

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM
HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**

.....*.....**

NGUYỄN ĐÌNH DŨNG

**ĐỘNG LỰC HỌC NGƯỢC VÀ ĐIỀU KHIỂN
CHUYỂN ĐỘNG CỦA ROBOT SONG SONG
DELTA KHÔNG GIAN**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT CƠ KHÍ VÀ CƠ KỸ THUẬT**

Hà Nội – 2018

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ
- Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học 1: GS. TSKH Nguyễn Văn Khang

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS Nguyễn Quang Hoàng

Phản biện 1: GS. TS. Đinh Văn Phong

Phản biện 2: GS. TS. Trần Văn Tuấn

Phản biện 3: PGS. TS. Lê Lương Tài

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Học viện, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi ... giờ ..', ngày ... tháng ... năm 2018

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài

Robot song song là robot có cấu trúc vòng động học kín trong đó các khâu được nối với nhau bằng các khớp động. Mặc dù robot song song có cấu trúc động học phức tạp, khó thiết kế và điều khiển, nhưng nó có một số ưu điểm nổi trội so với robot nối tiếp như: chịu được tải trọng lớn, độ cứng vững cao do kết cấu hình học của chúng, có thể thực hiện những thao tác phức tạp và hoạt động với độ chính xác cao. Vì vậy việc đi sâu nghiên cứu bài toán động lực học và điều khiển robot song song để tận dụng những ưu điểm của nó là một vấn đề khoa học và có ý nghĩa thực tế.

Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là áp dụng Phương trình Lagrange dạng nhân tử nghiên cứu về động lực học và điều khiển robot song song Delta không gian. Trong đó chủ yếu xây dựng mô hình cơ học và mô hình toán học, xây dựng các thuật toán điều khiển cho robot song song Delta làm cơ sở khoa học cho việc nghiên cứu thiết kế, chế tạo robot song song Delta.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: Động lực học và điều khiển hai loại robot song song Delta không gian là robot 3RUS và robot 3PUS.

Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu bài toán xây dựng mô hình toán học và cơ học, nghiên cứu các thuật toán động lực học và điều khiển cho robot song song Delta. Trong luận án không nghiên cứu bài toán thiết kế và chế tạo robot song song Delta.

Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng Phương trình Lagrange dạng nhân tử để thiết lập phương trình chuyển động của robot song song Delta không gian. Sử dụng phương pháp số cho việc giải bài toán động lực học và điều khiển robot song song không gian có mô hình toán là các phương trình vi phân – đại số.

Bố cục của luận án

Ngoài mở đầu và kết luận, luận án gồm những phần chính sau đây:

Chương 1: Trình bày tổng quan về tình hình nghiên cứu động lực học và điều khiển robot song song không gian ở trong và ngoài nước. Từ đó, hướng đi của luận án được lựa chọn sao cho có ý nghĩa khoa học và có tính ứng dụng thực tiễn cao.

Chương 2: Trình bày việc xây dựng các mô hình cơ học và áp dụng các phương trình Lagrange dạng nhân tử để xây dựng mô hình toán học cho hai robot song song Delta không gian. Mỗi robot đưa ra hai mô hình cơ học để nghiên cứu và so sánh với nhau.

Chương 3: Trình bày một số cải tiến về phương pháp số để giải bài toán động học ngược và động lực học ngược robot song song. Bài toán động học ngược được giải bằng cách áp dụng phương pháp Newton – Raphson cải tiến. Bài toán động lực học ngược được giải bằng cách khử các nhân tử Lagrange để tính mô men hoặc lực dẫn động ở các khớp chủ động.

Chương 4: Trình bày việc điều khiển bám quỹ đạo robot song song Delta dựa trên mô hình toán học của robot song song là hệ các phương trình vi phân – đại số. Việc điều khiển bám quỹ đạo của các robot dạng chuỗi mô tả bởi các phương trình vi phân thường đã được nghiên cứu nhiều. Trong khi bài toán điều khiển bám quỹ đạo robot song song Delta dựa trên mô hình toán là hệ phương trình vi phân – đại số còn ít được nghiên cứu. Các thuật toán điều khiển như điều khiển PD, điều khiển PID, điều khiển trượt, điều khiển trượt sử dụng mạng nơ ron được nghiên cứu trong chương này.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ BÀI TOÁN ĐỘNG LỰC HỌC VÀ ĐIỀU KHIỂN ROBOT SONG SONG

1.1 Robot có cấu trúc song song

Robot có cấu trúc song song thường gồm có bàn máy động được nối với giá cố định, dẫn động theo nhiều nhánh song song hay còn gọi là chân. Thường số chân bằng số bậc tự do, được điều khiển bởi nguồn phát động đặt trên giá cố định hoặc ngay trên chân. Do đó, robot song song đôi khi được gọi là robot có bộ.

1.2 So sánh robot nối tiếp và robot song song

Robot song song có độ cứng vững cao và khả năng chịu tải từ các thiết bị truyền động hoạt động song song để hỗ trợ tải. Độ chính xác vị trí của robot song song cao vì các sai số được bù trung bình từ sai số của từng chân do cấu trúc song song mà không bị tích lũy như robot nối tiếp. Trong khi các chuỗi động học tạo ra các ràng buộc và giới hạn về không gian làm việc, các thiết kế điển hình có đặc tính quán tính thấp. Các lĩnh vực ứng dụng robot song song bao gồm: Máy CNC, máy chính xác cao, máy móc tự động hóa trong bán dẫn và công nghiệp lắp ráp điện tử tốc độ và gia tốc cao. Để so sánh giữa robot nối tiếp với robot song song ta có bảng sau:

Bảng 1.1: So sánh robot nối tiếp và robot song song

STT	Tính năng	Robot nối tiếp	Robot song song
1	Độ chính xác	Thấp hơn	Cao hơn
2	Không gian làm việc	Lớn hơn	Nhỏ hơn
3	Độ cứng vững	Thấp hơn	Cao hơn
4	Tỉ số tải/khối lượng	Thấp hơn	Cao hơn
5	Tải trọng quán tính	Lớn hơn	Nhỏ hơn
6	Tốc độ làm việc	Thấp hơn	Cao hơn
7	Độ phức tạp thiết kế/điều khiển	Đơn giản	Phức tạp
8	Mật độ điểm suy biến	Ít hơn	Nhiều hơn

1.3 Một số nghiên cứu về động lực học và điều khiển robot song song ở ngoài nước

1.3.1 Động lực học robot song song

Về mặt cơ học, robot song song là hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng. Tính toán động lực học là bài toán cần thiết để thiết kế và nâng cao chất lượng điều khiển của robot song song. Các tài liệu về lý thuyết và

phương pháp tính toán động lực học robot nổi tiếp khá phong phú [47, 73, 85-88, 96, 103]. Các phương pháp thiết lập phương trình động lực học của hệ nhiều vật cấu trúc mạch vòng được đề cập khá kỹ trong các tài liệu [88, 103]. Sau đó bài toán động học, động lực học được đề cập cụ thể hơn trong các tài liệu về robot song song [67, 96].

Trong các nghiên cứu kể trên về robot song song Delta không gian, các phương pháp được sử dụng để thiết lập phương trình chuyển động là Lagrange dạng nhân tử, nguyên lý công ảo, phương trình Newton – Euler, tách cấu trúc... Khi thiết lập phương trình, thanh nối giữa hai khâu dẫn và bàn máy động được mô hình hóa bằng thanh đồng chất hoặc bằng hai khối lượng tập chung ở hai đầu thanh. Cho đến nay chưa có công trình nào so sánh, đánh giá hai loại mô hình này.

1.3.2 Điều khiển bám quỹ đạo robot song song

Các tài liệu về điều khiển robot rất phong phú. Có nhiều phương pháp tiếp cận khác nhau để điều khiển robot được đưa ra bởi Spong và Vidyasagar [90], Sciavicco và Siciliano [87]. Tuy nhiên, những công trình này ít tập trung vào các vấn đề cụ thể của robot song song.

Gần đây, các công trình về nâng cao chất lượng điều khiển robot Delta cũng được công bố khá nhiều. Các công trình này xây dựng luật điều khiển dựa trên phương trình chuyển động được thiết lập bằng cách đơn giản hóa mô hình động lực học đó là mỗi khâu hình bình hành được mô hình bằng hai chất điểm ở hai đầu. Phương pháp tuyến tính hóa mô hình được sử dụng để thiết lập các luật điều khiển đơn giản, B. Hemici và đồng nghiệp [80-82] đã thiết kế các bộ điều khiển PID, H_∞ dựa trên mô hình tuyến tính để điều khiển chuyển động bám quỹ đạo bền vững cho robot Delta. Mô hình này cũng được A. Mohsen [68] sử dụng để thiết lập các luật điều khiển PD, PID kết hợp với giám sát mờ để điều khiển bám quỹ đạo khâu thao tác.

Các công trình này sử dụng các bộ điều khiển khác nhau với mục đích cường bức chuyển động của khâu thao tác bám theo một quỹ đạo mong muốn. Các bộ điều khiển này phần nào đáp ứng được các yêu cầu đặt ra. Tuy nhiên còn thiếu các nghiên cứu so sánh đánh giá các bộ điều khiển và đưa ra khuyến cáo khi nào nên sử dụng bộ điều khiển nào là thích hợp.

1.4 Các nghiên cứu tại Việt Nam

Các nghiên cứu tại Việt Nam chủ yếu tập chung vào việc giải bài toán động học, thiết lập phương trình chuyển động và trình bày phương pháp giải các phương trình chuyển động này. Bài toán điều khiển còn ít được quan tâm nghiên cứu.

1.5 Xác định vấn đề cần nghiên cứu của luận án

Từ sự xem xét, đánh giá các công trình mà các nhà khoa học đã và đang nghiên cứu về loại robot song song Delta không gian, luận án này sẽ đi vào nghiên cứu những vấn đề sau:

Xây dựng thuật giải cho bài toán động học ngược với mục đích nâng cao độ chính xác nghiệm số.

Nghiên cứu, so sánh các mô hình động lực học khác nhau đối với một robot song song. So sánh độ phức tạp của các mô hình và ảnh hưởng của nó đến mô men tính toán. Trên cơ sở đó khuyến cáo cho người sử dụng nên sử dụng mô hình nào là hợp lý.

Thiết kế các luật điều khiển trực tiếp dựa trên các phương trình vi phân – đại số.

Nghiên cứu so sánh chất lượng của các bộ điều khiển khi sử dụng các mô hình cơ học khác nhau.

Kết luận chương 1

Trên cơ sở tổng hợp những kết quả đạt được từ các nghiên cứu trong và ngoài nước, luận án đã xác định được vấn đề cần đi sâu nghiên cứu nhằm mục đích nâng cao chất lượng điều khiển cho robot song song là xây dựng các mô hình cơ học và mô hình toán học và các thuật toán số giải bài toán động lực học và điều khiển cho hai loại robot song song là 3RUS và 3PUS.

Chương 2

XÂY DỰNG MÔ HÌNH CƠ HỌC VÀ MÔ HÌNH TOÁN HỌC CHO ROBOT SONG SONG DELTA KHÔNG GIAN

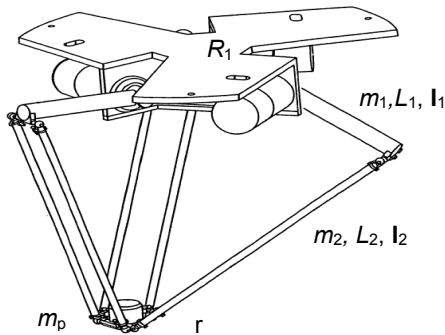
Trong luận án này, dạng ma trận mới của các phương trình Lagrange dạng nhân tử [51] được sử dụng để thiết lập phương trình chuyển động của hai loại robot song song không gian là robot 3RUS và robot 3PUS. Nhờ các

phần mềm đa năng MAPLE hoặc MATLAB, ta nhận được dạng giải tích của các phương trình vi phân – đại số mô tả chuyển động của robot song song.

2.1 Mô hình động lực robot song song Delta không gian

2.1.1 Mô hình động lực robot song song Delta không gian 3RUS

Từ mô hình thực của robot hình 2.1 ta thấy có các khâu dẫn động hình bình hành nên việc tính toán động học, động lực học trực tiếp trên robot thực là khá phức tạp. Để đơn giản ta xây dựng 2 mô hình động lực học của robot dựa trên mô hình thực như sau:



Hình 2.1: Robot song song Delta không gian 3RUS

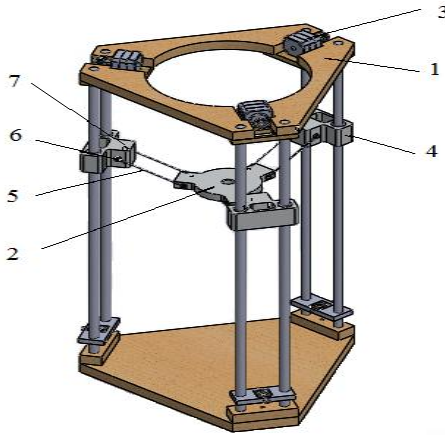
Mô hình 1: Khâu hình bình hành được mô hình bằng một thanh có khối lượng phân bố đều trên toàn chiều dài thanh. Khối lượng và chiều dài thanh tương ứng bằng khối lượng và chiều dài khâu hình bình hành.

Mô hình 2: Khâu hình bình hành được mô hình bằng một thanh không trọng lượng có khối lượng tập trung ở hai đầu, khối lượng mỗi đầu thanh bằng $\frac{1}{2}$ khối lượng khâu hình bình hành.

2.1.2 Mô hình động lực robot song song Delta không gian 3PUS

Robot song song Delta không gian 3PUS là một biến thể của robot 3RUS khi thay thế khớp dẫn động quay bằng khớp dẫn động tịnh tiến như

hình 2.4. Robot 3PUS cũng được xây dựng hai mô hình động lực học tương tự như với robot 3RUS.



Hình 2.4: Robot song song Delta không gian 3PUS

2.2 Thiết lập phương trình chuyển động của robot song song Delta không gian

Áp dụng dạng ma trận mới của phương trình Lagrange dạng nhân tử [4, 51], phương trình chuyển động của hai robot 3RUS và 3PUS là hệ phương trình vi phân – đại số có dạng tổng quát sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{g}(\mathbf{s}) + \mathbf{\Phi}_s^T(\mathbf{s})\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\tau} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{s}) = \mathbf{0} \quad (2.58)$$

2.3 So sánh phương trình chuyển động các mô hình của robot

Từ phương trình chuyển động của mô hình 1 và mô hình 2 của mỗi robot ta có bảng so sánh như sau:

Bảng 2.1: So sánh phương trình chuyển động của mô hình 1 và 2

	Mô hình 1	Mô hình 2
Số bậc tự do	3	3

Số tọa độ suy rộng dư	$3 \times 3 + 3 = 12$	$3 + 3 = 6$
Phương trình liên kết	9	3
Số nhân tử Lagrange	9	3
Số phương trình	21	9
Ma trận M và C	$\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{s}), \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \neq \mathbf{0}$	$\mathbf{M}(\mathbf{s}) = const, \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) = \mathbf{0}$

Từ bảng 2.1 ta thấy phương trình chuyển động của mô hình 2 đơn giản và dễ thiết lập hơn mô hình 1 rất nhiều, nhưng hiệu ứng quán tính không thể hiện rõ.

Kết luận chương 2

Việc thiết lập dạng giải tích các phương trình chuyển động của robot song song Delta không gian là bài toán rất phức tạp. Sử dụng kỹ thuật lập trình ký tự, trong chương này luận án đã đạt được một số kết quả mới như sau:

1. Sử dụng dạng ma trận mới của các phương trình Lagrange dạng nhân tử [51], đã thiết lập được dạng giải tích phương trình vi phân – đại số mô tả chuyển động của 2 loại robot song song Delta không gian (robot 3RUS và robot 3PUS).

2. Bên cạnh việc thiết lập phương trình chuyển động khi xem các khâu là các vật rắn, trong luận án cũng đưa ra phương án thiết lập phương trình chuyển động đơn giản bằng cách thay thế khâu hình bình hành bằng hai chất điểm. Các mô hình cơ học này là cơ sở để tính toán động lực học và điều khiển robot song song 3RUS và 3PUS.

Chương 3

MÔ PHỎNG SỐ ĐỘNG HỌC NGƯỢC VÀ ĐỘNG LỰC HỌC NGƯỢC ROBOT SONG SONG DELTA KHÔNG GIAN

Dựa trên dạng giải tích tường minh của các phương trình vi phân - đại số mô tả chuyển động của robot song song không gian Delta thiết lập trong

chương 2, trong chương này áp dụng và phát triển các thuật toán số để giải bài toán động học ngược và động lực học ngược các robot song song Delta không gian 3RUS và 3PUS.

3.1 Tính toán động học ngược robot song song bằng phương pháp Newton – Raphson cải tiến

Các phương trình liên kết của robot đã thiết lập được viết lại dưới dạng véc tơ như sau:

$$\mathbf{f}(\mathbf{s}) = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.1)$$

trong đó: $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^r$, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$

Nội dung của bài toán động học ngược: Cho trước quy luật chuyển động của khâu thao tác $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ cần phải tìm quy luật chuyển động của các khớp dẫn động. Ở đây, ta sẽ trình bày phương pháp Newton- Raphson cải tiến [4] để giải bài toán động học ngược:

Bước 1: Hiệu chỉnh độ chính xác của véc tơ tọa độ suy rộng tại thời điểm $t_0=0$

Đầu tiên, ta có thể xác định véc tơ gần đúng $\tilde{\mathbf{q}}_0$ bằng phương pháp vẽ hình (hoặc thực nghiệm). Sau đó áp dụng phương pháp lặp Newton – Raphson để tìm nghiệm \mathbf{q}_0 tốt hơn tại thời điểm đầu từ hệ phương trình phi tuyến (3.1).

Bước 2: Hiệu chỉnh độ chính xác của véc tơ tọa độ suy rộng tại thời điểm t_{k+1} . Giá trị gần đúng ban đầu của \mathbf{q}_{k+1} được lấy xấp xỉ theo công thức:

$$\tilde{\mathbf{q}}_{k+1} \approx \mathbf{q}_k + \dot{\mathbf{q}}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{q}}_k (\Delta t)^2 \quad (3.14)$$

Trong các tài liệu tính toán động học robot [87] người ta thường bỏ qua các vô cùng bé bậc ≥ 2 làm xấp xỉ ban đầu cho phép lặp Newton – Raphson.

Trong luận án này, chúng tôi lấy đến xấp xỉ bậc 2, bỏ qua vô cùng bé bậc 3 và lấy công thức (3.14) làm xấp xỉ ban đầu cho phép lặp Newton – Raphson.

Sau mỗi bước tính vị trí các tọa độ khớp bằng phương pháp Newton – Raphson cải tiến, vận tốc suy rộng và gia tốc suy rộng của các khớp được tính theo các công thức sau:

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} \quad (3.4)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = -\mathbf{J}_q^{-1} \left(\dot{\mathbf{J}}_q \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}_x \ddot{\mathbf{x}} \right) \quad (3.6)$$

3.2 Phương pháp số giải bài toán động lực học ngược robot song song

3.2.1 Bài toán động lực học ngược

Phương trình chuyển động tổng quát của robot có dạng như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{g}(\mathbf{s}) + \Phi_s^T(\mathbf{s})\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\tau} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{s}) = \mathbf{0} \quad (3.21)$$

Gọi $\mathbf{q}_a \in \mathbb{R}^f$ là véc tơ các tọa độ khớp chủ động, $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^r$ là véc tơ tọa độ suy rộng dư (bao gồm các tọa độ khớp bị động và tọa độ thao tác). Ký hiệu:

$$\mathbf{s} = [\mathbf{q}_a^T, \mathbf{z}^T]^T, \mathbf{s} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{q}_a \in \mathbb{R}^f, \mathbf{z} \in \mathbb{R}^r, n = f + r$$

Bài toán động lực học ngược của robot song song được phát biểu như sau: Cho biết hệ phương trình chuyển động của robot dạng (3.20), (3.21), cho biết quy luật chuyển động của khâu thao tác $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$. Xác định mô men/ lực của các khâu dẫn động $\boldsymbol{\tau}_a \in \mathbb{R}^f$ cần thiết để tạo ra chuyển động mong muốn của khâu thao tác.

3.2.2 Giải bài toán động lực học ngược bằng phương pháp khử các nhân tử Lagrange [4]

Qua bài toán động lực học ngược với quỹ đạo cho trước của tâm bàn máy động ta đã tìm được các véc tơ $\mathbf{s}(t)$, $\dot{\mathbf{s}}(t)$, $\ddot{\mathbf{s}}(t)$. Từ đó các biểu thức về ma

trận khối lượng, ma trận quán tính ly tâm và Coriolis, ma trận Φ_s , cũng như véc tơ $\mathbf{g}(\mathbf{s})$ đã xác định hoàn toàn. Như vậy, phương trình (3.20) là phương trình đại số tuyến tính với ẩn là các véc tơ momen dẫn động $\boldsymbol{\tau}_a$ và các nhân tử Lagrange $\boldsymbol{\lambda}$ với số phương trình bằng số ẩn. Vì vậy, ta có thể giải trực tiếp hệ phương trình này sau đó tách lấy kết quả là các mô men dẫn động $\boldsymbol{\tau}_a$.

Trong luận án này sẽ không giải trực tiếp phương trình (3.20) mà tìm cách khử nhân tử Lagrange $\boldsymbol{\lambda}$, biến đổi hệ phương trình vi phân – đại số (3.20), (3.21) về hệ phương trình chỉ có các ẩn là mô men khớp chủ động $\boldsymbol{\tau}_a$ như sau:

Ta đưa vào ký hiệu [4, 47]:

$$\mathbf{R}(\mathbf{s}) = \mathbf{R}(\mathbf{q}_a, \mathbf{z}) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ -\Phi_z^{-1} \Phi_q \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

trong đó \mathbf{E} là ma trận đơn vị cỡ $f \times f$ và $\Phi_z = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{z}}$, $\Phi_a = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}_a}$

Nhân bên trái hai vế của phương trình (3.20) với $\mathbf{R}^T(\mathbf{s})$ và rút gọn lại ta được:

$$\mathbf{R}^T(\mathbf{s})\mathbf{M}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{R}^T(\mathbf{s})\mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{R}^T(\mathbf{s})\mathbf{g}(\mathbf{s}) = \boldsymbol{\tau}_a \quad (3.29)$$

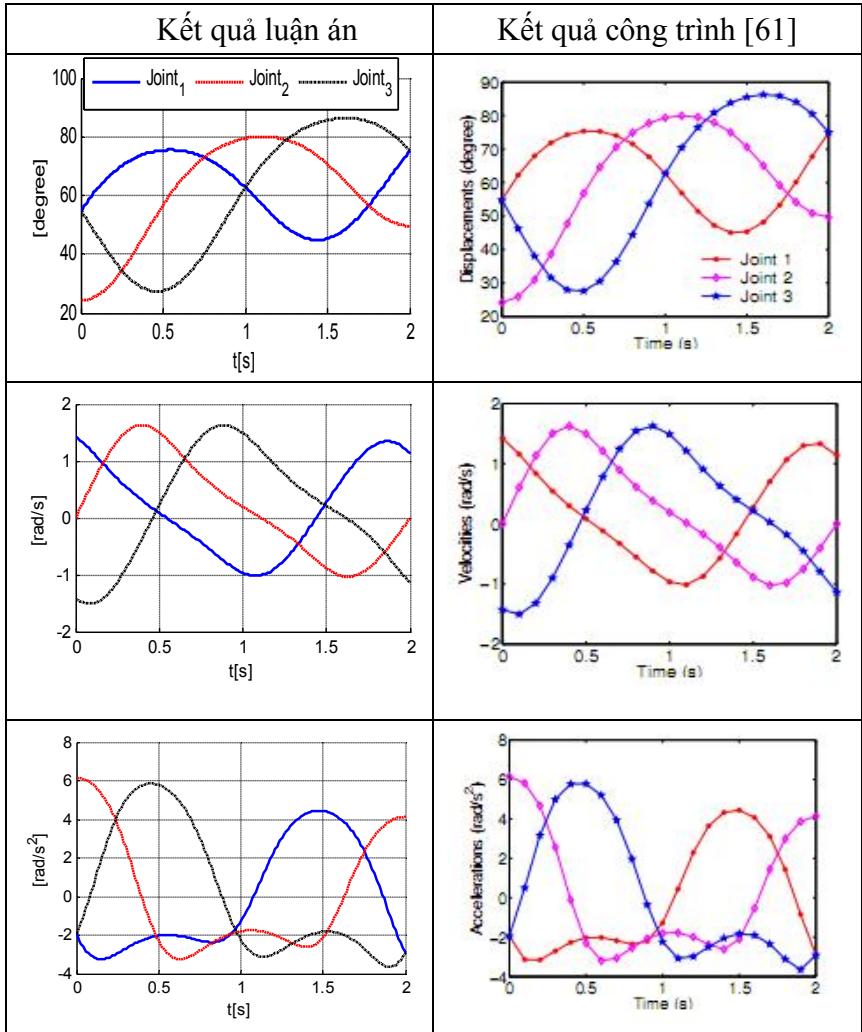
Các đại lượng ở vế trái của phương trình (3.29) đã được biết từ kết quả của bài toán động học ngược. Do vậy, các mô men khớp chủ động được tính theo phương trình này.

3.3 Mô phỏng số bài toán động học ngược và động lực học ngược robot song song Delta không gian

3.3.1 Mô phỏng số bài toán động học ngược robot 3RUS

Để đánh giá sự đúng đắn của các thuật toán và chương trình tính của luận án, chúng ta tính bài toán động học ngược robot song song Delta không gian 3RUS bằng chương trình DELTA-IMECH do NCS xây dựng dựa trên phần mềm MATLAB. Để so sánh, sử dụng bộ số liệu các tham số robot và chuyển động của khâu thao tác được cho trong [61] của Y. Li và Q. Xu.

Sử dụng chương trình DELTA-IMECH ta thu được các kết quả mô phỏng số bài toán động học ngược và có bảng so sánh sau:



Hình 3.11: So sánh kết quả bài toán động học ngược với tài liệu [61]

Nhận xét: Hình 3.11 cho ta thấy kết quả bài toán động học ngược của luận án hoàn toàn trùng khớp với kết quả của tài liệu [61].

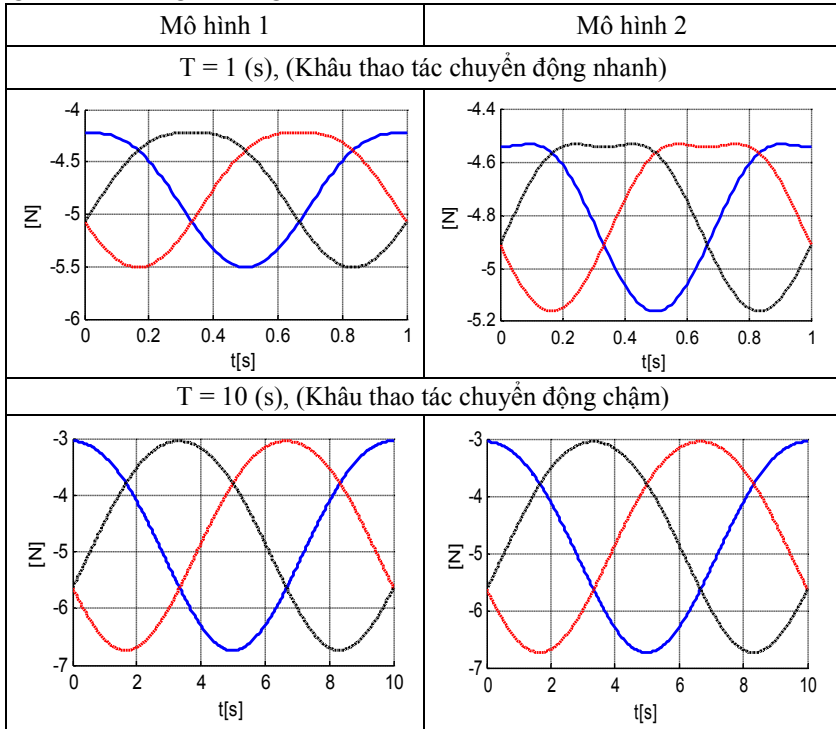
3.3.2 Mô phỏng số bài toán động lực học ngược robot 3PUS

Bộ số liệu tham số robot và chuyển động của khâu thao tác như sau:

$$L = 0.242, R = 0.16, r = 0.029(m), m_1 = 0.12, m_2 = 2 \times 0.15, m_p = 0.2(\text{kg})$$

$$x_p = -0.05 \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right); y_p = 0.05 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right); z_p = -0.5 (m)$$

Các kết quả mô phỏng số được tính toán trên mô hình 1 và 2 của robot 3PUS bằng cách sử dụng chương trình DELTA-IMECH.



Hình 3.22: Kết quả mô phỏng số động lực học ngược robot 3PUS

Nhận xét: Khi khâu thao tác chuyển động nhanh kết quả của hai mô hình là khác nhau. Khi khâu thao tác chuyển động chậm kết quả của hai mô hình là giống nhau.

Kết luận chương 3

Đóng góp của luận án trong chương này là:

1. Xây dựng 1 chương trình, gọi là chương trình DELTA – IMECH, tính toán số bài toán động học ngược và động lực học ngược 2 loại robot song song Delta không gian 3RUS và 3PUS. Các kết quả tính toán bằng chương trình này phù hợp với tài liệu [61], [92]. Điều đó chứng tỏ các phương trình chuyển động đã thiết lập và các thuật toán và chương trình tính trong DELTA – IMECH là đúng.

2. Các kết quả mô phỏng số cho thấy: khi chuyển động của khâu thao tác không nhanh có thể sử dụng mô hình robot đơn giản để tính toán động lực học 2 loại robot nghiên cứu. Tuy nhiên khi sử dụng mô hình đơn giản các hiệu ứng quán tính của các khâu rắn chuyển động không gian tổng quát không được thể hiện trong phương trình. Đó là hạn chế mà người sử dụng cần lưu ý.

Chương 4

ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHUYỂN ĐỘNG ROBOT SONG SONG DELTA KHÔNG GIAN DỰA TRÊN CÁC MÔ HÌNH CƠ HỌC

Việc sử dụng phương pháp động lực học ngược để điều khiển vị trí robot dạng chuỗi đã được bàn nhiều trong kỹ thuật [1, 87]. Trong chương này, dựa trên các phương trình vi phân - đại số viết dưới dạng tường minh trong chương 2 và phương pháp số giải bài toán động lực học ngược trong chương 3, các thuật toán điều khiển PD, PID, điều khiển trượt, điều khiển trượt sử dụng mạng nơ ron được xây dựng cho các robot song song Delta 3RUS và 3PUS.

4.1 Tổng quan về điều khiển bám quỹ đạo của khâu thao tác

Nhiệm vụ của bài toán điều khiển bám quỹ đạo chuyển động của khâu thao tác: Đảm bảo khâu thao tác (End-effector) chuyển động bám theo quỹ đạo cho trước trong không gian làm việc. Cho trước quỹ đạo mong muốn $\mathbf{x}^d(t)$, yêu cầu điều khiển để quỹ đạo thực tế \mathbf{x} thỏa mãn điều kiện:

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^d\| < \varepsilon \quad (4.1)$$

4.2 Điều khiển bám quỹ đạo robot song song trong không gian khớp dựa trên phương trình Lagrange dạng nhân tử.

4.2.1 Cơ sở động lực học hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng

Sử dụng các phương trình Lagrange dạng nhân tử, phương trình chuyển động của robot song song có dạng như (3.20) và (3.21) và phương trình (3.20) được biến đổi về (3.29), ta tiếp tục biến đổi phương trình này về dạng sau:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{s}) + \bar{\mathbf{d}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) = \boldsymbol{\tau}_a \quad (4.12)$$

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s}) := \mathbf{R}^T(\mathbf{s})\mathbf{M}(\mathbf{s})\mathbf{R}(\mathbf{s})$$

$$\text{Trong đó: } \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) := \mathbf{R}^T(\mathbf{s})[\mathbf{M}(\mathbf{s})\dot{\mathbf{R}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\mathbf{R}(\mathbf{s})] \quad (4.14)$$

$$\bar{\mathbf{g}}(\mathbf{s}) := \mathbf{R}^T(\mathbf{s})\mathbf{g}(\mathbf{s}), \quad \bar{\mathbf{d}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) := \mathbf{R}^T(\mathbf{s})\mathbf{d}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})$$

Phương trình (4.12) là cơ sở cho việc thiết lập các luật điều khiển cho các robot song song.

4.2.2 Xây dựng các thuật toán điều khiển

Trong luận án đã xây dựng các thuật toán điều khiển bám quỹ đạo dựa trên các phương trình vi phân - đại số mô tả chuyển động của robot song song. Các tính chất ổn định và bám quỹ đạo của các thuật toán điều khiển cũng được chứng minh một cách chặt chẽ.

4.2.2.1 Điều khiển PD

$$\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\mathbf{v} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{s}) + \bar{\mathbf{d}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \quad (4.18)$$

$$\text{với: } \mathbf{v} = \ddot{\mathbf{q}}_a^d - \mathbf{K}_D\dot{\mathbf{e}}_a - \mathbf{K}_P\mathbf{e}_a \quad (4.19)$$

$$\mathbf{K}_P = \text{diag}(k_{P1}, k_{P2}, \dots, k_{Pna}), \quad \mathbf{K}_D = \text{diag}(k_{D1}, k_{D2}, \dots, k_{Dna}), \quad k_{Pi} > 0, k_{Di} > 0$$

4.2.2.2 Điều khiển PID

$$\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\mathbf{v} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{s}) + \bar{\mathbf{d}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \text{với } \mathbf{v} &= \ddot{\mathbf{q}}_a^d - \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_a - \mathbf{K}_P \mathbf{e}_a - \mathbf{K}_I \int_0^t \mathbf{e}_a(\tau) d\tau \\ \mathbf{K}_P &= \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{pna}), \mathbf{K}_D = \text{diag}(k_{D1}, k_{D2}, \dots, k_{Dna}), \\ \mathbf{K}_I &= \text{diag}(k_{I1}, k_{I2}, \dots, k_{Ina}) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Trong đó: $k_{Di} > 0, k_{Pi} > 0, k_{Ii} > 0, k_{Di}k_{Pi} - k_{Ii} > 0; \quad (i=1,2,\dots,n_a)$

4.2.2.3 Điều khiển trượt robot song song

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{q}}_a^d + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{q}}_a^d + \bar{\mathbf{g}} + \bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\Lambda \dot{\mathbf{e}}_a \\ &\quad - \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\Lambda \mathbf{e}_a - \mathbf{K}_{PD} \mathbf{v} - \mathbf{K}_S \text{sign}(\mathbf{v}) \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\text{trong đó: } \text{sign}(\mathbf{v}) = [\text{sign}(v_1), \text{sign}(v_2), \dots, \text{sign}(v_{na})]^T \quad (4.46)$$

$$\mathbf{K}_{PD} = \text{diag}(k_{PD1}, k_{PD2}, \dots, k_{PDna}), \quad k_{PDi} > 0 \quad (4.47)$$

$$\mathbf{K}_S = \text{diag}(k_{S1}, k_{S2}, \dots, k_{Sna}), \quad k_{Si} > 0$$

4.2.2.4 Điều khiển robot song song theo nguyên lý trượt sử dụng mạng nơ ron

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{q}}_a^d + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{q}}_a^d + \bar{\mathbf{g}} + \bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})\Lambda \dot{\mathbf{e}}_a - \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\Lambda \mathbf{e}_a - \mathbf{K}\mathbf{v} \\ &\quad - \gamma \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} + (1 + \eta)\mathbf{W}\boldsymbol{\sigma} \end{aligned} \quad (4.62)$$

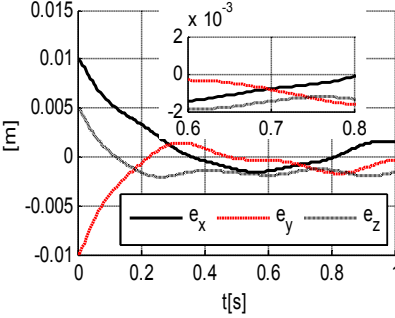
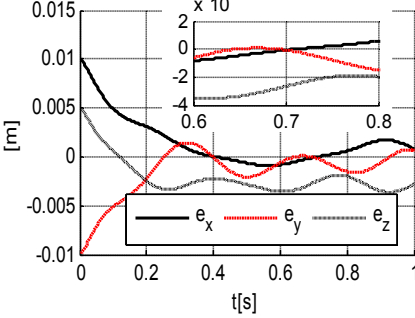
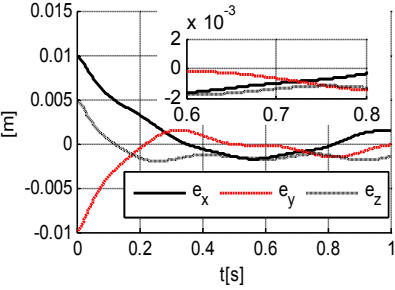
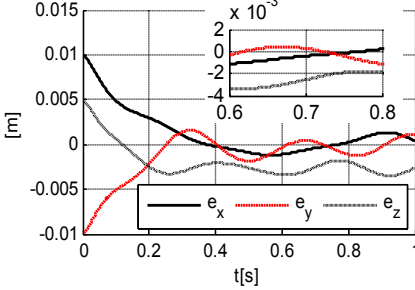
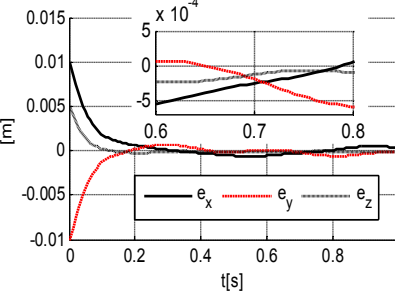
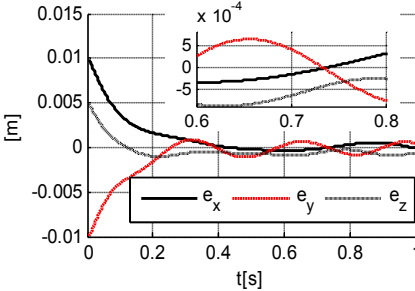
$$\dot{\mathbf{W}}_i = -\eta \sigma_i \mathbf{v} \quad (4.63)$$

trong đó ma trận \mathbf{K} là ma trận đối xứng cấp n_a xác định dương, các tham số tự chọn $\eta > 0, \gamma > 0$.

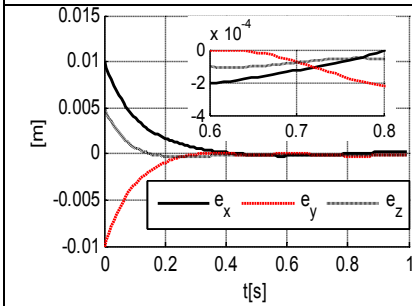
4.3 Mô phỏng số các luật điều khiển cho robot song song Delta không gian dựa trên các mô hình động lực

4.3.1 Mô phỏng số các phương pháp điều khiển robot song song Delta không gian 3RUS và 3PUS

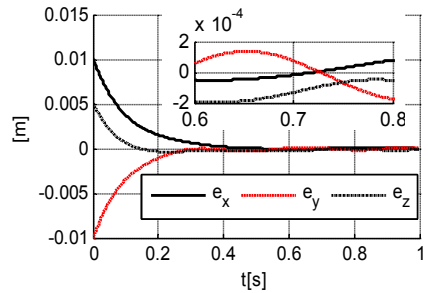
Bảng 4.1: Bảng so sánh sai số bám quỹ đạo của robot

Luật điều khiển dựa trên mô hình 1	Luật điều khiển dựa trên mô hình 2
Điều khiển PD, robot có sai số và nhiễu	
 <p>Hình 4.11: Sai số vị trí bàn máy động</p>	 <p>Hình 4.12: Sai số vị trí bàn máy động</p>
Điều khiển PID, robot có sai số và nhiễu	
 <p>Hình 4.19: Sai số vị trí bàn máy động</p>	 <p>Hình 4.20: Sai số vị trí bàn máy động</p>
Điều khiển trượt, robot có sai số và nhiễu	
 <p>Hình 4.27: Sai số vị trí bàn máy động</p>	 <p>Hình 4.28: Sai số vị trí bàn máy động</p>

Điều khiển trượt mờ ron, robot có sai số và nhiễu



Hình 4.35: Sai số vị trí bàn máy động



Hình 4.36: Sai số vị trí bàn máy động

4.3.2 Nhận xét các kết quả mô phỏng số

Các luật điều khiển được thiết kế dựa trên mô hình 2 dễ dàng hơn các luật điều khiển được thiết kế dựa trên mô hình 1 rất nhiều vì hệ phương trình chuyển động của mô hình 1 có số phương trình lớn và phức tạp hơn mô hình 2 (xem bảng 2.1)

Khi sử dụng luật điều khiển PD, PID để điều khiển robot thực đã biết chính xác các tham số động lực và không có nhiễu thì khi sử dụng mô hình 2 để thiết kế luật điều khiển cho kết quả kém chính xác hơn khi ta sử dụng mô hình 1.

Khi sử dụng các luật điều khiển PD, PID để điều khiển robot thực khi không biết chính xác các tham số động lực và có nhiễu thì cả hai mô hình đều cho kết quả kém chính xác ($\sim 10^{-3}$ m xem hình 4.11, 4.12, 4.19 và 4.20).

Khi sử dụng các luật điều khiển trượt, điều khiển dựa trên nguyên lý trượt sử dụng mạng mờ ron khi robot thực biết chính xác các tham số động lực, không có nhiễu và khi robot thực không biết chính xác các tham số động lực và có nhiễu cho kết quả tốt như nhau (độ chính xác đạt được $\sim 10^{-4}$ m xem từ hình 4.27 đến hình 4.36).

Như vậy khi sử dụng luật điều khiển trượt và điều khiển dựa trên nguyên lý trượt sử dụng mạng mờ ron thì ta chỉ cần sử dụng mô hình đơn

giản để thiết kế các luật điều khiển này sẽ rất đơn giản mà vẫn cho kết quả tốt như khi ta sử dụng mô hình phức tạp.

Với robot 3PUS khi mô phỏng sai số bám quỹ đạo ta cũng có các nhận xét về các luật điều khiển tương tự như với robot 3RUS.

Kết luận chương 4

Các đóng góp của luận án trong chương này là

1. Chứng minh một cách chặt chẽ sự ổn định của các luật điều khiển PD, PID, điều khiển trượt và điều khiển trượt sử dụng mạng nơ ron của robot song song dựa trên các phương trình vi phân – đại số mô tả chuyển động của robot.

2. Khi mô hình cơ học của robot được xây dựng một cách chính xác và không có nhiễu về lực trong quá trình làm việc, các luật điều khiển PD và PID có thể được sử dụng nhưng phải được thiết lập từ mô hình cơ học phức tạp (mô hình 1) thì vẫn đảm bảo được tính bám quỹ đạo mong muốn của khâu thao tác.

3. Khi mô hình cơ học của robot không xây dựng được chính xác và có nhiễu trong quá trình làm việc thì phải sử dụng các luật điều khiển hiện đại như: điều khiển trượt và điều khiển sử dụng mạng nơ ron dựa trên nguyên lý trượt nhưng chỉ cần thiết lập từ mô hình cơ học đơn giản (mô hình 2) mà vẫn đảm bảo được tính bám quỹ đạo mong muốn của khâu thao tác.

KẾT LUẬN

1. Các đóng góp mới của luận án

1) Áp dụng dạng ma trận mới của phương trình Lagrang dạng nhân tử thiết lập được các phương trình vi phân – đại số mô tả chuyển động của robot song song không gian Delta 3RUS và 3PUS. Các phương trình được biểu diễn dưới dạng giải tích tường minh tuy khá phức tạp.

2) Thực hiện biến đổi hệ phương trình vi phân – đại số về hệ các phương trình vi phân thường dựa trên ý tưởng của Schiehlen và đồng nghiệp [28]. Sau đó tính toán các mô men/ lực của các khâu dẫn động. Áp dụng

phương pháp này giải bài toán động lực học ngược của robot song song Delta không gian 3RUS và 3PUS. Các kết quả mô phỏng số thu được theo thuật toán đề xuất phù hợp với các kết quả đã biết.

3) Biến đổi hệ phương trình chuyển động của robot song song không gian là các phương trình vi phân - đại số về hệ phương trình vi phân thường với tọa độ suy rộng dư. Khi đó ta thu được các ma trận khối lượng mới $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{s})$, ma trận lực quán tính theo và coriolis $\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})$ mới. Từ đó có thể áp dụng các thuật toán điều khiển PD, PID, điều khiển trượt, điều khiển sử dụng mạng nơ ron dựa trên nguyên lý trượt điều khiển chuyển động robot dạng chuỗi sang nghiên cứu điều khiển robot song song. Chứng minh được sự ổn định các phương pháp điều khiển PD, PID, điều khiển trượt, điều khiển sử dụng mạng nơ ron dựa trên nguyên lý trượt dựa trên mô hình toán học của robot là hệ các phương trình vi phân – đại số.

4) Xây dựng một chương trình tính đặt tên là DELTA-IMECH tính toán động học ngược, động lực học ngược và điều khiển chuyển động hai loại robot song song không gian 3RUS và 3PUS. Một số thí dụ tính toán bằng chương trình DELTA-IMECH phù hợp với các kết quả đã biết. Điều đó chứng tỏ thuật toán và chương trình DELTA-IMECH là đúng đắn.

5) Trong kỹ thuật đôi khi người ta thay thế mô hình vật rắn ở một vài khâu chuyển động phức tạp bằng mô hình các chất điểm. Trong luận án đã trình bày tính toán động lực học và điều khiển với mô hình này cho robot song song Delta không gian 3RUS và 3PUS. Việc làm này cần hết sức thận trọng vì trong mô hình đơn giản hiệu ứng quán tính của cơ hệ không thể hiện đúng như bản chất của nó.

2. Các hướng nghiên cứu có thể tiếp tục

Điều khiển dựa trên tính chất thụ động (Passive – based Control) các robot song song không gian.

Động lực học và điều khiển robot song song có tính đến tính chất đàn hồi của các khâu nối.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Nguyen Van Khang, Nguyen Quang Hoang, Nguyen Duc Sang, Nguyen Dinh Dung (2015), “A comparison study of some control methods for Delta spatial parallel robot”. *Journal of computer science and cybernetics, VAST*, Vol. 31, pp 71-81.
2. Nguyen Van Khang, Nguyen Quang Hoang, Nguyen Dinh Dung, Nguyen Van Quyen (2016), “Model-based Control of a 3-PRS Spatial Parallel Robot in The Space of Redundant Coordinates”. *Journal of Science and Technology Technical Universities*, Vol. 112, pp. 49-53.
3. Nguyen Quang Hoang, Nguyen Van Khang, Nguyen Dinh Dung (2015), Influence of models on computed torque of delta spatial parallel robot. *Proceedings of the 16th Asia Pacific Vibration Conference*, Hanoi, pp. 791-798
4. Nguyen Dinh Dung, Nguyen Van Khang, Nguyen Quang Hoang (2016), Modelling and sliding mode control based models of a 3RUS spatial parallel. *Proceedings of International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA4)*, Ha Noi, pp. 198-205.
5. Nguyễn Văn Khang và Nguyễn Đình Dũng (2013), Về một dạng thức mới phương trình chuyển động của robot song song, *Hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về Điều khiển và Tự động hóa VCCA-2013*, Đà Nẵng, tr. 457-466.
6. Nguyễn Văn Khang, Nguyễn Quang Hoàng, Nguyễn Đình Dũng, Mai Trọng Dũng (2015), Xây dựng mô hình cơ học cho robot song song Delta không gian 3PUS. *Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc*, Đà Nẵng, tr. 398-406.
7. Nguyễn Văn Khang, Nguyễn Đình Dũng, Nguyễn Văn Quyền (2016), Điều khiển bám quỹ đạo robot song song Delta không gian 3-PRS dựa trên mô hình hệ các phương trình vi phân-đại số. *Hội nghị toàn quốc về Cơ điện tử 2016 (VCM 2016)*, Cần Thơ, tr. 830 – 840.