

การศึกษาการควบคุม ZMP สำหรับหุ่นยนต์เดิน 2 ขาด้วยระบบควบคุมฟัซซีที่ใช้ฟังก์ชัน Sinc

A Study of ZMP Control for a Walking Biped Robot by the Sinc-function Fuzzy Controller

กิดชอบ ไวยสุศรี , ภาสกร จงสถิตย์วัฒนา

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 , โทร: 02-218-6983 แฟกซ์: 02-218-6955
E-mail: 47718076@student.netserv.chula.ac.th, prabhas@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงการศึกษาการควบคุมตำแหน่ง ZMP (Zero Moment Point) ของหุ่นยนต์เดิน 2 ขาโดยอาศัยการควบคุมการเคลื่อนไหวของส่วนลำตัวซึ่งแยกอิสระจากการควบคุมส่วนขาเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเดินได้อย่างมีเสถียรภาพบนพื้นเรียบและในบทความนี้เราจะได้นำเสนอระบบควบคุมแบบฟัซซีที่มีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบฟังก์ชัน sinc ซึ่งเป็นรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกที่ยังไม่เคยมีการนำมาใช้ในระบบควบคุมมาก่อน โดยจะมีการทดลองเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ P และแบบ PD ที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมแบบฟัซซีที่นำเสนอสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: หุ่นยนต์เดิน 2 ขา, Zero Moment Point, ระบบควบคุมแบบฟัซซี, ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟังก์ชัน sinc

Abstract

This paper presents the ZMP (Zero Moment Point) control for the walking biped by the trunk movement control, which decoupled from the legs movement control, to keep the biped walking stably on the flat surface. In this paper, we a fuzzy controller using sinc-function as the membership function. The sinc-function has never been used in the control application before. The proposed controller is compared with the standard P and PD controllers. The experimental results show that the proposed controller compared very well with the standard controllers. We also discuss the distinct feature of the sinc-function fuzzy controller.

Keywords: Biped Robot, Zero Moment Point, Fuzzy Control, Sinc Membership Function.

1. บทนำ

ในปัจจุบันวิทยาการทางด้านหุ่นยนต์กำลังได้รับการสนใจและมีการพัฒนาไปอย่างมากและการควบคุมหุ่นยนต์เดิน 2 ขาให้สามารถเดิน

ได้อย่างมีเสถียรภาพนั้นก็นับเป็นประเด็นหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างสูงด้วยความเชื่อที่ว่าหุ่นยนต์ที่จะมาอยู่กับมนุษย์ก็จะต้องมีลักษณะและการเคลื่อนไหวที่เหมือนกับมนุษย์นั่นเอง

โดยทั่วไปแล้วการควบคุมหุ่นยนต์เดิน 2 ขาให้สามารถเดินได้อย่างมีเสถียรภาพนั้นมักจะนิยมใช้การควบคุมตำแหน่งของจุด ZMP (Zero Moment Point) [1] ของหุ่นยนต์ให้อยู่ภายในขอบเขตของพื้นที่รองรับ (Support Polygon) ซึ่งก็คือพื้นที่ของฝ่าเท้าที่สัมผัสอยู่กับพื้น โดยที่จุด ZMP นี้สามารถหาได้จากค่าการอาศัยเซนเซอร์วัดแรง (Force Sensor) ที่ฝ่าเท้าของหุ่นยนต์หรือการคำนวณ [2],[3]

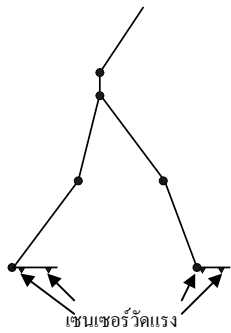
การควบคุมจุด ZMP ให้อยู่ภายในพื้นที่รองรับนั้นอาจทำได้โดยการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ทั้งตัว (Whole-body Control) ให้เหมาะสม [4] หรืออาจอาศัยการควบคุมการเคลื่อนที่ของส่วนลำตัวของหุ่นยนต์ซึ่งแยกอิสระจากการเคลื่อนไหวของส่วนขาเพื่อควบคุมหรือชดเชยให้จุด ZMP อยู่ภายในพื้นที่รองรับ [5] ซึ่งการควบคุมจุด ZMP โดยอาศัยการควบคุมการเคลื่อนที่ของส่วนลำตัวนั้นมีข้อดีคือเราสามารถออกแบบการเคลื่อนที่รวมทั้งระบบควบคุมของส่วนขาและส่วนลำตัวแยกจากกันได้ทำให้การออกแบบทำได้ง่ายขึ้นแต่ลักษณะการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์โดยรวมอาจดูไม่ต่อเนื่องสวยงามเท่ากับการควบคุมจุด ZMP โดยการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ทั้งตัว

ในบทความฉบับนี้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งของจุด ZMP โดยอาศัยการควบคุมการเคลื่อนที่ของส่วนลำตัวด้วยระบบควบคุม 3 แบบคือระบบควบคุมแบบ P, แบบ PD และแบบฟัซซี (Fuzzy Controller) ที่มีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบฟังก์ชัน sinc ($\sin(x)/x$) ซึ่งเป็นรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกที่ยังไม่เคยมีการนำมาใช้ในระบบควบคุมมาก่อน โดยที่ระบบควบคุมแบบฟัซซีที่มีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบฟังก์ชัน sinc นี้จะมีจุดเด่นอยู่ที่สามารถเรียนรู้ได้เร็วเมื่อนำมาใช้ในลักษณะของระบบฟัซซีแบบปรับตัว (adaptive fuzzy system) [6] ซึ่งน่าจะมีประโยชน์มากเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นระบบการควบคุมที่มีความสามารถในการเรียนรู้ (learnable control system) สำหรับควบคุมหุ่นยนต์

2. โครงสร้างของหุ่นยนต์เดิน 2 ขา

โครงสร้างของหุ่นยนต์เดิน 2 ขาที่จะใช้ในการจำลองการ

ทำงานมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในบทความฉบับนี้เราจะสนใจเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกับการเดิน (sagittal plane) เท่านั้น



ส่วนประกอบ	ความยาว (m)	น้ำหนัก (kg)
ลำตัว	0.35	3.0
สะโพก	0.05	0.5
ขาตอนบน	0.42	0.4598
ขาตอนล่าง	0.42	0.306
เท้า	0.25	0.3466

รูปที่ 1 โครงสร้างของหุ่นยนต์เดิน 2 ขาที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

โครงสร้างของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานนี้ได้ใช้โครงสร้างในส่วนขาตามตัวอย่างหุ่นยนต์ “Spring Flamingo” ที่มาพร้อมกับซอฟต์แวร์ Yobotics [7] ที่ใช้ในการจำลองการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ซึ่งโครงสร้างของหุ่นยนต์ “Spring Flamingo” เดิมนี้จะไม่มีส่วนลำตัวแต่จะมีส่วนสะโพกยาว 0.2 m หนัก 12 kg ดังนั้นเราจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนโดยการลดความยาวและน้ำหนักส่วนสะโพกลงและทำการใส่ข้อต่อและมวลในส่วนของลำตัวเพิ่มเข้าไป (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์มีข้อต่อทั้งหมด 7 ข้อคือ ข้อต่อลำตัว 1 ข้อ, ข้อต่อสะโพก 2 ข้อ, ข้อต่อหัวเข่า 2 ข้อและข้อต่อส่วนข้อเท้า 2 ข้อ นอกจากนี้ก็จะมีจำลองการคิดเซนเซอร์วัดแรงไว้ที่บริเวณสันเท้าและหัวแม่เท้าที่เท้าทั้ง 2 ข้างเพื่อใช้ในการหาจุด ZMP ด้วย

3. การควบคุมจุด ZMP โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนลำตัว

3.1 การหาจุด ZMP และจุด ZMP*

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนลำตัวหุ่นยนต์เพื่อให้จุด ZMP อยู่ภายในพื้นที่รองรับนั้น ขั้นแรกเราจะต้องทำการหาจุด ZMP จริงจากเซนเซอร์วัดแรงเสียก่อนซึ่งจุด ZMP (ในกรณีที่หุ่นยนต์เดินได้อย่างมีเสถียรภาพ) นั่นก็คือจุดศูนย์รวมแรงหรือ CoP (Center of Pressure) นั่นเอง ซึ่งหากเราให้จุดสันเท้าของขาที่สัมผัสพื้นเป็นจุดอ้างอิงในช่วงที่มีเท้าเดียวสัมผัสพื้น (Single-support Phase) และให้จุดสันเท้าของขาที่อยู่ด้านหลังเป็นจุดอ้างอิงในช่วงที่เท้าทั้งสองสัมผัสพื้น (Double-support Phase) (ดูรูปที่ 2) จะได้ว่าเราจะหาจุด ZMP ในแต่ละช่วงได้จากสมการ (1) และ (2)

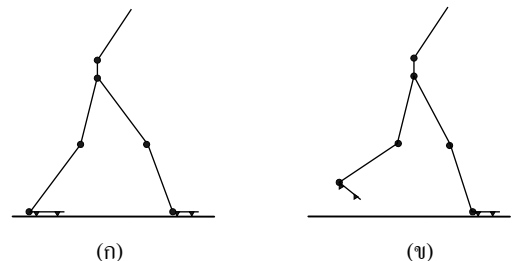
$$ZMP_{single} = \frac{r_{O-toe} f_{toe}}{f_{heel} + f_{toe}} \quad (1)$$

$$ZMP_{double} = \frac{\sum_j r_{O_j} f_j}{\sum_j f_j} \quad (2)$$

เมื่อ f_* คือแรงที่กระทำบนเซนเซอร์วัดแรง
 r_{O*} คือระยะจากจุดอ้างอิงจนถึงเซนเซอร์

แต่อย่างไรก็ตามในช่วงที่เท้าทั้งสองสัมผัสพื้นนั้นเราจะใช้เฉพาะค่า CoP ของเท้าที่อยู่ด้านหน้าเป็นค่าอ้างอิงแทนค่า ZMP ซึ่งจะทำให้เราลดการคำนวณในส่วนการหาระยะห่างระหว่างเท้าทั้งสองได้และทำให้การคำนวณหาค่า ZMP กลายเป็นการคำนวณหา CoP ของเท้าข้างเดียวทั้งในกรณีที่เท้าสัมผัสพื้นเพียงข้างเดียวและทั้งสองข้าง นอกจากนี้เรายังจะใช้ค่า CoP แบบ Normalize แทนค่า CoP ปรกติซึ่งในที่นี้จะขอเรียกเป็น ZMP* ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3) โดยค่าที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง [0,1] นั่นเอง

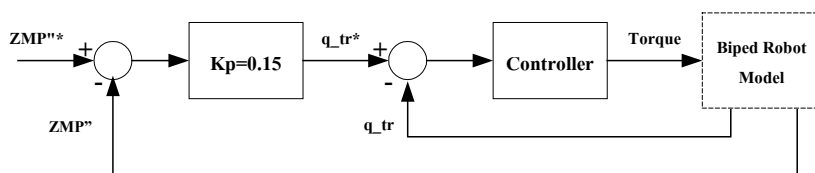
$$ZMP^* = \frac{f_{toe}}{f_{heel} + f_{toe}} \quad (3)$$



รูปที่ 2 (ก) ช่วงที่มีเท้าเดียวสัมผัสพื้น (ข)ช่วงที่เท้าทั้งสองสัมผัสพื้น

3.2 ระบบควบคุม

ในการควบคุมจุด ZMP (ZMP*) ด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนลำตัวหุ่นยนต์นั้นเราจะกำหนดให้มีระบบควบคุมต่ออนุกรมกัน 2 ชุดดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่ระบบควบคุมชุดแรกจะเป็นแบบ P ซึ่งมีค่า $K_p=0.15$ โดยจะรับสัญญาณขาเข้าเป็นค่าผิดพลาดระหว่างค่า ZMP* กับค่า ZMP** จริงและให้สัญญาณออกเป็นค่ามุมของลำตัวคำสั่ง (q_{tr}^*) ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าผิดพลาดเทียบกับค่ามุมของลำตัวจริง (q_{tr}) เพื่อเป็นสัญญาณเข้าให้กับระบบควบคุมชุดที่ 2 (ส่วน Controller ในรูปที่ 3) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของลำตัวโดย



รูปที่ 3 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

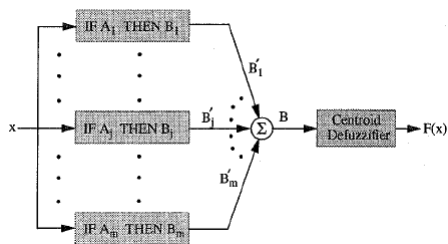
ให้สัญญาณขาออกเป็นค่าแรงบิด (Torque) คำสั่งของข้อต่อลำตัว ซึ่งในบทความฉบับนี้เราจะทดลองระบบควบคุม(ชุดที่ 2) 3 แบบคือระบบควบคุมแบบ P, แบบ PD และแบบฟัซซีที่มีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบฟังก์ชัน sinc

4. ระบบควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Control System)

ระบบฟัซซี (Fuzzy System) ที่เราจะใช้ในการสร้างระบบควบคุมในบทความนี้จะเป็นแบบ SAM (Standard Additive Model) [6] ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4 โดยที่ระบบจะให้ค่าขาออก F(x) ดังสมการ (4)

$$F(x) = \text{Centroid} \left(\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) B_j \right) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) V_j c_j}{\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) V_j} \quad (4)$$

- เมื่อ m คือจำนวนฟังก์ชันสมาชิก
- w_j คือน้ำหนักของกฎ (Rule weight)
- $a_j(x)$ คือระดับความเป็นสมาชิกของ x
- V_j คือปริมาตรหรือพื้นที่ของ B_j
- c_j คือจุดรวมมวล (Centroid) ของ B_j

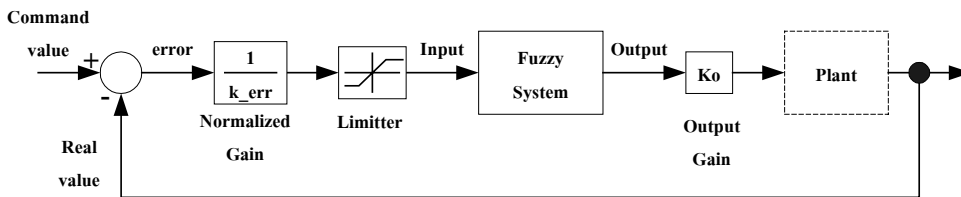


รูปที่ 4 ระบบฟัซซีแบบ SAM

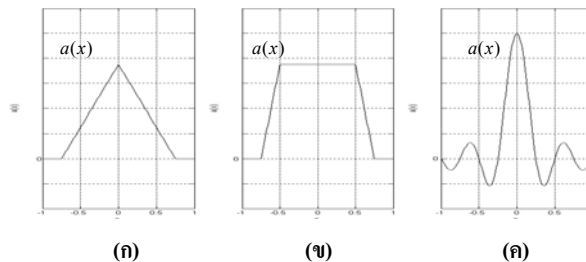
ระบบฟัซซีโดยปรกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) แบบสามเหลี่ยม (Triangle) หรือสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid) ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ แต่ในบทความฉบับนี้จะทดลองใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟังก์ชัน sinc ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5(ค) ซึ่งฟังก์ชัน sinc นี้จะคำนวณตามสมการ (5)

$$\text{sinc}\left(\frac{x-m}{d}\right) = \frac{\sin\left(\frac{x-m}{d}\right)}{\left(\frac{x-m}{d}\right)} \quad (5)$$

- เมื่อ m คือค่าตำแหน่งกึ่งกลางฟังก์ชัน sinc
- d คือค่าความกว้างของฟังก์ชัน sinc

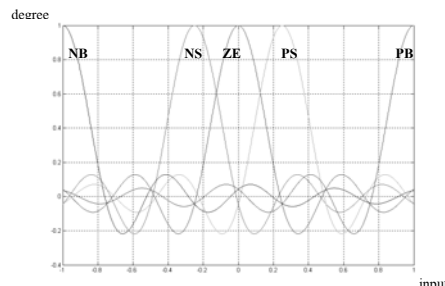


รูปที่ 6 ระบบควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้ในการทดลอง

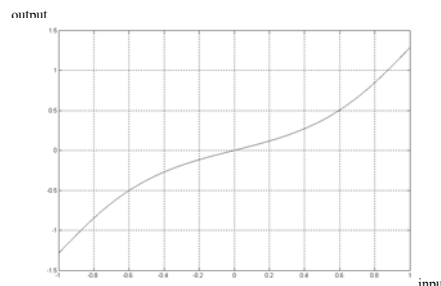


รูปที่ 5 ฟังก์ชันสมาชิก (ก)แบบสามเหลี่ยม (ข)แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (ค)แบบฟังก์ชัน sinc

ระบบควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้ในการทดลองจะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะมีค่าอัตราขยายสัญญาณขาออก (Ko) และค่าอัตราขยายสำหรับการ Normalize สัญญาณขาเข้า (k_err) รวมทั้งมีการจำกัดให้ค่าขาเข้าอยู่ในช่วง [-1,1] ด้วย ส่วนลักษณะของฟังก์ชันสมาชิกที่ใช้ในนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 7 ส่วนลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าขาเข้าและขาออกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 ในที่นี่เราจะใช้ฟังก์ชันสมาชิกจำนวน 5 ชุดคือ NB, NS, ZE, PS, PB ซึ่งมีค่ากึ่งกลาง (m_j) อยู่ที่ -1, -0.25, 0, 0.25, 1 ตามลำดับ, จุดรวมมวล (c_j) มีค่าเท่ากับ m_j , ความกว้าง (d_j) มีค่าเท่ากับ $0.75/\pi$ และพื้นที่ (V_j) จะให้เป็น 1 ทั้งหมด ส่วนค่าอัตราขยาย k_{err} และ K_o นั้นเราเลือกให้มีค่าเท่ากับ 0.6 และ 120 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ลักษณะของฟังก์ชันสมาชิกที่ใช้



รูปที่ 8 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าขาเข้าและขาออกที่ใช้

5. การทดลอง

ในการทดลองเราได้ทำการตั้งค่า ZMP* คำสั่งแยกตามช่วงการเดินดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ช่วงที่เท้าสัมผัสพื้นทั้ง 2 ข้าง เราจะพยายามให้ ZMP* เคลื่อนไปอยู่ทางด้านหน้าของเท้าที่อยู่ข้างหลังเพื่อพยายามยกเท้าจากนั้นเมื่อเท้าหลังกำลังจะยกจากพื้นเราก็จะให้ ZMP* เคลื่อนไปอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของเท้าหน้าและเมื่อเท้าหลังยกขึ้นแล้วเราก็จะพยายามบังคับให้ ZMP* อยู่ที่บริเวณกึ่งกลางเท้าที่สัมผัสพื้นจนกระทั่งถึงช่วงที่หุ่นยนต์ยืดอกเพื่อวางเท้าที่แกว่งเราก็จะให้ ZMP* เคลื่อนไปอยู่ทางด้านหน้าของเท้าที่สัมผัสพื้นเพื่อความต่อเนื่องในการวางเท้า

ตารางที่ 1 ค่า ZMP* คำสั่ง

State Index (เลขกำกับ)	คำอธิบาย	ค่า ZMP**
Support (0)	ช่วงที่เท้าสัมผัสพื้น	0.6
Toe-off (1)	ช่วงที่กำลังจะยกเท้าจากพื้น	0.35
Swing (2)	ช่วงแกว่งขา	0.5
Straight (3)	ช่วงยืดอก(วางเท้า)	0.95

ส่วนค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมมุลำดับแบบต่างๆนั้น เราจะใช้ค่าดังนี้ ระบบควบคุมแบบพีซีเราจะใช้ค่าตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4 ส่วนระบบควบคุมแบบ P และแบบ PD นั้นเราจะใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2 โดยในการควบคุมแบบ PD เราจะใช้เฉพาะค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำตัวแทนค่าดิฟเฟอเรนเชียลของค่าผิดพลาด (de/dt) ซึ่งจะทำให้เราได้สมการของระบบควบคุมแบบ PD ดัง (6)

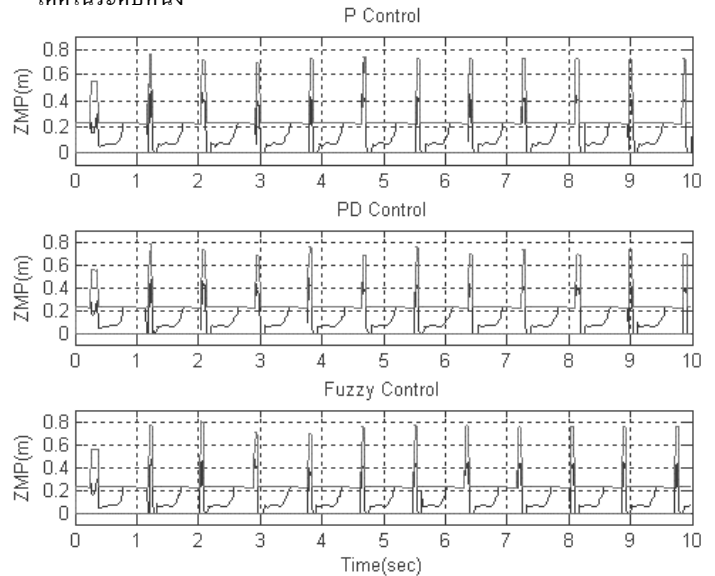
$$Out(\tau) = Kp.(q_{tr}^* - q_{tr}) - Kd.\dot{q}_{tr} \quad (6)$$

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบต่างๆ

ระบบควบคุม	ค่าพารามิเตอร์
P	Kp=120
PD	Kp=115, Kd=0.5
Fuzzy	ตามหัวข้อ 4

ในส่วนของการควบคุมส่วนขา นั้นเราจะใช้ระบบควบคุมเดิมที่มีมาพร้อมกับตัวอย่างอย่างหุ่นยนต์ “Spring Flamingo” ซึ่งจะใช้การควบคุมแบบ PD ในแต่ละข้อต่อของส่วนขาโดยจะมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมไปตามจังหวะการเดินกล่าวคือเป็นการใช้การคุมแบบ PD ที่ปรับค่าได้ตามที่กำหนดไว้ (Gain Scheduling)

ผลการจำลองการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9-13 โดยในรูปที่ 9 จะแสดงตำแหน่ง ZMP จริงของหุ่นยนต์ซึ่งตำแหน่งของ ZMP ที่จะทำให้หุ่นยนต์เดินได้อย่างมีเสถียรภาพนั้นจะต้องอยู่ในขอบเขตของเส้นสีเทาซึ่งจากรูปจะเห็นว่าการควบคุมทั้ง 3 แบบสามารถควบคุมตำแหน่งของจุด ZMP ให้อยู่ภายในขอบเขตของเส้นสีเทาได้อันเป็นการแสดงว่าหุ่นยนต์สามารถเดินได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่วนรูปที่ 10-12 นั้นจะแสดงผลการควบคุมจุด ZMP* ของระบบควบคุมแต่ละแบบซึ่งจากรูปพบว่าระบบควบคุมทั้ง 3 แบบสามารถควบคุมให้จุด ZMP* เป็นไปตามคำสั่งได้ดีในระดับหนึ่ง



รูปที่ 9 ตำแหน่ง ZMP ของการควบคุมแบบต่างๆ

รูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงค่ากำลังงาน (Power) ที่ใช้ในการเคลื่อนไหวส่วนลำตัวของหุ่นยนต์ของระบบควบคุมทั้ง 3 แบบซึ่งค่ากำลังงานนี้คำนวณได้จากสมการ (7) และเราสามารถนำกราฟของกำลังงานมาคำนวณเป็นค่าพลังงาน (Energy) ที่สูญเสียไปได้ตามสมการ (8) ซึ่งเราจะสามารถคำนวณค่าพลังงานที่สูญเสียไปของแต่ละระบบควบคุมได้ดังตารางที่ 3

$$Power = \tau.\dot{q}_{tr} \quad (7)$$

$$Energy = \int Power.dt \quad (8)$$

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานสูญเสียของระบบควบคุมแบบต่างๆ

ระบบควบคุม	ค่าพลังงานสูญเสีย(J)
P	9.56
PD	4.66
Fuzzy	7.23

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมแบบ PD นั้นทำให้การเคลื่อนที่ของส่วนลำตัวใช้พลังงานต่ำที่สุด ส่วนระบบควบคุมแบบพีชซีนั้นใช้พลังงานมากกว่าระบบควบคุมแบบ PD แต่น้อยกว่าแบบ P แต่ระบบควบคุมแบบพีชซีใช้สัญญาณขาเข้าเป็นค่าผิดพลาดของมุมของลำตัวเพียงอย่างเดียวในขณะที่ระบบควบคุมแบบ PD ต้องใช้ข้อมูลความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำตัวด้วย

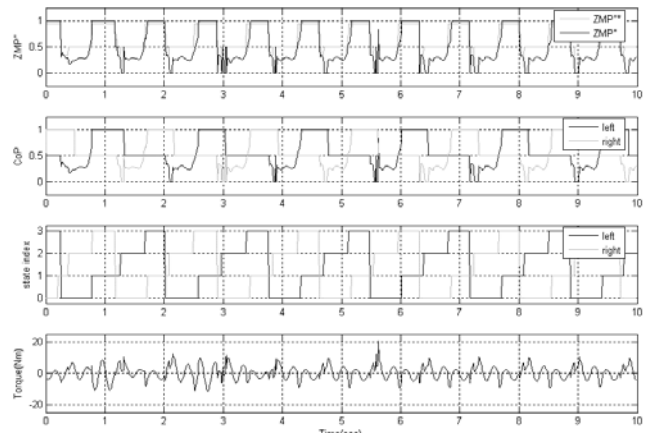
8. สรุป

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอถึงการควบคุมจุด ZMP (ZMP*) ของหุ่นยนต์เดิน 2 ขาโดยการควบคุมการเคลื่อนไหวส่วนลำตัวของหุ่นยนต์ด้วยระบบควบคุม 3 แบบคือระบบควบคุมแบบ P, แบบ PD และแบบพีชซีที่มีฟังก์ชันสมาธิเป็นแบบฟังก์ชัน sinc ซึ่งจากการทดลองพบว่าระบบควบคุมทั้ง 3 แบบสามารถควบคุมให้จุด ZMP* เป็นไปตามคำสั่งได้ดีในระดับหนึ่งและสามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถเดินได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยที่ระบบควบคุมแบบ PD นั้นทำให้การเคลื่อนที่ของส่วนลำตัวใช้พลังงานต่ำที่สุด ส่วนระบบควบคุมแบบพีชซีนั้นใช้พลังงานมากกว่าระบบควบคุมแบบ PD แต่น้อยกว่าแบบ P โดยที่ระบบควบคุมแบบพีชซีใช้สัญญาณขาเข้าเป็นค่าผิดพลาดของมุมของลำตัวเพียงอย่างเดียวในขณะที่ระบบควบคุมแบบ PD ต้องใช้ข้อมูลความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำตัวด้วย

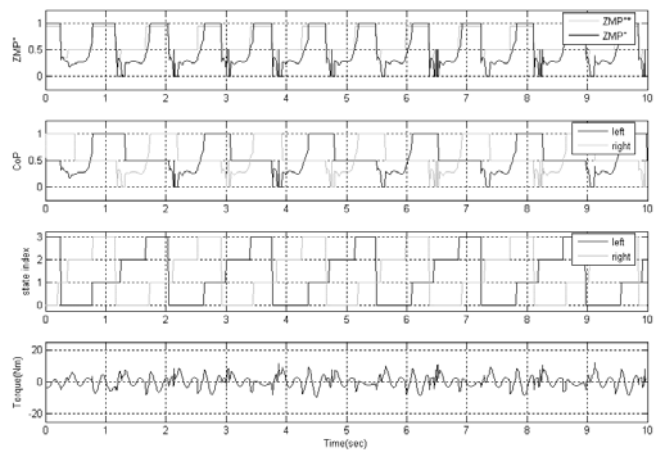
เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Vukobratovic, B.Borovac, "ZERO-MOMENT POINT – THIRTY FIVE YEARS OF ITS LIFE," International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 1, No. 1, p.157–173, 2004.
- [2] K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, A. Kawamura, "A Study on the Zero Moment Point Measurement for Biped Walking Robots," Proc. IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, pp.431-436, 2002.
- [3] Y. Bachar, "Developing Controllers for Biped Humanoid Locomotion," Master of Science Thesis, School of Informatics, University of Edinburgh, 2004.
- [4] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K.Tanie, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 17, No. 3, June 2001.
- [5] "Prescribed Synergy Method-Based Hybrid Intelligent Gait Synthesis For Biped Robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation, pp.1384-1389, 1999.
- [6] S. Mitaim, B. Kosko, "What is the Best Shape for a Fuzzy Set in Function Approximation?," Proc. 5th IEEE Int. Conf. Fuzzy System (FUZZ-96), Vol.2, pp. 1237-1243, Sept. 1996.

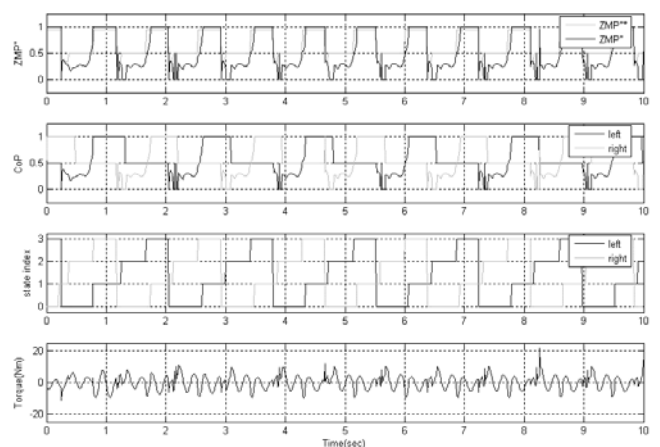
[7] <http://www.yobotics.com>



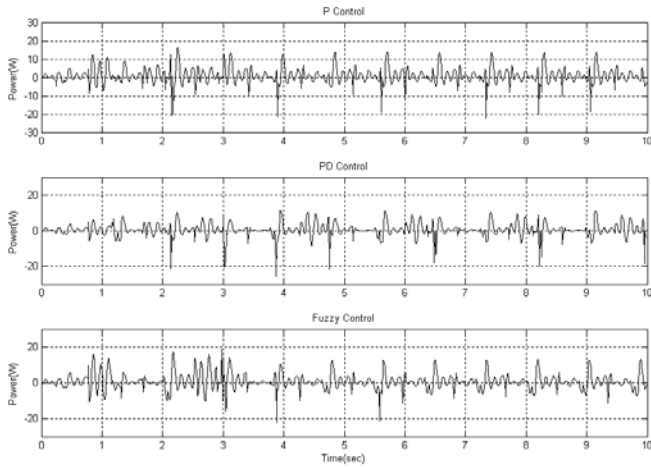
รูปที่ 10 ผลการทดลองของการควบคุมแบบ P



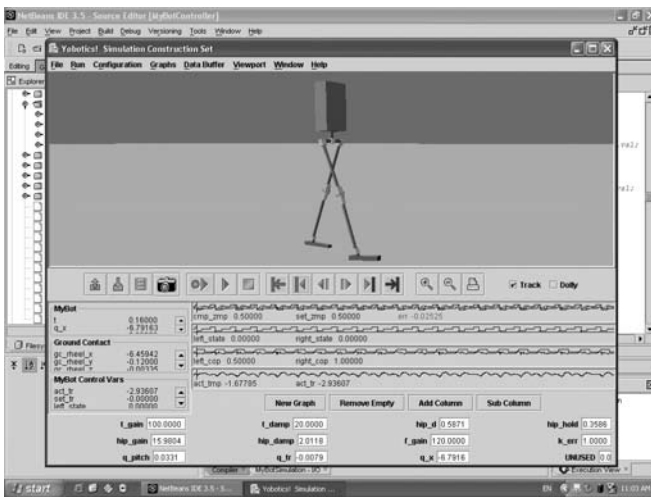
รูปที่ 11 ผลการทดลองของการควบคุมแบบ PD



รูปที่ 12 ผลการทดลองของการควบคุมแบบพีชซี



รูปที่ 13 กราฟค่ากำลังงาน ของการควบคุมแบบต่างๆ



รูปที่ 14 หน้าจอของซอฟต์แวร์ Yobotics ขณะจำลองการทำงาน