

BỘ CÔNG THƯƠNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

NARIME

TRẦN SĨ KIÊN

**ĐỘNG LỰC HỌC VÀ ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU CHUYỂN ĐỘNG
CỦA TAY MÁY CÔNG NGHIỆP DỰA TRÊN NGUYÊN LÝ CỰC
ĐẠI PONTRYAGIN**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9.52.01.03

HÀ NỘI - 2026

Công trình được hoàn thành tại:

Viện Nghiên cứu Cơ khí - Bộ Công Thương

Người hướng dẫn khoa học:

1. Người hướng dẫn 1: TS. Phan Đăng Phong

2. Người hướng dẫn 2: GS. TSKH. Đỗ Sanh

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Viện

Họp tại: Viện Nghiên cứu Cơ khí - Bộ Công Thương

Tòa nhà trụ sở chính: số 4 đường Phạm Văn Đồng, phường Phú Diễn, TP Hà Nội

Vào hồi giờ, ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Quốc gia Việt Nam
2. Thư viện Viện Nghiên cứu Cơ khí

PHẦN MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của tự động hóa, sản xuất thông minh và chuyển đổi số trong công nghiệp, tay máy công nghiệp ngày càng được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như lắp ráp, hàn, sơn, gia công, bóc xếp, đóng gói và vận chuyển vật liệu.

Trong thực tế vận hành, yêu cầu đặt ra đối với tay máy công nghiệp không chỉ dừng ở khả năng thực hiện được chuyển động theo yêu cầu công nghệ, mà còn phải bảo đảm các tiêu chí về độ chính xác, độ ổn định, tính linh hoạt, thời gian chu kỳ làm việc và hiệu quả sử dụng năng lượng.

Phân tích động lực học tay máy công nghiệp là cơ sở để xác định mối quan hệ giữa chuyển động của hệ với các lực và mômen tác dụng tại các khâu, khớp và cơ cấu dẫn động. Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu về mô hình hóa động học, động lực học và điều khiển tay máy, song đây vẫn là một lĩnh vực còn nhiều vấn đề cần tiếp tục làm rõ.

Bên cạnh đó, trong nhiều nghiên cứu và ứng dụng hiện nay, mô phỏng số ngày càng giữ vai trò quan trọng trong thiết kế, đánh giá và tối ưu hóa chuyển động của tay máy công nghiệp. Đồng thời, các mô hình và dữ liệu mô phỏng này cũng có thể cung cấp cơ sở tham khảo cho các hướng nghiên cứu tiếp theo về điều khiển thông minh, tối ưu hóa dựa trên dữ liệu và mô hình song sinh số trong lĩnh vực robot công nghiệp.

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng nghiên cứu phân tích động lực học và điều khiển tối ưu chuyển động của tay máy công nghiệp là cần thiết.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Nghiên cứu cơ sở lý thuyết và xây dựng khung phương pháp phân tích động lực học, tối ưu hóa chuyển động của tay máy công nghiệp, làm cơ sở cho việc mô phỏng và đánh giá một số bài toán chuyển động điển hình.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là tay máy công nghiệp dạng chuỗi hở. Đối tượng khảo sát cụ thể trong mô phỏng số là các mô hình tay máy phẳng 3 bậc tự do.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu các tay máy công nghiệp trên phương diện mô hình hóa cơ học, phân tích động lực học và tối ưu hóa chuyển động.

- Các khâu của tay máy được giả thiết là vật rắn tuyệt đối, không xét đến tính đàn hồi của các khâu, khớp và các vấn đề bất định (sai số tham số và nhiễu tải).

- Các dạng chuyển động được xem xét tối ưu hóa là chuyển động điểm-điểm, chuyển động theo quỹ đạo định sẵn của điểm tác động cuối.

- Tiêu chí tối ưu được lựa chọn là giảm nỗ lực điều khiển.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng số. Trên cơ sở lý thuyết cơ học hệ nhiều vật và lý thuyết điều khiển tối ưu, các bài toán phân tích động lực học và tối ưu hóa chuyển động của tay máy công nghiệp được xây dựng và khảo sát theo hướng mô hình hóa, thiết lập phương trình, giải bài toán tối ưu bằng các công cụ mô phỏng số.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

5.1. Ý nghĩa khoa học

- Nghiên cứu, xây dựng được cơ sở lý thuyết và khung phương pháp nghiên cứu cho bài toán điều khiển tối ưu tay máy công nghiệp.

- Xác định được quỹ đạo tối ưu nỗ lực điều khiển cho một số tay máy phẳng, qua đó góp phần làm rõ khả năng ứng dụng của hướng tiếp cận sử dụng nguyên lý Pontryagin trong nghiên cứu tối ưu hóa chuyển động tay máy công nghiệp.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn

- Phương pháp nghiên cứu được đề xuất có thể hỗ trợ lựa chọn phương án chuyển động theo hướng giảm nỗ lực điều khiển và nâng cao hiệu quả làm việc của tay máy trong các quá trình vận hành công nghiệp.

- Kết quả nghiên cứu của luận án có thể cung cấp cơ sở tham khảo về bộ tham số đầu vào, mô hình động lực học, hàm chi phí và dữ liệu mô phỏng cho các nghiên cứu tiếp theo về điều khiển thông minh và tối ưu hóa chuyển động robot dựa trên dữ liệu.

6. Những đóng góp mới của luận án

- Đề xuất được một khung phương pháp cho bài toán phân tích động lực học và điều khiển tối ưu chuyển động của tay máy công nghiệp. Các thành phần phương pháp được tổ chức thành một quy trình thống nhất, phục vụ trực tiếp cho việc thiết lập và giải bài toán điều khiển tối ưu chuyển động của tay máy công nghiệp.

- Thiết lập được các bài toán điều khiển tối ưu cho một số dạng chuyển động điển hình của tay máy công nghiệp, xem xét trực tiếp đến cấu trúc động lực học của tay máy thay vì chỉ được mô tả như các bài toán lập quỹ đạo hình học riêng lẻ.

- Kiểm chứng được quy luật điều khiển tối ưu thông qua mô phỏng số đối với một số mô hình tay máy phẳng điển hình, so sánh định lượng về tiêu chí tối ưu với một số quy luật chuyển động và phương pháp khác, qua đó minh họa khả năng áp dụng của phương pháp đề xuất.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về tay máy công nghiệp

Tay máy công nghiệp là một bộ phận quan trọng của hệ thống tự động hóa hiện đại. Theo chuẩn thuật ngữ của ISO, robot công nghiệp được hiểu là một cơ cấu chấp hành tự động, có thể lập trình lại, đa dụng, làm việc trên ba hoặc nhiều hơn ba trục, có thể cố định tại chỗ hoặc gắn trên nền tảng di động để phục vụ các ứng dụng tự động hóa trong môi trường công nghiệp [1].

1.1.1. Sự phát triển của tay máy công nghiệp

Sự phát triển của tay máy công nghiệp gắn liền với quá trình chuyển dịch từ tự động hóa cứng sang tự động hóa linh hoạt và sản xuất thông minh.

Về quy mô triển khai, số liệu của Liên đoàn Robot Quốc tế cho thấy robot công nghiệp đã duy trì xu hướng tăng trưởng dài hạn trong thập niên gần đây. Báo cáo World Robotics cho biết số robot công nghiệp lắp đặt mới trên toàn cầu đã vượt mốc 500.000 đơn vị mỗi năm trong nhiều năm liên tiếp, trong khi tổng lượng robot đang vận hành trên thế giới đã đạt trên 4 triệu đơn vị [2], [4].

Một xu hướng đáng chú ý trong giai đoạn gần đây là sự phát triển song song của robot công nghiệp truyền thống và robot cộng tác.

1.1.2. Ưu thế của tay máy công nghiệp

Tay máy công nghiệp có nhiều ưu thế trong sản xuất, gia công.

Thứ nhất là khả năng làm việc với độ lặp lại cao và duy trì chất lượng thao tác ổn định trong thời gian dài.

Thứ hai là khả năng nâng cao năng suất và tính linh hoạt của hệ thống sản xuất.

Thứ ba là cải thiện điều kiện lao động và an toàn sản xuất.

Bên cạnh các ưu thế nêu trên, một lợi thế ngày càng được quan tâm là khả năng tối ưu hóa hiệu quả vận hành, đặc biệt theo các tiêu chí thời gian chu kỳ, tiêu hao năng lượng và độ bền thiết bị.

1.2. Khái quát về phân tích động lực học và tối ưu hóa chuyển động tay máy công nghiệp

Phân tích động lực học và tối ưu hóa chuyển động là hai nội dung trung tâm trong nghiên cứu hiện đại về tay máy công nghiệp, có quan hệ chặt chẽ và bổ sung cho nhau trong quá trình mô hình hóa, điều khiển và đánh giá hiệu quả vận hành của hệ [6], [7], [9], [10].

Nêu phân tích động lực học trả lời câu hỏi “để tay máy chuyển động như vậy thì cần lực hoặc mômen gì”, thì tối ưu hóa chuyển động trả lời câu hỏi “tay máy nên chuyển động như thế nào để tốt nhất theo một tiêu chuẩn xác định”. Tối ưu hóa chuyển động là một khái niệm rộng, bao trùm các bài toán lập kế hoạch quỹ đạo, quy hoạch chuyển động, phân bổ thời gian, tối ưu tiêu chuẩn năng lượng và điều khiển tối ưu [7], [10], [12].

1.3. Tình hình nghiên cứu trên thế giới và trong nước

1.3.1. Vấn đề phân tích động lực học tay máy robot

Trên thế giới, các nghiên cứu về phân tích động lực học tay máy robot chủ yếu phát triển theo các hướng phương pháp kinh điển, trong đó nổi bật là phương pháp Newton-Euler, phương pháp Lagrange và phương pháp Hamilton [13]-[16].

Nhìn chung, có thể thấy rằng các phương pháp phân tích động lực học tay máy robot đã được xác lập tương đối đầy đủ và hiệu quả của chúng đã được kiểm chứng qua nhiều công trình nghiên cứu. Vì vậy, trong giai đoạn gần đây, các nghiên cứu quốc tế ít tập trung vào việc đánh giá lại các phương pháp nền tảng một cách độc lập, mà chủ yếu phát triển theo các hướng mở rộng và ứng dụng chuyên sâu hơn.

1.3.2. Vấn đề tối ưu hoá chuyển động của tay máy robot

1.3.2.1. Khái quát các hướng tiếp cận trong tối ưu hóa chuyển động tay máy robot

Tối ưu hóa chuyển động tay máy robot là một hướng nghiên cứu đã được quan tâm từ sớm và ngày càng phát triển cùng với yêu cầu nâng cao năng suất, độ chính xác và hiệu quả vận hành của robot công nghiệp.

Trong các nghiên cứu đã công bố, có thể quy các hướng tiếp cận chính của bài toán tối ưu hóa chuyển động tay máy robot thành ba nhóm lớn, gồm: quy hoạch động, phương pháp trực tiếp và phương pháp gián tiếp.

Một xu hướng nghiên cứu đáng chú ý khác là sự chuyển dịch từ các bài toán tối ưu thời gian thuần túy sang các bài toán tối ưu đa mục tiêu. Tuy vậy, sự phong phú của các tiêu chí và hướng tiếp cận cũng dẫn đến tình trạng các nghiên cứu bị phân tán theo từng dạng bài toán, từng loại hàm mục tiêu và từng cách phát biểu bài toán tối ưu.

1.3.2.2. Các nghiên cứu theo hướng tiếp cận phương pháp quy hoạch động

Nhìn chung, các nghiên cứu theo hướng quy hoạch động có giá trị chủ yếu ở việc đặt nền tảng cho bài toán tối ưu hóa chuyển động tay máy robot trên cơ sở lý thuyết tối ưu động. Tuy nhiên, khi xét tới các tay máy công nghiệp nhiều bậc tự do, có mô hình động lực học phi tuyến và các bài toán chuyển động có điều kiện biên hoặc ràng buộc quỹ đạo cụ thể, quy hoạch động thường gặp trở ngại lớn về tính khả thi tính toán. Đây là lý do quan trọng khiến dù có nền tảng lý thuyết chặt chẽ, quy hoạch động không trở thành hướng tiếp cận chủ đạo trong đa số các nghiên cứu tối ưu hóa chuyển động tay máy công nghiệp hiện nay.

1.3.2.3. Các nghiên cứu theo hướng phương pháp trực tiếp

Về bản chất, với hướng tiếp cận này, bài toán điều khiển tối ưu ban đầu không được xử lý thông qua việc xây dựng trực tiếp các điều kiện cần tối ưu, mà được chuyển thành một bài toán tối ưu hữu hạn chiều bằng cách tham số hóa quỹ đạo trạng thái hoặc tín hiệu điều khiển. Sau đó, bài toán được giải bằng các công cụ tối ưu số, thường dưới dạng quy hoạch phi tuyến [18], [32]. Một số nhược điểm thường gặp là chất lượng nghiệm phụ thuộc mạnh vào lựa chọn tham số thuật toán, thời gian tính toán có thể lớn, và khó đánh giá chặt chẽ về mặt lý thuyết đối với tính tối ưu của nghiệm.

1.3.2.4. Các nghiên cứu theo hướng phương pháp gián tiếp

Từ các công trình đã công bố có thể thấy rằng phương pháp gián tiếp đã chứng minh được khả năng xử lý nhiều lớp bài toán điều khiển tối ưu khác nhau. Ưu điểm nổi bật của hướng tiếp cận này là làm rõ được cấu trúc của bài toán tối ưu trên cơ sở mô hình động lực học, từ đó thiết lập trực tiếp mối liên hệ giữa trạng thái, biến liên hợp, điều khiển và các điều kiện biên. Đối với các bài toán mà tiêu chuẩn tối ưu gắn chặt với lực/mômen khớp, đây là một lợi thế quan trọng.

1.3.2.5. Các nghiên cứu trong nước

Một công trình có tính ứng dụng là nghiên cứu của Lê Anh Kiệt và cộng sự năm 2016 [63] về thiết kế, chế tạo hệ thống điều khiển robot bốc xếp AKB.

Theo hướng tối ưu tham số điều khiển để nâng cao chất lượng đáp ứng, Dương Xuân Biên và Chu Anh Mỹ năm 2018 [64] đã nghiên cứu bài toán thiết kế bộ điều khiển cho tay máy có khâu cứng-mềm, trong đó các thông số của bộ điều

hiển PID được tối ưu bằng thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) nhằm nâng cao độ chính xác vị trí.

Ở góc độ tối ưu chuyển động hình học, Nguyễn Mai Quyên, Chu Bình Minh và Hà Bình Minh năm 2022 [65] đã trình bày một phương pháp tính toán và tối ưu hóa các góc quay khớp trong điều khiển cánh tay robot ba bậc tự do phẳng. Bài toán được đặt ra là xác định các góc quay sao cho điểm tác động cuối di chuyển

Lưu Thị Huệ và Nguyễn Phạm Thực Anh năm 2022 [57] đã đề xuất một phương pháp thiết kế quỹ đạo tối ưu cho robot sử dụng thuật toán di truyền.

1.3.2.6. Nhận xét về tình hình nghiên cứu tối ưu hoá chuyển động tay máy robot

Từ các nghiên cứu đã tổng quan có thể thấy rằng, trên thế giới, bài toán tối ưu hóa chuyển động tay máy robot đã được nghiên cứu theo nhiều hướng tiếp cận khác nhau và đã đạt được những kết quả đáng kể.

So với các nghiên cứu trên thế giới, nghiên cứu trong nước về tối ưu hóa chuyển động và điều khiển tối ưu tay máy robot còn hạn chế hơn cả về số lượng công bố lẫn mức độ đa dạng của hướng tiếp cận.

1.4. Định hướng nội dung nghiên cứu của đề tài luận án

Từ những nhận xét trên có thể chỉ ra một số khoảng trống nghiên cứu mà luận án sẽ tập trung như sau:

- Thứ nhất, cần có một cách tiếp cận gắn kết chặt chẽ giữa mô hình động lực học của tay máy công nghiệp với bài toán tối ưu hóa chuyển động, thay vì chỉ dừng ở tối ưu quỹ đạo theo nghĩa hình học hoặc tối ưu số thuần túy.

- Thứ hai, cần khảo sát các trường hợp chuyển động điển hình của tay máy công nghiệp nhằm đánh giá khả năng áp dụng của khung phương pháp nghiên cứu trong những tình huống có ý nghĩa thực tiễn.

Nội dung nghiên cứu của luận án như sau:

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về động lực học tay máy và điều khiển tối ưu.
- Xây dựng mô hình động lực học và thiết lập bài toán điều khiển tối ưu cho tay máy công nghiệp sử dụng nguyên lý Pontryagin.
- Mô phỏng số điều khiển tối ưu tay máy với các chuyển động điển hình.

Kết luận chương 1

Từ nội dung chương 1 có thể rút ra một số kết luận như sau:

1- Từ nghiên cứu tổng quan tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước, việc tối ưu hóa chuyển động của robot công nghiệp vẫn đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu.

2- Lý thuyết bài toán phân tích động lực học robot công nghiệp đã có cơ sở hoàn chỉnh với các phương pháp chủ yếu như Newton–Euler, Lagrange, Hamilton và các cách tiếp cận đối với tay máy chịu ràng buộc. Các phương pháp này là nền tảng để mô hình hóa và khảo sát chuyển động của tay máy. Đối với bài toán tối ưu hóa chuyển động và điều khiển tối ưu tay máy robot, hiện nay đã hình thành nhiều hướng tiếp cận chính như quy hoạch động, phương pháp trực tiếp và phương pháp gián tiếp.

3- Luận án xác định nội dung nghiên cứu là sử dụng mô hình động lực học dựa trên phương pháp Lagrange và nguyên lý phù hợp, từ đó thiết lập giải bài toán tối ưu hóa chuyển động của tay máy công nghiệp theo phương pháp gián tiếp sử

dụng nguyên lý Pontryagin, áp dụng cho một số trường hợp chuyển động điển hình nhằm làm rõ quy luật điều khiển tối ưu của hệ.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC VÀ ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU TAY MÁY CÔNG NGHIỆP

2.1. Cơ sở lý thuyết về động học tay máy

2.1.1. Phương pháp ma trận truyền

Xét điểm M có vị trí trong hệ tọa độ

$O_j x_j y_j$ là $\mathbf{r}_M^{(j)} = [x_M^{(j)} \quad y_M^{(j)}]^T$, khi đó vị trí

của nó trong hệ tọa độ $O_i x_i y_i$ là

$$\begin{aligned} x_M^{(i)} &= u + x_M^{(j)} \cos \varphi - y_M^{(j)} \sin \varphi \\ y_M^{(i)} &= v + x_M^{(j)} \sin \varphi + y_M^{(j)} \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.1)$$

Đặt các ma trận biến đổi

$$\mathbf{t}_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{t}_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{t}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Ma trận $\mathbf{T}_j^i = \mathbf{t}_u \mathbf{t}_v \mathbf{t}_\varphi$ còn được gọi là ma trận truyền từ hệ tọa độ $O_j x_j y_j$ sang hệ tọa độ $O_i x_i y_i$.

2.1.2. Áp dụng phương pháp ma trận truyền cho tay máy

Khi đó, ma trận biểu diễn phép biến đổi của hệ tọa độ $O_i x_i y_i$ về hệ tọa độ cố định $O_0 x_0 y_0$ sẽ là:

$$\mathbf{T}_i^0 = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \dots \mathbf{T}_i^{i-1} \quad (2.3)$$

Tọa độ điểm tác động cuối E trong hệ tọa độ cố định $O_0 x_0 y_0$ sẽ là:

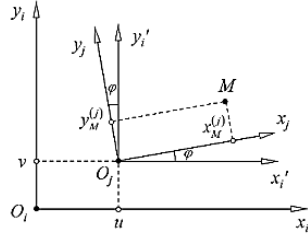
$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_E^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_n^0 \begin{bmatrix} \mathbf{r}_E^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Với từng mô hình tay máy, ta sẽ xác định các ma trận truyền $\mathbf{T}_1^0, \mathbf{T}_2^1, \dots$ và tính được ma trận \mathbf{T}_n^0 . Sau đó xác định được vị trí, vận tốc, gia tốc của điểm tác động cuối.

2.2. Cơ sở lý thuyết về động lực học tay máy

2.2.1. Phương trình Lagrange loại 2 dạng ma trận

Phương trình Lagrange loại 2 của tay máy với $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n]^T$ là các tọa độ suy rộng đủ có dạng:



Hình 2.1. Biểu diễn các hệ tọa độ và vị trí điểm M

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial P}{\partial q_i} + Q_i^{kt} ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.5)$$

Trong đó T là biểu thức động năng của hệ, P là hàm thế năng và Q_i^{kt} là lực suy rộng của các lực không thế.

Phương trình động lực học của tay máy có dạng ma trận như sau [1]:

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q} + \mathbf{Q}_{qt} \quad (2.6)$$

2.2.2. Phương trình chuyển động của tay máy chịu ràng buộc

Trong nhiều bài toán công nghệ, tay máy robot không chuyển động hoàn toàn tự do trong không gian làm việc mà phải thỏa mãn thêm những điều kiện hình học hoặc động học nhất định

Trong dạng ma trận, phương trình phản lực liên kết có dạng

$$\mathbf{D}\mathbf{Q}^* = \mathbf{0} \quad (2.7)$$

với ma trận $\mathbf{D} = [d_{\sigma_j}]$ cỡ $(n-r) \times n$ và vectơ $\mathbf{Q}^* = [Q_1^* \quad Q_2^* \quad \dots \quad Q_n^*]^T$.

Lúc này, phương trình chuyển động dạng ma trận được thiết lập như sau

$$\mathbf{D}\mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}(\mathbf{Q} + \mathbf{Q}^{qt}) \quad (2.8)$$

Hệ phương trình (2.8) cùng với ràng buộc tạo thành một hệ phương trình vi phân đại số, nhưng chỉ còn n tọa độ suy rộng dư.

2.3. Cơ sở lý thuyết về điều khiển tối ưu tay máy

2.3.1. Bài toán điều khiển tối ưu của tay máy

Xét tay máy robot là một hệ động lực có phương trình vi phân chuyển động dưới dạng

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Trong dạng tổng quát, hàm mục tiêu có thể được viết dưới dạng

$$J = \phi(\mathbf{x}_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (2.10)$$

Trong dạng tổng quát, các điều kiện cuối có thể viết dưới dạng

$$\Phi(\mathbf{x}_f) = 0 \quad (2.11)$$

Từ các thành phần trên, có thể phát biểu bài toán điều khiển tối ưu tay máy robot trong dạng tổng quát như sau:

Xét tay máy robot có phương trình vi phân chuyển động biểu diễn dưới dạng (2.9). Xác định biến các điều khiển $\mathbf{u}^(t)$ để hệ chuyển từ trạng thái đầu $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$, thỏa mãn các điều kiện cuối (2.11) đồng thời hàm mục tiêu (2.10) đạt giá trị tối ưu.*

2.3.2. Nguyên lý cực đại Pontryagin

Để xây dựng các điều kiện cần của bài toán tối ưu, đưa vào một hệ biến phụ gọi là biến liên hợp. Ký hiệu vector biến liên hợp là \mathbf{p} .

Xây dựng hàm Hamilton kết hợp động lực học của hệ và chi phí như sau

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{p}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + p_0 L(\mathbf{x}, \mathbf{u}); \quad p_0 \in \{0, -1\} \quad (2.12)$$

Nguyên lý Pontryagin:

Điều kiện cần để điều khiển tối ưu $\mathbf{u} = \mathbf{u}^*(t)$ đưa hệ thống (2.9) từ trạng thái đầu $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$, thỏa mãn các điều kiện cuối (2.11), theo quỹ đạo tối ưu tương ứng $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*(t)$, biến liên hợp tương ứng $\mathbf{p} = \mathbf{p}^*(t)$ và phiếm hàm mục tiêu (2.10) đạt cực trị theo yêu cầu là:

1. Tồn tại vector biến liên hợp mở rộng $\mathbf{p} = [p_0, \mathbf{p}]^T$ không đồng nhất bằng không, thỏa mãn phương trình liên hợp và phương trình trạng thái
2. Hàm Hamilton $H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p})$ đạt cực đại theo \mathbf{u}^*
3. Tại thời điểm cuối $t = t_f$ thì điều kiện của biến liên hợp thỏa mãn

$$\mathbf{p}(t_f) = \left[\frac{\partial \phi(\mathbf{x}_f)}{\partial \mathbf{x}} \right]^T + \left[\frac{\partial \Phi(\mathbf{x}_f)}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \boldsymbol{\Psi} \quad (2.13)$$

2.3.3. Áp dụng nguyên lý Pontryagin điều khiển tối ưu tay máy

Phương trình động lực học có thể được viết trong không gian trạng thái:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{q})[\mathbf{u} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})] \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Như vậy, việc áp dụng nguyên lý Pontryagin cho bài toán điều khiển tối ưu tay máy robot dẫn tới một hệ gồm: phương trình trạng thái, phương trình liên hợp, điều kiện cực trị và các điều kiện biên.

2.4. Cơ sở lý thuyết một số quy luật chuyển động phục vụ so sánh định lượng

2.4.1. Quy luật chuyển động đa thức bậc ba

Xét một biến chuyển động trong khoảng thời gian từ t_0 đến t_f . Biến này được mô tả bằng đa thức bậc ba theo thời gian:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2.15)$$

trong đó $\varphi(t)$ là biến chuyển động và a_0, a_1, a_2, a_3 là các hệ số cần xác định.

2.4.2. Quy luật chuyển động đa thức bậc năm

Xét một biến chuyển động trong khoảng thời gian từ t_0 đến t_f . Biến này được mô tả bằng đa thức bậc năm theo thời gian:

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (2.16)$$

trong đó $\varphi(t)$ là biến chuyển động và $a_i, i = \overline{0..5}$ là các hệ số cần xác định.

2.4.3. Quy luật chuyển động S-curve

Xét một biến chuyển động $\varphi(t)$ trong khoảng thời gian từ t_0 đến t_f . Độ giạt của biến chuyển động được xác định bởi:

$$j(t) = \ddot{\varphi}(t) = \frac{d^3\varphi(t)}{dt^3} \quad (2.17)$$

Trong quy luật S-curve 7 pha, chuyển động được chia thành bảy khoảng thời gian liên tiếp.

2.4.4. Quy trình so sánh các luật chuyển động theo hàm mục tiêu J

Đối với bài toán chuyển động điểm-điểm trong không gian khớp, các quy luật chuyển động đối chứng được xây dựng trực tiếp cho từng biến khớp:

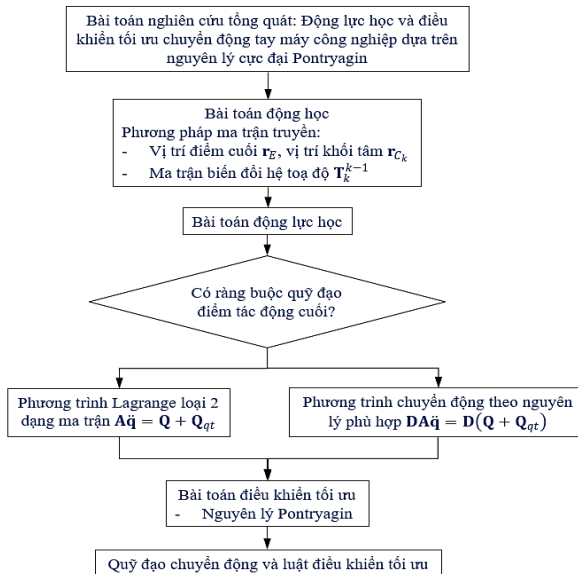
$$q_i(t) = \varphi_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.18)$$

Đối với bài toán có ràng buộc quỹ đạo điểm cuối, xét quỹ đạo điểm cuối được mô tả dưới dạng tham số:

$$x_E = x_E(\varphi), \quad y_E = y_E(\varphi) \quad (2.19)$$

Từ đó, thay $\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \ddot{\mathbf{q}}(t)$ vào phương trình động lực học để tìm lực/mômen tương ứng.

2.5. Khung phương pháp đề xuất của luận án



Hình 2.1. Khung phương pháp đề xuất của luận án

Kết luận chương 2

Từ nội dung chương 2 có thể rút ra một số kết luận như sau:

1- Bài toán phân tích động lực học và tối ưu hoá chuyển động tay máy công nghiệp có thể được đặt trên một cơ sở lý thuyết thống nhất. Sự liên kết này cho thấy ba lớp nội dung trên không tách rời nhau mà tạo thành một chuỗi logic nghiên cứu hoàn chỉnh.

2- Việc lựa chọn phương pháp ma trận truyền, phương trình Lagrange loại 2 dạng ma trận kết hợp nguyên lý phù hợp và nguyên lý Pontryagin là phù hợp với định hướng nghiên cứu của luận án.

3- Xây dựng được khung nghiên cứu tổng quát của luận án đối với lớp bài toán phân tích động lực học và tối ưu hoá chuyển động tay máy công nghiệp.

CHƯƠNG 3. ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU TAY MÁY CÔNG NGHIỆP TRONG CHUYỂN ĐỘNG ĐIỂM-ĐIỂM

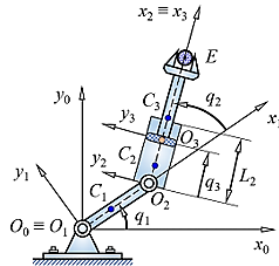
3.1. Điều khiển tối ưu tay máy chuyển động đến điểm đích

3.1.1. Đặt bài toán

Xét tay máy phẳng với hai khâu quay và một khâu tịnh tiến ở cuối (tay máy phẳng RRP), như trong **Lỗi! Không tìm thấy nguồn tham chiếu.**

Bài toán đặt ra là giảm nỗ lực điều khiển, hay tối ưu nỗ lực điều khiển của tay máy thông qua xác định các lực/mômen dẫn động tối ưu tại các khớp (biến điều khiển \mathbf{u}) để điểm tác động cuối E di chuyển từ điểm đầu

(x_0, y_0) ứng với cấu hình tay máy robot là $\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0$ đến điểm cuối (x_f, y_f) ứng với cấu hình tay máy robot là $\mathbf{q}(t_f) = \mathbf{q}_f$ trong thời gian t_f cho trước.



Hình 3.1. Tay máy phẳng RRP dạng 1

3.1.2. Thiết lập phương trình động lực học

3.1.3. Xây dựng bài toán điều khiển tối ưu

Yêu cầu đặt ra là xác định biến điều khiển $\mathbf{u}(t)$ và quy luật chuyển động trong không gian khớp $\mathbf{q}(t)$ tương ứng để điểm cuối của tay máy di chuyển từ vị trí đầu $M_0(x_0, y_0)$ tương ứng với cấu hình ban đầu $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}(0)$, đến vị trí đích $M_f(x_f, y_f)$ ứng với cấu hình cuối $\mathbf{q}_f = \mathbf{q}(t_f)$, trong đó các đại lượng $\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_f, t_f$ được cho trước, và thỏa mãn tiêu chí tối ưu nỗ lực điều khiển biểu diễn thông qua tích phân bình phương lực/mômen điều khiển theo thời gian:

$$J = \int_0^{t_f} f_0 dt \rightarrow \min ; f_0 = \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (2.20)$$

3.1.4. Kết quả mô phỏng nghiệm điều khiển tối ưu

a) Thiết lập mô phỏng

Thực hiện mô phỏng tính với các tham số của tay máy như sau:

$$m_1 = 4,8; m_2 = 2,4; m_3 = 3,0; m = 1,5 \text{ [kg]}$$

$$L_1 = 1,0; L_2 = 0,5; L_3 = 0,6 \text{ [m]; } c_1 = 0,5; c_2 = 0,25; c_3 = 0,3 \text{ [m]}$$

$$J_1 = 0,4; J_2 = 0,05; J_3 = 0,09 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$b_1 = 5; b_2 = 5 \text{ [N.m.s/rad]; } b_3 = 5 \text{ [kg/s]; } g = 10 \text{ [m/s}^2\text{]; } t_f = 3,0 \text{ [s]}$$

Cấu hình ban đầu và cấu hình cuối của tay máy được chọn như sau:

$$M_0 : q_1(0) = 0; q_2(0) = 0,2 \text{ [rad]; } q_3(0) = 0,1 \text{ [m]}$$

$$M_f : q_1(t_f) = 1,4; q_2(t_f) = 1,0 \text{ [rad]; } q_3(t_f) = 0,5 \text{ [m]}$$

Điều kiện biên của vận tốc khớp được chọn như sau:

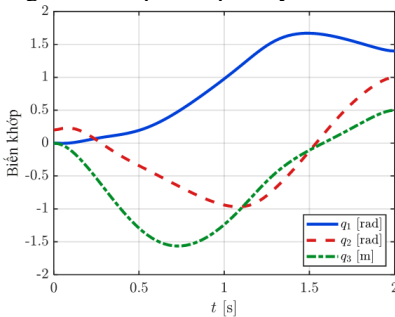
$$\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = \dot{q}_3(0) = \dot{q}_1(t_f) = \dot{q}_2(t_f) = \dot{q}_3(t_f) = 0$$

Phiếm hàm mục tiêu: $z = \int_0^t f_0 dt$ với $z(0) = 0$.

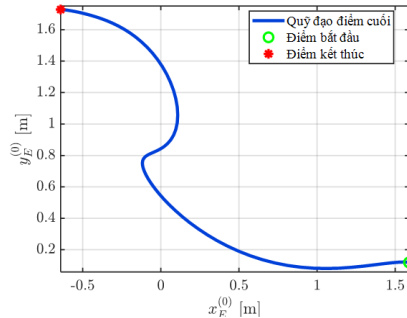
Hệ phương trình giá trị biên được giải bằng phần mềm MATLAB®.

b) Kết quả mô phỏng

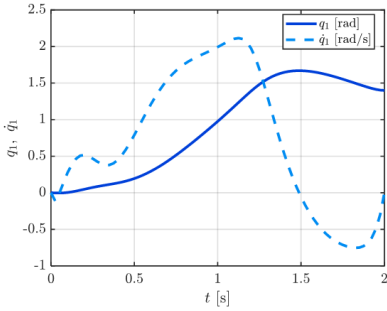
Trong **Hình 3.2**, các biến khớp biến thiên liên tục theo thời gian và giá trị góc khớp tại thời điểm đầu và cuối đúng với điểm đầu và điểm đích tại điều kiện biên. Cùng với đó, quỹ đạo chuyển động của điểm cuối trên **Hình 3.3** có dạng đường cong liên tục, cho thấy tay máy đã thực hiện được chuyển động điểm-điểm trong mặt phẳng làm việc phù hợp với yêu cầu.



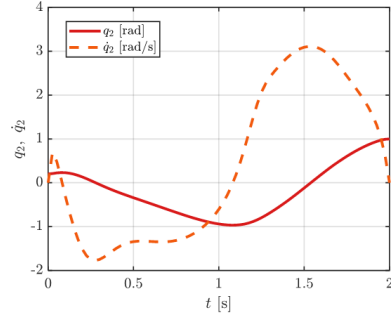
Hình 3.2. Đồ thị các biến khớp



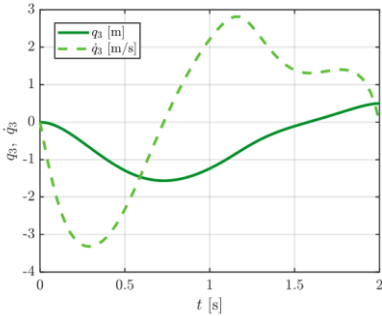
Hình 3.3. Đồ thị quỹ đạo chuyển động điểm cuối



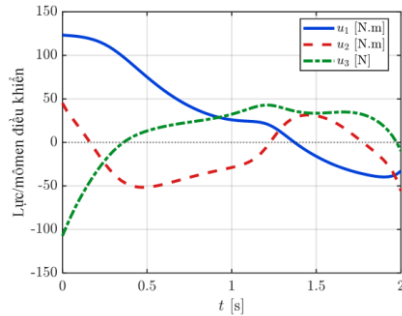
Hình 3.4. Đồ thị biến khớp và vận tốc khớp khâu 1



Hình 3.5. Đồ thị biến khớp và vận tốc khớp khâu 2

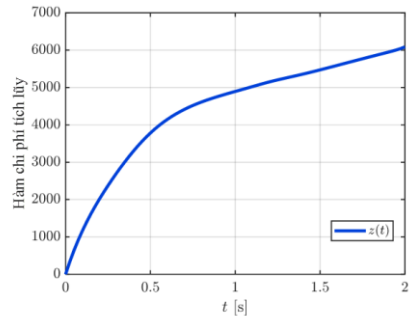


Hình 3.6. Đồ thị biến khớp và vận tốc khớp khâu 3



Hình 3.7. Đồ thị các lực và mômen điều khiển

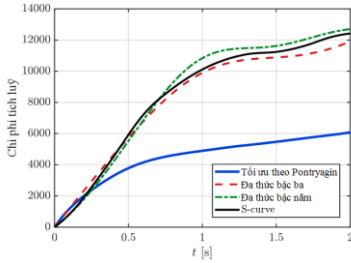
Trên *Hình 3.4* đến *Hình 3.6* thể hiện góc khớp và vận tốc khớp tương ứng của mỗi khâu. Các vận tốc khớp biến thiên liên tục, không xuất hiện dao động lớn và thỏa mãn điều kiện vận tốc bằng không tại thời điểm đầu và cuối. Lực và mômen điều khiển trên *Hình 3.7* đều có sự biến đổi liên tục, không xuất hiện dao động lớn hoặc đột biến. Tính đơn điệu của hàm mục tiêu trong *Hình 3.8* cho thấy tích lũy chi phí điều khiển.



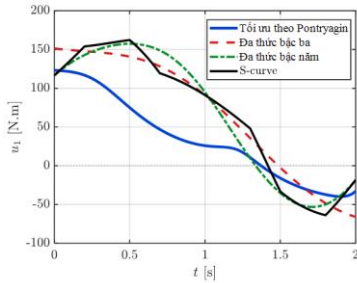
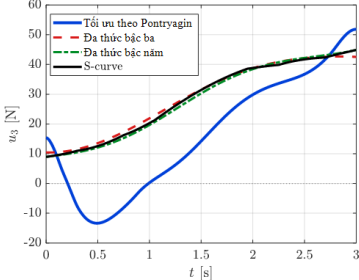
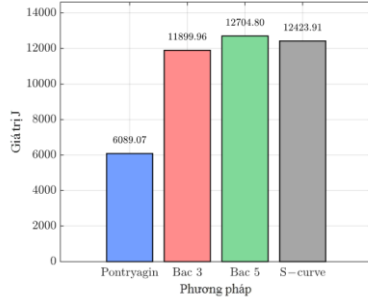
Hình 3.8. Đồ thị hàm chi phí tích lũy

3.1.5. So sánh định lượng với các quy luật chuyển động đối chứng

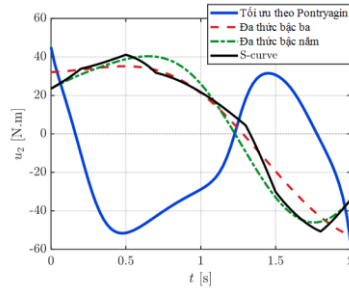
Từ *Hình 3.9*, có thể thấy các hàm chi phí tích lũy của bốn phương án đều tăng theo thời gian, phù hợp với dạng hàm mục tiêu được xây dựng từ bình phương lực/mômen điều khiển.



Hình 3.9. Đồ thị hàm chi phí tích lũy của các quy luật chuyển động

Hình 3.11. Đồ thị mômen u_1 của các quy luật chuyển độngHình 3.13. Đồ thị lực u_3 của các quy luật chuyển động

Hình 3.10. Biểu đồ so sánh giá trị hàm mục tiêu

Hình 3.12. Đồ thị mômen u_2 của các quy luật chuyển động

Bảng 3.1. So sánh giá trị hàm mục tiêu giữa nghiệm tối ưu và các quy luật chuyển động đối chứng trong chuyển động đến điểm đích

Quy luật chuyển động	Giá trị hàm mục tiêu J	Mức giảm của nghiệm tối ưu so với các quy luật đối chứng
Tối ưu theo Pontryagin	6089,07	
Đa thức bậc ba	11899,96	48,83%
Đa thức bậc năm	12704,80	52,07%
S-curve	12423,91	50,99%

Kết quả trên **Hình 3.10** và **Bảng 3.1** cho thấy nghiệm điều khiển tối ưu theo nguyên lý Pontryagin đạt giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất. So với các quy luật đối chứng, nghiệm tối ưu làm giảm giá trị hàm mục tiêu khoảng từ 48,83% đến 52,07%.

3.2. Điều khiển tối ưu tay máy chuyển động điểm-điểm theo chu trình

3.2.1. Đặt bài toán

Toàn bộ chu trình làm việc của tay máy gồm hai giai đoạn:

- Giai đoạn thứ nhất: tay máy mang tải di chuyển từ vị trí đầu đến vị trí cuối;
- Giai đoạn thứ hai: tay máy không tải di chuyển từ vị trí cuối trở về vị trí ban đầu hoặc một cấu hình làm việc xác định.

Yêu cầu đặt ra là xác định các quy luật điều khiển $\mathbf{u}(t)$ tương ứng với toàn bộ chu trình sao cho tay máy thực hiện được đầy đủ hai hành trình đi và về theo các điều kiện biên đã cho, đồng thời bảo đảm tiêu chuẩn tối ưu theo yêu cầu.

3.2.2. Xây dựng bài toán điều khiển tối ưu

Ở giai đoạn thứ nhất, điểm tác động cuối của tay máy di chuyển từ vị trí đầu $M_0(x_0, y_0)$ ứng với cấu hình ban đầu $\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0$ đến vị trí cuối $M_d(x_d, y_d)$ ứng với cấu hình $\mathbf{q}(t_{f1}) = \mathbf{q}_d$ tại thời điểm $t = t_{f1}$ cho trước, với tải trọng mang theo là $m = m_d$. Ở giai đoạn thứ hai, tay máy chuyển động không tải từ vị trí M_d trở về vị trí $M_f \equiv M_0$ ứng với cấu hình $\mathbf{q}(t_f) = \mathbf{q}_0$ trong thời gian t_{f2} . Hàm mục tiêu được lựa chọn cho mỗi giai đoạn của chuyển động là

$$J = \int_0^{t_f} f_0 dt \rightarrow \min ; f_0 = \frac{1}{2} (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (2.21)$$

3.2.3. Kết quả mô phỏng nghiệm điều khiển tối ưu

a) Thiết lập mô phỏng

Thực hiện mô phỏng tính toán với các tham số được chọn như trong mục 3.1.4 với $t_{f1} = t_{f2} = 2$ [s], $t_f = t_{f1} + t_{f2} = 4$ [s]. Các điều kiện biên của bài toán chuyển động theo chu trình được chọn như sau:

Điều kiện biên của giai đoạn đi (pha đi) là

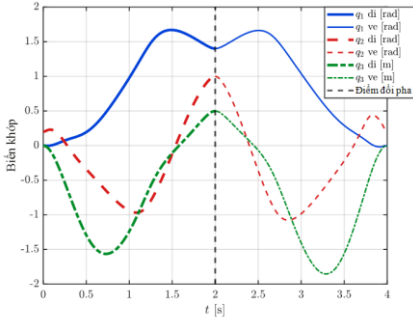
$$\begin{aligned} q_1(0) &= 0 \text{ [rad]}; q_2(0) = 0, 2 \text{ [rad]}; q_3(0) = 0 \text{ [m]}; \\ q_1(t_{f1}) &= 1, 4 \text{ [rad]}; q_2(t_{f1}) = 1, 0 \text{ [rad]}; q_3(t_{f1}) = 0, 5 \text{ [m]} \\ \dot{q}_1(0) &= \dot{q}_2(0) = \dot{q}_3(0) = \dot{q}_1(t_{f1}) = \dot{q}_2(t_{f1}) = \dot{q}_3(t_{f1}) = 0 \\ z(0) &= 0 \end{aligned}$$

Điều kiện biên của giai đoạn về (pha về) là

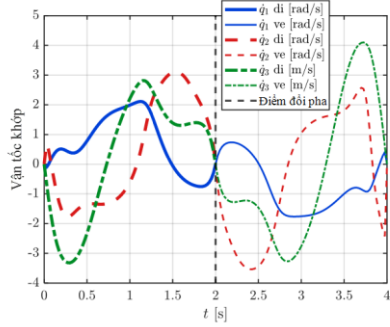
$$\begin{aligned} q_1(t_{f1}) &= 1, 4 \text{ [rad]}; q_2(t_{f1}) = 1, 0 \text{ [rad]}; q_3(t_{f1}) = 0, 5 \text{ [m]}; \\ q_1(t_f) &= 0 \text{ [rad]}; q_2(t_f) = 0, 2 \text{ [rad]}; q_3(t_f) = 0 \text{ [m]}; \\ \dot{q}_1(t_{f1}) &= \dot{q}_2(t_{f1}) = \dot{q}_3(t_{f1}) = \dot{q}_1(t_f) = \dot{q}_2(t_f) = \dot{q}_3(t_f) = 0; \end{aligned}$$

b) Kết quả mô phỏng

Từ *Hình 3.14* có thể thấy các biến khớp biến thiên liên tục trong cả hai giai đoạn đi và về. Các biến khớp đạt đúng cấu hình tại điểm đổi pha; sau đó tay máy tiếp tục thực hiện giai đoạn về để trở lại cấu hình ban đầu.

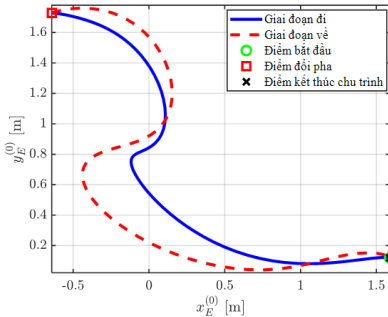


Hình 3.14. Đồ thị các góc khớp giai đoạn đi và về

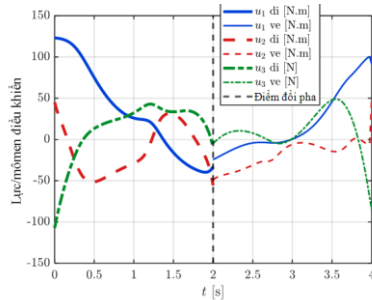


Hình 3.15. Đồ thị các vận tốc khớp giai đoạn đi và về

Hình 3.15 cho thấy vận tốc các khớp tại thời điểm bắt đầu, tại điểm đổi pha và tại thời điểm kết thúc chu trình đều bằng không.

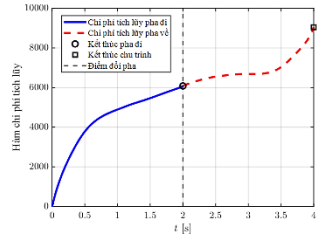


Hình 3.16. Đồ thị vị trí điểm tác động cuối



Hình 3.17. Đồ thị mômen điều khiển giai đoạn đi và về

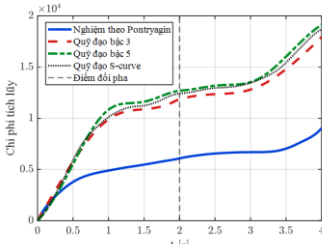
Đường quỹ đạo của giai đoạn đi và giai đoạn về trong Hình 3.16 nối các vị trí đầu, vị trí đổi pha và vị trí kết thúc theo đúng yêu cầu đặt ra. Hình 3.17 biểu diễn các mômen điều khiển biến thiên liên tục trong từng giai đoạn và không xuất hiện dao động bất thường. Hình 3.18 thể hiện giá trị tích lũy của hàm mục tiêu trong toàn bộ chu trình.



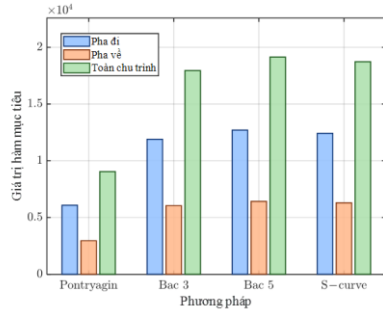
Hình 3.18. Đồ thị tích lũy hàm mục tiêu giai đoạn đi và về

3.2.4. So sánh định lượng với các quy luật chuyển động đối xứng

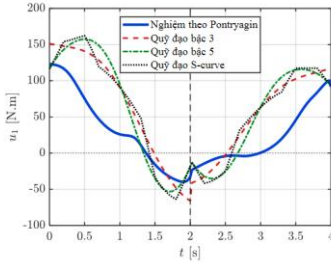
Từ Hình 3.19 có thể thấy hàm chi phí tích lũy của các phương án đều tăng theo thời gian, phù hợp với dạng hàm mục tiêu được xây dựng từ bình phương mômen điều khiển. Theo Bảng 3.2, nghiệm điều khiển tối ưu làm giảm giá trị hàm mục tiêu toàn chu trình khoảng 49,59% so với quy luật đa thức bậc ba, 52,70% so với quy luật đa thức bậc năm và 51,66% so với quy luật S-curve.



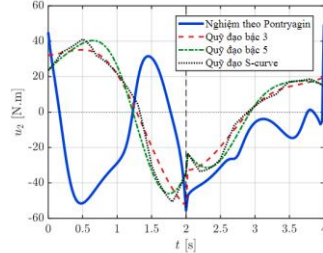
Hình 3.19. Đồ thị hàm chi phí tích lũy của các quy luật chuyển động



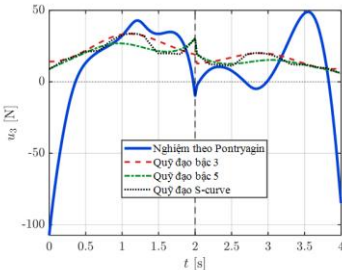
Hình 3.20. Biểu đồ so sánh giá trị hàm mục tiêu



Hình 3.21. Đồ thị mômen u_1 của các quy luật chuyển động



Hình 3.22. Đồ thị mômen u_2 của các quy luật chuyển động



Hình 3.23. Đồ thị mômen u_3 của các quy luật chuyển động

Bảng 3.2. So sánh giá trị hàm mục tiêu giữa nghiệm tối ưu và các quy luật chuyển động đối chứng trong chuyển động điểm-điểm theo chu trình

Quy luật chuyển động	Giá trị hàm mục tiêu J			Mức giảm của nghiệm tối ưu so với các quy luật đối chứng trong toàn bộ chu trình
	Pha đi	Pha về	Chu trình	
Tối ưu theo Pontryagin	6089,07	2960,65	9049,72	
Đa thức bậc ba	11899,96	6050,73	17950,68	49,59%
Đa thức bậc năm	12704,80	6429,21	19134,01	52,70%
S-curve	12423,91	6297,60	18721,51	51,66%

Kết luận chương 3

Từ nội dung chương 3 có thể rút ra các kết luận sau:

1- Khung phương pháp nghiên cứu đã xây dựng ở Chương 2 có thể áp dụng hiệu quả cho bài toán điều khiển tối ưu tay máy công nghiệp trong chuyển động điểm-điểm.

2- Việc áp dụng nguyên lý cực đại Pontryagin cho phép chuyển các bài toán điều khiển tối ưu đã xét về dạng hệ phương trình vi phân biên hai điểm, trong đó các biến trạng thái, biến liên hợp và luật điều khiển tối ưu được xác định đồng thời.

3- Các kết quả mô phỏng số cho thấy nghiệm tối ưu thu được đều bảo đảm tay máy thực hiện đúng yêu cầu chuyển động. Việc so sánh định lượng tiêu chí tối ưu với các quy luật chuyển động đối chứng gồm đa thức bậc ba, đa thức bậc năm và S-curve đã được thực hiện. Đối với bài toán chuyển động đến điểm đích, nghiệm tối

ưu làm giảm giá trị hàm mục tiêu lần lượt 48,83%; 52,07% và 50,99% so với các quy luật đối chứng. Đối với bài toán chuyển động điểm-điểm theo chu trình, giá trị hàm mục tiêu toàn chu trình giảm lần lượt 49,59%; 52,70% và 51,66%.

CHƯƠNG 4. ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU TAY MÁY CÔNG NGHIỆP CHỤY RÀNG BUỘC QUỸ ĐẠO ĐIỂM CUỐI

4.1. Điều khiển tối ưu tay máy chịu ràng buộc quỹ đạo điểm cuối

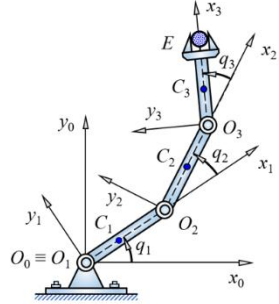
4.1.1. Đặt bài toán

Xét tay máy phẳng với ba khâu quay như trong *Hình 4.1*.

Bài toán đặt ra là tối ưu nỗ lực điều khiển của tay máy thông qua xác định các lực/mômen dẫn động tối ưu tại các khớp (biến điều khiển) để điểm cuối E với tọa độ (x_E, y_E) trong hệ tọa độ O_0, x_0, y_0 di chuyển trong mặt phẳng thẳng đứng theo quỹ đạo cho trước là một đường thẳng có phương trình

$$G \triangleq y_E + ax_E - b = 0 \quad (2.22)$$

với a, b là các hệ số cho trước.



Hình 4.1. Tay máy phẳng ba khâu quay (RRR)

4.1.2. Thiết lập phương trình động lực học tay máy chịu ràng buộc

Đạo hàm theo thời gian của G ta được:

$$G_1 \triangleq \frac{dG}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial G}{\partial q_i} \dot{q}_i = \sum_{i=1}^3 d_i \dot{q}_i = 0; \quad d_i = \frac{\partial G}{\partial q_i} \quad (2.23)$$

Từ đó ta được ma trận \mathbf{D} như sau:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{d_1}{d_3} \\ 0 & 1 & -\frac{d_2}{d_3} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

4.1.3. Xây dựng bài toán điều khiển tối ưu

Yêu cầu đặt ra là xác định biến điều khiển $\mathbf{u}(t)$ và quỹ đạo góc khớp $\mathbf{q}(t)$ tương ứng để điểm cuối của tay máy di chuyển từ vị trí đầu $M_0(x_0, y_0)$ tương ứng với góc khớp $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}(0)$, theo đường dịch chuyển thẳng ứng với phương trình (2.22), đến vị trí đích $M_f(x_f, y_f)$ với góc khớp $\mathbf{q}_f = \mathbf{q}(t_f)$, trong đó $\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_f, t_f$ cho trước, và thỏa mãn tiêu chí tối ưu như sau

$$J = \int_0^{t_f} f_0 dt \rightarrow \min; \quad f_0 = \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (2.25)$$

4.1.4. Kết quả mô phỏng số

a) Thiết lập mô phỏng

Thực hiện mô phỏng tính toán với các tham số được chọn như sau:

$$m_1 = 4,2; m_2 = 3,0; m_3 = 2,88; m_d = 1,5 \text{ [kg]}$$

$$L_1 = 0,8; L_2 = 0,6; L_3 = 0,5 \text{ [m]; } c_1 = 0,4; c_2 = 0,3; c_3 = 0,25 \text{ [m]}$$

$$J_1 = 0,224; J_2 = 0,09; J_3 = 0,06 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$b_1 = 3; b_2 = 5; b_3 = 5 \text{ [N.m.s/rad]; } g = 10 \text{ [m/s}^2\text{]}; t_f = 2 \text{ [s]}$$

Điều kiện biên được chọn như sau:

$$q_1(0) = 0 \text{ [rad]; } q_2(0) = \frac{\pi}{6} \text{ [rad]; } q_3(0) = \frac{\pi}{6} \text{ [rad]}$$

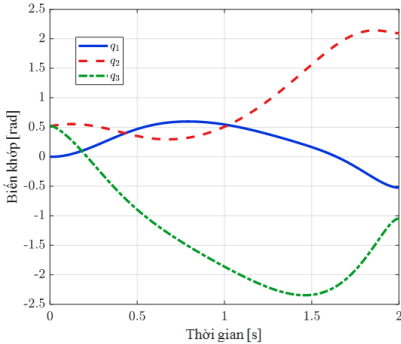
$$q_1(t_f) = -\frac{\pi}{6} \text{ [rad]; } q_2(t_f) = \frac{2\pi}{3} \text{ [rad]; } q_3(t_f) = -\frac{\pi}{3} \text{ [rad];}$$

$$\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = \dot{q}_3(0) = 0$$

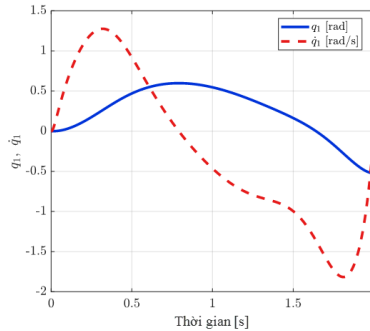
$$\dot{q}_1(t_f) = \dot{q}_2(t_f) = \dot{q}_3(t_f) = 0$$

Phiếm hàm mục tiêu tích lũy: $z = \int_0^t f_0 dt$; $z(0) = 0$.

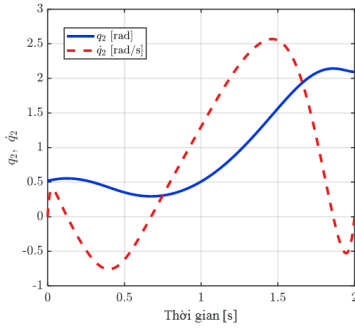
b) Kết quả mô phỏng



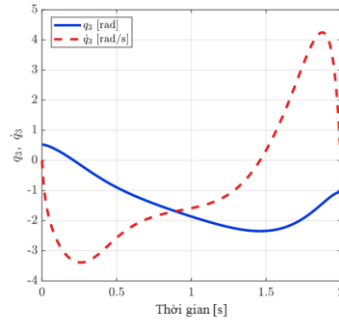
Hình 4.2. Đồ thị các biến khớp



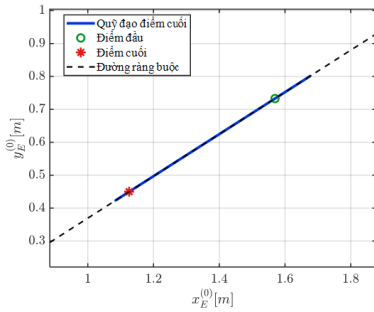
Hình 4.3. Đồ thị biến khớp và vận tốc khớp khâu 1



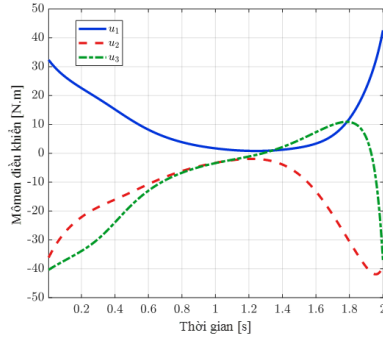
Hình 4.4. Đồ thị biến khớp và vận tốc khớp khâu 2



Hình 4.5. Đồ thị biến khớp và vận tốc khớp khâu 3



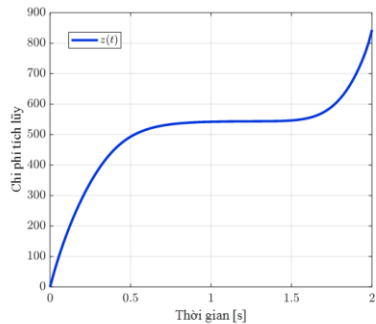
Hình 4.6. Đồ thị quỹ đạo chuyển động điểm cuối



Hình 4.7. Đồ thị các lực/mômen điều khiển

Trên **Hình 4.2**, các biến khớp biến thiên liên tục theo thời gian, không xuất hiện bước nhảy hoặc dao động bất thường. Các **Hình 4.3**, **Hình 4.4** và **Hình 4.5** thể hiện chi tiết quy luật biến khớp và vận tốc khớp tương ứng. Có thể thấy vận tốc của các khớp đều bằng không tại thời điểm đầu và thời điểm cuối, phù hợp với điều kiện biên đã đặt ra.

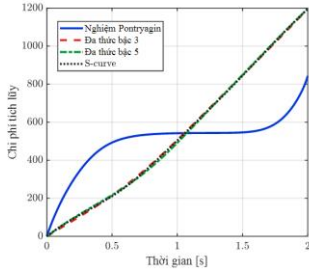
Hình 4.6 cho thấy điểm cuối của tay máy di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối và bám theo đường ràng buộc hình học đã đặt ra. **Hình 4.7** thể hiện các tín hiệu điều khiển u_1, u_2, u_3 biến thiên liên tục trong toàn bộ quá trình mô phỏng. **Hình 4.8** biểu diễn giá trị tích lũy của hàm mục tiêu $z(t)$ tăng nhanh ở giai đoạn đầu, sau đó tăng chậm hơn ở khoảng giữa quá trình và tiếp tục tăng mạnh hơn ở giai đoạn cuối. Điều này phù hợp với diễn biến của các lực/mômen điều khiển trên **Hình 4.7**.



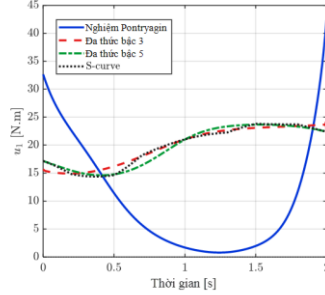
Hình 4.8. Đồ thị hàm mục tiêu

4.1.5. So sánh định lượng với các quy luật chuyển động đối chứng

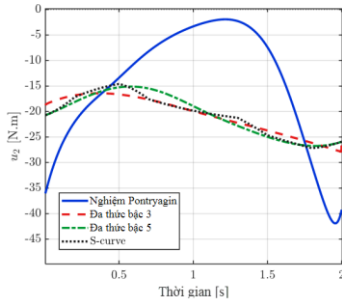
Hình 4.9 cho thấy đường chi phí tích lũy của nghiệm Pontryagin nằm thấp hơn rõ rệt so với các quy luật đối chứng trong phần lớn quá trình chuyển động.



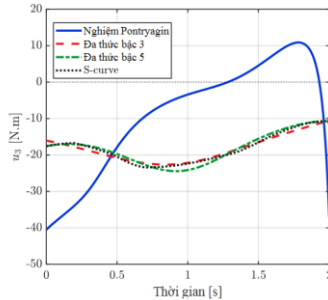
Hình 4.9. Đồ thị hàm chi phí tích lũy của các quy luật chuyển động



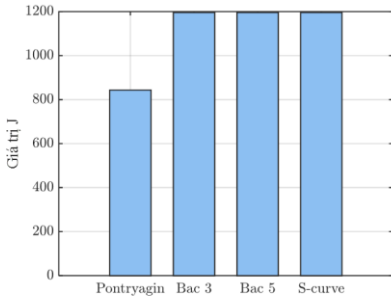
Hình 4.10. Đồ thị mômen u_1 của các quy luật chuyển động



Hình 4.11. Đồ thị mômen u_2 của các quy luật chuyển động



Hình 4.12. Đồ thị mômen u_3 của các quy luật chuyển động



Hình 4.13. Biểu đồ so sánh giá trị hàm mục tiêu

Các tín hiệu điều khiển của cả bốn phương pháp trên Hình 4.10 đến Hình 4.12 đều biến thiên trơn, không xuất hiện các đỉnh bất thường. Nhìn chung, nghiệm Pontryagin không tối thiểu hóa biên độ tại từng cơ cấu chấp hành riêng lẻ, mà phối hợp cả ba biến điều khiển để giảm chi phí hàm tích lũy.

Kết quả trên Hình 4.13 cho thấy nghiệm tối ưu theo Pontryagin làm giảm đáng kể chi phí điều khiển so với các quy luật đối chứng. Tương ứng, nghiệm tối ưu giúp giảm khoảng 29,46% năng lượng so với quy luật chuyển động đa thức bậc 3 và khoảng 29,46% so với quy luật chuyển động đa thức bậc 5 và khoảng 29,47% so với quy luật chuyển động S-curve. Điều này chứng tỏ nghiệm điều khiển tối ưu

Bảng 4.1. So sánh giá trị hàm mục tiêu giữa nghiệm tối ưu và các quy luật chuyển động đối chứng trong chuyển động chịu ràng buộc quỹ đạo điểm cuối

Quy luật chuyển động	Giá trị hàm mục tiêu J	Mức giảm của nghiệm tối ưu so với các quy luật đối chứng
Tối ưu theo Pontryagin	843,56	
Đa thức bậc ba	1195,88	29,46%
Đa thức bậc năm	1195,89	29,46%
S-curve	1196,02	29,47%

không chỉ thỏa mãn điều kiện biên và ràng buộc quỹ đạo điểm cuối, mà còn đạt hiệu quả tốt hơn theo đúng tiêu chí tối ưu đã lựa chọn.

4.2. Điều khiển tối ưu tay máy trên quỹ đạo định sẵn theo chu trình

4.2.1. Đặt bài toán

Xét tay máy phẳng RRP dạng 2 như trong mục 4.1. Chuyển động của tay máy thực hiện trong một chu trình bao gồm giai đoạn đi và giai đoạn về. Ở giai đoạn đi, tay máy mang tải trọng m ở điểm tác động cuối, di chuyển từ điểm đầu đến điểm đích trên quỹ đạo định sẵn. Ở giai đoạn về, tay máy di chuyển từ điểm đích về vị trí ban đầu và không mang tải, vẫn trên quỹ đạo định sẵn của điểm tác động cuối.

4.2.2. Xây dựng bài toán điều khiển tối ưu

Ở giai đoạn đi, điểm tác động cuối của tay máy di chuyển từ vị trí đầu $M_0(x_0, y_0)$ ứng với cấu hình ban đầu $\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0$ trong khoảng thời gian $0 \leq t \leq t_{f1}$ đến vị trí cuối $M_d(x_d, y_d)$ ứng với cấu hình $\mathbf{q}(t_{f1}) = \mathbf{q}_d$ kèm tải trọng mang theo là $m = m_d$. Ở giai đoạn về, tay máy chuyển động không tải, điểm tác động cuối di chuyển từ vị trí M_d trở về vị trí $M_f \equiv M_0$ ứng với cấu hình $\mathbf{q}(t_f) = \mathbf{q}_0$ trong thời gian $t_{f1} \leq t \leq t_{f2}$. Tổng thời gian di chuyển của một chu trình là $t_f = t_{f1} + t_{f2}$.

Hàm mục tiêu được lựa chọn cho mỗi giai đoạn của chuyển động là

$$J = \int_0^{t_f} f_0 dt \rightarrow \min; \quad f_0 = \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (2.26)$$

4.2.3. Kết quả mô phỏng số

a) Thiết lập mô phỏng

Các điều kiện biên được chọn như sau:

- Điều kiện biên của giai đoạn đi ($0 \leq t \leq t_{f1} = 2[s]$)

$$q_1(0) = 0 [\text{rad}]; q_2(0) = \frac{\pi}{6} [\text{rad}]; q_3(0) = \frac{\pi}{6} [\text{rad}]$$

$$q_1(t_{f1}) = -\frac{\pi}{6} [\text{rad}]; q_2(t_{f1}) = \frac{2\pi}{3} [\text{rad}]; q_3(t_{f1}) = -\frac{\pi}{3} [\text{rad}];$$

$$\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = \dot{q}_3(0) = 0$$

$$\dot{q}_1(t_{f1}) = \dot{q}_2(t_{f1}) = \dot{q}_3(t_{f1}) = 0$$

- Điều kiện biên của giai đoạn về ($t_{f1} \leq t \leq t_{f2}$)

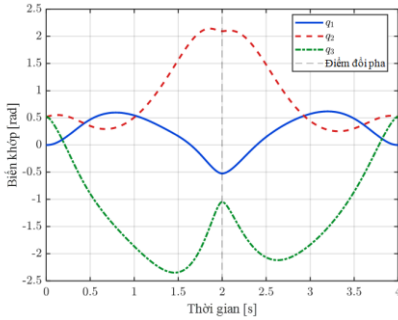
$$q_1(t_{f1}) = -\frac{\pi}{6} [\text{rad}]; q_2(t_{f1}) = \frac{2\pi}{3} [\text{rad}]; q_3(t_{f1}) = -\frac{\pi}{3} [\text{rad}];$$

$$q_1(t_f) = 0 [\text{rad}]; q_2(t_f) = \frac{\pi}{6} [\text{rad}]; q_3(t_f) = \frac{\pi}{6} [\text{rad}];$$

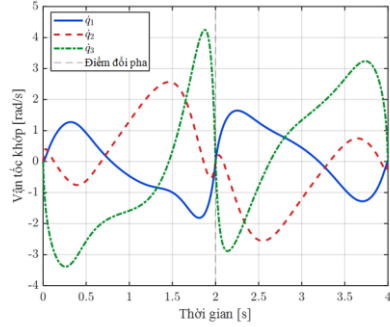
$$\dot{q}_1(t_{f1}) = \dot{q}_2(t_{f1}) = \dot{q}_3(t_{f1}) = 0; \dot{q}_1(t_f) = \dot{q}_2(t_f) = \dot{q}_3(t_f) = 0$$

b) Kết quả mô phỏng

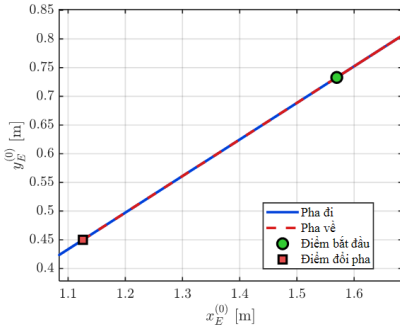
Đồ thị **Hình 4.14** cho thấy các biến khớp đều biến thiên liên tục theo thời gian trong cả hành trình đi và hành trình về. Giá trị của các tọa độ suy rộng tại đầu và cuối mỗi hành trình phù hợp với các điều kiện biên đã đặt ra.



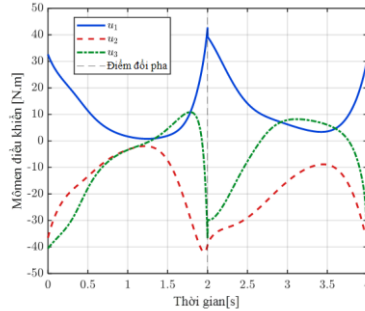
Hình 4.14. Đồ thị các biến khớp giai đoạn đi và về



Hình 4.15. Đồ thị các vận tốc khớp giai đoạn đi và về



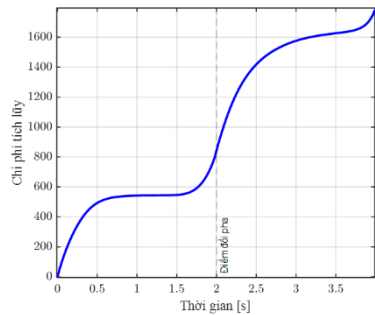
Hình 4.16. Đồ thị quỹ đạo điểm cuối



Hình 4.17. Đồ thị mômen điều khiển giai đoạn đi và về

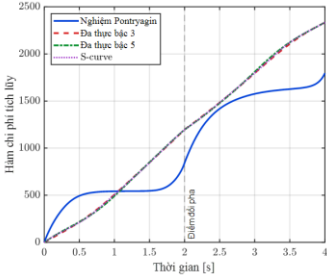
Hình 4.15 thể hiện vận tốc của các khớp trong toàn bộ chu trình. Các vận tốc khớp thỏa mãn điều kiện bằng không tại thời điểm đầu, tại điểm chuyển pha và tại thời điểm kết thúc chu trình.

Kết quả biểu diễn quỹ đạo của điểm tác động cuối trong mặt phẳng thao tác trên **Hình 4.16** cho thấy quỹ đạo điểm cuối ở giai đoạn đi và giai đoạn về đều nằm trên đường ràng buộc hình học đã cho, cách xây dựng bài toán điều khiển tối ưu theo từng pha của chu trình vẫn bảo đảm yêu cầu ràng buộc quỹ đạo tại điểm tác động cuối. **Hình 4.17** biểu diễn các lực điều khiển tối ưu tương ứng với hai hành trình. Có thể thấy các lực điều khiển đều biến thiên liên tục theo thời gian, không xuất hiện đột biến lớn. Giá trị hàm mục tiêu trên **Hình 4.18** tăng đơn điệu theo thời gian, phù hợp với bản chất của hàm mục tiêu.

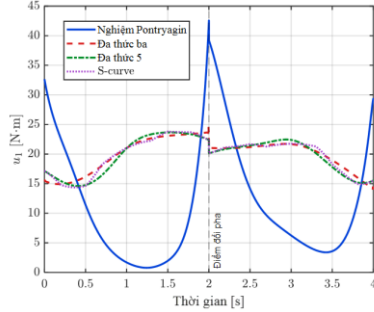


Hình 4.18. Đồ thị hàm chi phí giai đoạn đi và về

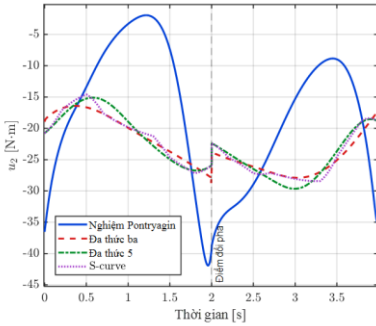
4.2.4. So sánh định lượng với các quy luật chuyển động đối chứng



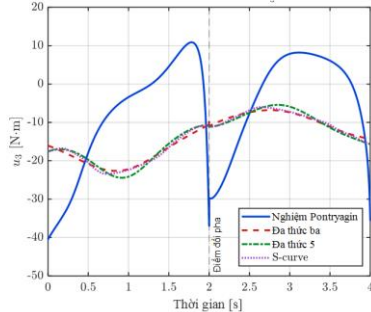
Hình 4.19. Đồ thị hàm chi phí tích lũy của các quy luật chuyển động



Hình 4.20. Đồ thị mômen u_1 của các quy luật chuyển động

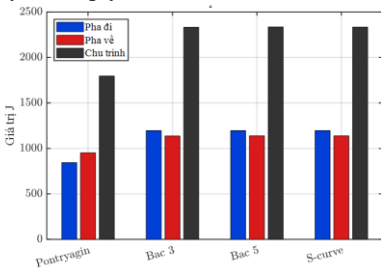


Hình 4.21. Đồ thị mômen u_2 của các quy luật chuyển động



Hình 4.22. Đồ thị mômen u_3 của các quy luật chuyển động

Hình 4.19 biểu diễn sự biến thiên của hàm chi phí tích lũy theo thời gian đối với nghiệm tối ưu theo Pontryagin và các quy luật chuyển động đối chứng. Có thể nhận thấy đường chi phí tích lũy của nghiệm Pontryagin nằm thấp hơn rõ rệt so với các quy luật đối chứng trong phần lớn thời gian của chu trình, kể cả pha đi và pha về. Ba đồ thị biên điều khiển trên Hình 4.20 đến Hình 4.22 cho thấy tín hiệu điều khiển của các phương pháp điều liên tục và không xuất hiện các đỉnh bất thường do sự biến quỹ đạo như trước.



Hình 4.23. Biểu đồ so sánh giá trị hàm mục tiêu toàn chu trình

Bảng 4.2. So sánh giá trị hàm mục tiêu nghiệm tối ưu và các quy luật chuyển động đối chứng trong chuyển động chịu ràng buộc quỹ đạo điểm cuối theo chu trình

Quy luật chuyển động	Giá trị hàm mục tiêu J toàn chu trình	Mức giảm của nghiệm tối ưu so với các quy luật đối chứng trong toàn bộ chu trình
Tối ưu theo Pontryagin	1795,79	
Đa thức bậc ba	2332,38	23,01%
Đa thức bậc năm	2335,12	23,10%
S-curve	2334,06	23,06%

Kết quả trong giá trị J cho thấy giá trị hàm mục tiêu toàn chu trình của nghiệm tối ưu theo Pontryagin giảm 23,01% so với quy luật đa thức bậc ba, giảm 23,10% so với quy luật đa thức bậc năm và giảm 23,06% so với quy luật S-curve. Điều này

chứng tỏ nghiệm điều khiển tối ưu đạt hiệu quả định lượng rõ rệt theo đúng tiêu chí tối ưu nỗ lực điều khiển.

Kết luận chương 4

Từ nội dung và kết quả đạt được của chương 4 có thể rút ra kết luận như sau:

1- Khung phương pháp nghiên cứu của luận án có thể tiếp tục được mở rộng từ bài toán chuyển động điểm-điểm sang bài toán điều khiển tối ưu tay máy công nghiệp chịu ràng buộc quỹ đạo điểm cuối.

2- Việc áp dụng nguyên lý cực đại Pontryagin cho các mô hình tay máy chịu ràng buộc quỹ đạo đã cho thấy hướng tiếp cận của luận án không chỉ phù hợp với hệ cơ học không ràng buộc, mà còn có thể xử lý được các hệ cơ học chịu ràng buộc hình học trong suốt quá trình chuyển động.

3- Các kết quả so sánh định lượng với các quy luật chuyển động đối chứng đã làm rõ hơn hiệu quả của nghiệm tối ưu theo Pontryagin. Đối với bài toán chuyển động đơn chịu ràng buộc quỹ đạo điểm cuối, giá trị hàm mục tiêu của nghiệm tối ưu giảm lần lượt khoảng 29,46%; 29,46% và 29,47% so với các quy luật chuyển động đối chứng. Đối với bài toán chuyển động theo chu trình, giá trị hàm mục tiêu toàn chu trình của nghiệm tối ưu giảm lần lượt khoảng 23,01%; 23,10% và 23,06%.

KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN TIẾP THEO

Kết luận chung

Từ nội dung và kết quả đạt được của luận án, có thể rút ra các kết luận sau:

1- Luận án đã xây dựng được một khung phương pháp nghiên cứu tương đối thống nhất cho lớp bài toán phân tích động lực học và tối ưu hóa chuyển động tay máy công nghiệp.

2- Đối với bài toán chuyển động điểm-điểm, luận án đã phát biểu, xây dựng và giải được bài toán điều khiển tối ưu cho hai trường hợp tiêu biểu là chuyển động đến điểm đích và chuyển động theo chu trình. Kết quả thu được cho thấy các mô hình động lực học được thiết lập là phù hợp, bài toán tối ưu được phát biểu đúng đắn, và lời giải tối ưu thu được bảo đảm tay máy thực hiện đúng yêu cầu chuyển động với các biên khớp, vận tốc khớp và tín hiệu điều khiển biến thiên liên tục, hợp lý về mặt cơ học.

3- Đối với bài toán chuyển động chịu ràng buộc quỹ đạo điểm cuối, luận án đã mở rộng được khung phương pháp từ hệ không ràng buộc sang hệ chịu ràng buộc hình học. Các kết quả nghiên cứu cho thấy phương trình chuyển động của hệ chịu ràng buộc có thể được thiết lập dưới dạng thích hợp để áp dụng nguyên lý Pontryagin, từ đó xác định được luật điều khiển tối ưu bảo đảm điểm tác động cuối bám đúng quỹ đạo yêu cầu trong suốt quá trình chuyển động.

4- Các kết quả so sánh định lượng với các quy luật chuyển động đối chứng như đa thức bậc ba, đa thức bậc năm và S-curve cho thấy nghiệm tối ưu theo Pontryagin làm giảm rõ rệt giá trị hàm mục tiêu.

5- Về mặt đóng góp, luận án không chỉ dừng ở việc áp dụng các kết quả lý thuyết đã biết cho các mô hình cụ thể, mà đã tổ chức và phát triển được một hướng xử lý có tính hệ thống cho lớp bài toán động lực học và điều khiển tối ưu tay máy công nghiệp. Các mô hình tay máy phẳng 3 bậc tự do được khảo sát trong luận án đóng vai trò minh họa và kiểm chứng cho khung phương pháp đề xuất.

Hướng phát triển tiếp theo

1- Mở rộng hướng nghiên cứu của luận án cho các mô hình tay máy robot có cấu trúc không gian và số bậc tự do lớn hơn.

2- Nghiên cứu bổ sung vào mô hình động lực học các yếu tố ảnh hưởng như môi trường có vật cản, sai lệch mô hình động lực học, tính đàn hồi của khâu và khớp.

3- Nghiên cứu kiểm chứng bằng thực nghiệm trên mô hình tay máy cụ thể.