

Ứng dụng phương pháp Chained Beam Constraint Model trong tính toán thiết kế cơ cấu mềm Bistable

Application of Chain Beam Constraint Model in numerical design Bistable compliant mechanisms

Trần Ngọc Đăng Khoa¹, Nguyễn Văn Bình², Phan Văn Đức^{2,*}, Đoàn Văn Đồng³

¹Trường Đại học Công nghiệp Thành Phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Văn Lang

³Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

*Email liên hệ: duc.pv@vlu.edu.vn

Tóm tắt:

Cơ cấu mềm Bistable là dạng cơ cấu nguyên khối không cần lắp ráp trong quá trình chế tạo, được sử dụng phổ biến vì những lợi ích Bistable mang lại như việc tiết kiệm năng lượng hoạt động, hoạt động chính xác và không cần bảo dưỡng thường xuyên. Cơ cấu này vận hành dựa trên sự nén và giãn các thanh đàn hồi. Hiện nay, các phương pháp tính toán thiết kế giúp dự đoán đặc trưng hoạt động của cơ cấu này chưa được chính xác và gặp nhiều khó khăn do tính chất phi tuyến trong quá trình hoạt động. Bài báo ứng dụng phương pháp Chained Beam Constraint Model (CBCM) để phân tích và dự đoán đặc tính các mô hình cơ cấu mềm Bistable. Phương pháp chia nhỏ thành phần thanh đàn hồi thành nhiều đoạn bằng nhau giúp dự đoán chính xác các thuộc tính của cơ cấu mềm Bistable. Phương pháp cũng được so sánh và kiểm chứng bằng phương pháp phần tử hữu hạn và cho các kết quả với sai số nhỏ. Phương pháp CBCM giúp tính toán nhanh hơn trong việc thiết kế các cơ cấu mềm Bistable.

Từ khóa: Cơ cấu mềm; phi tuyến; tính toán số; chuyển vị.

Abstract:

Bistable compliant mechanism is a monolithic part and jointless in the structure, is utilized due to saving energy, precious in operation, and reducing maintenance costs. This mechanism work based on the compression and tension of the flexural beam. Most calculation methods assist the mechanism's characteristics to have challenges because of the nonlinear behavior of the structure. This paper employs the CBCM (Chained Beam Constraints Model) method to analyze and evaluate Bistable compliant mechanisms. The flexural beam of the mechanism is divided into many segments for evaluating the compliant mechanism behavior. This method is verified with the finite element method and the results show insignificant errors. CBCM assists in the design of the compliant Bistable mechanism with high accuracy in a short time.

Keywords: Compliant mechanism; nonlinear; numerical method; displacement.

1. Giới thiệu

Trong thế giới kỹ thuật hiện đại nói chung và kỹ thuật cơ khí nói riêng, cơ cấu mềm là một trong những cơ cấu hiện đại mà ngày càng được sử dụng phổ biến nhằm thay thế các cơ cấu truyền thống trong rất nhiều trường hợp cả dân dụng lẫn thiết bị, bộ phận máy móc chuyên dụng [1]. Phổ biến trong các bộ phận cơ khí cần độ chính xác cao [2]. Cơ cấu

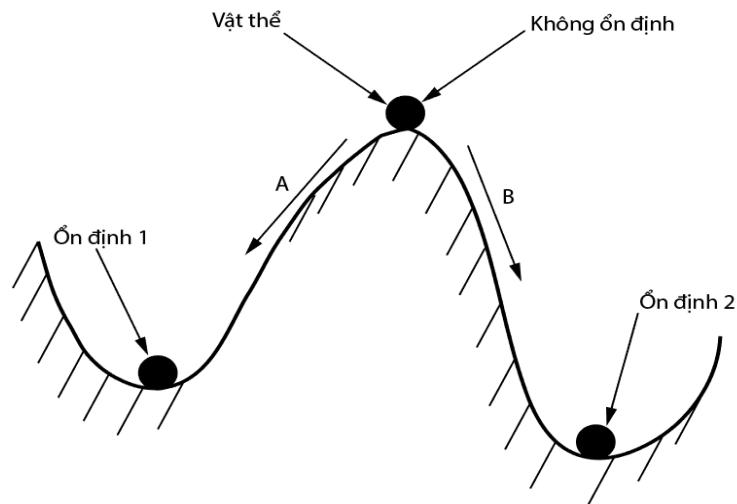
mềm mang lại nhiều lợi ích to lớn, chủ yếu trong thiết kế các hệ thống vi cơ điện tử, thay thế một số bộ phận trong xe hơi, máy bay, thiết bị cảm biến, máy móc,...[1]. Những lợi ích của cơ cấu mềm: Không có ma sát, không cần lắp ráp, giảm thiểu việc bảo trì, tiết kiệm các chi phí sản xuất vì chế tạo đơn giản chủ yếu từ các vật liệu dẻo, bền, nhẹ hơn cơ cấu được chế tạo từ kim loại [3]. Hiện nay, với sự

phát triển của công nghệ in 3D, việc in các cơ cấu mềm trở nên phổ biến, không những dễ sử dụng, thay thế mới mà còn tiện lợi trong việc phân phối, tinh giản các bước thực hiện thường có trong sản xuất các cơ cấu truyền thống. Một số công ty có thể tự in cơ cấu mềm nếu trang bị máy in 3D tại văn phòng không cần thông qua trung gian [4]. Ngoài ra, cơ cấu mềm còn được ứng dụng để chế tạo các bộ phận cơ thể người, ví dụ như các nhà khoa học đã nghiên cứu và chế tạo ra bộ phận mắt cá chân làm từ cơ cấu mềm [5].

Việc thay thế các cơ cấu truyền thống bằng cơ cấu mềm dẫn đến các thay đổi trong kết cấu, hình dạng của cơ cấu. Thay thế các thanh cứng chế tạo từ vật liệu kim loại, được gắn vào các khớp cố định, khớp xoay bằng một thanh đàn hồi chế tạo từ các vật liệu dẻo, còn được gọi là thanh dầm đàn hồi (elastic beam) và được cố định một bên đầu bằng

ngàm [6]. Tính toán các cơ cấu biến dạng dẻo vẫn tiếp tục được nghiên cứu và phát triển [7][8].

Trong rất nhiều cơ cấu mềm được phát triển, cơ cấu mềm Bistable được chế tạo và ứng dụng rộng rãi trong đời sống lẫn công nghiệp sản xuất [9][10]. Đây là cơ cấu có nguyên lý luôn ổn định ở hai vị trí khác nhau, ví dụ, kẹp tóc, cái kim làm từ vật liệu đàn hồi. Các cơ cấu mềm Bistable trong các thí nghiệm thường thấy là: Cơ cấu với bốn thanh đàn hồi nối với nhau bằng một khối liên kết cứng [11] hoặc một đĩa bẹt mặt được đặt bên trong một đĩa có các thanh đàn hồi quay xung quanh đĩa bẹt mặt [12]. Hình dạng và kết cấu của thanh dẻo đàn hồi có thể là đường cong Bezier (B-spline) [13], trong bài báo này sử dụng thanh đàn hồi có hình dạng thẳng. Ngoài ra, cơ cấu mềm Bistable còn được sử dụng để thiết kế cơ cấu dựa theo bộ phận chân của con cua [14] và ứng dụng trong nghiên cứu, thiết kế kết cấu của cảm biến gia tốc [15].



Hình 1. Nguyên lý lưỡng ổn định.

Cơ cấu mềm Bistable áp dụng nguyên lý Bistability từ bài toán The-ball-on-the-hill. Nguyên lý này được minh họa như hình 1. Bài toán ở đây như sau, một quả bóng (Ball) được đặt ở trên một bề mặt bị nhô được gọi là đỉnh (Hill), hai bên đỉnh là các bề mặt thấp hơn và lõm, quả bóng lúc này đang ở vị trí không ổn định, ta gọi vị trí này là U (Unstable). Giả sử, quả bóng lăn xuống một trong hai bên bề mặt lõm của đỉnh, dưới tác dụng của phản lực vào quả bóng đến khi quả bóng ổn định, không còn di chuyển. Tại hình 1, có thể thấy hai vị trí lõm xuống

so với đỉnh U, ta gọi lần lượt hai vị trí này là S1 (Stable 1) là vị trí ổn định thứ nhất và S2 (Stable 2) là vị trí ổn định thứ hai. Nguyên lý này thể hiện rằng cơ cấu mềm Bistable sẽ luôn có được hai vị trí ổn định (Bistable). Điều này được ứng dụng để nghiên cứu và thiết kế các dụng cụ cơ khí sử dụng trong thực tế, ví dụ kể trên là kẹp tóc, cái kim làm từ vật liệu đàn hồi.

Sự ra đời của cơ cấu mềm nói chung và cơ cấu Bistable nói riêng dẫn đến việc nghiên cứu và phát triển các phương pháp tính toán mới phù hợp có thể

thay thế các phương pháp tính truyền thống với sai số lớn và không hiệu quả trong thiết kế. Các phương pháp trong sức bền vật liệu vẫn được dùng để tính toán các cơ cấu biến dạng dẻo nhưng cho kết quả chính xác không cao khi áp dụng tính với cơ cấu mềm Bistable [10]. Mỗi một loại trong cơ cấu mềm đều có các phương pháp tính toán riêng cho kết quả chính xác, một trong số đó là phương pháp CBCM đã được công bố và áp dụng nhiều vào tính toán, thiết kế mô hình cơ cấu mềm Bistable. Phương pháp CBCM cho sai số nhỏ hơn so với các phương pháp tính toán cơ cấu mềm khác [11] và có thể dùng cho nhiều mô hình cơ cấu mềm khác nhau. Bên cạnh đó, sử dụng kết quả từ phần mềm phân tích phần tử hữu hạn để đối chứng với kết quả tính toán từ phương pháp CBCM.

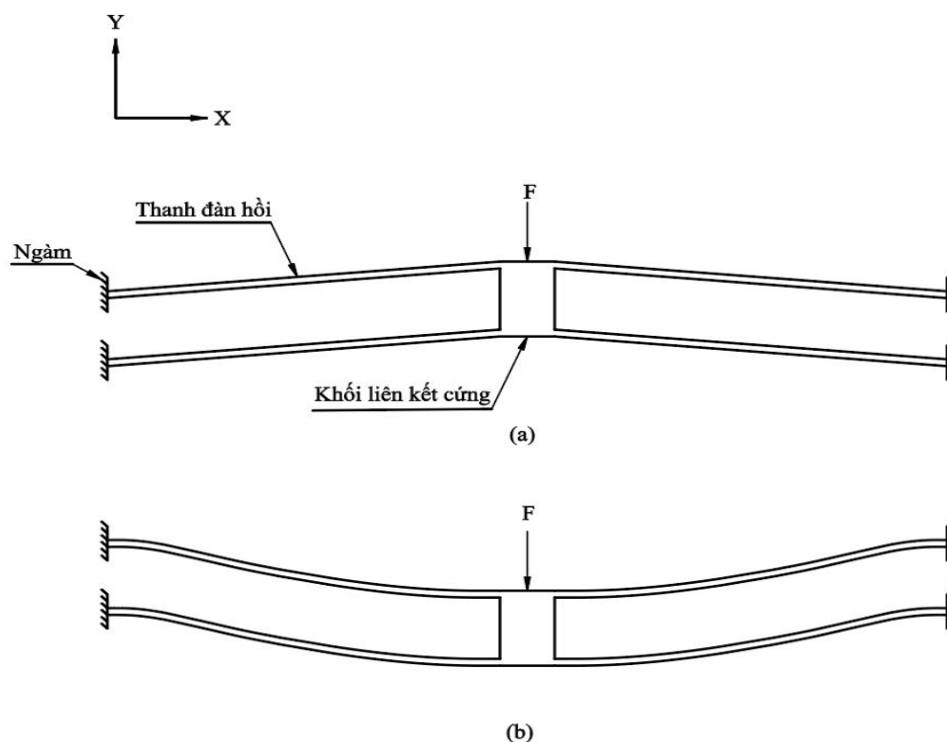
Bài báo này sử dụng phần mềm CAE SIMULIA ABAQUS để phân tích phần tử hữu hạn. Sử dụng phần mềm HYPERMESH để chia lưới mô hình. Phần đồ thị kết quả được vẽ bằng phần mềm MATLAB. Đồ thị thể hiện kết quả của phương

pháp CBCM và phương pháp phần tử hữu hạn. Phương pháp CBCM bao gồm việc chia một thanh đàn hồi ban đầu ra thành n thanh. Bài báo cũng đưa ra các sai số kết quả khi đối chứng hai phương pháp với nhau.

2. Thiết kế

Hình 2 (a) thể hiện cơ cấu mềm Bistable bao gồm bốn thanh đàn hồi được cố định bởi bốn ngàm mỗi bên. Ở giữa là một khối liên kết cứng (Rigid mass). Tọa độ XY được thể hiện tại hình 2. Khi đó, cơ cấu mềm đang ở vị trí ổn định thứ nhất (vị trí ổn định ban đầu). Đặt một lực F vào khối liên kết cứng, khối di chuyển theo phương $-y$ đi xuống, bốn thanh đàn hồi bị kéo xuống cùng phương và biến dạng như hình 2 (b).

Cơ cấu mềm đã đạt được vị trí ổn định thứ hai dựa vào các đặc tính biến dạng đàn hồi của thanh, qua đó cũng đạt được cả hai vị trí ổn định được gọi là cơ cấu mềm Bistable (ổn định tại hai vị trí).



Hình 2. Kết cấu cơ cấu mềm Bistable.

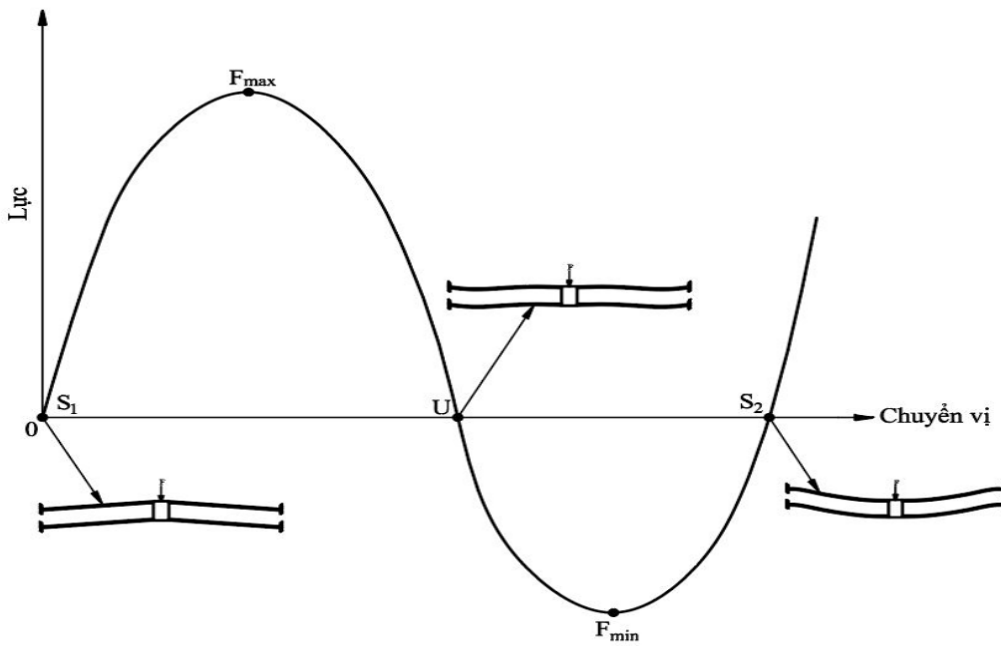
(a) Vị trí ổn định 1; (b) Vị trí ổn định 2.

Hình 3 là đồ thị bao gồm trục Y thể hiện giá trị lực và trục X thể hiện giá trị chuyển vị. Đồ thị thể hiện đặc tính của cơ cấu mềm Bistable bao gồm một đường cong như trong hình xuất phát tại điểm 0

(S_1), cơ cấu ở vị trí ổn định thứ nhất (vị trí ổn định ban đầu). Đặt một lực F vào khối liên kết cứng, cơ cấu có giá trị chuyển vị theo chiều trong đồ thị là phương $+x$ làm xuất hiện các giá trị phản lực tại các

ngàm, các giá trị phản lực được thể hiện theo trục lực trong đồ thị, lúc này, đường cong đang hướng lên. Khi cơ cấu chuyển vị đến một giá trị x xác định thì tại đó có một giá trị phản lực lớn nhất F_{max} , đường cong bắt đầu đảo chiều hướng xuống. Khi cơ cấu chuyển vị đến một vị trí x xác định thì tại đó có một giá trị phản lực là 0, vị trí của cơ cấu mềm là vị trí không ổn định U (Unstable). Ở đây, đường cong đồ thị đã ở mặt bên trên của trục X (chuyển vị), tức là phản lực dương. Vì vậy, đường cong của đồ thị tiếp tục đi xuống. Cơ cấu tiếp tục chuyển vị đến một vị trí x xác định, tại đó giá trị phản lực là nhỏ nhất F_{min} . Tại vị trí này, đường cong của đồ thị bắt đầu

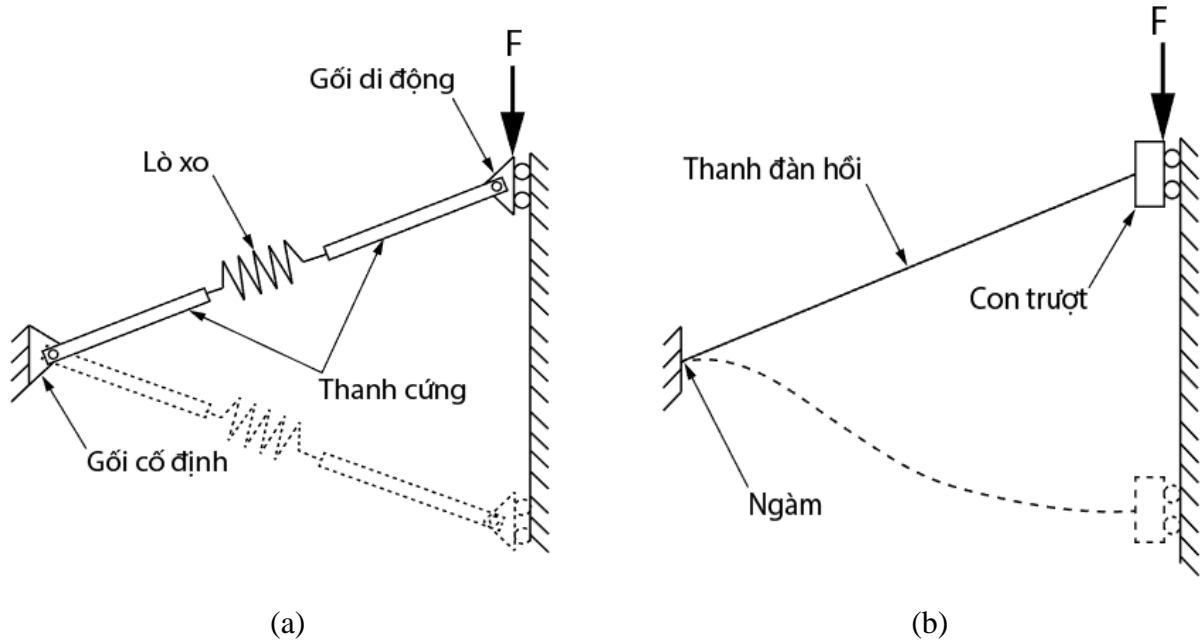
đảo chiều và đi lên. Cuối cùng, cơ cấu tiếp tục chuyển vị đến vị trí x xác định, trong đó, giá trị phản lực là 0, vị trí của cơ cấu mềm là vị trí ổn định thứ hai (Stable 2). Ở đây, đường cong của đồ thị đã ở phía dưới của trục X (chuyển vị), tức là lúc đó xuất hiện các phản lực âm và tiếp tục đi lên tại mặt phía trên của trục X . Vẫn tác động một lực F đi lên theo phương $+y$ vào khối liên kết cứng, cơ cấu sẽ chuyển vị về vị trí ổn định thứ nhất (vị trí ổn định ban đầu). Vị trí các thông số, các hình biến dạng của cơ cấu theo từng điểm tại các vị trí x xác định đều được thể hiện trong hình 3.



Hình 3. Đặc tính của cơ cấu mềm Bistable.

Hình 4 trình bày mô hình khung của cơ cấu Bistable. Hình 4 (a) thể hiện mô hình cơ cấu thanh cứng - lò xo truyền thống, bao gồm hai thanh cứng liên với nhau bằng lò xo, một đầu thanh cứng được nối với gối cố định, thanh cứng còn lại được gắn với gối di động cho phép di chuyển dọc trục Y . Khoảng cách L từ khớp cố định đến khớp trượt. Tọa độ XY được thể hiện trong hình. Cơ cấu đang ổn định tại vị trí thứ nhất (vị trí ban đầu). Đặt một lực F vào gối di động như hình, gối di động di chuyển theo phương y một khoảng d , theo sau là cơ cấu thanh cứng - lò xo xoay quanh khớp trượt biến dạng và di chuyển xuống. Ở đây, khi cơ cấu di chuyển xuống theo phương y , lò xo bị nén lại và sau đó giãn ra khi cơ cấu đạt vị trí ổn định thứ hai. Nét đậm thể hiện

cơ cấu ở lúc ban đầu, nét đứt thể hiện cơ cấu sau khi biến dạng và chuyển vị. Hình 4 (b) thể hiện cơ cấu mềm bao gồm một thanh đàn hồi được ngàm cố định một đầu, đầu còn lại nối với con trượt. Khoảng cách L từ ngàm đến con trượt. Tọa độ XY được thể hiện như trong hình. Cơ cấu đang ở vị trí ổn định thứ nhất (vị trí ban đầu). Đặt một lực F vào con trượt di chuyển theo phương y một khoảng d , thanh đàn hồi sẽ bị nén và sau đó giãn ra, thanh đàn hồi bị biến dạng cong như hình, cơ cấu đã ở vị trí ổn định thứ hai. Vậy, hai cơ cấu đều cùng đạt được vị trí ổn định thứ hai nhưng thay hai thanh cứng và lò xo ở cơ cấu tại hình 4 (a) bằng một thanh đàn hồi cho nhiều ưu điểm như không cần khớp, không có ma sát, không cần lắp ráp.



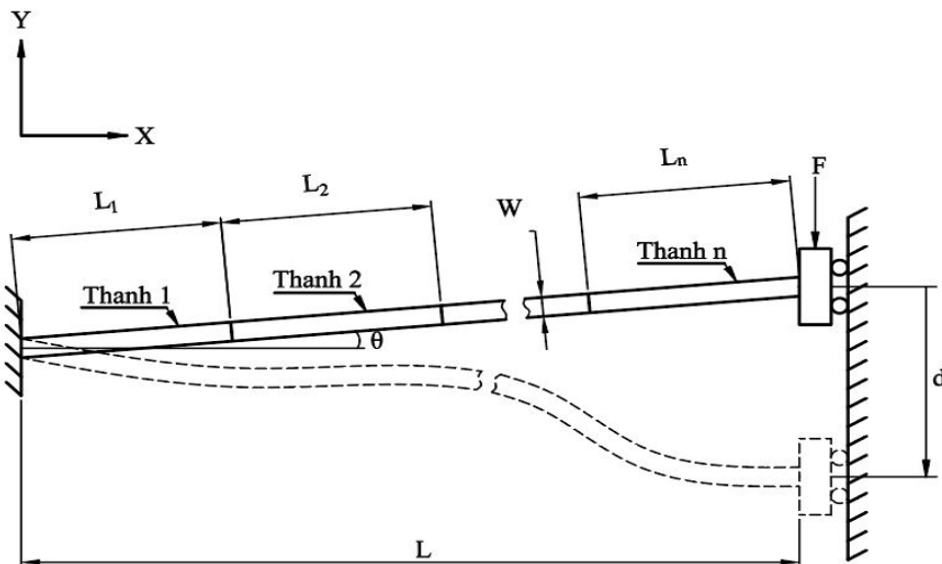
Hình 4. Mô hình hóa cơ cấu mềm Bistable.
(a) Mô hình cổ điển; (b) Mô hình thanh đàn hồi.

3. Phân tích

3.1. Phương pháp CBCM

Hình 5 xét cơ cấu bao gồm một thanh đàn hồi trong bốn thanh của cơ cấu mềm Bistable, được cố định bởi một ngàm tại một bên, bên đầu còn lại được nối với một con trượt. Thanh đàn hồi được chia ra thành n đoạn thanh ($1, 2, i, \dots, n$)

tương ứng với $(L_1, L_2, L_i, \dots, L_n)$, rộng W và nghiêng một góc θ . Khoảng cách L từ ngàm đến con trượt. Tọa độ XY được thể hiện trong hình. Lực F được đặt tại con trượt, cơ cấu chuyển vị theo phương $-y$ một khoảng d . Sử dụng phương pháp CBCM để tính toán cơ cấu. Bài báo chia thanh đàn hồi ra làm năm đoạn thanh bằng nhau.



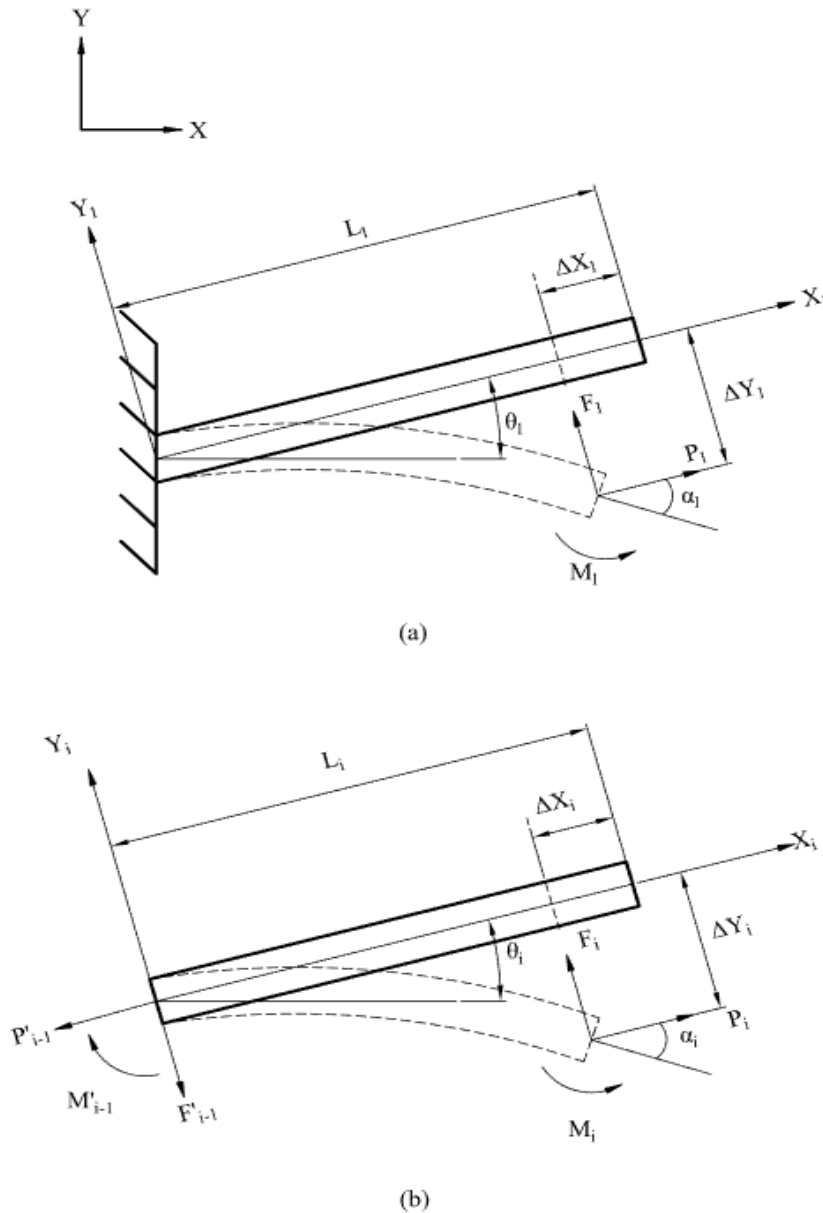
Hình 5. Các thông số trong thanh đàn hồi.

Hình 6 (a) thể hiện các lực và moment được đặt vào một đoạn thanh, ở đây là thanh đầu tiên, tức là thanh 1 (L_1), tách ra từ một thanh đàn hồi được chia thành

n đoạn thanh như trên hình 5. Các phản lực, moment và chuyển vị được đặt tại cuối đoạn thanh. Trục tọa độ XY chung và trục tọa độ địa phương

X_1Y_1 của đoạn thanh 1 đều được thể hiện như trong hình. Hình 5 (b) thể hiện các lực và moment đặt lên đoạn thanh i trong n đoạn thanh, khác với đoạn thanh trong hình 5 (a), tức là đoạn thanh đầu tiên

được cố định bởi ngàm một đầu, đoạn thanh i còn có các phản lực và moment phản lực $i - 1$, đặt tại gốc tọa độ địa phương X_iY_i của đoạn thanh như hình, còn các phản lực i được đặt ở đầu đoạn thanh.



Hình 6. Phân tích lực và moment trên từng thanh.

Các công thức tính các phản lực, moment trình bày như sau:

$$P_{i-1} = [P_i \quad F_i] \begin{bmatrix} \cos(\theta_i - \theta_{i-1} + \alpha_{i-1}) \\ -\sin(\theta_i - \theta_{i-1} + \alpha_{i-1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_{i-1} = [P_i \quad F_i] \begin{bmatrix} \cos(\theta_i - \theta_{i-1} + \alpha_{i-1}) \\ \sin(\theta_i - \theta_{i-1} + \alpha_{i-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{i-1} = M'_{i-1} = M_i + [P_i \quad F_i] \begin{bmatrix} -\Delta Y_i \\ (L_i + \Delta X_i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó, P_i, F_i và M_i là các lực đặt ở cuối mỗi thanh i được xem xét trong tọa độ địa phương. M'_{i-1} là moment đặt tại gốc tọa độ địa phương, ΔX_i và ΔY_i là các chuyển vị khi thanh biến dạng so với vị trí ban đầu tại ở cuối mỗi thanh i và α là góc biến dạng của thanh so với vị trí ban đầu, θ_i là góc quay tọa độ của thanh i so với góc tọa độ của thanh $i - 1$.

1. Các thành phần: moment M_i , các lực P_i, F_i , và

các chuyển vị theo phương x và y $\Delta X_i, \Delta Y_i$ ở mỗi thanh i được đơn giản hóa [11]:

$$\begin{aligned} m_i &= \frac{M_i L_i}{EI_i} \\ f_i &= \frac{F_i L_i^2}{EI_i} \\ p_i &= \frac{P_i L_i^2}{EI_i} \\ \delta Y_i &= \frac{\Delta Y_i}{L_y} \\ \delta X_i &= \frac{\Delta X_i}{L_x} \end{aligned} \quad (4)$$

Khi I_i là moment quán tính của tiết diện thanh i . Các thông số ảnh hưởng lực biến dạng của dầm được đưa ra dựa trên phương trình BCM [11]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} f_i \\ m_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 12 & -6 \\ -6 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Y_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} + \\ p_i \begin{bmatrix} \frac{5}{6} & -\frac{1}{10} \\ -\frac{1}{10} & \frac{2}{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Y_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} + \\ p_i^2 \begin{bmatrix} -\frac{1}{700} & \frac{1}{1400} \\ \frac{1}{1400} & -\frac{11}{6300} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Y_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} \\ \delta X_i &= \frac{t_i^2 p_i}{12L_i^2} - \\ \frac{1}{2} [\delta Y_i \quad \alpha_i] \begin{bmatrix} \frac{5}{6} & -\frac{1}{10} \\ -\frac{1}{10} & \frac{2}{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Y_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} - \\ p_i [\delta Y_i \quad \alpha_i] \begin{bmatrix} -\frac{1}{700} & \frac{1}{1400} \\ \frac{1}{1400} & -\frac{11}{6300} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Y_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Mỗi thanh i có 6 ẩn $f_i, p_i, m_i, \delta_{xi}, \delta_{yi}, \alpha_i$ trong tính toán. Tổng cộng có 30 ẩn trong tính toán, tương ứng với 15 phương trình. Trong đó, 15 phương trình của BCM, 12 phương trình cân bằng lực, còn lại là 3 phương trình. Dựa vào các điều kiện biên ràng buộc về mặt hình học, 3 phương trình hình học được tìm thấy như sau:

$$L_x = \sum_{i=1}^n \left([(L_i + \Delta X_i) \quad \Delta Y_i] \begin{bmatrix} \cos(\theta_i + \alpha_{i-1}) \\ -\sin(\theta_i + \alpha_{i-1}) \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

$$L_x + \delta = \sum_{i=1}^n \left([(L_i + \Delta X_i) \quad \Delta Y_i] \begin{bmatrix} \sin(\theta_i + \alpha_{i-1}) \\ \cos(\theta_i + \alpha_{i-1}) \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 0 \quad (9)$$

Các phương trình (7) và (8) được dựa trên các điều kiện biên ràng buộc theo các phương X và Y của cơ cấu khi con trượt di chuyển theo phương $\pm y$, cơ cấu bị biến dạng và chuyển vị một đoạn ΔY_i , khi di chuyển theo phương x , cơ cấu bị biến dạng và chuyển vị một đoạn ΔX_i . Phương trình L_x và L_y là tổng chuyển vị biến dạng của cơ cấu theo hai phương X và Y . Phương trình (9) là phương trình tổng các góc biến dạng α_i trên các thanh i khi thanh đàn hồi bị biến dạng.

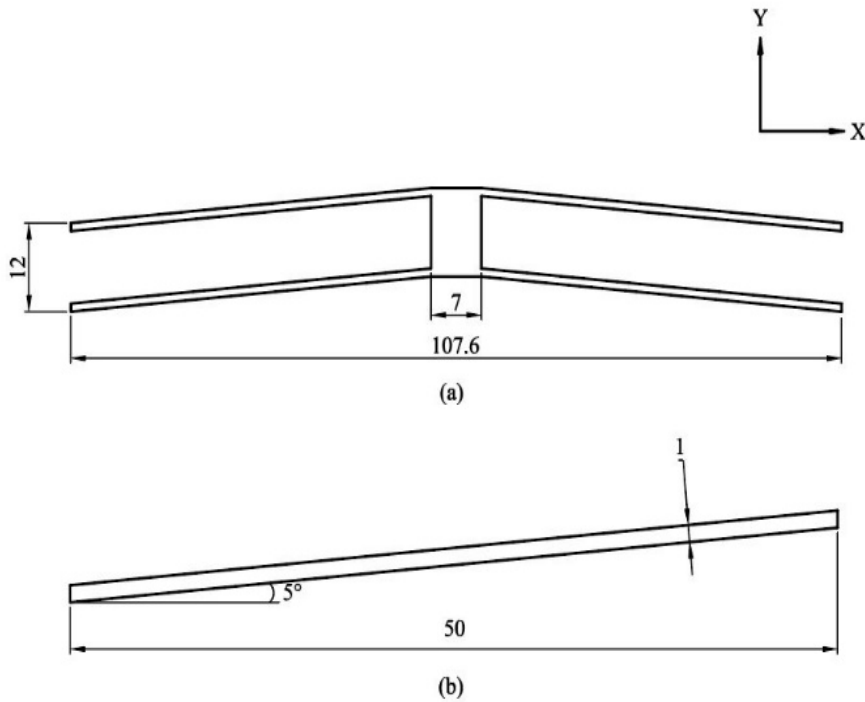
3.2. Phương pháp phần tử hữu hạn

Sử dụng phương pháp CBCM để tính toán mô hình cơ cấu trên vẫn chưa thể khẳng định được chính xác kết quả. Vì vậy, bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM – Finite Element Method) để phân tích mô hình cơ cấu và kiểm chứng, so sánh đường cong kết quả phương pháp CBCM với đường cong kết quả phương pháp FEM được vẽ trong đồ thị, sử dụng phần mềm MATLAB. Các kích thước cụ thể của mô hình cơ cấu mềm Bistable gồm bốn thanh đàn hồi và một khối liên kết cứng trong cơ cấu được cho ở trong hình 7 (a), đây là cơ cấu được sử dụng trong phân tích FEM. Hình 7 (b) thể hiện kích thước chi tiết của cơ cấu một thanh đàn hồi trong bốn thanh đàn hồi. Độ dày t của mô hình cơ cấu là 5 mm. Vật liệu dẻo polyoxymethylene (POM) được sử dụng trong lúc phân tích FEM. Sự đàn hồi tuyến tính và sự đẳng hướng được thể hiện qua các thông số sau: Modun đàn hồi E của vật liệu là 2,15 GPa, và hệ số Poisson ν là 0.38. Khối lượng riêng của vật liệu là 1.4 g/cm^3 . Phần mềm phân tích CAE SIMULIA ABAQUS được sử dụng để phân tích FEM cho mô hình cơ cấu mềm Bistable. Số bước mô phỏng là 1000 bước. Tọa độ XY được thể hiện như trong hình.

Bài báo sử dụng lưới hình vuông 4 nút bề mặt (Quadratic-4-Nuts-2 Dimension – CPE4R) để chia

lưới cho mô hình một thanh đàn hồi, với kích thước lưới là 0.25 mm. Lưới hình vuông 4 nút bề mặt được sử dụng để chia lưới cho toàn bộ mô hình. 4 dầm trong cơ cấu được chia lưới với kích thước là 0.25

mm. Khối liên kết cứng ở giữa khi xuống theo phương -y, không bị biến dạng đáng kể nhưng cũng không hóa rắn hoàn toàn.

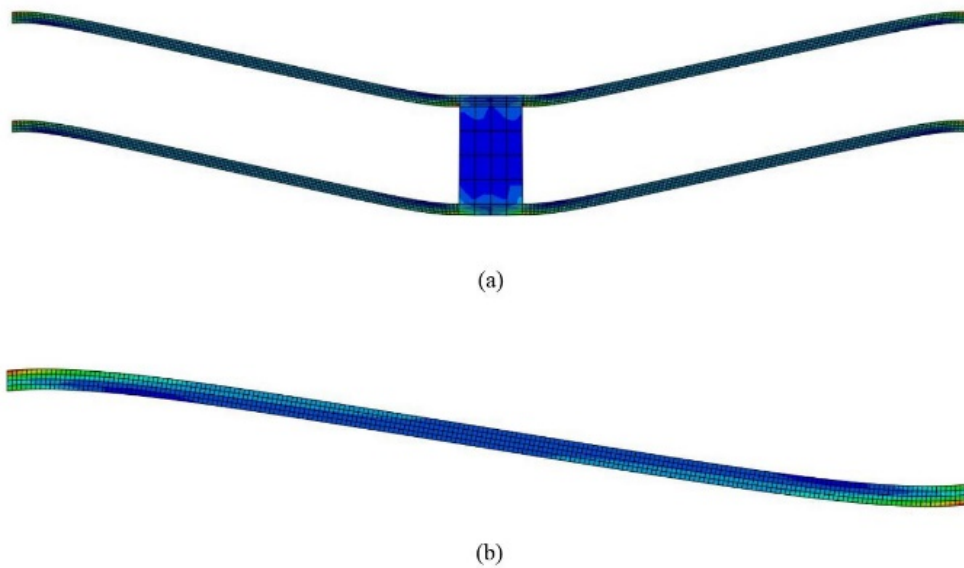


Hình 7. (a) Kích thước của kết cấu Bistable; (b) Kích thước chi tiết thanh đàn hồi.

4. Kết quả

Hình 8 (a) là mô hình biến dạng ứng suất cho một dầm. Ở đây, kích thước lưới nhỏ nên các ứng suất tập trung được thể hiện chính xác, lưu ý, đối với lưới càng nhỏ thì ứng suất tập trung ở đó càng lớn, với

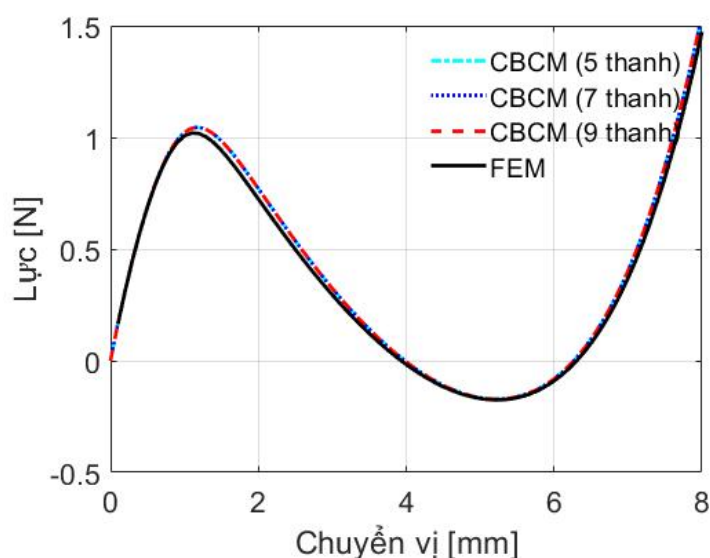
lưới màu xanh thì ứng suất tập trung ít hoặc không có ứng suất tập trung. Hình 8 (b) là một hình biến dạng ứng suất cho cơ cấu mềm Bistable. Ứng suất tập trung chủ yếu tại hai đầu của các dầm như trên hình. Ở phần dưới khối liên kết tại hình 8 (b), ứng suất phân bố tập trung nhiều nhất.



Hình 8. (a) Biến dạng của cơ cấu mềm Bistable; (b) Biến dạng chi tiết của thanh đàn hồi.

Sự chính xác của kết quả phân tích bởi phương pháp CBCM không chỉ dựa trên phương trình nhóm tác giả đã trình bày, mà còn phụ thuộc vào việc chia nhỏ thành của mô hình thành nhiều thành nhỏ hơn, việc chia càng nhiều các thanh tương ứng, độ chính xác càng tăng cao. Bài báo đưa ra ba trường hợp chia nhỏ lần lượt thành 5, 7, 9 đoạn thanh bằng nhau. Hình 9 thể hiện đường cong kết quả tính toán một thanh đàn hồi từ hai phương pháp - CBCM và FEM. Nhìn vào đồ thị, thanh càng được chia nhỏ, các đỉnh cong của đường cong từ đồ thị phương pháp CBCM càng gần với đỉnh cong của đường

cong từ đồ thị phương pháp FEM, có sai số giữa phương pháp CBCM và phương pháp FEM nhỏ hơn. Các sai số của những thông số S_{max}, S_{min}, U, S_2 thuộc đường cong đồ thị với phương pháp CBCM tương ứng một thanh đàn hồi được chia thành 9 thanh bằng nhau so với đường cong đồ thị của phương pháp phân tích FEM lần lượt là: 2.3%, 2%, 2.25% và 0.63%. Với $S_1 = 0$, vì đây là vị trí ban đầu của cơ cấu mềm Bistable (vị trí ổn định thứ nhất). Các thông số giá trị chi tiết F_{max}, F_{min}, S_2 tương ứng với vị trí chuyển vị nhất định thể hiện trong bảng 1.



Hình 9. (a) Biến dạng của cơ cấu mềm Bistable; (b) Biến dạng chi tiết của thanh đàn hồi.

Bảng 1. Lực và vị trí ổn định thứ 2 khi sử dụng CBCM nhiều đoạn.

Thông số	Giá trị			
	FEM	CBCM 5 đoạn	CBCM 7 đoạn	CBCM 9 đoạn
F_{max} (N)	1.0200	1.0443	1.0443	1.0443
F_{min} (N)	-0.175	-0.171	-0.171	-0.171
S_2 (mm)	3.9321	3.9792	3.9796	3.9795

5. Kết luận

Việc phát triển các mô hình tính toán kết cấu cơ cấu mềm đã được diễn ra. Phương pháp CBCM là một trong những phương pháp hiệu quả nhất cho việc tính toán cơ cấu mềm, đặc biệt là cơ cấu mềm Bistable. Trong các phân tích trên, bài báo đã sử

dụng mô hình cơ cấu mềm Bistable đơn giản bao gồm một bốn thanh thẳng đàn hồi và một khối liên kết cứng. Phương pháp này còn được sử dụng để tính toán nhiều mô hình cơ cấu mềm khác nhau. Các tính toán và phân tích bằng phương pháp CBCM được thể hiện bằng đồ thị có đường cong gần giống

với đường cong của phương pháp FEM. Nếu sử dụng vào các mô hình cơ cấu mềm khác, kết quả đường cong của phương pháp CBCM được kiểm chứng bởi kết quả từ phương pháp FEM thì phương pháp CBCM và phương trình áp dụng cho mô hình đó đạt kết quả chính xác cao. Không phải tất cả mô hình cơ cấu mềm cũng có thể sử dụng với phương pháp CBCM. Ngoài ra, các ưu điểm của cơ cấu mềm đã được phân tích rõ ràng ở phần giới thiệu. Mô hình cơ cấu mềm Bistable qua phân tích trên có kích thước được phóng to để đáp ứng nhu cầu thực nghiệm, trong thực tế, các cơ cấu mềm thường được chế tạo rất nhỏ, ngày càng phổ biến cho các nhu cầu mô hình cơ cấu mềm vi mô.

Lời cảm ơn.

Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, trường Đại học Văn Lang và trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thực hiện đề tài này.

Tài liệu tham khảo

- [1] I. I. Artobolevsky; “Mechanisms in Modern Engineering Design (Vol. I)”. Moscow, Russia: MIR Publishers. 1975.
- [2] A. H. Slocum; “Precision Machine Design”. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers. 1992.
- [3] L. L. Howell, “Compliant Mechanisms”. 1st edition. New York, US: Wiley-Interscience. 2001.
- [4] L. L. Howell, S. P. Magleby and B. M. Olsen; “Handbook of Compliant Mechanism”. New York, US: Wiley- Interscience. 2013.
- [5] E. Sung et al.; “Design of an ankle rehabilitation device using compliant mechanisms”. Journal of Medical Devices. 2005; 5(1). DOI: 10.1115/1.4002901.
- [6] N. Lobontiu; “Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges”. Florida, US: CRC Press LLC. 2003.
- [7] S. T. Smith. “Flexures: Elements of Elastic Mechanisms”. New York, US: CRC Press LLC. 2000.
- [8] P. G. Opdahl, B. D. Jensen and L. L. Howell; “An Investigation into Compliant Bistable Mechanisms”, in Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences; September 13–16, 1998; Atlanta, Georgia, USA. USA: ASME; 1998. DOI: 10.1115/DETC98/MECH-5914.
- [9] B. D. Jensen and L. L. Howell; “Bistable Configurations of Compliant Mechanisms Modeled Using Four Links and Translational Joints”. Journal of Mechanical Design. 2004; 126(4), 657-666. DOI: 10.1115/1.1760776.
- [10] J. M. Gere and B. J. Goodno; “Mechanics of Materials”. 8th edition. Canada: Cengage Learning. 2012.
- [11] F. Ma and G. Chen; “Chained Beam-Constraint-Model (CBCM): A Powerful Tool for Modeling Large and Complicated Deflections of Flexible Beams in Compliant Mechanisms”; in Proc. ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference; August 17–20, 2014; Buffalo, New York, USA. USA: AMSE; 2014. DOI: 10.1115/DETC2014-34140.
- [12] R. Luharuka and P. J. Hesketh; “Design of fully compliant, in-plane rotary, Bistable micromechanism for MEMS applications”. Sensors and Actuators A: Physical. 2007; 134(1):231-238. DOI: 10.1016/j.sna.2006.04.030.
- [13] I. T. Chi, T. H. Ngo, P. L. Chang, N. D. K. Tran and D. A. Wang; “Design of a Bistable mechanism with B-Spline proflid beam for versatile switching forces”. Sensors & Actuators A: Physical. 2019; 294(1):173-184. DOI: 10.1016/j.sna.2019.05.028.
- [14] N. D. K. Tran and D. A. Wang; “Design of a crab-like Bistable mechanism for nearly equal switching forces in forward and backward directions”. Mechanism and Machine Theory. 2017; 115:114-129. DOI: 10.1016/j.mechma chtheory.2017.05.005.
- [15] H. V. Tran, T. H. Ngo, P. L. Chang, I. T. Chi, N. D. K. Tran and D. A. Wang; “A threshold gyroscope based on a Bistable mechanism”. Mechatronics. 2018, 63:39-55. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2019.102280.

Ngày nhận bài: 04/02/2022

Ngày chuyển phản biện: 08/02/2022

Ngày hoàn thành sửa bài: 01/03/2022

Ngày chấp nhận đăng: 08/03/2022