

Tính toán, mô phỏng cơ cấu Theo Jansen ứng dụng làm chân cho robot di động

Phạm Văn Bạch Ngọc⁽¹⁾, Trần Thị Trâm⁽²⁾

¹Viện Cơ học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Đại học Mỏ Địa chất

Email: pbngoc@imech.ac.vn

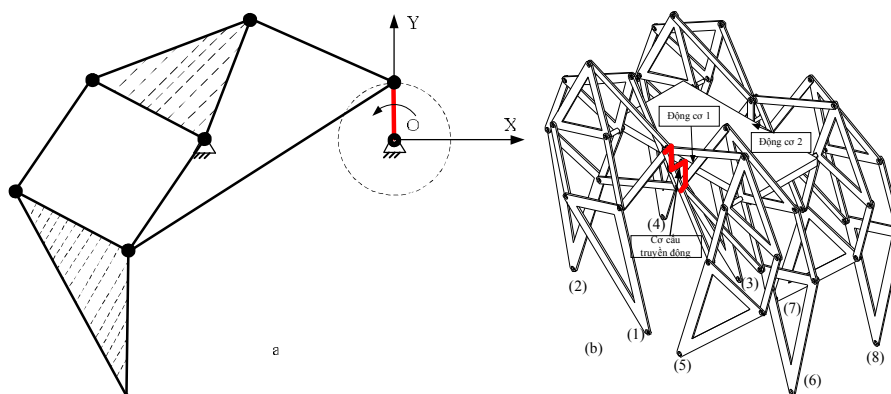
Tóm tắt

Ngày nay, robot di động đang được sử dụng rộng rãi, tùy theo ứng dụng cụ thể mà có nhiều loại robot di động với các cơ cấu dẫn động khác nhau, như loại sử dụng bánh xe, loại sử dụng xích, loại có chân... Có nhiều cơ cấu được phát triển để làm chân cho robot di động như nghiên cứu của Tsai, nghiên cứu của Klann... Trong nghiên cứu này, tác giả nghiên cứu robot di động sử dụng cấu trúc Theo Jansen làm chân. Cấu trúc Theo Jansen giúp cho robot có thể chuyển động được trên những bề mặt không bằng phẳng, hoặc có thể vượt qua các bậc cầu thang... Ngoài ra, việc sử dụng cơ cấu Theo Jansen giúp robot di động có thể mang tải trọng lớn hơn các robot di động sử dụng bánh xe hoặc xích... Bài báo này, tác giả sẽ trình bày các kết quả về nghiên cứu quỹ đạo chuyển động của chân robot, kích thước hình học, đồng thời mô phỏng chuyển động của chân của robot di động. Bên cạnh đó, tác giả sẽ đưa ra một mô hình robot di động sử dụng 8 cơ cấu Theo Jansen làm chân được thiết kế phù hợp để di chuyển trong không gian nhờ sự dẫn động của 2 động cơ. Cuối cùng tác giả sẽ đưa ra một mô hình thiết kế mẫu ba chiều cho robot di động sử dụng cơ cấu Theo Jansen làm chân.

Từ khóa: robot di động, động học và động lực học, Theo Jansen

1. Tổng quan

Ngày nay, robot di động đang được quan tâm nghiên cứu, phát triển với mục tiêu ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp, trong đời sống hàng ngày, làm việc trong các môi trường độc hại, hay thám hiểm ở các khu vực mà con người không trực tiếp tiếp cận được. Các robot di động có thể di chuyển bằng các bánh xe [3] như robot di động Sojourner do NASA chế tạo được sử dụng trong quá trình khám phá sao Hỏa, hay robot di động sử dụng chân (walking robot) Plustech được sử dụng để vận chuyển gỗ trong rừng, hay robot di động sử dụng bánh xích như Pioneer được phát triển để hoạt động trong môi trường độc hại của nhà máy nguyên tử Chernobyl, và có thể là các robot di động hoạt động dưới nước nhằm mục đích khám phá đại dương mê mông,...



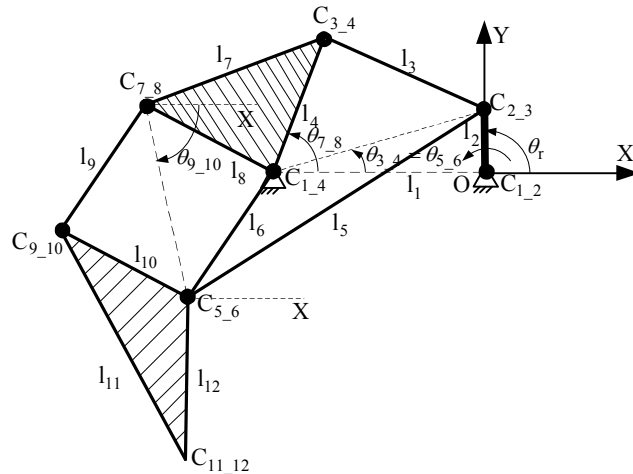
Hình 1. Cơ cấu Theo Jansen (a), và mô hình robot di động (b) sử dụng cơ cấu Theo Jansen làm chân

Hệ dẫn động của robot di động được phát triển dựa trên những ứng dụng hoặc các bề mặt của môi trường làm việc. Để vượt qua một bề mặt không bằng phẳng chúng ta cần phát triển một hệ thống dẫn động phù hợp mà hệ thống dẫn động bằng bánh xe hoặc bánh xích khó có thể thực hiện được. Ngày nay, phát triển các cơ cấu mới làm chân cho robot đang được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, như cơ cấu 6 khâu do Klann [4] giữ bản quyền, cơ cấu 4 khâu do Tsai nghiên cứu hay robot di động dạng chân do Boston Dynamics [5] phát triển,... Bài báo này, các tác giả quan tâm đến robot di động sử dụng chân dựa trên cơ cấu Theo Jansen [1], robot di động loại này sẽ di chuyển cân bằng hơn cơ cấu do Klann hay Tsai sử dụng. Cơ cấu Theo Jansen có 8 khâu được liên kết với nhau bằng các khớp quay, trong đó khâu 1 là tay quay như **hình 1(a)**. Tuy nhiên, cơ cấu Theo Jansen có

nhược điểm quá nhiều khâu, khớp dẫn đến ma sát lớn do vậy cần momen dẫn động lớn. Sử dụng 1 cơ cấu Theo Jansen như 1 chân cho robot đi động, kết hợp 8 cơ cấu này lại với nhau ta được 4 cặp chân cho robot đi động, 8 chân này được dẫn động bằng 2 động cơ điện. Các chân này được lắp ráp và dẫn động sao cho luôn có 4 chân tiếp xúc với bề mặt làm việc, 4 chân còn lại nhấc lên khi robot di chuyển. **Hình 1(b)** mô tả mô hình robot đi động sử dụng 8 cơ cấu Theo Jansen làm chân, cơ cấu truyền động từ động cơ dẫn động đến các chân được thiết kế như trên hình vẽ nhằm đảm bảo có thể dẫn động được đồng thời 4 chân. **Hình 1(b)** mô tả một vị trí chuyển động của robot trong quá trình di chuyển, các chân (1), (3), (5), (7) nhấc lên và các chân (2), (4), (6), (8) luôn tiếp xúc với bề mặt làm việc, điều đó đảm bảo rằng robot luôn được di chuyển nhờ 4 chân tiếp xúc với mặt làm việc. Để làm chủ cơ cấu Theo Jansen này, tác giả sẽ xây dựng các phương trình động học, tính toán quỹ đạo của điểm tiếp xúc với mặt phẳng làm việc và trình bày các kết quả về mô phỏng quỹ đạo này, cũng như đưa ra mô hình thiết kế ba chiều dạng ý tưởng cho robot đi động sử dụng cơ cấu Theo Jansen làm chân.

2. Phân tích động học cơ cấu Theo Jansen

Trong phần này tác giả phân tích chuyển động của 1 chân của robot đi động, chân này được mô hình hóa và ký hiệu như trên **hình 2**. Với θ_i là góc quay của động cơ dẫn động, l_i trong đó $i=1, 2, \dots, 12$ là chiều dài các khâu, $C_{1,2}, C_{2,3}, C_{3,4}, C_{1,4}, C_{5,6}, C_{7,8}, C_{9,10}$ lần lượt là giao điểm giữa 2 khâu, và $C_{11,12}$ (foot-point) là điểm tiếp xúc của chân robot với bề mặt làm việc. Cơ cấu Theo Jansen có tổng cộng 8 khâu liên kết với nhau, trong đó sẽ có 1 khâu chủ động là l_2 (hay khâu dẫn). Như trên **hình 2** điểm giao $C_{2,3}$ của khâu l_2 có thể chuyển động từ 0° (khi $C_{2,3}$ nằm trên trục OX) đến θ_r , khi $C_{2,3}$ nằm trên trục OY thì $\theta_r = 90^\circ$



Hình 2. Mô hình 1 cơ cấu chân của robot đi động

Trong phần này tác giả tập trung tính toán quỹ đạo chuyển động của giao điểm $C_{11,12}$ để làm căn cứ xác định kích thước chân của robot đi động cho phù hợp. Trước tiên các giao điểm từ $C_{1,2}$ đến $C_{11,12}$ cần phải được xác định. Như trên **hình 2** ta dễ dàng xác định được các giao điểm $C_{1,2}, C_{2,3}$ và $C_{1,4}$, các giao điểm khác sẽ được xác định dựa trên quan hệ sau:

- ① Giao điểm $C_{3,4}$ được xác định từ giao điểm $C_{1,4}$ và $C_{2,3}$
- ② Giao điểm $C_{7,8}$ được xác định từ giao điểm $C_{1,4}$ và $C_{3,4}$
- ③ Giao điểm $C_{5,6}$ được xác định từ giao điểm $C_{1,4}$ và $C_{2,3}$
- ④ Giao điểm $C_{9,10}$ được xác định từ giao điểm $C_{7,8}$ và $C_{5,6}$
- ⑤ Giao điểm $C_{11,12}$ được xác định từ giao điểm $C_{5,6}$ và $C_{9,10}$

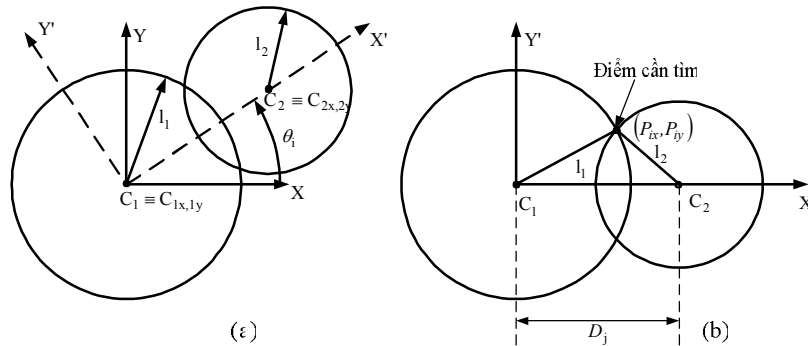
Khi tất cả các giao điểm được xác định thì quỹ đạo chuyển động của giao điểm C_{11_12} trên chân robot di động cũng được xác định, việc xác định các giao điểm này dựa trên kiến thức chung về cơ cấu bốn khâu trình bày trong [2]. Ở đây, các giao điểm này là giao điểm của 2 vòng tròn có bán kính lần lượt là chiều dài các khâu liên kết và tâm tại một giao điểm đã được xác định vì vậy ta có thể áp dụng tính chất hàm lượng giác để xác định vị trí các giao điểm này trong không gian. Trước tiên các giá trị của θ_i với $i = 3_4, 5_6, 7_8, 9_10, 11_12$ cần được xác định trên hệ tọa độ OXY. Dựa trên tính chất giao điểm giữa hai vòng tròn thì góc θ_i được xác định như phương trình sau:

$$\theta_i = \text{Atan2}(C_{2y} - C_{1y}, C_{2x} - C_{1x}) \text{ với } i = 3_4, 5_6, 7_8, 9_10, 11_12 \quad (1)$$

trong đó $C_{2y} - C_{1y}, C_{2x} - C_{1x}$ được liệt kê lần lượt ở cột 2 và 3 của **bảng 1**.

Bảng 1. Giao điểm của 2 vòng tròn và bán kính của chúng

Giao điểm cần tìm	C_1	C_2	Bán kính của vòng tròn 1	Bán kính của vòng tròn 2
① C_{3_4}	C_{1_4}	C_{2_3}	l_4	l_3
② C_{7_8}	C_{1_4}	C_{3_4}	l_8	l_7
③ C_{5_6}	C_{1_4}	C_{2_3}	l_6	l_5
④ C_{9_10}	C_{7_8}	C_{5_6}	l_9	l_{10}
⑤ C_{11_12}	C_{5_6}	C_{9_10}	l_{12}	l_{11}



Hình 3. Giao điểm của 2 vòng tròn và hệ tọa độ X-Y

Bán kính của các hình tròn được miêu tả như trên **hình 3** và chiều dài của bán kính chính là chiều dài của các thanh liên kết. Trong **hình 3b** khoảng cách giữa hai tâm của 2 đường tròn được ký hiệu là D_j , sử dụng phương trình hàm lượng giác tại giao điểm của hai vòng tròn ta xác định được khoảng cách giữa hai tâm của vòng tròn như sau:

$$D_j = \sqrt{(C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2} \text{ với } j = 1_2, 3_4, 5_6, 7_8, 9_10, 11_12 \quad (2)$$

trong đó C_{1x}, C_{1y} và C_{2x}, C_{2y} được liệt kê lần lượt trên cột thứ 2 và thứ 3 của bảng 1.

Sử dụng các công thức (1) và (2) ta sẽ xác định được giao điểm $P_i(P_{ix}, P_{iy})$ trong hệ tọa độ OXY với $i = 3_4, 5_6, 7_8, 9_10, 11_12$. Sử dụng tính chất hàm lượng giác từ hình 3 ta xác định được vị trí của P_i như sau:

$$P_{ix} = \frac{D_j^2 + l_1^2 - l_2^2}{2D_j} \text{ và } P_{iy} = \pm \sqrt{l_1^2 - P_{ix}^2} \quad (3)$$

P_i sẽ có 2 vị trí đối xứng nhau qua trục nằm ngang OX như trên hình 3b.

Đối với hệ tọa độ $OX_n Y_n$ giao điểm C_n được xác định như sau:

$$\begin{aligned} X_n &= \cos \theta \times P_{ix} - \sin \theta \times P_{iy} + C_{1x} \\ Y_n &= \sin \theta \times P_{ix} + \cos \theta \times P_{iy} + C_{1y} \end{aligned} \quad (4)$$

với $n = 1_2, 3_4, 5_6, 7_8, 9_10, 11_12$.

Sử dụng các công thức từ (1) đến (4) ta xác định được các giao điểm, sau đó sẽ xác định được điểm foot-point C_{11_12} . Trước tiên ta định nghĩa các hệ tọa độ của mỗi giao điểm và được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} C_n &= (X_n, Y_n) \\ C_{1_2} &= (X_{1_2}, Y_{1_2}) \\ C_{1_4} &= (X_{1_4}, Y_{1_4}) \\ C_{2_3} &= (X_{2_3}, Y_{2_3}) \\ C_{3_4} &= (X_{3_4}, Y_{3_4}) \\ &\dots \\ C_{11_12} &= (X_{11_12}, Y_{11_12}) \end{aligned} \quad (5)$$

Như được mô tả trên **hình 2** thì hệ tọa độ OXY được đặt tại tâm quay của thanh l_2 hay nằm trên tâm của trục quay của động cơ dẫn động khi đó tọa độ của $C_{1_2} = (0, 0)$. Giao điểm C_{1_4} nằm trên thanh cố định cách C_{1_2} một khoảng bằng đúng chiều dài của thanh l_1 . Như trên **hình 2** thanh l_1 là thanh cố định và nằm ngang, vì vậy giao điểm $C_{1_4} = (X_{1_4}, Y_{1_4})$ là điểm cố định của chân của robot đi động học này, do đó ta xác định được tọa độ của giao điểm C_{1_4} như sau

$$\begin{aligned} X_{1_4} &= -l_1 \sin \theta_{1_4} \\ Y_{1_4} &= l_1 \cos \theta_{1_4} \end{aligned} \quad (6)$$

Tương tự ta xác định được giá trị của $C_{2_3} = (X_{2_3}, Y_{2_3})$ như ở phương trình sau

$$\begin{aligned} X_{2_3} &= l_2 \sin \theta_{2_3} \\ Y_{2_3} &= l_2 \cos \theta_{2_3} \end{aligned} \quad (7)$$

Để xác định vị trí của nút $C_{3_4} = (X_{3_4}, Y_{3_4})$ trước tiên ta cần xác định giá trị của θ_{3_4} như trên hình 3a, sử dụng các công thức đã được trình bày phía trước ta có

$$\begin{aligned} \theta_{3_4} &= A \tan 2(C_{2_3y} - C_{1_4y}, C_{2_3x} - C_{1_4x}) \\ D_{3_4} &= \sqrt{(C_{2_3x} - C_{1_4x})^2 + (C_{2_3y} - C_{1_4y})^2} \\ P_{3_4x} &= \frac{D_{3_4}^2 + l_4^2 - l_3^2}{2D_{3_4}}; P_{3_4y} = \pm \sqrt{l_4^2 - P_{3_4x}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X_{3_4} &= \cos \theta_{3_4} \times P_{3_4x} - \sin \theta_{3_4} \times P_{3_4y} + C_{1_4x} \\ Y_{3_4} &= \sin \theta_{3_4} \times P_{3_4x} + \cos \theta_{3_4} \times P_{3_4y} + C_{1_4y} \end{aligned}$$

Tương tự ta có thể xác định được các giao điểm khác của chân của robot đi động học, giao điểm cuối cùng được xác định như phương trình sau

$$\begin{aligned} \theta_{11_12} &= A \tan 2(C_{9_10y} - C_{5_6y}, C_{9_10x} - C_{5_6x}) \\ D_{11_12} &= \sqrt{(C_{9_10x} - C_{5_6x})^2 + (C_{9_10y} - C_{5_6y})^2} \\ P_{11_12x} &= \frac{D_{11_12}^2 + l_{12}^2 - l_{11}^2}{2D_{11_12}}; P_{11_12y} = \pm \sqrt{l_{12}^2 - P_{11_12x}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} X_{11_12} &= \cos \theta_{11_12} \times P_{11_12x} - \sin \theta_{11_12} \times P_{11_12y} + C_{5_6x} \\ Y_{11_12} &= \sin \theta_{11_12} \times P_{11_12x} + \cos \theta_{11_12} \times P_{11_12y} + C_{5_6y} \end{aligned}$$

Phương trình (9) mô tả vị trí của điểm cuối cùng của chân robot di động $C_{11,12}$ (foot-point) trong suốt quá trình robot hoạt động. Quỹ đạo chuyển động của điểm cuối này giúp cho ta biết được robot di động có thể vượt qua các vật cản ở mức độ nào. Để vượt qua các chướng ngại vật có chiều cao khác nhau chúng ta thay đổi chiều dài các thanh liên kết khi đó quỹ đạo chuyển động của điểm cuối cùng cũng thay đổi, và giúp ta hình dung xem robot di động chuyển động có ổn định trong quá trình hoạt động hay không. **Bảng 2** trình bày giá trị của các góc θ_i khi giao điểm $C_{2,3}$ nằm trên đường nằm ngang là vị trí ban đầu của chân robot di động trong hệ tọa độ OXY hay $\theta_{2,3} = 0^\circ$.

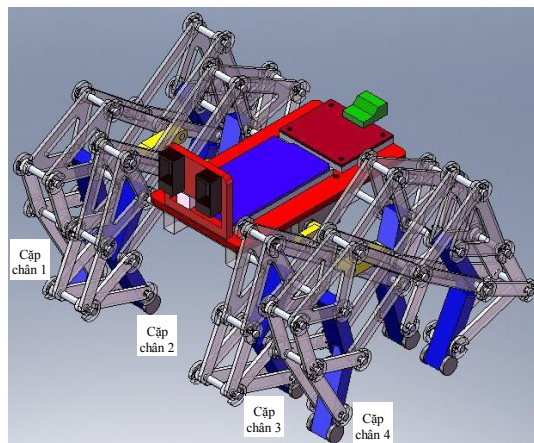
Bảng 2. Giá trị của θ_i khi giao điểm $C_{2,3}$ nằm trên đường nằm ngang hay $\theta_{2,3} = 0^\circ$

Giao điểm	$C_{3,4}$	$C_{5,6}$	$C_{7,8}$	$C_{9,10}$	$C_{11,12}$
θ_i [deg]	0°	0°	76.93°	-46.15°	164.63°

Trong phần sau tác giả trình bày kết quả mô phỏng chuyển động của chân của robot di động và mô hình thiết kế robot di động dạng chân.

3. Mô hình và mô phỏng chuyển động của robot di động sử dụng cơ cấu Theo Jansen

Trong nghiên cứu này, tác giả lựa chọn mô hình robot di động sử dụng cơ cấu Theo Jansen làm chân, robot di động này có 4 cặp chân được lắp ráp thành 4 lớp chân như **hình 4**. Dựa trên các kích thước hình học của cơ cấu Theo Jansen cùng với yêu cầu tính ổn định khi chuyển động của robot di động, sau khi tiến hành một số mô phỏng chuyển động của robot di động các tác giả lựa chọn ra một bộ thông số hình học của các khâu được liệt kê trong **bảng 3**. Để có được kết quả thiết kế và điều khiển robot di động dạng chân được tối ưu, trước tiên tác giả sẽ sử dụng chương trình Matlab cùng với các phương trình đã được xây dựng ở trên để mô phỏng chuyển động của 1 chân và 1 cặp chân của robot di động và tìm ra quỹ đạo chuyển động của $C_{11,12}$ (foot-point) khi khâu dẫn động quay một vòng hay $\theta_i = 360^\circ$.

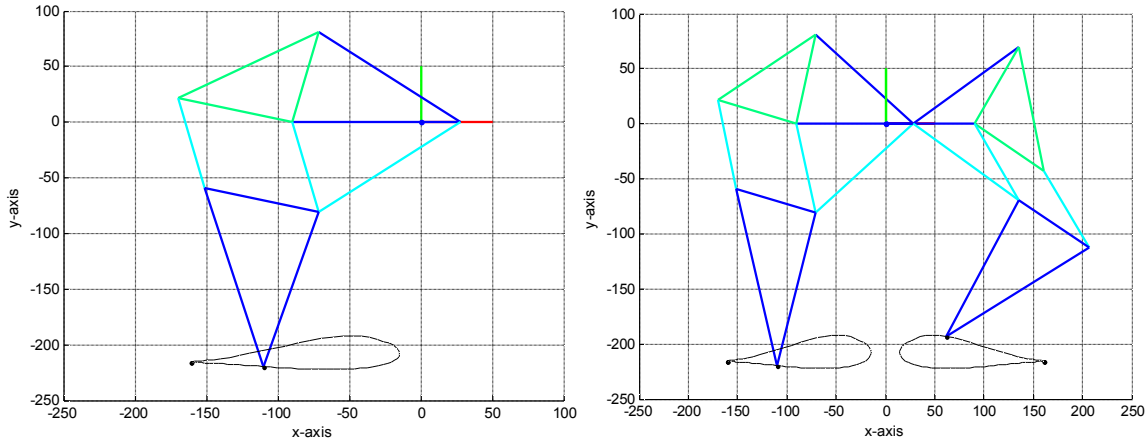


Hình 4. Mô hình robot di động sử dụng cấu trúc Theo Jansen làm chân

Bảng 3. Thông số hình học của 1 chân của robot di động

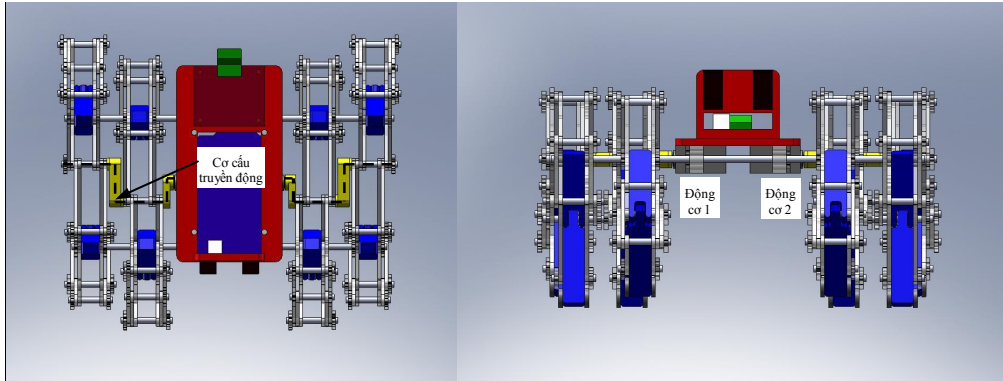
Ký hiệu thanh liên kết	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}	l_{12}
Chiều dài [mm]	90	28	128	83	128	83	115	83	83	83	166	144

Hình 5 là kết quả mô phỏng của 1 chân và 1 cặp chân khi robot di động chuyển động tại chỗ, dựa trên kết quả mô phỏng ta thấy có những thời điểm chân của robot nhấc khỏi bề mặt nằm ngang, do vậy khi thiết kế và lắp ráp robot di động chúng ta cần sử dụng tính chất này giúp cho robot di động có thể chuyển động qua được những bề mặt không bằng phẳng.



Hình 5. Kết quả mô phỏng 1 chân và 1 cặp chân của robot di động

Hình 6 giới thiệu mô hình robot di động sử dụng 8 cơ cấu Theo Jansen làm chân, được dẫn động bằng 2 động cơ điện. Để robot chuyển động tiến về phía trước hoặc lùi về phía sau thì 2 động cơ này hoạt động đồng tốc với nhau, để rẽ sang phải thì động cơ phía bên phải giảm tốc độ hoặc dừng hẳn so với động cơ phía bên trái, một cách tương tự nhưng ngược lại khi ta cần robot rẽ sang trái.



Hình 6. Mô hình 3D robot di động

4. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả giới thiệu tổng quan về cấu cơ cấu Theo Jansen và robot di động sử dụng chân. Bài báo này các tác giả cũng đã lựa chọn được một mô hình robot di động sử dụng chân sử dụng 8 cơ cấu Theo Jansen làm chân, đồng thời xây dựng được phương trình tính toán chuyển động của chân của robot di động, cũng như mô phỏng hoạt động của 1 chân và 1 cặp chân của robot di động bằng phần mềm Matlab. Bài báo cũng giới thiệu bản vẽ thiết kế mẫu mô hình 3 chiều của robot di động sử dụng cơ cấu Theo Jansen làm chân. Trong các nghiên cứu tiếp theo chúng tôi cần tính toán tối ưu các kích thước và thực nghiệm robot di động trong các môi trường làm việc khác nhau nhằm hoàn thiện cơ cấu cơ khí và phát triển thuật toán điều khiển.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ cho nghiên cứu này của Viện Cơ học.

Tài liệu tham khảo

- [1] <http://www.strandbeest.com/film.html>
- [2] R. L. Norton, Design of Machinery, New York, Mc Graw-Hill, 1991.
- [3] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England.
- [4] <http://www.mekanimzalar.com/mechanicalspider.html>
- [5] <http://www.bostondynamics.com/>