

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN**

NGUYỄN THỊ VIỆT HƯƠNG

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG PHƯƠNG PHÁP
ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI, BỀN VỮNG
HỆ EULER - LAGRANGE THIỂU CƠ CẤU CHẤP
HÀNH VÀ ÁP DỤNG CHO CẦU TREO**

**CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN
VÀ TỰ ĐỘNG HÓA
MÃ SỐ: 62520216**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

THÁI NGUYÊN - 2016

Công trình được hoàn thành tại
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP

Người hướng dẫn khoa học:

1 - GS.TS. Nguyễn Doãn Phước

2 - TS. Đỗ Trung Hải

Phản biện 1:.....

Phản biện 2:.....

Phản biện 3:.....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Đại học

Thái Nguyên họp tại.....

Vào hồi..... giờ..... tháng..... năm.....

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện Quốc gia, thư viện Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên hoặc Trung tâm học liệu của Đại học Thái Nguyên.

PHẦN MỞ ĐẦU

1. Giới thiệu về công trình nghiên cứu, lý do lựa chọn đề tài

Hệ Euler-Lagrange (EL) nói chung và cầu treo nói riêng với mô hình biến khớp là lớp hệ thường gặp nhất trong thực tế ở các lĩnh vực cơ khí, cơ điện tử. Giống như ở các hệ có mô hình trạng thái, mô hình hệ EL cũng mang đầy đủ các tính chất khách quan như không tuyệt đối chính xác, thường được lý tưởng hóa là không có nhiễu khi xây dựng mô hình. Bởi vậy bài toán thiết kế, xây dựng bộ điều khiển cho hệ EL trên nền tảng không có được sự chính xác của mô hình, cũng như phải tính tới sự tác động của nhiễu, mà vẫn đảm bảo chất lượng điều khiển đặt ra, luôn có ý nghĩa ứng dụng lớn.

Cầu treo là thiết bị công nghiệp được sử dụng rất rộng rãi trong thực tế. Khi cầu treo di chuyển khá nhanh thì tải trọng có thể bị đung đưa và quá trình hoạt động của cầu treo có thể bị mất điều khiển tải. Trong nhiều thập kỷ qua, các nhà nghiên cứu đã thực hiện nhiều nghiên cứu khác nhau về việc điều khiển tải trọng giống như quả lắc nhưng ứng dụng ở Việt Nam thì chủ yếu vẫn là điều khiển vòng hở. Cho tới ngày nay các cầu treo đa phần vẫn hoạt động thủ công bằng tay và theo kinh nghiệm của người vận hành là chủ yếu. Nhưng khi kích thước của cầu treo trở lên lớn hơn và tốc độ vận chuyển hàng đòi hỏi nhanh hơn thì việc vận hành thủ công này sẽ gặp khó khăn.

Cầu treo mang đặc điểm của hệ hực cơ cầu chấp hành khi không thể can thiệp trực tiếp để điều khiển góc lệch giữa dây treo và phương thẳng đứng khi tải trọng đung đưa. Đồng thời, hệ phương trình trạng thái điều khiển cho hệ thống cầu treo với chiều dài cáp biến đổi là phi tuyến và liên kết cao. Bên cạnh đó, những thành phần

bất định gây nhiều khó khăn cho việc thiết kế bộ điều khiển đảm bảo chất lượng điều khiển. Để nâng cao hiệu quả cũng như khả năng đáp ứng các yêu cầu khắt khe như đã nêu ở trên, việc thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững cho cầu treo được tác giả đề cập đến trong luận án.

Đề tài nghiên cứu lý thuyết về điều khiển hệ thống hệt cơ cấu chấp hành; thiết kế bộ điều khiển trượt bậc cao cho hệ cầu treo nhằm phát huy được ưu điểm của bộ điều khiển trượt là khả năng ổn định tiệm cận bền vững cho đối tượng bất định, đồng thời cải thiện được nhược điểm của bộ điều khiển trượt sử dụng relay là hiện tượng chattering sinh ra trong quá trình trượt.

Đề tài tập trung nghiên cứu về điều khiển thích nghi bền vững hệ Euler-Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành nói chung có tham số mô hình không xác định được cũng như có nhiễu tác động, từ đó đề xuất các bộ điều khiển bám bền vững cho hệ và áp dụng vào hệ cầu treo 3D nói riêng.

2. Mục tiêu của đề tài

Mục tiêu của luận án là hướng tới việc phát triển và bổ sung tính thích nghi bền vững cho các bộ điều khiển hệ Euler-Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành để hệ bám theo được quỹ đạo biến khớp mong muốn cho trước, trong khi mô hình của hệ có chứa các tham số bất định và hệ còn bị nhiễu tác động ở đầu vào. Tính thích nghi của bộ điều khiển được xác định là chất lượng bám không bị ảnh hưởng bởi những tham số không xác định được trong mô hình. Tính bền vững được xác định là chất lượng điều khiển không bị ảnh hưởng bởi nhiễu tác động ở đầu vào của hệ. Để đạt được mục tiêu này, luận án đã đặt ra nhiệm vụ:

- Nghiên cứu phân tích mô hình toán hệ hực cơ cấu chấp hành và từ đó xây dựng bộ điều khiển thích nghi bền vững cho nó trên nền phương pháp điều khiển trượt kết hợp với nguyên lý điều khiển ISS. Tiếp theo sẽ áp dụng kết quả vào điều khiển hệ cầu treo 3D, mô phỏng, đánh giá chất lượng bộ điều khiển với một đối tượng cụ thể.

- Phát triển và hoàn thiện phương pháp điều khiển trượt bậc cao vào điều khiển hệ Euler-Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành. Đánh giá chất lượng của bộ điều khiển thông qua ứng dụng vào điều khiển đối tượng cầu treo 3D và mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink.

Ngoài ra, luận án cũng còn đặt ra nhiệm vụ là xây dựng mô hình thí nghiệm hệ cầu treo 3D để bước đầu thử nghiệm và đánh giá chất lượng những kết quả lý thuyết đề xuất của luận án bằng thực nghiệm trên một đối tượng cụ thể. Chi tiết sẽ là:

- Chất lượng điều khiển theo vị trí đặt trước, đưa được trọng tải từ vị trí đầu tới vị trí cuối đặt trước trong khoảng thời gian ngắn.
- Các góc lệch được giới hạn trong phạm vi nhỏ và bị triệt tiêu dần.
- Cải thiện được hiệu ứng rung theo nghĩa thu nhỏ khoảng trượt về trong một lân cận của gốc.

3. Đối tượng nghiên cứu

Lớp mô hình hệ Euler-Lagrange tổng quát và cầu treo 3D như một đối tượng cụ thể để áp dụng, kiểm chứng kết quả, cũng như các hệ chuyển động thiếu cơ cấu chấp hành.

4. Phương pháp nghiên cứu

- Nghiên cứu lý thuyết điều khiển thích nghi hệ phi tuyến dạng mô hình các biến khớp. Xây dựng bộ điều khiển thích nghi ISS trên nền lý thuyết Lyapunov.

- Nghiên cứu phương pháp điều khiển trượt bậc cao nhằm giảm hiện tượng rung. Xây dựng bộ điều khiển thích nghi bền vững trên nền lý thuyết điều khiển trượt bậc cao.
- Phương pháp thực nghiệm: mô phỏng giả định và lấy kết quả trên mô hình thí nghiệm.

5. Nội dung nghiên cứu

- Mô hình toán hệ cầu treo 3D làm đối tượng nghiên cứu về các hệ Euler-Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành.
- Xây dựng bộ điều khiển thích nghi bền vững cho hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành trên cơ sở điều khiển thích nghi ISS.
- Tổng quan về các phương pháp điều khiển cho hệ cầu treo. Áp dụng kết quả nghiên cứu lý thuyết về điều khiển thích nghi ISS cho hệ cầu treo.
- Nghiên cứu, tìm hiểu về phương pháp điều khiển trượt (trượt cơ bản, phương pháp trượt bậc hai), trượt bậc hai phản hồi đầu ra (trượt siêu xoắn).
- Thiết kế bộ điều khiển trượt bậc hai và trượt siêu xoắn cho hệ Euler-Lagrange nói chung và hệ cầu treo 3D nói riêng. Kiểm chứng qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink.
- Xây dựng bản thí nghiệm, kiểm chứng kết quả nghiên cứu lý thuyết bằng thực nghiệm.

6. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết điều khiển thích nghi bền vững hệ Euler-Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành. Đề xuất bổ sung và hoàn thiện các phương pháp đã có về mặt lý thuyết. Áp dụng phương pháp điều khiển thích nghi ISS và phương pháp điều khiển trượt bậc cao đã đề xuất cho đối tượng cầu treo 3D.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Luận án đưa ra phương pháp luận và đề xuất xây dựng bộ điều khiển thích nghi bền vững theo nguyên lý điều khiển ISS và nguyên lý điều khiển trượt bậc 2, góp phần bổ sung và làm phong phú thêm khối kiến thức về điều khiển hệ phi tuyến đối với đối tượng là các hệ Euler Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành. Kết quả nghiên cứu của luận án có thể giúp cho việc thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững cho hệ Euler Lagrange thiếu cơ cấu chấp hành, trong đó có cấu trúc treo trong thực tiễn; Việc áp dụng phương pháp trượt bậc cao để nhằm phát huy ưu điểm của bộ điều khiển trượt là không phụ thuộc quá nhiều vào độ chính xác của mô hình, không quá phức tạp, thuận lợi cho việc lập trình và tính toán của vi điều khiển hay máy tính nên khả năng áp dụng trong thực tiễn rất lớn..

Chương 1: TỔNG QUAN VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN HỆ THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH

Hiện tại có khá nhiều phương pháp điều khiển cùng được đồng thời áp dụng vào điều khiển hệ thiếu cơ cấu chấp hành nói chung và các hệ cầu treo, cầu tháp nói riêng. Rất khó để nói được rằng phương pháp nào ưu việt hơn cả, vì mỗi bài toán điều khiển luôn có môi trường, điều kiện làm việc khác nhau và do đó xét tổng thể cả về mặt kỹ thuật cũng như kinh tế thì mỗi phương pháp đều có ưu nhược điểm riêng của nó. Trong chương này tác giả đã hệ thống lại một số các phương pháp điều khiển hệ EL thiếu và đủ cơ cấu chấp hành của các tác giả như:

- 1) Điều khiển tuyến tính hóa từng phần.
- 2) Điều khiển truyền thẳng (*input shaping*).
- 3) Phương pháp backstepping.
- 4) Điều khiển trượt.
- 5) Điều khiển nội suy mờ.

Hệ thiếu cơ cấu chấp hành nói chung là hệ mà mô hình Euler-Lagrange ở cấu trúc tổng quát dạng bất định, bị tác động bởi nhiễu, được mô tả bởi:

$$M(\underline{q}, \underline{\theta})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, \underline{\theta})\dot{\underline{q}} + \underline{g}(\underline{q}, \underline{\theta}) = G(\underline{u} + \underline{n}(t)) \quad (1.1)$$

Kết luận chương 1

Chương I đã hệ thống lại một số các phương pháp điều khiển hệ thiếu cơ cấu chấp hành. Về điều khiển lớp hệ này thì cho tới nay đã có rất nhiều các phương pháp khác nhau, từ đơn giản đến phức tạp hơn như thích nghi, bền vững và trong nó cũng có nhiều công cụ được sử dụng kết hợp với nhau. Tuy nhiên, ở đây chỉ trình bày tổng quan lại các phương pháp điều khiển trực tiếp trong không gian các biến khớp, bỏ qua các phương pháp trong không gian trạng thái.

Ngoài ra, luận án có định hướng sử dụng các phương pháp điều khiển thích nghi bền vững đã được xây dựng cho hệ EL đủ cơ cấu chấp hành vào điều khiển hệ thiếu cơ cấu chấp hành với những can thiệp bổ sung thêm cho thích hợp dựa trên công cụ tách hệ được Spong và các phương pháp điều khiển hệ EL đủ cơ cấu chấp hành đã được nhiều tác giả trước đây trình bày.

Chương 2: MỘT SỐ ĐỀ XUẤT BỔ SUNG TÍNH THÍCH NGHI BỀN VỮNG CHO BỘ ĐIỀU KHIỂN HỆ THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH

Trên cơ sở kết quả đã trình bày và phân tích về những phương pháp điều khiển hệ thiếu cơ cấu chấp hành hiện có ở chương trước, luận án sẽ đề xuất phương pháp nâng cao tính thích nghi và bền vững cho hai bộ điều khiển cụ thể trong số những phương pháp trên. Đó là:

1. Bổ sung thêm tính thích nghi và bền vững cho bộ điều khiển tuyến tính hóa từng phần đã có. Tính thích nghi được xây dựng theo nguyên lý giả định rõ. Tính bền vững được bổ sung nhờ nguyên lý

điều khiển ISS mà vẫn thường được gọi dưới tên là điều khiển ổn định thực tế.

2. Hoàn thiện phương pháp điều khiển trượt bậc cao. Một bộ điều khiển trượt bậc cao cho hệ cầu treo 3D đã được giới thiệu ở một tạp chí quốc tế do một nhóm các nhà khoa học Hàn Quốc nghiên cứu. Mặc dù bộ điều khiển trượt bậc hai này có thể mở rộng được cho cả những hệ thiếu cơ cấu chấp hành nói chung chứ không chỉ riêng hệ cầu treo, song bộ điều khiển giới thiệu ở đó là chưa được hoàn thiện. Tính chưa hoàn thiện này nằm ở chỗ:

- Bộ điều khiển chỉ có thể làm cho quỹ đạo hệ tiến tiệm cận về mặt trượt, chứ không đưa được về mặt trượt sau khoảng thời gian hữu hạn. Điều này làm cho ý nghĩa thành phần điều khiển giữ hệ ở lại trên mặt trượt của bộ điều khiển sẽ không còn nữa.

- Tính ổn định của hệ chưa được khẳng định khi mặt trượt tiệm cận về 0.

Luận án sẽ đề xuất phương pháp hoàn thiện bộ điều khiển trượt bậc cao trên theo hướng làm cho quỹ đạo biến khớp hệ thiếu cơ cấu chấp hành nói chung và quỹ đạo hệ cầu treo 3D nói riêng tiến về được mặt trượt sau đúng một khoảng thời gian hữu hạn, đồng thời bổ sung thêm điều kiện cho tham số bộ điều khiển sao cho khi mặt trượt bằng 0, hệ sẽ trượt trên mặt trượt về được gốc tọa độ.

2.1. Điều khiển bám ổn định ISS thích nghi nhờ tín hiệu bù

Phương pháp điều khiển ổn định ISS được luận án xây dựng dựa trên sự kết hợp phương pháp tuyến tính hóa từng phần của Spong, nhưng bây giờ sẽ được áp dụng cho hệ bất định, có nhiễu tác động, cùng với phương pháp điều khiển thích nghi tuyến tính hóa chính xác để xử lý thành phần hằng bất định θ trong hệ đủ cơ cấu chấp hành. Tính mới

của phương pháp được luận án đề xuất ở đây là để hạn chế ảnh hưởng của thành phần nhiễu $\underline{n}(t)$, luận án sẽ bổ sung thêm vector tín hiệu bù $\underline{s}(t)$ thay vì áp dụng nguyên tắc điều khiển trượt vẫn thường sử dụng trong điều khiển các hệ EL đủ cơ cấu chấp hành, nhờ đó sẽ không xảy ra hiện tượng rung không mong muốn trong hệ.

2.1.1. Bộ điều khiển thích nghi ISS với tín hiệu bù

Mô hình:

$$\begin{cases} D\ddot{\underline{q}}_1 + C_{11}\dot{\underline{q}}_1 + \underline{f}' = \underline{u} + \underline{n} \\ M_{21}\ddot{\underline{q}}_1 + M_{22}\ddot{\underline{q}}_2 + \underline{f}_2 = \underline{0} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\text{Giả thiết: } \|\underline{n}(t)\|_{\infty} = \sup_t |\underline{n}(t)| = \delta \quad (2.4)$$

là giá trị hữu hạn.

vế trái của mô hình (2.3) luôn viết lại được một cách chi tiết thành:

$$\begin{cases} D(\underline{q}, \underline{\theta})\ddot{\underline{q}}_1 + C_{11}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\theta})\dot{\underline{q}}_1 + \underline{f}'(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\theta}) = F_1(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\ddot{q}})\underline{\theta} \\ M_{21}(\underline{q}, \underline{\theta})\ddot{\underline{q}}_1 + M_{22}(\underline{q}, \underline{\theta})\ddot{\underline{q}}_2 + \underline{f}_2(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\theta}) = F_2(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\ddot{q}})\underline{\theta} \end{cases} \quad (2.5)$$

Định lý 1: Xét hệ bất định (2.3) thỏa mãn các giả thiết (2.4) và (2.5). Khi đó bộ điều khiển thích nghi bền vững:

$$\underline{u} = D(\underline{q}, \underline{d})\left[\ddot{\underline{q}}_r + K_1\underline{e} + K_2\dot{\underline{e}}\right] + C_{11}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{d})\dot{\underline{q}}_1 + \underline{f}'(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{d}) + \underline{s}(t) \quad (2.6)$$

trong đó:

$$\underline{e} = \underline{q}_r - \underline{q}_1, K_1 = \text{diag}(a), K_2 = \text{diag}\left(\sqrt{(a+1)a}\right), a > 0 \quad (2.7)$$

có vector hằng \underline{d} trong $D(\underline{q}, \underline{d})$, $C_{11}(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{d})$, $\underline{f}'(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{d})$ được chọn thay cho vector tham số hằng bất định $\underline{\theta}$ để:

$$\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |d_{ij}(\underline{q}, \underline{d})| \leq \gamma, \quad \forall \underline{q} \quad (2.8)$$

với γ là một giá trị hữu hạn xác định, $d_{ij}(\underline{q}, \underline{d})$ là các phần tử của ma trận $D(\underline{q}, \underline{d})^{-1}$ và:

$$\underline{s}(t) = F_1(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\ddot{q}}) \int_0^t \left[\left(D(\underline{q}, \underline{d})^{-1} F_1(\underline{q}, \underline{\dot{q}}, \underline{\ddot{q}}) \right)^T (K_1, K_2) \underline{x} \right] d\tau \quad (2.9)$$

trong đó $\underline{x} = \text{col}(\underline{e}, \underline{\dot{e}})$ là ký hiệu của vector sai lệch tám, sẽ luôn đưa vector sai lệch tám \underline{x} về được lân cận gốc O xác định bởi:

$$O = \left\{ \underline{x} \in \mathbf{R}^{2m} \mid |\underline{x}| < \frac{\delta\gamma}{a} \right\} \quad (2.10)$$

Chứng minh:

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B \left[F_1(\underline{\theta} - \underline{d}) - \underline{s} - \underline{n} \right] \quad (2.12)$$

$$\text{trong đó } \underline{x} = \begin{pmatrix} \underline{e} \\ \underline{\dot{e}} \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & I_m \\ -K_1 & -K_2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \widehat{D}^{-1} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Do K_1, K_2 cho bởi (2.7) là hai ma trận đối xứng xác định dương làm cho ma trận A định nghĩa trong (2.13) là ma trận bền, tức là ma trận có tất cả các giá trị riêng nằm bên trái trục ảo, nên hệ không có nhiễu: $\dot{\underline{x}}_m = A\underline{x}_m$ (2.14)

là hệ ổn định. Bởi vậy quỹ đạo $\underline{x}_m(t)$, không phụ thuộc giá trị đầu $\underline{x}_m(0)$, khi $t > 0$ luôn bị chặn và tiến tiệm cận về gốc khi $t \rightarrow \infty$.

Sau đó chứng minh bộ điều khiển bổ sung (2.9) đã cho trong định lý sẽ làm sai lệch $\underline{x} - \underline{x}_m$ luôn bị chặn và tiến về được lân cận gốc xác định bởi (2.10), từ đó khẳng định được tính chất bị chặn cũng như luôn tiến tiệm cận được về lân cận O của quỹ đạo sai lệch $\underline{x}(t)$.

$$\dot{V} = -a^2 |\underline{x}|^2 - \underline{x}^T PB \underline{n} \leq -a^2 |\underline{x}|^2 + \|PB\| \delta |\underline{x}| \leq a [-a |\underline{x}| + \gamma \delta] |\underline{x}| \quad (2.18)$$

Điều này chỉ ra rằng khi có: $\frac{\gamma \delta}{a} < |\underline{x}|$, tức là khi quỹ đạo sai lệch $\underline{x}(t)$ còn nằm ngoài lân cận 0 cho bởi công thức (2.10), sẽ có $\dot{V} < 0$, do đó $|\underline{x}(t)|$ vẫn còn đơn điệu giảm (đ.p.c.m). ■

Khi có $q_1 \rightarrow q_r$ với q_r là hằng số, sẽ có:

$$\ddot{q}_2 = -M_{22}^{-1}(q_2, q_r, d) f_{-2}(q_2, q_r, \dot{q}_2, d) \quad (2.20)$$

Bản thân định lý 1 trên cũng chính là các bước thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững cho thành phần hệ con đủ cơ cấu chấp hành, bất định, bị nhiễu tác động, bám theo được quỹ đạo mẫu với sai lệch tiệm cận không lớn hơn $\gamma \delta / a$.

Ngoài ra có thể dễ thấy thêm rằng:

- Với giá trị a được chọn càng lớn, lân cận 0 sẽ càng nhỏ.
- Luôn tồn tại d để giả thiết (2.8) được thỏa mãn.

- Bộ điều khiển (2.6) với tín hiệu bù $\underline{s}(t)$ cho bởi (2.9) có cùng chức năng giống như bộ điều khiển trượt là xử lý được sự ảnh hưởng của thành phần bất định hàm $\underline{n}(q, t)$ có lẫn trong tín hiệu đầu vào, song khác với điều khiển trượt, nó không sử dụng mặt trượt, không cần giữ quỹ đạo trạng thái của hệ trên mặt trượt, nên nó cũng sẽ không tạo ra hiện tượng rung trong hệ.

2.1.2. Chất lượng thành phần của hệ con thứ hai

Để hệ con thứ hai có được $q_2 \rightarrow \underline{0}$, ta đi chọn d để hệ ổn định, khi đó ta sẽ vừa có được $q_1 \rightarrow q_r$ nhờ bộ điều khiển nêu trong định lý 1 là (2.6), (2.9), vừa có $q_2 \rightarrow \underline{0}$. Tuy nhiên việc chọn d như thế

nào thì thích hợp còn phụ thuộc vào cấu trúc cụ thể của (2.20) và phụ thuộc vào đặc thù của từng hệ thống. Đối với hệ cầu treo, việc chọn d thích hợp là khá đơn giản để hệ (2.20) là ổn định với mọi d .

2.2. Điều khiển trượt bậc cao

Điều khiển trượt bậc cao được biết đến như một giải pháp chống rung trong điều khiển trượt. Tuy nhiên, những giải pháp đưa ra ở đó là chưa được hoàn chỉnh, ở chỗ:

- Chưa chỉ ra được là thời gian quỹ đạo của hệ tiến về mặt trượt là hữu hạn. Điều này rất cần thiết vì nếu chỉ có thể tiệm cận được về mặt trượt, hệ vẫn có thể mất ổn định.

- Còn thiếu điều kiện chặt chẽ để hệ trượt trên mặt trượt về đến gốc tọa độ.

Do vậy, bên cạnh phương pháp điều khiển ISS và để hoàn thiện hai thiếu sót vừa nêu, luận án sẽ đề xuất thêm bộ điều khiển trượt bậc hai và bộ điều khiển trượt siêu xoắn phục vụ bài toán điều khiển thích nghi bền vững cho các hệ EL thiếu cơ cấu chấp hành.

2.2.1. Khái niệm điều khiển trượt cơ bản và trượt bậc cao

2.2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt bậc hai cho hệ EL bất định thiếu cơ cấu chấp hành

Tại một tạp chí quốc tế do một nhóm các nhà khoa học Hàn Quốc nghiên cứu đã giới thiệu một ứng dụng của điều khiển trượt bậc hai vào điều khiển bám ổn định hệ cầu treo. Song, bộ điều khiển này là chưa hoàn chỉnh vì mới chỉ ra được rằng quỹ đạo của hệ cầu treo là tiệm cận về mặt trượt chứ chưa chứng minh được nó sẽ về mặt trượt sau một khoảng thời gian hữu hạn. Hơn nữa nó cũng chưa đưa ra được điều kiện để quỹ đạo của hệ sau đó sẽ trượt trên mặt trượt về gốc tọa độ.

Để khắc phục những khiếm khuyết trên, luận án sẽ mở rộng phương pháp giới thiệu tại tài liệu này, vốn được thiết kế riêng cho hệ cầu treo 3D, như sau:

- Mở rộng sang cho cả các hệ EL thiếu cơ cấu chấp hành nhiều biến khớp độc lập (1.1) một cách tổng quát.

- Bổ sung phần chứng minh bộ điều khiển đó luôn đưa quỹ đạo của hệ về mặt trượt sau khoảng thời gian hữu hạn.

- Bổ sung điều kiện để hệ trượt được trên mặt trượt về tới góc tọa độ.

Thiết kế bộ điều khiển

Xét hệ EL thiếu cơ cấu chấp hành có mô hình không tường minh, bị nhiễu tác động ở đầu vào và có số các biến khớp độc lập \underline{q}_1 nhiều hơn số biến khớp phụ thuộc \underline{q}_2 , mô tả bởi:

$$M(\underline{q}, \underline{\theta})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, \underline{\theta})\dot{\underline{q}} + \underline{g}(\underline{q}, \underline{\theta}) = \begin{pmatrix} \underline{u} + \underline{n}(t) \\ \underline{0} \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

Mô hình

$$M(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} + \underline{g}(\underline{q}) = \begin{pmatrix} \underline{u} + \underline{\varsigma} \\ \underline{0} \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

Áp dụng phương pháp tách hệ đã được Spong sử dụng, ta sẽ có thành phần hệ con đủ cơ cấu chấp hành tương ứng của (2.41) như sau:

$$\underline{u} + \underline{\varsigma} = D(\underline{q})\ddot{\underline{q}}_1 + \underline{h}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) \quad (2.43)$$

Khi mở rộng mặt trượt $\underline{s} = \underline{\dot{s}} = \underline{0}$, với nhiệm vụ điều khiển bám $\underline{q}_1 \rightarrow \underline{q}_r$, trong đó \underline{q}_r là quỹ đạo mẫu dạng hằng số cho trước, ta sẽ có mặt trượt mở rộng như sau:

$$\underline{s}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}_1) = \dot{\underline{q}}_1 + \Lambda \underline{e} + \Gamma \underline{q}_2, \quad \underline{e} = \underline{q}_1 - \underline{q}_r \quad (2.44)$$

Ta sẽ tiến hành xây dựng bộ điều khiển trượt bậc hai cho hệ EL có nhiều biến khớp độc lập. Bộ điều khiển trượt khi được mở rộng cho hệ (2.43) cũng sẽ có dạng như sau:

$$\underline{u} = \underline{u}_{eq} - K \operatorname{sgn}(\underline{s}), \quad K = \operatorname{diag}(k_i) \in \mathbf{R}^{m \times m} \quad \text{và} \quad k_i > 0, \quad \forall i, \quad (2.45)$$

$$\text{trong đó: } \underline{u}_{eq} = \underline{h}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) - D(\underline{q}) \left[2\Lambda \dot{\underline{q}}_1 + \Lambda^2 \underline{e} + \Gamma \dot{\underline{q}}_2 + \Lambda \Gamma \underline{q}_2 \right] \quad (2.46)$$

Khoảng thời gian tiến về mặt trượt là hữu hạn

Ta cần chứng minh luật điều khiển (2.45), (2.46) đưa hệ từ mọi điểm trạng thái đầu thuộc một tập compact trong không gian biến khớp $(\underline{q}(0), \dot{\underline{q}}_1(0)) \in \mathbf{C}$ về đến mặt trượt $\underline{s}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}_1) = \underline{0}$ sau đúng một khoảng thời gian hữu hạn.

Định lý 2: *Nếu tồn tại một vector hằng \underline{d} mà khi được thay cho vector tham số bất định $\underline{\theta}$ trong hệ (2.39) không làm thay đổi vector biến khớp độc lập \underline{q}_1 thì bộ điều khiển trượt bậc hai (2.45), (2.46) sẽ đưa được hệ (2.39) từ mọi điểm trạng thái đầu $(\underline{q}(0), \dot{\underline{q}}_1(0)) \in \mathbf{C}$ thuộc một miền compact \mathbf{C} về tới mặt trượt $\underline{s}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}_1) = \underline{0}$ có $\underline{s}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}_1)$ cho bởi (2.44) và quỹ đạo đặt \underline{q}_r là hằng số, sau đúng một khoảng thời gian hữu hạn T .*

Chứng minh:

$$V(t) < V(0) - \frac{\delta^2}{\lambda_{\max}} t \quad (2.49)$$

Bất đẳng thức cuối cùng (2.49) này đã xác nhận sự tồn tại của một khoảng thời gian T hữu hạn để có $V(T) = 0$, tức là quỹ đạo biến khớp của hệ sẽ về đến mặt trượt sau một khoảng thời gian hữu hạn (đ.p.c.m). ■

Như vậy với định lý 2 này, bộ điều khiển trượt bậc hai đó sẽ đưa được hệ về mặt trượt sau đúng một khoảng thời gian hữu hạn.

Điều kiện để hệ trượt được trên mặt trượt về góc tọa độ

Cần và đủ để hệ trượt được trên mặt trượt về góc tọa độ là hệ

$$\dot{\underline{x}} = \begin{pmatrix} -\Lambda \underline{x}_1 - \Gamma \underline{x}_2 \\ \underline{x}_3 \\ \underline{h}(\underline{x}) \end{pmatrix} = \underline{g}(\underline{x}) \quad \text{với} \quad \underline{g}(\underline{x}) = \begin{pmatrix} -\Lambda \underline{x}_1 - \Gamma \underline{x}_2 \\ \underline{x}_3 \\ \underline{h}(\underline{x}) \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

phải ổn định tiệm cận, tức là khi và chỉ khi tồn tại một hàm xác định dương $V'(\underline{x})$ sao cho:

$$\frac{\partial V'}{\partial \underline{x}} \underline{g}(\underline{x}) < 0, \quad \forall \underline{x} \neq 0 \quad (2.53)$$

là hàm xác định âm (theo định lý đảo Lyapunov).

2.3. Kết luận chương 2

L luận án đã đưa ra một số đề xuất về xây dựng bộ điều khiển thích nghi và bền vững cho hệ EL thiếu cơ cấu chấp hành, có tham số hằng bất định $\underline{\theta}$ trong mô hình và bị nhiễu $\underline{n}(q, t)$ tác động ở đầu vào \underline{u} , mô tả bởi mô hình tổng quát (1.1), mà cụ thể là:

1) Thứ nhất là đã xây dựng được bộ điều khiển thích nghi ISS (phát biểu trong định lý 1) cho hệ (1.1). Bộ điều khiển này áp dụng được cho hệ vừa chứa tham số hằng bất định, vừa bị nhiễu tác động ở đầu vào. Khác với bộ điều khiển trượt, bộ điều khiển thích nghi ISS này không tạo ra hiện tượng rung trong hệ, nên khả năng ứng dụng vào thực tế là cao hơn.

Ngoài ra, tuy rằng bộ điều khiển thích nghi ISS được đề xuất này có nhược điểm là không đưa được sai lệch bám của hệ về 0, mà chỉ đưa về được một lân cận gốc O xác định bởi (2.10), song điều này không quá quan trọng, vì kích thước của lân cận O đó luôn có thể điều chỉnh nhỏ một cách tùy ý thông qua tham số a của bộ điều khiển.

2) Thứ hai là đã tổng quát hóa được bộ điều khiển trượt bậc hai cho hệ cầu treo 3D dạng tường minh, giới thiệu trong bài báo quốc tế

của nhóm nhiên cứu Hàn Quốc, sang cho cả hệ EL thiếu cơ cấu chấp hành (1.1), có tham số bất định trong mô hình và bị nhiễu tác động ở đầu vào. Ngoài ra, luận án còn chỉ ra được thời gian hệ về mặt trượt luôn là hữu hạn (định lý 2) cũng như bổ sung thêm điều kiện để hệ sai số trượt được trên mặt trượt về gốc tọa độ, điều còn thiếu ở tài liệu này.

Cuối cùng, có một vấn đề đặt ra ở đây mà luận án chưa giải quyết được là đối với các hệ EL có hệ con thứ hai không tự ổn định thì cách thức xác định tham số \underline{d} thay cho tham số bất định $\underline{\theta}$ trong hệ (1.1) ban đầu một cách tổng quát, sao cho với nó hệ con thứ hai của hệ là (2.20) sẽ ổn định tiệm cận. Thực tế, tùy đặc thù của từng hệ thống sẽ lựa chọn được \underline{d} phù hợp chứ cũng không nhất thiết phải xác định trong trường hợp tổng quát.

Chương 3: ỨNG DỤNG TRONG ĐIỀU KHIỂN HỆ CẦU TREO 3D

3.1. Mô hình hoá hệ cầu treo

3.1.1. Cấu trúc vật lý hệ cầu treo

3.1.2. Mô hình EL hệ cầu treo 3D

$$M(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + B\dot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} + \underline{g}(\underline{q}) = G\underline{u} \quad (3.8)$$

trong đó: $\underline{q} = (x, y, l, \varphi_x, \varphi_y)^T$ là vector các biến khớp.

$\underline{u} = (u_x, u_y, u_l)^T$ là vector lực tác động vào hệ (tín hiệu đầu vào).

Dựa vào mô hình thu được, ta thấy:

1) Hệ mang đặc điểm hệt cơ cấu chấp hành khi các góc lệch φ_x, φ_y không được điều khiển một cách trực tiếp mà phải điều khiển gián tiếp thông qua các thành phần lực u_x, u_y, u_l .

2) Hệ phương trình mô tả hệ cầu treo 3D là hệ phi tuyến có tính liên kết cao. Hai điều này đã tạo ra nhiều khó khăn trong việc thiết kế bộ điều khiển cho hệ cầu treo 3D đòi hỏi cần có những phương pháp phù hợp để giải quyết chúng.

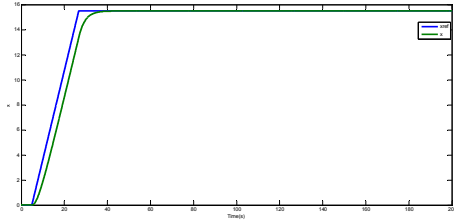
3.1.3. Mô hình EL hệ cầu treo 2D

$$M(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + C(\underline{q}, \dot{\underline{q}})\dot{\underline{q}} + \underline{g}(\underline{q}) = (u_1, u_2, 0, 0)^T \quad (3.10)$$

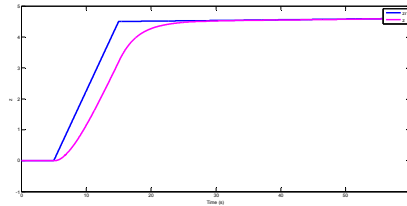
3.2. Điều khiển thích nghi ISS

3.2.1. Bộ điều khiển thích nghi ISS cho hệ cầu treo

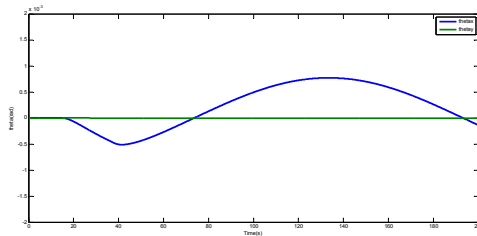
3.2.2. Kết quả mô phỏng



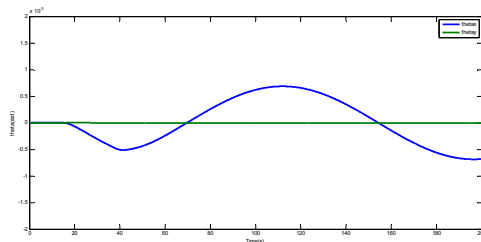
Hình 3.4. Đáp ứng vị trí cầu treo theo trục x



Hình 3.5. Đáp ứng vị trí cầu treo theo trục z



Hình 3.6a. Đáp ứng góc lắc của dây cáp theo các phương x, y khi chưa có bất định mô hình



Hình 3.6b. Đáp ứng góc lắc của dây cáp theo các phương x, y khi đã có bất định mô hình (tại thời điểm 50 giây).

Phần nội dung trên đã khẳng định phương pháp điều khiển thích nghi ISS giới thiệu ở chương 2 của luận án là áp dụng được tốt cho hệ thống cầu treo. Bằng cách sử dụng bộ điều khiển này không những đảm bảo được sự bám quỹ đạo cho các chuyển động của cầu treo mà còn đảm bảo góc lác của dây cáp theo các phương tiến dần về lân cận không. Không những thế, bộ điều khiển đề xuất trong phần này còn đảm bảo rằng hệ thống vẫn cho đáp ứng tốt khi có ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài và có tham số bất định mô hình. Hiệu quả của bộ điều khiển đã được chứng minh thông qua các kết quả mô phỏng thực hiện trên Matlab/Simulink.

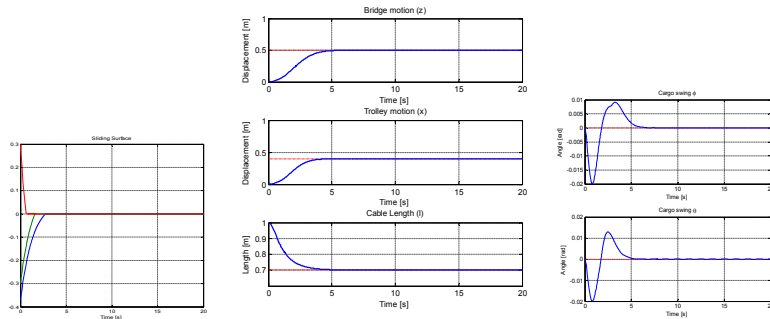
3.3. Điều khiển trượt bậc hai

3.3.1. Bộ điều khiển trượt bậc hai cho hệ cầu treo

Bộ điều khiển trượt bậc hai cho hệ EL bất định, thiếu cơ cấu chấp hành cũng áp dụng được cho hệ cầu treo mô tả bởi (3.8).

3.3.2. Kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng này cho thấy hệ là ổn định. Chất lượng hệ thống có thể được đánh giá là khá tốt.



Hình 3.11. Kết quả mô phỏng với $\alpha_1 = \alpha_2 = -4$

3.4. Điều khiển trượt siêu xoắn

3.4.1. Thiết kế bộ điều khiển trượt siêu xoắn cho hệ cầu treo

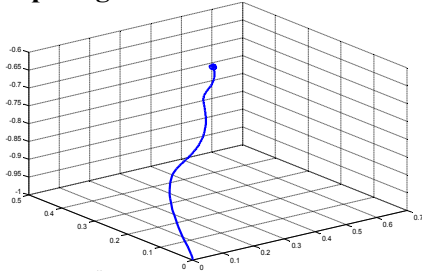
Luận án tiếp tục phát triển tiếp bộ điều khiển trượt siêu xoắn cho riêng hệ cầu treo 3D.

Đơn giản hóa mô hình khi hệ có góc lắc nhỏ

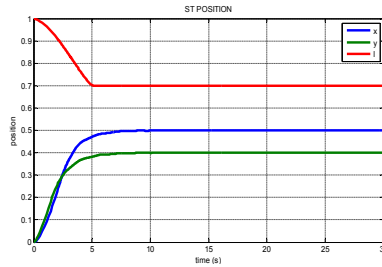
Thiết kế bộ điều khiển

$$\begin{cases} u_i = -\lambda_i \sqrt{|s_i|} \operatorname{sgn} s_i + \omega_i & \text{với } i \in \{x, y, l\} \\ \dot{\omega}_i = -\alpha_i \operatorname{sgn} s_i \end{cases} \quad (3.30)$$

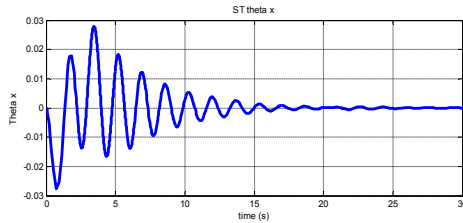
3.4.2. Kết quả mô phỏng



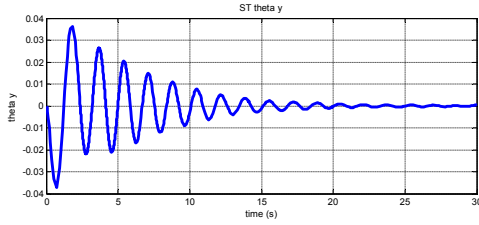
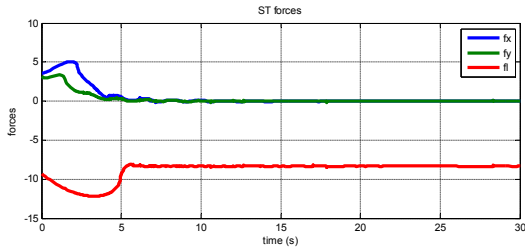
Hình 3.17. Quỹ đạo di chuyển của tải



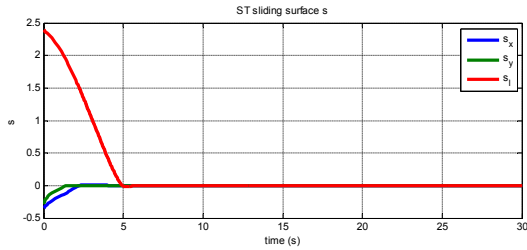
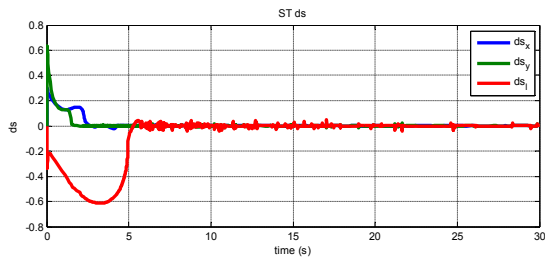
Hình 3.18. Đáp ứng của các biến trạng thái x, y, l

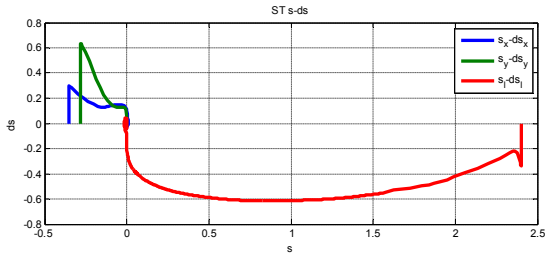


Hình 3.19. Đáp ứng góc φ_x

Hình 3.20. Đáp ứng góc φ_y 

Hình 3.21. Lực điều khiển

Hình 3.22. Mặt trượt \underline{s} Hình 3.23. Đạo hàm của mặt trượt $\underline{\dot{s}}$

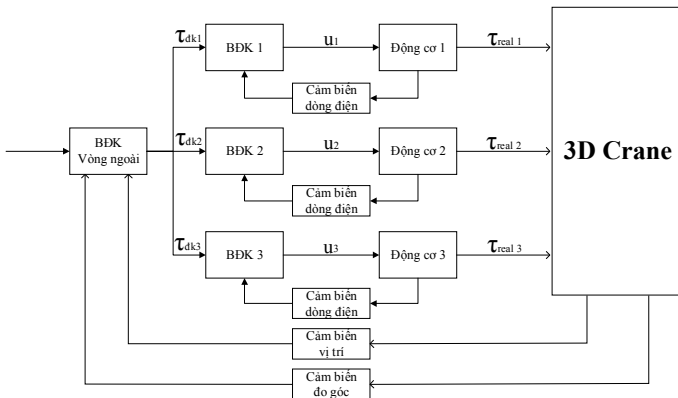


Hình 3.24. Quỹ đạo $\underline{s} - d\underline{s}$

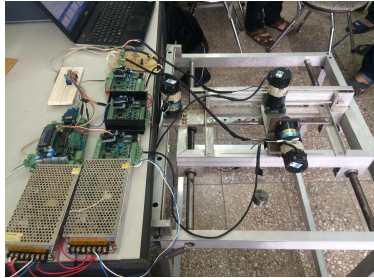
Như vậy, bộ điều khiển được thiết kế đã đáp ứng được yêu cầu bài toán điều khiển đặt ra mà cụ thể là:

- 1) Đưa được trọng tải từ vị trí đầu tới vị trí cuối đặt trước trong khoảng thời gian ngắn.
- 2) Các góc lệch được giới hạn trong phạm vi nhỏ và bị triệt tiêu dần. Bộ điều khiển trượt bậc cao đã cải thiện được hiệu ứng rung theo nghĩa thu nhỏ khoảng trượt về trong một lân cận của gốc, điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết, là cơ sở để ứng dụng bộ điều khiển vào trong thực tiễn.

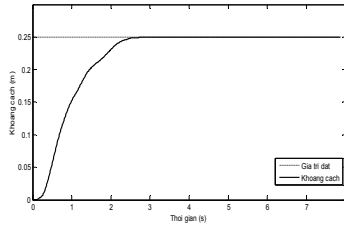
3.5. Xây dựng bản thí nghiệm cầu treo 3D



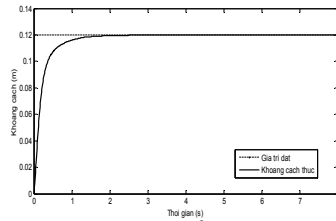
Hình 3.26. Hệ thống điều khiển



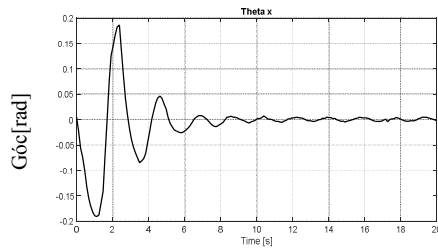
Hình 3.32. Hình ảnh hệ thực nghiệm 1
Kết quả thí nghiệm



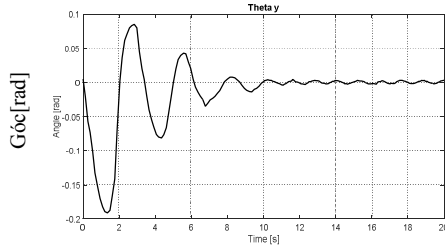
Hình 3.34. Tọa độ xà đỡ nằm ngang



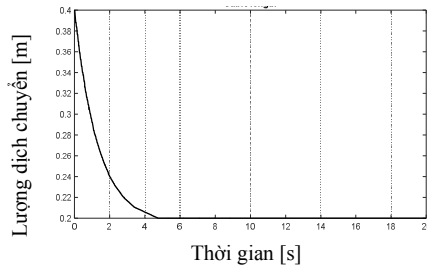
Hình 3.35. Tọa độ của xe cầu trên xà đỡ nằm ngang



Hình 3.36. Góc φ_x



Hình 3.37. Góc φ_y
Chiều dài cáp



Hình 3.38. Chiều dài cáp

Nhận xét

Hệ điều khiển đáp ứng được yêu cầu bài toán điều khiển vị trí, đưa được tải trọng từ vị trí đầu tới vị trí cuối trong thời gian ngắn, độ quá điều chỉnh nhỏ. Hạn chế ở đây là khớp trong khâu lắp ráp cảm biến góc nghiêng và kết cấu cơ khí chưa thực sự chính xác khi ăn khớp giữa bánh răng nhựa và thanh truyền lực.

3.6. Kết luận chương 3

Tại Chương 3 đã xây dựng được bản thí nghiệm cầu treo 3D nhằm kiểm chứng bằng thực nghiệm các kết quả lý thuyết của luận án. Bản thí nghiệm cũng đã được ghép nối với máy tính. Chương trình điều khiển cài đặt trên máy tính đối với bộ điều khiển trượt siêu xoắn, trong đó đã điều khiển được hệ cầu treo 3D bám theo được giá trị mong muốn như yêu cầu đặt ra. Mô hình thí nghiệm thực có thể ứng dụng trong ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa nhằm đáp

ứng được yêu cầu bài toán điều khiển đặt ra với chất lượng điều khiển khá tốt, cùng với đó là lực điều khiển phải hạn chế hiện tượng liên tục thay đổi với tần số lớn và là cơ sở để ứng dụng vào thực tiễn.

Kết quả thí nghiệm có sai lệch nhỏ so với kết quả mô phỏng lý thuyết, nguyên nhân chính là do kết cấu cơ khí của mô hình có sai lệch trong quá trình chế tạo. Tuy nhiên, nó đã thể hiện được đúng tính chất của bộ điều khiển trượt phản hồi đầu ra (bộ điều khiển trượt siêu xoắn) và đảm bảo theo các thông số của bộ điều khiển trượt.

Riêng các bộ điều khiển phản hồi trạng thái, gồm bộ điều khiển thích nghi ISS và bộ điều khiển trượt bậc hai chưa thực hiện được với bản thí nghiệm cầu treo 3D do còn thiếu các cảm biến phản hồi giá trị hành trình của quỹ đạo biến khớp về máy tính (BĐK).

KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

4.1. Kết luận chung

Luận án đã đạt được những kết quả sau đây:

1. Bổ sung thêm được tính thích nghi và bền vững cho bộ điều khiển tuyến tính hóa từng phần đã có. Tính thích nghi bổ sung thêm cho bộ điều khiển này được xây dựng theo nguyên lý giá định rõ (*certainty equivalence*). Tính bền vững được bổ sung nhờ nguyên lý điều khiển ISS (*input to state stable*). Kết quả đã được luận án phát biểu dưới dạng định lý 1 ở chương 2.
2. Hoàn thiện được phương pháp điều khiển trượt bậc hai với bộ điều khiển (2.45), (2.46) và (2.47) cho hệ thiếu cơ cấu chấp nói chung. Đồng thời luận án cũng đã:
 - Bổ sung định lý 2 ở chương 2 để khẳng định rằng bộ điều khiển đó đã đưa được hệ về mặt trượt sau một khoảng thời gian hữu hạn.
 - Bổ sung thêm được điều kiện (2.53) để hệ sai lệch trượt được trên mặt trượt về 0. Điều kiện này cũng đã được luận án triển khai

một cách chi tiết thành điều kiện (3.15) về các tham số bộ điều khiển khi áp dụng cho hệ cầu treo 3D.

3. Riêng với đối tượng EL thiếu cơ cấu chấp hành cụ thể là hệ cầu treo 3D, luận án cũng đã xây dựng được bộ điều khiển trượt siêu xoắn (3.30) ở chương 3 làm việc theo nguyên tắc phản hồi đầu ra. Đồng thời cũng đã chỉ ra được ở công thức (3.31) rằng với bộ điều khiển trượt siêu xoắn này sẽ đưa hệ về mặt trượt sau một khoảng thời gian hữu hạn.
4. Luận án cũng đã xây dựng được bàn thí nghiệm về hệ cầu treo 3D, ghép nối bàn thí nghiệm với máy tính và thử nghiệm được chất lượng của bộ điều khiển trượt siêu xoắn này trong môi trường thực tế.

4.2. Kiến nghị và hướng nghiên cứu tiếp theo

Một số vấn đề phát sinh trong quá trình thực hiện đề tài mà luận án chưa hoàn thiện được, sẽ được NCS xem như là các bài toán cần nghiên cứu tiếp theo của mình trong tương lai. Đó là:

1. Đối với các hệ EL thiếu cơ cấu chấp hành có hệ con (2.20) không tự ổn định cần xây dựng điều kiện đủ cho việc lựa chọn vector tham số \underline{d} của bộ điều khiển thích nghi ISS mà ứng với nó hệ con tự do (2.20) tương ứng sẽ ổn định tiệm cận khi mà hệ con này, với dạng tương đương (1.22), không thỏa mãn điều kiện đã được trình bày ở mục 1.1.2.
2. Trong quá trình xây dựng bàn thí nghiệm cầu treo 3D, mặc dù đã có cảm biến đo góc đủ chính xác, tuy nhiên để mô hình gọn hơn mà vẫn đảm bảo đủ chính xác, nghiên cứu sinh đã đặt ra nhiệm vụ xây dựng bộ thuật toán quan sát góc lắc φ_x, φ_y từ giá trị đo được của quỹ đạo biến khớp \underline{q} và tốc độ của nó $\underline{\dot{q}}$ thay cho các cảm biến góc, song chưa làm được.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CÓ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

Bài báo khoa học

1. Hoàng Đức Quỳnh, Nguyễn Thị Việt Hương, Nguyễn Doãn Phước (2013), “Nhận dạng trạng thái hệ cầu treo 2 chiều bằng bộ quan sát KALMAN rời rạc”, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, Tập 106, số 06, tr. 15-21.
2. Nguyễn Thị Việt Hương, Đào Phương Nam, Nguyễn Doãn Phước (2013), “Mô hình hóa và mô phỏng có sử dụng bộ quan sát trạng thái trong hệ cần cầu treo”, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, Tập 110, số 10, tr. 27-36.
3. Nguyễn Thị Việt Hương, Nguyễn Doãn Phước, Vũ Thị Thúy Nga, Đỗ Trung Hải (2014), “Điều khiển cầu treo 3D chất lượng cao sử dụng bộ điều khiển thích nghi bền vững”, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, Tập 128, số 14, tr. 35-41.
4. Nguyễn Thị Việt Hương, Đào Phương Nam, Nguyễn Quang Hùng (2014), “Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát trạng thái trong hệ cần cầu treo”, *Tạp chí nghiên cứu khoa học & công nghệ Quân sự*, Số đặc san TĐH’14, 04 – 2014, tr. 25-32.
5. Nguyễn Thị Việt Hương, Trần Vũ Trung, Đào Phương Nam (2015), “High-order Sliding Approach for Robust control of a 3-D Overhead Crane System”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ các trường đại học kỹ thuật*, ISSN 2354-1083, số 108, tr. 007-011.

Báo cáo hội nghị khoa học

6. Vũ Thị Thúy Nga, Nguyễn Thị Việt Hương (2013), “Điều khiển không cảm biến chất lượng cao cho động cơ đồng bộ trong toàn dải tốc độ”, *Hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về điều khiển và tự động hóa VCCA-2013*, Bài số 145, Tóm tắt tại trang 9.
7. Nguyễn Thị Việt Hương, Đào Phương Nam, Nguyễn Doãn Phước (2013), “Mô hình hóa và mô phỏng cần cầu treo”, *Hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về điều khiển và tự động hóa VCCA-2013*, Bài số 31, Tóm tắt tại trang 33.