

THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN DỰA TRÊN ĐỘNG HỌC, ĐỘNG LỰC HỌC VÀ LYAPUNOV CHO ROBOT SONG SONG DẪN ĐỘNG BẰNG CÁP TRONG ỨNG DỤNG IN 3D XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH
KINEMATICS, DYNAMICS AND LYAPUNOV BASED CONTROLLER DESIGN OF CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT FOR 3D PRINTING BUILDING CONSTRUCTION

NGUYỄN ĐÌNH LÂM¹, TRẦN MINH QUÂN¹, TRẦN VIỆT HÙNG¹, PHẠM ĐÌNH BÁ^{2*}

¹*Sinh viên Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

²*Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

*Email liên hệ: bapd.vck@vamaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.886>

Tóm tắt

Công nghệ sản xuất phun đắp (AM), công nghệ in 3D, hiện nay là một ngành có tiềm năng phát triển mạnh mẽ. Tuy nhiên, lĩnh vực sản xuất 3D quy mô lớn vẫn còn tương đối mới mẻ đối với giới nghiên cứu. Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu một mô hình cơ cấu quy mô lớn mới cho công nghệ AM, bao gồm một nền tảng đầu in di động được dẫn động bằng robot cáp song song. Các nội dung về động học, độ cứng, động lực học và thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống được đề xuất đã được trình bày như giai đoạn đầu tiên của dự án nghiên cứu. Vấn đề then chốt trong việc duy trì lực căng của cáp cũng được xem xét kỹ lưỡng trong cả tĩnh và động. Chiến lược điều khiển của hệ thống được đề xuất và tính ổn định của nó được phân tích bằng phương pháp Lyapunov bậc hai. Kết quả chứng minh rằng hệ thống vòng kín sử dụng thuật toán điều khiển được đề xuất là ổn định. Cuối cùng, hiệu suất của thuật toán điều khiển được kiểm chứng thông qua mô phỏng.

Từ khóa: Động học, động lực học, bộ điều khiển Lyapunov, in 3D, Robot song song dẫn động bằng cáp (CDPR).

Abstract

The additive manufacturing (AM) is currently a potential industry. However, the large-scale AM is still relatively new field for researchers. In this article, we introduce a new model of large mechanism for AM, which consists of a mobile extruder platform driven by a translational cable parallel robot. The kinematics, stiffness, dynamics, and controller design for proposed

system as a first stage of the research project are shown. The critical point of keeping the cables in tension was also well addressed both in statics and dynamics. The control strategy of the system was proposed, then the stability was analyzed through Lyapunov second method. It had proven that the closed-loop system with the proposed control algorithm is stable. Finally, the performance of the proposed algorithm was examined through simulation.

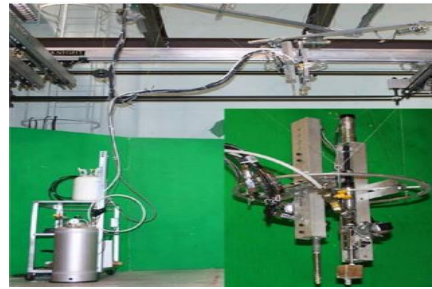
Keywords: Kinematics, dynamics, lyapunov controller, 3D printing, cable-driven parallel robot (CDPR).

1. Mở đầu

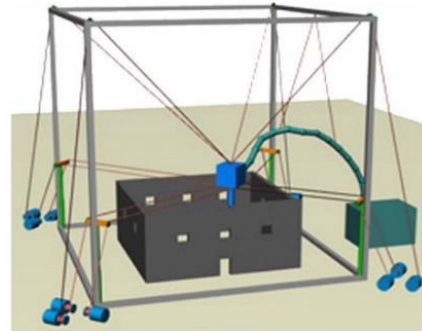
Trong những năm gần đây, công nghệ sản xuất phun đắp (AM) - in 3D, đã chứng kiến sự chuyển mình mạnh mẽ, từ một ngành công nghiệp ngách trở thành một công nghệ chủ đạo thực thụ. Hiện nay, AM được sử dụng phổ biến để chế tạo các vật thể có kích thước nhỏ. Tuy nhiên, sản xuất cộng quy mô lớn vẫn là một lĩnh vực nghiên cứu tương đối mới mẻ [1, 2]. Mục tiêu chính của công nghệ AM quy mô lớn là xây dựng nhanh chóng các cấu trúc có kích thước lớn như nhà ở, cầu hoặc trạm cứu hộ,... Rõ ràng, AM quy mô lớn không chỉ đòi hỏi sự tiến bộ của công nghệ vật liệu mà còn cần sự phát triển trong thiết kế các loại robot mới có vùng làm việc rộng hơn. Những tiến bộ gần đây trong thiết kế các cơ cấu có không gian làm việc lớn, đặc biệt là robot song song dẫn động bằng cáp (CDPR), đã mở ra các giải pháp mới cho ứng dụng AM trong xây dựng [1, 2, 10, 11]. Ở CDPRs, cơ cấu chấp hành (EE) được treo bằng nhiều sợi cáp mềm, thay thế cho các khâu cứng trong robot song song truyền thống. So với robot song song dùng khâu cứng,

CDPR có mô men quán tính nhỏ hơn nhiều và tỷ lệ mang tải trọng cao hơn, cho phép đạt được tốc độ và gia tốc cao của EE [3, 4]. Bên cạnh đó, nhờ vào độ dài mở rộng và tính linh hoạt của cáp, CDPR có thể được ứng dụng trong các nhiệm vụ yêu cầu vùng làm việc rộng, như trong công nghệ AM quy mô lớn [5-7]. Vị trí của EE được điều khiển bằng cách thay đổi đồng bộ độ dài của các dây cáp, được kích hoạt bởi các cơ cấu truyền động và tời cáp cố định hoặc di động. Trên thực tế, CDPR đã chứng minh được ưu thế trong những ứng dụng đòi hỏi không gian làm việc rộng. Một ví dụ tiêu biểu cho CDPR là ROBOCRANE [8, 9], được phát triển sớm bởi Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia Hoa Kỳ (NIST) vào năm 1989. ROBOCRANE nổi bật bởi cấu trúc đơn giản và khả năng ứng dụng rộng rãi, đặc biệt trong các lĩnh vực như gia công cơ khí, bốc dỡ hàng hóa tại cảng, xây dựng cầu, hàn và nhiều ứng dụng khác. Barnett và Gosselin [1] đã giới thiệu một loại máy in 3D dẫn động bằng cáp treo với vùng làm việc lớn hơn so với máy in 3D truyền thống sử dụng khâu cứng (Hình 1). Hệ thống này sử dụng robot CDPR 6 bậc tự do (6-DOF) để định vị và cung cấp vùng làm việc rộng cho chuyển động. Nhờ hệ thống điều khiển phản hồi hình học, độ ổn định và độ chính xác của máy in 3D CDPR được cải thiện đáng kể. Bosscher và cộng sự [10] đã phát triển ý tưởng xây dựng bằng kỹ thuật “contour crafting” [11] thông qua một robot CDPR 3 bậc tự do. Nền tảng đầu in (EE) được dịch chuyển tịnh tiến bằng chuyển động đồng bộ của 12 dây cáp. Các điểm cố định của tám dây cáp phía dưới sẽ được nâng lên khi quá trình xây dựng tiếp diễn. Các tác giả đã phân tích kỹ thuật về vùng làm việc của robot trong các giai đoạn xây dựng khác nhau, cũng như hiệu quả kinh tế của quy trình. Hình 2 minh họa thiết kế của hệ thống in “contour crafting”. Jean-Baptiste Izard và cộng sự đã minh họa sự kết hợp giữa robot CoGiro CDPR và đầu in Pylos. Pylos là kết quả của một dự án nghiên cứu tại Viện Kiến trúc Tiên tiến Catalonia (IAAC, Tây Ban Nha) về quy trình AM quy mô lớn, sử dụng vật liệu tác động sinh thái thấp, hoàn toàn tự nhiên và có thể phân hủy sinh học, dành cho lĩnh vực kiến trúc [10]. Hệ thống này đã mở ra khả năng phát triển một máy in 3D với vùng làm việc trên mười mét chiều dài và chiều rộng, như thể hiện trong Hình 3.

Bài báo này giới thiệu một ý tưởng mới về robot song song dẫn động bằng cáp (CDPR) quy mô lớn ứng dụng trong xây dựng bằng công nghệ in 3D. Hệ thống CDPR được đề xuất có điểm tương đồng với mô hình của Bosscher ở khía cạnh tránh va chạm giữa các dây cáp và vật thể đang được in; tuy nhiên, nó khác biệt ở



Hình 1. CDPR ứng dụng trong máy in 3D



Hình 2. CDPR in tạo hình theo đường viền



Hình 3. COGIRO kết hợp đầu in Pylos và vật thể in

số lượng dây cáp được giảm bớt và cấu trúc cơ cấu kéo được cải tiến. Bốn cáp phẳng đi động để ổn định và điều khiển trong mặt phẳng để mở rộng theo phương ngang trong khi đó cáp treo theo phương thẳng đứng chịu tải trọng theo phương thẳng đứng cân bằng trọng lực đầu in và giảm yêu cầu lực căng lên bốn dây ngang. Khi so với mô hình 6 hoặc 8 dây cáp thì không gian của 5 dây rộng hơn, điều khiển đơn giản hơn, độ cứng theo phương z cao hơn. Nghiên cứu này gồm mô hình động học, mô hình động lực học và thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống được đề xuất như là giai đoạn đầu tiên của dự án nghiên cứu. Vấn đề then chốt trong việc duy trì lực căng của dây cáp cũng được xem xét. Chiến lược điều khiển của hệ thống được đề xuất, sau đó tính ổn định của hệ thống được phân tích bằng phương pháp Lyapunov bậc hai. Kết quả chứng minh rằng hệ thống vòng kín sử dụng thuật toán điều khiển được đề xuất là ổn định. Cuối cùng, hiệu suất của thuật toán điều khiển được kiểm chứng thông qua mô phỏng.

2. Động học của CDRP

2.1. Cấu hình robot

Theo cách bố trí cáp, hệ robot song song dẫn động bằng cáp (CDPR) có thể được chia thành hai loại. Loại thứ nhất là CDRP dạng treo, trong đó tất cả các cáp dẫn động đều nằm phía trên cơ cấu chấp hành cuối, và trọng lực đóng vai trò như một “cáp ảo” giúp duy trì trạng thái cân bằng lực kéo. Loại thứ hai là CDRP không treo, trong đó có ít nhất một cáp được bố trí phía dưới cơ cấu chấp hành cuối. Dựa trên mối quan hệ giữa số lượng cáp dẫn động (m) và số bậc tự do (n) của cơ cấu chấp hành cuối, CDRP được chia thành ba dạng: CDRP thiếu ràng buộc ($m < n$), CDRP ràng buộc hoàn hảo ($m = n$) và CDRP ràng buộc dư ($m > n$) [13, 14]. Hình 4 minh họa mô hình khái niệm (góc nhìn xiên và chính diện) của hệ CDRP ràng buộc dư được đề xuất cho ứng dụng in 3D trong xây dựng. Hệ thống đề xuất có 3 bậc tự do và 5 cáp chủ động, bao gồm 1 cáp treo và 4 cáp phẳng. Cụ thể, bốn cáp phẳng có một đầu gắn với cơ cấu chấp hành cuối và đầu còn lại nối với các cơ cấu chấp hành (bộ truyền động) có thể di chuyển lên xuống dọc theo thanh đứng tương ứng với độ cao của cơ cấu chấp hành cuối. Chuyển động thẳng đứng này tương tự như cơ chế của hệ thống in 3D bằng cáp treo trong Hình 2. Tuy nhiên, điểm khác biệt là các cơ cấu chấp hành di động ở đây

được điều khiển đồng thời thông qua cơ cấu kéo để thích ứng với độ cao mới của cơ cấu chấp hành cuối, đảm bảo các cáp luôn nằm trong cùng một mặt phẳng. Cáp treo còn lại (ký hiệu là cáp số 5) có một đầu nối với cơ cấu chấp hành cuối và đầu kia nối với bộ truyền động cố định, giúp duy trì lực căng và cân bằng tổng thể của hệ thống.

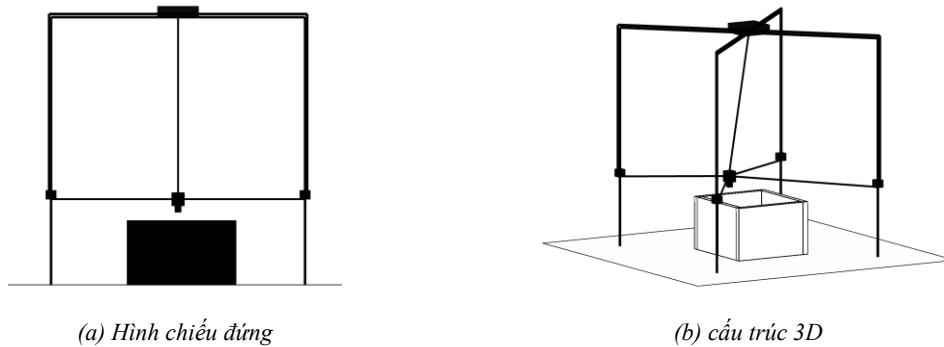
2.2. Động học của CDRP

Giả sử hệ robot có một khung cứng hình lập phương với các cạnh lần lượt là b_x, b_y, b_z ($b_x = b_y = b_z = L$). Các dây coi như là thẳng và không đàn hồi. Chúng ta đặt hệ tọa độ $\{O\}$ tại mặt sàn của hình lập phương này, với gốc tọa độ là tâm hình học của đáy (XOY) như minh họa trong Hình 5. Hệ tọa độ $\{O\}$ được xem là hệ cơ sở và là tham chiếu toàn cục. Vector tọa độ của EE trong hệ tọa độ $\{O\}$ là 0P_E . Bài toán động học ngược đối với 3 bậc tự do đối với cơ cấu 3 bậc tự do này là tìm năm độ dài dây cáp sao cho EE đạt vị thế mong muốn P_E Như thấy trong Hình 5,

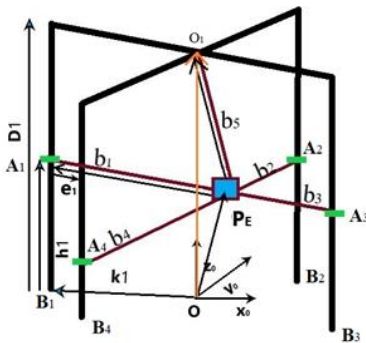
$$\mathbf{b}_i = \mathbf{k}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{P}_E, (i = 1...5) \quad (1)$$

$$q_i^2 = \mathbf{b}_i^T \cdot \mathbf{b}_i = [\mathbf{k}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{P}_E]^T [\mathbf{k}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{P}_E] \quad (2)$$

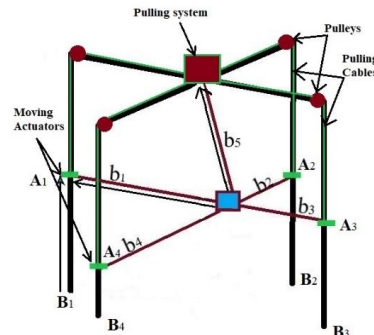
Trong đó, \mathbf{b}_i là vector từ cơ cấu truyền động thứ i tới điểm gắn dây cáp trên cơ cấu chấp hành; \mathbf{k}_i là vector không đổi từ gốc của hệ tọa độ $\{O\}$ tới điểm \mathbf{B}_i trên thanh đứng; \mathbf{h}_i là véc tơ từ điểm \mathbf{B}_i tới điểm



Hình 4. Mô hình cấu trúc của CDRP



Hình 5. Sơ đồ động học của CDRP



Hình 6. Hệ thống cáp của hệ thống CDRP

A_i trên cơ cấu truyền động; q_i là độ dài của dây cáp thứ i ; \mathbf{e}_i là vector đơn vị của \mathbf{b}_i .

$$\mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{b}_i}{q_i} = \frac{\mathbf{k}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{P}_E}{\sqrt{[\mathbf{k}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{P}_E]^T [\mathbf{k}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{P}_E]}}$$

Lấy đạo hàm theo thời gian của (2), sau đó sắp xếp các phương trình thu được dưới dạng ma trận

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{x}}, \quad (3)$$

trong đó $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \dot{q}_4 \dot{q}_5]^T$, \mathbf{x} là véc tơ vị trí, $\mathbf{x} = [x \ y \ z]^T$, và ma trận Jacobin \mathbf{J} :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \dots & \mathbf{e}_5 \\ \mathbf{h}_1 \times \mathbf{e}_1 & \dots & \mathbf{h}_5 \times \mathbf{e}_5 \end{bmatrix}$$

3. Động lực học và thiết kế bộ điều khiển cho CDPDR

3.1. Động lực học của CDPDR

Sử dụng các định luật Newton-Euler, phương trình chuyển động của cơ cấu chấp hành EE có thể coi là chất điểm chuyển động và được biểu diễn dưới dạng sau:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{J}^T \mathbf{T} + \mathbf{P} \quad (4)$$

trong đó \mathbf{M} là ma trận khối lượng của thiết bị đầu cuối EE; \mathbf{J} là ma trận Jacobi; \mathbf{T} là véc tơ sức căng dây; và \mathbf{P} là các yếu tố ngoại lực khác quy đổi (ví dụ như là ma sát,...). Do các dây luôn luôn yêu cầu phải căng trong quá trình điều hướng thiết bị đầu cuối EE, mà hệ lực \mathbf{T} cần thay thế bằng hệ lực tương đương luôn dương \mathbf{u} [12]. Khi đó, phương trình (4) được viết lại như sau:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{P} \quad (5)$$

Vế phải của phương trình (5) phụ thuộc vào \mathbf{x} và vectơ đầu vào \mathbf{u} (\mathbf{u} tương đương với \mathbf{T}). Mô hình động lực học trên chỉ có giá trị khi $\mathbf{u} \geq 0$, tức là các dây cáp đang ở trạng thái căng. Lực căng dương cho thấy rằng dây cáp đang kéo điểm gắn trên cơ cấu chấp hành EE.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển dựa trên Lyapunov

Phần này mô tả bộ điều khiển phản hồi nhằm ổn định tiệm cận hệ thống về giá trị mong muốn $\mathbf{x}^d(t)$ từ điều kiện ban đầu $\mathbf{x}(t)$, đo $\mathbf{u}(t) \geq 0$ với mọi thời điểm $t \geq 0$. Ta định nghĩa sai lệch trạng thái là $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^d(t)$. Hàm Lyapunov áp dụng cho hệ thống (5) được xác định như sau

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}) &= \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T(t) \mathbf{M}(\mathbf{x}) \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) \\ &\quad + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

\mathbf{K}_p là một ma trận hệ số đường chéo dương. Lấy đạo hàm theo thời gian của $V(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}})$ dọc theo quỹ đạo của hệ thống thu được:

$$\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}) = \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T (-\mathbf{J}^T \mathbf{u} + \mathbf{P} + \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}}) \quad (7)$$

Để bảo đảm tính ổn định tiệm cận của hệ thống, cần thỏa mãn các điều kiện sau:

$$\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}) \leq 0 \quad \text{và} \quad \mathbf{u} \geq 0.$$

Lựa chọn:

$$-\mathbf{J}^T \mathbf{u} = -\mathbf{P} - \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}}, \quad (8)$$

trong đó \mathbf{K}_d cũng là một ma trận đường chéo dương. Khi, $\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}) = -\dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \leq 0$, nên điều kiện thứ nhất được thỏa mãn. Về phương diện tính toán, điều kiện thứ hai đầu vào không âm \mathbf{u} thỏa mãn phương trình (5) có thể được giải bằng hàm *lsqnonneg()* của Matlab. Hàm này được thiết kế để giải bài toán bình phương sai tối thiểu có ràng buộc không âm. Cấu trúc toán học của hàm là $\|\mathbf{C}\mathbf{u} - \mathbf{B}\|_2^2$ do đó $\mathbf{u} \geq 0$. Trong trường hợp đó, phương trình được biểu diễn là:

$$\mathbf{C} = [-\mathbf{J}^T], \quad \mathbf{B} = -\mathbf{P} - \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \quad (9)$$

Các hệ số \mathbf{K}_p và \mathbf{K}_d là các hệ số ma trận dương để đảm bảo $\dot{V}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}) \leq 0$. Các hệ số này mà dương lớn thì quá trình hội tụ sẽ nhanh tuy nhiên nó sẽ cần một công suất lớn cần cung cấp cho hệ thống.

3.3. Cải thiện độ cứng cho CDPDR

Cải thiện độ cứng của CDPDR không phải là làm cứng hơn về vật liệu, mà là làm cho hệ robot *ứng xử cứng hơn về mặt động lực học* thông qua cách phân bố và giới hạn lực căng cáp.

Việc cải thiện độ cứng cho các robot song song dẫn động bằng cáp với cấp trúc năm dây, một phương pháp bình phương tối thiểu với ràng buộc không âm (Non-Negative Least squares - NNLS) được đề xuất:

$$-\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{u} = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{T}, \quad \mathbf{T} \geq \mathbf{T}_{min} \quad (10)$$

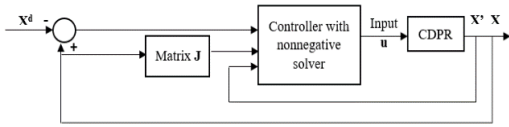
Để giải phương trình 10 đảm bảo hệ lực tối thiểu các lực không âm, hàm *lsqnonneg()* trong MATLAB giải bài toán bình phương tối thiểu có ràng buộc không âm bằng thuật toán active-set (Lawson-Hanson). Đây là phương pháp tối ưu lặp xác định.

4. Kết quả mô phỏng số

Để kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất, một mô phỏng của robot song song dẫn động bằng cáp đã được xây dựng trong môi trường Matlab-Simulink. Hình 7 trình bày sơ đồ khối điều khiển. Khối controller with nonnegative solver bao gồm bộ điều khiển dựa trên Lyapunov như trình bày trong mục 3.2 và một hàm *lsqnonneg()* trong Matlab để chuyển hệ lực sức căng dây \mathbf{T} sang hệ lực tương đương dương \mathbf{u} .

Các thông số của khung robot: $b_x = b_y = b_z = 5m$; với chiều dài ban đầu của các dây $q_4 = q_3 = 1.7m$; $q_2 = q_1 = 2,6m$ và $q_5 = 2,8m$ tung ứng với vị trí ban đầu của

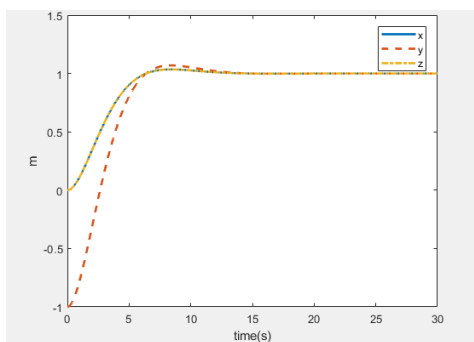
EE tại $\mathbf{x}_0 = [0, -1, 0]^T$ (m), khối lượng của EE=30kg.



Hình 7. Sơ đồ khối điều khiển

Trong thí nghiệm này, các thông số của bộ điều khiển được lựa chọn qua phương pháp thử sai $\mathbf{K}_p = \text{diag}(15, 15, 15)$ và $\mathbf{K}_d = \text{diag}(40, 40, 40)$ và áp dụng trong một kịch bản di chuyển của cơ cấu đầu cuối từ vị trí ban đầu $\mathbf{x}_0 = [0, -1, 0]^T$ đến vị trí mong đợi $\mathbf{x}_f = [1, 1, 1]^T$. Ngoài ra, trong mô phỏng này giả sử các ngoại lực là nhỏ và có thể bỏ qua, $\mathbf{P} = \mathbf{0}$. Kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng theo thời gian của ba trục x, y, z thể hiện trong các Hình 8 đến 10.

Trong Hình 8, Các tín hiệu đầu ra đều tăng từ giá trị ban đầu $\mathbf{x}_0 = [0, -1, 0]^T$ lên đến giá trị đặt $\mathbf{x}_f = [1, 1, 1]^T$ trong khoảng 8-10 giây, với độ quá điều chỉnh nhỏ (dưới 10%). Đặc biệt, chuyển động dọc trục y có dao động nhẹ hơn so với hai trục còn lại, nhưng nhanh chóng suy giảm và hội tụ về giá trị ổn định, chứng tỏ tính hiệu quả của bộ điều khiển trong việc cân bằng và triệt tiêu sai lệch giữa các hướng chuyển động. Cũng trong kết quả Hình 8 khi cùng thông số bộ điều khiển K_p và K_d theo mỗi trục tọa độ thì khoảng cách di chuyển thời gian đáp ứng sẽ nhanh hơn. Nguyên nhân là do sai số ban đầu nhỏ hơn dẫn đến lực điều khiển sinh ra thấp hơn, hệ thống duy trì trong vùng tuyến tính với phân bố lực căng cáp ổn định, từ đó hạn chế các hiệu ứng phi tuyến như mất lực căng và liên kết chéo động lực học.

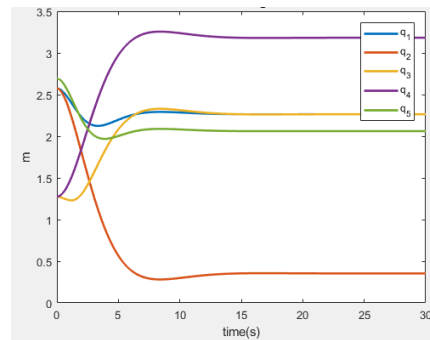


Hình 8. Vị trí của EE

Khi đạt đến trạng thái ổn định, sai số xác lập của hệ thống gần như bằng không, và các biến điều khiển duy trì ổn định quanh giá trị mong muốn. Điều này chứng minh rằng thuật toán điều khiển được đề xuất có khả năng đảm bảo ổn định Lyapunov, đồng thời duy trì căng dây và vị trí chính xác của đầu in trong suốt quá trình

vận hành. Như vậy, mô hình điều khiển được phát triển hoàn toàn đáp ứng yêu cầu về độ chính xác, tính ổn định và hiệu suất động học, làm cơ sở cho các bước nghiên cứu và triển khai thực nghiệm tiếp theo.

Hình 9 minh họa các đáp ứng trạng thái và sự thay đổi chiều dài của các dây cáp trong quá trình chuyển động tương ứng. Đồ thị biểu diễn sự biến thiên chiều dài của năm dây cáp (q_1-q_5) trong hệ thống robot cáp song song dùng cho cơ cấu in bồi đắp quy mô lớn. Trong giai đoạn đầu (0-5 giây), các dây thay đổi nhanh chóng về chiều dài để điều chỉnh vị trí của nền tảng di động theo quỹ đạo mong muốn. Có thể thấy một số dây như q_2 giảm mạnh trong khi q_4 và q_5 tăng lên đáng kể, thể hiện quá trình phân bố lại lực căng giữa các dây khi hệ thống chuyển động. Sau khoảng thời gian này, các đường cong dần ổn định, cho thấy hệ thống đã đạt trạng thái cân bằng về lực căng và vị trí.

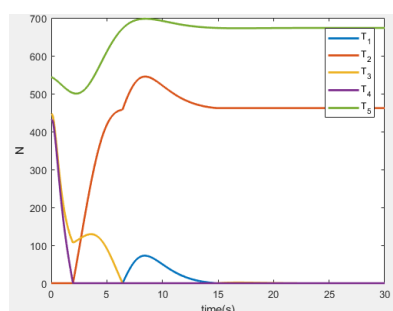


Hình 9. Chiều dài của dây cáp

Khi thời gian vượt quá 10 giây, tất cả các dây đều hội tụ về giá trị ổn định riêng, không còn dao động đáng kể. Điều này chứng tỏ thuật toán điều khiển đã điều phối hiệu quả sự thay đổi chiều dài giữa các dây, đảm bảo lực căng được duy trì dương và ổn định, tránh tình trạng dây chùng hoặc quá căng. Kết quả này đồng thời xác nhận rằng hệ thống cáp hoạt động ổn định về mặt động lực học, hỗ trợ chính xác cho chuyển động của nền tảng đầu đùn trong mô hình in phun đắp quy mô lớn.

Hình 10 thể hiện sự biến thiên của lực căng trong năm dây cáp (T_1-T_5) theo thời gian trong quá trình di chuyển của cơ cấu. Kết quả cho thấy toàn bộ các dây đều duy trì lực căng dương, nghĩa là không có dây nào bị trùng, đảm bảo hệ thống luôn trong trạng thái điều khiển ổn định. Ở giai đoạn đầu, các đường cong xuất hiện dao động mạnh do quá trình chuyển tiếp khi cơ cấu bắt đầu di chuyển, sau đó lực căng dần ổn định khi thiết bị đầu cuối (EE) đạt vị trí cân bằng mong muốn.

Trong năm dây, dây T_2 và T_3 có lực căng lớn nhất, đóng vai trò chủ đạo trong việc kéo và định hướng chuyển động của EE. Ngược lại, các dây T_1, T_3 và T_4



Hình 10. Lực căng của các dây cáp

duy trì lực căng nhỏ hơn nhưng vẫn luôn dương, giúp cân bằng và giữ ổn định hệ thống, tránh tình trạng dây bị chùng. Như vậy, kết quả mô phỏng trong Hình 9 chứng minh rằng chiến lược điều khiển và phân bố lực căng giữa các dây là hợp lý, đảm bảo cả yêu cầu về động học lẫn động lực học của cơ cấu truyền động bằng cáp ngoài ra đảm bảo ổn định hệ thống khi có rung lắc trong quá trình in.

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo này đã đề cập đến một số vấn đề quan trọng liên quan đến động học, tĩnh học, và động lực học của robot điều khiển bằng cáp. Các giải pháp cho bài toán phân bố lực căng tối ưu của CDPR được đề xuất và trình bày. Mô hình động lực học của robot song song dẫn động bằng cáp đã được xây dựng. Với bộ điều khiển phản hồi được đề xuất, hệ thống đạt được trạng thái ổn định, và quỹ đạo lực căng của các cáp luôn dương trong suốt quá trình chuyển động. Rõ ràng, đặc tính làm việc của hệ thống cáp là khả năng làm việc với không gian lớn khi so với các robot song song dẫn động cứng. Thông qua mô phỏng tính toán, tính hiệu quả của bộ điều khiển đã được chứng minh.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.21**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Eric Barnett (2015), *Clement Gosselin, Large-Scale 3D Printing with a Cable-Suspended Robot, Additive Manufacturing*, Vol.7, pp.27-44.
 [2] J. B. Izard et al. (2017), *On the Improvements of a Cable-Driven Parallel Robot for Achieving Additive Manufacturing for Construction*, in *Proceedings of the Third International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*, Quebec, Canada, pp.353-363.
 [3] Yunpeng He, Fengzhen Yang, Xiaowen Zheng, Jianli Wang, Xiaoxue Huang, Xiaogang Kang

(2025), *Mechanism Design and Kinematic Analysis of a Cable-Driven Parallel Robot for Grinding Applications*, 4th International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC).

[4] Xiaoqiang Tang (2014), *An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator*, *Advances in Mechanical Engineering*.

Doi:10.1155/2014/823028.

[5] B. Zi, S. Qian (2017), *Design, analysis and control of cable-suspended parallel robots and its applications*, Singapore: Springer Singapore.

[6] PDion-Gauvin, C Gosselin (2017), *Trajectory planning for the static to dynamic transition of point-mass cable - suspended parallel mechanisms*, *Mechanism and Machine Theory*, Vol.113, pp.158-178.

[7] Ilija Vukorep (2017), *Autonomous Big-Scale Additive Manufacturing Using Cable-Driven Robots*, 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan, pp.254-259.

[8] J. S. Albus, R. V Bostelman, and N. G. Dagalakis (1993), *The NIST robocrane*, *Journal of Robotic Systems*, Vol.10, No.5, pp.709-724.

[9] Jean-Baptiste Izard, Alexandre Dubor, Pierre-Elie Hervé, Edouard Cabay, David Cull, Mariola Rodriguez, Mikel Barrado (2017), *Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots*, *Construction Robotics*, Vol.1, Issue 1-4, pp.69-76.

[10] Bosscher P, Williams R, Bryson L, Castro-Lacouture D (2007), *Cable suspended robotic contour crafting system*, *Automation in Construction*, Vol.17, No.1, pp.45-55.

[11] B. Khoshnevis (2004), *Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies*, *Automation in Construction*, Vol.13, No.1, pp.5-19.

[12] A. Sharifi, M. Vakili (2024), *Graph-Based Simultaneous Localization and Calibration for Planar Cable-Driven Parallel Robots*, *IEEE International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*.

Ngày nhận bài:	11/11/2025
Ngày nhận bản sửa:	20/01/2026
Ngày duyệt đăng:	03/02/2026