

Điều khiển lực căng hội tụ thời gian cố định cho hệ thống xử lý vật liệu đa trục

Fixed-time tension control for multi-roller material handling systems

Nguyễn Như Bách^{1,2}, Nguyễn Tiến Dũng¹, Nguyễn Danh Huy^{1,*} and Nguyễn Tùng Lâm¹

¹Hanoi University of Science and Technology

²Hanoi University of Civil Engineering

*Corresponding author E-mail: huy.nguyendanh@hust.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i4.355>

Abstract

The main function of a multi-roller material handling (MaMH) system is to precisely control the tension and transport speed of web segments to ensure operational productivity and product quality. This paper proposes a fixed-time backstepping control method for the MaMH system. The proposed control method guarantees that the tracking errors of both tension and reference speed in the web segments converge to zero within a fixed time, regardless of the system's initial states. The stability of the control method is proven based on Lyapunov stability theory. Simulation results carried out in Matlab demonstrate that the proposed control method maintains robustness and fast convergence, even when the reference value changes abruptly, thereby confirming the superior performance of the proposed method.

Keywords: Multi-roller material handling; Fixed-time convergence control; Nonlinear systems; Tension control; Lyapunov-based analysis

Danh mục ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
R_u, R_r	m	Bán kính cuộn tổ và cuộn thu
J_u, J_r	kg·m ²	Mô-men quán tính của cuộn tổ và cuộn thu
b_{fu}, b_{fr}	N·m·s	Hệ số cản nhớt của cuộn tổ và cuộn thu
R_i	m	Bán kính cuộn trung gian thứ i
J_i	kg·m ²	Mô-men quán tính của cuộn trung gian thứ i
b_{fi}	N·m·s	Hệ số cản nhớt của cuộn trung gian thứ i
M_u, M_i, M_r	N·m	Mô-men truyền động của cuộn tổ, trung gian, thu
$\omega_u, \omega_i, \omega_r$	rad/s	Tốc độ góc của cuộn tổ, trung gian, thu
F_i	N	Lực căng trên đoạn vật liệu thứ i
L_i	m	Chiều dài đoạn vật liệu thứ i
E	N/m ²	Mô-đun đàn hồi của vật liệu
S	m ²	Diện tích mặt cắt ngang của vật liệu
w	m	Chiều rộng của vật liệu
a	m	Độ dày của vật liệu
ρ	kg/m ³	Khối lượng riêng của vật liệu

1. Giới thiệu

Hệ thống xử lý vật liệu đa trục (MaMH) được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất công nghiệp điện đại đặc biệt như các

lĩnh vực sản xuất pin mặt trời màng mỏng [1], phủ nano, pin lithium [2] hệ thống sản xuất bảng mạch điện tử [3], [4]. Các hệ thống này vận chuyển vật liệu liên tục từ cuộn tổ thông qua các cuộn trung gian và được xử lý trước khi đi vào cuộn thu. Trong quá trình xử lý các vật liệu như màng mỏng của tấm pin năng lượng mặt trời, giấy, kim loại mỏng, việc kiểm soát lực căng trên các đoạn vật liệu là vô cùng quan trọng. Lực căng vượt quá mức cho phép có thể làm đứt và hư hỏng vật liệu, trong khi lực căng không đủ có thể gây ra hiện tượng nổi, nhăn làm giảm chất lượng sản phẩm [5], [6]. Ngoài ra, tốc độ dịch chuyển của băng vật liệu cũng cần được kiểm soát để hệ thống vận hành đúng với mục tiêu sản xuất [6], [7].

Trước đây, một số phương pháp kiểm soát lực căng giữa các đoạn vật liệu và tốc độ của cuộn đã được giới thiệu như phương pháp điều khiển tuyến tính sử dụng bộ điều khiển LQR [7], [8], bộ điều khiển phản hồi trạng thái [9]. Các phương pháp này có ưu điểm là đơn giản và dễ triển khai trong thực tế. Tuy nhiên hạn chế của các phương pháp này là thiếu tính linh hoạt khi điều kiện vận hành phức tạp. Từ đó, các phương pháp điều khiển phi tuyến được áp dụng nhằm mục đích nâng cao khả năng điều khiển cho hệ thống. Trong số các kỹ thuật điều khiển phi tuyến đã được đề xuất, kỹ thuật điều khiển backstepping [10]–[12] đã chứng minh sự phù hợp với hệ thống MaMH, bởi hệ thống này là một mô hình thiếu cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển backstepping được áp dụng nhằm khắc phục hạn chế về cơ cấu chấp hành của hệ thống MaMH bằng cách chuyển đổi mô hình hệ thống thành các bậc động lực học liên tiếp, rồi thiết kế bộ điều khiển cho từng bậc một cách tuần tự. Sau đó, các biến thể của bộ điều khiển backstepping đã được phát triển để

đem lại hiệu suất kiểm soát vật liệu tốt hơn. Trong [6], các tác giả đề xuất cấu trúc điều khiển backstepping sử dụng các mặt trượt bậc phân số kết hợp mạng nơ-ron để ước lượng động lực học của MaMH, qua đó đạt được hiệu suất kiểm soát vượt trội.

Một điểm chung của các phương pháp điều khiển MaMH nêu trên là tập trung vào hiệu suất kiểm soát vật liệu, có thể được đánh giá thông qua sai số bám lực căng và tốc độ dịch chuyển của vật liệu trên các phân đoạn. Tuy nhiên, một yếu tố quan trọng khác cần xem xét khi thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống MaMH là thời gian hội tụ của các trạng thái, đặc biệt trong các hệ thống sản xuất tự động. Các kỹ thuật điều khiển có tính đến thời gian hội tụ cho các hệ thống phi tuyến đã được phát triển mạnh trong những năm gần đây; ví dụ, [13] giới thiệu bộ điều khiển backstepping thời gian hữu hạn cho một lớp hệ thống phi tuyến, đảm bảo rằng các trạng thái trong hệ thống vòng kín hội tụ về gốc trong thời gian hữu hạn, thay vì vô hạn như trong bộ điều khiển backstepping truyền thống. Theo hiểu biết của nhóm tác giả, kỹ thuật điều khiển thời gian hữu hạn được áp dụng cho hệ thống MaMH lần đầu trong [14], trong đó các tác giả đề xuất bộ điều khiển thời gian hữu hạn theo khung điều khiển backstepping, đảm bảo sai số bám lực căng và tốc độ dịch chuyển của vật liệu hội tụ về gốc trong thời gian hữu hạn. Thời gian hội tụ này phụ thuộc vào giá trị khởi đầu của các trạng thái và bộ tham số điều khiển hệ thống; cần lưu ý rằng, với cùng một bộ tham số điều khiển, các trạng thái sẽ hội tụ lâu hơn nếu sai số bám ban đầu lớn hơn.

Từ những phân tích tổng quan nêu trên, bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển backstepping hội tụ thời gian cố định cho hệ thống MaMH. Phương pháp đề xuất bao gồm hai bước thiết kế điều khiển như sau: Ở bước điều khiển thứ nhất, bộ điều khiển lực căng của vật liệu trên các phân đoạn được thiết kế, với đầu vào là sai số bám lực căng trên các phân đoạn và đầu ra tương ứng là vận tốc góc tham chiếu của cuộn tổ và các cuộn trung gian. Dựa trên đầu ra của bộ điều khiển lực căng, bộ điều khiển vận tốc được thiết kế trong bước điều khiển thứ hai. Từ đó, mô-men truyền động trên các cuộn của hệ thống MaMH được xác định để đáp ứng chính xác lực căng tham chiếu trên các phân đoạn và vận tốc tham chiếu của các cuộn.

Đóng góp chính của bài báo như sau:

1. Khác với các phương pháp điều khiển đã được giới thiệu trước đó chỉ đảm bảo hệ thống hội tụ tiệm cận gốc [10], [11], phương pháp điều khiển đề xuất đảm bảo sai số bám lực căng và tốc độ dịch chuyển của băng vật liệu hội tụ về 0 trong thời gian cố định.
2. Khác với các tài liệu [13], [14] chỉ đảm bảo thời gian hội tụ của hệ thống là hữu hạn phụ thuộc vào trạng thái ban đầu, phương pháp điều khiển đề xuất đảm bảo hệ thống hội tụ trong thời gian cố định bất kể trạng thái ban đầu của hệ thống MaMH, có thể thay đổi bằng cách điều chỉnh tham số điều khiển.

Các phần còn lại của bài báo bao gồm: Phần 2 trình bày mô hình động lực học của hệ thống MaMH và xác định mục tiêu điều khiển của bài báo, Phần 3 trình bày phương pháp điều khiển đề xuất, các kết quả mô phỏng và thảo luận được trình bày trong Phần 4. Cuối cùng, Phần 5 kết luận bài báo.

Trong bài báo này, một số bổ đề được sử dụng để thiết kế phương pháp điều khiển đề xuất, được trình bày như sau:

Bổ đề 1. Theo [15], với hệ thống phi tuyến có dạng: $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{y}(t))$, $\mathbf{f}(0) = 0$, $\mathbf{y}(0) = 0$ trong đó $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ là trạng thái của hệ thống, $\mathbf{f}(\mathbf{y})$ là một hàm phi tuyến liên tục. Nếu tồn tại hàm

lyapunov thỏa mãn bất đẳng thức sau:

$$\dot{V}(\mathbf{y}) \leq -\left(\mu V^\alpha(\mathbf{y}) + \varepsilon V^\beta(\mathbf{y})\right)^\gamma \quad (1)$$

trong đó $\mu, \varepsilon, \alpha, \beta > 0$, $\alpha\gamma < 1$ and $\beta\gamma > 1$, khi đó hệ thống sẽ hội tụ về gốc trong thời gian cố định, được mô tả như sau:

$$T \leq \frac{1}{\mu^\gamma(1-\alpha\gamma)} + \frac{1}{\varepsilon^\gamma(\beta\gamma-1)} \quad (2)$$

Bổ đề 2. Theo [16] với $y_1, y_2, \dots, y_k \geq 0$, ta có:

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^k y_i\right)^n \leq \sum_{i=1}^k y_i^n, & 0 < n \leq 1 \\ k^{1-n} \left(\sum_{i=1}^k y_i\right)^n \leq \sum_{i=1}^k y_i^n, & n > 1 \end{cases} \quad (3)$$

2. Mô hình hóa và mục tiêu điều khiển hệ thống MaMH

Trong phần này, chúng tôi tiến hành phân tích động lực học của hệ thống MaMH, làm rõ các vấn đề trọng yếu cần lưu ý trong quá trình thiết kế hệ thống điều khiển. Từ đó, mục tiêu điều khiển của bài báo được xác định.

2.1 Mô hình hóa hệ thống MaMH

Để xử lý và vận chuyển vật liệu, hệ thống MaMH được thiết kế gồm nhiều các cuộn, vận hành với với chức năng tương ứng được gọi là cuộn tổ, các cuộn trung gian và cuộn thu. Vật liệu ban đầu được cuốn tại cuộn tổ. Khi hệ thống vận hành, vật liệu được dẫn động thông qua các cuộn trung gian đóng vai trò điều hướng, truyền động và kiểm soát lực căng trước khi được thu lại tại cuộn thu. Quá trình xử lý được diễn ra liên tục, trong đó việc kiểm soát lực căng và tốc độ dịch chuyển của vật liệu là rất quan trọng, đóng vai trò quyết định chất lượng của vật liệu. Với đặc điểm là một hệ thống phi tuyến nhiều thành phần biến thiên theo thời gian bao gồm nhiệt độ của vật liệu [17], lực căng trên các đoạn vật liệu [6], mô-men quán tính của cuộn tổ và cuộn thu [18].

Gần đây, một mô hình của hệ thống MaMH có xem xét đầy đủ các yếu tố trên được giới thiệu trong [6], động lực học của các cuộn trung gian, cuộn tổ và cuộn thu được xây dựng dựa trên định luật bảo toàn mô-men động lượng. Đối với các phân đoạn vật liệu, bởi đặc tính tuyến tính trong vùng biến dạng đàn hồi, các tác giả áp dụng định luật Hooke cho biến dạng vật liệu và bỏ qua ma sát giữa các cuộn với đoạn vật liệu tương ứng. Từ đó, động lực học của hệ thống MaMH gồm n phân đoạn làm việc được xác định như sau:

$$\begin{aligned} J_u \dot{\omega}_u &= R_u F_1 + M_u + b_{fu} \omega_u + b_w \rho_w R_u^3 \omega_u^2 \\ J_1 \dot{\omega}_1 &= (F_2 - F_1) R_1 + M_1 + b_{f1} \omega_1 \\ L_1 \dot{F}_1 &= ES(\omega_1 R_1 - \omega_u R_u) + \omega_u R_u F_u - \omega_1 R_1 F_1 \\ &\vdots \\ J_i \dot{\omega}_i &= (F_{i+1} - F_i) R_i + M_i - b_{fi} \omega_i \\ L_i \dot{F}_i &= ES(\omega_i R_i - \omega_{i-1} R_{i-1}) + \omega_{i-1} R_{i-1} F_{i-1} - \omega_i R_i F_i \\ &\vdots \\ J_{n-1} \dot{\omega}_{n-1} &= (F_n - F_{n-1}) R_{n-1} + M_{n-1} - b_{f_{n-1}} \omega_{n-1} \\ J_r \dot{\omega}_r &= M_r - F_n R_r - b_{fr} \omega_r + b_w \rho_w R_r^3 \omega_r^2 \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó R_u, J_u, b_{fu} lần lượt là bán kính, mô-men quán tính và hệ số cản nhớt của cuộn tổ, M_u và ω_u là mô-men động cơ truyền động và tốc độ góc của cuộn tổ, b_w, ρ, w, L_i lần lượt là độ dày, mật độ khối lượng, chiều rộng, và chiều dài của phân đoạn vật liệu được xử lý. F_i là lực căng của vật liệu trên phân đoạn thứ i , R_i, J_i và b_{fi} lần lượt là bán kính, mô-men quán tính và hệ số cản nhớt của cuộn trung gian thứ i , M_i và ω_i là mô-men động cơ truyền động và tốc độ góc của cuộn trung gian thứ i . R_r, J_r và b_{fr} lần lượt là bán kính, mô-men quán tính và hệ số cản nhớt của cuộn thu, M_r và ω_r là mô-men động cơ truyền động và tốc độ góc của cuộn thu. E là module đàn hồi, S diện tích mặt cắt ngang vật liệu trên các phân đoạn.

2.2 Mục tiêu điều khiển

Từ những phân tích trên, các trạng thái cần điều khiển để bám theo giá trị tham chiếu bao gồm lực căng của vật liệu trên các phân đoạn ($F_1, F_2, \dots, F_n$) và tốc độ dịch chuyển của băng vật liệu. Hệ thống (4) là hệ thống hạt cơ cấu chấp hành khi có $2n+1$ trạng thái ($\omega_u, \omega_1, \dots, \omega_r, F_1, F_2, \dots, F_n$) với $n+1$ đầu vào điều khiển ($M_u, M_1, \dots, M_r$). Do đó, chúng tôi sử dụng kỹ thuật điều khiển backstepping để thiết kế điều khiển cho hệ thống MaMH, trong đó lực căng của vật liệu trên các phân đoạn được điều khiển gián tiếp thông qua tốc độ góc của cuộn tổ (ω_u) và các cuộn trung gian ($\omega_u, \omega_1, \dots, \omega_{n-1}$) trong bước 1, tốc độ dịch chuyển của băng vật liệu được điều khiển thông qua tốc độ góc cuộn thu. Sau đó, mô-men truyền động trên các cuộn được thiết kế thông qua tốc độ góc của cuộn tổ, các cuộn trung gian và cuộn thu trong bước 2.

Đặt $\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_n]^\top$, $\bar{\boldsymbol{\omega}} = [\omega_u, \omega_1, \dots, \omega_{n-1}]^\top$, $\boldsymbol{\omega} = [\omega_u, \omega_1, \dots, \omega_r]^\top$ và $\mathbf{M} = [M_u, M_1, \dots, M_r]^\top$, (4) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{F}} &= \mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 \bar{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} &= \mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{M} \end{aligned} \quad (5)$$

trong đó

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} \omega_1 R_1 (ES - F_1) / L_1 \\ \omega_2 R_2 (ES - F_2) / L_2 \\ \vdots \\ \omega_r R_r (ES - F_n) / L_n \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \text{diag} \begin{pmatrix} (F_u - ES) R_u / L_1 \\ (F_1 - ES) R_1 / L_2 \\ \vdots \\ (F_{n-1} - ES) R_{n-1} / L_n \end{pmatrix}, \\ \mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} (R_u F_1 + b_{fu} \omega_u + b_w \rho w R_u^3 \omega_u^2) / J_u \\ ((F_2 - F_1) R_1 + b_{f1} \omega_1) / J_1 \\ \vdots \\ (-F_n R_r - \omega_r b_{fr} + b_w \rho w R_r^3 \omega_r^2) / J_r \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \text{diag} \begin{pmatrix} 1/J_u \\ 1/J_1 \\ \vdots \\ 1/J_r \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

3. Phương pháp điều khiển đề xuất

Trong phần này, phương pháp điều khiển đề xuất được thiết kế theo (5). Trước tiên, bộ điều khiển lực căng được thiết kế trong bước 1 để đưa ra tốc độ góc tham chiếu cho các cuộn. Sau đó, mô-men truyền động tương ứng được thiết kế trong Bước 2 để đáp ứng tốc độ góc tham chiếu do bước 1 cung cấp. Cấu trúc điều khiển của phương pháp đề xuất được mô tả trong Hình 1.

3.1 Bộ điều khiển backstepping thời gian cố định

Tiếp theo, chúng tôi thiết kế bộ điều khiển lực căng và bộ điều khiển vận tốc góc tương ứng với hai bước thiết kế điều khiển như sau:

Bước 1. Bộ điều khiển lực căng

Với giá trị tham chiếu của lực căng trên các phân đoạn là $\mathbf{F}_d = [F_{1d}, F_{2d}, \dots, F_{nd}]^\top$, sai số bám lực căng được định nghĩa là $\mathbf{e}_F = \mathbf{F} - \mathbf{F}_d$. Kết hợp với (5), đạo hàm theo thời gian của $\mathbf{e}_F$ như sau:

$$\dot{\mathbf{e}}_F = \mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 \bar{\boldsymbol{\omega}} - \dot{\mathbf{F}}_d \quad (6)$$

Theo luật điều khiển hội tụ thời gian cố định, $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ cần được thiết kế để thỏa mãn điều kiện sau:

$$\dot{\mathbf{e}}_F = -\mathbf{k}_{11} \|\mathbf{e}_F\|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_F) - \mathbf{k}_{12} \|\mathbf{e}_F\|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_F) \quad (7)$$

trong đó $\mathbf{k}_{11}, \mathbf{k}_{12} \in \mathbb{R}_{>0}^{n \times n}$, $0 < \alpha < 1$ và $\beta > 1$. $\|\mathbf{e}_F\|$ và $\text{sign}(\mathbf{e}_F)$ lần lượt là chuẩn Euclid và hàm dấu của $\mathbf{e}_F$. Kết hợp (6) và (7), vận tốc góc tham chiếu của các cuộn cho bước 2 được xác định như sau:

$$\bar{\boldsymbol{\omega}}_d = -\mathbf{B}_1^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 + \mathbf{k}_{11} \|\mathbf{e}_F\|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_F) \\ + \mathbf{k}_{12} \|\mathbf{e}_F\|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_F) - \dot{\mathbf{F}}_d \end{pmatrix} \quad (8)$$

Từ đó, vận tốc góc tham chiếu của các cuộn được xác định là $\boldsymbol{\omega}_d = [\bar{\boldsymbol{\omega}}_d^\top, \omega_{rd}^\top]^\top$ với ω_{rd} là vận tốc góc tham chiếu của cuộn thu.

Bước 2. Bộ điều khiển vận tốc góc

Sai số bám vận tốc góc được định nghĩa là $\mathbf{e}_\omega = \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_d$. Kết hợp với (5), đạo hàm theo thời gian của $\mathbf{e}_\omega$ như sau:

$$\dot{\mathbf{e}}_\omega = \mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{M} - \dot{\boldsymbol{\omega}}_d \quad (9)$$

Theo luật điều khiển hội tụ thời gian cố định, $\mathbf{M}$ cần được thiết kế để thỏa mãn điều kiện sau:

$$\dot{\mathbf{e}}_\omega = -\mathbf{k}_{21} \|\mathbf{e}_\omega\|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_\omega) - \mathbf{k}_{22} \|\mathbf{e}_\omega\|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_\omega) \quad (10)$$

trong đó $\mathbf{k}_{21}, \mathbf{k}_{22} \in \mathbb{R}_{>0}^{(n+1) \times (n+1)}$, $\|\mathbf{e}_\omega\|$ và $\text{sign}(\mathbf{e}_\omega)$ lần lượt là chuẩn Euclid và hàm dấu của $\mathbf{e}_\omega$. Kết hợp (9) và (10), mô-men truyền động trên các cuộn xác định như sau:

$$\mathbf{M} = -\mathbf{B}_2^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{k}_{21} \|\mathbf{e}_\omega\|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_\omega) + \mathbf{k}_{22} \|\mathbf{e}_\omega\|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_\omega) \\ + \mathbf{A}_2 - \dot{\boldsymbol{\omega}}_d + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & 0_{n \times 1} \\ 0_{1 \times n} & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{e}_F^\top, 0]^\top \end{pmatrix} \quad (11)$$

trong đó $\begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & 0_{n \times 1} \\ 0_{1 \times n} & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{e}_F^\top, 0]^\top$ là thành phần bổ sung để triệt tiêu sai số bám vận tốc góc ($\bar{\boldsymbol{\omega}}_d$) khi bộ điều khiển ở bước 2 chưa hoàn thành đáp ứng do bước 1 cung cấp.

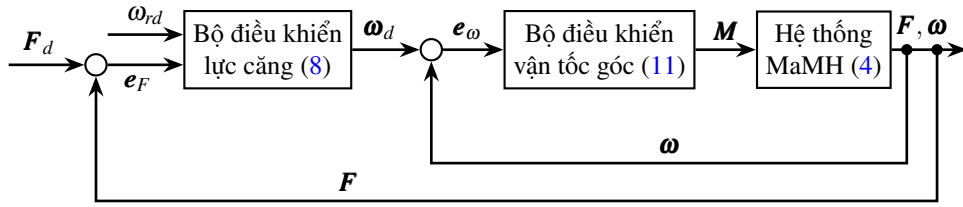
3.2 Phân tích ổn định

Tính ổn định và hội tụ trong thời gian cố định của phương pháp điều khiển đề xuất được phát biểu trong Định lý sau đây:

Định lý 1. Với động lực học của hệ thống MaMH trong (4), nếu mô-men truyền động trên các cuộn được thiết kế như (11), dựa trên các vận tốc góc tham chiếu được thiết kế trong (8), sai số bám lực căng và tốc độ dịch chuyển của các đoạn vật liệu sẽ hội tụ về 0 trong thời gian cố định T , được mô tả như sau:

$$T \leq \frac{2^{\frac{1-\alpha}{2}}}{\min\{\lambda_{\max}(\mathbf{k}_{11}), \lambda_{\max}(\mathbf{k}_{21})\}(1-\alpha)} + \frac{1}{\min\{\lambda_{\max}(\mathbf{k}_{12}), \lambda_{\max}(\mathbf{k}_{22})\}(\beta-1)} \quad (12)$$

trong đó $\lambda_{\max}(\mathbf{k}_{11}), \lambda_{\max}(\mathbf{k}_{12}), \lambda_{\max}(\mathbf{k}_{21}), \lambda_{\max}(\mathbf{k}_{22})$ là giá trị riêng lớn nhất của $\mathbf{k}_{11}, \mathbf{k}_{12}, \mathbf{k}_{21}, \mathbf{k}_{22}$ tương ứng.



Hình 1: Cấu trúc phương pháp điều khiển đề xuất

Chứng minh. Lý thuyết ổn định Lyapunov được sử dụng để chứng minh Định lý 1, trong đó hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}_F^\top \mathbf{e}_F + \frac{1}{2} \mathbf{e}_\omega^\top \mathbf{e}_\omega \quad (13)$$

Theo (5), đạo hàm theo thời gian của V được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{e}_F^\top \dot{\mathbf{e}}_F + \mathbf{e}_\omega^\top \dot{\mathbf{e}}_\omega \\ &= \mathbf{e}_F^\top (\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 \bar{\omega} - \dot{\mathbf{F}}_d) + \mathbf{e}_\omega^\top (\mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{M} - \dot{\omega}_d) \\ &= \mathbf{e}_F^\top (\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 \bar{\omega}_d - \dot{\mathbf{F}}_d) + \mathbf{e}_F^\top \mathbf{B}_1 (\bar{\omega} - \bar{\omega}_d) \\ &\quad + \mathbf{e}_\omega^\top (\mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{M} - \dot{\omega}_d) \\ &= \mathbf{e}_F^\top (\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 \bar{\omega}_d - \dot{\mathbf{F}}_d) + \mathbf{e}_\omega^\top (\mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{M} - \dot{\omega}_d) \\ &\quad + \left[\mathbf{e}_F^\top, 0 \right] \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & 0 \\ 0_{1 \times n} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{e}_\omega \\ &= \mathbf{e}_F^\top (\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 \bar{\omega}_d - \dot{\mathbf{F}}_d) \\ &\quad + \mathbf{e}_\omega^\top \left(\mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{M} - \dot{\omega}_d + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & 0 \\ 0_{1 \times n} & 0 \end{bmatrix} \left[\mathbf{e}_F^\top, 0 \right]^\top \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Kết hợp với (8) và (11), biểu thức (14) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{e}_F^\top \mathbf{k}_{11} \|\mathbf{e}_F\|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_F) - \mathbf{e}_F^\top \mathbf{k}_{12} \|\mathbf{e}_F\|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_F) \\ &\quad - \mathbf{e}_\omega^\top \mathbf{k}_{21} \|\mathbf{e}_\omega\|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_\omega) - \mathbf{e}_\omega^\top \mathbf{k}_{22} \|\mathbf{e}_\omega\|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_\omega) \\ &\leq -\lambda_{\min}(\mathbf{k}_{11}) \|\mathbf{e}_F\|^{\alpha+1} - \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{12}) \|\mathbf{e}_F\|^{\beta+1} \\ &\quad - \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{21}) \|\mathbf{e}_\omega\|^{\alpha+1} - \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{22}) \|\mathbf{e}_\omega\|^{\beta+1} \\ &\leq -\min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{11}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{21}) \} \left(\|\mathbf{e}_F\|^{\alpha+1} + \|\mathbf{e}_\omega\|^{\alpha+1} \right) \\ &\quad - \min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{12}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{22}) \} \left(\|\mathbf{e}_F\|^{\beta+1} + \|\mathbf{e}_\omega\|^{\beta+1} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

trong đó $\lambda_{\min}(\mathbf{k}_{11}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{12}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{21}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{22})$ là giá trị riêng nhỏ nhất của $\mathbf{k}_{11}, \mathbf{k}_{12}, \mathbf{k}_{21}, \mathbf{k}_{22}$ tương ứng.

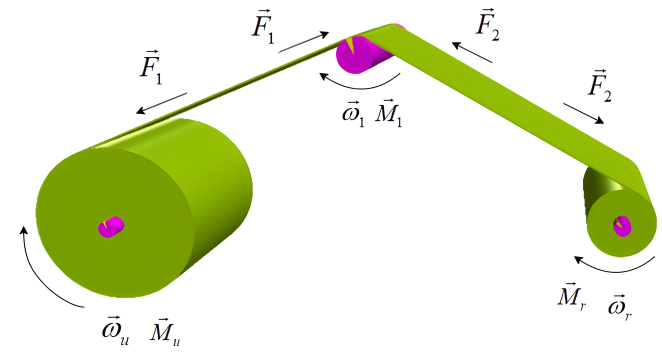
Áp dụng Bổ đề 2, biểu thức (15) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -2^{\frac{\alpha+1}{2}} \min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{11}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{21}) \} V^{\frac{\alpha+1}{2}} \\ &\quad - 2 \min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{12}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{22}) \} V^{\frac{\beta+1}{2}} \end{aligned} \quad (16)$$

Theo Bổ đề 1, giá trị hàm Lyapunov V sẽ hội tụ về 0 trong thời gian cố định T như sau:

$$\begin{aligned} T &\leq \frac{2^{\frac{1-\alpha}{2}}}{\min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{11}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{21}) \} (1-\alpha)} \\ &\quad + \frac{1}{\min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{12}), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_{22}) \} (\beta-1)} \end{aligned} \quad (17)$$

Khi V hội tụ đến $V \equiv 0$, biểu thức (13) chỉ ra rằng sai số bám lực căng và tốc độ dịch chuyển của vật liệu trên các phân đoạn $\mathbf{e}_F = \mathbf{e}_\omega = 0$. Từ đó, Định lý 1 được chứng minh hoàn thành. $\square$



Hình 2: Hệ thống cuộn vật liệu đa trục

Nhận xét 1. Biểu thức (17) cho thấy thời gian hội tụ về gốc của các trạng thái trong hệ thống vòng kín phụ thuộc vào các tham số điều khiển; bằng cách điều chỉnh các tham số này, thời gian hội tụ có thể được rút ngắn. Tuy nhiên, các tham số cũng cần được lựa chọn hợp lý để đảm bảo chất lượng tín hiệu điều khiển. Ảnh hưởng của các tham số điều khiển đến tốc độ hội tụ của các trạng thái và đến chất lượng tín hiệu điều khiển được nhận xét chi tiết như sau:

Theo (17), thời gian hội tụ của các trạng thái sẽ ngắn hơn nếu các phân tử đường chéo của các tham số $\mathbf{k}_{11}, \mathbf{k}_{12}, \mathbf{k}_{21}, \mathbf{k}_{22}$ được chọn lớn hơn. Đồng thời, việc chọn α nhỏ hơn và β lớn hơn cũng giúp rút ngắn thời gian hội tụ của hệ thống. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng việc tăng tốc độ hội tụ có thể làm suy giảm chất lượng tín hiệu điều khiển. Chẳng hạn, nếu α quá nhỏ và β quá lớn, tín hiệu điều khiển ảo $\bar{\omega}_d$ và mô-men dẫn động $\mathbf{M}$ có thể xuất hiện hiện tượng vọt lố hoặc chattering.

Ngoài ra, do cấu trúc điều khiển theo phương pháp backstepping, nếu các tham số $\mathbf{k}_{11}, \mathbf{k}_{12}, \mathbf{k}_{21}, \mathbf{k}_{22}$ được chọn quá lớn, tín hiệu điều khiển ảo có thể đạt giá trị lớn, dẫn đến vọt lố của các mô-men dẫn động tại thời điểm ban đầu. Vì vậy, các tham số điều khiển cần được lựa chọn phù hợp nhằm cân bằng giữa hiệu suất bám và chất lượng tín hiệu điều khiển.

4. Mô phỏng kiểm chứng

Trong phần này, các ví dụ vận hành hệ thống MaMH được thực hiện trong môi trường Matlab/Simulink nhằm kiểm chứng hiệu quả của phương pháp điều khiển được đề xuất. Trước hết, các thiết lập của mô phỏng được trình bày dưới đây.

4.1 Cài đặt mô phỏng

Để kiểm chứng hiệu suất điều khiển của phương pháp đề xuất, chúng tôi mô phỏng thuật toán cho hệ thống MaMH bao gồm 2 phân đoạn làm việc như Hình 2. Dựa trên phân tích trong (4), động lực học của hệ thống MaMH trên được xây dựng như sau:

$$\begin{cases} J_u \dot{\omega}_u = k_{u,1} F_1 + k_{u,2} M_u + k_{u,3} \omega_u + k_{u,4} \omega_u^2 \\ J_1 \dot{\omega}_1 = k_{1,5} F_2 + k_{1,6} F_1 + k_{1,7} M_1 + k_{1,8} \omega_1 \\ \dot{F}_1 = k_{1,9} \omega_1 + k_{1,10} F_1 \omega_1 + k_{1,11} F_u \omega_u + k_{1,12} \omega_u \\ J_r \dot{\omega}_r = k_{r,1} F_2 + k_{r,2} M_r + k_{r,3} \omega_r + k_{r,4} \omega_r^2 + \\ \dot{F}_2 = k_{2,9} \omega_r + k_{2,10} F_2 \omega_r + k_{2,11} F_1 \omega_1 + k_{2,12} \omega_1 \end{cases} \quad (18)$$

Thông số mô hình của hệ thống MaMH được sử dụng như trong [6], cụ thể như sau: $R_{u0} = 0.04$ m, $R_{r0} = 0.03$ m, $R_1 = 0.03$ m, $J_{u0} = 0.015$ kg·m², $J_{r0} = 0.005$ kg·m², $J_1 = 0.005$ kg·m², $L_1 = L_2 = 0.5$ m, $b_{fu} = b_{fr} = 0.0002533$ N·m·s, $b_{f1} = 0.00028$ N·m·s, $w = 0.5$ m, $a = 0.00001$ m, $S = 5 \times 10^{-6}$ m², $E = 2.5 \times 10^9$ N/m², $\rho = 800$ kg/m³.

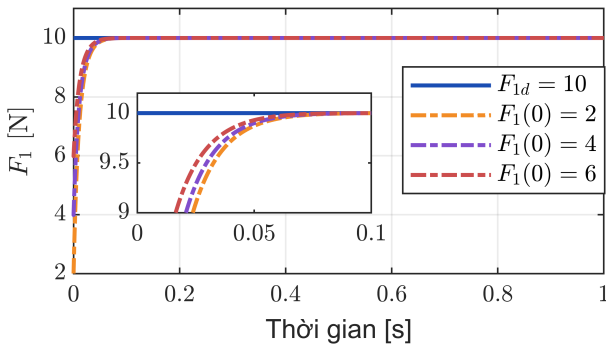
Sau đó, các kịch bản mô phỏng được triển khai để đánh giá hiệu suất của phương pháp điều khiển đề xuất, cụ thể như sau:

1. **Kịch bản 1.** Hệ thống MaMH được vận hành trong ba trường hợp khác nhau, tương ứng với sự thay đổi của trạng thái khởi đầu về lực căng vật liệu trên hai phân đoạn và tốc độ góc của cuộn thu, qua đó cho phép đánh giá khả năng hội tụ trong thời gian cố định của phương pháp điều khiển được đề xuất, bất kể trạng thái khởi đầu.
2. **Kịch bản 2.** Các tham số của bộ điều khiển được lựa chọn khác nhau trong ba trường hợp nhằm quan sát ảnh hưởng của chúng đến tốc độ hội tụ của các trạng thái.
3. **Kịch bản 3.** So sánh hiệu suất điều khiển lực căng và tốc độ dịch chuyển vật liệu của phương pháp đề xuất với bộ điều khiển Backstepping truyền thống [11].

4.2 Kết quả mô phỏng

4.2.1 Kịch bản mô phỏng 1: Vận hành hệ thống MaMH với các trạng thái ban đầu khác nhau

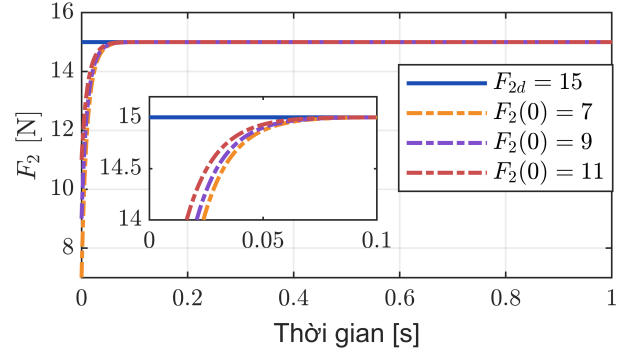
Trong kịch bản này, Hệ thống MaMH được vận hành với lực căng và vận tốc dịch chuyển ban đầu của vật liệu khác nhau để chứng minh tính hội tụ thời gian cố định bất kể trạng thái ban đầu của phương pháp điều khiển đề xuất.



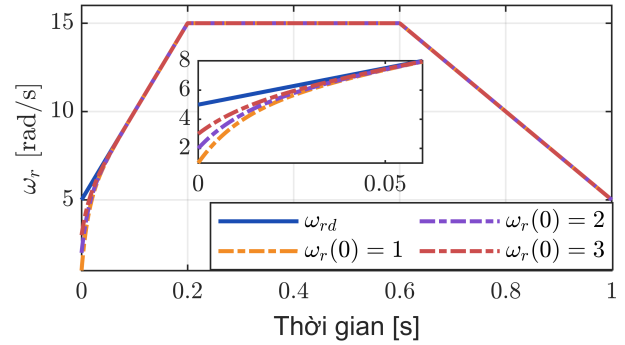
Hình 3: Kịch bản 1 - Đáp ứng lực căng trên phân đoạn 1

Kết quả mô phỏng đáp ứng lực căng ở phân đoạn thứ nhất được mô tả trong Hình 3, Hình 4 mô tả đáp ứng lực căng trên phân đoạn thứ hai. Vận tốc góc của cuộn thu, đại diện cho tốc

độ dịch chuyển của băng vật liệu, được trình bày trong Hình 5. Các kết quả cho thấy dù các trạng thái ban đầu của hệ thống MaMH (lực căng, vận tốc dịch chuyển) có khác nhau, chúng vẫn hội tụ đến giá trị tham chiếu tương ứng trong cùng một thời gian. Từ đó, tính hội tụ thời gian cố định của phương pháp đề xuất được khẳng định.



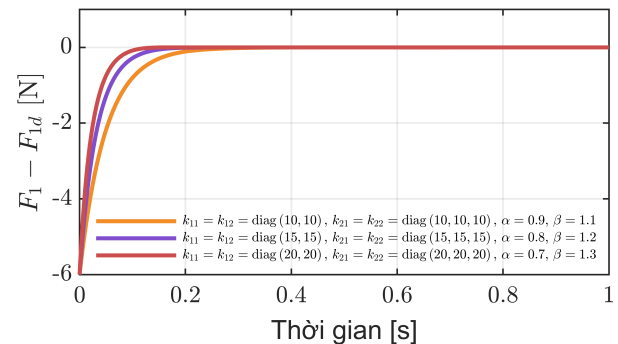
Hình 4: Kịch bản 1 - Đáp ứng lực căng trên phân đoạn 2



Hình 5: Kịch bản 1 - Đáp ứng vận tốc của góc cuộn thu

4.2.2 Kịch bản mô phỏng 2: Vận hành hệ thống MaMH với các bộ tham số điều khiển khác nhau

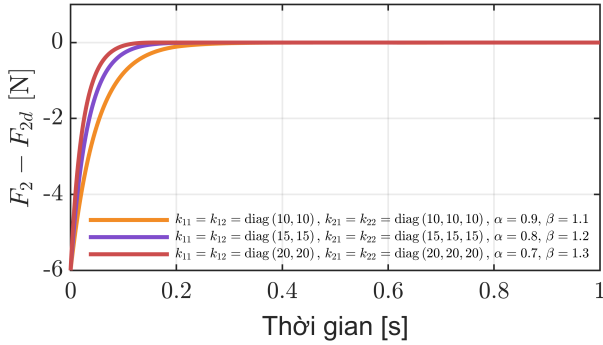
Để xem xét thêm ảnh hưởng của các tham số điều khiển trong hệ thống, chúng tôi thực hiện các mô phỏng với cùng một điều kiện vận hành và các bộ tham số được chọn khác nhau. Trạng thái ban đầu của hệ thống MaMH được cài đặt là $F_1(0) = 4$ N, $F_2(0) = 9$ N và $\omega_r(0) = 2$ rad/s với lực căng tham chiếu trên hai phân đoạn lần lượt là $F_{1d} = 10$ N và $F_{2d} = 15$ N.



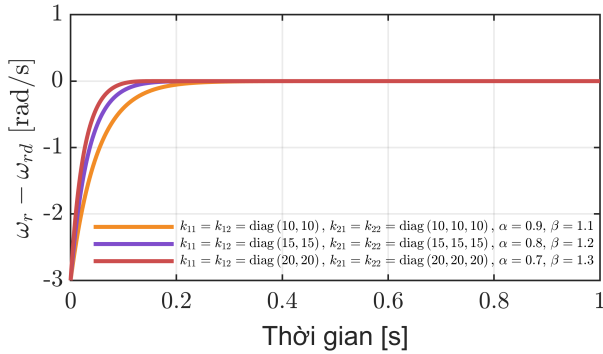
Hình 6: Kịch bản 2 - Sai số bám lực căng trên phân đoạn 1

Sai số bám lực căng ở phân đoạn thứ nhất được mô tả trong Hình 6, trong khi Hình 7 thể hiện sai số bám lực căng ở phân

đoạn thứ hai. Sai số bám vận tốc góc của cuộn thu được trình bày trong Hình 8. Các kết quả cho thấy rằng, với việc thay đổi bộ tham số điều khiển như đã nêu trong Nhận xét 1, chất lượng của hệ thống điều khiển đề xuất có thể được cải thiện đáng kể, thể hiện qua tốc độ hội tụ nhanh về 0 của các sai số bám. Do đó, hệ thống điều khiển đề xuất có khả năng điều chỉnh linh hoạt để đáp ứng các yêu cầu vận hành cụ thể trong thực tế.



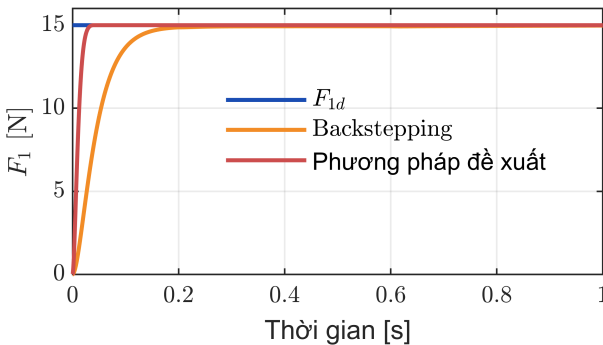
Hình 7: Kịch bản 2 - Sai số bám lực căng trên phân đoạn 2



Hình 8: Kịch bản 2 - Sai số bám vận tốc góc của cuộn thu

4.2.3 Kịch bản mô phỏng 3: So sánh với bộ điều khiển Backstepping truyền thống

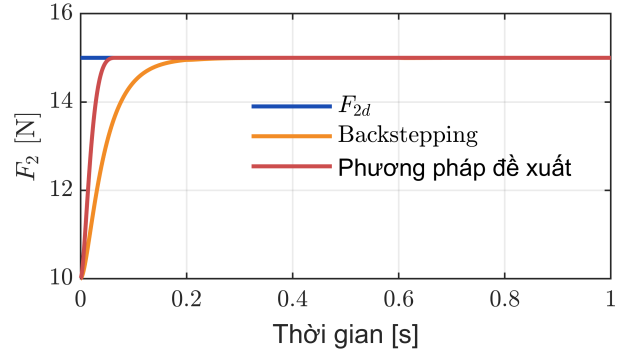
Trong phần này, chúng tôi thực hiện mô phỏng so sánh hiệu suất điều khiển giữa phương pháp đề xuất và bộ điều khiển Backstepping truyền thống, lực căng tham chiếu trên hai phân đoạn được đặt 15 N, vận tốc góc tham chiếu tương tự như các kịch bản trước. Điều kiện đầu của các trạng thái là như nhau đối với hai bộ điều khiển được triển khai.



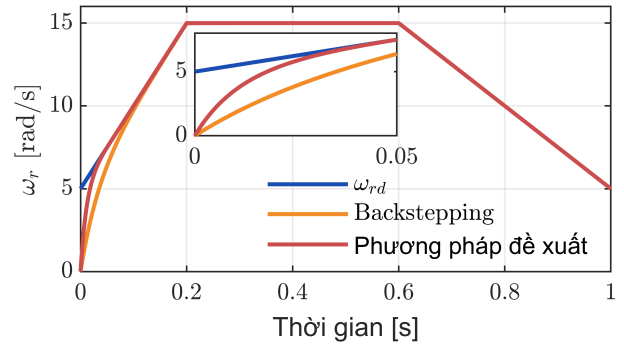
Hình 9: Kịch bản 3 - Đáp ứng lực căng trên phân đoạn 1

Đáp ứng lực căng của hệ thống điều khiển đề xuất và Backstepping được trình bày trong Hình 9 và Hình 10, trong

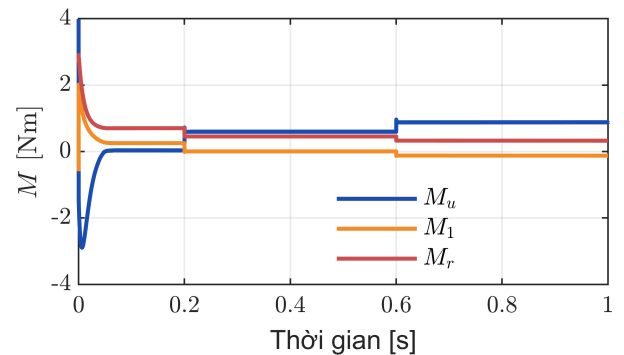
khi đáp ứng vận tốc góc cuộn thu tương ứng được trình bày trong Hình 11. Kết quả cho thấy hệ thống đề xuất có khả năng bám tốt hơn điều khiển Backstepping truyền thống. Các trạng thái hội tụ về giá trị tham chiếu tương ứng một cách nhanh chóng, không xảy ra hiện tượng vọt lố hay mất ổn định hệ thống. Mô-men truyền động trên các cuộn được trình bày trong Hình 12.



Hình 10: Kịch bản 3 - Đáp ứng lực căng trên phân đoạn 2



Hình 11: Kịch bản 3 - Đáp ứng vận tốc góc của cuộn thu



Hình 12: Kịch bản 3 - Mô-men truyền động ở các cuộn khi vận hành hệ thống MaMH bằng hệ thống đề xuất

4.3 Thảo luận

Để đánh giá định lượng hiệu suất điều khiển của phương pháp đề xuất và so sánh với điều khiển backstepping truyền thống, chúng tôi sử dụng chỉ số RMSE (Root Mean Square Error) làm cơ sở so sánh. Biểu thức tính RMSE được trình bày như sau:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (19)$$

Bảng 1: So sánh chỉ số RMSE khi vận hành MaMH bằng phương pháp đề xuất và bộ điều khiển backstepping truyền thống

Bộ điều khiển	Lực căng phân đoạn 1	Lực căng phân đoạn 2	Vận tốc góc cuộn thu
Backstepping truyền thống	0.0254	0.0085	0.0064
Phương pháp đề xuất	0.0125	0.0056	0.0036

trong đó n là số lượng điểm dữ liệu, $n = \frac{T}{dt}$ với T là thời gian vận hành và dt là thời gian trích mẫu của hệ thống. e_i là sai số bám tại các điểm dữ liệu tương ứng. Trong phần này, ba sai số bám bao gồm sai số bám lực căng trên hai phân đoạn và sai số bám vận tốc góc của cuộn thu được xem xét. Chỉ số RMSE tương ứng với các sai số bám khi vận hành MaMH bằng phương pháp điều khiển đề xuất và bộ điều khiển backstepping truyền thống được trình bày như trong Bảng 1.

5. Kết luận

Trong bài báo này, một phương pháp điều khiển mới được đề xuất cho hệ thống xử lý web đa trục. Phương pháp điều khiển đề xuất bao gồm bộ điều khiển lực căng của vật liệu trên các phân đoạn làm việc và tốc độ dịch chuyển của băng vật liệu. Dựa trên luật điều khiển thời gian cố định, sai số bám lực căng và vận tốc của băng vật liệu sẽ hội tụ về 0 trong thời gian cố định, thời gian hội tụ này không bị ảnh hưởng bởi trạng thái khởi động của hệ thống MaMH. Các kết quả mô phỏng cũng cho thấy sự vượt trội của phương pháp này so với điều khiển backstepping truyền thống. Trong tương lai, chúng tôi sẽ xem xét các tác nhân gây bất lợi cho hệ thống MaMH như nhiễu loạn bên ngoài, sự bất định thông số mô hình.

6. Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) theo đề tài mã số 107.01-2024.19

Tài liệu tham khảo

- [1] J. F. Benitez-Rodriguez, D. Chen, M. Gao and R. A. Caruso, Roll-to-roll processes for the fabrication of perovskite solar cells under ambient conditions, *Solar RRL*, 5, 9, 2100341, 2021. DOI: [10.1002/solr.202100341](https://doi.org/10.1002/solr.202100341).
- [2] J. Park, J. Kim, J. Kim, M. Kim, T. Song and U. Paik, Sustainable and cost-effective electrode manufacturing for advanced lithium batteries: the roll-to-roll dry coating process, *Chemical Science*, 16, 16, 6598–6619, 2025. DOI: [10.1039/D5SC00059A](https://doi.org/10.1039/D5SC00059A).
- [3] E.-H. Ko, H.-J. Kim, S.-J. Lee, J.-H. Lee and H.-K. Kim, Nano-sized Ag inserted into ITO films prepared by continuous roll-to-roll sputtering for high-performance, flexible, transparent film heaters, *RSC advances*, 6, 52, 46634–46642, 2016. DOI: [10.1039/C6RA08704C](https://doi.org/10.1039/C6RA08704C).
- [4] Y.-M. Sung, C.-S. Tsao, H.-K. Lin, H.-C. Cha and Y.-C. Huang, Scale-up fabrication and characteristic study of oligomer-like small-molecule solar cells by ambient halogen-free sheet-to-sheet and roll-to-roll slot-die coating, *Solar Energy*, 231, 536–545, 2022. DOI: [10.1016/j.solener.2021.11.080](https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.080).
- [5] P. R. Raul and P. R. Pagilla, Design and implementation of adaptive PI control schemes for web tension control in roll-to-roll (R2R) manufacturing, *ISA transactions*, 56, 276–287, 2015. DOI: [10.1016/j.isatra.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.11.020).
- [6] V. T. Dang, D. B. H. Nguyen, T. D. T. Tran, D. T. Le and T. L. Nguyen, Model-free hierarchical control with fractional-order sliding surface for multisection web machines, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 37, 2, 497–518, 2023. DOI: [10.1002/acs.3534](https://doi.org/10.1002/acs.3534).
- [7] E. Sutanto and A. Alleyne, A semi-continuous Roll-to-Roll (R2R) electrohydrodynamic jet printing system, *Mechatronics*, 31, 243–254, 2015. DOI: [10.1016/j.mechatronics.2015.08.002](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.08.002).
- [8] T. T. Lý, Đ. Đ. Thắng, P. V. Hùng, T. T. T. Hương, N. B. Khá and D. D. Minh, Thiết kế bộ điều khiển mặt trượt động thích nghi cho hệ truyền động nhiều trục liên kết mềm, *Journal of Measurement, Control, and Automation*, 4, 2, 15–24, 2023.
- [9] D. E. Chang, J. Lévine, J. Jo and K.-H. Choi, Control of roll-to-roll web systems via differential flatness and dynamic feedback linearization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21, 4, 1309–1317, 2012. DOI: [10.1109/TCST.2012.2204057](https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2204057).
- [10] K.-H. Choi, T. T. Tran and D.-S. Kim, Back-stepping controller based web tension control for roll-to-roll web printed electronics system, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 5, 1, 7–21, 2011. DOI: doi.org/10.1299/jamdsm.5.7.
- [11] T. T. Tran and K.-H. Choi, A backstepping-based control algorithm for multi-span roll-to-roll web system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 45–61, 2014. DOI: [10.1007/s00170-013-5168-6](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5168-6).
- [12] T. L. Tong, T. T. Nguyen, D. D. Minh, D. H. Nguyen and T. L. Nguyen, Điều khiển lực căng kết hợp bù thành phần mô men quán tính bất định sử dụng neural RBF cho hệ cuộn lại nhiều phân đoạn, *Journal of Measurement, Control, and Automation*, 2, 1, 2021.
- [13] J. Yu, P. Shi and L. Zhao, Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems, *Automatica*, 92, 173–180, 2018. DOI: [10.1016/j.automatica.2018.03.033](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.03.033).
- [14] V. T. Dang, X. B. Nguyen, T. D. T. Tran, D. T. Le and T. L. Nguyen, Finite-time Velocity Sensorless Integral Sliding Mode Control for Roll-To-Roll Systems under Matched Disturbances, *ISA transactions*, 2025. DOI: [10.1016/j.isatra.2025.05.036](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.05.036).

- [15] A. Polyakov, Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems, *IEEE transactions on Automatic Control*, 57, 8, 2106–2110, 2011. DOI: [10.1109/TAC.2011.2179869](https://doi.org/10.1109/TAC.2011.2179869).
- [16] Z. Zuo **and** L. Tie, A new class of finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems, *International Journal of Control*, 87, 2, 363–370, 2014. DOI: [10.1080/00207179.2013.834484](https://doi.org/10.1080/00207179.2013.834484).
- [17] J. Lee, J. Byeon **and** C. Lee, Theories and control technologies for web handling in the roll-to-roll manufacturing process, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 2, 525–544, 2020. DOI: [10.1007/s40684-019-00185-3](https://doi.org/10.1007/s40684-019-00185-3).
- [18] J. Yan **and** X. Du, Web tension and speed control in Roll-to-Roll systems, *Control Theory in Engineering*, 209, 2020. DOI: [10.5772/intechopen.88797](https://doi.org/10.5772/intechopen.88797).