

# Điều khiển thích nghi cho cụm quán liêu trong hệ thống vận chuyển vật liệu mềm

- Nguyễn Quốc Chí<sup>1</sup>
- Nguyễn Hùng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Đại Học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

<sup>2</sup> Trường Đại Học Công Nghệ TP. Hồ Chí Minh

(Bản nhận ngày 25 tháng 3 năm 2015, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 14 tháng 8 năm 2015)

## TÓM TẮT

*Trong nghiên cứu này, chúng tôi phát triển một phương pháp điều khiển thích nghi cho cụm quán liêu trong các hệ thống vận chuyển vật liệu mềm (vải, thép cán mỏng, plastic, dây thép v.v.). Có hai giải thuật điều khiển thích nghi được phát triển cho hai mục tiêu là khử dao động trong mặt cắt ngang của vật liệu và điều khiển vận tốc quán liêu. Bộ điều khiển khử dao động được thiết kế với sự xem xét ảnh hưởng của lực căng của vật liệu (mà giá trị phụ thuộc vào tọa độ và thời gian), và sự thay đổi theo thời gian của vận tốc vận chuyển. Thêm vào đó, bộ điều khiển dao*

*động sẽ thích nghi với sự không biết trước của khối lượng trên một đơn vị chiều dài của vật liệu. Bộ điều khiển vận tốc của trục quán hoạt động dưới ảnh hưởng của nhiễu và sự chưa biết trước hệ số ma sát tại trục quán. Hệ thống vận chuyển được mô hình hóa bằng phương pháp kết hợp các phương trình vi phân đạo hàm riêng và phương trình vi phân thông thường. Dựa trên phương pháp Lyapunov, ổn định tiệm cận của hệ thống vận hành với luật điều khiển dao động và điều khiển vận tốc được chứng minh. Hiệu suất của bộ điều khiển sẽ được kiểm chứng thông qua mô phỏng.*

**Từ khóa:** Điều khiển thích nghi, phương pháp Lyapunov, phương trình vi phân đạo hàm riêng, hệ thống roll-to-roll, điều khiển dao động.

## 1. GIỚI THIỆU

Trong thực tế, nhiều ngành công nghiệp sử dụng hệ thống vận chuyển các vật liệu mềm chẳng hạn như giấy, sợi dệt, kim loại, polymers, và các vật liệu composite. Trong các hệ thống này, việc sử dụng các hệ thống từ trực tới trực (roll-to-roll, R2R) làm nâng cao hiệu suất, tốc

độ sản xuất, và chất lượng của sản phẩm [1]. Các hệ thống vận chuyển vật liệu mềm và các vấn đề điều khiển đã được nghiên cứu trong một số tài liệu [2-10]. Hầu hết các nghiên cứu trên hệ thống R2R tập trung vào vấn đề điều khiển lực căng và điều khiển tốc độ cho vật liệu mềm,

và các nghiên cứu này dựa trên những mô hình động lực học sử dụng phương trình vi phân thông thường (ordinary differential equations, ODEs) với giả sử rằng tất cả các thông số trong hệ thống đều xác định. Trong thực tế, việc giả sử tất cả các thông số đều có thể xác định đúng với giá trị vật lý thực là không thể xảy ra. Ví dụ, hệ số giảm chấn nhớt và của vật liệu mềm là rất khó để xác định chính xác. Điều này ảnh hưởng đến chất lượng của quá trình điều khiển, khi mà luật điều khiển không được thiết kế dựa trên các thông số chính xác.

Có rất ít nghiên cứu phát triển các bộ điều khiển thích nghi để giải quyết vấn đề các thông số không thể xác định một cách chính xác. Trong nghiên cứu của Pagilla và các đồng nghiệp [9] đã sử dụng một mô hình điều khiển thích nghi phân tán để giải quyết vấn đề thay đổi đường kính của bộ cuộn và xả liệu có kể đến nhiều cho một hệ thống vận chuyển vật liệu mềm. Tuy nhiên, tất cả các nghiên cứu kể trên kể cả trong trường hợp có bộ điều khiển thích nghi hay không có bộ điều khiển thích nghi đều không chú ý đến dao động trong mặt cắt ngang của vật liệu mềm. Trên thực tế, chất lượng của các cuộn quấn liên quan đến rung động theo phương ngang và tốc độ vận chuyển vật liệu, đặc biệt trong hệ thống R2R tốc độ cao [10-32]. Vì lý do này mà bài báo hướng tới vấn đề điều khiển thích nghi cho quá trình cuộn dây trong hệ thống R2R tốc độ cao.

Nhiều giải thuật điều khiển dao động của vật liệu mềm trong mặt cắt ngang sử dụng tác động ở biên của của hệ thống đã được phát triển [11-32]. Trong số đó, nhiều bộ điều khiển thích nghi đã được phát triển [12-15,18,22,26-28]. Những nghiên cứu này đã chứng tỏ được sự hữu ích của kỹ thuật sử dụng tác động ở biên điều khiển biên trong quá trình thiết kế và thi công.

Điều này có thể được giải thích như sau. Luật điều khiển biên được xây dựng dựa trên hàm năng lượng Lyapunov. Luật điều khiển này sử dụng hai tín hiệu đo ở biên của hệ thống là độ dịch chuyển theo phương ngang và tốc độ thay đổi của vật liệu. Việc đo các tín hiệu này có thể thực hiện một cách dễ dàng bằng việc lắp đặt các cảm biến laser ở biên. Vì vậy, phương pháp điều khiển biên là một giải pháp khả thi để có thể ứng dụng bộ điều khiển được phát triển trong thực tế.

Phần còn lại của bài báo này được trình bày như sau. Đầu tiên chúng tôi giới thiệu mô hình động lực học của hệ thống được xem xét bao gồm động lực học của hệ thống vận chuyển vật liệu mềm trong đó bao gồm động lực học của cụm quấn liệu trong phần 2. Trong phần 3, chúng tôi trình bày quá trình xây dựng bộ điều khiển. Dựa trên mô hình động lực học trong phần 2, phương pháp Lyapunov được sử dụng để phát triển luật điều khiển biên thích nghi cho việc giảm rung động theo phương ngang của vật liệu với giả thiết: tốc độ vận chuyển và lực căng là các thông số thay đổi theo thời gian. Một luật điều khiển được giới thiệu để bù vào khối lượng chưa biết trên mỗi đơn vị chiều dài di chuyển vật liệu. Để điều khiển vận tốc của cuộn quấn mà chưa biết được hệ số ma sát ổ bi trong trục cuộn và sự thay đổi các thông số quay trong động cơ, một luật điều khiển thích nghi cũng được đề xuất. Hiệu suất của bộ điều khiển sẽ được kiểm chứng qua mô phỏng trong phần 4. Cuối cùng, Kết luận sẽ được đưa ra ở phần 5.

## 2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

### 2.1. Mô hình trục cuộn

Hình 1 thể hiện sơ đồ của bộ phận cuộn dây với một xy lanh thủy lực được thiết kế cho khử dao động của vật liệu. Trong Hình 1, đặt  $t$

là thời gian,  $x$  là tọa độ điểm dọc theo chiều chuyển động ngang của vật liệu,  $v(t)$  là vận tốc vận chuyển của vật liệu,  $w(x,t)$  là dao động trong mặt cắt ngang của vật liệu, và  $l$  là khoảng cách giữa các trục cố định và trục được kết nối với cơ cấu chấp hành thủy lực. Các đặc tính của vật liệu mềm được mô tả như sau: khối lượng trên mỗi đơn vị chiều dài  $\rho$ , mặt cắt ngang  $A$ , module đàn hồi Young  $E$ , moment quán tính  $I$  (tính trong mặt cắt ngang vuông góc với hướng chuyển động của vật liệu), và hệ số giảm chấn nhớt  $c_v$ . Các thông số của cơ cấu chấp hành thủy lực là khối lượng của trục lăn bị động ở cơ cấu chấp hành thủy lực  $m_a$  và hệ số giảm chấn  $d_a$ . Lực căng của vật liệu là  $T(x,t)$  phụ thuộc vào vị trí theo phương ngang và thay đổi theo thời gian. Lực điều khiển  $f_a(t)$  được cung cấp để khử dao động trong mặt cắt ngang của vật liệu. Để thuận tiện cho việc trình bày,  $w_x(x,t)$  và  $w_t(x,t)$  được thay thế bằng ký hiệu viết tắt  $w_x$  và  $w_t$  một cách tương ứng.

Như trình bày trong Hình 1, cơ cấu chấp hành thủy lực được đặt gần cụm quần liệu sao cho khoảng cách giữa cụm khử dao động và cụm quần liệu nhỏ hơn nhiều lần khoảng cách giữa các cụm quần liệu với các trục lăn cố định. Vì vậy, giả sử rằng dao động của vật liệu chỉ xảy ra trong khoảng giữa các trục cố định và cụm khử dao động (được xác định trong khoảng  $0 \leq x \leq l$ ). Phương trình động lực học mô tả dao động của vật liệu trong khoảng  $0 \leq x \leq l$  được thành lập như sau [17]:

$$\rho A(w_{tt} + \dot{v}w_x + 2vw_{xt} + v^2w_{xx}) - (Tw_x)_x + c_v(w_t + vw_x) + EIw_{xxxx} = 0, \quad (1)$$

$$w(x,0) = w_0(x), w_t(x,0) = w_{t0}(x), \quad (2)$$

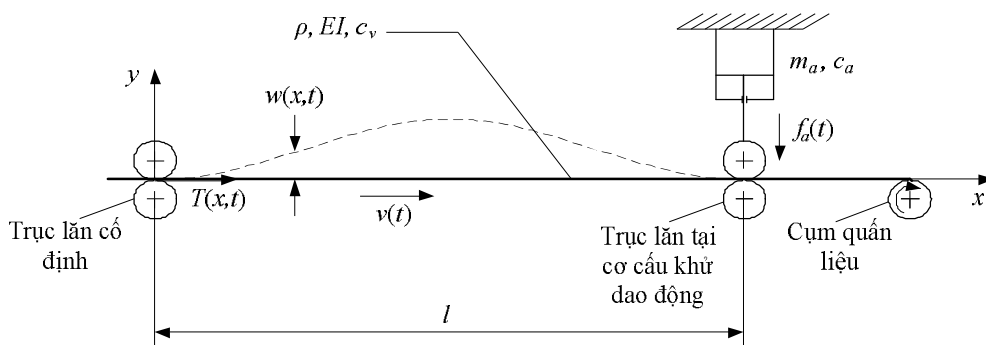
$$w(0,t) = 0, w_x(l,t) = 0, \quad (3)$$

$$m_a w_{tt}(l,t) + d_a w_t(l,t) + T(l,t)w_x(l,t) - EIw_{xxxx}(l,t) - f_a(t) = 0. \quad (4)$$

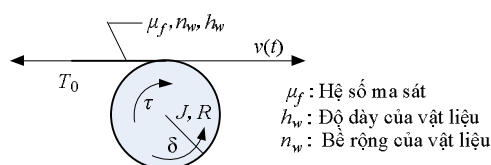
Chú ý rằng phương trình (1) cung cấp thông tin về dao động trong mặt cắt ngang  $w(x,t)$  của vật liệu. Điều kiện đầu được cung cấp bởi phương trình (2), và điều kiện biên được cho bởi phương trình (3) và (4). Phương trình (4) cũng mô tả động lực học của cơ cấu chấp hành thủy lực. Lực căng  $T(x,t)$  được thay đổi theo vị trí điểm và được xác định bởi phương trình sau [29].

$$T(x,t) = T_0 + \rho A(l-x)\dot{v}(t) \quad (5)$$

Trong đó  $g$  và  $T_0$  biểu diễn gia tốc trọng trường và lực căng ban đầu ở trạng thái tĩnh của vật liệu. Từ phương trình (5), có thể quan sát thấy lực căng là liên tục và có giới hạn với mọi  $x \in [0, l]$  và  $t \in [0, \infty]$ . Tuy nhiên, xin lưu ý rằng khác với các giả thiết thông thường, lực căng trong nghiên cứu này sẽ thay đổi theo thời gian  $t$  lẫn vị trí được xem xét của vật liệu  $x$ . Chính yếu tố này sẽ làm cho việc thiết kế bộ điều khiển khử dao động phức tạp hơn nhưng việc mô hình hóa lực căng chính xác hơn sẽ và sử dụng mô hình này cho việc thiết kế bộ điều khiển sẽ nâng cao chất lượng của bộ điều khiển.



Hình 1. Sơ đồ thể hiện một hệ thống roll-to-roll với cụm quán liêu.



Hình 2. Cụm quán liêu.

## 2.2. Mô hình hóa cụm quán liêu

Hình 2 miêu tả mặt cắt ngang của cuộn quán liêu được dẫn động bởi một động cơ điện. Đặt ký hiệu  $h_w$  là bề dày của vật liệu và  $n_w$  là bề rộng vật liệu.  $J$  và  $R$  lần lượt là moment quán tính và bán kính cuộn quán liêu. Hệ số ma sát ở bi trong trục cuộn quán  $\mu_f$  được giả sử chưa biết. Các ảnh hưởng của các chi tiết quay (ví dụ sự mất cân bằng của trục động cơ, pu li, rotor) được xem như là nhiễu  $\delta(t)$ . Moment xoắn của động cơ là  $\tau(t)$  được chọn làm tín hiệu điều khiển để duy trì vận tốc làm việc của trục quán liêu. Trong khoảng từ cơ cấu khử dao động tới cụm quán liêu, lực căng của vật liệu được giả sử là một hằng số. Vận tốc dài của cụm quán liêu được xác định bằng phương trình sau [10]:

$$\frac{J}{R} \dot{v}(t) = -\frac{\mu_f}{R} v(t) - T_0 R + \delta(t) + \tau(t) + \frac{h_w}{2\pi R} \left( \frac{J}{R} - 2\pi\rho n_w R^2 \right) v^2(t). \quad (6)$$

Phương trình (6) có thể được viết lại như sau

$$\dot{v}(t) = -av(t) + bv^2(t) + u(t) + \delta(t) \quad (7)$$

Trong đó

$$a = \mu_f J, \quad (8)$$

$$b = \frac{h_w}{2\pi R} \left( \frac{J}{R} - 2\pi\rho n_w R^2 \right), \quad (10)$$

$$u(t) = \frac{R\tau(t)}{J}. \quad (11)$$

Trong phương trình (7),  $a$  là một hằng số chưa biết, và  $u(t)$  được xem như là một tín hiệu điều khiển đầu vào.

## 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong phần này, mục tiêu điều khiển là triệt tiêu rung động trong mặt cắt ngang của vật liệu mềm trong khi duy trì tốc độ vận chuyển theo yêu cầu. Để đạt được điều này, hai giải thuật điều khiển được đề xuất riêng biệt cho bộ điều khiển khử dao động và cho bộ điều khiển vận tốc. Bộ điều khiển khử dao động cung cấp tác động điều khiển thông qua cơ cấu chấp hành thủy lực. Bộ điều khiển tốc độ cho cuộn quán liêu cung cấp tác động điều khiển thông qua động cơ dẫn động. Một lưu ý rằng, tuy vận tốc của vật liệu được điều khiển tuy nhiên sai số sinh ra trong quá trình chuyển tiếp sẽ ảnh hưởng

đến dao động trong mặt cắt ngang của vật liệu. Vì vậy, trong mô hình động lực học (1), vận tốc của vật liệu được giả sử là thay đổi theo thời gian và yếu tố này sẽ được xem xét trong quá trình thiết kế giải thuật điều khiển.

### 3.1 Thiết kế bộ điều khiển khử dao động

Để khử dao động, một lực điều khiển được tạo ra bởi cơ cấu chấp hành thủy lực. Luật điều khiển được xây dựng sử dụng để suy ra công thức cho lực điều khiển này. Các thông số hệ thống bao gồm khối lượng trên một đơn vị chiều dài  $\rho$  sẽ được sử dụng để xây dựng luật điều khiển. Tuy nhiên, trong thực tế  $\rho$  có thể không được biết một cách chính xác. Vì vậy, một luật ước lượng được xây dựng để đưa ra giá trị của  $\rho$ . Dựa trên tổng năng lượng của hệ thống, ta xem xét hàm Lyapunov sau:

$$V(t) = \alpha E_{beam}(t) + E_{act}(t) + V_{cross}(t) + V_{est}(t), \quad (11)$$

trong đó

$$E_{beam}(t) = \frac{1}{2} \int_0^l \rho (w_t + v(t)w_x)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l T w_x^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l EI w_{xx}^2 dx, \quad (12)$$

$$E_{act}(t) = \frac{1}{2} m_a \{ \alpha w_i(l,t) + (v + 2\beta l) w_x(l,t) \}^2, \quad (13)$$

$$V_{cross}(t) = 2\beta \int_0^l x w_x (w_t + v(t)w_x) dx, \quad (14)$$

$$V_{est}(t) = \frac{1}{2\gamma} \tilde{\rho}^2(t). \quad (15)$$

Với  $\alpha$ ,  $\beta$ , và  $\gamma$  là các hằng số dương. Sai số ước lượng được xác định bởi

$$\tilde{\rho}(t) = \hat{\rho}(t) - \rho(t). \quad (16)$$

Trong đó  $\hat{\rho}$  là ước lượng của  $\rho$ . Luật điều khiển biên thích nghi được đề xuất như sau

$$f_a(t) = -m_a \{ \dot{v}(t)w_x(l,t) + (\alpha v(t) + 2\beta l)w_{xx}(l,t) \} + d_a w_i(l,t) - \frac{2\beta Alv(t)}{\alpha v(t) + 2\beta l} w_i(l,t) \hat{\rho}. \quad (17)$$

Trên thực tế, dịch chuyển của cơ cấu chấp hành  $w(l,t)$  và độ dốc của vật liệu  $w_x(l,t)$  có thể đo được bằng các cảm biến laser và một encoder được lắp vào cụm cơ cấu chấp hành [17,20,25,26]. Vận tốc cơ cấu chấp hành  $w_t(x,t)$  và  $w_{xt}(x,t)$  có thể thu thập được bằng cách thực hiện phép toán đạo hàm của  $w(l,t)$  và  $w_x(l,t)$ . Luật ước lượng sau được đề xuất để ước lượng giá trị  $\hat{\rho}$  trong luật điều khiển (17).

$$\dot{\hat{\rho}}(t) = \frac{2\beta Al\gamma v(t)}{\alpha v(t) + 2\beta l} w_i(l,t) \{ \alpha w_i(l,t) + (\alpha v(t) + 2\beta l)w_x(l,t) \}. \quad (18)$$

**Định lý 1:** Xem xét hệ thống (1) với điều kiện biên (3) và (4), trong đó khối lượng trên một đơn vị chiều dài  $\rho$  chưa biết. Luật điều khiển thích nghi (17) sử dụng luật ước lượng (18) đảm bảo hệ thống (1) ổn định tiệm cận theo Lyapunov. Trong đó, dao động trong mặt cắt ngang và sai số ước lượng hội tụ đều về không với suy giảm theo hàm mũ.

**Chứng minh:** Sử dụng luật điều khiển (17) và luật ước lượng (18), đạo hàm của  $V(t)$  được tính như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & - \left\{ \beta c_v l + \beta \rho A v(t) \right\} \int_0^l (w_t + v(t)w_x)^2 dx \\ & - \frac{\alpha \hat{T}}{2 \max_{x \in [0,l]} \{T\}} \int_0^l T w_x^2 dx - \frac{\alpha EI}{2} \int_0^l w_{xx}^2 dx \\ & - \alpha Elv(t)w_{xx}^2(0,t) - (\beta l T_0 - \beta Alv^2)w_x^2(l,t) \\ & - \left( \frac{2\beta Alv(t)}{\alpha v(t) + 2\beta l} - \beta \rho Al \right) w_i^2(l,t). \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó,  $\hat{T}$  được xác định như sau:

$$\hat{T} = \frac{2\beta \min_{x \in [0, l]} \{T\}}{\alpha} - \left( \frac{2\beta l}{\alpha} - v(t) \right) \max_{x \in [0, l]} \{T_x\} - \max_{x \in [0, l]} \{T_t\} - \frac{2\beta(c_v l + \rho A v(t))}{\alpha}. \quad (20)$$

Vì giá trị của  $T_0$  là đủ lớn, tồn tại  $\alpha$  và  $\beta$  thỏa mãn những bất đẳng thức sau với mọi  $x \in [0, l]$ :

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{c_v}{\rho A + c_v l + \rho A v_{\min}}. \quad (21)$$

$$2\beta l < \alpha < A v_{\min}. \quad (22)$$

$$v_{\max} < \sqrt{T_0 / \rho A}. \quad (23)$$

$$\frac{2\beta \min_{x \in [0, l]} \{T\}}{\alpha} - \left( \frac{2\beta l}{\alpha} - v_{\min} \right) \max_{x \in [0, l]} \{T_x\} - \max_{x \in [0, l]} \{T_t\} - \frac{2\beta(c_v l + \rho A v_{\max})}{\alpha} > 0. \quad (24)$$

Trong đó vận tốc giới hạn  $v_{\min} < v(t) < v_{\max}$ , các hằng số  $v_{\min}$  và  $v_{\max}$  là các đại lượng đã biết. Sử dụng các bất đẳng thức từ (21)-(24) chúng ta có:

$$\dot{V}(t) \leq -\lambda \{E_{beam}(t) + E_{act}(t)\}. \quad (25)$$

Trong đó  $\lambda$  là hằng số dương và

$$\lambda = \min \left\{ \frac{c_v - \frac{\beta}{\alpha}(\rho A + c_v l + \rho A v_{\min})}{\hat{T}}, \frac{\max_{x \in [0, l]} \{T\}}{2\beta(l T_0 - \rho A l v_{\max})}, \frac{2\beta(l T_0 - \rho A l v_{\max})}{m_a(\alpha v_{\max})} \right\}. \quad (26)$$

Sử dụng bất đẳng thức Cauchy-Schwarz, cho ta bất đẳng thức sau

$$(\alpha - 2\beta l) \{E_{beam}(t) + E_{act}(t)\} \leq V(t) \leq (\alpha + 2\beta l) \{E_{beam}(t) + E_{act}(t)\}. \quad (27)$$

Sử dụng bất đẳng thức (27), chúng ta thu

được kết quả sau:

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{\lambda}{\alpha + 2\beta l} V(t). \quad (28)$$

Biểu thức (28) đã hoàn tất chứng minh cho Định lý 1.

### 3.2 Thiết kế bộ điều khiển cho vận tốc của cuộn quấn

Trên thực tế, moment điều khiển  $\tau(t)$  được cung cấp từ động cơ điều khiển để duy trì vận tốc trong của trục quấn liệu. Trong bài báo này, động lực học vận tốc của cuộn quấn (7) được sử dụng trong thiết kế điều khiển với tín hiệu đầu vào điều khiển là  $u(t)$ . Để thực thi, moment điều khiển sẽ được tính toán thông qua phương trình (10). Giả sử rằng nhiễu  $\delta(t)$  được chặn bởi hằng số xác định dương chưa biết  $\theta_d$ . Sai số điều khiển  $e(t)$  được xác định như sau:

$$e(t) = v(t) - v_d, \quad (29)$$

trong đó  $v_d$  là vận tốc mong muốn. Xét hàm Lyapunov sau

$$V_r(t) = \frac{1}{2} e^2(t) + \frac{1}{2} \{\hat{a}(t) - a\}^2 + \frac{1}{2} \{\hat{\theta}_d(t) - \theta_d\}^2, \quad (30)$$

trong đó  $\hat{a}(t)$  là ước lượng của  $a$ , và  $\hat{\theta}_d(t)$  là ước lượng của  $\theta_d$ . Chọn luật điều khiển thích nghi như sau:

$$u(t) = -ke(t) - bv^2(t) + \hat{a}(t)v(t) - \hat{\theta}_d(t), \quad (31)$$

$$\dot{\hat{a}}(t) = -ev(t), \quad (32)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_d(t) = e(t). \quad (33)$$

Trong luật điều khiển (31),  $k$  là hệ số điều khiển và có giá trị dương.

**Định lý 2:** Xem xét động lực học vận tốc của trục quấn liệu (7), trong đó hệ số  $a$  là không

được biết trước. Tín hiệu nhiễu  $\delta(t)$  được giả sử có giới hạn trên và dưới. Sử dụng luật điều khiển thích nghi (31) kết hợp luật ước lượng (32) và (33) đảm bảo ổn định tiệm cận của hệ động lực học (7) mà sai số điều khiển hội tụ đều về 0.

**Chứng minh:** Đạo hàm  $V_r(t)$  ta được

$$V_r(t) = e(t)\dot{v}(t) + \{\hat{a}(t) - a\} \dot{\hat{a}}(t) + \{\hat{\theta}_d(t) - \theta_d\} \dot{\hat{\theta}}_d(t). \quad (34)$$

Sử dụng phương trình (8) cùng với luật điều khiển (31) và luật thích nghi (31) và (32), ta được

$$V_r(t) = e(t) \{av(t) + bv^2(t) + u(t) + \delta(t)\} - \{\hat{a}(t) - a\} e(t)v(t) - \{\hat{\theta}_d(t) - \theta_d\} e(t). \quad (35)$$

Từ phương trình (35), ta được bất đẳng thức sau

$$\int_0^\infty e^2(t) dt \leq \frac{\{V(0) - V(\infty)\}}{k} < \infty. \quad (36)$$

Từ phương trình (36), có thể kết luận rằng  $e(t) \in L^2(0, \infty)$ . Chú ý rằng đạo hàm của  $e(t)$  là  $\dot{e}(t)$  có giới hạn. Sử dụng theo bổ đề Barbalat [31, p.192], ta chứng minh được  $e(t)$  sẽ hội tụ về 0. Đây là điều phải chứng minh.

#### 4. MÔ PHỎNG KIỂM CHỨNG

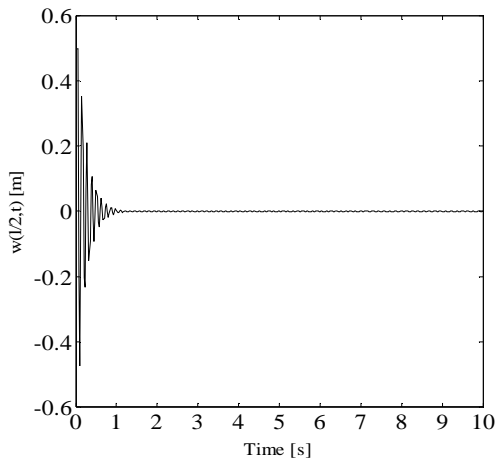
Mô phỏng bằng phương pháp số (sử dụng phần mềm Matlab) được dùng để kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển. Các thông số hệ thống được sử dụng trong mô phỏng được cung cấp trong Bảng 1. Điều kiện đầu của vật liệu là  $w(x,0) = 0.5 \sin(\pi x/l)$  và  $w_t(x,0) = 0$ . Giá trị dương  $\alpha$  và  $\beta$  được chọn dựa theo bất đẳng thức (21)-(23) như sau:  $\alpha = 15$  và  $\beta = 15$ . Hệ số ước lượng dùng trong (18)  $\gamma = 15$ , và hệ số điều

khiển trong phương trình (31) là  $k = 15$ .

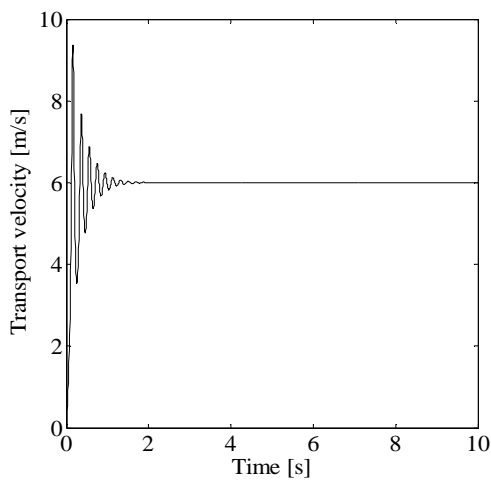
Như thể hiện ở Hình 3, dao động được triệt tiêu trong 1 giây. Trong đó năng lượng rung động suy giảm về 0 một cách lũy tiến với luật điều khiển biên (17). Mất 3 giây để ổn định vận tốc vận chuyển với vận tốc ban đầu  $v_0 = 0$  và vận tốc mong muốn  $v_d = 6$ , như thể hiện ở Hình 4. Từ Hình 4 và Hình 5, rõ ràng rằng dao động theo trong mặt cắt ngang được triệt tiêu hoàn toàn, ngay cả khi vận tốc của vật liệu chưa đạt được giá trị thiết lập. Điều này chứng minh hiệu quả khử dao động của luật điều khiển, khi vẫn đảm bảo khử hoàn toàn dao động trong khi tốc độ vận chuyển vẫn đang thay đổi. Hình 4 và Hình 6 thể hiện sự hội tụ của giá trị ước lượng của các thông số chưa biết (cụ thể là, khối lượng trên một đơn vị chiều dài của vật liệu và hệ số ma sát ổ bi).

**Bảng 1.** Các thông số của hệ thống quản dây sử dụng trong mô phỏng.

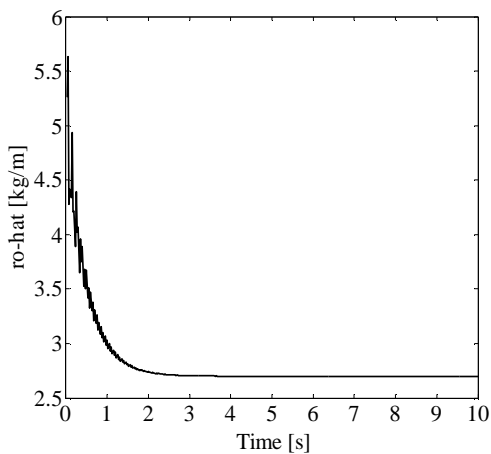
Thông số	Giá trị
$\rho$	0.7 kg/m
$A$	0.0007 m <sup>2</sup>
$I$	0.34×10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup>
$E$	1.8×10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>
$h_w$	0.7×10 <sup>-3</sup> m
$n_w$	1 m
$l$	6 m
$c_v$	0.001·m <sup>2</sup> s
$m_a$	1 kg
$d_a$	0.25 N·s/m
$\mu_f$	2.25 N·m·s
$J$	2.1542 kg/m <sup>2</sup>
$R$	0.2 m
$T_0$	100 N
$\delta(t)$	0.5sin(20πt) N



**Hình 3.** Rung động phương ngang tại  $x = l/2$ .



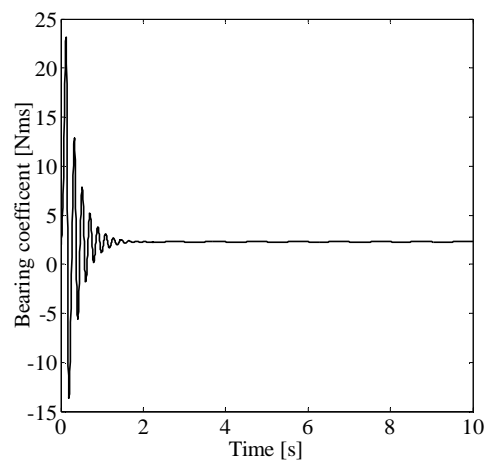
**Hình 4.** Vận tốc vận chuyển của cụm quần dây.



**Hình 5.** Hội tụ của  $\hat{\rho}$ .

## 5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này hai sơ đồ điều khiển đã được phát triển cho một cụm quần liệu trong một hệ thống sản xuất và vận chuyển các vật liệu mềm liên tục. Hai bộ điều khiển được thiết kế nhằm mục đích khử dao động trong mặt cắt ngang và điều khiển vận tốc. Kỹ thuật điều khiển biên đã được sử dụng để thiết lập luật điều khiển thích nghi dùng để khử dao động với các giả thiết: vận tốc vận chuyển vật liệu mềm thay đổi và khối lượng trên mỗi đơn vị chiều dài chưa biết.



**Hình 6.** Hội tụ của  $\hat{\mu}_f$ .

Phương pháp Lyapunov đã được dùng để chứng minh dao động của vật liệu mềm suy giảm đều theo hàm mũ. Sơ đồ điều khiển thích nghi thứ hai được phát triển để điều khiển tốc độ vận chuyển trong quá trình làm việc dưới ảnh hưởng của tín hiệu nhiễu, trong đó hệ số ma sát ổ bi là không biết trước. Phương pháp Lyapunov đã được dùng để chứng minh rằng sai số điều khiển giữa vận tốc vận chuyển và vận tốc mong muốn hội tụ đều về 0. Chúng tôi tin rằng sơ đồ bộ điều khiển được đề xuất có thể cung cấp một phương pháp triển vọng để điều khiển dao động và điều khiển vận tốc của cụm quần dây trong hệ thống vận chuyển vật liệu mềm với các thông số thay



đổi theo thời gian hoặc chưa biết.

**Ghi Nhận Tài Trợ:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí

Minh (VNU-HCM) trong khuôn khổ đề tài mã số C2013-20-01 và Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.04-2012.37.

# Adaptive control for a rewinding process of a roll-to-roll system

- Nguyen Quoc Chi<sup>1</sup>
- Nguyen Hung<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ho Chi Minh city University of Technology, VNU-HCM

<sup>2</sup> HUTECH

## ABSTRACT

*In this paper, transverse vibration and transport velocity controls of a moving web in a rewinding section of a roll to roll system are investigated. The moving web is modeled as an axially moving beam. Two independent adaptive control schemes are proposed. The first control scheme using a control force exerted from a hydraulic actuator is to suppress transverse vibrations of the moving web of unknown mass per unit length under a spatially varying tension and a time-varying transport velocity. The second control scheme using a control torque applied to the rewind roller*

*is to maintain the transport velocity levels of the moving web in spite of disturbances such as the variations of rotating elements and unknown bearing friction. From the decentralized control viewpoint, the uniformly exponential stability for suppressing the transverse vibrations and the uniformly asymptotic stability for maintaining the transport velocity are achieved. However, as a whole, the uniformly asymptotic stability is concluded. Simulations for demonstrating the effectiveness of the proposed control schemes are presented.*

**Key words:** Adaptive boundary control, axially moving beam, Lyapunov method, partial differential equations, roll-to-roll system, vibration control.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jain, K., Klosner, M., and Zemel, M., Flexible electronics and displays: high-resolution, roll-to-roll, projection lithography and photoablation processing technologies for high-throughput production, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 93, No. 8, pp. 1500-1510, 2005.
- [2]. Pagilla, P. R., Garimella, S. S., Dreinhofer, L. H., and King, O., Dynamics and control of accumulators in continuous strip processing lines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 3, pp. 934-940, 2001.
- [3]. Koc, H., Knittel, D., Mathelin, M., and Abba, G., Modeling and robust control of winding systems for elastic webs, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 197-208, 2002.
- [4]. Knittel, D., Edouard, L., Gigan, D., and Koc, H., Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom  $H_\infty$  controllers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 1, pp. 113-120, 2002.
- [5]. Pagilla, P. R., Dwivedula, R. V., Zhu, Y., and Perera, L. P., Periodic tension disturbance attenuation in web process lines using active dancers, *ASME Journal of Dynamics System, Measurement and Control*, Vol. 125, pp. 361-371, 2003.
- [6]. Wang, C., Wang, Y., Yang, R., and Lu, H., Research on precision tension control system based on neural network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 2, pp. 381-386, 2004.
- [7]. Pagilla, P. R., Siraskar, N. B., and Dwivedula, R. V., Decentralized control of web processing lines, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 106-117, 2007.
- [8]. Shin, K. and Soon, O. K., The effect of tension on the lateral dynamics and control of a moving web, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 43, No. 2, pp. 403-411, 2007.
- [9]. Pagilla, P. R., Dwivedula, R. V., and Siraskar, N. B., A decentralized model reference adaptive controller for large-scale systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 12, No. 2, pp. 154-163, 2007.
- [10]. Lee, C., Kang, H., Kim, H., and Shin, K., Effect of taper tension profile on the telescoping in a winding process of high speed roll to roll printing systems, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 11, pp. 3036-3048, 2009.
- [11]. Fung, R. F., Wu, J. W., and Wu, S. L., Exponential stabilization of an axially moving string by linear boundary feedback, *Automatica*, Vol. 44, pp. 177-181, 1999.
- [12]. Queiroz, M., Dawson, D. M., Rahn, C. D., and Zang, F., Adaptive vibration control of an axially moving string, *ASME Journal of Dynamics Vibration and Acoustics*, Vol. 121, pp. 41-49, 1999.
- [13]. Fung, R. F., Wu, J. W., and Lu, P. Y., Adaptive boundary control of an axially moving system, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 124, pp. 435-440, 2002.
- [14]. [Li, Y., Aron, D., and Rahn, C. D., Adaptive vibration isolation for axially moving string: theory and experiment,

- Automatica*, Vol. 38, pp. 379-390, 2002.
- [15]. Yang, K.-Y., Hong, K.-S., and Matsuno, F., Robust adaptive boundary control of an axially moving string under a spatiotemporally varying tension, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 273, pp. 1007-1029, 2004.
- [16]. Kim, C.-W., Park, H., and Hong, K.-S., Boundary control of axially moving continua: application to a zinc galvanizing line, *International of Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1029, 2005.
- [17]. Yang, K.-Y., Hong, K.-S., and Matsuno, F., Robust boundary control of an axially moving string by using a PR transfer function, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 50, No. 12, pp. 2053-2058, 2005.
- [18]. Chen, L. Q. and Zhang, W., Adaptive vibration reduction of an axially moving string via a tensioner, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, pp. 1409-1415, 2006.
- [19]. Li, T. and Hou, Z., Exponential stabilization of an axially moving string with geometrical nonlinearity by a linear boundary feedback, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 296, pp. 861-870, 2006.
- [20]. Li, T. and Hou, Z., Stabilization analysis of a generalized nonlinear axially moving string by boundary velocity feedback, *Automatica*, Vol. 44, pp. 498-503, 2008.
- [21]. Wickert, J. A., Non-linear vibration of a traveling tensioned beam, *International Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 27, No. 3, pp. 503-517, 1992.
- [22]. Li, Y. and Rahn, C. D., Adaptive vibration isolation for axially moving beams, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, pp. 419-428, 2000.
- [23]. Zhu, W. D., Ni, J., and Huang, J., Active control of translating media with arbitrarily varying length, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 123, pp. 347-358, 2001.
- [24]. Yang, K.-Y., Hong, K.-S., and Matsuno, F., Energy-based control of axially translating beams: varying tension, varying speed and disturbance adaptation, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 1045-1054, 2005.
- [25]. Yang, K.-Y., Hong, K.-S., and F. Matsuno, Boundary control of a translating tensioned beam with varying speed, *IEEE Transactions on Mechatronics*, Vol. 10, No. 5, pp. 594-597, 2005.
- [26]. Nguyen, Q. C., and Hong, K.-S., Asymptotic stabilization of a nonlinear axially moving string by adaptive boundary control, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 15, pp. 4588-4603, 2010.
- [27]. Nguyen, Q. C., Ngo, Q. H., and Hong, K.-S., Adaptive control of an axially moving string under spatiotemporally varying tension via a hydraulic actuator, *Proceedings of ICROS-SICE 2009, Japan*, pp. 293-297.
- [28]. Nguyen, Q. C., Ngo, Q. H., and Hong, K.-S., Active vibration control of an axially moving beam using varying velocity method, *Proceedings of ICROS-SICE 2009*, pp. 287-292, 2009.
- [29]. Ngo, Q. H. and Hong, K.-S., Adaptive control an axially moving system, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 11, pp. 3071-3078, 2009.
- [30]. Kim, C.-S. and Hong, K.-S., Boundary

- control of container cranes from the perspective of controlling an axially moving string system, *International of Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 7, No.3, pp. 437-455, 2009.
- [31]. Chao, P. C. P. and Lai, C. L., Boundary control of an axially moving string via fuzzy sliding-mode control and fuzzy neural network methods, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 262, pp. 795-813, 2009.
- [32]. How, B. W. E., Ge, S. S., and Y. S. Cho, Control of coupled vessel, crane, cable, and payload dynamics for subsea installation operations, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 19, pp. 795-813, 2009.