

MÔ HÌNH HOÁ VÀ ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG HỌC NGƯỢC HỆ THỐNG GIÁ TÊN LỬA P60KM SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẢN HỒI VÒNG KÍN

MODELING AND INVERSE KINEMATICS CONTROL P60KM ROCKET RACK SYSTEM USING CLOSED - LOOP INVERSE KINEMATICS

Nguyễn Văn Nam^{1,*}, Dương Xuân Biên¹,
Nguyễn Minh Hồng², Nguyễn Tài Hoài Thanh³, Đỗ Mạnh Tùng³,
Phạm Văn Tuấn¹, Đào Văn Lưu¹, Nguyễn Tú Linh⁴

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả mô hình hóa và bài toán động học ngược dựa trên phương pháp điều khiển phản hồi vòng kín (Closed-loop Inverse Kinematics - CLIK) cho hệ thống giá tên lửa P60KM. Hệ thống được xem xét như một cánh tay robot với ba bậc tự do với giả thiết các khâu là vật rắn tuyệt đối, chưa xem xét đến yếu tố biến dạng đàn hồi trong các khâu và các khớp. Dựa trên lý thuyết DH và cơ học hệ nhiều vật, hệ phương trình động học của hệ thống được xây dựng cụ thể. Kết hợp với các thông số hình học của hệ thống và các giá trị giới hạn theo mô hình thực, bài toán động học ngược được triển khai với đầu vào là quỹ đạo điểm thao tác cuối trong không gian làm việc. Thông qua giải pháp điều khiển phản hồi vòng kín, giá trị các biến khớp được xác định trong giới hạn cho phép và được dùng cho bài toán động học thuận nhằm tìm ra sai số quỹ đạo thao tác. Kết quả mô phỏng số cho thấy, sai số quỹ đạo rất nhỏ, tính ổn định của hệ thống điều khiển được đảm bảo trong thời gian dài. Kết quả nghiên cứu có thể được dùng để tham khảo cho hệ thống điều khiển trong thực tế, làm cơ sở giải quyết bài toán động lực học, tính toán lực/mô men dẫn động cho các khớp, từ đó có căn cứ để chọn hệ truyền động phù hợp với hệ thống.

Từ khóa: Tên lửa P60KM, mô hình hóa, động học ngược, phản hồi vòng kín.

ABSTRACT

This paper presents the results of modeling and inverse kinematics based on Closed-loop Inverse Kinematics (CLIK) for P60KM rocket rack system. The system is considered as a robotic arm with three degrees of freedom assuming the links are absolutely solid, without considering the elastic deformation in the joints and joints. Based on DH theory and many-body mechanics, the system of kinematic equations is specifically built. Combined with the geometrical parameters of the system and the limit values according to the real model, the inverse kinematics problem is implemented with the input as the trajectory of the last operating point in the workspace. Through the closed-loop feedback control solution, the values of the matching variables are determined within the allowable limits and are used for the forward kinematics problem to find the error of the manipulation trajectory. The numerical simulation results show that the orbital error is very small, and the stability of the control system is guaranteed for a long time. The research results can be used as a reference for the control system in practice, as a basis for solving the dynamics problem, calculating the driving force/torque for the joints.

Keywords: P60KM rocket, modeling, inverse kinematics, closed-loop feedback.

¹Trung tâm Công nghệ, Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Khoa Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật Quân sự

³Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự

⁴Khoa Công nghệ thông tin, Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: nguyennam251087@gmail.com

Ngày nhận bài: 27/02/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 29/3/2022

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2022

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, dưới ảnh hưởng của sự phát triển không ngừng của khoa học và công nghệ, nhiều hệ thống tự động hóa được thiết kế mới hoặc được nâng cấp theo xu hướng hiện đại hơn, thông minh hơn. Chúng đáp ứng yêu cầu ngày càng cao trong sản xuất công nghiệp và trong các hoạt động quân sự. Trong số đó, các loại tên lửa cỡ vừa và nhỏ được gắn trên các hệ thống giá cố định trên mặt đất hoặc di động trên các loại xe cơ giới quân sự, tàu hải quân [1-3] nhằm tăng tính cơ động trong hành quân hoặc trong chiến đấu. Dù được lắp đặt cố định hay tích hợp trên các thiết bị di động khác nhau, hệ thống giá tên lửa hiện nay không chỉ có chức năng mang, lưu giữ vốn có [4] mà còn được tích hợp thêm nhiệm vụ chiến đấu đầy đủ với việc thay đổi kết cấu, tăng thêm các chuyển động cơ học và hệ thống điều khiển cần thiết. Nghiên cứu về hệ thống giá tên lửa nói chung và hệ thống giá tên lửa cỡ nhỏ P60KM nói riêng gần như không được

nhắc đến trong các công trình công bố bởi hai lý do. Một là tính bảo mật cao của các thiết bị, khí tài liên quan đến quân sự. Lý do chủ yếu khác là do tên lửa là đối tượng được quan tâm nghiên cứu chủ yếu [5-11] nên hệ thống giá ít được nhắc đến trong các công bố như là một hệ thống phụ [13]. Các hệ thống phóng tên lửa cỡ lớn được quan tâm nhiều hơn [7-9] hoặc hệ thống tên lửa được lắp cố định trên tàu hải quân [1, 3]. Tuy nhiên, đối với một nước đang phát triển như Việt Nam, để có thể giảm dần chi phí mua sắm thiết bị quân sự từ các nước phát triển và tránh việc phụ thuộc nhiều vào đối tác nước ngoài thì việc chủ động nghiên cứu thiết kế, chế tạo vũ khí, trang bị quân sự và các hệ thống đi kèm là rất cần thiết. Một số hệ thống quân sự hiện nay Việt Nam đã có thể bước đầu làm chủ như nghiên cứu thiết kế và chế tạo hệ thống antenna vệ tinh địa tĩnh [13-15], nghiên cứu tích hợp hệ thống pháo trên xe quân sự, chế tạo một số vũ khí bộ binh, vũ khí phòng không, ...

Về mặt bản chất, nếu bỏ qua yếu tố quân sự, hệ thống giá tên lửa P60KM đơn giản chỉ là một cơ hệ như các hệ thống cơ khí khác. Việc nghiên cứu mô hình hóa và phân tích hệ thống này có thể sử dụng lý thuyết cơ học hệ nhiều vật [16] và các lý thuyết khác [17-19]. Cụ thể, hệ thống giá tên lửa P60KM có kết cấu như một tay máy công nghiệp với các khâu nối tiếp nên việc mô hình hóa và phân tích động học, động lực học có thể sử dụng lý thuyết về robot công nghiệp để giải quyết. Theo đó, bài toán về mô hình hóa, phân tích động học nói chung và động học ngược nói riêng đã được xem xét trong nhiều nghiên cứu như [20-34]. Phương pháp giải động học ngược theo hướng xây dựng ma trận Jacobian chuyển vị (Jacobian Transpose) được xem xét trong [20], phương pháp tựa nghịch đảo (Pseudo-Inverse) trong [21], phương pháp DLS (Damped Least Squares) [22], phương pháp Quasi-Newton và Conjugate Gradient [23, 24], điều khiển phản hồi vòng kín (CLIK) [25-28], thuật toán thông minh như thuật toán di truyền trong [29], thuật toán Neural Network trong [30, 31].

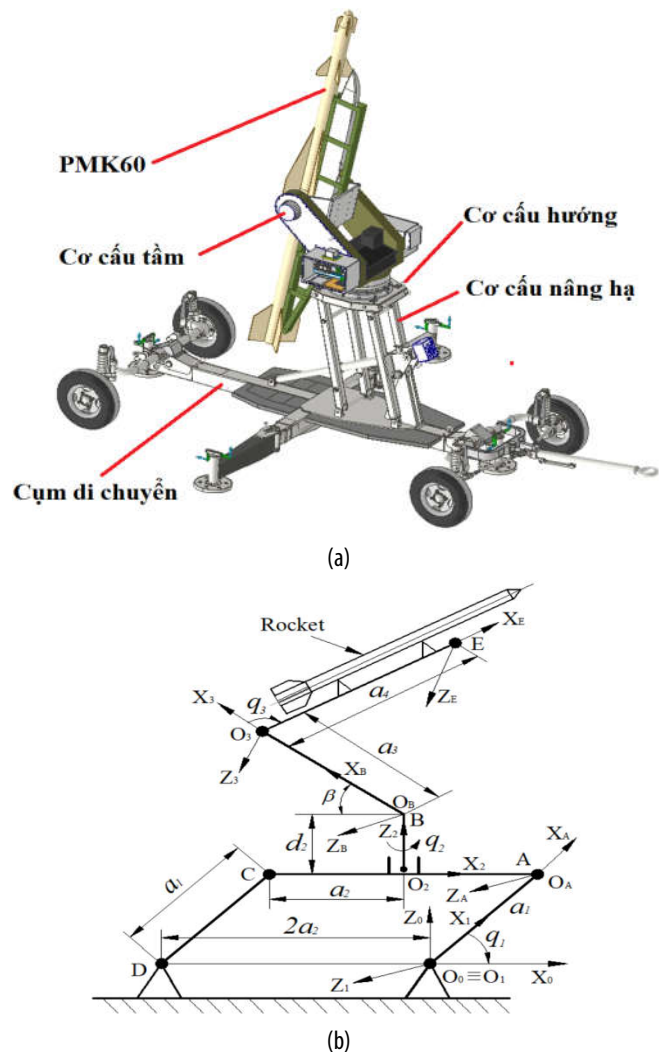
Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo này, vấn đề mô hình hóa và bài toán động học ngược của hệ thống giá tên lửa P60KM được xem xét cụ thể trên cơ sở phương pháp điều khiển phản hồi vòng kín [25-28, 33]. Lý thuyết cơ học hệ nhiều vật và lý thuyết robot công nghiệp được sử dụng trong việc mô hình hóa hệ thống. Hệ phương trình động học được thiết lập là cơ sở để thiết lập các bước giải bài toán động học ngược của hệ thống dựa trên các dữ liệu đầu vào về thông số động - hình học của mô hình và quỹ đạo điểm thao tác trong không gian làm việc thay đổi theo thời gian. Kết quả nghiên cứu có giá trị quan trọng cho việc xây dựng và giải quyết các vấn đề liên quan đến bài toán động lực học, lựa chọn hệ thống dẫn động và bài toán điều khiển hệ thống thực.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình hóa động học hệ thống giá tên lửa P60KM

Khảo sát hệ thống giá tên lửa P60KM như hình 1. Từ mô hình vật lý (hình 1a), hệ thống gồm 02 cụm truyền động chính là cụm di chuyển và cụm giá. Cụm di chuyển đảm

bảo tính cơ động của hệ thống trong quá trình hành quân và thay đổi vị trí hoạt động. Cụm giá là cơ hệ có ba bậc tự do ứng với các cụm nhỏ gồm cơ cấu nâng hạ hình bình hành đảm bảo nâng hạ độ cao trong tháo và lắp tên lửa, cơ cấu bệ xoay đảm bảo thay đổi hướng chuyển động của giá và cơ cấu tâm đảm bảo thay đổi tầm bắn của hệ thống. Hình 1b mô tả mô hình toán học của hệ thống giá tên lửa. Trong nghiên cứu này, chuyển động của cụm di chuyển chưa được xem xét đến. Chuyển động của cơ cấu hình bình hành O_0ACD tương ứng với 1 bậc tự do (khớp q_1) với khâu dẫn động (khâu 1) là O_0A . Cụm hướng của giá được mô tả ứng với khâu quay 2 (O_2BO_3), góc khớp q_2 . Cần chú ý rằng, khâu 2 gồm 02 đoạn nhỏ O_2B và BO_3 . Đoạn BO_3 hợp với phương nằm ngang một góc cố định β .



Hình 1. Mô hình vật lý (a) và toán học (b) hệ thống giá tên lửa P60KM

Khâu 3 là khâu cuối O_3E với khớp quay q_3 . Điểm cuối của khâu 3 (điểm E) được định nghĩa là điểm thao tác cuối của khâu.

Do cơ hệ có các đặc tính như một dạng cánh tay robot có các khâu nối tiếp nên trong nghiên cứu này, phương pháp Denavit - Hartenberg (DH) [18, 20] được sử dụng để mô hình hóa hệ thống giá nêu trên. Theo đó, tiến hành

định nghĩa hệ thống các hệ tọa độ cố định và hệ tọa độ địa phương lên cơ hệ. Đặt hệ tọa độ cố định (OXYZ)₀ với gốc tọa độ O₀ tại điểm đầu của khâu 1 với hướng các trục như hình 1b. Hệ tọa độ địa phương (OXYZ)₁ gắn với khâu 1 với gốc O₁ trùng với O₀. Hệ tọa độ (OXYZ)₂ ứng với khâu 2 và hệ (OXYZ)₃ ứng với khâu 3 được gắn tại điểm đầu các khâu O₂ và O₃. Bảng thông số DH với các tham số chính mô tả việc chuyển đổi giữa các hệ tọa độ địa phương được thể hiện như bảng 1.

Bảng 1. Thông số DH

Khâu	Thông số DH			
	q _i	d _i	a _i	α _i
O ₁ A	q ₁	0	a ₁	π/2
AO ₂	π - q ₁	0	a ₂	π/2
O ₂ B	q ₂	d ₂	0	-π/2
BO ₃	-β	0	a ₃	0
O ₃ E	q ₃	0	a ₄	0

Trong đó, a₁, a₂, a₃, a₄ (m) và d₂ (m) lần lượt là các thông số về kích thước hình học của hệ thống.

Theo lý thuyết DH [18, 20], các ma trận chuyển đổi thuận nhất giữa các hệ tọa độ địa phương được thiết lập dễ dàng dựa trên bảng thông số DH. Trên cơ sở đó, hướng của các khâu, vị trí của điểm bất kỳ trên hệ thống đều có thể được mô tả đầy đủ theo hệ tọa độ cố định (OXYZ)₀. Cụ thể về hướng và tọa độ một số điểm đặc trưng của hệ thống được xác định như sau:

Ma trận mô tả hướng khâu O₁A và vị trí điểm cuối khâu (điểm A):

$$D_{O_1A} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1c_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{cases} x_A = a_1c_1 \\ y_A = 0 \\ z_A = a_1s_1 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, c₁ = cos q₁; s₁ = sin q₁.

Ma trận mô tả hướng khâu O₂B và vị trí điểm cuối khâu (điểm B):

$$D_{O_2B} = \begin{bmatrix} -c_2 & 0 & s_2 & a_1c_1 - a_2 \\ -s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & a_1s_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{cases} x_B = a_1c_1 - a_2 \\ y_B = 0 \\ z_B = a_1s_1 + d_2 \end{cases} \quad (2)$$

Ma trận mô tả hướng khâu BO₃ và vị trí điểm cuối khâu (điểm O₃):

$$D_{BO_3} = \begin{bmatrix} -c_2c\beta & -c_2s\beta & s_2 & a_1c_1 - a_2 - a_3c_2c\beta \\ -s_2c\beta & -s_2s\beta & -c_2 & -a_3s_2c\beta \\ s\beta & -c\beta & 0 & a_1s_1 + d_2 + a_3s\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_B = a_1c_1 - a_2 - a_3c_2c\beta \\ y_B = -a_3s_2c\beta \\ z_B = a_1s_1 + d_2 + a_3s\beta \end{cases}$$

Trong đó, c₂ = cos q₂, s₂ = sin q₂, cβ = cos β, sβ = sin β.

Ma trận mô tả hướng và vị trí khâu thao tác O₃E:

$$D_{O_3E} = \begin{bmatrix} -c_2c(q_3 - \beta) & c_2s(q_3 - \beta) & s_2 & a_3c_1 - a_2 - c_2(a_3c\beta + a_4c(q_3 - \beta)) \\ -s_2c(q_3 - \beta) & s_2s(q_3 - \beta) & -c_2 & -s_2(a_3c\beta + a_4c(q_3 - \beta)) \\ s(q_3 - \beta) & -c(q_3 - \beta) & 0 & a_3s_1 + d_2 + a_3s\beta - a_4s(q_3 - \beta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó,

$$c_3 = \cos q_3, s_3 = \sin q_3, c(q_3 - \beta) = \cos(q_3 - \beta), s(q_3 - \beta) = \sin(q_3 - \beta)$$

Vị trí điểm cuối khâu O₃E (điểm thao tác cuối E):

$$\begin{cases} x_E = a_1c_1 - a_2 - c_2(a_3c\beta + a_4c(q_3 - \beta)) \\ y_E = -s_2(a_3c\beta + a_4c(q_3 - \beta)) \\ z_E = a_1s_1 + d_2 + a_3s\beta - a_4s(q_3 - \beta) \end{cases} \quad (5)$$

Phương trình (5) mô tả mối quan hệ giữa vị trí điểm thao tác cuối E và các giá trị biến khớp. Căn cứ vào đó, bài toán động học thuận và động học ngược được thiết lập. Bài toán động học ngược có nhiệm vụ xác định chính xác các quy luật thay đổi của biến khớp nhằm đảm bảo cho hệ thống thực hiện một nhiệm vụ cụ thể được yêu cầu trước trong không gian thao tác (vị trí các điểm rời rạc hoặc quỹ đạo chuyển động của điểm thao tác cuối).

2.2. Điều khiển động học ngược dựa trên phương pháp phản hồi vòng kín

Phương pháp điều khiển phản hồi vòng kín được thực hiện dựa trên việc so sánh dữ liệu đầu vào và dữ liệu đầu ra để xác định sai số điều khiển. Việc thay đổi một số thông số quan trọng trong quá trình điều khiển sẽ đảm bảo giá trị sai số điều khiển nằm trong giới hạn cho trước. Trong phần này, bài toán động học ngược được giải trên cơ sở dữ liệu đầu vào là quỹ đạo điểm thao tác trong không gian làm việc, thông qua hệ phương trình động học và thuật toán điều khiển phản hồi vòng kín, giá trị các biến khớp được tìm ra nhằm đáp ứng chính xác quỹ đạo mong muốn ban đầu của điểm thao tác. Sai số điều khiển được xác định là sai số quỹ đạo thao tác. Các giá trị biến khớp được tìm thấy cần thỏa mãn giới hạn khớp cho trước.

Định nghĩa các véc tơ tọa độ khớp và tọa độ điểm thao tác.

Véc tơ tọa độ khớp trong không gian khớp:

$$\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T \text{ (rad)} \quad (6)$$

Véc tơ tọa độ điểm thao tác cuối trong không gian làm việc:

$$\mathbf{x} = [x_E \quad y_E \quad z_E]^T \text{ (m)} \quad (7)$$

Phương trình động học (5) được viết lại ở dạng tổng quát như sau:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}); \mathbf{x} \in \mathbf{R}^3; \mathbf{q} \in \mathbf{R}^3 \quad (8)$$

Căn cứ vào điều kiện làm việc và nhiệm vụ của hệ thống, các biến khớp được giới hạn giá trị như sau:

$$\frac{\pi}{6} \leq q_1 \leq \frac{5\pi}{6}; -2\pi \leq q_2 \leq 2\pi; -\frac{2\pi}{3} \leq q_3 \leq 0; (\text{rad}) \quad (9)$$

Các thông số hình học của hệ thống cũng được xác định tương ứng với mô hình thực tế:

$$a_1 = 1,1(\text{m}); a_2 = 0,183(\text{m}); d_2 = 0,19(\text{m});$$

$$a_3 = 0,78(\text{m}); a_4 = 1,075(\text{m}); \beta = 2\pi/9(\text{rad})$$

Cũng từ phương trình (5), vận tốc điểm thao tác cuối $\dot{\mathbf{x}}$ được tính:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

Từ (10) ta xác định véc tơ vận tốc biến khớp $\dot{\mathbf{q}}$:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} \quad (11)$$

Trong đó, $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ là ma trận nghịch đảo của ma trận jacobian $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ ứng với véc tơ biến khớp \mathbf{q} :

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_E}{\partial q_1} & \frac{\partial x_E}{\partial q_2} & \frac{\partial x_E}{\partial q_3} \\ \frac{\partial y_E}{\partial q_1} & \frac{\partial y_E}{\partial q_2} & \frac{\partial y_E}{\partial q_3} \\ \frac{\partial z_E}{\partial q_1} & \frac{\partial z_E}{\partial q_2} & \frac{\partial z_E}{\partial q_3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Bài toán động học ngược được thành lập với đầu vào cho trước là quỹ đạo và vận tốc điểm thao tác cuối trong không gian thao tác $\mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{x}}_d$:

$$\mathbf{x}_d = \mathbf{f}_1(t), \dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{f}_2(t) \quad (13)$$

Đầu ra cần tìm là quỹ đạo các biến khớp $\mathbf{q}(t)$ đảm bảo yêu cầu quỹ đạo cho trước trong (13). Có hai phương pháp chính để giải bài toán động học ngược là phương pháp giải tích [18, 19] và phương pháp số [32-34]. Phương pháp giải tích cho kết quả khả quan nhưng khó thực hiện, đặc biệt với các cơ hệ có số bậc tự do lớn, hệ dư dẫn động. Phương pháp số là phương pháp giải hiện đại, mang tính tổng quát cao nhưng có sai số do các phép toán xấp xỉ. Trong phạm vi nghiên cứu này, phương pháp điều khiển phản hồi theo vòng kín [25-28, 33] được áp dụng để giải bài toán IK.

Định nghĩa sai số quỹ đạo trong không gian thao tác như sau:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x} \quad (14)$$

Hay từ (1):

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (15)$$

Theo phương pháp CLIK [33], phương trình (11) được tính như sau:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})(\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{k}_p \mathbf{e}) \quad (16)$$

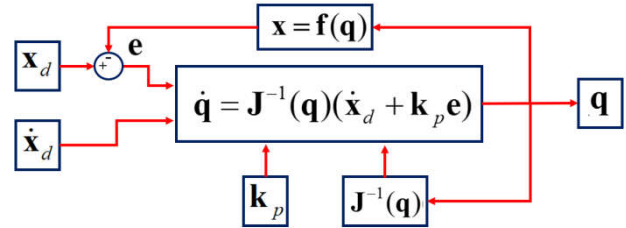
Trong đó, \mathbf{k}_p là ma trận hệ số đối xứng dương.

Từ (11) và (16) có thể suy ra:

$$\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} = 0 \quad (17)$$

Trong đó, $\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}$. Nghiệm của phương trình vi phân (17) có dạng $\mathbf{e} = \mathbf{C}_0 \exp(\mathbf{k}_p t)$ với \mathbf{C}_0 là hằng số. Dễ thấy, khi

$t \rightarrow \infty$ thì $\mathbf{e} \rightarrow 0$. Như vậy đề xuất (16) hoàn toàn đảm bảo sai số hội tụ về 0 với \mathbf{k}_p xác định dương. Sơ đồ giải IK theo phương pháp điều khiển CLIK được mô tả như hình 2.



Hình 2. Sơ đồ giải IK theo phương pháp điều khiển CLIK

Xem xét kết quả mô phỏng số với đầu vào như sau:

$$x_E = 1,55 + 0,05 \cos \frac{\pi t}{6}(\text{m}); y_E = -0,48 - 0,05 \sin \frac{\pi t}{6}(\text{m});$$

$$z_E = 2,23 - 0,02 \cos \frac{\pi t}{6}(\text{m}); \dot{x}_E = -\frac{0,05\pi}{6} \sin \frac{\pi t}{6}(\text{m});$$

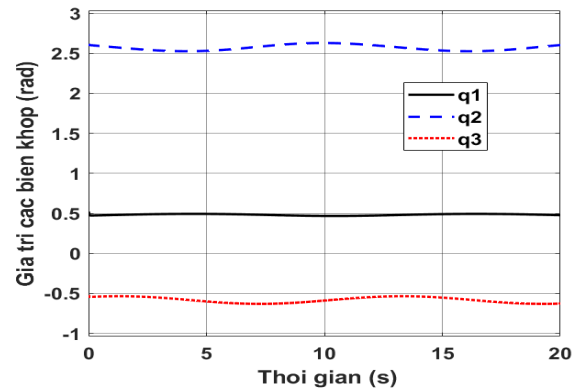
$$\dot{y}_E = -\frac{0,05\pi}{6} \cos \frac{\pi t}{6}(\text{m}); \dot{z}_E = \frac{0,02\pi}{6} \sin \frac{\pi t}{6}(\text{m});$$

Ma trận đối xứng xác định dương \mathbf{k}_p được cho trước như sau:

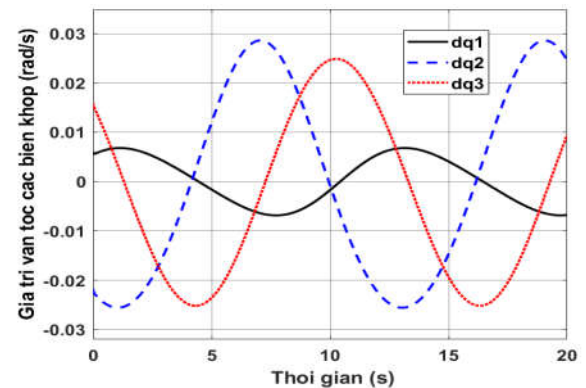
$$\mathbf{k}_p = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng số được thể hiện từ hình 3 ÷ 8.

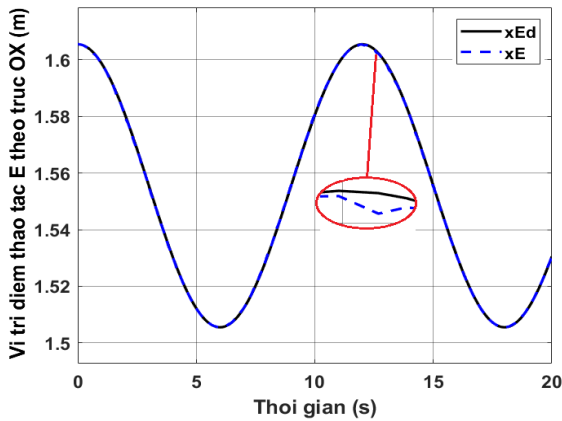


Hình 3. Giá trị các biến khớp

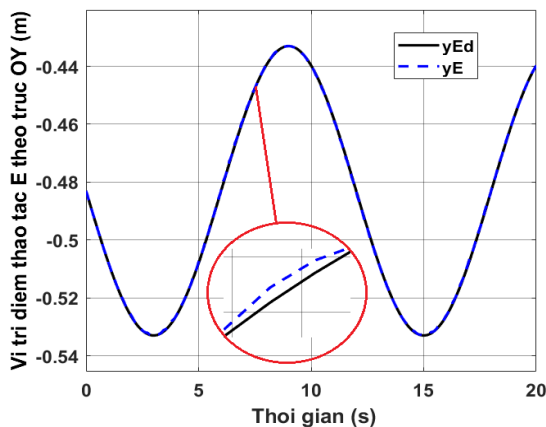


Hình 4. Giá trị vận tốc các biến khớp

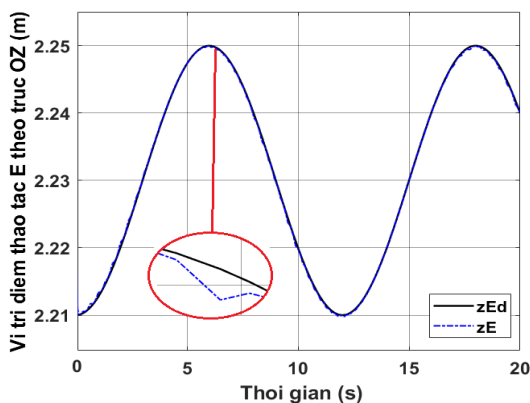
Kết quả bài toán động học ngược được thể hiện cụ thể trong hình 3 và 4. Hình 3 cho thấy, giá trị các biến khớp được xác định đều nằm trong giới hạn cho phép, không có sự thay đổi đột ngột và các quy luật thay đổi theo thời gian không có điểm bất thường. Tương tự như vậy, hình 4 thể hiện giá trị vận tốc các biến khớp và để thấy không có điểm bất thường, vận tốc không thay đổi đột ngột. Điều này hệ thống chuyển động trơn tru và mượt.



Hình 5. Vị trí điểm thao tác theo OX



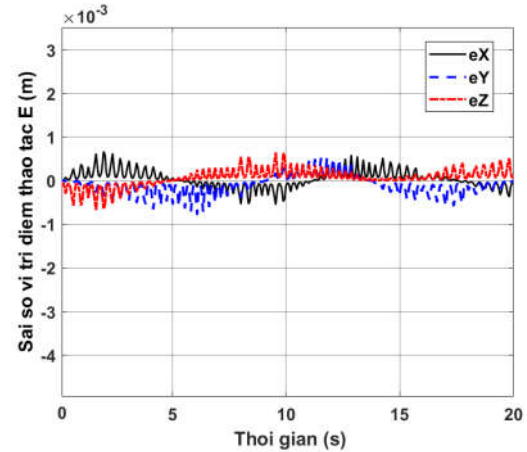
Hình 6. Vị trí điểm thao tác theo OY



Hình 7. Vị trí điểm thao tác theo OZ

Hình 5, 6 và 7 mô tả quỹ đạo của điểm thao tác E trong không gian làm việc được tính toán lại thông qua bài toán động học thuận, với dữ liệu đầu vào là giá trị các biến khớp được tính từ mô hình điều khiển phản hồi vòng kín. Để

nhận thấy, các giá trị vị trí điểm thao tác bám sát các giá trị mong muốn ban đầu, sơ sai lệch là không đáng kể. Điều này chứng tỏ thuật toán điều khiển phản hồi vòng kín rất hiệu quả đối với việc giải động học ngược cho mô hình này. Hình 8 thể hiện sai số vị trí quỹ đạo điểm thao tác cuối và cũng lần nữa khẳng định tính hiệu quả, ổn định cao của thuật toán điều khiển. Giá trị sai số quỹ đạo nhỏ hơn 1mm. Đây là kết quả rất tốt cho một cơ hệ có kích thước lớn.



Hình 8. Sai số quỹ đạo điểm thao tác

4. KẾT LUẬN

Hệ thống giá tên lửa P60KM có thể nói là một mô hình cụ thể nói riêng nhưng cũng có thể coi là một cơ hệ có tính chất như một cánh tay robot công nghiệp nói chung. Việc mô hình hóa và giải các bài toán động học, động lực học và điều khiển vẫn luôn cần thiết để khảo sát, phục vụ thiết kế và chế tạo hệ thống thực, đảm bảo hệ thống làm việc đúng như yêu cầu. Nghiên cứu này đã giải quyết cụ thể hai vấn đề chính gồm mô hình hóa toán học với kết quả là hệ phương trình động học được thành lập và giải bài toán động học ngược dựa trên phương pháp điều khiển phản hồi vòng kín. Với quỹ đạo của điểm thao tác cụ thể cho trước trong không gian làm việc, quy luật các biến khớp tương ứng được xác định với sai số quỹ đạo rất nhỏ và tính ổn định của hệ thống cao. Kết quả nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng và làm nền tảng để giải quyết bài toán động lực học trong việc tìm ra giá trị lực/mô men các khớp, từ đó có thể chọn được hệ thống dẫn động phù hợp. Hơn nữa, bài toán điều khiển hệ thống thực cũng có thể sử dụng kết quả nghiên cứu này để đánh giá và xác định yêu cầu cụ thể trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. <https://www.seaforces.org/wpnsys/SURFACE/Mk-141-missile-launcher.htm>
- [2]. X. Kan, L. Yu, X. Jianren, 2009. *Controlled canard configuration study for a solid rocket motor based unmanned air vehicle*. Journal of Mechanical Science and Technology, 23, pp. 3271- 3280..
- [3]. C. Corwel, G. Zoghbi, S. Webb, A. Dutta, 2016. *Design and Control of an Underwater Launch System*. IEEE Access, Vol. 4, pp. 1-18.
- [4]. <https://rocket-rack.com/>

- [5]. T. Blachowicz, G. Ehrmann, A. Ehrmann, 2021. *Metal Additive Manufacturing for Satellites and Rockets*. Applied Science, 11, 12036.
- [6]. P. Sethunathan, R. N Sugendran, T. Anbarasan, 2015. *Aerodynamic Configuration Design of a Missile*. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 4 (3), pp. 72-75, 2015.
- [7]. M. C. Murty, P. K. Sinha, D. Chakraborty, 2016. *Effect of rocket exhaust of canisterized missile on adjoining launching system*. Journal of Aerospace Engineering, DOI: 10.1177/0954410016662064.
- [8]. Y. Oda, T. Imai, et al, 2017. *A study of RF power station for microwave rocket launch system*. EPJ Web of Conferences 149, 02010.
- [9]. F.M. Engelen, E. Mooij, 2011. *Quantitative Risk Analysis of Rocket Trajectories*. 62nd International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa, IAC-11-D5.1.8.
- [10]. N. V. Nhu, M. Tyan, J. W. Lee, Y. H. Byun, 2014. *Investigations on Missile Configuration Aerodynamic Characteristics for Design Optimization*. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci, Vol. 57, No. 4, pp. 210-218.
- [11]. A. N. Barbosa, L. N. F. Guimarães, 2012. *Multidisciplinary Design Optimization of Sounding Rocket Fins Shape Using a Tool Called MDO-SONDA*. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.4, No 4, pp. 431-442.
- [12]. M. V. Shubov, 2021. *Feasibility Study for Multiply Reusable Space Launch System*. University of MA Lowell One University Ave, Lowell, MA 1854.
- [13]. Hoang P. Q., Hung L. X., Tung D. M., Thanh N. T. H., Phong N. H., Trung V. T., Tuan P. V., Bien D. X., 2021. *Kinematics modeling analysis of the geostationary satellite monitoring antenna system*. Sci. Tech. Dev. J. Engineering and Technology, 4(1), 704-712.
- [14]. Hoang P. Q., Bien D. X., Cuong P. H., Manh D. D., Duc N. V., Nam N. V., Tuan P. V., 2021. *Kinematics and Dynamics analysis of the geostationary satellite antenna system*. Proceeding of the 2nd Annual International Conference MMMS2020, 1009 – 1017.
- [15]. D. X. Bien, P. Q. Hoang, N. V. Nam, N. T. H. Thanh, P. V. Tuan, D. D. Manh, 2021. *Research on the Control of the Mechanical System of Satellite Monitoring Antenna in Different Environmental Conditions*. ASIAN MMS 2021: Advances in Asian Mechanism and Machine Science pp 391-400, https://doi.org/10.1007/978-3-030-91892-7_37.
- [16]. A. Shabana, 2013. *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [17]. M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, 2006. *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [18]. J. J. Craig, 2005. *Introduction to robotics: Mechanics and control*. Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [19]. N. V. Khang, C. A. My, 2011. *Fundamentals of industrial robots*. Vietnam Education Publisher, (In Vietnamese).
- [20]. Lian S, Han Y, Wang Y, Bao Y, Xiao H, Li X, Sun N., 2017. *Accelerating Inverse Kinematics for High-DOF Robots*. In: Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference, Austin, USA, 2017.
- [21]. Yoshikawa T., 1985. *Dynamic manipulability of robot manipulators*. Journal of Robotic Systems, 2, 113-124.
- [22]. Wampler C. W., 1986. *Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least squares methods*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 16, 93-101.
- [23]. Wang L. C. T, Chen C. C., 1991. *A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 7, 489-499.
- [24]. Zhao J, Badler N. I., 1994. *Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures*. ACM Transactions on Graphics, 13, 313-336.
- [25]. Sciavicco L, Siciliano B., 1988. *A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators*. Journal of robotics and automation, 4, 403-410.
- [26]. Antonelli G, Chiaverini S, Fusco G., 2000. *Kinematic control of redundant manipulators with online end-effector path tracking capability under velocity and acceleration constraints*. In: IFAC Robot Control, Austria, 183-188.
- [27]. Wang J, Li Y, Zhao X., 2010. *Inverse kinematics and control of a 7 DOF redundant manipulator based on the closed loop algorithm*. International Journal of Advanced Robotics Systems, 7, 1-10.
- [28]. My C. A, Bien D. X, Tung H. B, Hieu L. C, Cong N. V, Hieu T. V., 2019. *Inverse kinematic control algorithm for a welding robot-positioner system to trace a 3D complex curve*. In: International Conference on Advanced Technologies for Communications 2019, 319-323.
- [29]. Aguilar O. A, Huegel J. C., 2011. *Inverse Kinematics Solution for Robotic Manipulators Using a CUDA-Based Parallel Genetic Algorithms*. Mexican International Conference on Artificial Intelligence, 1, 490-503.
- [30]. Bingul Z, Ertunc H. M, Oysu C., 2005. *Comparison of inverse kinematics solutions using neural network for 6R robot manipulator with offset*. Computational Intelligence Methods and Applications, 1-5.
- [31]. Feng Y, Yaonan W, Yimin Y., 2012. *Inverse kinematics solution for robot manipulator based on Neural Network under joint subspace*. International Journal of Computer and Communications, 7, 459-472.
- [32]. A Liegeois, 1977. *Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms*. IEEE Transactions, man and cybernetics, vol. 7 (12), pp. 868-871.
- [33]. C. G. Carignan, 1991. *Trajectory Optimization for Kinematically Redundant Arms*. Journal of Robotic Systems, 8(2), pp. 221-248.
- [34]. S. R. Buss, 2009. *Intro duction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudo-inverse and Damped Least Squares methods*. Department of Mathematics University of California, San Diego La Jolla, CA 92093-0112.

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Van Nam¹, Duong Xuan Bien¹, Nguyen Minh Hong²,
Nguyen Tai Hoai Thanh³, Do Manh Tung³, Pham Van Tuan¹,
Dao Van Luu¹, Nguyen Tu Linh⁴**

¹Advanced Technology Center, Military Technical Academy

²Faculty of Control Engineering, Military Technical Academy

³Faculty of Mechanical Engineering, Military Technical Academy

⁴Faculty of Information Technology, Military Technical Academy