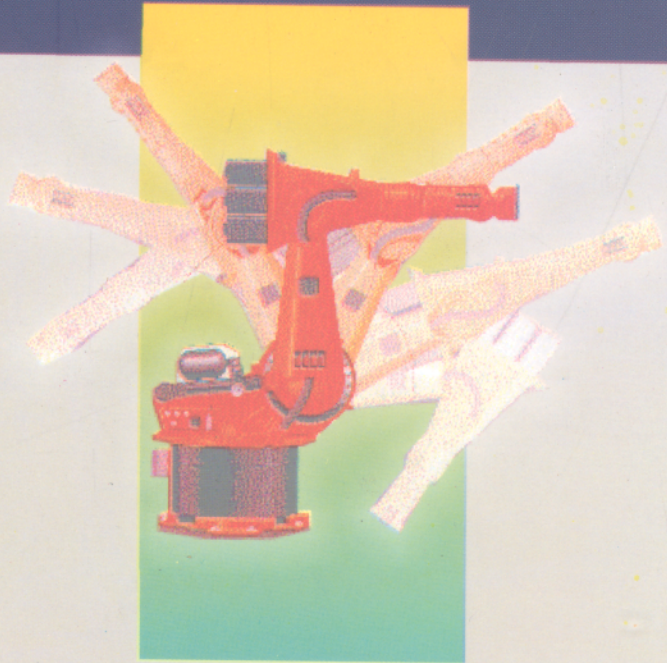


PGS. TS. ĐÀO VĂN HIỆP

KỸ THUẬT ROBOT



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

PGS. TS. ĐÀO VĂN HIỆP

KỸ THUẬT ROBOT

(Giáo trình dùng cho sinh viên đại học khối kỹ thuật)

In lần thứ hai có bổ sung và sửa chữa



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT
HÀ NỘI 2004

TÁC GIẢ: PGS. TS. ĐÀO VĂN HIỆP

Chịu trách nhiệm xuất bản: PGS. TS. Tô Đăng Hải
Biên tập và sửa chữa bản: Nguyễn Diệu Thùy
Trình bày và chế bản: Đào Văn Hiệp, Lê Thụy Anh
Vẽ bìa: Hương Lan

In 1.000 cuốn, khổ 16 x 24cm, tại Xí nghiệp in 19 - 8 số 3 đường
Nguyễn Phong Sắc - Nghĩa Tân - Cầu Giấy - Hà Nội.

Giấy phép số: 6-394 do Cục Xuất bản cấp ngày 5 tháng 1 năm 2004

In xong và nộp lưu chiểu tháng 4 năm 2004.

LỜI NÓI ĐẦU CHO LẦN IN THỨ HAI

Vào đầu thế kỷ trước, ý tưởng đầu tiên về robot xuất hiện, thể hiện ước mơ cháy bỏng của con người là tạo ra những người máy để thay thế mình trong những công việc nặng nhọc, nhàm chán, nguy hiểm. Vào khoảng năm 1940, mẫu robot đầu tiên (Master-Slave Manipulators) ra đời tại phòng thí nghiệm quốc gia Oak Ridge và Argonne của Mỹ, để vận chuyển các hoạt chất phóng xạ [7]. Đến thập kỷ 80 trên thế giới đã có tới 40 nghìn robot thuộc 500 kiểu, do 200 hãng tham gia sản xuất [2]. Ngày nay robot đã được sử dụng rộng rãi trong sản xuất, nghiên cứu khoa học và đời sống. Đó là thiết bị không thể thiếu được trên các hệ thống sản xuất, đặc biệt là các hệ thống sản xuất linh hoạt. Robot ngày càng khéo léo và thông minh, được coi là sản phẩm điển hình của một ngành kỹ thuật mới: ngành cơ - điện tử (Mechatronics).

Cho đến nay, hầu hết các trường đại học kỹ thuật ở Việt Nam đã đưa môn kỹ thuật robot vào chương trình chính khóa. Môn học này được giảng dạy chủ yếu cho các chuyên ngành cơ khí, song các khía cạnh riêng biệt của nó như kỹ thuật điều khiển, lập trình, mô phỏng cũng được các ngành khác rất quan tâm.

Ngày 12-10-2003 đã xảy ra một sự kiện, đánh dấu mốc phát triển mới trong lĩnh vực nghiên cứu, đào tạo và ứng dụng khoa học và công nghệ robot tại Việt Nam: Hội Khoa học Công nghệ Robot Việt Nam (Vietnamese Association of Robotics - VAR) được thành lập. Sự ra đời của Hội phản ánh nhu cầu cấp thiết của công nghiệp, quốc phòng và cuộc sống, đáp ứng sự mong mỏi của đông đảo các nhà

khoa học, các nhà sản xuất, các giáo sư, nghiên cứu sinh, sinh viên tại các trường đại học và tất cả những ai quan tâm đến robot.

Trong bối cảnh đó, đồng thời theo yêu cầu của nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, chúng tôi đã chỉnh sửa và bổ sung cuốn **"Kỹ thuật Robot"** được xuất bản tại nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật cách đây vừa đúng 1 năm. Chúng tôi tin tưởng rằng tài liệu sẽ đáp ứng tốt hơn nhu cầu giảng dạy và học tập môn "Robot công nghiệp" và các môn liên quan như "Tự động hóa hệ thống sản xuất", "Công nghệ sản xuất linh hoạt", "Điều khiển hệ thống sản xuất nhờ máy tính",..., tại các trường đại học kỹ thuật.

Được sự góp ý của các đồng nghiệp sau lần xuất bản trước, chúng tôi tiếp tục định hướng nội dung chủ yếu của tài liệu vào **lựa chọn, khai thác và sử dụng robot** trong công nghiệp. Ngoài 7 chương cũ đã được chỉnh sửa chút ít về nội dung và trình bày, chúng tôi bổ sung thêm chương 8: **"Tay máy có kết cấu động học song song"** để phản ánh toàn diện hơn và cập nhật những thành tựu mới trong khoa học và công nghệ robot. Tổng thể tài liệu hình thành 3 mảng kiến thức chính:

- Nền tảng cơ học và cơ khí trong kết cấu tay máy (các chương 2, 3, 5 và 8),

Điều khiển robot (chương 6), và

ứng dụng robot (chương 7).

Tuy nhiên, sự phân chia này là tương đối, vì không thể phân tách rạch ròi giữa cơ học và kết cấu, cơ khí và điều khiển. Chương 4 được hình thành như cầu nối giữa cơ khí và điều khiển. Ngoài ra, phần **phụ lục** được biên soạn để

bạn đọc tiện ôn lại các kiến thức liên quan về điều khiển tuyến tính, một vấn đề được đề cập nhiều trong tài liệu. Chương mới bổ sung được để ở cuối tài liệu vì đó là phần kiến thức đặc thù, hiện nay chưa nhất thiết phải đưa vào chương trình đào tạo cơ bản. Trong 7 chương đầu chỉ nói về robot nối tiếp, chỉ trong chương cuối cùng mới cần phân biệt robot nối tiếp và robot song song.

Nhân lần tái bản này, tác giả xin trân trọng cảm ơn các giáo sư, các nhà khoa học, các đồng nghiệp, các hội viên của Hội Khoa học và Công nghệ Robot Việt Nam và toàn thể các bạn đọc đã nhiệt tình ủng hộ và góp ý cho tài liệu xuất bản lần đầu tiên.

Mặc dù đã được chính tác giả và đồng sự sử dụng làm giáo trình chính trong đào tạo nhiều khoá đại học và sau đại học, lại được kiểm tra cẩn thận trước mỗi lần xuất bản, nhưng tài liệu chắc chắn vẫn còn thiếu sót. Chúng tôi chân thành mong muốn nhận được và hết sức cảm ơn mọi ý kiến đóng góp tiếp tục của bạn đọc.

Mọi ý kiến đóng góp xin gửi về Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 70 Trần Hưng Đạo, Hà Nội.

Hà Nội, tháng 1 năm 2004

TÁC GIẢ

Chương 1

CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VÀ PHÂN LOẠI ROBOT

1.1. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VÀ PHÂN LOẠI ROBOT

1.1.1. Robot và Robotics

Từ thời cổ xưa, con người đã mong muốn tạo ra những vật giống như mình để bắt chúng phục vụ cho bản thân mình. Ví dụ, trong kho thần thoại Hy Lạp có chuyện người khổng lồ Prometheus đúc ra con người từ đất sét và truyền cho họ sự sống, hoặc chuyện tên nô lệ Talus khổng lồ được làm bằng đồng và được giao nhiệm vụ bảo vệ hoang đảo Crete.

Đến năm 1921, từ "*Robot*" xuất hiện lần đầu trong vở kịch "*Rossum's Universal Robots*" của nhà viết kịch viễn tưởng người Sec. Karel Čapek. Trong vở kịch này, ông dùng từ "*Robot*", biến thể của từ gốc Slavơ "*Rabota*", để gọi một thiết bị - lao công do con người (nhân vật Rossum) tạo ra.

Vào những năm 40 nhà văn viễn tưởng Nga, Issac Asimov, mô tả robot là một chiếc máy tự động, mang diện mạo của con người, được điều khiển bằng một hệ thần kinh khả trình *Positron*, do chính con người lập trình. Asimov cũng đặt tên cho ngành khoa học nghiên cứu về robot là *Robotics*, trong đó có 3 nguyên tắc cơ bản:

1. Robot không được xúc phạm con người và không gây tổn hại cho con người.
2. Hoạt động của robot phải tuân theo các quy tắc do con người đặt ra. Các quy tắc này không được vi phạm nguyên tắc thứ nhất.
3. Một robot cần phải bảo vệ sự sống của mình, nhưng không được vi phạm 2 nguyên tắc trước.

Các nguyên tắc trên sau này trở thành nền tảng cho việc thiết kế robot.

Từ sự hư cấu của khoa học viễn tưởng, robot dần dần được giới kỹ thuật hình dung như những chiếc máy đặc biệt, được con người phỏng tác theo cấu tạo và hoạt động của chính mình, dùng để thay thế mình trong một số công việc xác định.

Để hoàn thành nhiệm vụ đó, robot cần có khả năng *cảm nhận* các thông số trạng thái của môi trường và tiến hành các *hoạt động* tương tự con người.

Khả năng hoạt động của robot được đảm bảo bởi *hệ thống cơ khí*, gồm cơ cấu vận động để di lại và cơ cấu hành động để có thể làm việc. Việc thiết kế và chế tạo hệ thống này thuộc lĩnh vực khoa học về cơ cấu truyền động, chấp hành và vật liệu cơ khí.

Chức năng cảm nhận, gồm thu nhận tín hiệu về trạng thái môi trường và trạng thái của bản thân hệ thống, do các cảm biến (*sensor*) và các thiết bị liên quan thực hiện. Hệ thống này được gọi là hệ thống thu nhận và xử lý tín hiệu, hay đơn giản là *hệ thống cảm biến*.

Muốn phối hợp hoạt động của hai hệ thống trên, đảm bảo cho robot có thể tự điều chỉnh "hành vi" của mình và hoạt động theo đúng chức năng quy định trong điều kiện môi trường thay đổi, trong robot phải có *hệ thống điều khiển*. Xây dựng các hệ thống điều khiển thuộc phạm vi điện tử, kỹ thuật điều khiển và công nghệ thông tin.

Một cách đơn giản, ***Robotics được hiểu là một ngành khoa học, có nhiệm vụ nghiên cứu về thiết kế, chế tạo các robot và ứng dụng chúng trong các lĩnh vực hoạt động khác nhau của xã hội loài người, như nghiên cứu khoa học - kỹ thuật, kinh tế, quốc phòng và dân sinh.***

Từ hiểu biết sơ bộ về chức năng và kết cấu của robot, chúng ta hiểu, *Robotics* là một khoa học liên ngành, gồm cơ khí, điện tử, kỹ thuật điều khiển và công nghệ thông tin. Theo thuật ngữ hiện nay, robot là sản phẩm của ngành cơ - điện tử (*Mechatronics*).

Khía cạnh nhân văn và khía cạnh khoa học - kỹ thuật của việc sản sinh ra robot thống nhất ở một điểm: thực hiện hoài bão của con người, là tạo ra thiết bị thay thế mình trong những hoạt động không thích hợp với mình, như:

- Các công việc lặp đi lặp lại, nhàm chán, nặng nhọc; vận chuyển nguyên vật liệu, lắp ráp, lau dọn nhà,...

- Trong môi trường khắc nghiệt hoặc nguy hiểm: như ngoài khoảng không vũ trụ, trên chiến trường, dưới nước sâu, trong lòng đất, nơi có phóng xạ, nhiệt độ cao,...

- Những việc đòi hỏi độ chính xác cao, như thông tắc mạch máu hoặc các ống dẫn trong cơ thể, lắp ráp các cấu tử trong vi mạch,...

Lĩnh vực ứng dụng của robot rất rộng và ngày càng được mở rộng thêm. Ngày nay, khái niệm về robot đã mở rộng hơn khái niệm nguyên thủy rất nhiều. Sự phỏng tác về kết cấu, chức năng, dáng vẻ của con người là cần thiết nhưng không còn ngự trị trong kỹ thuật robot nữa. Kết cấu của nhiều "con" robot khác xa với kết cấu các bộ phận của cơ thể người và chúng cũng có thể thực hiện được những việc vượt xa khả năng của con người.

1.1.2. Robot công nghiệp (RBCN)

Mặc dù, như định nghĩa chung về robot đã nêu, không có gì giới hạn phạm vi ứng dụng của robot, nhưng có một thực tế là hầu hết robot hiện đang có đều được dùng trong công nghiệp. Chúng có đặc điểm riêng về kết cấu, chức năng, đã được thống nhất hoá, thương mại hoá rộng rãi. Lớp robot này được gọi là *Robot công nghiệp (Industrial Robot - IR)*.

Kỹ thuật tự động hoá (TĐH) trong công nghiệp đã đạt tới trình độ rất cao: không chỉ TĐH các quá trình vật lý mà cả các quá trình xử lý thông tin. Vì vậy, TĐH trong công nghiệp tích hợp công nghệ sản xuất, kỹ thuật điện, điện tử, kỹ thuật điều khiển tự động trong đó có TĐH nhờ máy tính.

Hiện nay, trong công nghiệp tồn tại 3 dạng TĐH:

- TĐH cứng (*Fixed Automation*) được hình thành dưới dạng các thiết bị hoặc dây chuyền chuyên môn hoá theo đối tượng (sản phẩm). Nó được ứng dụng có hiệu quả trong điều kiện sản xuất hàng khối với sản lượng rất lớn các sản phẩm cùng loại.

- TĐH khả trình (*Programmable Automation*) được ứng dụng chủ yếu trong sản xuất loạt nhỏ, loạt vừa, đáp ứng phần lớn nhu cầu sản phẩm công nghiệp. Hệ thống thiết bị dạng này là các thiết bị vạn năng điều khiển số, cho phép dễ dàng lập trình lại để có thể thay đổi chủng loại (tức là thay đổi quy trình công nghệ sản xuất) sản phẩm.

- TĐH linh hoạt (*Flexible Automation*) là dạng phát triển của TĐH khả trình. Nó tích hợp công nghệ sản xuất với kỹ thuật điều khiển bằng máy tính, cho phép thay đổi đối tượng sản xuất mà không cần (hoặc hạn chế) sự can thiệp của con người. TĐH linh hoạt được biểu hiện dưới 2 dạng: tế

* Do tính phổ dụng của RBCN mà có tình trạng đồng nhất Robot với RBCN.

bào sản xuất linh hoạt (*Flexible Manufacturing Cell - FMC*) và hệ thống sản xuất linh hoạt (*Flexible Manufacturing System - FMS*).

RBCN có 2 đặc trưng cơ bản:

- Là thiết bị vạn năng, được TĐH theo chương trình và có thể lập trình lại để đáp ứng một cách linh hoạt, khéo léo các nhiệm vụ khác nhau.

- Được ứng dụng trong những trường hợp mang tính công nghiệp đặc trưng, như vận chuyển và xếp dỡ nguyên vật liệu, lắp ráp, đo lường,...

Vì thể hiện 2 đặc trưng cơ bản trên của RBCN, hiện nay định nghĩa sau đây về robot công nghiệp do Viện nghiên cứu robot của Mỹ đề xuất được sử dụng rộng rãi:

RBCN là tay máy vạn năng, hoạt động theo chương trình và có thể lập trình lại để hoàn thành và nâng cao hiệu quả hoàn thành các nhiệm vụ khác nhau trong công nghiệp, như vận chuyển nguyên vật liệu, chi tiết, dụng cụ hoặc các thiết bị chuyên dùng khác.

Ngoài các ý trên, định nghĩa trong ISO 25686-85 còn bổ sung cho RBCN chức năng điều khiển trong quá trình sản xuất:

RBCN là máy tự động được đặt cố định hay di động, bao gồm thiết bị thừa hành dạng tay máy có một số bậc tự do hoạt động và thiết bị điều khiển theo chương trình, có thể tái lập trình để hoàn thành các chức năng vận động và điều khiển trong quá trình sản xuất.

Chức năng vận động bao gồm các hoạt động "cơ bắp" như vận chuyển, định hướng, xếp đặt, gá kẹp, lắp ráp,... đối tượng. Chức năng điều khiển ám chỉ vai trò của robot như một phương tiện điều hành sản xuất, như cung cấp dụng cụ và vật liệu, phân loại và phân phối sản phẩm, duy trì nhịp sản xuất và thậm chí cả điều khiển các thiết bị liên quan.

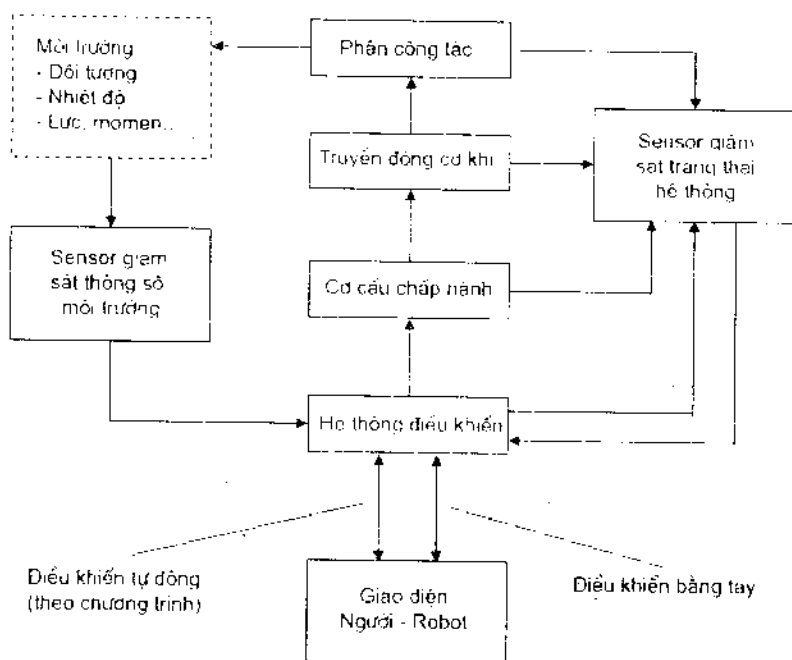
Với đặc điểm có thể lập trình lại, RBCN là thiết bị TĐH khá trình và ngày càng trở thành bộ phận không thể thiếu được của các tế bào hoặc hệ thống sản xuất linh hoạt.

1.2. CẤU TRÚC CƠ BẢN CỦA RBCN

1.2.1. Kết cấu chung

Một RBCN được cấu thành bởi các hệ thống sau (hình 1.1):

- **Tay máy (Manipulator)** là cơ cấu cơ khí gồm các khâu, khớp. Chúng hình thành **cánh tay** để tạo các chuyển động cơ bản, **cổ tay** tạo nên sự khéo léo, linh hoạt và **bàn tay (End Effector)**^{*} để trực tiếp hoàn thành các thao tác trên đối tượng.



Hình 1.1: Sơ đồ khối của RBCN

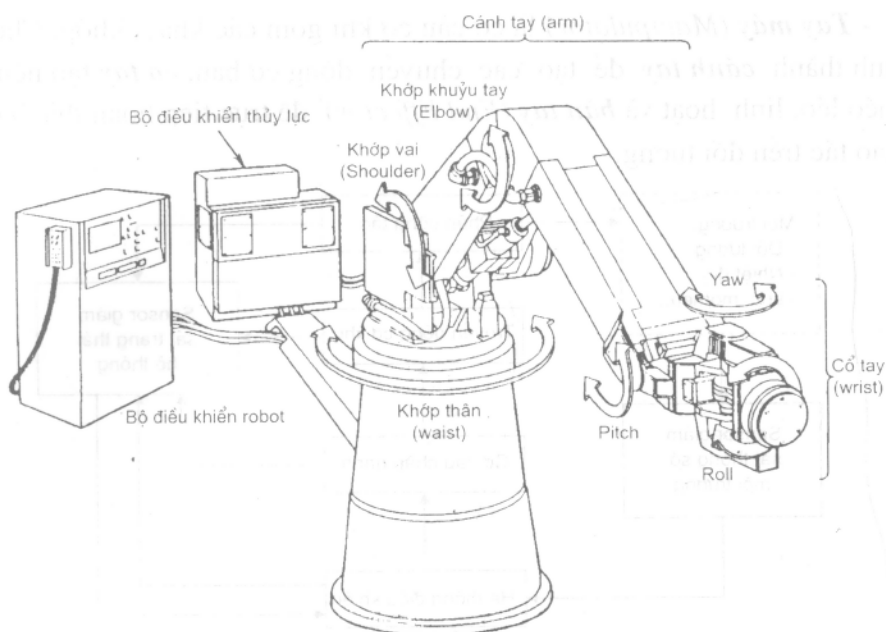
- **Cơ cấu chấp hành** tạo chuyển động cho các khâu của tay máy. Nguồn động lực của các cơ cấu chấp hành là động cơ các loại: điện, thủy lực, khí nén hoặc kết hợp giữa chúng.

- **Hệ thống cảm biến** gồm các sensor và thiết bị chuyển đổi tín hiệu cần thiết khác. Các robot cần hệ thống sensor trong để nhận biết trạng thái của bản thân các cơ cấu của robot và các sensor ngoài để nhận biết trạng thái của môi trường.

- **Hệ thống điều khiển (Controller)** hiện nay thường là máy tính để giám sát và điều khiển hoạt động của robot.

Sơ đồ kết cấu chung của robot như trong hình 1.2.

^{*} End Effector trực tiếp tác động lên đối tượng, có nghĩa rộng hơn Hand (bàn tay), nên sẽ được dịch là *phần công tác*.



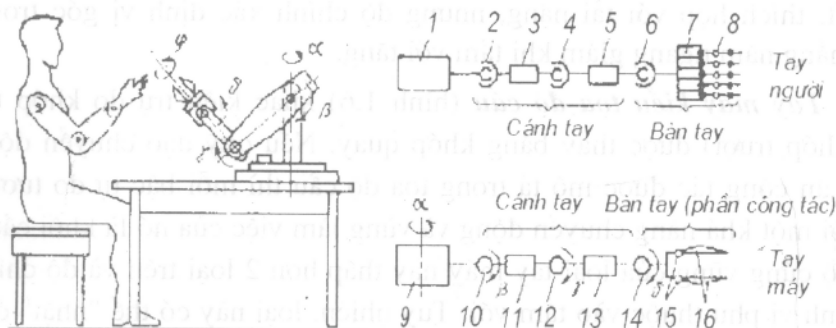
Hình 1. 2: Sơ đồ kết cấu chung của RBCN

1.2.2. Kết cấu của tay máy

Tay máy là phần cơ sở, quyết định khả năng làm việc của RBCN. Đó là thiết bị cơ khí đảm bảo cho robot khả năng chuyển động trong không gian và khả năng làm việc, như nâng hạ vật, lắp ráp,... Ý tưởng ban đầu của việc thiết kế và chế tạo tay máy là phỏng tác cấu tạo và chức năng của tay người (hình 1.3). Về sau, đây không còn là điều bắt buộc nữa. Tay máy hiện nay rất đa dạng và nhiều loại có dáng vẻ khác rất xa với tay người. Tuy nhiên, trong kỹ thuật robot người ta vẫn dùng các thuật ngữ quen thuộc, như vai (Shoulder), cánh tay (Arm), cổ tay (Wrist), bàn tay (Hand) và các khớp (Articulations),... để chỉ tay máy và các bộ phận của nó.

Trong thiết kế và sử dụng tay máy, người ta quan tâm đến các thông số có ảnh hưởng lớn đến khả năng làm việc của chúng, như:

- Sức nâng, độ cứng vững, lực kẹp của tay,...
- Tầm với hay vùng làm việc: kích thước và hình dáng vùng mà phần công tác có thể với tới;
- Sự khéo léo, nghĩa là khả năng định vị và định hướng phần công tác trong vùng làm việc. Thông số này liên quan đến số bậc tự do của phần công tác.



Hình 1. 3: Sự tương tự giữa tay người và tay máy

Để định vị và định hướng phần công tác một cách tùy ý trong không gian 3 chiều nó cần có 6 bậc tự do, trong đó 3 bậc tự do để định vị, 3 bậc tự do để định hướng. Một số công việc, như nâng hạ, xếp dỡ,... yêu cầu số bậc tự do ít hơn 6. Robot hàn, sơn thường có 6 bậc tự do. Trong một số trường hợp, như khi cần sự khéo léo, linh hoạt hoặc khi cần tối ưu hoá quỹ đạo,... người ta có thể dùng robot với số bậc tự do lớn hơn 6.

Các tay máy có đặc điểm chung về kết cấu là gồm có các khâu, được nối với nhau bằng các khớp để hình thành một chuỗi động học hở, tính từ thân đến phần công tác. Các khớp được dùng phổ biến là khớp trượt và khớp quay. Tùy theo số lượng và cách bố trí các khớp mà có thể tạo ra tay máy kiểu tọa độ đề các, tọa độ trụ, tọa độ cầu, SCARA và kiểu tay người (*Anthropomorphic*).

Tay máy kiểu tọa độ đề các (hình 1.4), còn gọi là kiểu chữ nhật, dùng 3 khớp trượt, cho phép phần công tác thực hiện một cách độc lập các chuyển động thẳng, song song với 3 trục tọa độ. Vùng làm việc của tay máy có dạng hình hộp chữ nhật. Do sự đơn giản về kết cấu, tay máy kiểu này có độ cứng vững cao, độ chính xác được đảm bảo đồng đều trong toàn bộ vùng làm việc, nhưng ít khéo léo. Vì vậy, tay máy kiểu đề các được dùng để vận chuyển và lắp ráp.

Tay máy kiểu tọa độ trụ (hình 1.5) khác với tay máy kiểu đề các ở khớp đầu tiên: dùng khớp quay thay cho khớp trượt. Vùng làm việc của nó có dạng hình trụ rỗng. Khớp trượt nằm ngang cho phép tay máy "thò" được vào khoang rỗng nằm ngang. Độ cứng vững cơ học của tay máy trụ

tốt, thích hợp với tải nặng, nhưng độ chính xác định vị góc trong mặt phẳng nằm ngang giảm khi tâm với tăng.

Tay máy kiểu tọa độ cầu (hình 1.6) khác kiểu trụ do khớp thứ hai (khớp trượt) được thay bằng khớp quay. Nếu quỹ đạo chuyển động của phần công tác được mô tả trong tọa độ cầu thì mỗi bậc tự do tương ứng với một khả năng chuyển động và vùng làm việc của nó là khối cầu rỗng. Độ cứng vững của loại tay máy này thấp hơn 2 loại trên và độ chính xác định vị phụ thuộc vào tâm với. Tuy nhiên, loại này có thể "nhặt" được cả vật dưới nền.

SCARA (hình 1.7) được đề xuất lần đầu vào năm 1979 tại Trường đại học Yamanashi (Nhật bản) dùng cho công việc lắp ráp. Đó là một kiểu tay máy có cấu tạo đặc biệt, gồm 2 khớp quay và 1 khớp trượt, nhưng cả 3 khớp đều có trục song song với nhau. Kết cấu này làm tay máy cứng vững hơn theo phương thẳng đứng nhưng kém cứng vững (*Compliance*) theo phương được chọn (*Selective*), là phương ngang. Loại này chuyên dùng cho công việc lắp ráp (*Assembly*) với tải trọng nhỏ, theo phương thẳng đứng. Từ SCARA là viết tắt của "*Selective Compliance Assembly Robot Arm*" để mô tả các đặc điểm trên. Vùng làm việc của SCARA là một phần của hình trụ rỗng, như trong hình 1.7.

Tay máy kiểu tay người (*Anthropomorphic*), như được mô tả trong hình 1.8, có cả 3 khớp đều là các khớp quay, trong đó trục thứ nhất vuông góc với 2 trục kia. Do sự tương tự với tay người, khớp thứ hai được gọi là khớp vai (*Shoulder joint*), khớp thứ ba là khớp khuỷu (*Elbow joint*), nối *cẳng tay* với *khuỷu tay*. Với kết cấu này, không có sự tương ứng giữa khả năng chuyển động của các khâu và số bậc tự do. Tay máy làm việc rất khéo léo, nhưng độ chính xác định vị phụ thuộc vị trí của phần công tác trong vùng làm việc. Vùng làm việc của tay máy kiểu này gần giống một phần khối cầu.

Toàn bộ dạng các kết cấu tả ở trên mới chỉ liên quan đến khả năng định vị của phần công tác. Muốn định hướng nó, cần bổ sung phần *cổ tay*. Muốn định hướng một cách tùy ý phần công tác, cổ tay phải có ít nhất 3 chuyển động quay quanh 3 trục vuông góc với nhau. Trong trường hợp trục quay của 3 khớp gặp nhau tại một điểm thì ta gọi đó là khớp cầu (hình 1.9). Ưu điểm chính của khớp cầu là tách được thao tác định vị và

định hướng của phân công tác, làm đơn giản việc tính toán. Các kiểu khớp khác có thể đơn giản hơn về kết cấu cơ khí, nhưng tính toán tọa độ khó hơn, do không tách được 2 loại thao tác trên.

Phân công tác là bộ phận trực tiếp tác động lên đối tượng. Tùy theo yêu cầu làm việc của robot, phân công tác có thể là tay gấp (*Gripper*), công cụ (súng phun sơn, mỏ hàn, dao cắt, chìa vặn ốc,...).

1.3. PHÂN LOẠI ROBOT

Thế giới robot hiện nay đã rất phong phú và đa dạng, vì vậy phân loại chúng không đơn giản. Có rất nhiều quan điểm phân loại khác nhau. Mỗi quan điểm phục vụ một mục đích riêng. Tuy nhiên, có thể nêu ra đây 3 cách phân loại cơ bản: theo kết cấu, theo điều khiển và theo phạm vi ứng dụng của robot.

1.3.1. Phân loại theo kết cấu

Theo kết cấu (hay theo hình học), người ta phân robot thành các loại: đề các, trụ, cầu, SCARA, kiểu tay người và các dạng khác nữa (xem các hình từ 1.4 đến hình 1.9). Điều này đã được trình bày trong mục 1.2.2.

1.3.2. Phân loại theo điều khiển

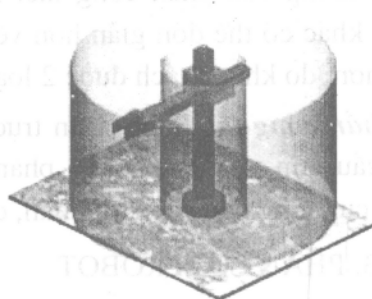
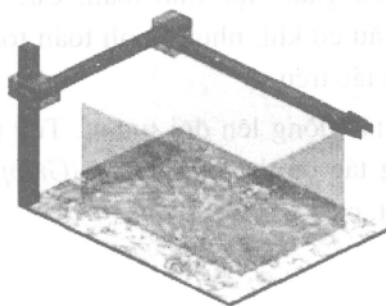
Có 2 kiểu điều khiển robot: điều khiển hở và điều khiển kín.

Điều khiển hở, dùng truyền động bước (động cơ điện hoặc động cơ thủy lực, khí nén,...) mà quãng đường hoặc góc dịch chuyển tỷ lệ với số xung điều khiển. Kiểu điều khiển này đơn giản, nhưng đạt độ chính xác thấp.

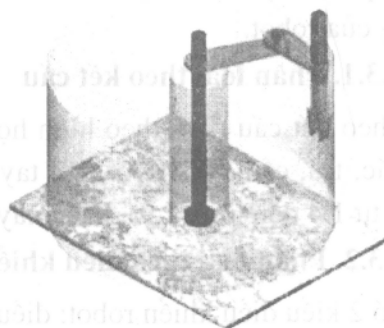
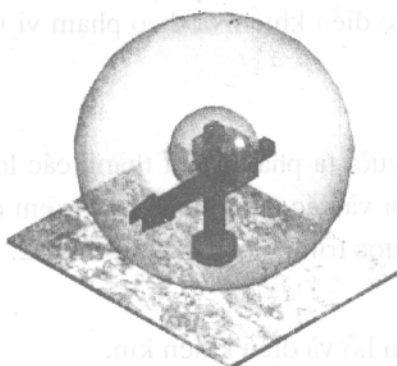
Điều khiển kín (hay điều khiển servo), sử dụng tín hiệu phản hồi vị trí để tăng độ chính xác điều khiển. Có 2 kiểu điều khiển servo: điều khiển điểm - điểm và điều khiển theo đường (*contour*).

Với kiểu điều khiển điểm - điểm, phân công tác dịch chuyển từ điểm này đến điểm kia theo đường thẳng với tốc độ cao (không làm việc). Nó chỉ làm việc tại các điểm dừng. Kiểu điều khiển này được dùng trên các robot hàn điểm, vận chuyển, tán đinh, bắn đinh,...

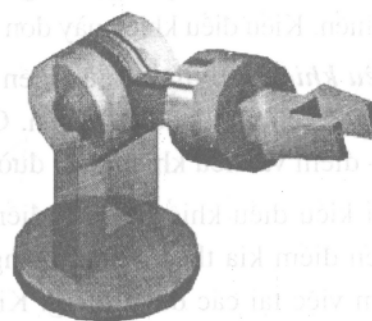
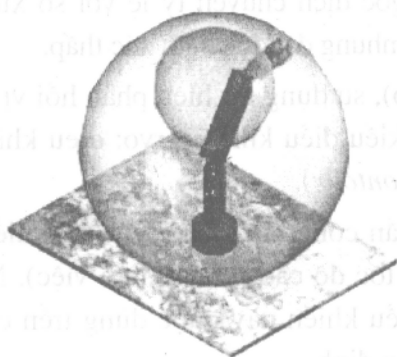
Điều khiển *contour* đảm bảo cho phân công tác dịch chuyển theo quỹ đạo bất kỳ, với tốc độ có thể điều khiển được. Có thể gặp kiểu điều khiển này trên các robot hàn hồ quang, phun sơn.



Hình 1. 4: Tay máy kiểu tọa độ đề các Hình 1. 5: Cấu trúc tay máy kiểu tọa độ trụ



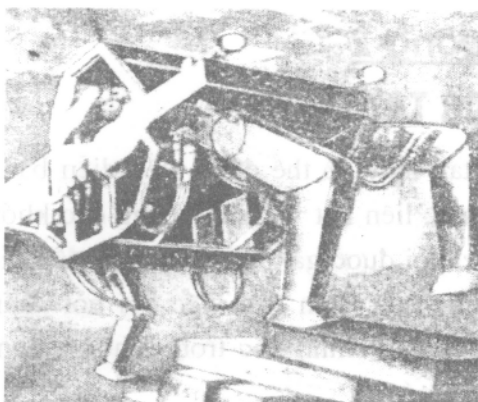
Hình 1. 6: Tay máy kiểu cầu Hình 1. 7: Tay máy kiểu SCARA



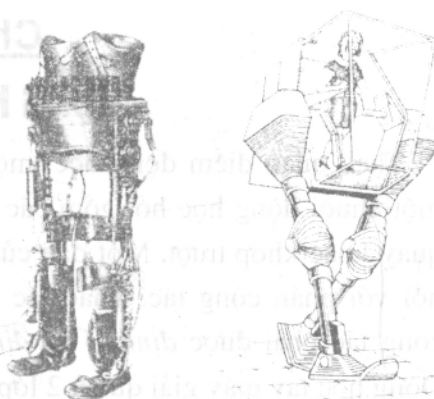
Hình 1. 8: Tay máy kiểu tay người Hình 1. 9: Khớp cổ tay

1.3.3. Phân loại theo ứng dụng

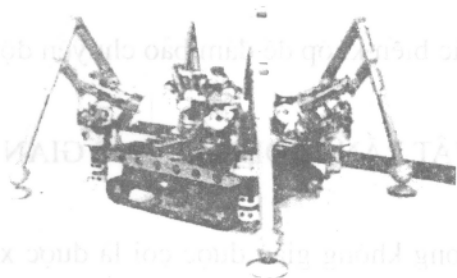
Cách phân loại này dựa vào ứng dụng của robot. Ví dụ, có robot công nghiệp, robot dùng trong nghiên cứu khoa học, robot dùng trong kỹ thuật vũ trụ, robot dùng trong quân sự,... (hình 1.10).



Robot leo cầu thang (General Electric - USA)



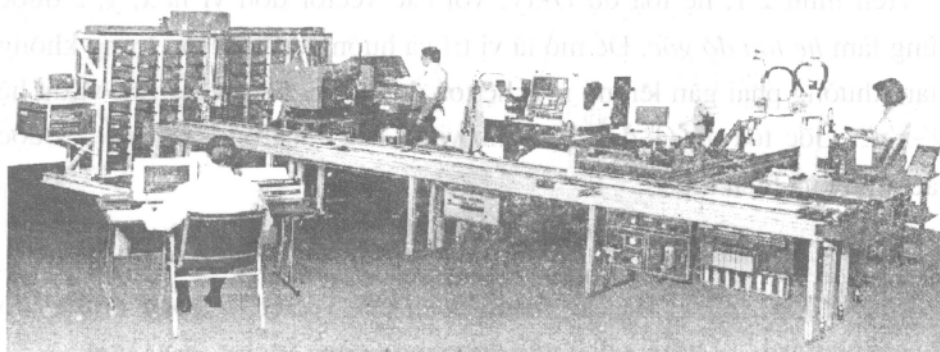
"Chân máy"



Robot chân nhện (Mech. Laboratory-Japan)



Robot làm việc dưới nước (OCA)



Robot trong hệ thống sản xuất linh hoạt

Hình 1.10: Một số loại robot được ứng dụng trong thực tế

Chương 2

ĐỘNG HỌC TAY MÁY

Theo quan điểm động học, một tay máy có thể được biểu diễn bằng một chuỗi động học hở, gồm các khâu, liên kết với nhau bằng các khớp quay hoặc khớp trượt. Một đầu của chuỗi được gắn lên thân, còn đầu kia nối với phần công tác. Thao tác trong quá trình làm việc đòi hỏi phần công tác phải được *định vị* và *định hướng* chính xác trong không gian. Động học tay máy giải quyết 2 lớp bài toán:

- Lớp bài toán thuận căn cứ vào các biến khớp để xác định vùng làm việc của phần công tác và mô tả chuyển động của phần công tác trong vùng làm việc của nó;

- Lớp bài toán ngược, xác định các biến khớp để đảm bảo chuyển động cho trước của phần công tác.

2.1. VỊ TRÍ VÀ HƯỚNG CỦA VẬT RẮN TRONG KHÔNG GIAN

2.1.1. Hệ toạ độ vật

Thế (Posture) của một vật rắn trong không gian được coi là được xác định hoàn toàn nếu biết được *vị trí* và *hướng* của nó trong một hệ quy chiếu cho trước.

Trên hình 2.1, hệ toạ độ $O-xyz$ với các vector đơn vị là x, y, z được dùng làm *hệ toạ độ gốc*. Để mô tả vị trí và hướng của vật rắn trong không gian, thường phải gắn lên nó một hệ toạ độ, gọi là *hệ toạ độ vật*, ví dụ hệ $O'-x'y'z'$. Góc toạ độ O' đại diện cho vị trí của vật trong hệ $O-xyz$, được xác định qua biểu thức:

$$o' = o'_x x + o'_y y + o'_z z$$

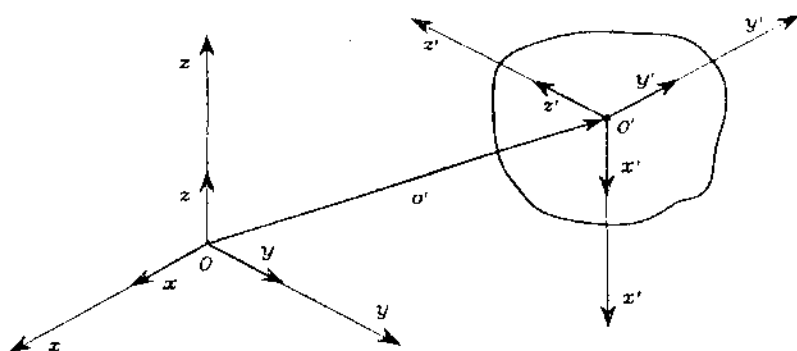
trong đó o'_x, o'_y, o'_z là các thành phần của vector o' trong hệ toạ độ $O-xyz$. Như vậy, vị trí của điểm O' được mô tả nhờ vector (3×1) sau:

$$o' = \begin{bmatrix} o'_x \\ o'_y \\ o'_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Hướng của vật được đại diện bởi các vector đơn vị x', y', z' của hệ $O'-x'y'z'$, được mô tả bằng các quan hệ sau:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x'_1 x + x'_2 y + x'_3 z \\ y' &= y'_1 x + y'_2 y + y'_3 z \\ z' &= z'_1 x + z'_2 y + z'_3 z \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Các thành phần của các vector đơn vị (x'_1, x'_2, x'_3) là *cosin chỉ phương* của các trục của hệ $O'-x'y'z'$ so với hệ $O-xyz$.



Hình 2. 1: Vị trí và hướng của vật rắn trong không gian

2.1.2. Ma trận quay

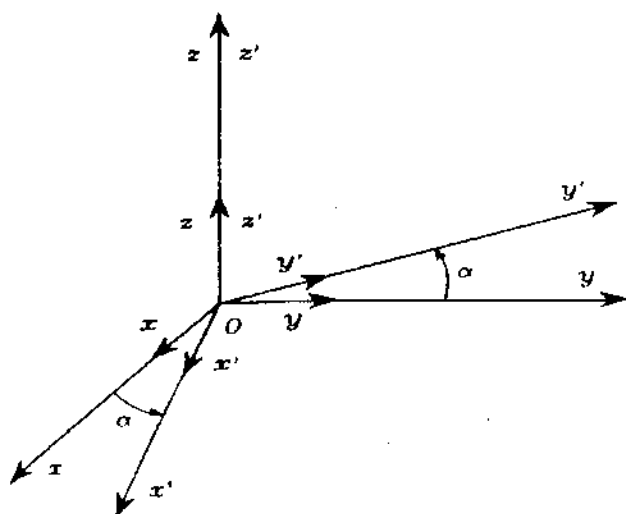
Để cho gọn, 3 vector đơn vị trong (2.2) có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận (3×3), gọi là *ma trận quay*, ký hiệu là R , như sau:

$$R = \begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'^T x & y'^T x & z'^T x \\ x'^T y & y'^T y & z'^T y \\ x'^T z & y'^T z & z'^T z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Phép quay một vật quanh một trục tọa độ là trường hợp riêng của phép quay một vật trong không gian. Chiều quay được quy ước là dương nếu ngược kim đồng hồ.

Giả sử hệ $O'-x'y'z'$ nhận được do quay hệ $O-xyz$ quanh trục z một góc α (hình 2.2), vector đơn vị của hệ này được biểu diễn trong hệ $O-xyz$ như sau:

$$x' = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}; \quad y' = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}; \quad z' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



Hình 2. 2: Quay hệ $O\text{-}xyz$ quanh trục z

Vì vậy, ma trận quay quanh trục z của hệ $O'\text{-}x'y'z'$ so với hệ $O\text{-}xyz$ là:

$$R(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Tương tự, các ma trận quay khi quay vật quanh trục y một góc β , $R(y, \beta)$ và quanh trục x một góc γ , $R(x, \gamma)$:

$$R(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$R(x, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Các ma trận quay trên sẽ rất hữu ích khi khảo sát phép quay vật quanh một trục bất kỳ. Có thể thử để xác minh rằng chúng có các tính chất sau:

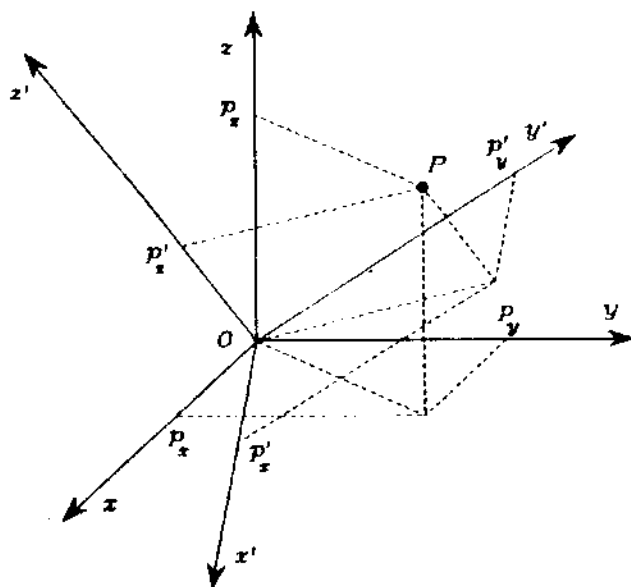
$$R(k, -\vartheta) = R^T(k, \vartheta) \quad (2.7)$$

trong đó $k = x, y, z$; $\vartheta = \alpha, \beta, \gamma$ và R^T là ma trận chuyển vị của ma trận R .

2.1.3. Phép quay một vector

Ma trận quay không chỉ dùng để biểu diễn vị trí của một hệ tọa độ so với một hệ tọa độ khác mà còn được dùng để mô tả sự quay của một vector.

Giả sử 2 hệ tọa độ $O-xyz$ và $O'-x'y'z'$, có gốc O và O' trùng nhau (hình 2.3).



Hình 2. 3: Biểu diễn điểm P trong 2 hệ tọa độ

Điểm P trong không gian được mô tả lần lượt trong hệ $O-xyz$ và $O'-x'y'z'$ bằng các vector p và p' :

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad \text{và} \quad p' = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix}$$

Vì p và p' biểu diễn cùng một điểm P và chú ý đến biểu thức (2.3)* ta có:

$$p = p' = p'_x x' + p'_y y' + p'_z z' = [x' \ y' \ z'] p' = R p' \quad (2.8)$$

* Chú ý rằng 3 vector của R vuông góc với nhau từng đôi một và R là ma trận đơn vị. Nó có các tính chất:

$$R^T R = I \text{ và } R^T = R^{-1}$$

Từ biểu thức trên ta rút ra một kết luận quan trọng: **Chuyển vị** của ma trận quay bằng nghịch đảo của nó [5].

hay:
$$p' = R^T p \quad (2.9)$$

Trong trường hợp này, ma trận quay R chính là ma trận chuyển đổi tọa độ của một vector từ hệ $O-xyz$ sang hệ $O-x'y'z'$, còn R^T là ma trận chuyển vị của ma trận R .

Ví dụ, nếu hệ $O-x'y'z'$ nhận được bằng cách quay hệ $O-xyz$ quanh trục z một góc α (hình 2. 4) thì ta có quan hệ giữa tọa độ của điểm P trong 2 hệ là:

$$p_x = p'_x \cos \alpha - p'_y \sin \alpha$$

$$p_y = p'_x \sin \alpha + p'_y \cos \alpha$$

$$p_z = p'_z$$

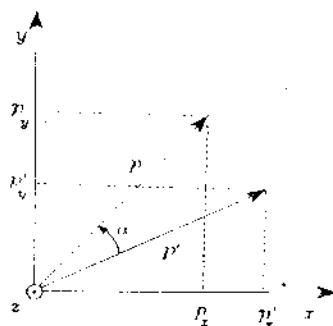
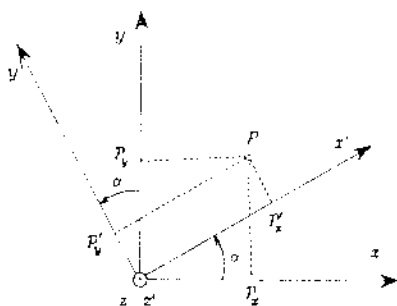
Nếu viết gọn lại và để ý đến biểu thức (2. 4) thì ta có:

$$p = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} p' = R(z, \alpha) p'$$

Đó cũng chính là phương trình mô tả phép quay vector p quanh trục z một góc α . Biểu diễn hình học của phép quay này như trong hình 2. 5.

Tóm lại, ma trận quay R có 3 ý nghĩa tương đương nhau:

- Biểu diễn hướng giữa 2 hệ tọa độ, trong đó các cột của ma trận là cosin chỉ phương giữa các trục của hệ mới so với hệ gốc.
- Biểu diễn sự chuyển đổi tọa độ của một vector giữa 2 hệ tọa độ có gốc trùng nhau.
- Là toán tử biểu diễn phép quay một vector trong cùng một hệ tọa độ.



Hình 2. 4: Biểu diễn vector trong 2 hệ tọa độ Hình 2. 5: Phép quay một vector

2.2. PHÉP QUAY MỘT VECTOR QUANH MỘT TRỤC BẤT KỲ

2.2.1. Tổng hợp các ma trận quay

Thông thường một vật thể trong không gian có thể quay quanh một trục bất kỳ. Trong trường hợp đó, có thể coi phép quay tổng quát là sự tổ hợp nào đó của các phép quay đơn giản. Nếu làm được như vậy thì ma trận quay tổng quát sẽ là tổng hợp của các ma trận quay đơn giản.

Giả sử có 3 hệ tọa độ chung gốc là $O-x_0y_0z_0$, $O-x_1y_1z_1$, $O-x_2y_2z_2$. Vector p đại diện cho một điểm bất kỳ trong không gian được biểu diễn trong mỗi hệ là p^0, p^1, p^2 . Ký hiệu ma trận biểu diễn phép quay của hệ i so với hệ j là R_i^j .

Ta có mối quan hệ giữa các vector p^1 và p^2 như sau:

$$p^1 = R_2^1 p^2 \quad (2.10)$$

Tương tự, ta có:

$$p^0 = R_1^0 p^1 \quad (2.11)$$

$$p^0 = R_2^0 p^2 \quad (2.12)$$

Thay (2.10) vào (2.11) và sử dụng (2.12), ta có:

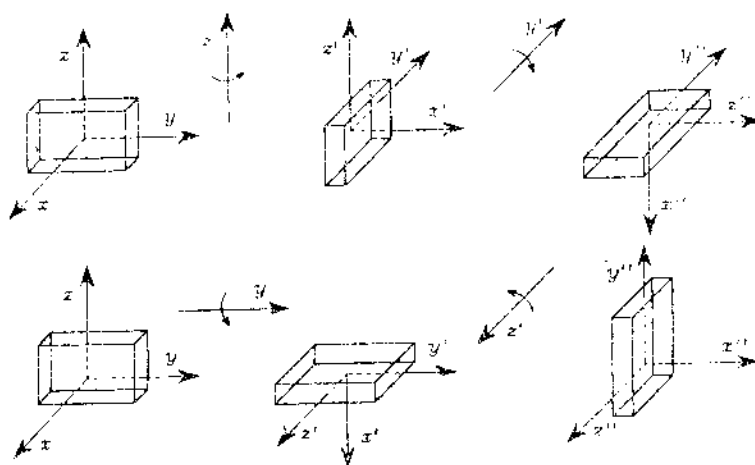
$$R_2^0 = R_1^0 R_2^1 \quad (2.13)$$

Ma trận quay R_2^0 trong biểu thức (2.13) có thể hiểu là ma trận tổng hợp từ 2 ma trận quay R_1^0 và R_2^1 . Nó mô tả 2 phép quay liên tiếp nhau:

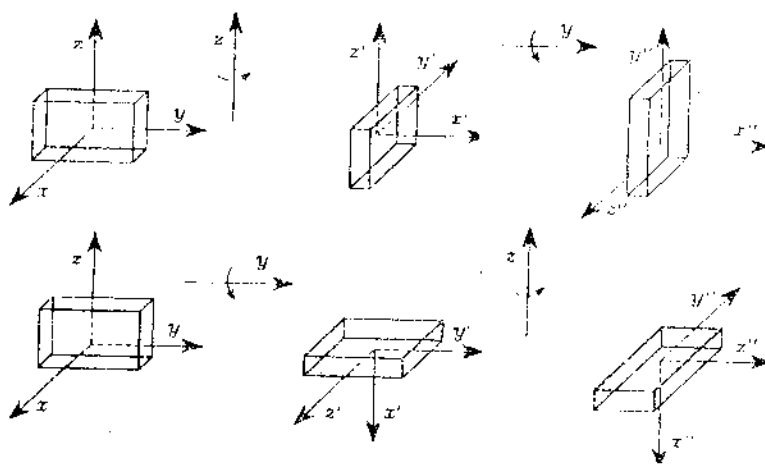
- Quay vật (đang trùng phương với hệ $O-x_0y_0z_0$) theo R_1^0 để nó trùng phương với hệ $O-x_1y_1z_1$.
- Tiếp tục quay vật (hiện đã trùng phương với hệ $O-x_1y_1z_1$) theo R_2^1 để nó trùng phương với hệ $O-x_2y_2z_2$.

Phép quay nói trên là quay vật quanh hệ tọa độ hiện thời (hình 2.6). Cũng có thể liên tiếp thực hiện phép quay quanh hệ tọa độ ban đầu. Trong trường hợp này, các phép quay luôn luôn được thực hiện với hệ tọa độ cố định (hình 2.7).

Từ đây về sau, chỉ số trên trong ký hiệu các vector hoặc ma trận chỉ hệ tọa độ, trong đó vector hoặc ma trận được mô tả.



Hình 2. 6: Quạt liên tiếp một vật theo hệ tọa độ hiện thời



Hình 2. 7: Quạt liên tiếp một vật theo hệ tọa độ cố định

Có thể hình dung quá trình quạt theo các bước sau:

Ban đầu có 2 hệ $O-x_0y_0z_0$ và $O-x_1y_1z_1$ lệch phương nhau theo ma trận quay R_1^0 .

- Quay hệ $O-x_1y_1z_1$ cho trùng với hệ $O-x_0y_0z_0$, tương ứng ma trận quay R_0^1 .
- Quay hệ $O-x_1y_1z_1$ theo R_1^1 để nhận được hệ $O-x_2y_2z_2$.
- Bù phép quay ở bước 1 bằng phép quay ngược R_1^0 .

Quá trình trên được thể hiện bởi biểu thức sau:

$$R_2^0 = R_1^0 R_0^1 R_2^1 R_1^0$$

Vì $R_i^{-1}R_i^T = I$, nên cuối cùng ta nhận được biểu thức:

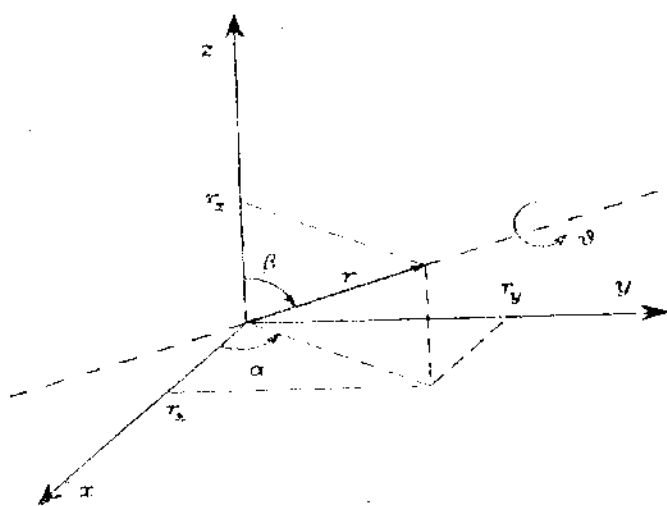
$$R_i^{-1} = R_i^T \quad (2.14)$$

So sánh với (2.13), chúng ta nhận thấy *phép quay liên tiếp vật theo hệ tọa độ cố định* cho kết quả giống như *phép quay liên tiếp vật theo hệ tọa độ hiện thời, nhưng theo thứ tự ngược lại*. Điều đó cũng nói lên rằng không thể tùy tiện thay đổi thứ tự quay vật. Cũng có thể kiểm tra kết luận trên bằng cách so sánh phép quay trong hình 2.6 và hình 2.7.

2.2.2 Phép quay quanh trục bất kỳ

Trường hợp thường xuyên gặp phải trong nghiên cứu động học tay máy là mô tả phép quay một vật quanh trục bất kỳ.

Giả sử $r = [r_x, r_y, r_z]^T$ là vector đơn vị trong hệ $O-xyz$ của trục quay. Ma trận quay $R(r, \theta)$ mô tả phép quay quanh trục r một góc θ được xác định bằng cách tổ hợp các ma trận quay theo các trục tọa độ gốc (hình 2.8). Góc θ được quy ước là *dương nếu chiều quay ngược kim đồng hồ*.



Hình 2.8: Phép quay quanh một trục bất kỳ

Một trong những cách tổ hợp có thể như sau:

- Làm trùng vector r với trục z bằng cách quay r một góc $-\alpha$ quanh trục x , sau đó là $-\beta$ quanh trục y .
- Quay một góc θ quanh z .

- Quay trả góc β quanh y , rồi α quanh z .

Mô tả bằng ma trận quay các phép quay trên như sau:

$$R(r, \vartheta) = R(z, \alpha)R(y, \beta)R(z, \vartheta)R(y, -\beta)R(z, -\alpha) \quad (2.15)$$

Từ các thành phần của vector r , có thể biểu diễn các hàm siêu việt để tính các thành phần của ma trận quay trong (2.15) như sau:

$$\sin \alpha = \frac{r_y}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}; \cos \alpha = \frac{r_x}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}; \sin \beta = \frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}; \cos \beta = \frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}$$

Thay chúng vào (2.15), nhận được ma trận quay $R(r, \vartheta)$, mô tả phép quay quanh trục bất kỳ như sau*:

$$R(r, \vartheta) = \begin{bmatrix} r_x^2(1 - c_\vartheta) + c_\vartheta & r_x r_y(1 - c_\vartheta) - r_z s_\vartheta & r_x r_z(1 - c_\vartheta) + r_y s_\vartheta \\ r_x r_y(1 - c_\vartheta) + r_z s_\vartheta & r_y^2(1 - c_\vartheta) + c_\vartheta & r_y r_z(1 - c_\vartheta) - r_x s_\vartheta \\ r_x r_z(1 - c_\vartheta) - r_y s_\vartheta & r_y r_z(1 - c_\vartheta) + r_x s_\vartheta & r_z^2(1 - c_\vartheta) + c_\vartheta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Ma trận quay $R(r, \vartheta)$ có tính chất sau:

$$R(r, \vartheta) = R(-r, -\vartheta)$$

Điều đó có nghĩa là phép quay một góc ϑ quanh trục r tương đương với phép quay một góc $-\vartheta$ quanh trục $-r$.

Khi giải bài toán ngược, nghĩa là tìm góc quay ϑ và trục quay r khi biết ma trận quay:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

thì có thể sử dụng các biểu thức sau:

$$\vartheta = \cos^{-1} \left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \right); r = \frac{1}{2 \sin \vartheta} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

với $\sin \vartheta \neq 0$.

* Từ đây, $\cos$ sẽ được viết tắt bằng c ; $\sin$ viết tắt bằng s . Ví dụ, $\cos \vartheta \rightarrow c_\vartheta$; $\sin \vartheta \rightarrow s_\vartheta$.

Ta thấy (2.17) mô tả phép quay nhờ 4 thông số: góc quay ϑ và 3 thành phần của vector r . Tuy nhiên, vì r là vector đơn vị nên 3 thành phần của nó bị ràng buộc bởi điều kiện:

$$r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 = 1 \quad (2.18)$$

Nếu $\sin \vartheta = 0$ thì (2.17) vô nghĩa. Khi đó, phải xét trực tiếp các trường hợp cụ thể, kể cả trường hợp $\vartheta = 0$ và $\vartheta = \pi$.

2.2.3. Mô tả tối thiểu của hướng

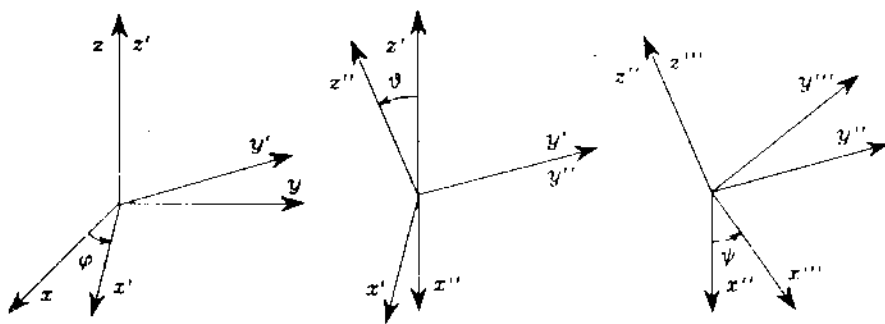
Ma trận quay dùng để mô tả hướng của vật có 9 thành phần, nhưng các thành phần này không hoàn toàn độc lập với nhau. Chúng phải vuông góc với nhau từng đôi một, nên có 6 điều kiện ràng buộc. Ngay cả phép quay quanh trục bất kỳ, tuy được mô tả bằng 4 tham số như trong (2.17), thì vẫn có một ràng buộc như biểu diễn ở (2.18).

Như vậy có nghĩa là, để mô tả phép quay (hay định hướng), chỉ cần dùng 3 tham số độc lập. Việc dùng 3 tham số độc lập để mô tả hướng được gọi là sự mô tả tối thiểu (*Minimal Representation of Orientation - MRO*). Có thể dùng các bộ ba tham số khác nhau cho MRO, nhưng thường dùng nhất là góc Euler và góc RPY.

2.2.3.1. Góc Euler

Góc Euler hình thành MRO bằng cách tổ hợp các thành phần của ma trận quay trong hệ tọa độ hiện thời. Tùy theo kiểu tổ hợp ma trận quay, có 12 bộ góc Euler khác nhau. Sau đây là một kiểu, gọi là kiểu ZYZ.

Giả sử $(\varphi \vartheta \psi)$ là một tổ hợp của góc Euler. Phép quay tương ứng với nó được hình thành theo thứ tự sau (xem hình 2.9):



Hình 2. 9: Sự hình thành góc Euler ZYZ

- Quay hệ toạ độ một góc φ quanh z , tương ứng ma trận quay $R(z, \varphi)$, xem (2.4).

- Quay tiếp hệ toạ độ hiện thời góc ϑ quanh y' , tương ứng $R(y', \vartheta)$, xem (2.5).

- Quay tiếp hệ toạ độ hiện thời góc ψ quanh z'' , tương ứng $R(z'', \psi)$, xem (2.4).

Hướng của hệ toạ độ cuối cùng là kết quả của sự tổ hợp các phép quay trong hệ toạ độ hiện thời:

$$R_{FUL} = R(z, \varphi)R(y', \vartheta)R(z'', \psi) = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\vartheta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\vartheta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\vartheta \\ s_\varphi c_\vartheta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\vartheta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\vartheta \\ -s_\vartheta c_\psi & s_\vartheta s_\psi & c_\vartheta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Bài toán ngược được giải bằng cách so sánh (2.19) với ma trận quay cho trước:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Chú ý các phần tử [1, 3], [2, 3] và [3, 3] của (2.19) với giả thiết $r_{13} \neq 0$ và $r_{33} \neq 0$, ta có:

$$\varphi = \text{Atan2}(r_{23}, r_{13}) \text{ và } \vartheta = \text{Atan2}(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33})^*$$

Yêu cầu $\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2} > 0$ (nghĩa là $\sin(\vartheta) > 0$), góc ϑ nằm trong khoảng $(0, \pi)$. Để ý các phần tử [3, 1] và [3, 2], ta có:

$$\psi = \text{Atan2}(r_{32}, -r_{31})$$

Tổng hợp lại, nếu chọn ϑ trong khoảng $(0, \pi)$, có lời giải sau cho bài toán ngược:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \text{Atan2}(r_{23}, r_{13}) \\ \vartheta &= \text{Atan2}(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}) \\ \psi &= \text{Atan2}(r_{32}, -r_{31}) \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

$\text{Atan2}(y, x)$ là $\arctang(y/x)$, có tính đến dấu của các đối số để xác định xem góc đang xét nằm ở góc phần tư nào.

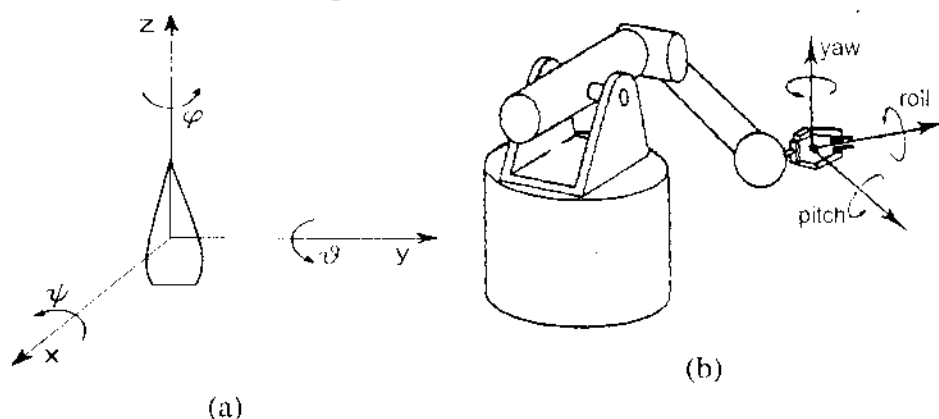
Nếu chọn ϑ trong khoảng $(-\pi, 0)$, có lời giải tương tự:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \text{Atan} 2(-r_{23}, -r_{13}) \\ \vartheta &= \text{Atan} 2(-\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}) \\ \psi &= \text{Atan} 2(-r_{32}, r_{31}) \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Lời giải bị suy thoái khi $s_{\vartheta} = 0$. Khi đó chỉ có thể tính tổng hoặc hiệu của φ và ψ . Nếu $\vartheta = 0$ hoặc $\vartheta = \pi$, thì phép quay chỉ thực hiện quanh các trục tọa độ ban đầu.

2.2.3.2. Góc RPY

Khác với góc Euler, góc RPY hình thành MRO bằng cách tổng hợp các phép quay thành phần trong hệ tọa độ cố định. RPY là các chữ tắt của các từ mô tả ba chuyển động của con tàu: Roll - chòng chành, Pitch - bổng bễnh và Yaw - chệch hướng (hình 2.10).



Hình 2.10: Mô tả góc RPY (a) và thể hiện của nó trên tay máy (b)

Phép quay tương ứng với góc RPY được thực hiện theo trình tự sau:

- Quay hệ tọa độ gốc một góc φ quanh trục z . Phép quay này được mô tả bằng ma trận quay $R(z, \varphi)$ và biểu thức (2.4).
- Quay tiếp một góc ϑ quanh trục y , tương ứng với ma trận quay $R(y, \vartheta)$ và biểu thức (2.5).
- Quay tiếp một góc ψ quanh trục x , tương ứng với ma trận quay $R(x, \psi)$ và biểu thức (2.6).

Ma trận quay tổng hợp là tích của các ma trận quay thành phần. Chú ý rằng các phép quay được thực hiện theo hệ tọa độ ban đầu (xem lại mục 2.2.1):

$$R_{RPY} = R(z, \varphi)R(y, \vartheta)R(x, \psi) = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\vartheta & c_\varphi s_\vartheta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\vartheta c_\psi + s_\varphi s_\psi \\ s_\varphi c_\vartheta & s_\varphi s_\vartheta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\vartheta c_\psi - c_\varphi s_\psi \\ -s_\vartheta & c_\vartheta s_\psi & c_\vartheta c_\psi \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Tương tự như trường hợp góc *Euler*, bài toán ngược được giải bằng cách so sánh (2.22) với ma trận quay cho trước:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Để $\sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2} > 0$ thì ϑ nằm trong khoảng $(-\pi/2, \pi/2)$. Khi đó ta có lời giải sau:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \text{Atan } 2(r_{21}, r_{11}) \\ \vartheta &= \text{Atan } 2(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) \\ \psi &= \text{Atan } 2(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Với ϑ trong khoảng $(\pi/2, 3\pi/2)$, có lời giải sau:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \text{Atan } 2(-r_{21}, -r_{11}) \\ \vartheta &= \text{Atan } 2(-r_{31}, -\sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) \\ \psi &= \text{Atan } 2(-r_{32}, -r_{33}) \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Lời giải bị suy thoái khi $c_\vartheta = 0$. Khi đó chỉ có thể tính tổng hoặc hiệu của φ và ψ .

2.3. PHÉP CHUYỂN ĐỔI THUẦN NHẤT

Chuyển động tổng quát trong không gian của một vật rắn gồm 2 thành phần: tịnh tiến (*chuyển vị*) và quay (*chuyển hướng*).

Giả sử có một điểm P trong không gian (hình 2.11). p^0 là vector của P trong hệ toạ độ $O_0-x_0y_0z_0$; p^I là vector trong hệ $O_I-x_Iy_Iz_I$. o_I^0 là vector chuyển vị của gốc O_I so với O_0 , còn R_I^0 là ma trận quay của hệ 1 so với hệ 0. Thế của điểm P so với hệ $O_0-x_0y_0z_0$ có thể được biểu diễn bằng biểu thức sau:

$$p^0 = o_I^0 + R_I^0 p^I \quad (2.25)$$

Bằng cách nhân 2 vế của (2.25) với R_i^{0T} và chú ý rằng $R_i^{0T} = R_0^{-1}$, nhận được phương trình biểu diễn chuyển vị ngược lại:

$$p^I = -R_0^I o_I^0 + R_0^I p^0 \quad (2.26)$$

Cả 2 biểu thức trên đều thể hiện rằng, phép chuyển đổi tọa độ có thể biểu diễn dưới dạng tổ hợp của phép chuyển vị và phép quay. Có thể biểu diễn phép chuyển đổi kiểu trên nhờ một ma trận duy nhất A_I^0 gồm 4 ma trận con:

$$A_I^0 = \begin{bmatrix} R_i^0 & O_i^0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Trong đó R_i^0 là ma trận quay dạng 3×3 , o_i^0 là vector chuyển vị có dạng ma trận 3×1 , 0^T là vector chuyển vị phối cảnh và đối với động học robot là vector 0, 1 là giá trị của hệ số tỷ lệ. Ma trận trên được gọi là *ma trận chuyển đổi thuần nhất*. Phép chuyển đổi nhờ ma trận thuần nhất được gọi là *phép chuyển đổi thuần nhất*.

Bằng cách trên, có thể biểu diễn các phép quay cơ bản:

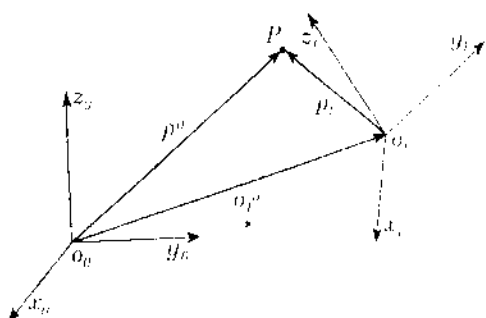
$$R(z, \alpha) = \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$R(y, \beta) = \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_\beta & 0 & c_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

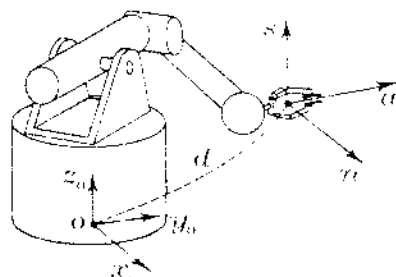
$$R(x, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_\gamma & -s_\gamma & 0 \\ 0 & s_\gamma & c_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

và phép tịnh tiến cơ bản:

$$T(d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$



Hình 2. 11: Biểu diễn điểm P trong các hệ tọa độ khác nhau



Hình 2. 12: Hệ tọa độ trên bàn tay

Nhờ 4 ma trận cơ bản này có thể biểu diễn chuyển động bất kỳ của một vật trong không gian.

Thông qua ma trận chuyển đổi thuận nhất, có thể biểu diễn phép chuyển đổi tọa độ tổng quát (2.25) dưới dạng thuận nhất:

$$\tilde{p}^0 = A_1^0 \tilde{p}^1$$

trong đó:
$$\tilde{p}^0 = \begin{bmatrix} p^0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \tilde{p}^1 = \begin{bmatrix} p^1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Tương tự, chuyển đổi thuận nhất giữa hệ tọa độ 0 sang hệ tọa độ 1:

$$\tilde{p}^1 = A_0^1 \tilde{p}^0 = (A_1^0)^{-1} \tilde{p}^0$$

hoặc:
$$A_0^1 = \begin{bmatrix} R_1^{01} & -R_1^{01} o_1^0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^1 & -R_0^1 o_1^0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

Chú ý rằng, đối với ma trận chuyển đổi thuận nhất tính chất trực giao, nghĩa là $A^{-1} \neq A^T$ không được đảm bảo.

Nói tóm lại, phép chuyển đổi thuận nhất cho phép biểu diễn dưới dạng thu gọn phép chuyển đổi giữa 2 hệ tọa độ. Rõ ràng, nếu gốc của 2 hệ tọa độ trùng nhau thì phép chuyển đổi thuận nhất trở thành phép quay. Ngược lại, nếu gốc quay bằng 0 thì nó trở thành phép tịnh tiến.

Tương tự với phép quay, ma trận của phép tịnh tiến tổng hợp có thể được biểu diễn dưới dạng tích các ma trận tịnh tiến thành phần:

$$\tilde{p}^0 = A_1^0 A_2^1 \dots A_n^{n-1} \tilde{p}^1$$

Trong đó, A_i^{i-1} mô tả chuyển đổi thuận nhất tọa độ một điểm từ hệ thứ i về hệ thứ $i-1$.

2.4. BÀI TOÁN THUẬN CỦA ĐỘNG HỌC TAY MÁY

Trong đại đa số các trường hợp, tay máy là một chuỗi động học, được cấu tạo bởi một số khâu (*Links*), được nối với nhau nhờ các khớp. Một đầu của chuỗi nối với giá (*Base*), còn đầu kia nối với phần công tác. Mỗi khâu hình thành cùng với khớp phía trước nó một cặp khâu - khớp. Tùy theo kết cấu của mình mà mỗi loại khớp đảm bảo cho khâu nối sau nó các khả năng chuyển động nhất định.

Mỗi khớp (thực chất là cặp khâu - khớp) được đặc trưng bởi 2 loại thông số:

- Các thông số không thay đổi giá trị trong quá trình làm việc của tay máy được gọi là **tham số**.

- Các thông số thay đổi khi tay máy làm việc được gọi là các **biến khớp**.

Hai loại khớp thông dụng nhất trong kỹ thuật tay máy là **khớp trượt** và **khớp quay**. Chúng đều là loại khớp có một bậc tự do.

Bài toán thuận nhằm mô tả *thế (vị trí và hướng) của phần công tác* dưới dạng hàm số của các biến khớp. Giả sử có một tay máy với $n+1$ khâu và n khớp (hình 2.13). Thế của phần công tác so với hệ tọa độ gốc $O_0-x_0y_0z_0$ được mô tả bằng vector định vị p^0 và hướng của các vector chỉ phương n, s, a . Phép chuyển đổi tọa độ được biểu diễn bằng ma trận chuyển đổi thuận như:

$$T^0(q) = \begin{bmatrix} n^0(q) & s^0(q) & a^0(q) & p^0(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Trong đó, q là vector n phân tử, gồm các biến khớp; p là vector định vị; n, s, a là các vector chỉ phương của phần công tác, cũng chính là vector đơn vị của các trục tọa độ. Nếu phần công tác là tay gấp thì gốc tọa độ đặt vào tâm quay; vector a đặt theo phương tiến đến vật; s nằm trong mặt phẳng trượt của hàm kẹp; n vuông góc với a và s theo quy tắc bàn tay phải.

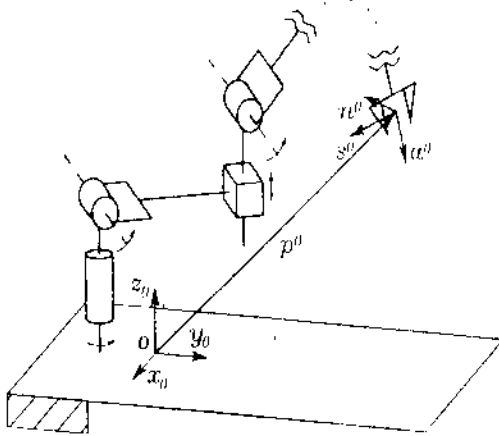
Một trong những phương pháp giải bài toán thuận là dùng trực tiếp hình học giải tích. Ví dụ, đối với trường hợp cơ cấu 2 khâu phẳng (hình 2.14), ta có:

* Ký hiệu $s_{i...j} = \sin(q_i + \dots + q_j)$; $c_{i...j} = \cos(q_i + \dots + q_j)$.

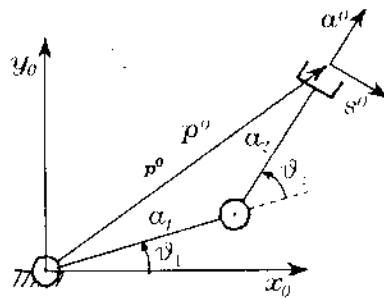
$$T^0(q) = \begin{bmatrix} n^0 & s^0 & a^0 & p^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & s_x^0 & a_x^0 & p_x^0 \\ 0 & s_y^0 & a_y^0 & p_y^0 \\ 1 & s_z^0 & a_z^0 & p_z^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & s_{12} & c_{12} & a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ 0 & -c_{12} & s_{12} & a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Phương pháp tính toán trực tiếp chỉ áp dụng được cho các cơ cấu đơn giản. Để có thể giải các bài toán tổng quát cần một thuật giải chung. Một trong những thuật giải như vậy xuất phát từ *quy tắc Denavit-Hartenberg*, được Denavit và Hartenberg xây dựng vào năm 1955. Đó là quy tắc thiết lập hệ thống tọa độ trên các cặp khâu - khớp trên tay máy. Dựa trên hệ tọa độ này có thể mô tả các cặp bằng hệ thống các tham số, biến khớp và áp dụng một dạng phương trình tổng quát cho bài toán động học tay máy.



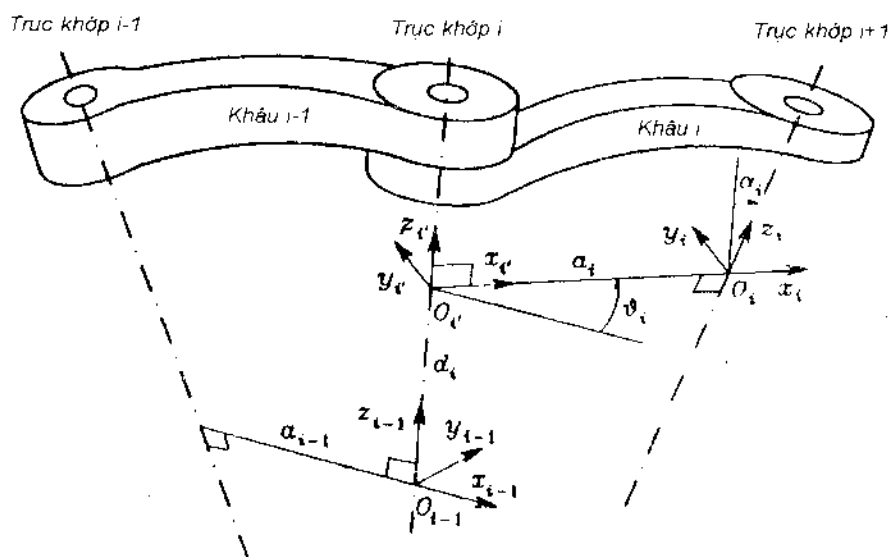
Hình 2.13: Mô tả thể của phần công tác



Hình 2.14: Chuỗi phẳng 2 khâu

2.4.1. Mô tả quy tắc Denavit-Hartenberg

Giả sử trong chuỗi động học của tay máy có n khâu, khâu thứ i nối khớp thứ i với khớp thứ $i+1$ (hình 2.15).



Hình 2. 15: Biểu diễn các thông số động học theo quy tắc Denavit-Hartenberg

Theo quy tắc Denavit-Hartenberg thì hệ toạ độ được gắn lên các khâu, khớp như sau*:

- Đặt trục toạ độ z_i dọc theo trục của khớp sau (thứ $i+1$).
- Đặt gốc toạ độ O_i tại giao điểm giữa z_i và pháp tuyến chung nhỏ nhất của trục z_i và z_{i-1} . Giao điểm của pháp tuyến chung với trục z_i là gốc O'_i của hệ $O'_i-x'_i-y'_i-z'_i$.

* Đối với quy tắc Denavit-Hartenberg, có một số trường hợp đặc biệt, cho phép đơn giản hoá thủ tục tính toán:

- Đối với hệ toạ độ gốc chỉ có phương của trục z_0 là xác định. Góc O_0 và trục x_0 có thể chọn tùy ý.
- Đối với hệ thứ n , chỉ có phương của trục x_n là xác định. Trục z_n có thể chọn tùy ý.
- Khi 2 khớp liên nhau có trục song song, vị trí của pháp tuyến chung có thể lấy bất kỳ.
- Khi trục của 2 khớp liên nhau có trục cắt nhau, phương của trục x_i có thể chọn bất kỳ.
- Khi khớp thứ i là khớp trượt thì chỉ có phương của trục z_{i-1} là xác định.

- Đặt trục tọa độ x_i theo phương pháp tuyến chung giữa z_{i-1} và z_i , hướng từ khớp thứ i đến khớp thứ $i+1$.

- Trục y_i vuông góc với x_i và z_i theo quy tắc bàn tay phải.

Sau khi được thiết lập, vị trí của hệ $O_i-x_i y_i z_i$ so với hệ $O_{i-1}-x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ hoàn toàn xác định nhờ các thông số sau:

- $a_i = O_i O'_i$: khoảng cách giữa 2 khớp liên tiếp theo phương x_i .
- $d_i = O_{i-1} O'_i$: khoảng cách giữa 2 khớp liên tiếp theo phương z_{i-1} .
- α_i : góc quay quanh trục x_i giữa z_{i-1} và z_i .
- θ_i : góc quay quanh trục z_{i-1} giữa x_{i-1} và x_i .

Trong 4 thông số trên thì a_i và α_i chỉ phụ thuộc vào kết cấu của khâu thứ i . Nếu là khớp quay thì θ_i là biến, còn $d_i = const$. Với khớp trượt thì d_i là biến, còn $\theta_i = const$.

Đến đây, có thể mô tả phép chuyển tọa độ giữa hệ i và hệ $i-1$, như sau:

- Tịnh tiến hệ $O_{i-1}-x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ dọc theo trục z_{i-1} một khoảng d_i , sau đó quay một góc θ_i để nhận được hệ $O'_i-x'_i y'_i z'_i$. Ma trận chuyển đổi thuận nhất tương ứng là:

$$A_i'^{-1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Tịnh tiến hệ $O'_i-x'_i y'_i z'_i$ vừa nhận được một khoảng a_i dọc trục x'_i , sau đó quay nó quanh trục x'_i một góc α_i để nhận được hệ $O_i-x_i y_i z_i$. Ma trận chuyển đổi thuận nhất tương ứng là

$$A_i^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Ma trận tổng hợp nhận được bằng cách nhân hai ma trận trên:

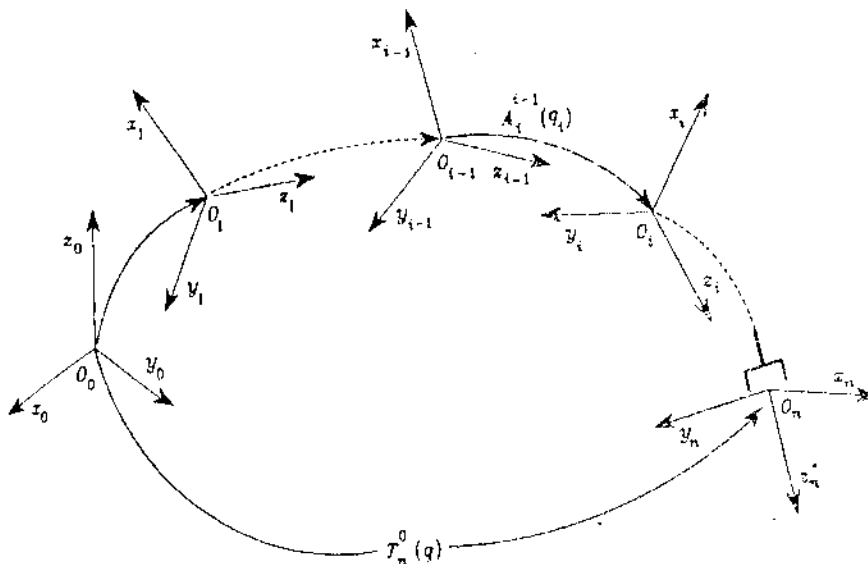
$$A_i'^{-1}(q_i) = A_i'^{-1} A_i^i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Chú ý rằng, ma trận chuyển vị từ hệ i đến hệ $i-1$ là hàm của các biến khớp q_i (nếu khớp thứ i là khớp quay) hoặc d_i (nếu khớp thứ i là khớp trượt).

Một cách tổng quát, quy tắc Denavit-Hartenberg cho phép tổ hợp các ma trận chuyển vị riêng rẽ thành một ma trận chuyển vị thuận nhất, biểu diễn vị trí và hướng của khâu n so với khâu cơ sở.

$$T_n^0(q) = \begin{bmatrix} n_v^0 & s_x^0 & a_x^0 & p_v^0 \\ n_v^0 & s_y^0 & a_y^0 & p_v^0 \\ n_z^0 & s_z^0 & a_z^0 & p_z^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1^0(q_1) A_2^1(q_2) \dots A_n^{n-1}(q_n) \quad (2.34)$$

Quy tắc này có thể áp dụng cho chuỗi hở bất kỳ trong kết cấu tay máy, như biểu diễn trong hình 2.16.

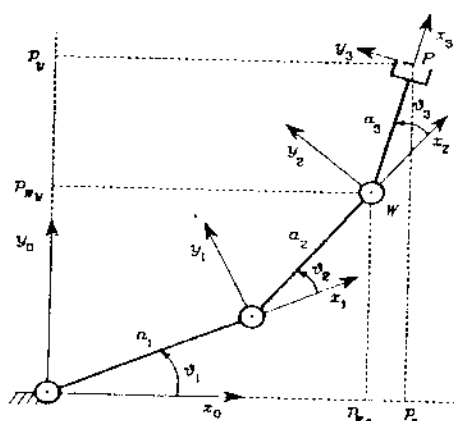


Hình 2. 16: Sơ đồ chuyển vị của phân công tác so với cơ sở

2.4.2. Một số ví dụ áp dụng quy tắc Denavit-Hartenberg

Cơ cấu 3 khâu phẳng

Cơ cấu có 3 khớp quay với các trục song song. Đặt trục x_i dọc theo phương của các khâu, còn các tham số $d_i = 0$. Các biến khớp là các góc quay q_i . Sơ đồ động học và bảng tham số Denavit-Hartenberg như trên hình 2.17.



Bảng thông số Denavit-Hartenberg

Khâu	a_i	α_i	d_i	ϑ_i
1	a_1	0	0	ϑ_1
2	a_2	0	0	ϑ_2
3	a_3	0	0	ϑ_3

Hình 2.17: Cơ cấu 3 khâu phẳng

Vì các cặp khâu - khớp có kết cấu tương tự nhau, nên từ (2.34) có thể viết cả 3 ma trận chuyển đổi thuận nhất dưới dạng như nhau:

$$A_i^{-1}(\vartheta_i) = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_i c_i \\ s_i & c_i & 0 & a_i s_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{với } i = 1, 2, 3)$$

Ma trận chuyển vị (2.34) bây giờ trở thành

$$T_i^0(q) = A_1^0 A_2^1 A_3^2 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

trong đó $q = [\vartheta_1 \ \vartheta_2 \ \vartheta_3]^T$.

Cơ cấu tọa độ cầu

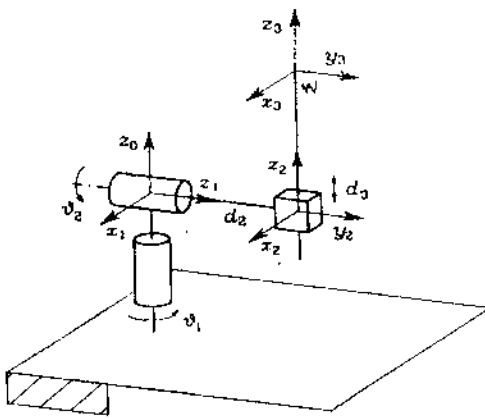
Cơ cấu tay máy cầu và bảng tham số của nó được cho trong hình 2.18. Vì z_0 và z_1 cắt nhau, nên $d_1 = 0$.

Từ (2.34), có thể viết các ma trận chuyển vị thành phần như sau:

$$A_1^0(\vartheta_1) = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1(\vartheta_2) = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2(\vartheta_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Bảng tham số Denavit-Hartenberg

Khớp	a_i	α_i	d_i	ϑ_i
1	0	$-\pi/2$	0	ϑ_1
2	0	$\pi/2$	d_2	ϑ_2
3	0	0	d_3	0

Hình 2. 18: Tay máy kiểu tọa độ cầu

Ma trận chuyển vị tổng hợp

$$T_3^0(q) = A_1^0 A_2^1 A_3^2 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -s_1 & c_1 s_2 & c_1 s_2 d_3 - s_1 d_2 \\ s_1 c_2 & c_1 & s_1 s_2 & s_1 s_2 d_3 + c_1 d_2 \\ -s_2 & 0 & c_2 & c_2 d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

trong đó $q = [\vartheta_1 \ \vartheta_2 \ \vartheta_3]^T$.

2.4.3. Vùng hoạt động của phần công tác

Như đã nói ở trên, vị trí của phần công tác được đại diện bởi vị trí của gốc tọa độ gắn trên nó so với hệ tọa độ chung, nghĩa là bởi vector p . Tương tự, hướng của phần công tác được mô tả thông qua bộ các tham số MRO và, một cách hình thức, ta biểu diễn bằng vector ϕ . Tổng hợp lại,

thế của phần công tác được biểu diễn bằng vector $(m \times 1)$, với $m \leq$ số biến khớp (n):

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Biểu thức này dùng một số lượng tối thiểu các thông số độc lập nhau để mô tả thế của phần công tác. Nó cũng biểu diễn vùng, trong đó tay máy có thể hoạt động theo đúng chức năng của nó, gọi là vùng hoạt động.

Vector $(n \times 1)$ biểu diễn miền giá trị của các biến khớp q_i , gọi là không gian khớp:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

trong đó, $q_i = \theta_i$ cho khớp quay; $q_i = d_i$ cho khớp trượt.

Bằng cách này có thể viết phương trình động học của tay máy dưới dạng khác:

$$\dot{x} = k(q) \quad (2.39)$$

Ví dụ, với cơ cấu 3 khâu phẳng (hình 2.17), có thể nhận thấy vị trí của phần công tác được xác định nhờ 2 tọa độ p_x, p_y , còn hướng của phần công tác được xác định nhờ góc ϕ giữa nó với trục x_0 . Đối chiếu với (2.35), có thể biểu diễn vị trí của phần công tác thông qua 2 phần tử đầu của cột thứ tư, còn hướng của nó qua góc $\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$.

$$x = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ \phi \end{bmatrix} = k(q) = \begin{bmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix}$$

Đó cũng chính là trường hợp riêng của (2.37), biểu diễn vùng hoạt động của tay máy 3 khâu phẳng.

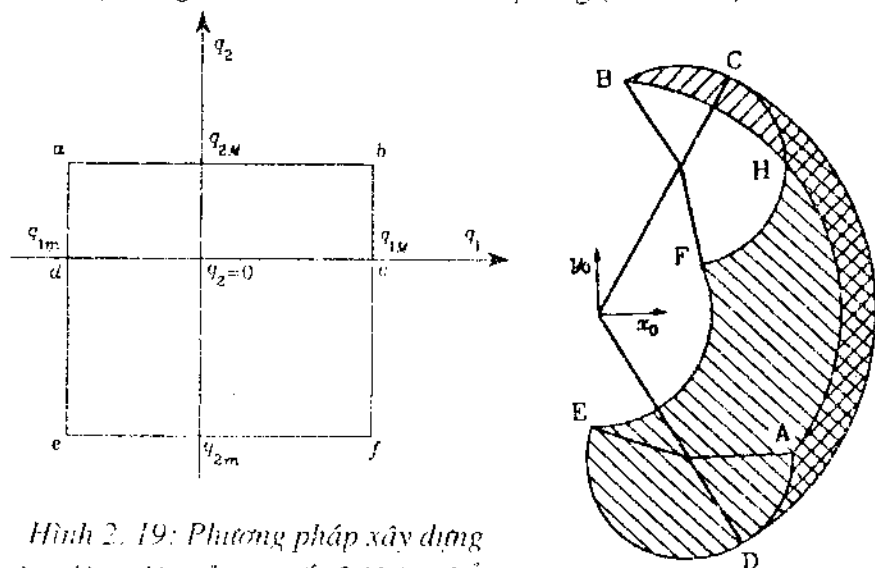
Một trong những thông số động học quan trọng của tay máy là vùng làm việc (*Workspace*) của nó. Đó là không gian mà gốc tọa độ của phần công tác có thể với tới được, tức là không tính đến sự định hướng của phần công tác. Đôi khi người ta phân biệt vùng làm việc nói trên (gọi là *Reachable Workspace*) với vùng làm việc có tính đến sự định hướng của phần công tác (*Dexterous Workspace*).

Thể tích và hình dạng của vùng làm việc phụ thuộc vào kết cấu của tay máy và giới hạn (miền giá trị) của các biến khớp. Đối với tay máy có n bậc tự do, vùng làm việc là tập hợp mọi vị trí có thể của phần công tác, như mô tả trong phương trình động học:

$$p = p(q); \quad q_{im} \leq q_i \leq q_{iM}; \quad i = 1 \dots n.$$

trong đó, q_{im} (q_{iM}) là giá trị giới hạn dưới (trên) của mỗi biến khớp. Vùng làm việc này có các tính chất: có giới hạn, khép kín và liên thông.

Biểu diễn hình học vùng công tác của tay máy là điều phức tạp. Tuy nhiên, chúng ta có thể hình dung về vùng làm việc của tay máy thông qua một ví dụ đơn giản. Đó là cơ cấu 2 khâu phẳng (hình 2.19).



Hình 2.19: Phương pháp xây dựng vùng làm việc của cơ cấu 2 khâu phẳng

Cấu hình và thể của cảng tay được thể hiện bằng hình chữ nhật kín $abcfeda$. Đoạn ab tương ứng với $q_2 = q_{2M}$, còn q_1 biến thiên từ q_{1m} đến q_{1M} . Ta vẽ được cung AB tương ứng trong hình bên phải. Cung BF tương ứng đoạn bf : $q_1 = q_{1M}$ còn q_2 giảm từ q_{2M} đến q_{2m} . Tương tự, ta vẽ được các cung FE , EA . Vùng công tác còn được hình thành bởi cung CD ứng với $q_2 = 0$, còn q_1 biến thiên từ q_{1m} đến q_{1M} .

2.5. BÀI TOÁN NGƯỢC CỦA ĐỘNG HỌC TAY MÁY

Bài toán thuận của động học tay máy cho phép xác định thể của phần công tác, và có thể cả vùng làm việc của nó theo quan hệ với các thông số động học của các cặp khâu - khớp. Bài toán ngược nhằm xác định bộ

thông số động học để đảm bảo chuyển động cho trước của phần công tác. Theo biểu thức (2.34), nếu có bộ các thông số xác định thì có thể xác định $T_n^0(q)$ một cách đơn trị. Đối với bài toán ngược thì không hẳn như vậy, vì:

- Các phương trình có dạng phi tuyến và siêu việt, thường không cho lời giải đúng.
- Có thể có nhiều lời giải.
- Có thể gặp nghiệm vô định, vì các liên kết thừa (giống như kết cấu siêu tĩnh).
- Có thể có nghiệm tìm được bằng toán học lại không chấp nhận được về mặt vật lý, do các ràng buộc về kết cấu.

Tính đa nghiệm của bài toán ngược không chỉ phụ thuộc vào số các biến khớp (tức là số bậc tự do) mà cả vào số lượng các tham số khác không trong kết cấu. Nói chung, số lượng này càng lớn thì số lời giải chấp nhận được càng nhiều. Ví dụ, tay máy 6 bậc tự do có thể có tới 16 nghiệm. Điều đó đòi hỏi phải có các điều kiện phụ về cơ cấu để giảm số nghiệm này.

Việc tìm kiếm một nghiệm phù hợp đòi hỏi ở người thiết kế một trực giác về toán học và về kết cấu để dự đoán những điểm hoặc khu vực khả dĩ giảm được số nghiệm cần chọn lựa.

2.5.1. Cơ cấu 3 khâu phẳng

Cơ cấu 3 khâu phẳng được hình dung như trong hình 2.17. So sánh phương trình động học của nó (2.35) với phương trình động học tổng quát (2.34) ta có thể xác định toạ độ của điểm W (gốc toạ độ của khớp 2):

$$\left. \begin{aligned} P_{w_x} &= p_x - a_3 c_\phi = a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ P_{w_y} &= p_y - a_3 s_\phi = a_1 s_1 + a_2 s_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

Mặt khác, từ hình học của cơ cấu, có giới hạn về góc nghiêng của phần công tác với thân:

$$\phi = \vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3 \quad (2.41)$$

Bình phương rồi cộng 2 vế của (2.40) sẽ rút ra được

$$c_2 = \frac{p_{w_x}^2 + p_{w_y}^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}$$

Tất nhiên, c_2 phải thỏa mãn điều kiện $-1 \leq c_2 \leq 1$.

Từ đó ta có $s_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2}$.

Trong đó, dấu cộng ứng với thế bàn tay hướng lên, còn dấu trừ ứng với thế bàn tay hướng xuống. Vậy:

$$\vartheta_2 = \text{Atan2}(s_2, c_2)$$

Thay ϑ_2 vào (2. 40) rồi giải hệ phương trình đó, nhận được

$$s_1 = \frac{(a_1 + a_2 c_2) p_{w_v} - a_2 s_2 p_{w_c}}{p_{w_x}^2 + p_{w_z}^2}$$

$$c_1 = \frac{(a_1 + a_2 c_2) p_{w_c} + a_2 s_2 p_{w_v}}{p_{w_x}^2 + p_{w_z}^2}$$

$$\vartheta_1 = \text{Atan2}(s_1, c_1).$$

Cuối cùng, tính được: $\vartheta_3 = \phi - \vartheta_1 - \vartheta_2$

2.5.2. Cơ cấu cầu

Cơ cấu cầu (hình 2.18) và phương trình động học của nó như (2.36). Cần xác định giá trị của các biến khớp $\vartheta_1, \vartheta_2, d_3$ tương ứng vị trí xác định của điểm gốc tọa độ W trên phần công tác. Để thuận tiện, vị trí của W được xác định theo hệ 1. Vậy, từ (2.36) có biểu thức

$$(A_1^0)^{-1} T_3^0 = A_2^1 A_3^2 = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 & d_3 s_2 \\ s_2 & 0 & -c_2 & -d_3 c_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bình phương 3 phần tử đầu của cột thứ 4 của ma trận trên 2 vế, được biểu thức chỉ phụ thuộc ϑ_2 và d_3 :

$$p^1 w = \begin{bmatrix} p_{w_c} c_1 + p_{w_z} s_1 \\ -p_{w_x} \\ -p_{w_z} s_1 + p_{w_c} c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_3 s_2 \\ -d_3 c_2 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (2. 42)$$

Để giải phương trình, đặt

$$t = \tan(\vartheta_1/2)$$

để cho $c_1 = \frac{1-t^2}{1+t^2}$ và $s_1 = \frac{2t}{1+t^2}$.

Thay chúng vào vế trái của (2.42), được phương trình

$$(d_2 + p_{w_1})t^2 + 2p_{w_1}t + d_2 - p_{w_1} = 0$$

Giải ra, ta được:

$$t = \frac{-p_{w_1} \pm \sqrt{p_{w_1}^2 + p_{w_1}^2 - d_2^2}}{d_2 + p_{w_1}}$$

với điều kiện biệt thức phải dương. Hai nghiệm tương ứng với 2 thế khác nhau của bàn tay là

$$\mathcal{G}_1 = 2A \tan 2(-p_{w_1} \pm \sqrt{p_{w_1}^2 + p_{w_1}^2 - d_2^2} \cdot d_2 + p_{w_1})$$

Từ hai phần tử đầu của (2.42), nhận được

$$\frac{p_{w_1}c_1 + p_{w_1}s_1}{-p_{w_2}} = \frac{d_3s_2}{-d_3c_2}$$

Từ đó: $\mathcal{G} = A \tan 2(p_{w_1}c_1 + p_{w_1}s_1, p_{w_2})$

Cuối cùng, bình phương và cộng 2 phần tử đầu của (2.42), được:

$$d_3 = \sqrt{(p_{w_1}c_1 + p_{w_1}s_1)^2 + p_{w_1}^2}$$

với điều kiện $d_3 > 0$.

2.6. BÀI TOÁN VẬN TỐC

Trong điều khiển robot, cần phải quan tâm đến quan hệ giữa các khâu, khớp và phân công tác không chỉ về thế mà cả về vận tốc và gia tốc. Bài toán vị trí đã được lập trình bày ở các mục trên. Vấn đề gia tốc liên quan đến động lực học sẽ được xét trong chương sau. Phần này sẽ nói về quan hệ giữa vận tốc chuyển động tại các khớp (gọi là vận tốc khớp - *Joint Velocity*) với vận tốc của phần công tác trong một hệ quy chiếu xác định.

2.6.1. Jacobian hình học

Giả sử một tay máy có n bậc tự do. Phương trình động học của nó có dạng như (2.32), được viết gọn lại như sau:

$$T(q) = \begin{bmatrix} R(q) & p(q) \\ O' & 1 \end{bmatrix}$$

với $q = [q_1 \dots q_n]^T$ là vector các biến khớp.

Cần xác định quan hệ hàm số giữa vận tốc thẳng $\dot{p}$ và vận tốc góc ω của phần công tác với vận tốc khớp $\dot{q}$:

$$\dot{p} = J_p(q) \dot{q}; \quad \omega = J_o(q) \dot{q}$$

trong đó, J_p và J_o là các ma trận $(3 \times n)$, tương ứng biểu diễn ảnh hưởng của các vận tốc khớp $\dot{q}$ đến vận tốc thẳng $\dot{p}$ và vận tốc góc ω .

Có thể viết phương trình trên dưới dạng gọn hơn:

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q) \dot{q}, \quad (2.43)$$

trong đó $J = \begin{bmatrix} J_p \\ J_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{p1} & \dots & j_{pn} \\ j_{o1} & \dots & j_{on} \end{bmatrix}$ là hàm số của các vận tốc khớp và

được gọi là *Jacobian*. Vì nó được xác định bằng phương pháp hình học nên mang tên là *Jacobian hình học*.

Để tiện cho việc tính toán Jacobian cần phân biệt trường hợp khớp trượt ($q_i = d_i$) và khớp quay ($q_i = \theta_i$).

Trường hợp khớp trượt

- Cho vận tốc thẳng, vì $q_i = d_i$, nên: $\dot{q}_i j_{pi} = \dot{d}_i z_{i-1}$. Vì vậy $j_{pi} = z_{i-1}$.

- Cho vận tốc góc, vì $q_i = \theta_i$, nên: $\dot{q}_i j_{oi} = 0$. Vì vậy $j_{oi} = 0$.

Trường hợp khớp quay

- Đối với vận tốc thẳng, như trên hình 2.20, ta có:

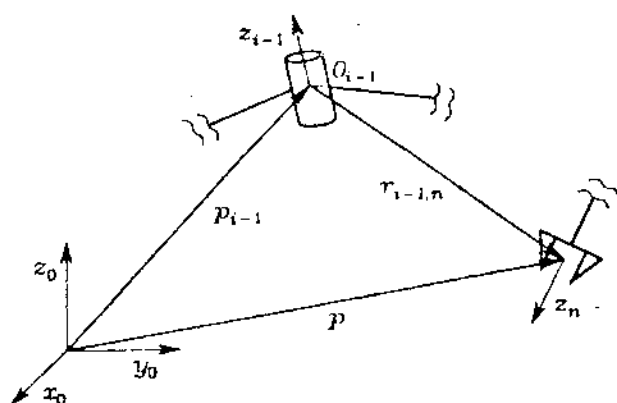
$$\dot{q} j_{pi} = \omega_{i-1,i} \times r_{i-1,i} = \dot{\theta}_i z_{i-1} \times (p - p_{i-1})$$

Vì $\dot{q} = \dot{\theta}$ nên cuối cùng ta có: $j_{pi} = z_{i-1} \times (p - p_{i-1})$.

- Cho vận tốc góc, vì $q_i = \theta_i$, nên: $\dot{q}_i j_{oi} = \dot{\theta}_i z_{i-1}$. Vì vậy $j_{oi} = z_{i-1}$.

Tổng hợp lại, có công thức tổng quát để tính *Jacobian hình học* như sau:

$$\begin{bmatrix} j_{pi} \\ j_{oi} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{cho khớp trượt} \\ \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (p - p_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} & \text{cho khớp quay} \end{cases} \quad (2.44)$$



Hình 2. 20: Sơ đồ tính toán ảnh hưởng của vận tốc khớp quay đến vận tốc thẳng của phần công tác

2.6.2. Jacobian giải tích

Một phương pháp khác để xác định ảnh hưởng của các vận tốc khớp đến vận tốc của phần công tác là dựa vào vi phân phương trình động học, ví dụ phương trình (2.37). Vì Jacobian loại này tìm được bằng phương pháp giải tích nên nó được gọi là *Jacobian giải tích*.

Vận tốc chuyển động tịnh tiến của phần công tác so với hệ cơ sở được tính bằng cách lấy đạo hàm của tọa độ $p(q)$ theo thời gian:

$$\dot{p} = \frac{\partial p}{\partial q} \dot{q} = J_p(q) \dot{q}$$

Tương tự, vận tốc quay của phần công tác được tính bằng đạo hàm của $\phi(q)$:

$$\dot{\phi} = \frac{\partial \phi}{\partial q} \dot{q} = J_\phi(q) \dot{q}$$

Tổng hợp lại, ta có phương trình tổng quát để biểu diễn ảnh hưởng của các vận tốc khớp đến vận tốc của phần công tác như sau:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p(q) \\ J_\phi(q) \end{bmatrix} \dot{q} = J_A(q) \dot{q} \quad (2.45)$$

trong đó Jacobian giải tích

$$J_A(q) = \frac{\partial k(q)}{\partial q}$$

Nó khác với *Jacobian hình học* vì $\omega \neq \phi$. Dựa vào các quan hệ động học trình bày ở trên, có thể tìm ra mối liên hệ giữa chúng.

Chương 3

ĐỘNG LỰC HỌC TAY MÁY

Động lực học tay máy nghiên cứu quan hệ giữa lực, momen, năng lượng,... với các thông số chuyển động của nó. Nghiên cứu động lực học tay máy phục vụ cho các mục đích sau:

- Mô phỏng hoạt động của tay máy, để khảo sát, thử nghiệm quá trình làm việc của nó mà không phải dùng tay máy thật.
- Phân tích, tính toán kết cấu của tay máy.
- Phân tích, thiết kế hệ thống điều khiển tay máy.

3.1. PHƯƠNG PHÁP LAGRANGE

3.1.1. Cơ sở chung

Phương pháp *Lagrange* dựa trên mối quan hệ giữa tổng năng lượng của hệ thống với *lực tổng quát*, trong một *hệ tọa độ tổng quát*.

Giả sử đã xác định được một tập hợp các biến $\lambda_i, i = 1, \dots, n$ với tư cách là hệ tọa độ tổng quát để mô tả vị trí các khâu của một tay máy n bậc tự do. *Lagrange* của cơ hệ là hàm số của các tọa độ tổng quát:

$$L = T - U \quad (3.1)$$

trong đó T và U tương ứng là động năng và thế năng của hệ thống.

Từ đó, có công thức *Lagrange* như sau:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_i} - \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = \xi_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

trong đó, ξ_i là lực tổng quát liên kết với hệ tọa độ tổng quát λ_i .

Đối với tay máy có kết cấu chuỗi động hở, chọn hệ tọa độ tổng quát là vector các biến khớp

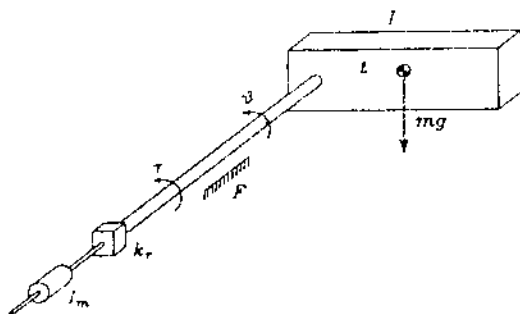
$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = q \quad (3.3)$$

Lực tổng quát có thể bao gồm momen trên trục động cơ chấp hành (lực phát động), momen ma sát tại các ổ trục, lực tương tác giữa phần công tác với đối tượng,...

Như vậy, đối với trường hợp tay máy, công thức (3.2) thể hiện quan hệ giữa lực tổng quát tác động lên hệ thống với vị trí, vận tốc và gia tốc của các khớp. Từ đó có thể xây dựng mô hình động lực học cho tay máy.

Để hiểu rõ về công thức *Lagrange*, chúng ta xét ví dụ sau:

Hình 3. 1: Mô hình
động học của trục
dao động



Xét một trục dao động như hình 3.1. Motor điện có momen quán tính I_m , thông qua hộp giảm tốc có tỷ số truyền bằng $k_r > 1$. Nhờ đó, trục được truyền một momen chủ động τ và có vận tốc $\dot{\theta}$. Vật quay có khối lượng m , momen quán tính I và toạ độ trọng tâm đặt cách trục một khoảng l .

Chọn θ làm toạ độ tổng quát, khi đó động năng của hệ thống:

$$T = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_m k_r^2 \dot{\theta}^2$$

Thế năng của hệ thống:

$$U = mgl(1 - \cos \theta)$$

Thay vào (3.1), được:

$$L = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_m k_r^2 \dot{\theta}^2 - mgl(1 - \cos \theta)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = I \dot{\theta} + I_m k_r^2 \dot{\theta}; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = I \ddot{\theta} + I_m k_r^2 \ddot{\theta}$$

* "Lực" ở đây không theo đúng khái niệm vật lý, nên "momen" đồng nghĩa với "lực".

$$\frac{\partial L}{\partial \vartheta} = -mgl \sin \vartheta$$

Thay các kết quả tính trung gian vào (3.2) và chú ý lực tổng quát ξ gồm momen phát động τ và momen ma sát $F\dot{\vartheta}$, được

$$(I + I_m k_r^2) \ddot{\vartheta} + mgl \sin \vartheta = \xi = \tau - F\dot{\vartheta}$$

Cuối cùng ta có mô hình động lực học của hệ:

$$(I + I_m k_r^2) \ddot{\vartheta} + F\dot{\vartheta} + mgl \sin \vartheta = \tau$$

3.1.2. Tính động năng

Động năng T của hệ thống gồm động năng chuyển động của mỗi khâu T_h (gọi tắt là động năng chuyển động) và động năng của cơ cấu phát động tại các khớp T_m (gọi tắt là động năng phát động):

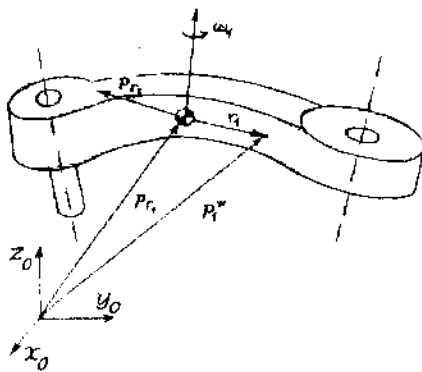
$$T = \sum_{i=1}^n (T_h + T_m) \quad (3.4)$$

Động năng chuyển động T_h có thể được tính theo sơ đồ trong hình 3.2:

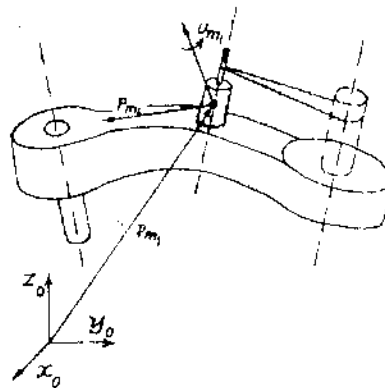
$$T_h = \frac{1}{2} \int_{V_h} \dot{p}_i^* \dot{p}_i^* \rho dV \quad (3.5)$$

trong đó $\dot{p}_i^*$ là vector vận tốc dài, ρ là khối lượng riêng của phần tử thể tích dV , V_h là thể tích của khâu thứ i :

$$\dot{p}_i^* = \dot{p}_h + \omega_i \times r_i$$



Hình 3. 2: Sơ đồ tính động năng chuyển động



Hình 3. 3: Sơ đồ tính động năng phát động

Sau khi tính các thành phần dưới dấu tích phân của (3.5), ta nhận thấy động năng T_h có 3 thành phần: tịnh tiến, quay lại và quay. Tổng thành phần chủ yếu là tịnh tiến và quay, sau khi tính các tích phân tương ứng, bằng:

$$T_h = \frac{1}{2} m_h \dot{q}^T J_p^{(h)} J_p^{(h)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_o^{(h)} R_l I_h^l R_l^T J_o^{(h)} \dot{q}. \quad (3.6)$$

Ngoài các ký hiệu đã dùng từ trước, các ký hiệu trong phần này được quy ước như sau:

T - động năng

U - thế năng

m - khối lượng

J - Jacobian

I - Tensor quán tính tương ứng với khối tâm

Chỉ số l tương ứng với khâu (*link*); m với động cơ (*motor*).

Động năng của motor cũng được tính tương tự. Giả thiết động năng của stator được tính vào động năng của khâu mang nó. Phần phải tính là động năng của các phần chuyển động, quy về rotor. Một giả thiết nữa là động cơ điều khiển khớp thứ i sẽ được gắn trên khâu thứ $i-1$.

Với sơ đồ trong hình 3.3, động năng của motor được tính nhờ công thức sau:

$$T_m = \frac{1}{2} m_m \dot{p}_m^T \dot{p}_m + \frac{1}{2} \omega_m^T I_m \omega_m \quad (3.7)$$

trong đó các thông số của rotor: m_m là khối lượng, $\dot{p}_m$ là vận tốc dài, I_m là tensor quán tính của rotor đối với khối tâm của nó, ω_m là vận tốc góc.

Ta nhận được công thức tương tự như (3.6):

$$T_m = \frac{1}{2} m_m \dot{q}^T J_p^{(m)} J_p^{(m)} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T J_o^{(m)} R_m I_m^T R_m^T J_o^{(m)} \dot{q}. \quad (3.8)$$

Cộng động năng của tất cả các khâu tương ứng với các biểu thức (3.6) và (3.8) được công thức tính động năng của toàn hệ thống:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \dot{q}^T B(q) \dot{q}. \quad (3.9)$$

* Trên thực tế, các motor được gắn gần thân để giảm nhẹ các bộ phận chuyển động. Khi đó "motor" được hiểu là khâu truyền dẫn cuối cùng. Cũng có khi motor được gắn trực tiếp lên trục quay.

3.1.3. Tính thế năng

Việc tính thế năng của hệ thống cũng xuất phát từ tính thế năng của từng khâu và của từng motor:

$$U = \sum_{i=1}^n (U_h + U_m) \quad (3.10)$$

Giả thiết các khâu rắn tuyệt đối và lực duy nhất gây nên thế năng là trọng lực, khi đó thế năng của các khâu được tính bởi công thức

$$U_h = - \int_h g_0^T p_h^T \rho dV = -m_h g_0^T p_h$$

trong đó, g_0 là vector gia tốc trọng trường trong hệ cơ sở, nghĩa là:

$g_0 = [0, 0, g]^T$ nếu trục Z được đặt theo phương thẳng đứng.

Thế năng của motor:

$$U_m = -m_m g_0^T p_m$$

Thay 2 thành phần trên vào (3.10), được công thức cuối cùng của thế năng:

$$U = - \sum_{i=1}^n (m_h g_0^T p_h + m_m g_0^T p_m) \quad (3.11)$$

Chú ý rằng thế năng tính thông qua p_h và p_m chỉ phụ thuộc vào biến khớp q mà không phụ thuộc các vận tốc khớp $\dot{q}$.

3.1.4. Phân tích ý nghĩa cơ học của mô hình *Lagrange*

Thay (3.9) và (3.11) vào (3.1), ta tính được *Lagrange* của hệ thống:

$$\begin{aligned} L(q, \dot{q}) &= T(q, \dot{q}) - U(q) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \sum_{i=1}^n (m_h g_0^T p_{hi}(q) + m_m g_0^T p_{mi}(q)) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Để xây dựng mô hình động lực dạng (3.2), ta phải tính các đạo hàm:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) = \sum_{j=1}^n h_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \frac{dh_{ij}(q)}{dt} \dot{q}_j \\ &= \sum_{j=1}^n h_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial h_{ij}(q)}{\partial q_k} \dot{q}_k \dot{q}_j \\ \frac{\partial T}{\partial q_i} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial h_{jk}(q)}{\partial q_i} \dot{q}_k \dot{q}_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial q_i} &= -\sum_{j=1}^n (m_{ij} g_{ij}^i \frac{\partial p_{ij}}{\partial q_i} + m_{mi} g_{oi}^i \frac{\partial p_{mi}}{\partial q_i}) \\ &= -\sum_{j=1}^n (m_{ij} g_{ij}^i J_{p_i}^{(h_i)}(q) + m_{mi} g_{oi}^i J_{p_i}^{(m_i)}(q)) - g_i(q)\end{aligned}$$

Thay vào (3.2), nhận được phương trình chuyển động:

$$\sum_{j=1}^n h_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk}(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + g_i(q) = \xi_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.13)$$

trong đó:
$$h_{ijk} = \frac{\partial h_{ij}}{\partial q_k} = \frac{1}{2} \frac{\partial b_{ijk}}{\partial q_i}$$

Từ (3.13) có thể rút ra các nhận xét sau:

- Hệ số h_{ij} biểu thị momen quán tính tại trục của khớp thứ i , đại diện cho ảnh hưởng của gia tốc của khớp j đến khớp i .
- Thành phần h_{iii} biểu thị thành phần ly tâm đối với trục i của vận tốc khớp j . Vì $\partial h_{ii}/\partial q_i = 0$ nên $h_{iii} = 0$.
- Thành phần $h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$ biểu thị hiệu ứng Coriolis của khớp j và k đối với khớp i .
- Thành phần g_i biểu thị momen đối với khớp i do gia tốc trọng trường.

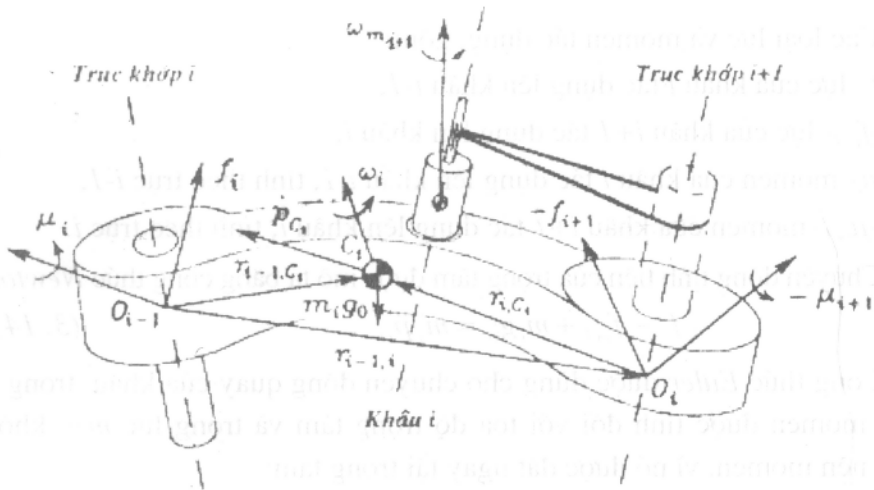
Để cho đầy đủ hơn, trong phương trình chuyển động (3.13) cần phải có mặt momen ma sát và lực tương tác của phần công tác đến đối tượng.

3.2. PHƯƠNG PHÁP NEWTON-EULER

3.2.1. Mô hình động lực học

Với phương pháp *Lagrange*, mô hình động lực học của tay máy xuất phát từ tổng năng lượng (*Lagrange*) của hệ thống. Phương pháp *Newton-Euler* xây dựng mô hình dựa vào sự cân bằng của hệ lực tác dụng lên hệ thống. Nó hình thành hệ phương trình, có thể giải bằng thuật toán đệ quy (*recursive*).

Hình 3.4 là sơ đồ tính động lực học theo phương pháp Newton -Euler.



Hình 3. 4: Sơ đồ động học dẫn đến công thức Newton-Euler

Giả sử khâu thứ i của tay máy có kèm motor dẫn động khớp thứ $i + 1$ với các thông số kết cấu sau:

m_i - khối lượng của khâu thứ i ,

I_i - tensor quán tính của khâu thứ i ,

I_{m_i} - momen quán tính của rotor,

r_{i-1,C_i} - vector từ gốc của $i-1$ đến trọng tâm C_i ,

r_{i,C_i} - vector từ gốc của i đến trọng tâm C_i ,

$r_{i-1,i}$ - vector từ gốc $i-1$ đến gốc i .

Các vận tốc và gia tốc được đưa vào tính toán, gồm có:

$\dot{p}_{C_i}$ - vận tốc dài của trọng tâm C_i ,

$\dot{p}_i$ - vận tốc dài của gốc tọa độ i ,

ω_i - vận tốc góc của khâu i ,

ω_{m_i} - vận tốc góc của rotor trục i ,

$\ddot{p}_{C_i}$ - gia tốc dài của trọng tâm C_i ,

$\ddot{p}_i$ - gia tốc dài của gốc tọa độ i ,

$\dot{\omega}_{C_i}$ - gia tốc góc của trọng tâm C_i ,

$\dot{\omega}_i$ - gia tốc góc của khâu i ,

$\dot{\omega}_{m_i}$ - gia tốc góc của rotor,

g_0 - gia tốc trọng trường.

Các loại lực và momen tác dụng, gồm:

f_i - lực của khâu i tác dụng lên khâu $i-1$,

f_{i+1} - lực của khâu $i+1$ tác dụng lên khâu i ,

μ_i - momen của khâu i tác dụng lên khâu $i-1$, tính theo trục $i-1$,

μ_{i+1} - momen của khâu $i+1$ tác dụng lên khâu i , tính theo trục i .

Chuyển động tịnh tiến của trọng tâm được mô tả bằng công thức *Newton*:

$$f_i - f_{i+1} + m_i g_0 = m_i \ddot{p}_{i0} \quad (3.14)$$

Công thức *Euler* được dùng cho chuyển động quay của khâu, trong đó các momen được tính đối với toạ độ trọng tâm và trọng lực $m_i g_0$ không gây nên momen, vì nó được đặt ngay tại trọng tâm:

$$\mu_i + f_i \times r_{i-1,i} - \mu_{i+1} - f_{i+1} \times r_{i,i+1} = \frac{d}{dt} (I_i \omega_i + k_{r,i+1} \dot{q}_{i+1} I_{m,i+1} z_{m,i+1}) \quad (3.15)$$

Đạo hàm của thành phần thứ nhất ở vế phải:

$$\frac{d}{dt} (I_i \omega_i) = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) \quad (3.16)$$

Đạo hàm của thành phần thứ hai:

$$\frac{d}{dt} (\dot{q}_{i+1} I_{m,i+1} z_{m,i+1}) = \ddot{q}_{i+1} I_{m,i+1} z_{m,i+1} + \dot{q}_{i+1} I_{m,i+1} \omega_i \times z_{m,i+1} \quad (3.17)$$

Thay (3.16) và (3.17) vào (3.15), nhận được công thức *Euler*:

$$\begin{aligned} \mu_i + f_i \times r_{i-1,i} - \mu_{i+1} - f_{i+1} \times r_{i,i+1} &= I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) \\ &+ k_{r,i+1} \ddot{q}_{i+1} I_{m,i+1} z_{m,i+1} + k_{r,i+1} \dot{q}_{i+1} I_{m,i+1} \omega_i \times z_{m,i+1} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Lực tổng quát có thể tìm được bằng cách chiếu lực f_i (đối với khớp trượt) hoặc momen μ_i (đối với khớp quay) lên trục khớp, cộng thêm momen quán tính của rotor:

$$\tau = \begin{cases} f_i^T z_{i-1} + k_{r,i} I_{m,i} \dot{\omega}_i^T z_{m,i} & \text{với khớp trượt} \\ \mu_i^T z_{i-1} + k_{r,i} I_{m,i} \dot{\omega}_i^T z_{m,i} & \text{với khớp quay} \end{cases} \quad (3.19)$$

3.2.2. Tính gia tốc của khâu

Các công thức *Newton* (3.14) và *Euler* (3.18) đều chứa thành phần gia tốc dài và gia tốc góc của các khâu và các khớp.

Tương tự như tính vận tốc trong chương 2, ta tính riêng cho trường hợp khớp trượt và khớp quay.

Tính gia tốc dài

- Đối với khớp trượt, ký hiệu p_{i-1} , p_i lần lượt là vector vị trí của khớp $i-1$ và khớp i , $r_{i-1,i}$ là khoảng cách giữa 2 trục của chúng, d_i là khoảng dịch chuyển theo khớp i , ta có:

$$\dot{p}_i = (\dot{p}_{i-1} + \dot{d}_i z_{i-1} + \omega_{i-1} \times r_{i-1,i})$$

Đạo hàm vận tốc $\dot{p}_i$ theo thời gian, được:

$$\ddot{p}_i = \ddot{p}_{i-1} + \ddot{d}_i z_{i-1} + \dot{d}_i \omega_{i-1} \times z_{i-1} + \dot{\omega}_i \times r_{i-1,i} + \omega_i \times \dot{d}_i z_{i-1} + \omega_i \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1,i})$$

Thay $\dot{r}_{i-1,i} = \dot{d}_i z_{i-1} + \omega_{i-1} \times r_{i-1,i}$ vào phương trình trên, được:

$$\ddot{p}_i = \ddot{p}_{i-1} + \ddot{d}_i z_{i-1} + 2\dot{d}_i \omega_{i-1} \times z_{i-1} + \dot{\omega}_i \times r_{i-1,i} + \omega_i \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1,i}) \quad (3.20)$$

- Đối với khớp quay:

$$\dot{p}_i = \dot{p}_{i-1} + \omega_i \times r_{i-1,i}$$

Đạo hàm vận tốc $\dot{p}_i$ theo thời gian, được:

$$\ddot{p}_i = \ddot{p}_{i-1} + \dot{\omega}_i \times r_{i-1,i} + \omega_i \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1,i}) \quad (3.21)$$

Tổng hợp lại, ta có công thức tính gia tốc góc của khâu thứ i như sau:

$$\ddot{p}_i = \begin{cases} \ddot{p}_{i-1} + \ddot{d}_i z_{i-1} + 2\dot{d}_i \omega_{i-1} \times z_{i-1} + \dot{\omega}_i \times r_{i-1,i} + \omega_i \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1,i}) & (1) \\ \ddot{p}_{i-1} + \dot{\omega}_i \times r_{i-1,i} + \omega_i \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1,i}) & (2) \end{cases} \quad (3.22)$$

trường hợp (1) dùng cho khớp trượt, trường hợp (2) cho khớp quay.

Tính gia tốc góc

- Đối với khớp trượt, vì $\omega_i = \omega_{i-1}$ nên:

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} \quad (3.23)$$

- Đối với khớp quay, vì $\omega_i = \omega_{i-1} + \dot{\theta}_i z_{i-1}$ nên:

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + \ddot{\theta}_i z_{i-1} + \dot{\theta}_i \omega_{i-1} \times z_{i-1} \quad (3.24)$$

Tổng hợp lại, ta có công thức tính gia tốc góc của khâu thứ i như sau:

$$\dot{\omega}_i = \begin{cases} \dot{\omega}_{i-1} & \text{với khớp trượt} \\ \dot{\omega}_{i-1} + \ddot{\theta}_i z_{i-1} + \dot{\theta}_i \omega_{i-1} \times z_{i-1} & \text{với khớp quay} \end{cases} \quad (3.25)$$

Chương 4

CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN ROBOT

Động học và động lực học tay máy phục vụ việc phân tích kết cấu của tay máy, đồng thời cũng đặt nền móng cho thiết kế tay máy. Mặt khác, mối quan hệ giữa các biến khớp với thể của phần công tác trong vùng hoạt động của nó, giữa các thông số động học (thể, vận tốc, gia tốc) của các khâu, khớp với các thông số động lực học của chúng (momen tại các khớp, động năng và thế năng của các khâu,...) cũng rất cần thiết cho việc thiết kế bộ phận phát động. Về cơ bản, các nội dung trên mới đề cập tới phần *tay máy*.

Nói một cách đơn giản, RBCN là một tay máy được điều khiển tự động theo chương trình. Nó gồm đối tượng điều khiển (phần tay máy) và hệ thống điều khiển. Nhiệm vụ của hệ thống điều khiển là điều khiển tay máy thực hiện các nhiệm vụ đặt ra, nghĩa là phần công tác phải chuyển động theo quỹ đạo định trước và thực hiện các chức năng công tác. Nghiên cứu về điều khiển robot động chạm tới các vấn đề sau:

- Quan hệ giữa quỹ đạo hoạt động của phần công tác với các thông số động học, động lực học của tay máy.
- Luật, phương pháp điều khiển và cấu trúc của hệ điều khiển.
- Các cơ cấu của hệ thống điều khiển như: cơ cấu phát động, cảm biến, bộ điều khiển,... cùng các cơ cấu chuyển đổi và truyền tín hiệu giữa chúng.
- Lập trình cho robot.

Các vấn đề trên liên quan đến nhiều ngành kỹ thuật khác nhau: cơ khí, truyền động điện, điều khiển tự động, điện tử, công nghệ thông tin,... mà ranh giới giữa chúng ngày càng khó phân định. Trong chương này, chúng ta sẽ giải quyết những vấn đề *thiên về cơ khí* trong điều khiển robot.

4.1. THIẾT KẾ QUỸ ĐẠO

Quỹ đạo chuyển động của phần công tác⁽¹⁾ là vấn đề chung trong điều khiển robot, vì để hoàn thành nhiệm vụ cụ thể của mình thì trước hết phần

⁽¹⁾ Để đơn giản, khi nói đến quỹ đạo, xin được bỏ cụm từ "phần công tác".

công tác phải di chuyển theo đúng quỹ đạo xác định. Nói cách khác, quỹ đạo là yếu tố cơ bản để mô tả hoạt động của robot. Việc thiết kế quỹ đạo cung cấp dữ liệu đầu vào cho hệ điều khiển nên cũng là cơ sở trực tiếp cho việc điều khiển.

Trong tài liệu này, xin tạm phân biệt 2 thuật ngữ sau:

- *Đường dịch chuyển (Path)*, là quỹ tích của các điểm trong không gian. Vì vậy, nó chứa đựng các yếu tố hình học thuần túy.

- *Quỹ đạo chuyển động*, gọi tắt là *quỹ đạo (Trajectory)* bao hàm cả yếu tố hình học của *đường dịch chuyển* lẫn yếu tố thời gian, như vận tốc, gia tốc.

Vì vậy bài toán thiết kế quỹ đạo liên kết các vấn đề động học và động lực học. Các yếu tố *đầu vào* của bài toán thiết kế quỹ đạo gồm *đường dịch chuyển* và *các điều kiện ràng buộc* về động học và động lực học. *Đầu ra* của bài toán là *quỹ đạo* của phần công tác. Nói chung, mô tả chính xác đường dịch chuyển là rất khó khăn. Người ta giảm bớt các tham số mô tả bằng cách quy định các điểm biên của vùng hoạt động, thêm các điểm trung gian mà đường phải đi qua, xấp xỉ (nội suy) bằng các đường đơn giản. Tương tự như vậy, yếu tố thời gian của quỹ đạo không thể xác định được cho từng điểm, mà thường quy định cho cả đoạn đường. Chúng cũng thường được quy định bằng các giá trị giới hạn như vận tốc hay gia tốc cho phép, hoặc gán các giá trị mặc định.

Bài toán thiết kế quỹ đạo được đặt ra cả trong *không gian khớp* lẫn *vùng hoạt động*. Các điều kiện ràng buộc của quỹ đạo, nhất là của đường dịch chuyển, thường được mô tả trong vùng hoạt động. Ngược lại, lực chuyển động của hệ thống xuất phát từ các khớp nên việc xác định quy luật theo thời gian của các biến khớp được thực hiện trong không gian khớp.

4.1.1. Quỹ đạo trong không gian khớp

Chuyển động của tay máy thường được mô tả trong vùng làm việc bằng các điểm nút (gồm điểm đầu, điểm cuối của quỹ đạo, có thể thêm một số điểm trung gian) và thời gian chuyển động. Vì vậy, để thiết kế quỹ đạo trong không gian khớp phải giải bài toán động học ngược để xác định giá trị các biến khớp tại các điểm nút. Sau đó, thiết lập các hàm nội suy $q(t)$ để mô tả quỹ đạo vừa nhận được.

Thuật toán thiết kế quỹ đạo trong không gian khớp phải đạt các điều kiện sau:

- Không đòi hỏi tính toán quá nhiều;
- Vị trí, vận tốc và có thể cả gia tốc của các khớp phải được biểu diễn bằng các hàm liên tục;
- Giảm thiểu các hiệu ứng bất lợi, ví dụ quỹ đạo không trơn tru.

Dạng đơn giản của quỹ đạo là **chuyển động điểm-điểm** (*Point-to-point Motion*). Nếu thêm các điểm trung gian thì kết quả này có thể được khái quát lên thành **chuyển động theo đường** (*Path Motion*). Không làm giảm tính tổng quát, chúng ta xét bài toán với một biến khớp $q(t)$.

4.1.1.1. Chuyển động điểm-điểm

Chuyển động điểm - điểm ứng dụng cho một số loại robot, như robot hàn điểm, tán đinh, xếp dỡ vật liệu,... Trong dạng chuyển động này, người ta chỉ quan tâm đến các tọa độ điểm đầu, điểm cuối của đường dịch chuyển và thời gian chuyển động giữa chúng chứ không quan tâm đến dạng hình học của đường dịch chuyển. Nhiệm vụ được đặt ra là *xác định quỹ đạo chuyển động* thỏa mãn các yêu cầu chung và có thể thêm cả việc *cải thiện một số thông số* của quỹ đạo.

Giả sử I là momen quán tính của một vật rắn quanh trục quay của nó. Cần xác định quy luật thay đổi của góc q giữa giá trị đầu q_i và giá trị cuối q_f trong khoảng thời gian t_f . Lực phát động là momen τ từ một motor. Bài toán rõ ràng là có nhiều lời giải. Ta thêm tiêu chuẩn tối ưu, ví dụ năng lượng tiêu thụ trên motor là nhỏ nhất. Từ đó, có một tập hợp giá trị $\dot{q} = \omega$ là lời giải của phương trình vi phân:

$$I\dot{\omega} = \tau$$

* thỏa mãn điều kiện:

$$\int_0^{t_f} \omega(t) dt = q_f - q_i$$

sao cho:

$$\int_0^{t_f} \tau^2(t) dt \rightarrow \min \quad (4.1)$$

Lời giải tổng quát sẽ có dạng đa thức bậc hai:

$$\omega(t) = at^2 + bt + c$$

Vì vậy, quỹ đạo chuyển động sẽ có dạng đa thức bậc ba:

$$q(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (4.2)$$

vận tốc thay đổi theo quy luật bậc hai:

$$\dot{q}(t) = 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1$$

và gia tốc thay đổi theo quy luật bậc nhất

$$\ddot{q}(t) = 6a_3 t + 2a_2$$

Để xác định 4 hệ số, cần cho trước 4 điều kiện. Chúng thường là vị trí đầu và vị trí cuối q_i, q_f , vận tốc đầu và vận tốc cuối $\dot{q}_i, \dot{q}_f$. Thường chọn $\dot{q}_i = \dot{q}_f = 0$. Cuối cùng, các hệ số trong phương trình quỹ đạo chuyển động (4.2) được xác định từ hệ phương trình:

$$a_0 = q_i$$

$$a_1 = \dot{q}_i$$

$$a_3 t_f^3 + a_2 t_f^2 + a_1 t_f + a_0 = q_f$$

$$3a_3 t_f^2 + 2a_2 t_f + a_1 = \dot{q}_f$$

Trên hình 4.1 là đồ thị quan hệ giữa vị trí, vận tốc và gia tốc với thời gian chuyển động (s) cho trường hợp: điểm (góc xuất phát) $q_i = 0$, điểm đích $q_f = \pi$, thời gian chuyển động $t_f = 1$, vận tốc tại điểm xuất phát và tại điểm cuối $\dot{q}_i = \dot{q}_f = 0$.

Giải hệ trên với các giá trị ban đầu đã cho, được:

$$a_0 = a_1 = 0$$

$$a_2 = 3\pi, a_3 = -2\pi$$

Vận tốc có quy luật bậc 2 với giá trị cực đại:

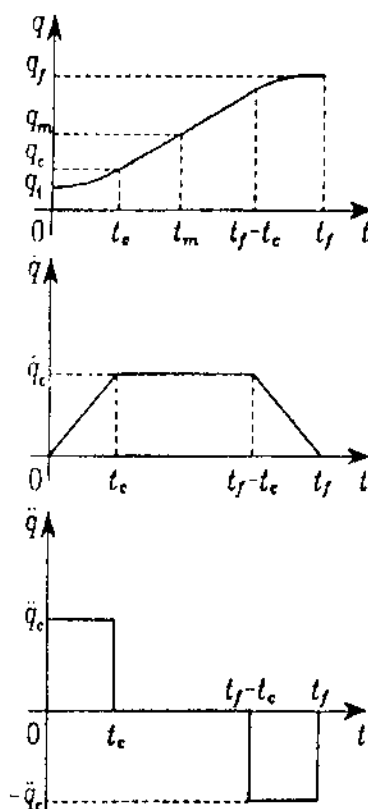
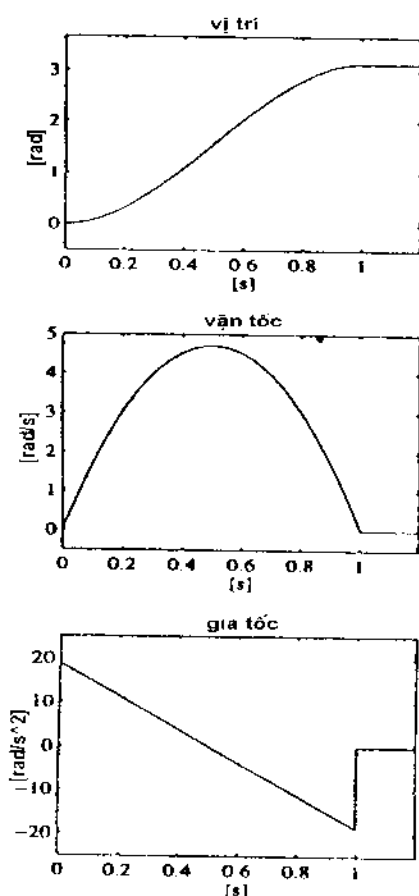
$$\dot{q}_{max} = 3\pi/2 \text{ khi } t = 1/2$$

Còn gia tốc biến thiên theo quy luật bậc nhất với giá trị cực đại:

$$\ddot{q}_{max} = 6\pi \text{ tại } t = 0 \text{ và } t = 1$$

Nhược điểm của quy luật này là gia tốc tại điểm đầu và điểm cuối lớn, sinh lực va đập do quán tính.

Một dạng quỹ đạo thường dùng trong công nghiệp là dạng đa thức hỗn hợp (*Blended Polynomial*). Đối với quỹ đạo dạng này, thường chọn quy luật vận tốc hình thang (hình 4. 2).



Hình 4. 1: Đồ thị vị trí, vận tốc, gia tốc với quy luật đa thức bậc 3

Hình 4. 2: Quỹ đạo với quy luật vận tốc hình thang

Quỹ đạo có 3 đoạn: khởi động (tăng tốc) với gia tốc không đổi; chuyển động tiếp với vận tốc không đổi; đến đích (giảm tốc) với gia tốc không đổi. Quỹ đạo nhận được gồm 2 đoạn *parabol*, nối nhau bằng một đoạn thẳng.

Giả thiết $\dot{q}_i = \dot{q}_f = 0$ và thời gian tăng tốc và thời gian giảm tốc bằng nhau ($\ddot{q}$ có giá trị bằng nhau ở đoạn đầu và đoạn cuối). Các điều kiện trên dẫn đến quỹ đạo đối xứng với điểm giữa $q_m = (q_f - q_i)/2$ tại $t_m = t/2$.

Để đảm bảo quỹ đạo là hàm liên tục, vận tốc tại các điểm tiếp giáp đoạn parabol và đoạn thẳng không được nhảy bậc, nghĩa là:

$$\ddot{q}_c t_c = \frac{q_m - q_c}{t_m - t_c} \quad (4.3)$$

trong đó, q_c là giá trị mà biến khớp q đạt tới tại thời điểm kết thúc đoạn parabol t_c , với gia tốc $\ddot{q}_c$. Vì $\dot{q}(0) = 0$, nên

$$q_c = q_i + \frac{1}{2} \ddot{q}_c t_c^2 \quad (4.4)$$

Kết hợp (4.3) với (4.4), nhận được phương trình:

$$\ddot{q}_c t_c^3 - \ddot{q}_c t_f t_c + q_f - q_i = 0 \quad (4.5)$$

Nếu cho trước $\ddot{q}_c, t_f, q_i, q_f$ giải (4.5) trong khoảng $t_c \leq t_f/2$, nhận được:

$$t_c = \frac{t_f}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{t_f^2 \ddot{q}_c - 4(q_f - q_i)}{\ddot{q}_c}} \quad (4.6)$$

Để (4.6) có nghĩa, phải đảm bảo điều kiện:

$$|\ddot{q}_c| \geq \frac{4|q_f - q_i|}{t_f^2} \quad (4.7)$$

Nếu biểu thức trên nhận dấu bằng thì không có đoạn nằm ngang của vận tốc, và đồ thị vận tốc có dạng tam giác.

Như vậy, với các giá trị cho trước của q_i, q_f và t_f từ (4.7) tính được gia tốc $\ddot{q}_c$, sau đó tính t_c nhờ (4.6). Cuối cùng, quỹ đạo được xác định từ 3 đoạn:

$$q(t) = \begin{cases} q_i + \frac{1}{2} \ddot{q}_c t^2 & 0 \leq t \leq t_c \\ q_i + \ddot{q}_c t_c (t - t_c/2) & t_c \leq t \leq t_f - t_c \\ q_f - \frac{1}{2} \ddot{q}_c (t_f - t)^2 & t_f - t_c \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (4.8)$$

Chú ý rằng, áp dụng quy luật vận tốc hình thang không đảm bảo điều kiện tối ưu về năng lượng (4.1) như đạt được với quỹ đạo bậc 3. Nó tăng khoảng 12,5% so với giá trị tối ưu.

4.1.1.2. Chuyển động theo đường

Trong nhiều hoạt động, ví dụ hàn hồ quang, sơn, xếp dỡ vật liệu trong không gian có nhiều vật chướng ngại,... robot cần được điều khiển theo đường. Khi đó, số điểm cần xác định trên mỗi đoạn đường lớn hơn 2. Đó không chỉ là những điểm mà phân công tác phải đi qua, mà tại đó có thể phải không chế cả vận tốc và gia tốc chuyển động để đáp ứng yêu cầu

công nghệ. Các điểm như vậy được gọi là các *điểm chốt* (*path point*). Số điểm này nhiều hay ít là tùy theo yêu cầu công nghệ.

Bài toán đặt ra là xác định quỹ đạo qua N điểm chốt. Như vậy, mỗi biến khớp phải thỏa mãn N điều kiện ràng buộc. Để thực hiện điều đó, có thể nghĩ đến quỹ đạo dạng đa thức bậc $N-1$. Tuy nhiên, giải pháp này có các nhược điểm:

- Không thể khống chế được vận tốc tại điểm đầu và điểm cuối,
- Bậc của đa thức càng cao thì khả năng dao động càng lớn, ảnh hưởng xấu đến trạng thái công tác của robot,
- Độ chính xác tính toán các hệ số của đa thức giảm khi bậc của đa thức tăng,
- Hệ phương trình ràng buộc phức tạp và khó giải,
- Các hệ số của đa thức phụ thuộc tất cả các điểm. Vì vậy, khi cần sắp xếp lại một điểm thì cũng phải tính toán lại hoàn toàn.

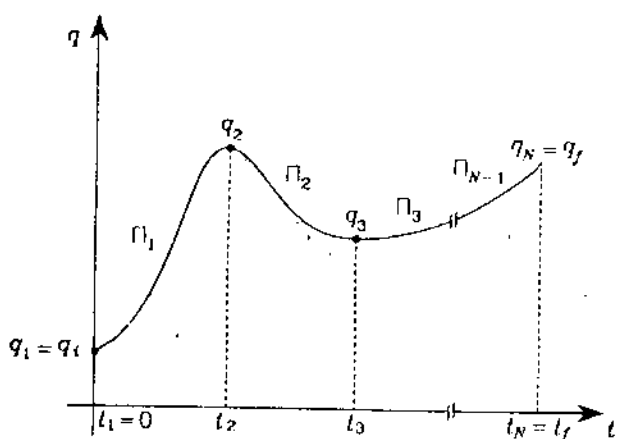
Có thể khắc phục các nhược điểm trên bằng cách thay thế quỹ đạo đa thức bằng một quỹ đạo "lái", trong đó một số đoạn đa thức bậc cao được thay thế bằng các đoạn đa thức bậc thấp hơn. Các đa thức thay thế này được gọi là *đa thức nội suy*.

Để đảm bảo tính liên tục của vận tốc tại các điểm chốt, bậc của đa thức nội suy *không thể nhỏ hơn 3*. Xét quy luật biến thiên theo thời gian của một biến khớp $q(t)$. Đường cong biến thiên của nó gồm $N-1$ đoạn đa thức nội suy bậc ba $\Pi_k(t)$, với $k = 1, \dots, N-1$. Hàm $q(t)$ nhận giá trị q_k tại thời điểm $t = t_k$ ($k = 1, \dots, N$). Tại điểm đầu ($t_1 = 0$), giá trị $q_1 = q_i$. Tại điểm cuối ($t_N = t_f$), giá trị $q_N = q_f$. Các giá trị q_k chính là đại diện cho các điểm chốt của quỹ đạo (hình 4.3).

Quỹ đạo được thiết kế cần phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc nhất định. Có thể xem xét 3 trường hợp sau:

- Giá trị vận tốc $\dot{q}(t)$ tại các điểm chốt xác định,
- Giá trị $\dot{q}(t)$ tại các điểm chốt được tính theo các chỉ tiêu nhất định,
- Đảm bảo tính liên tục của gia tốc $\ddot{q}(t)$ tại các điểm chốt.

Sau đây sẽ trình bày chi tiết hơn về mỗi trường hợp.



Hình 4. 3: Quỹ đạo với các điểm chốt và các đa thức nội suy

• **Đa thức nội suy với giá trị cho trước của vận tốc tại các điểm chốt**

Có 2 điều kiện phải được đảm bảo:

- Các đa thức nội suy phải đi qua các điểm chốt;
- Vận tốc tại các điểm chốt phải bằng giá trị định trước.

Nếu trên quỹ đạo có N điểm chốt thì số đa thức bậc ba, nội suy $\Pi_k(t)$ nối lần lượt các điểm q_k và q_{k+1} là $N-1$. Mỗi đa thức phải thỏa mãn các điều kiện sau:

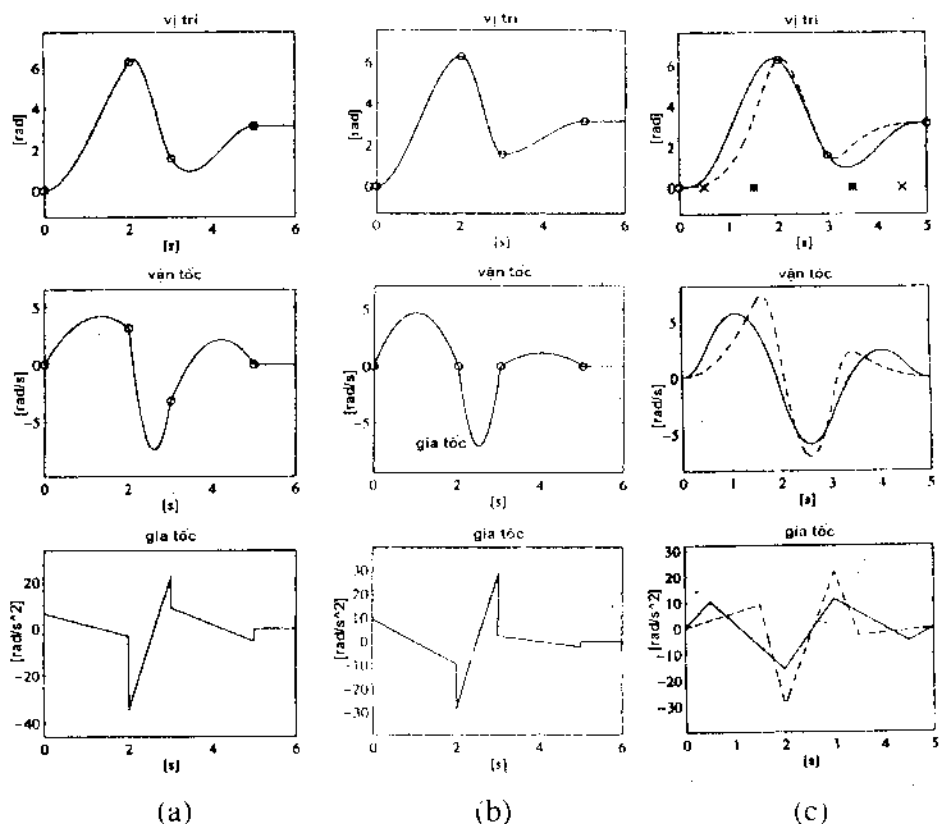
$$\left. \begin{aligned} \Pi_k(t_k) &= q_k \\ \Pi_k(t_{k+1}) &= q_{k+1} \\ \dot{\Pi}_k(t_k) &= \dot{q}_k \\ \dot{\Pi}_k(t_{k+1}) &= \dot{q}_{k+1} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Mỗi đa thức nội suy (bậc 3) có 4 hệ số. Chúng được xác định bằng cách giải các hệ phương trình dạng (4.9). Cần giải $N-1$ hệ phương trình để tìm $N-1$ bộ hệ số.

Thông thường giá trị vận tốc tại điểm đầu và tại điểm cuối được lấy bằng 0 ($\dot{q}_1 = \dot{q}_N = 0$). Tính liên tục của vận tốc tại các điểm chốt được đảm bảo bởi điều kiện:

$$\dot{\Pi}_k(t_{k+1}) = \dot{\Pi}_{k+1}(t_{k+1}) \quad \text{với } k = 1, \dots, N-2$$

Hình 4.4a là biểu đồ vị trí, vận tốc và gia tốc với các số liệu sau: $q_1 = 0$, $q_2 = 2\pi$, $q_3 = \pi/2$, $q_4 = \pi$, $t_1 = 0$, $t_2 = 2$, $t_3 = 3$, $t_4 = 5$, $\dot{q}_1 = 0$, $\dot{q}_2 = \pi$, $\dot{q}_3 = -\pi$, $\dot{q}_4 = 0$. Ta thấy, chỉ có vận tốc là liên tục, còn gia tốc không liên tục.



Hình 4.4: Quỹ đạo với đa thức được xác định bằng 3 điều kiện khác nhau

• Đa thức nội suy với giá trị vận tốc tính toán tại các điểm chốt

Trong trường hợp này, giá trị vận tốc tại các điểm chốt được tính từ các điều kiện nhất định. Bằng cách nối các điểm chốt bằng các đoạn thẳng, vận tốc tại các điểm chốt được tính theo quy tắc sau:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= 0 \\ \dot{q}_k &= \begin{cases} 0 & \text{khi } \text{sgn}(v_k) \neq \text{sgn}(v_{k-1}) \\ \frac{1}{2}(v_k + v_{k-1}) & \text{khi } \text{sgn}(v_k) = \text{sgn}(v_{k-1}) \end{cases} \\ \dot{q}_N &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

trong đó, $v_k = (q_k - q_{k-1}) / (t_k - t_{k-1})$ biểu diễn độ dốc của đoạn thẳng trong khoảng thời gian $[t_k - t_{k-1}]$.

Hình 4. 4b minh hoạ trường hợp nói trên với các số liệu sau: $q_1 = 0$, $q_2 = 2\pi$, $q_3 = \pi/2$, $q_4 = \pi$, $t_1 = 0$, $t_2 = 2$, $t_3 = 3$, $t_4 = 5$, $\dot{q}_1 = 0$, $\dot{q}_4 = 0$. Ta thấy, vận tốc tiến tới giá trị 0 tại các điểm chốt.

• **Đa thức nội suy với gia tốc liên tục tại các điểm chốt**

Cả 2 trường hợp trên đều không đảm bảo được tính liên tục của gia tốc tại các điểm chốt. Muốn đảm bảo tính liên tục của cả đường chuyển động lẫn vận tốc và gia tốc thì đa thức nội suy giữa 2 điểm chốt liên nhau phải thoả mãn các điều kiện ràng buộc sau:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_{k-1}(t_k) &= q_k \\ \Pi_{k-1}(t_k) &= \Pi_k(t_k) \\ \dot{\Pi}_{k-1}(t_k) &= \dot{\Pi}_k(t_k) \\ \ddot{\Pi}_{k-1}(t_k) &= \ddot{\Pi}_k(t_k) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

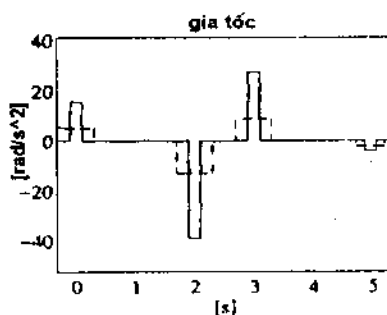
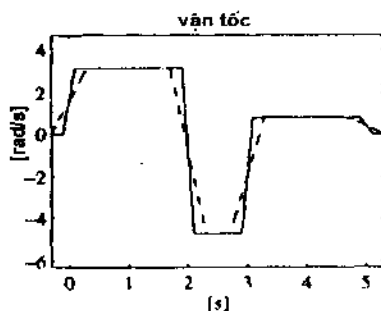
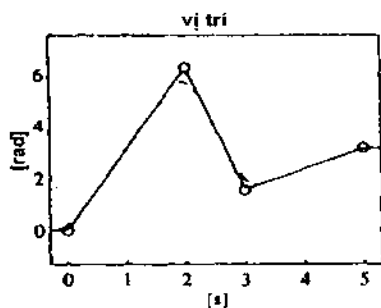
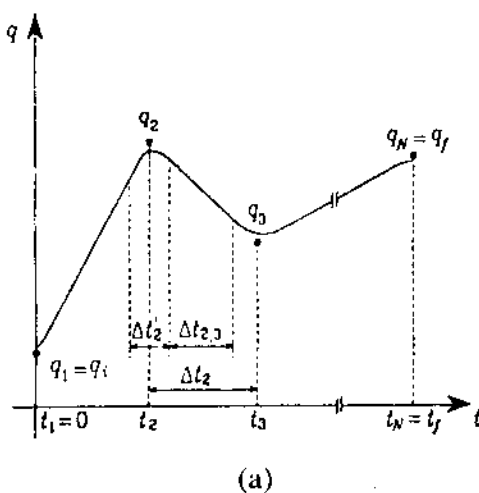
Muốn giải hệ phương trình này phải dùng thuật giải đặc biệt mà khuôn khổ có hạn của tài liệu này không cho phép trình bày. Độc giả có thể tham khảo trong tài liệu [5]. Kết quả, nhận được quỹ đạo trơn với đường chuyển động, vận tốc và gia tốc liên tục.

Hình 4. 4c minh hoạ quỹ đạo tính bằng phương pháp nói trên với các số liệu sau: $q_1 = 0$, $q_3 = 2\pi$, $q_4 = \pi/2$, $q_6 = \pi$, $t_1 = 0$, $t_3 = 2$, $t_4 = 3$, $t_6 = 5$, $\dot{q}_1 = 0$, $\dot{q}_6 = 0$. Hai cặp điểm ảo khác nhau được chọn để so sánh là $t_2 = 0,5$; $t_5 = 4,5$ (đồ thị nét liền) và $t_2 = 1,5$; $t_5 = 3,5$ (nét đứt). Ta thấy, đồ thị vận tốc là đường bậc 2, còn gia tốc là đường bậc 1. Mặt khác, cặp điểm ảo thứ hai (tương ứng với nét đứt) dẫn đến gia tốc lớn hơn vì các điểm trung gian gần nhau hơn.

• **Nội suy đường bậc nhất bằng các đoạn parabol**

Một trong những dạng đơn giản nhất của quỹ đạo tay máy gồm các đoạn thẳng, nối với nhau bằng các đoạn parabol tại các điểm chốt.

Giả sử trên quỹ đạo có N điểm chốt, ứng với thời điểm t_k , tại đó biến khớp đạt giá trị q_k với $k = 1, \dots, N$. Quỹ đạo nguyên thủy gồm các đoạn thẳng nối với nhau tại các điểm chốt. Để đảm bảo tính liên tục của vận tốc, tại các điểm chốt (gãy khúc), đường chuyển động được nối bằng các đoạn parabol (hình 4. 5a).



(b)

Hình 4. 5: Nội suy quỹ đạo bậc nhất bằng các đoạn parabol

Ký hiệu $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ là khoảng thời gian giữa q_k và q_{k+1} ; $\Delta t_{k,k+1}$ là khoảng thời gian tương ứng với đoạn thẳng giữa hai điểm q_k và q_{k+1} ; $\dot{q}_{k,k+1}$ là vận tốc không đổi tương ứng với khoảng thời gian $\Delta t_{k,k+1}$; $\ddot{q}_k$ là gia tốc tương ứng với đoạn nối parabol và khoảng thời gian $\Delta t'_k$. Giả sử giá trị của các đại lượng q_k , Δt_k , $\Delta t'_k$ được cho trước. Vận tốc và gia tốc tại các điểm chốt được tính như sau:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{k+1,k} &= \frac{q_k - q_{k-1}}{\Delta t_{k-1}} \\ \ddot{q}_k &= \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{\Delta t'_k}\end{aligned}\quad (4.12)$$

Muốn cho các điểm đầu và điểm cuối của quỹ đạo đạt giá trị mong muốn, nghĩa là $q_1 = q_i$ và $q_N = q_f$ thì phải kéo dài thêm thời gian: $t_N - t_1 + (\Delta t'_1 + \Delta t'_N)/2$, đồng thời vận tốc tại các điểm đầu và điểm cuối $\dot{q}_{0,1} = \dot{q}_{N,N+1} = 0$. Chú ý rằng quỹ đạo nhận được không đi qua các điểm chốt mà chỉ đi gần chúng. Gia tốc tại các cung cong ($\ddot{q}_k$) càng nhỏ thì quỹ đạo càng đi sát các điểm chốt hơn. Hình 4.5b minh họa quỹ đạo với $q_1 = 0, q_2 = 2\pi, q_3 = \pi/2, q_4 = \pi, t_1 = 0, t_2 = 2, t_3 = 3, t_4 = 5, \dot{q}_1 = 0, \dot{q}_4 = 0$. Hai giá trị của $\Delta t'_k$ được dùng là $\Delta t'_k = 0,2$ (nét liền) và $\Delta t'_k = 0,6$ (nét đứt). Ta cũng thấy trong trường hợp thứ hai (gia tốc lớn), quỹ đạo đi xa các điểm chốt hơn vì phải trả giá cho gia tốc lớn.

4.1.2. Quỹ đạo trong không gian công tác

Quỹ đạo trong không gian khớp mô tả diễn tiến theo thời gian của các biến khớp $q(t)$, sao cho phân công tác di chuyển thẳng từ điểm ban đầu đến điểm cuối hoặc đi qua các điểm trung gian. Thực tế, khi thiết kế quỹ đạo trong không gian khớp khó có thể đảm bảo chuyển động chính xác của phân công tác, vì ảnh hưởng phi tuyến khi chuyển đổi các quan hệ động học từ không gian khớp sang không gian công tác. Muốn cho chuyển động của phân công tác theo đúng lộ trình đã định trong không gian công tác, cần thiết kế quỹ đạo trực tiếp trong chính không gian này. Quỹ đạo có thể được xây dựng bằng cách *nội suy đường dịch chuyển* qua các điểm chốt hoặc xác lập bằng *giải tích* hàm chuyển động.

Trong cả hai trường hợp, diễn tiến thời gian của các biến trong không gian công tác được dùng để xác định giá trị của các biến khớp theo thời gian thực, bằng thuật toán nghịch của động học tay máy. Vì các giá trị này là chuẩn đầu vào của hệ điều khiển, nên người ta thường dùng phép *vi nội suy đường thẳng (linear microinterpolation)*. Bằng cách đó có thể tăng tần số cập nhật chuẩn đầu vào để cải thiện đặc tính động lực học của hệ thống.

Ký hiệu x là biến, dùng để miêu tả đường dịch chuyển của phân công tác trong không gian công tác. Diễn tiến thời gian của biến đó có thể được chỉ định chính xác hơn nhờ N điểm trung gian (điểm chốt), xác định giá trị của biến x tại các thời điểm t_k , với $k = 1, \dots, N$. Tương tự như đã trình bày ở phần trên, quỹ đạo có thể được hình thành bằng cách nội suy

hàm vector giữa các điểm chốt. Hàm đó có thể được xác định nhờ áp dụng một trong những phương pháp nội suy đã trình bày ở mục 4.1.1.2.

4.1.2.1. Các nguyên tố của đường dịch chuyển

Một đường dịch chuyển trong không gian có thể được mô tả dưới dạng tham số bằng tập hợp các phần tử tối giản (*các nguyên tố - path primitives*). Giả sử p là vector (3×1) và $f(\sigma)$ là một hàm vector liên tục trong khoảng $[\sigma_i, \sigma_f]$. Xét phương trình

$$p = f(\sigma) \quad (4.13)$$

Khi σ thay đổi trong khoảng $[\sigma_i, \sigma_f]$ thì các giá trị tương ứng của p hình thành một đường trong không gian. Phương trình (4.13) là biểu diễn theo tham số của đường Γ , trong đó đại lượng vô hướng σ là tham số. Khi σ tăng, điểm p di chuyển trên đường Γ theo một hướng nhất định. Dạng của Γ và hướng tăng của nó do hàm $f(\sigma)$ quyết định. Đường được gọi là *kín* nếu $p(\sigma_f) = p(\sigma_i)$. Nếu $p(\sigma_f) \neq p(\sigma_i)$ thì có đường *hở*.

Trên một đường Γ có hướng xác định, cho một điểm p_i cố định làm gốc. Ta định nghĩa toạ độ s của một điểm bất kỳ trên Γ là độ dài cung từ p_i đến p . Mỗi điểm p trên Γ tương ứng với một giá trị toạ độ s . Vì vậy, s có thể được dùng như là một tham số để biểu diễn đường dịch chuyển Γ :

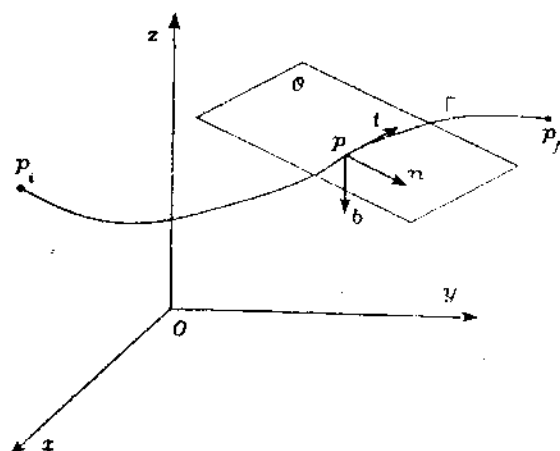
$$p = f(s) \quad (4.14)$$

Xét một đường Γ được biểu diễn theo tham số s như (4.14). Tại mỗi điểm p trên đó có thể xác định 3 vector đơn vị đặc trưng cho đường đó. Hướng của các vector đơn vị phụ thuộc vào đặc tính của đường, còn chiều của chúng phụ thuộc vào chiều biến thiên của (4.14). Cách xác định các vector như sau:

- Vector thứ nhất, ký hiệu là t , là vector tiếp tuyến với Γ tại p , hướng theo chiều tăng của s .

- Vector thứ hai là vector pháp tuyến chính, ký hiệu là n . Nó vuông góc với vector t tại p và nằm trong *mặt phẳng tiếp* với Γ tại p (mặt phẳng O trên hình 4.6. Đó là vị trí giới hạn của mặt phẳng chứa vector tiếp tuyến t và điểm $p' \in \Gamma$ khi p' tiến dọc theo Γ đến p . Chiều của vector n được xác định sao cho trong vùng lân cận của p , đường Γ nằm cùng phía với n so với mặt phẳng chứa t và n .

Hình 4. 6: Biểu diễn đường dịch chuyển dưới dạng tham số



- Vector thứ ba, ký hiệu là b , hình thành với t và n một tam diện thuận, nghĩa là chiều của (t, n, b) được xác định theo quy tắc bàn tay phải.

Theo định nghĩa về tọa độ s của điểm p trên đường dịch chuyển Γ , ta có các quan hệ sau:

$$\left. \begin{aligned} t &= \frac{dp}{ds} \\ n &= \frac{1}{\left\| \frac{d^2 p}{ds^2} \right\|} \frac{d^2 p}{ds^2} \\ b &= t \times n \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Sau đây là hai dạng nguyên tố điển hình, thường dùng nhất khi xây dựng quỹ đạo trong không gian công tác.

- **Đoạn thẳng trong không gian công tác**

Xét đoạn thẳng nối hai điểm p_i và p_f . Nó được biểu diễn dưới dạng tham số bởi phương trình sau:

$$p(s) = p_i + \frac{s}{\|p_f - p_i\|} (p_f - p_i) \quad (4.16)$$

Chú ý rằng $p(0) = p_i$ và $p(\|p_f - p_i\|) = p_f$. Vì vậy hướng của Γ đi từ p_i đến p_f .

Ví phân (4.16) theo s được:

$$\begin{aligned}\frac{dp}{ds} &= \frac{l}{\|p_j - p_i\|} (p_j - p_i) \\ \frac{d^2 p}{ds^2} &= 0\end{aligned}\quad (4.17)$$

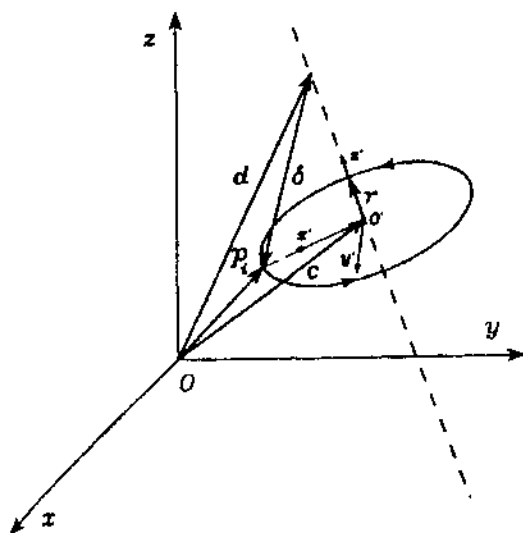
Trong trường hợp này không thể xác định hệ tọa độ (t, n, b) một cách đơn trị.

• **Đường tròn trong không gian công tác**

Giả sử có đường tròn trong không gian (hình 4. 7), được xác định bởi:

- Vector đơn vị r nằm theo trục đường tròn,
- Vector vị trí d của một điểm trên trục đường tròn,
- Vector vị trí p_i của một điểm nằm trên đường tròn.

Hình 4. 7: Biểu diễn đường tròn dưới dạng tham số



Ký hiệu $\delta = p_i - d$. Nếu p_i không nằm trên trục, nghĩa là đường tròn không suy biến thành một điểm, thì phải có quan hệ:

$$|\delta^T r| < \|\delta\|$$

Khi đó có thể xác định tâm của đường tròn thông qua vector sau:

$$c = d + (\delta^T r)r \quad (4.18)$$

Cần biểu diễn đường tròn dưới dạng hàm của tọa độ s . Để cho hàm này đơn giản, cần chọn một hệ tọa độ thích hợp $O'-x'y'z'$, trong đó O' trùng với tâm đường tròn; trục x' hướng theo chiều vector $p_i - c$; trục z' hướng theo r , còn y' được xác định từ x' và z' bằng quy tắc bàn tay phải. Tọa độ điểm p trong hệ tọa độ này được biểu diễn qua vector

$$p'(s) = \begin{bmatrix} \rho \cos(s / \rho) \\ \rho \sin(s / \rho) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

trong đó $\rho = \|p_i - c\|$ là bán kính đường tròn và điểm p_i là gốc tọa độ. Khi thay đổi hệ tọa độ thì phương trình biểu diễn đường tròn trở thành

$$p(s) = c + Rp'(s) \quad (4.20)$$

trong đó R là ma trận quay của hệ tọa độ $O'-x'y'z'$ so với hệ $O-xyz$. Trong chương 2, chúng ta đã biểu diễn ma trận này dưới dạng

$$R = [x' \ y' \ z'].$$

Vi phân (4.20) theo s ta nhận được các vector vận tốc và gia tốc dưới dạng hàm số của tọa độ s như sau:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{ds} &= R \begin{bmatrix} -\sin(s / \rho) \\ \cos(s / \rho) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \frac{d^2 p}{ds^2} &= R \begin{bmatrix} -\cos(s / \rho) / \rho \\ -\sin(s / \rho) / \rho \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.1.2.2. Vị trí và hướng trên quỹ đạo

Quỹ đạo trong không gian công tác là tổ hợp theo trình tự nhất định của các nguyên tố đã trình bày ở trên. Thiết kế quỹ đạo trong không gian công tác có nghĩa là xác định hàm $x(t)$, biểu diễn thế của phần công tác x theo thời gian t , trong đó t biến thiên trong khoảng từ t_i đến t_f . Thế của một vật trong không gian có 2 yếu tố: vị trí và hướng. Khi vật chuyển động dọc theo đường dịch chuyển, không chỉ vị trí mà cả hướng của nó thay đổi theo thời gian. Vì vậy, "quỹ đạo" ở đây phải hiểu theo nghĩa rộng, gồm cả thành phần mô tả vị trí và thành phần mô tả hướng. Trong

chương 2 chúng ta đã biểu diễn thế của phân công tác qua vị trí và hướng của nó như sau:

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix}$$

Bài toán được tách thành 2 phần: biểu diễn vị trí và hướng của phân công tác.

• Vị trí của phân công tác

Cho $p = f(s)$ là vector 3×1 , biểu diễn đường dịch chuyển Γ dưới dạng hàm của tọa độ s . Gốc tọa độ của phân công tác di chuyển từ điểm p_i đến điểm p_f trong khoảng thời gian t_f . Để đơn giản, đặt gốc tọa độ tại điểm p_i , hướng của Γ đi từ p_i đến p_f . Tọa độ của điểm p bất kỳ trên Γ (chính là độ dài cung s giữa gốc p_i đến p) là hàm của thời gian t , nghĩa là: $s = s(t)$. Vì $p = f(s)$, ta có thể tính vận tốc di chuyển của điểm p trên đường Γ bằng cách lấy đạo hàm của p theo t :

$$\dot{p} = \dot{s} \frac{dp}{ds} = \dot{s} t$$

trong đó t là vector tiếp tuyến của đường cong tại p . Như vậy, $\dot{s}$ biểu diễn độ lớn của vector vận tốc tại p . Giá trị của $\dot{p}$ biến thiên từ 0 (khi $t = 0$) biến thiên theo quy luật parabol hoặc hình thang, tùy theo chúng ta sử dụng phép nội suy bậc 3 hay bậc nhất, và trở lại bằng 0 khi $t = t_f$.

Nếu đường dịch chuyển Γ là đoạn thẳng, được biểu diễn bởi (4.16) thì vận tốc và gia tốc của điểm p được tính như sau:

$$\dot{p} = \frac{\dot{s}}{\|p_f - p_i\|} (p_f - p_i) = \dot{s} t$$

vận tốc vận tốc hướng từ từ p_i đến p_f

$$\ddot{p} = \frac{\ddot{s}}{\|p_f - p_i\|} (p_f - p_i) = \ddot{s} t \text{ trong khoảng } t \in [0, t_f] \quad (4.22)$$

Nếu đường cong Γ là đường tròn, từ (4.21) ta nhận được vận tốc và gia tốc:

ta có thể biểu diễn vận tốc và gia tốc dưới dạng vector như sau: vận tốc $\dot{p} = R \begin{bmatrix} \dot{s} \sin(s/R) \\ \dot{s} \cos(s/R) \\ 0 \end{bmatrix}$ và gia tốc $\ddot{p} = R \begin{bmatrix} \ddot{s} \sin(s/R) \\ \ddot{s} \cos(s/R) \\ -\dot{s}^2/R \end{bmatrix}$ trong đó R là bán kính của đường tròn, $\dot{s}$ và $\ddot{s}$ là vận tốc và gia tốc theo trục s của đường tròn. Vận tốc và gia tốc theo trục s có thể biểu diễn dưới dạng vector như sau:

$$\ddot{\mathbf{p}} = R \begin{bmatrix} -\dot{s}^2 \cos(s/\rho)/\rho - \ddot{s} \sin(s/\rho) \\ -\dot{s}^2 \sin(s/\rho)/\rho + \ddot{s} \cos(s/\rho) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Chú ý rằng vector vận tốc hướng dọc theo vector t , còn gia tốc có 2 thành phần: thành phần *hướng tâm* theo phương n , thành phần *tiếp tuyến* theo phương t .

• Hướng của phần công tác

Hướng của phần công tác, như đã nghiên cứu trong chương 2, được mô tả thông qua ma trận quay của hệ toạ độ gắn trên nó so với hệ toạ độ cơ sở. Trong bài toán quỹ đạo chỉ phải quan tâm rằng ma trận quay này là hàm của thời gian. Chúng ta cũng đã biết, ma trận quay có 3 cột, tương ứng với 3 vector đơn vị (n, s, a) của hệ toạ độ hiện thời. Tuy nhiên ứng dụng trực tiếp ma trận quay để mô tả hướng không có lợi, vì phải giải quyết các liên kết thừa. Có trường hợp, ví dụ khi nội suy đường thẳng, các vector đơn vị n, s, a không thể đảm bảo tính vuông góc của chúng tại mọi thời điểm. Để khắc phục khó khăn trên, người ta dùng phép mô tả tối thiểu của hướng bằng các bộ ba góc $\phi = (\varphi, \vartheta, \psi)$ như góc Euler *XYZ* hoặc góc *RPY*.

Khi phần công tác chuyển động dọc theo đường dịch chuyển, hệ toạ độ ϕ thay đổi từ giá trị ϕ_i đến ϕ_f . Tương tự như đối với vị trí, có thể dùng phép nội suy bậc 3 hoặc bậc nhất để mô tả hướng của quỹ đạo. Khi đó, như đã chỉ ra trong mục 4.1.1.2, vận tốc góc ω (cố quan hệ bậc nhất với $\dot{\phi}$) sẽ là hàm liên tục đối với thời gian.

Vì vậy, với ϕ_i và ϕ_f cho trước, ta cũng xác định được hướng, vận tốc góc và gia tốc thay đổi hướng của phần công tác như sau:

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi_i + \frac{s}{\|\phi_f - \phi_i\|} (\phi_f - \phi_i) \\ \dot{\phi} &= \frac{\dot{s}}{\|\phi_f - \phi_i\|} (\phi_f - \phi_i) \\ \ddot{\phi} &= \frac{\ddot{s}}{\|\phi_f - \phi_i\|} (\phi_f - \phi_i) \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Một phương pháp nữa để xây dựng quỹ đạo về hướng là vận dụng phép quay quanh trục bất kỳ, đã được trình bày trong chương 2. Nếu cho trước 2 hệ toạ độ để các cố gốc trùng nhau thì luôn luôn có thể xác định vector đơn vị r sao cho nhận được hệ thứ hai bằng cách quay hệ thứ nhất một góc ϑ_f quanh trục r .

Ký hiệu R_i và R_f là hai ma trận quay của hệ ở vị trí ban đầu $O_i-x_iy_iz_i$ và ở vị trí cuối $O_f-x_fy_fz_f$. Chúng ta đã có quan hệ $R_f = R_i R'_f$ trong đó

$$R'_f = R_i^T R_f = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Nếu dùng ma trận $R'_f(t)$ để mô tả phép quay từ R_i đến R_f thì phải có $R'_f(0) = I$ và $R'_f(t_f) = R'_f$. Như vậy có thể coi R'_f là phép quay quanh trục cố định trong không gian. Góc quay ϑ_f và vector đơn vị r của trục quay có thể tính theo các công thức sau:

$$\vartheta_f = \cos^{-1} \left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33}}{2} \right)$$

$$r = \frac{1}{2 \sin \vartheta_f} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad \text{với } \sin \vartheta_f \neq 0 \quad (4.25)$$

Ma trận $R(t)$ có thể được viết thành $R'_f(\vartheta(t))$ và tính nhờ công thức (2.16). Nếu xác định được quy luật $\vartheta(t)$, với $\vartheta(0) = 0$ và $\vartheta(t_f) = \vartheta_f$ và tính được các thành phần r_x, r_y, r_z của vector đơn vị r của trục cố định thì có thể xác định ma trận quay tại thời điểm t bất kỳ:

$$R(t) = R_i R'_f(\vartheta(t))$$

Ma trận trên mô tả hướng của phần công tác so với hệ cơ sở dưới dạng hàm của thời gian t .

Sau khi đường dịch chuyển được xác định trong không gian công tác nhờ các hàm $p(t)$ và $\phi(t)$ hoặc $R(t)$ thì, bằng thuật toán động học ngược, có thể thiết lập quỹ đạo tương ứng trong không gian khớp $q(t)$.

4.2. ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG

Sau khi nhận được số liệu đầu vào tương ứng với quỹ đạo của phần công tác hay của khớp, hệ thống điều khiển phải điều khiển robot chuyển

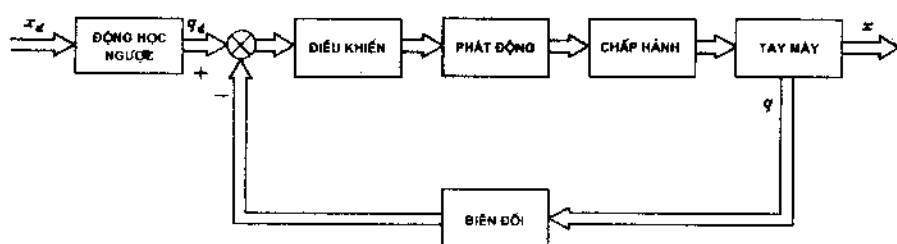
động theo đúng quỹ đạo đặt ra. Vấn đề điều khiển robot nói chung rất phức tạp, vì ngoài việc đảm bảo thực hiện quỹ đạo một cách chính xác, còn phải giải quyết vấn đề tương tác với đối tượng-công tác. Tùy theo yêu cầu sử dụng robot, có rất nhiều kỹ thuật điều khiển khác nhau được ứng dụng, chẳng hạn:

- Điều khiển tự do và điều khiển có tương tác với đối tượng.
- Điều khiển trong không gian khớp và điều khiển trong không gian làm việc.
- Điều khiển phân tán và điều khiển tập trung.
- Điều khiển điểm - điểm và điều khiển theo đường.

Ngoài ra, kỹ thuật điều khiển còn phụ thuộc kết cấu phần cơ khí của robot, ví dụ sử dụng hệ tọa độ đề - các hay hệ tọa độ khác, sử dụng động cơ chấp hành kiểu nào, có dùng truyền động cơ khí phụ hay không. Truyền động cơ khí phụ cho phép sử dụng vùng có lợi nhất trên đặc tuyến của động cơ, mở rộng được vùng tuyến tính của nó,... nhưng lại chịu các tác động phụ, như biến dạng, tổn hao năng lượng do ma sát, khe hở, các lực và momen phát sinh, như lực ly tâm, dao động, lực coriolis,...

Sự lựa chọn giữa điều khiển trong không gian công tác hay trong không gian khớp cũng là vấn đề khó. Nhiệm vụ của robot (tức là của phần công tác) được thiết lập trong không gian công tác, trong khi tác động điều khiển lại đặt vào các khớp nên biến khớp là đối tượng điều khiển trực tiếp. Vì vậy bài toán động học ngược bao giờ cũng phải được giải, nhưng vị trí của nó khác nhau giữa trường hợp điều khiển trong không gian khớp và điều khiển trong không gian công tác.

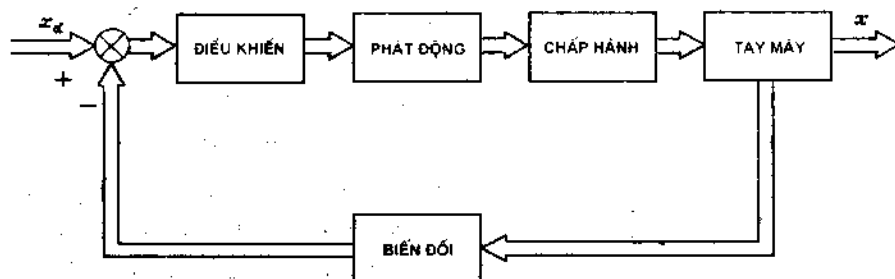
Khi điều khiển trong không gian khớp, bài toán động học ngược được giải trước để chuyển các thông số từ không gian công tác sang không gian khớp (hình 4. 8).



Hình 4. 8: Sơ đồ điều khiển trong không gian khớp

Mạch điều khiển nhận giá trị đặt của các biến khớp (có thể qua hệ số chuyển đổi nào đó) và điều khiển khớp theo sát diễn tiến thời gian của biến khớp. Mạch điều khiển kiểu này đơn giản hơn, nhưng độ chính xác bị hạn chế do chính đối tượng cần giám sát trực tiếp là phần công tác lại nằm ngoài mạch điều khiển.

Hệ điều khiển trong không gian công tác (hình 4.9) nhận trực tiếp thông số của không gian khớp làm số liệu đầu vào, bài toán ngược được giải trong mạch phản hồi, nên về lý thuyết thì có vẻ chính xác hơn. Tuy nhiên, nó có hai nhược điểm cơ bản. Thứ nhất, hệ điều khiển phức tạp hơn. Thứ hai, hệ thống đo thường gắn lên các khớp, giám sát trực tiếp các thông số của khớp. Muốn chuyển chúng sang không gian công tác thì phải thực hiện các phép tính động học thuận và đó cũng là nguồn phát sinh sai số.



Hình 4. 9: Sơ đồ hệ điều khiển trong không gian công tác

4.2.1. Điều khiển trong không gian khớp

Trong chương 3 chúng ta đã xây dựng được phương trình tổng quát biểu diễn chuyển động của tay máy trong không gian khớp. Nếu bỏ qua lực tương tác với môi trường (giả thiết tay máy chuyển động không tải) và lực ma sát tĩnh (do khó mô hình hoá) thì phương trình có dạng sau:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F, \dot{q} + g(q) = \tau. \quad (4.26)$$

Muốn xây dựng hệ điều khiển chuyển động của tay máy phải xác định n thành phần của lực tổng quát (nếu là khớp trượt) hoặc momen tổng quát (nếu là khớp quay), sao cho quỹ đạo thực $q(t)$ và quỹ đạo mong muốn $q_d(t)$ càng gần nhau càng tốt, nghĩa là chúng ta mong muốn

$$q(t) = q_d(t)$$

Ký hiệu q_m là vector chuyển vị của cơ cấu phát động, K_r là tỷ số truyền của truyền động cơ khí. Giả thiết bỏ qua biến dạng và khe hở trong truyền động cơ khí, chúng ta có quan hệ

$$q_m = K_r q \quad (4.27)$$

Tương tự, ký hiệu τ_m là vector momen do cơ cấu phát động sinh ra, ta cũng có

$$\tau_m = K_r^{-1} \tau \quad (4.28)$$

Để ý rằng ma trận quán tính $B(q)$ có thành phần không đổi $\bar{B}$ biểu thị quán tính trung bình của mỗi khớp và thành phần phụ thuộc cấu hình của khớp $\Delta B(q)$:

$$B(q) = \bar{B} + \Delta B(q) \quad (4.29)$$

Thay các biểu thức (4.27) đến (4.29) vào (4.26), ta được:

$$\tau_m = K_r^{-1} \bar{B} K_r^{-1} \ddot{q}_m + F_m \dot{q}_m + d \quad (4.30)$$

trong đó

$$F_m = K_r^{-1} F_v K_r^{-1} \quad (4.31)$$

biểu thị ma trận các hệ số ma sát nhớt quanh trục động cơ và

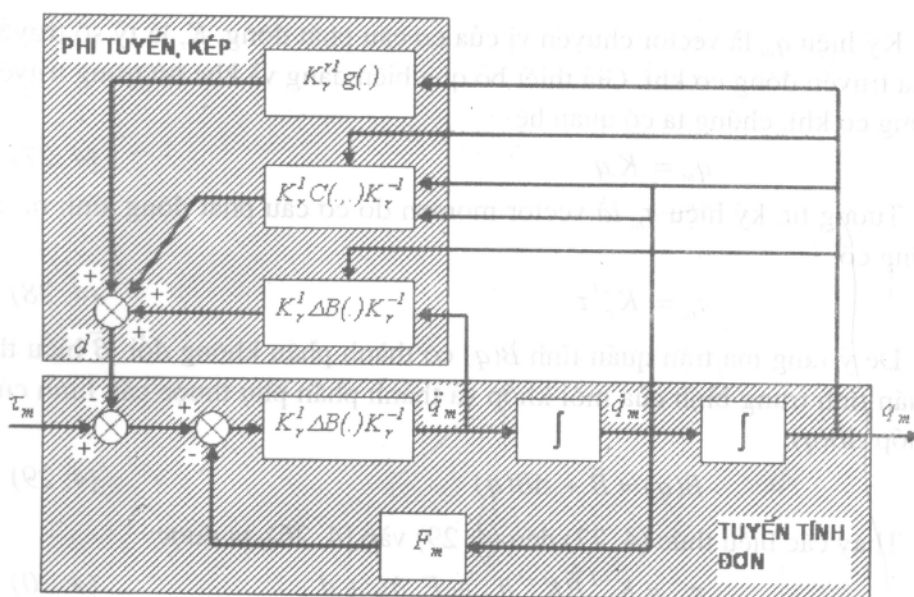
$$d = K_r^{-1} \Delta B(q) K_r^{-1} \ddot{q}_m + K_r^{-1} C(q, \dot{q}) K_r^{-1} \dot{q}_m + K_r^{-1} g(q) \quad (4.32)$$

biểu thị thành phần phụ thuộc cấu hình của các khớp.

Hình 4.10 là sơ đồ khối minh họa cho phương trình động học điều khiển tay máy (4.30). Nó gồm 2 bộ phận: một bộ phận nhận τ_m làm đại lượng vào, q_m làm đại lượng ra. Giữa chúng có quan hệ *tuyến tính* và *đơn* (*linear and decoupled*), vì mỗi thành phần của τ_m chỉ ảnh hưởng đến một thành phần của q_m . Bộ phận thứ hai nhận đại lượng vào là q_m , $\dot{q}_m$, $\ddot{q}_m$ và d làm đại lượng ra với quan hệ *phi tuyến* và *kép* (*nonlinear and coupled*).

Dựa vào sơ đồ trên có thể đề xuất một số thuật toán điều khiển với các mô hình động lực học khác nhau.

Trường hợp đơn giản nhất xảy ra khi hệ số giảm tốc lớn, với sự hạn chế về vận tốc và gia tốc. Khi đó, hệ thống được xem là khớp điều khiển đơn (*single joint servo*), còn đại lượng d được coi là nhiễu. Điều đó dẫn đến kết cấu điều khiển phân tán, trong đó các khớp được coi là độc lập với nhau. Bộ điều khiển phải đảm bảo khả năng chống nhiễu cao và khả năng "bám" quỹ đạo tốt. Về thực chất, hệ điều khiển này làm việc theo sai số giữa giá trị ra và giá trị cần điều khiển.



Hình 4. 10: Sơ đồ quan hệ động lực học của tay máy

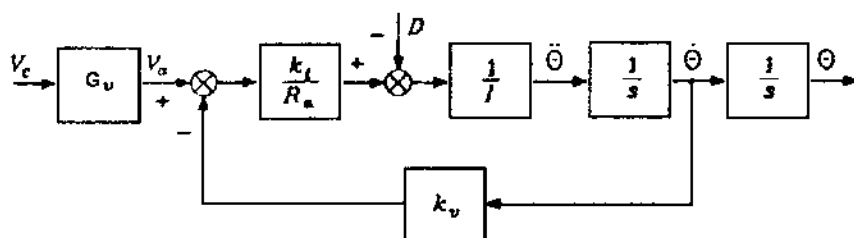
Trường hợp thứ hai, khi đòi hỏi vận tốc cao, dùng hệ thống truyền động trực tiếp ($K_r = I$), thì các thành phần phi tuyến d có ảnh hưởng nhiều, sai số quỹ đạo sẽ lớn hơn. Trong hệ thống phải có bộ phận bù cho các thành phần phi tuyến bằng cách tạo ra *momen bù*. Đó là giải pháp tích cực, vì nó nhằm loại trừ nguyên nhân sai số chứ không phải hạn chế ảnh hưởng của chúng. Điều đó dẫn đến thuật toán điều khiển tập trung.

Như vậy, tùy theo kiểu điều khiển mà bộ phận phát động có vai trò khác nhau. Đối với hệ điều khiển phân tán, bộ phát động (*actuator*) đóng vai trò máy phát được điều khiển theo vận tốc (*velocity-controlled generator*). Trong hệ điều khiển tập trung, nó được coi là máy phát được điều khiển theo momen (*torque-controlled generator*).

Cả hai trường hợp trên đều sử dụng kỹ thuật điều khiển theo sai số giữa quỹ đạo thực và quỹ đạo yêu cầu, không phân biệt dùng *liên hệ ngược* hay *liên hệ thuận*. Dù với mô hình động lực học nào đi nữa thì các hệ thống thực cũng phải được đơn giản hoá bằng cách nào đó, ví dụ bỏ qua ma sát tĩnh, khe hở, biến dạng đàn hồi, sai số chế tạo,... trong hệ thống.

4.2.2. Điều khiển độc lập

Trường hợp đơn giản nhất trong điều khiển robot là mỗi khớp được điều khiển hoàn toàn độc lập với các khớp khác, và hệ điều khiển chỉ có một đại lượng vào và một đại lượng ra (*single-input /single-output system*). Sự ảnh hưởng kép giữa các khớp với nhau trong quá trình làm việc được xem là nhiễu. Sơ đồ của hệ thống này (hình 4.11) tương ứng với phân tuyến tính và đơn của hình 4.10.



Hình 4. 11: Sơ đồ điều khiển độc lập của mỗi khớp

Không làm mất tính tổng quát, xét trường hợp thiết bị chấp hành là động cơ điện một chiều. Như vậy, θ là góc quay của trục động cơ, I là momen quán tính trung bình của phần chuyển động quy đổi đến trục động cơ, R_a là điện trở phần ứng của động cơ, k_t và k_v là hệ số momen và hệ số vận tốc của động cơ, G_v là hệ số điện áp của bộ khuếch đại công suất.

Giả thiết hệ số ma sát nhớt trên trục của động cơ rất nhỏ (có thể bỏ qua) so với hệ số cản điện năng, nghĩa là:

$$F_m \ll \frac{k_v k_t}{R_a}$$

Hàm truyền của động cơ có thể được viết dưới dạng:

$$M(s) = \frac{k_m}{s(I + sT_m)} \quad (4.33)$$

trong đó, $k_m = \frac{I}{k_v}$ và $T_m = \frac{R_a I}{k_v k_t}$, tương ứng là hệ số chuyển đổi vận tốc - điện áp và hằng số thời gian của động cơ.

4.2.2.1. Điều khiển có liên hệ ngược

Để đảm bảo khả năng chống nhiễu, bộ điều khiển phải thỏa mãn các điều kiện:

- Hệ số khuếch đại lớn đặt phía trước điểm tác động của nhiễu,
- Có tác động tích phân trong bộ điều khiển để hạn chế ảnh hưởng của trọng trường tới đại lượng ra khi hệ thống ở trạng thái tĩnh (giữ cho θ không đổi).

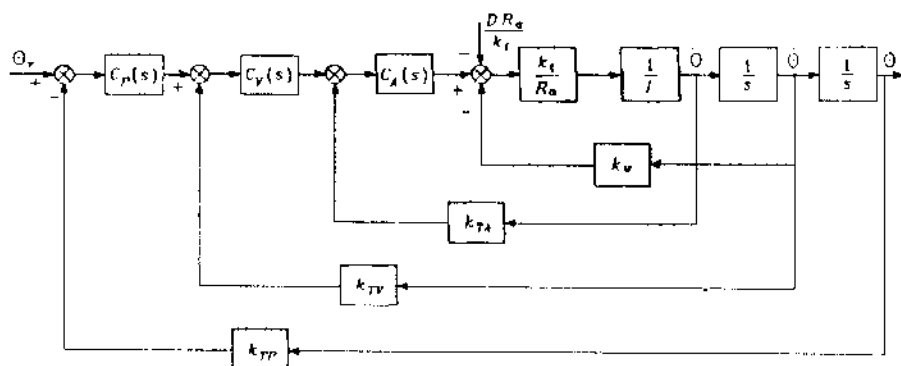
Yêu cầu trên gợi ra ý tưởng dùng tác động điều khiển PI (*Proportional - Integral*) trong mạch chính với hàm truyền

$$C(s) = K_c \frac{1 + sT_c}{s} \quad (4.34)$$

Nó có thể cho sai số trong trạng thái xác lập khi tác động của nhiễu không đổi, tại $s = -1/T_c$. Để cải thiện các đặc tính động lực học, nên dùng các vòng điều khiển có phản hồi cục bộ để khử tác động của nhiễu.

Bên cạnh việc đóng kín mạch phản hồi vị trí, thường dùng cả mạch phản hồi vận tốc và gia tốc. Điều đó dẫn đến mạch có sơ đồ như trong hình 4.12, trong đó $C_P(s)$, $C_V(s)$ và $C_A(s)$ tương ứng biểu thị các bộ điều khiển vị trí, vận tốc và gia tốc; k_{TP} , k_{TV} , k_{TA} là các hằng số của các bộ biến đổi. Trong sơ đồ này, momen nhiễu D cũng được chuyển đổi thành điện áp nhờ hệ số chuyển đổi R_d/k_r .

Từ sơ đồ cơ bản trên, có thể nảy sinh một số phương án điều khiển có phản hồi riêng, như phản hồi vị trí phản hồi vị trí và vận tốc, phản hồi vị trí, vận tốc và gia tốc.



Hình 4.12: Sơ đồ mạch điều khiển khép độc lập

• **Điều khiển có phản hồi vị trí**

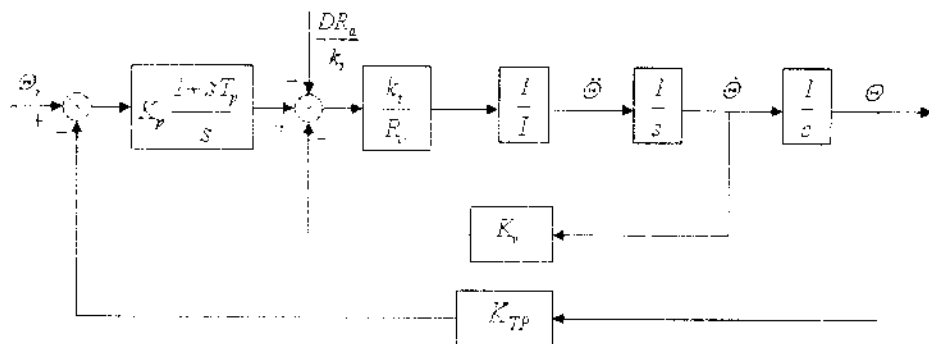
Trong trường hợp này, tác động điều khiển được đặc trưng bởi các hàm truyền:

$$C_p(s) = K_p \frac{1 + sT_p}{s}; \quad C_v(s) = C_d(s) = 1; \quad k_{lv} = k_{ld} = 0.$$

Từ sơ đồ khối trong hình 4.13, ta xác định được hàm truyền cho mạch thuận (chưa kể tác động của nhiễu):

$$P(s) = \frac{k_m K_p (1 + sT_p)}{s^2 (1 + sT_m)}$$

và cho mạch phản hồi: $H(s) = k_{lp}$.



Hình 4.13: Mạch điều khiển có phản hồi vị trí

Cuối cùng, hàm truyền của mạch kín vào/ra bằng

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_r(s)} = \frac{1}{1 + \frac{k_{lv}}{k_m K_p k_{lp} (1 + sT_p)} \frac{1}{s^2 (1 + sT_m)}} \quad (4.35)$$

Tương tự, hàm truyền của mạch kín nhiễu/ra bằng

$$\frac{\Theta(s)}{D(s)} = \frac{sR_m}{1 - \frac{k_t K_p k_{lp} (1 + sT_p)}{k_m K_p k_{lp} (1 + sT_p)} \frac{1}{s^2 (1 + sT_m)}} \quad (4.36)$$

Bằng phương pháp phân tích quỹ tích nghiệm^(*) có thể chỉ ra phương hướng thiết kế hệ điều khiển có phản hồi vị trí, như sau:

- Hệ thống chỉ có thể ổn định khi hằng số thời gian của bộ điều khiển (trong trường hợp này là khâu tuyến tính) lớn hơn hằng số thời gian của động cơ, nghĩa là: $T_p > T_m$.

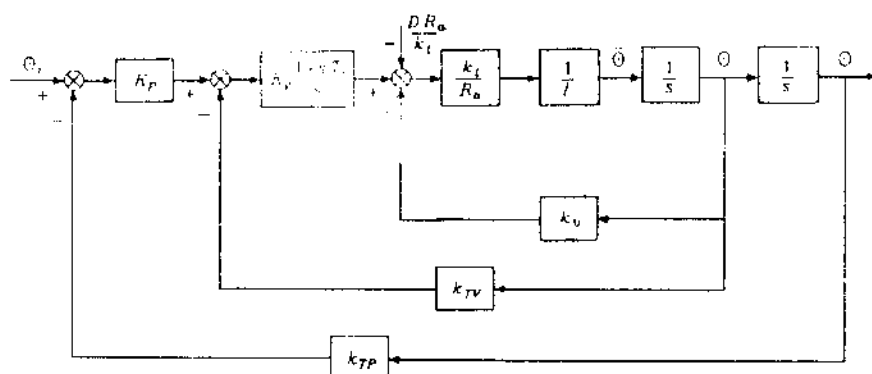
- Để giảm thời gian phản ứng của hệ thống, cần tăng T_p . Thường dùng $T_p \gg T_m$.

- Để chống nhiễu có hiệu quả cần tăng hệ số truyền K_p . Tích $X_k = K_p k_{ip}$, được gọi là nhân tố chống nhiễu (*disturbance rejection factor*), cũng phụ thuộc vào K_p . Tuy nhiên, nếu tăng K_p quá mức có thể gây nên dao động của đại lượng ra.

• Điều khiển có phản hồi vị trí và vận tốc

Sơ đồ khối của hệ thống được thể hiện trong hình 4.14. Tác động điều khiển được đặc trưng bởi

$$C(s) = K; \quad C_v(s) = K; \quad \frac{1 + sT_p}{s}; \quad C_A(s) = 1; \quad k_{vd} = 0.$$



Hình 4. 14: Sơ đồ điều khiển có phản hồi vị trí và vận tốc

Hàm truyền của mạch thuận và của mạch phản hồi:

$$P(s) = \frac{k_m K_v K_p (1 + sT_p)}{s^2 (1 + sT_m)}; \quad H(s) = k_{vp} (1 + s \frac{k_{pv}}{K_p k_{vp}})$$

^(*) Root-locus analysis là một công cụ để khảo sát các chỉ tiêu chất lượng của hệ thống, như tính ổn định, đặc tính tĩnh và đặc tính của quá trình quá độ.

Hàm truyền của mạch kín vào/ra:

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{\frac{I}{k_{TP}}}{1 + \frac{sk_{TV}}{K_p k_{TP}} + \frac{s^2}{k_m K_p k_{TP} K_V}} \quad (4.37)$$

Hàm truyền của mạch kín nhiều/ra:

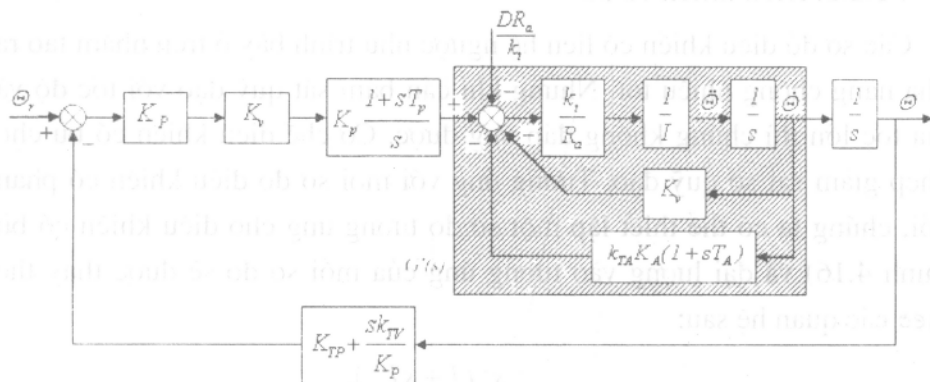
$$\frac{\theta(s)}{D(s)} = \frac{\frac{sR_a}{k_l K_p k_{TP} K_V (1 + sT_m)}}{1 + \frac{sk_{TV}}{K_p k_{TP}} + \frac{s^2}{k_m K_p k_{TP} K_V}} \quad (4.38)$$

Nhân tố chống nhiễu: $X_R = K_p k_{TP} K_V$

• **Điều khiển có phản hồi vị trí, vận tốc và gia tốc**

Hệ điều khiển này ứng với sơ đồ trong hình 4.15. Tác động điều khiển được đặc trưng bởi:

$$C_p(s) = K_p; \quad C_V(s) = K_V; \quad C_A(s) = K_A \frac{1 + sT_A}{s}$$



Hình 4. 15: Sơ đồ điều khiển có phản hồi vị trí, vận tốc và gia tốc

Để cho biểu thức được đơn giản, phần gạch chéo trong sơ đồ được thay thế tương đương bằng một khối có hàm truyền:

$$G'(s) = \frac{k_m}{sT_m(1 + k_m K_A k_{IA} \frac{T_A}{T_m}) (1 + k_m K_A k_{IA}) (1 + \frac{k_m K_A k_{TA}}{1 + k_m K_A k_{TA}})}$$

Hàm truyền của mạch thuận và của mạch phản hồi:

$$P(s) = \frac{K_p K_v K_A (1 + sT_m)}{s^2} G'(s); \quad H(s) = k_{iv} \left(1 + \frac{sk_{iv}}{K_p k_{iv}}\right)$$

Hàm truyền của mạch kín vào/ra:

$$\frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = \frac{1}{1 + \frac{sk_{iv}}{K_p k_{iv}} + \frac{s^2(1 + k_m K_v k_{iv})}{k_m K_p k_{iv} K_v K_A}} \quad (4.39)$$

Hàm truyền của mạch kín nhiều/ra:

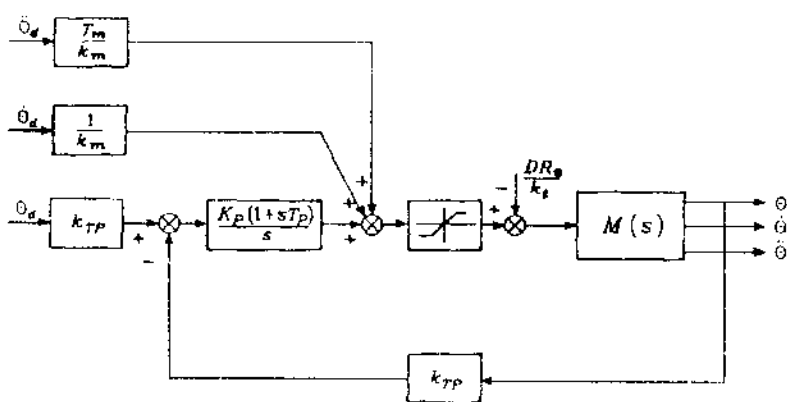
$$\frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = \frac{sR_a}{1 + \frac{sk_{iv}}{K_p k_{iv}} + \frac{s^2(1 + k_m K_v k_{iv})}{k_m K_p k_{iv} K_v K_A}} \quad (4.40)$$

Nhân tố chống nhiễu: $X_K = K_p k_{iv} K_v K_A$

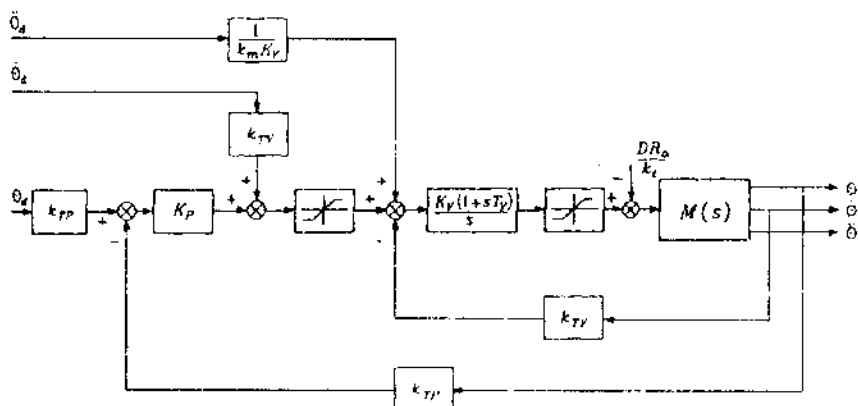
4.2.2.2. Điều khiển có bù

Các sơ đồ điều khiển có liên hệ ngược như trình bày ở trên nhằm tạo ra khả năng chống nhiễu tốt. Nhưng khi cần bám sát quỹ đạo với tốc độ và gia tốc lớn thì chúng không đáp ứng được. Cơ chế điều khiển có bù cho phép giảm sai số quỹ đạo. Tương ứng với mỗi sơ đồ điều khiển có phản hồi, chúng ta có thể thiết lập một sơ đồ tương ứng cho điều khiển có bù (hình 4.16) và đại lượng vào tương ứng của mỗi sơ đồ sẽ được thay thế theo các quan hệ sau:

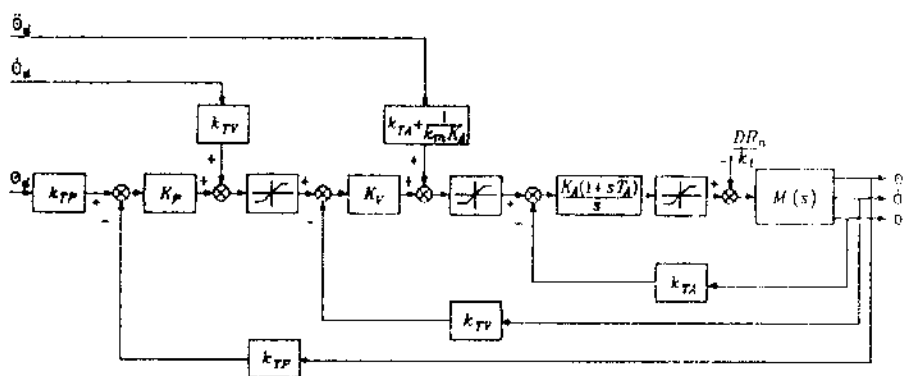
$$\begin{aligned} \theta_r(s) &= \left(k_{iv} + \frac{s^2(1 + sT_m)}{k_m K_p(1 + sT_p)}\right) \theta_d(s) \\ \theta_r(s) &= \left(k_{iv} + \frac{sk_{iv}}{K_p} + \frac{s^2}{k_m K_p K_v}\right) \theta_d(s) \\ \theta_r(s) &= \left(k_{iv} + \frac{sk_{iv}}{K_p} + \frac{(1 + k_m K_v k_{iv})s^2}{k_m K_p K_v K_A}\right) \theta_d(s) \end{aligned}$$



a: Điều khiển có bù với phản hồi vị trí

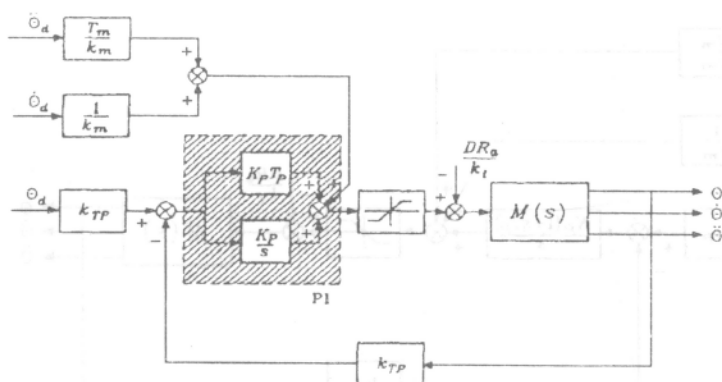


b: Điều khiển có bù với phản hồi vị trí và vận tốc

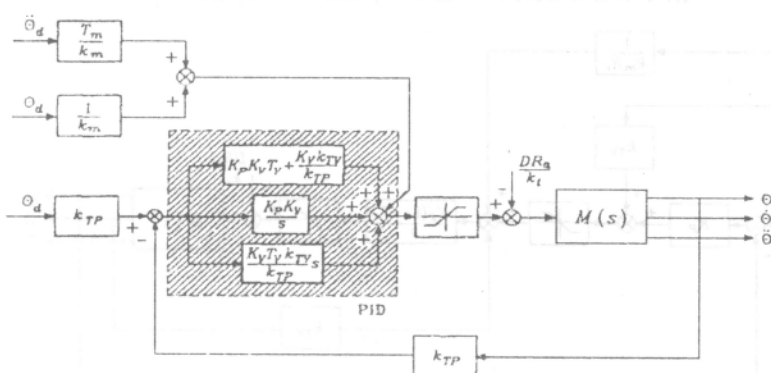


c: Điều khiển có bù với phản hồi vị trí, vận tốc và gia tốc

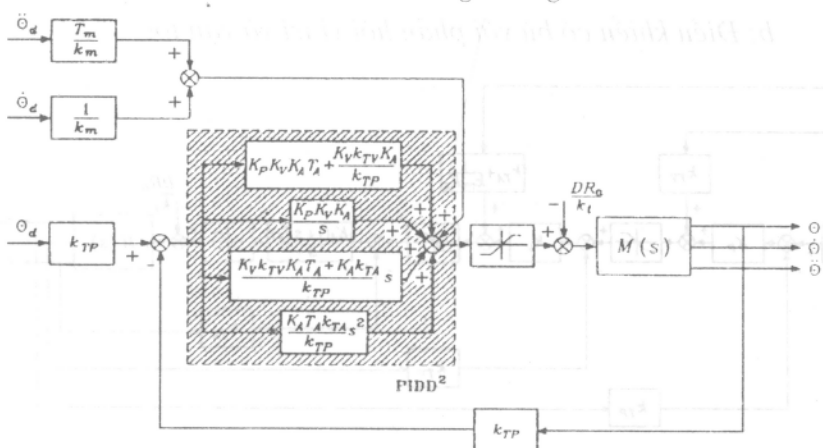
Hình 4. 16: Các hệ thống điều khiển có phản hồi



a: Sơ đồ điều khiển tương đương kiểu PI



b: Sơ đồ điều khiển tương đương kiểu PID



c: Sơ đồ điều khiển tương đương kiểu PIDD²

Hình 4. 17: Các sơ đồ tương đương của hệ điều khiển có phản hồi

Chú ý rằng, lượng bù vận tốc và gia tốc được tính dễ dàng bằng giải tích, dựa vào thông số vị trí $\theta_d(t)$, còn $M(s)$ là hàm truyền của động cơ chấp hành.

Các sơ đồ trên cho phép bám sát quỹ đạo vào trong phạm vi tuyến tính của hệ thống. Khả năng đó còn phụ thuộc mức độ phù hợp của bộ điều khiển và các tham số bù với các thông số của quá trình. Tuy nhiên, hệ càng có nhiều vòng phản hồi thì càng ít phải quan tâm đến chúng. Các khối bảo hoà trong sơ đồ là các phần tử phi tuyến, được dùng để hạn chế vùng biến thiên của vận tốc và gia tốc. Điều đó giúp phòng ngừa ảnh hưởng của sự biến thiên thái quá của các đại lượng vào đến quá trình quá độ, nhưng cũng có thể làm giảm độ chính xác bám quỹ đạo.

Trên hình 4.17 là các sơ đồ tương đương của các sơ đồ trên hình 4.16. Chúng chỉ dùng mạch phản hồi vị trí, cộng thêm một bộ hiệu chỉnh (phần gạch chéo trong sơ đồ) với các tác động điều khiển tiêu chuẩn là PI, PID, PIDD²,....

4.2.3. Điều khiển tập trung

Trong mục 4.2.2 trình bày các vấn đề cơ sở của việc thiết kế các bộ điều khiển độc lập trong không gian khớp. Chúng đều là các hệ thống đơn (*single-input / single-output*), vì ảnh hưởng qua lại giữa các khớp đều được coi là nhiễu. Điều đó có nghĩa là chúng ta mới chỉ quan tâm đến một phần (tuyến tính và đơn) của hệ thống. Mô hình toán học (4.26) và sơ đồ khối trên hình 4.10 cho thấy tay máy là một hệ *n-inputs* (gồm *n* momen khớp), *n-outputs* (gồm *n* vị trí khớp) và *phi tuyến* (phần lớn mối quan hệ giữa chúng là phi tuyến). Vì vậy, về mặt phương pháp luận thiết kế hệ điều khiển robot, cần xem xét tay máy là một hệ thống *đa biến* và *phi tuyến*. Sử dụng luật điều khiển phi tuyến-tập trung là giải pháp đảm bảo các đặc trưng động lực học của robot. Phần này sẽ trình bày cơ sở toán học hình thành luật điều khiển này.

Để dễ theo dõi, chúng ta hãy xem lại các phương trình (4.26), (4.27) và (4.28), biểu diễn các quan hệ động lực của tay máy, của hệ truyền động cơ khí và của động cơ khớp.

Xuất phát từ phương trình (4.28) và sơ đồ trên hình 4.11, hệ có n nguồn động lực có thể được mô tả dưới dạng ma trận bằng các phương trình sau:

$$K_t^{-1} \tau = K_t^{-1} j_a \quad (4.41)$$

$$v_a = R_a j_a + K_v \dot{q}_a \quad (4.42)$$

$$v_a = G_v v_c \quad (4.43)$$

trong đó:

K_t - ma trận đường chéo các hằng số momen của n động cơ,

j_a - vector các dòng điện phản ứng của n động cơ,

v_a - vector các điện áp trên phản ứng của n động cơ,

R_a - ma trận đường chéo các điện trở trên phản ứng của n động cơ,

K_v - ma trận đường chéo các hằng số điện áp của n động cơ,

G_v - ma trận đường chéo các hệ số của n bộ khuếch đại,

v_c - vector các điện áp điều khiển của n động cơ servo.

Tổng hợp các biểu thức trên, nhận được dạng khác của mô hình động lực học dùng trong điều khiển robot:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) = u \quad (4.44)$$

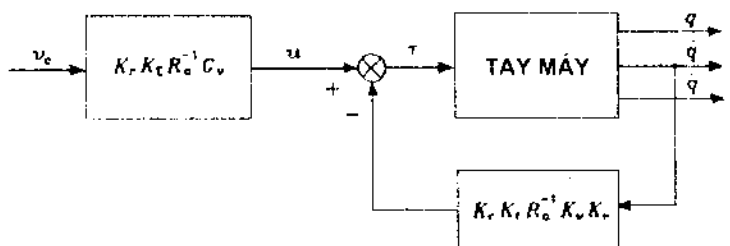
Trong đó F là ma trận đường chéo của toàn bộ lực cản, có 2 thành phần là cơ khí và điện, và u là vector các đại lượng vào của hệ thống:

$$F = F_c + K_t K_t^{-1} R_a^{-1} K_v K_t \quad (4.45)$$

$$u = K_t K_t^{-1} R_a^{-1} G_v v_c \quad (4.46)$$

So sánh các biểu thức (4.44) và (4.26) và chú ý đến các biểu thức tính F , u ở trên, chúng ta rút ra mô hình điều khiển hệ thống bằng điện áp. Sơ đồ khối của hệ được thể hiện trên hình 4.18.

$$u = K_t K_t^{-1} R_a^{-1} K_v K_t = \tau \quad (4.47)$$



Hình 4. 18: Sơ đồ điều khiển robot bằng điện áp

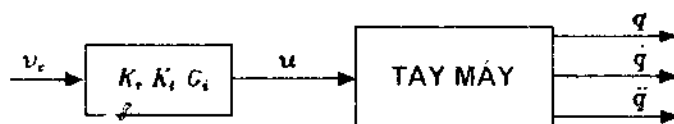
Trong sơ đồ trên, đại lượng vào u phụ thuộc các tham số K , K_i , R , của động cơ, mà giá trị của chúng lại thay đổi theo điều kiện làm việc. Để loại trừ các ảnh hưởng đó, có thể dùng hệ *điều khiển bằng momen* hay *dòng điện*. Các phương trình (4.43), (4.45), và (4.46) được thay thế bằng:

$$i_a = G_i v_c \quad (4.48)$$

$$F = F_i \quad (4.49)$$

$$u = K_r K G_i v_c \quad (4.50)$$

trong đó G_i là ma trận hằng, thể hiện quan hệ tỷ lệ giữa dòng điện phản ứng i_a và điện áp điều khiển v_c . Bây giờ hệ thống được thể hiện bằng sơ đồ trên hình 4.19.



Hình 4.19: Sơ đồ điều khiển robot bằng momen

Xuất phát từ mô hình điều khiển cơ bản (4.44), có thể thực hiện các nhiệm vụ điều khiển khác nhau bằng cách chọn đại lượng vào u thích hợp. Sau đây chúng ta xét 2 trường hợp ứng dụng mô hình điều khiển tập trung cho robot.

4.2.3.1. Điều khiển PD có bù trọng lực

Đặt bài toán: Tay máy gồm nhiều khâu, khớp và các cơ cấu liên quan. Mỗi bộ phận đều có trọng lượng. Trong quá trình làm việc, thể của các bộ phận luôn thay đổi, nên trọng lực đặt lên chúng cũng thay đổi và không theo quy luật định trước. Nhiệm vụ của bộ điều khiển là ổn định trạng thái của tay máy dù nó đang làm việc ở thế nào. Bộ điều khiển phải thường xuyên giám sát trạng thái của hệ thống dưới tác dụng của trọng trường, sinh ra tín hiệu điều khiển thích hợp để bù lại. Phần này nói về cách chọn dạng của hàm điều khiển u để thực hiện chức năng bù trọng lực.

Để làm việc đó, chúng ta sử dụng phương pháp *Lyapunov*. Nó dựa trên nguyên tắc, là trong quá trình hệ thống tiệm tiến đến trạng thái cân bằng thì năng lượng của nó giảm dần và ở trạng thái cân bằng, năng lượng của hệ đạt cực tiểu.

Ta biểu diễn năng lượng của hệ bằng hàm $V(e)$, trong đó e là sai lệch giữa trạng thái thực và trạng thái cân bằng của hệ. Nếu các điều kiện sau được đồng thời thỏa mãn thì hệ sẽ đạt trạng thái cân bằng toàn cục.

$$\begin{aligned} V(e) > 0 & \quad \forall e \neq 0; \quad V(e) = 0 & \quad e = 0; \\ \dot{V}(e) < 0 & \quad \forall e \neq 0; \quad V(e) = \infty & \quad \|e\| \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Trong trường hợp đang xét, trạng thái của hệ thống là thể của phần công tác và được biểu thị bằng vector gồm n phần tử

$$\begin{bmatrix} \tilde{q}^T & \dot{q}^T \end{bmatrix}^T$$

trong đó $\tilde{q}$ là sai lệch giữa giá trị thực q và giá trị ở trạng thái cân bằng q_d ($\tilde{q} = q_d - q$) của biến khớp thứ i ($i = 1, n$).

Năng lượng của hệ là hàm số của sai lệch $\tilde{q}$ và vận tốc $\dot{q}$:

$$V(\dot{q}, \tilde{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T B(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \tilde{q} > 0 \quad \forall \dot{q}, \tilde{q} \neq 0 \quad (4.51)$$

trong đó, K_p là ma trận đối xứng ($n \times n$), biểu thị độ cứng của hệ thống. Thành phần thứ nhất biểu thị động năng, thành phần thứ hai biểu thị thế năng của hệ thống.

Lấy đạo hàm biểu thức theo thời gian và chú ý q_d là hằng số:

$$\dot{V} = \dot{q}^T B(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{B}(q) \dot{q} - \dot{q}^T K_p \tilde{q} \quad (4.52)$$

Rút $B(q)\ddot{q}$ từ (4.44) và thay nó vào (4.52), nhận được

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \dot{q}^T (\dot{B}(q) - 2C(q, \dot{q})) \dot{q} - \dot{q}^T F \dot{q} + \dot{q}^T (u - g(q) - K_p \tilde{q}) \quad (4.53)$$

Thành phần thứ nhất của biểu thức trên bằng 0; thành phần thứ hai xác định âm. Thành phần thứ ba chứa yếu tố trọng lực $g(q)$ và một tác động điều khiển tỷ lệ $K_p \tilde{q}$, chứa sai lệch trạng thái. Vì vậy, nếu chọn tín hiệu điều khiển:

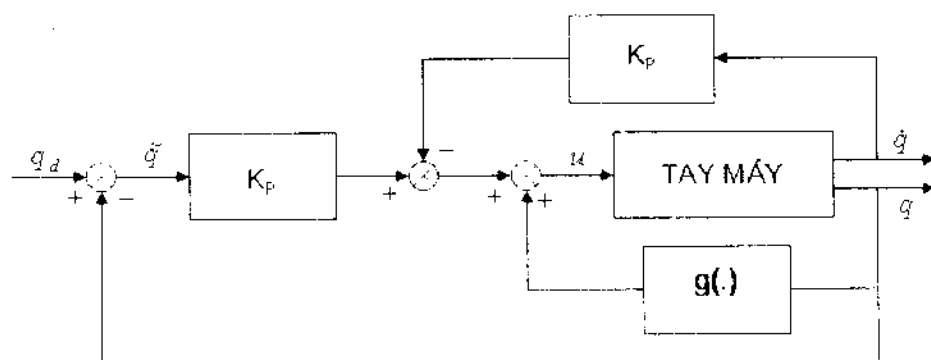
$$u = g(q) + K_p \tilde{q}$$

thì cũng đã đạt được điều kiện của phương pháp *Lyapunov*. Tuy nhiên, có thể tăng tốc độ xác lập nếu thêm một tác động vi phân, để nhận được tác động điều khiển PD

$$u = g(q) + K_p \tilde{q} + K_D \dot{q}$$

trong đó, K_D là ma trận hằng số, xác định tỷ lệ bù phi tuyến của trọng lực.

Nguyên lý điều khiển tập trung có bù trọng lực được thể hiện trên hình 4.20, trong đó chúng ta nhận rõ tác động của sai lệch trạng thái hệ thống đến trạng thái thực.



Hình 4. 20: Sơ đồ điều khiển PD có bù trọng lực

4.2.3.2. Điều khiển dùng động lực học ngược

Vấn đề bám quỹ đạo đã được đề cập với hệ điều khiển độc lập, trong đó giả thiết hệ là tuyến tính và đơn. Phần này nhằm giải quyết cùng bài toán bám sát quỹ đạo nhưng trong bối cảnh của hệ đa biến và phi tuyến.

Mô hình động lực học (4.44) được viết lại cho tay máy có n khớp như sau

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = u \quad (4.54)$$

trong đó

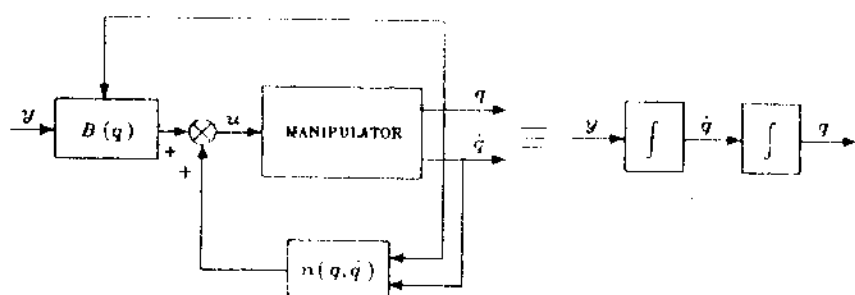
$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) \quad (4.55)$$

Vector điều khiển u là hàm trạng thái của hệ thống và cho phép thể hiện quan hệ vào/ra dưới dạng tuyến tính. Tuy nhiên, đây là sự tuyến tính hoá toàn cục nhờ phản hồi phi tuyến từ thông số trạng thái.

Dùng $y = \ddot{q}$ với giá trị hoàn toàn xác định làm đại lượng vào, ta có thể viết u dưới dạng khác của hàm điều khiển

$$u = B(q)y + n(q, \dot{q}) \quad (4.56)$$

Hàm này dựa trên bài toán ngược của động lực học robot và được thể hiện trên sơ đồ trong hình 4.21. Với đại lượng vào y , hệ trở thành *tuyến tính* và *độc lập*. Nói cách khác, phần tử y chỉ ảnh hưởng đến biến khớp q , một cách độc lập với các khớp khác.



Hình 4. 21: Sơ đồ tuyến tính hoá toàn cục dùng thuật toán động lực học ngược

Nhiệm vụ bây giờ là xác định cụ thể hàm điều khiển y . Để vừa đảm bảo tính năng bám quỹ đạo, vừa ổn định, hàm y cần có dạng sau

$$y = -K_p q - K_v \dot{q} + r = \ddot{q} \quad (4.57)$$

Điều đó dẫn đến hệ phương trình vi phân cấp 2

$$\ddot{q} + K_v \dot{q} + K_p q = r$$

Nếu K_p và K_v là các ma trận xác định dương thì hệ sẽ ổn định tiệm tiến.

Mỗi khi cho trước quỹ đạo $q_d(t)$ thì việc bám sát nó được thực hiện bởi đại lượng vào gồm 3 thành phần:

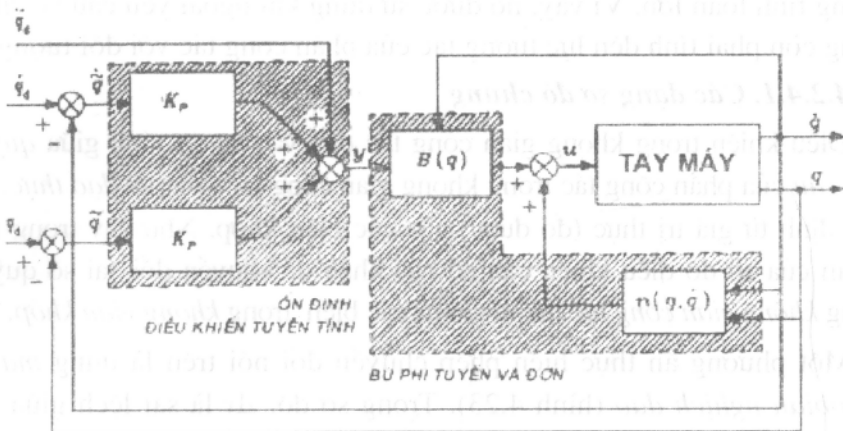
$$r = \ddot{q}_d + K_v \dot{q}_d + K_p q_d \quad (4.58)$$

Thay r trong (4.58) vào (4.57), ta có:

$$\begin{aligned} y &= \ddot{q}_d + K_p (q_d - q) + K_v (\dot{q}_d - \dot{q}) \\ &= \ddot{q}_d + K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} \end{aligned} \quad (4.59)$$

Hình 4.22 là sơ đồ điều khiển theo thuật toán động lực học ngược, trong đó vòng kín trong thể hiện mô hình động lực học (4.54) hoặc (4.56), vòng ngoài thực hiện chức năng bám quỹ đạo và ổn định hệ thống, làm việc theo sai lệch của trạng thái (4.59).

Sơ đồ điều khiển này có ưu điểm là cho phép thay thế hệ *phi tuyến*, *kép* bằng *n* hệ *tuyến tính*, *đơn*. Tuy nhiên, nó đòi hỏi phải tính ma trận quán tính $B(q)$ và các vector lực Coriolis, ly tâm, trọng trường, cản,... ngay trong thời gian làm việc của robot (*online* và *real time*). Mặt khác, thuật toán còn đòi hỏi phải biết chính xác các thông số của hệ thống.



Hình 4. 22: Sơ đồ điều khiển theo thuật toán động lực học ngược

Trên thực tế, không thể biết và mô hình hoá chính xác được các thông số kết cấu cơ khí và cũng không thể đảm bảo giải một cách chính xác bài toán ngược của động lực học tay máy. Tình trạng trên được khắc phục bằng cách kết hợp các kỹ thuật điều khiển đã nêu với kỹ thuật điều khiển bền vững (*Robust Control*) hoặc điều khiển thích nghi (*Adaptive Control*).

4.2.4. Điều khiển trong không gian công tác

Trong các mục trước chúng ta nói về điều khiển robot theo tư tưởng bài toán thuận của động học và động lực học tay máy. Mục tiêu điều khiển là đảm bảo vị trí, vận tốc và gia tốc của các khớp, nên bài toán điều khiển được thực hiện trong không gian khớp.

Thông thường, quỹ đạo yêu cầu của phần công tác được xác định trong không gian công tác, sau đó các thông số chuyển động tương ứng của các khớp được tính nhờ giải bài toán ngược của động học và động lực học tay máy. Trong khi robot làm việc, giá trị ra (các biến khớp) được đo, tổng hợp thành giá trị tương ứng của thông số quỹ đạo thực nhờ giải bài toán thuận, đưa trở lại đầu vào theo mạch phản hồi.

Về nguyên tắc, bài toán ngược được giải không chỉ để xác định vị trí mà cả vận tốc và gia tốc của các khớp. Tuy nhiên, để đơn giản hoá kết cấu điều khiển, bài toán ngược chỉ được dùng khi xác định vị trí của các khớp, còn vận tốc và gia tốc của chúng được xác định bằng phương pháp vi phân số. Nói chung, phương pháp điều khiển tập trung đòi hỏi khối

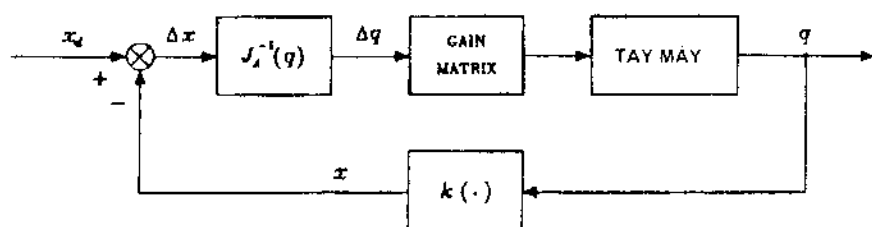
lượng tính toán lớn. Vì vậy, nó được sử dụng khi ngoài yêu cầu về chuyển động còn phải tính đến lực tương tác của phần công tác với đối tượng.

4.2.4.1. Các dạng sơ đồ chung

Điều khiển trong không gian công tác dựa vào sự so sánh giữa quỹ đạo yêu cầu của phần công tác trong không gian công tác với quỹ đạo thực, được xác định từ giá trị thực (do được) của các biến khớp. Như vậy trong mạch thuận của sơ đồ điều khiển cần có các khâu để chuyển đổi sai số quỹ đạo trong không gian công tác thành giá trị các biến trong không gian khớp.

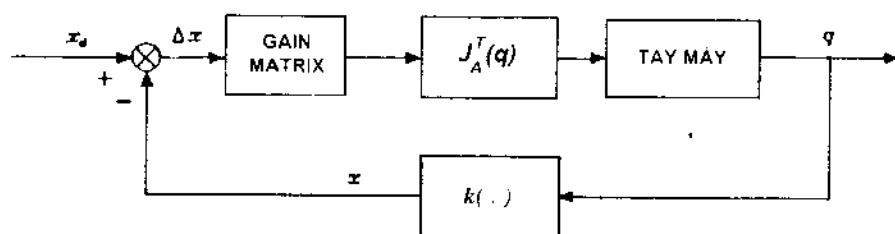
Một phương án thực hiện phép chuyển đổi nói trên là dùng ma trận Jacobian nghịch đảo (hình 4.23). Trong sơ đồ, Δx là sai lệch giữa vị trí yêu cầu và vị trí thực của phần công tác trong không gian công tác. Thông qua khâu biến đổi, dùng ma trận Jacobian nghịch đảo, Δx được biến đổi thành các sai lệch Δq của các biến khớp để điều khiển các khớp.

Khối GAIN MATRIX có tác dụng như lò xo, sinh ra lực đàn hồi theo chiều khử các sai lệch Δq (và do đó khử Δx).



Hình 4. 23: Sơ đồ điều khiển dùng ma trận Jacobian nghịch đảo

Phương án chuyển đổi thứ hai dùng ma trận Jacobian chuyển vị (hình 4.24).



Hình 4. 24: Sơ đồ điều khiển dùng ma trận Jacobian chuyển vị

Trong trường hợp này khối GAIN MATRIX được đưa lên trước, sinh ra lực điều khiển các khớp theo chiều hướng khử sai số Δx . Lực tổng quát đó sẽ được phân phối cho các khớp nhờ khối *Jacobian* chuyển vị.

Chúng ta cũng thấy, cả hai phương án đều sử dụng bài toán thuận của động lực học trong mạch phản hồi.

Tương tự như phương pháp điều khiển tập trung trong không gian khớp, trong không gian công tác cũng tồn tại 2 dạng: *điều khiển có bù trọng lực* và *điều khiển dùng động học ngược*.

4.2.4.2. Điều khiển PD có bù trọng lực

Ký hiệu vị trí cần đạt của phần công tác trong không gian công tác là x_d , vị trí thực là x . Chúng ta mong muốn sai lệch vị trí

$$\tilde{x} = x_d - x \quad (4.60)$$

có xu hướng tiệm tiến tới 0.

Năng lượng của hệ là hàm số của sai lệch $\tilde{x}$ và vận tốc $\dot{q}$:

$$V(\dot{q}, \tilde{x}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T B(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T K_p \tilde{x} > 0 \quad \forall \dot{q}, \tilde{x} \neq 0 \quad (4.61)$$

trong đó, K_p là ma trận đối xứng ($n \times n$), biểu thị độ cứng của hệ thống.

Lấy đạo hàm biểu thức theo thời gian, nhận được

$$\dot{V} = \dot{q}^T B(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{B}(q) \dot{q} - \tilde{x}^T K_p \dot{\tilde{x}} \quad (4.62)$$

Vì $\dot{x}_d = 0$ và chú ý rằng $\dot{x} = J_A(q) \dot{q}$, ta có

$$\dot{\tilde{x}} = -J_A(q) \dot{q}$$

$$\text{Do đó:} \quad \dot{V} = \dot{q}^T B(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{B}(q) \dot{q} - \dot{q}^T J_A^T(q) K_p \tilde{x} \quad (4.63)$$

Để ý mô hình động lực học (4.44), rút ra:

$$\dot{V} = -\dot{q}^T F \dot{q} + \dot{q}^T (u - g(q) - J_A^T(q) K_p \tilde{x}). \quad (4.64)$$

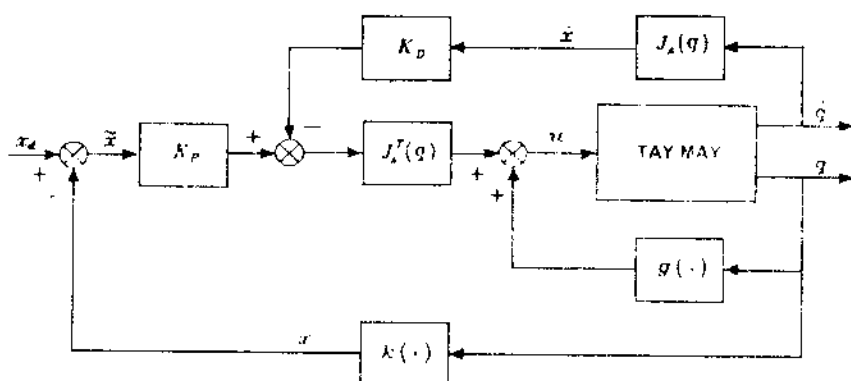
Biểu thức trên gợi ý chọn luật điều khiển

$$u = g(q) + J_A^T(q) K_p \tilde{x} - J_A^T(q) K_D J_A(q) \dot{q} \quad (4.65)$$

trong đó, K_D là ma trận hằng số. Vì vậy, phương trình (4.64) trở thành

$$\dot{V} = -\dot{q}^T F \dot{q} - \dot{q}^T J_A^T(q) K_D J_A(q) \dot{q} \quad (4.66)$$

Hệ điều khiển như trên hình 4.25 có dạng tương tự sơ đồ hình 4.20.



Hình 4. 25: Sơ đồ điều khiển PD có bù trọng lực

Luật điều khiển (4.65) hình thành một tác động bù phi tuyến cho trọng lực trong không gian khớp (tương ứng với thành phần $g(q)$) và một tác động điều khiển PD trong không gian công tác.

Biểu thức (4.66) cho thấy với mọi quỹ đạo cho trước, khi $\dot{q} \neq 0$ thì hàm Lyapunov giảm, hệ thống sẽ tiến tới trạng thái cân bằng. Trạng thái đó được xác định bởi

$$J_a^T(q)K_p\tilde{x} = 0 \quad (4.67)$$

4.2.4.3. Điều khiển dùng động lực học ngược

Viết lại mô hình động lực học (4.44) cho tay máy có n khớp như sau

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = u \quad (4.68)$$

trong đó

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) \quad (4.69)$$

Chọn luật điều khiển dưới dạng tuyến tính hoá

$$u = B(q)y + n(q, \dot{q}) \quad (4.70)$$

sẽ dẫn đến hàm tích phân

$$\ddot{q} = y \quad (4.71)$$

Đại lượng vào y được xác định theo tính năng bám quỹ đạo cho trước $x_d(t)$. Để nhận được quan hệ

$$\tilde{x} = J_a(q)\ddot{q} + \dot{J}_a(q, \dot{q})\dot{q}$$

thì có thể chọn

$$y = J_A^{-1}(q)(\ddot{x}_d + K_D\dot{\tilde{x}} + K_P\tilde{x} - \dot{J}_A(q, \dot{q})\dot{q}) \quad (4.72)$$

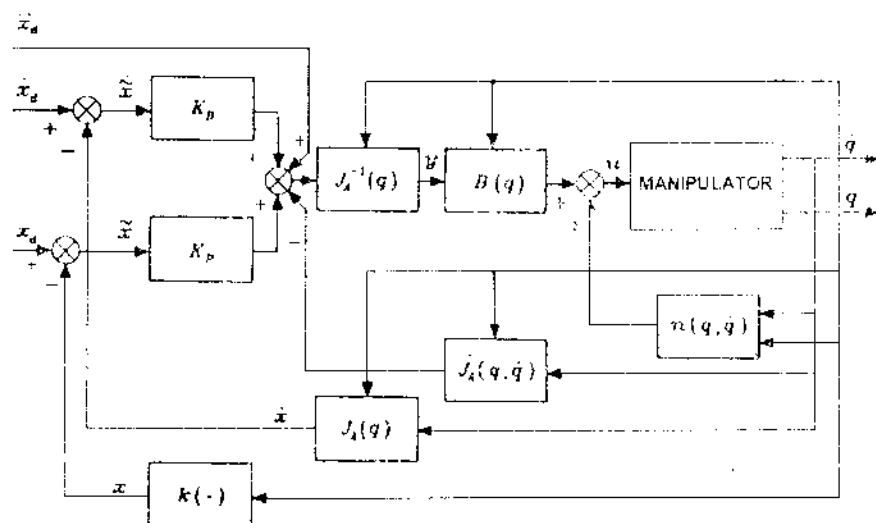
với K_P và K_D là các ma trận chéo xác định dương.

Thay (4.72) vào (4.71), nhận được phương trình mô tả sai lệch động lực học trong không gian công tác:

$$\ddot{\tilde{x}} - K_D\dot{\tilde{x}} + K_P\tilde{x} = 0 \quad (4.73)$$

trong đó, K_D và K_P xác định tốc độ hội tụ của sai lệch tới 0. Sơ đồ điều khiển được thể hiện trên hình 4.26.

Bên cạnh x và $\dot{x}$, cần phải đo cả q và $\dot{q}$. Nếu x và $\dot{x}$ được đo gián tiếp thì bộ điều khiển cần phải tính toán trực tuyến các hàm $k(q)$ và $J_A(q)$.



Hình 4. 26: Sơ đồ điều khiển theo thuật toán động lực học ngược

Như tính toán đã chỉ ra, điều khiển trong không gian công tác luôn luôn đòi hỏi tính *Jacobian*, vì vậy nó thường phức tạp hơn so với điều khiển trong không gian khớp. Bù lại, chúng ta nhận được các thuận lợi từ việc mô tả trực tiếp quỹ đạo trong không gian công tác.

Chương 5

CƠ SỞ THIẾT KẾ VÀ LỰA CHỌN ROBOT

Chương này sẽ khái quát kết cấu cơ khí điển hình của tay máy. Nó nhằm tạo cho người sử dụng robot một cơ sở thực tiễn để chọn mua loại robot phù hợp với yêu cầu công nghệ và đặc điểm sử dụng. Đồng thời, đây cũng là tài liệu tham khảo cho người thiết kế, tổ hợp robot.

5.1. CÁC THÔNG SỐ KỸ THUẬT CỦA RBCN

RBCN rất đa dạng về kết cấu và tính năng, được đánh giá bằng các thông số kỹ thuật rất khác nhau. Tuy nhiên, có những thông số kỹ thuật chung cho hầu hết robot. Dựa vào các thông số kỹ thuật chung đó, người ta thống nhất hoá và tiêu chuẩn hoá kết cấu và tính năng của robot. Người dùng có kinh nghiệm không bao giờ cố chọn robot có mọi tính năng kỹ thuật tốt nhất mà biết chọn các thông số ưu tiên để thoả mãn yêu cầu công việc với chi phí thấp nhất. Ví dụ, đối với một robot vận chuyển thì 3 bậc tự do có thể là đủ, nhưng robot phun sơn thường cần tới 6 bậc tự do. Robot lắp ráp hoặc robot phục vụ máy công cụ thường phải có độ chính xác định vị cao còn robot phun sơn thì không. Trên robot hàn điểm có thể chọn kiểu điều khiển điểm - điểm cho rẻ, còn trên robot hàn hồ quang thì nhất thiết phải dùng điều khiển đường (*contour*), v.v... Mục này nói về khái niệm và hướng lựa chọn một số thông số kỹ thuật chính.

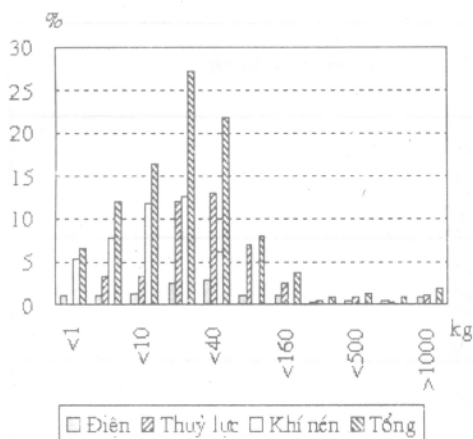
5.1.1. Sức năng của tay máy

Đó là khối lượng lớn nhất của vật mà robot có thể nâng được (không kể khối lượng của các cơ cấu trong tay máy) trong điều kiện nhất định, ví dụ khi tốc độ dịch chuyển cao nhất hoặc khi tay với dài nhất. Nếu robot có nhiều tay thì đó là tổng sức năng của các tay. Thông số này quan trọng đối với các robot vận chuyển, xếp dỡ, lắp ráp,... Sự tham khảo các tài liệu kỹ thuật hiện nay của robot cho thấy, dải sức năng của tay máy thay đổi rất rộng, từ 0,1 đến hàng ngàn kilogam. Hình 5.1 cho thấy robot có sức nâng dưới 100 kg chiếm đa số. Các robot có sức năng lớn thường dùng hệ truyền động thủy lực và điện, trong đó tỷ lệ dùng động cơ điện ngày càng tăng. Truyền động khí nén cho đến nay vẫn được dùng nhiều trên RBCN, nhưng chủ yếu với các robot có sức năng dưới 40 kg.

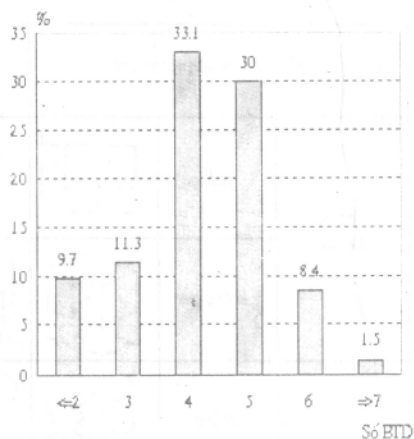
Đối với một số kiểu robot, ngoài sức năng người ta còn có thể quan tâm đến lực hoặc momen lớn nhất mà cánh tay hoặc bàn tay có thể sinh ra.

5.1.2. Số bậc tự do của phần công tác

Đó là tổng số các tọa độ mà phần công tác có thể dịch chuyển so với thân robot. Số bậc tự do càng lớn thì hoạt động của robot càng linh hoạt, nhưng điều khiển nó càng phức tạp. Hình 5. 2 cho thấy phần lớn robot có 4-5 bậc tự do.



Hình 5. 1: Phân bố robot theo sức nâng



Hình 5.2: Phân bố robot theo số bậc tự do

Trong cơ học đã có công thức tính số bậc tự do DOF của một chuỗi động học, như sau:

$$DOF = 6n - 5k_5 - 4k_4 - 3k_3 - 2k_2 - k_1$$

trong đó, n là số khâu chuyển động được; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 là số khớp bậc I, II, III, IV, V*. Cơ cấu phẳng chỉ có các khớp bậc IV và bậc V, nên:

$$DOF = 6n - 5k_5 - 4k_4$$

Nếu chuỗi động học là chuỗi hở (cho đến nay vẫn được dùng phổ biến trong tay máy) thì số khâu bằng số khớp, nghĩa là $n = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5$, nên:

$$DOF = k_5 + 2k_4 + 3k_3 + 4k_2 + 5k_1$$

Nếu là chuỗi vừa hở, vừa phẳng thì:

$$DOF = k_5 + 2k_4$$

* Khớp bậc I, II, III, IV, V, có 5, 4, 3, 2, 1 khả năng chuyển động.

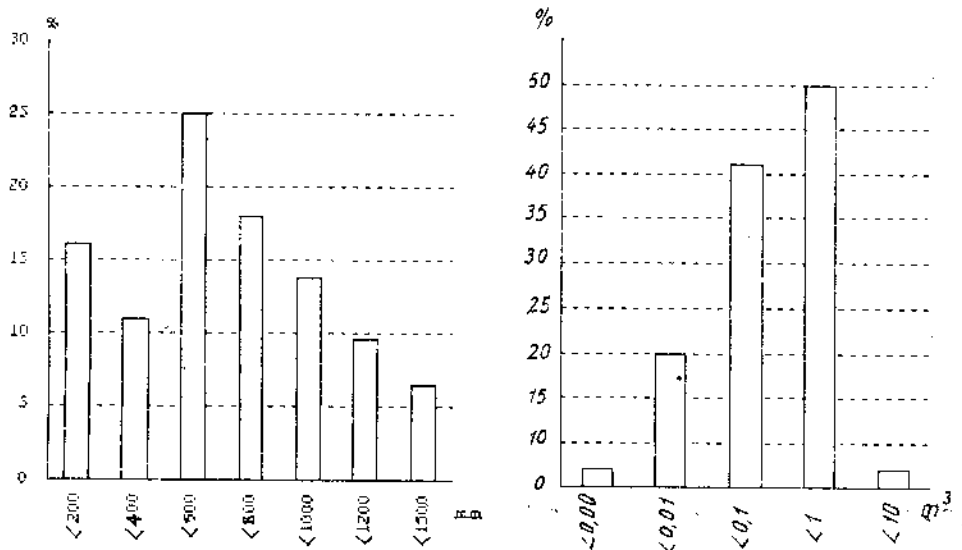
5.1.3. Vùng công tác

Khi nói đến vùng công tác của tay máy, người ta quan tâm đến cả thể tích (tính bằng m^3) và hình dạng của nó. Hình 5. 3 cho thấy vùng công tác của tay máy không chỉ phụ thuộc vào kết cấu cơ khí mà cả trình tự chuyển động của các khâu.

Số độ tự do chuyển động			Ví dụ kết cấu của tay máy
Tọa độ Đề các	phẳng		
	không gian		
Tọa độ cực	chúng		
	trụ		
	cầu		
Phức hợp cực - đề các	trụ		
	cầu		

Hình 5. 3: Vùng công tác của tay máy (Q: khớp quay, T: khớp trượt)

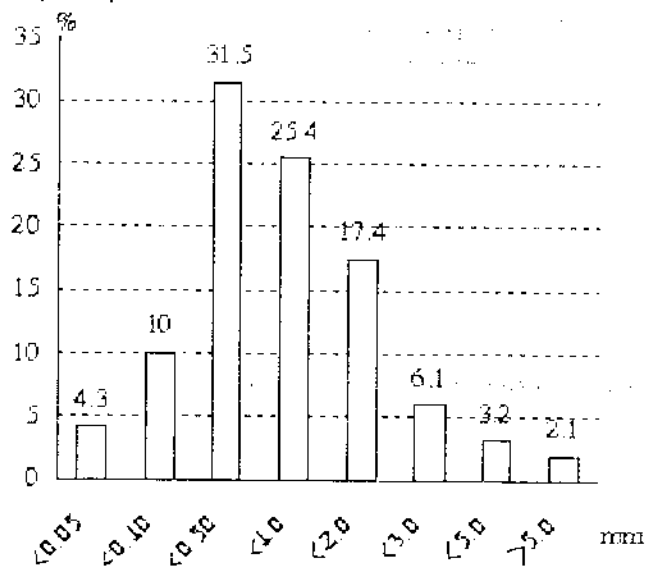
Một thông số khác liên quan đến vùng công tác của tay máy là *tầm với* của cánh tay. Tăng tầm với sẽ gây nên sự mất ổn định của tay máy khi làm việc. Sự phân bố của robot theo thể tích phần công tác và theo tầm với được thể hiện trên hình 5. 4.



Hình 5. 4: Phân bố robot theo tâm với và thể tích vùng công tác

5.1.4. Độ chính xác định vị

Độ chính xác định vị (*positioning accuracy*) thể hiện khả năng đối tượng đạt được chính xác tới điểm đích. Đó là một thông số rất quan trọng, ảnh hưởng đến sự thao tác chính xác của phần công tác và khả năng bám quỹ đạo của nó.



Hình 5. 5: Phân bố robot theo độ chính xác định vị

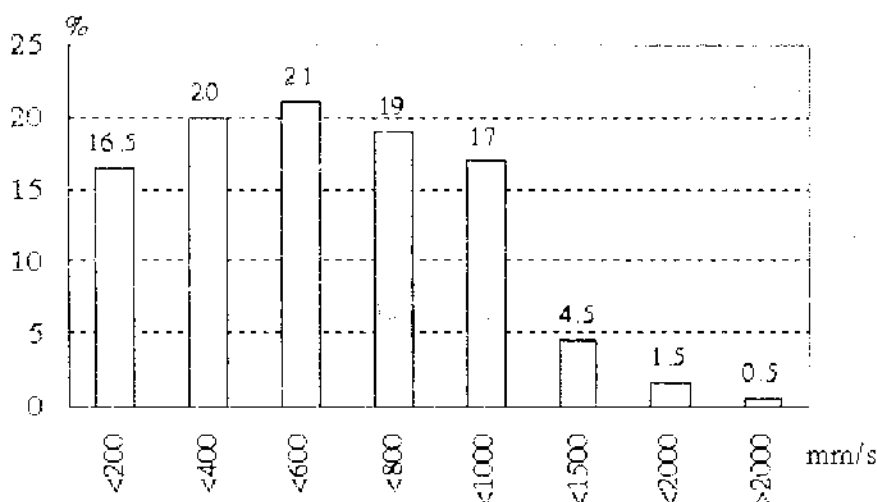
Đối với thiết bị điều khiển số, độ chính xác định vị liên quan đến 2 thông số, là độ phân giải điều khiển (*control resolution*) và độ lặp lại (*repeatability*).

Tuỳ theo yêu cầu công nghệ, người ta dùng các robot có độ chính xác định vị trong khoảng $\pm(0,05 \div 5) \text{ mm}$. Hình 5. 5 cho thấy 70% số robot có sai số định vị không quá $\pm 1,0 \text{ mm}$. Với khả năng của máy tính và các thiết bị điều khiển hiện nay thì việc giảm sai số định vị xuống $0,05 \text{ mm}$ không gây vấn đề về kinh tế và kỹ thuật.

5.1.5. Tốc độ dịch chuyển

Xét về năng suất, người ta mong muốn tốc độ dịch chuyển (thẳng hoặc góc) của phân công tác hoặc của từng khâu càng cao càng tốt. Tuy nhiên, xét về mặt cơ học, tốc độ cao sẽ dẫn đến những vấn đề, như giảm tính ổn định, lực quán tính lớn, sự hư mòn nhanh các cơ cấu.... Xét về mặt điều khiển, với độ phân giải nhất định của bộ điều khiển, muốn tăng tốc độ dịch chuyển có thể phải giảm độ chính xác định vị. Vì vậy, vấn đề chọn tốc độ dịch chuyển hợp lý luôn luôn phải được đặt ra khi thiết kế cũng như lựa chọn robot.

Các bộ điều khiển và hệ thống chấp hành hiện đại cho phép nâng tốc độ điều khiển tới hàng trăm mét/phút nhưng, như trên hình 5.6 cho thấy phần lớn robot có tốc độ dịch chuyển tối đa trong khoảng $100 \div 1000 \text{ mm/s}$ ($6 \div 60 \text{ m/ph}$).



Hình 5. 6: Phân bố robot theo tốc độ dịch chuyển của phân công tác

5.1.6. Đặc tính của hệ điều khiển

Hệ điều khiển ảnh hưởng rất lớn đến tính năng của robot. Khi chọn hệ điều khiển, người ta quan tâm đến các khía cạnh sau:

5.1.6.1. Kiểu điều khiển

Có hai kiểu điều khiển hay dùng nhất cho RBCN, đó là *điều khiển điểm - điểm* và *điều khiển contour*. Điều khiển điểm - điểm được dùng cho các robot hàn điểm, tán đinh, vận chuyển.... Điều khiển contour vận năng hơn, song trước đây được dùng ít hơn vì phải sử dụng hệ thống điều khiển phức tạp và đắt tiền. Ngày nay, nhờ sự phát triển của kỹ thuật điều khiển số có trợ giúp của máy tính, nó được dùng ngày càng phổ biến.

5.1.6.2. Dung lượng bộ nhớ

Bộ nhớ trên robot hiện đại thường được chia làm 2 loại: *bộ nhớ hệ thống* và *bộ nhớ chương trình*. Bộ nhớ hệ thống dùng để lưu trữ các phần mềm hệ thống, phần mềm công dụng chung, như hệ điều hành, dữ liệu máy, các modul chương trình tính toán động học, động lực học,... Bộ nhớ chương trình để lưu trữ các chương trình ứng dụng của người dùng và các dữ liệu liên quan. Thường thì bộ nhớ chương trình là RAM, có dung lượng hạn chế nên *dung lượng của bộ nhớ chương trình* là một thông số kỹ thuật đáng quan tâm. Nó có thể được tính bằng *kB* hoặc bằng số từ, số câu lệnh.

5.1.6.3. Giao diện với thiết bị ngoại vi

Các thiết bị ngoại vi có thể là các thiết bị công nghệ mà robot phải phục vụ hay cùng làm việc, như máy công cụ, phương tiện vận chuyển, thiết bị đo,... hoặc các thiết bị lưu trữ, hiển thị, in ấn,... Phần lớn các robot phục vụ trong dây chuyền sản xuất có khả năng nối ghép trong hệ CIM thông qua giao diện và mạng truyền thông chuẩn.

5.1.6.4. Các tiện ích

Đối với các thiết bị được điều khiển bằng máy tính thì các tiện ích là rất quan trọng. Đó có thể là tiện ích lập trình có trợ giúp đồ họa, hệ thống dạy (*teach-in*), mô phỏng,...

Bộ thông số kỹ thuật chính của các robot thương mại thường được các nhà chế tạo cung cấp đầy đủ trong các catalog. Trong một số sổ tay cũng có các bản thống kê về thông số kỹ thuật của các robot do các hãng lớn trên thế giới sản xuất.

5.2. THIẾT KẾ VÀ TỔ HỢP ROBOT

5.2.1. Các nguyên tắc chung

Về cơ bản, thiết kế robot cũng tuân theo những nguyên tắc chung của việc thiết kế máy. Chúng ta sẽ áp dụng các nguyên tắc đó vào đối tượng cụ thể là robot.

5.2.1.1. Xuất phát từ yêu cầu công nghệ

Mỗi robot đều được thiết kế và chế tạo để trực tiếp thực hiện hoặc phục vụ cho một quá trình sản xuất cụ thể. Vì vậy, các thông số kỹ thuật của robot phải đáp ứng yêu cầu của nguyên công công nghệ. Ví dụ, robot hàn hồ quang phải có khả năng di chuyển que hàn theo đường hàn định trước; có tốc độ di chuyển của phần công tác (kẹp que hàn) phải phù hợp với chế độ hàn; có khả năng tự điều chỉnh để duy trì khoảng cách và góc nghiêng của que hàn so với bề mặt vật hàn; phải có cơ cấu tự động cấp dây hàn,... Robot lắp ráp phải có khả năng nắm được vật, di chuyển và đặt nó đúng chỗ cần lắp và thực hiện thao tác lắp (lựa, đẩy, kẹp,...). Chúng cần có độ chính xác định vị cao hoặc được trang bị hệ điều khiển thích nghi để nhận biết vị trí của vật lắp và tự động lựa nó theo tình huống.

5.2.1.2. Đảm bảo sự đồng bộ hệ thống

Robot phải làm việc trong hệ thống công nghệ cùng với các thiết bị khác nên chúng phải phối hợp nhịp nhàng với nhau. Ví dụ, robot phục vụ (chuyển, gắp phối và thay dụng cụ) cho máy công cụ, khi nhận được tín hiệu gia công xong chi tiết phải tác động mở kẹp, nhả chi tiết bỏ lên băng tải, nhả phối từ băng tải khác đặt vào cơ cấu kẹp, kẹp phối, lùi ra khỏi vùng gia công, phát tín hiệu kẹp xong để cho phép máy công cụ làm việc. Như vậy, trạng thái làm việc của máy, robot, các băng tải... phải được thường xuyên giám sát, điều khiển đồng bộ với nhau. Sự trục trặc trong phối hợp sẽ gây rối loạn và nguy hiểm.

5.2.1.3. Chọn kết cấu điển hình

Kế thừa kết cấu là một nguyên tắc cơ bản của thiết kế máy. Khi thiết kế, dù có ý hay không, ít hay nhiều, người thiết kế cũng phải kế thừa kết cấu nào đó. Điển hình hoá kết cấu là sự kế thừa kết cấu một cách có ý thức và có tổ chức bằng cách hệ thống hoá kết cấu, tổ chức kết cấu thành các nhóm điển hình. Công việc của người thiết kế là chọn kết cấu điển hình, hiệu chỉnh chúng nếu cần và tổ hợp nó vào hệ thống. Sử dụng kết

câu điển hình làm cho quá trình thiết kế và chế tạo được đơn giản, nhanh chóng, chất lượng và rẻ tiền. Thiết kế robot theo phương pháp tổ hợp modul (sẽ được trình bày ở phần sau) là dạng phát triển cao của sự điển hình hoá kết cấu.

5.2.1.4. Đảm bảo sự hoà hợp giữa robot với môi trường

Nguyên tắc này đảm bảo sự làm việc có hiệu quả, tin cậy, an toàn, bền lâu của robot. Nó tính đến nhiệt độ môi trường, độ ẩm, lượng khí hoặc chất gây hại, mật độ bụi, mức độ rung động,... Có 2 biện pháp đảm bảo sự hoà hợp giữa robot với môi trường. Biện pháp thứ nhất là cải tạo môi trường, như điều hoà không khí, lọc bụi, lọc độc, cách ly để chống rung. Biện pháp này kém hiệu quả khi phạm vi làm việc của robot rộng, ví dụ trong phân xưởng, trong hầm mỏ,... Khi đó người ta dùng biện pháp thứ hai, là bảo vệ robot hoặc các bộ phận của nó khỏi tác động có hại của môi trường, ví dụ bao kín các khối điều khiển; làm mát cục bộ các bộ phận phát nhiệt hoặc tăng khả năng chịu nhiệt của chúng. Nhiều khi phối hợp các biện pháp có thể mang lại hiệu quả cao.

5.2.1.5. Sự hoà hợp giữa robot với người dùng

Đó là tính đến sự tác động của thiết bị đến tâm, sinh lý của người dùng. Ngày nay, người ta hay nói đến quan hệ "thân thiện" giữa máy móc với người dùng. Nó là kết hợp của các ngành khoa học, như tâm sinh lý lao động, nhân trắc học, tổ chức lao động,... Sự hài hoà đó thể hiện ở hình dạng, kích thước, vị trí, màu sắc, âm thanh,... mà con người cảm nhận khi tiếp xúc với thiết bị. Có một ngành khoa học, nghiên cứu về các giải pháp thiết kế đảm bảo sự hoà hợp giữa máy móc và con người, gọi là *Ergonomics*. Đặc tính thể hiện tính phù hợp giữa thiết bị và con người được gọi là *tính ergonomic*.

5.2.1.6. Thiết kế có định hướng sản xuất

Nguyên tắc này nói về *tính công nghệ* của kết cấu. Định hướng của nó là thiết kế ra kết cấu sao cho việc chế tạo nó được dễ dàng nhất, rẻ tiền nhất. Chỉ tiêu của tính công nghệ là chỉ tiêu kinh tế, nhưng biểu hiện của nó rất khác nhau, tùy thuộc điều kiện sản xuất cụ thể. Chính vì thế, nguyên tắc này còn có tên là *thiết kế định hướng phân xưởng (Workshop Oriented Design)*.

5.2.2. Các công việc phải tiến hành khi thiết kế robot

Robot là thiết bị rất phức tạp, nên thiết kế và chế tạo nó là công việc có tầm cỡ quốc gia của các ngành hoặc các hãng công nghiệp lớn. Riêng việc thiết kế robot đòi hỏi khối lượng công việc rất lớn, đa dạng của các tập thể cán bộ thiết kế có trình độ chuyên môn cao. Thường các tập thể đó được lãnh đạo bởi các tổng công trình sư, chịu trách nhiệm thiết kế hệ thống và điều hành chung và các nhóm cán bộ thiết kế chuyên ngành, phụ trách các hệ thống riêng biệt, như cơ khí, thủy lực, khí nén, điều khiển và truyền động điện,... Trong bối cảnh giao lưu kinh tế và kỹ thuật mang tính toàn cầu như hiện nay, không mấy khi người ta thiết kế và chế tạo các thiết bị "từ A đến Z". Tuy nhiên, để bạn đọc hình dung một cách tổng quát quá trình thiết kế robot, chúng tôi nêu ra các công việc cần làm như sau:

1. Phân tích quá trình công nghệ để xác định khâu nào cần phải sử dụng robot, chú ý đặc biệt các khâu sử dụng lao động chân tay hoặc điều kiện lao động khắc nghiệt. Sơ bộ đánh giá khả năng và hiệu quả của việc sử dụng robot vào các khâu đó.

2. Nghiên cứu các thông số kết cấu của đối tượng dự định sẽ xử lý bằng robot, như hình dạng, kích thước, khối lượng, trạng thái vật lý (cứng, mềm, lỏng,...), sự phân bố khối lượng của tải trọng,...

3. Nghiên cứu điều kiện môi trường sử dụng robot như nhiệt độ, bụi, rung động, khả năng gây cháy nổ,...

4. Xác định các thông số kỹ thuật chính của robot theo yêu cầu công nghệ. Từ đó tính toán các chỉ tiêu kinh tế - kỹ thuật, lựa chọn phương án thiết kế hợp lý về mặt kỹ thuật và kinh tế.

5. Phân chia kết cấu thành các cụm cơ cấu chính. Xác định cụm nào có sẵn trên thị trường, có thể mua được; cụm nào có thể sử dụng thiết kế đã có; cụm nào phải thiết kế và chế tạo mới hoàn toàn. Phân chia nhiệm vụ thiết kế các cụm cho các bộ phận chuyên ngành.

6. Tổ hợp hệ thống, thử nghiệm trên mô hình. Trong giai đoạn này nên sử dụng kỹ thuật mô hình hoá trên máy tính để giảm chi phí và thời gian thử nghiệm.

7. Chế thử, thử nghiệm robot trong phòng thiết kế và trong sản xuất.

8. Đánh giá kết cấu về tính năng kỹ thuật, công nghệ chế tạo, kinh tế. Từ đó đề xuất các biện pháp hoàn thiện kết cấu và công nghệ chế tạo robot.

Trong mỗi bước thiết kế cần chú ý tham khảo các mẫu robot đã có hoặc tìm mua các cụm chức năng tiêu chuẩn, có sẵn trên thị trường. Cũng cần hết sức quan tâm đến điều kiện chế tạo các cụm kết cấu mới. Tùy tình hình cụ thể, một số bước có thể là không cần thiết hoặc trình tự thực hiện chúng có thể thay đổi.

5.2.3. Thiết kế robot theo phương pháp tổ hợp modul

Phương pháp tổ hợp theo modul được áp dụng trong thiết kế và sản xuất máy móc nói chung. Phương pháp này đặc biệt có hiệu quả đối với các sản phẩm thông dụng, như ô tô, máy công cụ, robot,... Bản chất của phương pháp này là tổ hợp thiết bị từ các cụm kết cấu có công dụng chung, như thân, cơ cấu phát và truyền lực, phần công tác, phần điều khiển.... Chúng được nối ghép và truyền năng lượng hoặc thông tin cho nhau nhờ các chi tiết nối ghép nhanh. Muốn thiết kế và sản xuất robot theo phương pháp tổ hợp modul thì các cụm kết cấu phải được thống nhất hoá, tiêu chuẩn hoá. Vì vậy, thiết kế theo phương pháp tổ hợp modul gắn liền với thống nhất hoá, tiêu chuẩn hoá kết cấu.

Phương pháp tổ hợp modul có các ưu điểm chính sau:

- Giảm thời gian thiết kế và chế tạo, vì sử dụng các bản thiết kế hoặc các cụm chế tạo có sẵn trên thị trường. Nhiệm vụ của người thiết kế mới chỉ là chọn và tổ hợp chúng theo yêu cầu thực tế và chế tạo bổ sung các chi tiết phụ.

- Thoả mãn các điều kiện làm việc tiêu chuẩn với kết cấu đơn giản, sử dụng được các giải pháp kết cấu tối ưu, ít phạm phải các kết cấu và chức năng thừa. Khi thay đổi yêu cầu công nghệ, ví dụ khi cải tạo dây chuyền sản xuất, không nhất thiết phải mua hẳn robot mới mà có thể thay đổi, bổ sung một số modul của nó.

- Nâng cao chất lượng và độ tin cậy của thiết bị, vì các cụm tiêu chuẩn được chế tạo với chất lượng cao, được thử nghiệm tại các cơ sở chuyên môn hoá, có kinh nghiệm, được đầu tư đầy đủ các thiết bị gia công và thử nghiệm chuyên dùng.

- Giảm giá thành thiết bị, vì các cụm được sản xuất với tính loạt cao.

- Vì các modul của robot được chuẩn hoá cao nên nhiều robot sẽ sử dụng chung một số ít modul giống nhau, tạo dễ dàng trong việc bảo dưỡng, bảo trì, sửa chữa, thay thế chúng sau này.

Nhược điểm cơ bản của phương pháp tổ hợp modul là khó thoả mãn các yêu cầu cá biệt. Có một số trường hợp làm cho thiết bị cồng kềnh, nặng nề, tính năng kỹ thuật không hợp lý. Mặt khác, phải tốn kém rất nhiều cho việc thống nhất hoá, tiêu chuẩn hoá kết cấu.

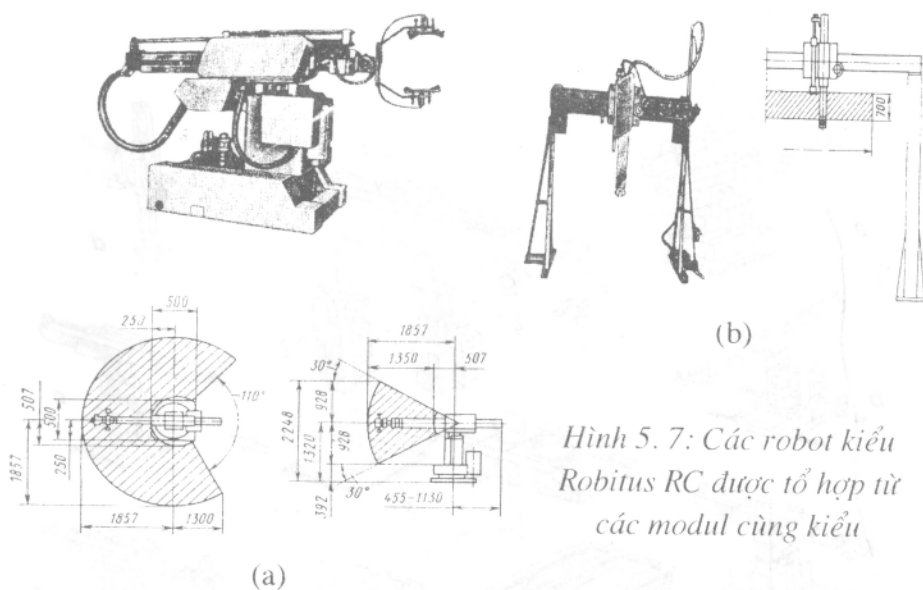
Sự thống nhất hoá, tiêu chuẩn hoá kết cấu nhằm giảm số chủng loại sản phẩm, nên luôn luôn mâu thuẫn với tính đa dạng trong kết cấu và sử dụng chúng. Mặt khác, sự phát triển không ngừng trong kỹ thuật thiết kế, công nghệ, vật liệu, kết cấu,... luôn luôn có xu hướng phá vỡ các tiêu chuẩn đã xây dựng. Lựa chọn chỉ tiêu để thống nhất hoá và tiêu chuẩn hoá là việc khó khăn. Đối với robot, người ta đã chọn các chỉ tiêu sau:

Theo tính năng, người ta phân robot chia thành các "gam" về sức nâng, tốc độ dịch chuyển, tầm với, độ chính xác định vị,... Một số tính năng không thể thay đổi, một số khác có thể thay đổi trong nội bộ gam. Tương tự, người ta cũng phân nhóm robot theo kiểu điều khiển, ví dụ điều khiển điểm - điểm, điều khiển *contour*.

Theo chức năng, người ta thống nhất hoá, tiêu chuẩn hoá các cụm chức cơ bản như cụm chuyển động thẳng, chuyển động góc, phân công tác, hệ điều khiển, hệ chấp hành, thiết bị đo,... Chúng ta có thể tìm thấy thông số kỹ thuật của các cụm tiêu chuẩn trong các sổ tay. Một cụm chức năng phải có vai trò độc lập nhất định, đồng thời phải có tính vạn năng. Ví dụ, bộ điều khiển cần có khả năng làm việc với hệ chấp hành điện cơ, thủy lực, khí nén; có thể nhận tín hiệu từ các loại sensor khác nhau. Tay có thể lắp và làm việc với các loại thiết bị kẹp khác nhau.

Theo công nghệ, người ta thống nhất hoá và tiêu chuẩn hoá điều kiện sử dụng robot, ví dụ robot hàn, sơn, robot phục vụ dây chuyền sản xuất....

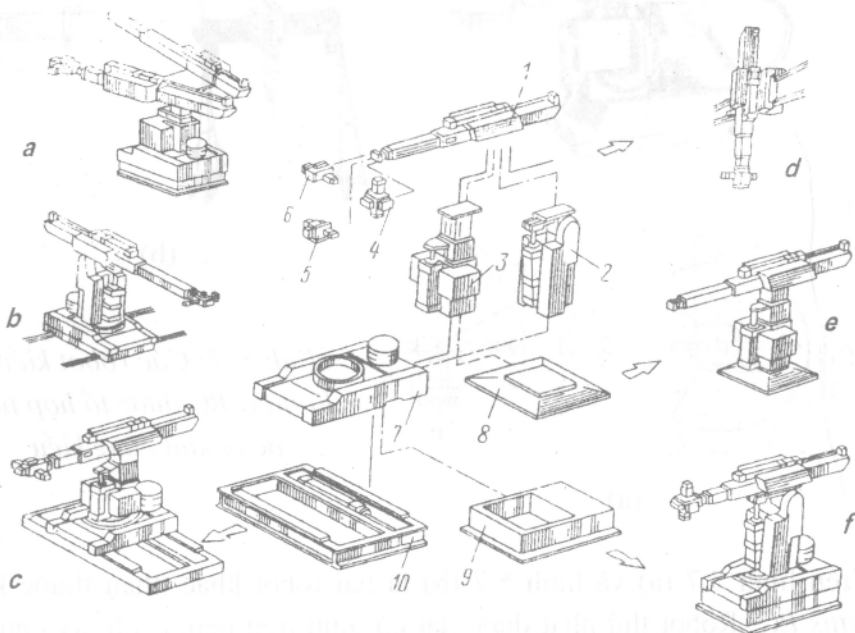
Một số ví dụ điển hình kết cấu tổ hợp modul có thể thấy ở robot *MHU Senior*, *MHU Junior*, *MHU Minor* của hãng Electrolux (Thụy Điển); *MHU-500* của hãng Bosch (Pháp), *Robitus RC* của Misubishi (Nhật).



Hình 5. 7: Các robot kiểu Robitus RC được tổ hợp từ các modul cùng kiểu

Trên hình 5.7 (a) và hình 5.7 (b) là hai robot khác nhau thuộc kiểu Robitus RC. Robot thứ nhất được đặt cố định trên nền, cánh tay chuyển động lên xuống, vùng công tác là một phần hình cầu. Robot thứ hai kiểu cổng, cánh tay được treo và chuyển động trên ray, vùng công tác có dạng hình chữ nhật. Điều đáng chú ý là modul cánh tay và toàn bộ hệ thống truyền động thủy lực và hệ thống điều khiển liên quan đều cùng kiểu.

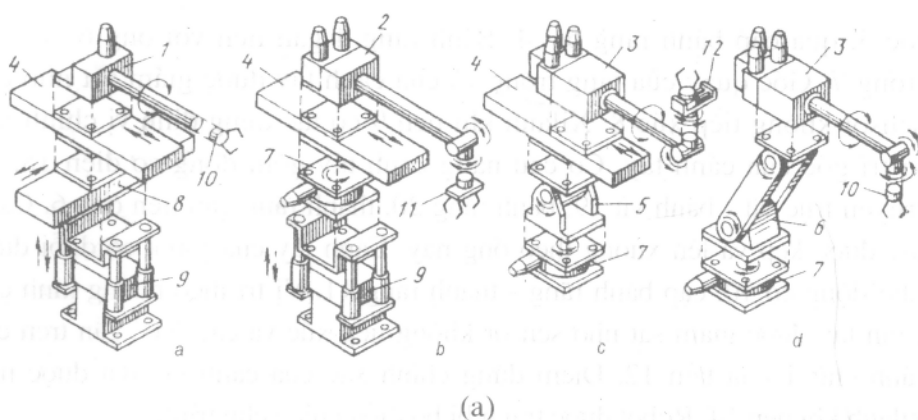
Sơ đồ tổ hợp trong hình 5.8 cho thấy sự phong phú và đa dạng hơn của các phương án tổ hợp modul. Từ một số modul: cánh tay 1 với cơ cấu chuyển động qua lại, cơ cấu quay cánh tay lên-xuống trong mặt phẳng thẳng đứng 2, cơ cấu nâng hạ cánh tay trong mặt phẳng thẳng đứng 3, cơ cấu xoay cổ tay lên-xuống trong mặt phẳng thẳng đứng 4, cơ cấu xoay cổ tay trái-phải trong mặt phẳng thẳng đứng 5, phần công tác 6 và các modul thân, giá ($8 \div 10$) có thể tổ hợp thành các robot Robitus RC khác nhau: robot cố định, thân quay, có 2 cánh tay gập gù (a); robot di động trên ray, thân quay, một cánh tay lên xuống (b); robot di động, thân quay, một cánh tay lên xuống và gập gù (c); robot treo, chuyển di động trên ray, một cánh tay (d); robot cố định, một cánh tay gập gù (e); robot cố định, thân quay, một cánh tay gập gù (f). Phương án cuối cùng tương ứng với mẫu robot trên hình 5.7 (a).



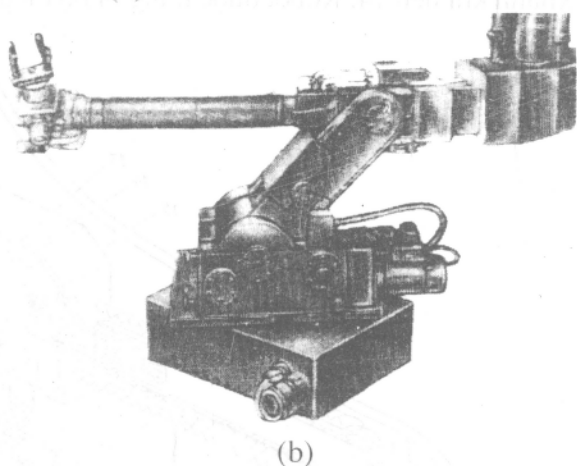
Hình 5. 8: Các phương án tổ hợp modul của robot họ Robitus RC

Các robot họ Robitus RC có thể dùng hệ truyền động khí nén, thủy lực và hệ điều khiển một, hai hay 3 tọa độ. Tùy theo bộ điều khiển và truyền động mà tải trọng của chúng có thể là $(15 \div 55) \text{ kg}$, độ chính xác định vị là $\pm 0,1 \text{ mm}$ hoặc $\pm 0,2 \text{ mm}$.

Trên hình 5.9 (a) là bốn phương án tổ hợp robot với các hệ tọa độ Đề-các, trụ, cầu từ 12 modul khác nhau. Từ các mũi tên trong sơ đồ chúng ta có thể nhận biết chức năng của từng modul và trình tự tổ hợp chúng. Hình 5.9 (b) là một mẫu tương ứng với một trong những phương án tổ hợp nói trên (phương án d).



Hình 5. 9: Các robot Robitus RC được tổ hợp từ các modul cùng kiểu



5.3. MỘT SỐ KẾT CẤU ĐIỂN HÌNH CỦA ROBOT

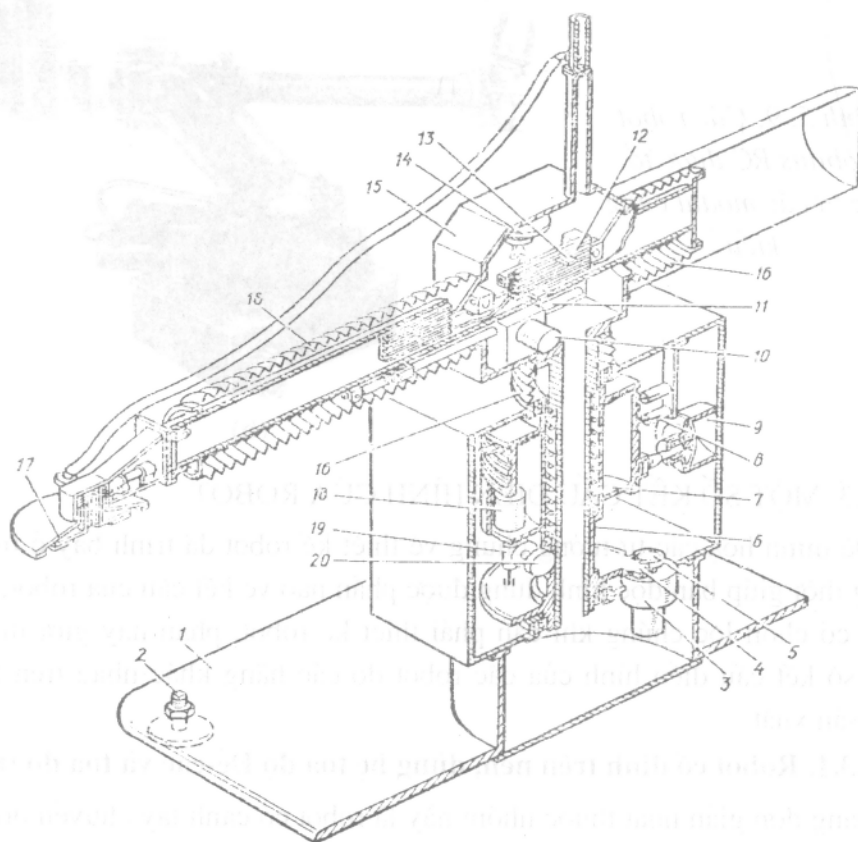
Để minh họa các tư tưởng chung về thiết kế robot đã trình bày ở trên, đồng thời giúp bạn đọc hình dung được phần nào về kết cấu của robot, kể thừa có chọn lọc chúng khi cần phải thiết kế robot, phần này giới thiệu một số kết cấu điển hình của các robot do các hãng khác nhau trên thế giới sản xuất.

5.3.1. Robot cố định trên nền, dùng hệ tọa độ Đề-các và tọa độ trụ

Dạng đơn giản nhất thuộc nhóm này là robot có cánh tay chuyển động trên *trụ dẫn hướng công xôn*. Một trong những đại diện của nhóm kết cấu này là robot MP4 của Liên xô (cũ). Đó là loại robot điện-cơ với sơ đồ động được biểu diễn trên hình 5.10.

Trong thân 1 của robot chứa cơ cấu nâng tay và quay nó xung quanh trục thẳng đứng. Chuyển động quay được phát động từ bộ động cơ-giảm

tốc 3, qua cặp bánh răng 5 - 4. Bánh răng 4 gắn liền với ống 6 và tang trống 7. Góc quay của tang trống và của cánh tay được giám sát nhờ cặp sensor không tiếp xúc 8. Xilanh khí nén 9 có tác dụng định vị chính xác vị trí góc của cánh tay. Cơ cấu nâng cánh tay gồm động cơ điện 18, bộ truyền trục vít - bánh vít 19, bánh răng 20, thanh răng gắn trên ống 6. Cánh tay được kẹp và lên xuống theo ống này. Cánh tay của robot co duỗi được nhờ động cơ 10, cặp bánh răng - thanh răng 11. Vị trí theo hướng kính của cánh tay được giám sát nhờ sensor không tiếp xúc và các "cờ" gắn trên các rãnh chữ T của tấm 12. Điểm dừng chính xác của cánh tay đạt được nhờ xilanh khí nén 14. Robot được trang bị bộ điều khiển chu trình.

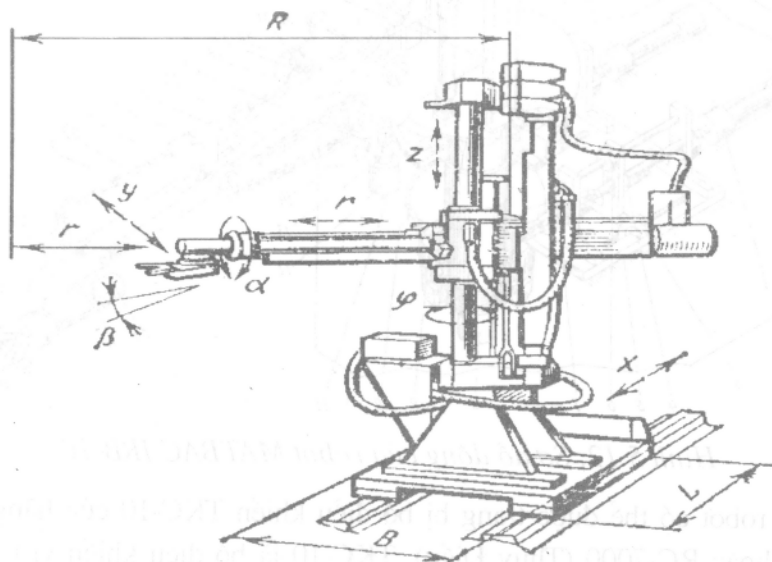


Hình 5.10: Sơ đồ động của robot MP4

Với cơ cấu nâng cánh tay kiểu công xôn như mô tả ở trên, khoảng dịch chuyển của cánh tay theo phương thẳng đứng bị hạn chế bởi chiều dài dẫn hướng thường nhỏ. Vì vậy nó được dùng cho các robot nâng chuyển

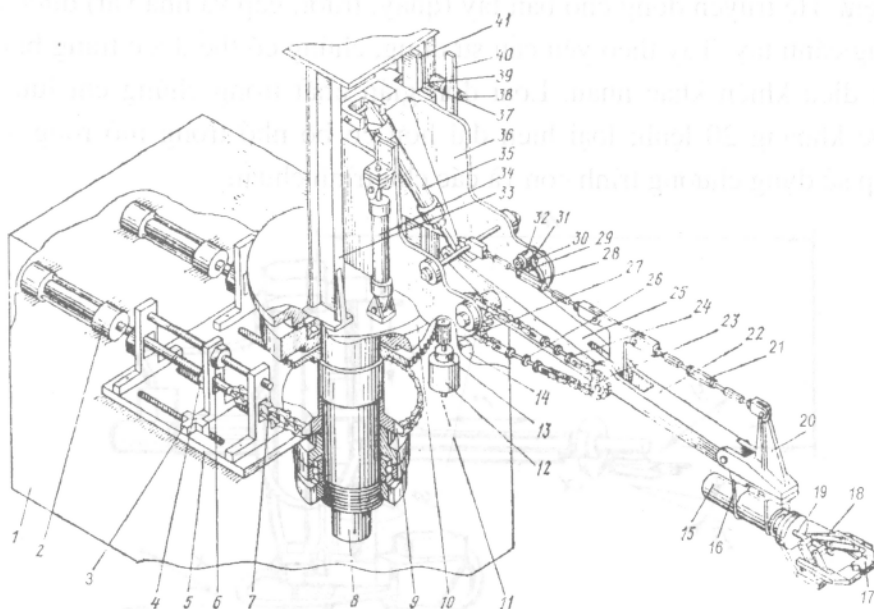
đơn giản, làm việc trong hệ toạ độ vuông góc hoặc toạ độ trụ, dùng truyền động khí nén hoặc điện - cơ và bộ điều khiển chu trình đơn giản.

Để khắc phục khuyết điểm của cơ cấu nâng cánh tay nói trên, cánh tay được gắn trên bàn trượt (hình 5.11). Trụ dẫn hướng tựa 2 đầu cho phép nâng chiều cao vùng công tác tới 2 m, tải trọng $1 \div 1000$ kg, số bậc tự do $3 \div 7$. Robot thuộc nhóm này được sản xuất tại hầu hết các nước lớn trên thế giới, ví dụ Liên xô có ПФ-1001 С, ИТЭКАР, РКТФБ; Bulgari có РБ-231, РБ-232, РБ-233; Hungari có IR-51; Balan có HM-3, MP-25; Mỹ có họ robot Versatran; Nhật có MHY Junior, Versatran E-302, UM1320PT,... trong đó có thể coi họ robot Versatran của hãng AMF Versatran Automation System của Mỹ là đại diện về kết cấu. Chúng dùng hệ thống truyền động cơ khí - thuỷ lực. Chuyển động quay quanh trục thẳng đứng được thực hiện bởi 2 xilanh thuỷ lực và truyền động xích. Chuyển động thẳng đứng của bàn trượt cũng do các xilanh thuỷ lực đảm nhiệm. Hệ truyền động cho bàn tay (quay, trượt, gấp và nhả vật) được đặt trong cánh tay. Tùy theo yêu cầu sử dụng, chúng có thể được trang bị các loại điều khiển khác nhau. Loại đơn giản nhất trong chúng chỉ lưu trữ được khoảng 20 lệnh; loại hiện đại hơn có bộ nhớ trong mở rộng, cho phép sử dụng chương trình con và các chu trình chuẩn.



Hình 5.11: Sơ đồ kết cấu robot với cánh tay gắn trên bàn trượt

Một dạng khác thuộc nhóm này là các robot có *cánh tay gấp*. Đó là sản phẩm của các hãng Nagoya Kiko, Icnikon Industries, Tokyo Keiki (Nhật). Trên hình 5.12 là sơ đồ động học của robot MATBAC IRB-10 do hãng Tokyo Keiki sản xuất. Trên thân 1 lắp các hệ thống nâng hạ và quay giá cánh tay 33. Cánh tay gồm 2 khâu (22 và 25) dài như nhau, nối với nhau bằng khớp trụ và truyền động qua nhau bằng xích. Góc quay của khâu bị động 22 gấp đôi góc quay của khâu chủ động 25 để duy trì phương chuyển động ngang của phần công tác. Phương nằm ngang của bàn tay được duy trì nhờ cơ cấu bình hành, gồm các khâu 22, 25 và các thanh nối 21, 28. Trên đầu mút khâu 22 gắn giá 20 của cổ tay và bàn tay. Động cơ thủy lực 15 quay cổ tay. Động cơ thủy lực 19 tạo chuyển động ra vào (kẹp, nhả) của các ngón tay. Chuyển động nâng hạ giá 33 do động cơ thủy lực 34 đảm nhận. Cơ cấu quay giá 33 gồm 2 xilanh thủy lực 2 và bộ truyền xích 7. Xilanh thủy lực 35 thực hiện việc co duỗi cánh tay. Các cảm biến 12, 32, 37 dùng để giám sát vị trí của bàn quay 10, cánh tay 25 và giá 33.

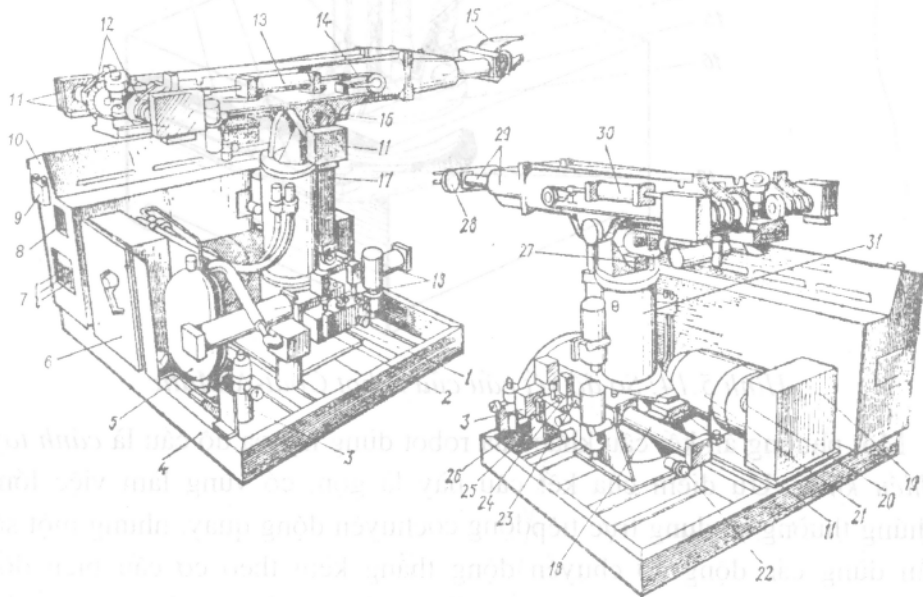


Hình 5.12: Sơ đồ động học của robot MATBAC IRB-10

Các robot có thể được trang bị bộ điều khiển TKC-10 của hãng Keiki (Nhật) hoặc RC-7000 (Thụy Điển). TKC-10 là bộ điều khiển vị trí, dùng tín hiệu tương tự. Nó có thể điều khiển đồng thời 2 tọa độ. RC-7000 là bộ điều khiển số, có thể điều khiển đồng thời 7 tọa độ, bộ nhớ có thể chứa 250 ÷ 5000 lệnh. Nó có 20 cổng vào và ra để nối ghép với các thiết bị ngoài.

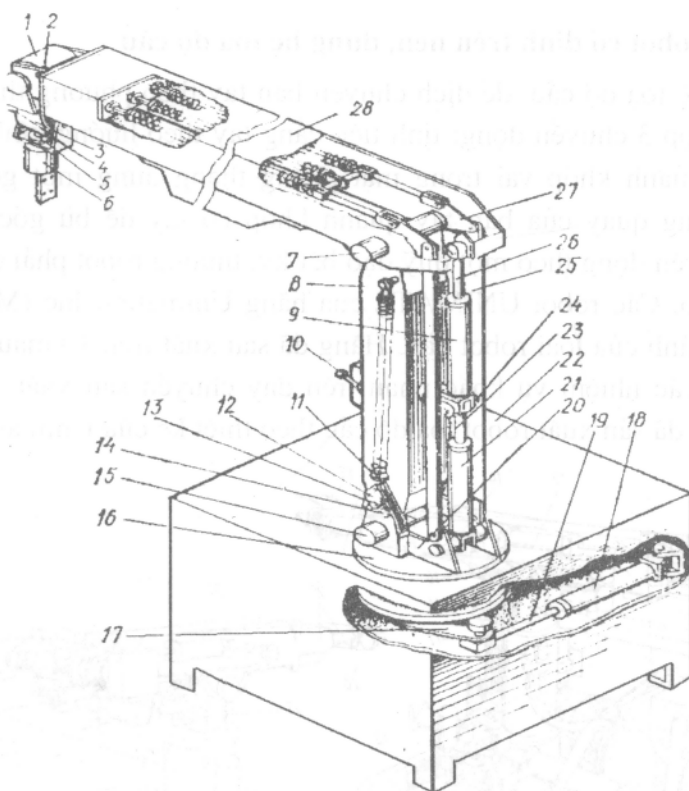
5.3.2. Robot cố định trên nền, dùng hệ tọa độ cầu

Trong hệ tọa độ cầu, để dịch chuyển bàn tay theo phương thẳng đứng cần phối hợp 3 chuyển động: tịnh tiến cẳng tay theo hướng kính R , quay cánh tay quanh khớp vai trong mặt phẳng thẳng đứng một góc α và chuyển động quay của bàn tay quanh khớp cổ tay để bù góc quay α . Muốn chuyển động theo một quỹ đạo bất kỳ, thường robot phải có tới $5 \div 6$ bậc tự do. Các robot UNIMATE của hãng Unimation Inc (Mỹ) là đại diện điển hình của loại robot này. Hãng đã sản xuất trên 10 mẫu cơ sở để thực hiện các nhiệm vụ khác nhau trên dây chuyền sản xuất. Ngoài ra nhiều nước đã sản xuất robot tọa độ cầu theo thiết kế của Unimation Inc.



Hình 5.13: Sơ đồ kết cấu của robot Unimate Mark II

Trên hình 5.13 là sơ đồ kết cấu của robot Unimate Mark II. Nó có 5 bậc tự do. Cánh tay được gắn trên trụ 31, quay quanh trục thẳng đứng nhờ xilanh thủy lực 18. Xilanh thủy lực 17 tạo nên chuyển động lắc (quay) của cánh tay quanh khớp vai. Xilanh 30 tạo chuyển động ra vào (hướng kính) của cẳng tay. Xilanh 13 thông qua bộ truyền xích 14 tạo chuyển động quay của cổ tay quanh trục. Chuyển động quay cổ tay trong mặt phẳng thẳng đứng do xilanh và bộ truyền xích đặt trong ống cẳng tay thực hiện.



Hình 5.14: Sơ đồ kết cấu của robot Coat-A-Matic

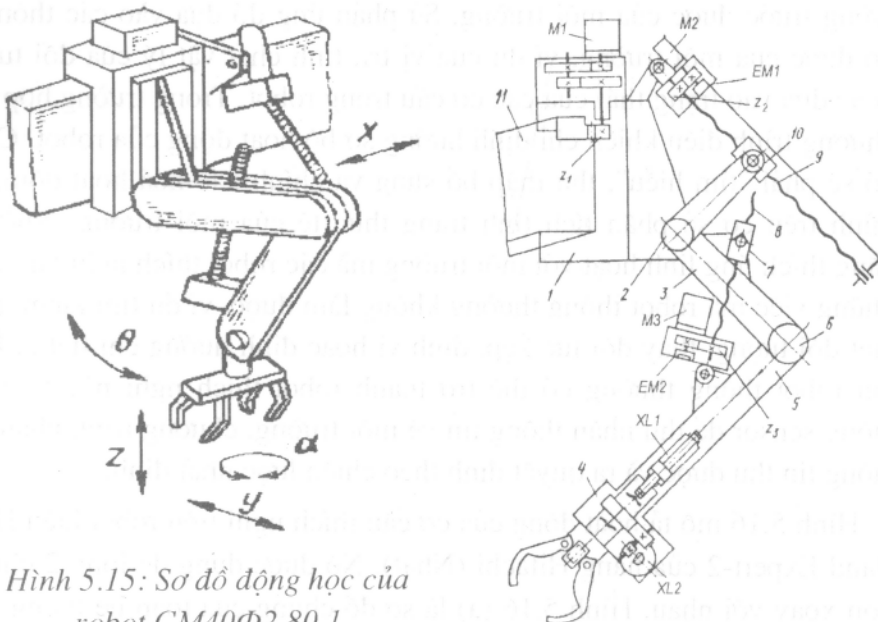
Một phương án kết cấu khác của robot dùng hệ tọa độ cầu là *cánh tay nhiều khâu*. Ưu điểm của kết cấu này là gọn, có vùng làm việc lớn. Chúng thường sử dụng trực tiếp động cơ chuyển động quay, nhưng một số vẫn dùng các động cơ chuyển động thẳng kèm theo cơ cấu biến đổi chuyển động như xích, thanh răng, đòn,... để tạo chuyển động quay của khâu bị dẫn. Nhờ vậy, bộ phận công tác vẫn giữ được chuyển động thẳng trong khi các khâu dẫn chuyển động quay. Cơ cấu như vậy được ứng dụng trên robot phun sơn COAT-A-MATIC của hãng Retab (Thụy Điển). Sơ đồ kết cấu của nó cho trên hình 5.14. Robot có 6 bậc tự do. Mâm 16 quay quanh trục thẳng đứng nhờ xilanh thủy lực 18. Cánh tay liên kết với mâm qua khớp quay. Xilanh thủy lực 21 có một đầu gắn với mâm quay qua tấm nối 20, đầu kia gắn với khâu 8 thông qua chạc 24, tạo chuyển động lắc lư cho khâu 8. Chuyển động quay của khâu 28 do xilanh thủy lực 9 thực hiện. Chuyển động lắc của cổ tay quanh 2 trục vuông góc được thực hiện nhờ 2 động cơ thủy lực quay 1 và 3. Động cơ thủy lực 6 quay

giá kẹp súng phun sơn quanh trục còn lại. Trạng thái của hệ thống được giám sát nhờ các sensor kiểu chiết áp 2, 4, 5, 7, 15. Trên robot dùng bộ điều khiển contour. Việc lập trình được thực hiện bằng phương pháp dạy, nghĩa là người vận hành dịch chuyển đầu phun theo quỹ đạo cần thiết, bộ điều khiển nhớ lại quỹ đạo dưới dạng chương trình. Lò xo 11 giữ vai trò cân bằng, giúp cho việc dịch chuyển đầu phun bằng tay được dễ dàng.

5.3.3. Robot treo

Các robot treo được lắp và chuyển động trên các đường ray trên không. Ưu điểm cơ bản của chúng là không chiếm diện tích sản xuất, ít cản trở hoạt động của các thiết bị khác và có vùng làm việc rộng. Các robot treo có thể vận chuyển nguyên vật liệu, thiết bị trong từng phân xưởng hoặc giữa các phân xưởng. Chúng có thể phục vụ nhiều thiết bị khác nhau trong dây chuyền sản xuất. Chúng cũng có thể được dùng vào các công việc lắp ráp, rửa, phun sơn, hàn,... Theo số phương chuyển động của tay, có thể phân các robot treo thành 2 loại: robot chuyển động theo một phương (kiểu palăng) và robot chuyển động theo 2 phương (kiểu cầu trục).

Robot CM40Φ2.80.1 (Liên xô) là đại diện điển hình của robot kiểu pa lăng. Nó được thiết kế để phục vụ cho 60 kiểu máy gia công kim loại có trục chính nằm ngang, bố trí theo một hàng hoặc hai hàng song song. Sơ đồ động học của robot CM40Φ2.80.1 được cho trên hình 5.15.



Hình 5.15: Sơ đồ động học của robot CM40Φ2.80.1

Cánh tay của robot được gắn trên giá 1, có thể di chuyển trên ray trong khoảng 12 m nhờ động cơ bước thủy lực M1, hộp giảm tốc 2 cấp và cơ cấu bánh răng - thanh răng. Thanh răng được gắn trên thanh ray 11. Khâu dẫn 3 và khâu bị dẫn 5 của cánh tay chuyển động nhờ các động cơ bước thủy lực có khuyếch đại thủy lực M2 và M3, thông qua hộp giảm tốc một cấp và các cặp vít me - đai ốc bị 9-10 và 8-7. Đó là các chuyển động quay, lắc lư quanh các trục 2 và 6. Trong các hộp giảm tốc có các ly hợp điện - từ EM1 và EM2 để phanh các cơ cấu khi ngắt dòng điện cung cấp cho động cơ. Đầu lực 4 với xilanh thủy lực XL1 tạo chuyển động quay của cổ tay.

Robot CM40Φ2.80.1 được trang bị bộ điều khiển YIM-331 với dung lượng bộ nhớ 0,5 kB, lập trình bằng phương pháp dạy.

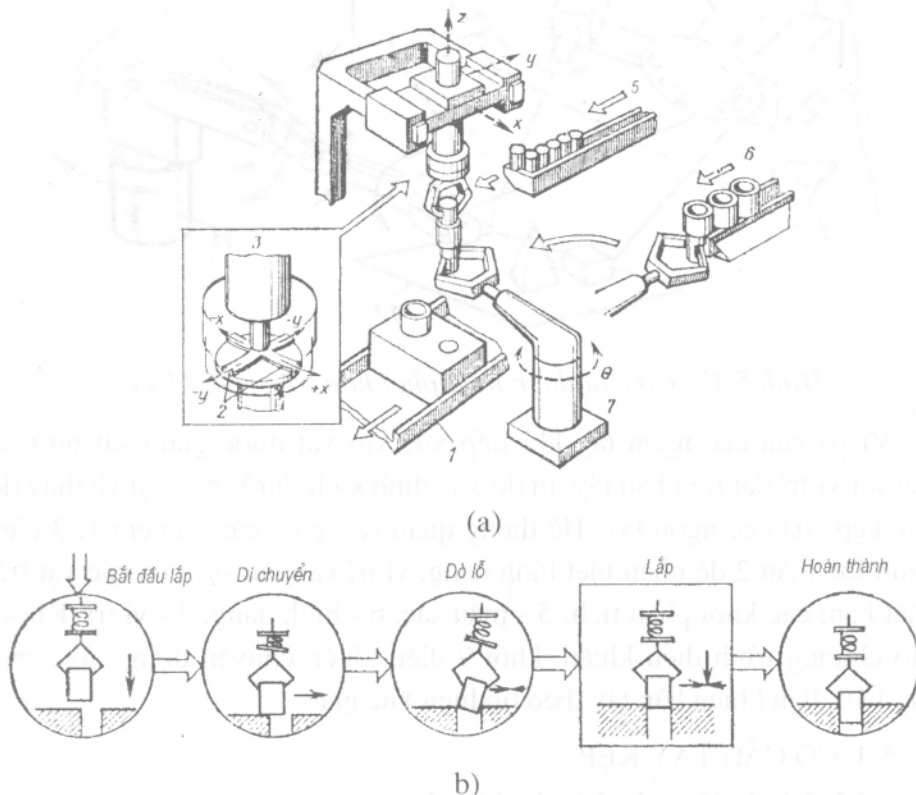
Robot kiểu cầu trục có tầm hoạt động, độ cứng vững và sức nâng cao hơn kiểu palăng. Tuy nhiên, kết cấu cầu trục cồng kềnh và phải gắn liền với nhà xưởng. Để thêm một khả năng chuyển động cho robot cầu trục, cần bổ sung một hệ truyền động. Ngoài điều đó ra, kết cấu của phần tay máy không có gì thay đổi so với robot kiểu pa lăng.

5.3.4. Robot có điều khiển thích nghi

Robot có điều khiển thích nghi (gọi tắt là robot thích nghi) là loại robot có khả năng tự phản ứng một cách có lợi trước sự biến động không lường trước được của môi trường. Sự phản ứng đó dựa vào các thông số đo được của môi trường, ví dụ của vị trí, tính chất vật lý của đối tượng, hoặc dựa vào trạng thái của các cơ cấu trong robot. Trong trường hợp này, chương trình điều khiển chỉ định hướng sơ bộ hoạt động của robot. Chính nó sẽ phải "tìm hiểu", thu thập bổ sung và chính xác hoá hoạt động của mình trên cơ sở phân tích tình trạng thực tế của môi trường. Nhờ khả năng thích ứng linh hoạt với môi trường mà các robot thích nghi làm được những việc mà robot thông thường không làm được, ví dụ tìm kiếm, nhận biết đối tượng, thay đổi lực kẹp, định vị hoặc định hướng chi tiết.... Phần lớn robot thông thường có thể trở thành robot thích nghi nếu thêm hệ thống sensor để thu nhận thông tin về môi trường, chương trình phân tích thông tin thu được và ra quyết định theo chiến lược nhất định.

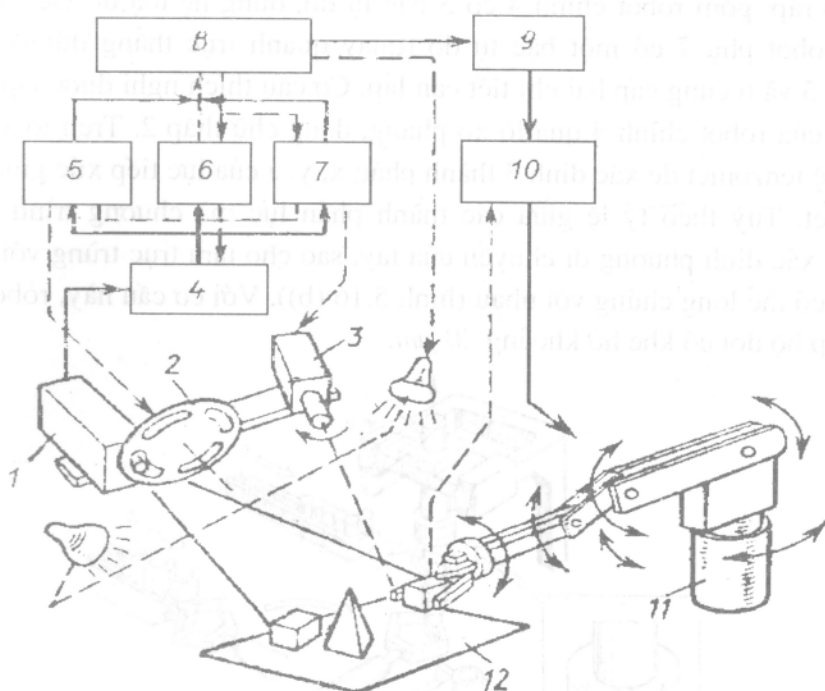
Hình 5.16 mô tả hoạt động của cơ cấu thích nghi trên robot kiểu HI-T-Hand Expert-2 của hãng Hitachi (Nhật). Nó được dùng để lồng 2 chi tiết tròn xoay với nhau. Hình 5.16 (a) là sơ đồ chung của toàn hệ thống thiết

bị lắp ráp, gồm robot chính 4 có 3 bậc tự do, dùng hệ tọa độ Đề các và một robot phụ 7 có một bậc tự do (quay quanh trục thẳng đứng). Hai máng 5 và 6 cung cấp hai chi tiết cần lắp. Cơ cấu thích nghi được lắp trên tay 3 của robot chính 4 qua lò xo phẳng, dạng chữ thập 2. Trên lò xo có dán hệ tenzomet để xác định 3 thành phần x , y , z của lực tiếp xúc giữa hai chi tiết. Tuỳ theo tỷ lệ giữa các thành phần lực mà chương trình điều khiển xác định phương di chuyển của tay, sao cho tâm trục trùng với tâm lỗ để có thể lồng chúng với nhau (hình 5.16 (b)). Với cơ cấu này, robot có thể lắp bộ đôi có khe hở khoảng $20\text{ }\mu\text{m}$.



Hình 5.16: Cơ cấu thích nghi của robot lắp ráp HI-T-Hand Expert-2

Hình 5.17 là sơ đồ cơ cấu thích nghi, phối hợp giữa thiết bị quan sát quang học và hệ thống xúc giác cơ điện, được lắp trên robot ETL của Nhật. Robot có 6 bậc tự do. Trên các ngón tay có gắn các sensor xúc giác, làm việc ở chế độ 1-0, để giúp robot tìm vị trí và hướng của các vật trong vùng công tác.



Hình 5.17: Cơ cấu thích nghi phối hợp trên robot ETL

Vị trí của các ngón tay khi tiếp xúc với vật được giám sát nhờ các sensor vị trí đặt trên bàn tay, từ đó xác định kích thước của vật và thay đổi lực kẹp của các ngón tay. Hệ thống quan sát, gồm các camera 1, 3 cùng kính lọc màu 2 để nhận biết hình dạng, vị trí và màu sắc của các vật trên mặt bàn; các khối phân tích: 5 - màu sắc, 6 - hình dạng, 7 - vị trí. Khối 8 tạo chương trình điều khiển. khối 9 điều khiển chuyển động của robot, khối 10 điều khiển bàn tay theo tín hiệu xúc giác.

5.4. CƠ CẤU TAY KẸP

5.4.1. Khái niệm và phân loại tay kẹp

Phần công tác của robot rất đa dạng. Trên các robot chuyên dùng thì phần công tác cũng là thiết bị chuyên dùng. Ví dụ, phần công tác của robot phun sơn là súng phun sơn, của robot hàn là kim kẹp dây hàn,... Trên một loạt các robot vạn năng, thường là robot vận chuyển, lắp ráp, xếp dỡ,... thì phần công tác có chức năng nắm, giữ và thực hiện các thao tác khác nhau với đối tượng (xoay, lựa, đặt,...). Bỏ qua sự khác biệt về kết

cấu, căn cứ vào chức năng chính của cơ cấu chúng ta gọi nó là *tay kẹp*^{*}. Mục này sẽ không đề cập đến phân công tác chuyên dùng mà chỉ nói về cơ cấu tay kẹp.

Các đối tượng mà robot phải xử lý rất khác nhau về kích thước, hình dạng và tính chất vật lý, nên tay kẹp cũng hết sức đa dạng. Yêu cầu cơ bản đối với tay kẹp là làm việc tin cậy: bắt đúng đối tượng, giữ chắc,... nhưng không làm hỏng đối tượng. Ngoài ra, nó cần gọn nhẹ, tác động nhanh. Tính vạn năng và sự gọn nhẹ luôn luôn mâu thuẫn với nhau. Một mặt người ta cố gắng mở rộng phạm vi hoạt động của từng tay kẹp. Mặt khác người ta tạo ra bộ các tay kẹp có tính năng khác nhau để người dùng có thể chọn tay kẹp phù hợp nhất cho từng việc cụ thể.

Tay kẹp được phân loại theo nhiều đặc trưng khác nhau, như theo công dụng, theo phương pháp giữ vật, theo tính vạn năng,... Chúng ta quan tâm đến các đặc trưng liên quan trực tiếp đến kết cấu, như sau:

- Theo nguyên lý tác động có tay kẹp *cơ khí*, *chân không*, *từ trường*, *tĩnh điện*,...
- Theo khả năng điều khiển có tay kẹp không có điều khiển, điều khiển cứng, điều khiển thích nghi.
- Theo nguồn năng lượng có các loại tay kẹp *có dẫn động* và *không có dẫn động*.

5.4.2. Kết cấu của tay kẹp

Do sự đa dạng về kết cấu của các tay kẹp, tài liệu này không thể mô tả hết các dạng kết cấu của chúng mà chỉ nghiên cứu kết cấu của một số loại tay kẹp điển hình.

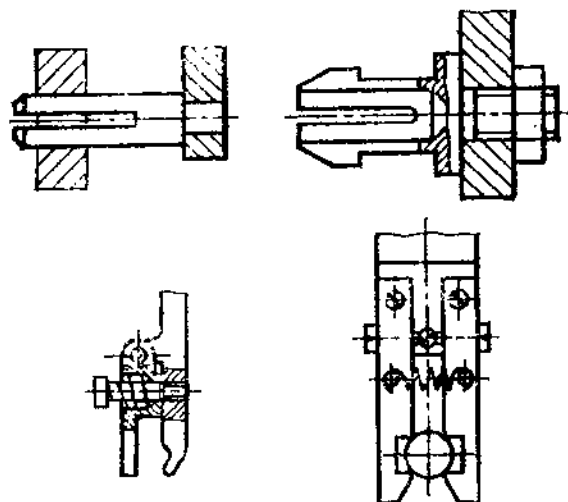
5.4.2.1. Tay kẹp cơ khí

Đó là loại tay kẹp để giữ, di chuyển đối tượng bằng các mỏ kẹp, móc, càng, tấm đỡ,...

Tay kẹp *không có điều khiển* dùng các loại mỏ, nhíp, chấu,... để kẹp vật nhờ tác dụng của lò xo hoặc nhờ lực đàn hồi của chính các chi tiết trong hệ thống (hình 5.18). Kết cấu của các tay kẹp loại này rất đơn giản.

^{*} Khi nhấn mạnh sự tương tự giữa tay máy và tay người, có thể gọi cơ cấu này là *bàn tay (Hand)*. Nhưng nó thường được gọi là cơ cấu kẹp, tay kẹp : "Захватное устройство" hoặc "Gripper".

Chúng không có nguồn dẫn động riêng, không có cơ cấu hãm nên lực kẹp dao động theo kích thước của đối tượng. Vì vậy, chúng thuộc loại tay kẹp chuyên dùng, được thiết kế cho từng loại đối tượng cụ thể, với phạm vi thay đổi kích thước hẹp. Do các đặc điểm trên, chúng được dùng chủ yếu trong sản xuất hàng khối.

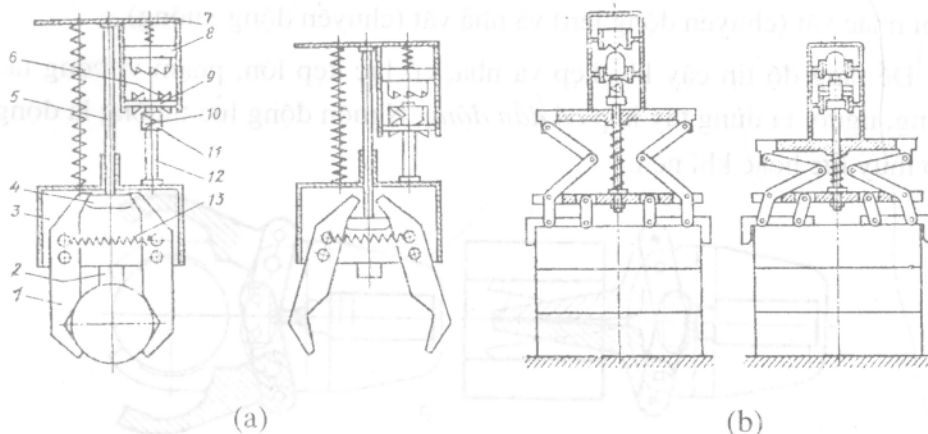


Hình 5.18: Tay kẹp không có điều khiển

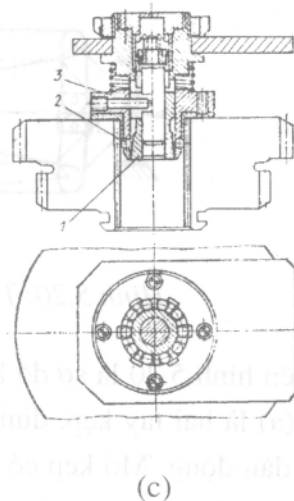
Để đảm bảo sự làm việc tin cậy và ổn định ngay cả khi có biến động kích thước của đối tượng, tay kẹp được bổ sung cơ cấu hãm, ví dụ như cơ cấu trong hình 5.19. Nhờ cơ cấu hãm mà tay kẹp làm việc với hành trình kẹp, nhả một cách rành mạch hơn mặc dù vẫn *không có nguồn dẫn động riêng*.

Tay kẹp trên hình 5.19 (a) được dùng với chi tiết tròn xoay. Lực kẹp được tạo ra khi dưới tác dụng của trọng lực, tấm nệm 4 tác dụng lên mặt nghiêng trên đuôi của các mỏ kẹp 1. Khi đặt vật xuống, nệm 4 tiến gần đến vật, hai mỏ kẹp được giải phóng, nhả vật do lực kéo của lò xo 13. Đáng chú ý ở đây là cơ cấu hãm. Nó gồm thân 7 gắn liền với cần 5. Chốt hãm 10 gắn trên cần 12 nhưng có thể quay tự do trên đó. Trong lỗ của thân 7 có lồng (không quay được) 2 bạc 8 và 9. Bạc 8 có các vấu phía dưới, bạc 9 có vấu cả trên và dưới. Các vấu này, mỗi lần ăn khớp và trượt tương đối với các vấu trên chốt 10 sẽ làm quay chốt đó 45°. Trong hành trình nhả, thân 7 tiến gần đến đầu 3, chốt 10 tiếp xúc với bạc 8, quay 45°, khi đi xuống tiếp xúc với mặt trên của bạc 9 lại quay tiếp 45° và bị mắc

trong lỗ. Hai mỏ kẹp bị giữ ở trạng thái nhả. Trong hành trình kẹp, sau khi chốt 2 tiếp xúc với vật, đầu 3 và thân 7 tiến gần đến nhau. Chốt 10 tiếp xúc với bạc 8, bị quay 45° . Khi đi xuống, chốt 10 lại tiếp xúc với bạc 9, bị quay tiếp 45° nữa. Kết quả là chốt lọt qua được rãnh và lọt ra khỏi lỗ. Các mỏ 1 được khoá ở trạng thái kẹp.



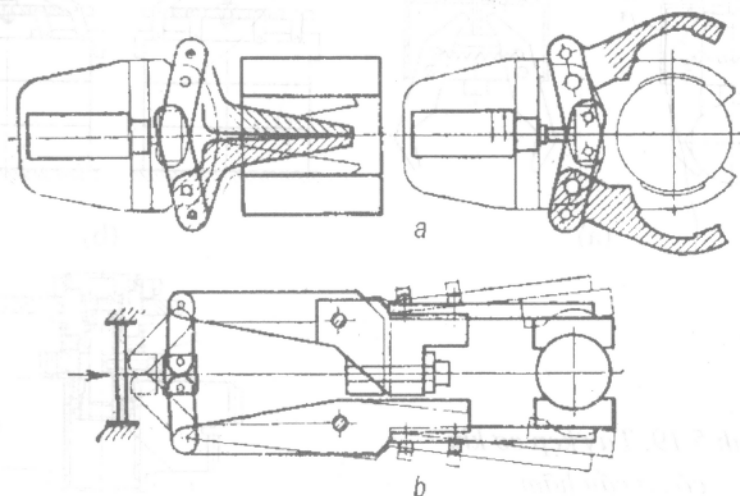
Hình 5.19: Tay kẹp cơ khí
có cơ cấu hãm



Tay kẹp trên hình 5.19 (b) làm việc theo nguyên lý tương tự, nhưng dùng để kẹp các chi tiết dạng đĩa, bánh răng, bạc,... trong tư thế thẳng đứng. Hai loại tay kẹp trên được dùng trong sản xuất hàng khối, để nhấc các vật tròn xoay có khối lượng không quá 30 kg, kích thước không được dao động quá 0,5 mm. Chúng được coi là tay kẹp có phạm vi công tác cứng.

Với nguyên lý làm việc tương tự như hai loại trên, tay kẹp trong hình 5.19 (c) thuộc loại *có phạm vi công tác hẹp*, cho phép dao động kích thước lớn hơn, từ 1,5 đến 2 mm. Nó kẹp vào mặt trụ trong của vật nhờ một dây bi 2 xếp theo vòng tròn. Mặt côn 1, có góc côn nhỏ hơn góc ma sát giữa các viên bi và vật liệu chi tiết (thường $5 \div 6$ độ), tạo ra lực kẹp khi nhấc vật (chuyển động lên) và nhả vật (chuyển động xuống).

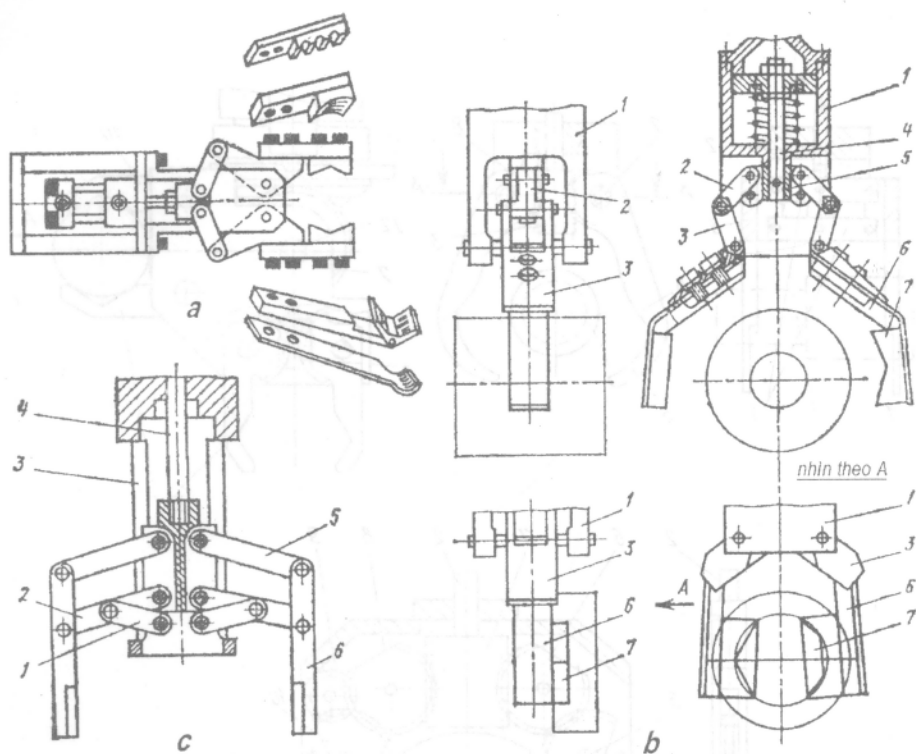
Để tăng độ tin cậy khi kẹp và nhả, có lực kẹp lớn, phạm vi công tác rộng, người ta dùng tay kẹp *có dẫn động*. Nguồn động lực thường là động cơ thủy lực hoặc khí nén.



Hình 5.20: Tay kẹp có truyền động thủy lực

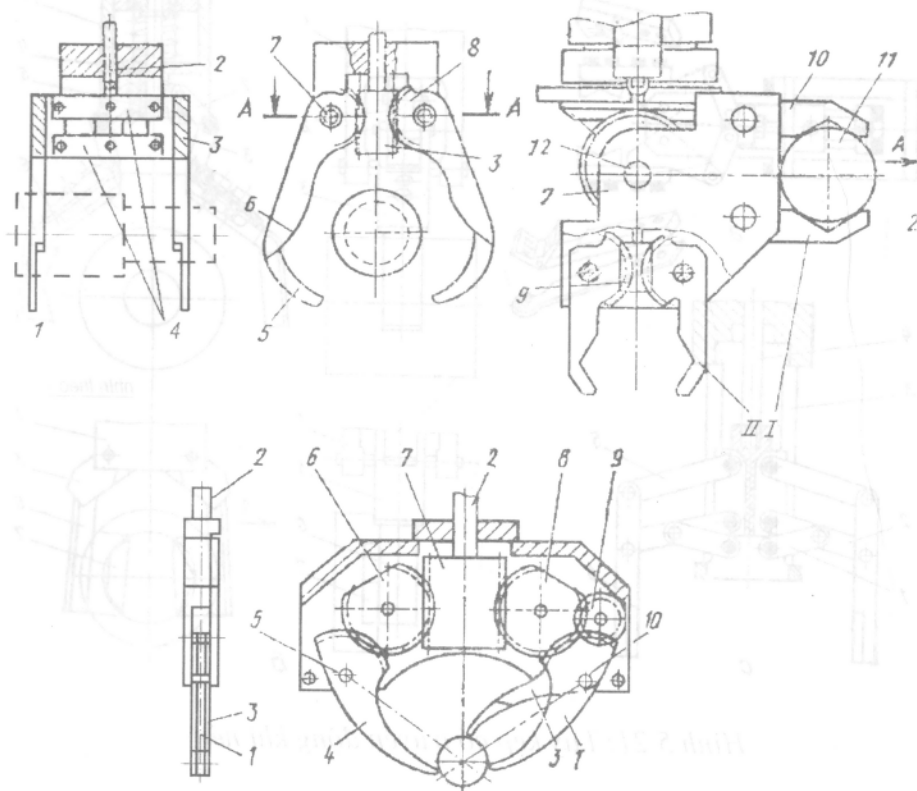
Trên hình 5.20 là sơ đồ kết cấu tay kẹp có truyền động thủy lực. Hình 5.20 (a) là hai tay kẹp, dùng chung cụm cơ sở là xi lanh thủy lực và hai càng dẫn động. Mỏ kẹp có thể thay được, vì vậy có thể dùng để kẹp vào mặt trong hoặc mặt ngoài của chi tiết. Kết cấu tay kẹp trên hình 5.20 (b) cho phép điều chỉnh khoảng cách giữa 2 mỏ kẹp.

Trên hình 5.21 là sơ đồ kết cấu các tay kẹp với truyền động khí nén. Các tay kẹp kiểu (a) và (b) có mỏ kẹp thay đổi được để dùng với các bề mặt khác nhau về hình dạng và kích thước. Tay kẹp kiểu (c) sử dụng cơ cấu bình hành, duy trì được độ song song giữa 2 mỏ kẹp cả khi độ mở thay đổi trong phạm vi rộng.



Hình 5.21: Tay kẹp có truyền động khí nén

Thay cho cơ cấu truyền động bằng cang, tay đòn,... trên nhiều tay kẹp người ta dùng cơ cấu thanh răng, trong đó đuôi các mỏ kẹp có dạng quạt răng (hình 5.22). Ưu điểm chính của cơ cấu này là gọn, làm việc tin cậy. Các sơ đồ trên hình vẽ cũng biểu diễn các dạng mỏ kẹp tự định tâm. Chúng có thể làm việc ở 2 vị trí, ví dụ vị trí kẹp phôi và vị trí đưa phôi vào mâm cặp của máy tiện (b). Kết cấu (c) cho phép định vị chi tiết tại 3 điểm. Sự kết hợp giữa truyền động thanh răng với đòn cũng gặp trên nhiều kiểu tay kẹp. Khi đã có nguồn dẫn động riêng, các tay kẹp có thể được điều khiển từ chương trình, bằng các lệnh nhả - kẹp đơn giản hoặc các chu trình điều khiển phức tạp hơn, như thay đổi khoảng công tác, làm việc nhiều vị trí,...



Hình 5.22: Tay kẹp sử dụng truyền động thanh răng

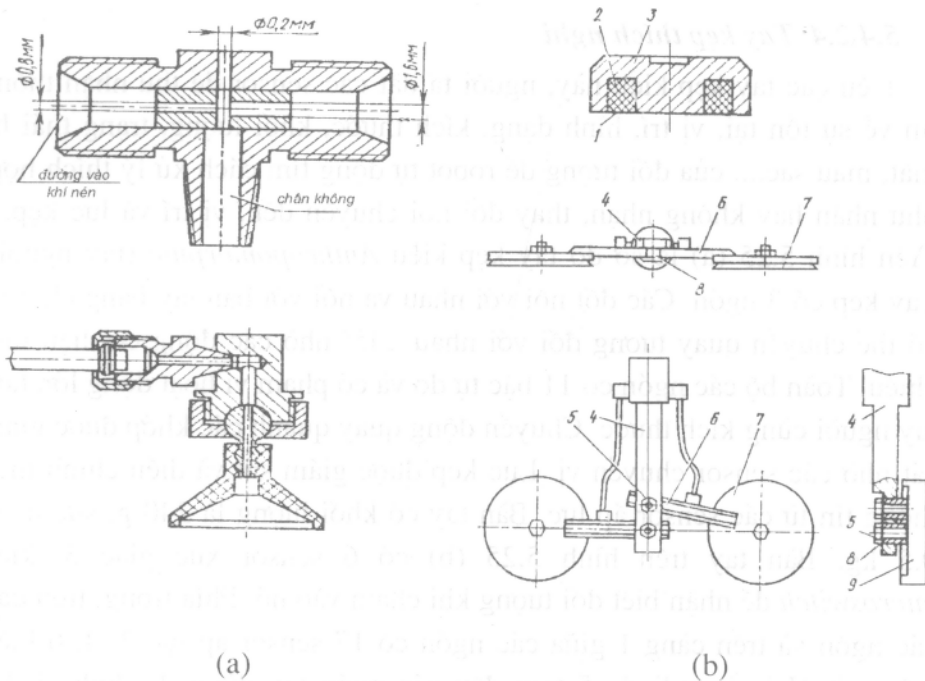
5.4.2.2. Tay kẹp chân không và điện - từ

Kết cấu của tay kẹp điện từ và chân không được thể hiện trên hình 5.23.

Các tay kẹp kiểu này dùng lực hút (chân không hoặc từ lực) để nhấc và di chuyển đối tượng. Trong một vài trường hợp, người ta còn dùng cả lực hút tĩnh điện. Ưu điểm chính của loại tay kẹp này là có kết cấu đơn giản, có thể dùng với các bề mặt hay vật liệu mà tay kẹp cơ khí khó đáp ứng, ví dụ chi tiết phẳng rộng nhưng mỏng như tấm tôn hoặc giấy mỏng, hình dạng chi tiết phức tạp, vị trí của chi tiết thay đổi ngẫu nhiên,... Tuy có nhiều điểm giống nhau, cơ cấu kẹp điện từ và khí nén có những đặc điểm sử dụng khác nhau như kê trong bảng 5.1.

Bảng 5.1: Sự khác nhau giữa cơ cấu kẹp điện - từ và khí nén

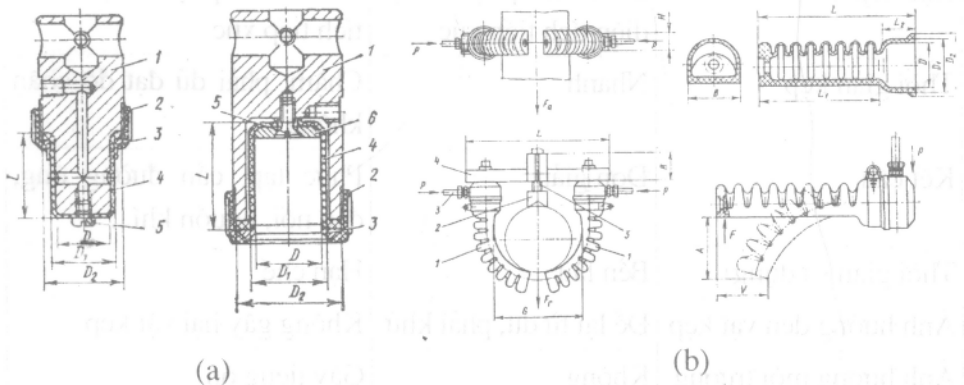
Tính chất	Kiểu điện - từ	Kiểu khí nén
Vật liệu vật kẹp	Phải có từ tính	Bất kỳ
Hình dạng vật kẹp	Bất kỳ	Mặt phẳng
Trạng thái bề mặt	Không cần nhẵn	Phải nhẵn, sạch
Lực kẹp	Lớn, ít phụ thuộc diện tích tiếp xúc	Hạn chế, phụ thuộc diện tích tiếp xúc
Thời gian kẹp	Nhanh	Chậm, phải đủ đạt độ chân không
Kết cấu	Đơn giản	Phức tạp, cần đường ống, đầu nối, nguồn khí...
Thời gian sử dụng	Bền lâu	Hạn chế
Ảnh hưởng đến vật kẹp	Để lại từ dư, phải khử	Không gây hại vật kẹp
Ảnh hưởng môi trường	Không	Gây tiếng ồn



Hình 5.23: Sơ đồ tay kẹp khí nén (a) và điện - từ (b)

5.4.2.3. Tay kẹp dùng buồng đàn hồi

Buồng đàn hồi thường được làm bằng cao su, chất dẻo. Lực kẹp sinh ra do sự biến dạng của buồng đàn hồi dưới tác dụng của khí nén hoặc thủy lực. Trên hình 5.24 là sơ đồ các tay kẹp dùng buồng đàn hồi do hãng Simrit (Pháp) chế tạo. Chi tiết có thể được định vị và kẹp tại mặt trụ trong, mặt trụ ngoài nhờ buồng đàn hồi hình trụ (a) hoặc định vị nhờ khối V và kẹp nhờ vòng ôm đàn hồi (b).

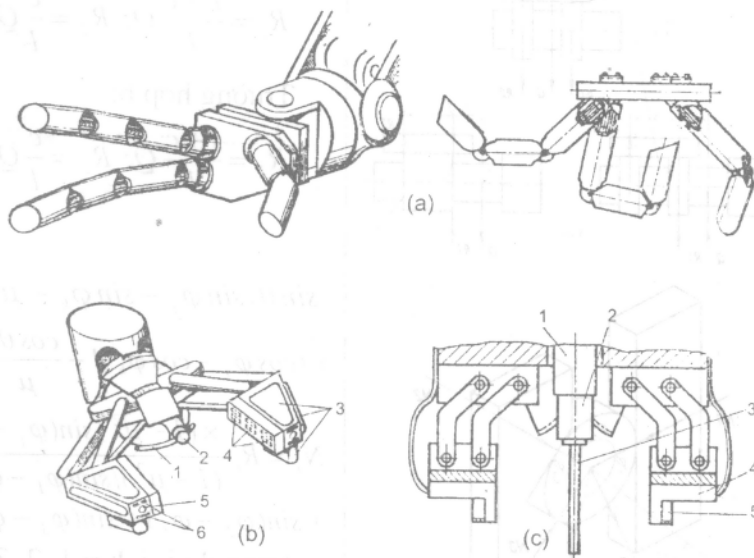


Hình 5.24: Sơ đồ tay kẹp dùng buồng đàn hồi

5.4.2.4. Tay kẹp thích nghi

Trên các tay kẹp kiểu này, người ta đặt các sensor để thu nhận thông tin về sự tồn tại, vị trí, hình dạng, kích thước, khối lượng, trạng thái bề mặt, màu sắc,... của đối tượng để robot tự động tìm cách xử lý thích hợp, như nhận hay không nhận, thay đổi nơi chuyển đến, vị trí và lực kẹp,... Trên hình 5.25 (a) là sơ đồ tay kẹp kiểu *Anthropomorphic* (tay người). Tay kẹp có 3 ngón. Các đốt nối với nhau và nối với bàn tay bằng chốt và có thể chuyển quay tương đối với nhau $\pm 45^\circ$ nhờ các động cơ điện một chiều. Toàn bộ các ngón có 11 bậc tự do và có phạm vi hoạt động lớn hơn tay người cùng kích thước. Chuyển động quay quanh các khớp được giám sát nhờ các sensor chuyển vị. Lực kẹp được giám sát và điều chỉnh theo thông tin từ các sensor áp lực. Bàn tay có khối lượng là 240 g, sức nâng 0,5 kg. Bàn tay trên hình 5.25 (b) có 6 sensor xúc giác 3, kiểu *microswitch* để nhận biết đối tượng khi chạm vào nó. Phía trong, trên đầu các ngón và trên cẳng 1 giữa các ngón có 17 sensor áp lực 2, 4, 6 kiểu biến trở. Hai photodiode 5 trên đầu các ngón tay dùng để định vị đối tượng và "dẫn đường" cho bàn tay tiếp cận tới nó. Tay kẹp trên hình 5.25C

có khả năng tìm, định tâm và kẹp chi tiết trụ dạng bạc. Nó có sensor lực 2, lắp trên đầu dò 3. Trên đầu các ngón có các sensor đo xa quang học 5. Đầu dò 3, sau khi chạm vào đối tượng sẽ di chuyển để tiếp xúc với mặt trụ của đối tượng, xác định tâm và chuyển động đến tâm của nó. Sau đó, nhờ các sensor 5, mỏ kẹp sẽ được đưa tới tiếp xúc với bề mặt kẹp chi tiết.



Hình 5.25: Sơ đồ tay kẹp thích nghi

5.4.3. Phương pháp tính toán tay kẹp

Khi tính toán tay kẹp cần phải tính lực kẹp cần thiết để nhấc và di chuyển đối tượng, tính lực hoặc công suất của cơ cấu dẫn động, kiểm nghiệm các chi tiết của cơ cấu theo điều kiện bền, kiểm nghiệm khả năng phá hỏng bề mặt của đối tượng do tác dụng của lực kẹp,... Trong một số trường hợp, phải tính toán hình học để đảm bảo độ chính xác định vị. Về nguyên tắc, chúng ta có thể áp dụng các phương pháp tính toán cơ học như với mọi cơ cấu khác. Phần này sẽ đề cập đến phương pháp tính toán các thông số đặc trưng cho một số dạng cơ cấu điển hình.

5.4.3.1. Tính toán tay kẹp cơ khí

• Tính lực tiếp xúc

Lực tác dụng tại điểm tiếp xúc giữa mỏ kẹp và đối tượng được xác định với 2 mục đích: đảm bảo đủ lực kẹp đồng thời không làm hỏng bề mặt đối tượng. Bảng 5.2 cho các sơ đồ kẹp và công thức tính toán tương ứng.

**Bảng 5.2: Công thức tính toán lực tại các điểm tiếp xúc giữa mô
kẹp và đối tượng**

TT	Sơ đồ	Công thức
1		Trường hợp a: $R_1 = \frac{l-c}{l} Q; R_2 = \frac{c}{l} Q.$ Trường hợp b: $R_1 = \frac{l+c}{l} Q; R_2 = \frac{c}{l} Q.$
2		$\sin \theta / \sin \varphi_j - \sin \varphi_k - \mu \times$ $\times (\cos \varphi_j - \cos \varphi_k) / - \frac{\cos \theta}{\mu} \times$ $N_i = R_n \frac{\times (1 - \mu^2) \sin(\varphi_i - \varphi_k)}{(1 - \mu^2) [\sin(\varphi_i - \varphi_2) +$ $+ \sin(\varphi_2 - \varphi_j) + \sin(\varphi_3 - \varphi_1)]}$ trong đó i, j, k = 1, 2, 3; i ≠ j ≠ k
3		$\theta = 0''$ $N_i = - \frac{R_n}{\mu} \frac{\sin(\varphi_i - \varphi_k)}{\sin(\varphi_i - \varphi_2) +$ $+ \sin(\varphi_2 - \varphi_j) + \sin(\varphi_3 - \varphi_1)}$ trong đó i, j, k = 1, 2, 3; i ≠ j ≠ k
4		$N_i = R_n \frac{\sin \varphi_i - \mu \cos \varphi_j}{\sin(\varphi_i + \varphi_j) - 2\mu \cos(\varphi_i + \varphi_j)}$ trong đó i, j = 1, 2; i ≠ j

Bảng 5.2 (tiếp)

TT	Sơ đồ	Công thức
5		$\varphi_1 = 90^\circ, \quad \varphi_2 = \varphi$ $N_1 = R_n \frac{\sin \varphi - \mu \cos \varphi}{\cos \varphi + 2\mu \sin \varphi};$ $N_2 = R_n \frac{1}{\cos \varphi + 2\mu \sin \varphi};$
6		$\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ;$ $N_1 = N_2 = \frac{R_n}{2\mu}$

Q- tải trọng tính toán; l- kích thước tay kẹp; c- khoảng cách từ điểm đặt tải đến mỏ kẹp đang xét; R_n - phản lực trên mỏ kẹp thứ n; θ - góc giữa trục phối và lực R_n ; N_i - lực tiếp xúc giữa mỏ kẹp và vật; φ_i - góc giữa hình chiếu của lực R_n lên mặt phẳng và lực N_i ; μ - hệ số ma sát giữa vật liệu mỏ kẹp và vật liệu của vật.

- Đối tượng được đỡ bởi cơ cấu kẹp (sơ đồ 1 và 4), vì vậy lực ma sát ảnh hưởng rất ít đến lực kẹp;
- Đối tượng được giữ nhờ cơ cấu hãm (sơ đồ 2 và 5), lực ma sát có ảnh hưởng nhất định đến lực kẹp;
- Đối tượng được giữ nhờ ma sát (sơ đồ 3 và 6), vì vậy ảnh hưởng của nó rất lớn.

Trên thực tế người ta thường áp dụng tổng hợp các phương pháp kẹp. Trong quá trình làm việc ảnh hưởng của các yếu tố luôn luôn thay đổi nên khi tính toán phải xét đến trường hợp tối hạn.

• *Tính lực đàn động*

Lực đàn động do cơ cấu dẫn động sinh ra, đặt lên đầu vào của tay kẹp. Bảng 5.3 cho công thức tính 3 cơ cấu dẫn động hay dùng, là ném, dòn và thanh răng.

Bảng 5.3: Công thức tính lực dẫn động

TT	Sơ đồ	Công thức
Cơ cấu nêm		Trường hợp chung: $P \geq \frac{\sum_{j=1}^m M_j \operatorname{tg}(\beta + \rho)}{b \eta_p}$ Trường hợp đối xứng: $P \geq \frac{2 M_j \operatorname{tg}(\beta + \rho)}{b \eta_p}$ $m=2$; $\eta_p = 0,9$; $\beta=4 \div 8^\circ$; $\rho=1^\circ 10'$ khi dùng ổ trượt; $\rho=3^\circ$ khi dùng ổ lăn.
Cơ cấu đòn		Trường hợp chung: $P \geq \frac{\sum_{j=1}^m M_j \cos \alpha}{b \eta_p}$ Trường hợp đối xứng: $P \geq \frac{2 M_j \cos \alpha}{b \eta_p}; \eta_p = 0,9 \div 0,95.$
Cơ cấu thanh răng		Trường hợp chung: $P \geq \frac{2 \sum_{j=1}^m M_j}{m_c z_c \eta_p}$ Trường hợp đối xứng: $P \geq \frac{4 M_j}{m_c z_c \eta_p}; \eta_p = 0,94.$

Các ký hiệu: m - số mỏ kẹp; N_i - lực tiếp xúc giữa mỏ kẹp và vật (N), tính theo bảng 5.2; M_j - momen kẹp (Nm) của mỏ kẹp thứ j , tính theo công thức:

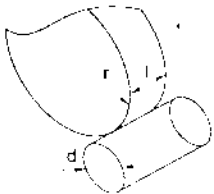
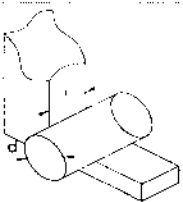
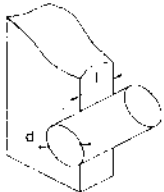
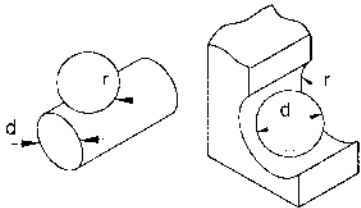
$$M_j = \sum_{i=1}^k N_j \cos \varphi_i [a_i \operatorname{tg} \varphi_i \pm c_i - \mu(a_i \mp c_i \operatorname{tg} \varphi_i)]; \quad k - \text{số điểm tiếp xúc}; a_i, c_i$$

- khoảng cách từ tâm quay của mỏ kẹp đến điểm tiếp xúc thứ i (m); φ_i - góc tiếp xúc; μ - hệ số ma sát giữa vật liệu mỏ kẹp và vật liệu của vật; ρ - góc ma sát quy đổi, có tính đến lực cản trên các chốt của đòn; β - góc nêm; η_p - hiệu suất của cơ cấu; b - kích thước của đòn (m); α - góc nghiêng của đòn; m_c - modul răng trên quạt; z_c - số răng trên quạt.

• **Tính ứng suất tiếp xúc**

Trong một số trường hợp, nhất là khi kẹp nhờ lực ma sát, thì ứng suất tiếp xúc khá lớn. Điều đó có thể dẫn đến hư hỏng bề mặt mỏ kẹp hoặc đối tượng, nhất là các chi tiết máy đã được gia công tinh. Vì vậy, điều kiện chung là ứng suất tiếp xúc thực tế phải nhỏ hơn giá trị cho phép. Công thức tính ứng suất tiếp xúc cho các trường hợp thông thường được cho trong bảng 5.4, trong đó giá trị m cho trong bảng 5.5.

Bảng 5.4: Công thức tính ứng suất tiếp xúc

TT	Sơ đồ	Công thức
1		$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{NE_q}{l} \left(\frac{2}{d} + \frac{1}{r} \right)}$
2		$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{NE_q}{l} \left(\frac{2}{d} - \frac{1}{r} \right)}$
3		$\sigma = 0,418 \sqrt{\frac{2NE_q}{ld}}$
4		$\sigma = m \sqrt{\frac{NE_q^2}{r^2}} \quad \text{khi } \frac{d}{2} < r$

Ghi chú: N- lực tiếp xúc giữa mỏ kẹp và vật (N), tính theo bảng 5.2; E_q - modul đàn hồi quy đổi của vật liệu mỏ kẹp và vật; l- bề rộng của mỏ kẹp (cm); d- đường kính của vật (cm); r- bán kính đầu mỏ kẹp (cm); m- hệ số phụ thuộc vào tỷ số $2r/d$ (bảng 5.5).

Modul đàn hồi quy đổi E_q được tính từ modul đàn hồi của vật liệu dôi tượng E_i và của mô kẹp E_m theo công thức:

$$E_q = \frac{2E_i E_m}{E_i + E_m}$$

Bảng 5.5: Giá trị hệ số m theo tỷ số $2r/d$

$2r/d$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.10	0.05
m	0.388	0.4	0.42	0.44	0.468	0.49	0.536	0.6	0.716	0.97	1.98

5.4.3.2. Tính toán tay kẹp chân không và điện - từ

Công thức kiểm nghiệm lực kẹp cần thiết cho cơ cấu được cho trong bảng 5.6, dùng chung cho các trường hợp chân không, điện từ, tĩnh điện....

Lực P trong các công thức cho trường hợp chân không và điện từ, như sau:

- **Tính lực kẹp chân không**

Lực kẹp được tính theo công thức:

$$P = k_p F_n (p_a - p_b) \quad (N)$$

trong đó:

k_p - là hệ số tính đến sự thay đổi áp suất khí quyển và tình trạng kín khí của mặt tiếp xúc, $k_p = 0,85$

F_n - diện tích tiếp xúc giữa đầu kẹp và vật, thường lấy $F_n = 0,6 \div 0,7$ giá trị thực;

p_a - áp suất khí quyển;

p_b - áp suất dư trong buồng hút.

Đối với hệ thống nối giữa buồng hút với bơm có gioăng kín khí thì áp suất p_b được lấy bằng áp suất chân không của bơm. Nếu không đạt được yêu cầu trên thì có thể chọn $p_b = (3,0 \div 3,5) N/cm^2$.

- **Tính lực kẹp điện từ**

Lực kẹp được tính theo công thức:

$$P = \frac{I_v^2}{25 F (R_s + R_l)^2} \quad N$$

trong đó:

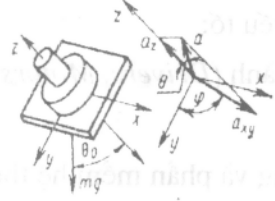
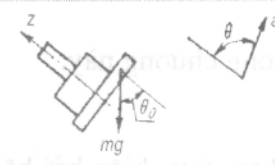
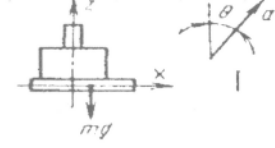
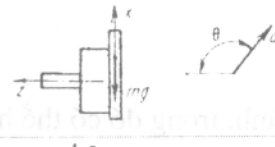
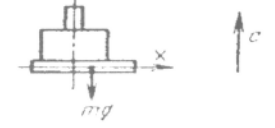
I_v - số ampe-vòng của cuộn dây nam châm.

F - diện tích tiếp xúc giữa cực nam châm và vật.

R_k, R_l - từ trở của khe hở không khí và của lõi thép trong mạch từ.

Nếu trong vật liệu sắt từ có chứa các tạp chất P, S, Mn, Ni,... thì từ trở tăng, lực kẹp bị giảm.

Bảng 5.6: Công thức kiểm nghiệm lực kẹp chân không và điện từ

TT	Sơ đồ	Công thức
1		$\mu\left(\frac{P}{mk_1k_2} - g \cos \theta_0 + a \cos \theta\right) \geq g \sin \varphi_0 \sin \theta_0 + a \sin \varphi \sin \theta;$ $\mu\left(\frac{P}{mk_1k_2} - g \cos \theta_0 + a \cos \theta\right) \geq g \cos \varphi_0 \sin \theta_0 + a \cos \varphi \sin \theta;$
2		$\varphi = \varphi_0 = 90^\circ$ $\mu\left(\frac{P}{mk_1k_2} - g \cos \theta_0 + a \cos \theta\right) \geq g \sin \theta_0 + a \sin \theta $
3		$\varphi = \varphi_0 = 90^\circ; \quad \theta_0 = 90^\circ;$ $\mu\left(\frac{P}{mk_1k_2} - g + a \cos \theta\right) \geq a \sin \theta$
4		$\varphi = \varphi_0 = 90^\circ; \quad \theta_0 = 90^\circ;$ $\mu\left(\frac{P}{mk_1k_2} - a \cos \theta\right) \geq g + a \sin \theta$
5		$\varphi = \varphi_0 = 90^\circ; \quad \theta_0 = \theta = 90^\circ;$ $\frac{P}{mk_1k_2} \geq g + a$

Ký hiệu: P- lực hút (N); m- khối lượng của vật (kg); g- gia tốc trọng trường; a- gia tốc hút vật; θ - góc giữa phương gia tốc a với trục z (trùng phương với lực hút); φ - góc giữa hình chiếu của các gia tốc a lên mặt phẳng xoy với trục y; μ - hệ số ma sát giữa vật liệu mỏ kẹp và vật; k_1 - hệ số dự trữ; k_2 - hệ số tính đến sự trùng của điểm đặt lực nâng và trọng tâm của vật (đối với vật hút tròn $k_2 = r/(r + \Delta x)$, trong đó r là bán kính mặt tiếp xúc, Δx là khoảng cách giữa trục z và toạ độ trọng tâm của vật).

Chương 6

HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ROBOT

Các chương trước đã tập trung giải quyết các vấn đề thuộc về cấu trúc, động học, động lực học, thiết kế quỹ đạo,... của tay máy. Chương này sẽ đề cập đến hệ thống điều khiển, nếu không có nó thì tay máy không thể trở thành robot được.

Muốn điều khiển được *robot* thì phải có 4 yếu tố:

- Hệ thống phát động (*Actuators*) và chấp hành (*Drivers, Motors*).
- Hệ thống cảm biến (*Sensors*).
- Bộ điều khiển (*Controller*), gồm phần cứng và phần mềm hệ thống.
- Chương trình điều khiển.

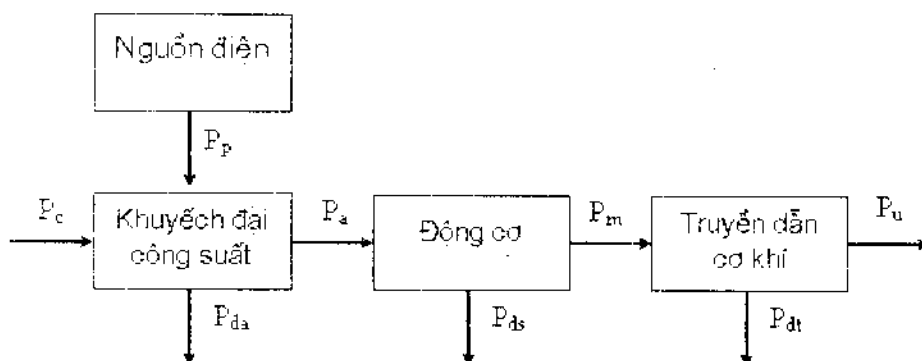
Các vấn đề trên sẽ được lần lượt trình bày trong chương này.

6.1. HỆ THỐNG CHẤP HÀNH

Chuyển động của các khớp trong tay máy được thực hiện bởi hệ thống chấp hành. Nó gồm các bộ phận sau:

- Nguồn cấp điện.
- Khuyếch đại công suất,
- Động cơ,
- Truyền động cơ khí.

Hình 6.1 là sơ đồ nối ghép hệ thống chấp hành, trong đó có thể hiện sự chuyển đổi năng lượng



Hình 6.1: Sơ đồ hệ thống chấp hành

Để thể hiện quan hệ chung, ký hiệu P_e là tín hiệu điều khiển (thường là tín hiệu điện); P_u là công suất cơ học cần thiết để làm chuyển động khớp. Các đại lượng trung gian, gồm công suất điện cung cấp cho động cơ (điện, thủy lực hoặc khí nén) P_e ; công suất nguồn P_p (thường có cùng bản chất vật lý với P_e); công suất cơ học do động cơ phát ra P_m . Ngoài ra còn có các loại công suất tổn hao trên các khâu trung gian: khuếch đại công suất, động cơ và truyền dẫn P_{da} , P_{dk} , P_{dt} . Xuất phát điểm để chọn các khâu trong hệ thống chấp hành là công suất cơ khí P_u để đảm bảo lực và vận tốc chuyển động của khớp.

Phần sau đây trình bày khái quát chức năng của các cụm chính.

6.1.1. Truyền dẫn cơ khí

Chuyển động tại các khớp của tay máy thường có vận tốc thấp và momen lớn, trong khi các động cơ thường làm việc với vận tốc lớn và momen nhỏ. Vì vậy, giữa động cơ và khớp thường có bộ phận biến tốc để sử dụng vùng làm việc có lợi nhất của động cơ. Thông qua bộ phận truyền dẫn này, công suất P_m trở thành P_u và bị tổn hao một lượng P_{dt} do ma sát. Khi chọn bộ phận truyền dẫn cần căn cứ vào công suất cần thiết, loại chuyển động của khớp và vị trí đặt động cơ so với khớp, vì bộ phận truyền dẫn không chỉ biến đổi giá trị công suất mà cả dạng chuyển động, ví dụ biến chuyển động quay của trục động cơ thành chuyển động tịnh tiến trong khớp. Nếu khéo bố trí động cơ và bộ phận truyền dẫn có thể giảm tiêu hao năng lượng. Ví dụ, nếu đặt động cơ và bộ phận truyền dẫn gần thân máy thì có thể tăng tỷ số công suất tiêu hao / trọng lượng cơ cấu.

Trong robot thường sử dụng các loại truyền dẫn sau:

- *Cơ cấu trục vít - bánh vít* có tỷ số truyền lớn, cho phép đổi phương trục và thay đổi điểm tác dụng của lực.
- *Cơ cấu vít me - đai ốc* cho phép biến chuyển động quay của trục động cơ thành chuyển động thẳng tại khớp trượt. Vít me - đai ốc bị thường được dùng để giảm ma sát. Thường cơ cấu này được lắp có độ dời để giảm khe hở và tăng độ cứng vững.
- *Truyền động đai răng và truyền động xích* cho phép đặt động cơ xa trục khớp. Lực căng đai gây tải trọng phụ nên đai thường được dùng khi vận tốc chuyển động lớn và lực nhỏ. Ngược lại, xích hay bị dao động nên thường dùng khi vận tốc nhỏ.

Với giả thiết chuyển động không có khe hở và không có trượt, tỷ số truyền của các bộ truyền động cơ khí là không đổi.

Ngày nay người ta hay gắn trực tiếp rotor của động cơ lên trục quay của khớp mà không dùng truyền dẫn cơ khí trung gian. Điều đó loại trừ được ảnh hưởng của biến dạng cơ khí và khe hở, giảm tổn hao năng lượng. Tuy nhiên nó đòi hỏi các giải pháp kỹ thuật điều khiển để duy trì quan hệ tuyến tính truyền động trong dải rộng. Truyền động trực tiếp còn chưa phổ biến trong kỹ thuật robot vì lý do kết cấu.

6.1.2. Động cơ

Động cơ là nguồn tạo động lực chuyển động cho các khớp. Tùy thuộc dạng năng lượng sử dụng, người ta dùng các loại *động cơ khí nén*, *động cơ thủy lực* và *động cơ điện*. Công suất vào động cơ P_u chỉ được chuyển một phần (P_n) thành cơ năng. Phần mất mát P_{do} là do tổn hao cơ khí, thủy lực hoặc khí nén. Trong kỹ thuật *robot* người ta dùng các động cơ công suất từ chục wat đến hàng chục kilowat. Do đặc điểm sử dụng trong *robot*, chẳng hạn yêu cầu "bám sát" quỹ đạo thiết kế, định vị chính xác.... các động cơ phải có các tính chất sau:

- Quán tính nhỏ và tỷ số năng lượng tiêu hao / trọng lượng cao.
- Có khả năng chịu quá tải và lực xung.
- Có khả năng gia tốc tốt.
- Dải tốc độ làm việc rộng ($1 \div 10.000$ v/ph).
- Độ chính xác định vị cao (ít nhất $1/1000$ vòng tròn).
- Có thể làm việc trơn tru ở vận tốc thấp.

Động cơ khí nén khó đáp ứng các yêu cầu trên, vì không thể khắc phục tính nén được của môi chất thể khí. Chúng thường chỉ được dùng cho các chuyển động đóng mở, ví dụ dùng cho tay kẹp hoặc chuyển động điểm - điểm.

Động cơ điện gồm các loại động cơ một chiều, xoay chiều thông dụng và động cơ servo, trong đó động cơ servo được dùng phổ biến hơn cả. Động cơ servo khác với các loại động cơ bình thường ở chỗ nó được điều khiển tự động bằng một hệ thống điều khiển điện tử có phản hồi. Tín hiệu phản hồi được lấy từ *sensor* vận tốc hoặc *sensor* vị trí, giám sát liên tục chuyển động tương đối giữa rotor và stator, từ đó sinh ra tín hiệu điều khiển tốc độ và chiều quay của rotor. Động cơ servo có đặc tính động lực

học tốt, đồng thời kết cấu đơn giản, làm việc tin cậy nên ngày càng được ưa dùng. Động cơ điện một chiều cổ điển không được ưa chuộng vì có bộ góp điện gây nhiều phiền phức khi sử dụng đã được thay bằng động cơ điện một chiều không cổ góp (*Brushless DC Servomotor*). Động cơ bước, do có công suất nhỏ, độ chính xác thấp (do không có mạch phản hồi vị trí, do đặc tính động lực học phụ thuộc tải trọng, thậm chí có hiện tượng "bỏ bước" khi tải lớn), nhưng lại rẻ tiền, nên được dùng cho những nơi không đòi hỏi độ chính xác điều khiển cao.

Động cơ thủy lực có các đặc tính động lực học tương đương với động cơ điện, có thể trực tiếp sinh ra chuyển động thẳng và chuyển động quay.

Mặc dù, về đại thể, bản thân động cơ điện và động cơ thủy lực có đặc tính động lực học tương đương nhau, nhưng chúng khác nhau về *đặc điểm sử dụng*.

Về phương diện đó, động cơ điện có các ưu điểm sau:

- Dễ cung cấp năng lượng, vì hệ thống cấp điện có ở khắp nơi.
- Giá rẻ, chủng loại phong phú và dải công suất rộng.
- Hiệu suất biến đổi năng lượng cao.
- Dễ sử dụng và dễ chăm sóc.
- Không gây ô nhiễm môi trường.

Bên cạnh đó, chúng có các nhược điểm sau:

- Phát nóng ở trạng thái tĩnh hoặc khi tốc độ thấp, vì vậy thường phải dùng phanh.

- Cần bảo vệ đặc biệt nếu làm việc trong môi trường dễ cháy.

Ngược lại, động cơ thủy lực có các ưu điểm:

- Làm việc tốt ở trạng thái tĩnh và tốc độ thấp mà không bị phát nóng.
- Tự bôi trơn và tản nhiệt tốt nhờ sự lưu thông của chất lỏng trong khi làm việc.

- An toàn trong mọi môi trường.
- Có công suất riêng theo trọng lượng cao.

Bên cạnh đó, chúng có các nhược điểm sau:

- Cần trạm cung cấp thủy lực riêng.
- Đắt tiền, ít chủng loại, khó lắp đặt, khó chăm sóc và bảo trì.

- Hiệu suất biến đổi năng lượng thấp.

- Dễ gây ô nhiễm môi trường do dầu trong hệ thống bị rò khi vận hành hoặc có dầu thải khi bảo dưỡng, sửa chữa.

Xét về khía cạnh điều khiển và vận hành, động cơ điện dễ điều khiển và có thể thay đổi chế độ làm việc một cách linh hoạt. Đặc tính động lực học của động cơ thủy lực còn phụ thuộc vào nhiệt độ dầu. Động cơ điện làm việc tốt ở tốc độ cao và tải trọng nhỏ nên thường phải dùng truyền động cơ khí trung gian. Ngược lại, động cơ thủy lực làm việc tốt khi tốc độ thấp và tải lớn nên thường truyền động trực tiếp.

Mục 6.2 sẽ trình bày chi tiết hơn về mô hình điều khiển của các loại động cơ servo thông dụng.

6.1.3. Khuyếch đại công suất

Bộ khuyếch đại công suất có nhiệm vụ biến đổi trạng thái năng lượng (gọi chung là *lưu* và *áp*) của nguồn cung cấp sao cho phù hợp với yêu cầu của động cơ. Công suất cung cấp tỷ lệ với tín hiệu điều khiển P_c và thường lớn hơn công suất điều khiển nên bộ biến đổi này có tên là bộ khuyếch đại công suất. Một bộ phân công suất vào, gồm P_c và P_p , sau khi biến đổi được cung cấp cho động cơ (P_d). Phần khác (P_{da}) bị tổn thất trên bản thân bộ biến đổi.

Đối với động cơ điện, bộ biến đổi thường phải biến điện năng dưới dạng xoay chiều thông dụng, ví dụ 230/380 V- 50 Hz thành điện một chiều (cho động cơ một chiều) hoặc thành điện xoay chiều với điện áp và tần số thích hợp (cho động cơ xoay chiều). Các bộ biến đổi dùng cho động cơ một chiều được gọi là *AC to DC converter*, hay là *chopper*. Loại dùng cho động cơ một chiều không chỉnh than được gọi là *DC to AC converter* hay *inverter*. Để điều khiển động cơ xoay chiều không đồng bộ, có thể dùng bộ biến đổi bề rộng xung (*pulse width modulator*) hoặc bộ biến đổi tần số (*frequency modulator* hay *frequency inverter*). Các thông số quan trọng nhất của bộ biến đổi là hiệu suất biến đổi $P_d/(P_c + P_p)$ và tỷ số truyền P_d/P_c . Giá trị của chúng thường vào khoảng 0,9 và 10⁶.

Động cơ thủy lực thường được điều khiển bằng cách thay đổi lưu lượng chất lỏng cung cấp cho nó. Cơ cấu điều khiển thường là các van tiết lưu, cho phép thay đổi lưu lượng cung cấp theo tín hiệu điện.

6.1.3. Nguồn cung cấp chính

Nhiệm vụ của nguồn cung cấp chính là cung cấp năng lượng tối đa vào của bộ biến đổi.

Nếu là điện năng thì nguồn cung cấp thường là biến áp. Nếu dùng dòng điện một chiều thì phải có chỉnh lưu.

Nguồn cung cấp cho các động cơ thuỷ lực là trạm bơm các loại, như bơm bánh răng, cánh gạt, piston,... Truyền động cho chúng là các động cơ sơ cấp, thường là động cơ điện xoay chiều không đồng bộ. Ngoài ra, trong hệ thống cung cấp còn có bể chứa (để tránh hiện tượng mạch đập), bộ lọc, van an toàn, van tràn,... giúp cho hệ thống làm việc được ổn định, an toàn. Vai trò của chúng giống như tụ điện là phẳng và các kiểu bộ lọc khác trong hệ thống nguồn điện.

6.2. ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ SERVO

Vì động cơ điện và động cơ thuỷ lực thường được dùng nhiều nhất trong kỹ thuật robot, nên sau đây mô tả kỹ hơn về mô hình toán học và sơ đồ điều khiển của chúng.

6.2.1. Điều khiển động cơ điện

Chúng ta đã biết nhiều về các loại động cơ điện thông thường, như động cơ điện một chiều có cổ góp, động cơ điện xoay chiều đồng bộ và không đồng bộ. Các động cơ dùng trong điều khiển tự động cần có những tính chất đặc biệt, như dễ điều khiển, quán tính nhỏ, có thể làm việc ổn định ở tốc độ thấp hoặc trong trạng thái tĩnh,...

Tuy có sự khác nhau về kết cấu và nguyên lý làm việc, động cơ điện một chiều và động cơ servo có thể được mô hình hoá giống nhau. Thông qua biến phức s , sự cân bằng điện của phân ứng được mô tả bởi phương trình:

$$V_u = (R_u + sL_u)I_u + V_g \quad (6.1)$$

trong đó

V_u , R_u , L_u và I_u lần lượt là điện áp, điện trở, điện kháng và dòng điện phần ứng.

V_g là sức điện động của phân ứng, tỷ lệ với vận tốc góc ω của rotor

$$V_g = k_v \omega. \quad (6.2)$$

Hệ số k_v thể hiện quan hệ giữa vận tốc góc của rotor với sức điện động. Nó phụ thuộc kết cấu của động cơ và tính chất điện từ của phần cảm.

Tương tự, phương trình cân bằng cơ học của động cơ có dạng:

$$C_m = (sI_m + F_m)\omega + C \quad (6.3)$$

$$C_m = k_t I_a \quad (6.4)$$

trong đó, C_m và C_r là momen chủ động và momen phản lực, I_m và F_m là momen quán tính và hệ số cản nhớt trên trục động cơ. Hệ số tỷ lệ k_t biểu diễn quan hệ giữa momen của động cơ và dòng điện phản ứng. Trong hệ đơn vị SI, giá trị của nó bằng k_v .

Đối với bộ phận khuếch đại công suất, quan hệ giữa điện áp vào V_e và điện áp phản ứng V_a chính là hàm truyền

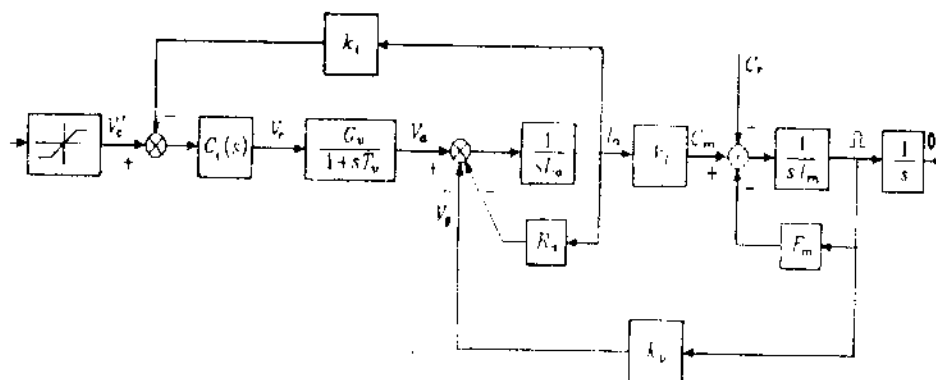
$$\frac{V_a}{V_e} = \frac{G_v}{1 + sT_v} \quad (6.5)$$

trong đó

G_v là hệ số điện áp.

T_v là hằng số thời gian. Giá trị của T_v nhỏ so với các hằng số thời gian khác của hệ thống nên có thể bỏ qua. Ví dụ, nếu dùng bộ biến tần trong khoảng $(10 \div 100)$ kHz thì giá trị của T_v nằm trong khoảng $(10^{-5} \div 10^{-4})$ giây.

Sơ đồ khối của động cơ servo với khuếch đại công suất được thể hiện trong hình 6.2.



Hình 6. 2: Sơ đồ khối của động cơ servo với khuếch đại công suất

Trong sơ đồ trên, bên cạnh các khối thể hiện các quan hệ nối trên, còn có các yếu tố sau:

- Vòng phản hồi dòng điện phản ứng thông qua bộ biến đổi k_i giữa cuộn dây phản ứng và khuếch đại công suất.

- Khối hiệu chỉnh dòng điện $C_i(s)$ có đặc tính phi tuyến ở trạng thái bão hoà.

Vòng phản hồi được dùng với 2 mục đích. Một mặt, điện áp V'_c đóng vai trò điện áp chuẩn. Nếu chọn $C_i(s)$ thích hợp thì độ trễ của I_d so với V'_c sẽ nhỏ hơn độ trễ giữa I_d và V_c . Mặt khác, tính phi tuyến ở trạng thái bão hoà cho phép hạn chế sự tăng của V'_c . Nó có tác dụng như bộ hạn chế dòng điện, bảo vệ khối khuếch đại công suất.

Từ sơ đồ trên, bằng cách chọn $C_i(s)$, có thể nhận được hệ điều khiển vận tốc hoặc hệ điều khiển momen.

Nếu $k_i = 0$, và nếu hệ số cản nhớt rất nhỏ so với hệ số hãm điện năng, nghĩa là ($F_m \ll k_i k / R_a$), đồng thời đặt $K = C_i(0)G_c$ và giả thiết $C_i = 0$ thì dẫn đến trạng thái *điều khiển vận tốc*:

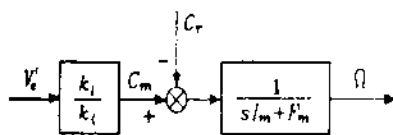
$$\omega \approx \frac{K}{k_v} v'_c. \quad (6.6)$$

Nếu $k_i \neq 0$ và chọn hàm truyền dòng điện rất lớn ($Kk_i \gg R_a$) sẽ dẫn đến trạng thái *điều khiển momen*:

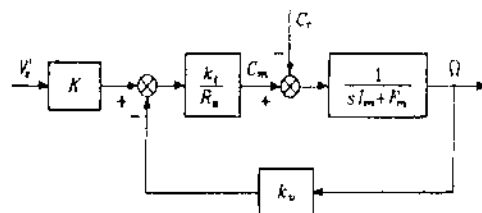
$$C_m \approx \frac{k_i}{k_t} (v'_c - \frac{k_v}{K} \omega). \quad (6.7)$$

Vì K thường có giá trị lớn nên momen hầu như không phụ thuộc vào vận tốc góc.

Với các điều kiện trên, nhận được sơ đồ điều khiển vận tốc và điều khiển momen như trong các hình 6.3 và 6.4.



Hình 6.3: Sơ đồ điều khiển vận tốc



Hình 6.4: Sơ đồ điều khiển momen

Từ các sơ đồ trên, có mối quan hệ giữa các đại lượng vào (điện áp điều khiển V_c , momen phản ứng C_r) với đại lượng ra, là vận tốc góc ω

- Đối với điều khiển vận tốc:

$$\omega = \frac{K}{I + s \frac{R_a I_m}{k_v k_t}} V_c' - \frac{R_a}{I + s \frac{R_a I_m}{k_c k_t}} C_r' \quad (6.8)$$

- Đối với điều khiển momen:

$$\omega = \frac{k_t F_m}{I + s \frac{F_m}{F_m}} V_c' - \frac{I}{I + s \frac{F_m}{F_m}} C_r' \quad (6.9)$$

6.2.2. Điều khiển động cơ thủy lực

Các động cơ thủy lực được điều khiển bằng cách thay đổi lưu lượng dầu qua bơm. Bất kể sự khác nhau về cấu trúc vật lý, các mối quan hệ cơ bản giữa *lưu lượng* và *áp suất*, *chuyển động của chất lỏng* và *chuyển động của các chi tiết*, *sự cân bằng cơ học của các chi tiết* đều xuất phát từ đạo hàm quan hệ vào/ra.

Giả sử Q là lưu lượng cung cấp, Q_m là lưu lượng vào động cơ, Q_l là lưu lượng tổn hao do lọt dầu trên bơm, Q_c là lưu lượng tổn hao do tính nén được của dầu, ta nhận được phương trình cân bằng lưu lượng như sau:

$$Q = Q_m + Q_l + Q_c \quad (6.10)$$

Các đại lượng tổn hao Q_l và Q_c được tính đến khi hệ thống làm việc dưới áp suất cao, cỡ hàng trăm atmosphe.

Gọi P là chênh lệch áp suất giữa đầu ra và đầu vào của bơm do tải, ta có quan hệ

$$Q_l = k_l P \quad (6.11)$$

Tổn hao lưu lượng do tính nén được của chất lỏng tỷ lệ với thể tích tức thời của chất lỏng V và áp suất P thông qua hệ số nén γ và biến phức s :

$$Q_c = \gamma V s P \quad (6.12)$$

Từ (6.12) thấy rằng hệ số tỷ lệ $k_c = \gamma V$ giữa đạo hàm theo thời gian của áp suất P và lưu lượng phụ Q_c thuộc vào thể tích V của chất lỏng. Vì

vậy, đối với động cơ quay thì k_c là hằng số, còn đối với động cơ tịnh tiến thì k_c thay đổi nên phản ứng của hệ thống tùy thuộc điểm công tác.

Lưu lượng chất lỏng vào động cơ tỷ lệ với lượng biến thiên trong một đơn vị thời gian của thể tích chất lỏng trong bể chứa. Mặt khác lượng biến thiên này lại tỷ lệ với vận tốc góc của động cơ. Cuối cùng nhận được:

$$Q_m = k_q \omega \quad (6.13)$$

Điều kiện cân bằng cơ học của các chi tiết chuyển động được mô tả bằng phương trình tương tự như (6.3):

$$C_m = (sI_m + F_m)\omega + C_r \quad (6.14)$$

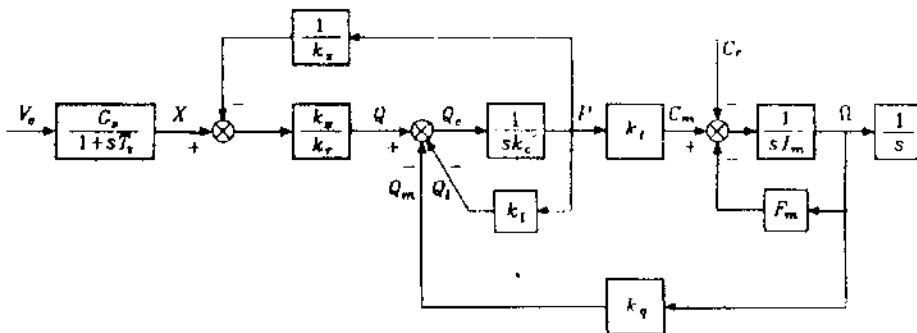
Cuối cùng thì momen của động cơ tỷ lệ với độ chênh lệch áp suất của bơm:

$$C_m = k_p P \quad (6.15)$$

Đối với van điều khiển, hàm truyền giữa vị trí X của van và điện áp điều khiển V_c được xác định như sau:

$$\frac{X}{V_c} = \frac{G_s}{1 + sT_s} \quad (6.16)$$

Vì hằng số thời gian T_s rất nhỏ (cỡ mili giây) so với các hằng số thời gian khác của hệ thống, nên G_s được coi là hệ số truyền tương đương của van và quan hệ giữa V_c và X là tuyến tính.



Hình 6.5: Sơ đồ khối hệ điều khiển động cơ thủy lực

Trên cơ sở các phương trình đã nêu, có thể xây dựng sơ đồ khối của hệ thống điều khiển động cơ thủy lực, gồm van, bộ phân phối, động cơ như trong hình 6.5. So sánh hình 6.2 với hình 6.5 có thể nhận ra sự

tương tự về hình thức giữa đặc tính động lực học của động cơ thuỷ lực và động cơ điện. Tuy nhiên điều đó *không có nghĩa là có thể dùng động cơ thuỷ lực để điều khiển vận tốc và điều khiển momen thay cho động cơ điện*. Về hình thức thì mạch phản hồi áp suất của động cơ thuỷ lực tương tự mạch phản hồi dòng trong động cơ điện, nhưng không thể thay đổi kết cấu của panel thuỷ lực một cách dễ dàng như đối với bảng mạch điện.

6.3. HỆ THỐNG CẢM BIẾN

Điều khiển tự động luôn đòi hỏi sự giám sát hệ thống hoặc quá trình. Hệ thống đo các đại lượng, đại diện cho trạng thái làm việc của robot và cho sự tương tác của nó với môi trường, ảnh hưởng rất lớn đến tính năng kỹ thuật của robot và phải được chọn tương ứng với yêu cầu điều khiển. Tuy nhiên, đo lường là một lĩnh vực chuyên sâu của kỹ thuật tự động hoá, đã có môn học và các tài liệu riêng về *sensor*. Trong chương này chỉ đề cập đến các khái niệm, phân loại chung và nguyên tắc làm việc của một số loại *sensor* hay gặp trong kỹ thuật robot.

6.3.1. Khái niệm và phân loại cảm biến

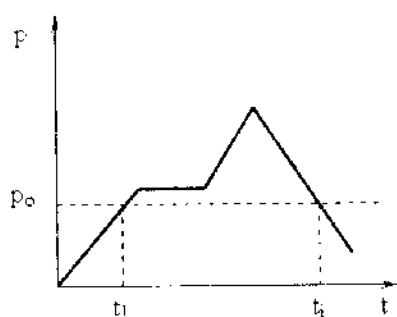
6.3.1.1. Các khái niệm

Cảm biến là thiết bị dùng để nhận giá trị của đại lượng vật lý cần đo và biến đổi nó thành tín hiệu mà thiết bị đo hay thiết bị điều khiển có thể xử lý được.

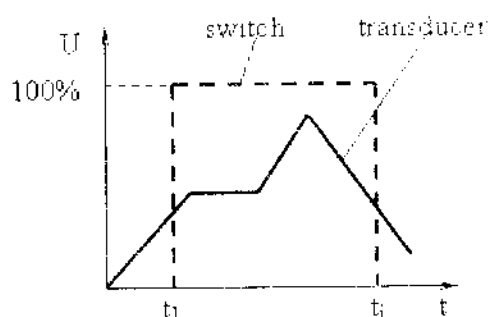
Như vậy, cảm biến có 2 chức năng: "*cảm*", nghĩa là nhận tín hiệu cần đo và "*biến*", nghĩa là chuyển đổi dạng và giá trị của tín hiệu để sẵn sàng cung cấp cho thiết bị hiển thị hay xử lý tiếp theo. Có nhiều đại lượng vật lý, như lực, rung động, thành phần hoá học,... rất khó đo trực tiếp một cách chính xác và rẻ tiền. Người ta phải chuyển đổi chúng sang đại lượng tương đương khác, thường là đại lượng điện như điện áp, dòng điện, điện trở,... để dễ sử dụng các thiết bị hiển thị và xử lý chuẩn, thông dụng và rẻ tiền. Dạng và giá trị tín hiệu xuất ra của các cảm biến thường được chuẩn hoá để dễ ghép nối vào các mạch xử lý tiếp theo.

Cảm biến còn có các tên khác, như *dầu đo*, *sensor*,... Từ có gốc Anh *sensor* đã được phổ cập rộng rãi trên thế giới, kể cả trong các tài liệu xuất bản ở Việt Nam.

Sensòr là tên chung của **Switch** và **Transducer**. **Switch** là thiết bị đóng mở, thường gọi là công tắc), chỉ có 2 trạng thái tín hiệu ra là *đóng* và *mở*. **Transducer** là thiết bị biến đổi. Tín hiệu ra và tín hiệu vào của nó có thể khác nhau về bản chất vật lý và giá trị, nhưng không khác nhau về quy luật biến thiên theo thời gian. Ví dụ với cùng tín hiệu vào là áp suất không khí (hình 6.6), **Switch** có trạng thái *đóng* nếu áp suất $p \geq p_0$, có trạng thái *mở* nếu $p < p_0$ còn **Transducer** thì cho tín hiệu ra là điện áp nhưng không thay đổi quy luật biến thiên theo thời gian vốn có của tín hiệu vào.



Tín hiệu vào sensor



Tín hiệu ra của sensor

Hình 6. 6: Sự khác nhau giữa switch và transducer

6.3.1.2. Phân loại sensor

Theo chức năng, người ta phân biệt 2 nhóm *sensor*. Một nhóm dùng để giám sát trạng thái công tác của bản thân robot, được gọi là *sensor trong* (*proprioceptive sensors*). Nhóm thứ hai, được gọi là *sensor ngoài* (*heteroceptive sensors*), dùng để đo các thông số của môi trường và sự tương tác của robot với môi trường*.

Các loại *sensor trong* chủ yếu là: *sensor vị trí*, *sensor vận tốc* và *sensor gia tốc* hay *sensor lực*.

* Môi trường ở đây được hiểu là mọi yếu tố bên ngoài robot, kể cả đối tượng công tác.

Sensor ngoài có rất nhiều loại, tùy thuộc thông số môi trường cần đo, ví dụ *sensor* nhiệt độ để đo nhiệt độ của môi trường mà robot hoạt động, *sensor* lực để đo lực nắm (kẹp) của tay hoặc để định vị đối tượng (ví dụ, để lồng trục vào bạc khi lắp ráp), thiết bị quan sát (*vision system*) để nhận dạng đối tượng,....

Ngoài cách phân loại *sensor* theo chức năng như trên, còn có nhiều cách phân loại khác, ví dụ:

- Theo đại lượng cần đo, có *sensor* nhiệt độ, áp suất, vận tốc, gia tốc, lưu lượng,....

- Theo kết cấu và nguyên lý làm việc, có *sensor* điện trở, điện dung, điện cảm, áp điện, quang điện, điện động,....

- Theo phương thức cảm nhận, có *sensor* tiếp xúc (*tactile sensor*), không tiếp xúc (*proximity sensor*).

6.3.2. Nguyên lý làm việc của một số loại *sensor*

6.3.2.1. Cảm biến vị trí

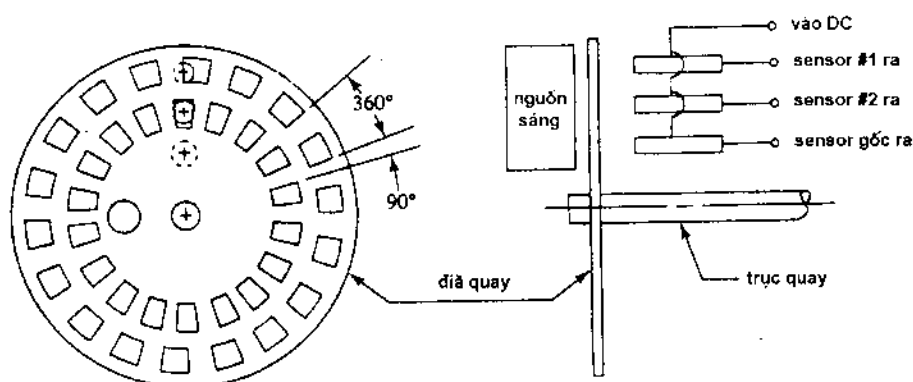
Các cảm biến (*sensor*) vị trí, như tên gọi của chúng, được dùng để giám sát vị trí tức thời của các cơ cấu. Tùy theo dạng chuyển động cần quan tâm mà vị trí có thể được tính bằng đơn vị dài hay đơn vị góc. Nhờ các chuyển đổi cơ khí cần thiết có thể dùng *sensor* đo góc để đo chiều dài và ngược lại. Các *sensor* đo chiều dài có thể là biến trở, biến thể vi sai, *encoder* thẳng. Để đo góc quay có các loại *sensor* đo góc, như biến trở quay, *encoder* góc, *resolver*,.... Sau đây nói về hai loại *sensor* thường gặp nhất là *encoder* và *resolver*.

Encoder là thước đo vị trí theo nguyên tắc số, trong đó toạ độ được mã hoá theo hệ nhị phân. Tùy theo đơn vị đo, chúng ta dùng *encoder* thẳng (*linear encoder*) hay *encoder* góc (*rotary encoder*). Hai loại này giống nhau về nguyên lý làm việc, chỉ khác nhau ở chỗ các vạch được khắc theo đường thẳng hay theo vòng tròn. Theo phương pháp mã hoá, có 2 loại *encoder* là tuyệt đối (*absolute*) và gia số (*incremental*).

Thước đo vị trí theo gia số (*Incremental encoder*) có 1 hoặc 2 đĩa quang, được khắc các vùng trong và đục xen kẽ nhau (hình 6.7). Nếu dùng một đĩa thì nó được gắn với trục quay. Nếu dùng 2 đĩa thì một đĩa gắn với

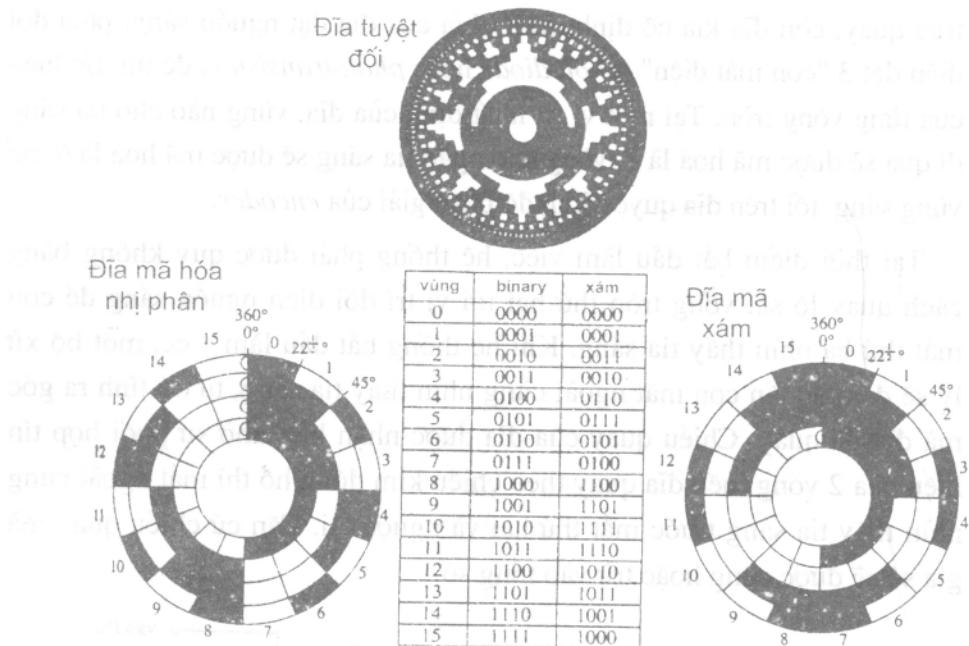
trục quay, còn đĩa kia cố định. Một phía của đĩa đặt nguồn sáng, phía đối diện đặt 3 "con mắt điện" (*photodiode* hoặc *phototransistor*) để thu tín hiệu của từng vòng tròn. Tại một vị trí nhất định của đĩa, vùng nào cho tia sáng đi qua sẽ được mã hoá là 1, vùng nào ngăn tia sáng sẽ được mã hoá là 0. Số vùng sáng, tối trên đĩa quyết định độ phân giải của *encoder*.

Tại thời điểm bắt đầu làm việc, hệ thống phải được quy không bằng cách quay lỗ sát vòng tròn thứ hai tới vị trí đối diện nguồn sáng để con mắt thứ ba nhìn thấy tia sáng. Khi hệ thống bắt đầu làm việc, một bộ xử lý sẽ đếm số lần con mắt ngoài cùng nhìn thấy tia sáng, từ đó tính ra góc mà đĩa đã quay. Chiều quay của đĩa được nhận biết nhờ sự phối hợp tín hiệu của 2 vòng: nếu đĩa quay theo chiều kim đồng hồ thì mắt ngoài cùng nhìn thấy tia sáng trước mắt thứ hai và ngược lại. Căn cứ chiều quay mà gia số sẽ được cộng hoặc trừ vào tổng số.



Hình 6. 7: Sơ đồ nguyên lý của thước đo vị trí theo gia số

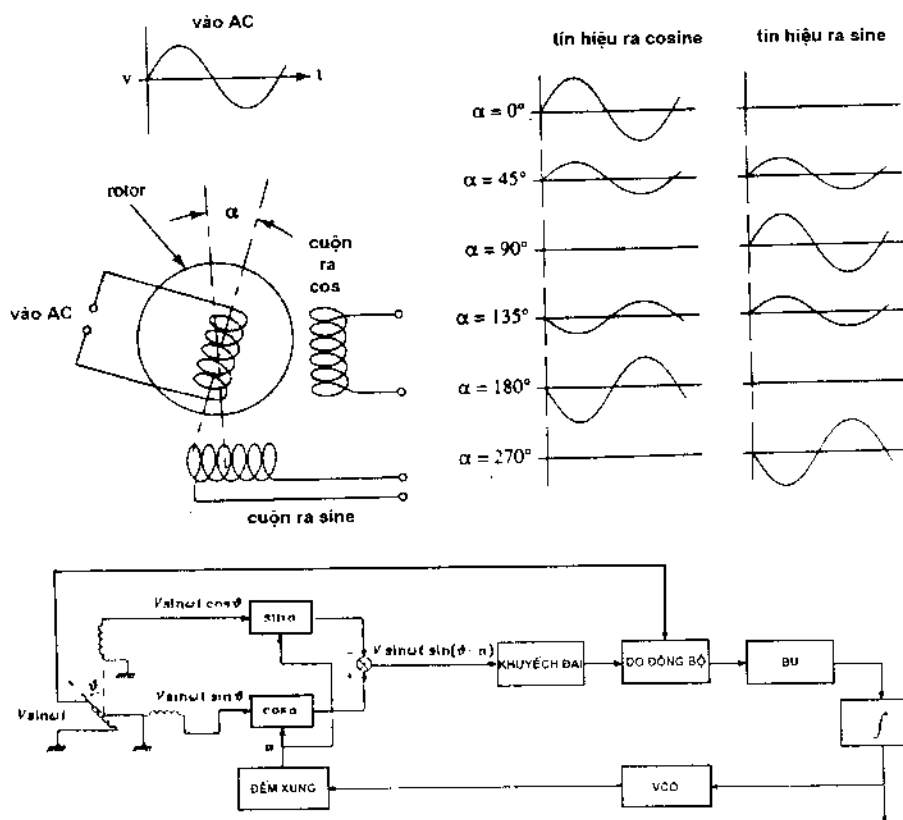
Thước đo vị trí tuyệt đối (*Absolute Encoder*) có một đĩa quang, trên đó có nhiều vòng tròn đồng tâm. Mỗi vòng chứa các vùng trong và đục xen kẽ nhau. Số vòng tròn quyết định độ phân giải của *encoder*. Nếu số vòng tròn là n thì số phần mà một vòng tròn có thể được chia ra bằng $2n$, góc nhỏ nhất mà *encoder* phân biệt được là $360^\circ/2n$. Ví dụ, nếu số vòng là $n = 4$ thì số phần chia của vòng tròn là $2^4 = 16$, *encoder* sẽ phân biệt được góc quay $360^\circ/16 = 22,5^\circ$. Nếu $n = 8$ thì góc đó là $360^\circ/4096 = 0,088^\circ$. Trên hình 6.8 là sơ đồ *encoder* với 4 vòng tròn.



Hình 6. 8: Sơ đồ nguyên lý của thước đo vị trí tuyệt đối

Resolver (hình 6.9) không phát ra tín hiệu số như *encoder* mà phát ra tín hiệu tương tự đại diện cho vị trí của đối tượng đo. Nhìn về ngoài nó giống động cơ điện nhưng nguyên lý làm việc của nó giống biến thế nhiều hơn. Cuộn dây rotor được cấp điện áp xoay chiều thông qua các vành dẫn điện.

Điện áp cung cấp cho rotor có dạng hình sin, dạng $V \sin \omega t$, tần số trong khoảng $0,4 \div 10 \text{ kHz}$. Stator của *resolver* có 2 cuộn dây, đặt lệch nhau 90° điện nên trên một cuộn xuất hiện điện áp $V \sin \omega t \cdot \cos \vartheta$, còn trên cuộn kia có điện áp $V \sin \omega t \cdot \sin \vartheta$. Rõ ràng là giá trị điện áp ra phụ thuộc góc ϑ giữa rotor và stator. Tín hiệu phản hồi α của góc quay được cung cấp cho 2 cuộn dây qua hàm $\sin \alpha$ và $\cos \alpha$, sau khi nhân với tín hiệu đầu vào và cộng đại số được tín hiệu ra là $V \sin \omega \cdot \sin(\vartheta - \alpha)$. Tín hiệu này được khuếch đại và gửi tới khối đồng bộ, đảm bảo giá trị của nó phải tỷ lệ với $\sin(\vartheta - \alpha)$. Nếu có sai lệch, tín hiệu được bù bởi thiết bị bù. Sau đó, tín hiệu được tích phân. Mạch phản hồi có bộ tạo dao động, chuyển đổi điện áp thành tần số (*voltage-to-frequency converter* - *VCO*), và khối đếm xung. Giá trị số α đại diện cho góc quay ϑ .



Hình 6. 9: Sơ đồ nguyên lý làm việc và xử lý tín hiệu của resolver

6.3.2.2. Cảm biến vận tốc

Mặc dù có thể xác định vận tốc từ kết quả đo vị trí, người ta vẫn thường đo trực tiếp nó bằng cảm biến độc lập. Các cảm biến vận tốc thường dùng có tên là *tachometer*. Có 2 loại *tachometer* là *DC tachometer* và *AC tachometer*.

DC tachometer là một máy phát điện một chiều, dùng nam châm vĩnh cửu. Yêu cầu đặc biệt đối với chúng là quan hệ tuyến tính giữa tín hiệu vào (tốc độ quay) và tín hiệu ra (điện áp); giảm hiệu ứng từ trễ và ảnh hưởng của nhiệt độ. Nhược điểm của *DC tachometer* là dùng cố góp điện và không thể loại trừ được hiện tượng mạch đập bằng phương pháp lọc, vì tần số tín hiệu ra thay đổi thường xuyên. Độ tuyến tính của *DC tachometer* có thể đạt trong khoảng $0,1 \div 1\%$, hệ số đáp mạch bằng khoảng $2 \div 5\%$ giá trị danh định của tín hiệu ra.

AC tachometer khắc phục được hiện tượng mạch đập. Nó gồm stator, có 2 cuộn dây và rotor kiểu cóc. Cuộn dây thứ nhất (cuộn kích từ) được cấp điện áp xoay chiều hình sin với tần số khoảng 400 Hz . Khi rotor quay, trên cuộn dây thứ hai sẽ xuất hiện điện áp xoay chiều tỷ lệ thuận với tốc độ quay của rotor. Hiện tượng mạch đập vẫn có nhưng có thể loại trừ bằng bộ lọc thích hợp, vì tần số tín hiệu ra không đổi. Ngoài ra, AC tachometer còn có các ưu điểm khác, như không gặp các phiền phức do cổ góp, rotor không có cuộn dây nên nhẹ, momen quán tính nhỏ, dễ cân bằng và chắc chắn. Nhược điểm của nó là có điện áp dư ở đầu ra ngay cả khi rotor không quay do hồ cảm ký sinh giữa các cuộn dây.

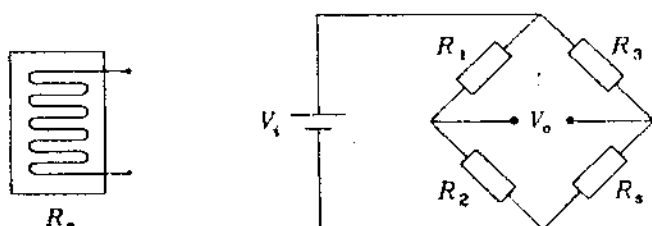
6.3.2.3. Cảm biến đo lực

Một vật chịu tác dụng của lực và momen bao giờ cũng bị biến dạng, nghĩa là có chuyển vị tương đối giữa các phần của nó. Vì vậy các phép đo lực và momen thường được quy về đo chuyển vị. Thông số của các linh kiện điện, như điện trở, điện dung, điện cảm, thường thay đổi khi bị biến dạng. Dựa vào đó người ta chế tạo các đầu đo kiểu điện trở, điện dung, điện cảm để đo lực. Trong một số tinh thể vật chất, như thạch anh, khi bị biến dạng sẽ có chênh lệch điện áp giữa các vùng. Dựa vào đó, người ta chế tạo ra các đầu đo lực kiểu áp điện (*piezoelectric*).

Trong số các loại *sensor* lực kể trên, người ta hay dùng kiểu điện trở, gọi là *tensiometer* (hình 6.10). Đó là điện trở làm bằng dây dẫn mảnh, được dán lên phần tử biến dạng. Nếu phần tử bị kéo thì tiết diện dây bị giảm, do đó điện trở của nó tăng. Ngoài yêu cầu về độ tuyến tính, điện trở suất của vật liệu làm *tensiometer* phải ít thay đổi theo nhiệt độ. Để tăng vùng làm việc tuyến tính, người ta dùng cầu cân bằng, trong đó *tensiometer* là một nhánh (R_x). Khi chưa tác dụng lực, cầu cân bằng, nghĩa là $V_o = 0$. Khi có lực, R_x thay đổi, làm cầu mất cân bằng. Tín hiệu ra được tính theo công thức:

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_x} \right) V_i. \quad (6.17)$$

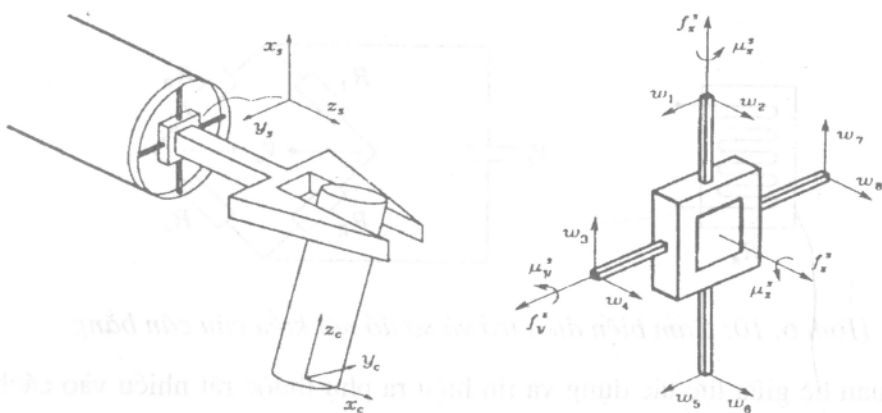
Để bù sự ảnh hưởng của nhiệt độ, người ta dùng R_3 như điện trở bù, gắn lên vùng không chịu lực. Nếu gắn R_3 lên phía đối diện của phần tử biến dạng, sao cho R_x chịu kéo còn R_3 chịu nén thì sẽ tăng được độ nhạy của *sensor*.



Hình 6. 10: Cảm biến điện trở và sơ đồ nối kiểu cầu cân bằng

Quan hệ giữa lực tác dụng và tín hiệu ra phụ thuộc rất nhiều vào cách gắn *sensor* lên phần tử biến dạng. Sau đây là ví dụ minh họa về ứng dụng *tensiometer* vào đo lực tác dụng lên cổ tay khi nâng vật. Hình 6.11 cho thấy, trong trường hợp này phần tử biến dạng có dạng chữ thập (kiểu Maltese), đóng vai trò truyền lực giữa kẹp và cổ tay. Các *tensiometer* được dán lên các nhánh chữ thập, sao cho *sensor* nhận được tín hiệu lực tác dụng theo bất cứ phương nào. Mỗi nhánh chữ thập được dán 2 *tensiometer*, nên tổng số giá trị đo được là 8, từ ω_1 đến ω_8 . Lực tổng quát tác dụng lên cổ tay có 6 thành phần: 3 thành phần lực hướng theo 3 trục tọa độ (f_x, f_y, f_z) và 3 thành phần momen quanh 3 trục đó (μ_x, μ_y, μ_z). Quan hệ giữa các thành phần lực và momen với các giá trị đo được biểu diễn qua một ma trận, gọi là *ma trận chuẩn định* (*calibration matrix*):

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 & c_{17} & 0 \\ c_{21} & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & c_{34} & 0 & c_{36} & 0 & c_{38} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & c_{48} \\ 0 & c_{52} & 0 & 0 & 0 & c_{56} & 0 & 0 \\ c_{61} & 0 & c_{63} & 0 & c_{65} & 0 & c_{67} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \\ \omega_6 \\ \omega_7 \\ \omega_8 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$



Hình 6.11: Phân tử biến dạng kiểu Maltese

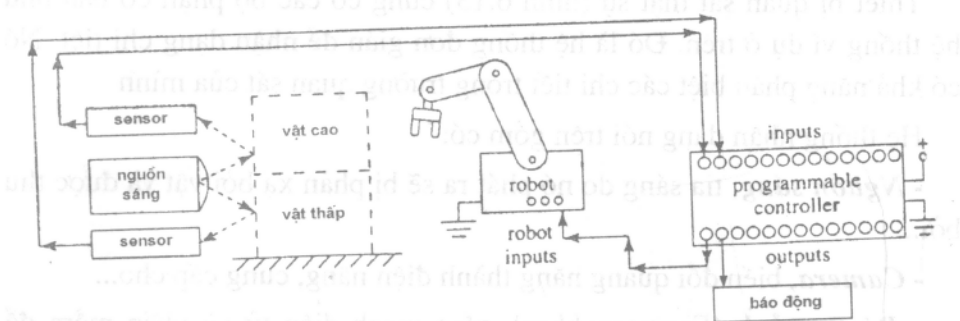
Các *sensor* thông dụng kiểu này có đường kính khoảng 10 cm, cao khoảng 5 cm; có giới hạn đo lực $(50 \div 500) \text{ N}$ và momen $(5 \div 70) \text{ Nm}$; độ phân giải đo lực khoảng 0,1% và momen 0,05% giá trị cực đại; tốc độ lấy mẫu của mạch xử lý khoảng 1 Hz.

Chú ý rằng giá trị lực và momen đo được là các giá trị tại khung đo, không phải tại vật (hình 6.11). Muốn xác định được giá trị lực và momen tại vật, cần tiến hành các phép chuyển đổi toạ độ như đã trình bày trong các chương trước.

6.3.2.4. Thiết bị quan sát (Visual System)

Thiết bị quan sát là một loại *sensor* đặc biệt, có khả năng nhận biết và xử lý hình ảnh của đối tượng. Thiết bị quan sát được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp nói chung, song ứng dụng trong robot là ứng dụng đặc trưng nhất. Mặt khác, xử lý ảnh là một trong những lĩnh vực phát triển mạnh nhất của công nghệ thông tin hiện đại, nên thiết bị quan sát trên robot gắn liền với máy tính.

Trên hình 6.12 là một hệ thống quan sát đơn giản của robot, để nhận biết 2 vật: một vật cao và một vật thấp. Hệ thống có một nguồn sáng và 2 *sensor* thu ánh sáng. Nếu có vật cao trước nguồn sáng thì cả 2 *sensor* đều nhận được ánh sáng phản xạ. Nếu chỉ có vật thấp thì chỉ riêng *sensor* thấp nhận được. Nếu không có vật nào thì không *sensor* nào nhận được tín hiệu. "Hình ảnh" của đối tượng chỉ gồm có 2 điểm ảnh (trong kỹ thuật xử lý ảnh, điểm ảnh được gọi là pixel).

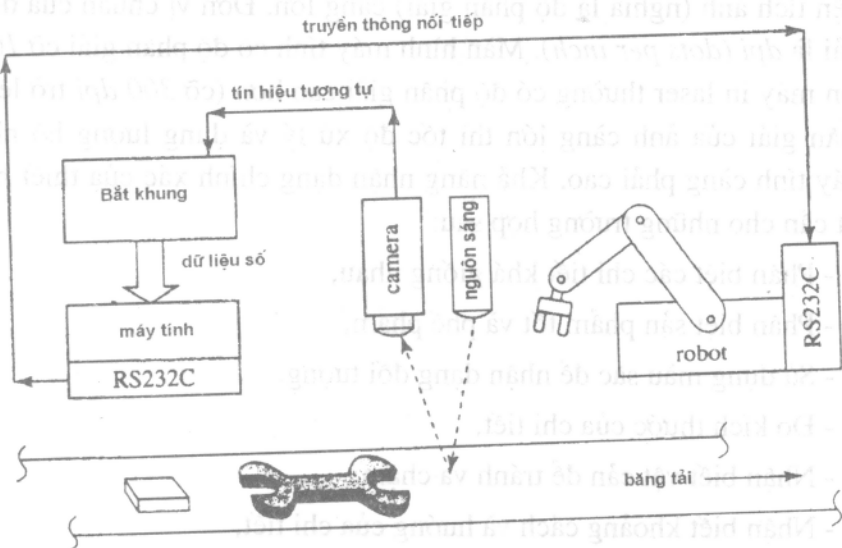


Hình 6.12: Hệ thống quan sát 2 pixel

Tín hiệu về đối tượng, tuy chỉ có 2 pixel nhưng cũng cần bộ phận tích, ví dụ một PLC. Nó sẽ được lập trình để:

- Báo hiệu cho robot nếu có vật cao trước mặt. Vì vậy robot chỉ phải phản ứng khi gặp vật cao.
- Nổi hiệu lệnh cho người nếu chỉ có vật thấp trước mặt. Như vậy, người chỉ phải phản ứng nếu gặp vật thấp.

Gọi hệ thống trên là "thiết bị quan sát" có thể là hơi lạm dụng từ này và hệ thống như vậy có lẽ không tồn tại trên thực tế, nhưng nó cho một hình dung ban đầu về thiết bị quan sát.



Hình 6.13: Hệ thống nhận dạng chỉ tiết

Thiết bị quan sát thật sự (hình 6.13) cũng có các bộ phận cơ bản như hệ thống ví dụ ở trên. Đó là hệ thống đơn giản để nhận dạng chi tiết. Nó có khả năng phân biệt các chi tiết trong trường quan sát của mình.

Hệ thống nhận dạng nói trên gồm có:

- **Nguồn sáng**, tia sáng do nó phát ra sẽ bị phản xạ bởi vật và được thu bởi...

- **Camera**, biến đổi quang năng thành điện năng, cung cấp cho...

- **Bộ thu ảnh** (*Framegrabber*), gồm mạch điện tử và phần mềm để phân tích tín hiệu thành các pixel và biểu diễn chúng dưới dạng mã nhị phân. Sơ đồ phân bố các điểm ảnh gọi là bitmap. Sơ đồ này sẽ được chuyển tới...

- **Máy tính** để lưu trữ và xử lý tiếp. Máy tính sẽ so sánh sơ đồ điểm ảnh của vật với sơ đồ điểm ảnh chuẩn (gọi là template) trong thư viện để xem vật thuộc loại nào. Máy tính sẽ chỉ cho robot biết chi tiết nó đang nhìn thấy là chi tiết nào, thông qua...

- **Giao diện đầu ra**. Nó chuyển tín hiệu từ hệ thống nhận dạng cho bộ điều khiển robot. Ví dụ, một mã "H" (nếu chi tiết là hộp), mã "C" (nếu chi tiết là cờ lê) sẽ được truyền theo giao diện chuẩn RS 232.

Thiết bị nhận dạng càng chính xác nếu số điểm ảnh trên một đơn vị diện tích ảnh (nghĩa là độ phân giải) càng lớn. Đơn vị chuẩn của độ phân giải là *dpi* (*dots per inch*). Màn hình máy tính có độ phân giải cỡ 100 *dpi*, còn máy in laser thường có độ phân giải cao hơn (cỡ 300 *dpi* trở lên). Độ phân giải của ảnh càng lớn thì tốc độ xử lý và dung lượng bộ nhớ của máy tính càng phải cao. Khả năng nhận dạng chính xác của thiết bị quan sát cần cho những trường hợp sau:

- Phân biệt các chi tiết khá giống nhau,
- Phân biệt sản phẩm tốt và phế phẩm,
- Sử dụng màu sắc để nhận dạng đối tượng,
- Đo kích thước của chi tiết,
- Nhận biết vật cản để tránh va chạm,
- Nhận biết khoảng cách và hướng của chi tiết,
- Nhận biết tốc độ và hướng chuyển động của đối tượng,

- Nhận biết đối tượng 3 chiều.

Các thiết bị nhận dạng mục tiêu của máy bay ném bom, nhận dạng đường cho các ô tô tự lái,... là những ví dụ về các thiết bị quan sát hiện đại.

6.4. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

Các phần trên đã trình bày về hệ thống cơ khí (xương cốt) và hệ thần kinh ngoại vi. Muốn điều khiển được robot cần một hệ thống thần kinh trung ương, tức là não bộ. Đó là hệ thống điều khiển.

6.4.1. Kiến trúc chức năng

Hệ thống điều khiển robot cần có các khả năng sau:

- Điều khiển chuyển động của các cơ cấu cơ khí (*manipulation ability*);
- Thu nhận thông tin về trạng thái của hệ thống và về môi trường công tác (*sensory ability*);
- Phân tích thông tin và phản ứng trước điều kiện thực tế trong phạm vi xác định (*intelligent behavior ability*);
- Lưu trữ, xử lý và cung cấp thông tin về hệ thống (*data processing ability*).

Muốn vậy, bộ điều khiển cần có các khối (modul) cơ bản:

- Modul cảm biến thu nhận, biến đổi, hiệu chỉnh, tổng hợp thông tin về trạng thái của hệ thống và về môi trường.
- Modul tổng hợp, thiết lập mô hình tổng hợp về hệ thống và môi trường trên cơ sở thông tin do modul cảm biến cung cấp.
- Modul ra quyết định, đưa ra phương thức hành động. Từ chiến lược hành động, lập kế hoạch, điều khiển hoạt động của cơ cấu để thực hiện nhiệm vụ theo tình huống cụ thể.

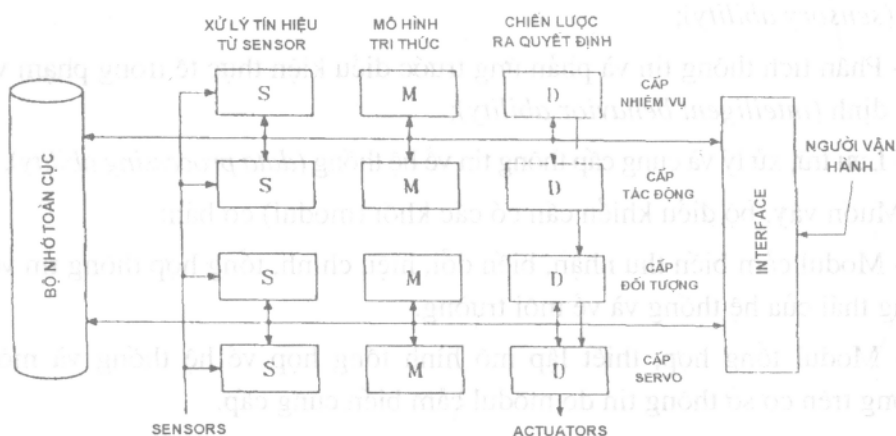
Các modul trên tự động liên kết với nhau theo nhiệm vụ, được quy định trong chương trình, có tính đến khả năng thích ứng của hệ thống trong tình huống cụ thể. Tuy vậy, vẫn cần có giao diện với người vận hành để khi cần con người có thể kiểm tra, giám sát, can thiệp vào hệ thống.

Tính đến cường độ trao đổi thông tin giữa các modul với nhau và giữa hệ thống với người vận hành, cần có bộ nhớ chung để lưu trữ các thông tin ban đầu và thông tin cập nhật của hệ thống và môi trường.

Cấu trúc chức năng trên được phân cấp theo thứ bậc. *Cấu trúc bậc thấp* liên quan đến các dịch chuyển vật lý. *Cấu trúc bậc cao* gắn với chức năng phân tích logic. Các bậc liên hệ với nhau thông qua dòng dữ liệu. Sơ đồ trên hình 6.14 cho phép nhìn nhận tổng quan về cấu trúc chức năng và cấu trúc thứ bậc của hệ điều khiển robot.

Tuỳ theo yêu cầu đối với hoạt động của robot, các chức năng được phân cấp với mức độ khác nhau. Nói chung, có thể phân thành 4 cấp chính:

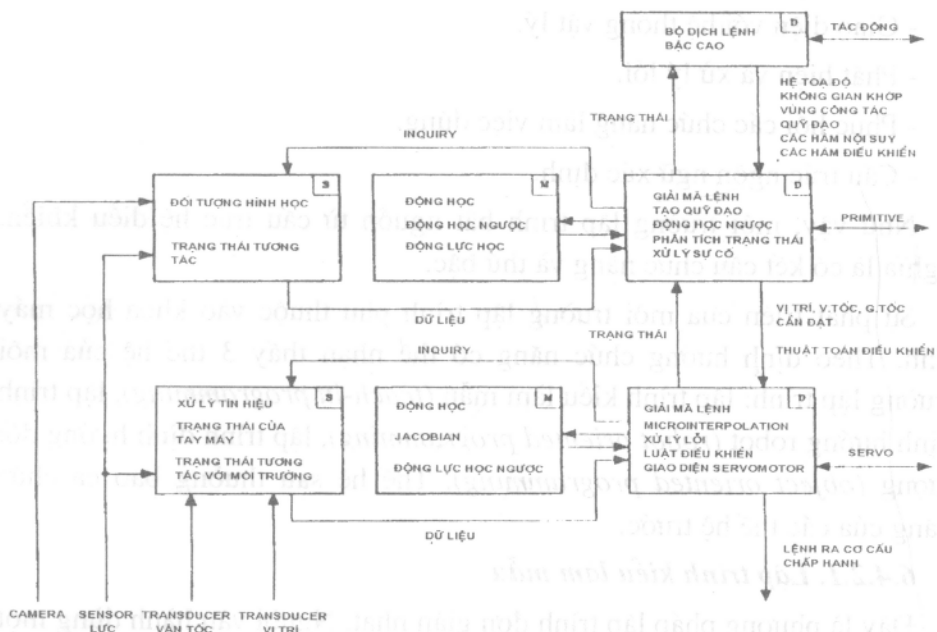
- Cấp nhiệm vụ (*task level*), giải quyết các vấn đề chung về nhiệm vụ. So sánh yêu cầu đặt ra với khả năng chấp nhận của hệ thống, tình trạng hiện tại của hệ thống và môi trường,...
- Cấp chiến lược (*action level*), giải quyết phương thức hành động chung, ví dụ hệ toạ độ, vị trí của phần công tác, các điểm phải đi qua, hàm nội suy sẽ sử dụng,...



Hình 6. 14: Cấu trúc chức năng và thứ bậc của hệ điều khiển robot

- Cấp kế hoạch (*primitive level*), thiết lập quỹ đạo, tính toán động học và động học ngược, phân tích tình trạng hệ chấp hành,...
- Cấp thừa hành (*servo level*), liên quan đến các hoạt động cụ thể, như giải mã lệnh, nội suy, xử lý lỗi, giao diện với cơ cấu chấp hành.

Sơ đồ trong hình 6.15 cho phép hình dung chi tiết về sự phân cấp điều khiển. Trên thực tế, không phải hệ điều khiển robot nào cũng có đầy đủ các cấp điều khiển nói trên. Hầu hết các RBCN không có cấp nhiệm vụ. Ngược lại, một số loại robot, như robot dùng trong vũ trụ, trong quân sự, trong y học,... có nhiều cấp điều khiển hơn.



Hình 6. 15: Phân cấp điều khiển robot

6.4.2. Môi trường lập trình

Đặc điểm quan trọng của robot là làm việc theo chương trình và tái lập trình được. Chương trình là phương tiện để người sử dụng truyền đạt cho robot các nhiệm vụ mà nó phải thực hiện và hướng dẫn cho robot làm việc đó thế nào. Vì vậy robot cần có một môi trường lập trình với ngôn ngữ lập trình nhất định. Môi trường lập trình, ngoài hệ thống lệnh và hàm như các ngôn ngữ lập trình khác, còn phải có khả năng giám sát quá trình làm việc của robot và có phản ứng thích hợp. Nói cách khác, dù hệ thống được thiết kế chính xác và tỷ mỉ đến đâu thì cũng không lường hết được mọi yếu tố bất trắc. Chương trình phải cho phép robot phản ứng hợp lý trong mỗi tình huống. Nói tóm lại, môi trường lập trình robot cần có các yếu tố sau:

- Hệ thống điều hành trong thời gian thực.
- Mô hình hoá không gian công tác.
- Điều khiển chuyển động.
- Đọc và xử lý thông tin từ hệ thống *sensor*.

- Giao diện với hệ thống vật lý.
- Phát hiện và xử lý lỗi.
- Phục hồi các chức năng làm việc đúng.
- Cấu trúc ngôn ngữ xác định.

Như vậy, môi trường lập trình bắt nguồn từ cấu trúc hệ điều khiển, nghĩa là có kết cấu chức năng và thứ bậc.

Sự phát triển của môi trường lập trình phụ thuộc vào khoa học máy tính. Theo định hướng chức năng có thể nhận thấy 3 thế hệ của môi trường lập trình: lập trình kiểu làm mẫu (*teach-in programming*), lập trình định hướng robot (*robot oriented programming*), lập trình định hướng đối tượng (*object oriented programming*). Thế hệ sau thường bao cả chức năng của các thế hệ trước.

6.4.2.1. Lập trình kiểu làm mẫu

Đây là phương pháp lập trình đơn giản nhất. Người vận hành dùng một thiết bị đặc biệt, gọi là *teach pendant* hay trực tiếp dẫn dắt tay máy thực hiện các thao tác. Mọi thao tác sẽ được ghi nhớ để sau đó tay máy có thể lặp lại. Dù ngày nay ngôn ngữ lập trình đã phát triển, phương pháp lập trình này hiện vẫn còn được sử dụng, ví dụ cho người mới học lập trình hoặc để lập trình các thao tác phức tạp, khó diễn đạt trực tiếp bằng ngôn ngữ lập trình bậc cao.

6.4.2.2. Lập trình định hướng robot

Phương pháp này phát triển trên cơ sở kỹ thuật máy tính hiện đại. Đặc điểm cơ bản của nó là dùng ngôn ngữ lập trình bậc cao, có cấu trúc để mô tả các thao tác. Các yếu tố chính của môi trường gồm:

- Bộ soạn thảo chương trình dưới dạng text editor.
- Cấu trúc biểu thị dữ liệu phức tạp.
- Sử dụng các biến trạng thái.
- Thực hiện các phép toán ma trận.
- Sử dụng ký hiệu để biểu diễn hệ tọa độ.
- Có khả năng chuyển đổi hệ tọa độ vật trên các khâu, khớp của tay máy.
- Dùng kỹ thuật chương trình con, thủ tục, vòng lặp.
- Có khả năng tính toán song song.

- Các chức năng điều khiển logic khả trình (PLC).

Sử dụng môi trường lập trình định hướng robot có thể tạo ra các giao diện với các thiết bị khác trong hệ thống sản xuất. Mặt khác, không nhất thiết phải lập trình trực tiếp trên thiết bị mà trên một trạm lập trình độc lập (*offline programming*). Một công cụ lập trình rất có hiệu quả là CAD/CAM, cho phép mô tả hệ thống và môi trường làm việc dưới dạng đồ họa.

6.4.2.3. Lập trình định hướng đối tượng

Lập trình hướng đối tượng cho phép thâm nhập vào cấp điều khiển cao nhất: mô hình hoá môi trường làm việc của robot như trong hệ thống sản xuất thực. Trong hệ thống đó robot chỉ là một trong những thiết bị, làm việc đồng bộ với các thiết bị khác. Đối tượng lập trình và mô tả là nhiệm vụ sản xuất của cả hệ thống chứ không phải chỉ riêng robot. Môi trường lập trình này dần dần mang các đặc tính của hệ chuyên gia và trí tuệ nhân tạo.

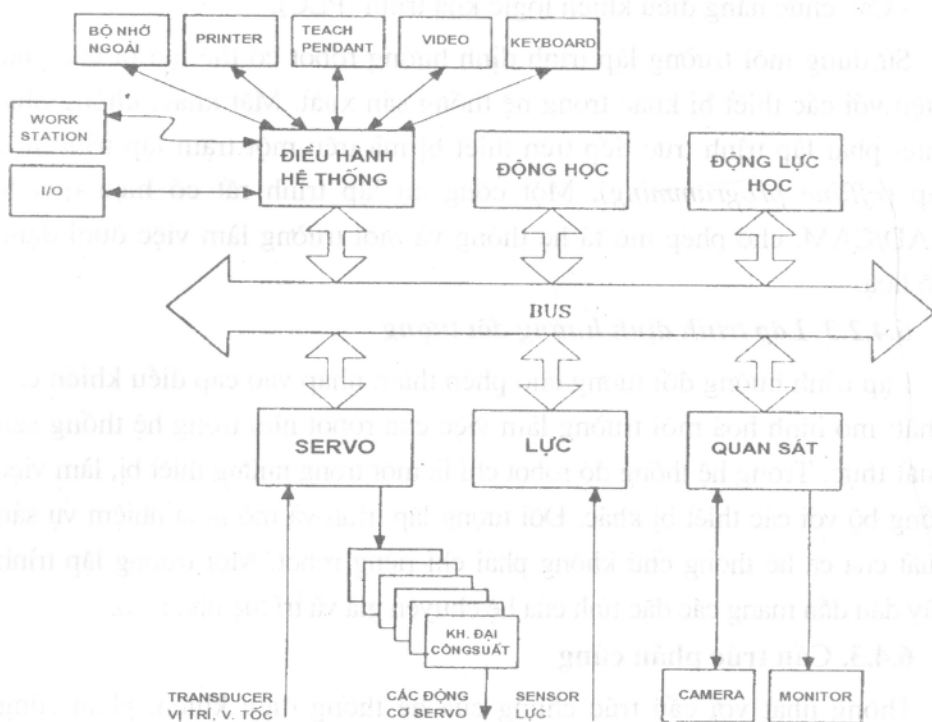
6.4.3. Cấu trúc phân cứng

Thống nhất với cấu trúc chung của hệ thống điều khiển, phân cứng cũng có cấu trúc chức năng theo thứ bậc. Sơ đồ cấu trúc phân cứng như trong hình 6.16.

Trong hệ thống này, từng chức năng được hình thành nhờ bảng mạch riêng. Các bảng mạch được liên kết với nhau qua đường truyền (BUS) dữ liệu. Độ rộng của BUS phải đủ cho các phép xử lý thời gian thực.

Bảng mạch (Board) hệ thống, thực chất là CPU, gồm:

- Một bộ vi xử lý với bộ đồng xử lý toán học,
- Một EPROM cho cấu hình hệ thống,
- Một RAM riêng (local),
- Một RAM chia sẻ với các bảng mạch khác thông qua BUS,
- Một số cổng nối tiếp và song song để ghép với BUS hoặc các thiết bị bên ngoài.
- Các bộ đếm, thanh ghi và đồng hồ.
- Hệ thống ngắt.



Hình 6. 16: Sơ đồ cấu trúc phần cứng của hệ điều khiển RBCN

Board hệ thống thực hiện các chức năng sau:

- Giao diện với teach pendant, bàn phím, video, máy in,
- Giao diện với bộ nhớ ngoài (ổ cứng) để lưu dữ liệu và chương trình,
- Giao diện với các trạm hoặc hệ điều khiển khác trong mạng cục bộ (LAN),
- Giao diện vào ra (I/O) với các thiết bị ngoại vi, như băng tải, nâng hạ, đo lường, ON/OFF sensor,
- Bộ dịch chương trình,
- Bộ điều khiển BUS.

Board động học thực hiện các chức năng:

- Tính toán động học của cấu trúc,
- Giải các bài toán thuận, nghịch, *Jacobian* của động học tay máy,
- Test quỹ đạo,
- Giải quyết vấn đề liên kết động học thừa.

Board động lực học giải bài toán ngược của động lực học tay máy.

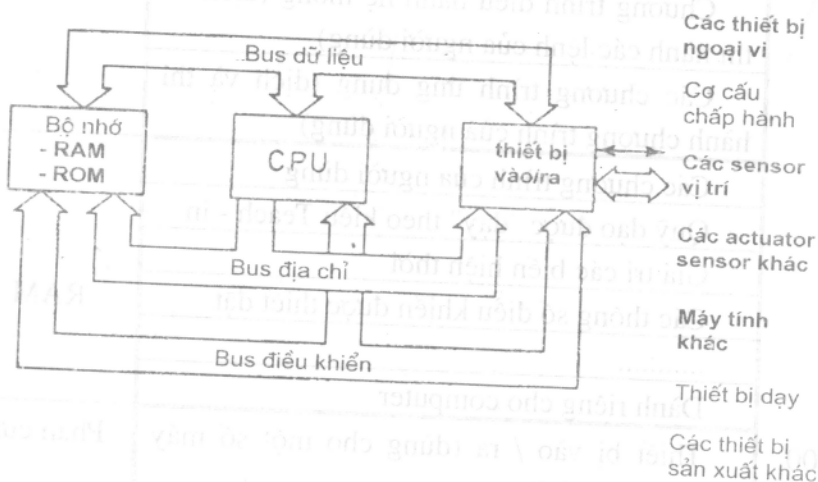
Servo board có các chức năng:

- Nội suy quỹ đạo,
- Thực hiện các thuật toán điều khiển,
- Chuyển đổi số - tương tự và giao diện với các bộ khuếch đại công suất,
- Xử lý các thông tin về vị trí và vận tốc,
- Ngắt chuyển động khi có sự cố.

Các board khác có các chức năng xử lý thông tin từ các *sensor* tương ứng.

Mặc dù các board đều truyền dữ liệu qua BUS, tốc độ trao đổi dữ liệu của chúng không cần giống nhau. Các thông tin hệ thống cung cấp cho *servo board* cần cập nhật nhanh nhất có thể được, nên tốc độ trao đổi của chúng rất cao ($100 \div 1000$) Hz. Board động học và động lực học chỉ thực hiện các phép tính, không trực tiếp tham gia điều khiển hệ thống nên trao đổi thông tin ở tần số thấp hơn ($10 \div 100$) Hz. *Vision board* còn trao đổi dữ liệu với tần số thấp hơn nữa ($1 \div 10$) Hz. Việc các board trao đổi dữ liệu với tốc độ khác nhau giúp phòng ngừa tình trạng nghẽn kênh dữ liệu.

Sự phát triển của kỹ thuật điều khiển robot không thể tách rời sự phát triển của công nghệ thông tin. Bản thân bộ điều khiển robot là một máy tính chuyên dùng (hình 6.17), bên cạnh những nguyên tắc chung, có những đặc điểm riêng trong cấu tạo và hoạt động.



Hình 6. 17: Bộ điều khiển robot có cấu trúc như một máy tính

6.4.3.1. Bộ xử lý trung tâm

Máy tính đã gây nên sự phát triển đáng kể của kỹ thuật điều khiển robot. Các bộ vi xử lý (VXL) 8 bit, như Motorola 6800 hoặc Zilog Z-80 đã từng được sử dụng phổ biến trong điều khiển robot. Ngày nay, phần lớn robot đã dùng VXL 16 bit, với co-processor để tăng khả năng tính toán. Thông dụng nhất là các bộ VXL Intel 8086, 8088. Ngoài tăng đáng kể tốc độ xử lý, chúng còn có khả năng mở rộng bộ nhớ địa chỉ, cho phép điều khiển tốt hơn vận tốc và gia tốc của phần công tác và mở rộng tiện ích lập trình. Một số robot hiện đại đã dùng bộ VXL 32 bit. Chúng rất thích hợp với kiểu điều khiển quỹ đạo liên tục.

6.4.3.2. Bộ nhớ

Trên hình 6.18 là sơ đồ cấu trúc bộ nhớ của bộ điều khiển robot.

Địa chỉ	Nội dung bộ nhớ	Loại bộ nhớ
\$FFFFF	Chương trình quản lý vào / ra (trao đổi dữ liệu với thiết bị vào / ra)	ROM
	Chương trình điều khiển servo (xác định vị trí, vận tốc, momen của phần chấp hành)	
	Chương trình quản lý chuyển động (cung cấp setpoints cho các chương trình điều khiển, tọa độ cho các trục để điều khiển theo quỹ đạo liên tục)	
	Chương trình điều hành hệ thống (dịch và thi hành các lệnh của người dùng)	
	Các chương trình ứng dụng (dịch và thi hành chương trình của người dùng)	
	Các chương trình của người dùng	RAM
	Quỹ đạo được "dạy" theo kiểu Teach - in	
	Giá trị các biến hiện thời	
	Các thông số điều khiển được thiết đặt	
		
	Dành riêng cho computer	
\$00000	Thiết bị vào / ra (dùng cho một số máy tính như bộ nhớ)	Phân cứng

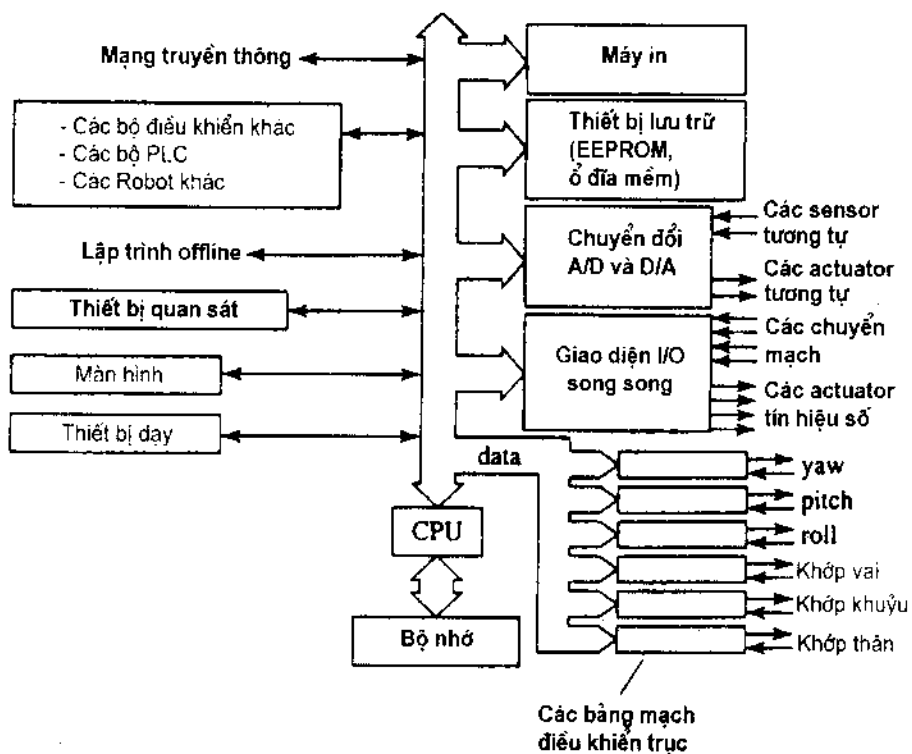
Hình 6. 18: Sơ đồ tổ chức bộ nhớ của robot

Bộ điều khiển robot sử dụng nhiều loại chương trình. Tùy theo tầm quan trọng, được phép thay đổi đến mức nào, chương trình điều hành hệ thống do nhà sản xuất cung cấp hay chương trình của người dùng,... mà các chương trình được lưu trữ trong ROM hay RAM.

6.4.3.3. Thiết bị vào/ra

Thiết bị vào/ra của robot (xem hình 6.19) phục vụ cho nhiệm vụ điều khiển, nghĩa là giao diện giữa máy tính với các hệ thống thiết bị trong robot và các thiết bị bên ngoài:

- **Thiết bị điều khiển các trục**, điều khiển nguồn động lực cung cấp cho các trục để thi hành các nhiệm vụ của robot. Máy tính điều khiển hệ thống chấp hành thông qua các thiết bị này. Chúng có thể là các servo driver, inverter,... Chúng có thể bao gồm cả bộ chuyển đổi số - tương tự, cho phép máy tính điều khiển động cơ một chiều. Nếu dùng hệ điều khiển servo thì cần thu nhận tín hiệu từ các *sensor*.



Hình 6. 19: Sơ đồ thiết bị vào / ra của robot

- **Thiết bị dạy (Teach Pendants)** có trên hầu hết robot. Loại đơn giản chỉ cho phép nhớ các tọa độ mà robot được dẫn qua để sau đó lặp lại. Loại phức tạp hơn có thể có các phím điều khiển chức năng, như chuyển động các trục, mở và đóng kẹp,... và các lệnh xử lý chương trình, như ghi, đọc, chạy chương trình....

- **Các thiết bị ngoại vi**, như máy in, thiết bị lưu trữ ngoài, màn hình,...

- **Giao diện với hệ thống sensor**, có thể là số hay tương tự tùy theo loại *sensor* và thiết bị xử lý.

- **Giao diện với các hệ điều khiển khác**, như PLC, máy CNC, robot và các thiết bị sản xuất khác,...

- **Mạng truyền thông** cục bộ hay diện rộng.

Chương 7

SỬ DỤNG ROBOT CÔNG NGHIỆP

7.1. CÁC LĨNH VỰC ỨNG DỤNG ĐIỂN HÌNH CỦA RBCN

Robot được sử dụng trong mọi lĩnh vực: sản xuất, quốc phòng, nghiên cứu khoa học, dân sinh,... trong đó, công nghiệp là nơi sử dụng robot một cách phổ biến nhất. Trong công nghiệp, cùng với các thiết bị công nghệ và các thiết bị nâng chuyển, robot cũng đã được thống nhất hoá cao về kết cấu và ứng dụng. Xu hướng ứng dụng RBCN nhằm vào một số trường hợp chính như sau:

- Công việc buồn tẻ, đơn điệu, hoặc làm việc liên tục cả ngày đêm, ví dụ vận chuyển, xếp dỡ hàng hoá, phục vụ máy công cụ, lắp ráp, đo lường, bao gói sản phẩm,...

- Công việc nặng nhọc;

- Công việc gây nguy hiểm cho con người;

- Làm việc trong các môi trường không lợi cho sức khoẻ của con người, như nóng, độc, phóng xạ, dưới nước sâu, trong lòng đất, ngoài khoảng không vũ trụ,...

Tuy robot được sử dụng rộng rãi như vậy nhưng tài liệu này chủ yếu đi sâu vào lĩnh vực ứng dụng rộng rãi nhất của RBCN, là ngành chế tạo máy.

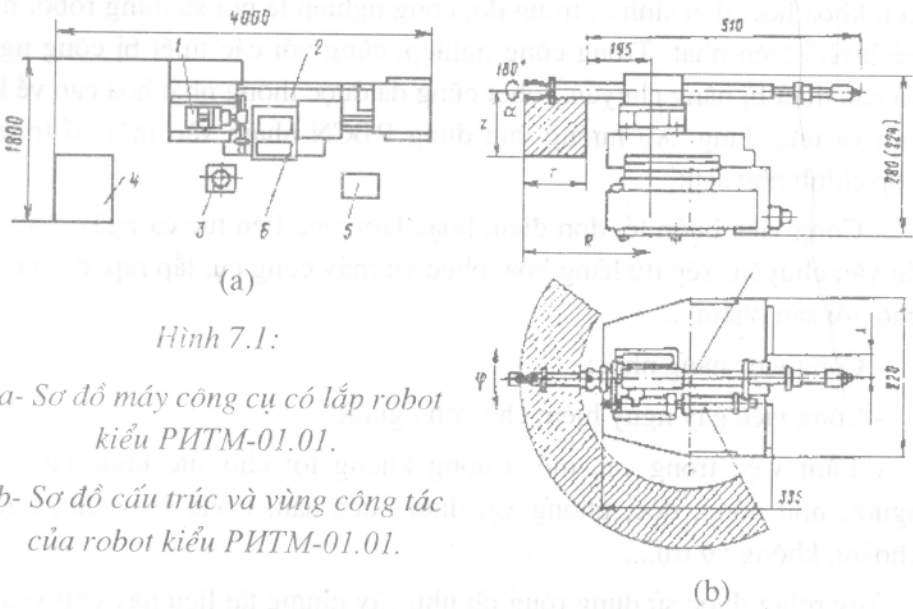
7.2. CÁC HỆ THỐNG SẢN XUẤT CÓ SỬ DỤNG RBCN

Ngày nay người ta đã dùng tính từ *robot hoá* để chỉ các hệ thống sản xuất có sử dụng RBCN. Căn cứ vào hình thái tổ chức sản xuất, người ta phân biệt 4 dạng robot hoá hệ thống sản xuất.

7.2.1. Robot hoá các thiết bị công nghệ

Đây là dạng ứng dụng đơn giản nhất của RBCN, trong đó thiết bị công nghệ được phục vụ bởi một hay các robot (hoặc được trang bị cơ cấu phục vụ dạng robot) để tự động hoá các công việc phục vụ. Trong gia công cắt gọt, các công việc thường được phục vụ bởi robot là vận chuyển phôi và sản phẩm, đưa phôi vào thiết bị gá kẹp và tháo sản phẩm sau gia công (thay phôi), đảo phôi trong khi gia công, xếp sản phẩm vào giá, đo sản phẩm trên máy hoặc đưa sản phẩm lên thiết bị đo, làm sạch đồ gá hoặc bề mặt chi tiết, thay dụng cụ,... Trong sản xuất đúc, robot thường được giao

nhiệm vụ lắp, dỡ khuôn, rót vật liệu, làm sạch vật đúc,... Trong gia công áp lực, robot có thể đảm nhận việc đưa phôi vào vùng gia công và lấy sản phẩm, đảo phôi khi rèn. Có những trường hợp, như khi hàn, sơn,... robot đồng thời là thiết bị công nghệ, nghĩa là nó trực tiếp điều khiển mỏ hàn hay đầu phun sơn để hoàn thành nguyên công công nghệ.



Hình 7.1:

a- Sơ đồ máy công cụ có lắp robot kiểu PITM-01.01.

b- Sơ đồ cấu trúc và vùng công tác của robot kiểu PITM-01.01.

Trên hình 7.1 (a) là sơ đồ một tổ hợp gồm máy tiện ren vít điều khiển số 2, kiểu 1И1611МФ3, được lắp robot 1, kiểu PITM-01.01. Phễu rung 3 để định hướng phôi trước khi đưa vào máy. Robot nhặt phôi đã được định hướng từ phễu 3. Chi tiết sau gia công được robot lấy khỏi mâm cặp và đặt lên khay 6.

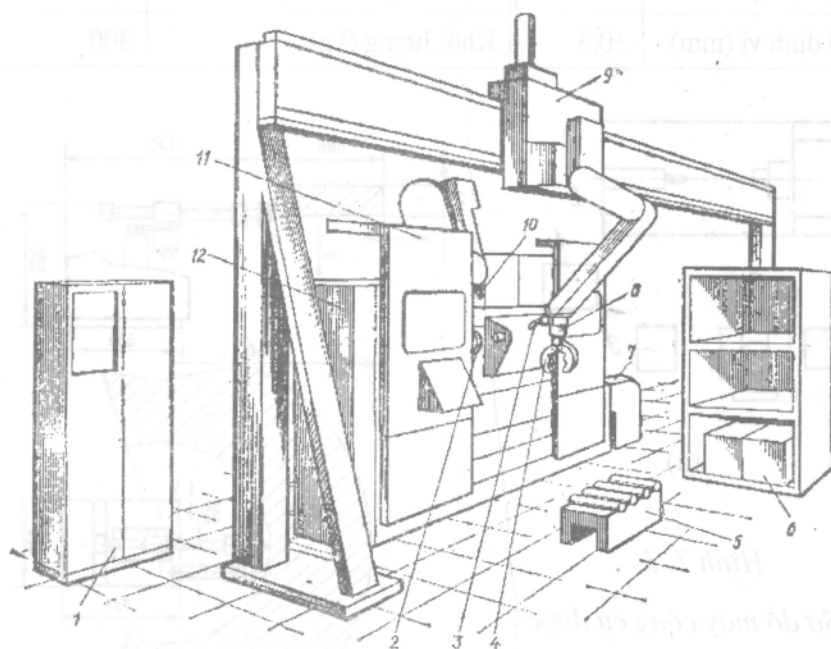
Tổ hợp này dùng để gia công các chi tiết tròn xoay, dùng phôi rời có đường kính 6÷50 mm, dài 10÷50 mm, khối lượng dưới 0,1 kg. Thời gian gia công một chi tiết từ 0,15 đến 0,5 ph. Năng suất gia công tăng 150% so với không dùng robot.

Trên hình 7.1 (b) là sơ đồ của robot PITM-01.01. Nó được thiết kế để phục vụ các máy gia công cắt gọt, máy dập nguội và lắp ráp đơn giản. Các tính năng kỹ thuật chính của nó trong bảng 7.1.

Bảng 7.1: Tính năng kỹ thuật của robot PNTM-01.01

Tên thông số	Giá trị	Tên thông số	Giá trị
Sức nâng (kg)	0,1	Tầm vươn lớn nhất (mm)	345
Số bậc tự do	5	Di chuyển thẳng x/r/z (mm)	50/150/50
Kiểu truyền động	khí nén	Vận tốc thẳng theo x/r/z (m/s)	0,17/0,6/0,17
Kiểu điều khiển	chu trình	Di chuyển góc φ/α ($^{\circ}$)	220/90
Số tọa độ lập trình	4	Vận tốc góc theo φ/α ($^{\circ}/s$)	6,2/1,53
Sai số định vị (mm)	$\pm 0,1$	Khối lượng (kg)	30

Trên hình 7. 2 là sơ đồ không gian của tổ hợp máy - robot để gia công cơ khí. Đó là một thiết bị vạn năng hẹp, có khả năng thay đổi cấu hình để thích ứng với sự thay đổi trong một phạm vi hẹp kích thước và hình dạng chi tiết.



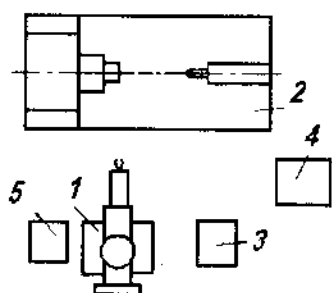
Hình 7. 2: Sơ đồ không gian của tổ hợp máy - robot

Ví dụ về máy công cụ được một robot độc lập phục vụ ở trên hình 7.3 (a). Tổ hợp dùng máy tiện CNC kiểu A616Φ3. Robot kiểu БРИГ-10Б có nhiệm vụ lấy phôi từ giá 3, cấp cho máy tiện và lấy chi tiết gia công xong khỏi máy, chất vào giá 5. Tổ hợp có thể gia công các chi tiết dạng đĩa,

đường kính đến 100 mm, dài đến 200 mm, hoặc chi tiết dạng trục, đường kính đến 80 mm, dài đến 600 mm. Robot kiểu БРИГ-10 trên hình 7.3 (b) được thiết kế để phục vụ các máy tiện bán tự động kiểu 1A730, 1A240II-6, máy phay ren 5K63, máy tiện CNC kiểu AT IIP-2M12. Nó có tính năng cơ bản như trong bảng 7.2.

Bảng 7. 2: Tính năng kỹ thuật của robot БРИГ-10

Tên thông số	Giá trị	Tên thông số	Giá trị
Sức nâng (kg)	10	Tầm vươn lớn nhất (mm)	1260
Số bậc tự do	5	Chuyển vị dài y/r/z (mm)	200/600/100
Kiểu truyền động	khí nén	Vận tốc dài theo x/r/z (m/s)	0,3/0,6/0,3
Kiểu điều khiển	chu trình	Chuyển vị góc φ/α (°)	210/180
Số tọa độ lập trình	4	Vận tốc góc theo φ/α (°/s)	1,53/1,53
Sai số định vị (mm)	$\pm 0,3$	Khối lượng (kg)	300

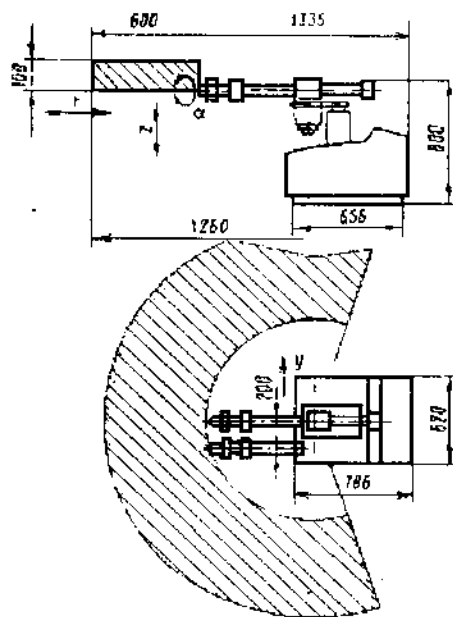


(a)

Hình 7. 3

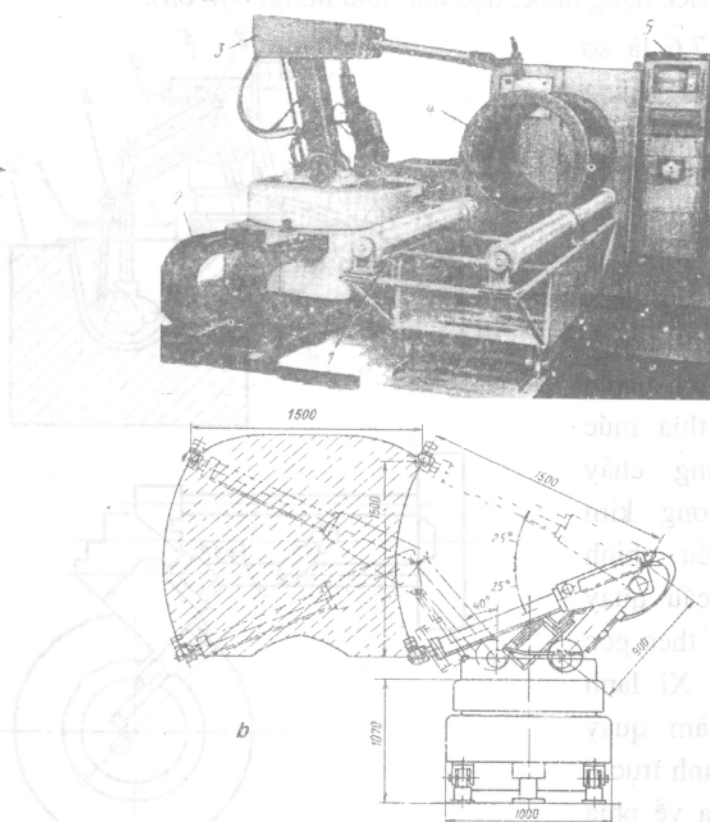
a- Sơ đồ máy công cụ được phục vụ bởi robot độc lập.

b- Robot БРИГ-10.



(b)

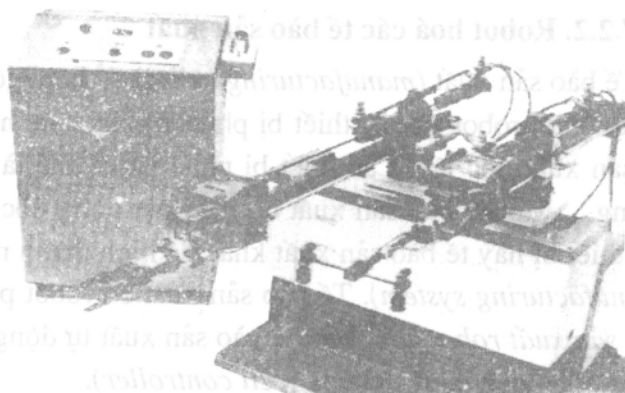
Trên hình 7.4 là robot phun sơn kiểu ППК-20. Nó mang đầu phun sơn và có đồ gá để xoay vật cần sơn.



Hình 7.4: Robot phun sơn kiểu ППК-20

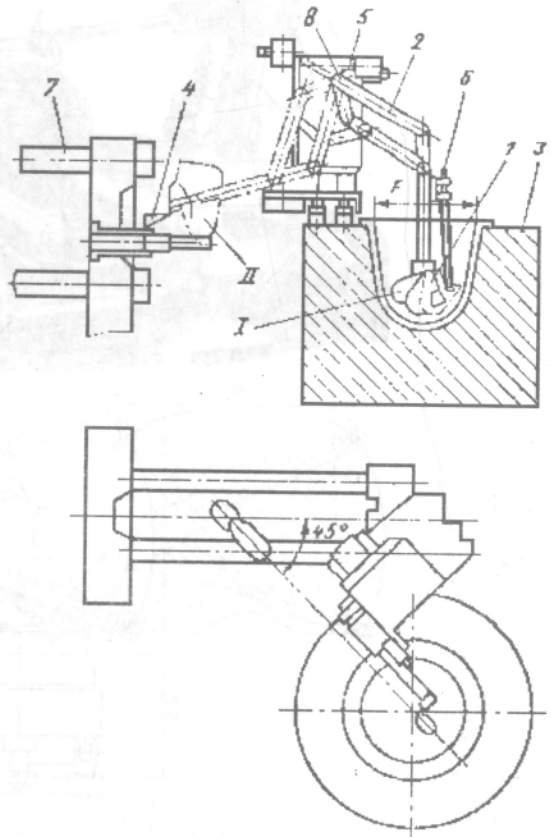
Trên hình 7.5 là robot kiểu ПИТМ-05-01, phục vụ máy dập tấm. Nó có 2 cánh tay: một tay mang kìm gấp, tay kia mang 2 bu lông hút chân không.

Hình 7.5:
Robot kiểu
ПИТМ-05-01
phục vụ máy
dập tấm



Trong sản xuất đúc, robot thường được dùng để thay thế con người trong các công việc nặng nhọc, độc hại (như nóng, bụi, ồn).

Trên hình 7.6 là sơ đồ robot của hãng Toshiba, làm công việc rót vật liệu ở thiết bị đúc dưới áp lực. Phần công tác của robot là thìa 1, được kẹp trên cánh tay 2. Cánh tay là cơ cấu hình bình hành. Tại vị trí I, thìa múc kim loại nóng chảy trong lò. Lượng kim loại được điều chỉnh nhờ một cơ cấu quay đặc biệt 6, tùy theo góc quay của nó. Xi lanh thủy lực 5 làm quay cánh tay 2 quanh trục 8 để chuyển thìa về phía phễu 4 (vị trí II). Kim loại được rót qua phễu vào buồng áp lực của máy đúc.

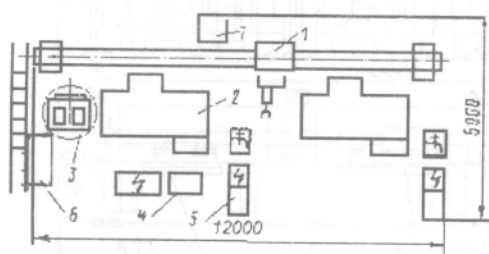


Hình 7. 6: Sơ đồ robot phục vụ thiết bị đúc áp lực

7.2.2. Robot hoá các tế bào sản xuất

Tế bào sản xuất (*manufacturing cell*) là tổ hợp, gồm (các) thiết bị công nghệ, (các) robot và các thiết bị phục vụ khác, để hoàn thành một nhiệm vụ sản xuất độc lập. Các thiết bị phục vụ có thể là thiết bị xếp dỡ, định hướng,... Mỗi tế bào sản xuất có thể hoạt động độc lập hoặc liên kết với các thiết bị hay tế bào sản xuất khác để hình thành một hệ thống sản xuất (*manufacturing system*). Tế bào sản xuất có robot phục vụ được gọi là *tế bào sản xuất robot hoá*. Một tế bào sản xuất tự động hoá được điều khiển bởi một bộ điều khiển chung (*cell controller*).

Trên hình 7.7 (a) là sơ đồ một tế bào sản xuất robot hoá để tiện chi tiết khối lượng đến 40 kg. Nó gồm hai máy tiện CNC cùng kiểu 16K30Φ3, được phục vụ bởi robot kiểu YM160Φ2.81.02. Nó có sơ đồ như trên hình 7.7 (b). Chu trình hoạt động của tế bào như sau: Robot nhặt phôi trên bàn quay 3, đặt vào mâm cặp của máy tiện thứ nhất để gia công một đầu. Sau đó, chuyển phôi đó sang máy tiện kia để gia công đầu còn lại. Cuối cùng, chuyển chi tiết vào bàn quay. Bàn quay 180°, chuyển chi tiết về phía giá chi tiết.

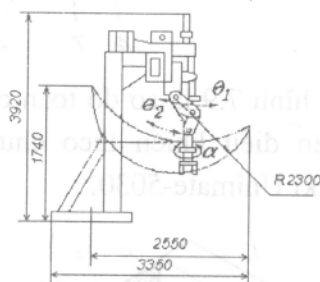
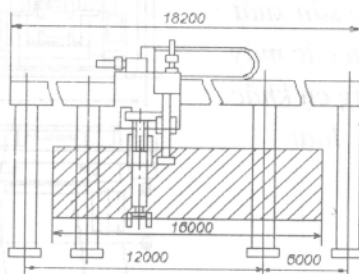


(a)

Hình 7. 7:

(a)- Sơ đồ tế bào sản xuất từ các máy công cụ cùng loại.

(b)- Robot kiểu YM 160Φ2.81.02



(b)

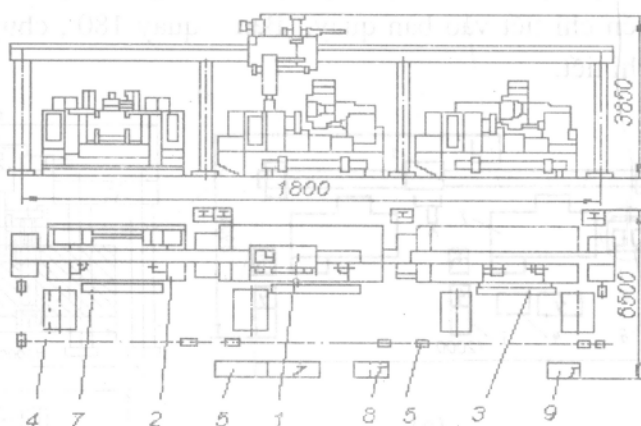
YM 160Φ2.81.02 là robot kiểu cổng, dùng để phục vụ đồng thời các máy cắt kim loại. Tính năng kỹ thuật cơ bản của nó như trong bảng 7.3.

Bảng 7. 3: Tính năng kỹ thuật của robot YM 160Φ2.81.02

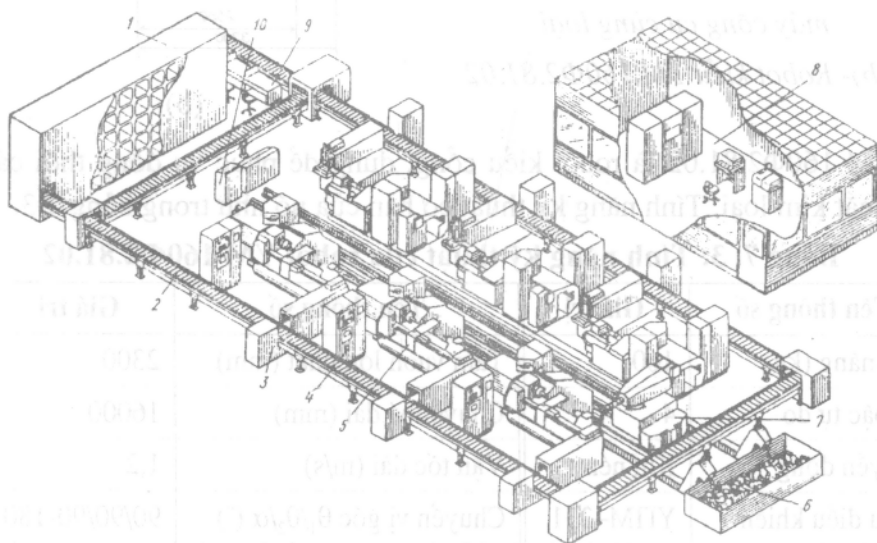
Tên thông số	Giá trị	Tên thông số	Giá trị
Sức nâng (kg)	160	Tầm vươn lớn nhất (mm)	2300
Số bậc tự do	4	Chuyển vị dài (mm)	16000
Truyền động	Khí nén	Vận tốc dài (m/s)	1,2
Kiểu điều khiển	YTIM-331	Chuyển vị góc $\theta_1/\theta_2/\alpha$ (°)	90/90/90-180
Số tọa độ lập trình	4	Vận tốc góc theo $\theta_1/\theta_2/\alpha$ (°/s)	0,51/0,51/0,25
Sai số định vị (mm)	$\pm 0,5$	Khối lượng (kg)	6500

Trên hình 7.8 là sơ đồ tế bào sản xuất để gia công tiện - phay các chi tiết dạng trục có khối lượng đến 160 kg. Nó gồm có máy phay - khoan tâm kiểu MP-179, máy tiện điều khiển số 1E732Φ3, được phục vụ bởi robot kiểu YM 160Φ2.81.02. Robot 1 có nhiệm vụ cấp phôi cho các máy phay 2, máy tiện 3 và chuyển chi tiết vào các giá đựng 4.

Hình 7.8: Tế bào sản xuất gồm các máy công cụ khác loại



Trên hình 7.9 là sơ đồ toàn cảnh một tổ hợp sản xuất tự động, gồm 6 máy tiện điều khiển theo chương trình số, được phục vụ bởi robot Kawasaki Unimate-5030.



Hình 7.9: Sơ đồ toàn cảnh của tổ hợp sản xuất tự động

Tổ hợp gồm có kho chứa tự động 1; băng tải con lăn 2 để vận chuyển phôi và chi tiết; thiết bị vận chuyển phôi từ băng tải đến từng máy công cụ 3; các máy công cụ 5 với tủ điều khiển 4; băng tải chuyển phôi và thùng đựng 6; robot 7; phòng điều khiển trung tâm nhờ máy tính 8; bàn kiểm tra (KCS) 9 và trạm quan sát 10.

7.2.3. Robot hoá hệ thống sản xuất

Khác với tế bào sản xuất, nhiệm vụ của hệ thống sản xuất là hoàn thành một hay một số sản phẩm hoàn chỉnh. Vì vậy, một hệ thống sản xuất được tổ hợp từ các tế bào sản xuất và các thiết bị công nghệ, thiết bị phục vụ đơn lẻ. Về tổ chức, người ta phân biệt 2 dạng hệ thống sản xuất: *dây chuyền sản xuất* và *công đoạn sản xuất*.

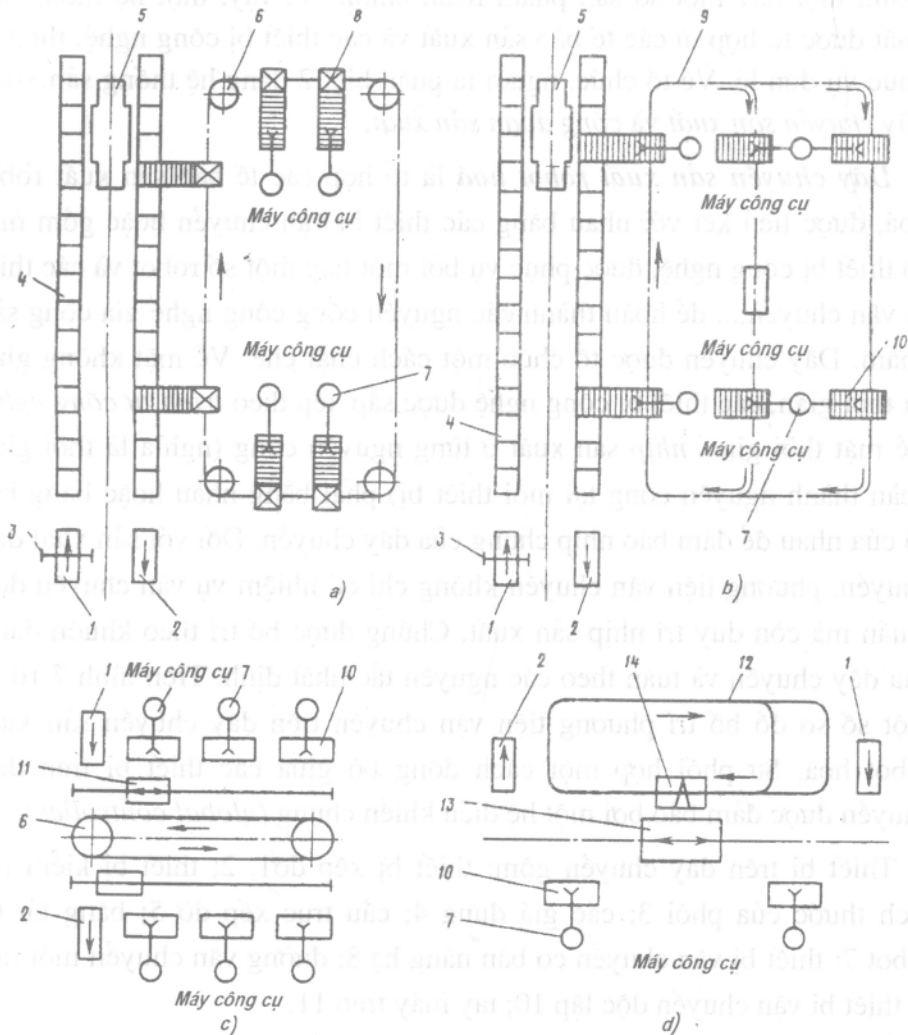
Dây chuyền sản xuất robot hoá là tổ hợp các tế bào sản xuất robot hoá, được liên kết với nhau bằng các thiết bị vận chuyển hoặc gồm một số thiết bị công nghệ, được phục vụ bởi một hay một số robot và các thiết bị vận chuyển,... để hoàn thành các nguyên công công nghệ gia công sản phẩm. Dây chuyền được tổ chức một cách chặt chẽ. Về mặt không gian và thời gian, các thiết bị công nghệ được sắp xếp theo *trình tự công nghệ*. Về mặt thời gian, *nhịp* sản xuất ở từng nguyên công (nghĩa là thời gian hoàn thành nguyên công tại mỗi thiết bị) phải bằng nhau hoặc bằng bội số của nhau để đảm bảo nhịp chung của dây chuyền. Đối với sản xuất dây chuyền, phương tiện vận chuyển không chỉ có nhiệm vụ vận chuyển đơn thuần mà còn duy trì nhịp sản xuất. Chúng được bố trí theo khuôn dạng của dây chuyền và tuân theo các nguyên tắc nhất định. Trên hình 7.10 là một sơ đồ bố trí phương tiện vận chuyển trên dây chuyền sản xuất robot hoá. Sự phối hợp một cách đồng bộ giữa các thiết bị trên dây chuyền được đảm bảo bởi một hệ điều khiển chung (*global controller*).

Thiết bị trên dây chuyền gồm: thiết bị xếp dỡ¹, 2; thiết bị kiểm tra kích thước của phôi 3; các giá đựng 4; cầu trục xếp dỡ 5; băng tải 6; robot 7; thiết bị vận chuyển có bàn nâng hạ 8; đường vận chuyển một ray 9; thiết bị vận chuyển độc lập 10; tay máy treo 11.

Công đoạn sản xuất robot hoá không đòi hỏi phải tổ chức các thiết bị công nghệ một cách khắt khe về không gian và thời gian.

7.2.4. Robot trong sản xuất linh hoạt

Sản xuất linh hoạt xuất hiện và phổ biến vào khoảng thập kỷ 80. Nó là kết quả của sự phát triển của máy công cụ điều khiển số, RBCN, kỹ thuật điều khiển tự động nhờ máy tính,... Một hệ thống sản xuất linh hoạt (*Flexible Manufacturing System - FMS*) trước hết phải là hệ thống sản xuất tự động hoá khả trình (*Programmable Automation System*), được robot hoá.



Hình 7. 10: Một số dạng sơ đồ bố trí dây chuyền sản xuất robot hoá

Điểm mấu chốt nhất để phân biệt *FMS* với hệ thống sản xuất cứng (*Fixed Manufacturing System*) là ở chỗ *FMS* có khả năng thích ứng với sự thay đổi đối tượng sản xuất mà *không cần sự can thiệp của con người*. Sự tích hợp hệ thống thiết bị *phần cứng* (hệ thống sản xuất linh hoạt, mạng truyền thông, hệ máy tính và thiết bị ngoại vi) và *phần mềm* (hệ điều hành, hệ CSDL, các phần mềm chức năng), cho phép thực hiện tự động và trọn vẹn mọi giai đoạn của quá trình sản xuất (từ thiết kế, chuẩn bị công nghệ, điều khiển sản xuất, giám sát chất lượng, bao gói, thống kê,...) hình thành hệ thống sản xuất tích hợp nhờ máy tính (*Computer Integrated Manufacturing - CIM*).

Theo I/OCT 26228-85, *FMS* được định nghĩa như sau:

Hệ thống sản xuất linh hoạt là tổ hợp giữa hệ thống *công nghệ* (các máy điều khiển số, các tổ hợp sản xuất robot hoá, các tế bào sản xuất linh hoạt, các thiết bị công nghệ đơn lẻ,...) và hệ thống đảm bảo các *chức năng* làm việc tự động của hệ thống, có khả năng tự điều chỉnh để thích ứng với sự thay đổi bất kỳ đối tượng sản xuất trong danh mục.

Hệ thống đảm bảo chức năng gồm có các hệ thống tự động hoá *thiết kế sản phẩm*, chuẩn bị *công nghệ*, vận chuyển đối tượng, đảm bảo *dụng cụ*, giám sát *chất lượng*, thu và chuyển *phoi*, điều khiển.

Một *FMS* có thể là một dây chuyền linh sản xuất hoạt, một công đoạn sản xuất linh hoạt, một phân xưởng sản xuất linh hoạt. Nó cũng được hình thành từ các tế bào sản xuất linh hoạt (*Fixed Manufacturing Cell - FMC*).

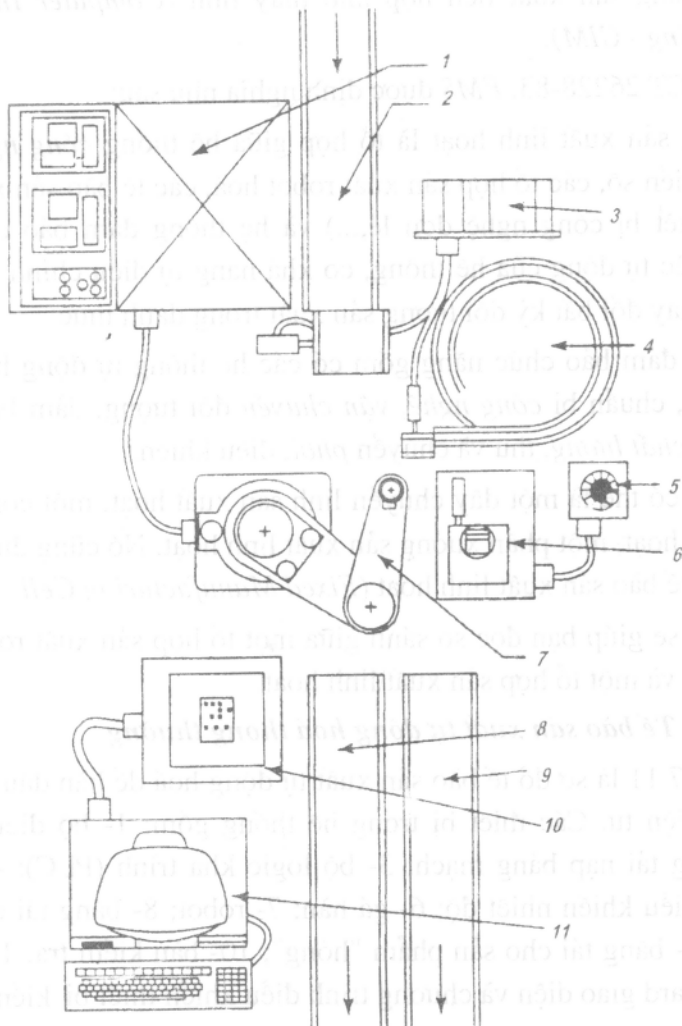
Ví dụ sau sẽ giúp bạn đọc so sánh giữa một tổ hợp sản xuất robot hoá thông thường và một tổ hợp sản xuất linh hoạt.

• 7.2.4.1. Tế bào sản xuất tự động hoá thông thường

Trên hình 7.11 là sơ đồ tế bào sản xuất tự động hoá để hàn đầu nối lên bảng mạch điện tử. Các thiết bị trong hệ thống gồm: 1- bộ điều khiển robot; 2- băng tải nạp bảng mạch; 3- bộ logic khả trình (PLC); 4- chảo quay; 5- bộ điều khiển nhiệt độ; 6- giá hàn; 7- robot; 8- băng tải cho sản phẩm "tốt"; 9- băng tải cho sản phẩm "hỏng"; 10- bàn kiểm tra; 11- máy tính (PC) có card giao diện và chương trình điều khiển thiết bị kiểm tra.

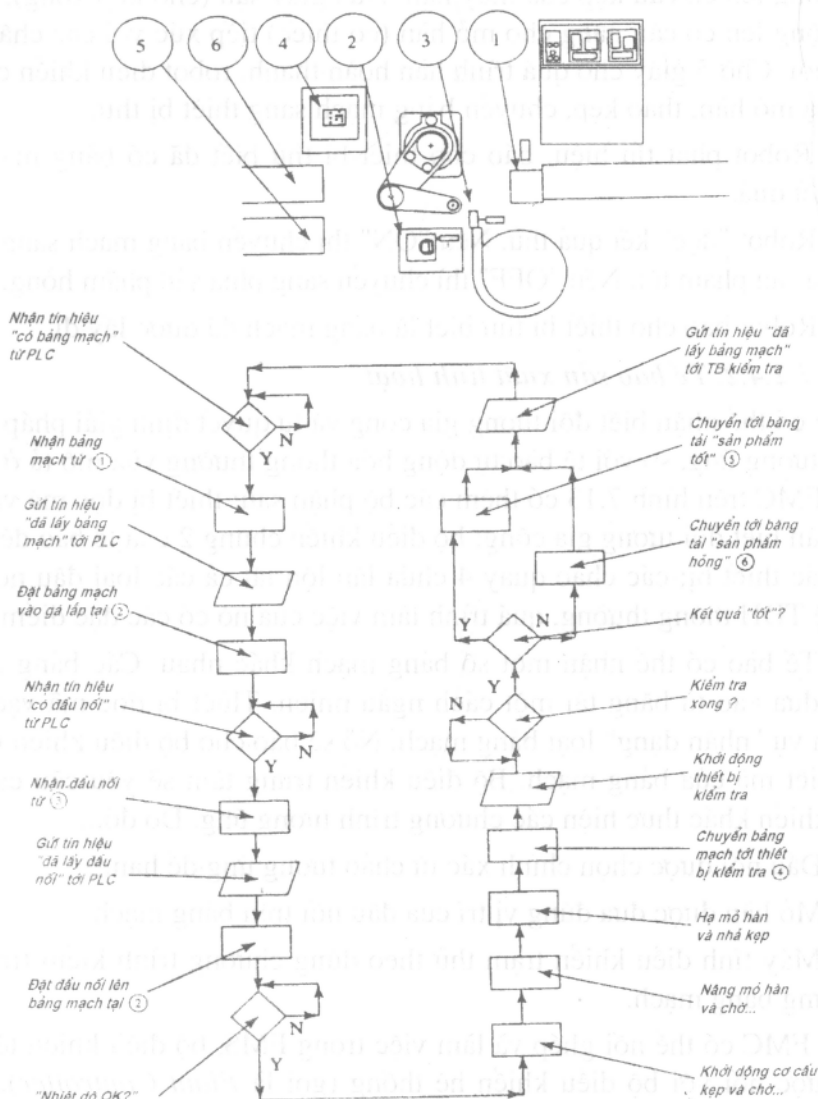
Quá trình làm việc của tế bào có 2 giai đoạn:

Giai đoạn 1: Bảng mạch cơ sở được chuyển vào nhờ băng tải 2. Bảng gá đặt cuối băng tải, được điều khiển bởi PLC 3 định hướng bảng mạch để robot có thể nhặt được. Robot 7 chuyển bảng mạch từ băng tải lên bàn gá hàn 6. Các đầu nối được chứa trong chảo quay 4. Cũng nhờ sự điều khiển của PLC 3, các đầu nối được tách riêng và định hướng ở đầu ra của chảo. Robot 1 nhặt đầu nối, đặt vào đúng vị trí quy định trên bảng cơ sở đã đặt trước lên bàn gá hàn. Mỏ hàn thiếc, có bộ phận ổn nhiệt tự động, hàn chắc đầu nối vào bảng mạch.



Hình 7. 11: Sơ đồ tế bào sản xuất tự động hoá thông thường

Giai đoạn 2: (xem sơ đồ logic trên hình 7.12). Robot chuyển băng mạch đã được hàn đầu nối từ gá hàn 6 lên bàn của thiết bị thử 10. Quá trình thử được điều khiển bằng máy tính 11. Kết quả thử (tốt hay hỏng) được chuyển đến robot. Tùy theo kết quả nhận được, robot sẽ chuyển sản phẩm tới băng tải tương ứng. Trong trường hợp này, robot không chỉ làm nhiệm vụ vận chuyển mà còn giữ vai trò điều khiển trung tâm. Các bộ điều khiển khác không liên hệ trực tiếp với nhau mà qua bộ điều khiển của robot.



Hình 7. 12: Sơ đồ logic hoạt động của robot

Toàn bộ chu trình gồm 6 bước:

1. Robot chờ tín hiệu từ PLC, báo bằng mạch đã sẵn sàng trên băng gá của băng tải. Nếu có tín hiệu thì robot nhấc băng mạch lên, báo cho PLC biết và đặt băng mạch lên gá hàn.

2. Lập lại công việc như bước 1, nhưng với đối tượng là đầu nối.

3. Nếu bộ điều khiển hàn KHÔNG báo hiệu "nhiệt độ OK" thì robot chờ cho mỏ hàn được đốt nóng. Nếu có tín hiệu "nhiệt độ OK" thì robot tác động lên cơ cấu kẹp của máy hàn. Ngay sau (chờ kẹp xong), robot tác động lên cơ cấu nâng cho mỏ hàn (có thiết) tiếp xúc với các chân của đầu nối. Chờ 5 giây cho quá trình hàn hoàn thành, robot điều khiển các cơ cấu hạ mỏ hàn, tháo kẹp, chuyển băng mạch sang thiết bị thử.

4. Robot phát tín hiệu, báo cho thiết bị thử biết đã có băng mạch và chờ kết quả.

5. Robot "đọc" kết quả thử. Nếu "ON" thì chuyển băng mạch sang băng tải của sản phẩm tốt. Nếu "OFF" thì chuyển sang phía sản phẩm hỏng.

6. Robot báo cho thiết bị thử biết là băng mạch đã được lấy đi.

• 7.2.4.2. Tế bào sản xuất linh hoạt

Để có thể nhận biết đối tượng gia công và tự quyết định giải pháp công nghệ tương ứng, so với tế bào tự động hóa thông thường vừa mô tả ở phần trên, FMC trên hình 7.13 có thêm các bộ phận sau: thiết bị đọc mã vạch 1 để nhận biết đối tượng gia công; bộ điều khiển chung 2 của tế bào để phối hợp các thiết bị; các chảo quay 4 chứa lẫn lộn tất cả các loại đầu nối. So với hệ TĐH thông thường, quá trình làm việc của nó có các đặc điểm sau:

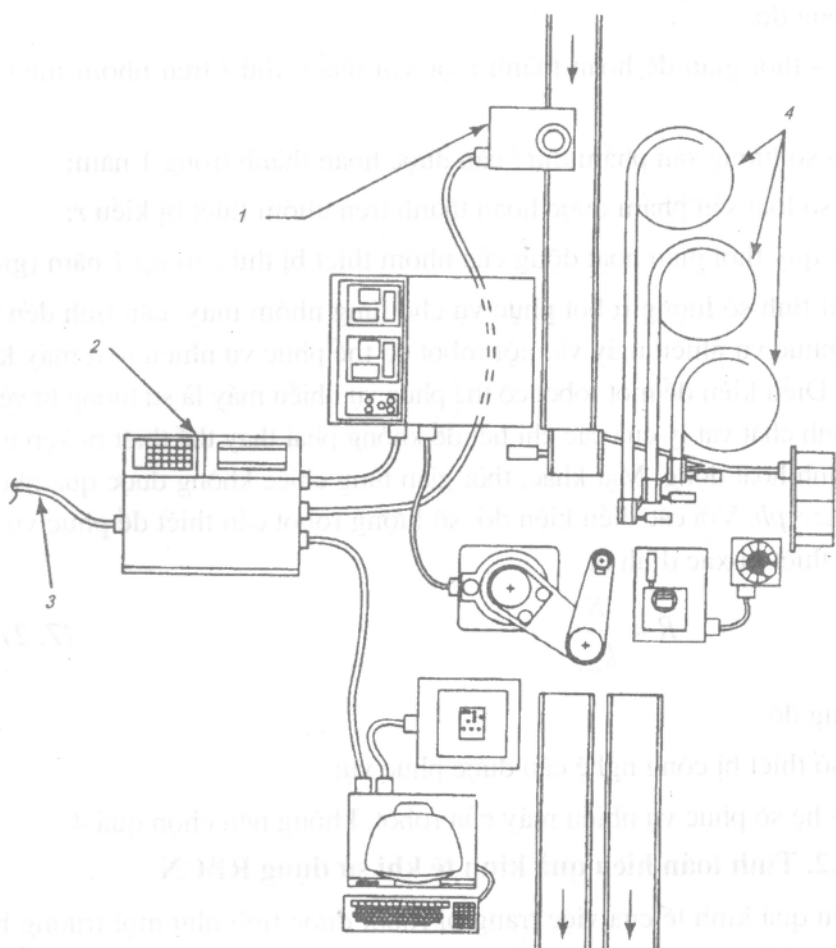
1. Tế bào có thể nhận một số băng mạch khác nhau. Các băng mạch được đưa vào từ băng tải một cách ngẫu nhiên. Thiết bị đọc mã vạch có nhiệm vụ "nhận dạng" loại băng mạch. Nó sẽ báo cho bộ điều khiển trung tâm biết mã của băng mạch. Bộ điều khiển trung tâm sẽ yêu cầu các bộ điều khiển khác thực hiện các chương trình tương ứng. Do đó...

2. Đầu nối được chọn chính xác từ chảo tương ứng để hàn,

3. Mỏ hàn được đưa đúng vị trí của đầu nối trên băng mạch,

4. Máy tính điều khiển trạm thử theo đúng chương trình kiểm tra phù hợp từng băng mạch.

Đề FMC có thể nối ghép và làm việc trong FMS, bộ điều khiển tế bào cần được nối với bộ điều khiển hệ thống (gọi là *Plant Controller*). Khi đó, loại băng mạch có thể do *plant controller* chỉ định nên không cần có thiết bị đọc mã vạch trên các tế bào nữa.



Hình 7. 13: Sơ đồ thiết bị trong tế bào sản xuất linh hoạt

7.3. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN KINH TẾ KHI SỬ DỤNG RBCN

7.3.1. Xác định nhu cầu sử dụng robot

Số lượng robot phục vụ cho một hệ thống sản xuất phụ thuộc số thiết bị công nghệ chính mà chúng phục vụ. Vì vậy, trước hết phải tính số lượng thiết bị công nghệ chính để hoàn thành nhiệm vụ sản xuất.

Số thiết bị kiểu r được tính theo công thức sau:

$$S_r = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ic,i} N_i}{60F_0} \quad (7.1)$$

trong đó:

T_{in} - thời gian để hoàn thành một sản phẩm thứ i trên nhóm thiết bị r (ph);

N_i - số lượng sản phẩm thứ i cần được hoàn thành trong 1 năm;

n - số loại sản phẩm được hoàn thành trên nhóm thiết bị kiểu r ;

F_r - quỹ thời gian hoạt động của nhóm thiết bị thứ r trong 1 năm (giờ).

Khi tính số lượng robot phục vụ cho từng nhóm máy, cần tính đến khả năng phục vụ nhiều máy và một robot có thể phục vụ nhiều loại máy khác nhau. Điều kiện để một robot có thể phục vụ nhiều máy là sự tương tự về kết cấu, tính chất vật lý của các chi tiết để không phải thay thế thiết bị kẹp trong quá trình hoạt động. Mặt khác, thời gian từng chiếc không được quá nhỏ, ví dụ $T_{in} \geq 3 \text{ ph}$. Với các điều kiện đó, số lượng robot cần thiết để phục vụ các nhóm thiết bị xác định là

$$R = \frac{S}{k_{um}} \quad (7.2)$$

trong đó

S - số thiết bị công nghệ cần được phục vụ;

k_{um} - hệ số phục vụ nhiều máy của robot, không nên chọn quá 4.

7.3.2. Tính toán hiệu quả kinh tế khi sử dụng RBCN

Hiệu quả kinh tế của việc trang bị robot được tính như mọi trường hợp đầu tư cơ bản.

Chỉ tiêu kinh tế quan trọng nhất là *hiệu quả kinh tế quy đổi*:

$$H = C_n - C = \left(G_n + \frac{K_n}{T_n}\right) - \left(G + \frac{K}{T_{ic}}\right) \quad (7.3)$$

trong đó:

H - hiệu quả kinh tế hàng năm nhờ trang bị robot;

C, C_n - chi phí quy đổi khi sử dụng và không sử dụng robot;

G, G_n - tổng chi phí thường xuyên để sản xuất lượng sản phẩm hàng năm khi sử dụng và không sử dụng robot;

K, K_n - đầu tư cơ bản khi sử dụng và không sử dụng robot;

T_{ic} - thời hạn thu hồi vốn tiêu chuẩn (năm).

Việc sử dụng robot chỉ có hiệu quả nếu $H > 0$.

Chỉ tiêu kinh tế thứ hai là *thời hạn thu hồi vốn đầu tư*. Việc xác định nó xuất phát từ điều kiện, tổng tiết kiệm do giảm chi phí sản xuất trong T năm phải lớn hơn hoặc bằng vốn đầu tư thêm do trang bị robot:

$$(G_0 - G)T \geq K - K_0$$

Từ đây ta rút ra điều kiện để trang bị robot là

$$T \leq T_k = \frac{K - K_0}{G_0 - G}$$

Chương 8

TAY MÁY CÓ KẾT CẤU ĐỘNG HỌC SONG SONG

Các chương trước mới đề cập đến các *tay máy* có kết cấu động học nối tiếp (từ đây sẽ gọi tắt là *tay máy nối tiếp*). Còn một loại *tay máy* nữa trong những năm gần đây đã được ứng dụng ngày càng nhiều trong công nghiệp và nghiên cứu khoa học. Đó là *tay máy có kết cấu động học song song*, sẽ được gọi tắt là *tay máy song song*. Để giúp bạn đọc có cái nhìn toàn diện hơn về *robot*, đồng thời có cơ sở tìm hiểu kỹ hơn về các loại máy có kết cấu động học song song, trong đó có *tay máy song song*, chúng tôi xin bổ sung chương "*Tay máy có kết cấu động học song song*" trong lần tái bản này. Tương tự như với *tay máy nối tiếp*, chương này sẽ đề cập đến vấn đề phân tích vị trí và quỹ đạo của tay máy, động học và động lực học tay máy có kết cấu song song, nhưng ngắn gọn hơn.

8.1. KHÁI NIỆM VÀ PHÂN LOẠI TAY MÁY SONG SONG

8.1.1. Khái niệm về *tay máy song song*

Trước khi nêu định nghĩa về kết cấu động học nối tiếp và song song, cần nhắc lại một vài khái niệm:

Chuỗi động học (*Kinematic Chain*) là một cụm lắp, gồm các khâu (*Link*), được liên kết với nhau thông qua các khớp (*Joint*).

Tuỳ theo cách liên kết giữa các khâu mà người ta phân biệt chuỗi động học kín (*Closed-Loop Chain*) và chuỗi động học hở (*Opened-Loop Chain*).

Chuỗi động học kín là chuỗi động học, trong đó *mỗi khâu luôn luôn được liên kết với ít nhất 2 khâu khác*.

Chuỗi động học hở không thoả mãn điều kiện trên, nghĩa là *có ít nhất một khâu chỉ được liên kết với 1 khâu khác*.

Như thấy trên hình 8.1, cơ cấu 4 khâu có dạng chuỗi động học kín, còn tay máy bên cạnh có dạng chuỗi động học hở. Trong chuỗi động học kín, hình thành các *vòng (Loop)*. Người ta đã chứng minh, giữa số vòng độc lập L , số khâu n và số khớp j có quan hệ sau:

$$L = j - n + 1 \quad (8.1)$$

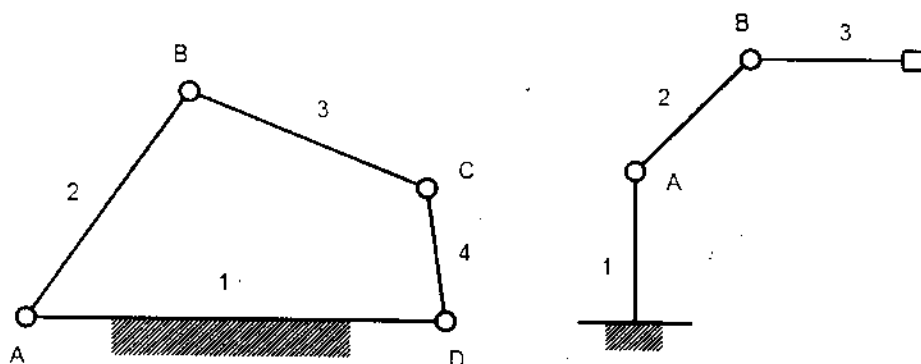
và
$$\sum f_i = Dof + \lambda L \quad (8.2)$$

trong đó

f_i - số khớp có i khả năng chuyển động. Ví dụ, khớp cầu có 3 khả năng chuyển động.

Dof - số bậc tự do của cơ cấu.

λ - thông số động học của cơ cấu, giá trị của nó đặc trưng cho không gian hoạt động. Với cơ cấu phẳng, $\lambda = 3$, cơ cấu không gian có $\lambda = 6$.



Hình 8.1: Chuỗi động học kín và chuỗi động học hở

Ví dụ, với cơ cấu 4 khâu trong hình 8.1, áp dụng công thức (8.1) cho số vòng độc lập:

$$L = j - n + 1 = 4 - 4 + 1 = 1.$$

Cơ cấu có 4 khớp trụ, mỗi khớp có 1 khả năng chuyển động (quay quanh trục). Số bậc tự do của khâu là $Dof=1$, là khâu phẳng nên $\lambda=3$. Theo (8.2), ta có

$$4 \times 1 = 1 + 3 \times 1 = 4.$$

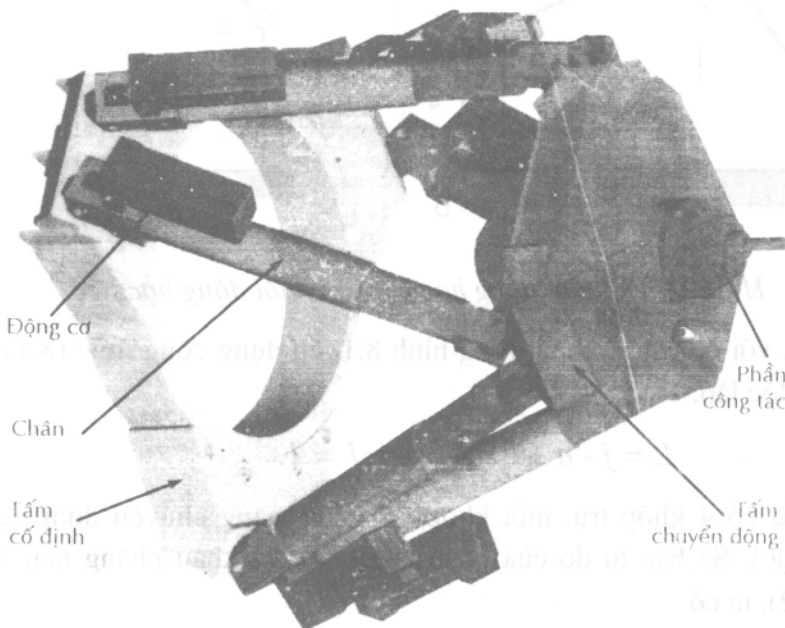
Thay (8.1) vào (8.2) ta được một công thức rất thuận tiện để tính số bậc tự do Dof của cơ cấu khi biết cấu trúc động học của nó:

$$Dof = \lambda(j - n + 1) + \sum f_i - f_p \quad (8.3)$$

trong đó, f_p là số chuyển động trùng giữa 2 khớp kề nhau. Ví dụ, giữa 2 khớp cầu, khớp cầu và khớp trụ, khớp cầu và khớp phẳng có 1 chuyển động trùng, giữa 2 khớp phẳng có 3 chuyển động trùng.

Các tay máy nối tiếp mà chúng ta đã nghiên cứu từ trước có đặc điểm chung là kết cấu của chúng có dạng chuỗi động học hở. Tay máy song song có kết cấu chuỗi động học kín.

Trong hình 8.2 là dạng kết cấu điển hình của tay máy song song, một Hexapod^(*). Một tay máy song song thường gồm giá cố định (hay đế) (Fixed Base), tấm chuyển động (Moving Platform). Hai tấm này được nối với nhau bằng các chân (Limb hoặc Leg). Chân gồm 2 ống lồng nhau hình thành khớp trượt. Thường thì số chân bằng số bậc tự do của cơ cấu nên mỗi chân được dẫn động nhờ một động cơ độc lập và được giám sát vị trí nhờ các Sensor vị trí, thường là các Encoder. Các cơ cấu truyền động thường được đặt trên hoặc gần giá cố định.



Hình 8. 2: Cơ cấu động học song song

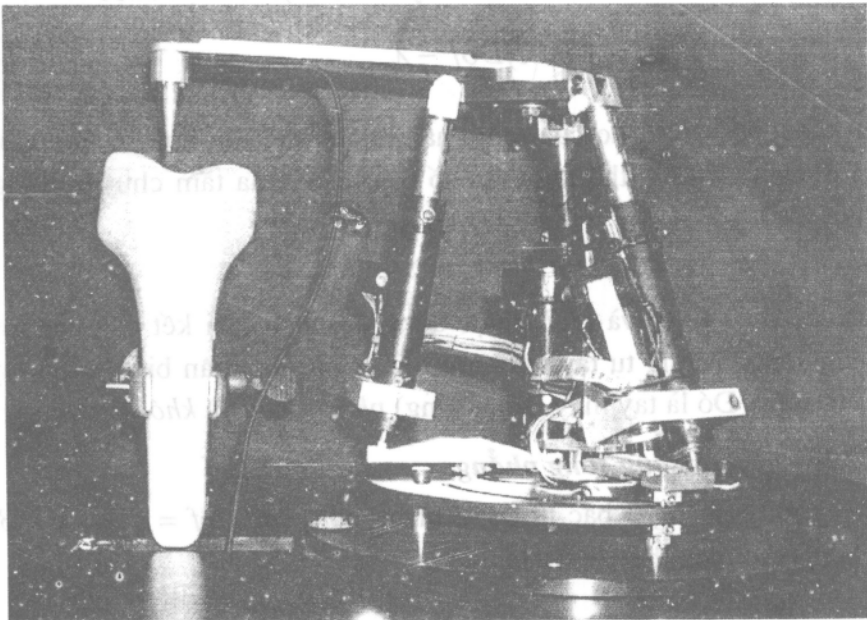
Năm 1962, khi Gough và Whitehall thiết kế ra thiết bị thử lốp vạn năng có 6 chân, được coi là năm ra đời của tay máy song song. Tiếp đó, năm 1965 Stewart thiết kế ra giá mô phỏng máy bay và cho đến nay các tay máy song song dạng này vẫn được gọi là Stewart Platform. Năm 1983

^(*) Hexapod nghĩa là 6 chân.

Hunt bắt đầu nghiên cứu một cách có hệ thống kết cấu động học của tay máy song song. Từ đó, việc nghiên cứu cơ cấu động học song song được xúc tiến mạnh mẽ hơn: Fichter (1986), Griffis và Duffy (1989), Parenti Castelli (1990), Clearly và Arai (1991), Zhang và Song (1994). Tháng 4 năm 2000, một hội thảo đã được tổ chức tại trường Chemnitz, Cộng hoà liên bang Đức với chủ đề *Working Accuracy of Parallel Kinematics* (Độ chính xác làm việc của cơ cấu động học song song), trong đó nhiều vấn đề liên quan đến cấu trúc, điều khiển các robot và máy công cụ có kết cấu động học song song đã được trình bày.

Vì các chân ít chịu tải trọng uốn và tải được phân bố cho nhiều chân nên cơ cấu động học song song có độ cứng vững cơ học rất cao, khả năng tải lớn, độ chính xác cao, quán tính nhỏ. Nhược điểm chính của chúng là vùng công tác nhỏ, khó thiết kế cả phần cơ khí lẫn phần điều khiển.

Do có các ưu điểm nổi bật về độ cứng vững và độ chính xác làm việc cao, các cơ cấu động học song song được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, trong đó chủ yếu là trong ngành kỹ thuật robot và ngành máy công cụ. Trong hình 8.3 là một robot song song dùng trong y học, đang lấy mẫu xương chân của bệnh nhân.



Hình 8. 3: Robot song song dùng trong y học

8.1.2. Phân loại tay máy song song

Một tay máy song song được gọi là *đối xứng* nếu kết cấu của nó thỏa mãn đồng thời các điều kiện sau:

- Số chân bằng số bậc tự do của tấm chuyển động.
- Loại và số lượng khớp được phân bố trên các chân là như nhau.
- Số lượng và vị trí của các khớp chủ động trên các chân là như nhau.

Nếu có ít nhất một điều kiện không được thỏa mãn thì tay máy song song được gọi là *không đối xứng*. Chương này chỉ đề cập đến tay máy song song *đối xứng*, trong đó số chân m bằng số bậc tự do Dof và bằng số vòng kín $L+1$ (kể cả vòng ngoài).

$$m = Dof = L+1 \quad (8.4)$$

Nếu gọi bậc tự do của mỗi chân là C thì tổng số bậc tự do của tất cả các chân sẽ bằng số bậc tự do f của tất cả các khớp, nghĩa là

$$\sum_{k=1}^m C_k = \sum_{i=1}^j f_i \quad (8.5)$$

trong đó m là số chân, j là số khớp trên tay máy.

Thay công thức (8.2) vào (8.5) và để ý đến (8.4), ta nhận được

$$\sum_{k=1}^m C_k = (\lambda + 1)Dof - \lambda \quad (8.6)$$

Mặt khác, số bậc tự do của mỗi chân không thể lớn hơn số thông số chuyển động và không thể nhỏ hơn số bậc tự do của tấm chuyển động, nghĩa là:

$$\lambda \geq C_k \geq Dof \quad (8.7)$$

Các biểu thức (8.6) và (8.7) được dùng để phân loại kết cấu của tay máy song song. Tương tự tay máy nối tiếp, người ta phân biệt 3 loại tay máy song song. Đó là tay máy (song song) *phẳng*, *cầu* và *không gian*.

8.1.2.1. Tay máy song song phẳng

Với tay máy phẳng 3 bậc tự do, 3 chân, có: $m = Dof = 3$ và $\lambda = 3$. Thay chúng vào biểu thức (8.6), ta được:

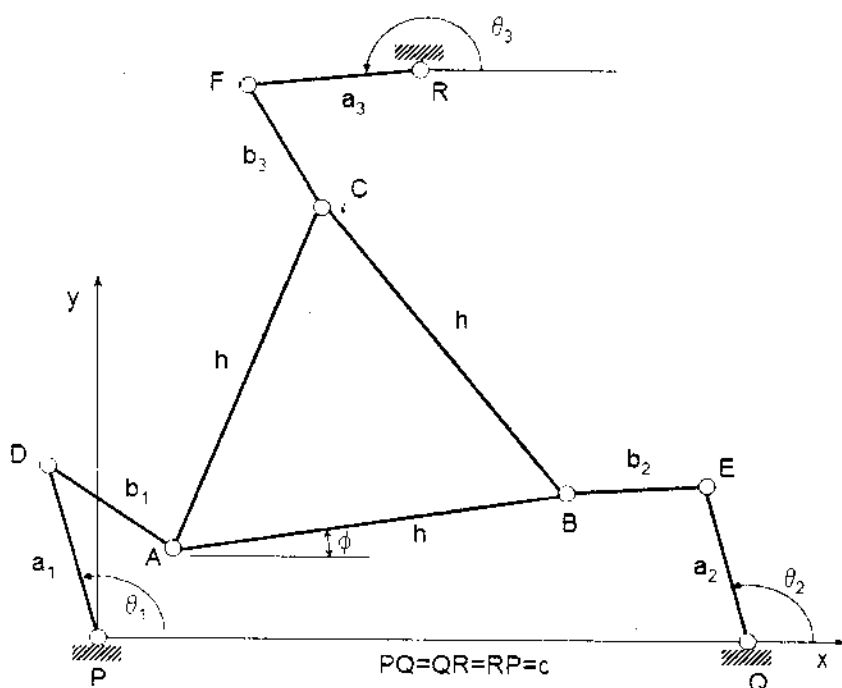
$$C_1 + C_2 + C_3 = 4Dof - 3 = 9.$$

Theo (8.7), ta lại có

$$3 \geq C_k \geq 3.$$

Từ đây, ta thấy mỗi chân có 3 bậc tự do. Thường thì mỗi chân có 2 khâu và 3 khớp nên mỗi khớp chỉ có thể có 1 bậc tự do. Nếu dùng các khớp quay (*R* - *Revolute*) và khớp trượt (*P* - *Prismatic*) thì có 7 khả năng bố trí các khớp trên mỗi chân: *RRR*, *RRP*, *RPR*, *PRR*, *RPP*, *PRP* và *PPR*.

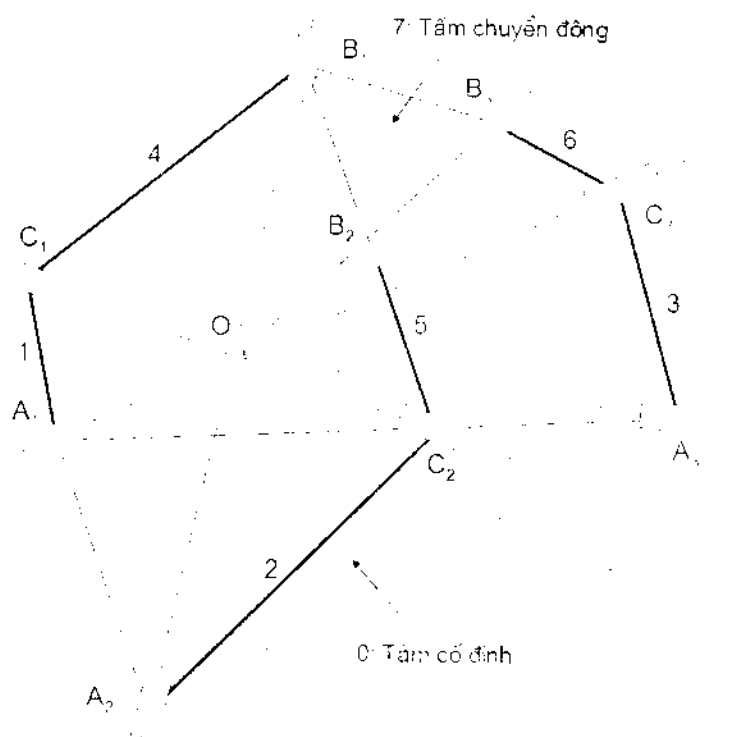
Trên hình 8.4 là sơ đồ kết cấu của tay máy song song phẳng, 3 bậc tự do với 3 khớp quay (*RRR*).



Hình 8. 4: Tay máy phẳng 3 BTĐ, *RRR*

8.1.2.2. Tay máy song song cầu

Trên tay máy cầu, quỹ tích của các điểm là các mặt cầu đồng tâm, trong đó tâm của các mặt cầu là tâm chung của cơ cấu. Tay máy cầu cũng có thông số động học là 3, vì vậy số bậc tự do của khâu cũng là 3. Loại khớp duy nhất có thể dùng ở đây là khớp quay và công thức kết cấu của các chân là *RRR*. Trục quay của các khớp gặp nhau tại một điểm. Đó chính là tâm của các mặt cầu quỹ tích (hình 8.5).



Hình 8. 5: Sơ đồ kết cấu của tay máy cân

8.1.2.3. Tay máy song song không gian

Tay máy không gian có $\lambda = 6$. Thay vào biểu thức (8.6), ta có:

$$\sum_{k=1}^m C_k = (\lambda + 1)Dof - \lambda = 7Dof - 6 \quad (8.8)$$

Theo (8.7), ta lại có

$$6 \geq C_k \geq Dof. \quad (8.9)$$

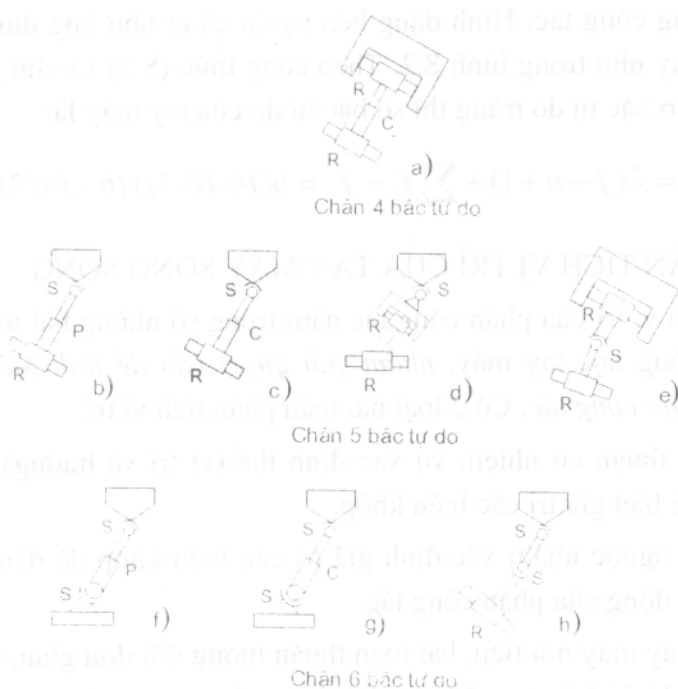
Giải các phương trình (8.8) và (8.9) với các giá trị nguyên dương của C_k với $k=1, 2, 3$ ta nhận được sự phân loại kết cấu tay máy theo số bậc tự do của các khớp và của các chân như trong bảng 8.1.

Số khâu trong mỗi chân có thể tùy ý, miễn là tổng số bậc tự do của tất cả các khớp bằng tổng số bậc tự do của các chân. Số khớp sẽ lớn nhất khi dùng các khớp 1 bậc tự do. Trên thực tế, mỗi chân chỉ có 2 khâu để nối để với tâm chuyển động.

Bảng 8.1: Phân loại tay máy song song không gian

Số bậc tự do Dof	Số vòng kín L	Tổng số bậc tự do của các khớp: $\sum_{i=1}^j f_i = \sum_{k=1}^m C_k$	Số bậc tự do của các chân: C_k , $k=1,2,3,\dots$
2	1	8	4,4 5,3; 6,2
3	2	15	5,5,5 6,5,4; 6,6,3
4	3	22	6,6,5,5; 6,6,6,4
5	4	29	6,6,6,6,5
6	5	36	6,6,6,6,6,6

Các phương án có thể để bố trí khớp trên mỗi chân như trong hình 8.6, trong đó các phương án *c, f, h* có 1 bậc tự do trùng, phương án *g* có 2 bậc tự do trùng.



Hình 8.6: Các phương án có thể của chân

Trong số các phương án kết cấu chỉ có các kết cấu tương ứng với chữ in đậm trong bảng 8.1 là đối xứng. Ví dụ, tay máy - máy phay song song 6 trục do Giddings và Lewis thiết kế năm 1995 có số bậc tự do của các chân là 6,6,6,6,6,6. Trên đó, mỗi chân sử dụng các khớp cacđăng - U, trượt - P, cầu - S (*Universal, Prismatic, Spherical*). Khớp trượt ở giữa được thực hiện bằng cơ cấu vít - đai ốc. Khi chiều dài của các chân thay đổi thì tám chuyển động mang dao sẽ thực hiện chuyển động cắt.

Vì các tay máy song có kết cấu rất đa dạng trong khi khuôn khổ của tài liệu có hạn, chúng tôi chọn một loại điển hình (hình 8.7) của tay máy song song làm đối tượng nghiên cứu cho các phần sau: phân tích vị trí, vận tốc và động lực học của tay máy song song. Đó là tay máy không gian, có 6 bậc tự do, 6 chân với các khớp cầu - trượt - cầu ($6 \times SPS$), gọi là *Stewart-Gough Platform* để lưu danh những người thiết kế ra nó. Các khớp trượt được thực hiện bởi cơ cấu vít me - đai ốc bi hoặc xi lanh thủy lực. Nhờ sự thay đổi chiều dài các chân mà tám trên di động, thực hiện chuyển động công tác. Hình dáng bên ngoài cũng như ứng dụng của tay máy loại này như trong hình 8.2. Theo công thức (8.3) và chú ý rằng kết cấu trên có 6 bậc tự do trùng thì số bậc tự do của tay máy là:

$$Dof = \lambda(j - n + 1) + \sum f_i - f_p = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 3 \times 12) - 6 = 6.$$

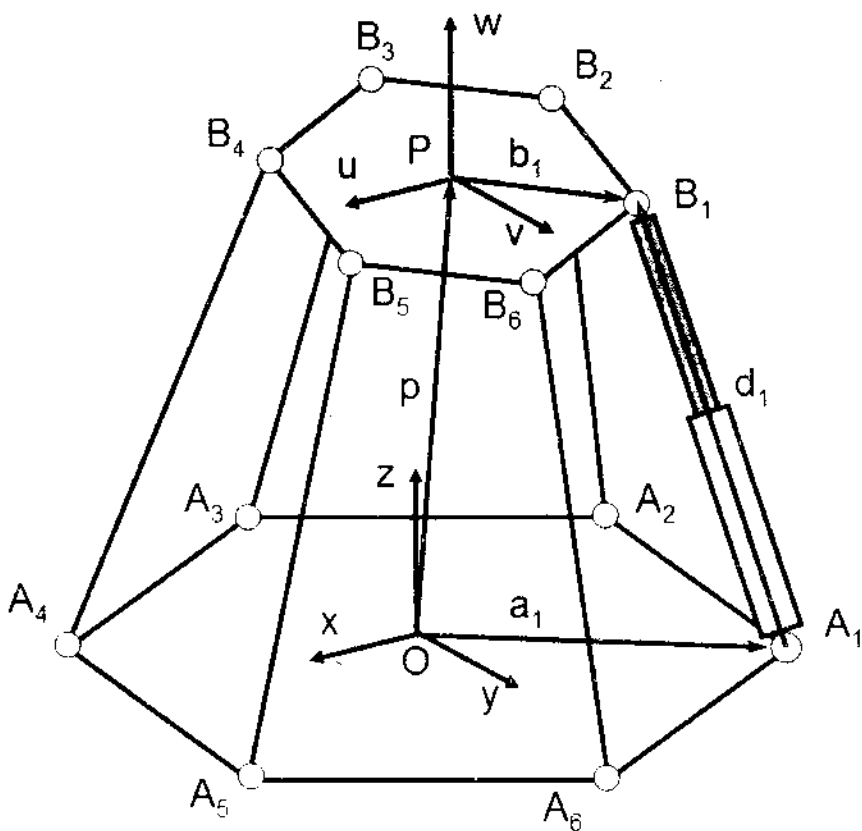
8.2. PHÂN TÍCH VỊ TRÍ CỦA TAY MÁY SONG SONG

Phân tích vị trí của phần công tác nằm trong số những bài toán cơ bản nhất của động học tay máy, nhằm giải quyết vấn đề tính toán và điều khiển quỹ đạo công tác. Có 2 loại bài toán phân tích vị trí:

Bài toán thuận có nhiệm vụ xác định thế (vị trí và hướng) của phần công tác khi biết giá trị các biến khớp.

Bài toán ngược nhằm xác định giá trị các biến khớp để đảm bảo quy luật chuyển động của phần công tác.

Đối với tay máy nối tiếp, bài toán thuận tương đối đơn giản, nhưng bài toán ngược khá phức tạp. Ngược lại, bài toán ngược của tay máy song song lại đơn giản nhưng bài toán thuận lại phức tạp. Bài toán ngược có thể có nhiều nghiệm, tùy thuộc số lượng các bậc tự do thừa.



Hình 8. 7: Tay máy không gian 6×SPS (Stewart-Gough Platform)

8.2.1. Mô tả hình học của tay máy

Để mô tả vị trí của tấm di động so với đế ta gán hệ tọa độ $A(x, y, z)$ lên đế và hệ tọa độ $B(u, v, w)$ lên tấm di động như trong hình 8.7. Chuyển vị của tấm di động so với đế được thay thế bằng chuyển vị giữa hệ tọa độ $B(u, v, w)$ so với hệ tọa độ $A(x, y, z)$ và được biểu diễn bằng vector chuyển vị p và ma trận quay R_B^A . Ký hiệu u, v, w là các vector đơn vị trong hệ tọa độ di động $B(u, v, w)$, ma trận quay R_B^A có thể được viết như sau:

$$R_B^A = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

Là các vector đơn vị, các phần tử của ma trận R_B^A phải thỏa mãn đồng thời các điều kiện:

$$u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1 \quad (8.11)$$

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 1 \quad (8.12)$$

$$w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 = 1 \quad (8.13)$$

$$u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0 \quad (8.14)$$

$$u_x w_x + u_y w_y + u_z w_z = 0 \quad (8.15)$$

$$v_x w_x + v_y w_y + v_z w_z = 0 \quad (8.16)$$

Ký hiệu $a_i = [a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}]$ và $b_i^B = [b_{ix}^B, b_{iy}^B, b_{iz}^B]$ là các vector biểu diễn vị trí của tâm khớp cầu A_i, B_i (với $i = 1, 2, \dots, 6$) trong hệ tọa độ $A(x, y, z)$, có thể viết phương trình vector vòng kín tương ứng với chân thứ i như sau:

$$\overline{A_i B_i} = p + R_B^A b_i^B - a_i \quad (8.17)$$

Chiều dài d_i của chân thứ i nhận được bằng cách nhân vô hướng vector $\overline{A_i B_i}$ với chính nó:

$$d_i^2 = [p + R_B^A b_i^B - a_i]^T [p + R_B^A b_i^B - a_i] \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8.18)$$

Khai triển vế phải của biểu thức (8.18), nhận được:

$$d_i^2 = p^T p + [b_i^B]^T [b_i^B] + a_i^T a_i + 2p^T [R_B^A b_i^B] - 2p^T a_i - 2[R_B^A b_i^B]^T a_i \quad (8.19)$$

Hệ 6 phương trình dạng (8.19) biểu diễn thế của tám di động so với đế, trong đó b_i^B và a_i là các vector hằng, phụ thuộc vào kết cấu của tay máy.

8.2.2. Động học ngược

Đối với bài toán động học ngược, đã biết vector chuyển vị p và ma trận quay R_B^A của hệ tọa độ B so với hệ A . Cần phải tìm chiều dài của các chân d_i ($i=1, 2, \dots, 6$). Đơn giản chỉ bằng cách lấy căn bậc 2 cả 2 vế của phương trình (8.19), ta nhận được lời giải:

$$d_i = \pm \sqrt{p^T p + [b_i^B]^T [b_i^B] + a_i^T a_i + 2p^T [R_B^A b_i^B] - 2p^T a_i - 2[R_B^A b_i^B]^T a_i} \quad (8.20)$$

Vì chiều dài của chân không thể âm nên ta lấy giá trị dương trong biểu thức (8.19).

8.2.3. Động học thuận

Trong trường hợp này, đã biết chiều dài d_i của các chân, cần xác định vector chuyển vị p và ma trận quay R_B^A của tấm di động so với tấm đế.

Vector chuyển vị p có 3 đại lượng vô hướng, còn ma trận quay R_B^A có 9 đại lượng vô hướng cần xác định. Như vậy bài toán có 12 ẩn. Tuy nhiên, 9 ẩn tương ứng với R_B^A chịu 6 điều kiện vuông góc, được biểu diễn bằng các biểu thức từ (8.11) đến (8.16). Không làm mất tính tổng quát của bài toán, ta đặt:

- Góc O của hệ toạ độ cố định tại tâm khớp cầu A_i .
- Góc P của hệ toạ độ chuyển động tại tâm khớp cầu B_i .

Khi đó $a_{ix} = a_{iy} = a_{iz} = 0$ và $b_{iu} = b_{iv} = b_{iw} = 0$.

Từ đó, phương trình (8.20) trở thành:

$$d_i = p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (8.21)$$

Khai triển biểu thức (8.20) với $i=2,3,...,6$ và thay (8.21) vào, nhận được:

$$\begin{aligned} & b_{iu}(p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z) + b_{iv}(p_x v_x + p_y v_y + p_z v_z) + b_{iw}(p_x w_x + p_y w_y + p_z w_z) - \\ & a_{ix} p_x - a_{iy} p_y - a_{iz} p_z - b_{iu}(a_{ix} u_x + a_{iy} u_y + a_{iz} u_z) - b_{iv}(a_{ix} v_x + a_{iy} v_y + a_{iz} v_z) - \\ & b_{iw}(a_{ix} w_x + a_{iy} w_y + a_{iz} w_z) + k_i = 0 \quad \text{với } i=2,3,...,6. \end{aligned} \quad (8.22)$$

trong đó $k_i = (a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2 + b_{iu}^2 + b_{iv}^2 + b_{iw}^2 + d_i^2 - d_1^2)/2$.

Phương trình (8.21), 5 phương trình (8.22) với $i = 2,3...6$ và 6 phương trình từ (8.11) đến (8.16) làm thành hệ 12 phương trình với 12 ẩn là 3 thành phần của vector chuyển vị p và 9 thành phần của ma trận quay R_B^A . Đây là hệ phương trình bậc hai, có rất nhiều nghiệm (nhiều nhất là 2^{12} nghiệm) và rất khó giải bằng phương pháp truyền thống. Bằng phương pháp số, Raghavan (1993) đã tìm được 40 lời giải khác nhau cho bài toán động học thuận của tay máy Stewart-Gough.

8.3. JACOBIAN CỦA TAY MÁY SONG SONG

Phần phân tích vị trí mới chỉ giải quyết vấn đề vị trí tương đối của phần công tác trong không gian. Trên thực tế, trong nhiều trường hợp, ví dụ, khi sơn, hàn, gia công cơ khí,... còn yêu cầu xác định vận tốc chuyển động của phần công tác. Tương tự bài toán vị trí, bài toán vận tốc cũng có bài toán thuận (*Direct Velocity Problem*), trong đó biết trước vận tốc chuyển động của các khớp, cần xác định vận tốc của phần công tác và bài toán ngược (*Inverse Velocity Problem*) để xác định vận tốc của các khớp nhằm đảm bảo vận tốc (biết trước) của phần công tác.

Trong chương 2, khái niệm *Jacobian* đã được đưa ra để biểu diễn mối quan hệ giữa vận tốc khớp và vận tốc của phần công tác. Một cách tổng quát, *Jacobian* là một ma trận (*Jacobian Matrix*) dùng để chuyển đổi vận tốc trong không gian khớp sang vận tốc trong không gian công tác và ngược lại. So với tay máy nối tiếp, bài toán vận tốc của tay máy song song phức tạp hơn nhiều do tồn tại nhiều vòng động học kín. Nhằm minh họa phương pháp chung để giải bài toán vận tốc của tay máy song song, phần này cũng lấy tay máy không gian 6 bậc tự do kiểu *Stewart-Gough* làm đối tượng nghiên cứu.

Thông số đầu vào của bài toán là vector vận tốc $\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_6]^T$, còn thông số đầu ra là vector, được mô tả bởi vận tốc của gốc P của hệ toạ độ di động và vận tốc góc của tấm di động:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} v_p \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

Ma trận *Jacobian* có thể được xác định từ phương trình vector vòng kín của mỗi chân. Theo sơ đồ trong hình 8.7, ta có:

$$\overline{OP} + \overline{PB}_i = \overline{OA}_i + \overline{A}_iB_i \quad (8.24)$$

Đạo hàm theo thời gian hai vế của phương trình trên, nhận được:

$$v_p + \omega_B \times \bar{b}_i = q_i \omega_i \times \bar{s}_i + \dot{q}_i \bar{s}_i \quad (8.25)$$

trong đó $\bar{b}_i$ và $\bar{s}_i$ ký hiệu vector $\overline{PB}_i$ và vector đơn vị theo trục $\overline{A}_iB_i$, ω_i là vận tốc góc của chân thứ i so với hệ toạ độ cố định A . Để khử ω_i , chúng ta nhân vô hướng hai vế của phương trình (8.25) với $\bar{s}_i$:

$$\bar{s}_i.v_p + (\bar{b}_i \times \bar{s}_i).\omega_B = \dot{q}_i \quad (8.26)$$

Với $i = 1, 2, \dots, 6$ nhận được 6 phương trình dạng (8.26) và chúng được ghép thành ma trận dạng

$$J_x \dot{x} = J_q \dot{q} \quad (8.27)$$

trong đó

$$J_x = \begin{bmatrix} \bar{s}_1^T & (\bar{b}_1 \times \bar{s}_1)^T \\ \bar{s}_2^T & (\bar{b}_2 \times \bar{s}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \bar{s}_6^T & (\bar{b}_6 \times \bar{s}_6)^T \end{bmatrix} \quad \text{và } J_q = I \quad (\text{ma trận đơn vị } 6 \times 6).$$

Từ đây ta nhận được thông số đầu ra của bài toán thuận:

$$\dot{x} = \frac{J_q}{J_x} \dot{q} = \frac{1}{J} \dot{q} \quad (8.28)$$

Đối với bài toán ngược, ta có quan hệ ngược lại:

$$\dot{q} = \frac{J_x}{J_q} \dot{x} = J \dot{x} \quad (8.29)$$

J được gọi là *ma trận Jacobian*, hay đơn giản là *Jacobian*.

8.4. PHÂN TÍCH TĨNH VÀ ĐỘ CỨNG VÙNG CỦA TAY MÁY SONG SONG

Khi tay máy làm việc, nó tác dụng lực hay momen (thường được gọi chung là lực) vào môi trường. Phần công tác chính là vật tương tác giữa tay máy với môi trường. Lực tác động phát sinh từ động cơ, thông qua các khâu và khớp chuyển đến phần công tác. Trong tay máy nối tiếp, đường truyền lực là một chuỗi động hờ, còn trong tay máy song song, lực được truyền qua một số nhánh chuỗi động song song. *Phân tích tĩnh tay máy nhằm xác định lực tác động lên các cơ cấu và trạng thái cân bằng của chúng.* Kết quả phân tích tĩnh được dùng để đánh giá tính ổn định của các cơ cấu khi làm việc. Mặt khác, giá trị lực và momen tác động lên các khâu, khớp cho phép tính toán độ bền của các khâu, tính toán các ổ trong các khớp, chọn động cơ và tính toán các bộ truyền. Do tính phức tạp của mình, vấn đề phân tích tĩnh tay máy động học song song đã được nhiều

nhà nghiên cứu quan tâm: Bayer (1960), Chace (1962) dùng phương pháp *vector*; Yang (1965) dùng phương pháp *vector* và *số bội bốn*; Asada và Slotine (1986), Gosselin (1990), Paul (1981), Tahmasebi và Tsai (1995) với phương pháp *công khả dĩ*,...

Trong mục này chúng ta sẽ nghiên cứu phương pháp biểu diễn lực tĩnh tác dụng lên tay máy và chuyển đổi lực giữa các hệ toạ độ. Sự truyền dẫn lực từ động cơ lên phần công tác cũng có thể được biểu diễn qua ma trận Jacobian. Sự phân tích tĩnh tay máy cũng dẫn đến phân tích độ cứng vững. Quan hệ giữa lực tác dụng lên phần công tác với chuyển vị của nó được biểu diễn thông qua ma trận độ cứng (*Stiffness Matrix*).

8.4.1. Phân tích tĩnh tay máy song song

Bài toán phân tích tĩnh của tay máy song song phức tạp hơn rất nhiều so với tay máy nối tiếp. Phương pháp thường được dùng ở đây là phương pháp *cân bằng lực và momen* hoặc phương pháp *công khả dĩ*.

8.4.1.1. Phương pháp cân bằng lực

Các chân của tay máy song song thường được cấu tạo bởi 2 khâu. Chúng liên kết với các tấm bằng các khớp quay hoặc khớp cầu. Nếu không có ngoại lực tác động thì chúng thường chỉ chịu lực kéo hoặc nén dọc trục. Ví dụ, trên tay máy kiểu *Stewart-Gough* (hình 8.7), các khâu chỉ chịu lực tác dụng đi qua tâm 2 khớp cầu. Nhờ phát hiện này mà bài toán cân bằng được đơn giản hoá rất nhiều.

Sau đây, chúng ta dùng tay máy *Stewart-Gough* làm ví dụ phân tích.

Giả sử gốc O của hệ toạ độ cố định nằm tại trọng tâm của đế và các trục x, y nằm trong mặt phẳng chứa các tâm khớp cầu A_i . Tương tự, gốc P của hệ toạ độ di động nằm tại trọng tâm của tấm di động và các trục u, v nằm trong mặt phẳng chứa các tâm khớp cầu B_i . Hơn nữa, giả thiết bỏ qua trọng lượng của các khâu. Chúng ta cần tìm lực phát động tại các chân $f_1, f_2, \dots, f_6$ để nhận được lực ra F và momen M tại tâm của tấm di động.

Lực và momen tại các khớp trượt được coi là nội lực. Do 2 đầu dùng khớp cầu nên không có momen nào được truyền qua các chân. Mặt khác, phản lực tại các khớp cầu phải hướng theo đường $A_i B_i$ nối tâm các khớp. Vì vậy lực do chân thứ i ($i=1, 2, \dots, 6$) tác dụng lên tấm di động có thể được viết như sau:

$$\bar{f}_i = f_i \bar{s}_i \quad \text{với } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8.30)$$

trong đó f_i là cường độ của lực, $\bar{s}_i$ là vector đơn vị hướng từ tâm khớp cầu trên đế tới tâm khớp cầu trên tấm di động.

Vậy phương trình cân bằng lực tác dụng lên tấm di động được viết như sau:

$$F = \sum_{i=1}^6 f_i \bar{s}_i \quad (8.31)$$

trong đó, vế phải là tổng các lực do các chân tác động, còn vế trái là lực do tải trọng tác động vào tấm di động.

Tương tự, phương trình cân bằng momen quanh tâm P do các lực gây nên:

$$M = \sum_{i=1}^6 f_i \bar{b}_i \times \bar{s}_i \quad (8.32)$$

trong đó $\bar{b}_i = \overrightarrow{PB_i}$ là cánh tay đòn, nghĩa là vector đi từ tâm P đến điểm đặt lực. Mỗi phương trình (8.31) và (8.32) biểu thị hệ 6 phương trình tuyến tính. Có thể viết gộp chúng dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{s}_1 & \bar{s}_2 & \dots & \bar{s}_6 \\ \bar{b}_1 \times \bar{s}_1 & \bar{b}_2 \times \bar{s}_2 & \dots & \bar{b}_6 \times \bar{s}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (8.33)$$

Phương trình (8.33) biểu diễn sự chuyển đổi giữa các lực phát động và lực được hình thành tại đầu ra của tấm di động, trong đó $\bar{b}_i$ và $\bar{s}_i$ là các vector đã biết từ kết quả phân tích động học tay máy. Nếu biết các lực phát động f_i thì có thể xác định lực và momen tổng hợp F và M (bài toán thuận) và ngược lại, nếu biết lực và momen yêu cầu tại đầu ra thì có thể tính các lực phát động cần thiết (bài toán ngược).

8.4.1.2. Phương pháp công khả dĩ

Như đã biết, có 2 loại khớp: khớp chủ động (có lực phát động) và khớp bị động (không có lực phát động). Nếu giả thiết bỏ qua ma sát tại các khớp và trọng lực thì phản lực tại các khớp bị động sẽ gây nên công khả dĩ. Ký hiệu:

$A = [F \ M]^T$ là vector lực và momen do phần công tác sinh ra;

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ là vector của các momen hoặc lực phát động tại các khớp;

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ là vector chuyển vị của các khớp chủ động;

$x = [\delta x, \delta y, \dots, \delta \psi]^T$ là vector chuyển vị của phần công tác.

Như vậy, công gây nên bởi tất cả các lực tác dụng bằng:

$$\tau^T q - A^T x = 0 \quad (8.34)$$

Mặt khác, giữa chuyển vị của các khớp q và chuyển vị của phần công tác δX có liên hệ với ma trận Jacobian J như sau:

$$q = Jx \quad (8.35)$$

trong đó J là Jacobian đã được định nghĩa trong công thức (8.28) và (8.29).

Thay biểu thức (8.35) vào (8.34), nhận được

$$(\tau^T J - A^T)x = 0 \quad (8.36)$$

Vì chuyển vị x khi có lực tác động luôn luôn khác 0 nên

$$\tau^T J - A^T = 0 \quad (8.37)$$

Từ đó ta có quan hệ

$$A = J^T \tau \quad (8.38)$$

Biểu thức (8.38) cho phép xác định lực trên phần công tác A khi biết lực phát động τ và quan hệ giữa chúng được biểu diễn thông qua ma trận Jacobian J .

Sau đây chúng ta sẽ áp dụng phương pháp phân tích trên cho tay máy *Stewart-Gough*.

Thay ma trận J từ biểu thức (8.27) vào biểu thức (8.38) với chú ý rằng $J_q = I$, ta nhận được:

$$A = \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{s}_1 & \bar{s}_2 & \dots & \bar{s}_6 \\ \bar{b}_1 \times \bar{s}_1 & \bar{b}_2 \times \bar{s}_2 & \dots & \bar{b}_6 \times \bar{s}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (8.39)$$

Kết quả là ta nhận lại được biểu thức giống như (8.33).

8.4.2. Độ cứng vững của tay máy song song

Khi chịu lực tác động, do biến dạng đàn hồi của các khâu, khớp mà phần công tác của tay máy bị di chuyển khỏi vị trí ban đầu. Lượng chuyển vị phụ thuộc giá trị lực tác dụng và độ cứng vững chung của cơ hệ. Độ cứng vững của tay máy ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác định vị của phần công tác. Vì vậy, trong nhiều trường hợp, độ cứng vững của tay máy được dùng như một thông số phản hồi của bộ điều khiển *robot*. Độ cứng vững chung của *robot* phụ thuộc nhiều yếu tố, như kích thước và vật liệu của các khâu, cơ cấu truyền dẫn cơ khí và bộ điều khiển. Trên các *robot* có các khâu dài, mảnh như *robot* dùng trong vũ trụ, thường các khâu là nguyên nhân chính gây nên chuyển vị. Ngược lại, trên các *robot* công nghiệp, các khâu thường rất cứng vững nên nguồn gốc biến dạng lại nằm ở phần truyền dẫn cơ khí và chấp hành.

Vấn đề độ cứng vững của tay máy song song cũng thu hút nhiều nhà nghiên cứu, như Gosselin (1990), Kerr (1989), Lebret và cộng sự (1993), Tahmasebi và Tsai (1995). Xuất phát từ thực tế, giả thiết rằng các khâu là cứng vững tuyệt đối và nguồn gây chuyển vị là hệ truyền động cơ khí và hệ thống servo.

Ký hiệu:

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$ là vector momen và lực phát động tại các khớp,

$\Delta q = [\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n]$ là vector chuyển vị của các khớp,

$\Delta X = [\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta z]$ là vector chuyển vị của phần công tác.

Giữa lực phát động τ và chuyển vị Δq của các khớp có thể xác lập mối quan hệ thông qua ma trận chéo $n \times n$ dạng $\chi = \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_n]$ như sau:

$$\tau = \chi \Delta q \quad (8.1)$$

Mặt khác, giữa biến dạng Δq của các khớp và chuyển vị ΔX của phần công tác có mối quan hệ:

$$\Delta q = J \Delta X \quad (8.2)$$

trong đó, J là ma trận Jacobian.

Thay biểu thức (8.41) vào (8.40) rồi thay kết quả vào (8.38) ta nhận được:

$$A = K\Delta X \quad (8.3)$$

trong đó K được gọi là *ma trận độ cứng* của tay máy song song:

$$K = J^T \chi J \quad (8.4)$$

Biểu thức (8.42) có dạng giống như quan hệ thông thường giữa lực tác dụng lên cơ cấu và biến dạng đàn hồi của cơ cấu đó. Ma trận độ cứng là ma trận *đối xứng, dương* và *phụ thuộc kết cấu* của tay máy. Hơn nữa, nếu các chân là giống nhau và độ cứng của các chân là $k_1=k_2=\dots=k_n=k$ thì ma trận độ cứng của tay máy trở thành:

$$K = kJ^T J \quad (8.5).$$

Đối với trường hợp tay máy Stewart-Gough, nếu biết độ cứng k của các chân, thông qua ma trận Jacobian (8.27) ta dễ dàng xác định ma trận độ cứng K của cơ cấu.

8.5. ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TAY MÁY SONG SONG

Việc xây dựng các mô hình động lực học và tính toán động lực học tay máy ngày càng đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu chúng. Có thể kể ra đây những ứng dụng của các mô hình động lực học, như:

- Mô phỏng động lực học các cơ cấu của tay máy. Nhờ các phần mềm phân tích và mô phỏng động lực học có thể kiểm nghiệm phản ứng của cơ cấu trong những điều kiện khác nhau mà không cần thiết bị thực. Hiện nay có rất nhiều phần mềm kiểu như vậy, như ADAMS, ALASKA. Một xu hướng đáng chú ý là các chức năng phân tích và mô phỏng động lực học cơ cấu được tích hợp trong môi trường CAD (*Computer-Aided Design - Thiết kế có trợ giúp của máy tính*) để kế thừa khả năng mô hình hoá hình học và khả năng biểu diễn đồ họa mạnh của CAD. Hàng loạt các phần mềm tích hợp như vậy đang được sử dụng phổ biến, ví dụ:

Motion Designer, MSC Visual Nastran là các phần mềm phân tích động lực học, được viết để chạy trong các môi trường CAD khác nhau như *Autodesk Mechanical Desktop, Autodesk Inventor, SolidWork*).

CATIA, Pro/E Engineer là các phần mềm tích hợp CAD/CAM/CAE.

- Để thiết kế hệ điều khiển robot: xây dựng luật điều khiển đảm bảo cho robot làm việc theo chức năng, quỹ đạo, vận tốc, lực,... quy định.

- Cung cấp số liệu để tính toán các cơ cấu, như tính độ bền và độ ổn định của các khâu, tính ổ, tính động cơ và truyền động cơ khí.

Có 2 loại bài toán động lực học:

- Bài toán thuận, trong đó biết trước lực và momen phát động tại các khớp, phải tính lực và momen trên phần công tác. .

- Bài toán ngược, phải xác định lực và momen cần cung cấp cho các khớp để đạt momen và lực cho trước tại đầu ra (phần công tác).

Tương tự như phân tích động học và phân tích tĩnh, bài toán ngược của động học tay máy song song đơn giản hơn nhiều so với bài toán thuận. Cũng do tính phức tạp của bài toán thuận mà nó ít được giới thiệu trong các tài liệu phổ thông mà chỉ có bài toán ngược của động lực học tay máy song song được giới thiệu.

Trong khi động học tay máy song song được nghiên cứu khá mạnh mẽ trong vài thập kỷ qua thì các công trình nghiên cứu động lực học mới chỉ được công bố hạn chế. Các phương pháp kinh điển đã được ứng dụng như phương pháp Newton-Euler: Do và Yang (1988), Tsai và Kohli (1990), Guglielmentti và Longchamp (1994); phương pháp Lagrange: Lebret (1993), Miller và Clavel (1992), Pang và Shahingpoor (1994); phương pháp công khả dĩ: Codourey và Burdet (1997), Miller (1995), Tsai (1998). Phương pháp Newton-Euler đòi hỏi viết phương trình chuyển động cho tất cả các khâu nên dẫn đến số lượng phương trình khá lớn. Phương pháp Lagrange đạt hiệu quả cao hơn nhưng cũng chỉ có thể giải được với các mô hình đơn giản hoặc đơn giản hóa, ví dụ, coi mỗi khâu là một chất điểm có khối lượng tập trung. Phương pháp công khả dĩ hiện đang tỏ ra là hiệu quả nhất [7]. Để đáp ứng yêu cầu ứng dụng thực tế trong điều kiện khuôn khổ có hạn của tài liệu, chúng tôi chỉ giới thiệu hai phương pháp hay dùng hơn. Đó là *phương pháp công khả dĩ* và *phương pháp Lagrange*.

8.5.1. Phương pháp công khả dĩ

Với mọi mô hình tay máy song song, chúng ta sử dụng các ký hiệu sau:

f_i - lực tổng hợp (kể cả lực phát động) đặt tại trọng tâm của khâu thứ i .

f_i^* - lực quán tính đặt tại trọng tâm của khâu thứ i : $f_i^* = -m_i \dot{v}_i$.

$$\hat{f}_i = f_i + f_i^*$$

f_p - lực tổng hợp đặt tại trọng tâm của tấm di động.

f_p^* - lực quán tính đặt tại trọng tâm của tấm di động: $f_p^* = -m_p \dot{v}_p$.

$$\hat{f}_p = f_p + f_p^*$$

n_i - momen tổng hợp (kể cả momen phát động) tại trọng tâm của khâu thứ i .

n_i^* - momen quán tính đặt tại trọng tâm của khâu thứ i :

$$n_i^* = -I_i^i \dot{\omega}_i^i - \omega_i^i \times (I_i^i \omega_i^i).$$

$$\hat{n}_i = n_i + n_i^*$$

n_p - momen tổng hợp đặt tại trọng tâm của tấm di động.

n_p^* - momen quán tính đặt tại trọng tâm của tấm di động.

$$n_p^* = -I_p \dot{\omega}_p - \omega_p \times (I_p \omega_p).$$

$$\hat{n}_p = n_p + n_p^*$$

q - vector độ dài của chân chủ động, $q = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$.

x_i - vector 6 thành phần mô tả vị trí và hướng của khâu thứ i .

$\dot{x}_i$ - vector 6 thành phần mô tả vận tốc dài và vận tốc góc của xilanh

($j=1$) hoặc piston ($j=2$) của chân thứ i . $\dot{x}_i = [v_{ix} + v_{iy} + v_{iz}]^T$.

x_p - vector 6 thành phần mô tả vị trí và hướng của tấm di động.

$\dot{x}_p$ - vector 6 thành phần mô tả vận tốc dài và vận tốc góc của tấm di động $\dot{x}_p = [v_{px} + v_{py} + v_{pz}]^T$.

τ - vector momen và/ hoặc lực phát động.

$\delta(.)$ - chuyển vị khả dĩ của $(.)$.

Để thuận tiện, ký hiệu lực xoắn $\hat{F}_i$ là tổng hợp xoắn (lực và moment tác dụng và quán tính) đặt tại trọng tâm của khâu thứ i :

$$\hat{F}_i = \begin{bmatrix} \hat{f}_i \\ \hat{n}_i \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

Tương tự, ký hiệu lực xoắn $\hat{F}_p$ là tổng hợp lực xoắn tác dụng và quán tính đặt tại trọng tâm của tấm di động:

$$\hat{F}_p = \begin{bmatrix} \hat{f}_p \\ \hat{n}_p \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

Như vậy công khả dĩ của tay máy song song bằng:

$$\delta q^T \tau + \delta x_p^T \hat{F}_p + \sum \delta x_i^T \hat{F}_i = 0 \quad (8.8)$$

Chuyển vị δq của các khớp chủ động có quan hệ với chuyển vị của tấm di động δx_p thông qua ma trận Jacobian J_p của tay máy:

$$\delta q = J_p \delta x_p \quad ((8.9))$$

Tương tự, chuyển vị δx_i của khâu thứ i có quan hệ với chuyển vị của tấm di động δx_p thông qua ma trận Jacobian J_i của khâu thứ i :

$$\delta x_i = J_i \delta x_p \quad ((8.10))$$

Thay (8.48) và (8.49) vào (8.47), nhận được

$$\delta x_p^T (J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i) = 0 \quad (8.11)$$

Biểu thức (8.50) có giá trị với mọi chuyển vị khả dĩ δx_p . Từ đó

$$J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i = 0 \quad (8.12)$$

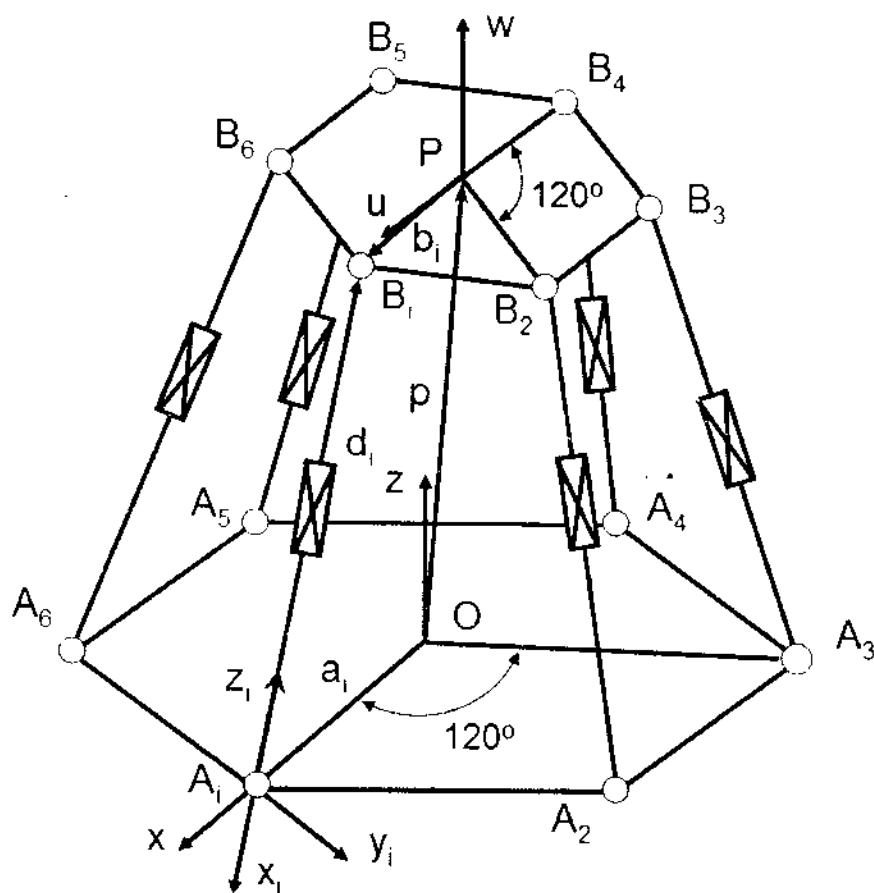
Chú ý rằng các lực xoắn trong công thức trên được giả thiết là đặt tại trọng tâm của các khâu. Vì vậy, nếu có lực nào đặt ngoài các điểm trên thì cần được quy về đó trước khi thay vào công thức.

Nói chung, trên các tay máy song song, số khớp chủ động bằng số bậc tự do của cơ cấu nên vector lực phát động τ được xác định như sau:

$$\tau = -J_p^{-T} (\hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i) \quad (8.13)$$

Sau đây, tay máy *Stewart-Gough* được dùng để minh hoạ phương pháp. Sơ đồ tính toán như trong hình 8.1. Trong sơ đồ này, gốc O của hệ toạ độ

tính được đặt tại toạ độ trọng tâm của đế, còn gốc P của hệ toạ độ di động được đặt tại trọng tâm của tấm di động. Chân thứ i được đại diện bởi vector d_i . Gắn vào mỗi chân một hệ toạ độ $C(x_i, y_i, z_i)$, trong đó gốc trùng với tâm khớp cầu A_i ; trục z_i hướng theo đường A_iB_i ; trục y_i song song với vector tích có hướng của các vector đơn vị hướng theo trục z_i và z ; trục x_i được xác định từ y_i và z_i theo quy tắc bàn tay phải.



Hình 8. 1: Sơ đồ tính toán động lực học tay máy Stewart-Gough

Thủ tục tính toán qua các bước sau:

8.5.1.1. Xác định các ma trận Jacobian

Để xác định ma trận Jacobian của tay máy, ta viết phương trình vận tốc v_{hi} của tâm khớp cầu trên tấm di động như sau:

$$v_{bi} = v_p + \omega_p \times b_i = J_{bi} \dot{x}_p \quad (8.14)$$

trong đó

$$J_{bi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & b_{iz} & -b_{iy} \\ 0 & 1 & 0 & -b_{iz} & 0 & b_{ix} \\ 0 & 0 & 1 & b_{iy} & -b_{ix} & 0 \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

Chuyển v_{bi} trong biểu thức (8.53) đến hệ tọa độ trên chân thứ i :

$$v'_{bi} = J^i_{bi} \dot{x}_p = \begin{bmatrix} J^i_{bix} \\ J^i_{biy} \\ J^i_{biz} \end{bmatrix} \dot{x}_p \quad (8.16)$$

trong đó $J^i_{bi} = R^i_A J_{bi}$ là ma trận 3×6 với các hàng như sau:

$$\begin{aligned} J^i_{bix} &= \begin{bmatrix} c\phi_i c\theta_i & s\phi_i c\theta_i & -s\theta_i & -b_{iz}s\phi_i c\theta_i - b_{iy}s\theta_i & b_{iz}c\phi_i c\theta_i + b_{ix}s\theta_i - \\ & b_{iy}c\phi_i c\theta_i + b_{ix}s\phi_i c\theta_i \end{bmatrix} \\ J^i_{biy} &= \begin{bmatrix} -s\phi_i & c\phi_i & 0 & -b_{iz}c\phi_i & -b_{iy}s\phi_i & b_{iy}s\phi_i + b_{ix}c\phi_i \end{bmatrix} \\ J^i_{biz} &= \begin{bmatrix} c\phi_i s\theta_i & s\phi_i s\theta_i & c\theta_i & -b_{iz}s\phi_i s\theta_i - b_{iy}c\theta_i & b_{iz}c\phi_i s\theta_i + b_{ix}c\theta_i - \\ & b_{iy}c\phi_i s\theta_i + b_{ix}s\phi_i s\theta_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8.17)$$

Sử dụng các ma trận hàng ở trên, có thể xác định được vận tốc của các chân như sau:

$$\dot{d}_i = J^i_{bi} \dot{x}_p \quad (8.18)$$

Viết phương trình (8.57) 6 lần cho các chân, được 6 phương trình vô hướng và gộp chúng thành ma trận dưới dạng:

$$\dot{q} = J_p \dot{x}_p \quad (8.19)$$

trong đó J_p được gọi là ma trận Jacobian của tay máy:

$$J_p = \begin{bmatrix} J^1_{b1z} \\ J^2_{b2z} \\ \vdots \\ J^6_{b6z} \end{bmatrix} \quad (8.20)$$

Working with the *Journal of the American Medical Association*, we have been able to identify the following authors:

$$v'_k = d\omega' \times s' + \dot{d}s' \quad (8.21)$$

Từ đây ta tính được vận tốc góc của chân thứ i :

$$\omega_i^j = \frac{\dot{l}}{d_i} (s_i^j \times v_{hi}^j) = \frac{\dot{l}}{d_i} \begin{bmatrix} -v_{hi}^j \\ v_{hi}^j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.22)$$

Tương tự, ta tính được vận tốc dài của tọa độ trọng tâm của xilanh và piston như sau:

$$v_1^j = e_1 \omega_i^j \times s_1^j = \frac{e_1}{d_i} \begin{bmatrix} v_{hi}^j \\ v_{hi}^j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

$$v_{2i}^j = (d_i - e_2) \omega_i^j \times s_2^j + \dot{d}_i s_2^j = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} (d_i - e_2) v_{hi}^j \\ (d_i - e_2) v_{hi}^j \\ d_i v_{hi}^j \end{bmatrix} \quad (8.24)$$

Chuyển về không gian công tác, các biểu thức (8.61), (8.62) và (8.63) có dạng:

$$\omega = \frac{\dot{l}}{d} \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{x}_p \quad (8.25)$$

$$v = \frac{e}{d} \begin{bmatrix} J_{21} \\ J_{22} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{x}_p \quad (8.26)$$

$$v_{2i} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} (d_i - e_2) J_{21} \\ (d_i - e_2) J_{22} \\ d_i J_{23} \end{bmatrix} \hat{x}_p \quad (8.27)$$

Tổng hợp các phương trình (8.64), (8.65) và (8.66) ta nhận được:

$$\dot{\hat{x}}_1 = J_{11} \hat{x}_p \quad (8.28)$$

$$\dot{\hat{x}}_{2i} = J_{2i} \hat{x}_p \quad (8.29)$$

trong đó

$$J_{1i}^i = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} e_1 J_{bix}^i \\ e_1 J_{biy}^i \\ 0_{1 \times 6} \\ -J_{biy}^i \\ J_{bix}^i \\ 0_{1 \times 6} \end{bmatrix} \quad (8.30)$$

$$J_{2i}^i = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} (d_i - e_2) J_{bix}^i \\ (d_i - e_2) J_{biy}^i \\ d_i J_{biz}^i \\ -J_{biy}^i \\ J_{bix}^i \\ 0_{1 \times 6} \end{bmatrix} \quad (8.31)$$

là các ma trận *Jacobian* của xilanh và piston thứ trên chân thứ i .

8.5.1.2. Xác định các lực xoắn

Giả thiết lực duy nhất tác dụng lên tay máy là trọng lực, vector tổng hợp của các lực xoắn quán tính và lực xoắn tác dụng tại trọng tâm của giá cố định bằng:

$$\hat{F}_p = \begin{bmatrix} \hat{f}_p \\ \hat{n}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_p g - m_p \dot{v}_p \\ -I_p^A \dot{\omega}_p - \omega_p \times (I_p^A \omega_p) \end{bmatrix} \quad (8.32)$$

trong đó $I_p^A = R_B^A I_p^B R_A^B$ là momen quán tính của tấm di động quanh trọng tâm của nó và được tính theo tấm đế.

Tương tự, vector tổng các ngoại lực và lực quán tính tại trọng tâm của xilanh và piston, tính theo hệ toạ độ trên chân:

$$\hat{F}_{1i}^i = \begin{bmatrix} \hat{f}_{1i}^i \\ \hat{n}_{1i}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1i} R_A^i g - m_{1i} \dot{v}_{1i}^i \\ -I_{1i}^i \dot{\omega}_i^i - \omega_i^i \times (I_{1i}^i \omega_i^i) \end{bmatrix} \quad (8.33)$$

$$\hat{F}_{2i}^i = \begin{bmatrix} \hat{f}_{2i}^i \\ \hat{n}_{2i}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{2i} R_A^i g - m_{2i} \dot{v}_{2i}^i \\ -I_{2i}^i \dot{\omega}_i^i - \omega_i^i \times (I_{2i}^i \omega_i^i) \end{bmatrix} \quad (8.34)$$

Chú ý rằng, do tính đối xứng nên các ma trận quán tính của tấm di động và 6 chân đều là các ma trận đường chéo.

8.5.1.3. Phương trình chuyển động

Đến đây, chúng ta đã có thể áp dụng nguyên lý công khả dĩ để xây dựng các phương trình chuyển động. Phương trình (8.51) có thể được viết lại như sau:

$$J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_{i=1}^6 [(J_{1i}^T)^T \hat{F}_{1i}^i + (J_{2i}^T)^T \hat{F}_{2i}^i] = 0 \quad (8.35)$$

Chú ý rằng trong phương trình (8.74), $\hat{F}_p$ được tính trong hệ cố định A, còn $\hat{F}_{1i}^i$ và $\hat{F}_{2i}^i$ được lấy theo chân thứ i sau đó chuyển sang hệ cố định nhờ các ma trận Jacobian của các khâu. Tương tự, các momen phát động τ được xác định trong không gian khớp sau đó mới chuyển sang hệ cố định nhờ ma trận Jacobian của tay máy.

Thay các phương trình (8.69) và (8.70) vào (8.74) và đơn giản, nhận được:

$$J_p^T (\tau + \hat{F}_z) + \hat{F}_p + J_v^T \hat{F}_x + J_y^T \hat{F}_y = 0 \quad (8.36)$$

trong đó

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{b1x}^1 \\ J_{b2x}^2 \\ \vdots \\ J_{b6x}^6 \end{bmatrix} \quad (8.37)$$

$$J_y = \begin{bmatrix} J_{b1y}^1 \\ J_{b2y}^2 \\ \vdots \\ J_{b6y}^6 \end{bmatrix} \quad (8.38)$$

$$\hat{F}_y = \begin{bmatrix} \frac{e_1 \hat{f}_{11x} + (d_1 - e_2) \hat{f}_{21x} + \hat{n}_{11y} + \hat{n}_{21y}}{d_1} \\ \frac{e_1 \hat{f}_{12x} + (d_2 - e_2) \hat{f}_{22x} + \hat{n}_{12y} + \hat{n}_{22y}}{d_2} \\ \vdots \\ \frac{e_1 \hat{f}_{16x} + (d_6 - e_2) \hat{f}_{26x} + \hat{n}_{16y} + \hat{n}_{26y}}{d_6} \end{bmatrix} \quad (8.39)$$

$$\hat{F}_x = \begin{bmatrix} \frac{e_1 \hat{f}_{11y} + (d_1 - e_2) \hat{f}_{21y} + \hat{n}_{11x} + \hat{n}_{21x}}{d_1} \\ \frac{e_1 \hat{f}_{12y} + (d_2 - e_2) \hat{f}_{22y} + \hat{n}_{12x} + \hat{n}_{22x}}{d_2} \\ \vdots \\ \frac{e_1 \hat{f}_{16y} + (d_6 - e_2) \hat{f}_{26y} + \hat{n}_{16x} + \hat{n}_{26x}}{d_6} \end{bmatrix} \quad (8.40)$$

$$\hat{F}_z = \begin{bmatrix} \hat{f}_{21z} \\ \hat{f}_{22z} \\ \vdots \\ \hat{f}_{26z} \end{bmatrix} \quad (8.41)$$

trong đó, $\hat{f}_{jix}$, $\hat{f}_{jiy}$ và $\hat{f}_{jiz}$ là các thành phần x, y, z của $\hat{f}_{ji}^x$ và $\hat{n}_{jix}$, $\hat{n}_{jiy}$ và $\hat{n}_{jiz}$ là các thành phần x, y, z của $\hat{n}_{ji}^x$.

Từ phương trình (8.75) có thể tính được lực phát động để nhận được đặc tính chuyển động cần thiết, ví dụ, bằng phương pháp loại trừ Gauss.

Dùng phương pháp công khả dĩ có thể loại trừ được các lực và momen liên kết. Vì vậy phương pháp này hiệu quả hơn phương pháp Newton-Euler và phương pháp Lagrange.

8.5.2. Phương pháp Lagrange

Trong chương 3, chúng ta đã có dịp tìm hiểu về ứng dụng của phương pháp Lagrange trong tính toán động lực học tay máy nối tiếp. Trong mục này, chúng ta sẽ ứng dụng phương pháp này để giải bài toán động lực học

tay máy song song. Tuy nhiên, do tính phức tạp của loại tay máy này, chúng ta chỉ đề cập đến bài toán ngược. Ví dụ minh họa cho phương pháp là tay máy 3 bậc tự do do trường đại học Maryland thiết kế (từ đây sẽ gọi là tay máy Maryland).

8.5.2.1. Cơ sở của phương pháp

Phương pháp Lagrange dựa trên sự cân bằng năng lượng của hệ thống trong trạng thái chuyển động. Trong quá trình làm việc, năng lượng của hệ thống gồm: động năng, thế năng và năng lượng của ngoại lực tác dụng phải cân bằng. Hơn nữa, trong tay máy song song cũng tồn tại các tọa độ thừa, nghĩa là số tọa độ n lớn hơn số bậc tự do của cơ cấu. Với những yếu tố trên, phương trình Lagrange có dạng:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \quad \text{với } j = 1 \div n \quad (8.42)$$

trong đó

$L = T - U$ - hàm Lagrange, T - tổng động năng, U - tổng thế năng của hệ

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ - vector các tọa độ tổng quát

$Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_n]^T$ - vector các ngoại lực tác dụng lên tấm di động

Γ_i - hàm liên kết thứ i

k - số hàm liên kết, bằng hiệu giữa số tọa độ n và số bậc tự do của cơ cấu

λ_i - nhân tử Lagrange.

Để thuận tiện cho quá trình giải, các phương trình trong hệ (8.81) được chia thành 2 nhóm. Nhóm thứ nhất chứa các ẩn là các nhân tử Lagrange. Nhóm thứ hai chứa các ẩn là các lực tổng quát do các cơ cấu phát động sinh ra. Giả thiết k phương trình đầu liên quan đến các tọa độ thừa và $n-k$ phương trình còn lại liên quan đến các biến khớp. Nhóm phương trình đầu có dạng:

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \hat{Q}_j \quad (8.43)$$

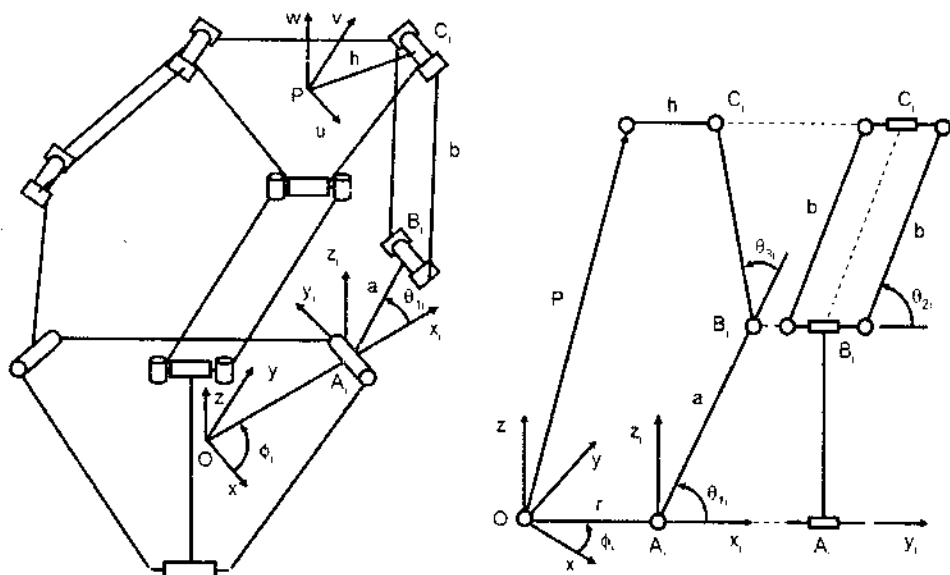
trong đó, $\hat{Q}_j$ - lực tổng quát sinh ra bởi các ngoại lực (nếu có).

Đối với bài toán ngược, $\hat{Q}_j$ đã biết, nên vế phải của hệ (8.82) đã biết. Hệ này có k phương trình với k ẩn là các nhân tử Lagrange λ_i . Sau khi đã biết các nhân tử Lagrange, các lực phát động được xác định nhờ nhóm phương trình thứ hai:

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} - \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \quad \text{với } j = k+1 \div n \quad (8.44)$$

8.5.2.2. Ứng dụng cho tay máy Maryland:

Tay máy Maryland có dạng như trong hình 8.3. Tay máy này có 3 chân giống nhau để nối đế với tấm di động. Mỗi chân có phần trên và phần dưới. Phần chân trên được hình thành bởi cơ cấu bình hành 4 khâu. Giữa các phần của chân và 2 tấm được nối với nhau bằng các khớp quay A , B và C với các trục song song. Đường tâm của các khớp B và C gặp và vuông góc với trục đối xứng của bình hành. Cơ cấu có 3 khớp chủ động là các khớp quay gắn với đế θ_{11} , θ_{12} và θ_{13} .



Hình 8.3: Sơ đồ chung (trái) và kích thước chân (phải) của tay máy Maryland

Với kết cấu như trên, tay máy Maryland có 17 khâu và 21 khớp. Số bậc tự do chung bằng:

$$Dof = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i = 6(17 - 21 - 1) + 21 = -9.$$

Tuy nhiên, do cách bố trí các khâu và khớp mà nhiều liên kết trong các khớp là trùng (thừa), cuối cùng cơ cấu có 3 bậc tự do tịnh tiến. Các chân không thể quay quanh trục z và các trục x_i . Tấm di động không thể quay quanh mà chỉ có thể chuyển động tịnh tiến theo 3 phương x, y, z . Tay máy Maryland được dùng làm thiết bị trở 3-D.

Phương trình (8.81) đại diện cho hệ 6 phương trình có 6 ẩn: 3 ẩn là các nhân tử Lagrange: λ_i ($i = 1, 2, 3$) và 3 ẩn là các lực phát động Q_j với $j = 4, 5, 6$. Chú ý rằng các lực Q_j với $j = 1, 2, 3$ là 3 thành phần x, y, z của ngoại lực tác động tại trọng tâm P của tấm di động. Có thể nhận được các hàm liên kết Γ_i với chú ý rằng khoảng cách giữa các khớp B_i và C_i đúng bằng chiều dài phân trên b của chân:

$$\Gamma_i = \overline{B_i C_i}^2 - b^2 = 0$$

hay

$$\begin{aligned} \Gamma_i = & (p_x + hc\phi_i - rc\phi_i - ac\phi_i c\theta_{li})^2 + (p_y + hs\phi_i - rs\phi_i - as\phi_i c\theta_{li})^2 + \\ & (p_z - as\phi_{li})^2 - b^2 = 0 \quad \text{với } i=1, 2, 3. \end{aligned} \quad (8.45)$$

Để đơn giản, giả thiết trọng tâm của thân chân trên nằm ở trên trục đối xứng và chính giữa 2 đầu B, C . Chúng ta sẽ xây dựng hàm Lagrange như sau:

Tổng động năng của tay máy bằng

$$T = T_p + \sum_{i=1}^3 (T_{ai} + T_{bi}) \quad (8.46)$$

trong đó, T_p - động năng của tấm di động; T_{ai} - rotor động cơ và khâu phát động và T_{bi} - động năng của 2 phần của chân thứ i :

$$T_p = \frac{1}{2} m_p (\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2)$$

$$T_{ai} = \frac{1}{2} (I_m + \frac{1}{3} m_a a^2) \dot{\theta}_{li}^2$$

$$T_m = \frac{1}{2} m_a (\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2) + \frac{1}{2} m_b a^2 \dot{\theta}_{1i}^2$$

trong đó m_p , m_a và m_b lần lượt là khối lượng của tấm di động, khâu phát động và của 2 phần chân; I_m - momen quán tính hướng trục của rotor gắn trên mỗi chân.

Giả thiết gia tốc trọng trường hướng theo trục $-z$. Tương tự như trên, thế năng của tay máy đối với mặt phẳng co định $x-y$ bằng:

$$U = U_p + \sum_{i=1}^3 (U_{ai} + U_{bi}) \quad (8.47)$$

trong đó,

$$U_p = m_p g \cdot p_z$$

$$U_{ai} = \frac{1}{2} m_a g_i a s \theta_{1i}$$

$$U_{bi} = m_b g_i (p_i + a s \theta_{1i})$$

Thay các biểu thức (8.85) và (8.86) với $i=1, 2, 3$ vào hàm Lagrange, ta nhận được:

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} (m_p + 3m_a) (\dot{p}_x^2 + \dot{p}_y^2 + \dot{p}_z^2) + \\ & \frac{1}{2} (I_m + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2) (\dot{\theta}_{11}^2 + \dot{\theta}_{12}^2 + \dot{\theta}_{13}^2) - (m_p + 3m_b) g \cdot p_z - \\ & (\frac{1}{2} m_a + m_b) g_i a (s \theta_{11} + s \theta_{12} + s \theta_{13}). \end{aligned} \quad (8.48)$$

Lấy đạo hàm hàm Lagrange tương ứng với 6 tọa độ tổng quát, ta nhận được:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_x} \right) &= (m_p + 3m_a) \ddot{p}_x, & \frac{\partial L}{\partial p_x} &= 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_y} \right) &= (m_p + 3m_a) \ddot{p}_y, & \frac{\partial L}{\partial p_y} &= 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}_z} \right) &= (m_p + 3m_b) \ddot{p}_z, & \frac{\partial L}{\partial p_z} &= -(m_p + 3m_b) g_e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{11}}\right) &= (I_m + \frac{1}{3}m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_{11}, \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_{11}} = -(\frac{1}{2}m_a + m_b)g_c ac\theta_{11}) \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{12}}\right) &= (I_m + \frac{1}{3}m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_{12}, \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_{12}} = -(\frac{1}{2}m_a + m_b)g_c ac\theta_{12}) \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{13}}\right) &= (I_m + \frac{1}{3}m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_{13}, \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_{13}} = -(\frac{1}{2}m_a + m_b)g_c ac\theta_{13})\end{aligned}$$

Lấy đạo hàm riêng của hàm liên kết F_i theo các toạ độ tổng quát, ta được:

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_x} = 2(p_x + hc\phi_i - rc\phi_i - ac\phi_i c\theta_{1i}) \quad \text{với } i = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_y} = 2(p_y + hs\phi_i - rs\phi_i - as\phi_i c\theta_{1i}) \quad \text{với } i = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial p_z} = 2(p_z - as\theta_{1i}) \quad \text{với } i = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{11}} = 2a(p_x c\phi_i + p_y s\phi_i + h - r)s\theta_{11} - p_z c\theta_{11})$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{12}} = 0 \quad \text{với } i = 2, 3$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{13}} = 0 \quad \text{với } i = 1, 3$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{12}} = 2a(p_x c\phi_i + p_y s\phi_i + h - r)s\theta_{12} - p_z c\theta_{12})$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{13}} = 0 \quad \text{với } i = 1, 2$$

$$\frac{\partial \Gamma_i}{\partial \theta_{13}} = 2a(p_x c\phi_i + p_y s\phi_i + h - r)s\theta_{13} - p_z c\theta_{13})$$

Thay tất cả các đạo hàm trên vào phương trình (8.82) và (8.83), ta nhận được hệ phương trình động lực học.

Với $j = 1, 2, 3$ ta có:

$$2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (p_x + hc\phi_i - rc\phi_i - ac\phi_i c\theta_{li}) = (m_p + 3m_b) \ddot{p}_x - f_{px} \quad (8.49)$$

$$2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (p_y + hs\phi_i - rs\phi_i - as\phi_i c\theta_{li}) = (m_p + 3m_b) \ddot{p}_y - f_{py} \quad (8.50)$$

$$2 \sum_{i=1}^3 \lambda_i (p_z - as\theta_{li}) = (m_p + 3m_b) \ddot{p}_z + (m_p + 3m_b) g_c - f_{pz} \quad (8.51)$$

trong đó f_{px}, f_{py}, f_{pz} là các thành phần x, y, z của ngoại lực đặt lên tấm di động.

Với $j = 4, 5, 6$ ta có:

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (I_m + \frac{1}{3}a^2 + m_b a^2) \ddot{\theta}_{11} + (\frac{1}{2}m_a + m_b) g_c ac\theta_{11} - \\ & 2a\lambda_1 [(p_x c\phi_1 + p_y s\phi_1 + h - r)s\theta_{11} - p_z c\theta_{11}] \end{aligned} \quad (8.52)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & (I_m + \frac{1}{3}a^2 + m_b a^2) \ddot{\theta}_{12} + (\frac{1}{2}m_a + m_b) g_c ac\theta_{12} - \\ & 2a\lambda_2 [(p_x c\phi_2 + p_y s\phi_2 + h - r)s\theta_{12} - p_z c\theta_{12}] \end{aligned} \quad (8.53)$$

$$\begin{aligned} \tau_3 = & (I_m + \frac{1}{3}a^2 + m_b a^2) \ddot{\theta}_{13} + (\frac{1}{2}m_a + m_b) g_c ac\theta_{13} - \\ & 2a\lambda_3 [(p_x c\phi_3 + p_y s\phi_3 + h - r)s\theta_{13} - p_z c\theta_{13}] \end{aligned} \quad (8.54)$$

Các phương trình (8.88) đến (8.90) hình thành hệ phương trình để xác định các nhân tử Lagrange. Sau khi đã xác định được chúng, ta giải hệ phương trình (8.91) đến (8.93) để xác định các lực phát động. Hai nhóm phương trình này cũng được dùng để điều khiển robot theo thời gian thực.

Phụ lục

HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH

Trong một số chương của tài liệu này có đề cập đến các hệ thống điều khiển của robot, trong đó chủ yếu là các hệ thống *điều khiển tuyến tính có phản hồi*. Để tạo thuận lợi cho bạn đọc khi nghiên cứu các chương trên chúng tôi sẽ nhắc lại một số vấn đề lý thuyết liên quan. Các nội dung sẽ được trình bày theo trình tự thiết lập hệ thống: từ mô tả (mô hình hoá) quá trình, đến lập sơ đồ và thiết lập hàm truyền, phép biến đổi Laplace, tác động điều khiển, cuối cùng là phân tích và đánh giá hệ thống.

P1. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Hầu hết các hiện tượng, quá trình thực được mô tả thông qua các đại lượng vật lý với đặc điểm chung là *tương tự* và *liên tục*. Mặc dù điều khiển số phát triển rất nhanh, trên phần lớn các thiết bị công nghiệp hiện nay vẫn dùng các hệ điều khiển trên cơ sở các đại lượng vật lý và chúng cũng mang tên là các hệ *điều khiển tương tự*. Hơn nữa, trong điều khiển số người ta cũng kế thừa nhiều khái niệm và luật của kỹ thuật điều khiển tương tự, chưa kể đến nhiều hệ thống lai giữa số và tương tự.

Các hệ điều khiển tuyến tính được mô tả bằng các phương trình vi phân bậc nhất. Ưu điểm cơ bản của các phương trình vi phân dạng tuyến tính là dễ giải hơn rất nhiều so với dạng phi tuyến, nên mặc dù rất ít các quá trình thực tế tuân theo quy luật tuyến tính, người ta vẫn cố gắng chuyển chúng về dạng tuyến tính, và vì vậy lý thuyết điều khiển tuyến tính được ứng dụng phổ biến.

Bước đầu tiên trong nghiên cứu quá trình là xây dựng mô hình toán học của nó, nghĩa là mô tả nó bằng các phương trình hoặc hệ phương trình, trong trường hợp này là các phương trình vi phân bậc nhất. Sau đây là hai ví dụ về mô hình vật lý đơn giản.

Có hệ thống thuỷ lực như trong hình P1, gồm:

- Bể chứa có tiết diện A không đổi và chiều cao mực nước h ;
- Vận tốc nước chảy vào bể là x_1 , chảy ra khỏi bể là x_2 (lít/ph);

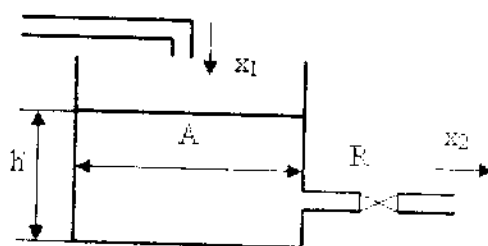
Quá trình cấp và xả nước được biểu diễn bởi phương trình vi phân sau:

$$x_1 - x_2 = A \frac{dh}{dt} \quad (P1)$$

P1.1. Mô tả hệ thống thủy lực

Vận tốc nước chảy ra khỏi bể x_2 được hạn chế bằng van có sức cản R theo quan hệ:

$$R = \frac{h}{x_2} \quad \text{hay} \quad x_2 = \frac{h}{R}$$

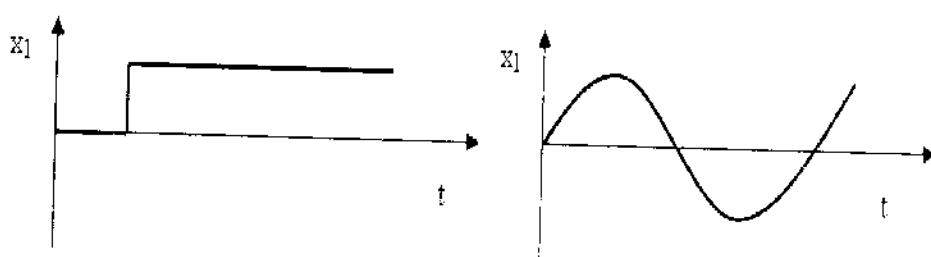


Hình P 1: Hệ thống thủy lực

Thay vào biểu thức (P 1), ta có

$$x_1 - \frac{h}{R} = A \frac{dh}{dt} \quad \text{hay} \quad AR \frac{dh}{dt} + h = R x_1 \quad (P 2)$$

(P 2) là phương trình vi phân bậc nhất với biến độc lập h , còn x_1 là tham số đầu vào với quy luật biến thiên có thể khác nhau, ví dụ dạng hằng số hoặc hình sin (hình -P2).



Hình P 2: Ví dụ về quy luật biến thiên theo thời gian của đại lượng vào x_1

Nghiệm tổng quát của phương trình trên có dạng

$$h = C_1 e^{-t/\tau} + R x_1 \quad (P 3)$$

trong đó, $\tau = AR$ được gọi là hằng số thời gian.

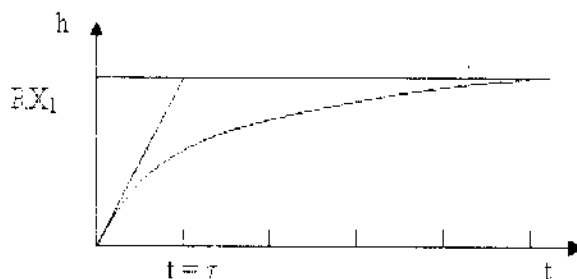
Vì tại thời điểm ban đầu $t = 0$ có $h = 0$, nên

$$0 = C_1(1) + R x_1 \rightarrow C_1 = -R x_1$$

và ta có nghiệm cuối cùng

$$h = R x_1 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (P 4)$$

Hằng số RX_1 xác định giá trị ổn định mà h đạt được sau thời gian đủ lớn. Hằng số thời gian τ càng lớn thì hệ thống càng lâu đạt tới trạng thái ổn định. Về mặt vật lý, chúng ta thấy bể càng rộng (A lớn) và sức cản của van càng cao (R lớn) thì τ càng lớn.



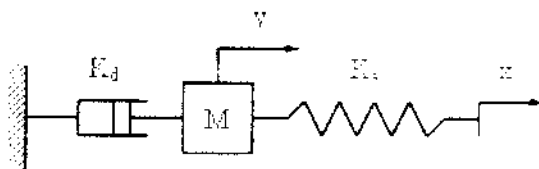
Hình P 3: Phản ứng của hệ thống khi đại lượng vào là hằng số

P1.2. Mô tả hệ thống dao động có lực cản

Trên hình P 4 là sơ đồ hệ dao động, gồm khối lượng tập trung M , lò xo có độ cứng K_s và giảm chấn có hệ số K_d . Nếu tác động một lực $K_x x$ vào đầu lò xo thì khối lượng M sẽ dao động với biên độ y . Phương trình vi phân mô tả dao động có dạng

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + K_d \frac{dy}{dt} + K_s y = K_x x \quad (P 5)$$

Trong phương trình trên, x là đại lượng vào, y là đại lượng ra biểu hiện phản ứng của hệ trước sự thay đổi của x .



Hình P 4: Sơ đồ hệ dao động gồm khối lượng - lò xo - giảm chấn

Phương trình đặc trưng của (P 5) có dạng:

$$Ms^2 + K_d s + K_s = 0$$

trong đó, s là toán tử vi phân.

Phương trình đặc trưng có 2 nghiệm là

$$s_{1,2} = \frac{-K_d}{2M} \pm \frac{\sqrt{K_d^2 - 4MK_s}}{2M} \quad (P 6)$$

Tuỳ theo các tham số M , K_d , K_s có thể xảy ra 4 trạng thái sau của hệ:

P1.2.1. Dao động không có cản

Nếu hệ không có giảm chấn (hay hệ số cản $K_d = 0$) thì phương trình đặc trưng trở thành

$$Ms^2 + K_s = 0$$

và có 2 nghiệm ảo là

$$s_{1,2} = \pm j\sqrt{\frac{K_s}{M}}$$

Nghiệm của phương trình vi phân (P 5) có dạng hàm tuần hoàn không tắt

$$y = C_1 \sin \omega_n t + C_2 \cos \omega_n t + X \quad (P 7)$$

với tần số dao động riêng $\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M}}$ và được biểu diễn trong hình P 5, a.

P1.2.2. Dao động có cản với hệ số cản bé hơn hệ số cản giới hạn

Khi có phần tử giảm chấn, phương trình đặc trưng có nghiệm:

$$s_{1,2} = -a \pm j\omega_d$$

trong đó

$$a = \frac{K_d}{2M}; \quad \omega_d = \frac{\sqrt{4MK_s - K_d^2}}{2M}$$

Đại lượng ω_d là tần số dao động riêng của hệ có giảm chấn. Phương trình dao động có dạng:

$$y = e^{-at}(C_1 \sin \omega_d t + C_2 \cos \omega_d t) + X \quad (P 8)$$

Đó là phương trình dao động tắt dần, như biểu diễn trong hình P 5, b.

P1.2.3. Dao động có cản với hệ số cản bằng hệ số cản giới hạn

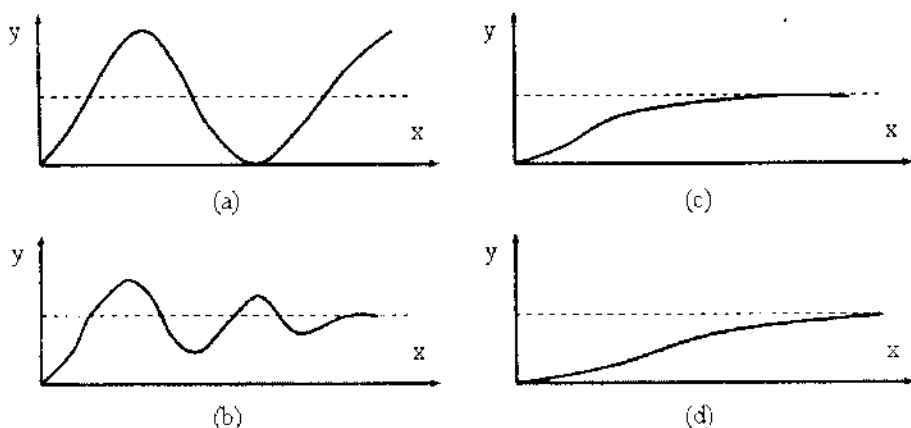
Đó là trường hợp đặc biệt của dao động có cản, khi $K_d^2 = 4MK_s$.

Phương trình đặc trưng có nghiệm kép:

$$s_{1,2} = \frac{-K_d}{2M} \pm 0$$

và nghiệm của phương trình vi phân có dạng

$$y = C_1 e^{-at} + C_2 t e^{-at} + X \quad (P 9)$$



Hình P 5: Các dạng phản ứng của hệ dao động a) không có cản, b) có cản, c) cản ở trạng thái tới hạn, d) cản quá giới hạn.

Đồ thị biểu diễn phản ứng của hệ thống có dạng như hình P5, c. Như thấy trong phương trình và trên đồ thị, hệ thống tiến đến trạng thái cân bằng mà không có dao động.

PI.2.4. Dao động có cản với hệ số cản lớn hơn hệ số cản giới hạn

Dạng phản ứng này xảy ra khi $K_d^2 > 4MK_s$, nghĩa là hệ số cản lớn hơn giá trị tới hạn. Phương trình đặc trưng có 2 nghiệm phức:

$$S_{1,2} = -a \pm b$$

trong đó

$$a = \frac{K_d}{2M}; b = \frac{\sqrt{K_d^2 - 4MK_s}}{2M}$$

Nghiệm của phương trình vi phân có dạng

$$y = C_1 e^{(-a+ib)t} + C_2 e^{(-a-ib)t} + X \quad (P 10)$$

Đồ thị phản ứng có dạng tương tự như trong trường hợp cản tới hạn nhưng thời gian để hệ đạt đến trạng thái cân bằng dài hơn (xem hình P5, d).

Hai mô hình giới thiệu ở trên chỉ là các ví dụ đơn giản về hệ thống vật lý. Việc giải trực tiếp các phương trình vi phân chỉ có thể thực hiện được với các mô hình đơn giản như vậy. Các hệ thống công nghiệp thường được tổ hợp từ các hệ thống đơn giản hơn hoặc các phần tử, khâu. Để diễn tả và khảo sát các thông số của chúng cần phải sử dụng các công cụ

riêng. Phần sau đây giới thiệu công cụ truyền thống nhưng vẫn thông dụng để khảo sát các hệ điều khiển.

P2. HÀM TRUYỀN VÀ SƠ ĐỒ KHỐI

P2.1. Hàm truyền

Hàm truyền (của một hệ thống hoặc của một phần tử) được định nghĩa là tỷ số giữa thông số ra (*output*) và thông số vào (*input*) .

Hàm truyền của một phần tử được xác định qua các bước sau:

1. Thiết lập phương trình vi phân (tuyến tính) mô tả phản ứng của hệ thống;

2. Viết phương trình vi phân dưới dạng hàm của *toán tử vi phân* s . Toán tử s còn được gọi là *biến Laplace*.

3. Hàm truyền là tỷ số giữa thông số ra và thông số vào với biến s .

Chúng ta sẽ áp dụng thủ tục trên vào 2 mô hình trong mục P1.

P2.1.1. Trường hợp hệ thống thủy lực

Ta viết lại phương trình (P 2) với chú ý rằng h là hàm của thời gian t

$$AR \frac{dh}{dt} + h = Rx_i$$

Chuyển phương trình sang dạng hàm Laplace:

$$ARsh(s) + h(s) = Rx_i(s) \rightarrow (ARs + 1)h(s) = Rx_i(s)$$

Vậy hàm truyền của hệ thống như sau

$$\frac{h(s)}{x_i(s)} = \frac{R}{ARs + 1} \quad (P 11)$$

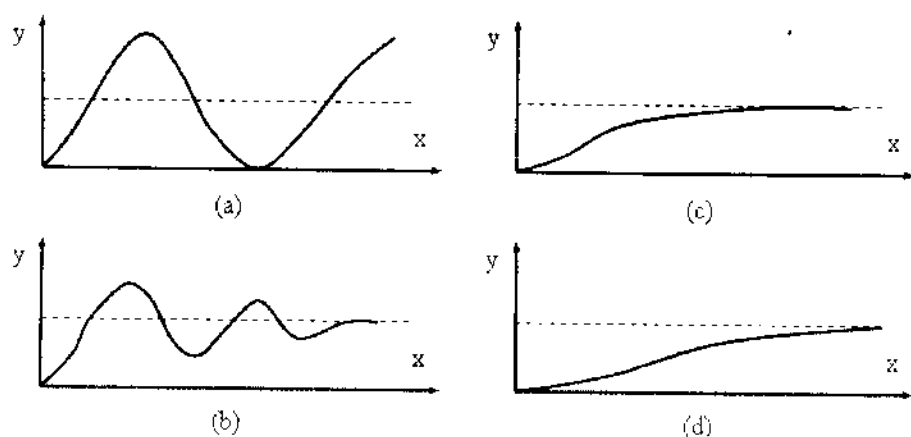
P2.1.2. Trường hợp hệ thống dao động

Từ phương trình vi phân (P 5)

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + K_f \frac{dy}{dt} + K_s y = K_s x$$

Chuyển sang hàm Laplace

Chính xác hơn, là tỷ số giữa Laplace của thông số ra với Laplace của thông số vào với điều kiện tất cả các điều kiện ban đầu bằng không.



Hình P 5: Các dạng phản ứng của hệ dao động a) không có cản, b) có cản, c) cản ở trạng thái tới hạn, d) cản quá giới hạn.

Đồ thị biểu diễn phản ứng của hệ thống có dạng như hình P5, c. Như thấy trong phương trình và trên đồ thị, hệ thống tiến đến trạng thái cân bằng mà không có dao động.

P1.2.4. Dao động có cản với hệ số cản lớn hơn hệ số cản giới hạn

Dạng phản ứng này xảy ra khi $K_d^2 > 4MK_s$, nghĩa là hệ số cản lớn hơn giá trị tới hạn. Phương trình đặc trưng có 2 nghiệm phức:

$$S_{1,2} = -a \pm b$$

trong đó

$$a = \frac{K_d}{2M}; b = \frac{\sqrt{K_d^2 - 4MK_s}}{2M}$$

Nghiệm của phương trình vi phân có dạng

$$y = C_1 e^{(-a+b)t} + C_2 e^{(-a-b)t} + X \quad (P 10)$$

Đồ thị phản ứng có dạng tương tự như trong trường hợp cản tới hạn nhưng thời gian để hệ đạt đến trạng thái cân bằng dài hơn (xem hình P5, d).

Hai mô hình giới thiệu ở trên chỉ là các ví dụ đơn giản về hệ thống vật lý. Việc giải trực tiếp các phương trình vi phân chỉ có thể thực hiện được với các mô hình đơn giản như vậy. Các hệ thống công nghiệp thường được tổ hợp từ các hệ thống đơn giản hơn hoặc các phần tử, khâu. Để diễn tả và khảo sát các thông số của chúng cần phải sử dụng các công cụ

$$Ms^2 y(s) + K_d s y(s) + K_s y(s) = K_s x(s)$$

$$\rightarrow (Ms^2 + K_d s + K_s) y(s) = K_s x(s)$$

Cuối cùng, có hàm truyền

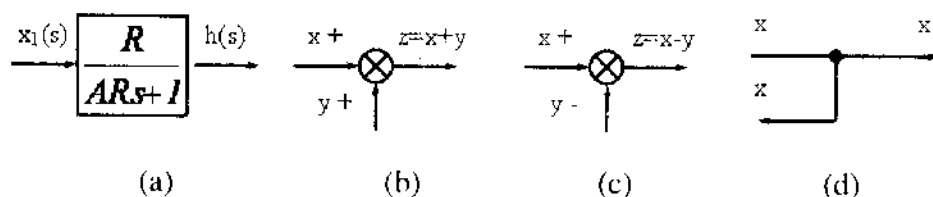
$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K_s}{Ms^2 + K_d s + K_s} \quad (P 12)$$

Việc xác định hàm truyền của hệ thống phức tạp hơn xác định hàm truyền của các phần tử đơn lẻ. Trước khi xác định hàm truyền của hệ thống, thường phải đưa sơ đồ khối về dạng tối giản nhờ các quy tắc biến đổi tương đương sơ đồ khối (Block Diagram Algebra), được trình bày dưới đây.

P2.2. Sơ đồ khối

P2.2.1. Kết cấu của sơ đồ khối

Sơ đồ khối là công cụ mô tả trực quan kết cấu của hệ thống (hình P 6). Nó gồm các phần tử cơ bản sau:



Hình P 6: Các phần tử cơ bản của sơ đồ khối

- Khối (block) thường là hình chữ nhật, trong có ghi hàm truyền để biểu diễn một phần tử của hệ thống.

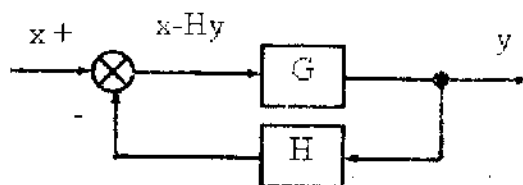
- Các mũi tên chỉ hướng truyền của các đại lượng, đồng thời cũng thể hiện hướng diễn tiến của quá trình.

- Các khâu cộng biểu thị điểm cộng (trừ) các đại lượng. Nó cũng dùng làm khâu so sánh trong sơ đồ điều khiển có phản hồi.

- Các điểm rẽ nhánh biểu thị sự rẽ nhánh tín hiệu. Giá trị của đại lượng không thay đổi sau khi rẽ nhánh.

Từ các phần tử trên chúng ta có thể thiết lập các sơ đồ khối.

Trên hình P7 là ví dụ về một sơ đồ khối. Đó là hệ điều khiển có phản hồi với các thông số vào là x , ra là y . Hàm truyền trong nhánh chính (thuận) là G , nghĩa là: $y = Gx$



Hình P 7: Ví dụ về sơ đồ khối

Tại đầu ra có một điểm rẽ nhánh: một nhánh ra, còn một nhánh đưa về mạch phản hồi. Nhánh phản hồi lấy tín hiệu y , qua một khâu chuyển đổi (*Transducer*) có hàm truyền H . Khâu cộng, bây giờ là khâu so sánh, tạo ra tín hiệu điều khiển $x - Hy$ để điều khiển quá trình.

P2.2.2. Biến đổi tương đương sơ đồ khối

Phép biến đổi tương đương sơ đồ khối cho phép xác định hàm truyền của hệ thống phức tạp, vì vậy có thể thay thế cả hệ thống bằng một phần tử tương đương. Nó dựa trên nguyên tắc chung của các phép tính đại số truyền thống.

Với một hệ thống đơn giản, ví dụ như trong hình P 7, có thể xác định trực tiếp hàm truyền của nó như sau.

Tín hiệu điều khiển nhận được sau khâu cộng bằng $x - Hy$. Đối với mạch chính, ta có quan hệ

$$y = G(x - Hy) = Gx - GHy$$

$$y(1 + GH) = Gx$$

Từ đây nhận được hàm truyền

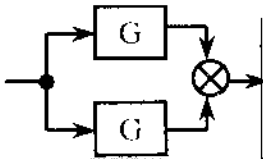
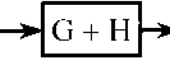
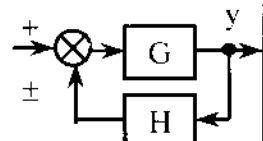
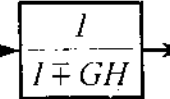
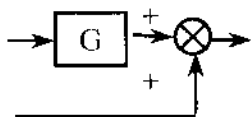
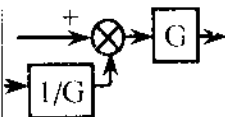
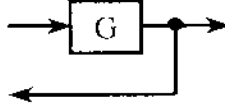
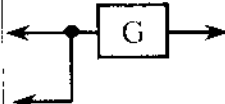
$$\frac{y}{x} = \frac{1}{1 + GH} \quad (P 13)$$

Đối với một sơ đồ phức tạp cần áp dụng các phép biến đổi tương đương. Có 5 phép biến đổi cơ bản như trong bảng P1.

Việc biến đổi một sơ đồ phức tạp thành sơ đồ đơn giản về cơ bản qua 4 bước sau:

1. Gộp nhóm các khối nối tiếp.
2. Gộp nhóm các khối song song.
3. Chuyển vòng điều khiển có phản hồi cơ bản thành một khối.
4. Chuyển các khâu cộng về phía trước, các điểm rẽ nhánh về phía sau.

Bảng P1: Các quy tắc biến đổi tương đương sơ đồ khối

Phương pháp biến đổi	Sơ đồ ban đầu	Kết quả	Giải thích
Gộp nhóm các khối nối tiếp			Hàm truyền tương đương bằng tích các hàm truyền
Gộp nhóm các khối song song			Hàm truyền tương đương bằng tổng các hàm truyền
Thay thế tương đương vòng điều khiển có phản hồi			
Chuyển khâu cộng về trước			
Chuyển điểm rẽ nhánh về sau			

P3. BIẾN ĐỔI LAPLACE

Phép biến đổi Laplace được áp dụng để chuyển các phương trình vi phân với biến t thành phương trình đại số với biến s . Nhờ vậy, thay vì phải giải các phương trình vi phân, chúng ta chỉ phải giải phương trình đại số.

Biến đổi Laplace của hàm $f(t)$ được định nghĩa như sau:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (P 14)$$

trong đó s là biến phức, dạng : $s = a + jb$. $F(s)$ còn được gọi là hàm ảnh của nguyên hàm $f(t)$.

Để tránh việc tính các tích phân dạng (P14), người ta thường dùng bảng biến đổi Laplace của các hàm cơ bản, một số trong chúng được kê trong bảng P2.

Bảng P2: Biến đổi Laplace của một số hàm thông dụng

Hàm f(t)	Laplace F(s)	Hàm f(t)	Laplace F(s)
1	$\frac{1}{s}$	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
t	$\frac{1}{s^2}$	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
t ⁿ	$\frac{n!}{s^{n+1}}$	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
e ^{-at}	$\frac{1}{s+a}$	dy/dt	$sy(s) - y(t=0)$
te ^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$	d ² y/dt ²	$s^2y(s) - sy(t=0) - \frac{dy(t=0)}{dt}$
sin ωt	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$		

Ví dụ: Biến đổi Laplace hàm sau, với điều kiện ban đầu: y=3 và dy/dt=0 tại t=0

$$\frac{dy}{dt} + 5y = 0$$

Theo bảng P2, ta có

$$sy(s) - 3 + 5y(s) = 0$$

$$(s+5)y(s) = 3$$

Vậy:
$$y(s) = \frac{3}{s+5} = 3 \frac{1}{s+5}$$

Lại theo bảng P2, ta có lời giải của phương trình vi phân ban đầu:

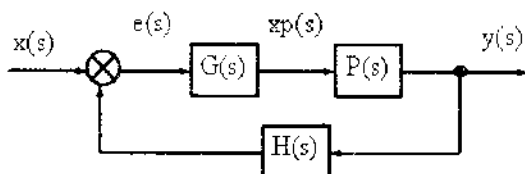
$$y = 3e^{-5t}$$

P4. TÁC ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN

Trên hình P7 đã đưa ra sơ đồ khối của một hệ điều khiển có phản hồi, trong đó G là hàm truyền của nhánh thuận. Trong các ứng dụng điển hình về điều khiển quá trình, thường nhánh thuận có 2 khâu (xem hình P8). Khâu thứ nhất được gọi là khâu điều khiển (*Controller Unit*), có hàm truyền là $C(s)$. Khâu thứ hai có hàm truyền của bản thân quá trình, ký hiệu là $P(s)$. $C(s)$ phải có tác động, sao cho tín hiệu ra của $P(s)$ có giá trị mong muốn. So sánh các sơ đồ trên hình P7 và P8, có thể nhận ra quan hệ

$$G(s) = C(s)P(s)$$

Tác động của khâu điều khiển $C(s)$ để đạt được tín hiệu ra mong muốn được gọi là *tác động điều khiển* (*Control Action*). Có 4 kiểu tác động điều khiển cơ bản, có thể được dùng độc lập hoặc kết hợp với nhau:



Hình P 8: Sơ đồ khối điều khiển quá trình

- Điều khiển tỷ lệ, ký hiệu là P (*Proportional Control*).
- Điều khiển tích phân, ký hiệu là I (*Integral Control*).
- Điều khiển vi phân, ký hiệu là D (*Derivative Control*).
- Điều khiển đóng mở (*On/Off Control*).

P4.1. Điều khiển tỷ lệ

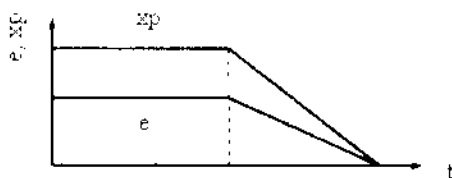
Trong điều khiển tỷ lệ, tín hiệu ra x_p tỷ lệ với tín hiệu vào e , nghĩa là:

$$x_p = Ke$$

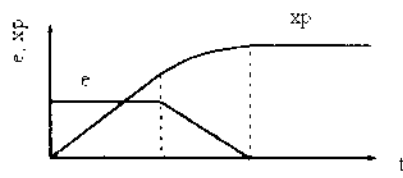
trong đó K là hệ số tỷ lệ và là hằng số. Khi phân tích hệ thống, thường viết biểu thức trên dưới dạng hàm truyền:

$$\frac{x_p(s)}{e(s)} = K \quad (P\ 15)$$

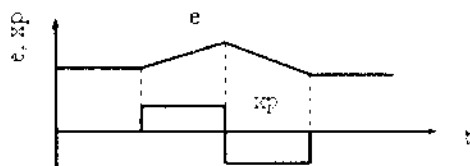
Giá trị K được gọi là tỷ số truyền của khâu điều khiển. Biến thiên của tín hiệu điều khiển e (trong mạch điều khiển có phản hồi, đó là sai lệch mà khâu so sánh đưa ra) và tín hiệu ra x_p theo thời gian được biểu diễn trên đồ thị, hình P9, a.



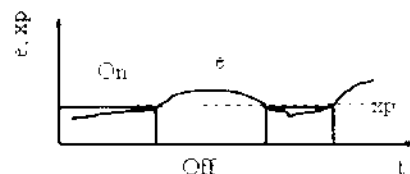
a: Điều khiển tỷ lệ (P)



b: Điều khiển tích phân (I)



c: Điều khiển vi phân (D)



d: Điều khiển đóng mở

Hình P 9: Các dạng tác động điều khiển

P4.2. Điều khiển tích phân

Với tác động điều khiển này, tín hiệu ra tỷ lệ với tích phân theo thời gian của tín hiệu vào, nghĩa là:

$$x_p = K \int e dt \quad (P 16)$$

trong đó K là tỷ số truyền của khâu điều khiển tích phân.

Hàm truyền của khâu có dạng:

$$\frac{x_p(s)}{e(s)} = \frac{K}{s} \quad (P 17)$$

Biến thiên theo thời gian của tín hiệu vào và ra được biểu diễn trên đồ thị hình P9,b. Nếu sai lệch $e > 0$ thì tín hiệu ra x_p tăng. Nếu $e = 0$ thì x_p là hằng số. Muốn x_p giảm thì e phải có giá trị âm. Điều đó dẫn đến xu hướng dao động của tín hiệu ra.

P4.3. Điều khiển vi phân

Trong điều khiển vi phân, tín hiệu ra tỷ lệ với tốc độ biến thiên của tín hiệu vào, nghĩa là:

$$x_p = K \frac{de}{dt} \quad (P 18)$$

trong đó, K là tỷ số truyền của khâu điều khiển vi phân.

Hàm truyền có dạng:

$$\frac{x_p(s)}{e(s)} = Ks \quad (P\ 19)$$

Sự biến thiên theo thời gian của tín hiệu vào và tín hiệu ra được biểu diễn trên hình P9, c. Ta thấy, kể cả khi tồn tại sai lệch $e \neq 0$ thì tín hiệu ra cũng có thể bằng 0, nghĩa là không có phản ứng của hệ thống. Đó là nhược điểm của điều khiển vi phân. Ưu điểm của nó là giảm sai số tĩnh của hệ thống, nghĩa là mỗi khi có sự biến thiên của tín hiệu vào thì hệ thống lập tức phản ứng để duy trì sự ổn định. Thường khâu điều khiển vi phân được dùng kết hợp với hai kiểu điều khiển trên.

P4.4. Điều khiển đóng mở

Điều khiển đóng mở (xem hình P9, d) làm việc trong 2 trạng thái phân biệt: Khi tín hiệu vào nhỏ hơn giá trị đặt thì bộ điều khiển đóng, tín hiệu ra đạt giá trị x_p . Khi tín hiệu vào lớn hơn giá trị đặt thì bộ điều khiển ngắt, tín hiệu ra bằng 0. Thực tế, hệ thống chỉ phản ứng khi sai khác trị tín hiệu thực và giá trị đặt đạt tới giá trị nhất định. Thông số này được dùng để đánh giá độ nhạy của hệ điều khiển.

P4.5. Điều khiển kết hợp

Mỗi kiểu điều khiển trình bày ở trên có ưu và nhược điểm riêng. Ví dụ, điều khiển tích phân có khả năng khắc phục nhanh sai lệch, nhưng khó khắc phục sai số tĩnh; còn điều khiển vi phân phạm sai số tĩnh nhỏ nhưng thời gian đạt tới trạng thái ổn định thường dài. Để đạt được tác động điều khiển như ý muốn, thường người ta kết hợp các kiểu điều khiển trên. Chúng ta hay gặp các phương án phối hợp sau:

- Điều khiển tỷ lệ - tích phân (PI) gồm nhánh tỷ lệ và nhánh tích phân song song với nhau. Hàm truyền của nó có dạng:

$$\frac{x_p(s)}{e(s)} = K_1 + \frac{K_2}{s} \quad (P\ 20)$$

- Điều khiển tỷ lệ - vi phân (PD) có hàm truyền dạng:

$$\frac{x_p(s)}{e(s)} = K_1 + K_2s \quad (P\ 21)$$

- Điều khiển tỷ lệ - vi phân - tích phân (PID) có hàm truyền dạng:

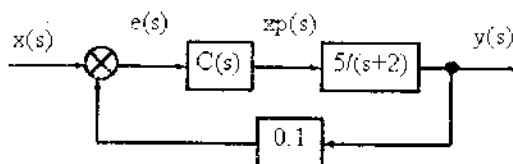
$$\frac{x_p(s)}{e(s)} = K_I + \frac{K_2}{s} + K_3 s \quad (P.22)$$

P4.6. Ví dụ về tác động điều khiển

Để thấy rõ vai trò của tác động điều khiển, chúng ta xét ví dụ điều khiển quá trình sau:

Quá trình được đặc trưng bởi hàm truyền $\frac{5}{s+2}$; khâu

phản hồi có hàm truyền $0,1$; khâu điều khiển có hàm truyền $C(s)$. Hàm truyền chung của hệ thống được tính nhờ phép biến đổi tương đương sơ đồ khối:



Hình P.10: Sơ đồ khối hệ điều khiển

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{5C(s)}{s+2+0,5C(s)}$$

Tín hiệu vào là hằng số: $x = 4,0$ biến đổi Laplace $x(s) = \frac{4}{s}$. Xét $C(s)$ với các kiểu điều khiển khác nhau.

1- Trường hợp điều khiển tỷ lệ với $C(s) = 2,0$:

Hàm truyền của hệ thống:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{5 \cdot 2}{s+2+0,5 \cdot 2} = \frac{10}{s+3}$$

$$y(s) = x(s) \frac{10}{s+3} = \frac{4}{s} \cdot \frac{10}{s+3} = \frac{40}{s(s+3)} = \frac{13,33}{s} - \frac{13,33}{s+3}$$

$$y = 13,33(1 - e^{-3t})$$

Phản ứng của hệ thống có dạng như hình P11, a.

2- Trường hợp điều khiển tích phân với $C(s) = 2/s$

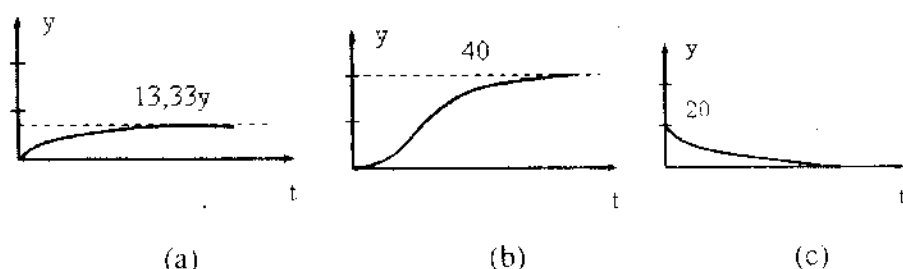
Hàm truyền của hệ thống có dạng:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{\frac{2}{s} \cdot \frac{5}{s+2}}{1 + 0,1 \frac{10}{s(s+2)}} = \frac{10}{s(s+2)+1} = \frac{10}{s^2 + 2s + 1} = \frac{10}{(s+1)^2}$$

$$y(s) = \frac{4}{s} \cdot \frac{10}{(s+1)^2} = \frac{40}{s} - \frac{40}{(s+1)^2} - \frac{40}{s+1}$$

$$y = 40(1 - te^{-t} - e^{-t})$$

Phản ứng của hệ thống có dạng như hình P11, b.



Hình P 11: Phản ứng của hệ thống với tác động điều khiển khác nhau

3- Trường hợp điều khiển vi phân với $C(s) = 2s$:

Hàm truyền của hệ thống:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{10s}{s+2+s} = \frac{5s}{s+1}$$

$$y(s) = \frac{4}{s} \cdot \frac{5s}{s+1} = \frac{20}{s+1}$$

$$y = 20e^{-t}$$

Phản ứng của hệ thống có dạng như hình P11, c.

Ta thấy phản ứng của hệ thống trong các trường hợp là rất khác nhau. Khi điều khiển tỷ lệ, hệ thống nhanh chóng đạt trạng thái xác lập, bằng 13,33. Khi điều khiển tích phân, giá trị xác lập bằng 40, đạt được chậm hơn. Trong cả 2 trường hợp, giá trị xác lập phụ thuộc tỷ số truyền K của khâu điều khiển. Khi điều khiển vi phân, giá trị xác lập bằng 0 và không phụ thuộc vào K .

P5. PHÂN TÍCH HỆ THỐNG

Một hệ thống điều khiển muốn được áp dụng trong thực tế phải đạt những chỉ tiêu kỹ thuật nhất định. Phân tích hệ thống có nhiệm vụ đánh giá các chỉ tiêu kỹ thuật của hệ thống để xác định xem nó có đạt yêu cầu sử dụng hay không.

Để đánh giá một hệ thống điều khiển, người ta dựa vào 3 yếu tố cơ bản, là tính ổn định (*stability*), trạng thái xác lập (*steady-state performance*) và trạng thái quá độ (*transient performance*). Nói chung, tính ổn định đánh giá hệ thống có làm việc được hay không còn hai yếu tố sau nói lên phẩm chất của hệ thống.

P5.1. Tính ổn định của hệ thống

Về lý thuyết, một hệ thống được gọi là *ổn định* nếu phản ứng đầu ra không tiến tới vô hạn khi giá trị tín hiệu vào được giới hạn. Trên thực tế phản ứng đầu ra không được vượt quá một giá trị cho phép. Chúng ta nhận biết một hệ thống ổn định nếu sự biến động của tín hiệu ra giảm dần theo thời gian khi tín hiệu vào là hằng số.

Ví dụ, hệ thống được biểu diễn bởi phương trình

$$y = C - C_1 e^{at} \quad (P\ 23)$$

không ổn định do thành phần thứ hai (hàm mũ) tiến tới âm vô tận.

Hệ thống với phương trình:

$$y = C - e^{at}(C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t) \quad (P\ 24)$$

cũng không ổn định, vì tín hiệu ra dao động dưới tác động của hàm sin và hàm cosin, nhưng biên độ dao động tiến tới vô tận do tác động của hàm mũ có hệ số dương.

Để dự báo về tính ổn định, ta khảo sát kỹ hơn các trường hợp trên.

Phương trình (P 23) được suy từ nghiệm $s = +a$ của phương trình đặc trưng:

$$s - a = 0$$

Phương trình (P 24) được suy từ 2 nghiệm phức:

$$s = a - j\omega \quad \text{và} \quad s = a + j\omega$$

của phương trình đặc trưng:

$$s^2 - 2as + (\omega^2 + a^2) = 0$$

hay:

$$(s - a + j\omega)(s - a - j\omega) = 0$$

Rõ ràng, nguyên nhân gây nên sự mất ổn định của hệ thống thứ nhất là nghiệm thực, dương của phương trình đặc trưng, còn của hệ thống thứ hai là phần thực dương của các nghiệm phức. Từ đó có thể rút ra kết luận sau:

Điều kiện cần và đủ để một hệ tuyến tính ổn định là tất cả các nghiệm của phương trình đặc trưng phải có phần thực âm.

Điều đó có nghĩa là, dù chỉ một trong số các nghiệm có phần thực dương (kể cả nghiệm thực dương) thì hệ thống sẽ không ổn định.

Từ đây cũng có thể giả định về hệ có phương trình đặc trưng

$$s^2 + \omega^2 = 0$$

Nó sẽ có 2 nghiệm ảo là $s = \pm j\omega$. Với tín hiệu vào hằng số, nó dẫn tới lời giải:

$$y = C + C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t$$

Phương trình trên mô tả dao động vĩnh cửu xung quanh giá trị $y = C$. Chúng ta gọi đó là trường hợp *giới hạn* của sự ổn định. Nếu biểu diễn các nghiệm lên mặt phẳng phức thì chúng ta có nhận xét, rằng *điều kiện để hệ ổn định là tất cả các điểm biểu diễn nghiệm phương trình đặc trưng của nó đều phải nằm bên trái trục ảo*. Trục ảo bây giờ là *biên giới ổn định*. Nếu lùi biên giới ổn định về phía trái trục ảo một khoảng d nào đó thì ta có một khoảng *dự trữ ổn định*.

Khảo sát tính ổn định căn cứ vào nghiệm của phương trình đặc trưng là phương pháp cơ sở nhưng không phải là duy nhất. Có những phương pháp khác, mô tả gián tiếp điều kiện ổn định dưới dạng các *tiêu chuẩn ổn định*. Có thể tìm hiểu về chúng trong các tài liệu lý thuyết điều khiển tự động.

P5.2. Trạng thái xác lập

Trạng thái xác lập chính là trạng thái cân bằng tĩnh hoặc cân bằng động của hệ thống. Về lý thuyết, hệ thống được coi là ở trạng thái xác lập khi tín hiệu ra $y(t)$ của nó đạt được một cách ổn định giá trị cân y_0 (hình P12), nghĩa là:

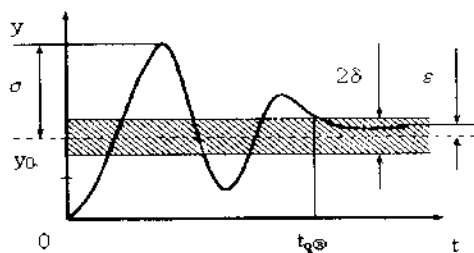
$$y_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$$

Để xác định giá trị y_0 , người ta dùng định lý, gọi là định lý giá trị cuối cùng:

Nếu tồn tại $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$ thì

$$y_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s)$$

trong đó, $Y(s)$ là biến đổi Laplace của $y(t)$.



Hình P 12: Sơ đồ xác định các thông số phẩm chất của hệ thống

Trên thực tế, có tồn tại một sai số

$$\varepsilon = \left| \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - y_0 \right| > 0$$

Sai số đó được gọi là *sai số tĩnh* và là một thông số đánh giá phẩm chất của hệ thống ở trạng thái tĩnh.

P5.3. Trạng thái quá độ

Về lý thuyết, trạng thái tĩnh của hệ thống chỉ đạt được khi $t \rightarrow \infty$. Trên thực tế, trạng thái xác lập được chấp nhận khi $y(t)$ tiến tới y_0 với sai số không vượt quá một trị số δ cho trước, thường bằng $2 \div 5\%$ giá trị y_0 . Thời gian để hệ đạt trạng thái đó được gọi là *thời gian quá độ* t_{qd} . Đó là một thông số chất lượng của hệ thống, càng nhỏ càng tốt.

Một thông số nữa được dùng để đánh giá chất lượng của hệ thống là *giá trị vượt* σ (hình P12). Thường phải hạn chế trị số này trong khoảng $30 \div 50\%$ giá trị của y_0 .

BẢNG TRA CỨU

- Đa thức nội suy, 62
- Động cơ, 138
- Đường dịch chuyển, 57
- Động học tay máy
 - bài toán ngược, 42
 - bài toán thuận, 33
 - bài toán vận tốc, 44
- Động lực học
 - nhiệm vụ, 47
 - phương trình tổng quát, 76
- Điểm chốt, 62
- Điều khiển
 - độc lập, 79
 - điện áp, 88
 - có bù, 84
 - có bù trọng lực, 89, 95
 - có liên hệ ngược, 80
 - có phản hồi gia tốc, 83
 - có phản hồi vị trí, 81
 - có phản hồi vị trí và vận tốc, 82
 - contour, 98
 - dùng động lực học ngược, 91, 96
 - dòng điện, 89
 - momen, 89
 - phân loại, 74
 - PI, 86
 - PID, 86
 - PIDD², 86
 - tác động, 87
 - tập trung, 87
 - trong không gian công tác, 93
 - trong không gian khớp, 76
- Điều khiển động cơ, 141
 - động cơ điện, 141
 - động cơ thủy lực, 144
- Điều khiển tuyến tính, 184
- dầu do. *Xem cảm biến*
- Bộ nhớ, 164
- Bộ xử lý trung tâm, 164
- Bậc tự do, 13
- Biến Laplace, 189
- Board hệ thống
 - board động học, 162
 - board động lực học, 163
 - servo board, 163
- BUS, 161
- Cơ cấu tay kẹp, 120
 - cơ khí, 121
 - chân không và điện - từ, 126
 - dùng buồng đàn hồi, 128
 - khái niệm và phân loại, 120
 - phương pháp tính toán, 129
- Cell controller, 172
- Chuyển đổi thuận nhất, 30
- Chuyển động điểm - điểm, 58
- Chuyển động theo đường, 61
- CIM, 177
- CPU, 161
- Dao động
 - có lực cản, 187
 - không có lực cản, 187
- Denavit-Hartenberg
 - quy tắc, 34
 - ví dụ áp dụng, 37
- Encoder, 148
- EPROM, 161
- FMC, 10
- FMS, 10
- Góc Euler, 27
- Góc RPY, 29
- Hàm truyền, 189
- Hiệu quả kinh tế, 182

- Hiệu quả kinh tế quy đổi, 182
- Hệ thống cảm biến, 146
- Hệ thống ngắt, 161
- Jacobian
 - biểu thức, 45
 - giải tích, 46
 - hình học, 45
- Khuyếch đại công suất, 140
- Lagrange
 - động năng, 49
 - công thức chung, 47
 - thế năng, 51
 - ý nghĩa cơ học, 51
- Lyapunov, 89
- Mô tả tối thiểu của hướng, 27
- Ma trận quay
 - biểu thức toán học, 19
 - tổng hợp, 23
 - ý nghĩa, 22
- Manipulator. *Xem* tay máy
- Manufacturing cell, 172
- Manufacturing system, 172
- Mechatronics, 8
- Một số kết cấu điển hình của robot
 - kết cấu robot COAT-A-MATIC, 116
 - kết cấu robot HI-T-Hand Expert-2, 118
 - kết cấu robot MATBAC IRB-10, 114
 - kết cấu robot MP4, 111
 - kết cấu robot Unimate Mark II, 115
 - robot có điều khiển thích nghi, 118
 - robot cố định dùng tọa độ Decac và tọa độ trụ, 111
 - Robot cố định trên nền dùng tọa độ cầu, 115
 - robot treo, 117
- MRO. *Xem* Mô tả tối thiểu của hướng
- Newton-Euler, 52
- Nguồn cung cấp, 141
- Nguyên tố của đường dịch chuyển, 68
 - đường tròn, 70
 - đoạn thẳng, 69
- Object oriented programming, 160
- Offline programming, 161
- Path. *Xem* đường dịch chuyển
- Path Motion. *Xem* Chuyển động theo đường
- Path point. *Xem* điểm chốt
- Path primitives. *Xem* nguyên tố của đường dịch chuyển
- phần cứng, 161
- Point-to-point Motion. *Xem* chuyển động điểm - điểm
- Quỹ đạo, 57
 - trong không gian công tác, 67
 - trong không gian khớp, 57
- RAM, 161
- Resolver, 150
- Robot
 - arm, 12
 - articulations, 12
 - hand, 12
 - wrist, 12
- Robot
 - định nghĩa, 7
 - công nghiệp, 10
 - phân loại, 15
 - sơ đồ kết cấu, 10
 - shoulder, 12
- Robot hoá các tế bào sản xuất, 172

- Robot oriented programming, 160
- Robot trong sản xuất linh hoạt, 176
- Robotics**, 8
- Sơ đồ động lực học. Xem phương trình động lực học tổng quát
- Sơ đồ khối
 - bảng quy tắc biến đổi tương đương**, 192
 - biến đổi tương đương, 191
 - kết cấu, 190
- Sensor. Xem cảm biến
- Sensor lực, 152
- Sử dụng RBCN
 - Robot hoá thiết bị công nghệ, 167
- Sử dụng RBCN
 - robot hoá hệ thống sản xuất, 175
- Tác động điều khiển, 194
 - đóng mở, 196
 - tỷ lệ, 194
 - tỷ lệ - tích phân (PI), 196
 - tỷ lệ - vi phân - tích phân (PID), 197
 - tỷ lệ - vi phân (PD), 196
 - tích phân, 195
 - vi phân, 195
 - ví dụ, 197
- Tachometer. Xem Sensor vận tốc
- Tay máy, 11
 - kiểu dẻ cày, 13
 - kiểu anthropomorphic, 14
 - kiểu cầu, 14
 - kiểu SCARA, 14
 - kiểu trụ, 13
- Teach-in programming, 160
- Tensiometer. Xem Sensor lực
- Thông số kỹ thuật của RBCN, 98
 - đặc tính của bộ điều khiển, 103
 - số bậc tự do, 99
 - sức nâng, 98
 - tốc độ dịch chuyển, 102
 - vùng công tác, 100
- Thanh ghi, 161
- Thời hạn thu hồi vốn đầu tư, 183
- Thiết bị quan sát, 154
- Thiết bị vào / ra, 165
- Thiết kế và tổ hợp robot, 104
 - các công việc phải tiến hành, 106
 - các nguyên tắc chung, 104
 - phương pháp tổ hợp modul, 107
- Thế, vị trí, hướng của vật rắn, 18
- Tế bào sản xuất, 174
- Toán tử vi phân, 189
- Trạng thái quá độ, 201
- Trạng thái tĩnh, 201
- Trạng thái xác lập, 200
- Trajectory. Xem quỹ đạo
- Truyền dẫn cơ khí, 137
- Tự động hoá
 - cứng, 9
 - khả trình, 9
 - linh hoạt, 9
- Tính ổn định, 199
- Vector
 - quay quanh một điểm, 21
 - quay quanh một trục, 23
 - quay quanh trục bất kỳ, 25
- Vi nội suy, 67
- Vùng hoạt động, 40
- Vị trí và hướng trong không gian công tác, 72

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *U. Rembold,...*: Computer Integrated Manufacturing and Engineering; Wesley, 1993.
2. *П. Н. Беянин*: Промышленные роботы и их применение; Москва Машиностроение, 1983.
3. *А. А. Панова*: Обработка металлов резанием - Справочник технолога; Москва Машиностроение, 1988.
4. *Ю. Г. Козырев*: Промышленные роботы - Справочник; Москва Машиностроение, 1983.
5. *L. Sciavicco, B. Siciliano*: Modeling and Control of Robot Manipulators; McGraw-Hill, 1996.
6. *S. Brian Morriss*: Automated Manufacturing Systems; McGraw-Hill, 1995.
7. *Lung-Wen Tsai*: Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Wiley & Sons. Inc, 1999.
8. *Wolfram Stadler*: Analytical Robotics and Mechatronics. McGraw-Hill, 1995.

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU CHO LẦN IN THỨ HAI	3
CHƯƠNG 1: CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VÀ PHÂN LOẠI ROBOT	7
1.1. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VÀ PHÂN LOẠI ROBOT	7
1.1.1. Robot và Robotics	7
1.1.2. Robot công nghiệp (RBCN)	9
1.2. CẤU TRÚC CƠ BẢN CỦA RBCN	10
1.2.1. Kết cấu chung	10
1.2.2. Kết cấu của tay máy	12
1.3. PHÂN LOẠI ROBOT	15
1.3.1. Phân loại theo kết cấu	15
1.3.2. Phân loại theo điều khiển	15
1.3.3. Phân loại theo ứng dụng	16
CHƯƠNG 2: ĐỘNG HỌC TAY MÁY	18
2.1. VỊ TRÍ VÀ HƯỚNG CỦA VẬT RẮN TRONG KHÔNG GIAN	18
2.1.1. Hệ tọa độ vật	18
2.1.2. Ma trận quay	19
2.1.3. Phép quay một vector	21
2.2. PHÉP QUAY MỘT VECTOR QUANH MỘT TRỤC BẤT KỲ	23
2.2.1. Tổng hợp các ma trận quay	23
2.2.2. Phép quay quanh trục bất kỳ	25
2.2.3. Mô tả tối thiểu của hướng	27
2.3. PHÉP CHUYỂN ĐỔI THUẦN NHẤT	30
2.4. BÀI TOÁN THUẬN CỦA ĐỘNG HỌC TAY MÁY	33
2.4.1. Mô tả quy tắc <i>Denavit-Hartenberg</i>	34
2.4.2. Một số ví dụ áp dụng quy tắc <i>Denavit-Hartenberg</i>	37
2.4.3. Vùng hoạt động của phần công tác	39
2.5. BÀI TOÁN NGƯỢC CỦA ĐỘNG HỌC TAY MÁY	41
2.5.1. Cơ cấu 3 khâu phẳng	42
2.5.2. Cơ cấu cầu	43
2.6. BÀI TOÁN VẬN TỐC	44
2.6.1. <i>Jacobian</i> hình học	44
2.6.2. <i>Jacobian</i> giải tích	46
CHƯƠNG 3: ĐỘNG LỰC HỌC TAY MÁY	47
3.1. PHƯƠNG PHÁP <i>LAGRANGE</i>	47

3.1.1. Cơ sở chung	47
3.1.2. Tính động năng	49
3.1.3. Tính thế năng	51
3.1.4. Phân tích ý nghĩa cơ học của mô hình <i>Lagrange</i>	51
3.2. PHƯƠNG PHÁP NEWTON-EULER	52
3.2.1. Mô hình động lực học	52
3.2.2. Tính gia tốc của khâu	54
CHƯƠNG 4: CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN ROBOT	56
4.1. THIẾT KẾ QUỸ ĐẠO	56
4.1.1. Quỹ đạo trong không gian khớp	57
4.1.2. Quỹ đạo trong không gian công tác	67
4.2. ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG	74
4.2.1. Điều khiển trong không gian khớp	76
4.2.2. Điều khiển độc lập	79
4.2.3. Điều khiển tập trung	87
4.2.4. Điều khiển trong không gian công tác	93
CHƯƠNG 5: CƠ SỞ THIẾT KẾ VÀ LỰA CHỌN ROBOT	98
5.1. CÁC THÔNG SỐ KỸ THUẬT CỦA RBCN	98
5.1.1. Sức nâng của tay máy	98
5.1.2. Số bậc tự do của phần công tác	99
5.1.3. Vùng công tác	100
5.1.4. Độ chính xác định vị	101
5.1.5. Tốc độ dịch chuyển	102
5.1.6. Đặc tính của hệ điều khiển	103
5.2. THIẾT KẾ VÀ TỔ HỢP ROBOT	104
5.2.1. Các nguyên tắc chung	104
5.2.2. Các công việc phải tiến hành khi thiết kế robot	106
5.2.3. Thiết kế robot theo phương pháp tổ hợp modul	107
5.3. MỘT SỐ KẾT CẤU ĐIỂN HÌNH CỦA ROBOT	111
5.3.1. Robot cố định trên nền, dùng hệ tọa độ Đê-các và tọa độ trụ	111
5.3.2. Robot cố định trên nền, dùng hệ tọa độ cầu	115
5.3.3. Robot treo	117
5.3.4. Robot có điều khiển thích nghi	118
5.4. CƠ CẤU TAY KÉP	120
5.4.1. Khái niệm và phân loại tay kẹp	120
5.4.2. Kết cấu của tay kẹp	121
5.4.3. Phương pháp tính toán tay kẹp	129

CHƯƠNG 6: HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ROBOT	136
6.1. HỆ THỐNG CHẤP HÀNH	136
6.1.1. Truyền dẫn cơ khí	137
6.1.2. Động cơ	138
6.1.3. Khuếch đại công suất	140
6.1.3. Nguồn cung cấp chính	141
6.2. ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ SERVO	141
6.2.1. Điều khiển động cơ điện	141
6.2.2. Điều khiển động cơ thủy lực	144
6.3. HỆ THỐNG CẢM BIẾN	146
6.3.1. Khái niệm và phân loại cảm biến	146
6.3.2. Nguyên lý làm việc của một số loại sensor	148
6.4. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN	157
6.4.1. Kiến trúc chức năng	157
6.4.2. Môi trường lập trình	159
6.4.3. Cấu trúc phần cứng	161
CHƯƠNG 7: SỬ DỤNG ROBOT CÔNG NGHIỆP	167
7.1. CÁC LĨNH VỰC ỨNG DỤNG ĐIỂN HÌNH CỦA RBCN	167
7.2. CÁC HỆ THỐNG SẢN XUẤT CÓ SỬ DỤNG RBCN	167
7.2.1. Robot hoá các thiết bị công nghệ	167
7.2.2. Robot hoá các tế bào sản xuất	172
7.2.3. Robot hoá hệ thống sản xuất	175
7.2.4. Robot trong sản xuất linh hoạt	176
7.3. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN KINH TẾ KHI SỬ DỤNG RBCN	181
7.3.1. Xác định nhu cầu sử dụng robot	181
7.3.2. Tính toán hiệu quả kinh tế khi sử dụng RBCN	182
CHƯƠNG 8: TAY MÁY CÓ KẾT CẤU ĐỘNG HỌC SONG SONG	184
8.1. KHÁI NIỆM VÀ PHÂN LOẠI TAY MÁY SONG SONG	184
8.1.1. Khái niệm về tay máy song song	184
8.1.2. Phân loại tay máy song song	188
8.2. PHÂN TÍCH VỊ TRÍ CỦA TAY MÁY SONG SONG	192
8.2.1. Mô tả hình học của tay máy	193
8.2.2. Động học ngược	194
8.2.3. Động học thuận	195
8.3. JACOBIAN CỦA TAY MÁY SONG SONG	196
8.4. PHÂN TÍCH TÍNH VẪN VÀ ĐỘ CỨNG VỮNG CỦA TAY MÁY SONG SONG	197

8.4.1. Phân tích tĩnh tay máy song song	198
8.4.2. Độ cứng vững của tay máy song song	201
8.5. ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TAY MÁY SONG SONG	202
8.5.1. Phương pháp công khả dĩ	203
8.5.2. Phương pháp Lagrange	212
PHỤ LỤC: HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH	219
P1. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG	219
P1.1. Mô tả hệ thống thủy lực	220
P1.2. Mô tả hệ thống dao động có lực cản	221
P2. HÀM TRUYỀN VÀ SƠ ĐỒ KHỐI	224
P2.1. Hàm truyền	224
P2.2. Sơ đồ khối	225
P3. BIẾN ĐỔI LAPLACE	227
P4. TÁC ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN	229
P4.1. Điều khiển tỷ lệ	229
P4.2. Điều khiển tích phân	230
P4.3. Điều khiển vi phân	230
P4.4. Điều khiển đóng mở	231
P4.5. Điều khiển kết hợp	231
P4.6. Ví dụ về tác động điều khiển	232
P5. PHÂN TÍCH HỆ THỐNG	234
P5.1. Tính ổn định của hệ thống	234
P5.2. Trạng thái xác lập	235
P5.3. Trạng thái quá độ	236
BẢNG TRA CỨU	237
TÀI LIỆU THAM KHẢO	240

204032



GIÁ: 30.000đ