

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO CƠ CẤU HỖ TRỢ RÔBÔT LEO CẦU THANG

A STUDY ON DESIGNING AND MANUFACTURING A SUPPORTING MECHANISM FOR STAIR CLIMBING ROBOT

Lê Thanh Hải¹, Nguyễn Duy Anh¹, Phạm Thị Thu Hiền²

¹ Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM

² Trường Đại học Quốc tế TP.HCM

Ngày tòa soạn nhận bài 17/4/2015, ngày phản biện đánh giá 21/4/2015, ngày chấp nhận đăng 27/4/2015

TÓM TẮT

Thiết kế rôbốt di động có khả năng leo cầu thang và chở vật nặng trong thời gian qua được xem là một công việc đầy thách thức. Trong nghiên cứu này, một rôbốt leo cầu thang có thể mang được vật nặng có khối lượng đến 50kg đã được thiết kế và chế tạo thành công. Các kết cấu cơ khí thể hiện khả năng leo lên và xuống cầu thang cùng với việc mang được tải trọng lớn với khả năng hoạt động bán tự động của rôbốt được tập trung phân tích, đánh giá. Thông qua các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã chứng minh được hiệu quả của rôbốt và là tiền đề cho các nghiên cứu khác về thiết kế và phân tích rôbốt leo cầu thang.

Từ khóa: Rôbốt di động, leo cầu thang, vật nặng, leo lên và đi xuống.

ABSTRACT

Designing robot which is able to climb stairs and carry a heavy object is one of the most difficult challenges for both legged and wheeled mobile robot. In this research, a wheel stair climbing robot is created to help people carry an object of about 50kg weight. This research is focused on analyzing the capability of climbing mechanisms for going up and down stairs with the large load tolerance while operating in semi-autonomous mode. Through simulations and experiments, the effectiveness of this robot in stairs climbing is verified, which can provide design and analysis foundations for other stair climbing robots.

Keywords: Mobile robot, stair climbing, heavy object, going up and down stairs

1. GIỚI THIỆU

Thiết kế rôbốt leo cầu thang từ lâu đã được coi là thử thách đầy hấp dẫn với các nhà nghiên cứu khoa học cho rôbốt di động, đặc biệt là cho cả hai dạng di chuyển bằng chân và bánh rôbốt [1-8].

Dựa trên các nghiên cứu và kinh nghiệm, một trong những giải pháp khả thi cho rôbốt leo cầu thang hỗ trợ con người mang vác đồ vật nặng trong cuộc sống hàng ngày là loại bánh xích leo núi với khả năng chuyên chở nhiều hơn so với rôbốt di chuyển bằng chân. Trong quá khứ, khi vận chuyển vật nặng rôbốt chỉ hữu dụng trên mặt đất bằng phẳng và vật nặng phải được đưa lên hoặc xuống cầu thang

bằng tay. Hiện nay, có nhiều nghiên cứu đề cải thiện khả năng di chuyển của rôbốt khi lên xuống cầu thang với các phương thức như bằng chân, bánh hay đai của rôbốt. Trong đó, rôbốt loại bánh xích dễ dàng điều khiển hơn và có khá nhiều nghiên cứu như loại bánh xích với mấu trên đai [9, 12], bánh xích cho hoạt động cứu hộ [4-8] và bánh rôbốt đặc biệt [10, 11].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày cách thiết kế một rôbốt có khả năng di chuyển lên xuống cầu thang trong môi trường sống của con người. Để thực hiện được điều này, một dạng đai có lực bám cao vào cầu thang do sự biến dạng của vật liệu khi chạm vào các

cạnh của cầu thang đã được phát triển. Nghiên cứu cũng đề xuất và phát triển một rôbot leo cầu thang có khả năng mang vật nặng, cùng với việc kiểm tra tính hiệu quả và tính khả dụng của robot.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1 Các yêu cầu của rôbot di chuyển bằng bánh

Trong trường hợp di chuyển trên cầu thang, dạng bánh xích có một số nhược điểm như sau:

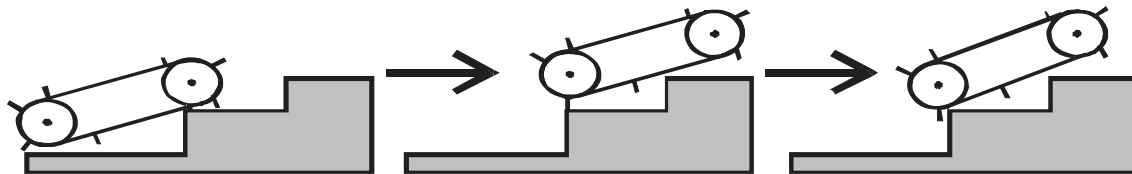
- Khoảng cách của các răng không phù hợp nên khi hoạt động chỉ tiếp xúc với bậc thang như trong hình 2. Đặc biệt khi rôbot chờ một khối lượng lớn sẽ khiến cho rôbot rung động và có thể phá hủy các cạnh cầu thang. Theo khảo sát, lực ma sát của rôbot với cầu thang có thể bị giảm đi khi cạnh cầu thang bị phá hủy hoặc một trong các răng của bánh xích bị vướng vào vật cản. Những hiện tượng này sẽ làm giảm sự ổn định và an toàn của rôbot do đó cần phải tránh.

- Hiện tượng trượt có thể xảy ra khi bánh xích tiếp xúc không đủ với cầu thang. Khi

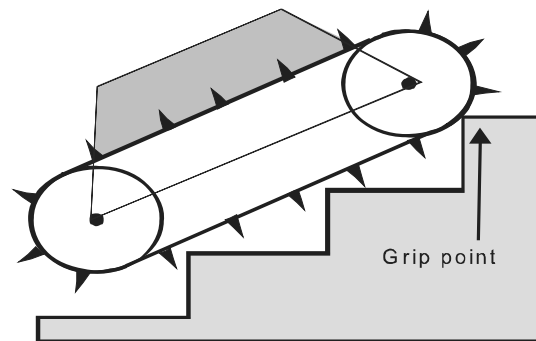
đi lên cầu thang, các vành đai xích chỉ đơn giản là quay cho đến khi chạm vào các bậc cầu thang. Đặc biệt khi rôbot đi xuống, dù các răng không chạm vào bậc cầu thang thì rôbot vẫn bị trượt xuống.

- Khả năng chỉ có 1 răng trên bánh xích tiếp xúc với cầu thang khi đi lên và đi xuống như trong hình 1. Do đó khi rôbot đi đến cuối cầu thang thì có thể xảy ra tình trạng các răng khác trên bánh xích không có răng nào bám vào bậc cầu thang. Trong tình huống này, rôbot có thể trượt xuống hoặc bánh xích sẽ tuột ra khỏi vành đai cho đến khi có một răng nào đó bám được vào bậc cầu thang.

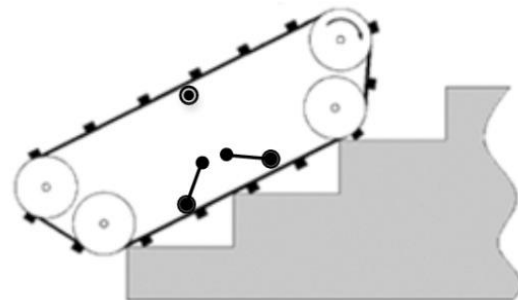
Những nhược điểm này có thể được giải quyết bằng cách tăng số lượng răng trên bánh xích một cách hợp lý để ngăn ngừa tình trạng trượt của rôbot do điểm tiếp xúc giữa rôbot và cầu thang không đủ như hình 3. Ngoài ra, lực tại các răng trong trường hợp này sẽ nhỏ hơn nhiều so với khi rôbot chỉ có 1 răng bám vào cầu thang. Một lớp cao su với hệ số ma sát lớn có thể gắn thêm vào bề mặt của đai để có tạo nên một lực bám tại các bậc cầu thang.



Hình 1: Tình trạng trượt khi rôbot leo cầu thang



Hình 2: Mô hình rôbot với dây đai dạng răng cứng



Hình 3: Mô hình bố trí các răng trên rôbot theo tính toán để đảm bảo luôn có ít nhất 2 răng tiếp xúc với cầu thang

Theo số liệu cầu thang tiêu chuẩn ở Việt Nam, ta chọn bậc cầu thang có thông số cao $h = 150\text{mm}$ và rộng $b = 300\text{mm}$.

Từ đó, tính khoảng cách giữa hai bậc cầu thang liên tiếp là:

$$L = \sqrt{h^2 + b^2} = \sqrt{150^2 + 300^2} \approx 336\text{mm}$$

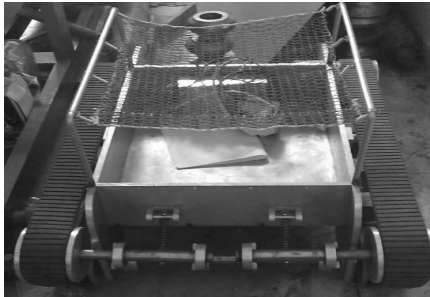
Để rôbốt có thể di chuyển lên xuống cầu thang tốt thì ít nhất khoảng cách giữa hai gai bằng L hay đảm bảo luôn sẽ có ít nhất hai răng tiếp xúc với bậc cầu thang. Nhưng để tăng độ bám và lưu ý đến số liệu kích thước dài, rộng của cầu thang trong thực tế có thể thay đổi ít nhiều, nên ta giảm khoảng cách giữa hai răng liên tiếp xuống một nửa.

Như vậy khoảng cách giữa hai răng liên tiếp là:

$$z = \frac{L}{2} = \frac{336}{2} = 168\text{mm}$$

2.2 Thiết kế robot

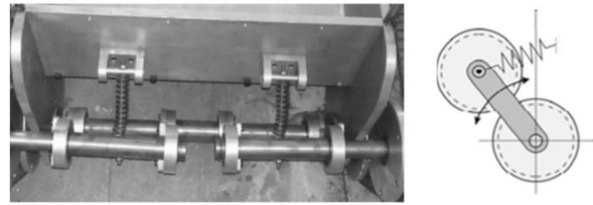
Một mô hình rôbốt leo cầu thang đã được đề xuất và chế tạo như hình 4. Rôbốt có tổng chiều dài 1.142mm, chiều rộng 700mm và trọng lượng 45 kg. Rôbốt này có tốc độ tối đa 0.2m/s.



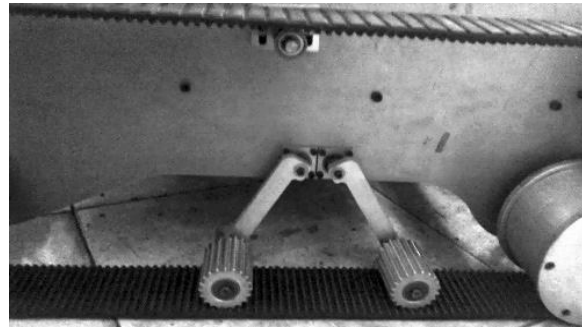
Hình 4: Mô hình rôbốt leo cầu thang được thiết kế và chế tạo

Rôbốt được trang bị cơ cấu căng đai (hình 5) để tạo áp lực phân bố đều trên nền đất. Ngoài ra, rôbốt còn được gắn thêm cơ cấu

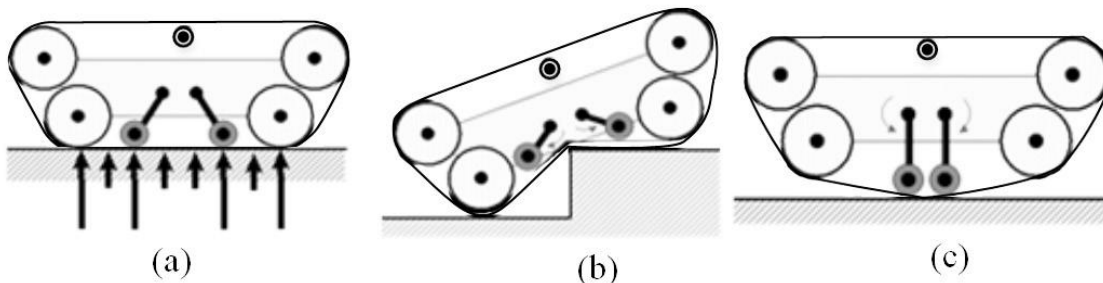
chống và con lăn (hình 6). Cơ cấu này có hai bánh được lắp ráp có cùng độ cao như nhau để tạo lực cân bằng ở vùng giữa vành đai và con lăn có nhiệm vụ giữ cho phần đai trên có một lực căng nhất định (hình 7a). Khi rôbốt di chuyển trên cầu thang, cơ cấu chống này sẽ nâng cánh tay và kéo bánh đai lên, làm cho vành đai uốn cong (hình 7b) và chuyển động này giúp ngăn cản sự thay đổi đột ngột của bánh đai. Khi rôbốt thực hiện các chuyển động xoay, cơ cấu chống sẽ được hạ xuống để nâng rôbốt lên và khu vực tiếp đất trở nên nhỏ như thể hiện trong hình 7c. Chuyển động này giúp trục quay dễ dàng hơn trên các bề mặt ma sát cao, chẳng hạn như đường nhựa.



Hình 5: Cơ cấu căng đai



Hình 6: Cơ cấu chống



Hình 7: Cơ cấu chống gồm: (a) trên đất bằng và (b) khi di chuyển trên cầu thang (c) khi di chuyển trên mặt đường có độ ma sát cao

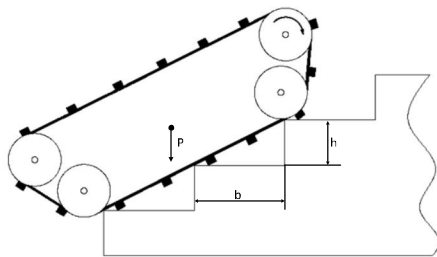
2.3 Đánh giá độ ổn định của robot

Đảm bảo độ ổn định của rôbốt trong suốt quá trình leo cầu thang là một vấn đề quan trọng cho phép rôbốt hoạt động trong một biên độ ổn định giúp phòng ngừa hiệu quả những biến dạng của đai, độ rung và các tác động do va chạm. Trong thực tế, rôbốt có thể ngã nhào khi leo cầu thang do quá trình thay đổi thế năng, lúc này rôbốt quay xung quanh một điểm tựa và chịu tác động của lực khi rôbốt đang ở trạng thái nghiêng dốc lên nên trọng tâm của rôbốt có giá trị cao nhất và thế năng của nó đạt giá trị tối đa dẫn đến rôbốt chỉ ổn định trở lại khi ngã ra phía sau. Nhóm nghiên cứu đã dựa vào tiêu chí đánh giá ổn định “Normalized Energy Stability Margin” [13, 14] áp dụng cho các rôbốt di chuyển bằng chân và bánh để đánh giá độ ổn định của rôbốt đã thiết kế và chế tạo.

Phương trình đánh giá độ ổn định D_s khi rôbốt leo cầu thang:

$$D_s = \frac{E_t}{E_0} \quad (1)$$

Với E_0 là thế năng lớn nhất khi rôbốt ngã trong lúc di chuyển trên mặt phẳng ngang và E_t là thế năng lớn nhất khi rôbốt di chuyển trên cầu thang. Từ công thức (1) và hình 8, khi $D_s < 0$ thì chỉ có trọng lực P tác động lên rôbốt khi đang leo cầu thang là lực làm cho rôbốt ngã, còn khi di chuyển trên mặt phẳng ngang thì D_s sẽ có giá trị tối đa là 1.



Hình 8: Trạng thái rôbốt khi leo cầu thang

Từ đây, giá trị E_0 được tính theo công thức:

$$E_0 = mg(y'_p - y_p) = mg(\sqrt{h^2 + b^2} - y_p) \quad (2)$$

Với tọa độ trọng tâm khi rôbốt nằm trên mặt phẳng ngang là (x_p, y_p) và trọng tâm của rôbốt khi bị dựng lên thẳng đứng là (x'_p, y'_p) , thế năng E_t được tính theo công thức sau khi rôbốt di chuyển trên cầu thang:

$$E_t = mg(y''_p - y_p) = mg\sqrt{y_p^2 + (x_p - S_t)^2} \cdot (1 - \cos \delta) \quad (3)$$

Góc δ là góc xoay của rôbốt khi leo cầu thang, được tính theo công thức sau:

$$\delta = \pi / 2 - \arctan \frac{h}{b} - \arctan \frac{y_p}{x_p - S_t} \quad (4)$$

Trong đó S_t là khoảng cách từ bánh lái rôbốt tới bậc cầu thang đầu tiên.

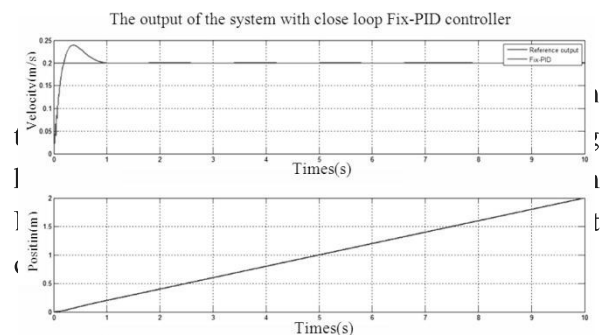
2.4 Kết quả mô phỏng và thực nghiệm robot

2.4.1 Kết quả mô phỏng với MATLAB

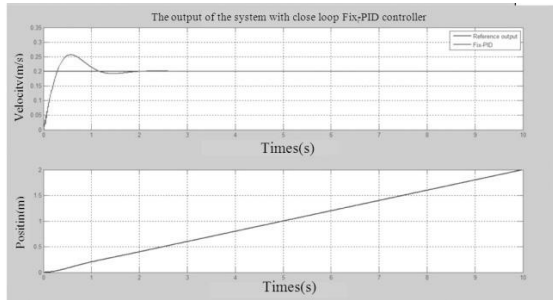
Sau khi phân tích rôbốt, nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng đáp ứng của rôbốt qua bộ điều khiển PID bằng phần mềm MATLAB.

Với yêu cầu giữ cho rôbốt chạy với vận tốc ổn định $v = 0,2\text{m/s}$.

a) Kết quả mô phỏng điều khiển vận tốc dùng PID của rôbốt khi di chuyển trên địa hình bằng phẳng



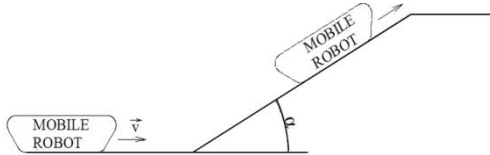
Hình 9: Kết quả mô phỏng vận tốc khi chạy không tải



Hình 10: Kết quả mô phỏng vận tốc khi robot chạy toàn tải

Từ hai hình 9 và 10 cho thấy khi robot chạy trên mặt phẳng ngang ở hai chế độ không tải và toàn tải thì ta thấy robot đảm bảo chạy được với tốc độ như mong muốn và hệ thống rất nhanh chóng điều chỉnh lại tốc độ khi có sai lệch.

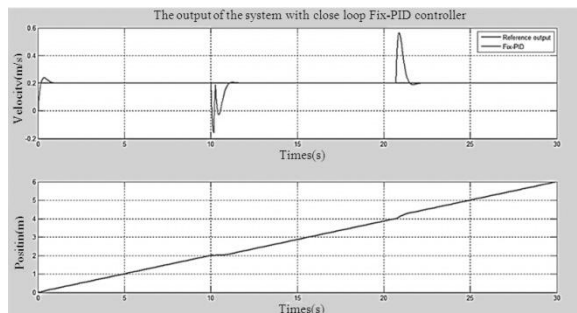
b) Kết quả mô phỏng điều khiển vận tốc dùng PID của robot khi leo dốc



Hình 11: Robot leo dốc với góc nghiêng α

Kết quả dưới đây mô phỏng quá trình điều chỉnh vận tốc của robot khi leo dốc có góc nghiêng là 30° theo sơ đồ như hình 11.

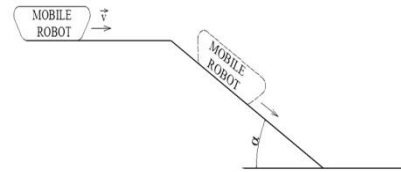
Vận tốc của robot sẽ ảnh hưởng bởi góc α (hình 11), khi robot leo dốc thì góc α sẽ thay đổi tại hai điểm lên dốc, và khi leo hết dốc. Tại điểm leo dốc, khi α thay đổi sẽ xuất hiện lực F_w (lực cản do trọng lượng robot) làm giảm vận tốc, và khi leo hết dốc thì lực F_w mất đi làm vận tốc robot tăng lên.



Hình 11: Kết quả mô phỏng khi robot leo dốc $\alpha = 30^\circ$

Ta thấy vận tốc robot sẽ giảm xuống khi lên dốc -0.18m/s và có thời gian ổn định vận tốc khi lên dốc là 2s. Ngược lại, khi robot leo hết dốc thì vận tốc của nó đạt tới 0.55m/s nhưng thời gian ổn định vận tốc lại nhanh hơn 1s như hình 11.

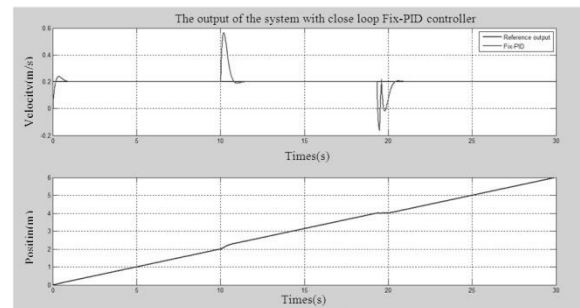
c) Kết quả mô phỏng điều khiển vận tốc dùng PID của robot khi xuống dốc



Hình 12: Mobile Robot xuống dốc với góc nghiêng α

Kết quả dưới đây mô phỏng quá trình điều chỉnh vận tốc của robot khi xuống dốc có góc nghiêng là 30° như sơ đồ hình 12.

Vận tốc của robot sẽ ảnh hưởng bởi góc α (hình 12), khi robot xuống dốc thì góc α sẽ thay đổi tại hai điểm xuống dốc và khi xuống hết dốc. Tại điểm xuống dốc khi α thay đổi sẽ xuất hiện lực F_w (lực kéo do trọng lượng robot) làm tăng vận tốc, và khi xuống hết dốc thì lực F_w mất đi làm vận tốc giảm xuống. Chúng ta sẽ mô phỏng bộ điều khiển PID tại các điểm đó như sau:



Hình 13: Kết quả mô phỏng khi robot xuống dốc $\alpha = 30^\circ$

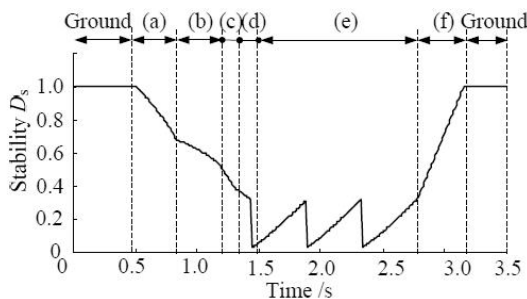
Ngược lại với khi leo dốc, hình 13 cho thấy vận tốc của robot tăng vọt khi xuống dốc 0.55m/s và có thời gian ổn định lại giá trị vận tốc là 1s. Khi xuống hết dốc vận tốc giảm còn -0.19m/s với thời gian ổn định dài 2s.

Từ các kết quả mô phỏng trên ta nhận thấy

bộ điều khiển đáp ứng tốt yêu cầu điều khiển rôbốt với vận tốc ổn định như mong muốn ở tình trạng không tải và có tải với góc nghiêng tối đa khi leo dốc và xuống dốc.

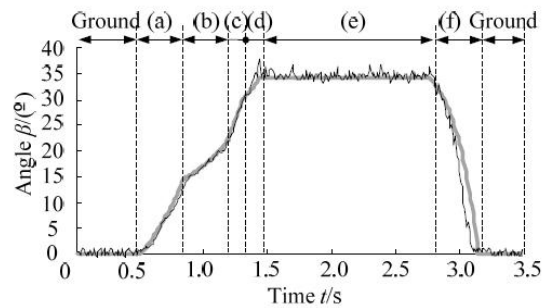
2.4.2 Thử nghiệm

Để chứng minh khả năng của rôbốt leo cầu thang đã thiết kế, nhóm nghiên cứu đã tiến hành một số thử nghiệm. Cầu thang được sử dụng trong các thí nghiệm có kích thước chiều rộng 240 mm và chiều cao 150mm và thực nghiệm cho thấy rôbốt đã di chuyển lên xuống cầu thang tốt. Trong các thí nghiệm, rôbốt đã được thử nghiệm di chuyển trên cầu thang và trên mặt đất. Ngoài khảo sát vận tốc, sự ổn định của rôbốt đã được kiểm tra theo phương pháp đã đề xuất ở phần 3 và kết quả được thể hiện như trong hình 14. Từ hình 14, ta thấy rôbốt có độ ổn định giảm mạnh khi nó rời khỏi mặt đất và di chuyển trên cầu thang, đặc biệt ở hai nấc thang đầu tiên. Bên cạnh đó, trong quá trình di chuyển độ nghiêng của rôbốt cũng được đo và so sánh với kết quả mô phỏng như trong hình 15, với đường đậm là kết quả mô phỏng và đường mảnh là kết quả thu được từ cảm biến. Góc nghiêng tăng từ 0 đến giá trị góc nghiêng của cầu thang khi bắt đầu leo đến khi rôbốt leo hết cầu thang thì giá trị góc nghiêng trở về 0.



Hình 14: Khảo sát độ ổn định của rôbốt khi leo cầu thang

Rôbốt đã chứng tỏ có thể mang vật nặng và khả năng tải trọng tối đa là khoảng 50 kg khi di chuyển trên cầu thang có độ dốc xấp xỉ 30°. Hơn nữa, rôbốt cũng hoàn thành tốt các thử nghiệm khi thay đổi vị trí ở đầu cầu thang và rôbốt dễ dàng xoay ngay cả khi có chờ tải nặng đè lên cơ cấu căng đai.



Hình 15: Độ nghiêng của rôbốt khi leo cầu thang

3. KẾT LUẬN

Nhóm nghiên cứu đã chế tạo thành công rôbốt có khả năng leo cầu thang với các cơ cấu cần thiết để rôbốt có thể di chuyển ổn định trên cầu thang. Công việc tính toán đã xác định được kết cấu đai với số lượng răng đủ để di chuyển ổn định trên cầu thang. Kết quả thực nghiệm cho thấy, cơ cấu căng đai là phù hợp và có khả năng bám vào cạnh cầu thang chắc chắn hơn giúp cho rôbốt leo vững vàng.

Ngoài ra, các thử nghiệm khi rôbốt mang tải lớn cũng được tiến hành. Rôbốt đã di chuyển tốt trên các mặt đường với các điều kiện ma sát khác nhau như đường nhựa, bê tông và gạch men. Rôbốt cũng đã di chuyển lên và xuống thành công trên các cầu thang với độ dốc khoảng 30°. Các kết quả thử nghiệm cho thấy, mô hình thiết kế rôbốt có đủ điều kiện và độ ổn định cho các ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hirose S., Fukuda Y., Yoneda K., Nagakubo A., Tsukagoshi H., Arikawa K., Endo G., Doi T. and Hodoshima R., Quadruped Walking Robots at Tokyo Institute of Technology, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.16, No. 2, pp. 104-114, (2009).

- [2] Stoeter A. Sascha, Rybski E. Paul, Gini Maria and Papanikolopoulos Nikolao, Autonomous Stair-Hopping with Scout Robots, *Proceedings of the IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems*, pp.721-726, 2002.
- [3] Granosik G., Hansen M., and Borenstein, J., The OmniTread Serpentine Robot for Industrial Inspection and Surveillance, *International Journal of Industrial Robots*, No. 32, Vol.2, 139–148.
- [4] Liu, J., Wang, Y., Ma, S. & Li, B., Analysis of Stairs-Climbing Ability for a Tracked Reconfigurable Modular Robot, *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 36–41, Kobe, Japan, (2005).
- [5] Liu Y. and Liu G., Track-Stair Interaction Analysis and Online Tipover Prediction for a Self-Reconfigurable Tracked Mobile Robot Climbing Stairs. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol.19, No.5, pp. 528-538, (2009).
- [6] Tanaka, Y., Arai, M., Hirose, S. and Tsukui, S., Development of “Souryu-V” with Mono-Tread-Crawlers and Elastic-Rods Joint. *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety Security and Rescue Robotics*, pp. 10-15, Washington, USA, (2006).
- [7] Miyataka, H., Wada, N., Kamegawa, T., Sato, N., Tsukui, S., Igarashi, H. and Matsuno, F., Development of a unit type robot “KOHGA2” with stuck avoidance ability, *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3877–3882, Rome, Italy, (2007).
- [8] Takahashi M., Yoneda K., and Hirose S., Rough Terrain Locomotion of a Leg-Wheel Hybrid Quadruped Robot, *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1090-1095, Florida, USA, (2006).
- [9] Hirose, S.; Senu, T. & Aoki, S., The TAQT Carrier: A Practical Terrain-Adaptive Quadruped Track Carrier Robot, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2068–2073, (1992).
- [10] Uchida Y., Furuichi K., and Hirose S., Consideration of stair-climbing performance of a six-wheeled off-road vehicle ‘HELIOS-V’, *Proceedings of 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 383–391.
- [11] Yoneda K., Light weight Quadruped with Nine Actuators, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.19, No.2, pp. 160-165, (2007).
- [12] Yoneda, K.; Ota, Y. and Hirose, S., Development of a Hi-Grip Stair Climbing Crawler with Hysteresis Compliant Blocks, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No.1, pp. 81-89, (2009).
- [13] Weijun Tao, Yi Ou and Hutian Feng, Research on Dynamics and Stability in the Stairs-climbing of a Tracked Mobile Robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.9, pp. 1-9, (2012).
- [14]. Hirose S., Tsukagoshi H. and Yoneda K., Normalized Energy Stability Margin and Its Contour of Walking Vehicles on Rough Terrain. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 181 - 186, Seoul, Korea, (2011).