

Thuật toán điều khiển động học tay máy khoan lỗ nổ mìn trong thi công các công trình ngầm

Nguyễn Hồng Thái, Nguyễn Quang Thái

Tóm tắt—Ngày nay trong thi công các đường hầm ở những nơi có địa hình phức tạp phương pháp sử dụng phổ biến vẫn là khoan lỗ nổ mìn. Để nâng cao hiệu quả của công tác thi công, hiện nay ở Việt Nam và một số nước đã đưa các tay máy robot thủy lực tự hành với bảy bậc tự do, có điều khiển bằng tay nhằm hiện đại hóa công đoạn khoan lỗ, nổ mìn và nâng cao độ chính xác thi công. Để có thể điều khiển tay máy robot tự động khoan lỗ theo hộ chiếu nổ mìn đã được thiết kế bởi chuyên gia địa chất và công trình ngầm thì cần phải có một thuật toán điều khiển cài đặt vào bộ điều khiển của robot. Đây chính là nội dung mà các tác giả sẽ trình bày trong bài báo này.

Từ khóa—Tay máy robot, khoan lỗ nổ mìn, thi công đường hầm, tay máy robot tự hành, công trình ngầm.

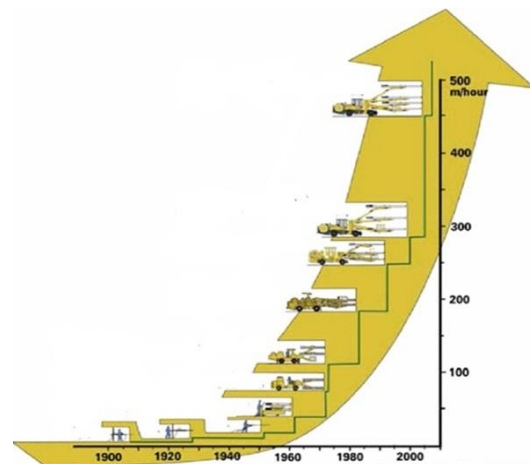
1 GIỚI THIỆU

Trong quá trình phát triển hơn sáu mươi năm qua công nghệ khoan lỗ, nổ mìn trong thi công đường hầm đã có những bước phát triển đáng kể. Công nghệ khoan lỗ nổ mìn được biết đến từ những năm 1940, với việc sử dụng các tay khoan khí nén [1] thì một người có thể khoan 10m lỗ trong vòng một giờ. Sau đó để tăng năng suất, người ta đã đưa những giàn khoan gắn trên giàn giáo gồm nhiều tay khoan khí nén được biết đến ở trên. Bắt đầu những năm 1970, các cánh tay robot thủy lực gắn trên xe tự hành được đưa vào thi công đường hầm đã làm tăng năng suất thi công lên đáng kể cụ thể một người vận hành thiết bị khoan được 125 m lỗ/một giờ.

Từ năm 1990 trở lại đây, với sự phát triển của khoa học và công nghệ, các loại xe tự hành đã được

nâng cấp với hai, ba cánh tay robot làm tăng năng suất lên 275 m lỗ/một giờ, cho tới hiện nay là 500 m lỗ/một giờ. Quá trình phát triển của thiết bị khoan lỗ, nổ mìn trong thi công đường hầm được mô tả trong hình 1 dưới đây.

Cũng theo tài liệu [1] đã chỉ ra rằng để thi công hiệu quả thì: xe tự hành một tay máy thi công đường hầm có diện tích mặt cắt ngang là 20 m² (chiều cao hầm 4,7 m và chiều rộng hầm 4,2 m). Loại hai tay máy thường thi công đường hầm có diện tích mặt cắt ngang 104 m² (chiều cao hầm 9,7 m và chiều rộng hầm 13 m) và loại ba tay máy thi công đường hầm 179 m² (chiều cao hầm 10,6 m, chiều rộng hầm 18 m). Ngày nay, với sự phát triển của khoa học và công nghệ, để nâng cao hiệu quả công tác khoan lỗ, nổ mìn trong thi công đường hầm các nhà khoa học đã và đang nghiên cứu chuyên sâu về từng công đoạn của thi công đường hầm, trong đó phải kể đến:



Hình 1. Lịch sử phát triển của khoan nổ mìn qua từng giai đoạn [2]

Bài báo này được gửi vào ngày 5 tháng 06 năm 2017 và được chấp nhận đăng vào ngày 20 tháng 09 năm 2017.

Nguyễn Hồng Thái, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (e-mail: thai.nguyenhong@hust.edu.vn)

Nguyễn Quang Thái, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (e-mail: nguyenhongthai.vn@gmail.com)

- Nghiên cứu về cơ học đất đá: Trên cơ sở thực tiễn quá trình thi công đường hầm Vouli ở Phần Lan có đặc điểm địa chất tự nhiên với nhiều lớp trầm tích, đá cứng được hình thành từ 1750÷1990 triệu năm về trước [3]. Nhóm tác giả A. Petko, R. Ziman đã nghiên cứu đưa ra quy trình thi công

theo phương pháp khoan lỗ nổ mìn trong điều kiện địa chất phức tạp. Để giải quyết được vấn đề này nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu đặc điểm cơ học của đất đá, từ đó đưa ra quy trình thi công bao gồm: hệ chiều nổ mìn, kỹ thuật khoan, liều lượng và loại thuốc nổ, kỹ thuật nổ để thi công đường hầm này. Ngoài ra, nhóm tác giả cũng đưa ra bộ số liệu thực nghiệm khi thi công đó là với hầm có diện tích tiết diện cắt ngang 90 m² thì cần phải khoan 163.471 m lỗ nổ, 157.333 kg thuốc nổ và 31.839 kíp nổ (trong đó 28.495 kíp của hãng Nonel LP và 3.344 kíp của hãng Firex VA-T).

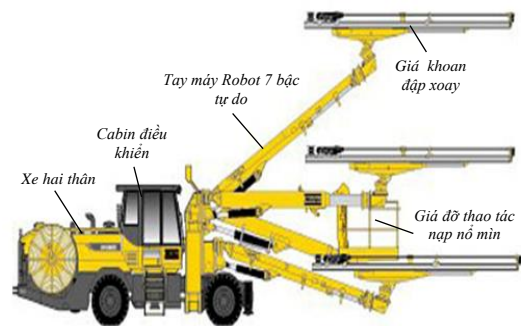
- Về hệ thống gia cố đường hầm khi thi công: Trong quá trình thi công đường hầm các mỏ có đặc điểm địa chất phức tạp như mỏ than Xiajing (Quảng Tây) với độ sâu 600 m gồm đá thạch anh, sa thạch, đá bùn hay mỏ than G. Zhibiao ở độ sâu 659 m có đặc điểm địa chất là đất cát thô, đá cuội kết cấn [4, 5] nhóm tác giả L. Xuefeng và G. Zhibiao đã chỉ ra rằng: khi độ sâu của các mỏ dưới lòng đất càng tăng thì vấn đề về gia cố các vùng đất đá yếu rất cần được quan tâm bởi các công cụ hỗ trợ thông thường chưa kiểm soát được biến dạng, sụt lún dẫn đến mất an toàn trong quá trình thi công, khai thác. Từ đó, nhóm tác giả đã đưa ra giải pháp neo bu lông lưới neo thông qua việc nghiên cứu các vấn đề của cơ học đất đá như: độ dày đặc, cường độ chịu nén, độ bền kéo, độ đàn hồi, hệ số biến dạng ngang của đất đá ở hai mỏ này. Cùng về vấn đề này có tác giả P. K. Kaiser và M. Cai [6] cũng đã chỉ ra rằng: khi các đường hầm dần sinh và các mỏ khai thác khoáng sản có độ sâu ngày càng tăng các dư chấn trong quá trình thi công bằng phương pháp khoan lỗ, nổ mìn là khó có thể ngăn chặn được. Hệ thống gia cố cho hầm có đất đá dễ sạt lở khác với hệ thống gia cố thông thường [4, 5] với chức năng chính là cố định đất đá trước tác dụng của trọng lực. Hệ thống chống cho hầm có đất đá dễ sạt lở dùng trong môi trường có tải trọng động khi đất đá có sự giãn nở sau mỗi lần nổ mìn. Hệ thống gồm các bộ phận: gia cố đá và kiểm soát việc phình to, giữ lại khối đá vỡ để ngăn chặn các vết nứt lan rộng và cố định các vết nứt.

- Nghiên cứu về thiết bị để nâng cao hiệu quả khoan nổ mìn trong đó phải kể đến:

+ Về kết cấu: J. Karlinski và các cộng sự [7, 8] đã phát triển tay máy robot khoan nổ mìn đào hầm thế hệ mới, bằng việc nghiên cứu, tính toán thiết kế thông qua hệ thống phần mềm hiện đại để phân tích tính toán bằng phương pháp phân tử hữu hạn với điều kiện biên là các điều kiện thực tế trong thi công đường hầm nhằm giảm chi phí thực nghiệm.

+ Xác định thông số công nghệ khi khoan: Để

xác định thông số kỹ thuật và chiều sâu khoan của búa khoan “Jack Hammer” khi thi công đường hầm trong điều kiện địa chất là các loại đá cứng, tác giả V. Raghavan [9] đã tiến hành thí nghiệm trong hai trường hợp đó là: Trường hợp thứ nhất sử dụng búa khoan “Jack Hammer” thông thường còn trường hợp thứ hai nối đầu búa khoan này với một xi lanh khí nén để thí nghiệm khoan vào các loại đá xanh, Syenite, Limestone với tốc độ khoan 1,5 m/phút và loại đá Biotite ở độ sâu 2,5 m/phút với áp lực khí 4 kg/cm². Từ các thí nghiệm này tác giả đưa ra kết luận khi nối thêm xi lanh khí nén tốc độ khoan cắt ăn sâu đất đá cao hơn. Cùng với hướng nghiên cứu này còn có tác giả R. Phillips và các cộng sự [10] đã đưa ra giải pháp dùng động cơ điện một chiều để thay thế cho khoan khí nén và thủy lực. Kết quả đã được thử nghiệm trên robot ExoMars của dự án hợp tác giữa cơ quan vũ trụ Nga (Roscosmos) và cơ quan vũ trụ châu Âu (ESA) trong việc khoan lấy mẫu đất đá ở hành tinh đỏ nhằm tìm kiếm dấu hiệu của sự sống trên hành tinh này.



Hình 2. Xe tự hành ba tay máy của hãng AtlasCopco

+ Ngoài những nghiên cứu về phần cứng thì phần mềm cũng được quan tâm nghiên cứu trong đó phải kể đến M.Torngren [11] đã ứng dụng hệ điều khiển phân tán để điều khiển các thiết bị thi công thủy lực trong thi công dự án “Noddator” năm 1989. Ngoài ra khi thi công đường hầm (Boliden ở Thụy Sĩ và Kemi ở Phần Lan) các tác giả G.Nord, J. Appelgren và Casper Swart [12, 13] đã đưa ra thuật toán ABC để điều khiển một cách tích hợp hệ thống máy tính, bộ điều khiển để có thể khoan một cách tự động trong quá trình thi công. Ngoài ra hệ thống này cũng có chế độ điều khiển bằng tay như các hệ thống khác khi cần thiết.

Về lĩnh vực thiết bị thi công các công trình ngầm ở trong nước chưa được quan tâm nghiên cứu mà hầu như chỉ tập trung vào khai thác, vận hành, bảo dưỡng các thiết bị nhập khẩu ví dụ như công ty Lũng Lô đã nhập khẩu các xe tự hành hai tay máy của hãng AtlasCopco để thi công, các công trình cỡ lớn như: thủy điện A Vương (Quảng Nam), thủy

diện Đa Mi (Hàm Thuận).v.v...

Ngoài ra, còn một số công ty khai thác than cũng đã nhập khẩu xe tự hành (Sandvik Tamrock) hay BFRK1 (Deilmann - Haniel Mining Systems) để đào các đường hầm khai thác than cỡ trung và cỡ lớn. Mặt khác, các hãng sản xuất trên thế giới thường sản xuất các thiết bị thi công đường hầm cỡ lớn. Trong khi một vấn đề thực tiễn hiện nay ở các thủy điện cỡ nhỏ và vừa các đường hầm dẫn dòng thường được thi công bằng khoan nổ mìn một cách thủ công với các búa khoan khí nén cầm tay ví dụ như: PP-30, PP-24, PP-54, PP-63 của Nga, YT-25, YT-27, YL-18, YL-24 của Trung Quốc, PLB-241K của Thụy Sĩ... dẫn đến chất lượng nổ mìn không cao do lỗ khoan thường bị sai lệch nhiều so với hộ chiếu thiết kế và năng suất thấp làm hiệu quả kinh tế không cao. Ngoài ra trong lĩnh vực an ninh quốc phòng cũng có nhu cầu lớn về xây các đường hầm công binh cỡ nhỏ nằm trong các khu vực có địa hình hiểm trở. Do đó, việc nghiên cứu, thiết kế các xe tự hành tay máy robot trong việc khoan nổ mìn phục vụ thi công các đường hầm nhỏ ở Việt Nam là cần thiết.

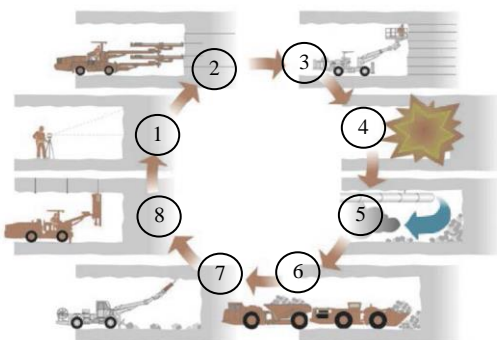
Để góp phần vào giải quyết vấn đề này trong bài báo này chúng tôi trình bày một số vấn đề sau:

- Trình bày một cách tóm tắt về quy trình đào hầm theo phương pháp khoan nổ mìn để từ đó đưa ra yêu cầu cho bài toán thiết kế robot. Vấn đề này sẽ được trình bày ở mục 2 của bài báo.

- Từ công đoạn khoan nổ theo hộ chiếu nổ mìn và khoan nổ gia cố đường hầm được trình bày ở mục 2, bài báo tiến hành mô hình hoá và thiết lập phương trình động học của robot trong mục 3.

- Mục 4 của bài báo trình bày quy trình thiết kế quỹ đạo điều khiển chuyển động tay máy trong công tác khoan nổ mìn theo mặt gương.

2 QUY TRÌNH THI CÔNG ĐƯỜNG HẦM THEO PHƯƠNG PHÁP KHOAN LỖ NỔ MÌN



Hình 3. Mô tả quy trình khoan nổ mìn trong thi công đường hầm

Hình 3 mô tả quy trình đào hầm bằng phương pháp khoan nổ mìn, trong đó:

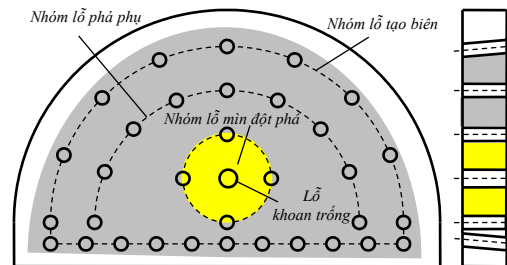
① Công tác xác định hộ chiếu nổ mìn: Ở công đoạn này người kỹ sư địa chất xác định tọa độ từ lỗ khoan dựa vào cấu tạo và kích thước hầm cần đào để thiết lập vị trí khoan nổ mìn.

② Công đoạn khoan nổ mìn: Trong thực tế sử dụng các tay máy để khoan các lỗ nạp mìn có chiều sâu từ 2 m ÷ 4 m đối với hầm cỡ lớn còn hầm cỡ nhỏ là 1,2 m ÷ 1,8 m. Trên thế giới, các hầm có diện tích từ 7 m² đến 12 m² sử dụng xe tay khoan tự hành một tay máy robot khoan đào hầm còn từ 12 m² sử dụng loại 2, 3 hay 4 tay máy.

③ Công tác nạp mìn: Thông thường người công nhân đào hầm sẽ nạp mìn thủ công vào các lỗ khoan mìn, vì vậy trên xe tự hành còn tích hợp thêm các giàn thao tác để phục vụ công tác nạp mìn được nhanh chóng (Xem hình 2).

④ Công tác nổ mìn: Nổ lần lượt từ vị trí nổ phá đến nổ biên dạng hầm (Xem hình 4)

- Nhóm lỗ khoan trống: được khoan vuông góc với mặt gương hầm. Nhóm lỗ khoan trống có nhiệm vụ làm yếu khối đá trên gương, rút ngắn đường kháng nổ nhỏ nhất của khối đá kẹp giữa chúng và các lỗ mìn lân cận, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình nổ mìn phá vỡ khối đá kẹp giữa đó.



Hình 4. Hộ chiếu nổ mìn trong một mặt gương

- Nhóm lỗ mìn đột phá: được khoan vuông góc với mặt gương hầm. Nhóm lỗ mìn đột phá được điều khiển nổ đầu tiên trên toàn mặt gương nhằm đột phá khối đá xung quanh, tạo ra không gian tự do phụ, giảm đường kháng nổ nhỏ nhất của khối đá còn lại đối với nhóm lỗ mìn phá phụ lân cận, nổ vì sai tiếp sau, tạo ra sự cộng hưởng các ứng suất sinh ra bởi chúng, làm tăng hiệu quả nổ phá đá của chúng lên.

- Nhóm lỗ phá phụ (thường bố trí lân cận các lỗ khoan trống và các lỗ mìn đột phá): được khoan vuông góc với mặt gương hầm. Nhóm lỗ phá phụ được nổ vì sai sau nhóm lỗ mìn đột phá, nhưng vì sai trước nhóm lỗ mìn nổ tạo biên. Nhóm lỗ mìn này được điều khiển nổ để phá vỡ khối đá cận kề, kẹp giữa chúng với không gian tự do phụ, hình

thành sau khi nổ đột phá và tạo thuận lợi cho quá trình phá vỡ đá của nhóm lỗ mìn biên nổ vì sai tiếp sau.

- Nhóm lỗ mìn tạo biên: có góc nghiêng khoảng $85^\circ \div 87^\circ$ so với mặt gương và có hướng cắm vào biên. Nhóm lỗ mìn tạo biên được điều khiển nổ sau cùng, nhằm mở rộng không gian đã nổ vỡ trong lòng hầm lò đến biên cần thiết.

⊙ Công tác hút khí độc sau nổ mìn: Sau khi nổ mìn, tạo ra rất nhiều khí độc và bụi, để con người có thể tiến hành thao tác và vận chuyển đất đá trong hầm cần có hệ thống cấp khí và hút khí độc cũng như bụi ra khỏi hầm.

⊙ Vận chuyển đất đá ra khỏi hầm: Để tạo thành đường hầm sau khi nổ mìn cần phải đưa đất đá ra khỏi đường hầm bằng các thiết bị chuyên dụng như xe xúc lật, xe ben để vận chuyển toàn bộ đất đá ra khỏi hầm.

⊙ Công tác sửa hầm: Trong quá trình thao tác trước khi thu hồi đất đá tạo đường hầm cũng như lập lại chu trình tiếp theo cần phải sửa đường hầm, tạo biên dạng hầm, phá vỡ đất đá yếu, gia cố tạm (phun vữa bê tông, gắn gông chữ C) để đảm bảo an toàn.

⊙ Công tác gia cố tạo đường hầm: Trong quá trình đào hầm, để đảm bảo an toàn thi công, chống sụt lún, phải gia cố đường hầm bằng cách khoan neo và gắn các gông hình móng ngựa để đỡ tạm đường hầm bằng các tay máy khoan nổ mìn.

3 THIẾT LẬP HỆ PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG HỌC TAY MÁY THỦY LỰC

Để đáp ứng yêu cầu trong thi công đường hầm theo mặt gương như đã trình bày ở mục 2 robot phải đáp ứng:

- Khoan nổ mìn ở mặt gương với chiều sâu từ 1,2 m đến 1,8 m, góc nghiêng 85° so với mặt gương.

- Khoan neo gia cố đường hầm.

Từ nhiệm vụ đặt ra như trên mà các robot này thường có từ 5 đến 7 bậc tự do. Hình 5 dưới đây là một tay máy robot thủy lực thực hiện thi công đường hầm.

3.1 Mô tả nguyên lý cấu tay máy

Từ sơ đồ kết cấu tay máy thủy lực được mô tả ở hình 5 ta có sơ đồ nguyên lý hoạt động được diễn giải như hình 6 (có các mạch vòng để tăng độ cứng vững-cấu trúc này thường thấy trong các tay máy có tải trọng làm việc lớn) với các khớp chuyển động chính là các khớp từ 1 đến 7. Trong đó các khớp quay 1, 2, 4, 5, 7 được điều khiển thông qua các xi lanh thủy lực như mô tả trên hình 7.

3.2 Thiết lập hệ phương trình động học tay máy

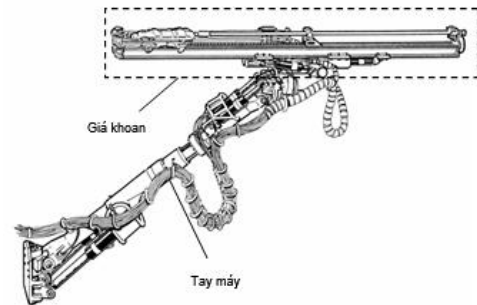
- Thiết lập hệ phương trình biến đổi tọa độ và hướng từ giá khoan đến hệ quy chiếu gắn trên xe

Để thiết lập hệ phương trình động học từ kết cấu và nguyên lý phức tạp ở hình 5 và hình 6 (là cấu trúc lai giữa chuỗi động học kín và chuỗi động học hở) được đưa về dạng chuỗi động học hở tương đương thuần túy được mô tả ở hình 7. Trên cơ sở đó các hệ quy chiếu được đặt theo Denavit- Hartenberg (D-H) [14] (được mô tả trong hình 8). Từ đó, ta có bảng thông số D-H được mô tả ở Bảng 1.

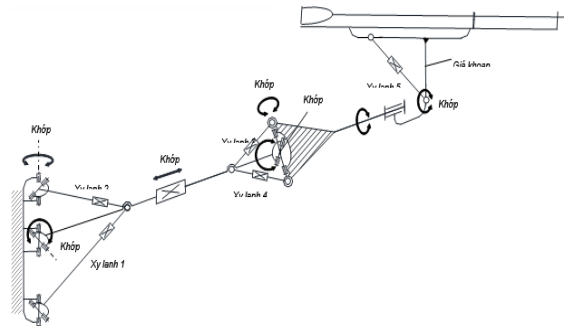
Bảng 1. Thông số D-H của tay máy khoan nổ mìn

Khớp	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	D_1	a_1	$\pi/2$
2	θ_2	0	0	$\pi/2$
3	$\pi/2$	d_3	0	$\pi/2$
4	θ_4	0	a_4	$-\pi/2$
5	θ_5	0	a_5	$-\pi/2$
6	θ_6	D_6	0	$\pi/2$
7	θ_7	D_7	a_7	0

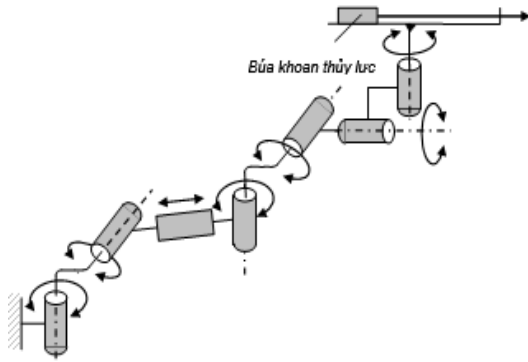
Trong đó: $d_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$ là các biến khớp, còn $a_1, a_4, a_5, a_7, D_1, D_4, D_6, D_7$ là các thông số kích thước các khâu



Hình 5. Kết cấu tay máy thủy lực



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của tay máy



Hình 7. Chuỗi động học hở tương đương của tay máy

Theo tài liệu [14, 15, 16] ta có các ma trận biến đổi tọa độ từ hệ quy chiếu $\mathcal{G}_{i-1}\{O_i, x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}\}$ sang hệ quy chiếu $\mathcal{G}_i\{O_i, x_i, y_i, z_i\}$ được cho bởi:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \sin \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \sin \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Như vậy, ma trận biến đổi từ giá khoan của robot về khâu cố định gắn trên xe:

$${}^0A_7 = \prod_{i=0}^6 {}^iA_{i+1} \quad \text{với } i = 1 \div 6 \quad (2)$$

- Phương trình xác định vị trí và hướng của lỗ khoan trên mặt gương

Nếu gọi:

+ E_j là tọa độ tâm các lỗ cần khoan trên mặt gương (xem hình 8) so với hệ quy chiếu

$\mathcal{G}_0\{O_0, y_0, x_0\}$ gắn trên robot ta có:

$${}^rE_j = \begin{bmatrix} x_{Ej} & y_{Ej} & z_{Ej} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

+ 0R_E là ma trận cosin chỉ hướng giữa hệ quy chiếu $\mathcal{G}_{Ej}\{E_j, u_j, v_j, w_j\}$ (gắn trên mặt gương) và $\mathcal{G}_0\{O_0, y_0, x_0\}$ (gắn trên xe) ta có:

$${}^0R_E = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Từ (3), (4) ta có ma trận biến đổi từ mặt gương về hệ quy chiếu $\mathcal{G}_0\{O_0, y_0, x_0\}$ trên robot được cho bởi:

Từ (3), (4) ta có ma trận biến đổi từ mặt gương về hệ quy chiếu $\mathcal{G}_0\{O_0, y_0, x_0\}$ trên robot được cho bởi:

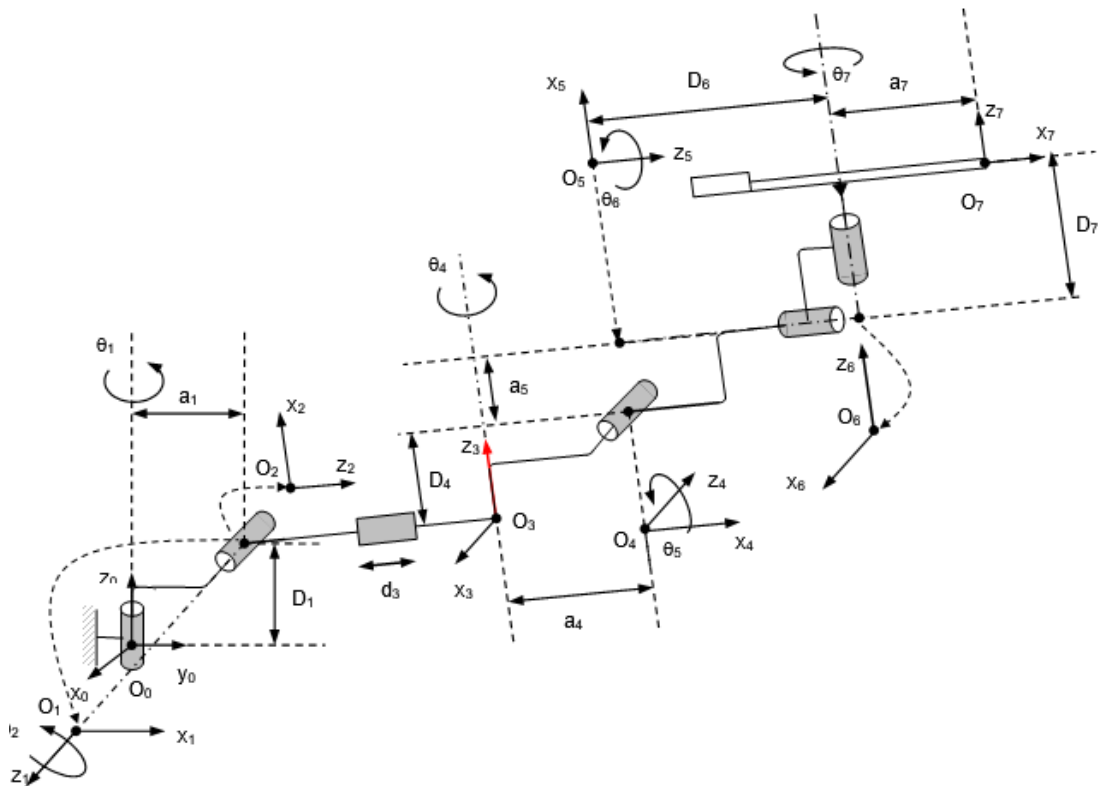
$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{R} & {}^rE \\ \underline{O} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{với } \underline{O} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

Cân bằng hai phương trình (2) và (5) ta có hệ phương trình (6):

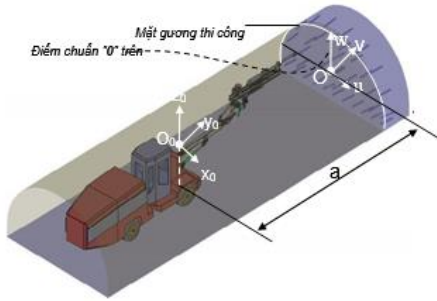
Với a là khoảng cách từ hệ quy chiếu $\mathcal{G}_0\{O_0, x_0, y_0, z_0\}$ đến mặt gương.

Nhận xét: Hệ phương trình (6) với 7 ẩn 6 phương trình là bài toán dư dẫn động vì vậy ta cần phải có thuật toán để giải bài toán này. Vấn đề này được trình bày trong mục 4 dưới đây.

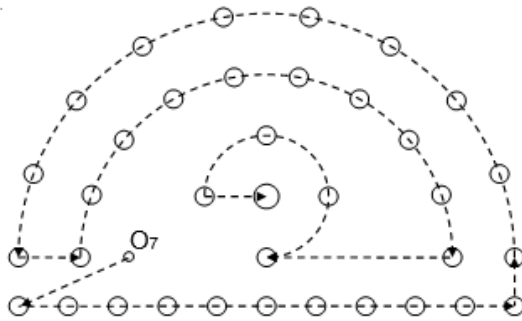
$$\begin{aligned}
 & + 750 \left[(\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \sin \theta_5 + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 \right] \sin \theta_7 - 800 \left[(\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cos \theta_5 \right. \\
 & \left. - \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_5 \right] \sin \theta_6 + 800 \cdot (\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_4 - \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_4) \cdot \cos \theta_6 - 620 \cdot (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \sin \theta_5 \\
 & - 620 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 + 155 \cdot (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cos \theta_5 - 155 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_5 + 70 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 \\
 & + 35 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot d_3 + 120 \cdot \cos \theta_1 = x_E \\
 & 750 \left\{ (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cdot \cos \theta_5 - \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_5 \right\} \cos \theta_6 + (\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_4 - \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_4) \cdot \sin \theta_6 \cdot \cos \theta_7 \\
 & + 750 \left[(\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \sin \theta_5 + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 \right] \sin \theta_7 - 800 \left[(\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cos \theta_5 \right. \\
 & \left. - \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_5 \right] + 800 \cdot (-\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_4 - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_4) \cos \theta_6 - 620 \cdot (-\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cdot \sin \theta_5 \\
 & - 620 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 + 155 \cdot (-\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cos \theta_5 - 155 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_5 - 70 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_4 \\
 & - 70 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4 + 35 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot d_3 + 120 \cdot \sin \theta_1 = y_E \\
 & 750 \left[(-\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_4 \cdot \cos \theta_5 - \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5) \cos \theta_6 + \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4 \cdot \sin \theta_6 \right] \cos \theta_7 + 750 \cdot (-\cos \theta_2 \cdot \sin \theta_4 \cdot \sin \theta_5 + \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_5) \sin \theta_7 \\
 & - 800 \cdot (\cos \theta_2 \cdot \sin \theta_4 \cdot \cos \theta_5 - \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5) \sin \theta_6 + 800 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4 \cdot \cos \theta_6 + 500 + 620 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_4 \cdot \sin \theta_5 - 620 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_5 \\
 & - 155 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_4 \cdot \cos \theta_5 - 155 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 - 70 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_4 + 35 \cdot \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \cdot d_3 = z_E \\
 & \left\{ (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cos \theta_5 - \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 \right\} \cos \theta_6 + (\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_4 - \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_4) \cdot \sin \theta_6 \cdot \cos \theta_7 \\
 & + \left\{ (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \sin \theta_5 + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 \right\} \sin \theta_7 = \cos \beta \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \\
 & - \left\{ (-\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \cos \theta_5 - \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_5 \right\} \cos \theta_6 + (-\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_4 - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_4) \cdot \sin \theta_6 \cdot \cos \theta_7 \\
 & + \left\{ (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \sin \theta_5 + \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 \right\} \cos \theta_7 = \cos \alpha \cdot \cos \gamma \\
 & (\cos \theta_2 \cdot \sin \theta_4 \cdot \cos \theta_5 - \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5) \sin \theta_6 + \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4 \cdot \cos \theta_6 = \cos \alpha \cdot \cos \beta
 \end{aligned} \tag{6}$$



Hình 8. Đặt hệ quy chiếu theo D-H cho tay máy khoan lỗ 7 bậc tự do



Hình 9. Vị trí tương quan giữa hệ quy chiếu điểm chuẩn "0" trên mặt gương và hệ quy chiếu gắn trên xe



Hình 10 Quy luật di chuyển của giá khoan theo mặt gương hệ chiếu nổ mìn

4 XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG HỌC ROBOT

Với các bậc tự do từ 1÷6 là robot có thể vươn tới mọi vị trí và hướng trong miền làm việc. Tuy nhiên, do đặc thù không gian đường hầm chật hẹp [3] do đó robot cần thêm bậc tự do thứ 7 để tăng tính linh hoạt và phục vụ khoan neo trong công tác gia cố đường hầm trình bày ở phần ⑧ mục 2 của bài báo này.

4.1 Xác định thông số biến khớp điều khiển tay máy robot thủy lực thi công mặt gương

Với hệ chiếu nổ mìn mà người kỹ sư địa chất đã thiết kế ta hoàn toàn xác định được tọa độ và hướng của các lỗ khoan. Trên cơ sở đó bài báo đưa ra quy luật lập trình cho robot để đưa giá khoan đến vị trí các lỗ như mô tả trên hình 10. Trong trường hợp này khớp quay thứ 7 được mặc định $\theta_7 = \pi/2$, hệ phương trình (6) chỉ có 6 phương trình 6 ẩn giải bằng phương pháp số (cụ thể là phương pháp Newton Raphson) ta tìm được các nghiệm $\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$. Trong đó $\theta_1, \theta_2, \theta_4, \theta_5$ là các biến trung gian mà chưa phải là các thông số điều khiển động học của tay máy robot, dưới đây trình bày phương pháp xác định các nghiệm xác điều khiển các xi lanh thủy lực.

- Xác định $d_{3,1}, d_{3,2}$ điều khiển hai xi lanh thủy lực khớp vai theo góc θ_1, θ_2

Xét khớp vai được cho trên hình 10. Nếu gọi $A_{3,1}, A_{3,2}$ là hai tâm khớp quay nối khớp trên của xi lanh với cẳng tay khi đó ta có:

$${}^0r_{A_{3,n}} = R(x, \theta_2)R(z, \theta_1) {}^3r_{A_{3,n}} \tag{7}$$

Trong đó: $R(x, \theta_2), R(z, \theta_1)$ là các ma trận quay quanh trục x và z của hệ quy chiếu $\mathcal{G}_0\{O_0x_0y_0z_0\}$, còn n = 1 và 2 (trùng ứng với từng xi lanh của khớp vai). Tách từng xi lanh về dạng chuỗi động học hở và giải theo phương pháp D-H tương tự mục 3.2 ở trên ta có:

Bảng 2. Thông số D-H xi lanh truyền động cụm khớp vai

Khớp	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	$a_{1,1}$	$\pi/2$	$d_{1,1}$	$\theta_{1,n}$
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_{2,n}$
3	0	0	$d_{3,n}$	0

Trong đó: $d_{3,n}, \theta_{1,n}, \theta_{2,n}$ là các biến khớp, $a_{1,1}, d_{1,1}$ là các thông số kích thước các khâu với $n = 1 \div 2$.

$$d_{3,n} = \frac{d_{1,1} - z_{A_3}}{\cos \theta_{2,n}} \tag{8}$$

Trong đó:

$$\theta_{2,n} = \frac{\sqrt{x_{A_3}^2 + y_{A_3}^2} - d_{1,1}}{d_{1,1} - z_{A_3}} \text{ còn } d_{1,1} \text{ là thông số}$$

kích thước khâu.

- Xác định $d_{3,3}, d_{3,4}$ điều khiển hai xi lanh thủy lực khớp cổ tay theo góc θ_4, θ_5

Với cách giải tương tự trên, ta có:

$$d_{3,m} = \frac{d_{2,1} - z_{B_3/B_4}}{\cos \theta_{2,m}} \tag{9}$$

Trong đó:

$$\theta_{2,n} = \frac{\sqrt{x_{B_3}^2 + y_{B_3}^2} - d_{2,1}}{d_{2,1} - z_{B_3}}; B_3, B_4 \text{ là tọa độ của}$$

các khớp quay trên trong hệ quy chiếu $\mathcal{G}_0\{O_3x_3y_3z_3\}$ gắn trên phần trượt thứ 2 của cẳng tay robot, $d_{2,1}$ là thông số kích thước khâu.

4.2 Ví dụ áp dụng cho trường hợp thi công mặt gương

+ Thông số kích thước thiết kế robot

$D_1 = 500$ mm; $D_4 = 35$ mm; $D_6 = 620$ mm;
 $D_7 = 670$ mm; $a_1 = 120$ mm; $a_4 = 70$ mm;
 $a_5 = 155$ mm; $a_7 = 800$ mm; $b_1 = 1130$ mm;
 $b_2 = 720$ mm

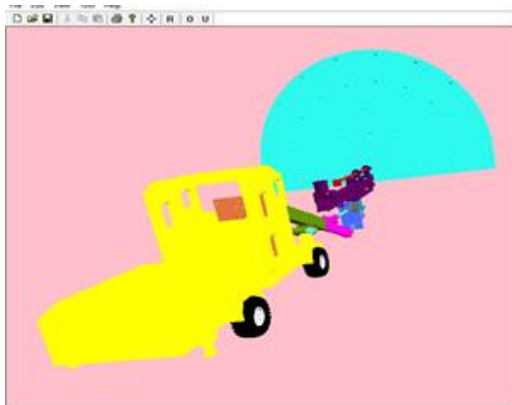
Như vậy điểm chia quỹ đạo dịch chuyển của một tay máy robot là $N = 2774$ điểm.

+ Thông số kỹ thuật hệ chiếu nổ mìn

Nhóm lỗ	Bán kính [mm]	Số lỗ	Góc nghiêng
Tạo biên	$R_1 = 2000$	21	85° so với đường tâm hầm
Phá phụ	$R_2 = 1500$	10	0°
Khoan trống	$R_2 = 500$	4	0°
Đột phá	(0, 3500, 400)	1	0°

Như vậy, với hệ chiếu nổ mìn đã cho và các thông số kích thước của tay máy robot ta có các thông số điều khiển động học tay máy thủy lực theo vị trí các lỗ khoan trên mặt gương gia công lỗ của hệ chiếu nổ mìn.

5 PHẦN MỀM MÔ PHỎNG



Hình 11. Giao diện phần mềm mô phỏng quá trình thi công mặt gương hệ chiếu nổ mìn

Trên cơ sở mô hình toán xác định thông số điều khiển động học đã được trình bày trong mục 3 và mục 4 cũng như bản thiết kế kết cấu (được thiết kế trên SolidWorks) nhóm tác giả đã viết phần mềm mô phỏng bằng ngôn ngữ C++ để kiểm chứng lý thuyết. Hình 11 là giao diện phần mềm mô phỏng kiểm chứng công thức đã thiết lập.

6 KẾT LUẬN

Kết quả trình bày trong bài báo này có ý nghĩa có thực tiễn trong việc lập trình thành phần mềm cài đặt vào thiết bị nhằm tự động hóa khoan lỗ, nổ mìn trong việc thiết kế robot mới cũng như có thể cài đặt cho các robot bán tự động mà Việt Nam đã nhập ngoại nhằm nâng cao độ chính xác, hiệu quả trong công tác khoan lỗ, nổ mìn. Ngoài ra, kết quả này cũng là tiền đề để phát triển các loại tay máy robot tự hành có tích hợp định vị vệ tinh để thể tự động hóa quá trình khoan lỗ nổ mìn có giám sát từ xa theo một quy trình đã được thiết kế, đây là một trong những vấn đề nhóm tác giả tiếp tục nghiên cứu trong thời gian tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J M Reynolds, Modern drilling equipment for underground applications, Atlas Copco construction and mining Australia. Source: <https://vi.scribd.com/document/63182918/Modern-Drilling-Equipment-for-Underground-Applications>.
- [2] Dimitrios Kolymbas, *Tunelling and Tunnel mechanics*, 2nd corrected printing, 2008th edition, Springer.
- [3] Anton Petko, Richard Ziman; Drill and blast work on the Vouli tunnels, Finland, (2006) 04-09.
- [4] Li Xuefeng, Cheng Guihai, Li Xiaoquan, Zhang Ruichong; A Study of soft rock coupling support in Xiangjing coal mine; International symposium on safety science and technology, (2014) 812 – 817.
- [5] Guo Zhibiao, Yang Xiaojie, Bai Yunpeng, Zhou Feng, Li Erquiang; A study of support strategies in deep soft rock: The horsehead crossing roadway in Daquiang coal mine; *International journal of mining Science and Technology* 22 (2012) 665-667.
- [6] Peter K. Kaiser, Ming Cai; Design of rock support system under rockburst condition; *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering* 2012, 4(3), 215-227.
- [7] Jacek Karlinski, Eugeniusz Rusinski, Tadeusz Lewandowski; New generation automated drilling machine for tunnelling and underground mining work; *Automation in Construction* 17 (2008) 224-231.

- [8] Damian Derlukiewicz, Jacek Karlinski; Static and dynamic analysis of telescopic boom of self-propelled tunnelling machine; *Journal of theoretical and applied mechanics* 50, (2012) 47-59.
- [9] Vijaya Ranghavan, Assistant Professor; Analysis of performance of Jack hammer to determine the penetration rate on different rocks; *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, (2014) 08-17.
- [10] Robin Phillips, Massio Palladino, Camille Courtois; Development of brushed and brushless DC motors for use in the ExoMars and sampling mechanism, *Proceedings of the 41st Aerospace Mechanisms Symposium*. 2012.
- [11] Richard W. Uuswarvi, Martin E. Torngren; Introducing distributed control in mobile machine based on hydraulic actuators; *Mechatronics* Vol.4 1994, No 2, 139-157.
- [12] G. Nord, J. Appelgren; The next Atlas Copco generation of tunnel-rigs and some experience; *17th International mining congress and exhibition of Turkey-IMCET*, 2001, 289-295.
- [13] Casper Swart; Modern trends in drill navigation and system integration case studies from studies from Boliden and Kemi underground mines, *The South African Institute of Mining and Metallurgy: Rise Of The Machines - The 'State Of The Art' In Mining Mechanisation, Automation, Hydraulic Transportation And Communications*, (2006), 1-14.
- [14] Bruno Siciliano, Oussama Khalib; Handbook of Robotics; 2nd corrected printing; 2008th edition; Springer.
- [15] Mikell P.Groover, M.Weiss, R.Nagel; Industrial Robotics; 1986th edition; McGraw – Hill.
- [16] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo; Robotics: Modelling, planning and Control; 2010th edition; Springer.



Nguyễn Hồng Thái, kỹ sư chuyên ngành Cơ tin kỹ thuật năm 1999 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, nhận bằng Thạc sỹ chuyên ngành Cơ học máy năm 2002, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Máy và Thiết bị tự động năm 2010 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Hướng nghiên cứu chính robot công nghiệp, lý thuyết bánh răng.



Nguyễn Quang Thái nhận bằng cử nhân Cơ Điện tử (2016) Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Từ năm 2016 đến nay là học viên cao học tại trường Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

A kinematic control algorithm for blasthole drilling robotic arm in tunneling

Nguyen Hong Thai, Nguyen Quang Thai

Abstract—The most typical method of tunneling in complicated geographical conditions is still blasthole drilling. To improve the efficiency of the work, Vietnam and several other countries have used drilling devices fitted with self-propelled hydraulic seven-link robotic arms which can also be manually controlled to modernize the drilling and blasting processes and improve the accuracy of the work. The task of controlling the robotic arm to automatically

drill the holes exactly as specified in the passport of blasting prepared by geotechnical and underground construction engineers requires a control algorithm for the controller of the robot. The matter will be clearly presented in this article.

Keywords—robotic arm, blasthole drilling, tunneling, self-propelled robotic arm, underground construction.