Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Số 81, 2026

CÔNG NGHỆ - KỸ THUẬT

PHÁT TRIỂN PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ CƠ CẤU MỀM BA VỊ TRÍ ỔN ĐỊNH VỚI HAI CƠ CẤU MỀM ỔN ĐỊNH ĐỘC LẬP

TRẦN NGỌC ĐĂNG KHOA[1*], ĐẶNG VĂN ÁNH[1]

[1] *Khoa Công nghệ Cơ khí, Đại học Công nghiệp Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

** Tác giả liên hệ: tranngocdangkhoa@iuh.edu.vn*

DOIs: https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v81i3.6009

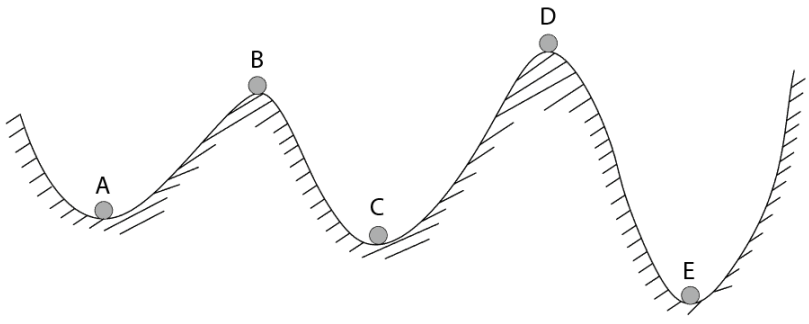
Tóm tắt. Cơ cấu mềm hai vị trí ổn định là dạng kết cấu nguyên khối có khả năng duy trì vị trí cân bằng mà không cần ngoại lực bên ngoài tác dụng vào. Bằng sự kết hợp hai cấu trúc của hai cơ cấu mềm ổn định, một thiết kế của cấu trúc ba vị trí ổn định được giới thiệu, hai cơ cấu mềm ổn định liên kết với nhau bởi một khung cứng với điều kiện biên nhất định. Dựa trên đặc tính của mối liên hệ lực và biến dạng của hai cơ cấu tự ổn định, đặc tính của cơ cấu mềm ba vị trí ổn định được dự đoán với độ chính xác cao. Ứng suất bên trong cơ cấu và năng lượng biến dạng cũng được phân tích. Sự ảnh hưởng của khung cứng liên kết cũng được khảo sát và đánh giá.

Từ khóa. cơ cấu mềm, ứng suất, chuyển vị, ổn định

1 GIỚI THIỆU

Nhiều ứng dụng của cơ cấu mềm nhiều vị trí ổn định có tiềm năng được sử dụng trong ngành công nghiệp hiện đại. Các cơ cấu này duy trì được ba trạng thái cân bằng ổn định mà không cần tiêu tốn năng lượng và có khả năng tích hợp hiệu quả. Các cơ cấu này có thể được tích hợp vào thiết kế của công tắc, bộ định vị, cảm biến, thiết bị thu năng lượng, bộ truyền động vi mô và nhiều hệ thống khác. Hầu hết các công trình nghiên cứu hiện nay vẫn ưu tiên cho việc thiết kế thiết bị với cơ cấu mềm hai vị trí ổn định [1-5].

Cơ cấu mềm ba vị trí ổn định có nhiều ứng dụng trong các cảm biến, các thiết bị y sinh, với các ưu điểm tiết kiệm năng lượng, giảm chi phí bão dưỡng, hạn chế bộ điều khiển phức tạp. Hình 1 trình bày nguyên lý hoạt động của cơ cấu có ba vị trí ổn định, dựa theo hình tượng "Quả bóng trên đồi", được giới thiệu bởi Chen và cộng sự [6]. Quả bóng ở vị trí A là vị trí ổn định đầu tiên, ở vị trí này bóng nằm trong phần lõm xuống, rất khó di chuyển về vị trí B. Để di chuyển về vị trí B, quả bóng cần có ngoại lực đẩy quả bóng đi về vị trí B. Khi bóng tới vị trí B, quả bóng mất thăng bằng, có thể dễ dàng tự do đi xuống điểm A hoặc C. Khi quả bóng di chuyển đến điểm C thì đạt được vị trí thứ hai. Khi ngoại lực tác dụng vào quả bóng và đẩy quả bóng đi đến điểm D, đạt đến vị trí không ổn định thứ hai và liên tục di chuyển đến vị trí E là vị trí ổn định thứ ba.



Hình 1. Nguyên lý hoạt động cơ cấu ba vị trí ổn định

Nhiều nhà nghiên cứu đã nghiên cứu các cơ cấu ba vị trí ổn định. Dựa vào cơ cấu ổn định kép Young, Chen và Yu [7] đã phát triển một thiết bị có thể điều chỉnh được, cấu trúc của cơ chế này có thể được thực hiện bằng mô hình vật thể giả cứng. Cấu trúc của cơ cấu ba vị trí ổn định được đã được phân tích bằng phương pháp số. Oberhammer và cộng sự [8] đã thiết kế một bộ truyền động tĩnh điện dựa trên cơ cấu ba vị trí ổn định. Cơ cấu có một trạng thái đầu vào và hai trạng thái đầu ra, các trạng thái này ổn định nhờ cơ cấu chốt. Ngoài ra, phương pháp này đã được áp dụng trong việc phân tích các đặc tính phi tuyến của cơ

© 2026 Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

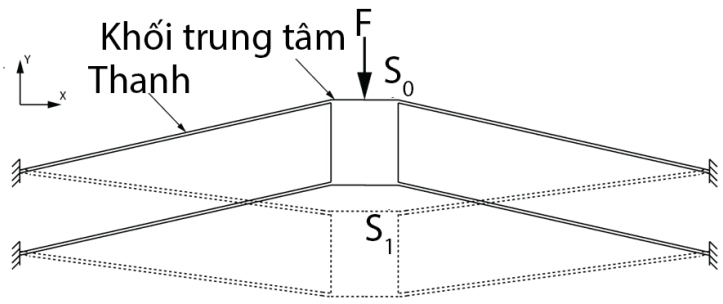
cấu hai vị trí ổn định [6]. Nghiên cứu tập trung vào tổng hợp lực nén, uốn và căng của các cấu kiện linh hoạt. Bằng cách ghép ba cơ cấu hai vị trí ổn định, Chen và Chang [9] đã phát triển một cơ cấu ba vị trí ổn định. Các đặc tính phi tuyến của hệ cơ cấu này được phân tích thông qua các mô hình tuân thủ ở trạng thái cân bằng tĩnh. Trong nghiên cứu của Wang và cộng sự [10], một cơ cấu ba vị trí ổn định trong mặt phẳng đã được thiết kế dựa trên nguyên lý kết hợp hai cơ cấu hai vị trí ổn định, sử dụng các thanh mỏng linh hoạt và loại bỏ hoàn toàn khớp nối lắp ráp. Một cơ cấu ba vị trí ổn định trong mặt phẳng khác được phát triển bởi Chen et al. [11], thiết bị vi mô di chuyển theo hai hướng, giai đoạn ổn định thứ hai theo hướng ngang và trạng thái ổn định thứ ba theo hướng dọc. Cơ cấu vi mô này được chế tạo và thử nghiệm để xác minh hành vi phi tuyến dự đoán bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Dai và cộng sự [12] đã xây dựng một cấu trúc có thể chịu được ba lớp bao gồm một số tầng. Bốn tấm hình chữ nhật được lắp ráp để thực hiện ba vị trí ổn định khác nhau trong không gian ba

Hơn nữa, cơ cấu nhiều vị trí ổn định có hơn ba vị trí cân bằng cũng đã được được nghiên cứu. Ví dụ, Oh và Kota [13] đề xuất bốn thiết bị quay ổn định, được hình thành trên hai cơ cấu quay ổn định. Một cơ cấu nhiều vị trí ổn định trong một chuyển động có hướng được Phạm và Wang [14] trình bày, họ kết hợp hai đường cong cosine để thiết kế cơ cấu này. King và cộng sự [15] đã minh họa cơ cấu nhiều vị trí ổn định bằng sự kết hợp nhiều thanh mỏng có độ linh hoạt cao. Bằng cách kết hợp cơ cấu mềm hai vị trí ổn định và cơ cấu trượt, Chen và cộng sự [16] đã tạo ra các cơ cấu có nhiều vị trí ổn định với khả năng tương thích cao. Tuy nhiên, những thiết kế này rất phức tạp và khó dự đoán được hành vi phi tuyến của cơ cấu ổn định một cách dễ dàng.

Bài báo này trình bày một phương pháp tiếp cận mới trong thiết kế cơ cấu ba vị trí ổn định bằng cách kết hợp cấu trúc của hai cơ cấu hai vị trí ổn định. Hai cơ cấu này được kết nối thông qua một khung cứng để duy trì hoạt động của chúng, bằng cách kết hợp các cơ chế này, lực của cơ cấu ổn định được dễ dàng lưu trữ. Hành vi của cơ cấu được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn đối với cơ cấu hai vị trí ổn định và một cơ cấu ba vị trí ổn định.

2 CƠ CẤU MỀM HAI VỊ TRÍ ỔN ĐỊNH

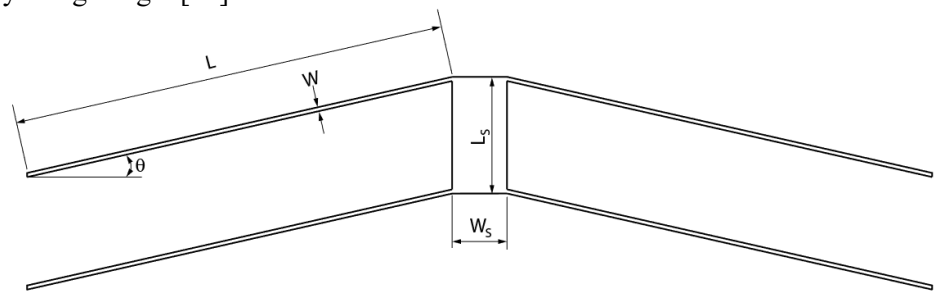
Cơ cấu mềm hai vị trí ổn định có thể đạt được các vị trí cân bằng trong quá trình hoạt độn. Nguyên lý hoạt động của cơ cấu lưỡng ổn được minh họa trên hình 2. Cơ cấu này bao gồm bốn thanh mỏng đặt nghiên, kết nối với khối trung tâm ở một đầu và cố định ở đầu kia. Bên cạnh đó, hệ tọa độ OXY được trình bày trong hình. Khối trung tâm có tác dụng chống xoắn. Ban đầu khối trung tâm đặt ở vị trí S0, vị trí ổn định thứ nhất. Một lực tác dụng lên khối trung tâm theo phương y, các thanh mỏng dạng và tích trữ năng lượng bằng lực nén. Khi lực đủ lớn, năng lượng được giải phóng và khối trung tâm chuyển sang vị trí ổn định thứ hai S1 thể hiện ở đường đứt. Các thông số kích thước của cơ cấu hai vị trí ổn định được thể hiện trên hình 3. Biên dạng của dầm là đường thẳng và nghiêng một góc θ so với phương x. Chiều dài của thanh là L, chiều rộng của thanh là W và độ dày của thanh là t. Bốn thanh có cùng kích thước. Kích thước khối trung tâm là L_s và W_s, có cùng độ dày với thanh.



Hình 2. Hoạt động của cơ cấu mềm hai vị trí ổn định.

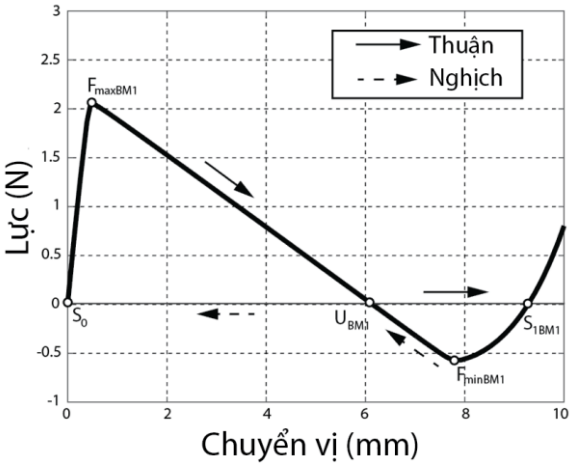
Hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định được thiết kế dựa trên biên dạng ở hình 3. Các thông số thiết kế nêu ở Bảng 1, Hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định, có các thông số hình học giống nhau, bao gồm độ dày, chiều

rộng và khối trung tâm, được sử dụng để nghiên cứu hành vi phi tuyến, mối quan hệ lực – chuyển vị của cơ cấu được đánh giá thông qua phương pháp phần tử hữu hạn. Mô phỏng và phân tích được tiến hành với sự hỗ trợ của phần mềm ABAQUS. Polyoxymethylene (POM) là vật liệu để chế tạo mô hình. Giá trị mô đun đàn hồi của vật liệu được xác định là 2,2 GPa, với hệ số Poisson tương ứng là 0,31. Kích thước của BM1 được trình bày trong bảng 1 [21].



Hình 3: Kích thước của cơ cấu mềm hai vị trí ổn định

Hình 4 thể hiện đường cong lực-chuyển vị của cơ cấu mềm hai vị trí ổn định thứ nhất (BM1). Do ngoại lực tác dụng theo hướng y nên trên hình chỉ thể hiện phản lực ở đầu cố định của cơ cấu theo hướng y. Trong chuyển động tịnh tiến, khối trung tâm chuyển động từ vị trí ổn định thứ nhất S_{0BM1} đến vị trí ổn định thứ hai S_{1BM1}, lực cực đại tại F_{maxBM1}= 2,05 (N). Tại vị trí không ổn định U_{BM1}, khối trung tâm di chuyển nhanh qua vị trí cân bằng thứ hai S_{1BM1} cũng tạo nên ứng suất cực đại trong cơ cấu. Trong chuyển động ngược lại, S_{1BM1} là vị trí ổn định thứ nhất, S_0 là vị trí ổn định thứ hai. Cơ cấu này nhận được F_{minBM1}= - 0,527 (N) và khối trung tâm nhảy từ U_{BM1} sang S_{0BM1}.

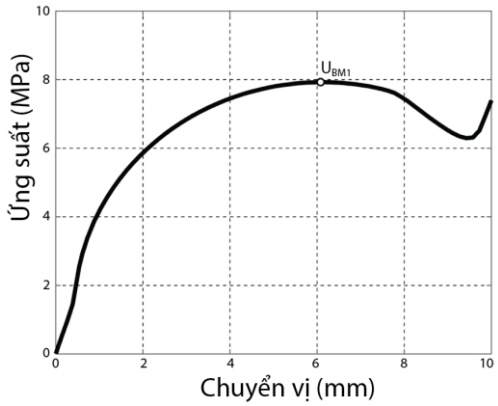


Hình 4: Lực – chuyển vị của cơ cấu mềm hai vị trí ổn định thứ nhất

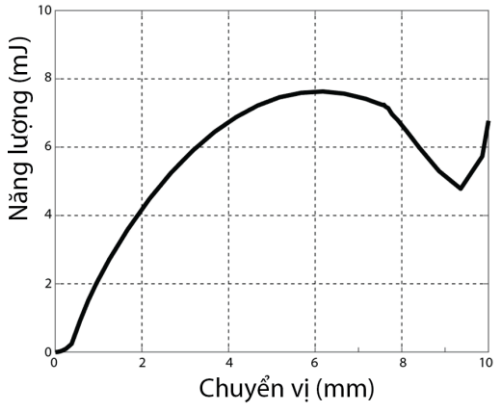
Hình 5 trình bày phân bố ứng suất von Mises cực đại của cơ cấu mềm ba vị trí ổn định dựa trên phân tích phần tử hữu hạn. Từ S_{0BM1} đến S_{1BM1}, ứng suất cực đại là 7,927 (MPa) gần vị trí không ổn định U_{BM1}, dưới giới hạn phá hủy của vật liệu POM là 64 MPa. Năng lượng biến dạng của cơ cấu được thể hiện trong hình 6. Năng lượng được tích trữ có giá trị cực đại là 15,26 (mJ) khi cơ cấu đạt tới vị trí không ổn định U_{BM1}. Khi khối trung tâm đi đến vị trí ổn định thứ hai thì năng lượng giảm xuống giá trị nhỏ nhất là 9,56 (mJ). Cơ cấu đạt được dạng ổn định. Tương tự, cơ hai vị trí ổn định thứ 2 (BM2) được thiết kế với các thông số ở Bảng 1 [21], đặc tính của cơ cấu này được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 1. Thông số thiết kế của hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định

Thông số	BM1	BM2
L (mm)	110	80
θ (độ)	4.5	4.5
W (mm)	0.8	0.8
t	6	6



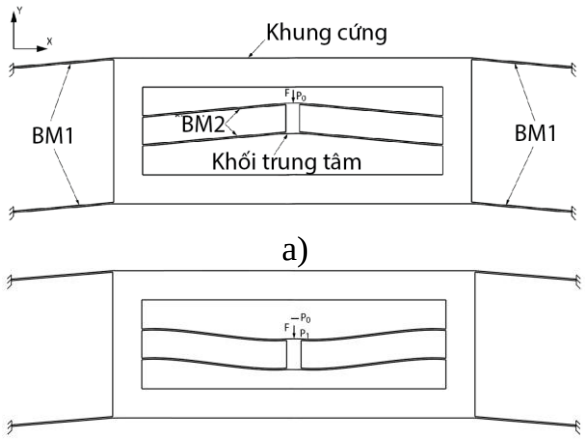
Hình 5: Ứng suất của cơ cấu mềm hai vị trí ổn định thứ nhất

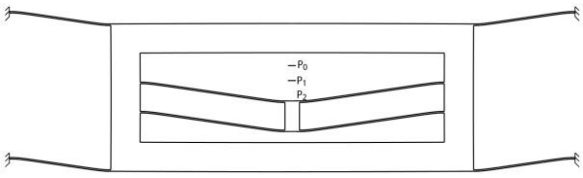


Hình 6: Năng lượng biến dạng của cơ cấu mềm hai vị trí ổn định thứ nhất

3 CƠ CẤU MỀM BA VỊ TRÍ ỔN ĐỊNH

Một cơ cấu mềm ba vị trí ổn định được thiết kế bằng cách kết hợp hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định thông qua một khung cứng. Hình 7a giới thiệu mô hình thiết kế của cơ cấu này. Cơ cấu bao gồm hai cơ cấu có thể kết nối được với nhau thông qua một khung cứng. Một đầu BM1 được cố định ngàm, đầu còn lại nối vào khung cứng. BM2 một đầu nối vào khung cứng, đầu còn lại nối với khối trung tâm. Trong chuyển động tịnh tiến, ngoại lực F tác dụng lên khối trung tâm theo phương y, khối trung tâm chuyển động từ vị trí ổn định thứ nhất P0 đến vị trí ổn định thứ hai P1, theo hình 7b. Khung cứng gần như không đổi, chỉ có BM2 là biến dạng. Liên tục, ngoại lực F tác dụng lên khối trung tâm, BM1 bị uốn cong và khối trung tâm chuyển động qua vị trí ổn định thứ ba, khung cứng chuyển động gần với khối trung tâm, như trên hình 7(c). Hai kết cấu BM1 và BM2 có cùng kích thước ở Bảng 1.

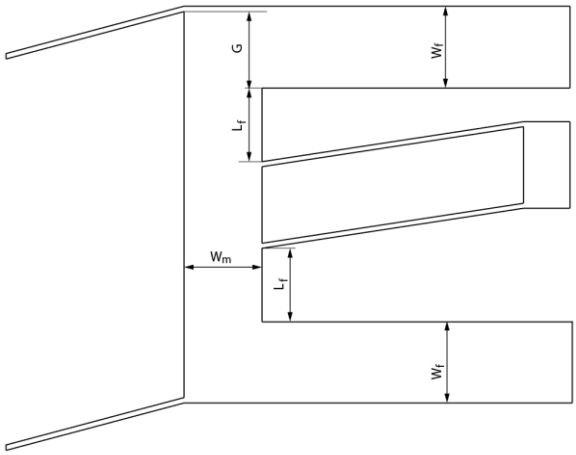




c)

Hình 7: hoạt động của cơ cấu mềm ba vị trí ổn định

Kích thước của khung cứng được minh họa trên hình 8. G là khoảng cách giữa đầu BM1 và cạnh trong của khung cứng. L_f là khoảng cách giữa một đầu của BM2 và cạnh trong của khối khung. L_f phải đủ lớn để khối trung tâm chuyển động từ S_0 đến S_1. W_f và W_m là chiều rộng của khung cứng theo hướng x và y tương ứng. Chiều dày khung cứng là t = 5 (mm), bằng chiều dày của BM1, BM2 và khối trung tâm. Các thông số thiết kế khung cứng được cho trong Bảng 3, các kích thước được lựa chọn dựa trên các quá trình khảo sát mô phỏng cho kết quả ổn định.

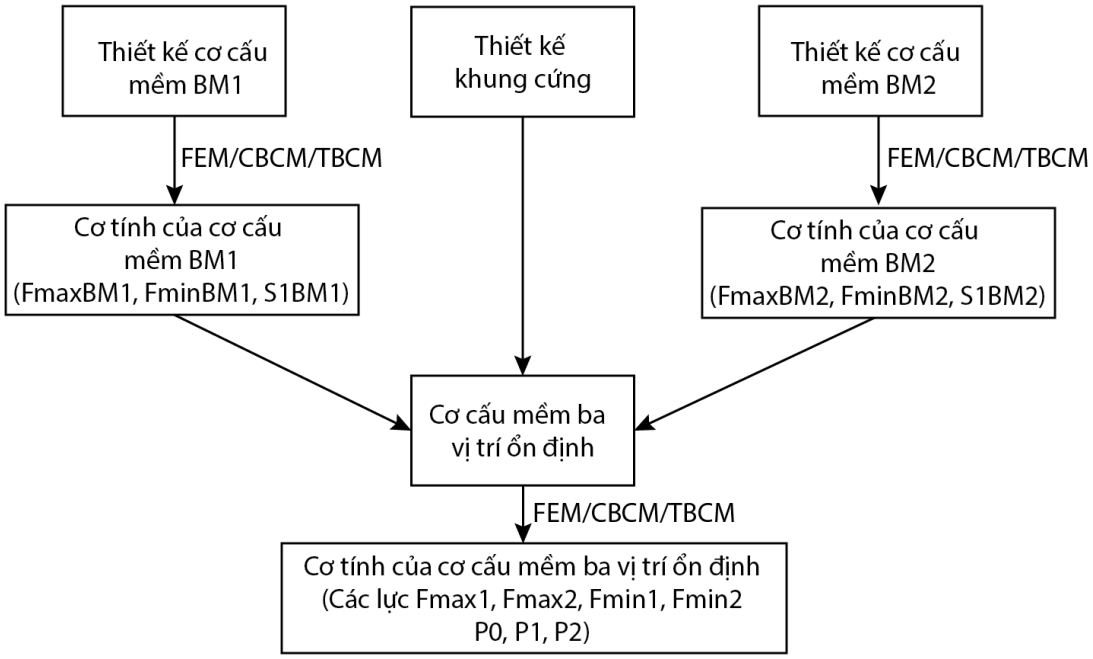


Hình 8: Các thông số của khung cứng

Bảng 3: Kích thước của phần khung cứng

	Value
G (mm)	15
L_f (mm)	15
W_f (mm)	15
W_m (mm)	15

Để thiết kế cơ cấu mềm ba vị trí ổn định, trước tiên cần xây dựng hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định độc lập, lần lượt gọi là BM1 và BM2. Mỗi cơ cấu có thể dự đoán hành vi ứng xử cơ tính dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) hoặc dựa trên các phương pháp tính toán số như CBCM, TBCM, BBCM, ….[17-20]. Sau đó kết nối hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định BM1 và BM2 thông qua khung cứng như hình 7. Thiết kế phần khung cứng với các thông số ở hình 8. Do khung cứng được sử dụng phương pháp giả cứng trong phân tích, do đối cơ cấu mềm hai vị trí ổn định mang tất cả các tính chất của hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định BM1 và BM2. Hình 9 thể hiện quy trình thiết kế cơ cấu mềm ba vị trí ổ định dựa trên hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định độc lập. Nhằm kiểm chứng qua thực nghiệm, hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định với thông số trong Bảng 1 được sử dụng cùng với khung cứng có thông số trong Bảng 3 để phân tích đặc tính cơ học của kết cấu.



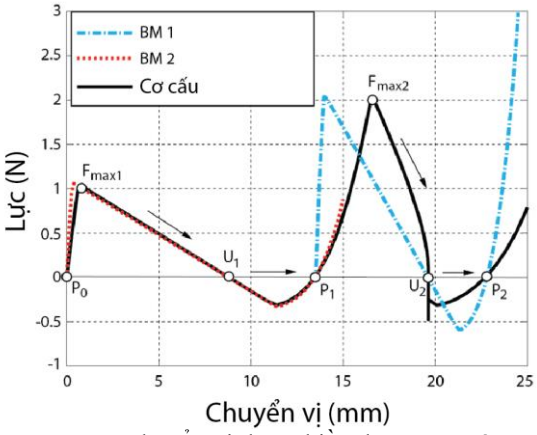
Hình 9: Quy trình thiết kế cơ cấu mềm ba vị trí ổn định

4 PHÂN TÍCH VÀ THẢO LUẬN

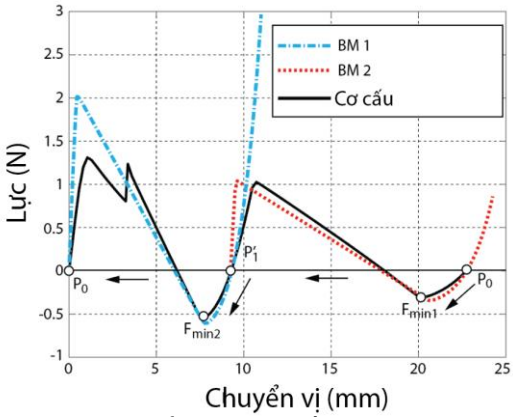
Mối quan hệ lực - chuyển vị của cơ cấu ba vị trí ổn định trong chuyển động tịnh tiến thu được bằng phương pháp phần tử hữu hạn được vẽ trên hình 10. Cơ cấu đạt ổn định ở vị trí thứ nhất P_0, ngoại lực tác dụng lên khối trung tâm. Khi lực đạt đến lực cực đại cục bộ F_{max1} thì lực giảm đến bằng 0 tại điểm U_1 là vị trí bất ổn định đầu tiên của cơ cấu này. Khối trung tâm di chuyển nhanh tới P_1, vị trí ổn định thứ hai. Ngoại lực vẫn tác dụng lên khối trung tâm và đạt lực cục bộ cực đại F_{max2}, lực giảm nhanh và đạt đến điểm U_2, vị trí mất ổn định thứ hai. Khối trung tâm chuyển động tới vị trí ổn định thứ ba P_2.

So sánh với đặc tính của hai cơ cấu mềm hai vị trí ổn định, lực cực đại của BM2, F_{maxBM2}=1,058 (N), gần với lực cực đại cục bộ F_{max1} của cơ cấu ba vị trí ổn định, F_{max1}= 1,021 (N), sai số là 3%. Tương tự, lực cực đại cục bộ F_{max2}= 1,983 (N), tiệm cận lực cực đại BM1, F_{maxBM1}= 2,05 (N), sai số là 3%. Vị trí ổn định thứ hai, P_1= 13,61 (mm) gần bằng vị trí thứ hai của BM2, S_{1BM2}=13,6 (mm). Vị trí ổn định thứ ba P_2 = 22,73 (mm) bằng tổng vị trí ổn định thứ hai của BM1 và BM2, S_{1BM1}+S_{1BM2} = 22,7 (mm). Hai vị trí không ổn định của cơ cấu ba ổn định lần lượt được ghi nhận ở vị trí không ổn định là BM1 và BM2. Tuy nhiên, lực âm không giống với hai cơ cấu hai vị trí ổn định. Điều này có nghĩa là giá trị đó không phản ánh đúng thực tế trong quá trình chuyển động ngược. Hiện tượng này ảnh hưởng đến đường cong chuyển vị của lực khi nó đạt tới vị trí mất ổn định thứ hai.

Thật vậy, chuyển động ngược được biểu diễn trên hình 11. Một mô phỏng được thực hiện với điều kiện ban đầu là khối trung tâm được đặt ở vị trí ổn định thứ ba. Một sự dịch chuyển tác dụng lên khối trung tâm làm cho nó chuyển động từ vị trí ổn định thứ ba P_3 đến vị trí ổn định thứ nhất P_0. BM2 chuyển động trước, đạt lực cục bộ nhỏ nhất của cơ cấu ba bền F_{min1} = - 0,311 (N), vẫn đóng trong lực nhỏ nhất của BM1, F_{minBM1} = - 0,327 (N). Lực cục bộ nhỏ nhất thứ hai của cơ cấu ba bền F_{min1} = - 0,54 (N) gần lực nhỏ nhất của BM2, F_{minBM2} = - 0,527 (N). Do độ dịch chuyển của BM1 và BM2 khác nhau nên vị trí ổn định thứ hai trong chuyển động ngược cũng khác với chuyển động thuận. Hình ảnh này cho phép rút ra đặc điểm của cơ cấu ba vị trí ổn định, vốn có thể đạt được các giá trị khác nhau trong suốt quá trình hoạt động.

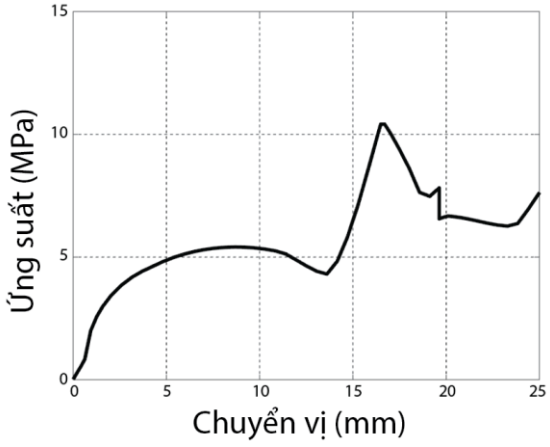


Hình 10. Lực – chuyển vị theo chiều thuận của các cơ cấu

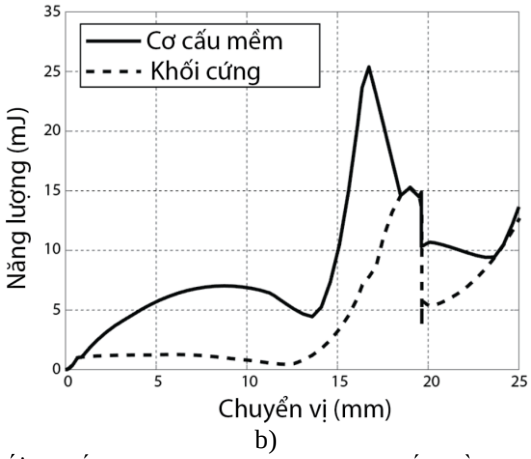


Hình 11. Lực – chuyển vị theo chiều ngược của các cơ cấu

Để ngăn ngừa hư hỏng và đứt gãy cơ cấu, khảo sát về ảnh hưởng của ứng suất Mises lên cơ cấu ba vị trí ổn định được đã được xem xét. Như đã thấy trong hình 12(a), ứng suất tối đa của cơ cấu, giá trị là 10,92 MPa, thỏa mãn giới hạn phá hủy của vật liệu. Hình 12(b) biểu diễn năng lượng biến dạng trong cơ cấu và khối trung tâm. Năng lượng biến dạng cực đại đạt 25,8 mJ tại vị trí có lực cục bộ F_{max2} cực đại. Do năng lượng dự trữ trong khung cứng nên khi thả ra sẽ xảy ra sự thay đổi đột ngột khiến khối trung tâm chuyển động nhanh về vị trí ổn định thứ ba.

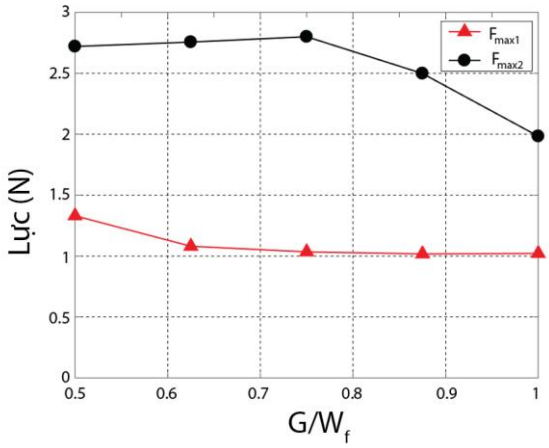


a)



b)

Hình 12. (a) Ứng suất và (b) năng lượng trong cơ cấu mềm ba vị trí ổn định



Hình 13. Mối quan hệ giữa các thông số của khung cứng

Các thông số hình học của khung cứng đã được khảo sát để đưa ra sự ảnh hưởng đến các hành vi cơ tính của cơ cấu ba vị trí ổn định. Hình 13 cho thấy giá trị của G ảnh hưởng như thế nào đến giá trị của lực cục bộ cực đại thứ nhất và thứ hai của cơ cấu ba vị trí ổn định. Tất cả các thông số khác của cơ cấu được giữ nguyên không thay đổi. Trong nghiên cứu này, độ lớn của Fmax1 và F_{max2} tăng khi G giảm. Để thỏa mãn lực cực đại của BM1 và BM2 tiệm cận lực cực đại cục bộ của cơ cấu ba vị trí ổn định thì giá trị của G phải gần đến Wf. Nó có nghĩa là vị trí của BM1 ở cạnh ngoài của khung cứng.

5 KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày một phương pháp mới cho thiết kế cơ cấu ba vị trí ổn định, phương pháp này kết nối các đặc điểm của hai cơ cấu hai vị trí ổn định và phân tích của hành vi phi tuyến của cơ chế ba vị trí ổn định. Dựa vào việc sử dụng khung cứng, lực lớn nhất và lực nhỏ nhất của cơ cấu ba vị trí ổn định gần với lực lớn nhất cục bộ và lực nhỏ nhất cục bộ của cơ cấu hai vị trí ổn định. Sự ổn định tại ba vị trí của cơ cấu được hình thành từ sự kết hợp nối tiếp của hai cơ cấu có hai vị trí ổn định. Kích thước của khung cứng cũng ảnh hưởng đến đặc tính của cơ cấu mềm ba vị trí ổn định, tuy nhiên sự ảnh hưởng này không đáng kể. Tiềm năng của thiết kế có thể được áp dụng với nhiều hình dạng của thanh mỏng đàn hồi và giúp cho quá trình dự đoán hành vi ứng xử của cơ cấu mềm ba vị trí ổn định nhanh hơn và chính xác hơn. Giai đoạn tiếp theo của nghiên cứu sẽ bao gồm thử nghiệm trên các mẫu và triển khai trong các ứng dụng để chứng minh tính hiệu quả.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của Khoa Công nghệ Cơ khí, trường Đại học Công nghiệp cho quá trình nghiên cứu đề tài này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] 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*, Vol. 115, pp. 114-129, 2017.

[2] Y. Huang, J. Zhao and S. Liu, Design optimization of segment-reinforced bistable mechanisms exhibiting adjustable snapping behavior, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 252, pp. 7-15, 2016.

[3] J. Qiu and J.H. Lang, A Curved-Beam Bistable Mechanism, *Journal Of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, no. 2, 2004.

[4] T. Gomm, L.L. Howell and R.H. Selfridge, In-plane linear displacement bistable microrelay, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, pp. 257–264, 2002.

[5] J. Tsay, H.A. Chang and C.K. Sung, Design and experiments of fully compliant bistable micromechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, pp. 17–31, *2005*.

[6] G. Chen, D.L. Wilcox and L.L. Howell, Fully compliant double tensural tristable micromechanisms (DTTM), *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *2006*.

[7] G. Chen and Y. Du, Double-Young Tristable Mechanisms, *Journal of Mechanism and robotics, 2012*.

[8] J. Oberhammer, M. Tang, A.Q. Liu and G. Stemme, Mechanically tri-stable, true single-pole-double-throw (SPDT) switches, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006.

[9] G. Chen and S. Zhang, Fully-compliant statically-balanced mechanisms without prestressing assembly: Concepts and case studies, *Mechanical Sciences*, vol. 2, pp. 169-174, 2011.

[10] D. A. Wang, J. H. Chen and H. T. Pham, A tristable compliant micromechanism with two serially connected bistable mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 71, pp. 27-29, 2014.

[11] G. Chen, Q. T. Aten, S. Zirbel, B. D. Jensen and L. L. Howell, A tristable mechanism configuration employing orthogonal compliant mechanisms, *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. *2*, 2010.

[12] F. Dai , H. Li and S. Du, Design and analysis of a tri-stable structure based on bi-stable laminates, *Composites: Part A*, vol. 43, pp. 1497–1504, 2012.

[13] Y.S Oh and S. Kota, Synthesis of multistable equilibrium compliant mechanism using combinations of bistable mechanisms, *Journal of Mechanical Design*, vol. 131, 2009.

[14] H. T. Pham, D. A. Wang, A quadristable compliant mechanism with a bistable structure embedded in a surrounding beam structure, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 167, pp. 438–448, 2011.

[15] C. King, J. J. Beaman, S.V. Sreenivasan and M. Campbell, Multistable equilibrium system design methodology and demonstration, *Journal of Mechanical Design*, vol. 126, pp. 1036–1046, 2004.

[16] G. Chen, Synthesis of Compliant Multistable Mechanisms Through Use of a Single Bistable Mechanism", *Journal of Mechanical Design*, vol. 113, 2011.

[17] K. Wu and G. Zheng, A comprehensive static modeling methodology via beam theory for compliant mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 169, 2022.

[18] G. Chen and F. Ma, Kinetostatic Modeling of Fully Compliant Bistable Mechanisms Using Timoshenko Beam Constraint Model, *Journal of Mechanical Design*, vol. 137(2), 2015

[19] P. Li, K. Wang and B. Wang, Chained Timoshenko Beam Constraint Model With Applications in Large Deflection Analysis of Compliant Mechanism, *Journal of Mechanism and Robotics*, vol. 17(10), 2025.

[20] T. Liu, G. Hao, J. Zhu, P. Kuresangsai, S. Abdelaziz and E. Wehrle, Modelling complian bistable mechanisms: An energy method based on the high-order smooth curvature model, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 275, 2024

[21] F. Ma, G. Chen and G. Hao, Determining the range of allowable axial force for the third-order Beam Constraint Model, *Mechanical Sciences*, vol. 9, pp. 71-79, 2018

DEVELOPMENT A DESIGN METHOD OF COMPLIANT TRISTABLE MECHANISM WITH TWO INDEPENDENT BISTABLE STRUCTURES

TRAN NGOC DANG KHOA, DANG VAN ANH

Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City

** Corresponding author: tranngocdangkhoa@iuh.edu.vn*

Abstract. The compliant bistable mechanisms are a monolithic structure capable of maintaining a balanced position without the need for external force. By combining the two structures of compliant bistable mechanism, a design compliant bistable mechanisms is introduced, two compliant bistable mechanisms linked together by a rigid mass with the condition certain boundary. Based on the characteristics of the force and deformation relationship of the two compliant bistable mechanisms, the behaviour of the compliant tristable mechanism are predicted with high accuracy. The internal stress of the structure and the strain energy are also analyzed. The influence of the connecting rigid mass is also investigated and evaluated.

Keywords. compliant mechanism, stress, displacement, stable.

Ngày nhận bài: 24/7/2025
Ngày chấp nhận đăng: 21/8/2025