

Tối ưu hóa dáng đi ổn định cho robot dạng người kích thước nhỏ sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến

Stable Gait Optimization for Small-Sized Humanoid Robot Using Modified Differential Evolution Algorithm

Trần Thiện Huân¹, Hồ Phạm Huy Ánh²

¹ĐH Sư phạm kỹ thuật TPHCM, ²ĐH Bách khoa - ĐH Quốc gia TPHCM

Email: hphanh@hcmut.edu.vn

Abstract

The design of humanoid robot gaits is to make the robot walk naturally and save consumed energy. Up to now it is still a difficult problem since the current technology has not yet reached the biological objects that are extremely complex in terms of structure and sophisticated in operation. The paper proposes a new method to optimize the gait design for humanoid robots that allows stable walking with pre-set foot lifting magnitude. Modified Differential Evolution algorithm is applied to optimize the gait parameters to help humanoid robot walk steadily. The efficiency of the proposed method is compared with the GA and PSO algorithm. The simulated and experimental results carried out on the *small-sized humanoid robot* (HUBOT-5) prove that the proposed algorithm offers an efficient and stable gait for humanoid robots with accurate height lifting magnitude.

Keywords

Humanoids robot, gait optimization, modified differential evolution algorithm, particle swarm optimization, genetic algorithm, zero moment point, inverse kinematics, forward kinematics

Tóm tắt¹

Hoạch định dáng đi của robot dạng người nhằm làm cho robot đi được một cách tự nhiên và tiết kiệm năng lượng tiêu thụ. Cho đến nay đây 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 tính vi trong hoạt động. Bài báo này đề xuất phương pháp mới tối ưu hóa một số thông số dáng đi cho robot dạng người cho phép bước đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước. Thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE) được sử dụng để tối ưu các thông số dáng đi giúp robot dạng người bước đi ổn định. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được so sánh với kỹ thuật tối ưu dáng đi dùng thuật toán di truyền (GA) và thuật toán bầy đàn (PSO). Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên *robot dạng người kích thước nhỏ* chứng tỏ thuật toán đề xuất bảo đảm dáng đi ổn định cho robot dạng người với độ nhấc chân chính xác.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
d_i	cm	Chiều dài giữa các khớp
m_i	gam	Khối lượng các khâu
θ_i	rad	Các góc quay ở 2 chân
S, H, h, n	cm	Các tham số dáng đi
$P_i(x, y, z)$	cm	Tọa độ các khớp

Chữ viết tắt

MDE	Modified Differential Evolution
GA	Genetic Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
ZMP	Zero Moment Point
BTD	Bậc Tự Do

1. Giới thiệu

Bước đi của người luôn ẩn chứa nhiều bí ẩn mà cho đến nay các mẫu robot dạng người đi bằng hai chân vẫn chưa thể hiện hết được. Chính vì thế, các nghiên cứu dành cho cơ chế bước đi của robot dạng người đang được phát triển theo nhiều hướng khác nhau. Một số tiêu chuẩn đã được áp dụng cho robot dạng người để bảo đảm bước đi ổn định và tự nhiên. Bước đi tĩnh (*static walking*) là nguyên lý được áp dụng đầu tiên, trong đó hình chiếu thẳng đứng của khối tâm (CoM - *center of mass*) xuống mặt đất luôn nằm trong lòng bàn chân chống (*supporting foot*); nói cách khác, robot dạng người có thể dừng lại tại mọi thời điểm lúc bước đi mà không bị ngã. Với bản chất đơn giản, nguyên lý này áp dụng hiệu quả cho robot dạng người có tốc độ đi chậm, qua đó các hiệu ứng động lực học có thể bỏ qua [1-2]. Sau đó, các nhà nghiên cứu bắt đầu tập trung phát triển bước đi động (*dynamic walking*) [3]. Phương pháp này cho phép robot dạng người đạt tốc độ bước đi nhanh hơn. Tuy nhiên, trong quá trình robot dạng người thực hiện bước đi động, robot có thể bị ngã do ảnh hưởng của nhiễu môi trường và không thể dừng đột ngột. Vì vậy, bước đi dựa trên nguyên lý ZMP (*ZMP-based walking*) được đề xuất [4-5].

¹ Ngày nhận bài: 16/03/2018; Ngày nhận bản sửa: 15/05/2018; Ngày chấp nhận: 06/06/2018; Phản biện: Lê Hoài Quốc, Đào Văn Hiệp

Gần đây, một số nghiên cứu tập trung cải thiện hiệu quả cho dáng đi của robot dạng người. Huang trong [6] giới thiệu dáng đi ổn định sử dụng bộ phát dáng đi dùng hàm nội suy. Phương pháp này được D. Huan phát triển, thông qua thuật toán GA, để tối ưu bộ phát dáng đi giúp robot dạng người bước đi ổn định với năng lượng tiêu hao ít [7]. Dip và cộng sự [8] giới thiệu dáng đi ổn định với vận tốc không đổi sử dụng bộ phát dáng đi hàm sin. Các thuật toán được áp dụng trong phương pháp này để tối ưu bộ phát dáng đi cho robot dạng người như thuật toán di truyền (GA) [8], thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) [9]. Shaffi trong [10] giới thiệu robot dạng người đạt dáng đi bền vững nhờ sử dụng bộ phát dáng đi dùng chuỗi Fourier. Phương pháp này sử dụng các thuật toán để phát triển bộ phát dáng đi cho robot dạng người, như thuật toán tối ưu đàn ong [11], bộ điều khiển T-S mờ [12], thuật toán tính toán tiến hóa [13]. Đặc biệt, theo hiểu biết của chúng tôi thì tiềm năng rất mạnh của giải thuật tiến hóa vi sai (*Differential Evolution* – DE [15]) cho đến nay vẫn chưa được áp dụng để tối ưu bộ phát dáng đi cho robot dạng người theo hướng Dip[8]. Son và cộng sự [16-17] đề xuất thuật toán MDE dựa trên DE ban đầu sử dụng hiệu quả trong việc xác định thông số của hệ thống MIMO với tốc độ tính toán nhanh và khả năng thoát khỏi cực trị cục bộ.

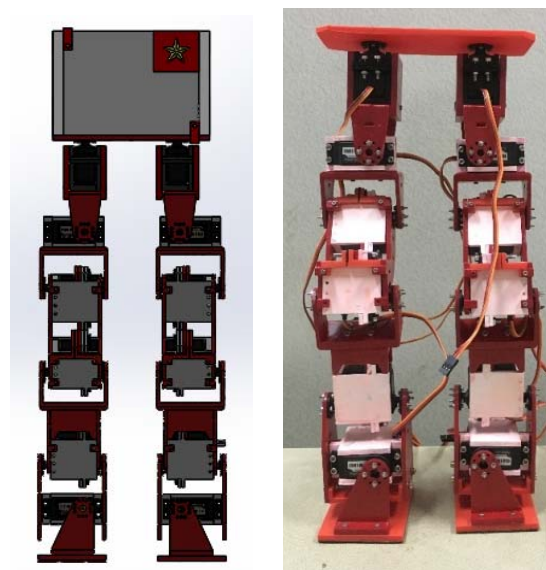
Dựa trên các kết quả đã đề cập ở trên, bài báo đề xuất bộ phát dáng đi cho robot dạng người dựa vào thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (*MDE-Modified Differential Evolution* [16,17]), dựa theo phương pháp bước đi động, và sử dụng tiêu chuẩn ZMP [18] để duy trì sự ổn định. Thuật toán MDE cho phép thu được kết quả tốt liên quan đến tính chắc chắn, khả năng hội tụ cao, giá trị hàm mục tiêu tối thiểu thấp và đạt hiệu quả cao hơn so với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO) và thuật toán di truyền (GA).

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy sử dụng thuật toán MDE cho phép tối ưu hóa các tham số dáng đi để robot dạng người đạt dáng đi ổn định với độ nhấc chân chính xác. Mô hình robot dạng người kích thước nhỏ (HUBOT-5) được dùng để kiểm chứng các kết quả thông qua thực nghiệm.

2. Mô hình robot dạng người

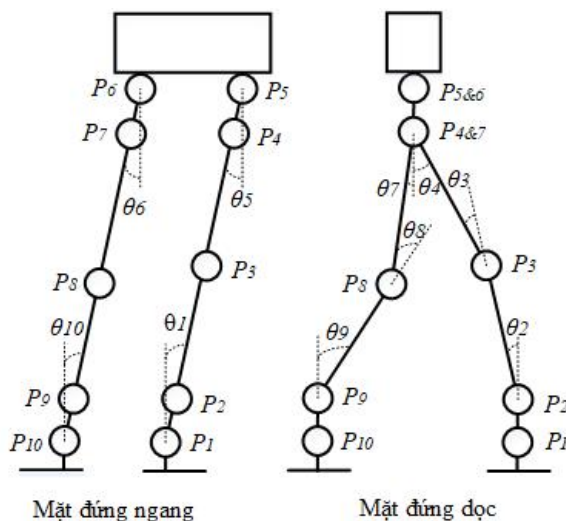
Robot dạng người kích thước nhỏ (HUBOT-5) có thân trên và hai chân như mô tả trong H. 1. Mỗi chân có khâu đùi, khâu cẳng chân, khâu bàn chân với tổng cộng 6 bậc tự do (BTD) gồm 3 BTD ở khớp hông, 1 BTD ở khớp gối và 2 BTD ở khớp cổ chân. HUBOT-5 có thể bắt chước động tác đi bộ của con người theo mặt đứng ngang (*YZ-Frontal View*) và mặt đứng dọc (*XZ-Sagittal View*). Tổng khối lượng của HUBOT-5 khoảng 1,5 kg (gồm thiết bị truyền động, cảm biến, bộ điều khiển và khuếch đại) và cao khoảng 50cm. HUBOT-5 được thiết kế đảm bảo cấu trúc động học đầy đủ, mỗi BTD tương ứng với 1 bộ truyền động độc lập. Động cơ Servo DC loại HD-1501 của hãng Power HD (www.chd.hk) được sử dụng làm phần tử truyền động. Ưu thế nổi bật của động cơ HD-1501 là nhỏ gọn và nhẹ (60 gam) với momen xoắn cao (1.7 N.cm).

Tín hiệu điều khiển động cơ servo được gửi từ Vi điều khiển Arduino.



H.1 Hình ảnh mô tả robot người HUBOT-5 với 12 (BTD)

Nghiên cứu này quan tâm đến bài toán điều khiển robot dạng người bước đi thẳng nên thân trên của robot người được giữ cố định và chỉ điều khiển thân dưới có 10 động cơ ở hai chân với 10 góc quay tương đối $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10})$ được định nghĩa như trong H. 2. Vị trí của các khớp $(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10})$ cũng được định nghĩa như trong H. 2.



H.2 Mô hình kết cấu robot người HUBOT-5

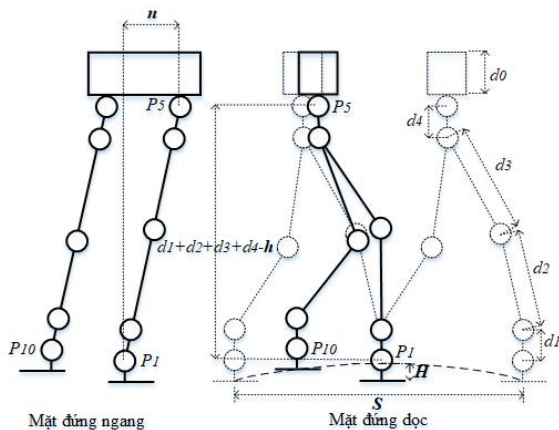
Tầm giới hạn của 10 góc quay được xác định dựa trên khả năng thực tế của HUBOT-5 như trình bày chi tiết trong bảng B.1.

B.1 Giới hạn góc quay

Góc	Mặt phẳng	Chân	Khớp	Giá trị
θ_1	YZ	Phải	Cổ chân	-20° to 20°
θ_2	XZ	Phải	Cổ chân	-30° to 30°
θ_3	XZ	Phải	Gối	-30° to 30°
θ_4	XZ	Phải	Hông	-30° to 30°
θ_5	YZ	Phải	Hông	-20° to 20°
θ_6	YZ	Trái	Hông	-20° to 20°
θ_7	XZ	Trái	Hông	-30° to 30°
θ_8	XZ	Trái	Gối	-30° to 30°
θ_9	XZ	Trái	Cổ chân	-30° to 30°
θ_{10}	YZ	Trái	Cổ chân	-20° to 20°

3. Quy hoạch dáng đi cho robot dạng người HUBOT-5

Bốn tham số quan trọng của robot dạng người giúp bước đi ổn định bao gồm S -chiều dài bước chân [cm], H -độ nhắc chân [cm], h -độ khuyu gối [cm] và n -độ lắc hông [cm] được minh họa trong H. 3. Trong đó, d_0 là chiều dài thân trên, d_1 là khoảng cách giữa 2 điểm P_1 và P_2 , d_2 là khoảng cách giữa 2 điểm P_2 và P_3 , d_3 là khoảng cách giữa 2 điểm P_3 và P_4 , d_4 là khoảng cách giữa 2 điểm P_4 và P_5 .



H.3 Bốn tham số ảnh hưởng đến dáng đi robot người HUBOT-5

Như chỉ ra trong hình H. 3, quỹ đạo hông $P_5 = [P_{5x}, P_{5y}, P_{5z}]$ và quỹ đạo cổ chân $P_1 = [P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}]$ của chân trụ, quỹ đạo cổ chân $P_{10} = [P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]$ của chân di chuyển sẽ phụ thuộc vào 4 tham số (S, H, h, n) trong cả mặt đứng ngang (YZ-Frontal View) và mặt đứng dọc (XZ-Sagittal View) [8]. Quỹ đạo P_1, P_5, P_{10} là những hàm phụ thuộc thời gian và có dạng sin, thể hiện qua các công thức (1), (2) và (3) (xem thêm ở [14]).

$$\begin{cases} P_{1x}(t) = \frac{S}{2} \sin\left[\frac{\pi}{T} \cdot \left(t - \frac{T}{2}\right)\right] \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \\ P_{1y}(t) = w \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \\ P_{1z}(t) = H \sin\left[\pi \cdot \left(\frac{P_{1x}(t)}{S} + 0.5\right)\right] \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{10x}(t) = \frac{S}{2} \sin\left[\frac{\pi}{T} \cdot \left(t - \frac{T}{2}\right)\right] \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ P_{10y}(t) = -w \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ P_{10z}(t) = H \sin\left[\pi \cdot \left(\frac{P_{10x}(t)}{S} + 0.5\right)\right] \cdot [u(t) - u(t-T)] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{5x}(t) = \frac{S}{4} \sin\left(\frac{\pi}{T} \cdot \left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right) \\ P_{5y_first_half_cycle}(\tau) = n \sin\left(\frac{\pi}{T} \tau\right) \cdot \left[u(\tau) - u\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right] \\ \quad + n \cos\left(\frac{\pi}{T} \left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right) \cdot \left[u\left(\tau - \frac{T}{2}\right) - u(\tau - T)\right] \\ P_{5y}(t) = P_{5y_first_half_cycle}(t) \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ \quad - P_{5y_first_half_cycle}(t) \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \\ P_{6z}(t) = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 - h) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: T là thời gian thực hiện 1 bước đi của robot dạng người, w là khoảng cách giữa 2 chân, h độ khuyu gối

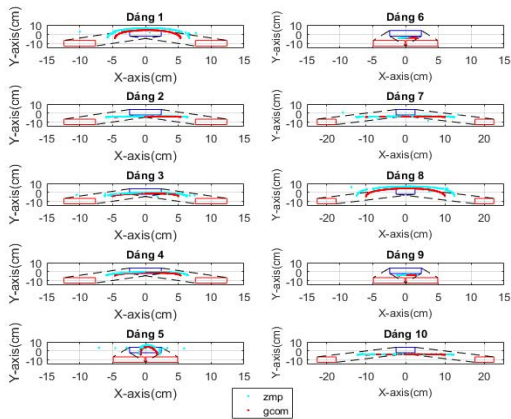
$$\tau = \begin{cases} t & \text{nếu } 0 \leq t \leq T \\ t - T & \text{nếu } t > T \end{cases}, u(t) = \begin{cases} 0 & \text{nếu } t < 0 \\ 1 & \text{nếu } t \geq 0 \end{cases}$$

Dựa vào các công thức (1-2-3), quỹ đạo hông và quỹ đạo cổ chân của chân trụ, quỹ đạo cổ chân của chân di chuyển được sử dụng để tạo dáng khi đi cho robot dạng người.

Vai trò của 4 tham số (S, H, h, n) ảnh hưởng đến độ ổn định được thực hiện như sau: 10 bộ tham số dáng đi được chọn như B.2, sau đó tìm quỹ đạo ZMP trong 1 chu kỳ tương ứng với từng bộ tham số. H. 4 minh họa 10 quỹ đạo ZMP và GCoM (hình chiếu CoM xuống mặt đất) tương ứng với 10 dáng trong B.2.

B.2 Thông số của 10 dáng đi

Dáng	S (mm)	H (mm)	h (mm)	n (mm)
1	200	60	15	150
2	200	60	15	10
3	200	60	6	50
4	200	60	15	50
5	50	60	15	150
6	50	60	15	10
7	400	60	10	10
8	400	60	15	150
9	50	30	6	10
10	400	10	6	10



H.4 10 quỹ đạo GCoM và ZMP

Cuối cùng, quỹ đạo của 10 góc quay ở 2 chân robot dạng người trong 1 chu kỳ bước đi có thể xác định dựa vào $P_1 = [P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}]$, $P_5 = [P_{5x}, P_{5y}, P_{5z}]$ và $P_{10} = [P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]$. Bài toán động học ngược robot dạng người có thể được giải bằng phương pháp giải tích hoặc phương pháp số hoặc phương pháp hình học. 10 góc khớp quay ở 2 chân của robot dạng người HUBOT-5 được xác định như công thức (4).

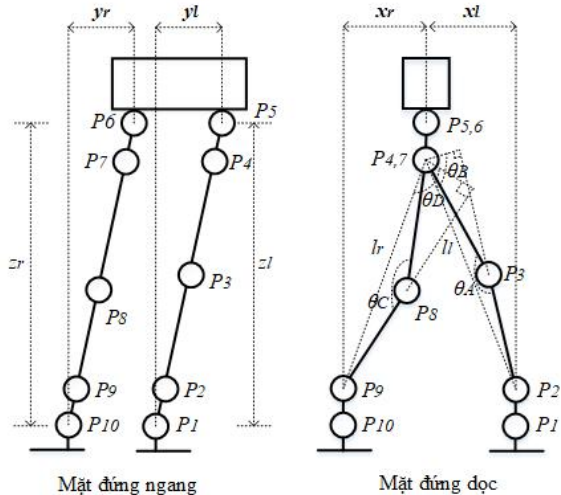
$$\begin{cases} \theta_1(t) = \arctan\left(\frac{y_l(t)}{z_l(t)}\right), & \theta_5(t) = -\theta_1(t) \\ \theta_{10}(t) = \arctan\left(\frac{y_r(t)}{z_r(t)}\right), & \theta_6(t) = -\theta_{10}(t) \\ \theta_3(t) = \pi - \theta_A(t), & \theta_8(t) = \pi - \theta_C(t) \\ \theta_4(t) = \frac{\pi}{2} - \theta_A(t) + \theta_B(t) - \arcsin\left(\frac{x_l(t)}{l_l(t)}\right) \\ \theta_7(t) = \frac{\pi}{2} - \theta_C(t) + \theta_D(t) - \arcsin\left(\frac{x_r(t)}{l_r(t)}\right) \\ \theta_2(t) = \theta_3(t) - \theta_4(t), & \theta_{11}(t) = \theta_9(t) - \theta_7(t) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:

$$y_l(t), z_l(t), y_r(t), z_r(t), \theta_A(t), \theta_B(t) \\ \theta_C(t), \theta_D(t), x_l(t), x_r(t), l_l(t), l_r(t)$$

tại thời điểm t xác định, được định nghĩa như H. 5 và công thức (5). Lưu ý, l_l là khoảng cách giữa P_2 và P_4 , trong khi l_r là khoảng cách giữa P_9 và P_7 .

$$\begin{cases} x_l = P_{5x} - P_{1x}, & y_l = P_{5y} - P_{1y}, & z_l = P_{5z} - P_{1z} \\ l_l = \sqrt{(P_{4x} - P_{2x})^2 + (P_{4y} - P_{2y})^2 + (P_{4z} - P_{2z})^2} \\ x_r = P_{6x} - P_{10x}, & y_r = P_{6y} - P_{10y}, & z_r = P_{6z} - P_{10z} \\ l_r = \sqrt{(P_{7x} - P_{9x})^2 + (P_{7y} - P_{9y})^2 + (P_{7z} - P_{9z})^2} \\ \theta_A = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_l^2}{2d_2d_3}\right), & \theta_B = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_A)}{l_l}\right) \\ \theta_C = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_r^2}{2d_2d_3}\right), & \theta_D = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_C)}{l_r}\right) \end{cases} \quad (5)$$



H.5 Định nghĩa các biến trong công thức (4)

Trong đó: d_1, d_2, d_3 và d_4 được minh họa trong H. 3. Toạ độ $P_6(x,y,z)$ được tính dựa vào $P_5(x,y,z)$, còn toạ độ $[P_2(x,y,z), P_4(x,y,z), P_7(x,y,z), P_9(x,y,z)]$ được tính dựa vào $[P_1(x,y,z), P_5(x,y,z), P_6(x,y,z), P_{10}(x,y,z)]$ và các góc quay $[\theta_1, \theta_5, \theta_6, \theta_{10}]$. Công thức (6) dưới đây được sử dụng để tính P_2, P_4, P_6, P_7, P_9 .

$$\begin{cases} P_{2x} = P_{1x}, & P_{2z} = d_1 \cos(\theta_1), & P_{2y} = P_{2z} \sin(\theta_1), \\ P_{4x} = P_{5x}, & P_{4z} = P_{5z} - d_4 \cos(\theta_1), \\ P_{4y} = P_{5y} - (P_{5z} - P_{4z}) \sin(\theta_1), \\ P_{6x} = P_{5x}, & P_{6y} = P_{5y} - w, & P_{6z} = P_{5z}, \\ P_{7x} = P_{6x}, & P_{7z} = P_{6z} - d_4 \cos(\theta_{10}), \\ P_{7y} = P_{6y} - (P_{6z} - P_{7z}) \sin(\theta_{10}), \\ P_{9x} = P_{10x}, & P_{9z} = P_{10z} + d_4 \cos(\theta_{10}), \\ P_{9y} = P_{10y} + (P_{9z} - P_{10z}) \sin(\theta_{10}). \end{cases} \quad (6)$$

Dựa vào các công thức (4-5-6), 10 quỹ đạo góc quay ở hai chân của robot dạng người HUBOT-5 trong 1 chu kỳ bước đi được sử dụng để điều khiển bước đi.

Như vậy bộ bốn tham số H, h, s và n cần được lựa chọn sao cho robot dạng người có thể bước đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước. Bài báo sử dụng giải thuật tiến hóa vi sai cải tiến (MDE-Modified Differential Evolution) để giải quyết thỏa đáng yêu cầu trên.

4. Tối ưu tham số đáng đi sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai MDE

4.1 Giải thuật MDE

Thuật toán MDE được phát triển dựa trên thuật toán DE trong [15] do Storn và Price đề xuất vào năm 1997. Thuật toán DE gồm 5 bước như sau: khởi tạo, đột biến, lai ghép, chọn lọc, hội tụ. Mã code thực hiện thuật toán tiến hóa vi sai cơ bản được mô tả như B.3.

B.3 Pseudo-code of DE

```

1. Begin
2. Initialization
3. Evaluation
4. For  $G=1$  to  $GEN$  do
5.   For  $i=1$  to  $NP$  do
6.      $j_{rand} = \text{randint}(1, D)$ 
7.     Select randomly  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ 
8.     For  $j=1$  to  $D$  do
9.       If  $\text{rand}[0,1] < CR$  or  $j = j_{rand}$ 
10.         $u_{i,j,G+1} = x_{r1j,G} + F \times (x_{r2j,G} - x_{r3j,G})$ 
11.      Else
12.         $u_{i,j,G+1} = x_{ij,G}$ 
13.      End if
14.    End for
15.    If  $f(\vec{U}_{i,G+1}) \leq f(\vec{X}_{i,G})$  then
16.       $\vec{X}_{i,G+1} = \vec{U}_{i,G+1}$ 
17.    Else
18.       $\vec{X}_{i,G+1} = \vec{X}_{i,G}$ 
19.    End if
20.  End for
21. End for
22. End

```

Đột biến đóng vai trò quan trọng trong khả năng tìm kiếm và tốc độ hội tụ của DE. Có bốn 4 kiểu đột biến đã được giới thiệu cho DE với các mục đích khác nhau. Ví dụ, với các kiểu đột biến rand/1, DE tìm kiếm toàn cục rất mạnh nhưng yếu trong tìm kiếm cục bộ phương. Sau đó, hội tụ với kết quả tối ưu toàn cục. Đối với kiểu đột biến best/1, DE tìm kiếm cục bộ rất tốt, nhưng bị hạn chế khi tìm kiếm toàn cục. Do đó, dễ dàng rơi vào các kết quả tối ưu cục bộ [21]. Dựa trên các phân tích trên, Sơn và đồng nghiệp đã đề xuất MDE cải tiến [16-17] như sau: đột biến của DE được sửa đổi bằng cách kết hợp hai kiểu đột biến rand/1 và best/1 với nhau để tạo vector đột biến thay vì chỉ sử dụng một kiểu đột biến hoặc rand/1 hoặc best/1 như DE cơ bản. Cải tiến này nhằm mục đích cân bằng giữa thăm dò toàn cục và khả năng tìm kiếm cục bộ. Kiểu đột biến mới được mô tả như sau:

```

If  $\text{rand}[0,1] > 0.3$ 
 $v_i = x_{r_1} + F(x_{r_2} - x_{r_3})$  % use "rand / 1"
else
 $v_i = x_{best} + F(x_{r_1} - x_{r_2})$  % use "best / 1"

```

End

Từ cơ chế trên, có thể nhận ra rằng đối với mỗi vector đột biến, chỉ một trong hai kiểu đột biến được áp dụng, tùy thuộc vào giá trị ngẫu nhiên được phân bố đều trong phạm vi [0,1]. Đối với mỗi vector đột biến, nếu giá trị ngẫu nhiên lớn hơn 0.3, thì rand/1 được thực hiện. Ngược lại, best/1 được thực hiện. Do đó, bất kỳ một véc-tơ mẹ ở thế hệ hiện tại thì một véc-tơ đột biến tương ứng luôn thực hiện chiến lược đã đề xuất để có cơ hội nâng cao khả năng thăm dò toàn cục và khai thác cục bộ.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi nhận ra rằng tỷ lệ 0,7 / 0,3 cho rand/1 và best/1 là một giá trị cân bằng tốt cho cả thăm dò toàn cục và khả năng khai thác cục bộ. Hệ số đột biến (F) và xác suất lai ghép (CR) không cố định như trong tiêu chuẩn DE, chúng được tạo ngẫu nhiên trong phạm vi [0.4, 1] và [0.7, 1], tương ứng. Các tham số này được giới thiệu từ [22] để cải thiện khả năng tìm kiếm của MDE-BP theo nhiều hướng tìm kiếm khác nhau.

Mã code của MDE được phát triển bởi Sơn và đồng nghiệp trong [16-17] được mô tả trong bảng B.4.

B.4 Pseudo-code of giải thuật tiến hóa vi sai cải tiến MDE

```

1. Begin
2. Initialization
3. Evaluation
4. For  $G=1$  to  $GEN$  do
5.   For  $i=1$  to  $NP$  do
6.      $j_{rand} = \text{randint}(1, D)$ 
7.      $F = \text{rand}[0:4; 1:0]$ ,  $CR = \text{rand}[0:7; 1:0]$ 
8.     For  $j=1$  to  $D$  do
9.       If  $\text{rand}[0,1] < CR$  or  $j = j_{rand}$  then
10.        If  $\text{rand}[0,1] > \text{threshold}$  then
11.          Select randomly  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ 
12.           $u_{i,j,G+1} = x_{r1j,G} + F(x_{r2j,G} - x_{r3j,G})$ 
13.        Else
14.          Select randomly  $r_1 \neq r_2 \neq best \neq i$ 
15.           $u_{i,j,G+1} = x_{bestj,G} + F(x_{r1j,G} - x_{r2j,G})$ 
16.        End if
17.      Else
18.         $u_{i,j,G+1} = x_{ij,G}$ 
19.      End if
20.    End for
21.    If  $f(\vec{U}_{i,G+1}^*) \leq f(\vec{X}_{i,G})$  then
22.       $\vec{X}_{i,G+1} = \vec{U}_{i,G+1}^*$ 
23.    Else
24.       $\vec{X}_{i,G+1} = \vec{X}_{i,G}$ 
25.    End if
26.  End for
27. End for
28. End

```

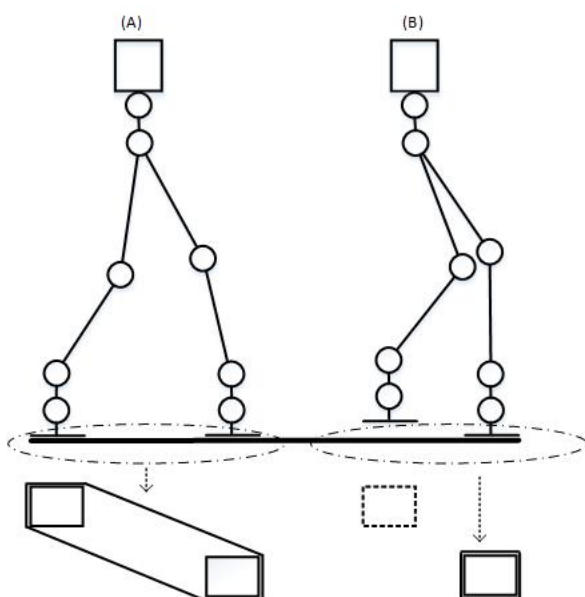
4.2 Xây dựng hàm mục tiêu

Để đánh giá các tham số dáng đi robot dạng người phải định nghĩa được hàm mục tiêu. Mục tiêu điều khiển robot dạng người HUBOT-5 là nhằm đạt dáng đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước. Muốn thế, điểm ZMP luôn nằm bên trong diện tích của vùng chân trụ [18].

Khi hai chân chạm đất thì diện tích vùng chân trụ là diện tích bao quanh của 2 bàn chân của robot dạng người, và khi 1 chân chạm đất thì diện tích vùng chân trụ là diện tích của bàn chân chạm đất. Diện tích vùng chân trụ trong hai trường hợp trên được minh họa trong H.6.

Nếu ZMP nằm trong vùng diện tích vùng chân trụ thì robot dạng người không bị ngã [19]. Bài toán tính toán quỹ đạo ZMP trong quá trình robot dạng người bước đi được trình bày trong mục 4.3.

Tính ổn định của robot dạng người được định lượng bởi khoảng cách của ZMP và tâm của bàn chân trụ trong chu kỳ bước. Các dáng đi bộ với tính ổn định tối đa thu được bằng cách tối thiểu hóa hàm f_1 ở công thức (7) [8]:



H.6 Diện tích vùng chân trụ trong 2 trường hợp: (a) 2 chân chạm đất, (b) 1 chân chạm đất

$$f_1 = \int_0^T \left(\sqrt{x_{ZMP}^2 + y_{ZMP}^2} \right) dt \quad (7)$$

trong đó: T là thời gian thực hiện 1 bước đi và (x_{ZMP}, y_{ZMP}) là tọa độ của điểm ZMP trong quá trình robot người thực hiện bước đi so với góc tọa độ đặt tại tâm bàn chân trụ. Công thức (7) là hàm mục tiêu thứ 1. Ngoài ra, để robot dạng người bám sát giá trị độ nhấc chân đã cài đặt $-H_{ref}$ thì sai lệch độ lớn của tham số độ nhấc chân $-H$ với độ nhấc chân đã cài đặt $-H_{ref}$ (như công thức 8) là hàm mục tiêu thứ 2.

$$f_2 = |H_{ref} - H| \quad (8)$$

Như vậy, để HUBOT-5 có dáng đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước thì chúng ta tìm giá trị cực tiểu của hai hàm mục tiêu f_1 và f_2 , hay tìm giá trị cực tiểu của hàm f sau:

$$\begin{cases} f = \lambda \left(\int_0^T \left(\sqrt{x_{ZMP}^2 + y_{ZMP}^2} \right) dt \right) \\ \quad + (1-\lambda) |H_{ref} - H| \\ -F_{x1} \leq x_{ZMP} \leq F_{x2}; -F_{y1} \leq y_{ZMP} \leq F_{y2} \end{cases} \quad (9)$$

trong đó, $F_{x1} + F_{x2}$ và $F_{y1} + F_{y2}$ là chiều dài và chiều rộng của bàn chân robot và hệ số $\lambda (0 < \lambda \leq 1)$ được lựa chọn giữa mức ưu tiên về độ ổn định (λ tăng) với mức sai lệch so với độ nhấc chân mong muốn (λ giảm).

4.3 Tính toán quỹ đạo điểm ZMP

Điểm ZMP có thể được tính như công thức 10 [6]:

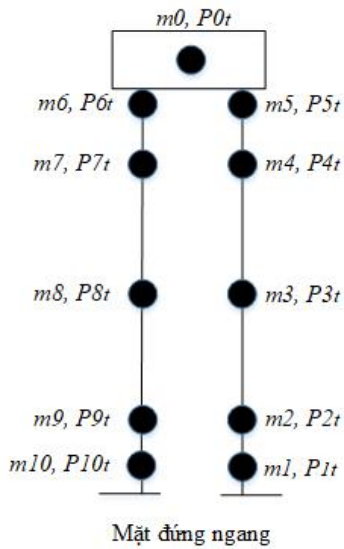
$$\begin{cases} x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{cases} \quad (10)$$

trong đó, m_i là khối lượng của khâu thứ i và (x_i, y_i, z_i) 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.

Đối với HUBOT-5, giả thiết mô-men quán tính và gia tốc góc tuyệt đối của các liên kết là đủ nhỏ để bỏ qua, công thức ZMP được tính như công thức (11) [20]:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = x_{COM} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i \ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_{ZMP} = y_{COM} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i \ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (11)$$

Trong công thức (11), phân bố khối lượng m_i và tọa độ (x_i, y_i, z_i) của các khâu được định nghĩa như trong H.7, tọa độ của khối tâm (COM) được tính thông qua công thức (12), các thành phần gia tốc sử dụng phép tính sắp xỉ như công thức (13).



H.7 Phân bố khối lượng và tọa độ của các khâu

$$\begin{cases} x_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ z_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}; \ddot{x}_i = \frac{\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i}{\Delta t} \\ \dot{y}_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t}; \ddot{y}_{i+1} = \frac{\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i}{\Delta t} \\ \dot{z}_{i+1} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta t}; \ddot{z}_{i+1} = \frac{\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i}{\Delta t} \end{cases} \quad (13)$$

Tọa độ $P_{it}(x, y, z)$ của các khâu được xác định từ 10 góc quay tại 1 thời điểm trong 1 bước đi với góc tọa độ đặt tại tâm bàn chân trụ bằng phương pháp hình học thông qua công thức (14-15-16):

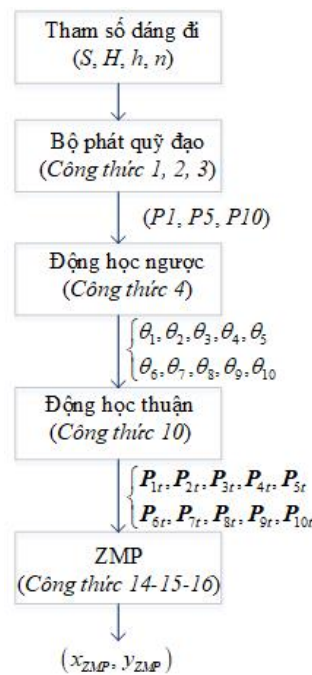
$$\begin{cases} P_{1z}(t) = 0, P_{1y}(t) = 0, P_{1x}(t) = 0, \\ P_{2z}(t) = P_{1z}(t), P_{2y}(t) = d_1 \cos[\theta_1(t)] \\ P_{2y}(t) = P_{2y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{3z}(t) = d_2 \sin[\theta_2(t)], P_{3y}(t) = P_{3y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{3z}(t) = P_{3z}(t) + d_2 \cos[\theta_2(t)] \cos[\theta_1(t)], \\ P_{4z}(t) = P_{3z}(t) + d_3 \sin[\theta_2(t) - \theta_3(t)], \\ P_{4y}(t) = P_{4y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{4z}(t) = P_{4z}(t) + d_3 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t)] \cos[\theta_1(t)], \\ P_{5z}(t) = P_{4z}(t) + d_4 \sin[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)], \\ P_{5y}(t) = P_{5y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{5z}(t) = P_{5z}(t) + d_4 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)] \cos[\theta_1(t)]. \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{5z}(t) = P_{4z}(t) + d_4 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)] \cos[\theta_1(t)], \\ P_{6z}(t) = P_{5z}(t), P_{6y}(t) = P_{5y}(t) - w, P_{6x}(t) = P_{5x}(t), \\ P_{7z}(t) = P_{6z}(t), P_{7y}(t) = P_{6y}(t) - d_4 \cos[\theta_6(t)], \\ P_{7y}(t) = P_{6y}(t) - [P_{6y}(t) - P_{7y}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\ P_{8z}(t) = P_{7z}(t) + d_3 \sin[\theta_7(t)], \\ P_{8z}(t) = P_{7z}(t) - d_3 \cos[\theta_7(t)] \cos[\theta_6(t)], \\ P_{8y}(t) = P_{7y}(t) - [P_{7y}(t) - P_{8y}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\ P_{9z}(t) = P_{8z}(t) + d_2 \sin[\theta_7(t) - \theta_8(t)], \\ P_{9z}(t) = P_{8z}(t) - d_2 \cos[\theta_7(t) - \theta_8(t)] \cos[\theta_6(t)], \\ P_{9y}(t) = P_{8y}(t) - [P_{8y}(t) - P_{9y}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\ P_{10z}(t) = P_{9z}(t) + d_1 \sin[\theta_7(t) - \theta_8(t) + \theta_1(t)], \\ P_{10z}(t) = P_{9z}(t) - d_1 \cos[\theta_7(t) - \theta_8(t) + \theta_1(t)] \cos[\theta_6(t)], \\ P_{10y}(t) = P_{9y}(t) - [P_{9y}(t) - P_{10y}(t)] \sin[\theta_6(t)]. \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{0z}(t) = \frac{P_{5z}(t) + P_{6z}(t)}{2}, \\ P_{1y}(t) = \frac{P_{5y}(t) + P_{6y}(t)}{2}, \\ P_{0z}(t) = P_{5z}(t) + \frac{d_0}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

trong đó: d_0, d_1, d_2, d_3 và d_4 được mô tả trong H.3.

Cuối cùng, lưu đồ khối để tính toán quỹ đạo điểm ZMP từ bộ bốn tham số đáng đi của robot dạng người được minh họa trong H.8.



H.8 Lưu đồ khối tính quỹ đạo điểm ZMP.

5. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm được kiểm tra trên robot dạng người HUBOT-5. Thông số vật lý của robot dạng người HUBOT-5 được trình bày trong bảng B.5.

B.5 Thông số vật lý của HUBOT-5

Tham số	Giá trị
d_0	6.000 cm
d_1	4.254 cm
d_2	9.109 cm
d_3	8.063 cm
d_4	9.345 cm
w	8.640 cm
F_{x1}	2.188 cm
F_{x2}	4.188 cm
$F_{y1} = F_{y2}$	3.970 cm
$\begin{cases} m_i \\ i = 0 \dots 10 \end{cases}$	60 gam

Để tìm giá trị thích hợp cho hệ số λ của hàm mục tiêu trong công thức (9), bằng cách chọn $\lambda = 0.4$ thì robot dạng người HUBOT-5 có dáng đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước H_{ref} , và giá trị này được sử dụng trong suốt quá trình chạy GA, PSO và MDE. Để các thuật toán tối ưu GA, PSO và MDE hội tụ nhanh, tham số dáng đi được giới hạn như trình bày ở bảng B.6.

B.6 Giới hạn các tham số dáng đi của HUBOT-5

Tham số	Chặn dưới	Chặn trên
S-chiều dài bước chân	1.5 cm	25 cm
H-độ nhấc chân	0.1 cm	5 cm
h-độ khuỷu gối	0.1 cm	1.5 cm
n-độ lắc hông	0.1 cm	10 cm

Bản chất toán học của các thuật toán tối ưu GA, PSO và MDE đều là thuật toán tìm kiếm theo xác suất nên mỗi thuật toán thực hiện huấn luyện 10 lần khác nhau, mỗi lần huấn luyện sẽ lặp 500 lần ($N=500$) với cùng kích thước quần thể ($NP=30$) và cùng số lượng các biến ($n=4$). Đối với GA có các đề xuất như sau: đột biến đều, chọn lọc tỉ lệ, lai ghép 2 điểm, xác suất đột biến (p_M) được lựa chọn thay đổi trong khoảng $[0.1; 0.3]$, xác suất lai ghép (p_C) được lựa chọn trong khoảng $[0.7; 1.0]$. B. 7 trình bày kết quả khảo sát giá trị tham số của thuật toán GA.

Dựa vào B. 7, trường hợp 6 cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất trong 7 trường khảo sát, tham số của thuật toán GA được lựa chọn là: $p_M=0.2$ và $p_C=0.7$ để thực hiện so sánh với thuật toán PSO và MDE. Đối với PSO có các đề xuất như sau: trọng số quán tính (w) được lựa chọn trong khoảng $[0.4; 0.9]$, hệ số gia

tốc (c_1, c_2) được lựa chọn trong khoảng $[2; 2.0 \ 5]$. B. 8 trình bày kết quả trình bày khảo sát giá trị tham số của thuật toán PSO.

B.7 Kết quả khảo sát giá trị tham số của GA

Trường hợp	p_M	p_C	f
1	0.1	1.0	15.68077
2	0.1	0.9	14.89913
3	0.1	0.8	14.89442
4	0.1	0.7	14.89111
5	0.15	0.7	14.89377
6	0.2	0.7	14.88492
7	0.25	0.7	14.8928

B.8 Kết quả khảo sát giá trị tham số của PSO

Trường hợp	c_1	c_2	w	f
1	2	2	0.9	14.88073
2	2	2	0.8	14.87792
3	2	2	0.7	14.87307
4	2	2	0.6	14.87065
5	2	2	0.5	14.87548
6	2	2	0.4	14.91537
9	2.05	2.05	0.6	14.87307
10	2.05	2	0.6	14.87548
11	2	2.05	0.6	14.87548

Dựa vào B. 8, trường hợp 4 cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất trong 11 trường khảo sát, tham số của thuật toán PSO được lựa chọn là: $c_1=c_2=2$ và $w=0.6$ để thực hiện so sánh với thuật toán GA và MDE. Đối với MDE được lựa chọn là: hệ số đột biến (F) và xác suất lai ghép (CR) được chọn ngẫu nhiên trong khoảng $[0.4; 1.0]$ và $[0.7; 1.0]$ cho từng cá thể trong mỗi lần lặp. B. 9 trình bày giá trị tham số của thuật toán GA, PSO và MDE.

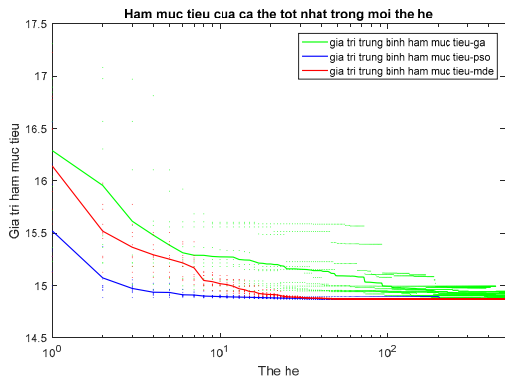
B.9 Các tham số của thuật toán GA, PSO, MDE

Phương pháp	Tham số	Giá trị
GA	Xác suất đột biến (p_M)	0.2
	Xác suất lai ghép (p_C)	0.7
PSO	Hệ số gia tốc 1 (C_1)	2
	Hệ số gia tốc 2 (C_2)	2
	Trọng số quán tính (w)	0.6
MDE	Hệ số đột biến (F)	Ngẫu nhiên $[0.4; 1.0]$
	Xác suất lai ghép (CR)	Ngẫu nhiên $[0.7; 1.0]$

Cài đặt độ nhấc chân của HUBOT-5 là $H_{ref} = 2cm$. B. 10 trình bày giá trị thông số dáng đi tối ưu và giá trị tốt nhất hàm mục tiêu của 10 lần chạy tương ứng với 3 thuật toán GA-PSO-MDE, H. 9 minh họa giá trị trung bình của hàm mục tiêu f sau 10 lần chạy của từng thuật toán (GA: màu xanh lá cây, PSO: màu xanh dương, MDE: màu đỏ).

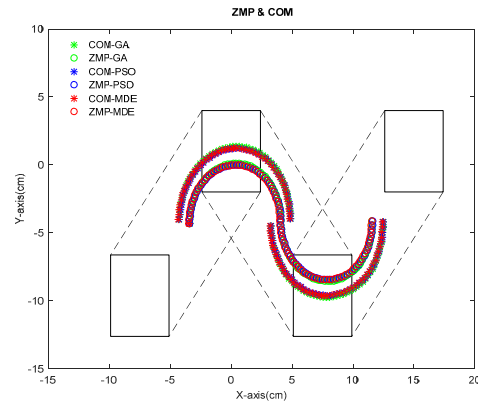
B.10 Giá trị thông số đáng đi tối ưu và giá trị tốt nhất hàm mục tiêu của 10 lần chạy.

Lần	Giá trị thông số đáng đi tối ưu											Giá trị tốt nhất hàm mục tiêu			
	S(cm)			H(cm)			h(cm)			n(cm)			GA	PSO	MDE
	GA	PSO	MDE	GA	PSO	MDE	GA	PSO	MDE	GA	PSO	MDE			
1	15.08	15	15	2.03	1.97	2.00	0.78	1.01	0.804	6.78	6.42	6.89	14.90	14.87	14.87
2	15.01	15	15	2.05	2.00	1.99	1.00	1.05	0.804	7.08	6.85	6.89	14.88	14.87	14.87
3	15.39	15	15	1.99	2.00	2.00	0.67	1.04	0.804	5.05	6.91	6.89	14.88	14.87	14.87
4	15.57	15	15	1.70	1.94	1.99	0.68	0.10	0.804	6.34	8.51	6.89	14.89	14.87	14.87
5	15.21	15	15	1.87	2.39	1.99	0.97	1.00	0.804	7.45	6.66	6.89	14.88	14.87	14.87
6	15.45	15	15	1.94	1.99	2.00	0.98	0.91	0.804	7.53	6.95	6.89	14.88	14.87	14.87
7	15.11	15	15	1.68	2.63	1.99	0.74	0.98	0.804	6.28	8.90	6.89	14.89	14.87	14.87
8	15.43	15	15	2.20	0.77	2.00	0.79	1.10	0.804	6.72	6.52	6.89	14.87	14.87	14.87
9	15.26	15	15	1.97	2.00	2.00	0.94	1.06	0.804	7.08	7.82	6.89	14.88	14.87	14.87
10	15.62	15	15	1.96	1.78	1.99	1.06	1.04	0.804	7.11	6.68	6.89	14.89	14.87	14.87



H.9 Giá trị trung bình của hàm mục tiêu f

Dựa vào bảng B.10, giá trị tối ưu của bộ tham số đáng đi cho HUBOT-5 thỏa mục tiêu sau 10 lần chạy với từng thuật toán MDE, PSO và GA được trình bày trong bảng B.11. Hình H.10 khảo sát điểm ZMP và COM khi HUBOT-5 bước đi trong 1 chu kỳ bước ($T = 2s$) tương ứng với bộ tham số đáng đi tối ưu sử dụng các thuật toán GA, PSO, MDE.



H.10 Khảo sát ZMP và COM

Bộ tham số tối ưu với từng thuật toán trong B. 11 cho thấy đạt được mục tiêu bám theo độ nhấc chân đã cài đặt là $H_{ref} = 2cm$. Quỹ đạo ZMP và COM tương ứng với từng thuật toán trong H.10 cho thấy luôn nằm trong vùng chân trụ hay là đạt được mục tiêu bước đi ổn định.

B.11 Bộ tham số tối ưu với từng giải thuật

H_{ref} (cm)	Giá trị tối ưu của bộ tham số đáng đi cho HUBOT-5											$f(cm)$			
	S (cm)			H (cm)			h (cm)			n (cm)			GA	PSO	MDE
	GA	PSO	MDE	GA	PSO	MDE	GA	PSO	MDE	GA	PSO	MDE			
2.0	15	15	15	2.05	2.00	2.00	1.0	1.04	0.804	7.08	6.91	6.89	14.88	14.87	14.87

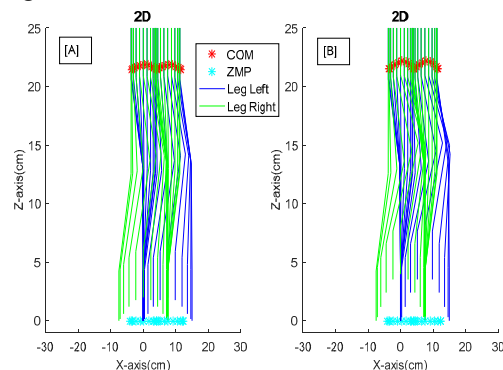
Dựa trên các kết quả mô tả ở H. 9 cho thấy rằng: thuật toán MDE tìm kiếm được điểm tối ưu có giá trị trung bình là 14.8706495 sau khoảng 144 thế hệ, trong khi đó thuật toán PSO là sau khoảng 254 thế hệ thì tìm kiếm được điểm tối ưu nhưng có giá trị trung bình là 14.87065, còn thuật toán GA phải sau khoảng 465 thế hệ thì tìm kiếm được điểm tối ưu có giá trị trung bình là 14.88492. Vậy thuật toán MDE có chất lượng và hiệu quả vượt trội so với các thuật toán PSO và GA.

Bảng B.12 trình bày giá trị tối ưu của bộ tham số đáng đi để HUBOT-5 bước đi ổn định với 2 trường hợp có độ nhấc khác nhau sử dụng thuật toán MDE.

B.12 Bộ tham số tối ưu

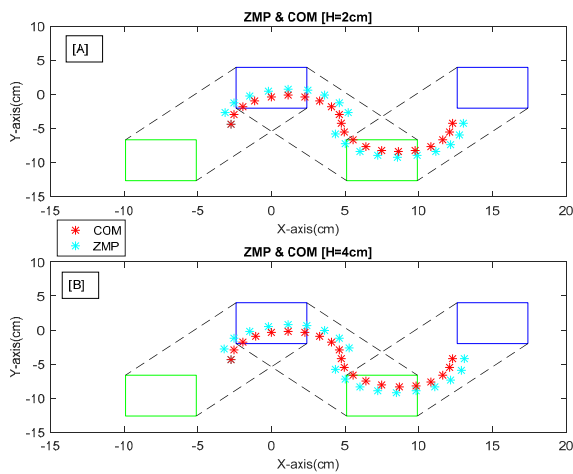
H_{ref} (cm)	Kết quả tối ưu MDE			
	S (cm)	H (cm)	h (cm)	n (cm)
2.0	15	2.0	0.8040	6.890
4.0	15	4.0	0.7950	6.860

Hình H.11 [A] và [B] minh họa 2 dáng đi 2D trong mặt phẳng X-Z của HUBOT-5 tương ứng với 2 trường hợp có độ nhấc chân $H=2cm$ và $H=4cm$. B. 12 và H.11 cho thấy HUBOT-5 có độ nhấc chân bám theo giá trị đã cài đặt.



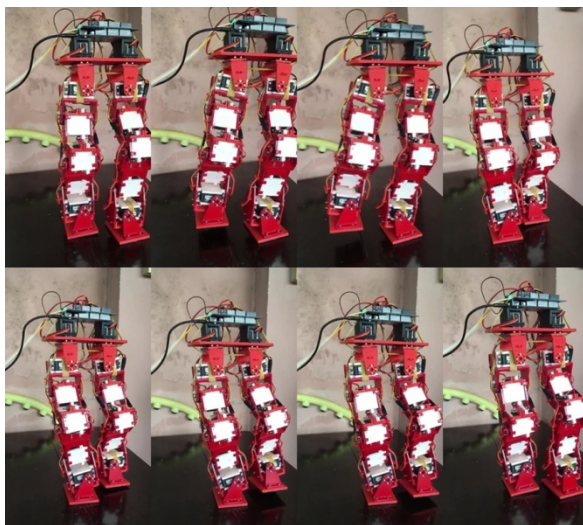
H.11 Dáng đi 2D của HUBOT-5 có độ nhấc chân khác nhau

Hình H.12 [A] và [B] minh họa điểm ZMP và hình chiếu của COM tương ứng với 2 trường hợp có độ nhắc chân $H=2cm$ và $H=4cm$. Điều này cho thấy điểm ZMP luôn nằm trong diện tích vùng chân trụ, nghĩa là HUBOT-5 không bị ngã.

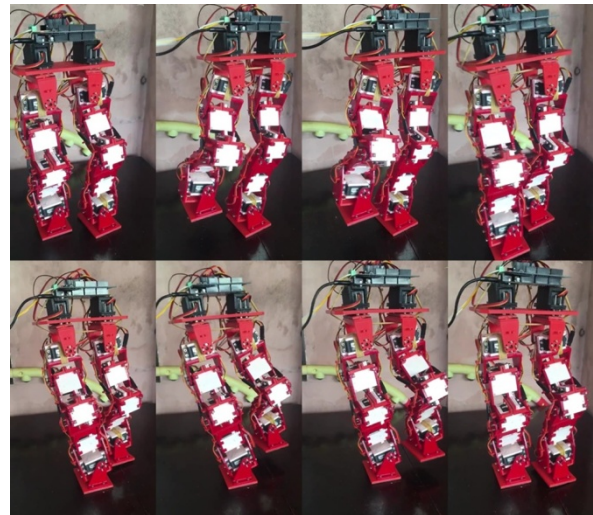


H.12 Quỹ đạo ZMP và COM

Hình H.13 và 14 minh họa hình ảnh HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhắc chân $H_{ref}=2cm$ và $H_{ref}=4cm$.

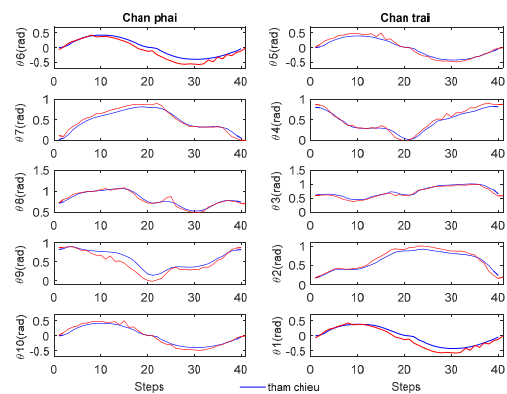


H.13 HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhắc chân $H_{ref}=2cm$

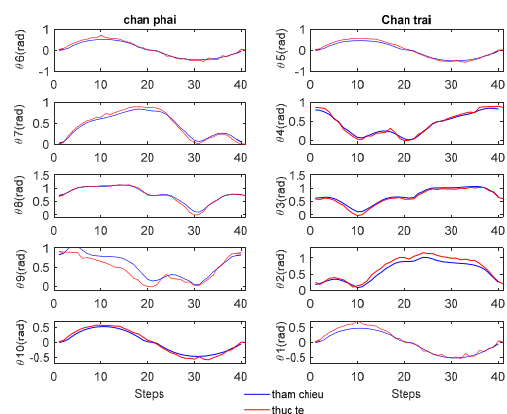


H.14 HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhắc chân $H_{ref}=4cm$

H. 15 và 16 minh họa 10 quỹ đạo góc quay tham chiếu và góc quay thực tế ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}$) trong 1 chu kỳ bước ở 2 chân của HUBOT-5, khi thực hiện bước đi với 2 bộ tham số đáng đi có độ nhắc chân khác nhau (B. 12).

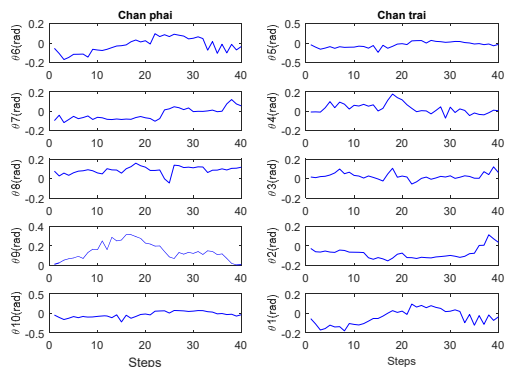


H.15 Quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=2cm$)

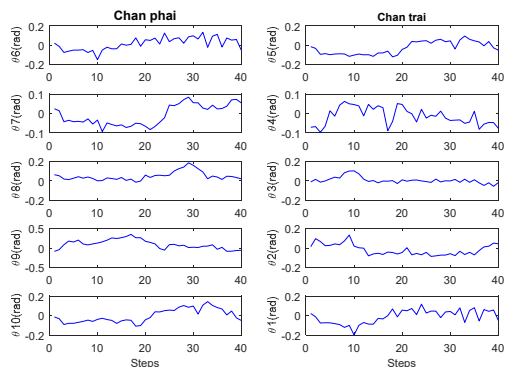


H.16 Quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=4cm$)

H. 17 và 18 minh họa 10 quỹ đạo sai lệch của góc quay ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}$) trong 1 chu kỳ bước ở 2 chân của HUBOT-5, khi thực hiện bước đi với 2 bộ tham số dáng đi có độ nhấc chân khác nhau (B. 12).



H.17 Quỹ đạo sai lệch của 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref} = 2cm$)



H.18 Sai lệch của quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref} = 4cm$)

Tóm lại, các kết quả tối ưu khi chạy mô phỏng đã được thể hiện đầy đủ ở B.12, H.11, H.12. Tương ứng, kết quả thực nghiệm của giải thuật đề xuất nhúng trên mô hình robot dạng người kích thước nhỏ HUBOT-5 được thể hiện trong H.13, H.14, H.15, H.16, H.17 và H.18, ứng với độ nhấc chân H_{ref} lần lượt là 2cm và 4cm.

Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy việc cài đặt dáng đi có độ nhấc chân theo ý muốn – H_{ref} với tham số dáng đi (chiều dài bước – S , độ nhấc chân – H , độ khụy gối – h và độ lác hông – n) tối ưu giúp robot dạng người HUBOT-5 bước đi ổn định không ngã và đạt khả năng bám sát giá trị độ nhấc chân – H_{ref} theo ý muốn, nhờ sử dụng thuật toán MDE đã khả thi.

6. Kết luận

Bài báo giới thiệu thuật toán mới cho phép tạo dáng đi cân bằng động cho robot dạng người dựa trên thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến MDE. Đầu tiên, động học

ngược được sử dụng để ước tính vị trí của các động cơ đặt tại các khớp ở 2 chân. Sau đó, thuật toán tối ưu MDE được sử dụng để tìm giá trị tốt nhất cho các tham số dáng đi của robot dạng người sao cho robot dạng người bước đi ổn định với độ nhấc chân cài đặt trước. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên robot dạng người kích thước nhỏ HUBOT-5 cho thấy việc sử dụng thuật toán MDE với hàm mục tiêu hợp lý, cho phép robot dạng người bước đi bền vững với thời gian huấn luyện được rút ngắn rất hiệu quả.

Tài liệu tham khảo

- [1] Miller WT (1994) *Real-time neural network control of a biped walking robot*. IEEE Control Systems Magazine, vol. 14(1), pp. 41-48
- [2] Shih CL (1999) *Ascending and descending stairs for a biped robot*. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 29(3), pp. 255-268
- [3] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, Fujiwara K, Harada K, Yokoi K, Hirukawa H (2003) *Biped walking pattern generation by using preview control of Zero-Moment Point*. Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, pp. 14-19
- [4] Vukobratovic M et al. (1990) *Biped locomotion*. Springer-Verlag
- [5] Mrozowski J, Awrejcewicz J (2007) *Analysis of stability of the human gait*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 45, no. 1, pp. 91-98
- [6] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, Kaneko K, Arai H, Koyachi N, Tanie K (2001) *Planning Walking Patterns for a Biped Robot*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 17, no. 3, pp 280-289
- [7] Dau VH, Chew CM, Poo AN (2007) *Optimal Trajectory Generation for Bipedal Robot*. Proc. of IEEE-RAS Intern. Conf. on Humanoid Robot, Pittsburgh, PA, USA, pp 603-608
- [8] Dip G, Prahlad V, Kien PD (2009) *Genetic algorithm-based optimal bipedal walking gait synthesis considering tradeoff between stability margin and speed*. Robotica, vol. 27, pp. 355-365
- [9] Huan TT, Anh HPH (2015) *Novel Stable Walking for Humanoid Robot Using Particle Swarm Optimization Algorithm*. Journal of Advances in Intelligent Systems Research, vol. 123, pp. 322- 325, Atlantis Press
- [10] Shafii N, Reis LP, Lau N (2011) *Biped Walking using Coronal and Sagittal Movements based on Truncated Fourier Series*. RoboCup-2010: Robot Soccer World Cup XIII, Springer LNAI / LNCS, vol. 6556, pp. 324-335
- [11] Yazdi E, Azizi V, Haghghat AT (2010) *Evolution of biped locomotion using bees algorithm, based on truncated Fourier series*. Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science, pp. 378-382

- [12] Farzaneh Y, Akbarzadeh A, Akbaria A (2013) *Online bioinspired trajectory generation of seven-link biped robot based on T-S fuzzy system*. Applied Soft Computing.
- [13] Gong D, Yan J, Zuo G (2010) *A review of gait optimization based on evolutionary computation*. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, vol. 2010, Article ID 413179, pp. 1-12
- [14] Huan TT, Anh HPH (2016) *Implementation of Novel Stable Walking Method for Small-Sized Biped Robot*. Proc. of the 8th Viet Nam Conf. on Mechatronics (VCM-2016), Can Tho, Viet Nam, pp. 283-292
- [15] Storn R, Price K (1997) *Differential Evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces*. Journal Global Optimization, vol. 11, pp. 341-359
- [16] Son NN, Kien CV, Anh HPH (2017) *A novel adaptive feed-forward-PID controller of a SCARA parallel robot using pneumatic artificial muscle actuator based on neural network and modified differential evolution algorithm*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 96, pp. 65-80
- [17] Son NN, Anh HPH, Chau TD (2016) *Adaptive neural model optimized by modified differential evolution for identifying 5-DOF robot manipulator dynamic system*. Soft Computing. DOI: 10.1007/s00500-016-2401-x.
- [18] Vukobratovic M, Frank AA, Juricic D (1979) *On the Stability of Biped Locomotion*. Proc. IEEE Trans. of Biomedical Engineering, pp. 25-36
- [19] Huang Q, Peng Z, Zhang W, Zhang L, Li K (2005) *Design of humanoid complicated dynamic motion based on human motion capture*. Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelli. Robots and Systems, pp. 3536-3541
- [20] Shih CL, Li YZ, Churng S, Lee TT, Gruver WA (1990) *Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase*. Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1646-1652
- [21] Qin AK, Huang VL, Suganthan PN (2009) *Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization*. Evol. Comput. IEEE Trans., vol. 13, no. 2, pp. 398-417
- [22] Wang Y, Cai Z, Zhang Q (2011) *Differential evolution with composite trial vector generation strategies and control parameters*. Evol. Comput. IEEE Trans., vol.15, no.1, pp. 55-66