

# Tạo dáng đi thích nghi cho Robot nhện sử dụng mô hình NARX kết hợp mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá

## Adaptive gait generation for Spider Robots using NARX model combining evolutionary neural network model

Nguyễn Tiên Đạt<sup>1,2</sup>, Trần Thiện Huân<sup>3</sup>, Hồ Phạm Huy Ánh<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Viet Nam

<sup>2</sup>Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM), Linh Trung Ward, Thu Duc District, Ho Chi Minh City, Viet Nam

<sup>3</sup>Faculty of Electronics and Telecommunication (FET), Saigon University (SGU), 273 An Duong Vuong Street, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam

\*Corresponding author E-mail: [hphanh@hcmut.edu.vn](mailto:hphanh@hcmut.edu.vn)

### Abstract

Legged robots' gait is a major factor in how well they walk. Because present solutions lack a precise approach to the incredibly complicated structure and sensitive motions of legged creatures, gait creation remains a highly challenging subject. This article proposes a gait generation model (WPG) for a spider robot to walk straight and follow the designed reference ZMP trajectory in 2 step cycles with two different speeds. Initially, the robot spider's gait parameters are determined using a nonlinear recurrent evolutionary neural network model (NARX+EANN), which is then used in a walking pattern generator (WPG). Next, a new gait pattern generator (WPG) that depends only on four parameters (step length, leg lift, knee bend, stride) of the small-sized spider robot is designed, by relying on realistic gait analysis of the spider robot and kinematic analysis. Simultaneously, by using analytical techniques to solve the inverse kinematics issue, 12 joint angle orbits at the spider robot's four legs will be determined from the hip and foot orbits at the spider robot's four legs. Then, the optimal weights of the NARX+EANN model are identified using the Jaya optimization algorithm for training with the objective function of minimizing the total error between the actual ZMP coordinates and the reference ZMP in two-step cycles of different speeds. The actual ZMP point is determined based on 12 joint angle orbits at the four legs of the spider robot by solving the forward kinematics problem using analytical methods. Finally, this proposal is applied to the experimental model of the B3-SBOT spider robot. The obtained results demonstrate that B3-SBOT walks steadily and strongly without tilting, closely following the designed reference ZMP trajectory in 2 step cycles with two different speeds.

**Keywords:** EA-ANN – Evolutionary Algorithm-Artificial Neural Network, NARX – Nonlinear Auto-Regressive with Exogenous, JAYA optimization algorithm, Spider robot, WPG – Walking Pattern Generator, ZMP – Zero Moment Point.

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
S	mm	chiều dài bước
H	mm	độ nhấc chân
h	mm	độ khụy gối
n	mm	độ sai chân

### Các từ viết tắt

NARX	Nonlinear Auto-Regressive with Exogenous
EA-ANN	Evolutionary Algorithm-Artificial Neural Network
ZMP	Zero Moment Point
WPG	Walking Pattern Generator
JAYA	JAYA optimization algorithm

### Tóm tắt

Dáng đi đóng vai trò quyết định về hiệu suất đi bộ của robot có chân. Hiện nay, tạo dáng vẫn là bài toán rất khó vì kỹ thuật hiện tại chưa tiếp cận được một cách chi tiết về kết cấu vô cùng phức tạp và sự vận động rất tinh vi của các động vật có chân. Bài báo này, đề xuất mô hình tạo dáng đi (WPG) để robot nhện bước đi thẳng bám theo quỹ đạo ZMP tham chiếu được thiết kế trong 2 chu kỳ bước với hai tốc độ khác nhau. Đầu tiên, mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá hồi quy phi tuyến (NARX+EANN) được thiết kế để nhận dạng các tham số dáng đi của spider robot và cấp cho bộ tạo mẫu đi bộ (WPG). Kế tiếp, bộ tạo mẫu dáng đi (WPG) mới chỉ phụ thuộc vào bốn tham số (chiều dài bước, độ nhấc chân, độ khụy gối, độ sai chân) của robot nhện kích thước nhỏ được thiết kế, bằng cách dựa vào phân tích dáng đi thực tế của robot nhện và phân tích động học. Đồng thời, 12 quỹ đạo góc khớp tại bốn chân của robot nhện sẽ được xác định từ quỹ đạo của hông và quỹ đạo của bàn chân tại bốn chân của robot nhện thông qua giải bài toán động học ngược bằng phương pháp giải tích. Sau đó, các trọng số tối ưu của mô hình NARX+EANN được nhận dạng bằng cách sử dụng thuật toán tối ưu Jaya để huấn luyện với hàm mục tiêu là cực tiểu hoá tổng sai số giữa tọa độ ZMP thực tế với ZMP tham chiếu trong hai chu kỳ bước có tốc độ khác nhau. Điểm ZMP thực tế được xác định bằng cách dựa vào 12 quỹ đạo góc khớp tại bốn chân của robot nhện thông qua giải bài toán động học thuận sử

dụng phương pháp giải tích. Cuối cùng, đề xuất này được áp dụng vào mô hình thực nghiệm robot nhện B3-SBOT. Kết quả thu được chứng tỏ rằng B3-SBOT bước đi vững chắc và mạnh mẽ mà không nghiêng ngã theo sát quỹ đạo ZMP tham chiếu được thiết kế trong 2 chu kỳ bước với hai tốc độ khác nhau.

## 1. Giới thiệu

Trong thế giới robot, robot nhện đang được phát triển cho nhiều mục đích khác nhau. Với thiết kế linh hoạt và điều khiển thích nghi, khiến robot nhện trở thành một công cụ có giá trị cho nhiều ứng dụng (bao gồm quân sự, hoạt động cứu hộ và giám sát). Ví dụ, giám sát các công trình bị sập để tìm người sống sót [1], kiểm tra và thử nghiệm các hệ thống đường ống phức tạp [2] và bảo trì các công trình nguy hiểm như lò phản ứng hạt nhân [3], làm sạch các bề mặt bên ngoài được xây dựng bằng kính của mọi tòa nhà, không gian làm việc văn phòng hoặc căn hộ chung cư [4], dò tìm bom mìn còn sót lại từ thời kỳ chiến tranh ở các vùng có địa hình gồ ghề phức tạp [5].

Việc tạo ra dáng đi cho robot bốn chân đòi hỏi phải tạo ra các cử động ở bốn chân để đảm bảo sự ổn định, tiết kiệm năng lượng và khả năng thích ứng với các địa hình khác nhau. Quá trình này đòi hỏi sự tích hợp phản hồi của cảm biến, thuật toán điều khiển và nguyên lý cơ sinh học để tạo ra dáng đi mạnh mẽ và linh hoạt. Hiện nay, tạo dáng đi cho robot bốn chân vẫn là bài toán khó do kỹ thuật hiện tại chưa tiếp cận được các đối tượng sinh học vô cùng phức tạp về kết cấu và tinh vi trong vận động.

Có hai phương pháp thông dụng để tạo dáng đi cho robot bốn chân là tạo dáng đi tĩnh và tạo dáng đi động [6]. Dáng đi tĩnh (static walking) được McGhee và Frank [7] đề xuất đầu tiên, là phương pháp điều khiển chuyển động bằng cách di chuyển từng chân của robot khi bước đi. Bằng cách sử dụng phương pháp này, tại một thời điểm chỉ có một chân được nâng lên và ba chân còn lại đặt trên mặt đất để robot bốn chân bước đi ổn định với tốc độ chậm [8]. Dáng đi động là phương pháp điều khiển chuyển động bằng cách di chuyển hai chân cùng một lúc, hai chân chuyển động ở hai bên khác nhau. Ví dụ: nếu chân phải trước di chuyển thì chân trái sau cũng di chuyển, ngược lại khi chân trái trước di chuyển thì chân phải sau cũng di chuyển. Việc sử dụng phương pháp dáng đi động khiến robot di chuyển nhanh hơn phương pháp dáng đi tĩnh nhưng độ ổn định của robot sẽ bị giảm [9].

Đặc biệt, tạo dáng đi robot nhện bám theo quỹ đạo ZMP mong muốn mà chỉ dựa vào ZMP thực nghiệm quan sát được, thì mô hình mạng nơ-rôn kết hợp mô hình hồi quy phi tuyến được chọn lựa đầu tiên. Vì mạng nơ-rôn là cấu trúc mô hình phi tuyến có tính linh hoạt rất cao, nên mạng nơ-rôn có thể xấp xỉ hàm phi tuyến trơn với sai số nhỏ tùy ý khi số nơ-rôn ở lớp ẩn đủ lớn. Đồng thời, trọng số của mạng nơ-rôn có thể ước lượng được mà chỉ cần dựa vào các phản hồi quy là ZMP tham chiếu và ZMP thực tế trong quá khứ. Phương pháp ước lượng các trọng số của mô hình mạng nơ-rôn được sử dụng phổ biến nhất hiện nay là phương pháp sai số dự báo. Ý tưởng cơ bản của phương pháp này là ước lượng các trọng số của mô hình mạng nơ-rôn sao cho cực tiểu hoá tiêu chuẩn ước lượng là hàm xác định dương của sai số dự báo (thường là hàm toàn phương), trong đó sai số dự báo là sai lệch giữa ZMP mong muốn và ZMP thực tế. Lời giải của bài toán tối ưu này có thể tìm được bằng thuật toán lặp Newton như: thuật toán suy giảm độ dốc, thuật toán Gauss - Newton và thuật toán Levenberg -

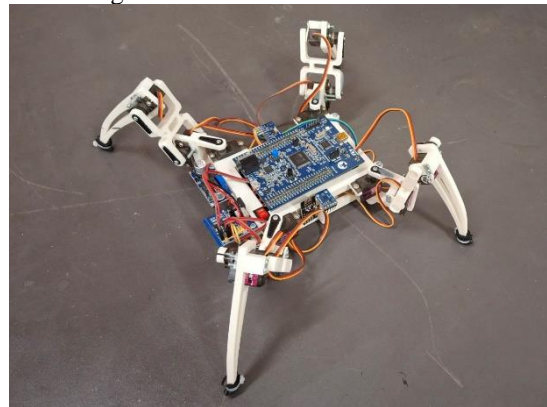
Marquardt [10]. Ngoài các thuật toán Newton, có thể áp dụng các thuật toán tối ưu tiên hoá để tìm giải bài toán ưu hoá [11]. Dựa vào các phân tích trên, bài báo đề xuất mô hình tạo dáng đi thích nghi sử dụng mô hình hồi quy phi tuyến (NARX) kết hợp mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá (EA-ANN) để robot nhện bước đi thẳng bám theo quỹ đạo ZMP tham chiếu được thiết kế trong 2 chu kỳ bước với hai tốc độ khác nhau. Các đóng góp chi tiết của nghiên cứu bao gồm:

- Mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá hồi quy phi tuyến (NARX+EANN) được thiết kế để nhận dạng các tham số dáng đi (S-chiều dài bước, H-độ nhắc chân, h-độ khụy gối, n- độ sai chân) của robot nhện và cấp cho bộ tạo mẫu đi bộ (WPG).
- Bộ tạo mẫu đi bộ (WPG) có quỹ đạo của hông và bàn chân tại mỗi chân của robot nhện phụ thuộc vào bốn thông số dáng đi (S, H, h và n) sẽ được thiết lập dựa vào quy luật vận động của robot nhện và hàm nội suy bậc 3. Đồng thời, 12 quỹ đạo góc khớp tại bốn chân của robot nhện sẽ được suy ra từ quỹ đạo của hông và quỹ đạo của bàn chân tại bốn chân của robot nhện thông qua giải bài toán động học ngược bằng phương pháp giải tích.
- Thuật toán tối ưu Jaya [12] được sử dụng để huấn luyện trọng số của mô hình mạng nơ-rôn (ANN) với hàm mục tiêu là cực tiểu hoá tổng của sai số giữa ZMP thực tế với ZMP tham chiếu trong hai chu kỳ bước có tốc độ khác nhau. Điểm ZMP thực tế được xác định bằng cách dựa vào 12 quỹ đạo góc khớp tại bốn chân của robot nhện bằng cách giải bài toán động học thuận sử dụng phương pháp giải tích.
- Đề xuất này được áp dụng vào B3-SBOT, kết quả mô phỏng chứng minh bộ tạo mẫu đi bộ (WPG) thích nghi được đề xuất cho phép B3-SBOT bước đi vững chắc và mạnh mẽ mà không ngã.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: mục 2 giới thiệu mô hình spider robot (B3-SBOT); mục 3 trình bày đề xuất mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá thích nghi kết hợp mô hình hồi quy phi tuyến để tạo các thông số dáng đi cấp cho bộ phát dáng (WPG - Walking Pattern Generator) để đảm bảo robot nhện bước đi thẳng bám theo quỹ đạo ZMP tham chiếu được thiết kế trong 2 chu kỳ bước với hai vận tốc khác nhau; mục 4 trình bày kết quả mô phỏng và mục 5 trình bày kết luận

## 2. Mô hình robot nhện B3-SBOT

Robot nhện kích thước nhỏ (B3-SBOT) có thân và bốn chân như mô tả trong Hình 1.

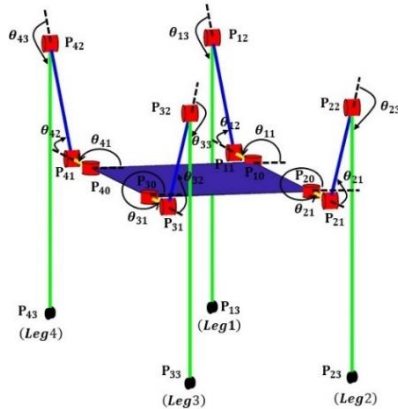


**Hình 1.** Hình ảnh mô tả robot nhện B3-SBOT với 12 DOF.

Mỗi chân có khâu đùi và khâu cẳng chân với tổng cộng 3 dof (2 dof ở khớp hông, 1 dof ở khớp gối). B3-SBOT có thể bắt chước động tác đi bộ của robot nhện theo mặt đứng ngang và

mặt đứng dọc. Tổng khối lượng của B3-SBOT là 350 gam (động cơ servo, cảm biến, bộ điều khiển, pin) và cao 15 cm. B3-SBOT được thiết kế đảm bảo cấu trúc động học, mỗi dof tương ứng 1 động cơ truyền động độc lập. Động cơ Servo DC loại MG90S của hãng TowerPro được sử dụng làm phần tử truyền động. Ưu điểm nổi bật của động cơ MG90S là nhỏ gọn và nhẹ (13.4 gam) với lực kéo momen (1.8 kg.cm). Tín hiệu điều khiển động cơ servo được gửi từ vi điều khiển STM32. Nguyên cứu này quan tâm đến bài toán tạo dáng và điều khiển robot nhện bước đi thẳng nên thân trên của robot nhện được giữ cố định và chỉ điều khiển thân dưới có 12 động cơ ở bốn chân với 12 góc quay

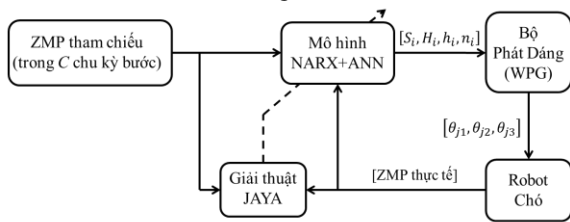
( $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, \theta_{41}, \theta_{42}, \theta_{43}$ ) được định nghĩa như trong Hình 2. Vị trí của các khớp ( $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{31}, P_{32}, P_{33}, P_{41}, P_{42}, P_{43}$ ) và thứ tự chân cũng được định nghĩa như trong Hình 2.



Hình 2. Mô hình kết cấu robot nhện B3-SBOT.

### 3. Đề xuất mô hình tạo dáng đi (WPG) thích nghi cho robot nhện

Bài báo đề xuất mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá thích nghi kết hợp mô hình hồi quy phi tuyến để tạo các thông số dáng đi cấp cho bộ phát dáng (WPG - Walking Pattern Generator) của robot nhện như minh họa trong hình 3.



$i = 1 \dots C$ ; C là số chu kỳ bước  
 $j = 1 \dots 4$ ; j là thứ tự chân của robot

Hình 3. Mô hình đề xuất.

WPG được thiết lập dựa vào quy luật vận động của robot nhện và hàm nội suy bậc 3. Ngõ ra của WPG là quỹ đạo góc quay của 12 góc khớp cấp cho robot nhện. Ngõ ra của robot nhện là tọa độ ZMP thực tế được hồi tiếp về mô hình đề xuất. Các trọng số của mô hình mạng nơ-rôn trong mô hình đề xuất được nhận dạng tối ưu bởi thuật toán Jaya.

#### 3.1. Mô hình NARX+EANN

Trong bài báo này, quỹ đạo ZMP tham chiếu của robot nhện là bước đi thẳng trong hai chu kỳ bước với hai tốc độ khác nhau (C=2). Ta gọi là tọa độ ZMP tham chiếu và là tọa độ

ZMP thực tế của robot nhện, các tọa độ này là ngõ vào của mô hình NARX+ANN. Vì cấu trúc NARX được chọn là bậc 1 nên mô hình mạng nơ-rôn có bốn ngõ vào là  $[x_{zmp\_ref}(k-1)]$ ,  $[y_{zmp\_ref}(k-1)]$ ,  $[x_{zmp\_real}(k-1)]$ ,  $[y_{zmp\_real}(k-1)]$  và có tám ngõ ra là  $[S1, H1, h1, n1, S2, H2, h2, n2]$ . Trong đó  $z^{-1}$  là toán tử trễ bậc 1;  $[S1, H1, h1, n1]$  là bốn tham số dáng của chu kỳ bước thứ nhất;  $[S2, H2, h2, n2]$  là bốn tham số dáng của chu kỳ bước thứ hai. Mô hình ANN được mô tả bởi phương trình (1).

$$y_i(k, \lambda) = F_i \left( \sum_{j=1}^q v_{ij} \cdot F_j \left( \sum_{l=1}^m w_{jl} \cdot \varphi_l(k) + w_{j0} \right) + v_{i0} \right); i = 1 \dots n \quad (1)$$

Trong đó, mô hình mạng nơ-rôn có 3 lớp;  $y_i$  là ngõ ra thứ  $i$  của lớp ra;  $q$  là số nơ-rôn ở lớp ẩn;  $n$  là số ngõ ra của lớp ra;  $m$  là số ngõ vào của lớp vào;  $w_{jl}$  là trọng số giữa lớp vào và lớp ẩn,  $w_{j0}$  là ngưỡng của lớp vào,  $v_{ij}$  là trọng số giữa lớp ẩn và lớp ra,  $v_{i0}$  là ngưỡng của lớp ẩn;  $F_j$  là hàm tác động tại lớp ẩn,  $F_i$  là hàm tác động tại lớp ra;  $D$  là tổng của các trọng số và các ngưỡng của mô hình mạng nơ-rôn;  $\varphi(k)$  là véc-tơ hồi quy và  $\lambda$  là véc-tơ trọng số và ngưỡng, được định nghĩa như công thức 2 và 3.

$$\varphi(k) = [\varphi_1(k), \varphi_2(k), \varphi_3(k), \varphi_4(k)]^T \quad (2)$$

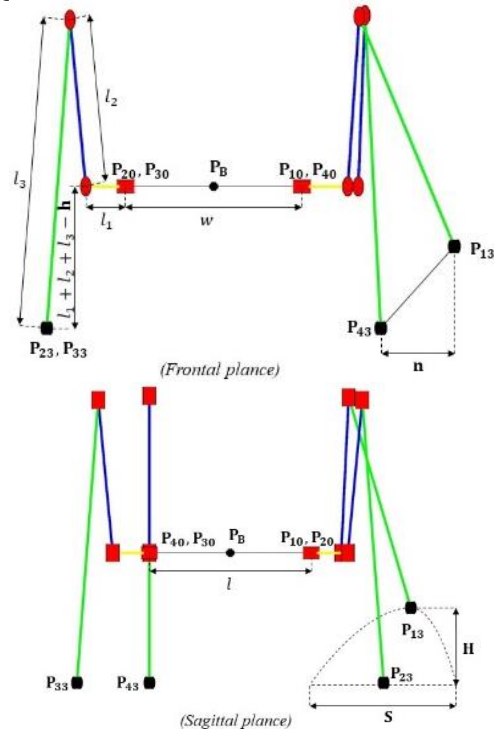
$$= [x_{zmp\_ref}(k-1), y_{zmp\_ref}(k-1), x_{zmp\_real}(k-1), y_{zmp\_real}(k-1)]^T$$

$$\lambda = [w_{j1}, w_{j0}, v_{ij}, v_{i0}]^T = [w_1, \dots, w_D]^T \quad (3)$$

với  $D = (m+1)q + (q+1)n$ ;  $j = 1 \dots q$ ;  $l = 1 \dots m$ ;  $i = 1 \dots n$

#### 3.2. Xây dựng bộ phát dáng đi (WPG-Walking Pattern Generator)

Bốn tham số quan trọng của robot nhện giúp bước đi ổn định bao gồm **S** – chiều dài bước chân, **H** – độ nhấc chân, **h** – độ khuya gối và **n** – độ sải chân được minh họa như trong Hình 4.



Hình 4. Bốn tham số ảnh hưởng quyết định đến dáng đi robot nhện B3-SBOT.

Trong đó:  $l$  là chiều dài của thân trên,  $w$  là chiều rộng của thân trên.

Chuyển động của robot nhện trong 1 chu kỳ bước ( $T$ ) được tạo ra bằng cách chọn hàm theo thời gian thích hợp cho 8 điểm tham chiếu:  $\mathbf{P}_{10}(P_{10x}, P_{10y}, P_{10z})$ ,  $\mathbf{P}_{20}(P_{20x}, P_{20y}, P_{20z})$ ,

$\mathbf{P}_{30}(P_{30x}, P_{30y}, P_{30z})$ ,  $\mathbf{P}_{40}(P_{40x}, P_{40y}, P_{40z})$ ,  $\mathbf{P}_{13}(P_{13x}, P_{13y}, P_{13z})$ ,

$\mathbf{P}_{23}(P_{23x}, P_{23y}, P_{23z})$ ,  $\mathbf{P}_{33}(P_{33x}, P_{33y}, P_{33z})$ ,  $\mathbf{P}_{43}(P_{43x}, P_{43y}, P_{43z})$ .

Trong suốt quá trình bước đi, chiều cao của thân trên được giữ cố định nên  $\mathbf{P}_{10}, \mathbf{P}_{20}, \mathbf{P}_{30}, \mathbf{P}_{40}$  được tính thông qua

$$\mathbf{P}_B(P_{Bx}, P_{By}, P_{Bz}) \text{ như công thức (4):}$$

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{10} = \left[ P_{Bx} + \frac{l}{2}, P_{By} + \frac{w}{2}, P_{Bz} \right] \\ \mathbf{P}_{20} = \left[ P_{Bx} + \frac{l}{2}, P_{By} - \frac{w}{2}, P_{Bz} \right] \\ \mathbf{P}_{30} = \left[ P_{Bx} - \frac{l}{2}, P_{By} - \frac{w}{2}, P_{Bz} \right] \\ \mathbf{P}_{40} = \left[ P_{Bx} - \frac{l}{2}, P_{By} + \frac{w}{2}, P_{Bz} \right] \end{cases} \quad (4)$$

Mỗi chu kỳ bước có 6 pha, chu kỳ mỗi pha là  $T_0 = \frac{T}{6}$ . Trong

các pha 1 – 3 – 4 – 6 có một chân di chuyển về phía trước, ba chân còn lại đứng yên. Trong pha 2 – 5 chỉ có thân di chuyển về phía trước và cả 4 chân đứng yên. Luật di chuyển bốn chân và thân của robot nhện trong 1 chu kỳ bước ( $0 \leq t \leq 6T_0$ ) được minh họa chi tiết trong bảng 1. Lưu ý các ký hiệu trong bảng 1 như sau:  $\uparrow$  biểu diễn chân nhấc;  $\downarrow$  biểu diễn chân hạ xuống;  $\Rightarrow$  biểu diễn thân tiến về phía trước.

$\mathbf{P}_B, \mathbf{P}_{13}, \mathbf{P}_{23}, \mathbf{P}_{33}, \mathbf{P}_{43}$  được chọn lựa trực quan.  $\mathbf{P}_{13}, \mathbf{P}_{23}, \mathbf{P}_{33}, \mathbf{P}_{43}$  được lựa chọn theo chuyển động của các chân để có dáng đi mong muốn. Lựa chọn  $\mathbf{P}_B$  phụ thuộc vào cấu trúc cơ khí của robot nhện vì nó liên quan đến dịch chuyển ZMP từ pha này sang pha khác.

Bài báo này, quỹ đạo ZMP tham chiếu của robot nhện được thiết kế trong hai chu kỳ bước với hai tốc độ khác nhau. Do đó, bốn thông số dáng đi của robot nhện trong mỗi chu kỳ bước sẽ bị thay đổi như công thức (5). Để đảm bảo tính khả vi của bốn tham số dáng đi, phương pháp xấp xỉ bằng đa thức bậc 3 qua các nút được sử dụng.

$$\mathbf{A} = \begin{cases} \mathbf{A}_1, 0 \leq t < 5T_0 \\ \left( \frac{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}{2T_0} \right) t + \left( \frac{7}{2} \mathbf{A}_1 + \frac{5}{2} \mathbf{A}_2 \right), 5T_0 \leq t < 7T_0 \\ \mathbf{A}_2, 7T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:  $\mathbf{A}$  là các thông số dáng đi  $S, H, h, n$  của robot nhện. Trong hai chu kỳ bước ( $0 \leq t \leq 12T_0$ ), dựa vào luật di chuyển bảng 1 và giả sử tại thời điểm  $t=0s$  thì  $\mathbf{P}_B(t=0) = [0, 0, (l_1 + l_2 + l_3) - \mathbf{h}]$  thì  $\mathbf{P}_{13}, \mathbf{P}_{23}, \mathbf{P}_{33}, \mathbf{P}_{43}$  cho dáng đi thẳng được thể hiện như sau:

$$P_{13x} = \begin{cases} \frac{S}{T_0}t + \frac{l}{2}, & 0 \leq t < T_0 \\ \frac{l}{2} + S, & T_0 \leq t < 6T_0 \\ \frac{l}{2} + \frac{S}{T_0}t - 5S, & 6T_0 \leq t < 7T_0 \\ \frac{l}{2} + 2S, & 7T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{13y} = \begin{cases} \frac{2n}{T_0}t + \frac{w}{2} + \frac{S}{2}, & 0 \leq t < \frac{T_0}{2} \\ -\frac{2n}{T_0}t + \frac{w}{2} + \frac{S}{2} + 2n, & \frac{T_0}{2} \leq t < T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{S}{2}, & T_0 \leq t < 6T_0 \\ \frac{2n}{T_0}t + \frac{w}{2} + \frac{S}{2} - 12n, & 6T_0 \leq t < \frac{13}{2}T_0 \\ -\frac{2n}{T_0}t + \frac{w}{2} + \frac{S}{2} + 14n, & \frac{13}{2}T_0 \leq t < 7T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{S}{2}, & 7T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{13z} = \begin{cases} \frac{2H}{T_0}t, & 0 \leq t < \frac{T_0}{2} \\ -\frac{2H}{T_0}t + 2H, & \frac{T_0}{2} \leq t < T_0 \\ 0, & T_0 \leq t < 6T_0 \\ \frac{2H}{T_0}t - 12H, & 6T_0 \leq t < \frac{13}{2}T_0 \\ -\frac{2H}{T_0}t + 14H, & \frac{13}{2}T_0 \leq t < 7T_0 \\ 0, & 7T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (8)$$

**Bảng 1.** Luật di chuyển của bốn chân và thân của robot nhện trong 1 chu kỳ bước [15]

t	0	$\frac{T_0}{2}$	$T_0$	$\frac{3T_0}{2}$	$2T_0$	$\frac{5T_0}{2}$	$3T_0$	$\frac{7T_0}{2}$	$4T_0$	$\frac{9T_0}{2}$	$5T_0$	$\frac{11T_0}{2}$	$6T_0$
	$\rightarrow \frac{T_0}{2}$	$\rightarrow T_0$	$\rightarrow \frac{3T_0}{2}$	$\rightarrow 2T_0$	$\rightarrow \frac{5T_0}{2}$	$\rightarrow 3T_0$	$\rightarrow \frac{7T_0}{2}$	$\rightarrow 4T_0$	$\rightarrow \frac{9T_0}{2}$	$\rightarrow 5T_0$	$\rightarrow \frac{11T_0}{2}$	$\rightarrow 6T_0$	
Leg 1	$\uparrow$	$\downarrow$											
Leg 2							$\uparrow$	$\downarrow$					
Leg 3					$\uparrow$	$\downarrow$							
Leg 4											$\uparrow$	$\downarrow$	
Body			$\Rightarrow$	$\Rightarrow$					$\Rightarrow$	$\Rightarrow$			

$$P_{23x} = \begin{cases} \frac{l}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2}, & 0 \leq t < 3T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{T_0}t - 3\mathbf{S} + \frac{l}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2}, & 3T_0 \leq t < 4T_0 \\ \frac{l}{2} + \frac{3\mathbf{S}}{2}, & 4T_0 \leq t < 9T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{T_0}t - 8\mathbf{S} + \frac{l}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2}, & 9T_0 \leq t < 10T_0 \\ \frac{l}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2} + 2\mathbf{S}, & 10T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{23y} = \begin{cases} -\frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 0 \leq t < 3T_0 \\ -\frac{2\mathbf{n}}{T_0}t + 6\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 3T_0 \leq t < \frac{7}{2}T_0 \\ \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t - 8\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & \frac{7}{2}T_0 \leq t < 4T_0 \\ -\frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 4T_0 \leq t < 9T_0 \\ -\frac{2\mathbf{n}}{T_0}t + 18\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 9T_0 \leq t < \frac{19}{2}T_0 \\ \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t - 20\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & \frac{19}{2}T_0 \leq t < 10T_0 \\ -\frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 10T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{23z} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 3T_0 \\ \frac{2\mathbf{H}}{T_0}t - 6\mathbf{H}, & 3T_0 \leq t < \frac{7}{2}T_0 \\ -\frac{2\mathbf{H}}{T_0}t + 8\mathbf{H}, & \frac{7}{2}T_0 \leq t < 4T_0 \\ 0, & 4T_0 \leq t < 6T_0 \\ \frac{2\mathbf{H}}{T_0}t - 18\mathbf{H}, & 9T_0 \leq t < \frac{19}{2}T_0 \\ -\frac{2\mathbf{H}}{T_0}t + 20\mathbf{H}, & \frac{19}{2}T_0 \leq t < 10T_0 \\ 0, & 10T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{33x} = \begin{cases} -\frac{l}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 0 \leq t < 2T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{T_0}t - \frac{l}{2} - \frac{5\mathbf{S}}{2}, & 2T_0 \leq t < 3T_0 \\ -\frac{l}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2} + \mathbf{S}, & 3T_0 \leq t < 8T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{T_0}t - 7\mathbf{S} - \frac{l}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 8T_0 \leq t < 9T_0 \\ -\frac{l}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2} + 2\mathbf{S}, & 9T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{33y} = \begin{cases} -\frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 0 \leq t < 2T_0 \\ -\frac{2\mathbf{n}}{T_0}t + 4\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 2T_0 \leq t < \frac{5}{2}T_0 \\ \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t - 6\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & \frac{5}{2}T_0 \leq t < 3T_0 \\ -\frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 3T_0 \leq t < 8T_0 \\ -\frac{2\mathbf{n}}{T_0}t + 16\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 8T_0 \leq t < \frac{17}{2}T_0 \\ \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t - 18\mathbf{n} - \frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & \frac{17}{2}T_0 \leq t < 9T_0 \\ -\frac{w}{2} - \frac{\mathbf{S}}{2}, & 9T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{33z} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 2T_0 \\ \frac{2\mathbf{H}}{T_0}t - 4\mathbf{H}, & 2T_0 \leq t < \frac{5}{2}T_0 \\ -\frac{2\mathbf{H}}{T_0}t + 6\mathbf{H}, & \frac{5}{2}T_0 \leq t < 3T_0 \\ 0, & 3T_0 \leq t < 8T_0 \\ \frac{2\mathbf{H}}{T_0}t - 16\mathbf{H}, & 8T_0 \leq t < \frac{17}{2}T_0 \\ -\frac{2\mathbf{H}}{T_0}t + 18\mathbf{H}, & \frac{17}{2}T_0 \leq t < 9T_0 \\ 0, & 9T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{43x} = \begin{cases} -\frac{l}{2}, & 0 \leq t < 5T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{T_0}t - \frac{l}{2} - 5\mathbf{S}, & 5T_0 \leq t < 6T_0 \\ -\frac{l}{2} + \mathbf{S}, & 6T_0 \leq t < 11T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{T_0}t - \frac{l}{2} - 11\mathbf{S}, & 11T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (15)$$

$$P_{43y} = \begin{cases} \frac{w}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2}, & 0 \leq t < 5T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2} + \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t - 10\mathbf{n}, & 5T_0 \leq t < \frac{11}{2}T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2} - \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t + 12\mathbf{n}, & \frac{11}{2}T_0 \leq t < 6T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2}, & 6T_0 \leq t < 11T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2} + \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t - 22\mathbf{n}, & 11T_0 \leq t < \frac{23}{2}T_0 \\ \frac{w}{2} + \frac{\mathbf{S}}{2} - \frac{2\mathbf{n}}{T_0}t + 24\mathbf{n}, & \frac{23}{2}T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{43z} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 5T_0 \\ \frac{2\mathbf{H}}{T_0}t - 10\mathbf{H}, & 5T_0 \leq t < \frac{11}{2}T_0 \\ -\frac{2\mathbf{H}}{T_0}t + 12\mathbf{H}, & \frac{11}{2}T_0 \leq t < 6T_0 \\ 0, & 6T_0 \leq t < 11T_0 \\ \frac{2\mathbf{H}}{T_0}t - 22\mathbf{H}, & 11T_0 \leq t < \frac{23}{2}T_0 \\ -\frac{2\mathbf{H}}{T_0}t + 24\mathbf{H}, & \frac{23}{2}T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (17)$$

$\mathbf{P}_B$  cho dáng đi thẳng được thể hiện như sau:

$$P_{Bx} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{2T_0}t - \frac{\mathbf{S}}{2}, & T_0 \leq t < 2T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{2}, & 2T_0 \leq t < 4T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{2}t - \frac{3\mathbf{S}}{2}, & 4T_0 \leq t < 5T_0 \\ \mathbf{S}, & 5T_0 \leq t < 7T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{2}t - \frac{5\mathbf{S}}{2}, & 7T_0 \leq t < 8T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{2}, & 8T_0 \leq t < 10T_0 \\ \frac{\mathbf{S}}{2}t - \frac{7\mathbf{S}}{2}, & 10T_0 \leq t < 11T_0 \\ 2\mathbf{S}, & 11T_0 \leq t < 12T_0 \end{cases} \quad (18)$$

$$P_{By} = 0, \quad 0 \leq t < 12T_0 \quad (19)$$

$$P_{Bz} = l_1 + l_2 + l_3 - \mathbf{h}, \quad 0 \leq t < 12T_0 \quad (20)$$

Để đảm bảo tính liên tục về vị trí, vận tốc và gia tốc của các quỹ đạo  $\mathbf{P}_{13}$ ,  $\mathbf{P}_{23}$ ,  $\mathbf{P}_{33}$ ,  $\mathbf{P}_{43}$  và  $\mathbf{P}_B$  như công thức (6– 20), phương pháp xấp xỉ bằng đa thức bậc 3 qua các nút được sử dụng. Khi có quỹ đạo được xấp xỉ của  $\mathbf{P}_{13}$ ,  $\mathbf{P}_{23}$ ,  $\mathbf{P}_{33}$ ,  $\mathbf{P}_{43}$  thì robot nhện sẽ bước đi thẳng.

Dáng đi được tạo ra bằng cách lấy mẫu các quỹ đạo xấp xỉ của  $\mathbf{P}_{13}$ ,  $\mathbf{P}_{23}$ ,  $\mathbf{P}_{33}$ ,  $\mathbf{P}_{43}$ ,  $\mathbf{P}_{10}$ ,  $\mathbf{P}_{20}$ ,  $\mathbf{P}_{30}$ ,  $\mathbf{P}_{40}$  trong những khoảng thời gian nhất định. Các quỹ đạo xấp xỉ của  $\mathbf{P}_{10}$ ,  $\mathbf{P}_{20}$ ,  $\mathbf{P}_{30}$ ,  $\mathbf{P}_{40}$  được tính từ quỹ đạo xấp xỉ của  $\mathbf{P}_B$  thông qua công thức (4). Trong các quỹ đạo xấp xỉ của  $\mathbf{P}_{13}$ ,  $\mathbf{P}_{23}$ ,  $\mathbf{P}_{33}$ ,  $\mathbf{P}_{43}$ ,  $\mathbf{P}_{10}$ ,  $\mathbf{P}_{20}$ ,  $\mathbf{P}_{30}$ ,  $\mathbf{P}_{40}$ , thì  $t$  và  $T$  chi phối quá trình lấy mẫu quyết định tốc độ bước đi và độ êm ái của dáng đi. Với  $\Delta t$  là khoảng thời gian lấy mẫu,  $\frac{T}{\Delta t}$  biểu thị số lượng mẫu trong một chu kỳ bước  $T$  hoặc tần số lấy mẫu. Tùy thuộc vào cấu trúc của robot nhện mà giá trị của  $T$  và  $\Delta t$  sẽ được chọn sao cho phù hợp.

Mẫu đi bộ là quỹ đạo của 12 góc quay  $[\theta_{11}(t), \theta_{12}(t), \theta_{13}(t), \theta_{21}(t), \theta_{22}(t), \theta_{33}(t), \theta_{31}(t), \theta_{32}(t), \theta_{33}(t), \theta_{41}(t), \theta_{42}(t), \theta_{43}(t)]$  ở 4 chân của robot nhện trong 2 chu kỳ bước đi. Các quỹ đạo góc quay này được xác định từ các quỹ đạo xấp xỉ của  $\mathbf{P}_{13}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{23}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{33}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{43}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{10}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{20}(t)$ ,  $\mathbf{P}_{30}(t)$ ,

$\mathbf{P}_{40}(t)$ , bằng cách giải bài toán động học ngược từng chân của robot nhện.

Vai trò của 4 tham số (S, H, h, n) ảnh hưởng đến độ ổn định được thực hiện như sau: 2 bộ tham số dáng đi khác nhau được chọn như sau (trường hợp 1: S=89.4869, H=25.2623, h=138.2758, n=41.8079 và trường hợp 2: S=111.0861, H=40.3096, h=137.1566, n=25.6890), sau đó khảo sát dáng đi và ZMP trong 2 chu kỳ bước đi tương ứng với từng bộ tham số. Video minh họa dáng đi và ZMP tương ứng hai trường hợp trên theo link sau: <https://youtu.be/0-PLESyY8G4>

Tóm lại, có thể tạo ra nhiều dáng đi thẳng khác nhau trong các chu kỳ bước khác nhau bằng cách thay đổi giá trị của bốn thông số dáng đi ( $\mathbf{S}_i, \mathbf{H}_i, \mathbf{h}_i, \mathbf{n}_i$ ) trong mỗi chu kỳ bước. Do đó, các tham số này phải được lựa chọn tối ưu để đảm bảo robot nhện bước đi thẳng bám theo quỹ đạo ZMP tham chiếu được thiết kế trong 2 chu kỳ bước với hai vận tốc khác nhau.

### 3.3. ZMP của Robot nhện

Điểm ZMP thực tế của robot có chân được tính như công thức 21 [13]:

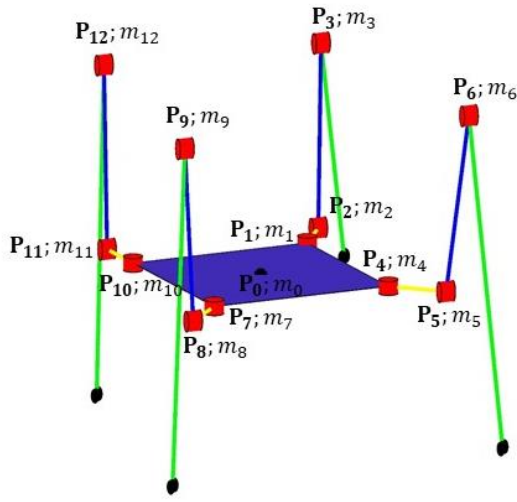
$$\begin{cases} x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{P}_{iz} + g) P_{ix} - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_{ix} P_{iz} - \sum_{i=1}^n I_{iy} \ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{P}_{iz} + g)} \\ y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{P}_{iz} + g) P_{iy} - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_{iy} P_{iz} - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{P}_{iz} + g)} \end{cases} \quad (21)$$

trong đó,  $m_i$  là khối lượng của khâu thứ  $i$  và  $(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$  là tọa độ khối tâm của khâu thứ  $i$  trong hệ trục tọa độ đề cát,  $I_{ix}$  và  $I_{iy}$  là thành phần momen quán tính,  $\ddot{\Omega}_{ix}$  và  $\ddot{\Omega}_{iy}$  là thành phần gia tốc góc quay xung quanh trục  $x$  và  $y$  tại khối tâm của khâu thứ  $i$ ,  $g$  là gia tốc trọng trường,  $(x_{ZMP\_real}, y_{ZMP\_real})$  là tọa độ điểm ZMP thực tế.

Đối với B3-SBOT, giả sử mô men quán tính và gia tốc góc tuyệt đối của các liên kết là đủ nhỏ để bỏ qua, công thức tính ZMP được tính như công thức (22) [14]:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = x_{COM} + \frac{\sum_{i=0}^{12} m_i \ddot{P}_{iz} P_{ix} - \sum_{i=0}^n m_i \ddot{P}_{ix} P_{iz}}{g \sum_{i=0}^n m_i} \\ y_{ZMP} = y_{COM} + \frac{\sum_{i=0}^{12} m_i \ddot{P}_{iz} P_{iy} - \sum_{i=0}^n m_i \ddot{P}_{iy} P_{iz}}{g \sum_{i=0}^n m_i} \end{cases} \quad (22)$$

Trong công thức 34, phân bố khối lượng  $m_i$  và tọa độ  $(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$  của các khớp được định nghĩa trong Hình 5, tọa độ của khối tâm (COM) được tính thông qua công thức (23), các thành phần gia tốc sử dụng phép tính xấp xỉ như công thức (24).



Hình 5. Phân bố khối lượng và tọa độ của các khớp.

$$\begin{cases} x_{COM} = \frac{\sum_{i=0}^{12} m_i P_{ix}}{\sum_{i=0}^{12} m_i} \\ y_{COM} = \frac{\sum_{i=0}^{12} m_i P_{iy}}{\sum_{i=0}^{12} m_i} \\ z_{COM} = \frac{\sum_{i=0}^{12} m_i P_{iz}}{\sum_{i=0}^{12} m_i} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \dot{P}_{ix}(t) = [P_{ix}(t) - P_{ix}(t-1)]/\Delta t; \ddot{P}_{ix}(t) = [\dot{P}_{ix}(t) - \dot{P}_{ix}(t-1)]/\Delta t; \\ \dot{P}_{iy}(t) = [P_{iy}(t) - P_{iy}(t-1)]/\Delta t; \ddot{P}_{iy}(t) = [\dot{P}_{iy}(t) - \dot{P}_{iy}(t-1)]/\Delta t; \\ \dot{P}_{iz}(t) = [P_{iz}(t) - P_{iz}(t-1)]/\Delta t; \ddot{P}_{iz}(t) = [\dot{P}_{iz}(t) - \dot{P}_{iz}(t-1)]/\Delta t; \end{cases} \quad (24)$$

Tọa độ  $\mathbf{P}_i(t) = [P_{ix}(t), P_{iy}(t), P_{iz}(t)]$  được xác định từ 12 góc quay  $[\theta_{11}(t), \theta_{12}(t), \theta_{13}(t), \theta_{21}(t), \theta_{22}(t), \theta_{23}(t), \theta_{31}(t), \theta_{32}(t), \theta_{33}(t), \theta_{41}(t), \theta_{42}(t), \theta_{43}(t)]$  ở 4 chân của robot nhện trong 2 chu kỳ bước đi, bằng cách giải bài toán động học thuận từng chân của robot nhện.

### 3.4. Tối ưu trọng số mạng nơ-ron trong mô hình NARX+EANN sử dụng thuật toán JAYA

Trong bài báo này, việc tối ưu véc-tơ trọng số  $\lambda$  (như công thức 3) của mạng nơ-ron trong mô hình NARX-EANN được xem như bài toán tối ưu với hàm mục tiêu như công thức (25).

$$\begin{cases} f(\lambda) = \sum_{k=1}^N (e_{x_{zmp}}^2(k) + e_{y_{zmp}}^2(k)) \\ e_{x_{zmp}} = x_{zmp_{ref}} - x_{zmp_{real}} \\ e_{y_{zmp}} = y_{zmp_{ref}} - y_{zmp_{real}} \end{cases} \quad (25)$$

Trong đó,  $(e_{x_{zmp}}, e_{y_{zmp}})$  là sai số giữa tọa độ ZMP tham chiếu và thực tế;  $N$  là số mẫu trong hai chu kỳ bước; Mẫu  $k$  được cập nhật với chu kỳ lấy mẫu là 0,01s.

Thuật toán Jaya được sử dụng để tìm véc-tơ trọng số  $\lambda$  sao cho hàm  $f$  đạt giá trị cực tiểu hay robot nhện sẽ bước đi theo quỹ đạo ZMP đã được thiết trong hai chu kỳ bước có tốc độ khác nhau. Việc sử dụng thuật toán Jaya là do thuật toán này chỉ có hai tham số lựa chọn (số cá thể trong một quần thể và số thế hệ). Bảng 2 trình bày thuật toán Jaya giải bài toán tối ưu này.

Bảng 2. Mã lập trình (pseudo-code) của thuật toán Jaya

- 1 Khởi tạo tham số của thuật toán Jaya:  $G$  là số thế hệ trong quá trình tiến hoá;  $NP$  là số cá thể trong một quần thể.
- 2 Khởi tạo một quần thể ngẫu nhiên có  $NP$  cá thể, mỗi cá thể  $X_i$  được đặc trưng bởi véc-tơ trọng số của mô hình mạng nơ-ron  $\lambda$  có  $D$  chiều (như công thức 15).
- 3 **Bắt đầu giải thuật**
- 4 Tính giá trị hàm mục tiêu của từng cá thể trong quần thể  $f(X_i)$  (như công thức 37), với  $i = 1 \dots NP$
- 5 Tìm cá thể tốt nhất  $X^{Best}$  và cá thể xấu nhất  $X^{Worst}$  trong quần thể.
- 6  $k = 1$
- 7 **Vòng lặp while** ( $k \leq G$ ) thực hiện
- 8 **Vòng lặp for**  $i = 1$  đến  $NP$
- 9 **Vòng lặp for**  $j = 1$  đến  $D$
- 10  $r_1 = rand(1)$ ;
- 11  $r_2 = rand(1)$ ;
- 12  $X_{j,k,i}^{new} = X_{j,k,i} + r_1 \times (X_{j,i}^{Best} - |X_{j,k,i}|) - r_2 \times (X_{j,i}^{Worst} - |X_{j,k,i}|)$
- 13 **Kết thúc vòng lặp for**
- 14 **Kiểm tra nếu**  $f(X_{j,k,i}^{new}) < f(X_{j,k,i})$
- 15  $X_{j,k,i} = X_{j,k,i}^{new}$
- 16 **Kết thúc kiểm tra**
- 17 **Kết thúc vòng lặp for**
- 18  $k = k + 1$
- 19 Update  $X^{Best}$  and  $X^{Worst}$
- 20 **Kết thúc vòng lặp while**
- 21 **Kết thúc**

## 4. Kết quả

Robot nhện B3-SBOT được sử dụng để kiểm chứng đề xuất của bài báo. Thông số vật lý của B3-SBOT được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Thông số vật lý của robot nhện B3-SBOT

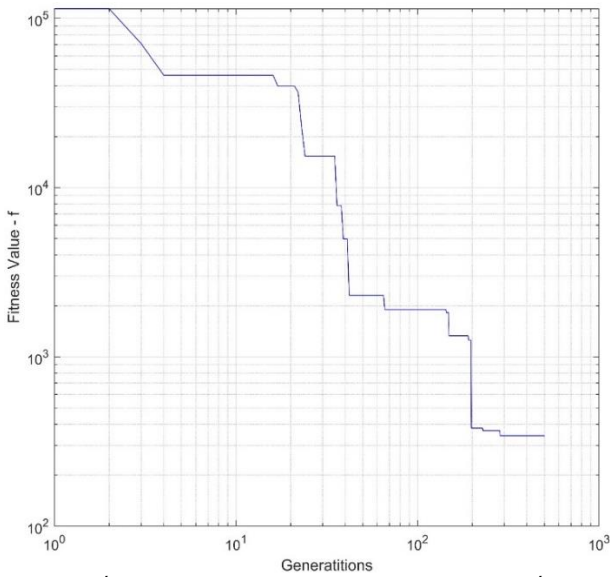
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
$l_1$	32 mm	$l$	100 mm
$l_2$	53 mm	$w$	100 mm
$l_3$	97 mm	$m_0$	13.4 gam
$T_0$	1s	$m_{1...12}$	89.2 gam

Để tìm véc-tơ trọng số  $\lambda$  tối ưu thỏa yêu cầu B3-SBOT thực hiện bước đi theo quỹ đạo ZMP đã được thiết trong hai chu kỳ bước có tốc độ khác nhau, thông số của mô hình mạng nơ-ron tiến hoá hồi quy phi tuyến được mô tả trong bảng 4. Kết quả mô phỏng được thực hiện trên nền tảng MATLAB 2023b chạy với CPU 2,49 GHz và RAM 8 GB.

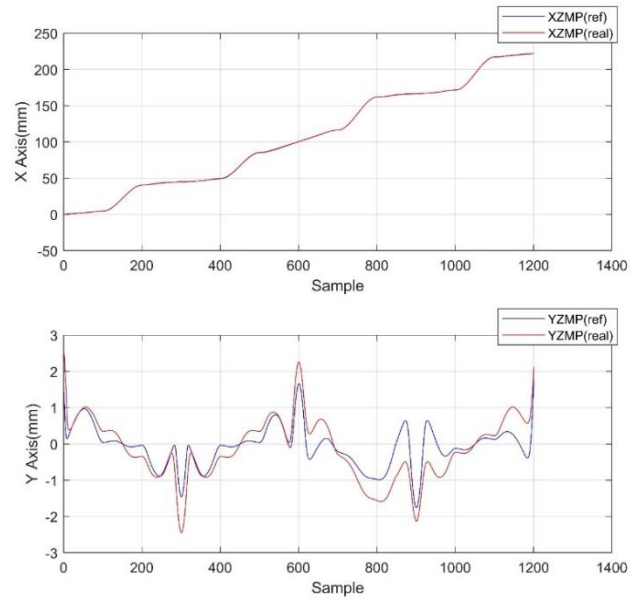
Bảng 4. Thông số của mô hình đề xuất

Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
$m$	4	$T$	2s
$n$	8	$N$	1201
$q$	8	$NP$	50
$F_i$	linear	$G$	200
$F_j$	sigmoid	$D$	112

Hình 6 minh họa tốc độ hội tụ của hàm mục tiêu trong quá trình huấn luyện. Hình 7 cho thấy kết quả so sánh giữa quỹ đạo ZMP mong muốn với quỹ đạo ZMP thực tế. Bảng 5 trình bày giá trị trọng số tối ưu của mô hình NARX+EANN. Hình 8 trình bày 12 giá trị góc quay của các khớp ở 4 chân robot nhện B3-SBOT trong hai chu kỳ bước.



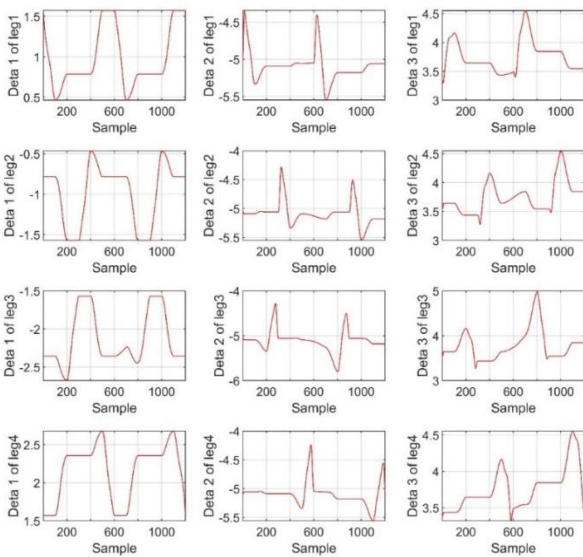
Hình 6. Tốc độ hội tụ của hàm mục tiêu  $f$  trong quá trình huấn luyện



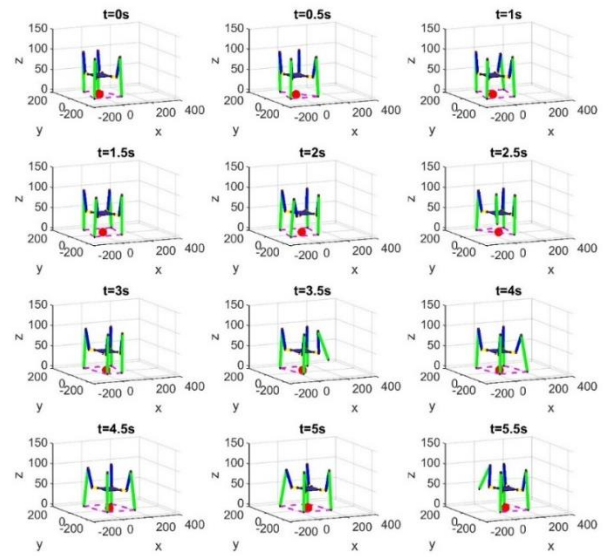
Hình 7. So sánh quỹ đạo ZMP mong muốn với quỹ đạo ZMP thực tế

Bảng 5. Giá trị trọng số tối ưu của mô hình NARX+EANN

		$j$	1	2	3	4	5	6	7	8
		$i$								
$v_{ij}$	1	1	5.826	11.888	12.753	14.213	15.546	8.466	12.891	12.998
		2	13.461	6.756	10.478	13.594	16.830	3.859	7.997	14.658
		3	8.676	11.377	12.760	4.989	14.215	13.470	14.036	7.395
		4	15.781	-4.140	13.452	14.467	10.768	-8.176	10.228	-5.323
$b_0$			16.960	4.007	14.056	12.651	4.393	2.583	4.394	14.297
$w_{ij}$	1	1	15.142	14.838	14.972	15.685	7.423	14.181	18.353	10.521
		2	8.051	17.099	19.357	-7.506	9.908	4.575	15.335	9.824
		3	17.406	5.359	11.799	15.569	11.202	9.786	15.752	11.065
		4	9.738	10.045	-1.836	11.542	16.534	5.280	14.545	10.299
		5	2.007	-5.441	11.478	12.048	18.795	-2.924	10.332	7.468
		6	5.901	8.205	11.179	-2.635	15.438	10.862	15.384	1.293
		7	5.251	3.009	4.615	-6.402	8.236	11.141	-0.296	16.592
		8	8.393	-16.697	-8.136	9.677	8.688	-4.979	13.832	10.036
$b_h$			18.000	-2.265	12.962	17.742	14.788	7.687	10.318	5.919

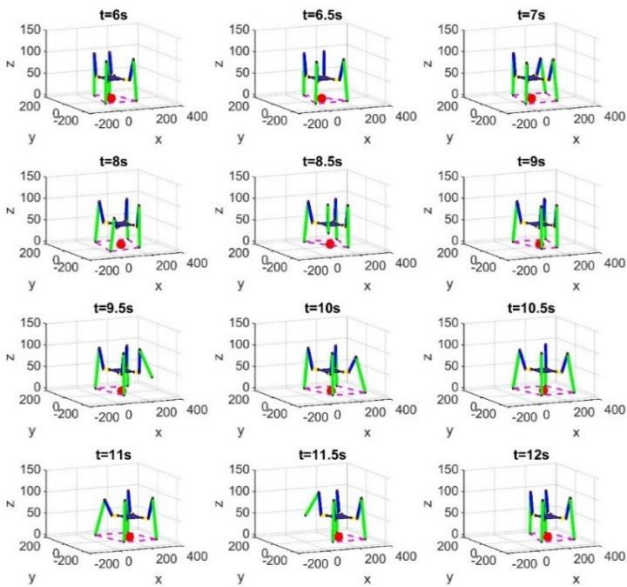


Hình 8. Mẫu đi bộ trong 2 chu kỳ bước của robot nhện B3-SBOT.

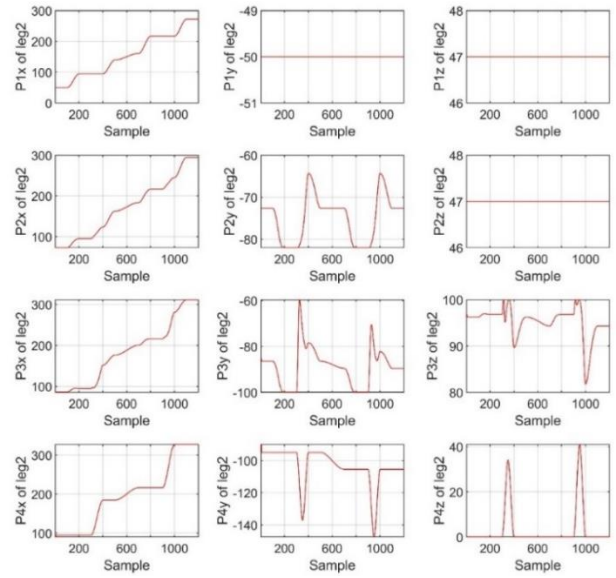


Hình 9a. Dáng 3D của B3-SBOT trong chu kỳ bước thứ 1.

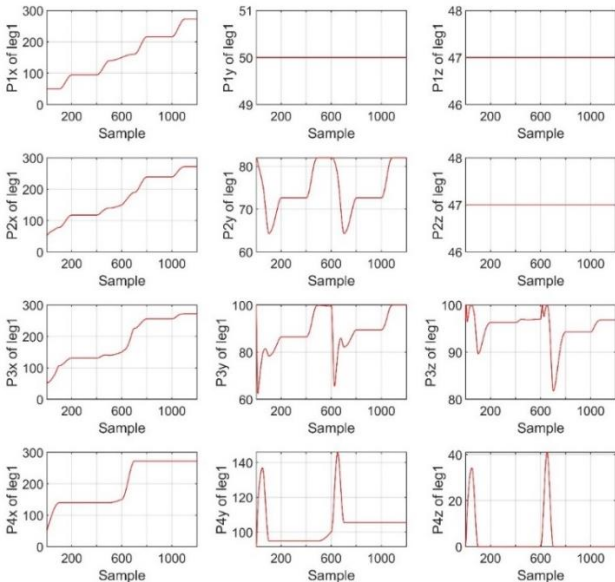




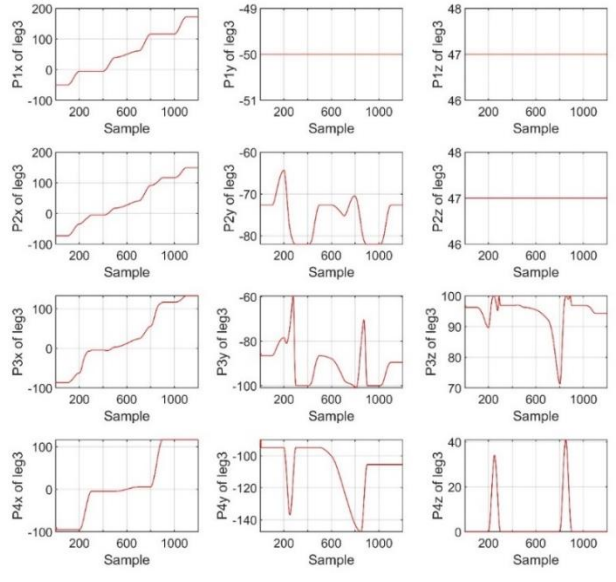
Hình 9b. Dáng đi 3D của B3-SBOT trong chu kỳ bước thứ 2.



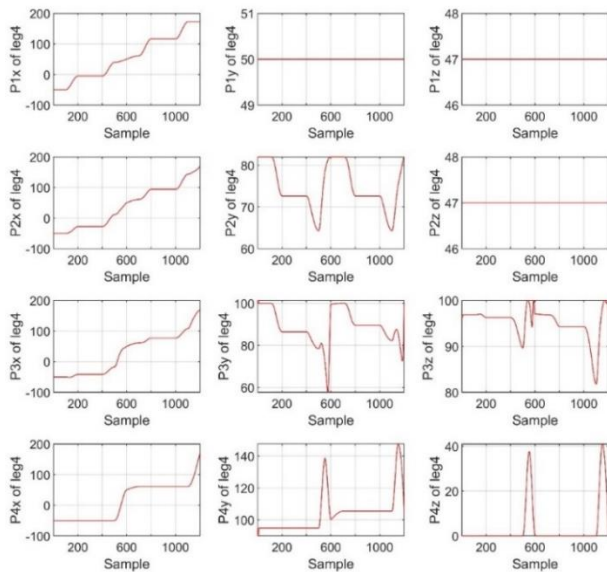
Hình 11. Quỹ đạo vị trí các khớp ở chân 2.



Hình 10. Quỹ đạo vị trí các khớp ở chân 1.



Hình 12. Quỹ đạo vị trí các khớp ở chân 3.



Hình 13. Quỹ đạo vị trí các khớp ở chân 4.

Sử dụng mẫu đi bộ trong hình 8, thực hiện mô phỏng dáng và khảo sát quỹ đạo quỹ đạo ZMP trong 2 chu kỳ bước của B3-SBOT. Hình 9a-b minh họa dáng đi 3D trong hai chu kỳ bước (ký hiệu \* màu đỏ là điểm ZMP), hình 10 – 11 – 12 – 13 minh họa quỹ đạo vị trí các khớp ở mỗi chân. Độc giả có thể xem video mô phỏng dáng đi 3D của robot nhện B3-SBOT tại link: <https://youtu.be/RdpA1M7Amy4>

Từ hình 9a-b và video mô phỏng dáng đi (Video mô phỏng dáng đi đề xuất), cho thấy quỹ đạo ZMP luôn nằm trong diện tích vùng chân trụ khi robot nhện B3-SBOT bước đi. Điều này khẳng định giải pháp đề xuất trong bài báo là khả thi.

### 5. Kết luận

Bài báo đề xuất phương pháp cho việc tạo mẫu dáng đi (WPG) ổn định để robot nhện bước đi thẳng bám theo quỹ đạo ZMP tham chiếu được thiết kế trong hai chu kỳ bước với hai tốc độ khác nhau, lần đầu tiên được áp dụng cho robot nhện kích

thước nhỏ B3-SBOT. Mô hình mạng nơ-rôn tiến hoá hồi quy phi tuyến (NARX+EANN) được thiết kế để nhận dạng các tham số dáng đi của robot nhện và cấp cho bộ tạo mẫu đi bộ (WPG). Bộ tạo mẫu đi bộ (WPG) phụ thuộc vào bốn tham số (chiều dài bước, độ nhấc chân, độ khụy gối, độ sải chân) của robot nhện kích thước nhỏ được thiết kế để tạo ra quỹ đạo cho các góc khớp ở bốn chân của robot nhện, bằng cách dựa vào phân tích dáng đi thực tế của robot nhện. Thuật toán tối ưu Jaya được sử dụng để huấn luyện trọng số của mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa (EANN) với hàm mục tiêu là cực tiểu hoá tổng của sai số giữa ZMP thực tế với ZMP tham chiếu trong hai chu bước có hai tốc độ khác nhau. Kết quả mô phỏng, chứng minh bộ tạo mẫu dáng đi (WPG) được đề xuất cho phép B3-SBOT bước đi vững chắc và mạnh mẽ mà không ngã. Trong bài báo này, bộ phát dáng cho robot nhện di chuyển trên địa hình bằng phẳng có thể được nâng cao để cải thiện khả năng thích nghi với địa hình không bằng phẳng dựa trên nền tảng có thể thay đổi các thông số dáng đi trong quá trình di chuyển.

## Acknowledgement

We acknowledge Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), VNU-HCM for supporting this study. This research is funded by Vietnam National Foundation for Science and Technology Development (NAFOSTED) under grant number 107.01-2021.22.

## References

- [1] T. J. Stone, D. S. Cook, and B. L. Luk, "Robug III - the design of an eight legged teleoperated walking and climbing robot for disordered hazardous environments", *Mechanical Incorporated Engineer*, 7(2):37–41, 1995.
- [2] F. Pfeiffer, T. Rossmann, N. Bolotnik, F. Chernousko, and G. Kostin, "Simulation and optimization of regular motions of a tube-crawling robot", *Multibody System Dynamics*, 5:159–184, 2001.
- [3] J. Savall, A. Avello, and L. Briones. Two compact robots for remote inspection of hazardous areas in nuclear power plants. *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1993–1998, 1999.
- [4] Venkata Naga Tanuja G, " Four-legged Spider Robot to Walk Over and Clean Vertical Glass Surfaces, *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET)*, Print ISSN: 2395-1990, Online ISSN: 2394-4099, Volume 9, Issue 1, pp.289-297, March-April-2021.
- [5] Y. Oh and J. -H. Kim, "System Design and Implementation of Multi-legged Spider Robots for Landmine Detection in the Demilitarized Zone," *in 2021 18th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, Gangneung, Korea (South), 2021, pp. 228-234
- [6] Richa Watiasih, Galuh Widia Rohman, Prihatsono, Ahmadi, "Gait Control Applications On Four Legged Robot", *Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 6, No 2, December 2021.
- [7] McGhee R and Frank A, "On the stability properties of quadruped creeping gaits", *Mathematical Biosciences*, 3:331–351, 1968.
- [8] Ahmed, "A Novel Navigation Algorithm for Hexagonal Hexapod Robot," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 320–327, 2010.
- [9] U. Asif and J. Iqbal, "On improvement of multi-legged locomotion over difficult terrains using a balance stabilization method," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 9, pp. 1–13, 2012.
- [10] Ljung L (1999) System identification: theory for the user, 2nd edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [11] Son, N.N., Anh, H.P.H. & Chau, T.D, "Adaptive neural model optimized by modified differential evolution for identifying 5-DOF robot manipulator dynamic system", *Soft Comput* 22, 979–988, 2018.
- [12] Rao RV. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *Int J Ind Eng Comput* 2016;7:19–34.
- [13] Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuji Kajita, Kenji Kaneko, Hirohiko Arai, Noriho Koyachi and Kazuo Tanie, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp 280-289, 2001.
- [14] C. L. Shih, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee and W. A. Gruver, "Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single-support phase," in *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990, pp. 1646-1652
- [15] Khomariah, Nuril Esti; Huda, Samsul. Walking Pattern for Quadruped as Observer Robot. *In: Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019. p. 012010.