



XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC CẦN TRỰC XÂY DỰNG PHỤC VỤ MÔ PHỎNG CÁC HOẠT ĐỘNG LẮP GHEP

Lê Hồng Quân¹

Tóm tắt: Kỹ thuật xây dựng ảo cho phép các kỹ sư mô phỏng quá trình xây dựng trên máy tính trước khi khởi công các dự án ngoài thực tế và đang trở thành một kỹ thuật quan trọng để quản lý các dự án xây dựng yêu cầu thi công nhanh và phức tạp. Một sự quan tâm chính của xây dựng ảo là sự mô phỏng chi tiết sự hoạt động của các thiết bị xây dựng chủ lực cho dự án xây dựng. Nghiên cứu này tập trung vào phát triển một mô hình toán học để hỗ trợ sự mô phỏng các cần trục xây dựng. Mô hình toán học này gồm có mô hình động học và động lực học. Mô hình động học thể hiện các bộ phận của cần trục được điều khiển bởi các thợ vận hành cần trục. Mô hình động lực học thể hiện quan hệ động lực học trong hệ thống treo vật nặng (gồm cáp nâng và vật nặng) mà các thợ vận hành không thể điều khiển trực tiếp được trong quá trình điều khiển cần trục.

Từ khóa: Cần trục xây dựng; rô bốt; xây dựng ảo; hoạt hình.

Summary: Virtual construction allows engineers to simulate construction progress on computer before commencing the real project and is becoming an important technique to manage complicated construction projects. One major consideration for virtual construction is the simulation of the operation of construction equipment for a construction project. This research aims at developing a mathematical model to support the simulation of construction cranes. This model is composed of two submodels- a kinematics model and a dynamic model.

Key words: Construction cranes; robotics; virtual construction; animation.

Nhận ngày 28/4/2014, chỉnh sửa ngày 15/5/2014, chấp nhận đăng 31/10/2014



1. Đặt vấn đề

Cần trục thường được sử dụng để lắp ghép các phần tử kết cấu chính, vận chuyển vật tư và hỗ trợ nhiều nhiệm vụ khác trên công trường xây dựng. Để đảm bảo sử dụng hợp lý cần trục xây dựng trong một dự án xây dựng nào đó thì các kế hoạch lắp ghép thường được phát triển trước hoặc trong các giai đoạn đầu của quá trình xây dựng. Một kế hoạch lắp ghép điển hình bao gồm mặt bằng công trường thể hiện các vị trí đứng của cần trục, nơi tập kết vật tư và tiến độ về các hoạt động đã được qui hoạch cho cần trục. Tiến độ thường là một thời gian biểu thể hiện các cấu kiện chính được lắp ghép cho từng ngày làm việc. Do kế hoạch lắp ghép có chứa đựng cả thông tin về thời gian và không gian nên các nhà quản lý xây dựng đã bắt đầu sử dụng các công cụ 4-D chẳng hạn như Common Point và Graphisoft để mô phỏng các quá trình lắp ghép [8]. Các công cụ như vậy không chỉ hỗ trợ các giao tiếp giữa các bên khác nhau trong dự án xây dựng mà còn cho phép các kỹ sư thấy trước được những vấn đề tiềm tàng có thể xảy ra trong một quá trình lắp ghép chẳng hạn như các hoạt động không an toàn và không hiệu quả. Một mô hình toán học cần trục mà trên cơ sở đó có thể tạo ra các hoạt hình một cách tự động hoặc bán tự động để giảm bớt thời gian và chi phí của việc hình dung hóa các kế hoạch xây dựng là rất cần thiết.

Hiện nay trên thế giới đã có một loạt các công trình nghiên cứu có liên quan đến mô phỏng lắp ghép. Các tác giả đã cố gắng tận dụng rất nhiều các phương pháp số và công nghệ thông tin để nâng cao việc sử dụng cần trục hoặc qui hoạch các hoạt động lắp ghép. Furusaka và Gray [5] đã phát triển các phương pháp số để hỗ trợ cho việc lựa chọn các cần trục. Zhang và các tác giả [12] đã nghiên cứu phương pháp máy tính

¹ThS, Khoa Cơ khí Xây dựng. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: lehquandhxd@gmail.com

để tối ưu hóa vị trí đứng của các cần trục tháp và vị trí tập kết vật tư. Lin và Haas [7] đã nghiên cứu việc sử dụng nhiều cần trục. Do sự phát triển nhanh chóng của công nghệ đồ họa máy tính nên O'Connor và các tác giả [10] đã phát triển rất nhiều các công cụ mô phỏng và hình dung hóa cho các hoạt động cần trục. Sacks và các tác giả [11] đã thực hiện nghiên cứu phân tích vùng dữ liệu để giám sát các hoạt động lắp ghép.

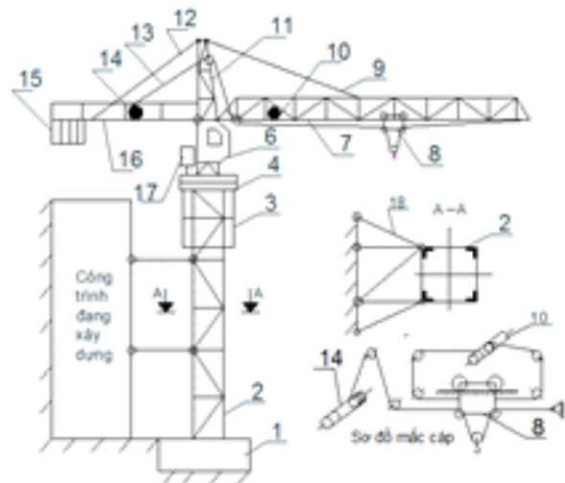
Các tác giả đề cập ở trên chủ yếu tập trung vào qui hoạch, lập tiến độ, hình dung hóa và giám sát các hoạt động lắp ghép của cần trục. Hầu hết họ đều nhấn mạnh đến các phần chính của các hoạt động lắp ghép chẳng hạn như quay tay cần, di chuyển xe con, và sự giãn dài của cáp nâng. Các tác giả thường bỏ qua hoặc giả thiết rằng thời gian cho quá trình nâng các phần tử kết cấu từ mặt đất và thao tác một cách chi tiết để đặt các phần tử kết cấu vào vị trí của chúng là không thay đổi. Ngoài ra, trong các nghiên cứu trên, do các bộ phận của cần trục chưa được mô tả chi tiết dưới dạng toán học nên không thể mô phỏng chính xác các hoạt động lắp ghép của cần trục ở mức chi tiết.

Ở Việt Nam, theo kiến thức cập nhật của tác giả thì hiện chưa có nghiên cứu nào và cũng chưa có tài liệu chỉ dẫn nào đề cập đến vấn đề phát triển mô hình toán học của cần trục phục vụ mô phỏng các hoạt động lắp ghép ở mức chi tiết. Do đó nội dung của nghiên cứu này là tập trung vào phát triển một mô hình toán học cho các cần trục xây dựng, trên cơ sở đó có thể tạo ra hoạt hình về các chuyển động lắp ghép của cần trục ở mức chi tiết. Một cách cụ thể, mục tiêu của nghiên cứu này là bao gồm:

- + Phát triển một mô hình toán học để hỗ trợ tạo ra các hoạt động cần trục dưới dạng chi tiết trên máy tính, mô hình này có thể phản ánh gần chính xác các hoạt động chi tiết của cần trục ngoài thực tế.
- + Quá trình phát triển mô hình phải có tính tổng quát sao cho nó có thể được mở rộng và được áp dụng cho các dạng cần trục hoặc các máy xây dựng khác
- + Sự dao động của cáp nâng gây ra bởi các chuyển động cần trục và các ngoại lực khác được tính toán để có thể hình dung hóa trên máy tính.

2. Mô hình hóa cần trục tháp xây dựng

Trong bài báo này, một cần trục tháp loại đầu quay cố định trên móng bê tông là loại cần trục đang được sử dụng phổ biến ở Việt Nam và trên thế giới được sử dụng như một ví dụ để giải thích cho các quá trình mô hình hóa. Các quá trình mô hình hóa này cũng có thể được sử dụng để mô hình hóa các dạng cần trục khác chẳng hạn như cần trục bánh xích, cần trục tháp loại nâng hạ cần... Hình 1 trình bày sơ đồ cấu tạo của một cần trục tháp loại đầu quay với 3 chuyển động: nâng hạ vật theo phương thẳng đứng, di chuyển xe con theo phương ngang và quay tay cần quanh trục thẳng đứng.



Hình 1. Sơ đồ cấu tạo chung cần trục tháp loại đầu quay với tay cần nằm ngang

1. Móng bê tông; 2. Thân tháp; 3. Lồng lắp dựng; 4. Thiết bị tựa quay; 6. Cabin; 7. Tay cần nằm ngang; 8. Xe con; 9. Neo cần; 10. Tời kéo xe con; 11. Đoạn đỉnh tháp; 12. Neo cần đối trọng; 13. Cáp nâng vật; 14. Tời nâng vật; 15. Đối trọng; 16. Cần đối trọng; 17. Cơ cấu quay; 18. Giằng tháp với công trình.

Trong nghiên cứu này, coi cần trục như một rô bốt có các khâu sau: thân tháp, tay cần nằm ngang, xe con, cáp nâng vật, móc treo và hệ thống nâng (gồm dây treo hàng và vật nâng). 5 khâu này được mô hình hóa bằng cách sử dụng một mô hình động học và một mô hình động lực học. Trong ba khâu đầu của các cần trục gồm thân tháp, cần và xe con được mô phỏng bằng một mô hình động học. Mô hình này được sử dụng để mô tả chuyển động của cần trục bằng cách giả thiết rằng không có các dao động xuất hiện trong khi cần trục làm việc. Giả thiết này cho phép sử dụng phương pháp của rô bốt để phân tích cần trục. Trong nghiên cứu này, ký hiệu Denavit - Hartenberg [1], [4] là một phương pháp ký hiệu được sử dụng rộng rãi trong rô bốt được ứng dụng để phát triển các ma trận động học của cần trục. Các ma trận này mô tả mỗi

quan hệ giữa chuyển động của từng bộ phận của rô bốt và khâu bàn kẹp dưới dạng phương pháp số. Các ma trận động học biểu diễn mối quan hệ giữa chuyển động của từng bộ phận có thể chuyển động của cần trục và vị trí của móc treo. Do ký hiệu Denavit- Hartenberg là một phương pháp có tính hệ thống để thiết lập các ma trận tay máy thuận cho tất cả các máy gần giống rô bốt nên nhìn chung nó có thể được áp dụng cho các dạng cần trục khác nhau.

Các phần còn lại của cần trục, bao gồm cáp và hệ thống nâng được mô phỏng bằng một mô hình động lực học. Nó được sử dụng để mô phỏng sự dao động của cáp nâng gây ra bởi các chuyển động cần trục chẳng hạn như quay tay cần hoặc dịch chuyển xe con dọc theo tay cần và bởi các lực quán tính trên cụm móc và tải trọng nâng. Các phương trình chuyển động sẽ được thiết lập để thể hiện các đặc tính dưới dạng vật lý và chương trình giải dạng số cũng sẽ được phát triển để cho phép giải các phương trình trên máy tính. Hai phần sau đây sẽ mô tả chi tiết sự phát triển các mô hình động học và động lực học của cần trục thấp loại đầu quay làm ví dụ như đã nêu ở trên.

3. Mô hình động học cần trục

Mô hình động học cho phép mô tả một cần trục và các chuyển động của nó dưới dạng toán học. Nó đặc biệt hữu ích khi muốn tính vị trí của móc treo từ chuyển động của từng khâu khớp hoặc để tìm ra chuyển động tương đối của các bộ phận cần trục để hoàn thành một quỹ đạo chuyển động nào đó của vật nâng.

3.1 Mối quan hệ giữa các bộ phận cần trục

Như đã đề cập ở phần trước, ký hiệu Denavit-Hartenberg được sử dụng để mô tả mối quan hệ về mặt hình học giữa các bộ phận cần trục dưới dạng toán học. Ký hiệu Denavit-Hartenberg xác định một hệ tọa độ gắn vào từng khâu để mô tả chuyển vị của khâu i nào đó có liên quan đến khâu liền kề với nó $i-1$.

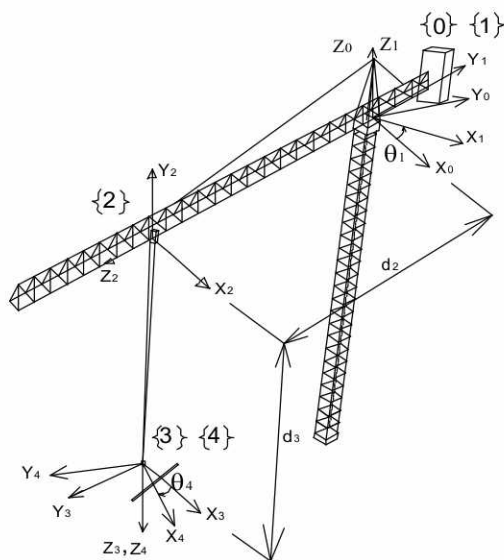
Theo [4] thì bản chất mối quan hệ giữa khâu $i-1$ và khâu i là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ $\{i-1\}$ và hệ tọa độ $\{i\}$. Ma trận này có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận chuyển đổi thuần nhất ${}^{i-1}T_i$ như sau:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c.\theta_i & -s.\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

trong đó ${}^{i-1}T_i$ biểu diễn hệ tọa độ $\{i\}$ theo hệ tọa độ $\{i-1\}$. Để trình bày một cách ngắn gọn hơn ở đây $c\theta_i$ được dùng để ký hiệu cho $\cos(\theta_i)$; $s\theta_i$ ký hiệu cho $\sin(\theta_i)$, $s\alpha_{i-1}$ ký hiệu cho $\sin(\alpha_{i-1})$ và $c\alpha_{i-1}$ ký hiệu cho $\cos(\alpha_{i-1})$. Chi tiết về các tham số a_{i-1} , d_i , α_{i-1} và θ_i có thể xem thêm trong [1],[4].

3.2 Mô hình động học cần trục

Để xây dựng mô hình động học cho toàn bộ một cần trục, phải xác định hệ tọa độ cho các bộ phận của nó bằng cách gắn bốn hệ tọa độ tham chiếu vào các vị trí mà các góc xoay hoặc các chuyển vị tương đối có thể xuất hiện. Hình 2 thể hiện việc gắn các hệ tọa độ. Hệ tọa độ thứ nhất $\{0\}$ được gắn vào đỉnh của tháp, hệ tọa độ này sẽ không dịch chuyển khi cần trục làm việc. Hệ tọa độ thứ hai $\{1\}$ giao thoa với hệ tọa độ thứ nhất $\{0\}$ nhưng được gắn vào tay cần. Nói một cách dễ hiểu thì trong khi cần trục đang quay thì hệ tọa độ $\{1\}$ quay quanh trục z_0 (là trục z của hệ tọa độ $\{0\}$). Hệ tọa độ thứ ba $\{2\}$ được gắn vào tâm của xe con. Hệ tọa độ thứ tư $\{3\}$ được gắn vào cụm móc và hệ tọa độ thứ năm $\{4\}$ được gắn vào phía dưới cụm móc sao cho góc quay tương đối giữa cụm móc và móc treo có thể được mô phỏng. Sử dụng phương trình (1) có thể thiết lập được bốn ma trận chuyển đổi để mô tả mối quan hệ giữa các khâu.



Hình 2. Gắn các hệ tọa độ tham chiếu trên cần trục tháp

0T_1 , 1T_2 , 2T_3 và 3T_4 . Trong đó 0T_1 là hàm chuyển đổi từ hệ tọa độ gốc {0} cố định trên đỉnh tháp sang hệ tọa độ {1}. Thay các tham số $a_0=0$, $\alpha_0=0^\circ$ và $d_1=0$ (được tìm bởi các định nghĩa đã được trình bày ở hình 2) vào phương trình (1) nhận được ma trận 0T_1 . Tương tự các ma trận 1T_2 , 2T_3 và 3T_4 được xác định bằng cách thay các tham số ($a_1=0$, $\alpha_1=-90^\circ$ và $\theta_2=0^\circ$), ($a_2=0$, $\alpha_2=-90^\circ$ và $\theta_3=0^\circ$), ($a_3=0$, $\alpha_3=0^\circ$ và $d_4=0$) vào phương trình (1). Một khi các ma trận chuyển đổi cho tất cả các cặp khâu liên kế đã được xác định thì hàm động học thuận của cần trục tháp sẽ tìm được bằng cách nhân tất cả các ma trận chuyển đổi khâu với nhau. Do mô hình động học là một ma trận chuyển hệ tọa độ từ {0} sang {4}, ký hiệu ma trận này là 0T_4 và được xác định bằng cách nhân các ma trận 0T_1 , 1T_2 , 2T_3 và 3T_4 .

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} C_1C_4 + S_1S_4 & S_1C_4 - C_1S_4 & 0 & -d_2S_1 \\ S_1C_4 - C_1S_4 & -C_1C_4 - S_1S_4 & 0 & d_2C_1 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

trong đó: c_i ký hiệu cho $\cos(\theta_i)$, s_i ký hiệu cho $\sin(\theta_i)$ và θ_i là góc quay của tay cần quanh hệ tọa độ {0} đó chính là góc quay giữa x_0 và x_1 đo quanh trục z_1 , c_4 ký hiệu cho $\cos(\theta_4)$, s_4 ký hiệu cho $\sin(\theta_4)$ và θ_4 là góc quay giữa móc và cụm móc đó cũng chính là góc giữa x_3 và x_4 đo quanh trục z_4 , d_2 là khoảng cách từ trục quay của tay cần đến tâm của xe con và d_3 ký hiệu cho chiều dài của cáp nâng cần trục.

Ma trận 0T_4 là một ma trận thuần nhất. Nó cho phép tính toán được hướng và vị trí của móc treo cần trục theo hệ tọa độ cố định {0}. Có thể nhận thấy rằng chín phần tử trong góc trái trên cùng của ma trận 0T_4 tương đương với một ma trận xoay 0R_4 , đó là ma trận xoay véc tơ từ hệ tọa độ {0} sang hệ tọa độ {4} nó xác định hướng của móc treo. Do đó 3 trục chính trong hệ tọa độ {4} theo hệ tọa độ {0} sẽ là:

$${}^0R_4 = [{}^0X_4, {}^0Y_4, {}^0Z_4] = \begin{bmatrix} C_1C_4 + S_1S_4 & S_1C_4 - C_1S_4 & 0 \\ S_1C_4 - C_1S_4 & -C_1C_4 - S_1S_4 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

trong đó 0X_4 , 0Y_4 và 0Z_4 lần lượt là các véc tơ đơn vị của các trục x , y , z trong hệ tọa độ của móc treo {4} theo hệ tọa độ {0}. Tương tự, véc tơ 0Y_4 là véc tơ đơn vị của trục y của hệ tọa độ của móc treo {4} theo hệ tọa độ {0} và véc tơ 0Z_4 là véc tơ đơn vị của trục z của hệ tọa độ móc treo {4} theo hệ tọa độ {0}.

Tọa độ xác định vị trí móc treo cũng được xác định bởi cột thứ 4 của phương trình (2):

$${}^0R_4 = [{}^0X_4, {}^0Y_4, {}^0Z_4] = \begin{bmatrix} C_1C_4 + S_1S_4 & S_1C_4 - C_1S_4 & 0 \\ S_1C_4 - C_1S_4 & -C_1C_4 - S_1S_4 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

trong đó ${}^0P_{4ORG}$ là gốc của hệ tọa độ {4} theo hệ tọa độ {0}. Vì hệ tọa độ {4} được gắn vào móc treo, nên véc tơ này cũng thể hiện vị trí của móc treo theo hệ tọa độ cố định {0} đặt trên đỉnh tháp.

Như vậy, với việc biết trước chuyển động trong từng khớp, cụ thể là biết trước θ_1 , d_2 , d_3 , θ_4 có thể sử dụng phương trình (2) để tính toán hướng và vị trí của móc treo (động học thuận) và ngược lại, nếu biết trước vị trí và hướng của móc treo chúng ta có thể sử dụng các ma trận động học ngược để tính toán các chuyển động của từng khớp, trong trường hợp này, giải các phương trình (3) và (4) sẽ đạt được điều đó.

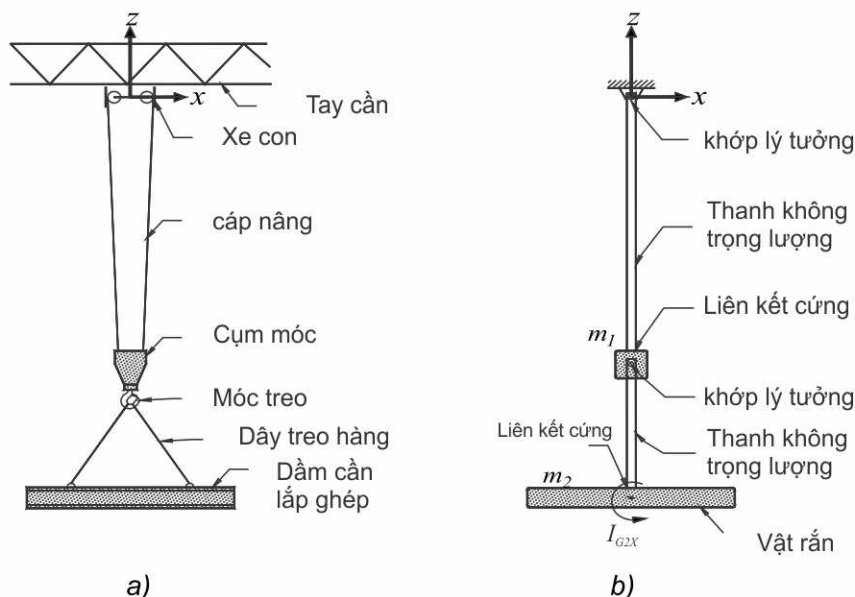


4. Mô hình động lực học cần trục

Mô hình động lực học chỉ mô phỏng các dao động của các phần tử được treo từ xe con. Bao gồm dao động của cáp nâng, cụm móc, móc treo, dây treo hàng, và vật nặng (thường là dầm hoặc cột). Các dao động gây ra do sự biến dạng của tháp và cần được ước lượng khoảng chừng 3 đến 10cm. Các biến dạng này là nhỏ hơn nhiều so với các chuyển vị của các phần tử trong hệ thống treo do đó được bỏ qua trong mô hình mô phỏng. Nói cách khác tháp và tay cần được giả thiết là các vật rắn tuyệt đối cứng trong mô hình cần trục. Để mô hình hóa động lực học của hệ thống treo dưới dạng số, cần thực hiện theo bốn bước sau: (1) mô hình hóa hệ thống treo vật, (2) phát triển các phương trình chuyển động, (3) xác định tất cả các ngoại lực và (4) giải các phương trình.

4.1 Mô hình hóa hệ thống treo vật của cần trục

Hệ thống treo của một cần trục bao gồm cáp nâng, cụm móc, móc treo, dây treo hàng và vật nâng (hình 3a). Để phân tích chuyển động động lực học của hệ thống treo này sử dụng hệ tọa độ bàn tay phải. Gốc của hệ tọa độ được đặt ở tâm của xe con. Trục x được xác định dọc theo chiều dài của tay cần và chiều dương là hướng ra mũi cần. Hướng trục y là vuông góc với tay cần, và trục z là hướng lên phía trên theo phương thẳng đứng.

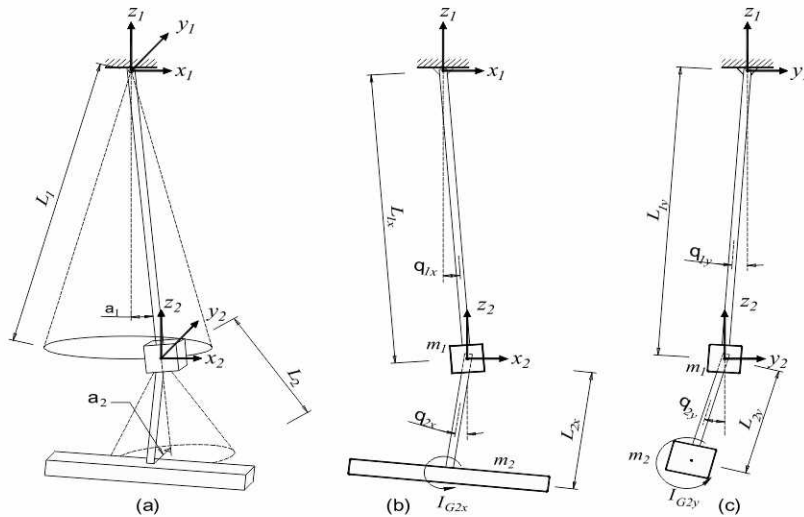


Hình 3. Mô hình đã lý tưởng hóa của hệ thống treo vật
a) Hệ thống treo; b) Mô hình hóa

Trên Hình 3b thể hiện hệ thống treo trong mặt phẳng $x-z$. Có hai phần tử cơ bản. Phần tử thứ nhất là sự kết hợp giữa cụm móc và móc treo được treo từ xe con và phần tử thứ hai là vật nâng. Giữa xe con và cáp nâng được liên kết với nhau thông qua khớp lý tưởng. Với liên kết như vậy sẽ cho phép cụm móc xoay tự do 3 chiều xung quanh trục Z .

Trong mô hình, cáp nâng được giả thiết như thanh cứng không trọng lượng có chiều dài là L_1 . Cụm móc và móc treo có khối lượng tập trung m_1 và coi mô men quán tính khối lượng là không đáng kể. Liên kết thanh không trọng lượng và cụm móc được giả thiết là liên kết cứng và do đó chúng được quay cùng nhau. Vật nâng được giả thiết có khối lượng tập trung m_2 với mô men quán tính khối lượng I_{G2x} trong mặt phẳng $x-z$ (quay quanh trục song song với trục y). Dây treo hàng cũng được mô hình hóa như một thanh cứng không trọng lượng có chiều dài L_2 có thể xoay nhờ khớp lý tưởng đặt tại tâm khối lượng m_1 . Liên kết giữa thanh không trọng lượng phía dưới và vật nâng được giả thiết là liên kết cứng sao cho cả 2 phần tử được quay cùng với nhau.

Hình 4 thể hiện cấu hình chuyển vị 3 chiều của hệ thống treo cần trục. Trong không gian 3 chiều, sử dụng 2 đường nón gạch - chấm để biểu thị các vùng mà các thanh không trọng lượng phía trên và phía dưới có thể lắc. Trên hình 4a, cho thấy khối lượng tập trung m_1 có thể lắc ngoài mặt phẳng tờ giấy và đồng thời cũng lắc về phía bên phải. Khối lượng tập trung m_2 lắc ngoài mặt phẳng tờ giấy nhưng lắc sang bên trái. Để đơn giản cho việc giải thích chuyển động trong không gian 3 chiều, cần xác định tạm thời 2 hệ tọa độ tham chiếu. Hệ thứ nhất được gọi là hệ tọa độ tham chiếu phía trên (hình 4a) được gắn vào khớp lý tưởng trên đỉnh của hệ thống treo (x_1, y_1, z_1). Hệ tọa độ thứ 2 gọi là hệ tọa độ tham chiếu phía dưới (x_2, y_2, z_2) được đặt tại tâm của khối lượng tập trung m_1 . Hệ tọa độ này là song song với hệ tọa độ phía trên và không có chuyển động xoay tương đối.

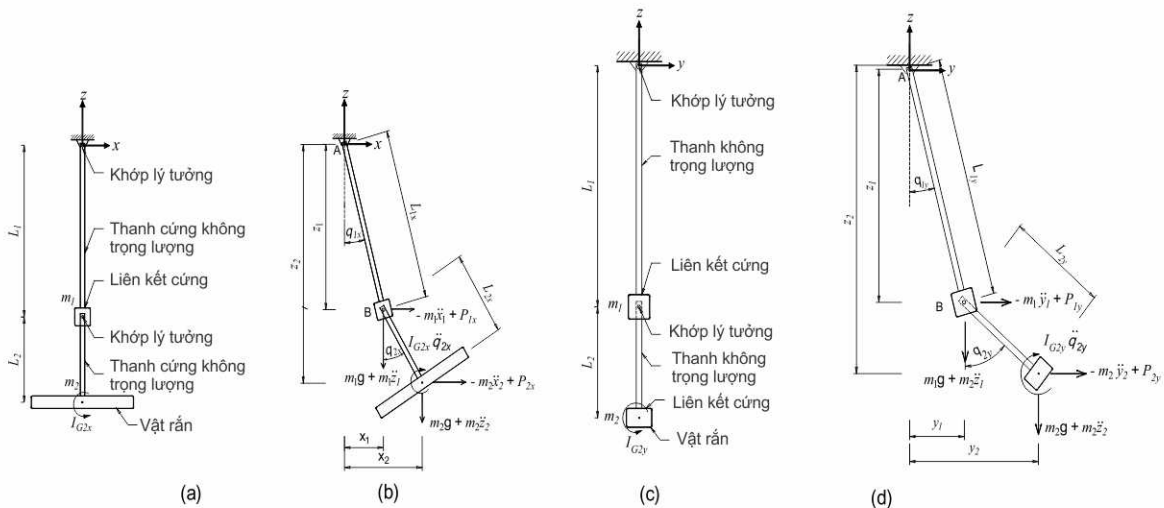


Hình 4. Mô hình hệ thống treo cần trục đã lý tưởng hóa theo vị trí chuyển vị:
(a) trong không gian 3 chiều, (b) chiếu lên mặt phẳng x-z, (c) chiếu lên mặt phẳng y-z

Trong Hình 4, α_1 ký hiệu góc tạo bởi thanh không trọng lượng phía trên và trục z_1 , α_2 ký hiệu góc tạo bởi giữa thanh không trọng lượng phía dưới với trục z_2 , θ_{1x} là góc tạo bởi giữa thanh không trọng lượng phía trên và mặt phẳng y_1-z_1 , θ_{2x} là góc tạo bởi giữa thanh không trọng lượng phía dưới và mặt phẳng y_2-z_2 , θ_{1y} là góc tạo bởi giữa thanh không trọng lượng phía trên và mặt phẳng x_1-z_1 , θ_{2y} là góc tạo bởi giữa thanh không trọng lượng phía dưới và mặt phẳng x_2-z_2 , L_{1x} là chiều dài của thanh không trọng lượng phía trên chiếu lên mặt phẳng x_1-z_1 , L_{2x} là chiều dài của thanh không trọng lượng phía dưới chiếu lên mặt phẳng x_2-z_2 , L_{1y} là chiều dài của thanh không trọng lượng phía trên chiếu lên mặt phẳng y_1-z_1 , L_{2y} là chiều dài của thanh không trọng lượng phía dưới chiếu lên mặt phẳng y_2-z_2 . I_{G2x} ký hiệu mômen quán tính khối lượng của vật nâng xoay trong mặt phẳng x-z (quanh 1 trục song song với trục y) và I_{G2y} ký hiệu mômen quán tính vật nâng xoay trong mặt phẳng y-z (quanh 1 trục song song với trục x).

4.2 Các phương trình chuyển động

Sử dụng mô hình đã được mô tả của hệ thống treo của cần trục, có thể thiết lập được các phương trình chuyển động. Để đơn giản hóa sử dụng 5 giả thiết sau: Bỏ qua khối lượng của cáp nâng do chúng nhỏ hơn nhiều so với các khối lượng khác; các sợi cáp nâng là thẳng tại mọi thời điểm; thân tháp, tay cần và xe con được xem như các vật rắn tuyệt đối; cáp có độ cứng tuyệt đối và gia tốc mở máy và phanh là hằng số.



Hình 5. Các sơ đồ treo buộc đảm bảo trong các mặt phẳng song song và vuông góc với cần
(a) Mô hình đã được lý tưởng hóa trong mặt phẳng x-z, (b) Sơ đồ lực tác dụng trong mặt phẳng x-z,
(c) Mô hình đã được lý tưởng hóa trong mặt phẳng y-z, (d) Sơ đồ lực tác dụng trong mặt phẳng y-z

Trong Hình 5, giả thiết hệ động lực học chỉ được phép dịch chuyển trong mặt phẳng x-z và y-z nên mô hình lý tưởng hóa chỉ ra trong hình 3 đã được biến đổi một chút sao cho hệ động lực học chỉ được phép chuyển động trong mặt phẳng x-z và y-z. Nói cách khác, chuyển động quay của chốt ngoài mặt phẳng x-z và y-z là không được xét đến. Hệ biến đổi này là giống với hệ đã thể hiện trong Hình 5 ngoại trừ rằng chốt không ma sát ba chiều phía trên đã được thay thế bởi một chốt 2 chiều. Hình 5b thể hiện sơ đồ lực tác dụng của hệ trong mặt phẳng x-z, trong đó các lực trọng trường tác dụng lên các khối lượng tập trung phía trên và phía dưới được thể hiện và các ngoại lực (lực nằm ngang) P_{1x} và P_{2x} cũng được kể đến. Các ngoại lực này có thể là các lực động tác dụng trực tiếp lên các khối lượng tập trung chẳng hạn như lực gió hoặc lực quán tính do chuyển động của tay cần và của xe con gây ra trong mặt phẳng ngang.

Từ sơ đồ cân bằng động lực học được thể hiện trong hình 5b, các khoảng cách các tay đòn lực được xác định như sau:

$$x_1 = L_{1x} \sin \theta_{1x} \quad (5)$$

$$x_2 = L_{1x} \sin \theta_{1x} + L_{2x} \sin \theta_{2x} \quad (6)$$

$$z_1 = L_{1x} \cos \theta_{1x} \quad (7)$$

$$z_2 = L_{1x} \cos \theta_{1x} + L_{2x} \cos \theta_{2x} \quad (8)$$

Các phương trình chuyển động được suy ra bằng cách xét các phương trình cân bằng Mômen. Phương trình chuyển động thứ nhất được suy ra bằng cách xét phương trình cân bằng tổng mômen quanh điểm A:

$$\sum M_A = 0 \quad (9)$$

$$-(m_1 \ddot{x}_1 + P_{1x}) \cdot z_1 - (m_2 \ddot{x}_2 + P_{2x}) \cdot z_2 + (m_1 g + m_1 \ddot{z}_1) x_1 + (m_2 g + m_2 \ddot{z}_2) x_2 + I_{G2x} \ddot{\theta}_{2x} = 0 \quad (10)$$

Tương tự, phương trình chuyển động thứ 2 được suy ra bằng cách xét phương trình cân bằng mômen quanh điểm B

$$\sum M_B = 0 \quad (11)$$

$$-(m_2 \ddot{x}_1 + P_{2x})(z_2 - z_1) + (m_2 g + m_2 \ddot{z}_2)(x_2 - x_1) + I_{G2x} \ddot{\theta}_{2x} = 0 \quad (12)$$

Lấy phương trình (10) trừ đi phương trình (12), được:

$$-(m_1 \ddot{x}_1 + P_{1x}) \cdot z_1 - (m_2 \ddot{x}_2 + P_{2x}) \cdot z_1 + (m_1 g + m_1 \ddot{z}_1) x_1 + (m_2 g + m_2 \ddot{z}_2) x_1 = 0 \quad (13)$$

Thay các phương trình từ (5) đến phương trình (8) vào trong phương trình (10), sau khi thay thế một loạt các số hạng lượng giác và một số phép biến đổi đại số:

$$(m_1 + m_2) \cdot L_{1x}^2 \ddot{\theta}_{1x} + m_2 \cdot L_{1x} \cdot L_{2x} \ddot{\theta}_{2x} \cos(\theta_{1x} - \theta_{2x}) + m_2 \cdot L_{1x} \cdot L_{2x} \cdot \dot{\theta}_{2x}^2 \sin(\theta_{1x} - \theta_{2x}) + (m_1 + m_2) \cdot L_{1x} \cdot g \cdot \sin \theta_{1x} = (P_{1x} + P_{2x}) \cdot L_{1x} \cdot \cos \theta_{1x} \quad (14)$$

Tương tự, thay thế các phương trình từ (5) đến phương trình (8) vào phương trình (13) được:

$$I_{G2x} \ddot{\theta}_{2x} + m_2 \cdot L_{2x}^2 \ddot{\theta}_{2x} + m_2 \cdot L_{1x} \cdot L_{2x} \ddot{\theta}_{1x} \cos(\theta_{1x} - \theta_{2x}) - m_2 \cdot L_{1x} \cdot L_{2x} \cdot \dot{\theta}_{2x}^2 \sin(\theta_{1x} - \theta_{2x}) + m_2 \cdot L_{2x} \cdot g \cdot \sin \theta_{2x} = P_{2x} L_{2x} \cos \theta_{2x} \quad (15)$$

Theo kinh nghiệm quan sát thực tế khi cần trục nâng các cột và dầm bê tông đúc sẵn trên công trường xây dựng chợ Mơ cho thấy rằng các góc xoay α_1 và α_2 là thường nhỏ hơn 10° . Mặt khác vì các góc θ_{1x} và θ_{1y} là nhỏ hơn hoặc bằng góc α_1 , và các góc θ_{2x} và θ_{2y} là nhỏ hơn hoặc bằng góc α_2 nên có thể dễ dàng suy ra rằng các góc θ_{1x} , θ_{1y} , θ_{2x} , θ_{2y} là đều nhỏ hơn 10° trong hầu hết các tình huống của một quá trình lắp ghép. Các sai số của việc giả thiết L_{1x} hoặc L_{1y} bằng L_1 và của giả thiết L_{2x} hoặc L_{2y} bằng L_2 khi α_1 và α_2 nhỏ hơn 10° là nhỏ hơn 1,5% ($1 - \cos(10^\circ) = 0,015$). Do đó khi α_1 và α_2 nhỏ hơn 10° sẽ là hợp lý để ước lượng L_{1x} và L_{1y} bằng L_1 và tương tự L_{2x} và L_{2y} bằng L_2 . Như vậy mô hình cần trục đã được lý tưởng hóa trong không gian 3 chiều có thể được tách riêng ra làm 2 hệ động lực học. Một hệ dao động trong mặt phẳng song song với tay cần (mặt phẳng x-z) và hệ còn lại chỉ dao động trong mặt phẳng vuông góc với tay cần (mặt phẳng y-z). Vì các góc θ_{1x} , θ_{1y} , θ_{2x} và θ_{2y} là nhỏ hơn 10° nên dễ dàng có $\sin \theta_{1x} = \theta_{1x}$, $\sin \theta_{2x} = \theta_{2x}$, $\cos \theta_{2y} = 1$, $\cos(\theta_{1x} - \theta_{2x}) = 1$, $\sin(\theta_{1x} - \theta_{2x}) = \theta_{1x} - \theta_{2x}$. Các số hạng có chứa $\dot{\theta}_{1x}^2$, $\dot{\theta}_{2x}^2$, là rất nhỏ so với các số hạng còn lại và có thể được bỏ qua. Cuối cùng có thể rút gọn phương trình (14):

$$(m_1 + m_2) \cdot L_1^2 \ddot{\theta}_{1x} + m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \ddot{\theta}_{2x} + (m_1 + m_2) \cdot L_1 \cdot g \cdot \theta_{1x} = (P_{1x} + P_{2x}) \cdot L_1 \quad (16)$$

Tương tự, phương trình (15) được rút gọn thành:

$$I_{G2x} \cdot \ddot{\theta}_{2x} + m_2 \cdot L_2^2 \cdot \ddot{\theta}_{2x} + m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \ddot{\theta}_{1x} + m_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \theta_{2x} = P_{2x} \cdot L_2 \quad (17)$$

Các phương trình (16) và (17) có thể được viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)L_1^2 & m_2 L_1 L_2 \\ m_2 L_1 L_2 & I_{G2x} + m_2 L_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_{1x} \\ \ddot{\theta}_{2x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gL_1 & 0 \\ 0 & m_2 g L_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{1x} \\ \theta_{2x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (P_{1x} + P_{2x})L_1 \\ P_{2x}L_2 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Hệ phương trình vi phân thể hiện trong (18) tương ứng với các chuyển động xuất hiện trong mặt phẳng x-z (song song với mặt phẳng chứa cần). Với cách làm tương tự, ta có thể tìm được hệ phương trình vi phân tương ứng với các chuyển động xuất hiện trong mặt phẳng y-z.

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)L_1^2 & m_2 L_1 L_2 \\ m_2 L_1 L_2 & I_{G2y} + m_2 L_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_{1y} \\ \ddot{\theta}_{2y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gL_1 & 0 \\ 0 & m_2 g L_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{1y} \\ \theta_{2y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (P_{1y} + P_{2y})L_1 \\ P_{2y}L_2 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

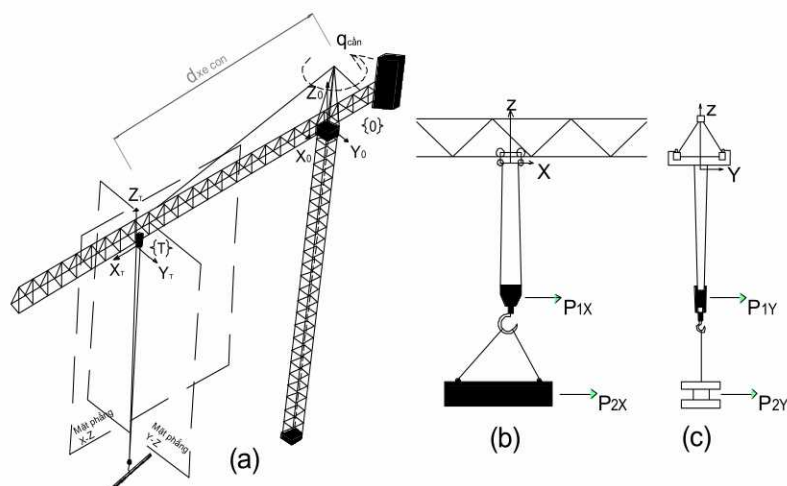
Cuối cùng, giả thiết rằng hệ động lực học là hệ dao động tắt dần. Số hạng tắt dần Caughey cho từng phương trình chuyển động để biểu thị cho sự tắt dần của biên độ dao động c được xác định theo [2]:

$$c = 2 \cdot \sqrt{km} \cdot \xi \quad (20)$$

trong đó ξ ký hiệu cho tỷ số tắt dần dao động, k là độ cứng và m là khối lượng lần lượt trong các phương trình chuyển động (18) và (19).

4.3 Các lực quán tính

Các lực quán tính P_{1x} , P_{1y} , P_{2x} , P_{2y} trong các phương trình (18) và (19) được sinh ra do các chuyển động quay tay cần và dịch chuyển xe con dọc theo tay cần.



Hình 6. Các chuyển động của cần trục và các lực quán tính: (a) Nhìn phối cảnh 3 chiều; (b) Các lực quán tính xuất hiện trong mặt phẳng x-z; (c) Các lực quán tính trong mặt phẳng y-z.

Gọi $\theta_{cần}$ là góc quay của tay cần nằm ngang quanh trục quay của máy (tâm tháp) và d_{xecon} là khoảng cách từ tâm tháp đến tâm xe con. Từ Hình 6b, xác định được các lực quán tính tác dụng lên các khối lượng tập trung trong mặt phẳng x-z là:

$$P_{1x} = -m_1(-d_{xecon} \cdot \ddot{\theta}_{cần} + \ddot{d}_{xecon}) \quad (21)$$

$$P_{2x} = -m_2(-d_{xecon} \cdot \ddot{\theta}_{cần} + \ddot{d}_{xecon}) \quad (22)$$

trong đó m_1 là khối lượng của cụm móc; m_2 là khối lượng của vật nâng; $\ddot{\theta}_{cần}$ là vận tốc góc của tay cần (chiều dương là ngược chiều kim đồng hồ); $\ddot{d}_{xecon}$ là gia tốc chuyển động tịnh tiến của xe con dọc theo tay cần nằm ngang.

Hoàn toàn tương tự, từ hình 6c xác định được các lực quán tính tiếp tuyến tác dụng lên hệ trong mặt phẳng vuông góc với cần như sau:

$$P_{1y} = -m_1 \cdot d_{xecon} \cdot \ddot{\theta}_{cần} \quad (23)$$

$$P_{2y} = -m_2 \cdot d_{xecon} \cdot \ddot{\theta}_{cần} \quad (24)$$

trong đó $\ddot{\theta}_{\text{cần}}^2$ là gia tốc góc của tay cần với chiều dương là ngược chiều kim đồng hồ quanh trục thẳng đứng.

4.4 Cách giải các phương trình

Sử dụng phương pháp Newmark [9] để giải các phương trình chuyển động (18) và (19) đã được thiết lập ở trên. Phương pháp Newmark được sử dụng rộng rãi để giải các phương trình vi phân cho hệ động lực học một bậc tự do có dạng:

$$m(t)\ddot{u}(t) + c(t)\dot{u}(t) + k(t)u(t) = p(t) \quad (25)$$

trong đó: $m(t)$ là số hạng khối lượng trong hệ tại thời điểm t , $c(t)$ là số hạng tắt dần trong hệ tại thời điểm t , $k(t)$ là số hạng độ cứng trong hệ tại thời điểm t , $p(t)$ là ngoại lực tác dụng trong hệ tại thời điểm t , $u(t)$, $\dot{u}(t)$ và $\ddot{u}(t)$ lần lượt là chuyển vị, vận tốc và gia tốc của hệ tại thời điểm t .

Trong bước thời gian t_i , hàm số tính toán các số hạng cần thiết trong các phương trình (18) và (19), bao gồm $m(t_i)$, $c(t_i)$, $k(t_i)$ và $p(t_i)$ và tìm ra được chuyển vị và vận tốc cho bước thời gian tiếp theo (nghĩa là tìm $\dot{u}(t_{i+1})$ và $\ddot{u}(t_{i+1})$) bằng cách sử dụng các phương trình sau:

$$\ddot{u}(t_{i+1}) = \ddot{u}(t_i) + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{u}(t_i) + (\gamma\Delta t)\ddot{u}(t_{i+1}) \quad (26)$$

$$u(t_{i+1}) = u(t_i) + (\Delta t)\dot{u}(t_i) + [(0,5-\beta(\Delta t)^2)]\ddot{u}(t_{i+1}) + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}(t_{i+1}) \quad (27)$$

Trong nghiên cứu này, biểu đồ gia tốc trung bình (với α và γ được cho lần lượt là 0,5 và 0,25) được sử dụng. Các thảo luận thêm về phương pháp Newmark và sự lựa chọn các tham số có thể được tìm trong [2].



5. Kết luận và hướng phát triển tiếp theo

Các hoạt động của cần trục ở mức chi tiết là các thành phần quan trọng và cơ bản khi mô phỏng quá trình lắp ghép của các cần trục xây dựng. Đóng góp chính của nghiên cứu này là xây dựng được một trình tự có tính hệ thống để thiết lập các mô hình động học và động lực học cần trục bằng các phương pháp toán học phục vụ cho mục đích mô phỏng các hoạt động cần trục ở dạng chi tiết. Với mô hình toán học của cần trục đã được thiết lập ở trên, các kỹ sư có thể ứng dụng lập các chương trình máy tính để thực thi mô hình toán học sao cho các hoạt động của cần trục ảo ở dạng chi tiết được tạo ra. Đồng thời, trong tương lai, có thể tích hợp mô hình toán học của cần trục với các phương pháp qui hoạch đường lắp ghép và các công cụ qui hoạch dự án để tăng mức độ tự động hóa của các quá trình mô phỏng. Các thuật toán và chương trình máy tính mô phỏng các hoạt động cần trục ở mức chi tiết để lắp ghép một tòa nhà bằng thép sẽ được trình bày ở các bài báo sau.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Thiện Phúc (2002), Rô bốt công nghiệp. Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật.
2. Chopra, K. A. (2000), *Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice- Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
3. Craig, J. (1989), *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 2nd edn., Addison-Wesley, Boston.
4. Denavit, J. & Hartenberg, R. S. (1955), "A kinematic notation for lower-pair mechanism based on matrices", *Journal of Applied Mechanics*, 215-21.
5. Furusaka, S. & Gray, C. (1984), "A model for the selection of the optimum crane for construction sites", *Construction Management and Economics*, 2, 157-76.
6. Heesom, D. & Mahdjoubi, L. (2004), "Trends of 4D CAD applications for construction planning", *Construction Management and Economics*, 22(2), 171-82.
7. Lin, K. & Haas, C. (1996), "Multiple heavy lifts optimization", *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(4), 354- 62.
8. Lipman, R.R. & Reed, K.A. (2000), "Using VRML in Construction Industry Applications", in *Proceedings of Web 3D: VRML 2000 Symposium*, Monterey, CA, February 21-24, 1-7.
9. Newmark, N. M. (1959), *A Method of Engineering Mechanics Division*, 85, 67-94.
10. O'Connor, J. T., Dharwadkar, P. V., Varghese, K. & Gatton, T. M. (1994), "Graphical visualization for planning heavy lifts", in *Proceedings of the First Congress on Computing in Civil Engineering*, ASCE, Washington DC, June.
11. Sacks, R., Navon, R., Brodetskaia, I. & Shapira, A. (2005), "Feasibility of automated monitoring of lifting equipment in support of project control", *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(5), 604-14.
12. Zhang, P., Harris, F. C., Olomolaiye, P. O. & Holt, G. D. (1999), "Location optimization for a group of tower cranes", *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(2), 115-22.