

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

TRẦN THIỆN HUÂN

**BÀI TOÁN NGƯỢC VẬN ĐỘNG ROBOT DẠNG NGƯỜI
TRONG PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH, TẠO DÁNG ĐI VÀ ĐIỀU
KHIỂN ỨNG DỤNG MÔ HÌNH MẠNG NƠ-RÔN MIMO
NARX THÍCH NGHI**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT**

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 9/2019

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

TRẦN THIỆN HUÂN

**BÀI TOÁN NGƯỢC VẬN ĐỘNG ROBOT DẠNG NGƯỜI
TRONG PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH, TẠO DÁNG ĐI VÀ ĐIỀU
KHIỂN ỨNG DỤNG MÔ HÌNH MẠNG NƠ-RÔN MIMO
NARX THÍCH NGHI**

NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT - 9520101

Hướng dẫn khoa học:

1. PSG. TS. HỒ PHẠM HUY ÁNH
2. TS. PHAN ĐỨC HUYNH

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

QUYẾT ĐỊNH

VỀ VIỆC GIAO ĐỀ TÀI LUẬN ÁN VÀ NGƯỜI HƯỚNG DẪN NGHIÊN CỨU SINH KHÓA 2012 HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ quyết định số 426/QĐ-TTg ngày 27/10/1976 của Thủ tướng Chính phủ quy định về mạng lưới tổ chức và nhiệm vụ của các trường đại học;

Căn cứ chương 6 Điều lệ Trường Đại học ban hành kèm theo quyết định số 58/2010/QĐ-TTg ngày 22 tháng 9 năm 2010 của Thủ tướng Chính phủ;

Căn cứ thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ thông tư số 05/2012/TT-BGDĐT ngày 15/02/2012 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ ban hành kèm theo Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị của Trưởng phòng Đào tạo,

QUYẾT ĐỊNH

Điều 1: Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : *Trần Thiện Huân*

Ngành : Cơ kỹ thuật

Khoá: 2012 – 2015

Tên luận án : *Vận động Robot người: phân tích ổn định, tạo dáng đi và điều khiển*

Người HD thứ nhất (HD chính): *TS. Hồ Phạm Huy Ánh*

Người HD thứ hai : *TS. Phan Đức Huỳnh*

Thời gian thực hiện : *01/10/2012 đến 01/10/2015*

Điều 2: Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

Điều 3: - Trưởng các đơn vị và các Ông (Bà) có tên ở điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

- Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký.

Nơi nhận :

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu P.ĐT



PGS.TS. Thái Bá Cần

LÝ LỊCH CÁ NHÂN

I. THÔNG TIN CÁ NHÂN

- Họ và tên: Trần Thiện Huân
- Ngày sinh: 04/02/1980 Nơi sinh: Bình Thuận Nam/Nữ: Nam
- Địa chỉ: 105/15/05 TL37, Phường Thạnh Lộc, Quận 12, Tp. HCM.
- Điện thoại: 0906535683
- Email: huantt@hcmute.edu.vn
- Cơ quan-nơi làm việc: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM.
- Địa chỉ cơ quan: 01 Võ Văn Ngân, Phường Linh Chiểu, Quận Thủ Đức, Tp. HCM.

II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO

- Từ 1997-2001: Sinh viên ngành Vật lý điện tử, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên Tp. HCM.
- Từ 2003-2006: Học viên cao học ngành Vật lý điện tử (hướng kỹ thuật), Trường Đại học Khoa học Tự nhiên Tp. HCM.
- Từ 2012-nay: Nghiên cứu sinh ngành Cơ kỹ thuật, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM.

III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC

- Từ 2001-2002: Giáo viên Trường kỹ thuật Cao Thắng, Tp. HCM.
- Từ 2003-nay: Giảng viên Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 20 tháng 09 năm 2019

Trần Thiện Huân

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 20 tháng 09 năm 2019

Trần Thiện Huân

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến tập thể hướng dẫn: Thầy PGS.TS. Hồ Phạm Huy Ánh và Thầy TS. Phan Đức Huỳnh, nhờ những gợi ý nghiên cứu hết sức quý báu, những chỉ dẫn cụ thể và những ý kiến phản biện của các Thầy đã giúp tôi hoàn thành luận án này. Một lần nữa xin được bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc đến các Thầy.

Tôi xin gửi lời cảm ơn đến tất cả Thầy Cô Khoa Xây dựng – Cơ học ứng dụng, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM đã truyền đạt các kiến thức nền tảng quý báu từ các học phần tiến sĩ, nhờ những kiến thức nền tảng này mà tôi mới có thể thực hiện được công việc nghiên cứu. Xin gửi lời cảm ơn đến các Thầy trong các Hội đồng đánh giá các chuyên đề Tiến sĩ, những ý kiến phản biện và góp ý thật sự đã giúp tôi rất nhiều trong việc chỉnh sửa và hoàn chỉnh luận án của mình.

Xin gửi lời cảm ơn đến lãnh đạo Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, Khoa Khoa học Ứng dụng vì đã có những chính sách hỗ trợ rất tốt cho nghiên cứu sinh học tập và làm việc. Xin cảm ơn Thầy TS. Võ Thanh Tân và các bạn bè đồng nghiệp đã đồng viên, giúp đỡ và chia sẻ kinh nghiệm để tôi có thể thực hiện công việc nghiên cứu một cách thuận lợi nhất. Xin trân trọng cảm ơn Phòng Thí Nghiệm Trọng Điểm Quốc Gia Điều Khiển Số và Kỹ Thuật Hệ Thống (DCSELAB) đã tài trợ kinh phí cho công việc nghiên cứu của tôi thông qua các đề tài nghiên cứu, cơ sở vật chất thực hiện thí nghiệm.

Cuối cùng xin chân thành cảm ơn gia đình và người thân luôn chia sẻ mọi khó khăn và là chỗ dựa vững chắc về vật chất và tinh thần trong suốt thời gian thực hiện và hoàn thành luận án.

TÓM TẮT

Hoạch định, tối ưu hóa và tạo dáng đi cho robot dạng người là nhằm làm cho robot đi được một cách tự nhiên và ổn định như con người. Hiện nay 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 hoạt động. Tuy nhiên, nếu vấn đề này được xem xét từ quan điểm toán học thì hoạch định, tối ưu hóa và tạo dáng đi của robot dạng người trở thành vấn đề tối ưu có ràng buộc và phù hợp với các kỹ thuật tính toán tối ưu.

Trong luận án này, tác giả thực hiện nghiên cứu và phát triển bộ tạo dáng đi (Walking Pattern Generator - WPG) phụ thuộc 4 thông số của Dip (chiều dài bước - S , độ nhấc chân - H , độ khuỵu gối - h và độ lắc hông - n) kết hợp các phương pháp tối ưu hóa ngẫu nhiên (meta-heuristic optimization approaches) và mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (Adaptive Evolutionary Neural Model - AENM) để robot hai chân bước đi ổn định và tự nhiên như con người.

Các đóng góp mới của luận án được tóm tắt như sau:

- *Một là*, Dip đã đề xuất bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S , H , h , n) và thực hiện tối ưu 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) để robot hai chân (kích thước nhỏ) bước đi ổn định với vận tốc nhanh nhất có thể sử dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA). Tuy nhiên, để bắt chước dáng đi của con người thì robot hai chân phải kiểm soát được độ nhấc chân. Vì vậy, tác giả tiếp tục thực hiện tối ưu 4 thông số dáng đi (S , H , h , n) của bộ tạo dáng (WPG) để robot hai chân bước đi ổn định với độ nhấc chân mong muốn sử dụng các phương pháp tối ưu hóa ngẫu nhiên. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5 chứng minh đề xuất của luận án là khả thi.
- *Hai là*, trong quá trình robot hai chân bước đi thì 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) của Dip là không đổi. Điều này làm cho robot hai chân khó thực hiện bước đi ổn định và tự nhiên với 1 quỹ đạo ZMP (Zero Momen Point) mong muốn. Để vượt qua khó khăn này, tác giả thực

hiện nhận dạng 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) này sử dụng mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) được tối ưu bởi thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE). Kết quả mô phỏng trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5 chứng minh đề xuất của luận án là khả thi.

- *Ba là*, bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S , H , h , n) của Dip được đề xuất chỉ áp dụng cho robot hai chân trong giai đoạn bước đi và thiếu giai đoạn chuẩn bị và giai đoạn kết thúc. Để bổ sung, tác giả tiếp tục hoàn thiện bộ tạo dáng đi (WPG) của Dip với đầy đủ 3 giai đoạn như mong muốn với tên gọi là bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (N-WPG). Kết quả mô phỏng trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-4 chứng minh đề xuất của luận án là khả thi.

ABSTRACT

Humanoid robot motion planning, optimization and gait generation is to make the robot walk naturally and stably as humans. Up to now it has been a difficult problem since the current technology has not yet reached the biological objects with highly complicated structure and sophisticated operation. However, under mathematical viewpoint the task of humanoid robot motion planning, optimization and gait generation is investigated as an optimization problem with respect to various trade-off constraints, hence it refers to evolutionary computation techniques.

In this thesis, the author performs the research and development of Walking Pattern Generator (WPG) depending on 4 parameters of Dip (S - step length, h - leg displacement, H - height of swing ankle, n - hip displacement) combining meta-heuristic optimization approaches and Adaptive Evolutionary Neural Model (AENM) for biped robot to move smoothly and naturally as humans.

The new contributions of the thesis are summarized as follows:

- *Firstly*, Dip proposed WPG depending on 4 parameters (S , H , h , n) and made optimal 4 parameters of WPG for the small-sized biped robot stable movement with the fastest possible speed using genetic algorithms (Genetic Algorithm-GA). However, in order to catch people's gaits, biped robots have to control their foot-lifting. Therefore, the author continues to optimize the four gait parameters (S , H , h , n) of the WPG that permits the biped robot able to stably and naturally walking with pre-set foot-lifting magnitude using meta-heuristic optimization approaches. Simulation and experimental results on small-sized biped robot model (HUBOT-5) prove that the thesis's proposal is feasible.
- *Secondly*, while the human robot walks, the 4 parameters of the WPG of Dip are unchanged. This makes biped robot difficult to perform a stable and natural walk with a desired ZMP trajectory (Zero Moment Point). To overcome this challenge, the author identifies and controls these 4

parameters of the WPG using adaptive evolutionary neural model (AENM) optimized Modified Differential Evolution (MDE). Simulation results on the small-sized biped robot models (HUBOT-5) prove the thesis's proposal is feasible.

- *Thirdly*, the WPG depending on the 4 parameters (S, H, h, n) of the Dip proposed is only applicable to biped robots in the stepping stage and lacks of preparation and end stages. In order to overcome these problems, the author continues to complete WPG of Dip with full 3 stages as desired with the name of a Natural Walking Pattern Generator (N-WPG). Simulation results on the small-sized biped robot models (HUBOT-4) proves that the thesis's proposal is feasible.

MỤC LỤC

Trang tựa	TRANG
Quyết định giao đề tài	
Lý lịch cá nhân	i
Lời cam đoan	ii
Lời cảm ơn	iii
Tóm tắt	iv
Mục lục	viii
Danh sách các chữ viết tắt	xi
Danh sách các hình	xii
Danh sách các bảng	xv
Danh mục các ký hiệu	xvi
Mở đầu	1
Động lực nghiên cứu	1
Mục tiêu nghiên cứu	2
Phương pháp nghiên cứu	3
Kết quả nghiên cứu	4
Bố cục của luận án	5
Chương 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN	8
1.1 Robot dạng người	8
1.2 Tổng quan về xây dựng quỹ đạo và điều khiển robot dạng người	11

1.3 Kết luận	19
Chương 2. TỐI ƯU HÓA DÁNG ĐI CHO ROBOT HAI CHÂN KÍCH THƯỚC NHỎ BƯỚC ĐI ỔN ĐỊNH VỚI ĐỘ NHẮC CHÂN MONG MUỐN SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI SAI CẢI TIẾN (MDE)	21
2.1 Giới thiệu	21
2.2 Mô hình robot hai chân	22
2.3 Quy hoạch dáng đi cho robot hai chân HUBOT-5	25
2.4 Tối ưu tham số dáng đi sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai MDE	32
2.4.1 Giải thuật MDE	32
2.4.2 Xây dựng hàm mục tiêu	34
2.4.3 Tính toán quỹ đạo điểm ZMP	35
2.5 Kết quả mô phỏng và thực nghiệm	39
2.6 Kết luận	49
Chương 3. TẠO DÁNG ĐI THÍCH NGHI CHO ROBOT HAI CHÂN BƯỚC ĐI ỔN ĐỊNH SỬ DỤNG MÔ HÌNH MẠNG NƠ-RÔN TIẾN HÓA THÍCH NGHI (AENM) ĐƯỢC TỐI ƯU BỞI THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI SAI CẢI TIẾN (MDE)	50
3.1 Giới thiệu	50
3.2 Cấu hình robot hai chân kích thước nhỏ	52
3.3 Nhận dạng và tối ưu mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM)	53
3.3.1 Đề xuất mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM)	54
3.3.2 Bộ tạo mẫu dáng đi (WPG)	56
3.3.3 Hoạt động của mô hình đề xuất	60

3.4 Kết quả nhận dạng	60
3.5 Kết luận	65
Chương 4. HOẠCH ĐỊNH DÁNG ĐI TỰ NHIÊN CHO ROBOT HAI CHÂN	67
4.1 Giới thiệu	67
4.2 Bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (N-WPG) cho robot hai chân	69
4.2.1 Mô hình robot hai chân	69
4.2.2 Chu kỳ bước đi	69
4.2.3 Quỹ đạo tham chiếu của hai bàn chân và hông	71
4.2.4 Phân tích động học ngược robot hai chân	80
4.3 Vận động của robot hai chân dựa trên nguyên lý ZMP	82
4.4 Phân tích quỹ đạo ZMP của bộ tạo mẫu đi bộ	86
4.5 Kết luận	91
Chương 5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	93
5.1 Kết luận	93
5.2 Kiến nghị	95
TÀI LIỆU THAM KHẢO	96
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ	113
PHỤ LỤC	115

DANH SÁCH CÁC CHỮ VIẾT TẮT

HMP - Humanoid Motion Planning, Optimization, and Gait Generation

CoM - Center of Mass

WPG - Walking Pattern Generator

AENM - Adaptive Evolutionary Neural Model

GA - Genetic Algorithm

ZMP - Zero Momen Point

MDE - Modified Differential Evolution

PSO - Particle Swarm Optimization

WP - Walking Pattern

SSP – Single Support Phase

DSP – Double Support Phase

CPG - Central Pattern Generator

RCGA - Real Coded Genetic Algorithm

RBFNN - Radial Basis Function Neural Network

CMAC - Cerebellar Model Arithmetic Computer

FRL - Fuzzy Reinforcement Learning

DE - Differential Evolution

LMS – Least Mean Square

N-WPG - Nature Walking Pattern Generation

BTD – Bậc Tự Do

DANH SÁCH CÁC HÌNH

Hình 2.1: Hình ảnh mô tả robot hai chân HUBOT-5 với 12 (BTD)	23
Hình 2.2: Mô hình kết cấu robot hai chân HUBOT-5	24
Hình 2.3: Bốn tham số ảnh hưởng đến dáng đi robot hai chân HUBOT-5	26
Hình 2.4: Minh họa 10 quỹ đạo GCoM và ZMP	28
Hình 2.5: Định nghĩa các biến trong công thức (2.4)	31
Hình 2.6: Diện tích vùng chân trụ trong 2 trường hợp	34
Hình 2.7: Phân bố khối lượng và tọa độ của các khâu	36
Hình 2.8: Lưu đồ khối tính quỹ đạo điểm ZMP	38
Hình 2.9: Giá trị trung bình của hàm mục tiêu f	42
Hình 2.10: Khảo sát ZMP và COM	43
Hình 2.11: Dáng đi 2D của HUBOT-5 có độ nhấc chân khác nhau	44
Hình 2.12: Quỹ đạo ZMP và COM	45
Hình 2.13: HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhấc chân $H_{ref}=2\text{cm}$	46
Hình 2.14: HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhấc chân $H_{ref}=4\text{cm}$	46
Hình 2.15: Quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=2\text{cm}$)	47
Hình 2.16: Quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=4\text{cm}$)	47
Hình 2.17: Quỹ đạo sai lệch của 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5($H_{ref}=2\text{cm}$)	48
Hình 2.18: Sai lệch của quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5($H_{ref}=4\text{cm}$)	48
Hình 3.1: Đề xuất sơ đồ điều khiển sử dụng mô hình AENM	54

Hình 3.2: Đề xuất cấu trúc mô hình AENM	55
Hình 3.3: Bốn tham số ảnh hưởng đến dáng đi robot hai chân HUBOT-5	56
Hình 3.4: Các tham số của vấn đề động học ngược	58
Hình 3.5: So sánh kết quả hội tụ của hàm mục tiêu	62
Hình 3.6: Kết quả so sánh quỹ đạo ZMP của AENM và ZMP mong muốn	62
Hình 3.7: So sánh về góc quay ở 10 khớp của robot hai chân	64
Hình 4.1: Mô hình kết cấu robot hai chân	69
Hình 4.2: Quá trình robot hai chân bước đi tự nhiên có đầy đủ 3 giai đoạn	70
Hình 4.3: Khoảng thời gian trong 1 bước	71
Hình 4.4: Quỹ đạo tham chiếu của P_{1x}	72
Hình 4.5: Quỹ đạo mong muốn của P_{1z}	73
Hình 4.6: Quỹ đạo tham chiếu của P_{10x}	74
Hình 4.7: Quỹ đạo mong muốn của P_{10z}	75
Hình 4.8: Quỹ đạo tham chiếu của P_{5x}	77
Hình 4.9: Quỹ đạo tham chiếu của P_{5y}	78
Hình 4.10: Quỹ đạo mong muốn của P_{5z}	79
Hình 4.11: Định nghĩa các biến trong công thức (4.18)	81
Hình 4.12: Diện tích vùng chân trụ trong 2 trường hợp	82
Hình 4.13: Phân bố khối lượng và tọa độ của các khâu	84
Hình 4.14: Lưu đồ khối tính quỹ đạo điểm ZMP	85
Hình 4.15: Hình ảnh mô tả robot hai chân HUBOT-4 với 10 (BTD)	86

Hình 4.16: quỹ đạo ZMP và GCOM của HUBOT-4 khi bước đi tự nhiên	87
Hình 4.17: Quá trình đi bộ tự nhiên trong mặt phẳng đứng ngang	88
Hình 4.18: Quá trình đi bộ trong mặt phẳng đứng dọc	89
Hình 4.19: Quá trình đi bộ trong mặt phẳng XY	90
Hình 4.20: 10 quỹ đạo góc quay ở hai chân của robot khi bước đi tự nhiên	91

DANH SÁCH BẢNG

Bảng 1.1: Các nguyên tắc điều khiển của bộ cân bằng	14
Bảng 1.2: Tối ưu tham số đáng đi sử dụng thuật toán tiến hóa	17
Bảng 2.1: Giới hạn góc quay	24
Bảng 2.2: Thông số của 10 đáng đi	27
Bảng 2.3: Thông số vật lý của HUBOT-5	39
Bảng 2.4: Giới hạn các tham số đáng đi của HUBOT-5	40
Bảng 2.5: Kết quả khảo sát giá trị tham số của GA	40
Bảng 2.6: Kết quả khảo sát giá trị tham số của PSO	41
Bảng 2.7: Các tham số của thuật toán GA, PSO, MDE	41
Bảng 2.8: Giá trị thông số đáng đi tối ưu và giá trị tốt nhất hàm mục tiêu	42
Bảng 2.9: Bộ tham số tối ưu với từng giải thuật	43
Bảng 2.10: Bộ tham số tối ưu	44
Bảng 3.1: Các tham số của các thuật toán GA, PSO, MDE	61
Bảng 3.2: So sánh kết quả huấn luyện	63
Bảng 3.3: Giá trị trọng số phù hợp nhất của mô hình AENM đã đề xuất	65
Bảng 4.1: Thông số vật lý của HUBOT-4	87
Bảng 4.2: Thông số của 6 đáng đi tự nhiên	88
Bảng A.1: Pseudo-code of DE	115
Bảng A.2: Pseudo-code of giải thuật tiến hóa vi sai cải tiến MDE	116

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Ý nghĩa
d_i	chiều dài giữa các khớp
m_i	khối lượng các khâu
θ_i	các góc quay ở 2 chân
S, H, h, n	các tham số dáng đi
$P_i(x, y, z)$,	tọa độ các khớp
p_M	xác suất đột biến
p_C	xác suất lai ghép
C_1	hệ số gia tốc 1
C_2	hệ số gia tốc 2
w	trọng số quán tính
F	hệ số đột biến
CR	xác suất lai ghép
H_{ref}	độ nhấc chân theo ý muốn

MỞ ĐẦU

Động lực nghiên cứu

Trong những năm gần đây, nhiều nhà khoa học đã cùng tham gia để nghiên cứu giải quyết nhiều vấn đề liên quan đến robot dạng người và cho ra đời 14 robot dạng người nổi tiếng [1]: ASIMO tại công ty Honda, Cog tại MIT, HRP-5P tại AIST, HUBO tại KAIST, Lohmic và LoLa tại TUM, NAO tại công ty Aldebaran, Atlas Robots tại công ty Boston Dynamics, QRIO tại công ty Sony, Robonaut tại NASA, T-HR3 tại công ty Toyota, WABIAN-2R tại đại học Waseda, iCub tại IIT, Robot Sarcos tại công ty Sarcos, ARMARX tại KIT. Tuy nhiên, việc nghiên cứu về robot dạng người luôn tồn tại những thách thức rất lớn vì đây là loại robot giống người, để mô tả các động tác cử động giống người đòi hỏi có nhiều nghiên cứu chuyên sâu.

- *Thứ nhất là* kết cấu cơ khí: Lắp đặt các động cơ và hệ thống cảm biến phải vừa gọn vừa đảm bảo tính đối xứng, tính thẩm mỹ và giảm tiêu tốn năng lượng trong di chuyển. Thiết kế phần cơ khí cho robot dạng người có nhiều bậc tự do và thực hiện các cử động giống con người. Thiết kế các khớp nối sao cho sự di chuyển trở nên vững vàng và nhuễn hơn.
- *Thứ hai là* mô hình toán: Để có thể có những cử động giống người thì kết cấu cơ khí càng nhiều bậc tự do. Nhưng như thế sẽ làm tăng số bậc tự do và mô hình động lực học lại càng phức tạp; Việc hoạch định di chuyển cho robot còn nhiều khó khăn để có được dáng đi giống với con người, trong mô hình toán sẽ tồn tại nhiều điều kiện ràng buộc, việc giải các ràng buộc này cùng với việc chọn các điều kiện đầu cho bài toán là một thách thức.
- *Thứ ba là* điều khiển: Trọng tâm của robot trong quá trình di chuyển luôn có khuynh hướng lệch ra khỏi vùng ổn định cân bằng cùng với hiện tượng kẹt cứng ở các cổ chân (hiệu chỉnh ZMP với hạn chế góc quay ở khớp cổ chân) làm cho vấn đề điều khiển trở nên cực kỳ khó khăn. Điều khiển robot mô phỏng người

còn có khó khăn khác là hệ thống phi tuyến nhiều bậc tự do: Trước tiên các thông số không chắc chắn của hệ thống và tín hiệu nhiễu ảnh hưởng rất lớn đến hoạt động điều khiển. Tiếp theo là, sự di chuyển của robot mô phỏng người trong pha hai chân chạm đất có thể được miêu tả như là sự chuyển động của một hệ thống động lực học dưới ràng buộc holonomic (đa hướng) làm cho việc điều khiển phức tạp hơn. Cuối cùng mục đích chính của điều khiển một robot mô phỏng người là duy trì sự ổn định động lực học (ổn định ZMP online) trong bước chân, và là một vấn đề quan trọng cần được nghiên cứu kỹ trong hoạch định di chuyển của robot mô phỏng người.

Tại Việt Nam, có những công trình nghiên cứu robot dạng người như sau. Dự án nghiên cứu robot hai chân mô phỏng người đang thực hiện tại Phòng Thí Nghiệm Trọng Điểm Quốc Gia Điều Khiển Số và Kỹ Thuật Hệ Thống (DCSELAB) với các phiên bản: HUBOT-2, HUBOT-3 [2]. Robot hai chân HUTECH-1 của trường đại học HUTECH [149]. Robot dạng người UXA 90-Light của trung tâm nghiên cứu thiết bị và công nghệ cơ khí bách khoa [150]. Dự án VIEbot của Viện nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa, Bộ công thương (VIELINA) [151].

Như vậy, những công trình nghiên cứu robot dạng người tại Việt Nam còn rất hạn chế. Với mong muốn chế tạo một robot dạng người đầu tiên của Việt Nam có khả năng bước đi giống người và góp phần vào dự án nghiên cứu robot hai chân mô phỏng người đang thực hiện tại Phòng Thí Nghiệm Trọng Điểm Quốc Gia Điều Khiển Số và Kỹ Thuật Hệ Thống (DCSELAB), chính là động lực nghiên cứu.

Mục tiêu nghiên cứu

Hoạch định, tối ưu hóa và tạo dáng đi cho robot dạng người là nhằm làm cho robot đi được một cách tự nhiên và ổn định như con người. Hiện nay 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 hoạt động.

Luận án này tiếp tục tập trung nghiên cứu và đề xuất những giải pháp mới về hoạch định, tối ưu hóa và tạo dáng đi cho robot hai chân kích thước nhỏ có khả năng bước đi thăng được một cách tự nhiên và ổn định như con người trên địa hình bằng phẳng.

Từ quan điểm toán học, hoạch định, tối ưu hóa và tạo dáng đi của robot dạng người trở thành vấn đề tối ưu có ràng buộc và phù hợp với các kỹ thuật tính toán tối ưu. Trong luận án này, tác giả thực hiện nghiên cứu và phát triển bộ tạo dáng đi (Walking Pattern Generator - WPG) phụ thuộc 4 thông số của Dip (chiều dài bước - S , độ nhấc chân - H , độ khụy gối - h và độ lắc hông - n) kết hợp các phương pháp tối ưu hóa ngẫu nhiên (meta-heuristic optimization approaches) và mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (Adaptive Evolutionary Neural Model - AENM) để robot hai chân có thể bước đi ổn định và tự nhiên như con người.

Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu được áp dụng để thực hiện luận án là phân tích lý thuyết, mô phỏng trên máy tính và kiểm chứng điều khiển trên mô hình thực nghiệm.

- Phân tích lý thuyết: nghiên cứu các lý thuyết liên quan đến nội dung luận án đã công bố trên các tạp chí, hội nghị khoa học chuyên ngành. Trên cơ sở đó đề xuất bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S , H , h , n) để robot hai chân thực hiện bước đi thăng trên bề mặt bằng phẳng với 3 trường hợp: không ngã với độ nhấc chân cài đặt trước sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE-Modified Differential Evolution); không ngã với quỹ đạo ZMP (Zero Moment Point) được thiết kế trước sử dụng mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (Adaptive Evolutionary Neural Model - AENM) được tối ưu bởi thuật toán MDE; với dáng đi tự nhiên đầy đủ 3 giai đoạn (chuẩn bị, bước, kết thúc).
- Mô phỏng trên máy tính: Lập trình mô phỏng mô hình đề xuất nghiên cứu trên, cho robot hai chân (kích thước nhỏ). Trên cơ sở các kết quả mô phỏng rút ra các kết luận về mô hình đề xuất.

- Ứng dụng thực nghiệm: Triển khai thực nghiệm mô hình đề xuất trên, cho robot hai chân (kích thước nhỏ), phân tích kết quả, rút ra nhận xét.

Kết quả nghiên cứu

Các kết quả nghiên cứu đạt được của luận án, được tóm tắt như sau:

- Dip đã đề xuất bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S, H, h, n) và thực hiện tối ưu 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) để robot hai chân (kích thước nhỏ) bước đi ổn định với vận tốc nhanh nhất có thể sử dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA). Tuy nhiên, để bắt chước dáng đi của con người thì robot hai chân phải kiểm soát được độ nhấc chân. Vì vậy, tác giả tiếp tục thực hiện tối ưu 4 thông số dáng đi (S, H, h, n) của bộ tạo dáng (WPG) để robot hai chân bước đi ổn định với độ nhấc chân mong muốn sử dụng các phương pháp tối ưu hóa ngẫu nhiên (meta-heuristic optimization approaches): GA, PSO, MDE. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5 chứng minh đề xuất của luận án là khả thi. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [2], [4] và [7], trong danh mục công trình công bố của tác giả.
- Trong quá trình robot hai chân bước đi thì 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) của Dip là không đổi. Điều này làm cho robot hai chân khó thực hiện bước đi ổn định và tự nhiên với 1 quỹ đạo ZMP (Zero Momen Point) mong muốn. Để vượt qua khó khăn này, tác giả thực hiện nhận dạng và điều khiển 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) này sử dụng mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (Adaptive Evolutionary Neural Model - AENM) được tối ưu bởi thuật toán (Modified Differential Evolution – MDE). Kết quả mô phỏng trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5 chứng minh đề xuất của luận án là khả thi. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [3], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

- Bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S, H, h, n) của Dip được đề xuất chỉ áp dụng cho robot hai chân trong giai đoạn bước đi và thiếu giai đoạn chuẩn bị và giai đoạn kết thúc. Để bổ sung, tác giả tiếp tục hoàn thiện bộ tạo dáng đi (WPG) của Dip với đầy đủ 3 giai đoạn như mong muốn với tên gọi là bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (N-WPG). Kết quả mô phỏng trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-4 chứng minh đề xuất của luận án là khả thi. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [1] và [6], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

Bố cục của luận án

- *Chương 1: Nghiên cứu tổng quan.* Nội dung chương này trình bày tóm tắt các kết quả đã có trong thiết kế và chế tạo robot dạng người, đặc biệt ở các nước đang dẫn đầu trong lĩnh vực này như Nhật, Đức, Mỹ, Hàn Quốc. Sau đó là phần tổng quan trình bày các phương pháp xây dựng quỹ đạo bước đi và dáng đi cho robot hai chân. Cuối cùng trình bày mục tiêu nghiên cứu trọng tâm của luận án.
- *Chương 2: Tối ưu hóa dáng đi cho robot hai chân kích thước nhỏ bước đi ổn định với độ nhấc chân mong muốn sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE).* Chương này đề xuất phương pháp mới tối ưu hóa một số thông số dáng đi cho robot hai chân cho phép bước đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước. Thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE-Modified Differential Evolution) được sử dụng để tối ưu các thông số dáng đi giúp robot hai chân 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-Genetic Algorithm) và thuật toán bầy đàn (PSO-Particle Swarm Optimization). Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên robot hai chân kích thước nhỏ (HUBOT-5) chứng tỏ thuật toán đề xuất bảo đảm dáng đi ổn định cho robot hai chân với độ nhấc chân chính xác.

- Chương 3: Tạo dáng đi thích nghi cho robot hai chân bước đi ổn định sử dụng mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) được tối ưu bởi thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE).* Chương này giới thiệu một hướng mới để tạo dáng thích nghi robot hai chân với mục tiêu bước đi ổn định và tự nhiên trên bề mặt bằng phẳng. Đề xuất áp dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE – Modified Differential Evolution) tối ưu bộ trọng số của mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM – Adaptive Evolutionary Neural Model) để nhận dạng các thông số dáng đi của bộ tạo dáng (WPG – Walking Pattern Generator) giúp robot hai chân bám theo quỹ đạo ZMP (Zero Moment Point) mong muốn. Hiệu quả của đề xuất MDE được so sánh với thuật toán PSO (Particle Swarm Optimisation) và GA (Genetic Algorithm). Phương pháp đề xuất được kiểm chứng trên mẫu thử robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5. Kết quả nhận dạng chứng minh rằng phương pháp đề xuất (MDE-AENM) hiệu quả trong việc tạo dáng đi bền vững và chính xác.
- Chương 4: Hoạch định dáng đi tự nhiên cho robot hai chân.* Chương này giới thiệu hướng tiếp cận mới cho phép phát ra quỹ đạo bước đi tự nhiên ổn định áp dụng cho robot hai chân kích thước nhỏ. Các thông số chính được chọn thể hiện các ràng buộc từ tọa độ mong muốn của bàn chân, đầu gối và hông tuân thủ nguyên lý ổn định ZMP. Từ đó quỹ đạo ổn định hoàn chỉnh của bàn chân, đầu gối và hông được hình thành. Dựa trên bộ thông số chủ chốt này, dùng phép biến đổi động học ngược của robot hai chân, các kiểu quỹ đạo bước đi tự nhiên ổn định khác nhau sẽ được xây dựng, qua đó cho phép điều khiển robot hai chân kích thước nhỏ bước đi tự nhiên ổn định thỏa mãn nguyên lý ổn định ZMP thể hiện qua góc quay đồng bộ phù hợp cho từng khớp. Các kết quả mô phỏng được thực hiện khẳng định tính khả thi và hiệu quả của phương pháp hoạch định được đề xuất.

- *Chương 5: Kết luận và kiến nghị.* Chương này, tổng kết lại các đóng góp của luận án ở khía cạnh lý thuyết và thực nghiệm vào việc hoạch định, tối ưu hóa và tạo dáng đi cho robot hai chân là nhằm làm cho robot đi được một cách tự nhiên và ổn định như con người. Cuối chương là một số đề xuất về hướng nghiên cứu tiếp theo.

CHƯƠNG 1 NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

1.1 Robot dạng người

Biped robot là khái niệm dùng để chỉ robot có khả năng bước được trên 2 chân, hiện tại người ta chủ yếu sử dụng biped robot như một khái niệm về robot dạng người.

Năm 1970, tiên phong nghiên cứu về biped robot là hai nhà nghiên cứu nổi tiếng Kato và Vukobratovic. Họ đều xây dựng mô hình thực nghiệm về biped robot. Tại Nhật, biped robot đầu tiên có tên WABOT1 được thực hiện thành công vào 1973 bởi I. Kato cùng đồng nghiệp tại đại học Waseda [3]. Họ sử dụng một sơ đồ điều khiển đơn giản và nó có thể thực hiện đi bộ vài bước rất chậm trong trường hợp thăng bằng tĩnh. Đây là thành tựu được xem như điểm bắt đầu cho việc sản xuất ra những biped robot. Tại viện Mihailo Puppin ở Belgrade – Yugoslavia, M. Vukobratovic cùng đồng nghiệp đã thiết kế kết cấu khung cho biped robot đầu tiên và đưa ra khái niệm ZMP để đảm bảo biped robot vận động ổn định vào năm 1972 [4]. Khái niệm ZMP này hiện nay được sử dụng rộng rãi trong điều khiển biped robot [5].

Vào thập niên kế tiếp – 1980, những đột phá đến từ Mỹ với hai nhà nghiên cứu R. MC Ghee và M. Raibert. Thật sự, R. MC Ghee đã bắt đầu nghiên cứu về biped robot vào thập niên 60 tại đại học Nam Cali (USC) và thập niên 70 tại đại học Ohio (OSU) với kết quả nổi bật là điều khiển biped robot đi bộ bằng máy tính. M. Raibert tại đại học Carnegie Mellon (CMU) bắt đầu nghiên cứu ổn định động lực học khi chạy. Sau đó, M. Raibert thành lập phòng thí nghiệm LEGLAB tại Viện kỹ thuật Massachusetts (MIT) và đạt được những kết quả khá ấn tượng cho robot có một chân, hai chân và bốn chân. [6]

Cuối thập niên 90, với sự phát triển của khoa học kỹ thuật đã chứng minh rằng có thể xây dựng được robot dạng người. Trong số những robot dạng người lúc bây giờ thì ASIMO của hãng HONDA có thể đi bộ giống người nhất. Mặc dù, HONDA công bố kết quả thực nghiệm về ASIMO rất sớm vào năm 1998 nhưng không công bố chi tiết

về việc làm thế nào để ASIMO có thể đi bộ giống con người mà chỉ cho biết là hệ thống của ASIMO đi bộ sử dụng tiêu chuẩn ZMP [7, 8]. Chính vì vậy, tại thời điểm đó có rất nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới tập trung vào nghiên cứu biped robot đi bộ sử dụng tiêu chuẩn ZMP với nhiều quan điểm khác nhau [9 – 13]. Mãi đến năm 2009, Toru Takenaka cùng đồng nghiệp của hãng HONDA mới trình bày tại hội nghị quốc tế về “Robot và Hệ thống thông minh” tại Louis – Mỹ với chủ đề “Tạo vận động và điều khiển cho biped robot theo thời gian thực” thông qua bốn bài báo: tạo dáng đi bộ [14], tạo dáng chạy [15], bù sai số động lực học [16], điều khiển cân bằng thông minh [17].

Hiện nay, những thành quả ấn tượng nhất vẫn thường xuyên được đề cập là sản phẩm được giới thiệu bởi các trường đại học, các viện nghiên cứu, các công ty và các dự án. Các hoạt động nghiên cứu về robot dạng người trên khắp thế giới đã tăng tốc trong những thập kỷ qua. Tại Nhật Bản, nhóm của giáo sư Takanishi tại trường đại học Waseda đã tích cực phát triển nhiều robot dạng người theo hướng của giáo sư Kato (Giáo sư Kato là người đã chế tạo robot dạng người – WABOT-1 đầu tiên trên thế giới). Vào năm 2006, WABIAN-2R của giáo sư Takanishi đã thể hiện khả năng đi bộ ấn tượng giống như con người với đầu gối duỗi, tiếp đất bằng gót chân và dừng chuyển động bằng các ngón chân [18]. Một nhóm nổi bật khác được dẫn dắt bởi giáo sư Inaba tại Đại học Tokyo. Năm 2010, họ đã chứng minh HRP-2 có thể nâng và giữ các vật thể (có trọng lượng không xác định) dựa trên ước tính trực tiếp về lực tương tác [19]. Họ cũng đang phát triển robot dạng người nguyên bản có thể giữ thăng bằng ngay cả khi bị đá [20]. Phòng thí nghiệm về khoa học thần kinh ATR đang nghiên cứu robot dạng người với quan điểm về khoa học của bộ não. Bộ điều khiển cân bằng về mặt sinh học của họ đã được thử nghiệm trên robot dạng người CB-i (do công ty SARCOS phát triển) [21]. Nghiên cứu robot dạng người không bị giới hạn ở Nhật Bản, ví dụ như: Lola của Đại học kỹ thuật Munchen (TUM) [22], HUBO2 của Viện Khoa học và Công nghệ tiên tiến Hàn Quốc (KAIST) [23], BHR-2 của Viện Công nghệ Bắc Kinh [24],

iCub của Viện Công nghệ Ý (IIT) và Đại học Genova [25], CHARLI của Viện Bách khoa Virginia [26], và TORO của Trung tâm hàng không vũ trụ Đức (DLR) [27].

Ngoài ra còn có nhiều robot dạng người được phát triển bởi các công ty. Kể từ khi ra mắt đáng ngạc nhiên về robot dạng người P2 vào năm 1996, Honda đã tiếp tục nghiên cứu và phát triển loạt ASIMO của họ. ASIMO mới nhất được công bố vào năm 2011 có thể chạy với tốc độ 9 km/h, chạy lùi, nhảy bằng một chân hoặc hai chân liên tục [28]. Tại EXPO 2005 tại Aichi, một nhóm robot được phát triển bởi Tập đoàn ô tô Toyota đã thu hút lượng lớn khán giả bởi màn trình diễn thổi kèn của robot dạng người. Năm 2007, họ đã tiết lộ một robot dạng người khác có thể chơi violin [29]. Công ty điện tử Samsung của Hàn Quốc, cũng đã phát triển robot dạng người với Viện Khoa học và Công nghệ Hàn Quốc (KIST). Robot dạng người mới nhất của họ là Roboray, có thể thực hiện bước đi giống như con người [30]. Vào năm 2012, công ty thiết kế và kỹ thuật robot của Mỹ, Boston Dynamics, đã phát triển một robot hình người PETMAN để thử quần áo bảo hộ hóa học [31]. Được hỗ trợ bởi các bộ truyền động thủy lực và được điều khiển bởi phần mềm điều khiển tiên tiến, robot này có thể thực hiện các động tác thu mình ngồi sát xuống đất, thu mình ngồi sát xuống đất trong khi xoay và nhảy với hai cánh tay giơ lên cao, cũng như đi bộ tự nhiên lên đến 4.8 km/giờ. Chúng ta không thể mua các robot được đề cập ở trên vì chúng được phát triển như một phần của các dự án R&D lớn. Mặt khác, đã tồn tại các robot dạng người có sẵn trên thị trường cho mục đích nghiên cứu. Ví dụ, công ty Kawada đang bán robot dạng người HRP-4 làm nền tảng nghiên cứu [32]. PAL Robotics ở Barcelona cũng đã phát triển một robot dạng người REEM-C để bán [33]. Hiện nay, có rất nhiều robot dạng người kích thước nhỏ để nghiên cứu và chơi. Ví dụ: chúng ta có thể chọn NAO của Aldebaran Robotics [34], DARwInOP của ROBOTIS [35], PALRO của FujitSoft [36] hoặc sê-ri KHR của Kondo Kagaku [37].

Vào ngày 10 tháng 4 năm 2012, dự án Nghiên cứu Quốc phòng Tiên tiến (DARPA) của Hoa Kỳ đã công bố một chương trình, cụ thể là Thử thách Robot

DARPA (DRC) [38]. Mục tiêu chính của nó là phát triển các công nghệ robot có thể thực hiện các nhiệm vụ phức tạp trong môi trường nguy hiểm của con người bằng cách sử dụng các công cụ, thiết bị và phương tiện có sẵn của con người [39]. DRC là một dự án theo phong cách cạnh tranh, nhiều đội cạnh tranh nhau trong cùng một nhiệm vụ. Trong thử nghiệm tháng 12 năm 2013, các nhiệm vụ sau đây đã được chỉ định (lái xe tiện ích, du lịch tháo gỡ, loại bỏ các mảnh vỡ chặn mục nhập, mở cửa và vào tòa nhà, leo lên một cái thang công nghiệp, vượt qua tường, xác định vị trí và đóng van, mang - giải mã và kết nối một vòi). Lưu ý rằng, DRC không giới hạn ở cấu hình robot là hình người, nhưng họ đang mong đợi năng lực giống như con người cho các nhiệm vụ nhất định. Thật vậy, một số đội đã thiết kế robot không hình người như CHIMP của Đại học Carnegie Mellon (CMU) - Trung tâm Kỹ thuật robot Quốc gia (NREC) [40] và ROBOSIMIAN của NASA - Phòng thí nghiệm Động cơ phản lực [41]. Tuy nhiên, các đội tham gia chiếm ưu thế đã chọn thiết kế robot hình người cho thử thách này. Ngoài ra, DRC còn có một robot robot hình người đặc biệt được phát triển bởi Boston Dynamics. Bản sao của nó sẽ được sử dụng bởi bảy đội. Không còn nghi ngờ gì nữa, thử thách Robot DARPA sẽ có tác động rất lớn đến nghiên cứu robot hình người trên thế giới.

Như vậy, các nghiên cứu về robot dạng người hiện này đã phổ biến ở nhiều nước trên thế giới. Ngoài việc tập trung vào phần trí tuệ nhân tạo, các nghiên cứu về hoạch định quỹ đạo bước và điều khiển cân bằng bước đi cho robot được xem xét. Hầu hết các robot này sử dụng tiêu chuẩn ổn định ZMP để thiết kế quỹ đạo động lực học cũng như thiết kế bộ điều khiển nhằm giúp robot bước đi ổn định trong địa hình không biết trước.

1.2 Tổng quan về xây dựng quỹ đạo và điều khiển robot dạng người

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. Sau đó, các nhà nghiên cứu bắt đầu tập trung phát triển bước đi động (*dynamic walking*). 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 nhiều môi trường và không thể dừng đột ngột. Vì vậy, bước đi dựa trên nguyên lý ZMP (*ZMP-based walking*) được đề xuất.

Hầu hết các robot đồ chơi thực hiện đi bộ tĩnh bằng cách sử dụng bàn chân lớn. Điều này không thú vị theo quan điểm của kỹ thuật điều khiển vì nó khá dễ dàng. Tuy nhiên, bàn chân của con người quá nhỏ so với chiều cao của khối tâm để thực hiện bước đi tĩnh và chúng ta đang thực hiện bước đi động trong cuộc sống hàng ngày. Chúng ta thực hiện được phong cách đi bộ bằng cách kiểm soát khéo léo sự cân bằng toàn bộ cơ thể mà về cơ bản là không ổn định. Do đó, robot dạng người vượt ra ngoài phạm vi của kỹ thuật cơ khí thông thường. Đây là lý do mà rất nhiều nhà nghiên cứu và kỹ sư bị thu hút để robot dạng người bước đi giống như con người.

Theo quan điểm của Shuuji Kajita [42], để robot dạng người bước đi như mong muốn thì chúng ta phải có mẫu đi bộ (*Walking Pattern*). Để tạo ra mẫu đi bộ, ta sử dụng bộ tạo dáng (*Walking Pattern Generator - WPG*). Trong điều kiện lý tưởng, robot dạng người có thể thực hiện bước đi như mong muốn nếu thỏa các điều kiện: mô hình toán học của robot dạng người chính xác, kết cấu cơ khí và bộ truyền động điện của robot dạng người đáp ứng chính xác yêu cầu của mẫu đi bộ, mặt phẳng robot dạng người bước đi không nhấp nhô. Thực tế, robot dạng người chỉ bước được vài

milimeters trên mặt phẳng không bằng phẳng thì ngã. Khối tâm của robot dạng người sẽ thay đổi nhanh khi robot dạng người thay đổi tư thế, nên robot dạng người bị mất thăng bằng. Để vượt qua khó khăn này, chúng ta cần phần mềm thứ 2 để điều chỉnh mẫu đi bộ, bằng cách sử dụng con quay hồi chuyển, cảm biến gia tốc, cảm biến lực và các thiết bị khác hay gọi là *bộ cân bằng*.

Bộ tạo dáng (WPG) được thiết kế dựa theo tiêu chuẩn ZMP, có hai kiểu thiết kế bộ tạo dáng thịnh hành là: dựa vào mô hình con lắc ngược hoặc dựa vào quỹ đạo bàn chân và hông. Người tiên phong theo mô hình con lắc ngược là Shuuji Kajita [43-45]. Từ đó, nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tập trung vào việc khảo sát mô hình con lắc ngược 3D để áp dụng điều khiển cho robot hai chân mô phỏng người. Người tiên phong theo dựa vào quỹ đạo bàn chân và hông là Qiang Huang [46]. Phương pháp này đưa ra các ràng buộc cho hông và chân, từ đó xây dựng phương trình quỹ đạo bước đi bằng cách nội suy spline bậc ba. Sau khi có được các phương trình quỹ đạo bước đi của khớp hông, một chương trình tính toán ZMP và dựa theo ZMP để chọn các hệ số trong phương trình quỹ đạo bước đi sao cho robot ở trạng thái cân bằng nhất. Cả hai hướng nghiên cứu này, khi robot dạng người nhấc chân để di chuyển (SSP) thì điểm ZMP nằm ở tâm của bàn chân trụ và khi robot dạng người đứng trên 2 chân chạm đất (DSP) thì quỹ đạo của điểm ZMP cũng di chuyển nhanh. Tuy nhiên, lúc này rất khó để điểm ZMP dừng ngay tại tâm của đế chân trụ khi robot dạng người thực hiện quá trình tiếp theo (SSP). Nghĩa là, biped sẽ bị lắc trong quá trình này. Khảo sát thực tế của con người thì quỹ đạo ZMP trong pha SSP luôn di chuyển về phía trước [47-49]. Để khắc phục điều này: Kemalettin Erbatur và Okan Kurt [50] đề xuất một thuật toán xây dựng quỹ đạo tham chiếu dựa trên mô hình con lắc ngược và ZMP, ứng dụng chuỗi Fourier để xấp xỉ đơn giản bài toán, giải pháp này giúp tạo ra một tham chiếu ZMP đều đặn hơn. Wei Xu và đồng nghiệp cũng cải tiến thuật toán xây dựng quỹ đạo tham chiếu dựa trên quỹ đạo chân và hông kết hợp ZMP để robot dạng người có dáng đi tự nhiên hơn

trong quá trình SSP [51]. Dip và đồng nghiệp đề xuất bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số áp dụng trên robot dạng người kích thước nhỏ [52].

Bộ cân bằng có thể được xây dựng dựa trên nhiều nguyên tắc điều khiển khác nhau như trình bày trong Bảng 1.1.

Bảng 1.1: Các nguyên tắc điều khiển của bộ cân bằng

Điều khiển momen xoắn của cổ chân	- WL-10RD bởi Takanishi cùng đồng nghiệp [53] - Idaten II bởi Miyazaki and Arimoto [54, 55] - Kenkyaku-2 bởi Sano and Furuhsu [56] - Meltran II bởi Kajita và Tani [44]
Điều khiển vị trí đặt bàn chân	- BIPER-3 bởi Shimoyama and Miura [57] - Robot nhảy của Raibert cùng đồng nghiệp [58]
ZMP control by CoM Acceleration	- MK.3 và morph3 bởi Okada [59]
Điều khiển tư thế bởi khớp hông	- Robot nhảy lò cò bởi Raibert [58] - Robot dạng người bởi Kumagai cùng đồng nghiệp [60]
Mô hình con lắc ngược kết hợp điều khiển ZMP	- HRP-4C bởi Shuuji Kajita cùng đồng nghiệp [61-65]

Đối với bộ cân bằng dựa vào điều khiển momen xoắn của cổ chân robot dạng người được phát triển vào thập niên 1980 và 1990. Ví dụ, WL-10RD của Takanishi và đồng nghiệp [53], Idaten II của Miyazaki và Arimoto [54, 55], Kenkyaku-2 của Sano và Furuhsu [56] và Meltran II của Kajita và Tani [44]. Đối với bộ cân bằng dựa vào điều khiển vị trí đặt bàn chân của robot dạng người, được thực hiện dựa trên mô hình con lắc ngược. Có một số robot được ổn định bằng cách điều chỉnh vị trí đặt chân, chẳng hạn như BIPER-3 được phát triển bởi Shimoyama và Miura [57], và robot nhảy của Raibert và các đồng nghiệp [58]. Đối với bộ cân bằng dựa trên điều khiển gia tốc của khối tâm (CoM) có Okada, Furuta và Tomiyama đã áp dụng để điều khiển robot dạng người MK.3 và morph3 [59]. Đối với bộ cân bằng dựa vào điều khiển tư thế của

robot dạng người bởi khớp hông, chúng ta mong muốn robot duy trì một tư thế thẳng đứng trong khi đi bộ. Cách dễ nhất là xoay khớp hông để cơ thể giữ trạng thái mong muốn dựa trên cảm biến. Phương pháp này được áp dụng trong các robot nhảy lò cò Raibert [58] và robot dạng người được phát triển bởi Kumagai cùng đồng nghiệp [60]. Gần đây, Shuuji Kajita cùng đồng nghiệp đã đề xuất một bộ ổn định mới dựa trên mô hình của LIPM với điều khiển ZMP [61]. Bộ ổn định này cho phép robot hình người mới HRP-4C của họ đi trên bề mặt không bằng phẳng cũng như thực hiện đi bộ giống như con người với hỗ trợ ngón chân [62]. Khi có nhiễu loạn lớn trong quá trình đi bộ, ví dụ như một cú đá vào cơ thể, có thể ngay lập tức khiến robot đi chệch khỏi quỹ đạo định sẵn và do đó rơi xuống. Robot dạng người có thể không ngã trong trường hợp này, nếu nó có thể tạo lại mẫu đi bộ bằng cách để trạng thái lệch quay về điều kiện ban đầu. Bằng cách thực hiện đúng khái niệm này, robot vẫn tiếp tục bước đi bộ như trong các tài liệu [63- 65].

Mẫu đi bộ (WP) dựa vào bộ tạo dáng (WPG) đề xuất ở trên không phải là cách duy nhất. Đối với tạo mẫu đi bộ (WP) online, Kajita đề xuất phương pháp điều khiển preview [66]. Đối với phương pháp thực tế, Harada et al. đề xuất sử dụng một giải pháp phân tích của phương trình ZMP [67]. Sau đó, điều này đã được cải thiện bởi Morisawa et al. để thực hiện WP hiệu quả hơn [64]. Những phương pháp này được kiểm chứng thực nghiệm trên HRP-2. Điều khiển preview được gọi chung là điều khiển dự báo theo mô hình (MPC-Model Predictive Control), mà việc tính toán điều khiển đầu vào bằng cách thực hiện tối ưu hóa quỹ đạo tương lai. Dựa trên MPC, Wieber đề xuất một phương pháp tạo mẫu đi bộ (WP) dựa trên việc tối ưu hóa chương trình bậc hai (QP) mà không yêu cầu một ZMP quy định [69, 70]. Bằng phương pháp này, các quỹ đạo ZMP và CoM có thể được tạo đồng thời từ các phần tử của vùng chân trụ.

Một nhóm các nhà nghiên cứu cho rằng robot dạng người bước đi không cần phải có tạo mẫu đi bộ (WP) trước, mà phải là kết quả của các dao động phi tuyến xuất hiện

từ phản hồi và tương tác động giữa hệ thống và môi trường. Katoh và Mori đã chế tạo một robot dạng người, BIPMAN2, sử dụng bộ phát chu kỳ giới hạn ổn định bởi một bộ dao động phi tuyến dựa trên cặp phương trình van der Pol. Robot có thể thực hiện một bước đi động tiến về phía trước [71]. Taga và đồng nghiệp mô phỏng một hệ thống muscle-born của con người với các bộ dao động phi tuyến phân tán (Bộ tạo mẫu trung tâm: CPGs-Central Pattern Generators) và thực hiện mô phỏng robot dạng người có thể bước đi tự nhiên tạo hoặc chạy trong môi trường có nhiễu loạn [72]. Gần đây, Hyon, Morimoto và Kawato đã chứng minh được robot dạng người có kích thước thật có thể thực hiện bước đi động dựa vào bộ tạo mẫu trung tâm (CPG) [73].

Dưới quan điểm toán học, nhiệm vụ tạo mẫu đi bộ (WP) được nghiên cứu như vấn đề tối ưu đa mục tiêu có ràng buộc, do đó bài toán cần giải quyết rất phù hợp với kỹ thuật tính toán mềm. Trong quá khứ, đã có những đóng góp đáng kể trong việc phát triển robot dạng người nhằm mang lại hiệu quả về mặt năng lượng và tối ưu hóa các thông số dáng đi của chúng bằng thuật toán tiến hóa. Người ta đã thấy rằng, điểm yếu của các robot dạng người sử dụng ZMP là chúng tiêu thụ rất nhiều năng lượng. Năng lượng tiêu thụ trong khi robot dạng người bước đi bộ phụ thuộc vào mẫu đi bộ (WP) [74]. Do đó, việc thiết kế cẩn thận mẫu đi bộ (WP) của robot dạng người có thể giúp ích rất nhiều, trong việc giảm mức tiêu thụ năng lượng cũng như tăng tính ổn định của nó [75]. Một số đóng góp liên quan đến tối ưu hóa dáng đi được tóm tắt trong bảng 1.2.

Capi và đồng nghiệp trong [76] đã sử dụng thuật toán di truyền mã hóa thực (Real Coded Genetic Algorithm - RCGA) để tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ của robot dạng người. Mục tiêu là tìm ra các quỹ đạo các góc quay ở các khớp để robot dạng người tiêu thụ năng lượng tối thiểu. Hàm năng lượng được xây dựng dựa vào mô-men xoắn được tạo ra tại các khớp động cơ của robot dạng người. Trong [77], Capi và đồng nghiệp đã tạo ra mẫu đi bộ (WP) hiệu quả năng lượng thời gian thực sử dụng thuật toán di truyền (GA) và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBFNN - Radial Basis Function Neural Network). Park và đồng nghiệp trong [78] đã sử dụng GA để giảm thiểu năng

lượng tiêu thụ của robot dạng người, bằng cách chọn vị trí tối ưu cho khối tâm của các khâu. Choi và đồng nghiệp trong [79] đã sử dụng GA để tối ưu hóa quỹ đạo đi bộ của robot dạng người (IWR-III) bằng cách giảm thiểu tổng độ lệch của vận tốc (hay gia tốc) để duy trì sự liên tục của quỹ đạo và phân phối năng lượng tại các điểm.

Bảng 1.2: Tối ưu tham số đáng sử dụng thuật toán tiến hóa

Hàm mục tiêu	Thuật toán tiến hóa	Tác giả (năm)
Năng lượng	RCGA	Capi et al. (2002) [76] Park et al. (2004) [78]
	RBFNN+GA	Capi et al. (2003) [77]
	GA	Choi et al. (1999) [79]
Ổn định	CMAC	Lin et al. (2004) [81]
	NN	Miller et al. (1994) [82]
	FRL	Zhou et al. (2003) [83]
	GA+FLC	Jha et al. (2005) [84]
	GA	Udai et al. (2008) [85]
	WOA	Mostafa et al. (2019) [86]
	GA+ANN, GA+FLC	Pratihari et al. (2007, 2015) [87, 88]
Năng lượng, tốc độ và ổn định	MOEA	Lee et al. (2004) [89]
Ổn định và tốc độ	GA	Dip et al. (2009) [52]
Năng lượng và ổn định	GA	Huan Dau et al. (2008) [90] Fattah et al. (2009) [93]
	MOPSO/MOGA	Rajendra et al. (2012) [91]
	MOEA	Raj et al. (2017) [92]

Bên cạnh tiêu thụ năng lượng, một mối quan tâm lớn khác cho robot dạng người là sự ổn định của nó. Khái niệm ZMP đã được các nhà nghiên cứu lựa chọn để đảm bảo sự ổn định của robot dạng người.

Ames và đồng nghiệp trong [80] đã tối ưu hóa các tham số đáng đi của robot Nao sao cho mẫu đi bộ (WP) của robot gần đúng với mẫu đi bộ (WP) của con người sử

dụng phương pháp bình phương tối thiểu. Lin và đồng nghiệp trong [81] đã đề xuất một phương pháp cân bằng động cho robot dạng người bằng cách sử dụng mạng nơ-ron máy tính số học mô hình tiểu não (Cerebellar Model Arithmetic Computer - CMAC). Phương pháp này có thể tìm các tham số đáng đi được tối ưu hóa trong thời gian thực. Miller và đồng nghiệp trong [82] đã cải tiến thuật toán điều khiển cho robot dạng người tăng tính ổn định. Cụ thể, Miller đã mô hình hóa đáng đi như một bộ dao động đơn giản, áp dụng thuật toán điều khiển PID và sau đó thực hiện huấn luyện mạng nơ-ron. Phương pháp này không cần biết thông tin động học và động lực học mà robot dạng người vẫn bước đi ổn định. Zhou và đồng nghiệp trong [83] đã sử dụng học tăng cường mờ (Fuzzy Reinforcement Learning - FRL) để tạo mẫu đi bộ (WP) ổn định cho robot dạng người. Mặc dù phương pháp này không yêu cầu thông tin về động học và động lực học nhưng khi số bậc tự do (Dof) của robot dạng người tăng thì thời gian để tạo mẫu đi bộ (WP) phù hợp nhất cho một trạng thái cũng tăng. Jha và đồng nghiệp trong [84] đã sử dụng GA để tạo quy tắc cơ sở cho bộ điều khiển logic mờ (FLC) có thể tạo ra đáng đi ổn định cho robot dạng người. Udai trong [85] đã đề xuất GA và Mostafa cùng đồng nghiệp trong [86] đề xuất WOA, để tối ưu hóa quỹ đạo hông của robot dạng người sao cho độ lệch giữa ZMP và tâm bàn chân trụ là nhỏ nhất, điều này làm tăng tính ổn định của robot dạng người. Vundavilli và đồng nghiệp trong [87, 88] đã sử dụng hai phương pháp lai là GA-NN và GA-FLC để tạo ra các đáng đi ổn định cho robot dạng người đi lên và xuống cầu thang.

Mặc dù, năng lượng và độ ổn định đã được tối ưu hóa một cách riêng biệt như đã đề cập ở trên, nhưng có thể thấy rằng hai mục tiêu này đối lập nhau [75]. Để vượt qua khó khăn này, nhiều nghiên cứu đã thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu và một số kết quả đã thực trong thời gian qua như sau. Lee và đồng nghiệp trong [89] đã sử dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu tiến hóa (MOEA) để tạo ra mẫu đi bộ (WP) cho robot dạng người với ba mục tiêu tương phản: năng lượng tiêu thụ, tốc độ đi bộ và độ ổn định. Dip và đồng nghiệp trong [52] đã áp dụng một thuật toán di truyền (GA) để tạo ra mẫu đi

bộ (WP) cho robot dạng người với hai mục tiêu tương phản: tốc độ đi bộ và độ ổn định. Huan Dau và đồng nghiệp trong [90] đã áp dụng một thuật toán di truyền (GA) để tạo ra mẫu đi bộ (WP) cho robot dạng người với hai mục tiêu tương phản: năng lượng tiêu thụ và độ ổn định. Pratihari và đồng nghiệp trong [91] cho thấy MO-PSO hoạt động tốt hơn MO-GA, trong việc tối ưu hóa dáng đi cho robot dạng người với hai mục tiêu tương phản: công suất tiêu thụ và độ ổn định. Điều này là do thuật toán PSO tìm kiếm các giải pháp tối ưu cả trong không gian tìm kiếm cục bộ cũng như toàn cầu. Jaj và đồng nghiệp trong [92] đã áp dụng MOEA để tạo dáng cho robot dạng người NAO với hai mục tiêu tương phản: độ ổn định và năng lượng. Fattah và đồng nghiệp trong [93] sử dụng GA để tạo dáng cho robot dạng người với hai mục tiêu đối lập nhau là độ ổn định và công suất.

1.3 Kết luận

Mặc dù hiện nay đã có rất nhiều lý thuyết thành công trong việc xây dựng quỹ đạo và điều khiển robot dạng người được ứng dụng vào các robot thực tế. Tuy nhiên nếu so sánh với con người trong nhiều cấp độ khác nhau thì các kết quả quỹ đạo bước đi cùng dáng đi của robot dạng người có được, vẫn chưa thật sự tự nhiên, ổn định và bền vững. Rõ ràng robot hai chân mô phỏng người vẫn đang đối mặt với rất nhiều thách thức phải vượt qua. Trong luận án này, tác giả thực hiện nghiên cứu và phát triển bộ tạo dáng đi (WPG) phụ thuộc 4 thông số của Dip (chiều dài bước - S, độ nhấc chân - H, độ khụy gối - h và độ lắc hông - n) [52] kết hợp các phương pháp tối ưu hóa ngẫu nhiên và mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi để robot hai chân bước đi ổn định và tự nhiên như con người. Mục tiêu nghiên cứu trọng tâm của luận án bao gồm các vấn đề sau:

- Dip đã đề xuất bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S, H, h, n) và thực hiện tối ưu 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) để robot hai chân (kích thước nhỏ) bước đi ổn định với vận tốc nhanh nhất có thể sử dụng thuật toán di truyền (GA). Tuy nhiên, để bắt chước dáng đi của con người thì robot hai chân phải kiểm soát được độ nhấc chân. Vì vậy, tác giả tiếp tục thực hiện tối ưu 4 thông số dáng đi (S, H, h, n) của bộ tạo dáng

(WPG) để robot hai chân bước đi ổn định với độ nhấc chân mong muốn sử dụng các phương pháp tối ưu hóa ngẫu nhiên (meta-heuristic optimization approaches).

- Trong quá trình robot hai chân bước đi thì 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) của Dip là không đổi. Điều này làm cho robot hai chân khó thực hiện bước đi ổn định và tự nhiên với 1 quỹ đạo ZMP mong muốn. Để vượt qua khó khăn này, tác giả thực hiện nhận dạng 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) này sử dụng mô hình mạng nơ-ron tiến hóa thích nghi (AENM) được tối ưu bởi thuật toán MDE.
- Bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S , H , h , n) của Dip được đề xuất năm 2009 chỉ áp dụng cho robot hai chân trong giai đoạn bước đi và thiếu giai đoạn chuẩn bị và giai đoạn kết thúc với tên gọi là bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (N-WPG). Để bổ sung, tác giả tiếp tục hoàn thiện bộ tạo dáng đi (WPG) của Dip với đầy đủ 3 giai đoạn như mong muốn.

CHƯƠNG 2 TỐI ƯU HÓA DÁNG ĐI CHO ROBOT HAI CHÂN KÍCH THƯỚC NHỎ BƯỚC ĐI ỔN ĐỊNH VỚI ĐỘ NHẮC CHÂN MONG MUỐN SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI SAI CẢI TIẾN (MDE)

2.1 Giới thiệu

Động lực học của robot dạng người có bản chất phi tuyến và rất khó phân tích [94]. Để tiện nghiên cứu, một số mô hình robot dạng người được lược giản đã được áp dụng, trong đó mô hình con lắc ngược được dùng rộng rãi hơn cả. Theo mô hình này, khối lượng robot dạng người được quy về ở khối tâm (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 robot người thông qua tính toán vị trí ZMP (Zero Moment Point) nằm trên mặt phẳng bước đi của robot người. Ổn định bước đi cho robot hai chân được bảo đảm khi điểm ZMP nằm trong diện tích đa giác được bao phủ bởi bàn chân chân trụ của robot dạng người. Nhiều phương pháp dựa trên nguyên lý này đã được đề xuất để tính toán quỹ đạo bước đi ổn định, trong đó robot 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 [95].

Gần đây, một số nghiên cứu tập trung cải thiện hiệu quả cho dáng đi của robot hai chân. Huang trong [46] 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 hai chân bước đi ổn định với năng lượng tiêu hao ít [90]. Dip và cộng sự [52] 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 hai chân như thuật toán di truyền (GA) [52], thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) [96]. Shaffi trong [97] giới thiệu robot hai chân 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 hai chân, như thuật toán tối ưu đàn ong [98], bộ điều khiển T-S mờ [99], thuật toán tính toán tiến hóa [75]. Đặc biệt, theo hiểu biết của

nghiên cứu sinh thì tiềm năng rất mạnh của giải thuật tiến hóa vi sai (*Differential Evolution* – DE [100]) cho đến nay vẫn chưa được áp dụng để tối ưu bộ phát dáng đi cho robot hai chân theo hướng Dip[52]. Son và cộng sự [101-102] 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, chương này đề xuất bộ phát dáng đi cho robot hai chân dựa vào thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (*MDE-Modified Differential Evolution* [101-102]), dựa theo phương pháp bước đi động, và sử dụng tiêu chuẩn ZMP [103] 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 ưu bầy đàn (PSO) và thuật toán di truyền (GA).

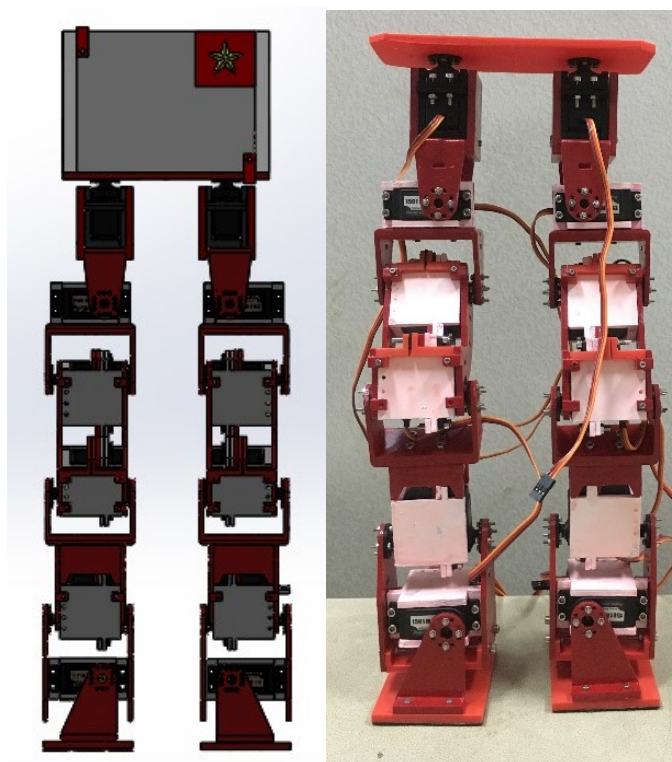
Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy sử dụng thuật toán MDE cho phép tối ưu hóa các tham số dáng đi để robot hai chân đạt dáng đi ổn định với độ nhấc chân chính xác. Mô hình robot hai chân kích thước nhỏ (HUBOT-5) được dùng để kiểm chứng các kết quả thông qua thực nghiệm.

Cấu trúc của chương này như sau: mục 2.2 giới thiệu mô hình robot hai chân, mục 2.3 trình bày quy hoạch dáng đi cho robot hai chân, mục 2.4 thực hiện tối ưu thông số dáng đi sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai MDE, mục 2.5 trình bày kết quả mô phỏng và thực nghiệm, mục 2.6 trình bày kết luận.

2.2 Mô hình robot hai chân

Robot hai chân kích thước nhỏ (HUBOT-5) có thân trên và hai chân như mô tả trong Hình 2.1. 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

khuyết đại) và cao khoảng 50cm. HUBOT-5 được thiết kế đảm bảo cấu trúc động học đầy đủ, mỗi BTĐ 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.

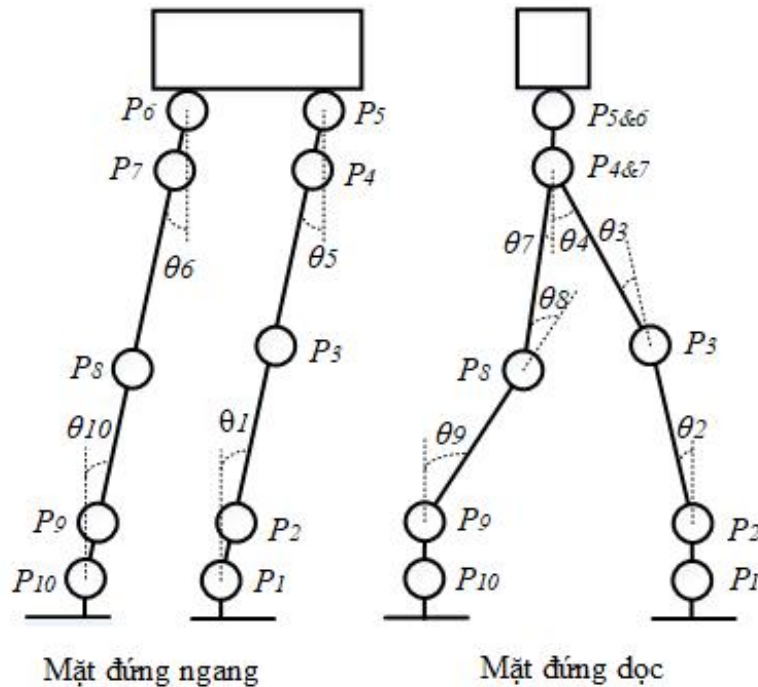


Hình 2.1: Hình ảnh mô tả robot hai chân HUBOT-5 với 12 (BTĐ).

Nghiên cứu này quan tâm đến bài toán điều khiển robot hai chân bước đi thẳng nên thân trên của robot hai chân 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 Hình 2.2.

(P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}) là tọa độ thể hiện vị trí của các bậc tự do (BTĐ) được đặt ở các khớp của hai chân của robot được hiển thị trong Hình 2.2. P_1 và P_2 biểu thị vị trí của hai BTĐ ở cổ chân trái. P_3 đại diện cho vị trí của BTĐ ở đầu gối của chân trái. P_4 và P_5 đại diện cho vị trí của hai BTĐ ở hông của chân trái. P_9 và P_{10} đại diện cho vị trí của hai BTĐ ở

cổ chân phải. P_8 đại diện cho vị trí của BTD ở đầu gối của chân phải. P_6 và P_7 đại diện cho vị trí của hai BTD ở hông của chân phải.



Hình 2.2: Mô hình kết cấu robot hai chân 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 2.1.

Bảng 2.1: Giới hạn góc quay

Góc	Mặt phẳng	Chân	Khớp	Giá trị
θ_1	YZ	Phải	Cổ chân	-20^0 to 20^0
θ_2	XZ	Phải	Cổ chân	-30^0 to 30^0
θ_3	XZ	Phải	Gối	-30^0 to 30^0
θ_4	XZ	Phải	Hông	-30^0 to 30^0
θ_5	YZ	Phải	Hông	-20^0 to 20^0
θ_6	YZ	Trái	Hông	-20^0 to 20^0
θ_7	XZ	Trái	Hông	-30^0 to 30^0
θ_8	XZ	Trái	Gối	-30^0 to 30^0
θ_9	XZ	Trái	Cổ chân	-30^0 to 30^0
θ_{10}	YZ	Trái	Cổ chân	-20^0 to 20^0

2.3 Quy hoạch dáng đi cho robot hai chân HUBOT-5

Bốn tham số quan trọng của robot hai chân giúp bước đi ổn định bao gồm S -chiều dài bước chân [cm], H -độ nhấc chân [cm], h -độ khuyu gối [cm] và n -độ lắc hông [cm] được minh họa trong Hình 2.3. 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 .

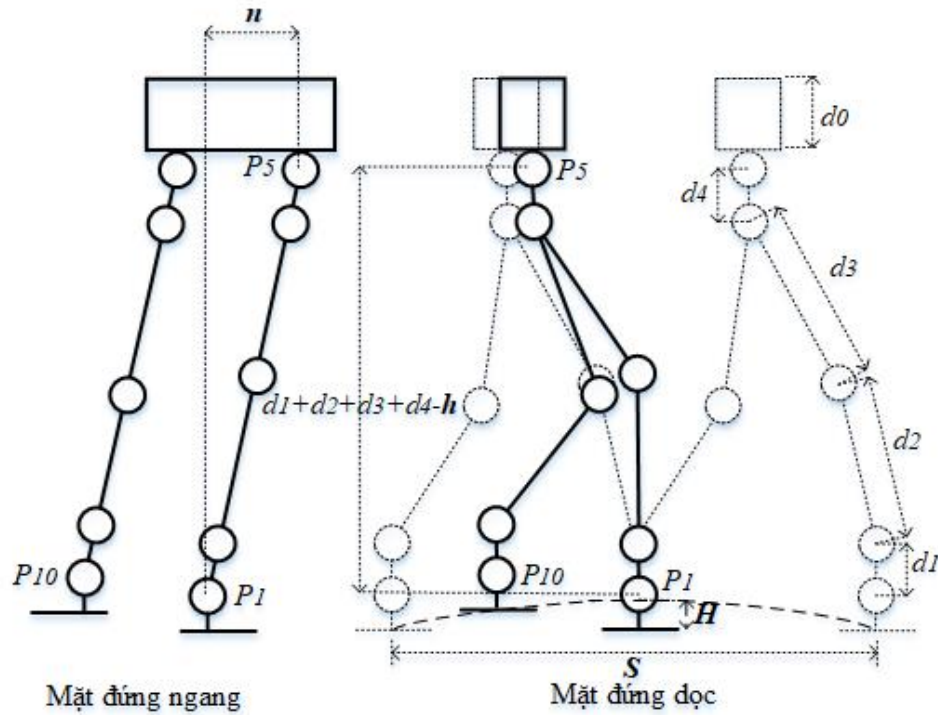
Theo Huang [46], nếu biết quỹ đạo hai bàn chân (P_1 và P_{10}) và quỹ đạo hông (P_5) thì tất cả quỹ đạo của các khớp ở 2 chân robot dạng người có thể xác định được với các ràng buộc động học. P_1 và P_5 là 2 điểm tham chiếu tại cổ chân và hông của chân trái, P_{10} là điểm tham chiếu tại chân phải, như minh họa trong Hình 2.3. Để thiết lập quỹ đạo của 3 điểm tham chiếu P_1 , P_{10} và P_5 cho robot hai chân: Shih [68] chọn quỹ đạo của P_1 và P_{10} có dạng hàm sin và sử dụng phương pháp lặp để tìm quỹ đạo của P_5 ; Huang [46] áp dụng hàm nội suy bậc 3 để tìm quỹ đạo của P_1 và P_{10} , và áp dụng phương pháp lặp để tìm quỹ đạo của P_5 ; Dip [52] giả sử quỹ đạo của P_1 , P_{10} và P_5 là những hàm sin phụ thuộc 4 thông số.

Như chỉ ra trong Hình 2.3, 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*) [52]. 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 (2.1), (2.2) và (2.3).

$$\begin{cases} P_{1x}(t) = \frac{S}{2} \sin\left[\frac{\pi}{T} \cdot \left(t - \frac{T}{2}\right)\right] \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \\ P_{1y}(t) = w \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \\ P_{1z}(t) = H \sin\left[\pi \cdot \left(\frac{P_{1x}(t)}{S} + 0.5\right)\right] \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} P_{10x}(t) = \frac{S}{2} \sin\left[\frac{\pi}{T} \cdot \left(t - \frac{T}{2}\right)\right] \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ P_{10y}(t) = -w \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ P_{10z}(t) = H \sin\left[\pi \cdot \left(\frac{P_{10x}(t)}{S} + 0.5\right)\right] \cdot [u(t) - u(t-T)] \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} P_{5x}(t) = \frac{S}{4} \sin\left(\frac{\pi}{T} \left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right), \\ P_{5y_first_half_cycle}(t) = n \sin\left(\frac{\pi}{T} \tau\right) \cdot \left[u(\tau) - u\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right] \\ \quad + n \cos\left(\frac{\pi}{T} \left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right) \cdot \left[u\left(\tau - \frac{T}{2}\right) - u(\tau - T)\right], \\ P_{5y}(t) = P_{5y_first_half_cycle}(t) \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ \quad - P_{5y_first_half_cycle}(t) \cdot [u(t-2T) - u(t-T)], \\ P_{6z}(t) = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 - h). \end{cases} \quad (2.3)$$



Hình 2.3: Bốn tham số ảnh hưởng đến dáng đi robot hai chân HUBOT-5

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

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

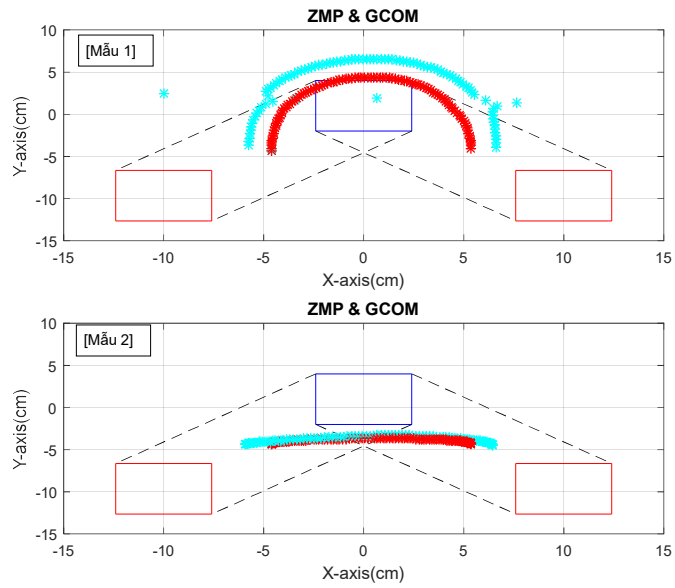
Dựa vào các công thức (2.1-2.2-2.3), quỹ đạo hông và quỹ đạo cổ chân của chân trụ, quỹ đạo cổ chân của chân di chuyển được sử dụng để tạo dáng khi đi cho robot hai chân.

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 Bảng 2.2, sau đó tìm quỹ đạo ZMP trong 1 chu kỳ tương ứng với từng bộ tham số. Hình 2.4a-2.4e minh họa 10 quỹ đạo ZMP và GCoM (hình chiếu CoM xuống mặt đất) tương ứng với 10 mẫu trong Bảng 2.2.

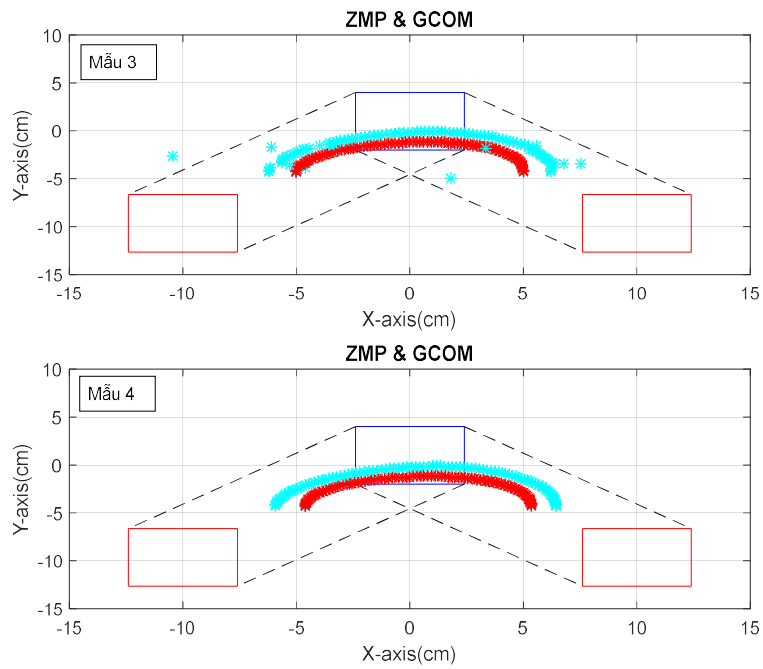
Bảng 2.2: Thông số của 10 dáng đi

Mẫu	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

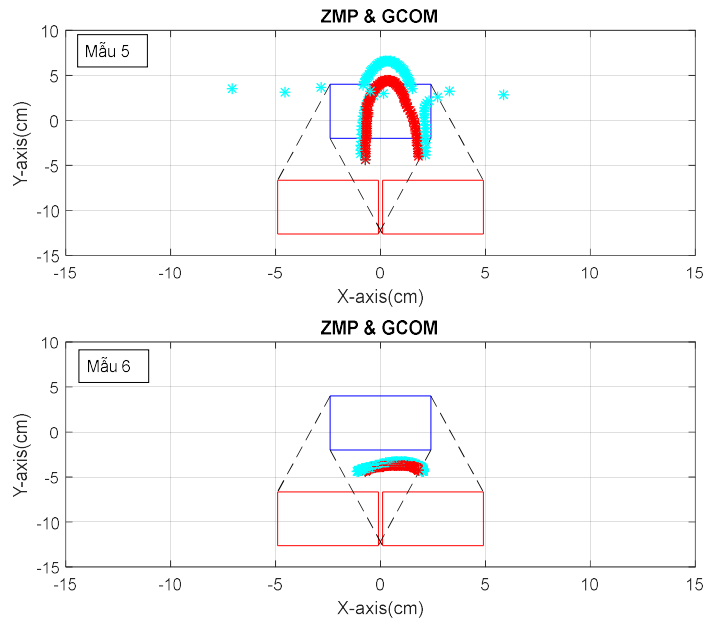
Hình 2.4a – 2.4e minh họa 10 quỹ đạo ZMP và GCoM (hình chiếu CoM xuống mặt đất) tương ứng với 10 mẫu trong bảng 2.2.



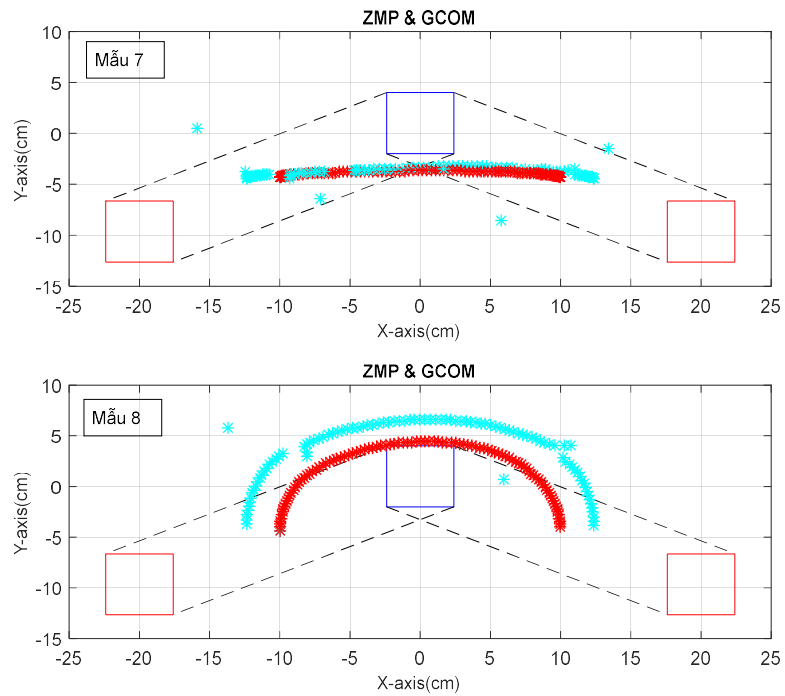
Hình 2.4a: Mẫu 1&2



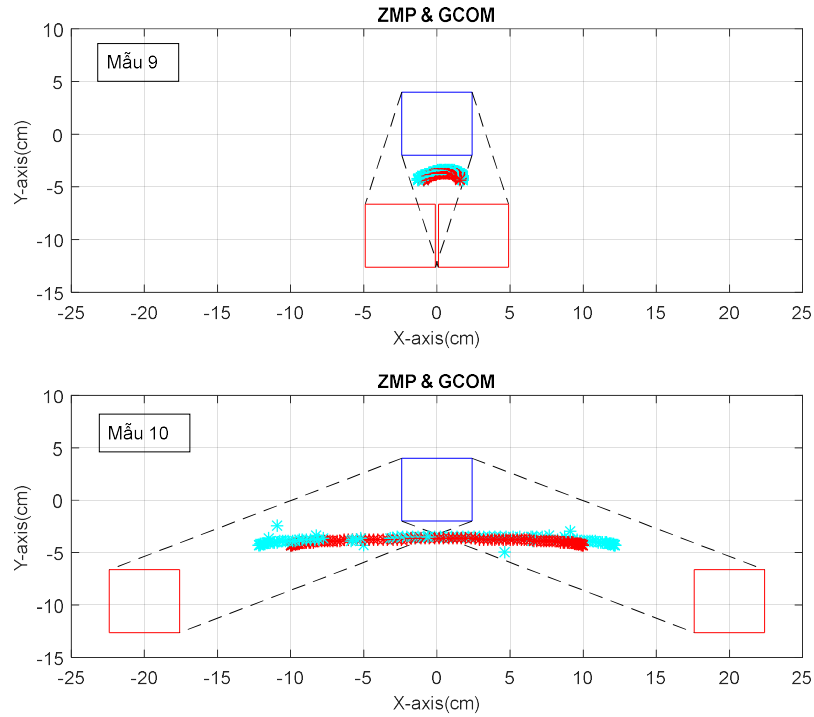
Hình 2.4b: Mẫu 3&4



Hình 2.4c: Mẫu 5&6



Hình 2.4d: Mẫu 7&8



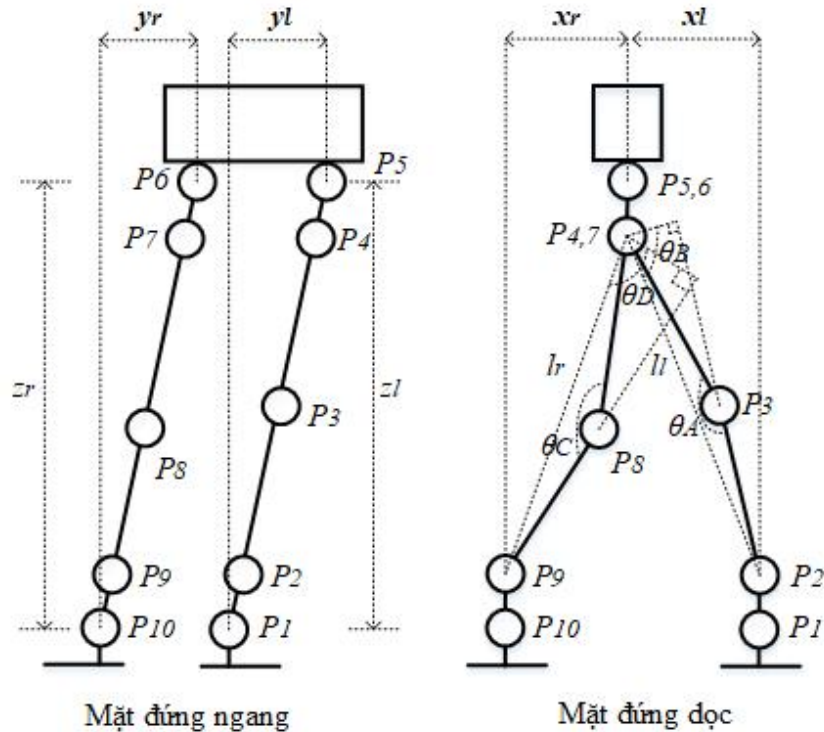
Hình 4.9: Mẫu 9&10

Trong hình 2.4a, mẫu 1 cho thấy việc chọn tham số lắc hông (n) lớn quá hoặc nhỏ quá sẽ làm quỹ đạo ZMP có lúc sẽ nằm ngoài vùng chân đỡ. Trong hình 2.4b, mẫu 3 cho thấy việc chọn độ khuy gối (h) ít quá cũng ảnh hưởng đến ZMP, vì có thời điểm ZMP nằm ngoài vùng chân đỡ. Trong hình 2.4c, mẫu 5 và 6 chọn độ dài bước chân (S) rất ngắn để tăng độ ổn định, nhưng nếu chọn độ lắc hông không hợp lý vẫn có thể ảnh hưởng đến ZMP. Như vậy, khi thay đổi bộ bốn tham số S , H , h và n có thể giúp robot hai chân đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước.

Cuối cùng, quỹ đạo của 10 góc quay ở 2 chân robot hai chân 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 hai chân 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 hai chân HUBOT-5 được xác định như công thức (2.4).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \theta_1(t) = \arctan\left(\frac{y_l(t)}{z_l(t)}\right), \quad \theta_5(t) = -\theta_1(t), \\
 \theta_{10}(t) = \arctan\left(\frac{y_r(t)}{z_r(t)}\right), \quad \theta_6(t) = -\theta_{10}(t), \\
 \theta_3(t) = \pi - \theta_A(t), \quad \theta_8(t) = \pi - \theta_C(t), \\
 \theta_4(t) = \frac{\pi}{2} - \theta_A(t) + \theta_B(t) - \arcsin\left(\frac{x_l(t)}{l_l(t)}\right), \\
 \theta_7(t) = \frac{\pi}{2} - \theta_C(t) + \theta_D(t) - \arcsin\left(\frac{x_r(t)}{l_r(t)}\right), \\
 \theta_2(t) = \theta_3(t) - \theta_4(t), \quad \theta_{11}(t) = \theta_9(t) - \theta_7(t)
 \end{array} \right. \quad (2.4)$$

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 Hình 2.5 và công thức (2.5). Lưu ý, l_l là khoảng cách giữa P_2 và P_4 , trong khi l_r là khoảng cách giữa P_3 và P_7 .



Hình 2.5: Định nghĩa các biến trong công thức (2.4)

$$\begin{cases}
x_l = P_{5x} - P_{1x}, & y_l = P_{5y} - P_{1y}, & z_l = P_{5z} - P_{1z}, \\
l_l = \sqrt{(P_{4x} - P_{2x})^2 + (P_{4y} - P_{2y})^2 + (P_{4z} - P_{2z})^2}, \\
x_r = P_{6x} - P_{10x}, & y_r = P_{6y} - P_{10y}, & z_r = P_{6z} - P_{10z}, \\
l_r = \sqrt{(P_{7x} - P_{9x})^2 + (P_{7y} - P_{9y})^2 + (P_{7z} - P_{9z})^2} \\
\theta_A = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_l^2}{2d_2d_3}\right), & \theta_B = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_A)}{l_l}\right), \\
\theta_C = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_r^2}{2d_2d_3}\right), & \theta_D = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_C)}{l_l}\right).
\end{cases} \quad (2.5)$$

trong đó: d_1, d_2, d_3 và d_4 được minh họa trong Hình 2.3. Tọa độ $P_6(x,y,z)$ được tính dựa vào $P_5(x,y,z)$, còn tọa 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 (2.6) dưới đây được sử dụng để tính P_2, P_4, P_6, P_7, P_9 .

$$\begin{cases}
P_{2x} = P_{1x}, & P_{2z} = d_1 \cos(\theta_1), & P_{2y} = P_{2z} \sin(\theta_1), \\
P_{4x} = P_{5x}, & P_{4z} = P_{5z} - d_4 \cos(\theta_1), & P_{4y} = P_{5y} - (P_{5z} - P_{4z}) \sin(\theta_1), \\
P_{6x} = P_{5x}, & P_{6y} = P_{5y} - w, & P_{6z} = P_{5z}, \\
P_{7x} = P_{6x}, & P_{7z} = P_{6z} - d_4 \cos(\theta_{10}), & P_{7y} = P_{6y} - (P_{6z} - P_{7z}) \sin(\theta_{10}), \\
P_{9x} = P_{10x}, & P_{9z} = P_{10z} + d_4 \cos(\theta_{10}), & P_{9y} = P_{10y} + (P_{9z} - P_{10z}) \sin(\theta_{10}).
\end{cases} \quad (2.6)$$

Dựa vào các công thức (2.4-2.5-2.6), 10 quỹ đạo góc quay ở hai chân của robot hai chân 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 hai chân 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.

2.4 Tối ưu tham số dáng đi sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai MDE

2.4.1 Giải thuật MDE

Thuật toán MDE được phát triển dựa trên thuật toán DE trong [100] 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 Bảng A1 (Phụ lục A).

Đột biến đóng vai trò quan trọng trong khả năng tìm kiếm và tốc độ hội tụ của DE. Có bốn 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 [105]. Dựa trên các phân tích trên, Son và đồng nghiệp đã đề xuất MDE cải tiến [101-102] 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 rand[0,1]>0.3

$$v_i = x_{r_1} + F(x_{r_2} - x_{r_3}) \quad \% \text{ use "rand / 1"}$$

else

$$v_i = x_{best} + F(x_{r_1} - x_{r_2}) \quad \% \text{ use "best / 1"}$$

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.

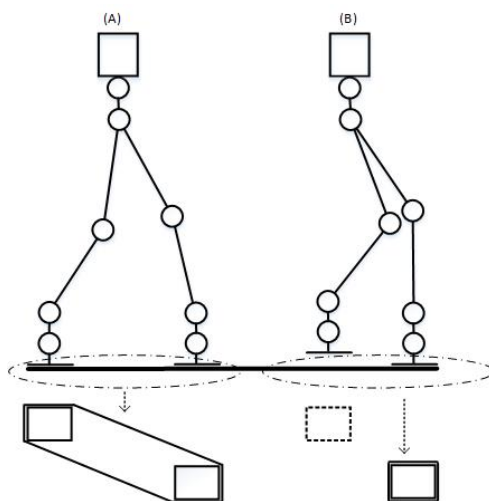
Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh nhận ra rằng tỷ lệ 0,7 / 0,3 cho rand/1 và best/1 là một giá trị cân bằng tốt cho cả thăm dò toàn cục và khả năng khai thác cục bộ. Hệ số đột biến (F) và xác suất lai ghép (CR) không cố định như trong tiêu chuẩn DE, chúng được tạo ngẫu nhiên trong phạm vi [0.4, 1] và [0.7, 1], tương ứng. Các tham số này được giới thiệu từ [106] 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 [101-102] được mô tả trong Bảng A.2 (Phụ lục A).

2.4.2 Xây dựng Hàm mục tiêu

Để đánh giá các tham số dáng đi robot hai chân phải định nghĩa được hàm mục tiêu. Mục tiêu điều khiển robot hai chân 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 [103].

Khi hai chân chạm đất (hay pha đôi) thì diện tích vùng chân trụ là diện tích bao quanh của 2 bàn chân của robot hai chân, và khi 1 chân chạm đất (hay pha đơn) 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 Hình 2.6.



Hình 2.6: Diện tích vùng chân trụ trong 2 trường hợp:

(a) 2 chân chạm đất, (b) 1 chân chạm đất.

Nếu ZMP nằm trong vùng diện tích vùng chân trụ thì robot hai chân không bị ngã [107]. Nghĩa là, trong pha đôi robot hai chân khó bị ngã hơn pha đơn. Bài toán tính toán quỹ đạo ZMP trong quá trình robot hai chân bước đi được trình bày trong mục 2.4.3.

Tính ổn định của robot hai chân 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 (2.7) [52]:

$$f_1 = \int_0^T \left(\sqrt{x_{ZMP}^2 + y_{ZMP}^2} \right) dt \quad (2.7)$$

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 hai chân thực hiện bước đi so với góc tọa độ đặt tại tâm bàn chân trụ. Công thức (2.7) là hàm mục tiêu thứ 1. Ngoài ra, để robot hai chân 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 2.8) là hàm mục tiêu thứ 2.

$$f_2 = |H_{ref} - H| \quad (2.8)$$

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:

$$\begin{cases} f = \lambda \cdot \left(\int_0^T \left(\sqrt{x_{ZMP}^2 + y_{ZMP}^2} \right) dt \right) + (1-\lambda) \cdot |H_{ref} - H| \\ -F_{x1} \leq x_{ZMP} \leq F_{x2}; -F_{y1} \leq y_{ZMP} \leq F_{y2} \end{cases} \quad (2.9)$$

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).

2.4.3 Tính toán quỹ đạo điểm ZMP

Điểm ZMP có thể được tính như công thức (2.10) [46]:

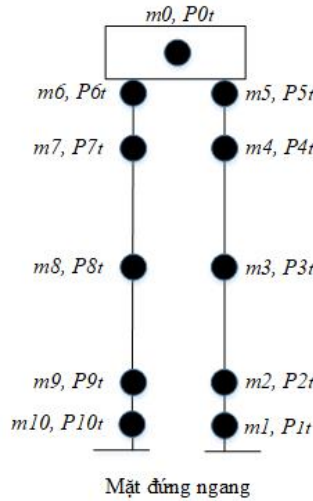
$$\begin{cases} x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{yy} \ddot{\Omega}_y}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{xx} \ddot{\Omega}_x}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{cases} \quad (2.10)$$

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_{xx} và I_{yy} là thành phần momen quán tính, $\ddot{\Omega}_x$ và $\ddot{\Omega}_y$ 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 (2.11) [108]:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = x_{COM} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i \ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_{ZMP} = y_{COM} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i \ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (2.11)$$

Trong công thức (2.11), phân bố khối lượng m_i và tọa độ (x_i, y_i, z_i) của các khâu được định nghĩa như trong Hình 2.7, tọa độ của khối tâm (COM) được tính thông qua công thức (2.12), các thành phần gia tốc sử dụng phép tính sắp xỉ như công thức (2.13).



Hình 2.7: Phân bố khối lượng và tọa độ của các khâu

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ z_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}; \ddot{x}_i = \frac{\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i}{\Delta t} \\ \dot{y}_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t}; \ddot{y}_{i+1} = \frac{\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i}{\Delta t} \\ \dot{z}_{i+1} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta t}; \ddot{z}_{i+1} = \frac{\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

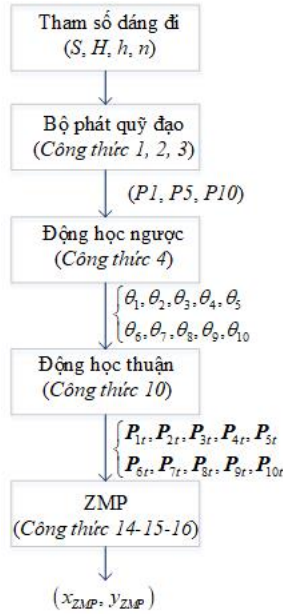
Tọa độ $P_{ii}(x, y, z)$ của các khâu được xác định từ 10 góc quay tại 1 thời điểm trong 1 bước đi với góc tọa độ đặt tại tâm bàn chân trụ bằng phương pháp hình học thông qua công thức (2.14-2.15-2.16):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{1x}(t) = 0, P_{1y}(t) = 0, P_{1z}(t) = 0, \\ P_{2x}(t) = P_{1x}, P_{2y}(t) = d_1 \cos[\theta_1(t)], P_{2z}(t) = P_{2y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{3x}(t) = d_2 \sin[\theta_2(t)], P_{3y}(t) = P_{3x}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{3z}(t) = P_{2z}(t) + d_2 \cos[\theta_2(t)] \cos[\theta_1(t)], \\ P_{4x}(t) = P_{3x}(t) + d_3 \sin[\theta_2(t) - \theta_3(t)], \\ P_{4y}(t) = P_{3y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{4z}(t) = P_{3z}(t) + d_3 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t)] \cos[\theta_1(t)], \\ P_{5x}(t) = P_{4x}(t) + d_4 \sin[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)], \\ P_{5y}(t) = P_{4y}(t) \sin[\theta_1(t)], \\ P_{5z}(t) = P_{4z}(t) + d_4 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)] \cos[\theta_1(t)]. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

$$\begin{cases}
P_{5z}(t) = P_{4z}(t) + d_4 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)] \cos[\theta_1(t)], \\
P_{6z}(t) = P_{5z}(t), P_{6y}(t) = P_{5y}(t) - w, P_{6x}(t) = P_{5x}(t), \\
P_{7z}(t) = P_{6z}(t), P_{7x}(t) = P_{6x}(t) - d_4 \cos[\theta_6(t)], \\
P_{7y}(t) = P_{6y}(t) - [P_{6z}(t) - P_{7z}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\
P_{8z}(t) = P_{7z}(t) + d_1 \sin[\theta_7(t)], \\
P_{8x}(t) = P_{7x}(t) - d_1 \cos[\theta_7(t)] \cos[\theta_6(t)], \\
P_{8y}(t) = P_{7y}(t) - [P_{7z}(t) - P_{8z}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\
P_{9z}(t) = P_{8z}(t) + d_2 \sin[\theta_7(t) - \theta_8(t)], \\
P_{9x}(t) = P_{8x}(t) - d_2 \cos[\theta_7(t) - \theta_8(t)] \cos[\theta_6(t)], \\
P_{9y}(t) = P_{8y}(t) - [P_{7z}(t) - P_{9z}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\
P_{10z}(t) = P_{9z}(t) + d_1 \sin[\theta_7(t) - \theta_8(t) + \theta_1(t)], \\
P_{10x}(t) = P_{9x}(t) - d_1 \cos[\theta_7(t) - \theta_8(t) + \theta_1(t)] \cos[\theta_6(t)], \\
P_{10y}(t) = P_{9y}(t) - [P_{7z}(t) - P_{10z}(t)] \sin[\theta_6(t)].
\end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases}
P_{0z}(t) = \frac{P_{5z}(t) + P_{6z}(t)}{2}, \\
P_{1y}(t) = \frac{P_{5y}(t) + P_{6y}(t)}{2}, \\
P_{0x}(t) = P_{5x}(t) + \frac{d_0}{2}.
\end{cases} \quad (2.16)$$

trong đó: d_0, d_1, d_2, d_3 và d_4 được mô tả trong Hình 2.3.



Hình 2.8: Lưu đồ khối tính quỹ đạo điểm ZMP.

2.5 Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm được kiểm tra trên robot hai chân HUBOT-5. Thông số vật lý của robot hai chân HUBOT-5 được trình bày trong Bảng 2.3. 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 , w là khoảng cách giữa 2 chân, như minh họa trong hình 2.3. $F_{x1} + F_{x2}$ và $F_{y1} + F_{y2}$ là chiều dài và chiều rộng của bàn chân robot. m_i là khối lượng của khâu thứ i .

Bảng 2.3: Thông số vật lý của HUBOT-5

Tham số	Giá trị
d_0	6.0 cm
d_1	4.2 cm
d_2	9.1 cm
d_3	8.0 cm
d_4	9.3 cm
w	8.6 cm
F_{x1}	2.1 cm
F_{x2}	4.1 cm
$F_{y1} = F_{y2}$	3.9 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 (2.9), bằng cách chọn $\lambda = 0.4$ thì robot hai chân 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 2.4.

Bảng 2.4: Giới hạn các tham số đáng 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 khụy 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 $[0.7; 1.0]$. Bảng 2.5 trình bày kết quả khảo sát giá trị tham số của thuật toán GA.

Bảng 2.5: 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

Dựa vào Bảng 2.5, trường hợp 6 cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất trong 7 trường hợp 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 $[2; 2.05]$. Bảng 2.6 trình bày kết quả trình bày khảo sát giá trị tham số của thuật toán PSO.

Bảng 2.6: 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 Bảng 2.6, trường hợp 4 cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất trong 11 trường hợp 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. Bảng 2.7 trình bày giá trị tham số của thuật toán GA, PSO và MDE.

Bảng 2.7: Các tham số của thuật toán GA, PSO, MDE

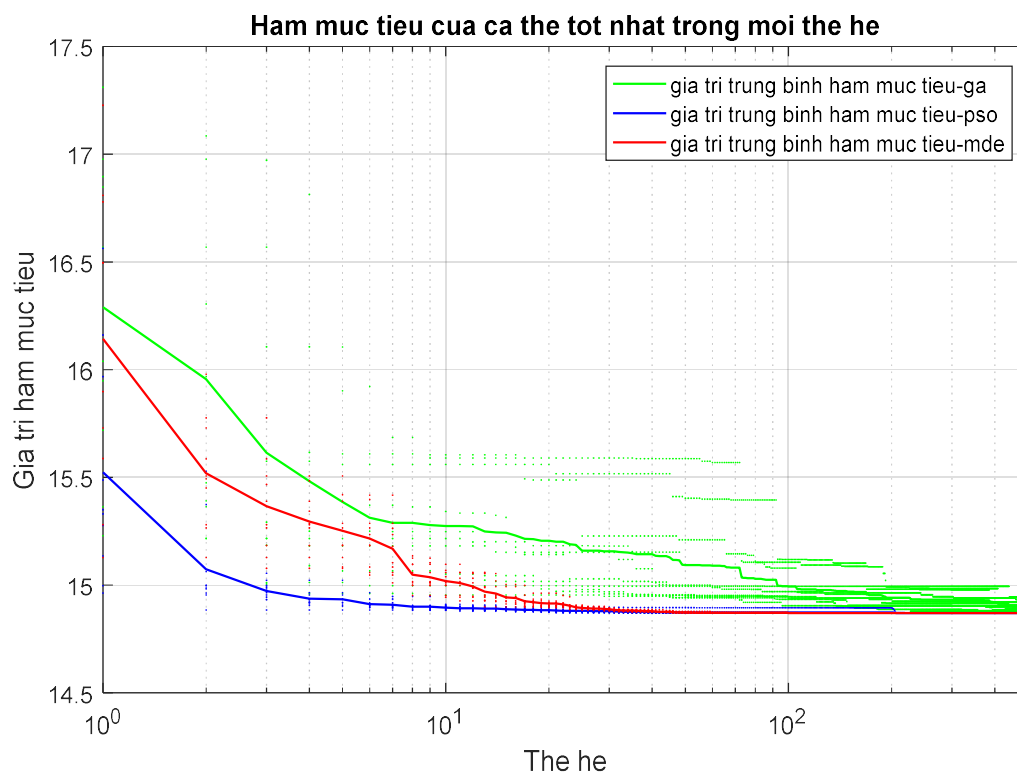
Phương pháp	Tham số	Giá trị
GA	Xác suất đột biến (p_M)	0.2
	Xác suất lai ghép (p_C)	0.7
PSO	Hệ số gia tốc 1 (C_1)	2
	Hệ số gia tốc 2 (C_2)	2
	Trọng số quán tính (w)	0.6
MDE	Hệ số đột biến (F)	Ngẫu nhiên $[0.4; 1.0]$
	Xác suất lai ghép (CR)	Ngẫu nhiên $[0.7; 1.0]$

Cài đặt độ nhắc chân của HUBOT-5 là $H_{ref} = 2cm$. Bảng 2.8 trình bày giá trị thông số đáng đi tối ưu và giá trị tốt nhất hàm mục tiêu của 10 lần chạy tương ứng với 3 thuật toán GA-PSO-MDE, Hình 2.9 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).

Bảng 2.8: 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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	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	15.00	15.00	1.96	1.78	1.99	1.06	1.04	0.804	7.11	6.68	6.89	14.89	14.87	14.87



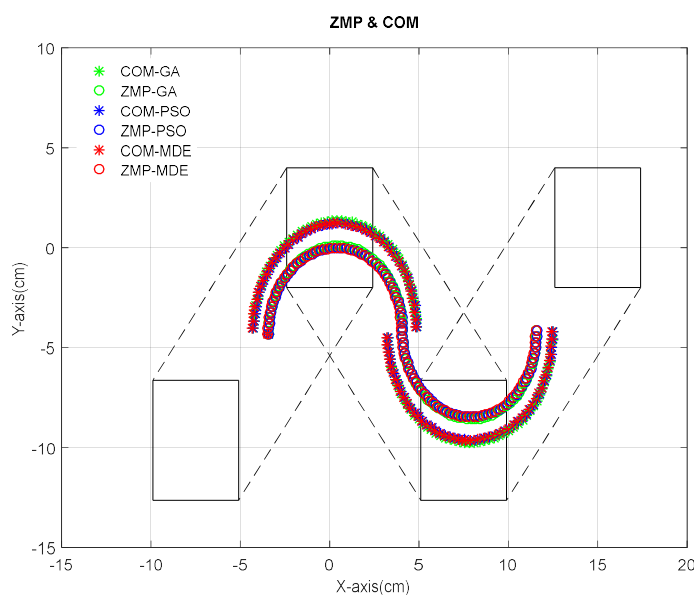
Hình 2.9 Giá trị trung bình của hàm mục tiêu f

Dựa vào Bảng 2.8, giá trị tối ưu của bộ tham số dáng đi cho HUBOT-5 thỏa mục tiêu sau 10 lần chạy với từng thuật toán MDE, PSO và GA được trình bày trong Bảng 2.9. Hình 2.10 khảo sát điểm ZMP và COM khi HUBOT-5 bước đi trong 1 chu kỳ bước ($T = 2s$) tương ứng với bộ tham số dáng đi tối ưu sử dụng các thuật toán GA, PSO, MDE.

Bộ tham số tối ưu với từng thuật toán trong Bảng 2.9 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 Hình 2.10 cho thấy luôn nằm trong vùng chân trụ hay là đạt được mục tiêu bước đi ổn định.

Bảng 2.9: Bộ tham số tối ưu với từng giải thuật

H_{ref} (cm)	Giá trị tối ưu của bộ tham số dáng 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	15.00	15.00	15.00	2.05	2.00	2.00	1.0	1.04	0.804	7.08	6.91	6.89	14.88	14.87	14.87



Hình 2.10 Khảo sát ZMP và COM

Dựa trên các kết quả mô tả ở Hình 2.9 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

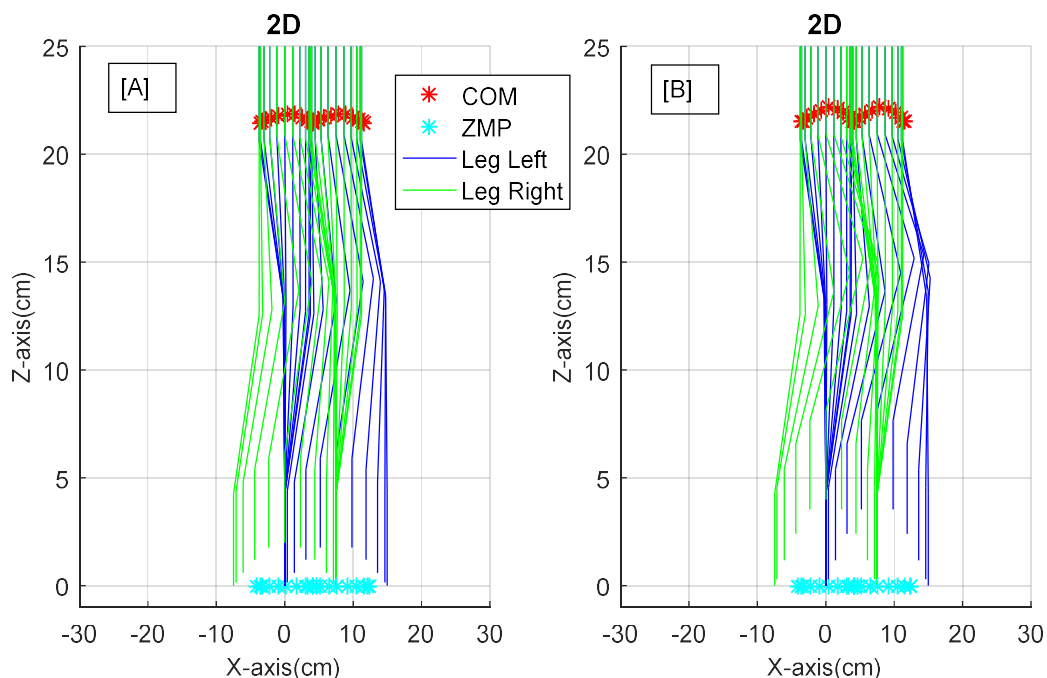
thuật toán PSO là sau khoảng 254 thế hệ thì tìm kiếm được điểm tối ưu nhưng có giá trị trung bình là 14.87065, còn thuật toán GA phải sau khoảng 465 thế hệ thì tìm kiếm được điểm tối ưu có giá trị trung bình là 14.88492. Vậy thuật toán MDE có chất lượng và hiệu quả vượt trội so với các thuật toán PSO và GA.

Bảng 2.10 trình bày giá trị tối ưu của bộ tham số dáng đi để HUBOT-5 bước đi ổn định với 2 trường hợp có độ nhắc khác nhau sử dụng thuật toán MDE.

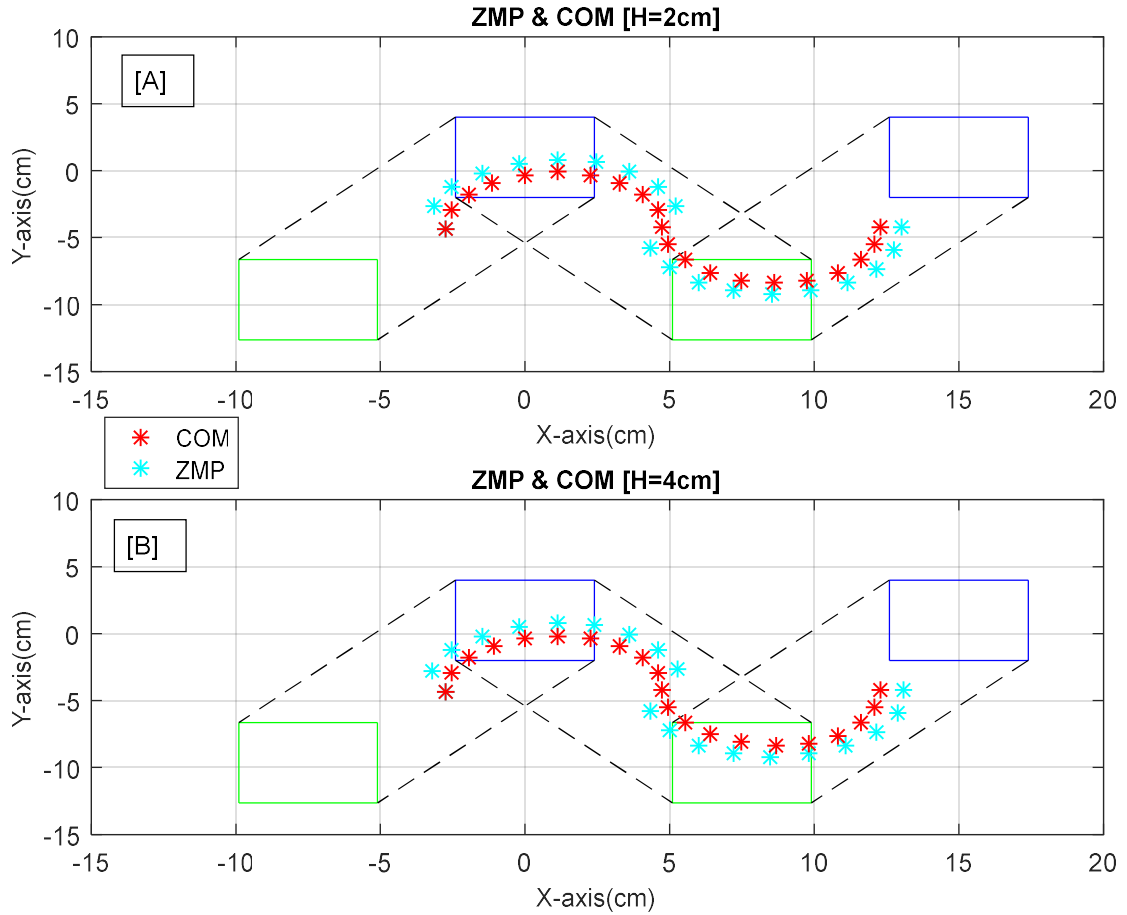
Bảng 2.10: Bộ tham số tối ưu

H_{ref} (cm)	Kết quả tối ưu MDE			
	S (cm)	H (cm)	h (cm)	n (cm)
2.0	15.00	2.00	0.80	6.89
4.0	15.00	4.00	0.79	6.86

Hình 2.11 [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 nhắc chân $H=2\text{cm}$ và $H=4\text{cm}$. Bảng 2.10 và Hình 2.11 cho thấy HUBOT-5 có độ nhắc chân bám theo giá trị đã cài đặt.



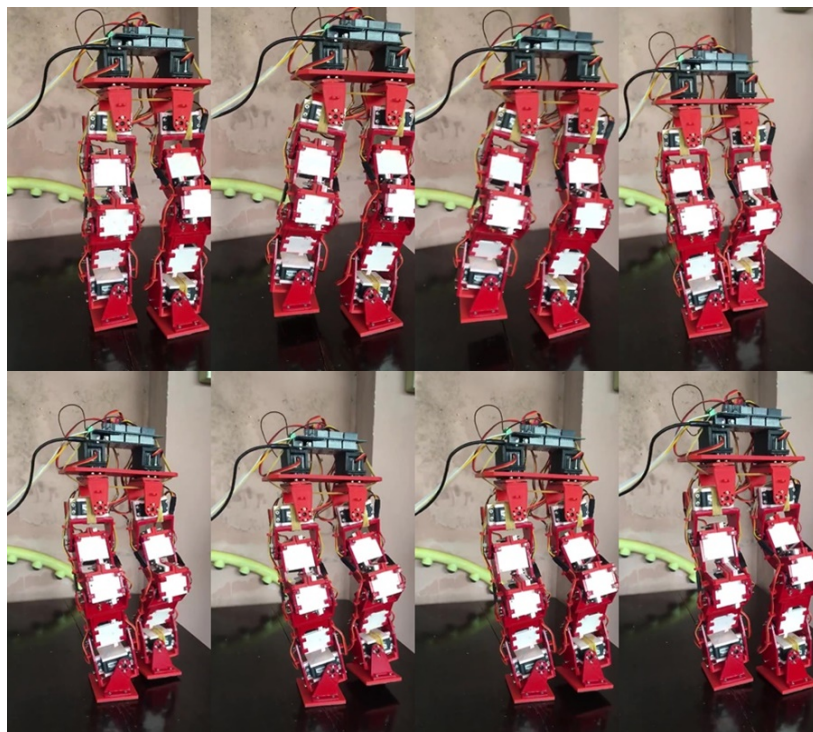
Hình 2.11: Dáng đi 2D của HUBOT-5 có độ nhắc chân khác nhau.



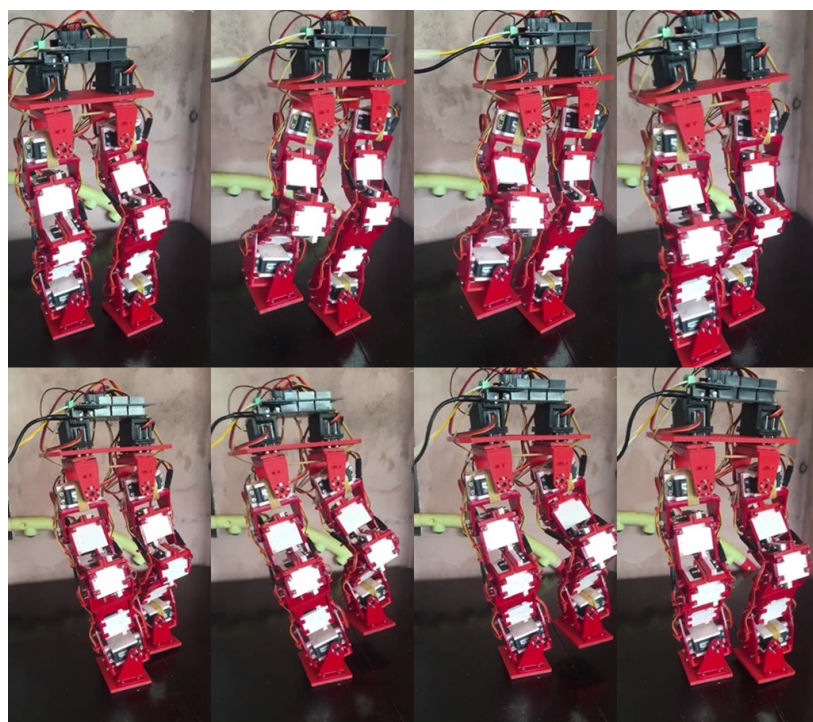
Hình 2.12: Quỹ đạo ZMP và COM

Hình 2.12 [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.

Hình 2.13 và Hình 2.14 minh họa hình ảnh HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhắc chân $H_{ref}=2cm$ và $H_{ref}=4cm$.

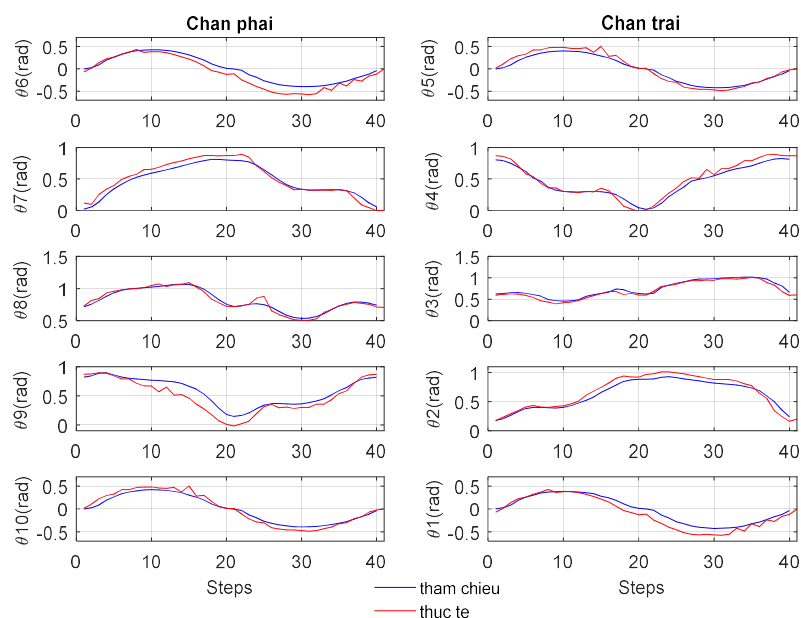


Hình 2.13: HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhắc chân $H_{ref}=2\text{cm}$

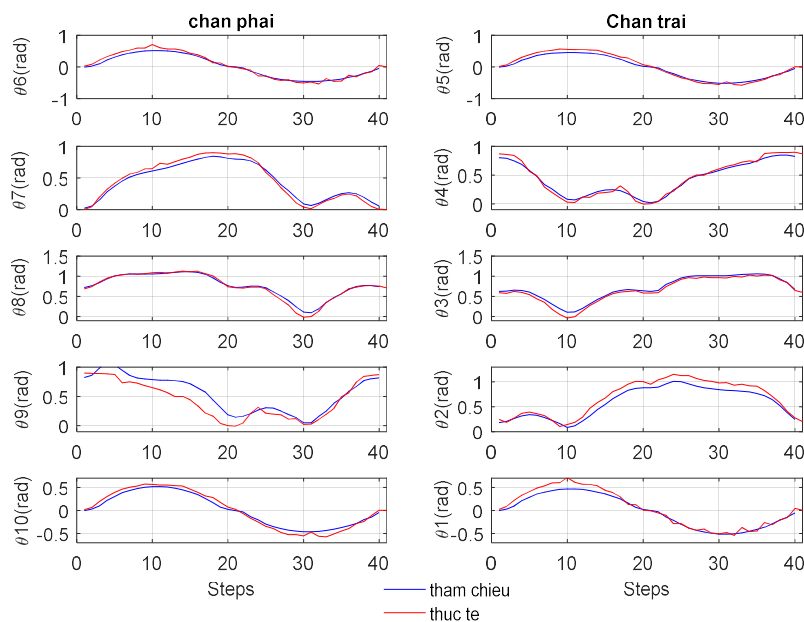


Hình 2.14: HUBOT-5 thực hiện bước đi ổn định với độ nhắc chân $H_{ref}=4\text{cm}$

Hình 2.15 và Hình 2.16 minh họa 10 quỹ đạo góc quay tham chiếu và góc quay thực tế 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 (Bảng 2.12).

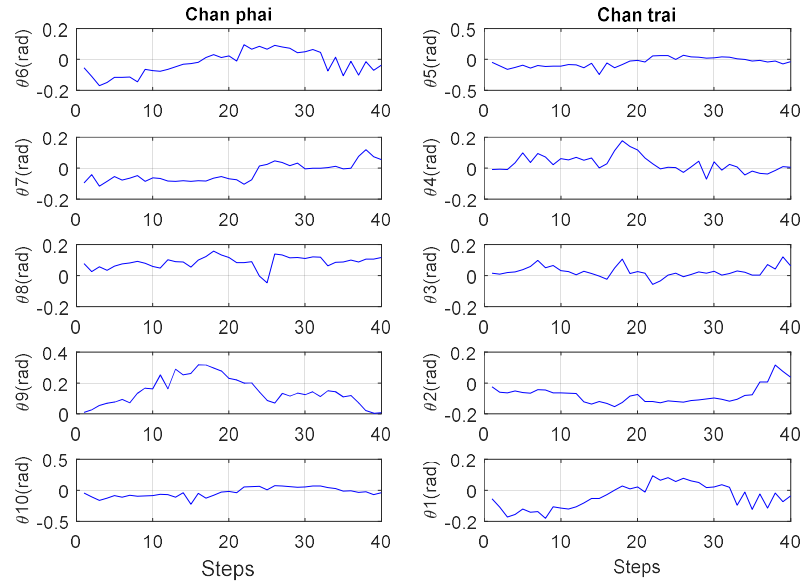


Hình 2.15: Quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=2\text{cm}$)

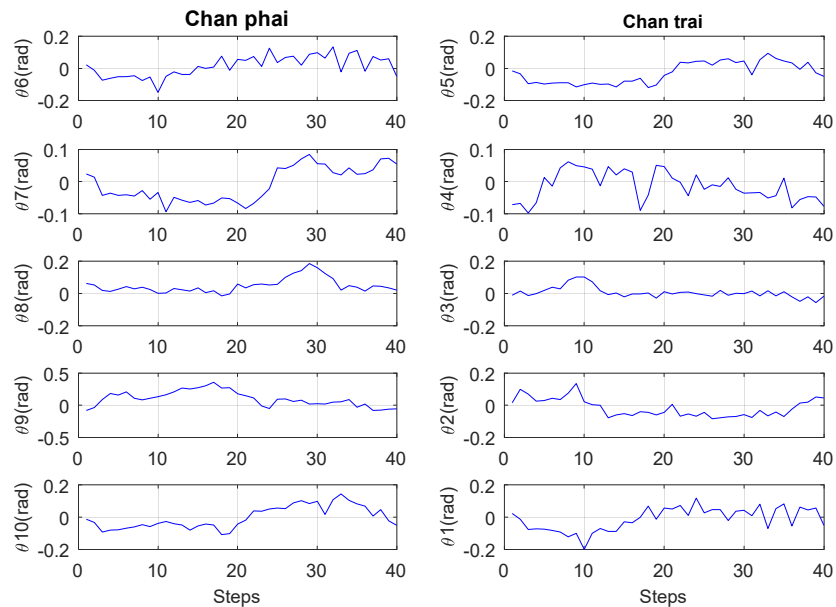


Hình 2.16: Quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=4\text{cm}$)

Hình 2.17 và Hình 2.18 minh họa 10 quỹ đạo sai lệch của góc quay 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 (Bảng 2.12).



Hình 2.17: Quỹ đạo sai lệch của 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=2\text{cm}$)



Hình 2.18: Sai lệch của quỹ đạo 10 góc quay ở 2 chân HUBOT-5 ($H_{ref}=4\text{cm}$)

Tóm lại, các kết quả tối ưu khi chạy mô phỏng đã được thể hiện đầy đủ ở Bảng 2.10, Hình 2.11, Hình 2.12. Tương ứng, kết quả thực nghiệm của giải thuật đề xuất nhúng trên mô hình robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5 được thể hiện trong Hình 2.13, Hình 2.14, Hình 2.15, Hình 2.16, Hình 2.17 và Hình 2.18, ứng với độ nhắc 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 nhắc chân theo ý muốn – H_{ref} với tham số dáng đi (chiều dài bước – S , độ nhắc chân – H , độ khụy gối – h và độ lắc hông – n) tối ưu giúp robot hai chân HUBOT-5 bước đi ổn định không ngã và đạt khả năng bám sát giá trị độ nhắc chân – H_{ref} theo ý muốn, nhờ sử dụng thuật toán MDE đã khả thi.

2.6 Kết luận

Chương này 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 hai chân sao cho robot dạng người bước đi ổn định với độ nhắc chân cài đặt trước. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-5 cho thấy việc sử dụng thuật toán MDE với hàm mục tiêu hợp lý, cho phép robot hai chân bước đi bền vững với thời gian huấn luyện được rút ngắn rất hiệu quả.

Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [2], [4] và [6], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

Trong quá trình robot hai chân bước đi thì 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) của Dip là không đổi. Điều này làm cho robot hai chân khó thực hiện bước đi ổn định và tự nhiên với 1 quỹ đạo ZMP (Zero Momen Point) mong muốn. Để vượt qua khó khăn này, trong chương tiếp theo nghiên cứu sinh thực hiện nhận dạng 4 thông số của bộ tạo dáng (WPG) này sử dụng mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) được tối ưu bởi thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE).

CHƯƠNG 3 TẠO DÁNG ĐI THÍCH NGHI CHO ROBOT HAI CHÂN BƯỚC ĐI ỔN ĐỊNH SỬ DỤNG MÔ HÌNH MẠNG NƠ-RÔN TIẾN HÓA THÍCH NGHI (AENN) ĐƯỢC TỐI ƯU BỞI THUẬT TOÁN MDE

3.1 Giới thiệu

Robot dạng người có cấu trúc cơ học phức tạp nhưng robot dạng người có khả năng thực hiện được các chuyển động tinh tế. Trong những thập kỷ gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào lĩnh vực robot dạng người dựa vào chuyển động của con người [109-113]. Mục đích quan trọng nhất của các nghiên cứu được thực hiện trong lĩnh vực này là cố gắng giải quyết vấn đề: làm thế nào để robot dạng người có thể đi lại tự nhiên và ổn định.

Để đạt được mục tiêu này, việc tạo mẫu đi bộ của robot dạng người được thực hiện bằng cách sử dụng các kỹ thuật học tăng cường [114-116]. Hơn nữa, phần lớn các nghiên cứu về bộ tạo mẫu đi bộ của robot dạng người đã được giới thiệu dựa trên tiêu chí (ZMP) [117]. ZMP là một điểm trên mặt đất tại đó các mô-men phản lực quanh bất kỳ trục nào đi qua điểm đó và tiếp tuyến với mặt đất là bằng 0. Do đó, nếu ZMP nằm trong diện tích vùng chân trụ (tất cả các điểm tiếp xúc giữa bàn chân và mặt đất) thì sự ổn định của robot dạng người khi chuyển động có thể được đảm bảo. Tương tự như vậy, Kondo et al. [118] đã mô tả một thuật toán mô phỏng dáng đi của người khuyết tật, dựa trên cơ sở ZMP. Ngoài ra, một bộ lọc phân tích quỹ đạo có ràng buộc [119] như một phần của bộ lọc phân tích chuyển động sử dụng ZMP làm tiêu chí ổn định. Một số đề xuất về dáng đi được dựa vào công nghệ như bộ tạo mẫu trung tâm (CPG) [120], học tăng cường [121]. Ngoài ra, Narukawa [122] và Safartoobi [123] đề xuất sử dụng động lực thụ động để đạt được bước đi hiệu quả với các cơ chế đơn giản.

Mặt khác, một số nhà nghiên cứu đã coi việc tạo dáng đi là một nhiệm vụ tối ưu hóa đa mục tiêu có ràng buộc. Nghĩa là, tạo dáng đi đóng vai trò quan trọng nhất để đảm bảo sự ổn định của robot dạng người khi đi bộ. Ví dụ, dữ liệu trong quá trình

chuyển động của con người được thu thập để điều khiển robot dạng người [124]. Tuy nhiên, vài bài báo chỉ ra rằng dữ liệu vận động sinh học không thể sử dụng trực tiếp cho robot dạng người, bởi sự khác biệt về động học và động lực giữa con người và robot dạng người. Điều này xác nhận yêu cầu cho việc sửa đổi động học trong việc tính toán quỹ đạo góc khớp [125, 126]. Do đó, việc tạo ra dáng đi của robot dạng người là một vấn đề tối ưu hóa với các ràng buộc [127, 128]. Ví dụ, tốc độ chuyển động [129, 130], tiêu chí ổn định, mức tiêu thụ năng lượng [131, 132], tối ưu hóa cân bằng động chống lại các lực bên ngoài xung quanh [133], bàn chân mềm mại [134].

Gần đây, các mô hình mạng nơ-rôn và các bộ điều khiển nơ-rôn được áp dụng vào nhận dạng và điều khiển robot dạng người [135, 136]. Mô hình mạng nơ-rôn được kết hợp với mô hình điều khiển trượt (SMC – Sliding Mode Control) để điều khiển robot dạng người bước đi ổn định và vững chắc [137]. Ngoài ra, tối ưu hóa mô hình mạng nơ-rôn dựa vào các thuật toán ngẫu nhiên (meta-heuristic) như tối ưu đàn kiến (ACO – Ant Colony Optimization) [138], đã thành công trong việc nhận dạng và điều khiển robot dạng người. Một bộ tạo mẫu đi bộ mới được mô tả bởi Dip [52], các tác giả tìm bốn tham số dáng đi của bộ tạo mẫu để robot hai chân bước đi ổn định với vận tốc tối đa cho phép sử dụng thuật toán GA. Tuy nhiên, bốn tham số này có giá trị xác định trong suốt quá trình robot hai chân bước đi. Liên quan đến thuật toán tối ưu ngẫu nhiên mới, Son và đồng nghiệp [101, 102] đề xuất thuật toán MDE dựa trên thuật toán DE gốc để nhận dạng tham số của hệ thống MIMO với tốc độ hội tụ nhanh và khả năng tránh khỏi cực tiểu cục bộ.

Dựa vào phân tích trên, chương này đề xuất một phương pháp mới cho việc tạo dáng thích nghi cho robot hai chân bằng cách kết hợp mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) được nhận dạng bởi thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE). Cụ thể, dựa trên dữ liệu bất chuyển động của con người được sử dụng làm dữ liệu huấn luyện và đánh giá, các hàm dáng đi được nội suy và xác định. Sau đó, bài toán tối ưu hóa được xây dựng để tối ưu hóa các hệ số của hàm dáng đi. Mạng nơ-rôn nhân tạo

(ANN) được áp dụng để sắp xỉ cho các hàm mục tiêu và hàm ràng buộc. Thuật toán MDE thực hiện một khả năng nổi bật đối với vấn đề nhận dạng đa mục tiêu và đa mục tiêu. Nó có thể đạt được kết quả tốt liên quan đến độ ổn định, độ hội tụ cao, giá trị hàm mục tiêu thấp và hiệu quả so với thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) và thuật toán di truyền (GA). Cụ thể, quỹ đạo ZMP tham chiếu được sử dụng để robot hai chân bước đi ổn định. Trong chương này, một trình bộ tạo dáng đi thích nghi được đề xuất để tạo quỹ đạo ZMP sắp xỉ với ZMP tham chiếu. Trong kết quả mô phỏng, phương pháp đề xuất được áp dụng vào robot hai chân kích thước nhỏ - HUBOT5. Các kết quả mô phỏng xác nhận tính khả thi của phương pháp được đề xuất.

Chương này được tổ chức như sau. Mục 3.2 trình bày cấu hình robot hai chân kích thước nhỏ. Nhận dạng và tối ưu mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến được trình bày trong mục 3.3. Mục 3.4 giới thiệu kết quả nhận dạng của bộ tạo dáng đi được đề xuất cho robot hai chân. Cuối cùng, mục 3.5 trình bày kết luận.

3.2 Cấu hình robot hai chân kích thước nhỏ

Robot hai chân kích thước nhỏ (HUBOT-5) gồm có phần thân trên và hai chân minh họa trong Hình 2.2 (chương 2). Mỗi chân có 3 thành phần: khâu bàn chân, khâu cẳng chân và khâu đùi. Khớp nối giữa khâu bàn chân và khâu cẳng chân gọi là cổ chân, khớp nối giữa khâu cẳng chân và khâu đùi gọi là đầu gối, khớp nối giữa khâu đùi và thân trên gọi là hông. Trong nghiên cứu này, robot hai chân kích thước nhỏ có 10 bậc tự do (BTD) gồm có 2 BTD tại hông, 1 BTD tại đầu gối, 2 BTD tại cổ chân và 5 BTD tại mỗi chân. Mỗi BTD tương ứng với 1 động cơ điện. Chương này chỉ tập trung vào robot hai chân bước đi thẳng với quỹ đạo ZMP được thiết kế trước trên bề mặt bằng phẳng. Vì vậy, thân trên của robot dạng người được giữ cố định và chỉ điều khiển 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 Hình 2.2. Trong hình 2.2: (P_1, P_2) và (P_9, P_{10}) thể hiện vị trí các động cơ đặt tại 2 cổ chân của robot hai chân; P_3 và P_8 thể hiện vị trí các động cơ đặt tại 2 đầu

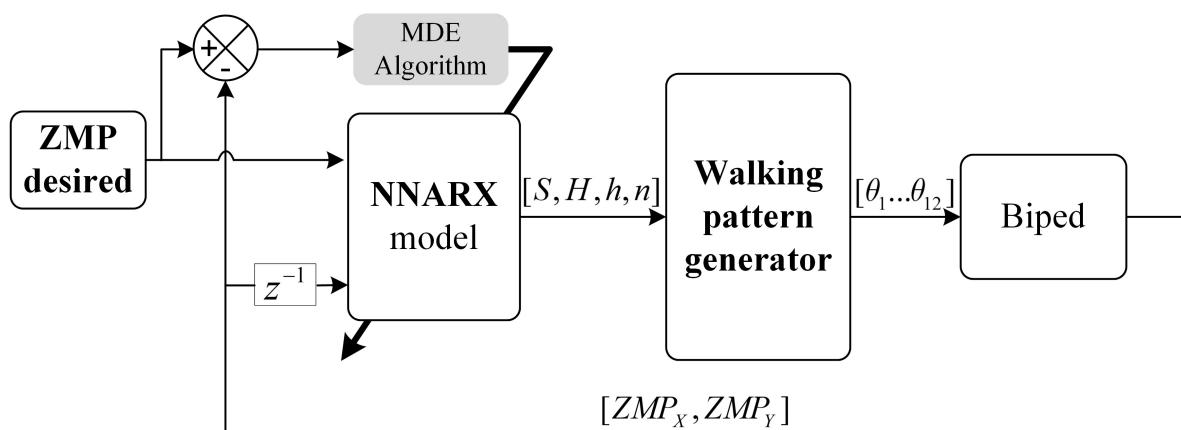
gối của robot dạng người; (P_4, P_5) and (P_6, P_7) thể hiện vị trí các động cơ đặt tại 2 hông của robot hai chân.

3.3 Nhận dạng và tối ưu mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE)

Nhận dạng hệ thống là xây dựng mô hình toán của hệ thống dựa trên dữ liệu quan sát được. Quá trình giải bài toán nhận dạng hệ thống là quá trình lặp với bốn bước: thí nghiệm thu thập dữ liệu, chọn cấu trúc mô hình, chọn tiêu chuẩn ước lượng thông số và đánh giá chất lượng mô hình. Chi tiết các bước thực hiện nhận dạng hệ thống được trình bày trong các tài liệu [152], [153]. Như trong [153], bước quan trọng nhất trong quá trình giải bài toán nhận dạng là chọn cấu trúc mô hình. Đối với hệ phi tuyến, vấn đề chọn cấu trúc mô hình bao gồm chọn vector hồi quy và chọn ánh xạ phi tuyến. Các phần tử hồi quy được chọn từ tín hiệu vào, tín hiệu ra trong quá khứ của hệ thống và sai số dự báo trong quá khứ. Tuy theo các phần tử hồi quy được lựa chọn mà ta phân biệt các loại mô hình hộp đen phi tuyến. Mô hình NARX là mô hình được sử dụng phổ biến nhất trong đa số các ứng dụng thực tế. Nếu biết trước rất ít thông tin về đối tượng ta phải giải bài toán nhận dạng hệ thống chủ yếu vào dữ liệu vào-ra thực nghiệm quan sát được. Trong trường hợp này, mạng thần kinh là cấu trúc mô hình phi tuyến được lựa chọn đầu tiên để mô hình hóa hệ thống vì mạng thần kinh có tính linh hoạt rất cao, có thể xấp xỉ hàm phi tuyến trơn với sai số nhỏ tùy ý nếu số tế bào thần kinh ở lớp ẩn đủ lớn, đồng thời trọng số của mạng có thể huấn luyện hoàn toàn dựa vào dữ liệu mà không cần thêm bất cứ thông tin gì khác về đối tượng cần nhận dạng. Các thuật toán có thể dùng để ước lượng trọng số của mạng như: thuật toán lan truyền ngược, thuật toán Newton, thuật toán tối ưu ngẫu nhiên.

Trong chương này, mô hình nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) được đề xuất để tạo tham số đầu vào cho bộ tạo dáng (WPG) như minh họa trong Hình 3.1. Bộ tạo mẫu (WPG) được mô tả bởi Goswami Dip [52]. Mô hình nơ-rôn tiến hóa thích nghi

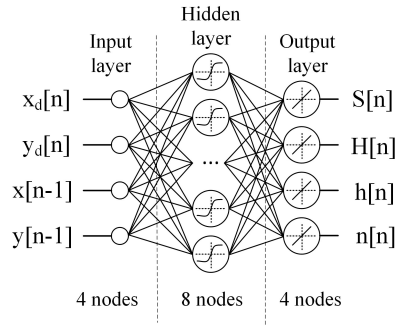
(AENM) được khảo sát là kết hợp giữa cấu trúc mạng nơ-rôn đa lớp (MLPNN) với mô hình hồi qui phi tuyến (NARX-Auto Regressive eXogenous model) thường được dùng trong kỹ thuật nhận dạng. Nhờ kết hợp này, mô hình nơ-rôn tiến hóa thích nghi kết hợp được khả năng xấp xỉ rất mạnh của mạng nơ-rôn đa lớp với tính nhớ và dự báo rất tốt của mô hình hồi qui phi tuyến NARX. Ngõ ra của mô hình nơ-rôn tiến hóa thích nghi là ngõ vào bộ tạo mẫu (WPG) và ngõ ra của bộ tạo mẫu (WPG) là tạo ra giá trị của góc quay tại khớp ở hai chân robot dạng người. Ngõ ra của mô hình robot dạng người là giá trị của điểm ZMP. Ngõ vào của mô hình nơ-rôn tiến hóa thích nghi là giá trị của điểm ZMP mong muốn và ngõ ra của mô hình robot dạng người. Các giá trị trọng số của mô hình nơ-rôn tiến hóa thích nghi sẽ được nhận dạng tối ưu bởi thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE).



Hình 3.1: Đề xuất sơ đồ điều khiển sử dụng mô hình AENM

3.3.1 Đề xuất mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM)

Trong chương này, mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi được thiết kế với 8 tế bào thần kinh ở lớp ẩn, 4 tế bào thần kinh ở lớp vào: các ngõ vào là tọa độ của điểm ZMP nhưng bị trễ một bước ($x[n-1]$ và $y[n-1]$) và tọa độ của điểm ZMP mong muốn ($x_d[n]$, $y_d[n]$), và 4 tế bào thần kinh ở lớp ra: 4 tham số ($S[n]$, $H[n]$, $h[n]$, $n[n]$) và 4 tham số này chính là ngõ vào của bộ tạo mẫu dáng đi (WPG), với cấu trúc như Hình 3.2.



Hình 3.2: Đề xuất cấu trúc mô hình AENM

Ngõ ra của mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM) được mô tả như sau:

$$\begin{aligned}
 net_h[n] &= v^T[n]x[n] + b_h \\
 y_h[n] &= \frac{1 - e^{-net_h}}{1 + e^{-net_h}} \\
 net_o[n] &= w^T y_h[n] + b_o \\
 y_o[n] &= net_o[n]
 \end{aligned}$$

trong đó, net_h là tổng có trọng số (v) của tín hiệu vào (x) và mức ngưỡng (b_h) trước khi đưa vào hàm tác động của các tế bào thần kinh ở lớp ẩn. y_h là tín hiệu ra của các tế bào thần kinh ở lớp ẩn. y_o là tín hiệu ra của tế bào thần kinh ở lớp ra và có giá trị bằng với tổng có trọng số (w) của tín hiệu (y_h) và mức ngưỡng (b_o).

Trọng số của mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa (AENM) được huấn luyện để hàm mục tiêu (3.1) đạt giá trị tối thiểu. Hàm mục tiêu (3.1) được tính toán dựa vào tiêu chuẩn sai số bình phương tối thiểu (LMS) như công thức (3.1).

$$f = \sum_1^{Total\ Sample} \left((X_{zmp} - desiredX_{zmp})^2 + (Y_{zmp} - desiredY_{zmp})^2 \right) \quad (3.1)$$

Để đạt được điều này, trong chương này thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE) được sử dụng.

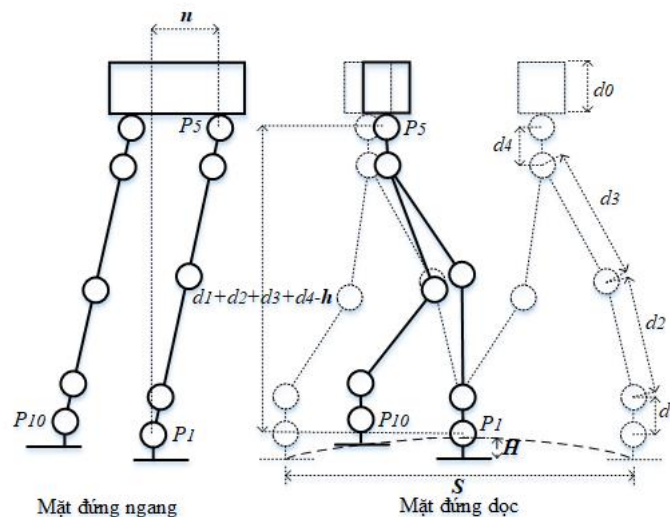
Thuật toán MDE được phát triển dựa trên thuật toán DE trong [100] do Storn và Price đề xuất vào năm 1997. Mã code thực hiện thuật toán tiến hóa vi sai cơ bản được mô tả như Bảng A.1 (Phụ lục A). Mã code của MDE được phát triển bởi Sơn và đồng nghiệp trong [101-102] được mô tả trong Bảng A.2 (Phụ lục A). Trong thuật toán

MDE, $\bar{X}_{i,G} = [x_{1,i,G}, \dots, x_{j,i,G}, \dots, x_{D,i,G}]$ và $\bar{U}_{i,G} = [u_{1,i,G}, \dots, u_{j,i,G}, \dots, u_{D,i,G}]$ đại diện cho véc-tơ mục tiêu và véc-tơ thử nghiệm (D - chiều) của cá thể thứ i trong thế hệ thứ G , $x_{j,i,G}$ và $u_{j,i,G}$ đại diện cho phần tử thứ j của véc-tơ mục tiêu và véc-tơ thử nghiệm, các tham số F (hệ số đột biến), CR (xác suất lai ghép) được chọn ngẫu nhiên cho từng cá thể và cho mỗi bước lặp, f đại diện cho hàm mục tiêu, với $G = 1, 2, \dots, G_{\max}$ đại diện cho số lượng thế hệ và $i = 1, 2, \dots, NP$ biểu thị kích thước của quần thể, $j = 1, 2, \dots, D$ đại diện cho số lượng tham số.

3.3.2 Bộ tạo mẫu dáng đi (WPG)

Vai trò của động học ngược là chuyển thông tin trong không gian Cartesian sang không gian khớp. Vì vậy, nguồn gốc của các quy luật thu được động học ngược sẽ trình bày trong mục này.

Bốn tham số quan trọng của robot hai chân giúp bước đi ổn định bao gồm S -chiều dài bước chân [cm], H -độ nhấc chân [cm], h -độ khuyu gối [cm] và n -độ lắc hông [cm] được minh họa trong Hình 3.3. 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 .



Hình 3.3: Bốn tham số ảnh hưởng đến dáng đi robot hai chân HUBOT-5

Như chỉ ra trong Hình 3.3, 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*) [52]. 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 (3.2).

$$\begin{cases} P_{1x}(t) = P_{1y}(t) = P_{1z}(t) = 0, \\ P_{5x}(t) = \frac{S}{4} \sin\left(\frac{\pi}{T}\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right), \\ P_{5y}(t) = n \sin\left(\frac{\pi}{2}\left(\sin\left(\frac{\pi\tau}{2T}\right) + 1\right)\right) \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right), \\ P_{5z}(t) = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 - h), \\ P_{10x}(t) = \frac{S}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T}\left(t - \frac{T}{2}\right)\right), \\ P_{10y}(t) = -w, \\ P_{10z}(t) = H \sin\left(\pi\left(\frac{P_{10x}(t)}{S} + 0.5\right)\right). \end{cases} \quad (3.2)$$

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,

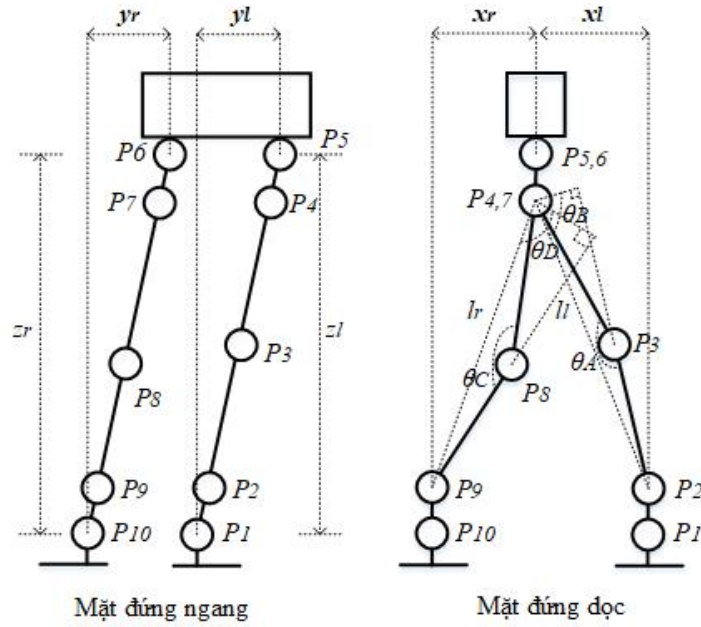
$$\tau = \begin{cases} t & \text{nếu } 0 \leq t \leq T \\ t - T & \text{nếu } t > T \end{cases}, u(t) = \begin{cases} 0 & \text{nếu } t < 0 \\ 1 & \text{nếu } t \geq 0 \end{cases}.$$

Từ công thức (3.2), 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 hai chân.

Tiếp theo, thảo luận việc tính quỹ đạo góc quay ở 2 chân robot hai chân $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10})$ sau khi biết được quỹ đạo cổ chân trụ là

$P_1 = [P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}]$, quỹ đạo hông chân trụ là $P_5 = [P_{5x}, P_{5y}, P_{5z}]$ và quỹ đạo cổ chân di chuyển là $P_{10} = [P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]$ như trong Hình 2.2. Bài toán động học ngược robot hai

chân có thể được giải bằng phương pháp giải tích hoặc phương pháp số. Tuy nhiên, trong mục này sẽ trình bày phương pháp hình học. Tham số của mô hình động học ngược $x_l(t)$, $y_l(t)$, $z_l(t)$, $x_r(t)$, $y_r(t)$, $z_r(t)$, $l_l(t)$, $l_r(t)$, $\theta_A(t)$, $\theta_B(t)$, $\theta_C(t)$, $\theta_D(t)$ được định nghĩa như Hình 3.4 và công thức (3.3). Tuy nhiên, lưu ý rằng: l_l là khoảng cách giữa P_2 và P_4 , l_r là khoảng cách giữa P_9 và P_7 . Trong đó, d_1 , d_2 , d_3 và d_4 được minh họa trong Hình 3.3.



Hình 3.4: Các tham số của vấn đề động học ngược

$$\begin{cases}
 x_l = P_{5x} - P_{1x}, & y_l = P_{5y} - P_{1y}, & z_l = P_{5z} - P_{1z}, \\
 l_l = \sqrt{(P_{4x} - P_{2x})^2 + (P_{4y} - P_{2y})^2 + (P_{4z} - P_{2z})^2}, \\
 x_r = P_{6x} - P_{10x}, & y_r = P_{6y} - P_{10y}, & z_r = P_{6z} - P_{10z}, \\
 l_r = \sqrt{(P_{7x} - P_{9x})^2 + (P_{7y} - P_{9y})^2 + (P_{7z} - P_{9z})^2} \\
 \theta_A = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_l^2}{2d_2d_3}\right), & \theta_B = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_A)}{l_l}\right), \\
 \theta_C = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_r^2}{2d_2d_3}\right), & \theta_D = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_C)}{l_l}\right).
 \end{cases} \quad (3.3)$$

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 (3.4) dưới đây được sử dụng để tính P_2, P_4, P_6, P_7, P_9 .

$$\begin{cases} P_{2x} = P_{1x}, & P_{2z} = d_1 \cos(\theta_1), & P_{2y} = P_{2z} \sin(\theta_1), \\ P_{4x} = P_{5x}, & P_{4z} = P_{5z} - d_4 \cos(\theta_1), & P_{4y} = P_{5y} - (P_{5z} - P_{4z}) \sin(\theta_1), \\ P_{6x} = P_{5x}, & P_{6y} = P_{5y} - w, & P_{6z} = P_{5z}, \\ P_{7x} = P_{6x}, & P_{7z} = P_{6z} - d_4 \cos(\theta_{10}), & P_{7y} = P_{6y} - (P_{6z} - P_{7z}) \sin(\theta_{10}), \\ P_{9x} = P_{10x}, & P_{9z} = P_{10z} + d_4 \cos(\theta_{10}), & P_{9y} = P_{10y} + (P_{9z} - P_{10z}) \sin(\theta_{10}). \end{cases} \quad (3.4)$$

Góc quay ở 2 chân của robot dạng người được xác định như công thức (3.5).

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{y_l}{z_l}\right), & \theta_5 = -\theta_1, \\ \theta_{10} = \arctan\left(\frac{y_r}{z_r}\right), & \theta_6 = -\theta_{10}, \\ \theta_3 = \pi - \theta_A, \\ \theta_8 = \pi - \theta_C, \\ \theta_4 = \frac{\pi}{2} - \theta_A + \theta_B - \arcsin\left(\frac{x_l}{l_l}\right), \\ \theta_7 = \frac{\pi}{2} - \theta_C + \theta_D - \arcsin\left(\frac{x_r}{l_r}\right), \\ \theta_2 = \theta_3 - \theta_4, \\ \theta_{11} = \theta_9 - \theta_7. \end{cases} \quad (3.5)$$

Cuối cùng, sử dụng các công thức (3.3-3.4-3.5), 10 quỹ đạo góc quay ở hai chân của robot HUBOT-5 trong 1 chu kỳ bước đi được tính toán để kiểm soát chính xác và hiệu quả dáng đi của robot dạng người.

Như vậy bốn tham số cơ bản H, h, s và n sẽ được chọn một cách tối ưu để ZMP của robot dạng người được đảm bảo, do đó giúp robot dạng người bước đi theo quỹ đạo ZMP tham chiếu.

3.3.3 Hoạt động của mô hình đề xuất

Mô hình mạng nơ-ron hoạt động như một bộ điều khiển vòng kín đảm bảo robot hai chân bước đi ổn định. Các ngõ vào là tọa độ của điểm ZMP nhưng bị trễ một bước ($x[n-1]$ và $y[n-1]$) và tọa độ của điểm ZMP mong muốn ($x_d[n]$, $y_d[n]$). Các ngõ ra là 4 tham số ($S[n]$, $H[n]$, $h[n]$, $n[n]$) và 4 tham số này chính là ngõ vào của bộ tạo mẫu dáng đi (WPG).

Trọng số của mô hình mạng nơ-ron tiến hóa (AENM) đã đề xuất sẽ được nhận dạng và tối ưu bằng cách sử dụng thuật toán ngẫu nhiên. Hàm mục tiêu được tính toán dựa vào tiêu chuẩn sai số bình phương tối thiểu (LMS) như công thức (3.1).

Ban đầu, các trọng số của mô hình mạng nơ-ron tiến hóa thích nghi (AENM) được khởi tạo ngẫu nhiên. Sau đó, các trọng số của AENM được cập nhật tối ưu với bốn giá trị đầu ra (S , H , h , n) để cấp cho bộ tạo dáng (WPG), bộ WPG sẽ tạo ra 10 giá trị góc khớp cho bộ điều khiển đi bộ của robot hai chân. Tiêu chuẩn ZMP được chọn để đảm bảo độ ổn định cho robot hai chân bước đi, ZMP được tính toán từ AENM được so sánh với ZMP mong muốn. Sau đó, hàm mục tiêu được tính như trong phương trình (3.1). Phương trình (3.1) cho thấy, giá trị của hàm mục tiêu càng nhỏ thì mô hình AENM được đề xuất sẽ đạt được chính xác hơn.

3.4 Kết quả nhận dạng của bộ tạo dáng cho robot hai chân sử dụng mô hình AENM

Các kết quả so sánh thu được từ ba thuật toán được thử nghiệm, cụ thể là PSO, GA và MDE được đề xuất, sẽ được trình bày đầy đủ. Mỗi thuật toán ngẫu nhiên được áp dụng để huấn luyện AENM được thực hiện 10 lần với các trọng số ban đầu ngẫu nhiên khác nhau. Mỗi lần huấn luyện sẽ lặp 200 thế hệ cho mục đích so sánh.

Các tham số của ba thuật toán tối ưu hóa được tổng hợp trong Bảng 3.1. Các tham số c_1 , c_2 đại diện cho gia tốc và w đại diện cho quán tính của thuật toán tối ưu hóa PSO.

Trong trường hợp thuật toán GA, tham số CP tương ứng với xác suất lai ghép và giá trị MP tương ứng với xác suất đột biến.

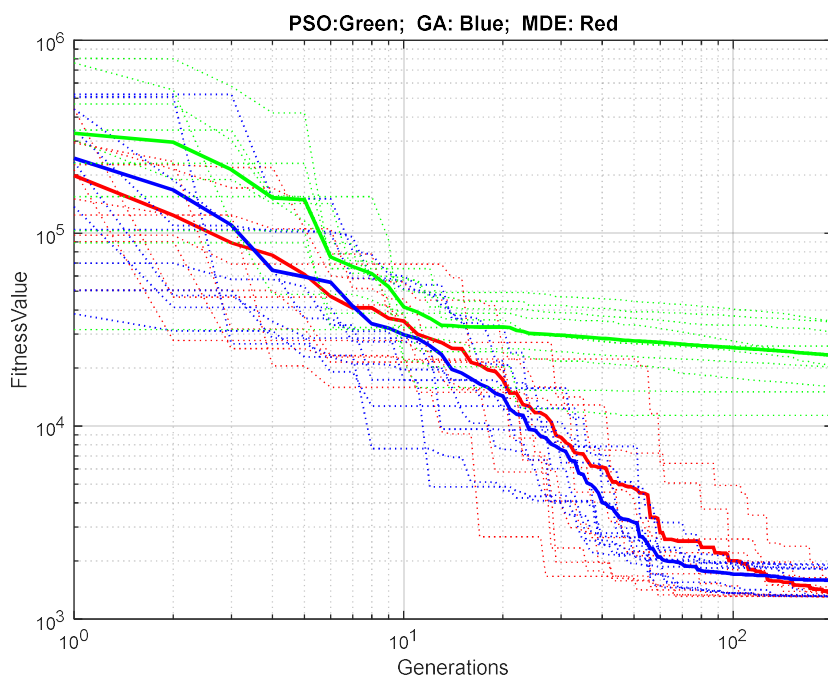
Bảng 3.1: Các tham số của các thuật toán GA, PSO, MDE

PSO		GA		MDE	
c_1	0.001	CP	0.9	F	Random [0.4; 1.0]
c_2	0.05	MP	0.01	CR	Random [0.7; 1.0]
w	0.8				

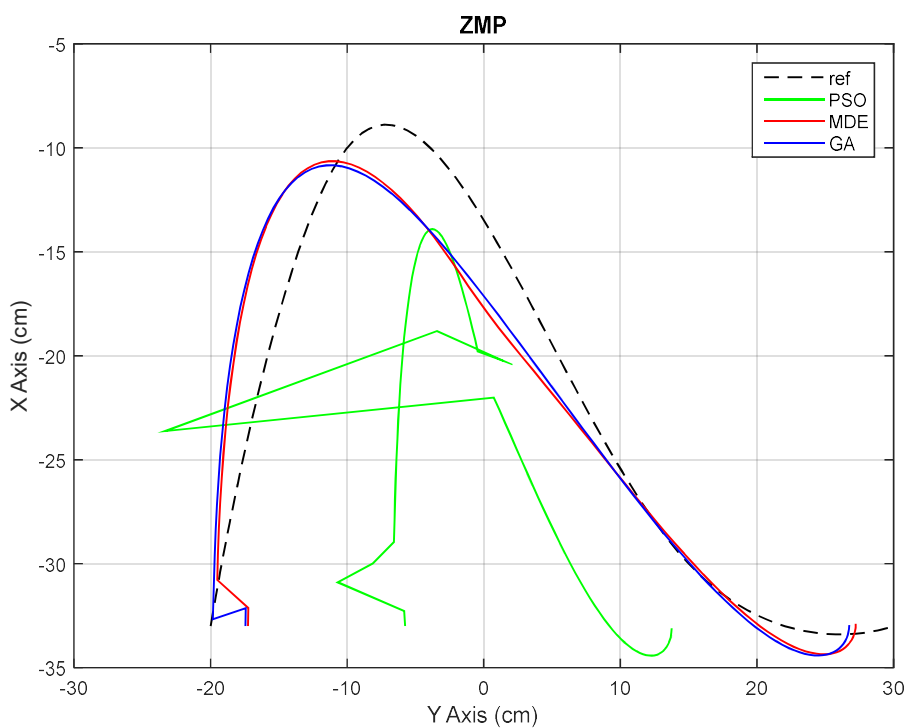
Quá trình nhận dạng được thực hiện bởi MATLAB phiên bản 2014b trên máy tính Intel Core i53210m với tốc độ 2,5GHz và 8,00 GB RAM.

Hình 3.6 trình bày kết quả so sánh về sự hội tụ của hàm mục tiêu tương ứng ba thuật toán được thử nghiệm, đó là PSO, GA và MDE được đề xuất trong hệ trục tọa độ logarit. Màu xanh lá cây đại diện cho sự hội tụ của hàm mục tiêu sử dụng thuật toán PSO, trong đó đường gạch ngang màu xanh lá cây là sự hội tụ của hàm mục tiêu trung bình được tính từ 10 đường chấm màu xanh lá cây. Tương tự, màu xanh lam đại diện cho sự hội tụ của hàm mục tiêu sử dụng thuật toán GA, trong đó, đường gạch ngang màu xanh lam là sự hội tụ của hàm mục tiêu trung bình được xác định từ 10 đường chấm màu xanh lam. Cuối cùng, màu đỏ đại diện cho sự hội tụ của hàm mục tiêu sử dụng thuật toán MDE được đề xuất, trong đó, đường gạch ngang màu đỏ là sự hội tụ của hàm mục tiêu trung bình được tính từ 10 đường chấm màu đỏ.

Trong Hình 3.5, kết quả so sánh về sự hội tụ của hàm mục tiêu cho thấy thuật toán PSO đã bị rơi vào nghiệm cục bộ nên không thể nhận dạng thành công AENM được đề xuất. Trong khi đó GA và MDE chứng minh thành công để có được nghiệm toàn cục. Đường màu xanh lam của sự hội tụ dựa trên GA và đường màu đỏ của sự hội tụ dựa trên MDE được đề xuất cho kết quả tốt hơn so với đường màu xanh lá cây. Hơn nữa, so sánh giữa GA và MDE được đề xuất, Hình 3.5 cho thấy sự hội tụ của hàm mục tiêu dựa trên MDE được đề xuất chứng minh tốt hơn thuật toán tối ưu hóa GA.



Hình 3.5: So sánh kết quả hội tụ của hàm mục tiêu



Hình 3.6: Kết quả so sánh giữa quỹ đạo ZMP của AENM và ZMP mong muốn

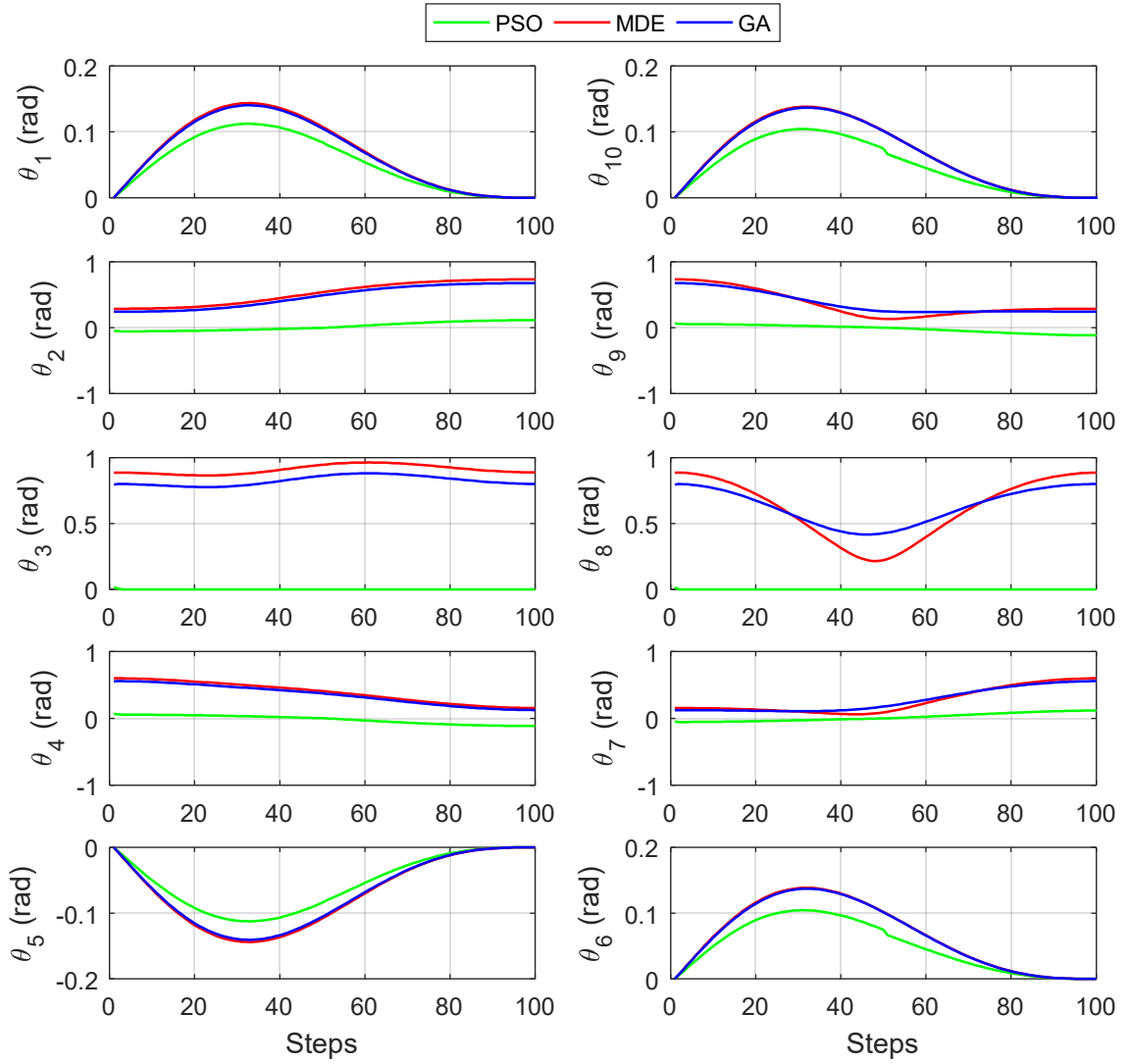
Trong hình Hình 3.6 cho thấy kết quả so sánh giữa đáp ứng quỹ đạo ZMP của AENM được đề xuất và ZMP mong muốn. Rõ ràng để thấy rằng kết quả màu xanh lam và màu đỏ đại diện cho đáp ứng quỹ đạo ZMP của mô hình AENM được đề xuất được huấn luyện với thuật toán GA và MDE, giống với ZMP mong muốn. Hơn nữa, rõ ràng là xác nhận rằng đường màu xanh lam và đường màu đỏ đi theo quỹ đạo ZMP đã định hướng tốt hơn đường màu xanh lá cây mà nó thể hiện đáp ứng ZMP của AENM được đề xuất sau khi được huấn luyện với PSO.

Bảng 3.2 cho thấy kết quả huấn luyện so sánh của PSO, GA và MDE. Dựa trên kết quả trung bình từ 10 lần chạy thử, giá trị của hàm mục tiêu MDE chứng minh tốt hơn GA khoảng 14,9% và nhanh hơn GA 3,8%. Sử dụng các kết quả so sánh được lập bảng trong Bảng 3.2, rõ ràng có thể kết luận rằng thuật toán MDE được đề xuất chứng minh khả năng tốt nhất và mạnh mẽ so với các thuật toán PSO và GA.

Bảng 3.2: So sánh kết quả huấn luyện

	PSO	GA	MDE
Min.	1.1381e+04	1.3099e+03	1.2987e+03
Avg.	2.3271e+04	1.5888e+03	1.3825e+03
Max.	3.5075e+04	1.9121e+03	1.6370e+03
Variance	0.7820e+04	0.2660e+03	0.1035e+3
Time to training (s)	1953.725	1957.348	1954.588
Time to computing objective function (s)	1952.085	1952.958	1952.898
Time to algorithm (s)	1.640	4.390	1.690

Hình 3.7 cho thấy kết quả so sánh về góc quay ở 10 khớp của robot hai chân. Từ Hình 3.7, chúng ta có thể nhận thấy rằng giá trị góc quay của 10 khớp được xác định sử dụng GA khá gần với MDE. Thực tế là sự khác biệt nhỏ này đã tạo ra một tác động đáng kể quyết định đến robot hai chân trong việc đi bộ ổn định và mạnh mẽ. Góc quay của θ_3 và θ_8 được xác định sử dụng GA có thay đổi lớn hơn so với MDE. Điều này đã khiến robot hai chân không chỉ đòi hỏi nhiều năng lượng hơn mà còn phải chịu sự kém ổn định hơn khi đi bộ so với kết quả được xác định dựa trên MDE.



Hình 3.7: So sánh về góc quay ở 10 khớp của robot dạng người

Các giá trị trọng số phù hợp nhất của AENM đề xuất được huấn luyện tối ưu bằng thuật toán MDE được trình bày trong Bảng 3.3. Bảng này cho thấy v_{ij} đại diện cho giá trị trọng số ngõ vào của lớp ẩn, trong đó i từ 1 đến số ngõ vào, j từ 1 đến số tế bào thần kinh trong lớp ẩn, tương ứng; b_n biểu thị mức ngưỡng của lớp ẩn; w_{ij} đại diện cho giá trị trọng số ngõ vào của lớp ra, trong đó i từ 1 đến số tế bào thần kinh trong lớp ẩn, j từ 1 đến số ngõ ra; b_o đại diện cho mức ngưỡng của lớp ra.

Bảng 3.3: Giá trị trọng số phù hợp nhất của mô hình AENM đã đề xuất

		<i>j</i>							
<i>i</i>		1	2	3	4	5	6	7	8
v_{ij}	1	12.357	-12.592	7.316	-1.301	14.576	14.081	9.858	-12.372
	2	-10.932	11.555	-14.233	13.448	12.560	-13.717	-14.167	10.584
	3	8.593	-14.095	-13.840	-8.439	7.623	11.937	-14.967	-4.733
	4	-10.692	14.587	-11.068	12.779	12.470	-14.829	-6.672	13.275
b_h		-7.986	14.325	9.737	9.043	12.851	-6.384	-12.212	-4.584
w_{ij}	1	14.497	7.569	-14.988	-11.953				
	2	-14.578	0.796	6.210	-7.751				
	3	14.825	14.379	-11.735	14.034				
	4	-10.463	-5.919	-13.455	-12.909				
	5	12.908	-7.553	-13.485	-3.129				
	6	6.659	-10.645	5.226	13.069				
	7	14.256	-9.189	13.337	9.730				
	8	-14.956	13.174	13.249	-6.786				
b_o		6.733	-12.324	12.967	-14.716				

3.5 Kết luận

Chương này đề xuất một bộ tạo dáng đi bộ mới được áp dụng cho một robot dạng người kích thước cỡ nhỏ, được nhận dạng tối ưu bằng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE), cụ thể là mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM). Thông qua mô phỏng động lực học của robot hai chân đi bộ ổn định kết hợp giữa động học ngược và nguyên lý ZMP, kết quả chứng minh rằng ứng dụng mới có được hiệu suất cao cho bộ tạo dáng đi cho robot hai chân mạnh mẽ và chính xác. AENM được đề xuất thực hiện khả năng dự đoán tốt để robot hai chân bước đi tự nhiên. Thông qua thuật toán MDE được sử dụng như một vai trò tìm kiếm, nó không đòi hỏi các điều kiện ban đầu cụ thể, dễ dàng tránh được cực tiểu cục bộ và nhanh chóng hội tụ đến nghiệm tối ưu toàn cục.

Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [3], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

Bộ tạo dáng (WPG) phụ thuộc 4 thông số (S, H, h, n) của Dip được đề xuất chỉ áp dụng cho robot hai chân trong giai đoạn bước đi và thiếu giai đoạn chuẩn bị và giai đoạn kết thúc. Để bổ sung, trong chương tiếp theo nghiên cứu sinh tiếp tục hoàn thiện bộ tạo dáng đi (WPG) của Dip với đầy đủ 3 giai đoạn như mong muốn với tên gọi là bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (N-WPG).

CHƯƠNG 4 HOẠCH ĐỊNH DÁNG ĐI TỰ NHIÊN CHO ROBOT HAI CHÂN

4.1 Giới thiệu

Robot dạng người là những robot thông minh được thiết kế có hình dạng và bước đi giống con người (*hay Biped Robot*). Biped robot khó điều khiển nhưng khả năng di chuyển tốt ở những địa hình phức tạp [139]. Trong quá trình vận hành robot dạng người, hai vấn đề quan trọng phải được giải quyết, đó là đi bộ ổn định và dáng đi đáp ứng thời gian thực. ZMP (Zero-Moment-Point) được giới thiệu lần đầu bởi Vukobratovic ngày càng được áp dụng cho việc điều khiển đi bộ ổn định của robot dạng người [5].

Robot dạng người đã được các nhà khoa học tại các trường đại học và công ty nghiên cứu rộng rãi trong nhiều năm. Mục đích là để liên tục cải thiện tính di động ổn định và trí thông minh của robot và làm cho chúng hữu ích trong cuộc sống. Loại robot này có thể thực hiện các công việc nặng nhọc hoặc nguy hiểm đối với con người. Cho đến nay, bốn rô-bốt điển hình tiên tiến được trình bày trên toàn thế giới: ASIMO, HRP-4, PETMAN - Atlas Robot tại Boston Dynamics [140] và Robonaut - Valkyrie tại NASA [141].

Đối với tính di động, nhiều vấn đề liên quan như tiêu chí ổn định [117], [142]. Một số nhà nghiên cứu [53], [108], [7], [143] đề xuất các thuật toán để tạo quỹ đạo cần thiết để thỏa tiêu chí ZMP. Hạn chế của các phương pháp này là một số quỹ đạo ZMP cần thiết dường như không thể đạt được và tốc độ di chuyển ở hông được yêu cầu rất đáng kể.

Tiêu chí ZMP là biện pháp ổn định được sử dụng rộng rãi nhất và được sử dụng rộng rãi cho robot dạng người. Để đảm bảo sự ổn định động của robot này, Takanishi et al. đã đề xuất phương pháp tổng hợp mô hình đi bộ dựa trên điểm ZMP luôn nằm trong vùng tiếp xúc giữa bàn chân và bề mặt [53]. Về cơ bản, đầu tiên thiết kế quỹ đạo ZMP mong muốn, sau đó thực hiện chuyển động hông hoặc chuyển động thân trên để

biped robot đạt được quỹ đạo ZMP đó. Nhưng khả năng chuyển động cơ thể bị giới hạn nên không phải tất cả các quỹ đạo ZMP mong muốn đều có thể đạt được. Ngoài ra, gia tốc hông cũng cần phải thay đổi rất lớn để đạt được một quỹ đạo ZMP yêu cầu.

Shih trình bày một phương pháp để tạo ra quỹ đạo chân bằng phép nội suy spline bậc 3 [144]. Và khi ràng buộc về độ ổn định và điều kiện tương tác với mặt đất được thỏa mãn, cần phải lựa chọn một dáng đi bộ mềm mại, mô men và tốc độ cho tất cả các khớp phải nhỏ. Huang et al. [46] đề xuất một phương pháp mới, trong đó các ràng buộc của quỹ đạo chân và hông được xây dựng và các quỹ đạo này được tạo ra bởi việc nội suy spline bậc 3 với độ ổn định cao bằng phương pháp lặp lại trong việc tính toán ZMP. Dip và đồng nghiệp [52] thực hiện dáng đi ổn định với vận tốc không đổi bằng cách sử dụng bộ phát dạng hàm sin. Erbatour et al. [50] đã đề xuất một phương pháp mới để có được dáng đi tự nhiên bằng cách sử dụng kỹ thuật xấp xỉ chuỗi Fourier khi giải phương trình động lực LIPM. Ho và đồng nghiệp [145] đề xuất một bộ tạo mẫu đi bộ (WPG) dựa trên lý thuyết mô hình con lắc ngược tuyến tính (LIPM), cho phép người dùng tạo ra một mẫu đi bộ (WP) tự nhiên với chiều dài bước mong muốn.

Tuy nhiên, trong quá trình robot dạng người bước đi phải có đầy đủ 3 giai đoạn: giai đoạn chuẩn bị, giai đoạn bước đi và giai đoạn kết thúc [148]. Các tác giả trong [144, 46, 52] chỉ đề xuất bộ tạo mẫu đi bộ (WPG) cho robot dạng người trong giai đoạn bước đi.

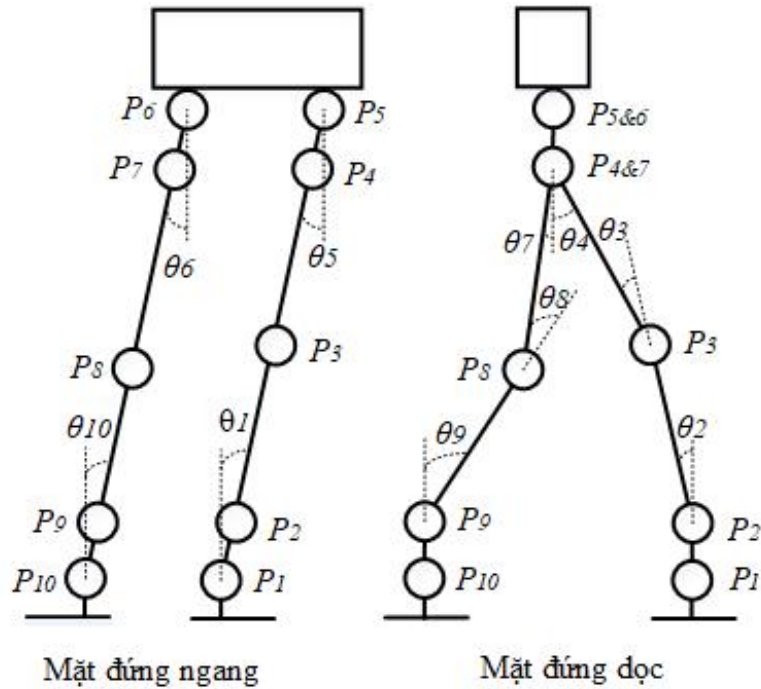
Trong chương này, bộ tạo mẫu đi bộ phụ thuộc vào 4 tham số dáng đi với đầy đủ các bước (Nature Walking Pattern Generation, n-WPG) được đề xuất, n-WPG bao gồm bộ phát hai quỹ đạo của chân và quỹ đạo của hông kết hợp với động học ngược.

Cấu trúc của chương này như sau: mục 4.2 đề xuất phương pháp tạo mẫu đi bộ cho robot hai chân, mục 4.3 trình bày bước đi của robot hai chân dựa trên nguyên lý ZMP, mục 4.4 khảo sát ảnh hưởng 4 tham số dáng đi của bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (n-WPG) đến quỹ đạo ZMP, mục 4.5 trình bày kết luận.

4.2 Bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên (N-WPG) cho robot hai chân

4.2.1 Mô hình robot hai chân

Để xây dựng một quá trình bước đi cho robot hai chân, ta xét mô hình robot hai chân có 10 khớp ở hai chân như Hình 4.1. Bỏ qua ảnh hưởng của phần thân trên của robot hai chân, xác định 10 góc khớp để tạo ra sự chuyển động bước đi. Vị trí của các khớp ($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$) và 10 góc quay tương đối ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}$) cũng được định nghĩa như trong Hình 4.1.



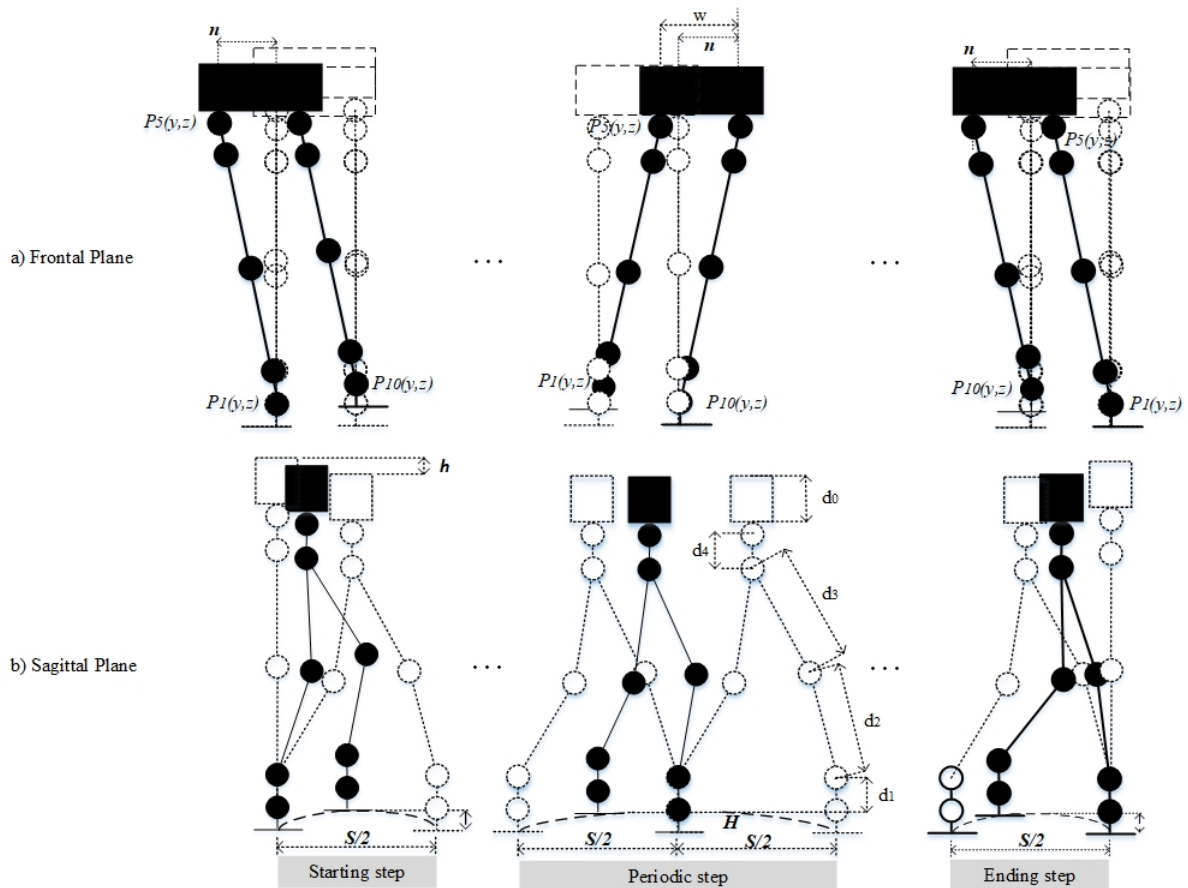
Hình 4.1: Mô hình kết cấu robot hai chân HUBOT-4.

4.2.2 Chu kỳ bước đi

Như chỉ ra trong Hình 4.2, quá trình robot hai chân bước đi tự nhiên có đầy đủ 3 giai đoạn: *Giai đoạn chuẩn bị* liên quan đến robot hai chân bắt đầu chuyển tư thế, từ tư thế 2 chân đứng thẳng sang tư thế 2 chân khuya gối và so le nhau. *Giai đoạn bước đi* liên quan đến robot hai chân thực hiện bước đi đều về phía trước với chân trụ và chân đi chuyển được thay đổi liên tục cho nhau (tuy nhiên trong hình 2 chỉ minh họa 1 bước

đi trong *giai đoạn bước đi*). *Giai đoạn kết thúc* liên quan đến robot hai chân chuyển từ thế 2 chân khuya gối và so le nhau sang thế 2 chân đứng thẳng.

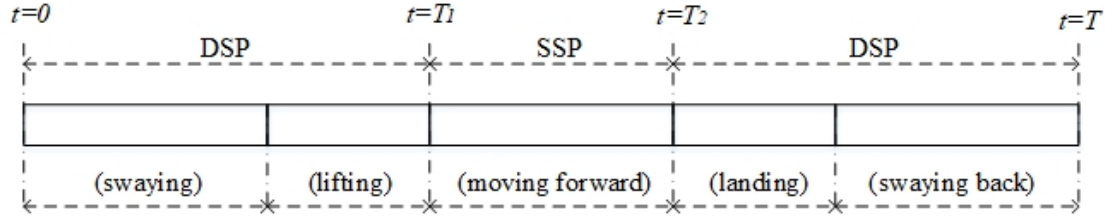
Thời gian trong mỗi bước đi ($0 - T$) ở 3 giai đoạn đều chia thành 3 khoảng thời gian. Khoảng thời gian đầu tiên ($0 - T_1$) là pha đôi (DSP – Double Support Phase), robot hai chân lắc hông về phía chân trụ. Khoảng thời gian thứ hai ($T_1 - T_2$) là pha đơn (SSP – Single Support Phase), robot hai chân nhấc chân đi chuyển về phía trước và hạ chân xuống. Khoảng thời gian thứ ba ($T_2 - 0$) là pha đôi (DSP – Double Support Phase), robot hai chân lắc hông ngược lại. Khoảng thời gian trong một bước đi được minh họa trong Hình 4.3.



Hình 4.2: Quá trình robot hai chân bước đi tự nhiên có đầy đủ 3 giai đoạn.

Mỗi dáng đi của robot hai chân phụ thuộc vào bộ tham số: S – chiều dài bước, h – độ khuya chân, H – độ nhấc chân, n – độ lắc hông, T – chu kỳ bước như Hình 4.2.

Vận động của robot hai chân được thực hiện bằng cách dựa vào những hàm phụ thuộc thời gian của 3 vị trí tham chiếu: $P_5=[P_{5x}, P_{5y}, P_{5z}]$ của hông, $P_1=[P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}]$ và $P_{10}=[P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]$ của bàn chân trái và phải.



Hình 4.3: Khoảng thời gian trong 1 bước

4.2.3 Quỹ đạo tham chiếu của hai bàn chân và hông

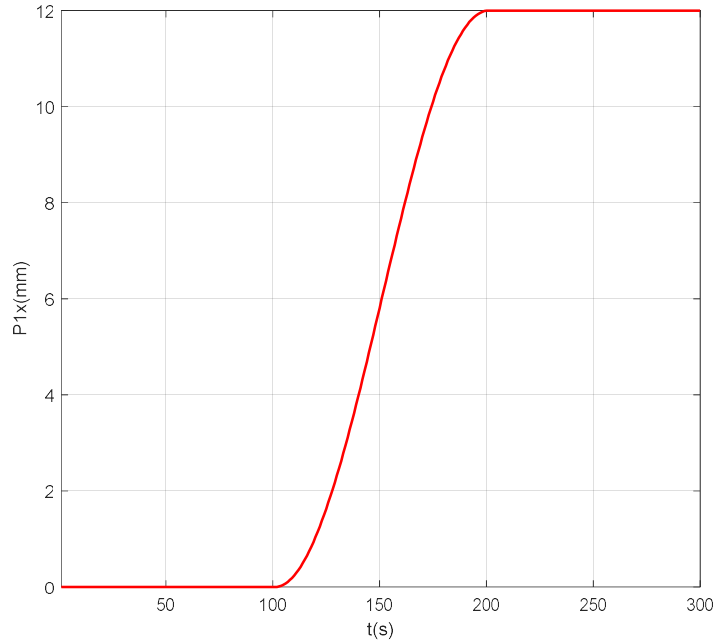
4.2.3.1 Quỹ đạo tham chiếu của chân phải

Quỹ đạo mong muốn của P_{1x} như mô tả trong công thức (4.1).

$$P_{1x}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < T + 3\tau \\ \frac{S}{2\tau}t - \frac{S}{2\tau}(T + 3\tau) & , T + 3\tau \leq t < T + 5\tau \\ S & , T + 5\tau \leq t \leq 3T \end{cases} \quad (4.1)$$

Tại thời điểm $T + 3\tau$ và $T + 5\tau$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.4. Phương trình cuối cùng cho P_{1x} như công thức (4.2).

$$P_{1x}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < T \\ \frac{S}{2} \left(1 - \sin \left(\frac{w}{2}t - \frac{\pi}{2} \right) \right) & , T \leq t \leq 2T \\ S & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.2)$$



Hình 4.4: Quỹ đạo tham chiếu của P_{1x}

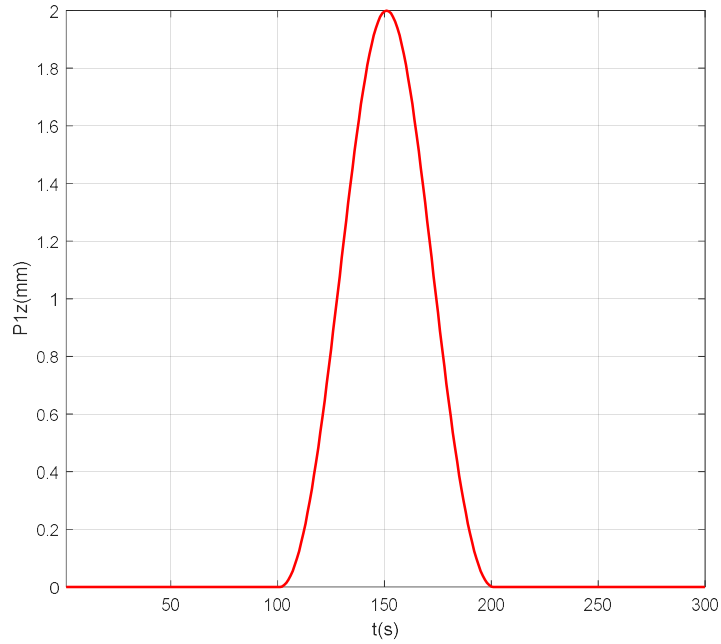
Quỹ đạo mong muốn của P_{1y} như mô tả trong công thức (4.3).

$$P_{1y}(t) = 0 \quad , \quad 0 \leq t \leq 3T \quad (4.3)$$

Quỹ đạo mong muốn của P_{1z} như mô tả trong công thức (4.4).

$$P_{1z}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < T + 2\tau \\ \frac{H}{\tau}t - H\left(\frac{T}{\tau} + 2\right) & , T + 2\tau \leq t < T + 3\tau \\ H & , T + 3\tau \leq t < T + 5\tau \\ -\frac{H}{\tau}t + H\left(\frac{T}{\tau} + 6\right) & , T + 5\tau \leq t < T + 6\tau \\ 0 & , T + 6\tau \leq t \leq 3T \end{cases} \quad (4.4)$$

Tại thời điểm $T + 2\tau$, $T + 3\tau$, $T + 5\tau$ và $T + 6\tau$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.5. Phương trình cuối cùng cho P_{1z} như công thức (4.5).



Hình 4.5: Quỹ đạo mong muốn của P_{1z}

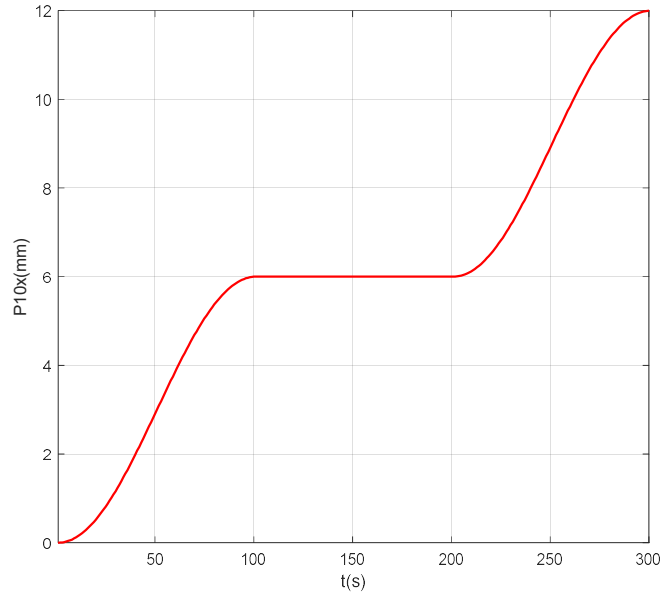
$$P_{1z}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < T \\ H \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{\pi}{2}\right) + 1\right)\right) & , T \leq t \leq 2T \\ 0 & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.5)$$

4.2.3.2 Quỹ đạo tham chiếu của chân trái

Quỹ đạo mong muốn của P_{10x} như mô tả trong công thức (4.6).

$$P_{10x}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < 3\tau \\ \frac{S}{3\tau}t - \frac{3}{4}S & , 3\tau \leq t < 5\tau \\ \frac{S}{2} & , 5\tau \leq t < 2T + 3\tau \\ \frac{S}{4\tau}t - \frac{S}{2}\left(\frac{1}{2} + \frac{T}{\tau}\right) & , 2T + 3\tau \leq t < 2T + 5\tau \\ S & , 2T + 5\tau \leq t \leq 3T \end{cases} \quad (4.6)$$

Tại thời điểm $3T$, $5T$, $2T+3T$ và $2T+5T$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.6. Phương trình cuối cùng cho P_{10x} như công thức (4.7).



Hình 4.6: Quỹ đạo tham chiếu của P_{10x}

$$P_{10x}(t) = \begin{cases} \frac{S}{4} \left(1 + \sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{\pi}{2}\right) \right) & , 0 \leq t < T \\ \frac{S}{2} & , T \leq t \leq 2T \\ \frac{S}{4} \left(3 + \sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{5\pi}{2}\right) \right) & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.7)$$

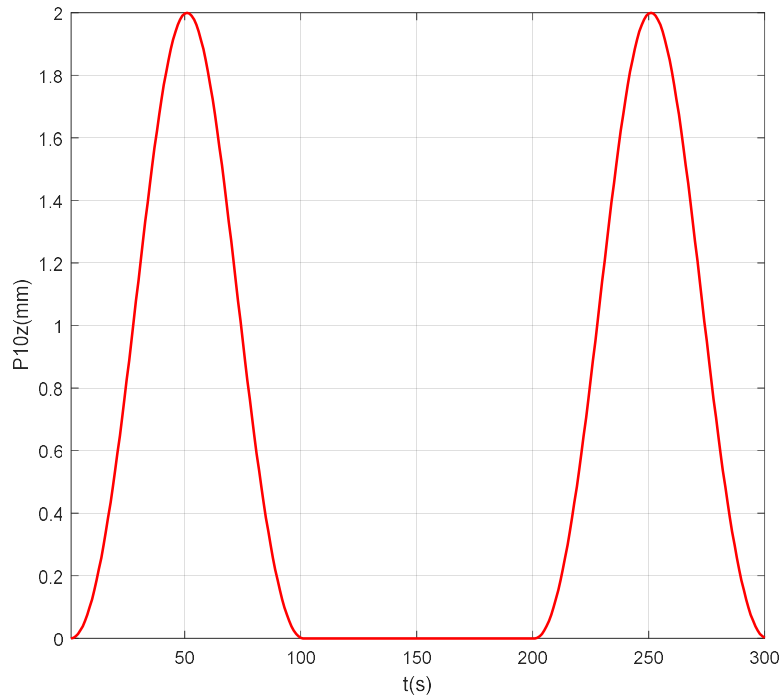
Quỹ đạo mong muốn của P_{10y} như mô tả trong công thức (4.8).

$$P_{10y}(t) = -w \quad , 0 \leq t \leq 3T \quad (4.8)$$

Quỹ đạo mong muốn của P_{10z} như mô tả trong công thức (4.9).

$$P_{10z}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < 2\tau \\ \frac{H}{\tau}t - 2H & , 2\tau \leq t < 3\tau \\ H & , 3\tau \leq t < 5\tau \\ -\frac{H}{\tau}t - 6H & , 5\tau \leq t < 6\tau \\ 0 & , 6\tau \leq t < 2T + 2\tau \\ \frac{H}{\tau}t - 2H\left(\frac{T}{\tau} + 1\right) & , 2T + 2\tau \leq t < 2T + 3\tau \\ H & , 2T + 3\tau \leq t < 2T + 5\tau \\ -\frac{H}{\tau}t + 2H\left(\frac{T}{\tau} + 3\right) & , 2T + 5\tau \leq t < 2T + 6\tau \\ 0 & , 2T + 6\tau \leq t \leq 3T \end{cases} \quad (4.9)$$

Tại thời điểm 2τ , 3τ , 5τ , 6τ , $2T + 2\tau$, $2T + 3\tau$, $2T + 5\tau$ và $2T + 6\tau$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.7. Phương trình cuối cùng cho P_{1z} như công thức (4.10).



Hình 4.7: Quỹ đạo mong muốn của P_{10z}

$$P_{10z}(t) = \begin{cases} H \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{\pi}{2}\right) + 1\right)\right) & , 0 \leq t < T \\ 0 & , T \leq t \leq 2T \\ H \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{5\pi}{2}\right) + 1\right)\right) & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.10)$$

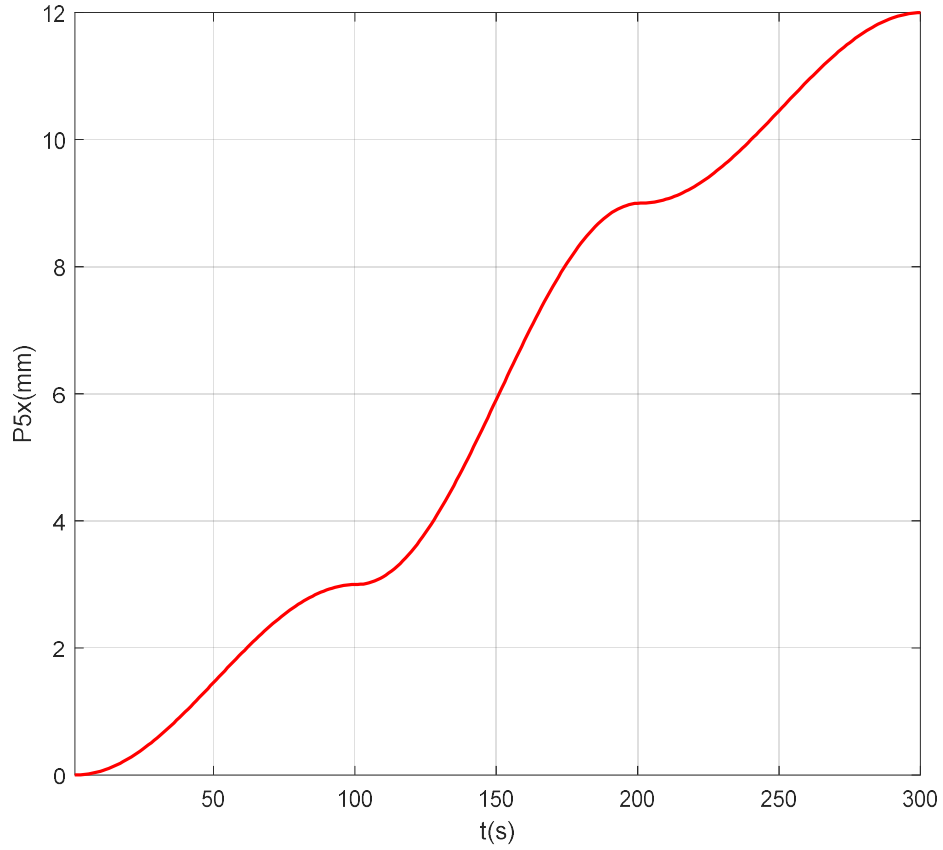
4.2.3.3 Quỹ đạo tham chiếu của hông

Quỹ đạo mong muốn của P_{5x} như mô tả trong công thức (4.11).

$$P_{5x}(t) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq t < 3\tau \\ \frac{S}{8\tau}t - \frac{3}{8}S & , 3\tau \leq t < 5\tau \\ \frac{S}{4} & , 5\tau \leq t < T + 3\tau \\ \frac{S}{4\tau}t - \frac{S}{2}\left(1 + \frac{T}{2\tau}\right) & , T + 3\tau \leq t < T + 5\tau \\ \frac{3S}{4} & , T + 5\tau \leq t < 2T + 3\tau \\ \frac{S}{8\tau}t + \frac{S}{4}\left(\frac{3}{2} - \frac{T}{\tau}\right) & , 2T + 3\tau \leq t < 2T + 5\tau \\ S & , 2T + 5\tau \leq t \leq 3T \end{cases} \quad (4.11)$$

Tại thời điểm 3τ , 5τ , $T + 3\tau$, $T + 5\tau$, $2T + 3\tau$ và $2T + 5\tau$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.8. Phương trình cuối cùng cho P_{5x} như công thức (4.12).

$$P_{5x}(t) = \begin{cases} \frac{S}{8} \left(1 + \sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{\pi}{2}\right)\right) & , 0 \leq t < T \\ \frac{S}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{3\pi}{2}\right)\right] & , T \leq t \leq 2T \\ \frac{S}{8} \left(7 + \sin\left(\frac{w}{2}t - \frac{5\pi}{2}\right)\right) & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.12)$$



Hình 4.8: Quỹ đạo tham chiếu của P_{5x}

Quỹ đạo mong muốn của P_{5y} như mô tả trong công thức (4.13).

$$P_{5y}(t) = \begin{cases} \frac{n}{2\tau}t & , 0 \leq t < 2\tau \\ n & , 2\tau \leq t < 6\tau \\ \frac{2n}{(4\tau - T)}t + n \left(1 - \frac{12\tau}{(4\tau - T)} \right) & , 2\tau \leq t < T + 2\tau \\ -n & , T + 2\tau \leq t < T + 6\tau \\ -\frac{2n}{(4\tau - T)}t + n \left(1 + \frac{4(T + \tau)}{(4\tau - T)} \right) & , T + 6\tau \leq t < 2T + 2\tau \\ n & , 2T + 2\tau \leq t < 2T + 6\tau \\ \frac{n}{(6\tau - T)}t - \frac{3nT}{(6\tau - T)} & , 2T + 6\tau \leq t \leq 3T \end{cases} \quad (4.13)$$

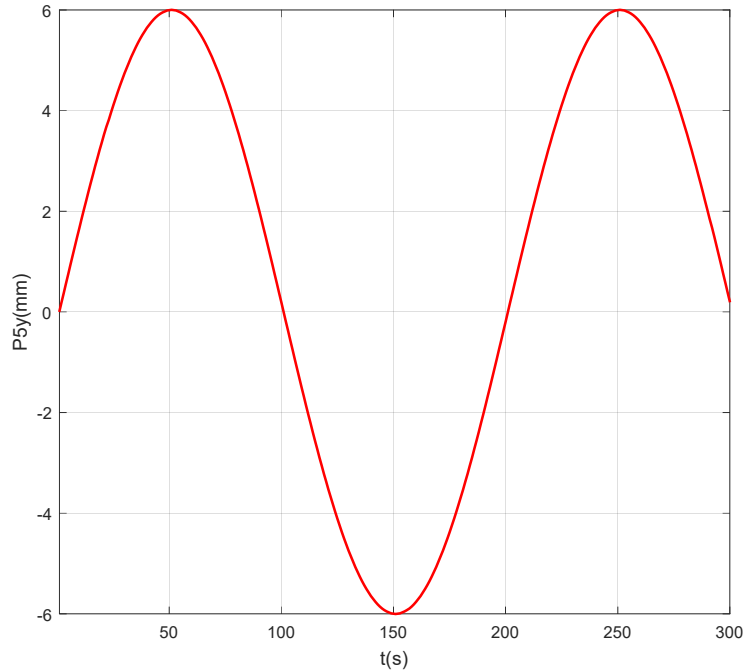
Tại thời điểm 2τ , 6τ , $T+2\tau$, $T+6\tau$, $2T+2\tau$ và $2T+6\tau$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.9. Phương trình cuối cùng cho P_{5y} như công thức (4.14).

$$P_{5y}(t) = \begin{cases} P_{5y_first_half_cycle}(t) \cdot [u(t) - u(t-T)] \\ \quad - P_{5y_first_half_cycle}(t) \cdot [u(t-2T) - u(t-T)] & , 0 \leq t < T \\ -P_{5y_first_half_cycle}(t_1) \cdot [u(t_1) - u(t_1-T)] \\ \quad + P_{5y_first_half_cycle}(t_1) \cdot [u(t_1-2T) - u(t_1-T)] & -w, t_1 = t-T \text{ and } T \leq t \leq 2T \\ P_{5y_first_half_cycle}(t_2) \cdot [u(t_2) - u(t_2-T)] \\ \quad - P_{5y_first_half_cycle}(t_2) \cdot [u(t_2-2T) - u(t_2-T)] & , t_2 = t-2T \text{ and } 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.14)$$

trong đó :

$$P_{5y_first_half_cycle}(t) = n \sin\left(\frac{\pi}{T}\tau\right) \cdot \left[u(\tau) - u\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right] + n \cos\left(\frac{\pi}{T}\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right) \cdot \left[u\left(\tau - \frac{T}{2}\right) - u(\tau - T)\right]$$

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



Hình 4.9: Quỹ đạo tham chiếu của P_{5y}

Quỹ đạo mong muốn của P_{5z} như mô tả trong công thức (4.15).

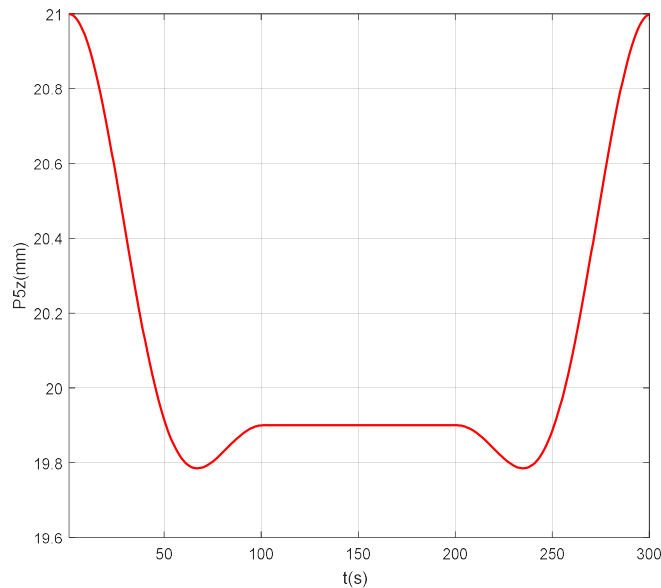
$$P_{5z}(t) = \begin{cases} -\frac{h}{T}t + l & , 0 \leq t \leq T \\ l - h & , T < t \leq 2T \\ \frac{h}{T}t + l - 3h & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.15)$$

trong đó: $l = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$.

Tại thời điểm T và $2T$ thì robot hai chân sẽ bị dừng đột ngột và giật mạnh. Để giải quyết vấn đề, hàm sin được sử dụng để thay thế như Hình 4.10. Phương trình cuối cùng cho P_{5z} như công thức (4.16).

$$P_{5z}(t) = \begin{cases} k_1 + h \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sin\left(\frac{w}{4}t + 1\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{w}{2}t + \frac{\pi}{2}\right) & , 0 \leq t < T \\ k_1 & , T \leq t \leq 2T \\ k_1 + h \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sin\left(\frac{w}{4}(3T - t) + 1\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{w}{2}(3T - t) + \frac{\pi}{2}\right) & , 2T < t \leq 3T \end{cases} \quad (4.16)$$

trong đó: $k_1 = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 - h$.



Hình 4.10: Quỹ đạo mong muốn của P_{5z}

4.2.4 Phân tích động học ngược robot hai chân

Cuối cùng, quỹ đạo của 10 góc quay ở 2 chân robot hai chân trong 1 quá trình 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 $P_{10} = [P_{10x}, P_{10y}, P_{10z}]$.

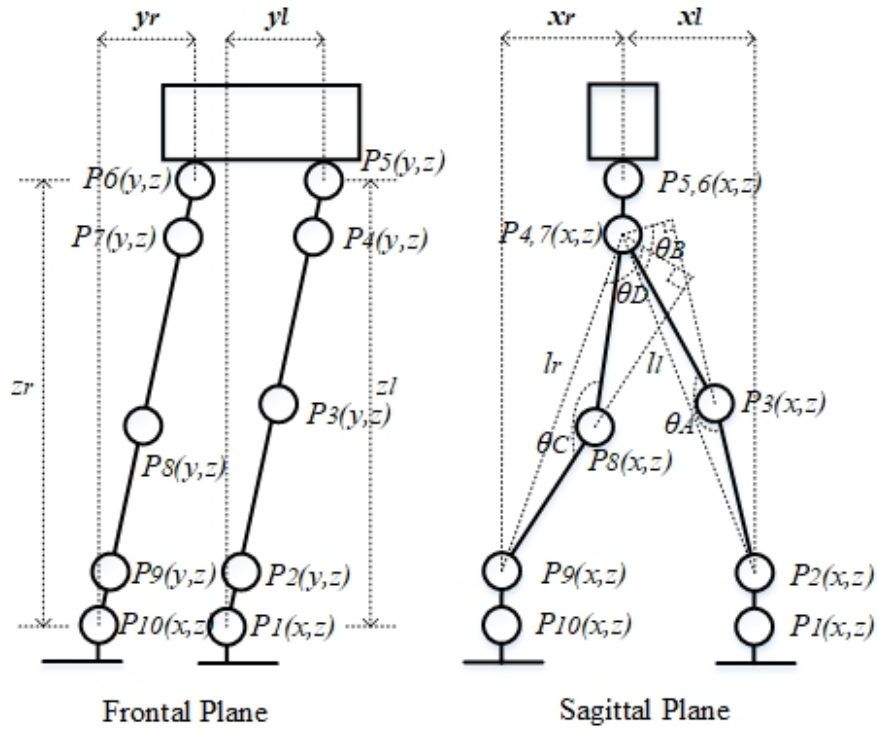
Bài toán động học ngược robot hai chân có thể được giải bằng phương pháp giải tích hoặc phương pháp số hoặc phương pháp hình học. 10 góc khớp quay ở 2 chân của robot dạng người được xác định như công thức (4.17).

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1(t) = \arctan\left(\frac{y_l(t)}{z_l(t)}\right), \quad \theta_5(t) = -\theta_1(t), \\ \theta_{10}(t) = \arctan\left(\frac{y_r(t)}{z_r(t)}\right), \quad \theta_6(t) = -\theta_{10}(t), \\ \theta_3(t) = \pi - \theta_A(t), \quad \theta_8(t) = \pi - \theta_C(t), \\ \theta_4(t) = \frac{\pi}{2} - \theta_A(t) + \theta_B(t) - \arcsin\left(\frac{x_l(t)}{l_l(t)}\right), \\ \theta_7(t) = \frac{\pi}{2} - \theta_C(t) + \theta_D(t) - \arcsin\left(\frac{x_r(t)}{l_r(t)}\right), \\ \theta_2(t) = \theta_3(t) - \theta_4(t), \quad \theta_{11}(t) = \theta_9(t) - \theta_7(t) \end{array} \right. \quad (4.17)$$

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 Hình 4.11 và công thức (4.18). Lưu ý, l_l là khoảng cách giữa P_2 và P_4 , l_r là khoảng cách giữa P_9 và P_7 .

$$\left\{ \begin{array}{l} x_l = P_{5x} - P_{1x}, \quad y_l = P_{5y} - P_{1y}, \quad z_l = P_{5z} - P_{1z}, \\ l_l = \sqrt{(P_{4x} - P_{2x})^2 + (P_{4y} - P_{2y})^2 + (P_{4z} - P_{2z})^2}, \\ x_r = P_{6x} - P_{10x}, \quad y_r = P_{6y} - P_{10y}, \quad z_r = P_{6z} - P_{10z}, \\ l_r = \sqrt{(P_{7x} - P_{9x})^2 + (P_{7y} - P_{9y})^2 + (P_{7z} - P_{9z})^2} \\ \theta_A = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_l^2}{2d_2d_3}\right), \quad \theta_B = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_A)}{l_l}\right), \\ \theta_C = \arccos\left(\frac{d_2^2 + d_3^2 - l_r^2}{2d_2d_3}\right), \quad \theta_D = \arccos\left(\frac{d_3 \sin(\theta_C)}{l_l}\right). \end{array} \right. \quad (4.18)$$

trong đó: d_1, d_2, d_3 và d_4 được minh họa trong Hình 4.2.



Hình 4.11: Định nghĩa các biến trong công thức (4.18)

Tọa độ $P_6(x, y, z)$ được tính dựa vào $P_5(x, y, z)$, còn tọa 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 (4.19) dưới đây được sử dụng để tính P_2, P_4, P_6, P_7, P_9 .

$$\begin{cases} P_{2x} = P_{1x}, & P_{2z} = d_1 \cos(\theta_1), & P_{2y} = P_{2z} \sin(\theta_1), \\ P_{4x} = P_{5x}, & P_{4z} = P_{5z} - d_4 \cos(\theta_1), & P_{4y} = P_{5y} - (P_{5z} - P_{4z}) \sin(\theta_1), \\ P_{6x} = P_{5x}, & P_{6y} = P_{5y} - w, & P_{6z} = P_{5z}, \\ P_{7x} = P_{6x}, & P_{7z} = P_{6z} - d_4 \cos(\theta_{10}), & P_{7y} = P_{6y} - (P_{6z} - P_{7z}) \sin(\theta_{10}), \\ P_{9x} = P_{10x}, & P_{9z} = P_{10z} + d_4 \cos(\theta_{10}), & P_{9y} = P_{10y} + (P_{9z} - P_{10z}) \sin(\theta_{10}). \end{cases} \quad (4.19)$$

Dựa vào các công thức (4.17-4.18-4.19), 10 quỹ đạo góc quay ở hai chân của robot hai chân trong 1 quá trình bước đi được sử dụng để điều khiển bước đi.

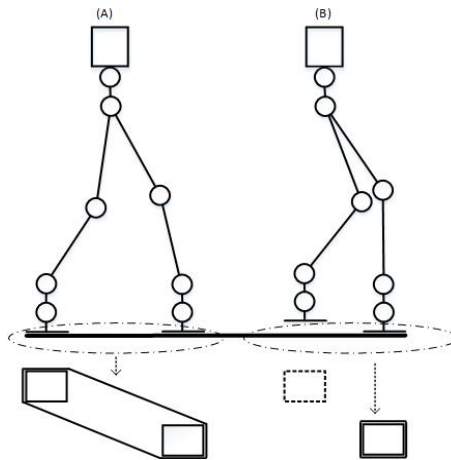
4.3 Vận động của robot hai chân dựa trên nguyên lý ZMP

Mục tiêu điều khiển robot hai chân là nhằm đạt dáng đi tự nhiên ổn định. Muốn thế, điểm ZMP luôn nằm bên trong diện tích của vùng chân trụ [103]. Khi hai chân chạm đất thì diện tích vùng chân trụ là diện tích bao quanh của 2 bàn chân của robot hai chân, 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 Hình 4.12. Nếu ZMP nằm trong vùng diện tích vùng chân trụ thì robot hai chân không bị ngã [107].

Điểm ZMP có thể được tính như công thức 4.20 [46]:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{cases} \quad (4.20)$$

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.



Hình 4.12: Diện tích vùng chân trụ trong 2 trường hợp:

(A) 2 chân chạm đất, (B) 1 chân chạm đất.

Đối với robot hai chân kích thước nhỏ, 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 (4.21) [108]:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = x_{COM} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i \ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_{ZMP} = y_{COM} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i \ddot{z}_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (4.21)$$

Trong công thức 4.21, phân bố khối lượng m_i và tọa độ (x_i, y_i, z_i) của các khâu được định nghĩa như trong Hình 4.13, tọa độ của khối tâm (COM) được tính thông qua công thức (4.22), các thành phần gia tốc sử dụng phép tính sắp xỉ như công thức (4.23).

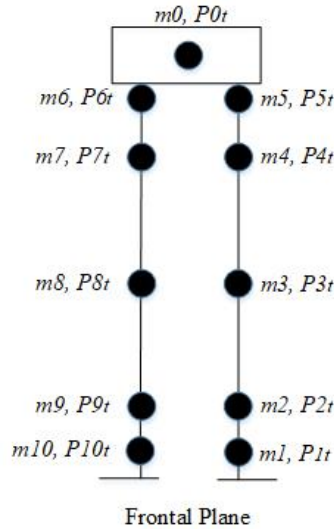
$$\begin{cases} x_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ z_{COM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}; \ddot{x}_i = \frac{\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i}{\Delta t} \\ \dot{y}_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t}; \ddot{y}_{i+1} = \frac{\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i}{\Delta t} \\ \dot{z}_{i+1} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta t}; \ddot{z}_{i+1} = \frac{\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i}{\Delta t} \end{cases} \quad (4.23)$$

Tọa độ $P_i(x, y, z)$ 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 (4.24 - 4.25 - 4.26):

$$\left\{ \begin{array}{l}
P_{1xt}(t) = 0, P_{1yt}(t) = 0, P_{1zt}(t) = 0, \\
P_{2xt}(t) = P_{1xt}(t), P_{2yt}(t) = d_1 \cos[\theta_1(t)], P_{2zt}(t) = P_{2xt}(t) \sin[\theta_1(t)], \\
P_{3xt}(t) = d_2 \sin[\theta_2(t)], P_{3yt}(t) = P_{3xt}(t) \sin[\theta_1(t)], \\
P_{3zt}(t) = P_{2zt}(t) + d_2 \cos[\theta_2(t)] \cos[\theta_1(t)], \\
P_{4xt}(t) = P_{3xt}(t) + d_3 \sin[\theta_2(t) - \theta_3(t)], \\
P_{4yt}(t) = P_{3yt}(t) \sin[\theta_1(t)], \\
P_{4zt}(t) = P_{3zt}(t) + d_3 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t)] \cos[\theta_1(t)], \\
P_{5xt}(t) = P_{4xt}(t) + d_4 \sin[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)], \\
P_{5yt}(t) = P_{4yt}(t) \sin[\theta_1(t)], \\
P_{5zt}(t) = P_{4zt}(t) + d_4 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)] \cos[\theta_1(t)].
\end{array} \right. \quad (4.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
P_{0xt}(t) = \frac{P_{5xt}(t) + P_{6xt}(t)}{2}, \\
P_{1yt}(t) = \frac{P_{5yt}(t) + P_{6yt}(t)}{2}, \\
P_{0zt}(t) = P_{5zt}(t) + \frac{d_0}{2}.
\end{array} \right. \quad (4.25)$$

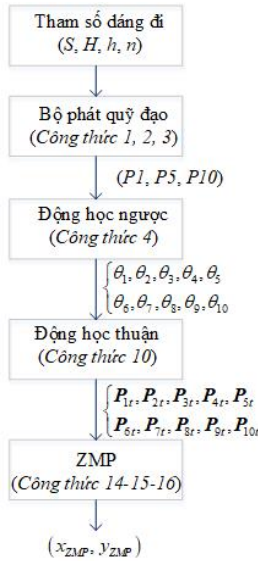


Hình 4.13: Phân bố khối lượng và tọa độ của các khâu

$$\left\{ \begin{array}{l}
P_{5zt}(t) = P_{4zt}(t) + d_4 \cos[\theta_2(t) - \theta_3(t) + \theta_5(t)] \cos[\theta_1(t)], \\
P_{6zt}(t) = P_{5zt}(t), P_{6yt}(t) = P_{5yt}(t) - w, P_{6zt}(t) = P_{5zt}(t), \\
P_{7zt}(t) = P_{6zt}(t), P_{7yt}(t) = P_{6yt}(t) - d_4 \cos[\theta_6(t)], \\
P_{7zt}(t) = P_{6zt}(t) - [P_{6zt}(t) - P_{7zt}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\
P_{8zt}(t) = P_{7zt}(t) + d_3 \sin[\theta_7(t)], \\
P_{8zt}(t) = P_{7zt}(t) - d_3 \cos[\theta_7(t)] \cos[\theta_6(t)], \\
P_{8yt}(t) = P_{7yt}(t) - [P_{7yt}(t) - P_{8yt}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\
P_{9zt}(t) = P_{8zt}(t) + d_2 \sin[\theta_7(t) - \theta_8(t)], \\
P_{9zt}(t) = P_{8zt}(t) - d_2 \cos[\theta_7(t) - \theta_8(t)] \cos[\theta_6(t)], \\
P_{9yt}(t) = P_{7yt}(t) - [P_{7yt}(t) - P_{9yt}(t)] \sin[\theta_6(t)], \\
P_{10zt}(t) = P_{11zt}(t) + d_1 \sin[\theta_7(t) - \theta_8(t) + \theta_1(t)], \\
P_{10zt}(t) = P_{9zt}(t) - d_1 \cos[\theta_7(t) - \theta_8(t) + \theta_9(t)] \cos[\theta_6(t)], \\
P_{10yt}(t) = P_{7yt}(t) - [P_{7yt}(t) - P_{10yt}(t)] \sin[\theta_6(t)].
\end{array} \right. \quad (4.26)$$

trong đó: d_0, d_1, d_2, d_3 và d_4 được mô tả trong Hình 4.2.

Cuối cùng, lưu đồ khối để tính toán quỹ đạo điểm ZMP từ bộ bốn tham số dáng đi của robot hai chân được minh họa trong Hình 4.14.

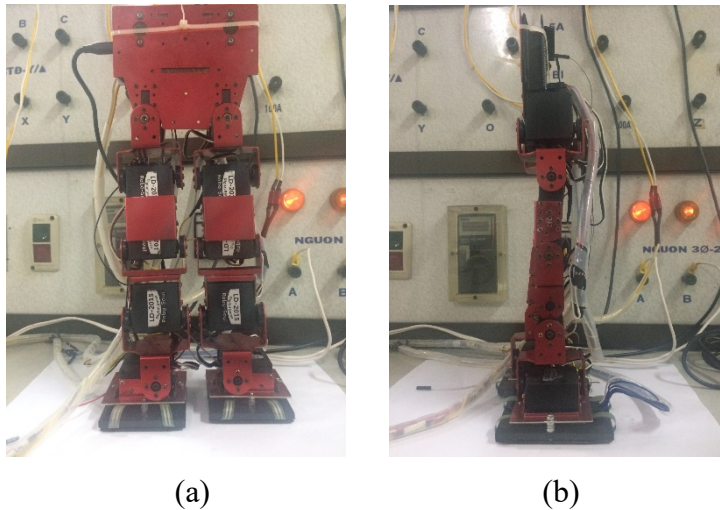


Hình 4.14: Lưu đồ khối tính quỹ đạo điểm ZMP.

4.4 Phân tích quỹ đạo ZMP của bộ tạo mẫu đi bộ

Trong phần này, chất lượng quỹ đạo ZMP trong quá trình bước đi tự nhiên của robot hai chân được mô tả trong mục 4.2 sẽ được phân tích. Trong trường hợp quỹ đạo ZMP không nằm hoàn toàn bên trong vùng ổn định, quỹ đạo của ZMP được thực hiện điều chỉnh thông qua việc sửa đổi 4 tham số dáng đi (S, H, h, n). Với phân tích trong mục 4.3, ảnh hưởng giữa các tham số dáng đi và quỹ đạo ZMP được khảo sát.

Để nghiên cứu điều này, chúng tôi thiết lập một số mẫu đi bộ tự nhiên và quan sát các hiệu ứng của chúng trên các quỹ đạo ZMP cho robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-4 của chúng tôi. Robot hai chân kích thước nhỏ (HUBOT-4) có thân trên và hai chân như mô tả trong Hình 4.15. Mỗi chân có khâu đùi, khâu cẳng chân, khâu bàn chân với tổng cộng 5 bậc tự do (BTD) gồm 2 BTD ở khớp hông, 1 BTD ở khớp gối và 2 BTD ở khớp cổ chân. HUBOT-4 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-4 khoảng 1,5 kg (gồm thiết bị truyền động, cảm biến, bộ điều khiển và khayếch đại) và cao khoảng 50cm.



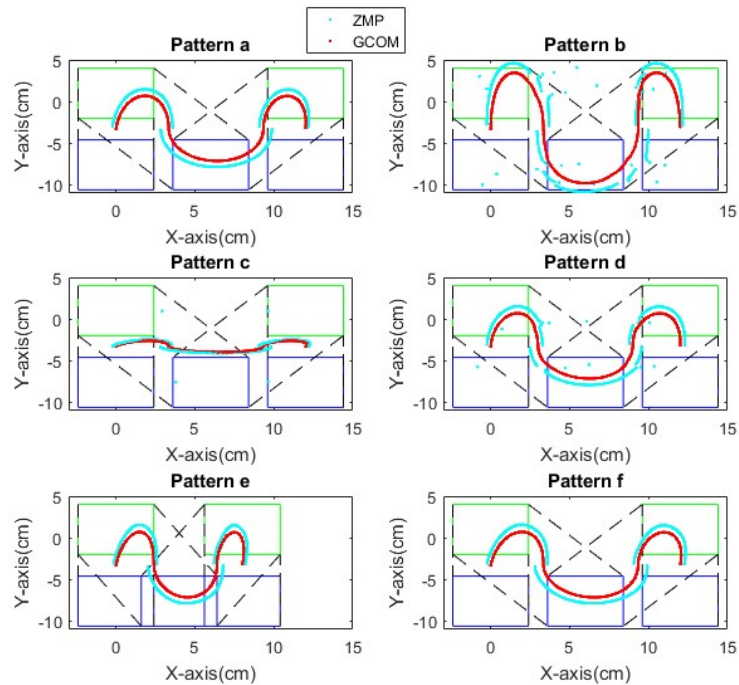
Hình 4.15: Hình ảnh mô tả robot hai chân HUBOT-4 với 10 (BTD)

Thông số vật lý của robot hai chân HUBOT-4 được trình bày trong Bảng 4.1.

Bảng 4.1: Thông số vật lý của HUBOT-4

Tham số	Giá trị
d_0	6.0 cm
d_1	4.5 cm
d_2	6.0 cm
d_3	6.0 cm
d_4	4.5 cm
w	6.6 cm
$\begin{cases} m_i \\ i = 0 \dots 10 \end{cases}$	70 gram

Bảng 4.2 trình bày 6 bộ tham số đáng đi cho việc khảo sát này. Hình 4.16 minh họa quỹ đạo ZMP và GCOM của HUBOT-4 trong quá trình bước đi tự nhiên tương ứng với 6 dáng đi.

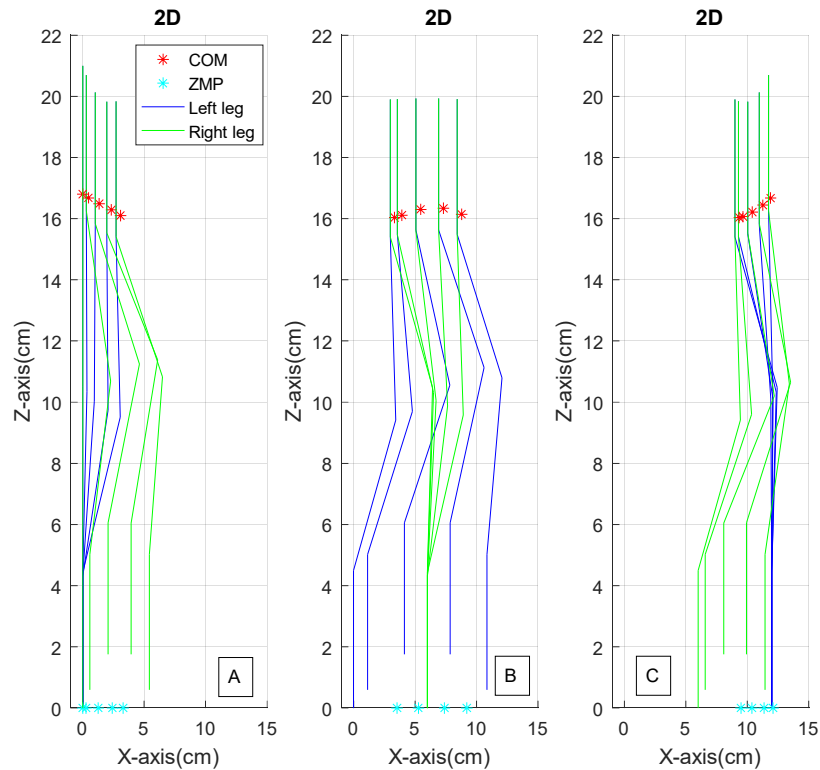


Hình 4.16: Quỹ đạo ZMP và GCOM của HUBOT-4 trong quá trình bước đi tự nhiên

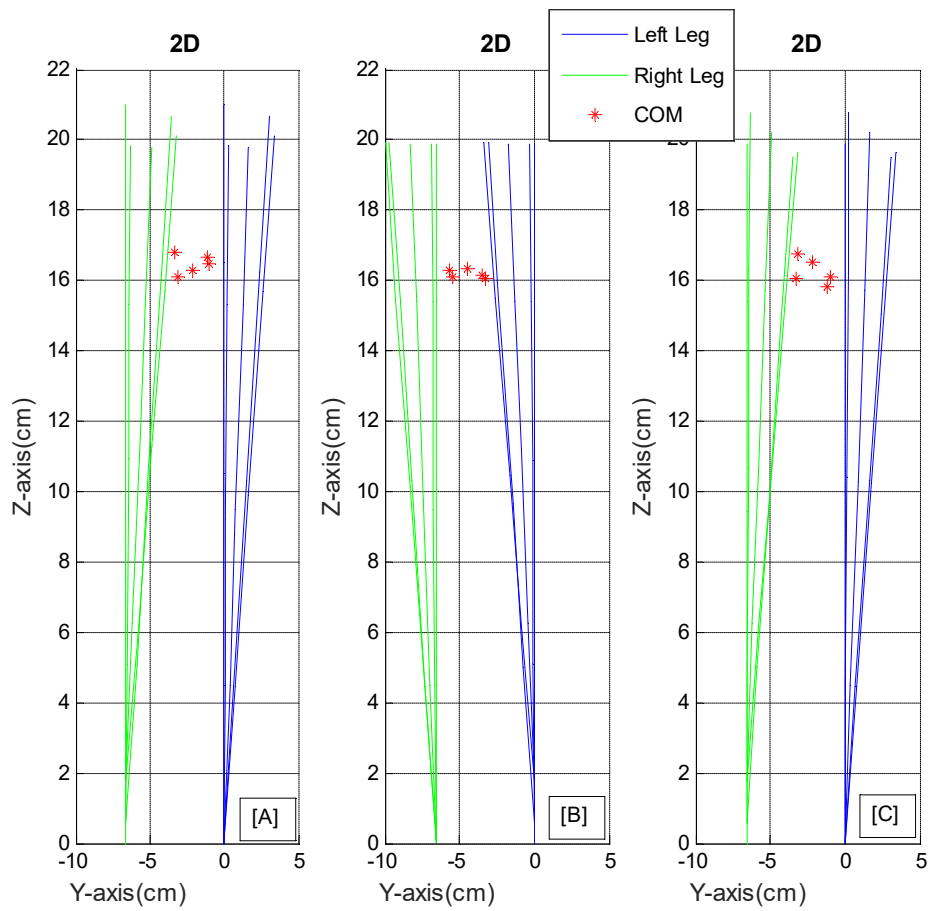
Bảng 4.2: Thông số của 6 dáng đi tự nhiên

Mẫu	S(cm)	H(cm)	h(cm)	n(cm)
a	12	2	1.1	6
b	12	2	1.1	11
c	12	2	1.1	1
d	12	2	0.1	6
e	8	2	1.1	6
f	12	5	1.1	6

Mẫu a (trong bảng 4.1) được lựa chọn để thực hiện khảo sát. Cụ thể: S=12cm, H=2cm, h=1.1cm, n=6 cm, T=1s) trong mặt phẳng đứng ngang và mặt phẳng đứng dọc được thể hiện trong Hình 4.17 và Hình 4.18. Hình 4.19 thể hiện dáng trong mặt phẳng XY. Các quỹ đạo của 5 khớp cho chân trái và phải được thể hiện trong Hình 4.20.

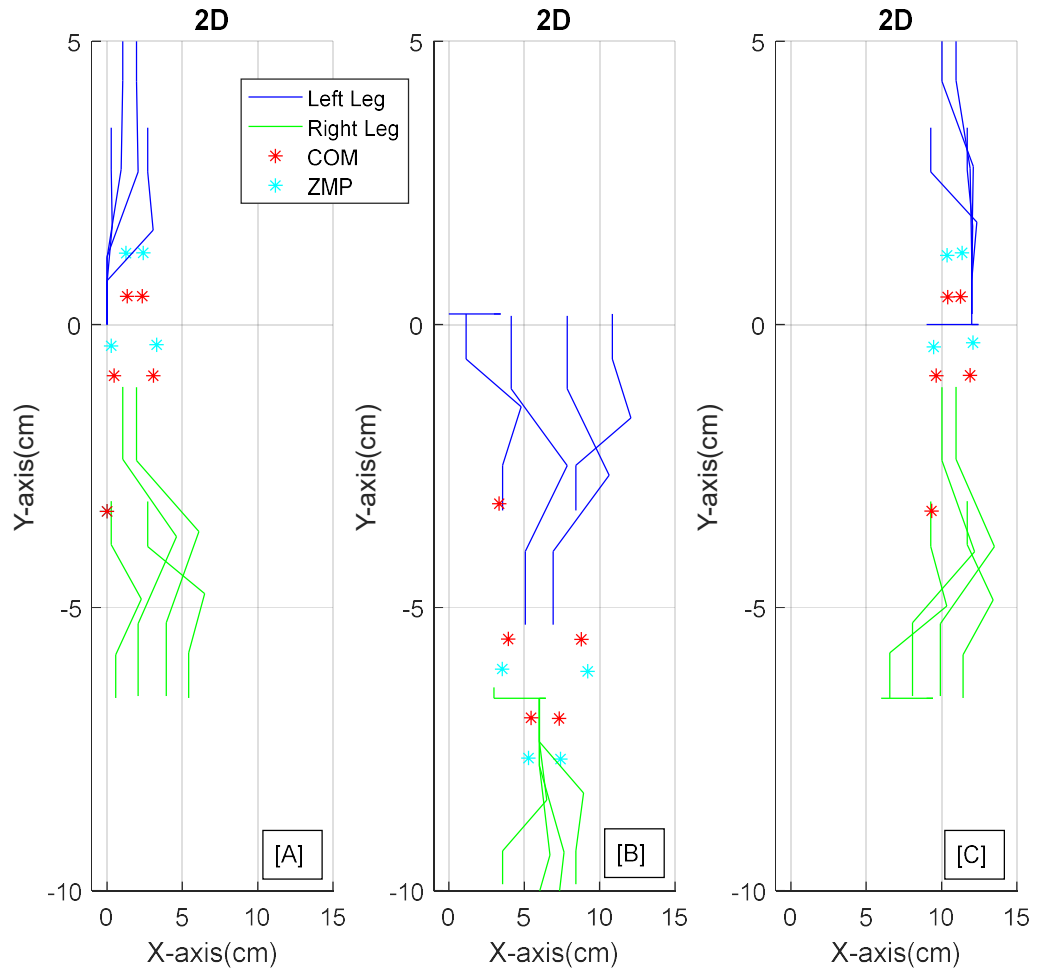


Hình 4.17: Quá trình đi bộ tự nhiên trong mặt phẳng đứng ngang
 [A]: Giai đoạn chuẩn bị. [B]: Giai đoạn bước đi. [C]: Giai đoạn kết thúc.



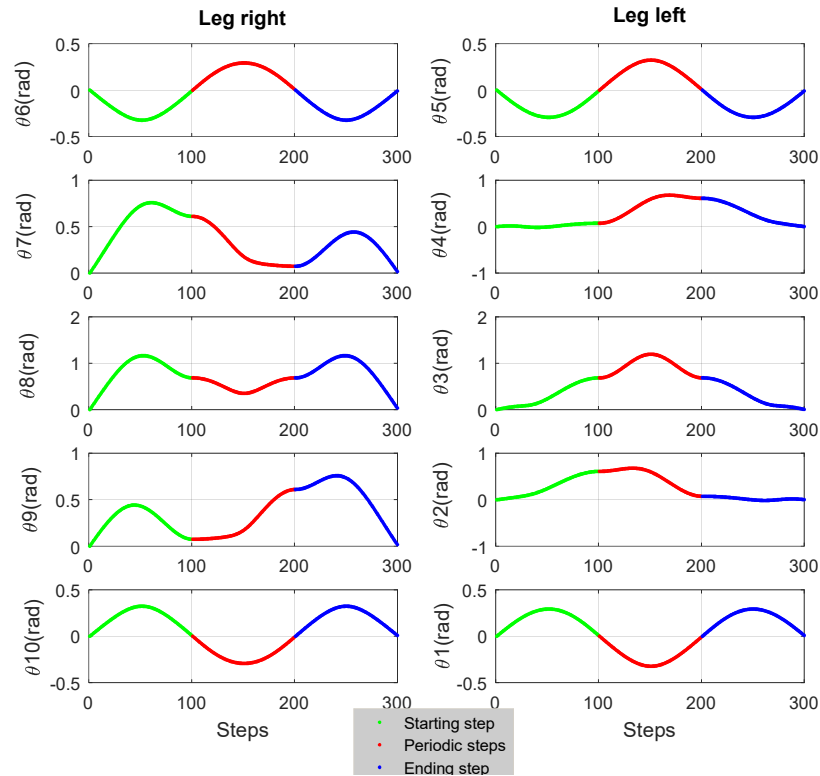
Hình 4.18: Quá trình đi bộ trong mặt phẳng đứng dọc

[A]: Giai đoạn chuẩn bị. [B]: Giai đoạn bước đi. [C]: Giai đoạn kết thúc.



Hình 4.19: Quá trình đi bộ trong mặt phẳng XY

[A]: Giai đoạn chuẩn bị. [B]: Giai đoạn bước đi. [C]: Giai đoạn kết thúc.



Hình 4.20: 10 quỹ đạo góc quay ở hai chân của robot dạng người trong quá trình bước đi tự nhiên.

[Xanh lá]: *Giai đoạn chuẩn bị*. [Đỏ]: *Giai đoạn bước đi*. [Xanh dương]: *Giai đoạn kết thúc*.

4.5 Kết luận

Chương này chủ yếu trình bày phương pháp off-line mới cho bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên ổn định lần đầu tiên được áp dụng cho robot hai chân kích thước nhỏ HUBOT-4 xét theo mặt đứng ngang (*YZ-Frontal View*) và mặt đứng dọc (*XZ-Sagittal View*).

Bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên ổn định phụ thuộc vào bốn tham số (chiều dài bước, độ nhấc chân, độ khụy gối, độ lắc hông) của robot hai chân kích thước nhỏ được thực hiện dựa vào phân tích dáng đi thực tế của con người. Quỹ đạo góc quay ở cổ chân, đầu gối và hông của robot hai chân được thực hiện dựa vào thông số vật lý của robot hai chân và điều kiện tương tác mặt đất. Dựa trên các thông số chính này, các chuyển động chân

khác nhau được tạo ra, và quỹ đạo đi bộ cuối cùng đáp ứng các ràng buộc ZMP ổn định được xác định để tạo ra các góc quay ở các khớp tương ứng.

Kết quả mô phỏng, chứng minh bộ tạo mẫu đi bộ tự nhiên được đề xuất cho phép robot hai chân bước đi vững chắc và mạnh mẽ mà không ngã. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [1] và [5], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

Tuy nhiên, trong quá trình robot hai chân bước đi thực tế có thể bị mất ổn định do chịu lực tác động ngang (va đập, cản gió, ...) hoặc di chuyển trên các địa hình phức tạp (bậc thang, có chướng ngại vật, mặt nghiêng, ...). Trong thời gian sắp tới, nghiên cứu sinh sẽ tiếp tục khảo sát và đưa ra các hướng để khắc phục.

CHƯƠNG 5 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1 Kết luận

Trong luận án tác giả đã nghiên cứu và phát triển bộ tạo dáng đi (WPG) phụ thuộc 4 thông số của Dip để robot hai chân bước đi ổn định và tự nhiên như con người. Trên cơ sở các kết quả mô phỏng và thực nghiệm, tác giả đã đề xuất thành công một số cải tiến mới để tăng hiệu quả và chất lượng của robot hai chân. Các đóng góp chính của tác giả trong luận án được tóm tắt như sau:

- Đề xuất phương pháp mới tối ưu hóa một số thông số dáng đi cho robot hai chân cho phép bước đi ổn định với độ nhấc chân được cài đặt trước. Thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE-Modified Differential Evolution) được sử dụng để tối ưu các thông số dáng đi giúp robot hai chân 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-Genetic Algorithm) và thuật toán bầy đàn (PSO-Particle Swarm Optimization). Kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên robot hai chân kích thước nhỏ (HUBOT-5) chứng tỏ thuật toán đề xuất bảo đảm dáng đi ổn định cho robot hai chân với độ nhấc chân chính xác. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [2], [4] và [6], trong danh mục công trình công bố của tác giả.
- Đề xuất một hướng mới để tạo dáng thích nghi robot hai chân với mục tiêu bước đi ổn định và tự nhiên trên bề mặt bằng phẳng. Sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai cải tiến (MDE – Modified Differential Evolution) tối ưu bộ trọng số của mô hình mạng nơ-rôn tiến hóa thích nghi (AENM – Adaptive Evolutionary Neural Model) để nhận dạng các thông số dáng đi của bộ tạo dáng (WPG – Walking Pattern Generator) giúp robot hai chân bám theo quỹ đạo ZMP (Zero Moment Point) mong muốn. Hiệu quả của đề xuất MDE được so sánh với thuật toán PSO (Particle Swarm Optimisation) và GA (Genetic Algorithm). Phương pháp đề xuất được kiểm chứng trên mẫu thử robot hai chân kích thước nhỏ

HUBOT-5. Kết quả nhận dạng chứng minh rằng phương pháp đề xuất (MDE-AENM) hiệu quả trong việc tạo dáng đi bền vững và chính xác. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [3], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

- Đề xuất hướng tiếp cận mới cho phép phát ra quỹ đạo bước đi tự nhiên ổn định áp dụng cho robot hai chân kích thước nhỏ. Các thông số chính được chọn thể hiện các ràng buộc từ tọa độ mong muốn của bàn chân, đầu gối và hông tuân thủ nguyên lý ổn định ZMP. Từ đó quỹ đạo ổn định hoàn chỉnh của bàn chân, đầu gối và hông được hình thành. Dựa trên bộ thông số chủ chốt này, dùng phép biến đổi động học ngược của robot hai chân, các kiểu quỹ đạo bước đi tự nhiên ổn định khác nhau sẽ được xây dựng, qua đó cho phép điều khiển robot hai chân kích thước nhỏ bước đi tự nhiên ổn định thỏa mãn nguyên lý ổn định ZMP thể hiện qua góc quay đồng bộ phù hợp cho từng khớp. Các kết quả mô phỏng được thực hiện khẳng định tính khả thi và hiệu quả của phương pháp hoạch định được đề xuất. Kết quả của nghiên cứu này được trình bày ở bài báo [1] và [5], trong danh mục công trình công bố của tác giả.

Tất cả các nghiên cứu, đề xuất cải tiến trong luận án đều được tác giả kiểm chứng mô phỏng và thực nghiệm trên robot hai chân kích thước nhỏ. Các kết quả nghiên cứu này đã được tác giả công bố trên các tạp chí và hội nghị uy tín như 3 bài báo tạp chí quốc tế trong danh mục SCIE [1-3], 1 bài báo tạp chí trong nước [4], 1 bài báo tham gia báo cáo ở hội nghị trong nước [5], 2 bài báo ở hội nghị quốc tế [6] và [7]. Các công bố này đã được các tác giả quốc tế tham khảo và trích dẫn như bài báo [6] có 5 trích dẫn, bài báo [4] và [5] có 3 trích dẫn, bài báo [2] có 2 trích dẫn, bài báo [7] có 1 trích dẫn (thống kê đến tháng 05/2019 từ nguồn Google Scholar). Các thống kê này chứng tỏ tính mới, độ tin cậy và ý nghĩa khoa học của các kết quả nghiên cứu trong luận án.

5.2 Kiến nghị

Hướng bộ tạo dáng đi (WPG) phụ thuộc 4 thông số để robot hai chân bước đi ổn định và tự nhiên như con người đạt được một số kết quả khá thú vị. Tuy nhiên, trong phạm vi luận án tác giả chưa khai thác hết tiềm năng. Do đó, hướng bộ tạo dáng đi (WPG) phụ thuộc 4 thông số để robot hai chân bước cần phải tiếp tục nghiên cứu và phát triển:

- Tiếp tục thực hiện điều khiển vòng kín để kiểm soát tốc độ của robot hai chân khi sử dụng bộ tạo dáng đi (WPG) được đề xuất trong luận án.
- Tiếp tục phát triển bộ tạo dáng đi (WPG) để robot hai chân có thể bước đi thẳng trên bề mặt không bằng phẳng (ví dụ: lên dốc và xuống dốc, lên xuống cầu thang), hoặc bước đi vòng trên bề mặt bằng phẳng.
- Áp dụng bộ tạo dáng đi (WPG) phụ thuộc 4 thông số cho robot dạng người kích thước thật (HUBOT-3).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Goswami, P. Vadakkepat. *Humanoid Robotics: A Reference*. Springer Nature B.V, 2019, pp. 55-368.
- [2] Hồ Phạm Huy Ánh, Nguyễn Thanh Nam, Phan Huỳnh Lâm, Chung Tấn Lâm, Trương Trọng Toại, Nguyễn Thiên Bình, Trần Thiện Huân, Nguyễn Đức Ngọc Hoàng. *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo Robot dịch vụ dạng người*, Báo cáo tổng kết đề tài KH&CN, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2013.
- [3] I. Kato, S. Ohteru, H. Kobayashi, K. Shirai, A. Uchiyama. Information-power machine with senses and limbs. *Proceedings of the CISM-IFTtoMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, 1973, pp. 12-24.
- [4] Vukobratović, M., Borovac, B., Surla, D., Stokić, D. *Biped Locomotion-Dynamics, Stability, Control and Application*. Springer, 1990.
- [5] Vukobratović, M., Borovac, B. Zero-Moment Point-Thirty Five Years on its Life, *International Journal of Humanoid Robotics* 1(1), pp.157-173, 2004.
- [6] S.Kajita and B.Espiau. *Handbook of Robotics-chapter16: Legged Robots*. Springer, 2008.
- [7] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka. The Development of Honda Humanoid Robot. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium*, 1998, pp. 1321-1326.
- [8] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. The intelligent ASIMO: System overview and integration. *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, pp. 2478-2483.
- [9] M. Gienger, K. Löffler, F. Pfeiffer. Towards the design of a biped jogging robot. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom*, 2001, pp. 4140-4145.

- [10] K. Kaneko, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Yokoi, K. Fujiwara, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, T. Isozumi. Design of advanced leg module for humanoid robotics project of METI. *IEEE Int. Conf. Robot Autom*, 2002, pp. 38-45.
- [11] Y. Sugahara, M. Kawase, Y. Mikuriya, T. Hosobata, H. Sunazuka, K. Hashimoto, H. Lim, A. Takanishi. Support torque reduction mechanism for biped locomotor with parallel mechanism. *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst*, 2004, pp. 3213-3218.
- [12] I.W.Park, J.Y.Kim, J.Lee, J.H.Oh. Online free walking trajectory generation for biped humanoid robot KHR-3 (HUBO). *IEEE Int. Conf. Robot. Autom*, 2006, pp. 1231-1236.
- [13] Weimin Z., Qiang H., and Dongyong J. Mechanical design of a light weight and high stiffness humanoid arm of BHR-03. *Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE International Conference on Digital Object Identifier*, 2008, pp.1681-1686.
- [14] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike. Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -1st Report: Walking Gait Pattern Generation. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1084-1091.
- [15] T. Takenaka, T. Matsumoto, T. Yoshiike, and S. Shirokura. Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -2nd Report: Running Gait Pattern Generation. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1092-1099.
- [16] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike. Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -3rd Report: Gait Pattern Modification to Compensate Approximated Dynamics Error. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1594-1600.
- [17] T. Takenaka, T. Matsumoto, T. Yoshiike, T. Hasegawa, S. Shirokura, H. Kaneko, and A. Orita. Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -4th

- Report: Integrated Balance Control. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1601-1608.
- [18] Ogura, Y., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Okubo, T., Momoki, S., Lim, H., Takanishi, A. Human-like walking with knee stretched, heelcontact and toe-off motion by a humanoid robot. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 3976-3981.
- [19] Nozaawa, S., Ueda, R., Kakiuchi, Y., Okada, K., Inaba, M. A full-body motion control method for a humanoid robot based on on-line estimation of the operational force of an object with an unknown weight. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 2684-2691.
- [20] Urata, J., Nishiwaki, K., Nakanishi, Y., Okada, K., Kagami, S., Inaba, M. Online walking pattern generation for push recovery and minimum delay to commanded changed of direction and speed. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 3411-3416.
- [21] Sugimoto, N., Morimoto, J., Hyon, S.-H., Kawato, M. The eMOSAIC model for humanoid robot control. *Neural Networks 30(0)*, pp. 8-19, 2012.
- [22] Lohmeier, S., Buschmann, T., Ulbrich, H. Humanoid robot LOLA. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 775-780.
- [23] Cho, B.K., Park, S.S., Oh, J.H. Controllers for running in the humanoid robot, HUBO. *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2009, pp. 385-390.
- [24] Peng, Z., Fu, Y., Tang, Z., Huang, Q., Xiao, T. Online walking pattern generation and system software of humanoid BHR-2. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, 2006, pp. 5471-5476.
- [25] Metta, G., Sandini, G., Vernon, D., Natale, L., Nori, F. The iCub humanoid robot: an open platform for research in embodied cognition. *Proceedings of the 8th*

- Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS 2008)*, 2008, pp. 50-56.
- [26] Lahr, D., Hong, D. The development of CHARLI: A linear actuated powered full size humanoid robot. *Proceedings of the International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2008)*, 2008.
- [27] Ott, C., Baumgärtner, C., Mayr, J., Fuchs, M., Burger, R., Lee, D., Eiberger, O., Albu-Schäffer, A., Grebenstein, M., Hirzinger, G. Development of a biped robot with torque controlled joints. *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2010)*, 2010, pp. 167-173.
- [28] S. Shigemi, K. Kawabe, T. Nakamura, Development of new ASIMO realization of autonomous machine. *Honda R&D Techn. Rev.* **24**(1), pp. 37–45, 2012.
- [29] Sanders, D., and Kusuda, Y. Toyota’s Violin-Playing Robot. *Industrial Robot: An International Journal*. Vol. 35, No. 6, pp. 504-506, 2008.
- [30] Lim, B., Lee, J., Kim, J., Lee, M., Kwak, H., Kwon, S., Lee, H., Kwon, W., Roh, K. Optimal gait primitives for dynamic bipedal locomotion. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 4013–4018.
- [31] Nelson, G., Saunders, A., Neville, N., Swilling, B., Bondaryk, J., Billings, D., Lee, C., Playter, R., Raibert, M. PETMAN: A humanoid robot for testing chemical protective clothing. *Journal of the Robotics Society of Japan* **30**(4), 372–377, 2012.
- [32] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, and S. Kajita. Cybernetic Human HRP-4C. *Proc. IEEE-RAS Int. Conference on Humanoid Robots*, 2009, pp. 7-14.
- [33] REEM-C. Internet: <http://www.pal-robotics.com/robots/reem-c>.
- [34] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, J. Monceaux, P. Lafourcade, et al., Mechatronic design of NAO humanoid. *Robotic and Automation ICRA 09 (IEEE, Kobe, 2009)*, pp. 769–774.

- [35] Inyong Ha, Yusuke Tamura, Hajime Asama, Jeakweon Han, Dennis W Hong. Development of Open Humanoid Platform DARwIn-OP. *SICE Annual Conference 2011*, Waseda University, Tokyo, Japan, pp. 2178-2181.
- [36] Inoue K., Sakuma N., Okada M., Sasaki C., Nakamura M., Wada K. Effective Application of PALRO: A Humanoid Type Robot for People with Dementia. *International Conference on Computers for Handicapped Persons (ICCHP 2014)*, Paris, France, July 9-11, 2014, pp. 451-454.
- [37] Mester, G. and Rodic, A. Contribution to the Simulation of Humanoid Kondo Robot. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara IX (1)*, pp. 73-78, 2011.
- [38] DARPA Robotics Challenge. Internet: <http://www.theroboticschallenge.org>.
- [39] Broad Agency Announcement DARPA Robotics Challenge. DARPA-BAA-1239, 2012.
- [40] J. Andrew Bagnell, et al. CHIMP-the CMU Highly Intelligent Mobile Platform. *Journal of Field Robotics*, 39(2), pp. 209-228, 2015.
- [41] S. Karamanchi, K. Edelberg and others. Team RoboSimian: Semi-autonomous Mobile Manipulation at the 2015 DARPA Robotics Challenge Finals. *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 2, pp. 305-332, 2017.
- [42] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada, K. Yokoi, B. Siciliano, O. Khatib. *Introduction to Humanoid Robotics*. Springer, vol. 101, 2014.
- [43] Kajita, S., Tani, K. Study of dynamic walk control of a biped robot on rugged terrain - derivation and application of the linear inverted pendulum mode. *Journal of Robotics and Mechatronics* 5(6), 516–523, 1993.
- [44] Kajita, S., Tani, K. Experimental study of biped dynamic walking. *IEEE Control Systems* 16(1), 13–19, 1996.
- [45] Kajita, S., Matsumoto, O., Saigo, M. Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, pp. 2299-2306.

- [46] Q.Huang, K.Yokoi, S.Kajita, K.Kaneko, H.Rai, N.Koyachi and K.Tanie. Planing Walking Patterns for a Biped Robot. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 17, pp. 280-289, 2001.
- [47] A. Dasgupta, Y. Nakamura. Making Feasible Walking Motion of Humanoid Robots Form Human motion capture Data. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, May 1999, pp. 1044-1049.
- [48] K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, A. Kawamura. A Study On The Zero Moment Point Measurement for Biped Walking Robots. *Proc. 7th Int. Workshop on Adv. Motion Control*, 2002, pp.431-436.
- [49] C. Zhu, Y. Tomizawa, X. Luo, A. Kawamura. Biped Walking With Variable ZMP, Frictional Constraint, Inverted Pendulum Mode. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 2004, pp. 425-430.
- [50] K. Erbatur, O. Kurt. Natural ZMP trajectories for biped robot reference generation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 835-845, Mar. 2009.
- [51] Wei Xu, Qiang Huang, Jing Li, Zhangguo Yu, Xuechao Chen, Qian Xu. An Improved ZMP Trajectory Design for the Biped Robot BHR. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 569-574.
- [52] Dip Goswami, Prahlad Vadakkepat. Genetic Algorithm-based Optimal Bipedal Walking Gait Synthesis considering Tradeoff between Stability Margin and Speed. *Robotica*, volume 27, pp. 355-365, 2009.
- [53] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y., Kato, I. The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD. *Proceedings of 1985 International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 1985, pp. 459-466.
- [54] Arimoto, S., Miyazaki, F. A hierachical control scheme for biped robots. *Journal of the Robotics Society of Japan* 1(3), pp. 167-175, 1983.

- [55] Miyazaki, F., Arimoto, S. A control theoretic study on dynamical biped locomotion. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 102, pp. 233-239, 1980.
- [56] Furusho, J., Sano, A. Sensor-based control of a nine-link biped. *International Journal of Robotics Research* 9 (2), pp. 83-98, 1990.
- [57] Miura, H., Shimoyama, I.: Dynamic walk of a biped. *International Journal of Robotics Research* 3 (2), pp. 60-74, 1984.
- [58] Raibert, M.H. *Legged robots that balance*. MIT Press, Cambridge, 1986.
- [59] Okumura, Y., Tawara, T., Endo, K., Furuta, T., Shimzu, M. Realtime ZMP compensation for biped walking robot using adaptive inertia force control. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, 2003, pp. 335-339.
- [60] Kumagai, M., Tomita, H., Emura, T. Sensor-based walking of human type biped robot – 2nd report, active control of body attitude. *Proceedings of JSME Conference on Robotics and Mechatronics (ROBOMECH 1998)*, 1998, pp. 112-117.
- [61] Kajita, S., Morisawa, M., Miura, K., Nakaoka, S., Harada, K., Kaneko, K., Kanehiro, F., Yokoi, K. Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, 2010, pp. 4489-4496.
- [62] Miura, K., Morisawa, M., Kanehiro, F., Kajita, S., Kaneko, K., Yokoi, K. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 4428-4435.
- [63] Nishiwaki, K., Kagami, S. Sensor feedback modification methods that are suitable for the short cycle pattern generation of humanoid walking. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*, 2007, pp. 4214-4220.

- [64] Morisawa, M., Kanehiro, F., Kaneko, K., Mansard, N., Sola, J., Yoshida, E., Yokoi, K., Laumond, J. P. Combining suppression of the disturbance and reactive stepping for recovering balance. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 3150-3156.
- [65] Urata, J., Nishiwaki, K., Okada, K., Kagami, S., Inaba, M. Online decision of foot placement using singular LQ preview regulation. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2011)*, 2011, pp. 13-18.
- [66] J. Mrozowski, J. Awrejcewicz. Analysis of stability of the human gait. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 45, no. 1, pp. 91-98, 2007.
- [67] Harada, K., Kajita, S., Kaneko, K., Hirukawa, H. An analytical method for real-time gait planning for humanoid robots. *International Journal of Humanoid Robotics* 3(1), pp. 1-19, 2006.
- [68] C. Shih, Y. Zhu, W. Gruver. Optimization of the biped robot trajectory. In Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern, 1991, pp. 899-903.
- [69] Wieber, P.-B. Trajectory Free Linear Model Predictive Control for Stable Walking in the Presence of Strong Perturbations. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Genova, Italy, 2006, pp. 137-142.
- [70] Herdt, A., Diedam, H., Wieber, P. B., Dimitrov, D., Mombaur, K., Diehl, M. Online walking motion generation with automatic footstep placement. *Advanced Robotics* 24, pp. 719-737, 2010.
- [71] Katoh, R., Mori, M. Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory. *Automatica* 20 (4), pp. 405-414, 1984.
- [72] Taga, G., Yamaguchi, Y., Shimizu, H. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics* (65), pp. 147-159, 1991.

- [73] Hyon, S.-H., Morimoto, J., Kawato, M. From compliant balancing to dynamic walking on humanoid robot: Integration of CNS and CPG. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 1084-1085.
- [74] Kuo Arthur D. The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: a dynamic walking perspective. *Human Mov Sci* 26 (4), pp. 617-656, 2007.
- [75] Gong D, Yan J, Zuo G. A review of gait optimization based on evolutionary computation. *Appl Comput Intell Soft Comput*, pp. 1-12, 2010.
- [76] Capi G, et al. Optimal trajectory generation for a prismatic joint biped robot using genetic algorithms. *Robot Auton Syst* 38(2), pp. 119-128, 2002.
- [77] Capi G, et al. Real time gait generation for autonomous humanoid robots: a case study for walking. *Robot Auton Syst* 42(2), pp. 107-116, 2003.
- [78] Park JH, Choi M. Generation of an optimal gait trajectory for biped robots using a genetic algorithm. *JSME Int J Ser C Mech Syst Mach Elem Manuf*, 47(2), pp. 715-721, 2004.
- [79] S. H. Choi, Y. H. Choi, and J. G. Kim. Optimal Waking Trajectory Generation for a Biped Robot using GA. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1999, pp. 1456-1461.
- [80] Ames AD, Cousineau EA, Powell MJ. Dynamically stable bipedal robotic walking with NAO via human-inspired hybrid zero dynamics. *Proceedings of the 15th ACM international conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2012, pp. 135-144.
- [81] Lin CM, Peng YF. Adaptive CMAC-based supervisory control for uncertain nonlinear systems. *Syst Man Cybern Part B Cybern IEEE Trans*, 34(2), pp. 1248-1260, 2004.
- [82] Miller WT. Real-time neural network control of a biped walking robot. *Control Syst IEEE*, 14(1), pp. 41-48, 1994.

- [83] Zhou Changjiu, Meng Qingchun. Dynamic balance of a biped robot using fuzzy reinforcement learning agents. *Fuzzy Sets Syst*, 134(1), pp. 169-187, 2003.
- [84] Jha RK, Singh B, Pratihar DK. On-line stable gait generation of a two-legged robot using a geneticfuzzy system. *Robot Auton Syst*, 53(1), pp. 15-35, 2005.
- [85] Udai AD. Optimum hip trajectory generation of a biped robot during single support phase using genetic algorithm. *First international conference on Emerging trends in engineering and technology*, 2008, pp 739-744.
- [86] Nour Khashan, Mostafa A. Elhosseini, Amira Y. Haikal, Mahmoud Badawy. Biped Robot Stability Based on an A-C parametric Whale Optimization Algorithm. *Journal of Computational Science*, Vol. 31, pp. 17-32, 2019.
- [87] Vundavilli PR, Sahu SK, Pratihar DK. Online dynamically balanced ascending and descending gait generations of a biped robot using soft computing. *Int J Humanoid Robot* 4, pp. 777-814, 2007.
- [88] Rajendra R, Pratihar DK. Analysis of double support phase of biped robot and multi-objective optimization using genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm. *Sadhana*, 2(2), pp. 549-575, 2015.
- [89] Lee JY, Lee JJ. Optimal walking trajectory generation for a biped robot using multi-objective evolutionary algorithm. *Control conference 2004 - 5th Asian*, 2004, pp. 357-364.
- [90] Van-Huan DAU, Chee-Meng CHEW and Aun-Neow POO. Optimal Trajectory Generation for Bipedal Robot. *Proceedings IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robot*, Pittsburgh, PA, USA, 2007, pp 603-608.
- [91] Rajendra R, Pratihar DK. Particle swarm optimization algorithm vs. genetic algorithm to solve multi-objective optimization problem in gait planning of biped robot. *Proceedings of the international conference on information systems design and intelligent applications 2012 (INDIA 2012)*, Visakhapatnam, India, January 2012, pp. 563-570.

- [92] Raj, M., Semwal, V.B., Nandi, G.C. Multiobjective optimized bipedal locomotion. *Int. J. Mach. Learn. Cybern*, pp. 1–17, 2017.
- [93] A. Fattah, A. Fakhari, S. Behbahani. Dynamics modeling and trajectory planning of a seven-link planar biped robot. *17th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering (ISME 2009)*, University of Tehran, Iran, 2009, pp. 1-7.
- [94] M. Vukobratovi'c, B. Borovac, D. Surla and D. Stoki'c. *Biped Robot Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [95] J. Mrozowski, J. Awrejcewicz. Analysis of stability of the human gait. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 45, no. 1, pp. 91-98, 2007.
- [96] T. T. Huan and H. P. H. Anh. Novel Stable Walking for Humanoid Robot Using Particle Swarm Optimization Algorithm, *Journal of Advances in Intelligent Systems Research*, Vol. 123, pp. 322- 325, 2015.
- [97] N. Shafii, L. P. Reis, N. Lau. 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, 2011.
- [98] E. Yazdi, V. Azizi, and A. T. Haghighat. Evolution of biped locomotion using bees algorithm, based on truncated Fourier series. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2010, pp. 378–382.
- [99] Y. Farzaneh, A. Akbarzadeh, A. Akbaria. Online bioinspired trajectory generation of seven-link biped robot based on T-S fuzzy system. *Applied Soft Computing*, Volume 14, Part B, pp. 167-180, 2014.
- [100] R. Storn and K. Price. Differential Evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.
- [101] N.N Son, C.V. Kien and H.P.H Anh. 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, 2017.
- [102] Son, N.N., Anh, H.P.H. and Chau, T.D. Adaptive neural model optimized by modified differential evolution for identifying 5-DOF robot manipulator dynamic system, *Soft Computing*, Vol. 22, N. 3, pp. 979-988, 2018.
- [103] M. Vukobratovic, A.A. Frank, D. Juricic. On the Stability of Biped Locomotion. *Proc. IEEE Trans. of Biomedical Engineering*, 1979, pp. 25-36.
- [104] T. T. Huan and H. P. H. Anh. Implementation of Novel Stable Walking Method for Small-Sized Biped Robot. *Proceedings The 8th Viet Nam Conference on Mechatronics (VCM-2016)*, Can Tho, Viet Nam, 2016, pp. 283-292.
- [105] A. K. Qin, V. L. Huang, and P. N. Suganthan. Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization. *Evol. Comput. IEEE Trans.*, vol. 13, no. 2, pp. 398–417, 2009.
- [106] Y. Wang, Z. Cai, and Q. Zhang. Differential evolution with composite trial vector generation strategies and control parameters. *Evol. Comput. IEEE Trans.*, vol.15, no.1, pp. 55–66, 2011.
- [107] Q. Huang, Z. Peng, W. Zhang, L. Zhang, and K. Li. Design of humanoid complicated dynamic motion based on human motion capture. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelli. Robots and Systems*, 2005, pp.3536-3541.
- [108] C. L. Shih, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee, W. A. Gruver. Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1990, pp. 1646-1652.
- [109] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. The intelligent ASIMO, system overview and integration. *Proc. the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, 2002, pp. 2478-2483.

- [110] S. Lohmeier, K. Loffler, M. Gienger, H. Ulbrich, and F. Pfeiffer. Computer system and control of biped Johnnie. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 4, 2004, pp. 4222-4227.
- [111] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, A. Morishima, H. O. Lim, and A. Takanishi. Development of a new humanoid robot WABIAN-2. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2006, pp. 830-835.
- [112] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi. Design of prototype humanoid robotics platform for HRP. *Proc. the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2002, pp. 2431-2436.
- [113] T. Ishida. Development of small biped entertainment robot QRIO. *Proc. The Fourth Symposium Micro-Nano mechatronics for Information-Based Society*, 2004, pp. 23-28.
- [114] L. Yang, C. M. Chew, Y. Zheng, and A. N. Poo. Truncated Fourier series formulation for bipedal walking balance control. *Robotica*, vol. 28, pp. 81-96, 2010.
- [115] T. Li, Y. T. Su, S. W. Lai, and J. J. Hu. Walking motion generation, synthesis, and control for biped robot by using PGRL, LPI, and fuzzy logic. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 41, pp. 736-748, 2011.
- [116] Heydari, Reza, and Mohammad Farrokhi. Robust model predictive control of biped robots with adaptive on-line gait generation. *International Journal of Control, Automation and Systems* 15(1), pp. 329-344, 2017.
- [117] M. Vukobratovic and D. Juricic. Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Trans. Bio-Med. Eng.*, vol. BME-16, no. 1, pp. 1-6, 1969.
- [118] H. Kondo, Y. Ogura, H. Aikawa, A. Morishima, J. Shimizu, H. Lim, and A. Takanishi. Application of biped humanoid robot to simulate the motion of elderly and disable people. *Gerontechnology*, vol. 7, No. 2, pp. 143-143, 2008.

- [119] K. Muecke and D. Hong. Constrained analytical trajectory filter for stabilizing humanoid robot motions. *Intelligent Service Robotics*, vol. 4, pp. 203-218, 2011.
- [120] C. Fu, F. Tan, K. Chen. A simple walking strategy for biped walking based on an intermittent sinusoidal oscillator. *Robotica*, vol. 28, pp. 869-884, 2010.
- [121] Wu, W., Gao, L. Posture self-stabilizer of a biped robot based on training platform and reinforcement learning. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 98, pp. 42-55, 2017.
- [122] T. Narukawa, M. Takahashi, and K. Yoshida. Efficient walking with optimization for a planar biped walker with torso by hip actuators and springs. *Robotica*, vol. 29, pp. 641-648, 2011.
- [123] Safartoobi, M., Dardel, M., Ghasemi, M. H., & Daniali, H. M. Determination of the initial conditions by solving boundary value problem method for period-one walking of a passive biped walking robots. *Robotica*, 35(1), pp. 166-188, 2017.
- [124] C. Zhou, P. K. Yue, J. Ni, and S. B. Chan. Dynamically stable gait planning for a humanoid robot to climb sloping surface. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 341-346, 2004.
- [125] Janardhan, V., & Kumar, R. P. Online trajectory generation for wide ditch crossing of biped robots using control constraints. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, pp. 61-82, 2017.
- [126] Hanazawa, Y., Asano, F. Asymmetric Swing-Leg Motions for Speed-Up of Biped Walking. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 29(3), pp. 490-499, 2017.
- [127] K. Seo and S. Hyun. Genetic programming based automatic gait generation for quadruped robots. *Proc. the 10th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2008, pp. 293-294.
- [128] T. Bui, H. Pham, and H. Hasegawa. Improve self-adaptive control parameters in differential evolution for solving constrained engineering optimization problems. *Journal of Computational Science and Technology*, vol.7, no.1, pp. 59-74, 2013.

- [129] M. Aghaabbasloo, M. Azarkaman, and M. E. Salehi. Biped robot joint trajectory generation using PSO evolutionary algorithm. *Proc. 3rd Joint Conf. of AI & Robotic and 5th RoboCup Iran Open Int. Symp.*, 2013, pp. 1-6.
- [130] P. H. Kuo, Y. F. Ho, K. F. Lee, L. H. Tai, and T. H. S. Li. Development of humanoid robot simulator for gait learning by using particle swarm optimization. *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2013, pp. 2683-2688.
- [131] T. Arakawa and T. Fukuda. Natural motion trajectory generation of biped locomotion robot using genetic algorithm through energy optimization. *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 2, 1996, pp. 1495-1500.
- [132] L. Hu, C. Zhou, and Z. Sun. Estimating biped gait using spline-based probability distribution function with Q-learning. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1444-1452, 2008.
- [133] Wang, L., Ge, Y., Chen, M., & Fan, Y. Dynamical balance optimization and control of biped robots in double-support phase under perturbing external forces. *Neural Computing and Applications*, 28(12), pp. 4123-4137, 2017.
- [134] De Magistris, Giovanni, et al. Design of optimized compliant soles for humanoid robots. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 95, pp. 129-142, 2017.
- [135] Ito, S., Nishio, S., Ino, M., Morita, R., Matsushita, K., & Sasaki, M. Design and adaptive balance control of a biped robot with fewer actuators for slope walking. *Mechatronics*, 49, pp. 56-66, 2018.
- [136] Sun, Changyin, et al. Adaptive neural network control of biped robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47.2, pp.315-326, 2017.
- [137] Heydarnia, O., Dadashzadeh, B., Allahverdizadeh, A., Noorani, M. S. Discrete sliding mode control to stabilize running of a biped robot with compliant kneed legs. *Automatic Control and Computer Sciences*, 51(5), pp. 347-356, 2017.
- [138] Chia-Feng Juang, Yen-Ting Yeh. Multi-objective Evolution of Biped Robot Gaits Using Advanced Continuous Ant-Colony Optimized Recurrent Neural

- Networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 48, No. 6, pp. 1910-1922, 2018.
- [139] S.H. Piao, et al. Research on cooperation of multi-robot. *Chinese Journal of Electronics*, Vol.20, No.1, pp.39-41, 2011.
- [140] A. Goswami, P. Vadakkepat. *Humanoid Robotics: A Reference*. Springer Nature B.V, 2019, pp. 169-186.
- [141] A. Goswami, P. Vadakkepat. *Humanoid Robotics: A Reference*. Springer Nature B.V, 2019, pp. 201-214.
- [142] F. Gubina, H. Hemami, and R. B. McGhee. On the dynamic stability of biped locomotion. *IEEE Trans. Bio-Med. Eng.*, vol. BME-21, no. 2, pp. 102–108, 1974.
- [143] A. Dasgupta and Y. Nakamura. Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1999, pp. 1044–1049.
- [144] C. Shih. Gait synthesis for a biped robot. *Robotica*, vol. 15, pp. 599–607, 1997.
- [145] Ho, Y.F., Li, T.H.S.; Kuo, P.H.; Ye, Y.T. Parameterized gait pattern generator based on linear inverted pendulum model with natural ZMP references. *Knowl. Eng. Rev.*, 32, pp. 1-17, 2016.
- [148] Hu, Y., Mombaur, K. Bio-Inspired Optimal Control Framework to Generate Walking Motions for the Humanoid Robot iCub Using Whole Body Models. *Appl. Sci.*, 8, pp. 1-22, 2018.
- [149] Tran Dinh Huy, Nguyen Thanh Phuong, Ho Dac Loc, Ngo Cao Cuong. A Simple Walking Control Method for Biped Robot with Stable Gait. *Journal of Computer Science and Cybernetics*, Vol. 29, N. 2, pp. 105-118, 2013.
- [150] Nguyen, T. D., Chu, B. L., Tran, T. P., Nguyen, T. T., Kim, S. B. Stable Walking Gait Planning for 3D Biped Robot with Feet Applied for UXA90-Light. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2016, pp. 675-685.

- [151] Hung Chan Nguyen, Ha Xuan Nguyen, Ngoc-Anh Mai, Lam Bao Dang, Hai Minh Pham. A Modular Design Process for Developing Humanoid Mobile Robot Vietbot. *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 230-235, 2018.
- [152] L. Ljung. *System Identification*. Springer, 1998.
- [153] H. T. Hoàng. *Hệ Thống Điều Khiển Thông Minh*. NXB Đại học quốc gia Tp. HCM, 2006, pp. 234-280.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

I. CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN TRỰC TIẾP LUẬN ÁN

1. **Tran Thien Huan**, Ho Pham Huy Anh, Cao Van Kien. Optimal Nature-Walking Gait for Humanoid Robot Using Jaya Optimization Algorithm. *Journal Advances in Mechanical Engineering*, **2019**. (In revision 3rd, SCIE, IF=1.024).
2. **Tran Thien Huan**, Ho Pham Huy Anh. Optimal Stable Gait for Nonlinear Uncertain Humanoid Robot Using Central Force Optimization Algorithm. *Journal of Engineering Computations*, Vol. 36, Issue. 2, pp. 599-621, **2019**. (SCIE, Q2-IF=1.177, DOI: [10.1108/EC-03-2018-0154](https://doi.org/10.1108/EC-03-2018-0154)).
3. **Tran Thien Huan**, Cao Van Kien, Ho Pham Huy Anh, Nguyen Thanh Nam. Adaptive Gait Generation for Biped Robot Using Evolutionary Neural Model Optimized with Modified Differential Evolution. *Neurocomputing*, Volume 320, pp. 112-120, **2018**. (SCIE, Q1-IF=3.02, DOI: [10.1016/j.neucom.2018.08.074](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.08.074)).
4. **Trần Thiện Huân**, Hồ Phạm Huy Ánh. Tối ưu hóa dáng đi ổn định cho robot dạng người kích thước nhỏ sử dụng thuật toán tiến hóa vi sai (MDE) cải tiến. *Chuyên san Đo lường, Điều khiển & Tự động hóa*, quyển 21, số 1, trang 63-74, **2018**.
5. **T. T. Huan** and H. P. H. Anh. Implementation of Novel Stable Walking Method for Small-Sized Biped Robot. *Proceedings The 8th Viet Nam Conference on Mechatronics (VCM-2016)*, Can Tho, Viet Nam, **2016**, pp. 283-292.
6. **Tran Thien Huan**, Ho Pham Huy Anh. Novel Stable Walking for Humanoid Robot Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Advances in Intelligent Systems Research*, vol.123, pp. 322-325, **2015**.

II. CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

7. **Tran Thien Huan**, Phan Duc Huynh, Cao Van Kien, Ho Pham Huy Anh. Implementation of Hybrid Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control and Evolution Neural

Observer for Biped Robot Systems. *IEEE International Conference on System Science and Engineering (IEEE-ICSSE 2017)*, Ho Chi Minh, Vietnam, **2017**, pp. 77-82.

PHỤ LỤC A

Bảng A.1: Pseudo-code của giải thuật tiến hóa vi sai DE

1. **Begin**
2. Initialization
3. Evaluation
4. **For** $G=1$ to GEN **do**
5. **For** $i=1$ to NP **do**
6. $j_{\text{rand}} = \text{randint}(1, D)$
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 $j == j_{\text{rand}}$
10. $u_{i,j,G+1} = x_{r_1j,G} + F \times (x_{r_2j,G} - x_{r_3j,G})$
11. **Else**
12. $u_{i,j,G+1} = x_{i,j,G}$
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**

Bảng A.2: Pseudo-code của 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. $j_{\text{rand}} = \text{randint}(1, D)$
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 $j == j_{\text{rand}}$ **then**
10. **If** $\text{rand}[0,1] > \text{threshold}$ **then**
11. Select randomly $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$
12. $u_{i,j,G+1} = x_{r_1,j,G} + F(x_{r_2,j,G} - x_{r_3,j,G})$
13. **Else**
14. Select randomly $r_1 \neq r_2 \neq \text{best} \neq i$
15. $u_{i,j,G+1} = x_{\text{best},j,G} + F(x_{r_1,j,G} - x_{r_2,j,G})$
16. **End if**
17. **Else**
18. $u_{i,j,G+1} = x_{i,j,G}$
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**
