

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU HÓA HÌNH HỌC ĐỂ TÁI THIẾT KẾ CÁN TAY TRÊN CỦA ROBOT DELTA

REDESIGNING UPPER ARM OF DELTA ROBOT USING TOPOLOGY OPTIMIZATION METHOD

Trần Thanh Hải Tuấn, Võ Như Thành, Lê Hoài Nam, Nguyễn Đình Sơn

Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng;

tthtuan@dut.udn.vn, vnthanh@dut.udn.vn, lehoainam@dut.udn.vn, ndson@dut.udn.vn

Tóm tắt - Robot Delta nói riêng và robot công nghiệp nói chung được sử dụng ngày càng nhiều trong các nhà máy, dây chuyền sản xuất tự động để thay thế con người. Chúng được dùng cho các ứng dụng gấp thả tốc độ cao như lắp ráp, phân loại sản phẩm... Với nhu cầu tiết kiệm vật liệu và chi phí trong quá trình thiết kế và chế tạo nhưng vẫn đảm bảo được các khả năng làm việc của robot như độ cứng và độ bền, việc sử dụng phương pháp tối ưu hóa hình học trong thiết kế là một giải pháp có thể giải quyết vấn đề trên. Bài báo trình bày về quá trình nghiên cứu, ứng dụng phương pháp tối ưu hóa hình học để tái thiết kế một phần của cánh tay robot Delta. Sản phẩm được thiết kế lại có khối lượng nhẹ hơn, tốn ít vật liệu hơn nhưng vẫn đảm bảo được đặc tính cơ khí và khả năng làm việc như yêu cầu.

Từ khóa - Tối ưu hóa hình học; robot Delta; tái thiết kế

1. Giới thiệu

Ngày nay, Robot Delta đang được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực y học, quân sự, mô phỏng, sản xuất công nghiệp và được biết đến là robot gấp - thả có tốc độ rất nhanh. Đây là loại robot song song được phát minh bởi Raymond Clavel [1] với nhiều ưu điểm vượt trội so với các loại robot dạng chuỗi truyền thống như: Độ cứng vững lớn, khả năng chịu tải cao...

Phương pháp tối ưu hóa hình học là phương pháp toán học để tối ưu hóa vật liệu trong không gian thiết kế với tải trọng cho trước, điều kiện biên và ràng buộc. Ưu điểm của phương pháp này là chúng ta có thể thiết kế bất kỳ hình dạng nào trong không gian thiết kế, thay vì xử lý các cấu hình được xác định trước. Với việc sử dụng phương pháp tối ưu hóa hình học, chúng ta có thể tạo ra được các chi tiết có khối lượng nhẹ hơn do đã cắt giảm được lượng vật liệu sử dụng. Nhờ đó, có thể tiết kiệm được chi phí về vật liệu trong quá trình chế tạo. Hơn nữa, việc sử dụng ít vật liệu hơn sẽ góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường do lượng cacbon tiêu thụ giảm trong bối cảnh đất nước hướng tới một nền sản xuất xanh.

Đã có nhiều nghiên cứu về phương pháp tối ưu hóa hình học [2-4] cũng như ứng dụng phương pháp này cho các bài toán thực tế, như thiết kế lại hình dáng của các chi tiết trong ngành hàng không [5], [6] hoặc các chi tiết kỹ thuật hàng ngày như chiếc cốc-lê [7]. Đối với thiết kế robot, phương pháp tối ưu hóa hình học đã được sử dụng trong thiết kế các robot có hình dáng con người [8], [9]. Tuy nhiên, hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp tối ưu hóa hình học trên robot Delta.

Với mong muốn tạo ra một mô hình robot Delta mới phục vụ trong giảng dạy và nghiên cứu cùng các ưu điểm

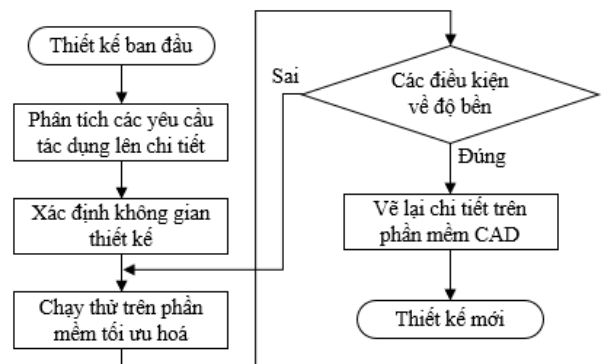
Abstract - Robots in general and Delta robot in particular are used more and more in factories and automatic production lines. Delta robot is a kind of parallel robot with many advantages: fast-moving speed, great productivity. The time requirements for product design and manufacturing must be reduced and shortened in the context of global economic integration. In particular, the quality and price of products are two important factors that determine the success of a product designed on the market. Therefore, product designers always seek to design products using as few materials as possible, but the durability and mechanical properties of the products are guaranteed. Therefore, using topology optimization method in design is an approach that can support designers. An application of topology optimization method to redesign a part of the Delta robot arm is presented in this paper. The redesigned part is lighter, consumes less material but still ensures its mechanical properties.

Key words - Topology optimization; Delta robot; redesign

nổi bật của phương pháp tối ưu hóa hình học trong thiết kế, bài báo này trình bày quá trình ứng dụng phương pháp tối ưu hóa hình học để tái thiết kế một phần cánh tay robot Delta hiện đang được phát triển tại Khoa Cơ khí – Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng [10], [11].

2. Quá trình tái thiết kế

Trình tự tái thiết kế chi tiết sử dụng phương pháp tối ưu hóa hình học được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Trình tự tái thiết kế một chi tiết sử dụng phương pháp tối ưu hóa hình học

- Từ file thiết kế ban đầu của chi tiết, chúng ta phân tích các yêu cầu tác dụng lên chi tiết: Các bề mặt chức năng của chi tiết, lực tác dụng lên chi tiết.

- Xác định vùng không gian thiết kế: Đây là nơi chúng ta sẽ giảm tối đa sự phân bố vật liệu nhưng vẫn đảm bảo yêu cầu về cơ tính của chi tiết.

- Sau khi tìm được các giá trị lực thiết yếu tác dụng lên chi tiết, chúng ta sẽ chạy kết quả tối ưu hóa trên phần mềm

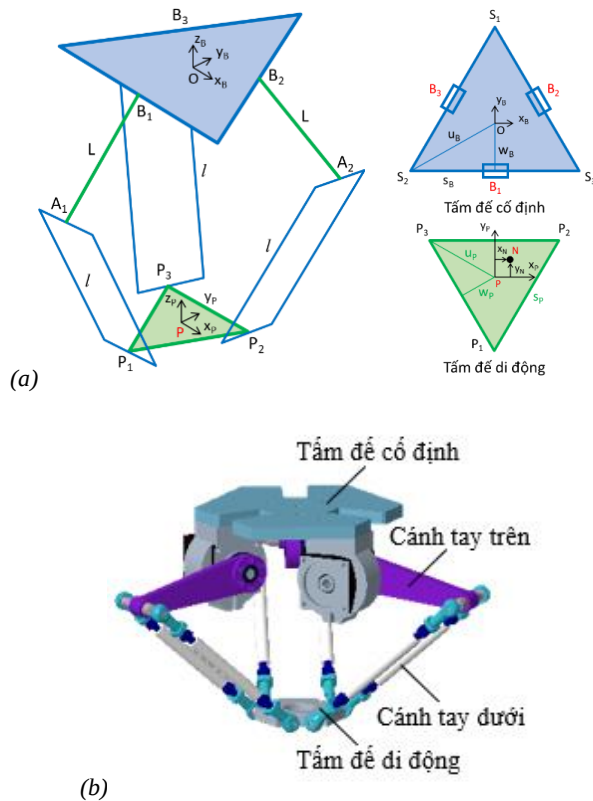
sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn với ràng buộc theo yêu cầu thiết kế.

• Từ kết quả tối ưu hóa, chúng ta sẽ kiểm tra lại các ràng buộc về ứng suất, độ chuyển vị, khả năng chịu lực... của chi tiết mới. Nếu kết quả đảm bảo các điều kiện theo yêu cầu thì vẽ lại chi tiết bằng phần mềm CAD vì bề mặt chi tiết của kết quả thu được tương đối gồ ghề do quá trình rời rạc hóa của phương pháp phần tử hữu hạn.

• Sau khi thiết kế lại, ta sẽ có chi tiết mới với hình dáng hình học được tối ưu nhưng vẫn đảm bảo được khả năng làm việc như chi tiết ban đầu.

3. Tái thiết kế cánh tay trên của robot Delta

Để minh họa cho phương pháp trên, phần này trình bày việc ứng dụng phương pháp tối ưu hóa hình học để giảm lượng vật liệu sử dụng trong quá trình chế tạo cánh tay trên của robot Delta. Mô hình động học cũng như thiết kế 3D của robot được biểu diễn ở Hình 2 [10], [11]. Ý nghĩa các thông số hình học được tóm tắt trong Bảng 1.



Hình 2. Mô hình động học (a) và thiết kế 3D (b) robot Delta

Bảng 1. Ý nghĩa các thông số hình học của robot Delta

Kí hiệu	Ý nghĩa
P_i	điểm nối giữa khâu bị dẫn và tấm đế di động ($i = 1, 2, 3$)
s_B	chiều dài cạnh tam giác đều tấm đế cố định
w_B	khoảng cách từ tâm O đến cạnh của tấm đế cố định
u_B	khoảng cách từ tâm O đến đỉnh của tấm đế cố định
s_P	chiều dài cạnh tam giác đều tấm đế di động
w_P	khoảng cách từ tâm P đến cạnh của tấm đế di động
u_P	khoảng cách từ tâm P đến đỉnh P_i ($i = 1, 2, 3$) của tấm đế di động

L	chiều dài cánh tay $B_i A_i$ ($i = 1, 2, 3$)
l	chiều dài của mỗi khâu bị dẫn
h	chiều rộng của mỗi khâu bị dẫn

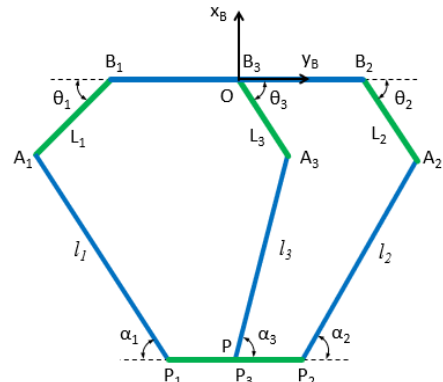
Chi tiết dùng để tái thiết kế là khâu phát động (cánh tay trên), nối giữa tấm đế cố định và khâu bị dẫn (cánh tay dưới). Hình dạng của chi tiết được thể hiện ở Hình 3.



Hình 3. Hình dạng ban đầu của chi tiết

3.1. Phân tích lực tác dụng lên chi tiết

Ở phần này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp tách vật để tiến hành giải phóng các liên kết giữa các khâu trong robot Delta. Từ đó, xác định được lực tác dụng lên chi tiết đang xét. Vì việc phân tích động lực học của robot Delta trong không gian ba chiều rất phức tạp nên để đơn giản hóa, nhóm tác giả sử dụng mô hình robot Delta trong mặt phẳng như Hình 4.



Hình 4. Mô hình các cánh tay robot Delta trong mặt phẳng

Trong đó:

$B_1 B_2$: Khoảng cách giữa tâm khớp quay B_1 và B_2 ;

$L_1 = L_2 = L_3 = L = 0,2m$: Chiều dài các khâu phát động;

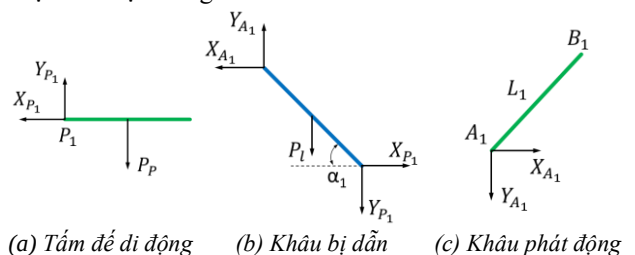
$l_1 = l_2 = l_3 = l = 0,28m$: Chiều dài các khâu bị dẫn;

$s_B = 0,1\sqrt{3}m$: Chiều dài tấm đế cố định;

$s_P = 0,05\sqrt{3}m$: Chiều dài tấm đế di động;

$m_{l_1} = m_{l_2} = m_{l_3} = m = 0,5kg$: Khối lượng khâu bị dẫn.

Từng cánh tay của robot sẽ được tách riêng lẻ để thực hiện phân tích lực. Từng khâu ở mỗi cánh tay sẽ được tách thành các vật riêng biệt. Lực tác dụng lên từng khâu gắn với cánh tay: Tấm đế di động, khâu bị dẫn, khâu phát động được thể hiện trong Hình 5.



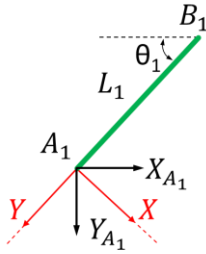
Hình 5. Lực tác dụng lên các khâu của cánh tay số 1

Áp dụng phương trình cân bằng lực cho từng khâu ta được các hệ phương trình (1), (2).

$$\begin{cases} X_{P_1} = 0 \\ Y_{P_1} = P_P \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{A_1} = P_{l_1} + Y_{P_1} \\ X_{A_1} = \frac{(P_{l_1} + Y_{P_1}) \cos \alpha_1 - P_{l_1} \frac{\cos \alpha_1}{2}}{\sin \alpha_1} = \frac{P_{l_1}}{2} + Y_{P_1} \tan \alpha_1 \end{cases} \quad (2)$$

Với khâu phát động, để thuận lợi cho việc đặt lực trong phần mềm tối ưu hóa, nhóm tác giả tiến hành dời trục tọa độ về bài toán dầm một đầu ngàm (điểm B_1), một đầu tự do (điểm A_1) được thể hiện trong Hình 6.



Hình 6. Chuyển hệ tọa độ các lực tác dụng lên khâu phát động

Trong đó:

$\vec{X}_{A_1}, \vec{Y}_{A_1}$ là lực ban đầu tác dụng lên khâu phát động;

$\vec{X}, \vec{Y}$ là lực sau khi chuyển hệ tọa độ tác dụng lên khâu phát động.

Khi đó, ta có giá trị của $\vec{X}, \vec{Y}$ là:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{l_1} + Y_{P_1}}{\sin \theta_1} - \frac{\frac{P_{l_1}}{2} + Y_{P_1}}{\tan \alpha_1 \cos \theta_1} \right) \\ Y = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{l_1} + Y_{P_1}}{\cos \theta_1} + \frac{\frac{P_{l_1}}{2} + Y_{P_1}}{\tan \alpha_1 \sin \theta_1} \right) \end{cases} \quad (3)$$

Từ các hệ phương trình (1), (2), (3), ta cần tìm các góc θ_1 và α_1 để $|\vec{X}|, |\vec{Y}|$ lớn nhất. Bằng phương pháp vector, ta thu được hệ phương trình (4).

$$\begin{cases} -l \cos \alpha_1 + L \cos \theta_1 + \frac{S_B}{2} - \frac{S_P}{2} = 0 \\ l \sin \alpha_1 + L \sin \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Bài toán trở thành bài toán tối ưu hóa cực đại với hàm mục tiêu (5).

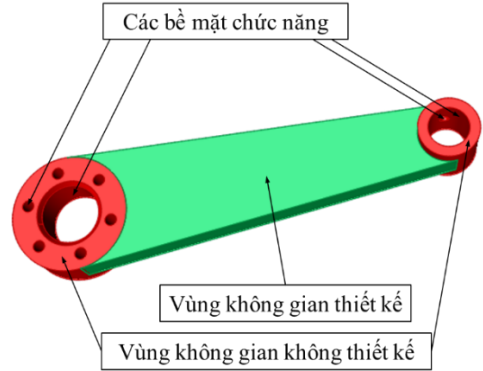
$$\begin{cases} \max f(\theta_1, \alpha_1) = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{l_1} + Y_{P_1}}{\sin \theta_1} - \frac{\frac{P_{l_1}}{2} + Y_{P_1}}{\tan \alpha_1 \cos \theta_1} \right) \\ \max f(\theta_1, \alpha_1) = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{l_1} + Y_{P_1}}{\cos \theta_1} + \frac{\frac{P_{l_1}}{2} + Y_{P_1}}{\tan \alpha_1 \sin \theta_1} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Kết quả của bài toán tối ưu hóa này là $\theta_1 = -15^\circ$ và $\alpha_1 = 75^\circ$. Tại vị trí này thì lực tác dụng lên khâu phát động là lớn nhất.

3.2. Tối ưu hóa hình học chi tiết

Chi tiết ban đầu được mô hình hóa dưới dạng khối rắn,

để tiến hành tối ưu hóa cần phải tách riêng ra hai phần riêng biệt là vùng không gian thiết kế (vùng không gian cần tối ưu hóa vật liệu) và vùng không gian không thiết kế. Vùng không gian thiết kế là vùng mà chúng ta có thể can thiệp để thiết kế lại mà không làm ảnh hưởng đến khả năng làm việc của cánh tay. Ngoài ra, còn có các bề mặt chức năng là các bề mặt dùng để lắp ráp và bắt vít với trục động cơ, được thể hiện trong Hình 7.



Hình 7. Các bề mặt chức năng, vùng không gian thiết kế và không thiết kế

Mục tiêu được đặt ra là khối lượng của chi tiết phải được giảm thiểu tối đa nhưng vẫn đảm bảo chịu được tải trọng làm việc nếu sử dụng riêng rẽ từng cánh tay để gấp thả là 2 kg. Ngoài ra, còn có điều kiện ràng buộc về vùng làm việc của robot (giá trị của hai góc α_1 và θ_1). Giả sử có cặp giá trị của hai góc đạt được khả năng tối ưu vật liệu tốt nhất, tuy nhiên hai giá trị này lại không nằm trong vùng làm việc của robot thì nhóm tác giả sẽ chọn cặp giá trị cho khả năng tối ưu tốt thấp hơn nhưng nằm trong vùng làm việc của robot.

Các lực tác dụng lên chi tiết và ràng buộc ngàm được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Vị trí của các lực và ràng buộc tác dụng lên chi tiết

Một lưới được tạo nên để rời rạc hóa vùng không gian thiết kế. Phần mềm Altair SolidThinking Inspire được sử dụng để giảm thiểu tối đa khối lượng của chi tiết. Trong trường hợp này, khối lượng của chi tiết giảm xấp xỉ 54%. Kết quả được thể hiện ở Hình 9.

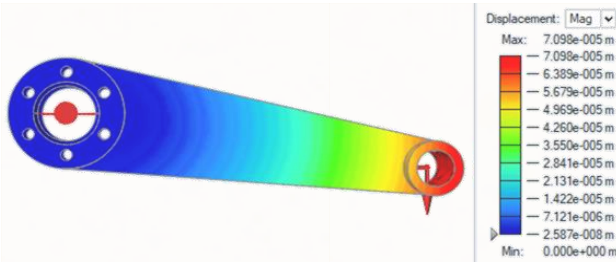


Hình 9. Kết quả tối ưu hóa

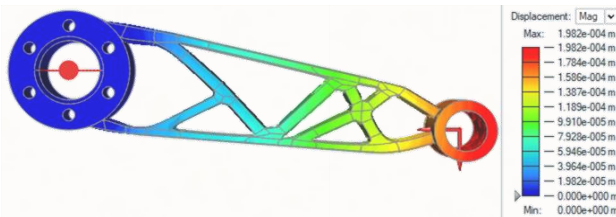
4. Bàn luận

Chi tiết đã tối ưu hóa của cánh tay trên robot Delta được thể hiện dưới định dạng CAD. Tuy nhiên, chúng ta chưa thể sử dụng trực tiếp chi tiết này để sản xuất bởi bề mặt làm

việc rất gò ghề. Vì vậy, nhóm tác giả đã thiết kế lại một mẫu chi tiết mới dựa vào kết quả tối ưu hóa. Sau đó, chi tiết mới được phân tích một lần nữa để kiểm tra lại các đặc điểm cơ khí, được thể hiện ở Hình 10.



a) Trước khi tối ưu hóa



b) Sau khi được vẽ lại dựa vào kết quả tối ưu hóa

Hình 10. So sánh độ chuyển vị của chi tiết trước khi tối ưu hóa (a) và sau khi được vẽ lại dựa vào kết quả tối ưu hóa (b)

Khối lượng của chi tiết sau khi được vẽ lại là 0,227 kg và phần trăm lượng vật liệu được cắt giảm so với trước khi tối ưu hóa là 48,8%. Vì vậy, chúng ta tiết kiệm được 0,216 kg cho mỗi chi tiết. Ngoài ra, chúng ta có thể thấy độ chuyển vị của chi tiết sau khi được vẽ lại lớn hơn độ chuyển vị của chi tiết trước khi tối ưu hóa khoảng 2,5 lần nhưng giá trị này là rất nhỏ (ở thang đo 0,1mm).

Hiện nay, ở Việt Nam, nếu các phương pháp gia công truyền thống như CNC được sử dụng để chế tạo chi tiết này thì sẽ rất tốn thời gian để chuẩn bị dụng cụ và máy móc đo hình dáng hình học của chi tiết sau tối ưu phức tạp hơn so với chi tiết ban đầu. Vì vậy, giá thành chế tạo có thể cao hơn. Tuy nhiên, việc sử dụng công nghệ gia công đắp lớp với các công nghệ như EBM, SLS, chi phí về vận hành máy và nhân công cũng sẽ được giảm đi khi chúng ta có thể chế tạo một lúc nhiều chi tiết so với việc chế tạo lần lượt từng chi tiết như phương pháp CNC. Ngoài ra, việc sử dụng công nghệ gia công đắp lớp sẽ góp phần tiết kiệm chi phí về vật liệu trong quá trình chế tạo do không có sản phẩm thừa.

5. Kết luận

Bài báo trình bày quá trình ứng dụng phương pháp thiết kế sử dụng tối ưu hóa hình học để giúp người thiết kế có thể

cải tiến sản phẩm trong quá trình thiết kế. Phương pháp cho phép tối ưu sự phân bố vật liệu và giảm khối lượng vật liệu sử dụng nhưng vẫn đảm bảo các đặc tính cơ học của chi tiết.

Một nghiên cứu điển hình là cánh tay trên của robot Delta đã được trình bày trong bài báo để minh họa cho phương pháp. Chi tiết mới đã được loại bỏ những phần vật liệu không cần thiết nhưng vẫn đảm bảo các ràng buộc thiết kế.

Tóm lại, phương pháp thiết kế với việc tích hợp tối ưu hóa hình học đang trở thành hướng tiếp cận cho các công nghệ gia công tiên tiến như công nghệ gia công đắp lớp. Nó có thể góp phần tạo ra một thể hệ robot Delta mới có khối lượng nhẹ hơn vì giảm được quán tính của robot trong quá trình di chuyển. Từ đó, giúp robot hoạt động ổn định và chính xác hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Clavel, "DELTA, A fast robot with parallel geometry", *18th International Symposium on Industrial Robot*, Lausanne, pp. 91-100, 1988.
- [2] M. P. Bendsoe, and O. Sigmund, *Topological Optimization, Theory, Methods and Application*: Springer Verlag, Berlin, 2004.
- [3] M. P. Bendsoe, and O. Sigmund, "Material interpolation schemes in topology optimization", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 69, no. 9, pp. 635-654, 1999.
- [4] X. Y. Yang, Y. M. Xie, and G. P. Steven, "Evolutionary methods for topology optimisation of continuous structures with design dependent loads", *Computers & Structures*, vol. 83, no. 12, pp. 956-963, 2005.
- [5] Süß, M., Schöne, C., Stelzer, R., Kloeden, B., Kirchner, A., Weissgaerber, T., Kieback, B., "Aerospace Case Study on Topology Optimization for Additive Manufacturing", *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC*, 2016, pp. 37– 41, 2016.
- [6] A W Gebisa and H G Lemu, "A case study on topology optimized design for additive manufacturing", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 276, Issue 1, 2017, pp. 012026, 2017.
- [7] Dinh Son Nguyen, Frédéric Vignat, "Topology Optimization as an Innovative Design Method for Additive Manufacturing", in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2017, pp. 304-308, 2017.
- [8] Kwon W, Kim HK, Park JK, Roh CH, Lee J, Park J, Kim WK, Roh K, "Biped humanoid robot Mahru III", 7th IEEE-RAS international conference on humanoid robots, pp 583–588, 2007.
- [9] Lohmeier S, Buschmann T, Ulbrich H, "Humanoid robot LOLA", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 775–780, 2009.
- [10] Hoài Nam Le and Xuan Hoang Le, "Geometrical Design of a RUU Type Delta Robot Based on the Prescribed Workspace", 2018 4th *International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2018, pp. 359-364, 2018.
- [11] Lê Xuân Hoàng, Lê Hoài Nam, "Bài toán động học, động lực học và phương pháp thiết kế hình học cho robot Delta kiểu ba khớp quay", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Số 11(132).2018, Quyển 1, 2018, trang 36, 2018.

(BBT nhận bài: 15/01/2020, hoàn tất thủ tục phân biên: 20/3/2020)