



## ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CỦA MÁY RẢI LOẠI BA BÁNH BẰNG THUẬT TOÁN BÁM THEO

Vũ Anh Tuấn<sup>1\*</sup>, Nguyễn Ngọc Linh<sup>2</sup>, Đoàn Yên Thế<sup>2</sup>, Đặng Ngọc Duyên<sup>3</sup>

**Tóm tắt:** Trong bài báo này, áp dụng thuật toán bám theo để mô tả chuyển động thẳng của máy rải bê tông tự hành loại ba bánh sử dụng cảm biến lái kiểu quét dây. Cụ ly đặt trước được đề xuất dựa trên yêu cầu kỹ thuật tạo hình về độ trơn hình dạng của sản phẩm. Thuật toán được đề xuất được so sánh với thuật toán bám theo với cụ ly đặt trước phụ thuộc vào bán kính quay vòng tối thiểu để kiểm nghiệm độ chính xác.

**Từ khóa:** Máy rải bê tông; điều khiển kiểu bám theo; cảm biến lái.

**Path tracking for paving machine by using the pure pursuit algorithm**

**Abstract:** In this paper, the pure pursuit algorithm is used to describe the linear motion of a three-wheel self-propelled paving machine using a stringline steering sensor. The proposal of look-ahead distance is based on the requirements for pavement smoothness. For checking the accuracy, the proposed algorithm is compared to the algorithm using the look-ahead distance depending on the minimum turning radius.

**Keywords:** Concrete paving machine; pure pursuit control; steering sensor.

Nhận ngày 10/5/2017, sửa xong 12/6/2017, chấp nhận đăng 23/6/2017  
Received: May 10, 2017; revised: June 12, 2017; accepted: June 23, 2017



### 1. Giới thiệu

Trong thi công đường hiện đại thường sử dụng máy rải bê tông tự hành với nguyên lý khuôn trượt ngang. Các loại máy cỡ trung và nhỏ thường dùng để thi công các hạng mục phụ trợ như vỉa hè, cống thoát nước hồ, bó vỉa, với cơ cấu di chuyển loại ba bánh. Các loại máy rải được trang bị cảm biến phục vụ chức năng lái và điều chỉnh cao độ tự động, phổ biến là cảm biến kiểu quét dây. Phương pháp dẫn hướng cho máy bằng dây căng giúp tăng độ trơn cho hình dạng của sản phẩm [1]. Kể từ khi ra đời từ những năm 1960 cho đến nay, các loại cảm biến và hệ thống điều khiển chức năng lái và điều chỉnh cao độ đã được cải tiến để đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về sai số tạo hình cũng như tính thẩm mỹ. Cùng với đó là sự phát triển các thuật toán nhằm nâng cao độ chính xác việc điều khiển chuyển động của máy theo quỹ đạo định trước. Phương pháp điều khiển kiểu bám theo được đề xuất đầu những năm 1990 [2] là một trong những phương pháp hình học được áp dụng phổ biến và hiệu quả nhất [3]. Phương pháp này được sử dụng để tính toán độ cong của quãng đường máy di chuyển từ vị trí hiện tại tới một điểm xác định, gọi là điểm đích. Chiều dài của dây cung được gọi là cụ ly đặt trước. Những ưu điểm chính của thuật toán này là tính toán đơn giản, có thể điều chỉnh cụ ly đặt trước để cải thiện độ chính xác.

Trong bài báo này phương pháp điều khiển kiểu bám theo được áp dụng để mô tả chuyển động thẳng của máy rải bê tông tự hành loại ba bánh sử dụng cảm biến lái kiểu quét dây. Cụ ly đặt trước được đề xuất dựa trên yêu cầu kỹ thuật tạo hình về độ trơn hình dạng của sản phẩm. Để kiểm nghiệm độ chính xác, thuật toán này được so sánh với thuật toán bám theo với cụ ly đặt trước phụ thuộc vào bán kính quay vòng tối thiểu [4].



### 2. Điều khiển bám quỹ đạo của máy rải loại 3 bánh

#### 2.1 Chuyển động của máy rải dẫn hướng bằng dây căng

Trong Hình 1 là một máy rải sử dụng nguyên lý khuôn trượt ngang, có bộ phận tạo hình sản phẩm bao gồm phễu nạp liệu, đầm dùi thủy lực đặt bên trong phễu và khuôn tạo hình nằm dưới phễu được lắp ở

<sup>1</sup>ThS, Khoa Cơ khí Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

<sup>2</sup>TS, Trường Đại học Thủy lợi.

<sup>3</sup>KS, Trường Đại học Thủy lợi.

\*Tác giả chính. E-mail: tuanva3@nuce.edu.vn.

một bên của máy. Hệ di chuyển của máy gồm 1 cụm bánh xích phía trước và 2 cụm bánh lốp phía sau. Bánh trước là bánh chủ động dẫn động bằng động cơ thủy lực, đồng thời cũng là bánh lái điều khiển bằng xi lanh thủy lực. Khi tạo hình, bê tông tươi đổ sụt thấp được cấp vào phễu nạp liệu từ bên ngoài bằng ô tô chở bê tông và được làm chặt trong khuôn nhờ đầm dùi thủy lực, kết hợp với việc di chuyển máy về phía trước để tạo hình sản phẩm trên mặt nền. Máy được điều khiển lái tự động với cảm biến lái kiểu quét dây. Khi phát hiện được sai lệch, cảm biến sẽ truyền tín hiệu tới bộ điều khiển van phân phối thủy lực điều khiển xi lanh lái để khuôn trở về quỹ đạo mong muốn. Quỹ đạo di chuyển của khuôn, bánh dẫn hướng và tác động của cảm biến kiểu quét dây được mô tả trên Hình 2.

Trong thực tế, do thi công trên công trường nên độ trơn hình dạng của sản phẩm tạo hình bị ảnh hưởng bởi nhiều nguyên nhân khác nhau, trong đó có thể kể đến hai nguyên nhân chủ yếu là sai số do máy tạo ra và do dây căng. Qua thực nghiệm, Rasmussen và cộng sự [1] đã đưa ra ba yếu tố chính của dây căng ảnh hưởng đến độ trơn hình dạng của sản phẩm là cọc neo dây, độ võng dây, và sai số lắp đặt. Nếu bỏ qua ảnh hưởng của dây căng, sai lệch theo phương ngang của sản phẩm sẽ được quyết định bởi hai yếu tố chính là khoảng tác động của cảm biến và góc lái của máy như mô tả trên Hình 2. Với mỗi khoảng tác động ở hai bên so với vị trí 0 của cảm biến thì bánh lái sẽ có góc quay tương ứng là  $\delta$ , máy có chuyển động quay vòng qua lại giữa hai trục I và II trong khoảng cách  $\Delta x$ . Nói một cách khác, độ lệch theo phương ngang của sản phẩm bằng tổng sai số so với đường chuẩn  $e$ . Với mỗi sai số  $e$  định trước, độ trơn hình dạng của sản phẩm phụ thuộc vào số cung cong trên một khoảng chiều dài của sản phẩm. Do đó, có thể thấy sự phụ thuộc của độ trơn hình dạng của sản phẩm với góc lái máy  $\delta$ .

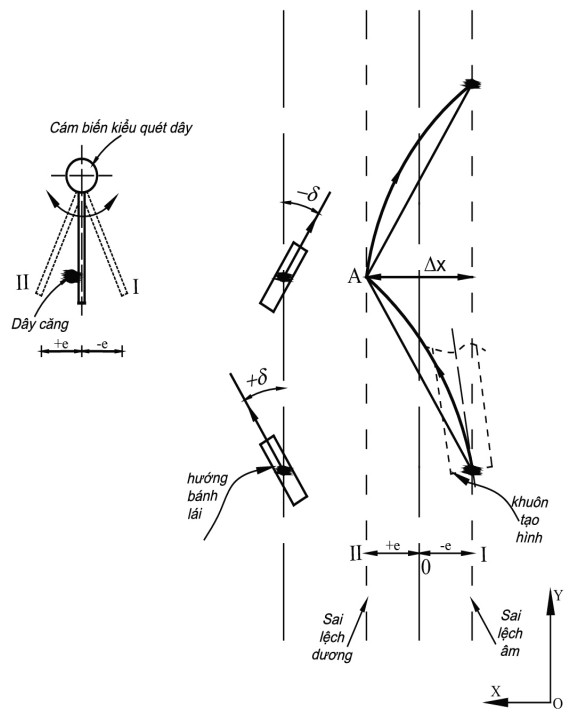
## 2.2 Luật điều khiển theo độ trơn hình dạng của sản phẩm

Trên Hình 4 biểu diễn máy đúc bó vỉa tự hành loại 3 bánh đang ở vị trí tạo hình sản phẩm thẳng, di chuyển với vận tốc không đổi  $v = \text{const}$  với góc lái của bánh trước  $\delta$ . Hệ tọa độ tổng thể được ký hiệu là OXY, còn hệ tọa độ di động gắn trên xe là oxy có gốc đặt tại trục khuôn ở đầu ra, trục y trùng với trục dọc của khuôn đồng thời cũng là trục dọc của máy, trục x đi qua miệng khuôn và trục hai cụm bánh sau. Áp dụng phương pháp bám theo được đề xuất trong [2], các bước tính toán là:

- Bước 1. Xác định vị trí hiện tại của xe trong tọa độ tổng thể: vị trí và góc của máy trong hệ tọa độ tổng thể được xác định qua tọa độ (X, Y) của điểm o trên khuôn và góc  $\theta$  như Hình 4.



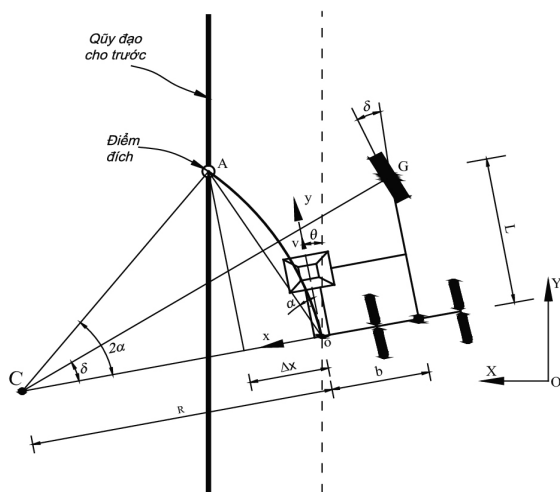
**Hình 1.** Máy rải bê tông loại 3 bánh với cảm biến lái kiểu quét dây



**Hình 2.** Quỹ đạo di chuyển của khuôn, bánh dẫn hướng và tác động của cảm biến kiểu quét dây  
A - điểm đích;  $e$  - sai số theo phương ngang so với đường chuẩn;  $\Delta x$  - độ lệch;  $v$  - vận tốc di chuyển của máy;  $\delta$  - góc lái bánh dẫn hướng



**Hình 3.** Sai lệch theo phương ngang của sản phẩm sau tạo hình



**Hình 4.** Mô tả hình học quỹ đạo di chuyển của máy bó vỉa loại 3 bánh

Do trong quá trình tạo hình máy chuyển động với vận tốc chậm nên có thể giả thiết bỏ qua sự trượt giữa các bánh xe và nền. Từ (1) có điều kiện chuyển động không trượt là:

$$\dot{X} \sin \theta - \dot{Y} \cos \theta = 0 \quad (2)$$

Với điều kiện chuyển động không trượt (2), quãng đường di chuyển của khuôn  $oA$  sẽ là cung tròn bán kính  $R$ , có chiều dài dây cung hay còn được gọi là cự ly đặt trước  $d$ . Giả sử  $d$  đã biết, trong bước 4, tọa độ điểm đích  $A$  từ hệ tọa độ tổng thể,  $(X_A, Y_A)$ , được chuyển đổi về tọa độ địa phương oxy,  $(x_A, y_A)$ , bằng công thức chuyển trục toạ độ:

$$x_A = X_A \cos \theta - Y_A \sin \theta; \quad y_A = X_A \sin \theta + Y_A \cos \theta \quad (3)$$

Trong hệ tọa độ địa phương oxy, ta có:  $x_d^2 + y_d^2 = d^2$  (4)

$$\text{v\grave{a}} \quad R = \frac{d}{2 \sin \alpha} \quad (5)$$

trong đó:  $\alpha$  là góc quay vòng. Cụ ly đặt trước  $d$  và hình chiếu  $\Delta x$  của  $d$  trên  $oy$  có liên hệ:

$$d = \frac{\Delta x}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Thay (6) vào (5) được:  $R = \frac{d^2}{2\Delta x} \sin \alpha$  (7)

Mặt khác, bán kính quay vòng  $R$  và góc lái  $\delta$  có liên hệ:

$$\tan \delta = \frac{L}{R+b} \quad (8)$$

trong đó:  $L$  là cơ sở bánh xe;  $b$  là khoảng cách tính từ trục khuôn đến trục máy. Thay (7) vào (8) có:

$$\tan \delta = \frac{2L\Delta x}{d^2 + 2h\Delta x} \quad (9)$$

Hoặc có thể biểu diễn dưới dạng:

$$\delta = a \tan \left[ \frac{2L\Delta x}{d^2 + 2b\Delta x} \right] \quad (10)$$

(9) hay (10) thường được gọi là phương trình xác định luật điều khiển của máy. Nếu biết  $d$  thì (9) hay (10) hoàn toàn xác định. Quay lại bước 3, để xác định điểm đích  $A$  thì  $d$  thường được chọn theo một điều kiện cụ thể. Trong [4], Kim và cộng sự đề xuất chọn  $d$  là hàm của vận tốc  $v$  và vận tốc góc lớn nhất  $\omega_{\max'}$   $d=2v/\omega_{\max'}$  hay cũng là hàm phụ thuộc bán kính quay vòng nhỏ nhất của máy  $R_{\min}$ :  $d = 2R_{\min}$  (11)

Trong bài báo này đề xuất một cách xác định  $d$  dựa trên yêu cầu kỹ thuật của sản phẩm. Từ Hình 2 cho thấy độ lệch theo phương ngang của sản phẩm là tổng của các sai số theo hai phía:  $\Delta x = 2|e|$  (12)

Để độ lệch theo phương ngang của sản phẩm đạt yêu cầu kỹ thuật về tạo hình, cụ thể là trong mỗi đoạn chiều dài được kiểm tra của sản phẩm  $l_{cp}$  chỉ có tối đa 1 điểm gãy khúc, nghĩa là  $d > l_{cp}$ . Nếu cự ly đặt trước  $d > l_{cp}$  thì sai lệch hình dạng của sản phẩm theo phương ngang sẽ có hiện tượng như Hình 3. Do đó, có thể đặt



$$d = nl_{cp} \quad (13)$$

trong đó:  $n$  là hệ số tỉ lệ,  $n \geq 1$ .

$$(14)$$

$$\text{Thay (12) và (13) vào (9), được: } \tan \delta = \frac{4L|e|}{n^2 l_{cp}^2 + 4b|e|} \quad (15)$$

Luật điều khiển (15) xác định sự phụ thuộc của góc lái máy với sai số của sản phẩm  $e$ , khoảng cách lắp khuôn  $b$ , cơ sở bánh xe  $L$ , độ dài kiểm tra  $l_{cp}$  và hệ số tỉ lệ  $n$ . Từ (15) rút ra:

$$n^2 = \frac{4|e|(L - b \tan \delta)}{l_{cp}^2 \tan \delta} \quad (16)$$

$$(16) \text{ là phương trình bậc hai đối với } n. \text{ Theo điều kiện (14) có: } \tan \delta \leq \frac{4L|e|}{l_{cp}^2 + 4b|e|} \quad (17)$$

Với góc lái nhỏ  $\tan \delta \approx \delta$ , thay vào (17) thu được công thức xác định góc lái lớn nhất:

$$\delta_{\max} = \frac{4L|e|}{l_{cp}^2 + 4b|e|} \quad (18)$$

Độ cong của quỹ đạo đường  $oA$  bán kính  $R$  cũng chính là độ cong của sản phẩm  $\gamma = \frac{1}{R}$ . Từ (7), (12) có

$$\gamma = \frac{2\Delta x}{d^2} = \frac{4|e|}{n^2 l_{cp}^2} \quad (19)$$

Kết hợp điều kiện (14) và (19) xác định được độ cong lớn nhất:

$$\gamma_{\max} = \frac{4|e|}{l_{cp}^2} \quad (20)$$

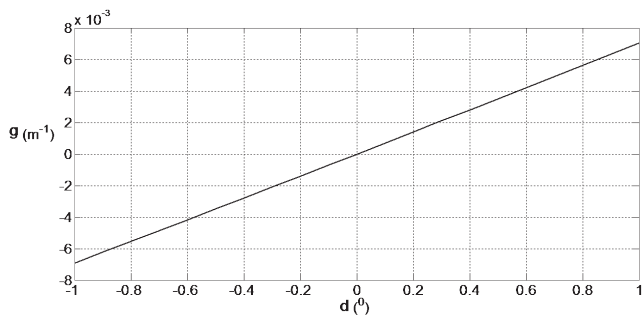
Các công thức (15), (19) được sử dụng để tính toán trong bước 5 của phương pháp bấm theo. Trong bước 6, tọa độ của khuôn tại điểm đích vừa xác định được sử dụng làm điểm xuất phát cho quỹ đạo di chuyển kế tiếp, tức là cần chuyển đổi lại về hệ tọa độ tổng thể, sau đó lặp lại các bước tính toán. Đối với trường hợp tạo hình sản phẩm thẳng đang xét, khuôn chỉ có quỹ đạo chuyển động là các cung tròn có cùng bán kính  $R$  nối tiếp nhau như Hình 2, bấm theo quỹ đạo thẳng mong muốn với sai số về hai phía là  $e$ , nên chỉ cần xác định được một quỹ đạo dịch chuyển  $oA$  là có thể xây dựng được chuyển động bấm quỹ đạo của khuôn.

Bảng 1 biểu diễn quan hệ của góc lái, độ cong và cự ly đặt trước với hệ số tỉ lệ của máy đúc bó vỉa BVR-60, các thông số cụ thể là  $|e| = 0.005m$ ,  $l_{cp} = 3m$ ,  $L = 2.5m$ ,  $b = 1.5m$ . Xét các mức độ lệch  $|e| = 5; 10; 15mm$ . Khi tăng độ trơn cho hình dạng của sản phẩm bằng cách tăng giá trị của  $n$ , giá trị của góc lái và độ cong giảm với giá trị góc lái nhỏ hơn  $1^\circ$ , độ cong nhỏ hơn  $0.007$ . Với mỗi cự ly đặt trước, nếu sai số càng nhỏ thì giá trị của góc lái và độ cong càng giảm. Từ công thức (8) có thể vẽ được đồ thị biểu diễn độ cong với góc lái (Hình 5). Với các thông số  $L$ ,  $b$  và giá trị của góc lái  $\delta \leq 1^\circ$  như đang xét trong Bảng 1, quan hệ giữa độ cong  $\gamma$  và góc lái  $\delta$  gần như tuyến tính khi khuôn bấm theo quỹ đạo thẳng.

**Bảng 1.** Quan hệ của góc lái, độ cong, cự ly đặt trước với hệ số tỉ lệ,  $l_{cp} = 3m$ ,  $L = 2.5m$ ,  $b = 1.5m$

$n$	$ e  = 5mm$		$ e  = 10mm$		$ e  = 15mm$		$d (m)$
	$\delta (độ)$	$\gamma (m^{-1})$	$\delta (độ)$	$\gamma (m^{-1})$	$\delta (độ)$	$\gamma (m^{-1})$	
1.0	0.317	0.0022	0.632	0.0044	0.945	0.0067	3.0
1.1	0.262	0.0018	0.523	0.0037	0.783	0.0055	3.3
1.2	0.221	0.0015	0.440	0.0031	0.659	0.0046	3.6
1.3	0.188	0.0013	0.375	0.0026	0.562	0.0039	3.9
1.4	0.162	0.0011	0.324	0.0023	0.485	0.0034	4.2
1.5	0.141	0.0010	0.282	0.0020	0.423	0.0030	4.5
1.6	0.124	0.0009	0.248	0.0017	0.372	0.0026	4.8
1.7	0.110	0.0008	0.220	0.0015	0.329	0.0023	5.1
1.8	0.098	0.0007	0.196	0.0014	0.294	0.0021	5.4
1.9	0.088	0.0006	0.176	0.0012	0.264	0.0018	5.7
2.0	0.080	0.00056	0.159	0.0011	0.238	0.0017	6.0

Sử dụng cự ly đặt trước theo công thức (11) do Kim và cộng sự đề xuất [4], với bán kính quay vòng nhỏ nhất của máy  $R_{min} = 1$  m, thì góc lái chỉ duy trì ở giá trị  $\delta = 0.9454^\circ$ , tương đương với  $n = 1$  và sai số  $lel = 15$ mm khi sử dụng cự ly đặt trước theo công thức (13). Nói một cách khác, bằng cách tăng giá trị của hệ số tỉ lệ  $n$  thì luật điều khiển theo độ trơn hình dạng đang xét có thể tăng độ trơn hình dạng cho sản phẩm với mức sai số nhỏ hơn. Tuy nhiên, cũng cần chú ý là cự ly đặt trước theo bán kính quay vòng nhỏ nhất do Kim và cộng sự đề xuất có thể áp dụng chung cho xe bám theo quỹ đạo ở dạng đường thẳng và đường cong, còn cự ly đặt trước theo độ trơn hình dạng mới chỉ xét đến quỹ đạo ở dạng đường thẳng.



**Hình 5.** Đồ thị biểu diễn độ cong với góc lái



### 3. Kết luận

Trong bài báo này, chuyển động thẳng của máy rải bê tông tự hành loại ba bánh sử dụng cảm biến lái kiểu quét dây được mô tả dựa trên thuật toán bám theo, trong đó luật điều khiển xác định quan hệ giải tích của góc lái máy không những với cơ sở bánh xe và cự ly đặt trước mà còn với sai số của sản phẩm và khoảng cách lắp khuôn. Cự ly đặt trước được đề xuất phụ thuộc độ trơn hình dạng của sản phẩm, với ràng buộc là đáp ứng yêu cầu kỹ thuật tạo hình. So sánh với luật điều khiển theo cự ly đặt trước phụ thuộc vào bán kính quay vòng tối thiểu cho thấy luật điều khiển theo độ trơn hình dạng được đề xuất có thể làm tăng được độ trơn hình dạng của sản phẩm với mức sai số nhỏ hơn. Vì vậy, thuật toán này có khả năng phát triển cho việc điều khiển máy khi tạo hình sản phẩm phức tạp hơn như dạng cung tròn và dạng gấp khúc.

### Tài liệu tham khảo

1. Rasmussen R.O., Karamihas S.K., Cape W.R., Chang G.K., Guntert R.M., (2004), "Stringline Effects on Concrete Pavement Construction", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N°. 1900, TRB, National Research Council, Washington, D.C, 3-11.
2. R. C. Coulter (1992), "Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm", DTIC Document.
3. Samuel M., Hussein M., Mohamad M.B. (2016), "A Review of some Pure-Pursuit based Path Tracking Techniques for Control of Autonomous Vehicle", *International Journal of Computer Applications*, 135(1):35-38.
4. Kim D.H., Han C.S., Lee J.Y. (2012), "Sensor-based motion planning for path tracking and obstacle avoidance of robotic vehicles with", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 178-191.