



(12) **BẢN MÔ TẢ GIẢI PHÁP HỮU ÍCH THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN
GIẢI PHÁP HỮU ÍCH**

(19) **Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)**
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ

(11) 
2-0001984

(51)⁷ **B62D 57/32, G06F 19/00**

(13) **Y**

(21) 2-2013-00111

(22) 27.05.2013

(45) 25.02.2019 371

(43) 26.05.2014 314

(73) **ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH (VN)**

Phường Linh Trung, quận Thủ Đức, thành phố Hồ Chí Minh

(72) **Hồ Phạm Huy Ánh (VN), Nguyễn Thanh Nam (VN), Chung Tấn Lâm (VN)**

(54) **QUY TRÌNH TỐI ƯU BỘ THÔNG SỐ BƯỚC ĐI CỦA RÔ-BỐT DẠNG NGƯỜI
DÙNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN NÂNG CAO (MGA)**

(57) Giải pháp hữu ích đề xuất quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người (biped robot) dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA). Đầu tiên giải pháp hữu ích đề xuất quy trình xây dựng động học ngược cho rô-bốt dạng người 12 bậc tự do (dof) dựa trên nhóm thông số đặc trưng. Từ đó phát triển quy trình tính tối ưu bộ thông số đặc trưng này dùng thuật toán di truyền nâng cao. Cụ thể thuật toán di truyền nâng cao (MGA) là công cụ cốt lõi được dùng trong quy trình để tối ưu các thông số của dáng đi rô-bốt dạng người. Quy trình tối ưu được thực hiện luôn bảo đảm hai yêu cầu là giữ ổn định bước đi cùng bảo đảm tốc độ chân bước của rô-bốt dạng người. Ngưỡng ổn định dựa theo vị trí xác định của điểm mômen zero (ZMP) sẽ cho phép thay đổi vận tốc bước đi theo chiều dài bước. Vị trí ZMP được tính toán dựa trên quy trình tối ưu mới đề xuất, không đòi hỏi động học hệ thống phức tạp. Các kết quả của quy trình tối ưu thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng MGA theo giải pháp đã được mô phỏng và sẽ được triển khai trên rô-bốt dạng người kích thước thật, có tên HUBOT-3.

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Sáng chế thuộc lĩnh vực cơ điện tử, cụ thể đề cập đến quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA).

Tình trạng kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Các phương pháp và thuật toán tối ưu hóa bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán thông minh đã được nghiên cứu trong khoảng mười năm gần đây. Động học của rô-bốt dạng người có bản chất phi tuyến và rất khó phân tích. Một số mô hình rô-bốt dạng người (biped) được lược giản đã được áp dụng, trong đó giải pháp mô hình con lắc ngược được dùng rộng rãi hơn cả. Theo mô hình này, khối lượng rô-bốt dạng người được quy về ở tâm khối lượng (center of mass – COM) của con lắc ngược. Mô hình con lắc ngược rất hữu dụng để khảo sát ổn định cho bước đi của rô-bốt dạng người thông qua tính toán vị trí (x,y) của điểm mômen không (zero moment point - ZMP) nằm trên mặt phẳng bước đi của rô-bốt dạng người.

Việc ổn định bước đi cho rô-bốt hai chân được bảo đảm khi điểm ZMP nằm trong diện tích đa giác được bao phủ bởi bàn chân chân trụ của rô-bốt dạng người. Một số giải pháp dựa trên nguyên lý này đã được đề xuất để tính toán quỹ đạo bước đi ổn định, trong đó rô-bốt dạng người ASIMO (Hãng HONDA – Nhật bản) là ví dụ tiêu biểu khi tính toán xây dựng quỹ đạo bước đi dựa trên nguyên lý ZMP.

Một số giải pháp khác đã được đề xuất nhằm tối ưu bước đi của rô-bốt người như các phương pháp học có giám sát và không giám sát dùng mạng nơ-ron, phương pháp học tăng cường, v.v..

Gần đây thuật toán di truyền (genetic algorithm – GA) là công cụ tối ưu đa biến phi tuyến rất mạnh bắt đầu được dùng để tối thiểu hàm trọng số của sai số ZMP dùng khi phát quỹ đạo bước đi cho rô-bốt người. Dựa trên cách tiếp cận khác, các tác giả F. Arakawa và T. Fukuda trong báo cáo nghiên cứu khoa học “Natural Motion Trajectory Generation of Biped Locomotion Robot Using Genetic Algorithm Through Energy Optimization” trong cuốn 2 tập san, trang 1495-1500 của hội nghị “IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics” diễn ra ở Trung Quốc năm dùng GA để đề xuất giải pháp tối thiểu năng lượng tiêu thụ khi rô-bốt dạng người thực hiện bước đi. Tuy vậy, cho đến nay thuật toán di truyền vẫn chưa được khai thác hiệu quả để tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người bảo đảm độ ổn định và tốc độ chân bước.

Ở Việt Nam, việc thiết kế, lắp đặt và điều khiển bước đi ổn định cho rô-bốt dạng

người chỉ mới đạt những thành tựu ban đầu (rô-bốt dạng người HUBOT-2 lần đầu ở Việt Nam được lắp đặt năm 2010 tại PTN Trọng Điểm DCSELAB, Đại học Bách Khoa-Đại Học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh). Việc xây dựng quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người vẫn là bài toán lớn đang chờ các nhà nghiên cứu trong nước và quốc tế đề xuất các giải pháp giải quyết.

Thực tế cho thấy, trong bài toán lập quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người, các khó khăn lớn cần giải quyết bao gồm: (1) xây dựng hiệu quả động học ngược cho rô-bốt dạng người đa bậc tự do, (2) tìm giải thuật tối ưu thích hợp để tối ưu các thông số của dáng đi rô-bốt dạng người (humanoid robot), và (3) kết quả bước đi tối ưu được tính toán và xây dựng bởi quy trình phải bảo đảm hai yêu cầu cơ bản là giữ ổn định bước đi cùng bảo đảm tốc độ chân bước cho rô-bốt dạng người.

Bản chất kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Mục đích của giải pháp hữu ích này đề xuất quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA), giúp khắc phục được những khó khăn đã nêu ở trên. Để đạt được mục đích đó giải pháp hữu ích đề xuất quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA), quy trình này được thực hiện trên một thiết bị tính toán có năng lực tính toán phù hợp, quy trình này bao gồm các bước sau:

xây dựng động học ngược cho rô-bốt dạng người 12 bậc tự do (dof) dựa trên nhóm thông số đặc trưng, cụ thể:

i) xác định các ràng buộc cơ bản của động học ngược rô-bốt dạng người 12 bậc tự do dựa trên nhóm thông số đặc trưng là vị trí P_0 , P_6 và P_{12} của 3 khớp nền tảng theo biểu thức (1),

ii) xác định 4 góc quay θ_A , θ_B , θ_C , θ_D của 4 khớp chính theo biểu thức (2),

iii) xác định động học ngược thể hiện qua 12 góc quay $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{12}]^T$ của toàn bộ 12 khớp của rô-bốt dạng người theo biểu thức (3);

tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA), cụ thể:

i) xác định tầm cho bộ 4 thông số đặc trưng quyết định dáng đi rô-bốt dạng người bao gồm khoảng chân bước s ; khoảng dịch hông; khoảng chùn thân h và khoảng nhấc cao bàn chân của chân quăng H theo biểu thức (7),

ii) cài đặt thông số của thuật toán di truyền nâng cao (MGA) theo bảng 1 và vận hành thuật toán di truyền nâng cao (MGA) dùng để tối ưu bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người,

iii) xác định hàm chi phí (*cost function*) khi tính tối ưu bộ 4 thông số đặc trưng dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA) theo các biểu thức (9), (10) và (11),

iv) xác định vị trí (x_{ZMP} , y_{ZMP} , 0) của điểm ZMP trong từng vòng lặp khi vận hành thuật toán di truyền nâng cao (MGA) theo các biểu thức dùng các biểu thức từ (12) đến (20) để khẳng định chất lượng bước đi ổn định của bộ thông số được tối ưu,

v) thay đổi giá trị trọng số λ có trong hàm chi phí (*cost function*) cho các lần vận hành thuật toán di truyền nâng cao (MGA) và tập hợp kết quả giá trị các bộ thông số tối ưu để điều khiển ổn định bước đi của rô-bốt dạng người.

Kết quả quy trình tối ưu bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người bảo đảm hai yêu cầu tiên quyết là giữ ổn định bước đi cùng bảo đảm tốc độ chân bước của rô-bốt dạng người, khả năng giữ ổn định bước đi cùng bảo đảm tốc độ chân bước của rô-bốt dạng người thông qua quy trình tối ưu bộ thông số dáng đi rô-bốt dạng người được định lượng qua hàm chi phí theo biểu thức (11).

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Hình 1 là hình vẽ quy ước hệ tọa độ và kí hiệu các khớp nối của rô-bốt dạng người – Mặt Trước (Frontal) và Mặt Bên (Sagittal);

Hình 2 là hình vẽ thể hiện trọng tâm các khớp nối của rô-bốt dạng người – Mặt Trước (Frontal) và Mặt Bên (Sagittal plane);

Hình 3 là hình vẽ minh họa rô bốt dạng người HUBOT-3;

Hình 4 là hình vẽ thể hiện tọa độ các khớp nối của rô-bốt dạng người – Mặt Trước (Frontal plane) và Mặt Bên (Sagittal plane);

Hình 5 là hình vẽ thể hiện các thông số của động học ngược của rô-bốt dạng người – Mặt Trước (Frontal plane) và Mặt Bên (Sagittal plane);

Hình 6 là hình vẽ thể hiện các thông số chính quyết định dáng đi của rô-bốt dạng người.

Mô tả chi tiết Giải pháp hữu ích

Giải pháp hữu ích nhằm đề xuất quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người bằng thuật toán di truyền nâng cao (MGA) được trình bày cụ thể như sau:

Xây dựng động học ngược cho rô-bốt dạng người 12 bậc tự do (dof) dựa trên nhóm thông số đặc trưng. Hình 1 minh họa vị trí P_0 , P_6 và P_{12} của 3 khớp nền tảng của rô-bốt dạng người. Hình 1 còn minh họa vị trí 12 góc quay $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{12}]^T$ của toàn bộ 12 khớp của rô-bốt dạng người. Ngoài ra, Hình 1 thể hiện kí hiệu các khớp nối của rô-bốt dạng người quy về 2 hình chiếu *Mặt Trước (Frontal View)* và *Mặt Bên (Sagittal View)*, bao gồm 12 bậc tự do, cho ta vector $[12 \times 1]$ ứng với 12 góc quay truyền động $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{12}]^T$.

Dựa theo vị trí lắp đặt các động cơ truyền động, trọng tâm các khớp chiều trên Mặt Trước (Frontal plane) và Mặt Bên (Sagittal plane) được thể hiện trên Hình 2.

Thiết kế tương ứng của HUBOT-3 được thể hiện trên Hình 3.

Tọa độ tương ứng của từng khớp truyền động $P_i(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$ cho trên Hình 4.

Hình 5 minh họa vị trí 4 góc $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ của 4 khớp chính của rô-bốt dạng người.

Các thông số của động học ngược của rô-bốt dạng người quy về Mặt Trước (Frontal plane) và Mặt Bên (Sagittal plane) cho trên Hình 5. Từ Hình 5, ta nhận thấy:

$$\begin{aligned} x_l &= P_{0x} - P_{6x}, \quad y_l = -P_{6y}, \quad z_l = P_{0z} - P_{6z}, \\ x_r &= P_{12x} - P_{6x}, \quad y_r = -P_{6y}, \quad z_r = P_{12z} - P_{6z}, \end{aligned} \quad (1)$$

Từ các thông số tọa độ $(x_l, y_l, z_l), (x_r, y_r, z_r)$ của hông so với gốc tọa độ là mắt cá chân trái (trái) và chân bước (phải), các góc quay của 4 khớp chính được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \theta_A &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1^2 + d_2^2 - x_l^2 - y_l^2 - z_l^2}{2d_1d_2} \right] \\ \theta_B &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1 \sin(\theta_A)}{\sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2}} \right] \\ \theta_C &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1^2 + d_2^2 - x_r^2 - y_r^2 - z_r^2}{2d_1d_2} \right] \\ \theta_D &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1 \sin(\theta_C)}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó d_1 là chiều dài từ khớp hông đến khớp gối và d_2 là chiều dài từ khớp gối đến bàn chân của rô-bốt dạng người.

Dùng động học ngược, các góc quay của toàn bộ 12 khớp của rô-bốt dạng người được xác định như sau:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_l}{z_l} \right)$$

$$\theta_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{y_r}{z_r} \right)$$

$$\theta_6 = -\theta_1$$

$$\theta_7 = -\theta_{12}$$

$$\theta_3 = \pi - \theta_A$$

$$\theta_{10} = \pi - \theta_C$$

$$\theta_5 = \frac{\pi}{2} - \theta_A + \theta_B + \sin^{-1} \left[\frac{x_l}{\sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2}} \right]$$

$$\theta_8 = \frac{\pi}{2} - \theta_C + \theta_D + \sin^{-1} \left[\frac{x_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \right]$$

$$\theta_4 = 0$$

$$\theta_9 = 0$$

$$\theta_2 = \theta_3 - \theta_5$$

$$\theta_{11} = \theta_{10} - \theta_8 \quad (3)$$

Ta lưu ý khi rô-bốt dạng người chuyển động thẳng, dễ thấy $y_r = y_l$ và $\theta_4 = \theta_9$.

Hình 6 cho thấy các thông số chính quyết định dáng đi của rô-bốt dạng người bao gồm: vị trí P_6 của hông, vị trí P_0 và P_{12} của gót chân trái và phải.

Trong bán kì $0 < t < T$, chân trái là chân trụ & chân phải là chân bước. Do đó, P_0 của gót chân trái được chọn làm gốc tọa độ và các giá trị P_6 , P_{12} của hông và chân phải cần được xác định.

Tương tự, trong bán kì $T < t < 2T$, chân phải là chân trụ & chân trái là chân bước. Lúc này, P_{12} của gót chân phải được chọn làm gốc tọa độ và các giá trị P_6 , P_0 của hông và chân trái cần được xác định.

Các kết quả có được như sau:

$$P_{0x}(t) = \left(\frac{s}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) \right) (u(t-2T) - u(t-T))$$

$$P_{0y}(t) = -\omega(u(t-2T) - u(t-T))$$

$$P_{0z}(t) = H \cdot \sin\left(\pi\left(\frac{P_{0x}(t)}{s} + 0.5\right)\right)(u(t-2T) - u(t-T))$$

$$P_{12x}(t) = \left(\frac{s}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{T}\left(t - \frac{T}{2}\right)\right)(u(t) - u(t-T))$$

$$P_{12y}(t) = -\omega(u(t) - u(t-T))$$

$$P_{12z}(t) = H \cdot \sin\left(\pi\left(\frac{P_{12x}(t)}{s} + 0.5\right)\right)(u(t) - u(t-T)) \quad (4)$$

Trong biểu thức trên, $u(t)$ là hàm bước đơn vị và được xác định bởi:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Giá trị vị trí P_6 của hông được xác định như sau:

$$P_{6x}(t) = \left(\frac{s}{4}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{T}\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right)$$

$$P_{6y}(t) = n \sin\left(\frac{\pi}{2}(\sin\left(\frac{\tau\pi}{2T}\right) + 1)\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{t}{T}\right)$$

$$P_{6z}(t) = (d_1 + d_2 - h) \quad (6)$$

Chú ý, trong bán kì $0 < t < T$, $\tau = t$ và trong bán kì $T < t < 2T$, $\tau = t - T$.

Các thông số cơ sở H , h , s và n được chọn sao cho quỹ đạo ZMP được bảo đảm, qua đó giúp rô-bốt dạng người bước thẳng ổn định với tốc độ mong muốn.

Gọi Δt là thời gian lấy mẫu. Chu kì bước T cùng Δt sẽ quyết định tốc độ bước đi cũng như độ mịn và độ ổn định của dáng đi. Tỉ số $(T/\Delta t)$ chỉ số lần lấy mẫu trong quãng 1 chu kì bước T . Với $(T/\Delta t)$ thấp, phần cơ có thể bị rung khi rô-bốt dạng người bước, dẫn đến nguy cơ rô-bốt dạng người dễ bị mất ổn định. Ngược lại, chủ động đẩy $(T/\Delta t)$ lên quá cao, sẽ làm rô-bốt dạng người bước rất chậm, do gánh nặng tính toán quá lớn. Vì thế, T và Δt cũng cần được chọn hết sức cẩn thận. Ta dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA) để bảo đảm quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người đạt kết quả mỹ mãn.

Tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA). Trong giai đoạn SSP (Single Support Phase) của bước đi rô-bốt dạng người, thông số n thể hiện khoảng dịch hông theo phương y cần có để dời điểm ZMP từ chân bước sang chân trụ. Chọn n quá bé, không chỉ gây mất ổn định mà còn làm chân bước (*swing leg*) không nhấc lên được. Ngược lại, chọn n quá lớn làm dáng đi mất tự nhiên.

Thông số quãng chùn thấp h của chân trụ (*stance leg*) sẽ quyết định độ cao trọng tâm CM khi đi của rô-bốt dạng người. Nếu h bé, tương ứng với độ cao trọng tâm CM tăng lên, sẽ làm giảm vùng biên ổn định khi đi của rô-bốt dạng người. Thêm vào đó, mômen/công suất cần có của mô-tơ truyền động ở mắt cá nhân trụ cũng phải tăng. Vì thế, thông số h cần được chọn phù hợp để dáng đi tự nhiên, ổn định mà không cần tăng mômen/công suất cần có của mô-tơ truyền động ở mắt cá nhân trụ.

Quãng bước s và chiều cao nhấc bàn chân H khi chân bước cũng sẽ rất khác nhau tùy theo dáng đi mong muốn. Dễ thấy, 2 thông số này càng lớn, càng khó thực hiện. Ngược lại, 2 thông số này được chọn quá bé, sẽ làm rô-bốt dạng người đi rất chậm và không tự nhiên.

Bảng 1: Cài đặt thông số cho thuật toán MGA

Thông Số	Giá Trị
Độ dài nhiễm sắc thể	4
Số lượng dân số	30
Số lần lặp	30
Suất chuyển vị	0,1
Suất hoán vị	0,8

Các thông số mômen/công suất cần có cho từng khớp cần được xác định cẩn thận thông qua khảo sát động lực học (*dynamics*) rô-bốt. Tuy vậy, việc tính toán động lực học (*dynamics*) cho toàn bộ 12 khớp rô-bốt dạng người sẽ rất phức tạp và không cần thiết.

$$\begin{aligned}
 0,05 &\leq s \leq 0,13 \\
 0,001 &\leq n \leq 0,13 \\
 0,001 &\leq H \leq 0,13 \\
 0,001 &\leq h \leq 0,13
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} -F_{x1} &\leq x_{zmp} \leq F_{x2} \\ -\frac{F_y}{2} &\leq y_{zmp} \leq \frac{F_y}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

Hàm chi phí (*cost function*) khi tính tối ưu dùng MGA xác định bởi:

$$Q = \int_0^T (x_{zmp}^2 + y_{zmp}^2) dt \quad (9)$$

Phối hợp tiêu chuẩn Q với thông số chiều dài bước chân s, ta xây dựng hai hàm cần được cực đại hóa:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{Q} \\ f_2 &= s \end{aligned} \quad (10)$$

Cuối cùng ta có hàm *chi phí* quy chuẩn khi tính tối ưu dùng MGA xác định bởi:

$$f = \frac{\lambda f_1}{f_1^{\max}} + \frac{(1-\lambda)f_2}{f_2^{\max}} \quad (11)$$

Để tính toán (11) trong từng lần lặp của MGA, vị trí (x_{ZMP} , y_{ZMP}) của điểm ZMP cần được xác định. Đầu tiên, để xác định (x_{CM} , y_{CM} , z_{CM}) của trọng tâm của rô-bốt dạng người, ta áp dụng các phép tính thông dụng sau [6]:

$$\begin{aligned} x_{cm} &= \frac{\sum_i m_i P_{ix}}{\sum_i m_i} \\ y_{cm} &= \frac{\sum_i m_i P_{iy}}{\sum_i m_i} \\ z_{cm} &= \frac{\sum_i m_i P_{iz}}{\sum_i m_i} \end{aligned} \quad (12)$$

Để xác định vị trí (x_{ZMP} , y_{ZMP} , 0) của điểm ZMP, ta áp dụng các kết quả từ [10]:

$$x_{ZMP} = x_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{ix} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{ix}}{g \sum_i m_i} + \frac{\sum_i M_{iy}}{g \sum_i m_i}$$

$$y_{ZMP} = y_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{iy}}{g \sum_i m_i} - \frac{\sum_i M_{ix}}{g \sum_i m_i} \quad (13)$$

Trong đó, M_{ix} và M_{iy} là mômen phát sinh ở từng khớp khi quay chiều theo phương x và y . Xét trường hợp rô-bốt dạng người chuyển động chậm, dựa theo [4], ta có thể giản lược còn:

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= x_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{ix} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{ix}}{g \sum_i m_i} \\ y_{ZMP} &= y_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{iy}}{g \sum_i m_i} \end{aligned} \quad (14)$$

Như vậy, khai thác các biểu thức (4), (6) và (14), ta xác định được vị trí (x_{ZMP} , y_{ZMP} , 0) của điểm ZMP. Cụ thể, ta xác định được từng thành phần trong biểu thức (14) như sau:

$$\begin{aligned} \sum_i m_i P_{ix} &= -(m_2 + 2m_4)x_l + m_1 d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) \\ &+ m_3 L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) + m_1 (x_r + d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) + m_3 (x_r + L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) \\ \sum_i m_i P_{iy} &= -m_4 y_l - m_2 \left(\frac{\omega}{2} + y_l \right) - m_4 (\omega + y_l) \\ &+ m_1 d_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_B) + m_3 L \sin(\theta_1) \sin(\theta_B) \\ &- m_1 (\omega + d_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_B)) - m_3 (L \sin(\theta_1) \sin(\theta_B) + \omega) \\ \sum_i m_i P_{iz} &= m_3 L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) + m_1 d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) \\ &+ (m_2 + 2m_4) P_{6z} + m_1 (z_r - z_l + d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) + m_3 (z_r - z_l + L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) \\ \sum_i m_i &= 2(m_1 + m_3 + m_4) + m_2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_i m_i P_{ix} \ddot{P}_{iz} &= m_1 P_{3x} \ddot{P}_{3z} + (m_2 + 2m_4) P_{6x} \ddot{P}_{6z} \\ &+ m_1 P_{10x} \ddot{P}_{10z} + m_3 P_{m12x} \ddot{P}_{m12z} + m_3 P_{m0x} \ddot{P}_{m0z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{ix} &= m_1 P_{3z} \ddot{P}_{3x} + (m_2 + 2m_4) P_{6z} \ddot{P}_{6x} \\ &+ m_1 P_{10z} \ddot{P}_{10x} + m_3 P_{m12z} \ddot{P}_{m12x} + m_3 P_{m0z} \ddot{P}_{m0x} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} &= m_1 P_{3z} \ddot{P}_{3y} + (m_2 + 2m_4) P_{6z} \ddot{P}_{6y} \\ &+ m_1 P_{10z} \ddot{P}_{10y} + m_3 P_{m12z} \ddot{P}_{m12y} + m_3 P_{m0z} \ddot{P}_{m0y} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} &= m_1 P_{3y} \ddot{P}_{3z} + (m_4) P_{6y} \ddot{P}_{6z} \\
&+ m_2 (P_{6y} - \frac{w}{2}) \ddot{P}_{6z} + m_4 (P_{6y} - w) \ddot{P}_{6z} \\
&+ m_1 P_{10y} \ddot{P}_{10z} + m_3 P_{m12y} \ddot{P}_{m12z} + m_3 P_{m0y} \ddot{P}_{m0z}
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
P_{3x} &= d_2 \cos(\theta_B) \cdot \cos(\theta_1) \\
P_{3y} &= d_2 \sin(\theta_B) \cdot \sin(\theta_1) \\
P_{3z} &= d_2 \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \\
P_3 &= [P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}]^T
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
P_{10y} &= d_2 \sin(\theta_D) \cdot \sin(\theta_{12}) - \omega \\
P_{3z} &= z_r - z_l + d_2 \cos(\theta_{11}) \cdot \cos(\theta_{12}) \\
P_{10} &= [P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]^T
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
P_{0mx} &= L \cos(\theta_B) \cdot \cos(\theta_1) \\
P_{0my} &= L \sin(\theta_B) \cdot \sin(\theta_1) \\
P_{0mz} &= L \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \\
P_{0m} &= [P_{0mx}, P_{0my}, P_{0mz}]^T
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
P_{12mx} &= x_r - x_l + L \cos(\theta_D) \cdot \cos(\theta_{12}) \\
P_{12my} &= L \sin(\theta_D) \cdot \sin(\theta_{12}) - w \\
P_{12mz} &= L \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \\
P_{12m} &= [P_{12mx}, P_{12my}, P_{12mz}]^T
\end{aligned} \tag{20}$$

Kết quả quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người

Như vậy, cuối cùng dùng các biểu thức (15 – 20), quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao đã xác định được vị trí (XZMP, yZMP, 0) của điểm ZMP với độ chính xác cao. Đồng thời, với các giá trị khác nhau của thông số λ , bộ thông số bước đi tối ưu của rô-bốt dạng người $[s, \omega, H, h, f]$ (dùng

thuật toán MGA tối ưu hóa) đã xác định được. Một ví dụ với rô-bốt dạng người kích thước nhỏ, quy trình tối ưu bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người cho phép tối ưu bộ thông số bước đi $[s, \omega, H, h, f]$ được trình bày trong bảng 2 sau:

Bảng 2

Trọng số λ	Chiều dài bước s (m)	Khoảng dịch hông tối đa n (m)	Độ cao nhấc chân tối đa H (m)	Khoảng gấp của chân trụ h (m)	Giá trị tối ưu của hàm chi phí f
0,10	0,125	0,128	0,010	0,022	0,944
0,15	0,130	0,109	0,014	0,020	0,965
0,20	0,124	0,130	0,006	0,017	0,924
0,40	0,119	0,105	0,018	0,016	0,903
0,60	0,105	0,112	0,013	0,016	0,857
0,90	0,057	0,127	0,017	0,018	0,937
1,0	0,055	0,125	0,026	0,010	1,000

Những lợi ích có thể đạt được

Giải pháp hữu ích đề xuất phương pháp và xây dựng quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA) lần đầu được đề xuất giúp khắc phục được những thiếu sót đã tồn tại trước đây gắn với yêu cầu bước đi ổn định và tốc độ bước đi chỉnh được của rô-bốt dạng người. Để đạt được mục đích đó Giải pháp hữu ích đề xuất xây dựng quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người với những đóng góp mới như sau:

Kết quả bộ thông số bước đi tối ưu của rô-bốt dạng người có được từ quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người có thể được nhúng trực tuyến thời gian thực lên các rô-bốt dạng người dùng trong công nghiệp và gia dụng, giúp chúng bước đi ổn định với tốc độ bước đi hiệu chỉnh được.

Kết quả bộ thông số bước đi tối ưu của rô-bốt dạng người có được từ quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người có thể được dùng để thử mô phỏng và thực nghiệm cho các rô-bốt dạng người với mọi cỡ thấp – vừa - cao, qua đó chọn lựa bước đi linh hoạt và ổn định với tốc độ bước chân điều chỉnh được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, *BipedLocomotion: Dynamics, Stability, Control and Application* (Springer-Verlag, Berlin, 1990).
2. F. Yamasaki, K. Hosoda and M. Asada, "An Energy Consumption Based Control for Humanoid Walking," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Rô-bôts and System (IROS)* (Switzerland, Sept. 30–Oct. 5, 2002) Vol. 3, pp. 2473–2477.
3. Kyung-Kon Noh, Jin-Geol Kim and Uk-Youl Huh, "Stability Experiment of a Biped Walking Rô-bôtt with Inverted Pendulum," *30th IEEE Annual Conference of Industrial Electronics Society* (USA, Nov. 2–6, 2004) Vol. 3, pp. 2475–2479.
4. S. Kitamura, Y. Kurematsu and M. Iwata, "Motion Generation of a Biped Locomotive Rô-bôtt Using an Inverted Pendulum Model and Neural Networks," *IEEE Conference on Decision and Control* (USA, Dec. 5–7, 1990) Vol. 6, pp. 3308–3312.
5. Hun-ok Lim, Y. Yamamoto and A. Takanishi, "Control to Realize Human-Like Walking of a Biped Humanoid Rô-bôtt," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (USA, Oct. 8–11, 2000) Vol. 5, pp. 3271–3276.
6. S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Môment Point," *IEEE International Conference on Rô-bôtics and Automation (ICRA)* (Taipei, Sept. 14–19, 2003) Vol. 2, pp. 1620–1626.
7. T. Sugihara, Y. Nakamura and H. Inoue, "Real-time Humanoid Motion Generation Through ZMP Manipulation Based on Inverted Pendulum Control," *ICRA* (USA, May 11–15, 2002) Vol. 2, pp. 1404–1409.
8. S. Kitamura, Y. Kurematsu and M. Iwata, "Motion Generation of a Biped Locomotive Rô-bôtt Using an Inverted Pendulum Model and Neural Networks," *IEEE Conference on Decision and Control* (USA, Dec. 5–7, 1990) Vol. 6, pp. 3308–3312.
9. M. Cao and A. Kawamura, "A Design Method of Neural Oscillatory Networks for Generation of Humanoid Biped Walking Patterns," *ICRA* (Belgium, May 16–20, 1998) Vol. 3, pp. 2357–2362.
10. A. Dasgupta and Y. Nakamura, "Making Feasible Walking Motion of Humanoid Rô-bôtt from Human Motion Capture Data," *ICRA* (USA, May 10–15, 1999) Vol. 2, pp. 1044–1049.

11. Sang-Ho Choi, Young-Ha Choi and Jin-Geol Kim, "Optimal Walking Trajectory Generation for a Biped Rô-bôt Using Genetic Algorithm," *IROS* (South Korea, Oct. 17–21, 1999) Vol. 3, pp. 1456–1461.
12. Z. Tang, C. Zhou and Z. Sun, "Humanoid Walking Gait Optimization Using GA-Based Neural Network," International Conference on Natural Computation (2) (*ICNC(2)*) (China, 2005) pp. 252–261.
13. F. Arakawa and T. Fukuda, "Natural Motion Trajectory Generation of Biped Locomotion Rô-bôt Using Genetic Algorithm Through Energy Optimization," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (China, 1996) Vol. 2, pp. 1495–1500.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Quy trình tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA), quy trình này được thực hiện trên một thiết bị tính toán có năng lực tính toán phù hợp, quy trình này bao gồm các bước sau:

xây dựng động học ngược cho rô-bốt dạng người 12 bậc tự do (dof) dựa trên nhóm thông số đặc trưng, cụ thể:

- i) xác định các ràng buộc cơ bản của động học ngược rô-bốt dạng người 12 bậc tự do dựa trên nhóm thông số đặc trưng là vị trí P_0 , P_6 và P_{12} của 3 khớp nền tảng theo biểu thức (1),

$$\begin{aligned} x_l &= P_{0x} - P_{6x}, \quad y_l = -P_{6y}, \quad z_l = P_{0z} - P_{6z}, \\ x_r &= P_{12x} - P_{6x}, \quad y_r = -P_{6y}, \quad z_r = P_{12z} - P_{6z}, \end{aligned} \quad (1)$$

từ các thông số tọa độ (x_l, y_l, z_l) , (x_r, y_r, z_r) của hông so với gốc tọa độ là mắt cá chân trái (trái) và chân bước (phải),

- ii) xác định 4 góc quay $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ của 4 khớp chính theo biểu thức (2),

$$\begin{aligned} \theta_A &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1^2 + d_2^2 - x_l^2 - y_l^2 - z_l^2}{2d_1d_2} \right] \\ \theta_B &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1 \sin(\theta_A)}{\sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2}} \right] \\ \theta_C &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1^2 + d_2^2 - x_r^2 - y_r^2 - z_r^2}{2d_1d_2} \right] \\ \theta_D &= \cos^{-1} \left[\frac{d_1 \sin(\theta_C)}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó d_l là chiều dài từ khớp hông đến khớp gối và d_2 là chiều dài từ khớp gối đến bàn chân của rô-bốt dạng người,

- iii) xác định động học ngược thể hiện qua 12 góc quay $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{12}]^T$ của toàn bộ 12 khớp của rô-bốt dạng người theo biểu thức (3),

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_l}{z_l} \right)$$

$$\theta_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{y_r}{z_r} \right)$$

$$\theta_6 = -\theta_1$$

$$\theta_7 = -\theta_{12}$$

$$\theta_3 = \pi - \theta_A$$

$$\theta_{10} = \pi - \theta_C$$

$$\theta_5 = \frac{\pi}{2} - \theta_A + \theta_B + \sin^{-1} \left[\frac{x_l}{\sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2}} \right]$$

$$\theta_8 = \frac{\pi}{2} - \theta_C + \theta_D + \sin^{-1} \left[\frac{x_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2}} \right]$$

$$\theta_4 = 0$$

$$\theta_9 = 0$$

$$\theta_2 = \theta_3 - \theta_5$$

$$\theta_{11} = \theta_{10} - \theta_8 \quad (3);$$

tối ưu hóa bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA), cụ thể:

i) xác định tầm cho bộ 4 thông số đặc trưng quyết định dáng đi rô-bốt dạng người bao gồm khoảng chân bước s , khoảng dịch hông, khoảng chùn thân h và khoảng nhấc cao bàn chân của chân quăng H theo biểu thức (7),

$$\begin{aligned} 0,05 &\leq s \leq 0,13 \\ 0,001 &\leq n \leq 0,13 \\ 0,001 &\leq H \leq 0,13 \\ 0,001 &\leq h \leq 0,13 \end{aligned} \quad (7)$$

ii) cài đặt thông số của thuật toán di truyền nâng cao (MGA) theo bảng 1 và vận hành thuật toán di truyền nâng cao (MGA) dùng để tối ưu bộ thông số bước đi của rô-bốt dạng người.

iii) xác định hàm chi phí (*cost function*) khi tính tối ưu bộ 4 thông số đặc trưng dùng thuật toán di truyền nâng cao (MGA) theo các biểu thức (9), (10) và (11),

hàm chi phí (*cost function*) khi tính tối ưu dùng MGA xác định bởi:

$$Q = \int_0^T (\dot{x}_{zmp}^2 + \dot{y}_{zmp}^2) dt \quad (9)$$

phối hợp tiêu chuẩn Q với thông số chiều dài bước chân s , xây dựng hai hàm cần được cực đại hóa:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{Q} \\ f_2 &= s \end{aligned} \quad (10)$$

c cuối cùng, hàm *chi phí* quy chuẩn khi tính tối ưu dùng MGA xác định bởi:

$$f = \frac{\lambda f_1}{f_1^{\max}} + \frac{(1-\lambda)f_2}{f_2^{\max}} \quad (11)$$

iv) xác định vị trí $(x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0)$ của điểm ZMP trong từng vòng lặp khi vận hành thuật toán di truyền nâng cao (MGA) theo các biểu thức dùng các biểu thức từ (12) đến (20) để khẳng định chất lượng bước đi ổn định của bộ thông số được tối ưu,

trong đó để xác định (x_{CM}, y_{CM}, z_{CM}) của trọng tâm của rô-bốt dạng người, cần áp dụng các phép tính thông thường như sau:

$$\begin{aligned} x_{cm} &= \frac{\sum_i m_i P_{ix}}{\sum_i m_i} \\ y_{cm} &= \frac{\sum_i m_i P_{iy}}{\sum_i m_i} \\ z_{cm} &= \frac{\sum_i m_i P_{iz}}{\sum_i m_i} \end{aligned} \quad (12)$$

trong đó, $P_i(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$ là tọa độ tương ứng của từng khớp truyền động, và để xác định vị trí $(x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0)$ của điểm ZMP, cần áp dụng các kết quả:

$$x_{ZMP} = x_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{ix} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{ix}}{g \sum_i m_i} + \frac{\sum_i M_{iy}}{g \sum_i m_i}$$

$$y_{ZMP} = y_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{iy}}{g \sum_i m_i} - \frac{\sum_i M_{ix}}{g \sum_i m_i} \quad (13)$$

trong đó, M_{ix} và M_{iy} là mômen phát sinh ở từng khớp khi quay chiếu theo phương x và y, xét trường hợp rô-bốt dạng người chuyển động chậm, có thể giản lược còn:

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= x_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{ix} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{ix}}{g \sum_i m_i} \\ y_{ZMP} &= y_{cm} + \frac{\sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} - \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{iy}}{g \sum_i m_i} \end{aligned} \quad (14)$$

khai thác các biểu thức (4), (6) và (14), xác định được vị trí (x_{ZMP} , y_{ZMP} , 0) của điểm ZMP, cụ thể là xác định được từng thành phần trong biểu thức (14) như sau:

$$\begin{aligned} \sum_i m_i P_{ix} &= -(m_2 + 2m_4)x_l + m_1 d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) \\ &+ m_3 L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) + m_1(x_r + d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) + m_3(x_r + L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) \\ \sum_i m_i P_{iy} &= -m_4 y_l - m_2 \left(\frac{\omega}{2} + y_l \right) - m_4(\omega + y_l) \\ &+ m_1 d_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_B) + m_3 L \sin(\theta_1) \sin(\theta_B) \\ &- m_1(\omega + d_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_B)) - m_3(L \sin(\theta_1) \sin(\theta_B) + \omega) \\ \sum_i m_i P_{iz} &= m_3 L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) + m_1 d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B) \\ &+ (m_2 + 2m_4)P_{6z} + m_1(z_r - z_l + d_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) + m_3(z_r - z_l + L \cos(\theta_1) \cos(\theta_B)) \\ \sum_i m_i &= 2(m_1 + m_3 + m_4) + m_2 \quad (15) \\ \sum_i m_i P_{ix} \ddot{P}_{iz} &= m_1 P_{3x} \ddot{P}_{3z} + (m_2 + 2m_4)P_{6x} \ddot{P}_{6z} \\ &+ m_1 P_{10x} \ddot{P}_{10z} + m_3 P_{m12x} \ddot{P}_{m12z} + m_3 P_{m0x} \ddot{P}_{m0z} \\ \sum_i m_i P_{iz} \ddot{P}_{ix} &= m_1 P_{3z} \ddot{P}_{3x} + (m_2 + 2m_4)P_{6z} \ddot{P}_{6x} \\ &+ m_1 P_{10z} \ddot{P}_{10x} + m_3 P_{m12z} \ddot{P}_{m12x} + m_3 P_{m0z} \ddot{P}_{m0x} \\ \sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} &= m_1 P_{3y} \ddot{P}_{3z} + (m_2 + 2m_4)P_{6y} \ddot{P}_{6z} \\ &+ m_1 P_{10y} \ddot{P}_{10z} + m_3 P_{m12y} \ddot{P}_{m12z} + m_3 P_{m0y} \ddot{P}_{m0z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_i m_i P_{iy} \ddot{P}_{iz} &= m_1 P_{3y} \ddot{P}_{3z} + (m_4) P_{6y} \ddot{P}_{6z} \\
&+ m_2 (P_{6y} - \frac{w}{2}) \ddot{P}_{6z} + m_4 (P_{6y} - w) \ddot{P}_{6z} \\
&+ m_1 P_{10y} \ddot{P}_{10z} + m_3 P_{m12y} \ddot{P}_{m12z} + m_3 P_{m0y} \ddot{P}_{m0z}
\end{aligned} \tag{16}$$

$$P_{3x} = d_2 \cos(\theta_B) \cdot \cos(\theta_1)$$

$$P_{3y} = d_2 \sin(\theta_B) \cdot \sin(\theta_1)$$

$$P_{3z} = d_2 \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2)$$

$$P_3 = [P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}]^T \tag{17}$$

$$P_{10y} = d_2 \sin(\theta_D) \cdot \sin(\theta_{12}) - \omega$$

$$P_{3z} = z_r - z_l + d_2 \cos(\theta_{11}) \cdot \cos(\theta_{12})$$

$$P_{10} = [P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]^T \tag{18}$$

$$P_{0mx} = L \cos(\theta_B) \cdot \cos(\theta_1)$$

$$P_{0my} = L \sin(\theta_B) \cdot \sin(\theta_1)$$

$$P_{0mz} = L \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2)$$

$$P_{0m} = [P_{0mx}, P_{0my}, P_{0mz}]^T \tag{19}$$

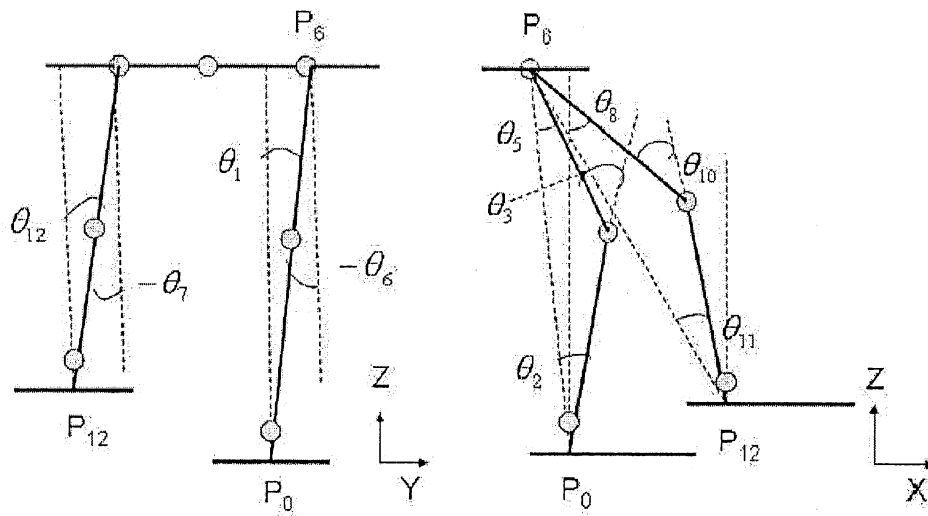
$$P_{12mx} = x_r - x_l + L \cos(\theta_D) \cdot \cos(\theta_{12})$$

$$P_{12my} = L \sin(\theta_D) \cdot \sin(\theta_{12}) - w$$

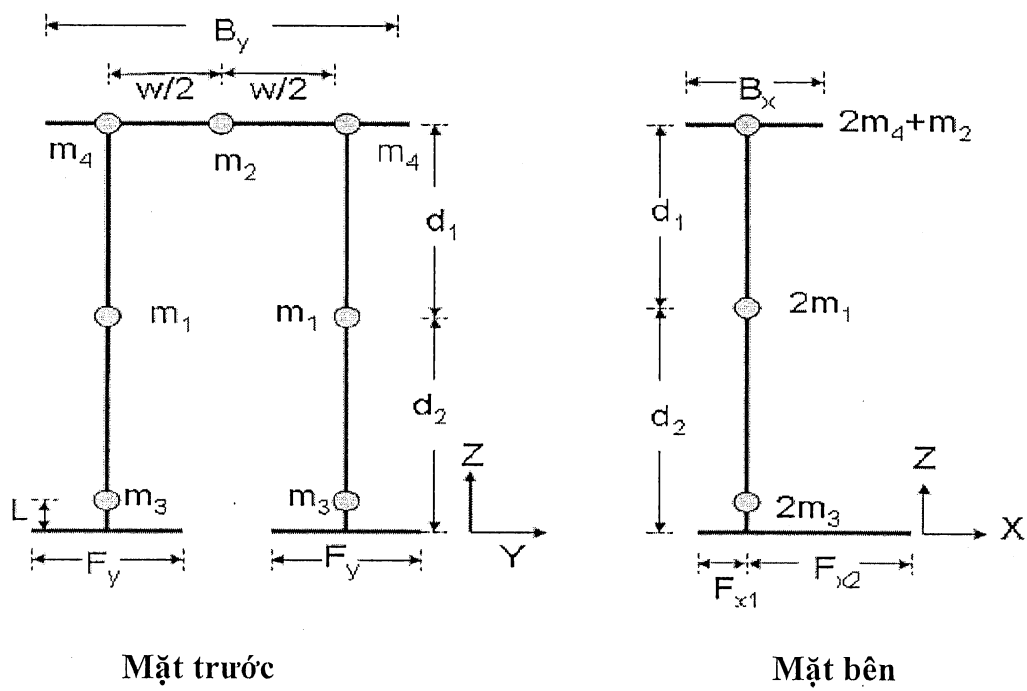
$$P_{12mz} = L \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2)$$

$$P_{12m} = [P_{12mx}, P_{12my}, P_{12mz}]^T \tag{20}$$

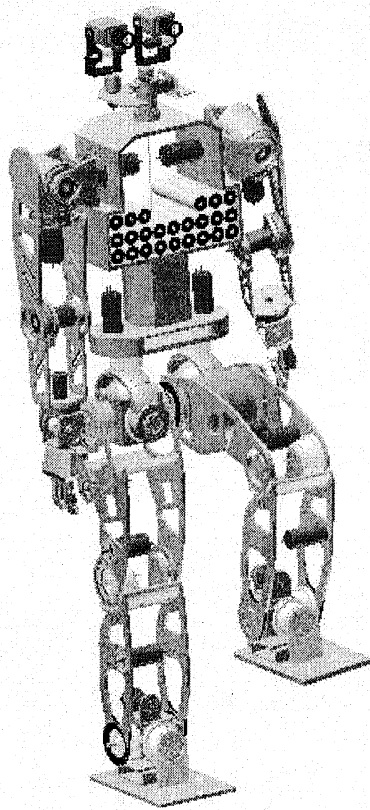
v) thay đổi giá trị trọng số λ có trong hàm chi phí (*cost function*) cho các lần vận hành thuật toán di truyền nâng cao (MGA) và tập hợp kết quả giá trị các bộ thông số tối ưu để điều khiển ổn định bước đi của rô-bốt dạng người.



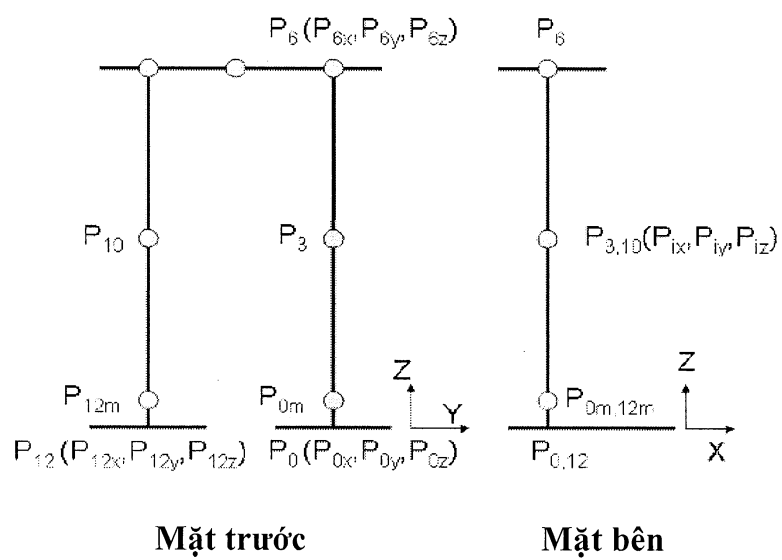
Hình 1



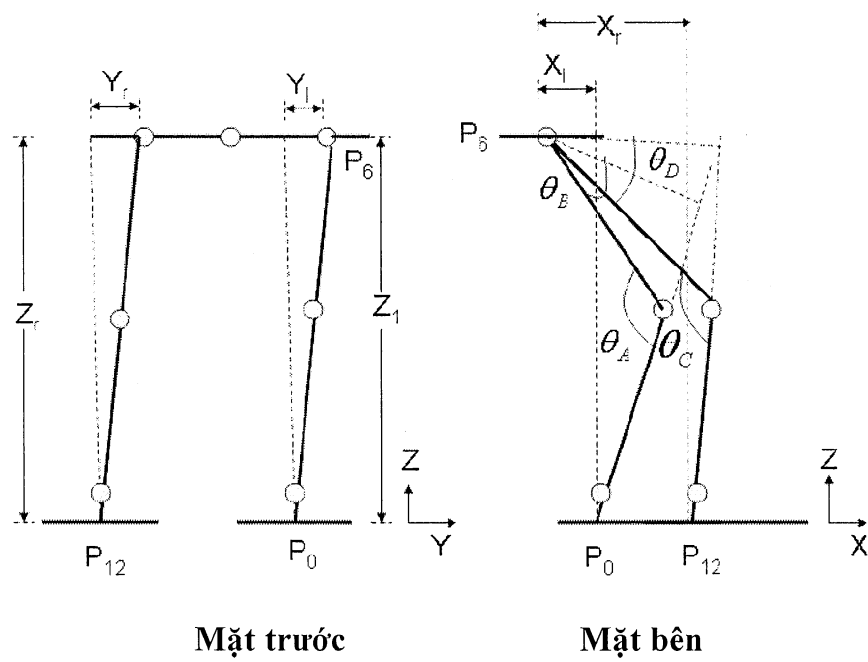
Hình 2



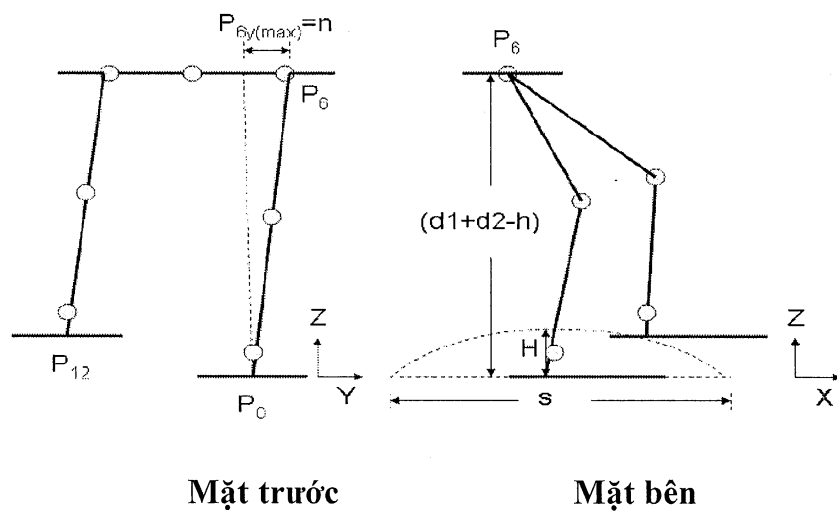
Hình 3



Hình 4



Hình 5



Hình 6