

PHÂN TÍCH KẾT CẤU KHUNG MÁY CỦA ROBOT TỰ CÂN BẰNG TRÊN BÓNG DƯA TRÊN PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

STRUCTURAL ANALYSIS FOR THE MAIN FRAME OF A BALL-BALLANCING ROBOT BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

Lê Nhật Chính¹, Văn Bá Khánh Tuấn², Phạm Anh Đức^{1*}

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

²Công ty Cổ phần Kiểm định An toàn và Chất lượng Việt Nam

*Tác giả liên hệ: ducpham@dut.udn.vn

(Nhận bài: 03/02/2023; Chấp nhận đăng: 24/3/2023)

Tóm tắt - Robot trợ lý là mẫu robot có khả năng tự hành và tương tác, hỗ trợ con người trong nhiều công việc khác nhau. Một mẫu mô hình robot trợ lý thường gặp là robot tự cân bằng trên bóng (BBR) với nhiều điểm nổi trội hơn các mẫu robot trợ lý thông thường. Tuy nhiên, để hệ thống có thể hoạt động ổn định và kết cấu robot để đạt được cân bằng trên quả bóng, việc tính toán kết cấu robot cần được thực hiện cẩn thận. Bài báo này trình bày cách tính toán và phân tích kết cấu khung chính của một BBR dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn. Trước tiên, đặc điểm và cấu tạo hình dạng của robot này được giới thiệu. Cấu tạo cơ khí và đặc điểm liên kết của các chi tiết của khung chính được mô tả. Từ đó, mô hình phân tích phần tử hữu hạn của cấu trúc khung chính BBR được thiết lập để đánh giá khả năng làm việc của nó trước khi tiến hành chế tạo sản phẩm thực tế.

Từ khóa - Robot cân bằng trên bóng (BBR); Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM); Phân tích kết cấu.

1. Giới thiệu

Cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0 đánh dấu sự ra đời của các robot trợ lý có khả năng tự hành và tương tác với con người, các thiết bị này hỗ trợ hoặc giúp con người cải thiện năng suất công việc một cách đáng kể [1-2]. Trong đó, robot tự cân bằng trên bóng (BBR) là một trong các hệ thống đang được quan tâm và nghiên cứu. Khác với các loại robot di chuyển truyền thống cần hai bánh dẫn động [3], không thể thực hiện các chuyển động theo các hướng khác nhau ngay lập tức, các BBR có thể thực hiện các chuyển động đa hướng mà không cần phải xoay phần thân của robot [4]. Bên cạnh đó, nhờ chỉ cần một điểm tiếp xúc với mặt đất khi vận hành, loại robot này có khả năng di động trong các không gian chật hẹp [5-7].

Với các ưu điểm trên, BBR đã được quan tâm nghiên cứu ở trong và ngoài nước. Nguyên bản đầu tiên của BBR đã được phát triển bởi Đại học Carnegie Mellon với cơ chế di chuyển dựa trên nguyên lý nghịch đảo hoạt động của viên bi và chuột máy tính [8]. Năm 2008, một nguyên mẫu khác được giới thiệu với cải tiến ở phần truyền động với việc sử dụng 3 bánh xe đa hướng (Omnidirectional wheel), robot này có khả năng tịnh tiến theo nhiều hướng khác nhau và thực hiện chuyển động quay quanh trục thẳng đứng [9]. Mẫu Rezero của ETH Zurich được giới thiệu năm 2010 là mẫu BBR có khả năng hoạt động ổn định với tốc độ cao (2mps) và có khả năng tự điều chỉnh

Abstract - Assistant robot is a model having capable of self-driving and interacting, assisting humans in various tasks. A usual design of assistant robot is a ball-balancing robot (BBR) with many outstanding features compared to conventional assistant robot models. However, for the stability of system and balancing capacity of robot on the ball, the calculation of the robot structure needs to be done carefully. This paper illustrates a process to calculate and analyze the main frame of a BBR based on the finite element method. Firstly, the characteristics and configuration of this robot are introduced. The mechanical structure and connection characteristics of the machine elements of the main frame are also described. From there, the finite element analysis model of the main frame of BBR robot is established to evaluate its working ability before proceeding to manufacture the actual product.

Key words - Ball-balancing robot (BBR); Finite element method (FEM); structure analysis

nhANH về trạng thái cân bằng khi bị các lực tác động nghiêng [10]. Mẫu BBR do Shreyas Srivatchan phát triển với vai trò là robot lễ tân trong nhà [11]. Trong các năm gần đây, nhiều nghiên cứu về bộ điều khiển của BBR được đưa ra, như: Bộ điều khiển dựa trên tối ưu hóa thuật toán di truyền [12]; Bộ điều khiển robot kết hợp giữa phương pháp điều khiển truyền thống và phương pháp học tăng cường (Reinforcement learning) [13]. Với các nghiên cứu đầu tiên trong nước, các công bố này chỉ tập trung vào quá trình phát triển các phương pháp và lựa chọn các thông số điều khiển một hệ thống BBR [5, 14]. Tuy vậy, các nghiên cứu phân tích và đánh giá khả năng hoạt động cấu trúc khung chính của BBR còn chưa được quan tâm nhiều. Việc xác định cấu trúc hình học hợp lý và khả năng chịu tải trong quá trình hoạt động của các chi tiết máy là cần thiết [15-18], do đó quy trình thiết kế và phân tích khả năng hoạt động của cấu trúc khung chính BBR cần được nghiên cứu.

Trong nghiên cứu này, cách tính toán và phân tích kết cấu khung chính của một robot tự cân bằng trên bóng (BBR) dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được giới thiệu. Đầu tiên, đặc điểm cấu tạo và thông số hình học của robot này được mô tả. Tiếp theo, cấu trúc phần khung chính của BBR được mô phỏng và phân tích với sự hỗ trợ của FEM. Trong đó, quá trình thiết lập mô hình mô phỏng gồm: Kỹ thuật chia lưới, thiết lập lực siết mặc định của mỗi

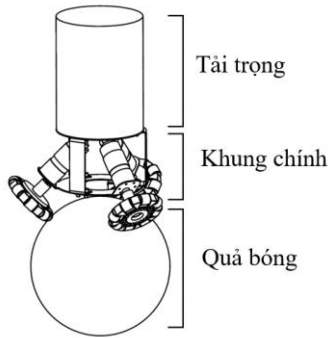
¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Nhat Chinh Le, Anh-Duc Pham)

² Vietnam Safety and Quality Inspection Joint Stock Company (Ba Khanh Tuan Van)

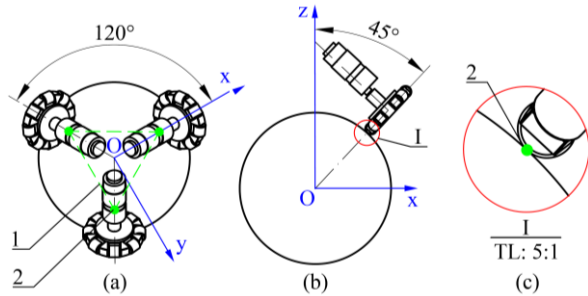
ghép bulông – đai ốc, mô hình hóa mối lắp ren và các điều kiện biên khác cũng được mô tả chi tiết. Cuối cùng, từ kết quả mô phỏng, việc chế tạo phần khung chính của BBR được thực hiện.

2. Cấu tạo BBR

2.1. Cấu trúc tổng thể



Hình 1. Cấu trúc khung của BBR



- *1 - Mặt chân đế của robot
- *2 - Điểm tiếp xúc giữa bánh đa hướng với quả bóng

Hình 2. Góc phân bố của động cơ và góc giữa bánh đa hướng với quả bóng

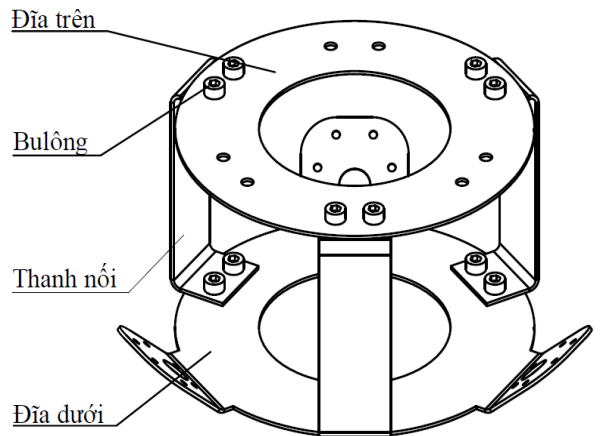
Nhìn chung, một BBR sẽ được cấu tạo gồm 3 phần chính: Tải trọng mang theo, khung chính và quả bóng di chuyển, như Hình 1. Ngoài công dụng chịu tải trọng lớn của các thiết bị mang theo, phần khung chính của BBR còn là nơi để gắn cố định ba động cơ điện làm bộ phận chính tạo nên chuyển động lăn cho quả bóng. Để robot có thể di chuyển dễ dàng và điều khiển thuận lợi, các yếu tố về cân bằng và tính linh hoạt của BBR cần được quan tâm. Do đó, vị trí gá đặt của động cơ và khả năng đứng vững của khung chính là quan trọng. Để tạo khả năng di chuyển linh hoạt, vị trí gá đặt của cụm cơ cấu “động cơ – bánh xe đa hướng” và quả bóng cần xác lập các góc tương ứng với các mặt phẳng khác nhau như Hình 2. Trước hết, để lực kéo tải của mỗi động cơ được phân bố đều nhau trong vòng tròn, hợp với nhau một góc 120° trong mặt phẳng Oxy. Thêm vào đó, tính linh hoạt của BBR còn được quyết định bởi góc bánh xe đa hướng của nó. Góc bánh đa hướng là góc được hợp bởi đường thẳng đi qua điểm tiếp xúc giữa bánh xe với quả bóng và tâm quả bóng so với trục đứng Oz của quả bóng như Hình 2(b). Về cơ bản, góc này càng lớn thì robot càng kém linh hoạt vì hành trình quay quanh trục Ox và Oy sẽ dài hơn, chuyển động quay đó sẽ khó khăn hơn. Ngược lại, góc bánh xe đa hướng nhỏ sẽ làm

cho mặt chân đế của robot (phần tam giác nét đứt “1” ở Hình 2(a) tạo bởi ba điểm tiếp xúc của các bánh xe đa hướng – điểm “2” được thể hiện trong Hình 2(c)) bị thu hẹp, làm robot khó cân bằng. Ở thiết kế này, giá trị góc được xác định là 45°.

2.2. Thiết kế khung chính của BBR

Trong kết cấu tổng quan của BBR, khung chính của robot là phần quan trọng nhất trong việc chịu tải và cố định các cụm cơ cấu “động cơ – bánh xe đa hướng”. Thông thường, một BBR cần mang theo các hệ thống thiết bị giám sát, hệ thống điều khiển, pin để dự trữ năng lượng đồng thời có thể mang theo các vật dụng khác tùy theo công năng thiết kế khác nhau của nó. Trong một số trường hợp đặc biệt, tổng tải trọng của BBR có thể đạt 100kg. Tuy vậy, tải trọng tối đa cũng bị hạn chế bởi khả năng chịu tải của quả bóng mà toàn bộ khối lượng robot đặt lên. Trong thiết kế này, khung chính của BBR sẽ được xác định có khả năng chịu tải tối đa 50kg.

Thiết kế cấu trúc của phần khung chính của BBR được mô tả trong Hình 3. Để tạo khả năng tháo lắp dễ dàng, phần khung chính này sẽ được thiết kế bởi 5 chi tiết rời và được lắp ráp với nhau bằng các mối ghép bulông – đai ốc chế tạo từ vật liệu thép SUS 304. Thiết kế này giúp robot dễ dàng tùy chỉnh hoặc thay thế các bộ phận, như: Tăng/giảm chiều cao khung chính, điều chỉnh độ rộng của khung chính... Toàn bộ chi tiết được gia công bằng thép tấm dày 2mm và được tạo hình bằng máy chấn kim loại. Để đạt được yêu cầu về tính công nghệ, vật liệu được dùng cho khung chính của BBR là thép không gỉ SUS 430. Đây là loại thép dễ dàng gia công chấn gấp do có tính dẻo cao, độ bền cao và có khả năng chịu mài mòn, ngoài ra còn dễ dàng tìm kiếm trên thị trường.

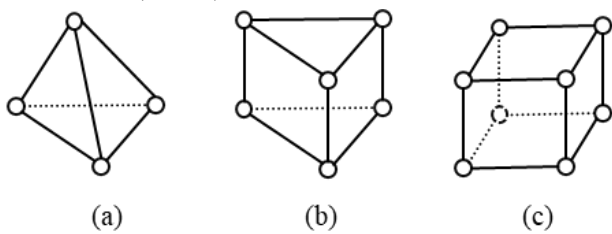


Hình 3. Thiết kế khung chính của BBR

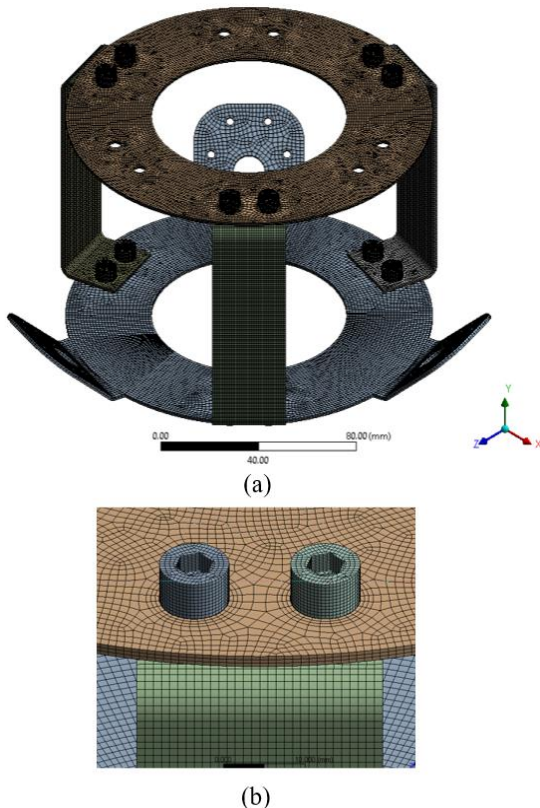
3. Mô hình phân tích FEM

Phần mềm phân tích phần tử hữu hạn ANSYS R15.2 được sử dụng để mô phỏng và phân tích khả năng hoạt động của khung chính BBR. Ở đây, để đơn giản hóa bài toán phân tích, phần khung chính là bộ phận được chọn phân tích chính. Đầu tiên, thiết kế 3D của khung chính BBR được đưa vào phần mềm ANSYS dưới dạng dữ liệu *.igs. Mô hình phân tích được tạo ra gồm 29 chi tiết rời, gồm 5 chi tiết chính và 12 cặp bulông – đai ốc.

Một mô hình phân tích phần tử hữu hạn tốt là mô hình có kết quả chính xác và thời gian mô phỏng ngắn [19-20]. Để đạt được yêu tố đó, việc thiết lập cấu trúc lưới là rất quan trọng [21]. Đầu tiên, cần lựa chọn loại phần tử (element) phù hợp với bài toán mô phỏng. Phần tử dạng lăng trụ tam giác 6 nút (Hình 4(b)) và khối hộp 8 nút (Hình 4(c)) luôn được ưu tiên lựa chọn, vì 2 loại này giúp mô phỏng được thực hiện nhanh chóng và kết quả ít sai số [22]. Tuy nhiên, đối với các chi tiết có hình dáng hình học phức tạp, không thể sử dụng 2 loại phần tử trên thì phần tử tứ diện 4 nút (Hình 4(a)) là lựa chọn đơn giản hơn [23]. Trong mô hình phân tích khung chính BBR này, phần tử lăng trụ tam giác 6 nút và khối hộp 8 nút được sử dụng cho toàn bộ mô hình; Trong khi đó, bulông và đai ốc được mô phỏng với sự kết hợp đa phần tử (multizone). Bên cạnh đó, ở những vùng cần đặc biệt chú ý khi tạo mô hình lưới (vùng tập trung ứng suất và dễ xảy ra hỏng), kích thước phần tử sẽ được thiết lập có kích thước nhỏ hơn như Hình 5(b). Từ các thiết lập nêu trên, mô hình phân tích này có 185714 phần tử (Elements) và 949023 nút (Nodes).



Hình 4. Các hình dáng phần tử cơ bản: (a) Tứ diện 4 nút; (b) Lăng trụ tam giác 6 nút; (c) Khối hộp 8 nút



Hình 5. Cấu trúc lưới của: (a) Mô hình tổng quát; (b) Ở mỗi ghép bulông - đai ốc

Tùy vào đặc điểm và tính chất liên kết giữa các chi tiết khác nhau trong thực tế, các lựa chọn vùng tiếp xúc giữa chúng trong mô hình mô phỏng sẽ được xác lập tương ứng. Trước tiên các bề mặt tiếp xúc giữa các đĩa trên và đĩa dưới với ba thanh nối sẽ được lựa chọn tiếp xúc có ma sát (Frictional). Đây là kiểu liên kết cho phép các bề mặt tiếp xúc giữa các chi tiết chính này có thể tách rời nhau khi bị tác động bởi ngoại lực. Để tạo liên kết thành một khối thống nhất, các đĩa dưới (hoặc đĩa trên) và các thanh nối sẽ liên kết với nhau bằng các mối ghép bulông - đai ốc. Để tăng tính chính xác mô phỏng, cấu trúc mối ghép ren giữa bulông - đai ốc cần được chi tiết hóa tốt và được mô phỏng với cấu trúc lưới mịn (Fine meshing) [22]. Tuy nhiên, cách làm này sẽ làm chương trình mô phỏng phức tạp và tốn kém nhiều tài nguyên máy tính. Thay vào đó, cách sử dụng công cụ sẵn có Bolt pretension của ANSYS có thể dùng làm phương án thay thế có chất lượng tính toán tương đương. Các khai báo cần có trong mô hình phân tích khi đó dành cho mỗi ghép bulông - đai ốc gồm có: Đường kính trung bình của mối ghép ren, bước ren, góc tiết diện ren, số đầu mối của đường xoắn ốc và chiều của ren.

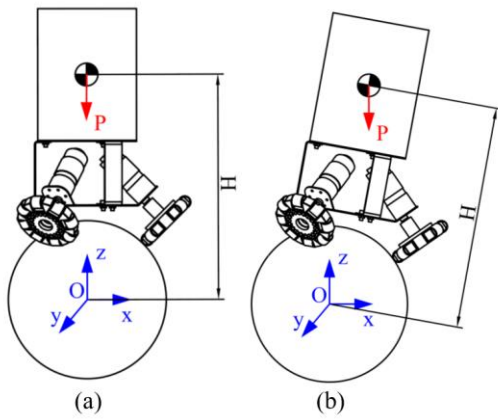
Thêm vào đó, trong mô hình phân tích, lực siết ban đầu (preload) của mỗi ghép bulông - đai ốc cần được xác định. Lực này có vai trò làm cho các mối ghép bulông không bị tách rời khi ngoại lực tác dụng lên vùng liên kết. Trong mô hình FEM, lực siết ban đầu cần được khai báo trước. Để tính được giá trị lực siết cần thiết của mỗi ghép bulông - đai ốc sử dụng đối với khung chính BBR, ta có thể sử dụng công thức (1) [24], lực siết ban đầu cho các mối ghép có thể tháo ráp được tính theo công thức:

$$F_i = 0,75F_p \quad (1)$$

Trong đó, F_p là tải thử nghiệm: $F_p = A_t \times 0,85 \times S_y$ (2)

Ở đây, A_t là diện tích chịu kéo của bulông và S_y là giới hạn chảy của vật liệu. Đối với bulông thép SUS 304 kích cỡ M5 thì $A_t = 14,2$ (mm²) và $S_y = 205$ (MPa). Do đó, ta có thể xác định được lực siết ban đầu của mỗi ghép bulông - đai ốc trong mô hình này là $F_i = 1856$ (N).

Trong mô phỏng này, khung chính của BBR có ràng buộc cố định tại ba vùng lắp động cơ và chịu tải tập trung quy đổi tại trọng tâm của khung. Nhìn chung, khung chính của BBR được cố định và di chuyển theo quả bóng bên dưới nhờ vào các động cơ gắn cứng trực tiếp với nó. Do đó, trong mô hình phân tích FEM này các ràng buộc cố định (Fixed support) được lựa chọn tại ba vị trí gắn với động cơ. Để đơn giản hóa mô hình, toàn bộ tải trọng đặt lên khung chính của BBR sẽ được xem là lực tập trung tại tâm của vòng tròn đĩa dưới (trọng tâm khung). Trên thực tế, một BBR có hai trạng thái hoạt động: Cân bằng và nghiêng với góc nghiêng tối đa 5° [6, 9], như Hình 6. Do đó, mô hình phân tích khả năng chịu tải của khung chính sẽ xét đến cả hai trường hợp này. Tùy vào trường hợp cân bằng hay nghiêng mà lực tải trọng P có thể chỉ có 1 thành phần P_z hoặc có đủ cả 3 thành phần (P_x, P_y, P_z) tương ứng. Ngoài ra, trong mô hình này, tải trọng đặt vào khung chính sẽ có giá trị tối đa không quá 50kg. Các thông số khai báo trong mô hình phân tích khả năng chịu tải của khung chính được mô tả trong Bảng 1.



Hình 6. Trọng lực tác động lên phần khung của robot trong trường hợp (a) BBR cân bằng và (b) BBR nghiêng

Bảng 1. Các thông số của mô hình mô phỏng

Đặc điểm	Thông số	Giá trị
Vật liệu của phần khung SUS 430	Giới hạn chảy	345 MPa
	Giới hạn bền	517 MPa
	Mô-đun Young	200000 MPa
	Hệ số Poisson	0,3
	Khối lượng riêng	7850 kg/m ³
Vật liệu của bulông – đai ốc SUS 304	Giới hạn chảy	205 MPa
	Giới hạn bền	515 MPa
	Mô-đun Young	198660 MPa
	Hệ số Poisson	0,29
	Khối lượng riêng	8000 kg/m ³
Tải trọng tối đa		50 kg
Gia tốc trọng trường		9,8 m/s ²
Góc quay robot quanh trục Ox và Oy		{0°, 5°}
Chiều cao (H) của trọng tâm tới tâm của quả bóng		{367mm, 467mm, 567mm}
Thông số hình học của ren		Bulông – đai ốc M5 × 0,8mm
Lực siết ban đầu của mối ghép bulông – đai ốc		1856 N

4. Kết quả và phân tích đánh giá

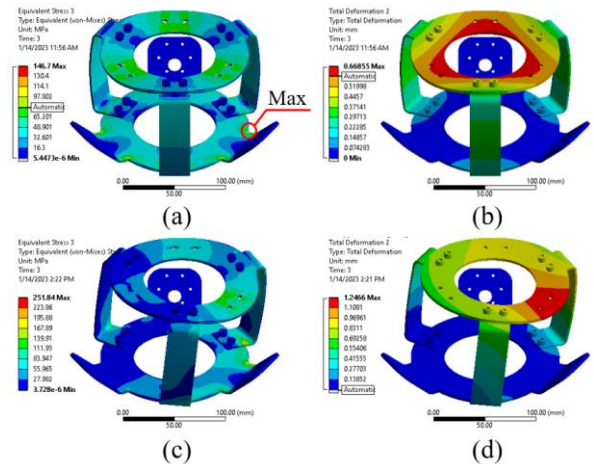
Bảng 2. Tổng hợp phân tích khả năng chịu tải của khung chính BBR với các trường hợp chịu tải khác nhau

Trường hợp (TH)	Chiều cao của trọng tâm theo trục Oz (mm)	Góc nghiêng của BBR (°)	Ứng suất tối đa (MPa)		Biến dạng tối đa (mm)
			Khung (trừ bulông - đai ốc)	Các bulông- đai ốc	
1	367	0	146,7	37,4	0,67
2		5	221,0	55,8	1,00
3	467	0	146,7	37,4	0,67
4		5	251,8	65,4	1,25
5	567	0	146,7	37,4	0,67
6		5	328,7	80,5	1,49

Kết quả tổng hợp phân tích khả năng chịu tải của khung chính BBR với các trường hợp chịu tải khác nhau được thể hiện ở Bảng 2. Nhìn chung, trong cả 6 trường hợp phân tích, ứng suất tối đa (USTĐ) sinh ra trên khung và các bulông – đai ốc đều nhỏ hơn giới hạn chảy của vật liệu. Khi robot ở vị trí cân bằng, ứng suất và biến dạng khi chịu tải của khung robot không thay đổi khi chiều cao trọng tâm tăng hoặc giảm. Ngược lại, ở trạng thái nghiêng, USTĐ

tăng mạnh khi chiều cao của trọng tâm tăng, vì khi đó mô men lực tác động lên khung chính của BBR cũng tăng theo và làm cho tải trọng phân bố không đều.

Theo kết quả mô phỏng sơ bộ cho các trường hợp khác nhau ở Bảng 2, nghiên cứu lựa chọn chiều cao trọng tâm robot theo trục Oz thuộc mô hình phân tích số 3 và 4 (H=467mm) là phương án cuối cùng để tiến hành các phân tích chi tiết. Kết quả mô phỏng toàn bộ phần khung chính của BBR với các thông số ứng suất và biến dạng của mô hình số 3 và 4 (TH3 và 4) được thể hiện trong Hình 7. Ở kết quả phân tích ứng suất khi BBR cân bằng được thể hiện trong Hình 7(a), ứng suất lớn nhất sinh ra là 146.7 MPa và tập trung ở điểm nối giữa phần gá động cơ và vành khung tròn của đĩa dưới. Trong khi đó, tại đĩa trên, ứng suất sinh ra tại các phần cố liên kết với thanh nối có xu hướng nhỏ hơn các phần còn lại. Xu hướng biến dạng của khung chính BBR robot có thể quan sát ở Hình 7(b). Đĩa trên của khung có xu hướng biến dạng lõm xuống và phân bố biến dạng giảm dần từ trong ra ngoài vành đĩa. Hình 7(c, d) là kết quả mô phỏng khi robot nghiêng 5°. Đối với trường hợp này, ứng suất và biến dạng phân bố tập trung hẳn về một phía (phía nghiêng), làm cho USTĐ của mô hình lớn hơn đáng kể so với robot ở vị trí thẳng bằng với giá trị 215,84 MPa. Nhìn chung, trong cả hai trường hợp (cân bằng và nghiêng), biến dạng của khung tại chỗ lắp động cơ là không đáng kể (tiệm cận 0). Điều này là cần thiết và giúp đảm bảo góc giữa bánh xe và quả bóng sẽ không thay đổi khi BBR hoạt động.

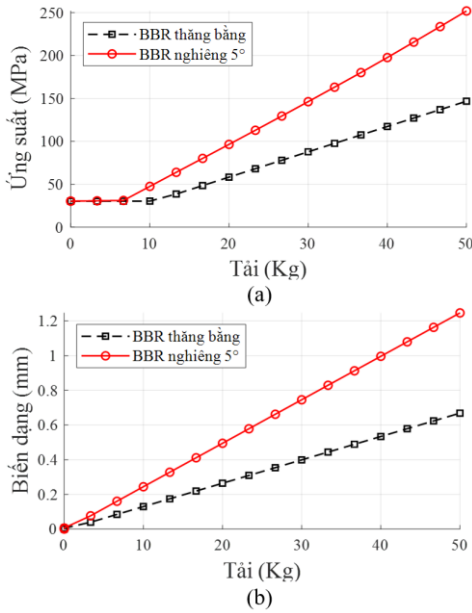


Hình 7. Kết quả phân tích khi chiều cao trọng tâm robot = 467mm

- (a) BBR thẳng bằng (TH3) – phân tích ứng suất
- (b) BBR thẳng bằng (TH3) – phân tích biến dạng
- (c) BBR nghiêng 5°(TH4) – phân tích ứng suất
- (d) BBR nghiêng 5°(TH4) – phân tích biến dạng

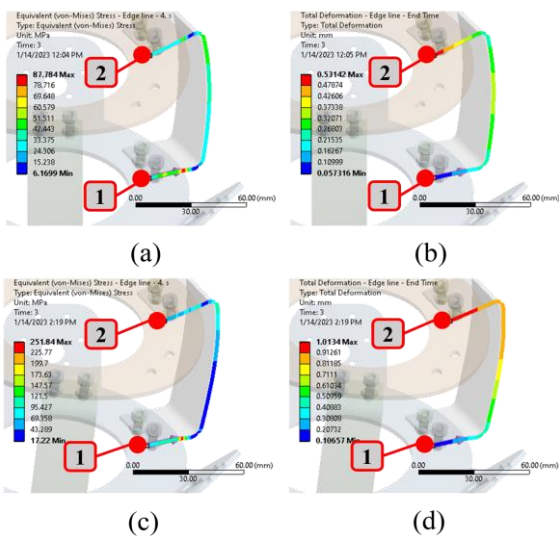
Hình 8 thể hiện tương quan giữa ứng suất và biến dạng của khung chính robot (không tính các bulông, đai ốc) khi tải trọng tăng dần trong phân tích chi tiết của 2 mô hình phân tích chi tiết 3 và 4 (TH3 và 4). Ban đầu khi chưa có tải, khung chính của BBR đã chịu một ứng suất có giá trị 35 MPa (Hình 8(a)) gây ra do lực siết ban đầu của mối ghép bulông. Khi chịu tải tác động tăng dần, khung chính của BBR cũng đồng thời chịu USTĐ và biến dạng tăng tuyến tính tương ứng với tải trọng đó. Tuy nhiên, khi tải trọng đạt giá trị 10kg trở lên, giá trị USTĐ này mới tăng đáng kể và lớn hơn ứng suất tạo bởi lực siết ốc ban đầu tác động lên

khung chính của BBR. Nhìn chung, ở trường hợp robot nghiêng, độ thị ứng suất và biến dạng có độ dốc cao hơn so với ở trạng thái thẳng bằng.

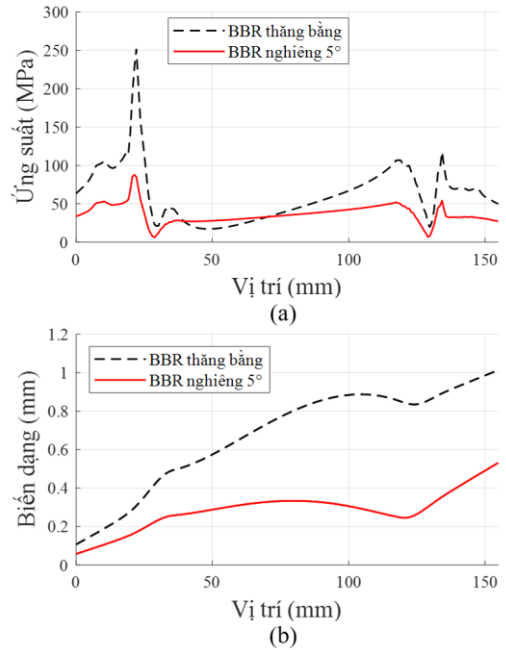


Hình 8. Mối liên hệ giữa tải trọng với (a) $U\sigma TĐ$ và (b) Biến dạng trong TH3 và 4 (không tính các bulông - đai ốc)

Phân tích kết cấu của thanh nối được thể hiện ở Hình 9 và Hình 10. Trong kết quả phân tích của mô hình, điểm đầu có vị trí 0mm là điểm được đánh số ‘1’ và điểm cuối là số ‘2’ như ở Hình 9. Từ đó các giá trị ứng suất và biến dạng được thể hiện dưới dạng đồ thị như Hình 10. Từ Hình 10(a) có thể thấy rõ, tại vùng 0 – 30mm và 120mm – 140mm là vùng có chênh lệch ứng suất lớn, vì các điểm này gần các mối ghép bulông – đai ốc. Ngược lại, ở vùng 30mm – 110mm, ứng suất có xu hướng tăng dần do các điểm về sau ở gần vùng chịu tải trọng của chi tiết. Ngoài ra, xu hướng biến dạng của thanh nối tăng dần theo dọc chiều dài của thanh như Hình 10(b).

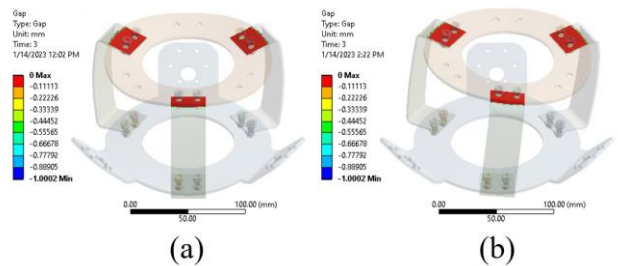


Hình 9. Kết quả phân tích kết cấu thanh nối (a) BBR thẳng bằng (TH3) – phân tích ứng suất (b) BBR thẳng bằng (TH3) – phân tích biến dạng (c) BBR nghiêng 5°(TH4) – phân tích ứng suất (d) BBR nghiêng 5°(TH4) – phân tích biến dạng



Hình 10. (a) Ứng suất và (b) biến dạng theo chiều dài thanh nối ở các TH 3 và 4

Khoảng hở giữa các mặt tiếp xúc của các chi tiết được lắp ráp trong quá trình hoạt động có tải được thể hiện ở Hình 11. Trong đó, tất cả các bề mặt tiếp xúc đều là màu đỏ, tức khoảng hở giữa bề mặt tiếp xúc bằng 0. Do đó lực siết trên bulông là đủ để giữ các bộ phận của phân khung chính liên kết với nhau trong các điều kiện hoạt động khác nhau của robot.



Hình 11. Khoảng hở giữa các mặt tiếp xúc của các chi tiết: (a) TH3 - Robot cân bằng, (b) TH4 - Robot nghiêng 5°



Hình 12. Khung chính của BBR sau khi chế tạo

Từ các phân tích kết cấu, đánh giá kết quả ứng suất tối đa và mức độ biến dạng của khung chính robot (ứng với khả năng chịu tải tối đa 50kg) bằng mô hình FEM, có thể nhận thấy, thiết kế khung này hoàn toàn đủ khả năng hoạt động trong thực tế. Do đó, một mẫu khung chính của BBR đã được gia công và lắp ráp thành công như ở Hình 12.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày thiết kế và phân tích cấu trúc khung chính của BBR. Toàn bộ cấu trúc được phân tích bằng phương pháp FEM với 6 mô hình mô phỏng khác nhau. Các kỹ thuật phân tích nâng cao (như: Chia lưới mịn, mô hình hóa mối ghép ren, đặt lực kéo trước cho bulông,...) đã được sử dụng trong mô hình phân tích.

Kết quả phân tích cho thấy ứng suất sinh ra ở khung chính của BBR nằm trong vùng an toàn của vật liệu, với tải trọng 50kg. Bộ phận giá động cơ không bị biến dạng quá lớn, đảm bảo cho góc giữa bánh xe đa hướng và quả bóng không bị thay đổi. Các mối nối bulông – đai ốc đủ lực kéo trước để kết nối các chi tiết với nhau.

Cuối cùng, từ kết quả thiết kế và mô phỏng khả năng hoạt động, phần khung chính của BBR được chế tạo và lắp ráp thành công.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Skilton, Mark, and Felix Hovsepian, *The 4th industrial revolution*. Springer Nature, 2018.
- [2] Pham, Anh-Duc, and Hyeong-Joon Ahn. "Rigid precision reducers for machining industrial robots", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 22(8), 2021, pp. 1469-1486.
- [3] Thanh, Vo Nhu, et al., "Restaurant Serving Robot with Double Line Sensors Following Approach", *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2019, pp. 235-239.
- [4] Blonk, J. W., *Modeling and control of a ball-balancing robot*. MS thesis. University of Twente, 2014.
- [5] Cao Thanh Bộ, Phạm Trường Hưng, TS. Lê Hoài Nam, Nguyễn Danh Ngọc, "So sánh bộ điều khiển PID với bộ điều khiển LQG Cho Robot cân bằng Trên Quả cầu", *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Số 7(128), 2018, trang 10-14.
- [6] Aphiratsakun, Narong, et al., "Implementation of AU balancing ballbot (AUB³)", *2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2014, pp. 1-4.
- [7] Han, Hew Yeong, Tiong Yih Han, and Hudyjaya Siswoyo Jo, "Development of omnidirectional self-balancing robot", *2014 IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, 2014, pp. 57-62.
- [8] Lauwers, Tom B., George A. Kantor, and Ralph L. Hollis., "A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive", *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006., 2006, pp. 2884-2889.
- [9] Kumagai, Masaaki, and Takaya Ochiai, "Development of a robot balancing on a ball", *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008, pp. 433-438.
- [10] Fankhauser, Peter, and Corsin Gwerder. *Modeling and control of a ballbot*. BS thesis. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2010.
- [11] Srivatchan, Shreyas. *Development of a Balancing Robot as an Indoor Service Agent*. Diss. Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA, 2020.
- [12] Gao, Tianyu, Jun Jin, and Xiao Hao, "A single-ball-driven self-balancing robot controller based on genetic algorithm optimization", *Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture*, 2020, pp. 453-457.
- [13] Zhou, Yifan, et al., "Learning ball-balancing robot through deep reinforcement learning", *2021 International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR)*, 2021, pp. 1-8.
- [14] Phạm Hoàng Giang, *Điều khiển Ballbot cân bằng và di chuyển*, Luận văn thạc sỹ, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh, 2016.
- [15] Nguyen, Trieu Khoa, Minh Quang Chau, and Anh-Duc Pham, "Characterization of geometrical parameters of plastic bottle shredder blade utilizing a two-step optimization method", *Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 68(3), 2021, pp. 253-269.
- [16] Le, H. N., et al., "System identifications of a 2DOF pendulum controlled by QUBE-servo and its unwanted oscillation factors", *Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 67(4), 2020, pp. 435-450.
- [17] Nguyen, Trieu Khoa, Chau Duc, Kiet, Pham, Anh-Duc, "Characterization of an FDM-3D Printed Moldcore in a Thermoforming Process Using Taguchi in Conjunction with Lumped-Capacitance Method", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023. DOI:10.1007/s13369-023-07646-7
- [18] Dang, P.V., et al., "On the Impact Test Methodology for the Quick Estimation of Natural Frequency of the Mechanical Systems". *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 191-201..
- [19] Ahn, Hyeong-Joon, et al. "Impact analysis of tolerance and contact friction on a Rv reducer using fe method", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 22(7), 2021, pp. 1285-1292.
- [20] Đặng Phước Vinh, Lê Hoài Nam, "Mô phỏng số một hệ thống máy có các chi tiết quay đơn giản bằng phương pháp phần tử hữu hạn.", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 17. No.7, 2019, trang 5-9.
- [21] Okereke, Michael, and Simeon Keates, *Finite element applications*, Springer International Publishing AG, 2018.
- [22] Đức, Phạm Anh, et al., "Phương pháp phân tích phần tử hữu hạn đánh giá hoạt động của cảm biến áp suất không khí sử dụng cho vật thể bay cỡ nhỏ", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Số 20(3), 2022, trang 35-39.
- [23] Le, Hoài Nam, et al., "Behavior analysis of soft pneumatic actuator gripper by using image processing technology", *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2020, pp. 1798-1802.
- [24] Budynas, Richard G., and J. Keith Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, McGraw Hill, New York NY 752, 2008.