MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Trong rất nhiều thông số làm việc của hệ thống thì độ chính xác của robot được xếp vào nhóm suy hao theo thời gian, nghĩa là nó mất dần khi cơ cấu mòn dão, xuống cấp. Việc duy trì độ chính xác của thiết bị là điều kiện cần để tiếp tục khai thác robot vào công việc mà nó đang làm. Nếu có thể hiệu chuẩn robot giữ lại độ chính xác của nó sau mỗi chu kỳ bảo dưỡng để không phải thay thế thiết bị thì là việc làm có ý nghĩa kinh tế và kỹ thuật lớn. Đây là việc làm đòi hỏi chi phí tối thiểu, quy trình tối thiểu nhưng phải giữ được độ chính xác cho robot. Vòng điều khiển phản hồi chỉ có tác dụng trong phạm vi từng khâu nên hiệu chuẩn phải đảm bảo rằng ngay cả các sai số ngoài vòng phản hồi cũng đã được phát hiện và hiệu chuẩn lại một cách chính xác. Những ràng buộc trên làm cho bài toán hiệu chuẩn độ chính xác là một thách thức về mặt học thuật và thực hành. Với lí do đó, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài ***"Nghiên cứu phương pháp hiệu chuẩn robot công nghiệp trên cơ sở quỹ đạo thay thế"*** cho khóa học nghiên cứu sinh**.**

2. Mục đích nghiên cứu

Đo được sai số tổng hợp mà robot mắc phải trên khâu cuối;

Xây dựng được mô hình nội suy sai số và so sánh với kết quả đo để sử dụng sau khi đã rút thiết bị đo khi hiệu chuẩn xong;

Xây dựng thuật toán bù được sai số phần có quy luật trong điều kiện chi phí tối thiểu (chi phí thời gian, chi phí tài nguyên hệ thống, chi phí đo lường) giữ nguyên thói quen vận hành thiết bị. Quy trình này phải có tính ứng dụng thực tế cao, được chứng minh bằng các mô phỏng và thực nghiệm.

3. Phương pháp và phạm vi nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu: Các mô hình toán được xây dựng trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết, kết hợp với phần mềm tự xây dựng, mô phỏng số và thí nghiệm thực nghiệm được thực hiện nhằm kiểm chứng tính đúng đắn.

Đối tượng nghiên cứu: Robot chuỗi, robot lai.

Phạm vi nghiên cứu: Bài toán hiệu chuẩn sai số

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1 Ý nghĩa khoa học

Mô hình nội suy sai số trong không gian công tác trên cơ sở kết hợp thiết bị đo độc lập như camera hay bộ theo dõi laze-laser tracker bằng hàm dạng là một đóng góp mới, nó cho phép việc hiệu chuẩn thực hiện đo một lần làm việc chính xác trong cả chu kỳ bảo dưỡng kể cả sau khi rút thiết bị đo đi;

Thuật toán hiệu chuẩn bằng phương pháp thay thế quỹ đạo cũng là một đóng góp nữa, nó cho phép duy trì độ chính xác lâu dài của robot mà không làm thay đổi phần cứng hay phần mềm, chỉ có thay đổi nhỏ về quy trình khá dễ dàng nắm bắt.

4.2 Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu này hoàn toàn áp dụng ngay vào thực tiễn được mà không có yêu cầu gì đặc biệt.

Do số robot được ứng dụng vào sản xuất công nghiệp ngày càng gia tăng, việc ứng dụng quy trình hiệu chuẩn này là cần thiết. Làm chủ các

kỹ năng này đảm bảo các nhà sản xuất luôn duy trì được thiết bị có độ chính xác cần thiết với giá thành tối thiểu, là nhóm kỹ thuật không thể thay thế thông qua các chiến lược điều khiển vòng kín đơn thuần.

5. Đóng góp mới của luận án

Luận án có hai đóng góp mới là:

- Mô hình sai số trên cơ sở hàm dạng lý thuyết và hàm dạng thực nghiệm;

- Phương pháp thay thế quỹ đạo dùng hiệu chuẩn sai số (cả robot chuỗi và robot lai) ứng dụng được chứng minh có hiệu quả giảm sai số sau hiệu chuẩn tới trên 40%.

6. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận, kiến nghị và phụ lục, luận án được cấu trúc với bốn chương như sau:

Chương 1: Tổng quan về sai số và hiệu chuẩn sai số. Trong chương này luận án trình bày tổng quát về sai số và các nguồn gây sai số tại khâu cuối của robot. Các nguyên cứu trong và ngoài nước về đo lường sai số bằng thiết bị đo độc lập và các phương án hiệu chuẩn đã có tính đến thời điểm này.

Chương 2: Thiết bị và kỹ thuật đo sai số trong hiệu chuẩn robot. Chương này nói về lý thuyết cơ bản trong việc ứng dụng các công nghệ đo khác nhau nhằm phát hiện sai số trên khâu cuối (TCP) của robot, các ưu nhược điểm của từng phép đo đó, khả năng công nghệ của từng phép đo. Kỹ thuật nội suy sai số bằng hàm dạng lý thuyết và hàm dạng thực nghiệm để giảm chi phí đo.

Chương 3: Hiệu chuẩn sai số robot công nghiệp. Chương này trình bày quy trình hiệu chuẩn và nội dung phương pháp thay thế quỹ đạo dùng cho robot chuỗi, phương pháp thay thế quỹ đạo và đổi giá dùng trên robot lai. Phương pháp đồng bộ dữ liệu đo của thiết bị đo kiểm độc lập với dữ liệu đo của robot thực hiện bởi các encoder của nó để sẵn sàng cho bài toán phát hiện sai số khi so sánh dữ liệu hai kênh đo.

Chương 4: Mô phỏng và thực nghiệm. Chương này trình bày các kết quả tính toán, mô phỏng và thực nghiệm gắn với các lý thuyết đã trình bày ở các chương trước. Có hai phương pháp được minh họa bằng thực nghiệm với thiết bị đo của Cognex và của Leica, phương pháp còn lại được mô phỏng kiểm chứng cũng được trình bày trong chương này.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ SAI SỐ VÀ HIỆU CHUẨN SAI SỐ

1.1 Xu hướng phát triển của các ứng dụng robot trong công nghiệp

Báo cáo mới nhất của World Robotics cho thấy mức cao nhất mọi thời đại là 517.385 robot công nghiệp mới được lắp đặt vào năm 2021 tại các nhà máy trên khắp thế giới. Châu Á là thị trường lớn nhất thế giới về robot công nghiệp và Việt Nam trong những năm gần đây, số lượng robot được lắp mới tăng mạnh. Theo thống kê của tạp chí kinh tế số, Việt Nam vẫn ở đáy của chuỗi giá trị toàn cầu, lý do chính là chúng ta chủ yếu thực hiện công đoạn lắp ráp trong các chuỗi hoàn thiện sản phẩm, đây là phần có lợi nhuận rất thấp trong chuỗi giá trị 4.0, một trong những khó khăn chính ở đây là chất lượng nhân lực lao động của Việt Nam chỉ đạt 3.39 điểm trên thang 10. Chính vì những lý do nói trên, việc triển khai các nghiên cứu liên quan đến làm chủ kỹ thuật thiết kế, chế tạo và đặc biệt là khai thác, bảo trì robot công nghiệp đối với Việt Nam lúc này là cực kỳ quan trọng và cấp bách, nó cũng phù hợp về thời điểm bởi đây là lúc các ngành công nghệ cao đòi hỏi chất lượng lao động cao.Trong mục tiêu chung là nhanh chóng chiếm lĩnh các kỹ thuật robot biến chúng thành công cụ lao động chủ lực trong cuộc cách mạng 4.0, đề tài này đặt mục tiêu hiệu chuẩn độ chính xác của robot công nghiệp, tức là nâng cao độ chính xác của robot ngay sau khi xuất xưởng và trong quá trình sử dụng thông qua các kỹ thuật mà tác giả đề xuất.

1.2 Một số thuật ngữ, khái niệm về độ chính xác và chính xác lặp

Một robot công nghiệp được đặc trưng bởi các tham số quan trọng chia ra làm hai nhóm như sau:

Nhóm thứ nhất bao gồm số bậc tự do, khả năng tải, vùng làm việc bao gồm hình dáng và thể tích công tác, khả năng thực hiện các liên kết ngoại vi.

Nhóm thứ hai bao gồm độ chính xác và độ chính xác lặp của robot

Sau đây là một số khái niệm và thuật ngữ:

Sai số

Độ chính xác

Độ chính xác lặp

Có thể phân ra làm ba nhóm các nguồn gây sai số chính trong không gian công tác này của robot:

Sai số hình học và động học

Các sai số trong hệ điều khiển

Các sai số do môi trường

1.3 Hiệu chuẩn robot công nghiệp

Hiệu chuẩn là việc sử dụng phần mềm, thay vì thay đổi cấu trúc cơ học hoặc thiết kế của chính robot, để nâng cao độ chính xác của vị trí robot. Hiệu chuẩn có thể được phân thành hai loại, hiệu chuẩn phi động học và hiệu chuẩn động học

Hiệu chuẩn phi động học

Hiệu chuẩn động học: Hiệu chuẩn động học bao gồm bốn bước tuần tự:

- *Mô hình hóa:*
- *Đo lường:*
- *Nhận dạng tham số:*
- *Bù:*

Dựa trên các phương pháp đo lường, hiệu chuẩn động học có thể phân làm 2 loại:

Hiệu chuẩn vòng mở:

Hiệu chuẩn vòng kín:

1.4 Các nghiên cứu tương cận với đề tài

Mặc dù đã có rất nhiều nghiên cứu được thực hiện về hiệu chuẩn động học, khác nhau cả về thiết bị đo và phương pháp xử lý dữ liệu, khác nhau về phương pháp hiệu chuẩn sau đó như bù vào tọa độ suy rộng, bù vào kích thước DH, song trong đề tài này tác giả đề xuất sử dụng một phương pháp mới cụ thể là:

- Thay thế quỹ đạo và xấp xỉ sai số bằng mô hình hàm dạng;

- Phương pháp thay thế quỹ đạo và nguyên lý chồng chất áp dụng với robot lai.

1.5 Phạm vi nghiên cứu của luận án

Để hiệu chuẩn robot cần có các công cụ đo lường bên ngoài, chẳng hạn như laser tracker hoặc camera, trong luận án này sử dụng một thiết

bị đo quang học của Leica, robot sử dụng trong thí nghiệm là Coloborative.

Giới thiệu một phương pháp luận về hiệu chuẩn các robot song song trong trường hợp chúng được sử dụng như một loại đồ gá chuyên dụng nhằm mở rộng khả năng công nghệ của các máy công cụ.

Kết luận chương 1

Tác giả lựa chọn phương pháp hiệu chuẩn thay thế quỹ đạo khâu chấp hành cuối kết hợp với nội suy sai số trên cơ sở hàm dạng để giảm chi phí đo lường cũng như có cơ sở can thiệp cho nhiều dạng quỹ đạo khác nhau trong vùng làm việc chỉ sau một lần đo – nhận dạng sai số.

CHƯƠNG 2: THIẾT BỊ VÀ KỸ THUẬT ĐO SAI SỐ TRONG HIỆU CHUẨN ROBOT

Các thiết bị đo phổ biến nhất thường dùng trong kỹ thuật đo sai số khâu cuối của robot rất đa dạng. Theo quá trình phát triển của kỹ thuật người ta đã sử dụng các thiết bị đo phổ biến nhất sau đây trong hiệu chuẩn robot:

- Bàn so và đầu dò;
- Máy CMM;
- Máy ảnh CCD;
- Laser tracker;
- Camera 3D.

2.1 Nguyên lý chung khi thiết lập hệ thống đo

Các tính năng kỹ thuật cơ bản của một hệ thống đo dùng hiệu chuẩn robot bao gồm:

- Độ chính xác phép đo;
- Độ phân giải phép đo;
- Trường làm việc của dụng cụ đo (hình dáng, thể tích);
- Phương pháp đo (tiếp xúc, không tiếp xúc);
- Khả năng tự động chuyển đổi thang đo và thứ nguyên;
- Khả năng tự động bù sai số và nhận gốc tọa độ biểu diễn dữ liệu đo theo chỉ định.

Về nguyên tắc phát hiện sai số đo, tất cả sơ đồ đo đều tiến hành đo hai kênh đồng thời là kênh robot và kênh thiết bị đo ngoài độc lập, sau đó so sánh kết quả đo hai kênh này với nhau trong đó giá trị đo của thiết bị đo độc lập dùng làm chuẩn. Cả hai kênh đo này đều phải quy chiếu theo một gốc duy nhất trước khi so sánh, điều này cần thực hiện ngay trong quá trình thiết lập hệ thống đo

2.2 Nhóm thiết bị đo dùng bàn so và đầu dò

Người ta gắn một đầu dò lên tay robot và sử dụng nó như một TCP của robot, bàn so là một mặt chuẩn chế tạo chính xác dùng để làm cữ hiệu chuẩn cho đầu dò khi nó chạm vào. Cả bàn so và đầu dò đóng vai trò như các điện cực mà khi chúng tiếp xúc nhau sẽ đóng kín mạch bởi một dòng điện làm sáng thiết bị chỉ thị là một bóng led, đó là thời điểm xác nhận đầu dò chạm vào bàn so. Phương pháp này có ưu điểm rẻ tiền nhưng nhược điểm của nó là hạn chế về hướng có thể đo của TCP và độ chính xác không cao.

2.3 Nhóm thiết bị đo dùng máy CMM

CMM bao gồm một cấu trúc chuyển động theo ba chiều, một đầu dò được gắn vào cấu trúc và một hệ thống ghi được điều khiển máy tính (Hình 2.4). Tất cả các CMM đều hoạt động theo cùng một cách: đầu dò chạm vào các điểm trên đối tượng cần đo và vị trí của cấu trúc được ghi lại. Mỗi điểm đo được mô tả bởi tọa độ X, Y và Z. Tất cả các điểm được đo cho một đối tượng được kết hợp thành một tệp CAD 3D được gọi là đám mây điểm. Đám mây điểm có thể được so sánh với bản vẽ thiết kế 3D để xác định xem đối tượng đã được sản xuất theo đúng kích thước chưa.

Có nhiều loại CMM khác nhau trên thị trường bao gồm cả CMM xúc giác và quang. Với chi phí cao của CMM, nhiều tùy chọn này gây khó khăn trong việc chọn một CMM phù hợp cho một phép đo nhất định. Ít nhất, có năm khía cạnh cần được xem xét để chọn CMM phù hợp nhất cho các ứng dụng cụ thể.

- Độ chính xác của CMM
- Đặc điểm công cụ của CMM

- Khả năng phần mềm của CMM
- Khả năng chiến lược lấy mẫu của CMM

2.4 Nhóm thiết bị đo dùng laser tracker

Laser tracker là thiết bị đo quang học không tiếp xúc, nó dựa trên hai kỹ thuật cơ bản là sử dụng một giao thoa kế laser để đo khoảng cách và sử dụng hai encoder để đo góc của hai gương lái tia. Một điểm đo được thể hiện bằng khoảng cách (bán kính) và hai góc trong tọa độ cầu.

Laser tracker đo được vị trí ba chiều của một mục tiêu di động với độ chính xác vài micrômét, trên phạm vi hàng chục mét.

Ưu điểm:

Nhược điểm:

2.5 Nhóm thiết bị đo dùng máy ảnh công nghiệp và camera 3D

Về bản chất thiết bị đo dùng máy ảnh và camera sẽ xuất phát từ các kỹ thuật định chiều sâu các điểm được đánh dấu gọi là maker trên mô hình (các điểm phản quang) từ các ảnh 2D này mô hình hóa vật thể thật thành một ảnh 3D. Tất cả các yếu tố kích thước của vật thể sau đó được đo trên mô hình ảo này mà không cần tới vật thật nữa.

Để tăng cường hơn nữa chất lượng mô hình 3D người ta sử dụng một kỹ thuật nâng cao có tên gọi là cấu trúc ánh sáng hoặc kỹ thuật bậc cao hơn của nó là mã hóa ánh sáng, nó chiếu một chuỗi nhị phân làm nổi bật các đặc tính không gian trong khi ghi hình (cấu trúc) hoặc tạo đám mây điểm (mã hóa) (Hình 2.15). Kỹ thuật mã hóa ánh sáng thực chất là tăng số lượng điểm đánh dấu lên số vô cùng lớn (đám mây) để qua đó nâng cao độ chính xác tái tạo

Ưu điểm:

Nhược điểm:

2.6 Nhóm kỹ thuật dùng cảm biến quét laser 3D

Các cảm biến quét 3D này lấy mẫu cùng lúc rất nhiều điểm nên về cơ bản giảm được thời gian lấy mẫu và tăng cường được độ chính xác của mô hình. Đây là một kiểu đo lường không tiếp xúc

Kết luận chương 2

Các phương pháp đo vị trí và hướng của robot công nghiệp phổ biến nhất là sử dụng laser tracker và camera độ phân giải cao tuy có giá thành rất lớn (khoảng > 80.000 USD). Đây là các thiết bị đo không tiếp xúc với độ chính xác cao (hàng micromet) và có khả năng thu thập dữ liệu nhanh chóng với mật độ dữ liệu lớn nên có thể cung cấp hình ảnh chi tiết trong quá trình robot hoạt động. Ngoài ra các camera và laser tracker hiện đại thường kết nối được với robot công nghiệp để tự xác định ma trận chuyển trục giữa hai hệ quy chiếu của robot và thiết bị đo.

Với những ưu điểm này, laser tracker của Leica (độ chính xác +/-15μm) và camera 3D (độ chính xác +/-55μm) của Cognex đã được lựa chọn sử dụng cho các thí nghiệm xác định sai số các điểm khảo sát của robot công nghiệp cần hiệu chuẩn độ chính xác trong nghiên cứu. Sai số nay sau đó được dùng để làm cơ sở tính toán ra quỹ đạo thay thế. Hiệu quả của việc thay đổi quỹ đạo sẽ được kiểm chứng bằng chính những thiết bị này.

CHƯƠNG 3: HIỆU CHUẨN SAI SỐ ROBOT CÔNG NGHIỆP

3.1 Phần mềm kiểm tra, hiệu chuẩn dung sai

Điều khiển phản hồi giám sát bởi các encoder là chiến lược rất phổ biến để can thiệp vào khử khe hở của truyền dẫn cơ khí trong cơ cấu, tuy nhiên nếu hai khâu kề nhau và tọa độ suy rộng liên kết giữa chúng không sai so với tính toán thì vị trí điểm cuối vẫn sai do các nguyên nhân như sai số lắp ghép của chúng, biến dạng đàn hồi của hai khâu đó, độ mòn của khớp liên kết, …tất cả các yếu tố này đều nằm ngoài vòng phản hồi của encoder nên nó không thể phát hiện ra, đây là lý do mà khi áp thiết bị đo độc lập lên khâu cuối luôn phát hiện sai số trội hơn so với công bố ban đầu.

Sai số cấu thành từ hai loại gồm sai số có quy luật và sai số không có quy luật. Trong việc đo sai số khâu cuối bằng thiết bị đo độc lập luôn phát hiện được tổng của cả hai loại này nhưng phần bù được chỉ là phần có quy luật.

Ở tình trạng lý tưởng, quan hệ hàm giữa hai đại lượng này tính toán dựa trên mô hình lý tưởng không có sai số, quan hệ này gọi là quan hệ chuẩn.

$$x_i = f(\mathrm{u}_i) \quad (3.1)$$

Việc nhận dạng quy luật có thể xây dựng dưới dạng các ánh xạ từ điểm nọ tới điểm kia và sử dụng các thuật toán nội suy để tính toán toàn bộ quỹ đạo công tác.

3.2 Các phương pháp hiệu chuẩn robot

3.2.1 Đối với robot chuỗi

Giả sử phương trình động học lý tưởng của robot dưới dạng tổng quát là:

$$f(x_i, y_i, z_i, q_i, a_i, d_i, \beta_i) = 0 \quad (3.2)$$

Giả sử dùng thiết bị đo độc lập có độ chính xác cao để kiểm tra phát hiện được sai số tại điểm khảo sát thứ i là cho phương trình (3.2) thực tế có dạng:

$$f(x_i, y_i, z_i, q_i, a_i, d_i, \beta_i) = \delta r_i \quad (3.3)$$

Để sai số $\delta r_i \to 0$ từ (3.2) có thể có những cách giải quyết sau đây:

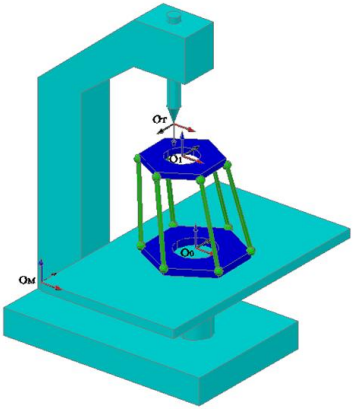
- Phương án thứ nhất: Điều chỉnh nhóm tọa độ thực của TCP sang một tọa độ thay thế khác và giữ nguyên các nhóm tham số còn lại

- Phương án thứ hai: Thay đổi nhóm tham số DH (a_i, d_i, β_i) từ kích thước danh nghĩa sang kích thước thực của nó.

3.2.2 Đối với robot lai

Trong một số hệ thống, hệ thống lai thường hình thành với lý do mở rộng khả năng công nghệ của thiết bị nhằm giải quyết một nhiệm vụ cụ thể nào đó đòi hỏi số bậc tự do lớn người ta thường ghép nối tiếp một bàn máy đóng vai trò cơ sở với một robot (chuỗi hoặc song song, thường là robot song song) nhằm mở rộng khả năng chuyển động của hệ. Các hệ này thường có bậc tự do lớn nhưng chuỗi động học dài nên sai số tích lũy trong chuỗi là rất lớn.

Tư tưởng hiệu chuẩn ở đây là ấn định một điểm trung gian trong chuỗi chia chuỗi động học thành hai phần trên dưới. Phần dưới có chức năng khử sai số của giá, phần trên có chức năng chạy quỹ đạo công tác, do tham gia vào hai chuyển động khác nhau nên cơ cấu robot ở đây có tới hai đầu vào và một đầu ra, nó đóng vai trò như cơ cấu vi sai phải tổng hợp chuyển động qua nó.



Hình 3.2 *Bố trí thiết bị và các hệ quy chiếu cơ bản*

Gọi quỹ đạo mong muốn của bàn máy có dạng:

$$f_3(\text{xyz})^{O_M} = 0 \quad (3.14)$$

Quỹ đạo thực của bàn máy có kể đến sai số động học của nó là:

$$f_4(\text{xyz})^{O_M} = 0 \quad (3.15)$$

Thay vì bàn máy di chuyển theo quỹ đạo lý tưởng (3.14), dưới ảnh hưởng của sai số vị trí nên bàn máy đã di chuyển theo quỹ đạo (3.15). Vì bản thân robot hexapod có độ cứng vững rất cao nên sai số của đồ gá

có thể bỏ qua, trong khi để đạt độ chính xác mong muốn về tạo hình thì các sai số của bàn máy cần được bù trừ. Có hai cách làm ở đây:

- Một là hiệu chuẩn chính bàn máy để quỹ đạo thực tế (3.15) trở về quỹ đạo lý tưởng (3.14), phương án này cần can thiệp vào phần cứng của máy công cụ và cũng không thể khử các sai số của bàn máy một cách triệt để và lâu dài. Vì vậy nó không phải là đối tượng đề cập đến trong nghiên cứu này.

- Hai là chấp nhận sai số của bàn máy, quỹ đạo thực của bàn lúc này là (3.15). Vì robot hexapod có các bậc tự do thừa nên có thể tận dụng chúng để tạo ra các chuyển động bù nhằm khử đi các sai số từ bàn máy. Đồng thời với việc bù sai số, robot cũng kết hợp với bàn máy tạo ra các chuyển động công tác theo (3.12) để hoàn thành nhiệm vụ của nó. Như vậy chuyển động của robot lúc này có hai chức năng, vừa tạo hình thông qua kết hợp với chuyển động của bàn máy, vừa khử các sai số của bàn tạo ra.

3.3 Chuyển đổi tọa độ trong không gian công tác

3.3.1 Chuyển đổi thế giữa hai điểm cuối

3.3.2 Chuyển đổi dữ liệu đo bằng camera

3.4 Cơ sở xây dựng quỹ đạo thay thế

3.4.1 Chuyển đổi ngược một điểm của quỹ đạo thực và quỹ đạo thay thế

3.4.2 Chuyển đổi ngược toàn bộ quỹ đạo thực thành quỹ đạo thay thế

3.4.3 Giải bài toán động học ngược bằng phương pháp số Giảm Gradient tổng quát (Generalized Reduced Gradient - GRG)

Kết luận chương 3

Trong khi phương pháp thay thế quỹ đạo trực tiếp dẫn đến thay đổi tọa độ suy rộng tức là tác động lên đầu vào để chỉnh lại sai số khâu cuối thì phương pháp thay đổi tham số DH sẽ lại gián tiếp tác động tới tọa độ suy rộng vì bản chất bộ tham số DH đang sử dụng là cố định, kết cấu khâu khớp không thay đổi nên việc đưa ra bộ tham số DH mới chỉ là cơ sở để định lượng lại sự thay đổi tương ứng của tọa độ suy rộng. Nguyên lý của hai phương pháp này giống nhau ở chỗ phải tác động vào tọa độ suy rộng trong khi quá trình lập luận dẫn đến các thay đổi này là khác nhau. Cơ sở toán học của cả hai phương pháp này là như nhau vì chúng cùng dựa trên một mô hình động học duy nhất.

Phương pháp thay thế quỹ đạo trực tiếp phù hợp với các quỹ đạo yêu cầu độ chính xác cao, tuy nhiên phương án này thực hiện cho các quỹ đạo cụ thể không phải bù cho cả vùng làm việc như phương pháp thay đổi tham số DH. Ngược lại phương pháp thay đổi tham số DH không có độ chính xác cho từng quỹ đạo cụ thể cao như phương pháp thay thế quỹ đạo trực tiếp. Trên thực tế do tính chuyên dùng của robot, nghĩa là chạy lặp đi lặp lại một quỹ đạo cụ thể là chủ yếu nên phương pháp thay thế quỹ đạo trực tiếp có nhiều ứng dụng hơn.

Riêng với phương pháp bù sàn, được áp dụng cho các hệ nhiều bậc tự do thường là các hệ có sự lai ghép hai cấu hình, phương pháp này ít ứng dụng hơn do máy công cụ ngày nay ít khi phải tổ chức theo cách này.

CHƯƠNG 4: MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

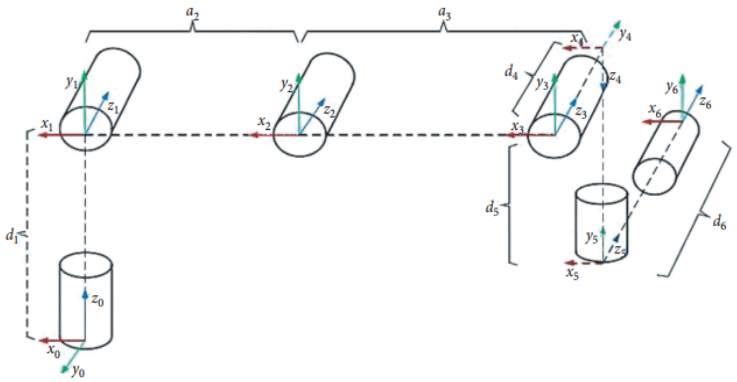
4.1 Mô tả sơ đồ thí nghiệm đo sai số

4.1.1 Thí nghiệm 1, Thiết bị đo Leica

Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng robot 6 bậc tự do Collaborative và laser tracker của hãng Leica kết hợp với đầu đo AT960-MR để đo sai số các điểm khảo sát, sai số nhận được bằng cách so sánh hai kênh dữ liệu của robot và của laser tracker (LT) sau khi dữ liệu được quy về biểu diễn cùng một gốc của robot. Sai số này sau đó được dùng để hình thành quỹ đạo thay thế, việc thay đổi quỹ đạo được kiểm chứng lại bằng chính laser tracker nói trên.

Hình 4.1 *Bố trí thí nghiệm và hình ảnh mặt trước thiết bị đo của Leica*

Sơ đồ động học và bảng DH của robot Collaborative được thể hiện lần lượt trên hình 4.2 và bảng 4.2.



Hình 4.2 *Sơ đồ động của Robot*

Bảng 4. 2 *Bảng DH của robot thí nghiệm*

Khớp	β_i(độ)	a_i (mm)	d_i (mm)	q_i (độ)
Khớp 1	-0.318	-7.3788	169.7586	(q_1)
Khớp 2	89.8912	-0.9163	179.4213	(q_2)
Khớp 3	-0.0217	505.5451	0.4213	(q_3)
Khớp 4	-0.1666	439.7139	0.4213	(q_4)
Khớp 5	-89.8511	0.8422	160.4283	(q_5)
Khớp 6	89.9531	-0.8371	103.4869	(q_6)

Bảng 4.3 *Tọa độ của gốc O_0 gắn với robot trong mối quan hệ với tọa độ O_c của LT*

Tham số	X (mm)	Y	Z	Rx (độ)	Ry	Rz
Giá trị	-466.5649	77.5747	-127.7128	0.8936	-0.3427	9.7938

Bảng 4.4 *Tọa độ đầu đo trong bàn kẹp của robot*

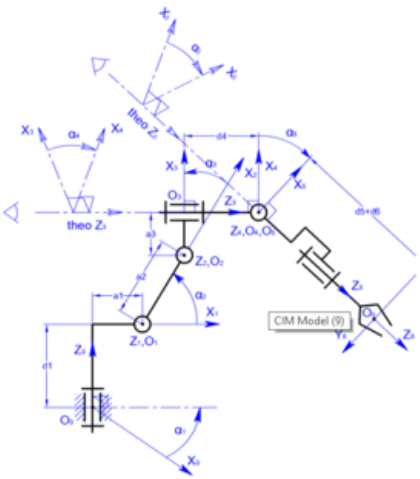
Tham số	X (mm)	Y	Z	Rx (độ)	Ry	Rz
Giá trị	7.5984	-15.8128	107.8152	90.1573	1.1997	-61.0056

T là ma trận chuyển trục theo bố trí vị trí tương quan giữa LT và robot thí nghiệm, trong trường hợp này T có dạng như sau:

$$T = \begin{vmatrix} 0.631699 & 0.334297 & 0.699401 & 550.2334 \\ 0.697931 & 0.147472 & -0.70091 & -449.973 \\ -0.33738 & 0.930947 & -0.1401 & 381.1823 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

4.1.2 Thí nghiệm 2, thiết bị đo Cognex

Hệ thống gồm 1 robot ABB IRB1200 6 bậc tự do có các thông số động học như bảng 4.5 và một camera 3D - A5030 của hãng Cognex ghi lại chính xác các sai số thực của điểm cuối tay kẹp với độ phân giải theo các phương x, y, z là 200µm, độ chính xác lặp là 66 µm. Trong thí nghiệm này, camera đã được calip với chỉ số RSM = 0.02. Sơ đồ động học và bảng DH của robot Collaborative được thể hiện lần lượt trên hình 4.3



Khớp	β_i	d_i	a_i	α_i
1	(α_1)	d_1	a_1	90^0
2	(α_2)	0	a_2	0
3	(α_3)	0	a_3	90^0
4	(α_4)	d_4	0	-90^0
5	(α_5)	0	0	90^0
6	(α_6)	d_5+d_6	0	0

Hình 4.3 *Sơ đồ động học và bảng DH*

4.2 Nội suy sai số

Dữ liệu tính toán trong mục này lấy từ sơ đồ thí nghiệm theo Thí nghiệm 2 ở mục 4.1.2. Một khối lăng trụ tam giác với đỉnh là 6 điểm nút A, B, C, D, E, F được chọn làm không gian khảo sát. Quá trình thực nghiệm được tiến hành trên 54 lưới điểm trong không gian này. Hai dữ liệu về thế (pose) tại các điểm này được ghi lại độc lập: pose danh nghĩa được hiển thị trên bộ điều khiển robot, và pose thực tế được ghi lại bởi area scan 3D camera.

4.3 Hiệu chuẩn sai số robot chuỗi

4.3.1 Thiết bị đo Leica

4.3.1.1 Bộ dữ liệu thứ nhất (Thay đổi quỹ đạo khâu cuối)

4.3.1.2 Bộ dữ liệu thứ hai (Thay đổi tham số DH)

4.3.2 Thiết bị đo Cognex

4.4 Hiệu chuẩn sai số robot lai

4.4.1 Mô hình động học robot hexapod cấu hình SPS và cơ cấu lai

4.4.2 Sai số động học bàn máy

4.4.4 Chuyển động chạy dao

4.4.5 Chuyển động tổng hợp

4.4.6 So sánh trước và sau bù sai số

Kết luận chương 4

Trong chương này trên cơ sở các lý thuyết đã đề xuất tác giả đã thực hiện các quy trình đo với các thiết bị thí nghiệm có độ chính xác cao của Cognex và của Leica. Từ sai số khâu cuối của robot công nghiệp thí nghiệm sau khi đồng bộ hai kênh đo, tác giả đã tiến hành các bước để hiệu chuẩn như đã đề xuất ở chương 3. Cuối cùng, sai số kiểm tra lại từ hệ thống đo độc lập cho thấy sai số giảm đi rõ rệt, trung bình sai số sau

hiệu chuẩn giảm hơn 40% sai số ban đầu đo được. Với những kết quả được chứng minh bằng thực nghiệm có thể thấy đề xuất của tác giả có tiềm năng áp dụng công nghiệp cao vì các phương pháp này không thay đổi thói quen sử dụng của người vận hành robot, không thay đổi phần cứng và phần mềm của robot mà chỉ thay đổi từ quỹ đạo được chỉ định sang quỹ đạo thay thế như trình bày ở đây. Đây cũng là điểm mới của luận án.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án đã chỉ ra các hạn chế của các phương pháp hiệu chuẩn đã có từ trước cho đến thời điểm mà tác giả thực hiện nghiên cứu này. Trên cơ sở đó, tác giả đã đề xuất phương pháp hiệu chuẩn có tính khả dụng cao, hoàn toàn áp dụng được vào thực tế sản xuất mà không làm thay đổi thói quen vận hành thiết bị của người dùng. Độ chính xác vượt hoặc tương đương với các nghiên cứu đã có tính đến thời điểm hiện nay. Nghiên cứu này cũng cho thấy các sai số hiệu chuẩn được bao gồm cả sai số động học, động lực học, sai số chế tạo, sai số do mòn, do nhiệt vv…bởi vì việc giám sát các sai số này thực hiện bằng kênh đo độc lập với robot và giám sát với khâu chấp hành cuối cùng

2. Kiến nghị hướng phát triển của đề tài

Đề tài đã phát triển hoàn thiện lý thuyết, đã chứng minh bằng thực nghiệm cho thấy sự phù hợp giữa tính toán lý thuyết và kết quả thực nghiệm, bước tiếp theo tác giả sẽ tự động hóa quá trình hiệu chuẩn bằng một ứng dụng trung gian giữa thiết bị đo và robot hướng tới triển khai công nghiệp rộng rãi. Trong thời gian tới, tác giả sẽ tiếp tục phát triển đề tài như sau:

1. Chuyển giao các kết quả nghiên cứu nói trên vào thực tiễn ở các khu công nghệ cao có sử dụng nhiều robot công nghiệp.

2. Kết hợp với các nhà cung cấp thiết bị đo quang học để chuyển giao thiết bị đo không chỉ thiết bị đo mà phương pháp sử dụng chúng trên các hệ thống robot như một quy trình chuẩn hoá.

3. Đẩy mạnh việc áp dụng hiệu chuẩn cho các thiết bị có cấu hình tương tự như robot, chẳng hạn các máy công cụ điều khiển số cấu trúc chuỗi, ...

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

I. Các bài báo đăng quốc tế

1. ***Thang Nguyen Huu, Khanh Duong Quoc, Thuy Le Thi Thu and Long Pham Thanh,*** Manufacturing cost of robot structures with tolerance calculated on the view of kinetic response and that of technology, International Conference on Engineering Research and Applications ICERA 2019, ISSN: 2367-3370; Scopus, p.462-470, 12/2019

2. ***Thang Nguyen Huu, Khanh Duong Quoc, Thuy Le Thi Thu and Long Pham Thanh,*** A solution to adjust kinetic of industrial robots based on alternative trajectories, International Conference on Engineering Research and Applications ICERA 2019, ISSN: 2367-3370, Scopus, p.55-65, 12/2019

3. ***Thuy Le Thi Thu, Khanh Duong Quoc and Long Pham Thanh*** Calibration of Industrial Robot Kinematics Based on Results of Interpolating Error by Shape Function, Journal of Engineering and Applied Sciences, ISSN: 1816-949X, © Medwell Journals, Q3 Scopus, Vol 15 (6), p.1451-1461, 2020

4. ***Khanh Duong Quoc, Trang Trung Thanh and Long Pham Thanh,*** Robot control using alternative trajectories based on inverse errors in the workspace, Hindawi Journal of Robotics, ISSN: 1687-9619, Q2 Scopus, Vol 2021, Article ID 9995787, 2021.

5. ***Khanh Duong Quoc, Thuy Le Thi Thu, Long Pham Thanh and Ngoc Nong Minh,*** Controlling Lai Machine Tools Concerning Error Compensation of Chain Elements, Hindawi Journal of Robotics, ISSN: 1687-9619, Q2 Scopus, Vol 2022, Article ID 4366888, 2022.

6. ***Trang Trung Thanh, Yue Ming Hu, Thanh Long Pham, Quoc Khanh Duong,*** Design and Kinematics Analysis of 3-URS Ankle Rehabilitation Parallel Robot, ICMHI' 22: Proceedings of the 6th International Conference on Medical and Health Informatics, ISBN: 978-1-4503-9630-1, Q2 Scopus, p.163-175, 2022

II. Các bài báo đăng trong nước

1. ***Dương Quốc Khánh, Phạm Thành Long,*** Bài toán dung sai của cơ cấu robot dạng chuỗi hở trên quan điểm tính công nghệ gia công, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, ISSN 1859 – 2171, 2021

2. ***Dương Quốc Khánh, Phạm Thành Long,*** Một giải pháp tính toán đảm bảo sai số khâu cuối robot nằm trong miền giới hạn định trước, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, ISSN 1859 - 2171, 2019.

3. ***Dương Quốc Khánh, Phạm Thành Long,*** Giá thành và lựa chọn khâu, khớp hợp lý trên cơ sở điều chỉnh dung sai khi thiết kế cơ cấu robot, Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự, ISSN 1859 – 1043, 2019.