

Tối ưu hóa thời gian làm việc và độ giật cho hệ cánh tay máy xúc dựa trên việc thiết kế quỹ đạo mẫu

Time and Jeck Optimazition Based Trajectory Generation for Excavator Arm

Vũ Thị Thúy Nga, Nguyễn Tiến Hoàng, Nguyễn Duy Đạt, Thân Văn Cường, Nguyễn Văn Long
 ĐH Bách khoa Hà Nội
 Email: nga.vuthithuy@hust.edu.vn

Abstract

The paper presents a method to generate the reference trajectory for an excavator arm which guarantees the time and jeck optimization based on B-spline technique. Firstly, some via-points of the desired trajectory is given. These points and mechanical constraint about velocity, acceleration, and jeck will be used to solve the optimal problem. From this solution, the trajectory will be interpolated using B-spline method. Finally, the algorithm is executed via Optimization and Simulink toolboxes. The simulation results show that the trajectory designed by this method satisfy the requirements about the smoothness as well as time and jeck optimization.

Keywords

B-spline, excavator, path planning, time and jeck optimization

Tóm tắt¹

Bài báo trình bày một phương pháp thiết kế quỹ đạo mẫu tối ưu thời gian và độ giật cho hệ cánh tay máy xúc dựa trên kỹ thuật B-spline. Đầu tiên, một số điểm đi qua của quỹ đạo mong muốn được cho trước. Từ các điểm này, cùng các ràng buộc cơ khí về vận tốc, gia tốc, và độ giật của các khớp ta sẽ đi giải bài toán tối ưu để xác định thời gian và độ giật hợp lý. Cuối cùng, quỹ đạo mong muốn được nội suy theo phương pháp B-spline từ các kết quả thu được của việc giải bài toán tối ưu. Toàn bộ thuật toán được thực hiện và kiểm nghiệm trên ứng dụng Optimization và Simulink của Matlab. Các kết quả thu được hoàn toàn thỏa mãn các yêu cầu đặt ra của bài toán.

1. Phần mở đầu

Máy xúc là một trong các máy công cụ phổ biến trong các ngành khai thác, xây dựng. Ngày nay, việc tự động hóa các máy móc nói chung và máy xúc nói riêng là một xu thế tất yếu. Việc tự động hóa các máy xúc làm việc trong môi trường hầm mỏ có ý nghĩa rất lớn trong việc giảm thiểu tai nạn rủi ro cho người vận hành. Chính vì vậy, vấn đề này nhận được sự quan tâm lớn của các nhà khoa học.

Trong bài toán tự động hóa cho hệ thống máy xúc thì phần xây dựng quỹ đạo mẫu cho đế máy và cánh tay máy là không thể thiếu, nó giúp cho hệ thống làm việc chính xác và đạt hiệu quả cao hơn. Ở [1], [2] các tác giả đã xây dựng quỹ đạo mẫu cho máy xúc tự động dựa vào máy quét laser, camera và các cảm biến để xây dựng lên quỹ đạo 3D. Với cách làm này, quỹ đạo hoạt động được xác định chính xác dựa vào các hình ảnh hiện trường. Tuy nhiên, phương pháp này

khó có thể cho kết quả chính xác trong môi trường thiếu ánh sáng và nhiều bụi bẩn. Ở [3], các vị trí hiện tại của cánh tay máy xúc được phản hồi về cho hệ thống điều khiển từ đó hệ thống sẽ dự báo ra quỹ đạo mẫu cho các chu kỳ sau. Trong công bố trước đây của nhóm nghiên cứu ở [4], các tác giả đã đề xuất một mạng nơ ron để xác định đặc tính của vật liệu, từ đặc tính xác định được kết hợp với phản lực tác động lên gàu xúc để đưa ra quỹ đạo tối ưu. Trong [5], [6] các tác giả đã xây dựng mô hình động học về sự tương tác giữa tay máy và môi trường để làm căn cứ xác định quỹ đạo đặt. Với phương pháp này, quỹ đạo được xây dựng dựa vào vận tốc và gia tốc của gàu, đây là một đại lượng khó xác định. Cũng dựa vào vận tốc và gia tốc của gàu, ở [7], các tác giả còn cần thêm thông tin về lực tác động của cơ cấu chấp hành để xác định quỹ đạo mẫu dựa trên thuật toán B-spline để thiết kế quỹ đạo tối ưu thời gian và momen cho hệ máy xúc.

Trong bài báo này, một thuật toán xác định quỹ đạo mẫu dựa vào kỹ thuật B-spline được trình bày để xác định quỹ đạo mẫu thỏa mãn yêu cầu tối ưu thời gian và độ giật cho cánh tay máy xúc. Quỹ đạo được xây dựng thông qua một số điểm cho trước. Từ các điểm này, cùng với các ràng buộc về giới hạn vận tốc, gia tốc, và độ giật của mỗi khớp sẽ xác định ra các trọng số để xây dựng đường cong quỹ đạo. Quỹ đạo thu được không những đảm bảo độ trơn mượt cần thiết mà còn đảm bảo các yêu cầu khác như thời gian thực hiện ngắn nhất hay độ giật bé nhất tùy thuộc vào việc lựa chọn trọng số ảnh hưởng của các yếu tố này. Tính đúng đắn và phù hợp của thuật toán được kiểm nghiệm thông qua các kết quả mô phỏng.

2. Nội dung chính

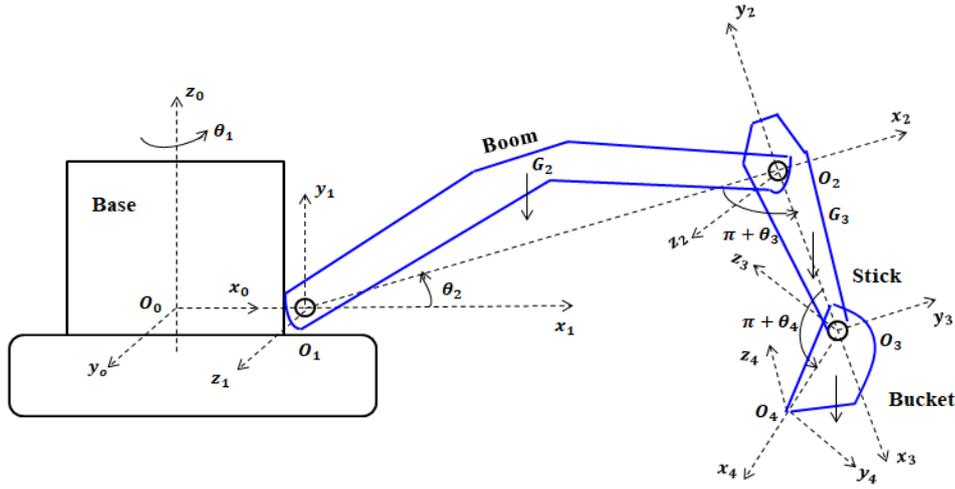
2.1 Xây dựng bài toán tối ưu

Xét hệ thống máy xúc có cấu trúc như Hình H.1. Hệ gồm hai hệ con là phần đế máy dùng để di chuyển

¹ Ngày nhận bài: 04/01/2018; Ngày nhận bản sửa: 03/05/2018; Ngày chấp nhận: 12/05/2018; Phân biên: Lại Khắc Lãi, Đoàn Quang Vinh

toàn bộ hệ thống trên mặt phẳng $x_0O_0y_0$, phần cánh tay máy xúc dùng để di chuyển theo mặt phẳng $z_0O_0y_0$ và $z_0O_0x_0$. Trong phạm vi bài báo này, mục tiêu là xây

dựng quỹ đạo cho gầu xúc trong quá trình xúc tải nên phần đế máy và phần xoay quanh trục O_1z_1 được coi là không đổi.



H.1 Cấu trúc của hệ thống máy xúc

Trong không gian biến khớp, phần cánh tay máy xúc có mô hình dạng Euler-Lagrangian như sau [8]:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + B(\dot{\theta}) = \Gamma\tau - F_L \quad (1)$$

trong đó: $\theta = [\theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]$ là vị trí của các khớp trong không gian biến khớp, $D(\theta)$ là thành phần quán tính, $C(\theta, \dot{\theta})$ là thành phần Coriolis và hướng tâm, $G(\theta)$ là thành phần trọng trường, $B(\dot{\theta})$ là thành phần ma sát, Γ là ma trận đầu vào, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]$ là lực tác dụng lên các trục của 3 khớp, F_L là thành phần phản lực.

Các đáp ứng của hệ (1) phải thỏa mãn các yêu cầu cứng về mặt cơ khí như, vận tốc, gia tốc, độ giật của các khớp. Cụ thể như sau:

$$\begin{cases} |\dot{\theta}_i| \leq VC_i, & i = 1, 2, 3 \\ |\ddot{\theta}_i| \leq WC_i, & i = 1, 2, 3 \\ |\dddot{\theta}_i| \leq JC_i, & i = 1, 2, 3 \end{cases}$$

trong đó VC_i, WC_i, JC_i là giới hạn vận tốc, gia tốc, và độ giật của mỗi khớp.

Ngoài các điều kiện cứng trên, quá trình làm việc của hệ còn phải thỏa mãn các yêu cầu về mặt công nghệ như tối ưu về thời gian làm việc của mỗi chu trình, tối ưu hóa năng lượng sử dụng... Trong khuôn khổ bài báo này, nhóm tác giả tập trung vào việc đảm bảo yêu cầu về tối ưu thời gian và độ giật cho cánh tay máy thông qua việc thiết kế quỹ đạo mẫu phù hợp. Tức là quỹ đạo tạo ra cho cánh tay máy phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$k_T t_f + k_J \sum_{m=1}^N \int_0^{t_f} (\ddot{\theta}_m(t))^2 dt \rightarrow \min \quad (2)$$

cùng với các ràng buộc (2), trong đó $k_T, k_J > 0, N$ là số khớp, t_f là thời gian thực hiện một chu trình của quỹ đạo.

2.2 Xác định quỹ đạo mẫu từ việc giải bài toán tối ưu

Một trong các phương pháp để xây dựng quỹ đạo mẫu là dựa vào kỹ thuật B-spline. Với kỹ thuật này, một đường cong bất kỳ sẽ được biểu diễn dưới dạng một đa thức bậc p , đó là sự kết hợp tuyến tính giữa một hàm cơ sở và các trọng số [9] (còn được gọi là các điểm điều khiển):

$$B_p(t) = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot N_{i,p}(t) \quad (3)$$

trong đó n là số điểm điều khiển, Q_i là các điểm điều khiển, $N_{i,p}(t)$ là hàm cơ sở được cho dưới dạng hồi quy:

$$\begin{cases} N_{i,p}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+p}-t_i} \cdot N_{i,p-1}(t) \\ \quad + \frac{t_{i+p+1}-t}{t_{i+p+1}-t_{i+1}} \cdot N_{i+1,p-1}(t) \\ N_{i,0} = \begin{cases} 1, & \text{for } t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Trên tinh thần của phương pháp này, quỹ đạo, vận tốc, gia tốc, và độ giật của mỗi khớp có dạng

$$q(t) = \theta(t) = \sum_{i=1}^n Q_{p,i} \cdot N_{i,p}(t) \quad (5)$$

$$v(t) = \dot{\theta}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} Q_{v,i} \cdot N_{i,p-1}(t) \quad (6)$$

$$a(t) = \ddot{\theta}(t) = \sum_{i=1}^{n-2} Q_{a,i} \cdot N_{i,p-2}(t) \quad (7)$$

$$j(t) = \dddot{\theta}(t) = \sum_{i=1}^{n-3} Q_{j,i} \cdot N_{i,p-3}(t) \quad (8)$$

Các trọng số trong các phương trình (5) – (8) có mối liên hệ với các nút như sau:

$$Q_{v,i} = \frac{p}{U_{q_{1+p+1}} - U_{q_{i+1}}} (Q_{p,i+1} - Q_{p,i}), \quad i = 1, \dots, n \tag{9}$$

$$Q_{a,i} = \frac{p-1}{U_{v_{i+p}} - U_{v_{i+1}}} (Q_{v,i+1} - Q_{v,i}), \quad i = 1, \dots, n-1 \tag{10}$$

$$Q_{j,i} = \frac{p-2}{U_{a_{i+p-1}} - U_{a_{i+1}}} (Q_{a,i+1} - Q_{a,i}), \quad i = 1, \dots, n-2 \tag{11}$$

trong đó U_q, U_v, U_a là các nút trên các đường cong quỹ đạo, vận tốc, và gia tốc. Các nút này được xác định từ thời gian tương ứng với các điểm đi qua.

Thế biểu thức (9) vào (10) sau đó được kết quả lại thay vào (11) sẽ được kết quả là các hệ số của các phương trình (5) – (8) chỉ còn chứa $Q_{p,i}$. Việc xác định $Q_{p,i}$ được xác định dựa vào các điều kiện biên. Cụ thể là:

- Biểu thức (5) phải thỏa mãn các điểm đi qua cho trước.
- Các biểu thức (6), (7), và (8) tương ứng phải thỏa mãn các điều kiện về vận tốc, gia tốc, và độ giật ở thời điểm bắt đầu và kết thúc.

Từ các lập luận trên ta tính toán ra được hệ phương trình ràng buộc cho khớp thứ m như sau:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{p}{U_{q_{p+2}} - U_{q_2}} Q_{p,m,1} + \frac{p}{U_{q_{p+2}} - U_{q_2}} Q_{p,m,2} = v_{m,in} \\ k_1 Q_{p,m,1} + k_2 Q_{p,m,2} + k_3 Q_{p,m,3} = a_{m,in} \\ g_1 Q_{p,m,1} + g_2 Q_{p,m,2} + g_3 Q_{p,m,3} + g_4 Q_{p,m,4} = j_{m,in} \\ \sum_{k=1}^{vp} N_{p,k}(\tau_i) Q_{p,m,k} = VPR_{m,i}, \quad (i = 1, \dots, vp) \\ g_{n-2} Q_{p,m,n-2} + g_{n-1} Q_{p,m,n-1} + g_n Q_{p,m,n} + g_{n+1} Q_{p,m,n+1} = j_{m,fin} \\ k_{n-1} Q_{p,m,n-1} + k_n Q_{p,m,n} + k_{n+1} Q_{p,m,n+1} = a_{m,fin} \\ -\frac{p}{U_{q_{n+p+1}} - U_{q_{n+1}}} Q_{p,m,n} + \frac{p}{U_{q_{n+p+1}} - U_{q_{n+1}}} Q_{p,m,n+1} = v_{m,fin} \end{array} \right. \tag{12}$$

Trong công thức (12), các ký hiệu $v_{m,in}, a_{m,in}, j_{m,fin}, v_{m,fin}, a_{m,fin}, j_{m,fin}$ là các giá trị ban đầu và kết thúc của vận tốc, gia tốc, và độ giật tương ứng với khớp thứ m . $VPR_{m,i}$ là các điểm đi qua của khớp thứ m .

Sau khi đã xác định được các hệ số Q_p, Q_v, Q_a , và Q_j , bài toán tối ưu (3) được viết lại thành:

$$J = k_T \sum_{i=1}^{vp} t_i + k_J \sum_{m=1}^N \int_0^{t_f} \left(\sum_{k=1}^{n-2} Q_{j,m,k} \cdot N_{p-3,k}(t) \right)^2 dt \tag{13}$$

trong đó vp là số điểm đi qua.

Giải bài toán tối ưu (13) thu được kết quả là thời gian di chuyển giữa các điểm đi qua. Từ kết quả này, dựa vào (4) sẽ xác định được các đường cong cho quỹ đạo, vận tốc, gia tốc, và độ giật theo các phương trình (5) – (8).

Tóm lại, quy trình để xây dựng quỹ đạo mẫu cho cánh tay máy xúc được thực hiện theo các bước sau:

- **Bước 1:** Cho trước các điểm đi qua, các ràng buộc về cơ khí, các giá trị ban đầu và kết thúc về vận tốc, gia tốc, độ giật của mỗi khớp.
- **Bước 2:** Giải hệ phương trình (12) để xác định các Q_p .
- **Bước 3:** Sử dụng (9), (10), và (11) để tính các Q_v, Q_a , và Q_j .

- **Bước 4:** Giải (13) để xác định các khoảng thời gian tối ưu t_i .
- **Bước 5:** Tính các $N_{i,p}$ từ (4).
- **Bước 6:** Xây dựng các đường cong cần thiết từ (5) – (8).

3. Kết quả mô phỏng

Thuật toán trình bày ở trên được tiến hành mô phỏng trên công cụ Matlab/Simulink. Các dữ liệu ban đầu của bài toán được cho trong các bảng dưới đây. Cụ thể, bảng 3 chứa các điểm đi qua của quỹ đạo mong muốn, bảng 4 chứa các giá trị giới hạn động học của các khớp.

Lựa chọn các giá trị ban đầu và kết thúc cho vận tốc, gia tốc, và độ giật bằng 0. Giải hệ phương trình (12) ta thu được các giá trị của Q_p như trong bảng 3.

Từ các dữ liệu trên, hàm mục tiêu J được xây dựng và đưa vào công cụ Optimization Tool trong Matlab để tính toán. Kết quả việc giải bài toán tối ưu là thời gian di chuyển giữa các điểm đi qua. Kết quả này phụ thuộc vào hệ số k_T và k_J xuất hiện trong biểu thức của hàm mục tiêu. Bảng 4 và 5 là kết quả của việc giải bài toán tối ưu tương ứng với 2 trường hợp là:

- Trường hợp 1: $k_T = 1, k_J = 0$
- Trường hợp 2: $k_T = 1, k_J = 10$

B.1 Các điểm đi qua cho trước

Khớp	Điểm đi qua (rad)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.6895	0.6417	0.5045	0.4259	0.3951	0.5683	0.6985	0.7857
2	-1.503	-1.580	-1.803	-1.938	-2.021	-2.040	-2.033	-2.026
3	0.8137	0.9381	1.2980	1.5125	1.6258	1.4717	1.3349	1.2403

B.2 Các ràng buộc về động học cho các khớp

Khớp	Các ràng buộc về động học		
	Vận tốc (rad/s)	Gia tốc (rad/s ²)	Độ giật (rad/s ³)
1	1.7453	1.0472	1.0472
2	1.7453	1.0472	1.0472
3	1.7453	1.0472	1.0472

B.3 Giá trị Q_p của các khớp

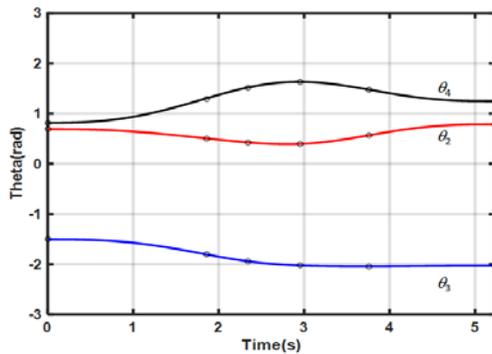
Khớp	1	2	3	4	5	6	7
1	0.6895	0.5872	0.4238	0.3233	0.6399	0.7857	
2	-1.5033	-1.6258	-1.9841	-2.0443	-2.0490	-2.0260	
3	0.8137	1.0386	1.5603	1.7211	1.4088	1.2403	

B.4 Nghiệm của bài toán tối ưu với $k_T = 1, k_J = 0$

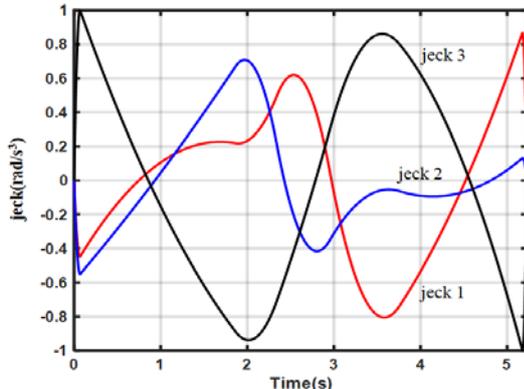
t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
0.07	1.79	0.48	0.61	0.80	1.42	0.05

B.5 Nghiệm của bài toán tối ưu với $k_T = 1, k_J = 10$

t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
0.07	3.06	0.88	0.93	1.69	2.45	0.05



a) Quỹ đạo của các khớp



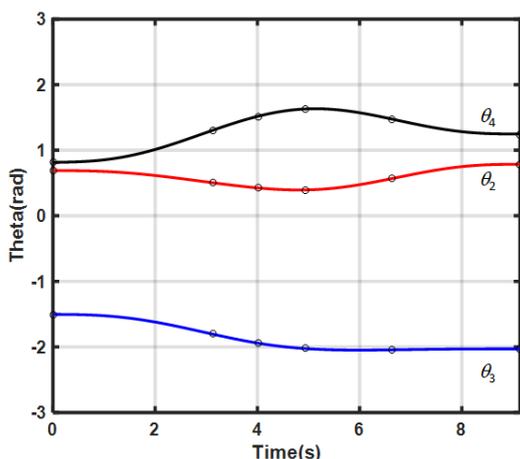
b) Độ giật của các khớp

H. 2 Quỹ đạo và độ giật của các khớp khi $k_T = 1, k_J = 0$

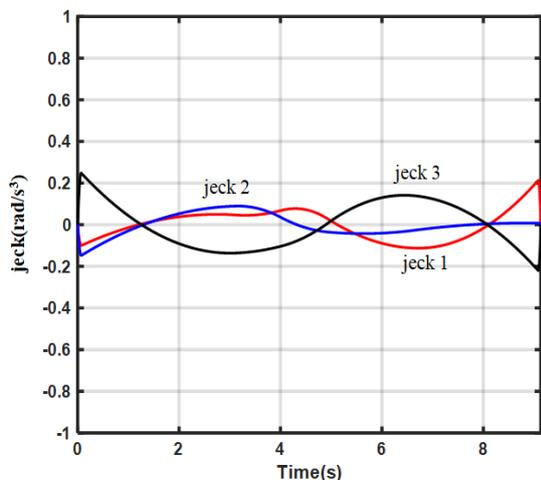
Hình 2 là kết quả mô phỏng cho trường hợp $k_T = 1, k_J = 0$, tức là chỉ quan tâm đến yếu tố tối ưu thời

gian. Trong trường hợp này, quỹ đạo xây dựng được từ 8 điểm đi qua cho trước khá trơn. Thời gian để đi từ điểm đầu đến điểm cuối khoảng 5.3s, độ giật lớn nhất của các khớp là 1rad/s³.

Hình 3 là kết quả mô phỏng cho trường hợp có xét đến tối ưu độ giật, cụ thể là $k_T = 1, k_J = 10$. Các kết quả cho thấy rằng, trong trường hợp này quỹ đạo vẫn đảm bảo đi qua 8 điểm cho trước nhưng thời gian để thực hiện dài hơn so với trường hợp trước (khoảng 9s). Tuy nhiên, lúc này, do có tính đến yếu tố tối ưu độ giật nên độ giật tối đa của các khớp chưa đến 0.3rad/s³.



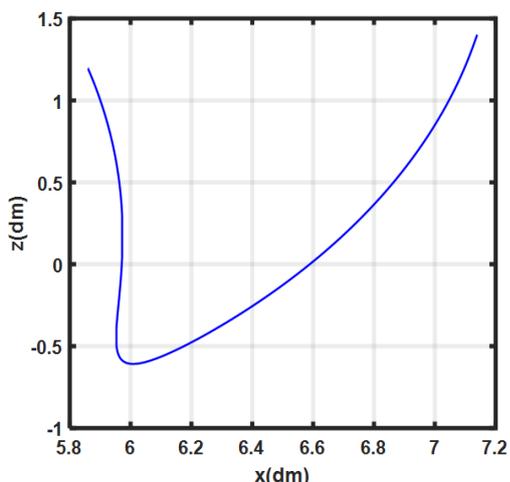
a) Quỹ đạo của các khớp



b) Độ giạt của các khớp

H. 3 Quỹ đạo và độ giạt của các khớp khi $kT = 1, kJ = 10$.

Hình 4 là quỹ đạo của gầu xúc trên không gian 3 chiều được xây dựng từ các quỹ đạo trên không gian khớp của 3 khớp.



H. 4 Quỹ đạo của gầu xúc trên hệ tọa độ xyz

Từ các kết quả mô phỏng ta nhận thấy rằng phương pháp đã trình bày ở trên tạo ra quỹ đạo là các đường cong trơn, đảm bảo được các yêu cầu về tối ưu

thời gian và độ giạt. Việc lựa chọn yếu tố cần tối ưu cũng như mức độ ưu tiên của các yếu tố này được thực hiện thông qua việc lựa chọn các trọng số ảnh hưởng trong hàm tối ưu. Khi ta chọn trọng số tối ưu thời gian là chủ đạo thì thời gian để thực hiện một chu trình khá ngắn nhưng độ giạt của các khớp lớn. Ngược lại, khi ta để trọng số của tối ưu độ giạt vượt trội so với tối ưu thời gian thì độ giạt của các khớp giảm đi đáng kể nhưng thời gian thực hiện một chu trình sẽ tăng lên.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp để xây dựng quỹ đạo mẫu cho hệ cánh tay máy xúc dựa trên phương pháp B-spline. Quỹ đạo được xây dựng từ các điểm đi qua mong muốn kết hợp với kết quả tính toán tối ưu về các yêu cầu công nghệ nên nó thỏa mãn được các yêu cầu về độ trơn mượt cũng như thời gian làm việc, độ giạt của máy. Toàn bộ thuật toán được tính toán và mô phỏng trên phần mềm Matlab. Các kết quả thu được chứng tỏ rằng thuật toán đã trình bày phù hợp cho việc thiết kế quỹ đạo mẫu cho hệ cánh tay máy xúc.

Acknowledgments

This work is funded by Ministry of Education and Training (MOET) under the grand number: B2018-BKA-70

Tài liệu tham khảo

- [1] Shao H, Yamamoto H, Sakaida Y, Yamaguchi T, Yanagisawa Y, Nozue A (2008) *Automatic Excavation Planning of Hydraulic Excavator*. International Conference on Intelligent Robotics and Applications
- [2] Stentz A, Bares J, Singh S, Rowe P (1998) *A robotic excavator for autonomous truck loading*. in Proceedings of the 1998 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems. Victoria, Canada, pp. 1885-1893
- [3] Zweiri YH, Seneviratne LD, Althoefer K (2002) *Model-based automation for heavy duty mobile excavator*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 2967-2972
- [4] Lee S, Hong D, and Park H, (2008) *Optimal path generation for excavator with neural networks based soil models*. in Proceeding of IEEE international Conference on Multisensor Fusion and intergration for intelligent Systems. Seoul, Korea, pp. 632-637
- [5] Wang FY, Lever PJA (1994) *On-Line trajectory planning for autonomous robotic excavation based on force/torque sensor measurements*. in Proceedings of the 1994 IEEE Intemational Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System, Las Vegas, USA, pp. 371-378
- [6] Li Z, Li X, Liu S, Linpeng J (2016) *A study on trajectory planning of hydraulic robotic*

- excavator based on movement stability.* International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)
- [7] Kim Y B, Ha J, Kang H, Kim PY, Park J, Park FC (2013) *Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators.* Automation in Construction, Vol. 35, pp. 568-578
- [8] Liu Y, Hasan MS (2010) *Modelling and remote control of an excavator.* International journal of automation and computing, vol. 7, no. 3, pp. 349-358
- [9] <http://mathworld.wolfram.com/B-Spline.html>