

# การวิเคราะห์โครงสร้างทางกลและเสถียรภาพ ของหุ่นยนต์เดินสองขา

ชิต เหล่าวัฒนา<sup>1</sup> จิตติศักดิ์ จันทร์พรม<sup>2</sup> และ ไพศาล สุวรรณเทพ<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

## บทคัดย่อ

บทความนี้เสนองานวิจัยพื้นฐานเชิงวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างทางกลและเสถียรภาพของหุ่นยนต์เดินสองขา (humanoid robot) ที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นที่ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีโบ้) ความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) และทำการเดิน (gait) โดยใช้ขาเพียงสองข้างส่งผลให้เกิดความลำบากซับซ้อนในการควบคุมเสถียรภาพในการเดินแบบพลศาสตร์ (dynamic walking) จึงเริ่มต้นโดยทำการวัดตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งเชิงมุมของข้อต่อต่างๆ ของขามนุษย์เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการเดินที่นำไปสู่การออกแบบทางเรขาคณิตของขาหุ่นยนต์และระบบควบคุม นอกจากนี้ยังได้เสนอการวิเคราะห์ทำการเดินของหุ่นยนต์ของแต่ละช่วงที่เกิดขึ้นขณะทำการก้าวเดินซึ่งมีความสัมพันธ์กับเสถียรภาพในด้านจลศาสตร์ (kinematics) และในด้านพลศาสตร์ (dynamics) ท้ายสุดแบบจำลองทางพลศาสตร์การทรงตัวของหุ่นยนต์หนึ่งขาบนระนาบ (PTIP) ซึ่งเป็นชุดทดสอบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับของสถานะ (state feedback) เมื่อทำการรบกวนระบบให้เสียสมดุลพบว่าระบบใช้เวลา 12 วินาทีในการกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นได้ทำการเพิ่มขนาดมวลของระบบเป็น 1.7 เท่าของมวลเริ่มต้นและทำการทดลองรบกวนระบบอีกครั้งพบว่าระบบมีการสั่นมากขึ้นและกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้าลงโดยใช้เวลาถึง 30 วินาที

<sup>1</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

<sup>2</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

## **Analysis of Mechanical Structure and Stability for a Humanoid Robot**

**Djitt Laowattana**<sup>1</sup> **Thitisak Chanprom**<sup>2</sup> and **Paisarn Suwanthep**<sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

---

### **Abstract**

This paper describes our preliminary research in analyzing mechanical structure and its stability of a humanoid robot, being designed and built at FIBO. Mobility and gaits of such a robot are governed by only two legs, leading to high complexity in dynamic control. We have thoroughly measured positions, velocities and accelerations of each joint of human legs in order to understand their profiles. We are in a process of designing geometry of the robot legs, based on such measured profiles. In addition, we have proposed robot gaits with related analysis on kinematic and dynamic stability. Finally, a planar two degree of freedom inverted pendulum (PTIP) has been built as a testbed to implement the state feedback controller. PTIP is considered a preliminary balancing prototype. When the system is disturbed, it can recover its stability under the time about 12 seconds. After that we increase 1.7 times of original mass to the system and disturbed it again, the system has more vibrate and slow response, which use a time to recover its stability about 30 seconds.

---

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering.

<sup>2</sup> Graduate Student, Department of Mechanical Engineering.

## 1. บทนำ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติจึงเข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรม เทคโนโลยีหุ่นยนต์ (robotics technology) โดยหุ่นยนต์ส่วนใหญ่เป็นแขนกลชนิดยึดอยู่กับที่ (fixed robot) แต่เนื่องจากการผลิตบางประเภทต้องการการขนย้าย เช่น การขนถ่ายวัตถุดิบที่มีความร้อนสูง การนำวัตถุเข้าสู่สายการผลิตหรือการสำรวจในพื้นที่อันตราย เป็นต้น จึงต้องทำหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ (mobile robot) มาใช้กับงานดังกล่าว โดยทั่วไปหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ที่นิยมนำมาใช้เป็นหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ด้วยล้อ (wheeled robot) และหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ด้วยขา (walking robot)

หุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ด้วยล้อที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีตั้งแต่ล้อเดี่ยวไปจนถึงหลายล้อ สามารถเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ค่อนข้างราบเรียบได้ดี แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงเกินกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อได้ ทำให้หุ่นยนต์แบบล้อไม่เหมาะสมกับภูมิประเทศที่สลับซับซ้อนและขรุขระ ดังนั้นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาจึงมีความเหมาะสมกับภูมิประเทศดังกล่าวมากกว่า โดยสามารถเคลื่อนที่ได้ในภูมิประเทศที่มีความขรุขระ พื้นที่ต่างระดับ พื้นที่ที่เป็นหลุมเป็นบ่อ และยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านหรือข้ามสิ่งกีดขวางได้ (traversability) ลักษณะเฉพาะคือการเคลื่อนที่แบบค่อยเป็นค่อยไป (incremental motion) ในทิศทางใดก็ได้ หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาที่ทำการวิจัยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีจำนวนตั้งแต่หนึ่งขาเป็นต้นไป ยิ่งจำนวนขาน้อยยิ่งส่งผลให้ความคล่องตัวในการเคลื่อนที่มีมากขึ้นเท่านั้น

หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาสองขา (humanoid robot) มีความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ได้ดีกว่าหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาแบบอื่น แต่เนื่องจากหุ่นยนต์สองขามีส่วนประกอบของโครงสร้างหลายชิ้นส่วนจึงทำให้การควบคุมให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพทั้งขณะที่อยู่กับที่และขณะก้าวเดินเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากและสลับซับซ้อน ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยการควบคุมดังกล่าว

## 2. งานวิจัยที่มีมาก่อน

สำหรับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเดินโดยใช้ขาสองขาได้มีงานวิจัย พัฒนา ออกแบบและสร้างกันมาก่อนหน้านี้แล้วดังต่อไปนี้

Hemami และ Wyman [1] ได้ทำการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์สองขาเคลื่อนที่บนระนาบโดยใช้วิธีของลากรางจ์ (Lagrange) และทำการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ด้วยวิธีป้อนกลับสถานะ (state feedback control)

Muir และ Neuman [2] ได้คิดวิธีการใหม่เพื่อหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อมีชื่อว่ายูเรนัส (Uranus) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่มีกลไกหลายส่วนประกอบ (multibody robotic mechanism) โดยอาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian dynamics) หลักการกระจายของแรง (force/torque propagation) และการวิเคราะห์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนแต่ละข้อต่อของระบบ ซึ่งการหาคำตอบของระบบได้ใช้หลักการวิเคราะห์สมการพีชคณิตเชิงเส้น (linear algebraic equations) นอกจากนี้ยังได้แสดงการใช้วิธีการดังกล่าวกับหุ่นยนต์สองขาที่พิจารณาบนระนาบ

Takanishi และคณะ [3]-[5] ได้วิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์และสร้างหุ่นยนต์สองขาชื่อ WABIAN โดยการทรงตัวของหุ่นยนต์ใช้หลักการควบคุมการเคลื่อนไหวของลำตัว (trunk motion) และการควบคุมการวางตำแหน่งเท้าของ หุ่นยนต์ เพื่อให้จุดโมเมนต์รวมเป็นศูนย์ (Zero Moment Point :ZMP) อยู่ในบริเวณพื้นที่ของฝ่าเท้า ต่อมาได้ทำการออกแบบกลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยใช้สปริงเพื่อเลียนแบบการทำงานของกล้ามเนื้อมนุษย์

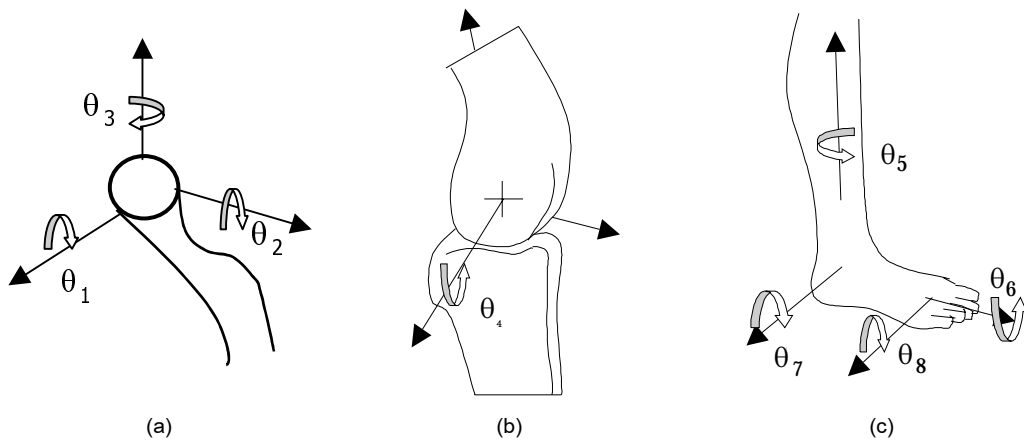
Shih และ Gruver [6] ทำการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์สองขาที่มีจำนวน 12 องศาความเป็นอิสระ โดยพิจารณาการควบคุมในช่วงที่ขาทั้งสองข้างติดอยู่กับพื้นและใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับของสถานะแบบเชิงเส้น (linear state feedback) ต่อมา Mitobe และคณะ [7] ได้ทดสอบการควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นของสถานะ (state feedback linearization) กับหุ่นยนต์สองขาที่มีการเคลื่อนที่เฉพาะระนาบด้านข้าง Kajita และ Tani [8] สร้างหุ่นยนต์สองขาชื่อ Meltran 2 ที่มีจำนวนหกองศาความเป็นอิสระและพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้ทฤษฎี linear inverted pendulum mode ซึ่งพิจารณาจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์อยู่ที่บริเวณสะโพกและไม่พิจารณามวลของขาทั้งสองข้าง ซึ่งเมื่อหุ่นยนต์ยืนหรือเดินก็สามารถอาศัยหลักการควบคุมการทรงตัวเช่นเดียวกับ inverted pendulum

Hirai และคณะ [9] ทำการสร้างหุ่นยนต์สองขาที่มีชื่อว่า Honda Humanoid Robot ซึ่งมีโครงสร้างและมีความสามารถในการเคลื่อนที่คล้ายคนมากที่สุด นอกจากนั้นยังสามารถรักษาความสมดุลแบบพลศาสตร์ (dynamic stability) ขณะเดินแบบปกติ เดินขึ้นบนพื้นเอียง เดินบนพื้นผิวขรุขระและเดินขึ้นลงบันได การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถทำได้โดยการวางแผนการเดินโดยการโปรแกรมล่วงหน้าและจากการใช้วิธีควบคุมทางไกล อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการสร้างหุ่นยนต์ของบริษัทฮอนด้า สูงมากถึง 300 ล้านดอลลาร์สหรัฐ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ด้านโครงสร้างและการควบคุมของหุ่นยนต์เดินสองขาเพื่อสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนจนสามารถออกแบบระบบควบคุมราคาถูกลงได้ นอกจากนี้ศาสตร์ทางด้านการพัฒนาแบบมองเห็นได้ (vision system) ให้สามารถทำงานร่วมกับการรักษาสมดุลทางพลศาสตร์ยังเป็นเรื่องที่ทางบริษัทฮอนด้าไม่ยอมเปิดเผย ในบทความนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์พื้นฐานด้านโครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบขาตั้งกล่าว

### 3. การวิเคราะห์หองศาอิสระของมนุษย์

สิ่งสำคัญที่ทำให้มนุษย์เคลื่อนที่ได้คือการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อต่อบนขาซึ่งประกอบด้วยข้อต่อส่วนของสะโพก ข้อต่อส่วนของหัวเข่า ข้อต่อส่วนของข้อเท้าและนิ้วเท้า แรงบิดของแต่ละข้อตอดังกล่าวขณะเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์ต่อกันส่งผลให้เกิดเสถียรภาพในการเดินของมนุษย์ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะเชิงโครงสร้างในแต่ละส่วนพบว่าข้อต่อส่วนสะโพกมีลักษณะเป็นทรงกลม (ball joint) เมื่ออ้างอิงกับพิกัดการเคลื่อนที่พบว่าข้อต่อส่วนสะโพกสามารถหมุนได้สามองศาอิสระ ( $\theta_a : a = 1,2,3$ ) ดังรูปที่ 3 (a)

สำหรับข้อต่อส่วนหัวเข่า จุดต่อของข้อมีลักษณะเป็นทรงกลมสองลูกประกอบเข้าด้วยกันทำให้การเคลื่อนที่ถูกรับค้ำให้สามารถเคลื่อนที่ได้เพียงหนึ่งองศาอิสระ ( $\theta_4$ ) ดังรูปที่ 3 (b)



รูปที่ 3 จำนวนองศาอิสระของการหมุนของข้อต่อ

- (a) ข้อต่อสะโพก
- (b) ข้อต่อหัวเข่า
- (c) ข้อต่อข้อเท้าและนิ้วเท้า

ในส่วนของข้อเท้ามีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับสะโพกคือสามารถเคลื่อนที่ได้สามองศาอิสระ ( $\theta_b : b = 5,6,7$ ) และสุดท้ายคือข้อต่อในส่วนของนิ้วเท้า ซึ่งถูกพิจารณาให้มีการเคลื่อนที่หนึ่งองศาอิสระ ( $\theta_8$ ) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่านิ้วเท้าทุกนิ้วมีการเคลื่อนที่เหมือนกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 (c)

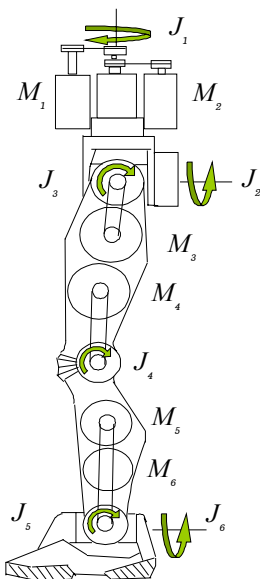
จากทั้งหมดที่ได้ทำการวิเคราะห์มาข้างต้นพบว่าในขาหนึ่งข้างของมนุษย์ประกอบด้วยแปดองศาอิสระของการหมุนซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ของมนุษย์มีความคล่องแคล่วสูง แต่ในทางออกแบบกลไกการเดินและการควบคุมของหุ่นยนต์สองขาถือว่ามีจำนวนองศาอิสระเกินความจำเป็นในการเคลื่อนที่บนปริภูมิ (space) และยากต่อการควบคุม ดังนั้นการกำหนดจำนวนองศาอิสระเพื่อให้หุ่นยนต์เดินได้เสมือนมนุษย์จึงมีผลในการออกแบบกลไกทางกลและการควบคุมของหุ่นยนต์สองขา

### 3.1 การออกแบบกลไกการเดินของหุ่นยนต์สองขา

ในการออกแบบหุ่นยนต์ให้สามารถเดินได้เสมือนมนุษย์โดยใช้จำนวนองศาอิสระดังกล่าวข้างต้นพบว่า มีข้อจำกัดด้านการออกแบบ เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน ข้อต่อต่างๆ มีอยู่อย่างจำกัด รวมถึงข้อจำกัดทางด้านน้ำหนักของหุ่นยนต์ กระบวนการผลิต การประมวลผลและการควบคุม ดังนั้นผู้เขียนจึงออกแบบหุ่นยนต์ให้มีองศาอิสระของข้อต่อในขาหนึ่งข้างทั้งหมดหกองศาอิสระ ในส่วนนี้ได้ต่างไปจากมนุษย์คือได้ตัดส่วนของนิ้วเท้า และส่วนของการหมุนรอบข้อเท้าออกไป ทั้งนี้หุ่นยนต์ยังสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริภูมิ เนื่องจากองศาอิสระที่มีอยู่เท่ากับองศาที่ใช้ในการทำงาน การออกแบบให้หุ่นยนต์เสมือนมนุษย์ทุกประการนั้น มีความเป็นไปได้ในอนาคตเมื่อมีความรู้ ประสบการณ์ และเทคโนโลยีเพียงพอ

จากการศึกษาของสภาวะการเคลื่อนที่ของมนุษย์และทฤษฎีทางด้านหุ่นยนต์ ผู้เขียนได้ข้อสรุปในการออกแบบขาหนึ่งข้างของหุ่นยนต์ให้มีหกองศาอิสระดังรูปที่ 4 กำหนดให้  $M$  แทนมอเตอร์กระแสตรง โดย  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบทั่วไป ส่วน  $M_3$  ถึง  $M_6$  เป็นมอเตอร์แบบพิเศษ มีลักษณะบาง แต่มีความกว้างเป็นพิเศษ (ultra slim type DC motor) และมีอัตราส่วนกำลัง เมื่อเทียบกับน้ำหนักค่อนข้างสูงจึงมีความเหมาะสมที่จะทำการติดตั้งในขาที่มีพื้นที่จำกัด และ  $J$  แทนข้อต่อหรือองศาอิสระของหุ่นยนต์ โดยข้อต่อ  $J_1, J_3, J_4$  และ  $J_5$  ถูกส่งถ่ายกำลังผ่านสายพานไปยังชุดเฟืองฮาร์โมนิก (Harmonic gear) แต่ข้อต่อ  $J_2$  และ  $J_6$  ไม่สามารถทำอย่างนั้นได้เนื่องจากปัญหาทางด้านข้อจำกัดในการติดตั้งมอเตอร์ ซึ่งการออกแบบโครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์สองขานี้ มุ่งเน้นให้มีรูปทรงเหมือนมนุษย์มากที่สุด ดังนั้นผู้เขียนจึงได้ออกแบบการส่งกำลังไปยังข้อต่อ  $J_2$  ถูกขับผ่านข้อต่อ  $J_1$  และข้อต่อ  $J_6$  ถูกขับผ่านข้อต่อ  $J_5$  โดยใช้สายพานและเฟืองดอกจอก (Bevel gear)

วัสดุที่ใช้ในการสร้างเป็นอลูมิเนียมแผ่นออกแบบให้ได้รูปร่างดังรูปที่ 4 ในส่วนของเท้า มียางกันกระแทกและมีอุปกรณ์ตรวจวัดแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่เท้า



รูปที่ 4 แนวความคิดด้านกลไกทางกลและจำนวนองศาอิสระของหุ่นยนต์สองขาที่จะสร้างขึ้นที่ FIBO

## 4. การหาตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งเชิงมุมของข้อต่อ

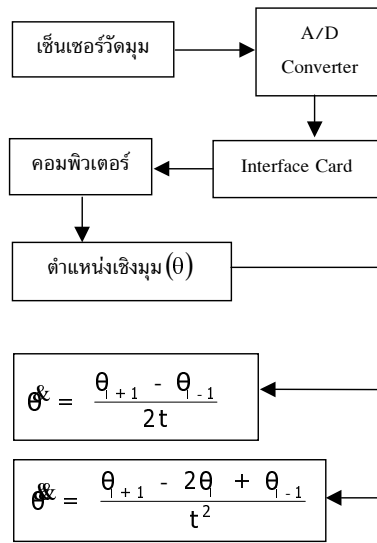
### 4.1 เครื่องมือวัด

ความจำเป็นที่ต้องทำการวัดการเคลื่อนที่ข้อต่อในส่วนต่างๆ ของมนุษย์เนื่องจากต้องการสร้างหุ่นยนต์ที่มีการเดินคล้ายมนุษย์ ในหนึ่งวงรอบการเดินของมนุษย์ (gait cycle) สามารถแบ่งช่วงการเดินออกเป็นสองช่วงได้แก่ ช่วงที่เท้ารับภาระด้วยเท้าทั้งสองเท้า (double support phase) และช่วงที่เท้ารับภาระแบบเท้าเดียว (single support phase) ช่วงที่เท้ารับภาระด้วยเท้าทั้งสองเท้าเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 20 ของวงรอบการเดินและช่วงเท้าที่รับภาระแบบเท้าเดียวเกิดขึ้นประมาณแปดร้อยละ 80 ของวงรอบการเดิน โดยในช่วงนี้ทำอีกข้างต้องแกว่งไปตำแหน่งใหม่ขณะก้าวเดิน การออกแบบเครื่องมือวัดต้องสามารถทำให้ผู้สวมใส่เดินได้อย่างปกติ อีกทั้งมุมที่จะทำการวัดต้องชัดเจนโดยอ้างอิงกับองศาอิสระของหุ่นยนต์ที่สำคัญทั้งหมดแปดองศาอิสระดังแสดงดังรูปที่ 5

ตัวตรวจวัดการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อต่อต่างๆ ที่ใช้คือ โพเทนโซมิเตอร์ จากนั้นแปลงสัญญาณแบบต่อเนื่อง (analog) ให้เป็นแบบเป็นช่วง (digital) และเชื่อมโยงข้อมูลกับคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล หลังจากนั้นได้นำค่าที่ได้ไปคำนวณอนุพันธ์เทียบกับเวลาเพื่อหาความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุม ดังแสดงการทำงานในรูปที่ 6



รูปที่ 5 เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของข้อต่อมนุษย์

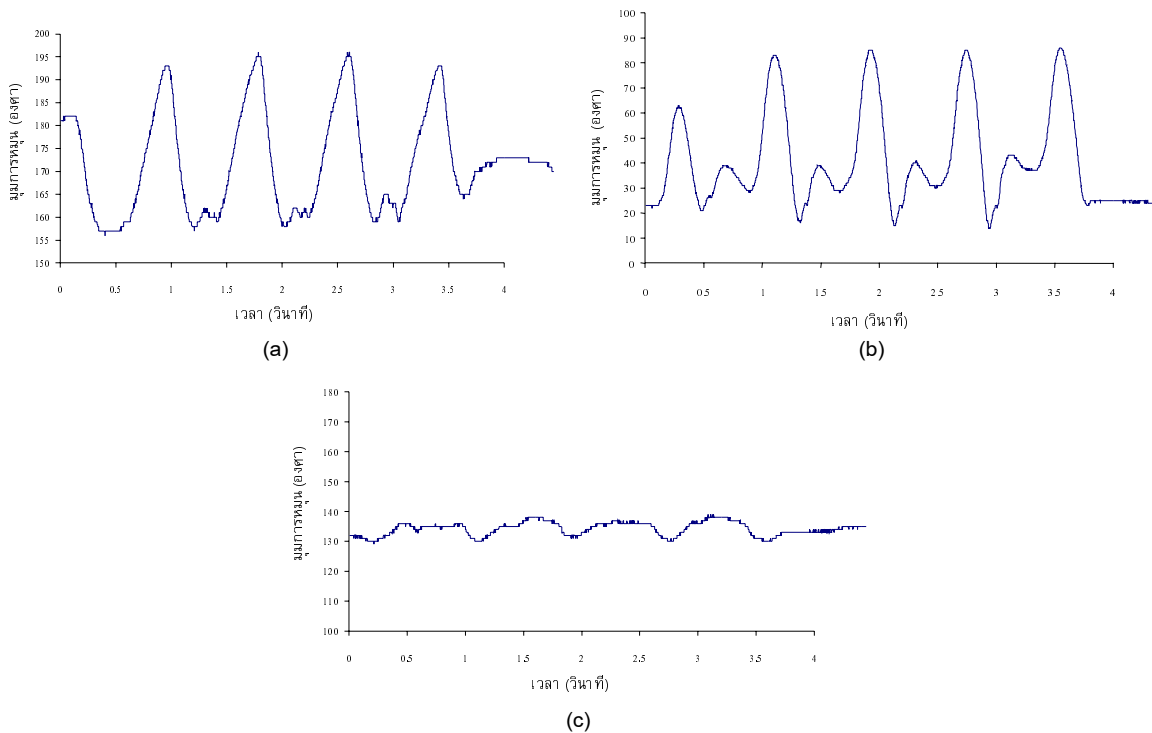


รูปที่ 6 การหาค่าตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งเชิงมุมของข้อต่อมนุษย์โดยใช้เครื่องมือวัด

### 4.2 ผลการทดลอง

หลังจากทำการติดตั้งเครื่องมือวัดเข้ากับผู้ทดลองและกำหนดให้ผู้ทดลองก้าวเดินด้วยความเร็ว 2.5 เมตรต่อวินาที วัดมุมของข้อต่อแต่ละข้อดังแสดงในรูปที่ 7

ข้อมูลที่ได้จากการวัดเป็นหนึ่งในข้อมูลที่จะนำไปช่วยในการออกแบบมุมการหมุนสูงสุดและค่าแรงบิดที่ต้องการของข้อต่อแต่ละข้อของหุ่นยนต์ ลักษณะทางเรขาคณิต (geometry) ขนาดของระบบต้นกำลัง (actuation system) และนำไปสร้างทางเดิน (gait trajectory) ของหุ่นยนต์ต่อไป



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อ  
 (a) ข้อต่อสะโพกในระนาบด้านข้าง (b) ข้อต่อหัวเข่าในระนาบด้านข้าง (c) ข้อต่อสะโพกในระนาบด้านหน้า



## 5. เสถียรภาพในการเดินของหุ่นยนต์สองขาและการควบคุม

เสถียรภาพในการเดิน (gait stability) ถูกนิยามโดย Vukobratovic และคณะ [10] ซึ่งได้พิจารณาการเดินของหุ่นยนต์สองขาออกเป็น 2 ชนิด คือ การเดินแบบสถิตศาสตร์ (static walking) เป็นการเดินที่ไม่คำนึงถึงผลของความเฉื่อยที่เกิดขึ้นกับมวลของหุ่นยนต์ และการเดินแบบพลศาสตร์ (dynamic walking) เป็นการเดินที่คำนึงถึงผลของความเฉื่อยที่เกิดขึ้นกับมวลของหุ่นยนต์ เสถียรภาพในการเดินแบบสถิตศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity: CG) ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับ (supporting polygon) ซึ่งแทนด้วยจุด CG ครอบไว้ที่พื้นที่ของรูปเหลี่ยมของจุดรองรับมากและจุดศูนย์กลางถ่วงต่ำ โอกาสที่หุ่นยนต์จะเกิดการพลิกคว่ำ (tip-over) ก็น้อยลง สำหรับเสถียรภาพในการเดินแบบพลศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อจุดผลรวมของโมเมนต์เป็นศูนย์ (ZMP) ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับโดยจุด ZMP เป็นจุดที่เกิดจากผลรวมของโมเมนต์ที่เกิดจากความเฉื่อยและผลรวมโมเมนต์ที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์กลางถ่วงมีค่าเป็นศูนย์

### 5.1 การวิเคราะห์ ZMP ของแต่ละท่าทางการเดิน

วิเคราะห์ ZMP โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อดู ZMP ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการเดินโดยได้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ช่วง ดังนี้

#### 5.1.1 ช่วงสมดุลแบบสถิตศาสตร์

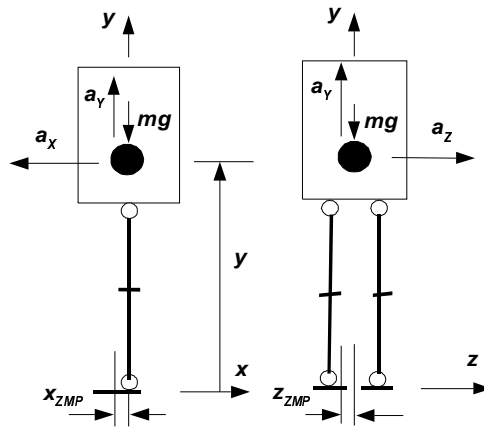
ช่วงนี้เป็นช่วงที่มนุษย์ยืนอยู่หนึ่ง ๆ หรือขณะเตรียมก้าวเดิน โดยอวัยวะต่างๆ ของร่างกายที่มีผลต่อการก้าวเดินจะถูกจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม อัตราเร่งที่เกิดขึ้นในช่วงนี้มีน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ การควบคุมความสมดุลทำได้โดยควบคุมเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์กลางถ่วง ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับ ดังรูปที่ 8 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\sum M_{ZMP} = 0 ; mgx_{ZMP} + mga_y x_{ZMP} = ma_y y \quad (1)$$

$$a_x = \frac{(g + a_y)x_{ZMP}}{y} \quad (2)$$

$$mzg_{ZMP} + ma_y z_{ZMP} = ma_z y \quad (3)$$

$$a_z = \frac{(g + a_y)z_{ZMP}}{y} \quad (4)$$



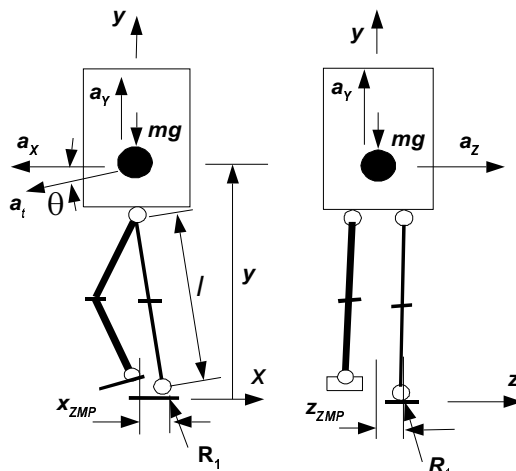
รูปที่ 8 การยื่นแบบสมดุลสถิตศาสตร์

- โดยที่ ZMP คือจุดรวมโมเมนต์เป็นศูนย์
- R คือแรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำกับเท้า
- a คืออัตราเร่งเชิงเส้น
- m คือมวลของลำตัว
- g คืออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
- y คือระยะในแนวตั้งของมวลเทียบกับจุด ZMP

ในการทำสมดุลในช่วงนี้สามารถพิจารณาให้เป็นการทำสมดุลแบบสถิตศาสตร์ ซึ่งอัตราเร่ง  $a_x$  และ  $a_y$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจุดผลรวมโมเมนต์เป็นศูนย์  $x_{ZMP}$  และ  $z_{ZMP}$  ในช่วงสมดุลแบบสถิตศาสตร์จึงมีค่าเป็นศูนย์

### 5.1.2 ช่วงการก้าวเดิน

การรับภาระของเท้าในช่วงนี้เป็นแบบเท้าเดียว ส่วนเท้าอีกข้างกางเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งการรองรับใหม่ดังรูปที่ 9 การก้าวเดินในช่วงนี้ส่งผลให้หุ่นยนต์เกิดการล้ม (tipping) ไปในทิศทางของการเดินและในทิศทางตั้งฉากกับการเดิน มุมเอียงที่เกิดจากการล้มส่งผลโดยตรงกับอัตราเร่ง



รูปที่ 9 ช่วงการรับภาระแบบเท้าเดียว

โดยที่  $l$  คือระยะจากข้อหมุนสะโพกถึงข้อเท้า ในช่วงที่พิจารณาไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาว

$\theta$  คือมุมการเอียงของมวลในแนวดิ่งโดยมีจุดหมุนที่ ZMP

$a_t$  คืออัตราเร่งเชิงเส้นที่ตั้งฉากกับระยะ  $l$

ดังนั้นช่วงการรับภาระแบบเท้าเดียวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\sum M_{ZMP} = 0 ; \frac{(mg + ma_y)x_{ZMP}}{y} = ma_x \quad (5)$$

การล้มด้วยมุม  $\theta$  สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $a_x$  และ  $a_y$  โดยกำหนดให้  $a_y = a_x \tan \theta$  และนำความสัมพันธ์นี้ไปแทนในสมการที่ (5) ได้

$$a_x = \frac{gx_{ZMP}}{(y - x_{ZMP} \tan \theta)} \quad (6)$$

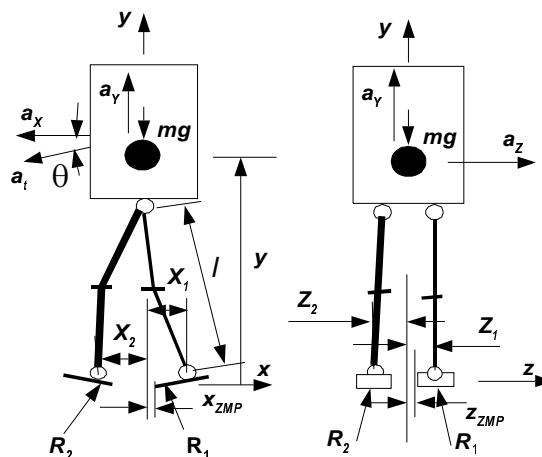
และในทำนองเดียวกันการเคลื่อนที่ในระนาบ  $z, y$  สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$a_z = \frac{gz_{ZMP}}{(y - z_{ZMP} \tan \theta)} \quad (7)$$

จากสมการที่ (6) และ (7) เห็นได้ว่านอกจาก ZMP แล้ว มุมการล้มยังมีผลโดยตรงกับอัตราเร่งที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ด้วย ในทางปฏิบัติเมื่อต้องการเพิ่มหรือลดความเร็วสามารถทำได้โดยการควบคุมมุมการล้มก่อนเข้าสู่ช่วงการรับภาระแบบสองเท้าหรือช่วงกระแทกซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 5.1.3 ช่วงการรับภาระแบบสองเท้า

ช่วงการรับภาระแบบเท้าเดียวสิ้นสุดเมื่อเท้าที่แกว่งก้าวมาสัมผัสพื้น โดยในช่วงที่เริ่มสัมผัสมีการกระแทกของเท้าดังกล่าวเกิดขึ้น หลังจากนั้นเป็นการรับภาระแบบสองเท้าดังรูปที่ 10 โดยเฉลี่ยในช่วงนี้เกิดประมาณร้อยละ 20 ของวงรอบการเดินและน้อยลงเมื่อเดินด้วยความเร็วที่สูงขึ้น



รูปที่ 10 ช่วงการรับภาระแบบสองเท้า

จากรูปที่ 10 สามารถเขียนให้อยู่ในสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

$$\sum M_{ZMP} = 0 ; (m a_y + mg)x_{ZMP} + R_{y1}(x_1 - x_{ZMP}) - R_{y2}(x_2 - x_{ZMP}) = m a_x y \quad (8)$$

$$\sum F_y = m a_y ; R_{y1} + R_{y2} - mg = m a_y \quad (9)$$

จัดรูปสมการที่ (8) ได้ดังนี้

$$(m a_y + mg)x_{ZMP} - (R_{y1} + R_{y2})x_{ZMP} + R_{y1}x_1 - R_{y2}x_2 = m a_x y \quad (10)$$

แทนสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (10) ได้คือ

$$\frac{R_{y1}x_1 - R_{y2}x_2}{m y} = a_x \quad (11)$$

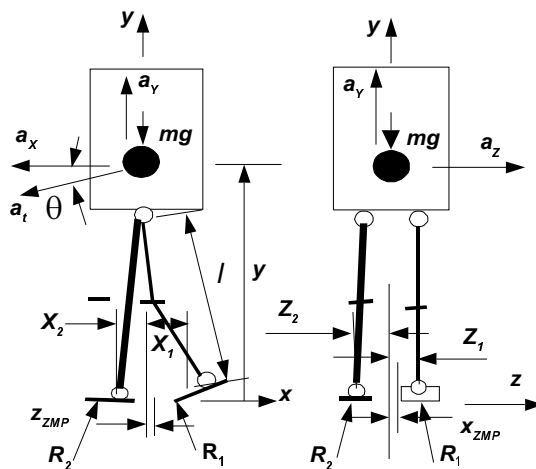
และในทำนองเดียวกันสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ในระนาบ y, z ได้เช่นเดียวกัน คือ

$$\frac{R_{y1}x_1 - R_{y2}x_2}{m y} = a_z \quad (12)$$

เห็นได้จากสมการที่ (11) และ (12) ไม่มี ZMP อยู่ในสมการ ดังนั้นอัตราเร่งที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์มีผลโดยตรงมาจากแรงปฏิกิริยาในแนวแกน y ( $R_{y1}, R_{y2}$ ) ซึ่งเครื่องหมายหน้า  $R_{y1}$  และ  $R_{y2}$  เป็นตัวบ่งบอกทิศทางที่ได้มาจากแรงกิริยาจากการกระทำที่ข้อต่อต่างๆ

#### 5.1.4 ช่วงออกแรงส่ง

เป็นช่วงรอยต่อระหว่างช่วงรองรับภาระแบบสองเท้ามาสู่ช่วงรองรับแบบเท้าเดียว อีกครั้งดังรูปที่ 11 การเดินของมนุษย์ก็เหมือนการทำงานของระบบทางกลต่างๆ ไป ที่มีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากผลของความเสียดทาน ดังนั้นในหนึ่งวงรอบของการเดินจึงมีช่วงหนึ่งที่ต้องออกแรงชดเชยเพื่อรักษาความเร็วการเดินให้คงที่หรือออกแรงเพิ่มเพื่อเพิ่มความเร็วในการเดิน



รูปที่ 11 การให้แรงส่งที่ปลายเท้า

เนื่องจากในช่วงนี้ยังเป็นการรับภาระแบบสองเท้าอยู่จึงสามารถนำสมการในช่วงการรับภาระแบบสองเท้ามาพิจารณาได้ดังนี้คือ

$$\frac{R_{y1}x_1 - R_{y2}x_2}{my} = a_x \quad (13)$$

$$\frac{R_{y1}z_1 - R_{y2}z_2}{my} = a_z \quad (14)$$

ในช่วงนี้เกิดขึ้นก่อนที่เท้าที่ให้แรงเริ่มแกว่งเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ จากรูปที่ 11 แรงปฏิกิริยา  $R_y$  มีขนาดเพิ่มขึ้นชั่วคราวโดยได้แสดงเป็นเส้นประขณะเมื่อทำการออกแรงส่งซึ่งทำให้อัตราเร่งเพิ่มขึ้นตาม โดยจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับให้การให้แรงในช่วงนี้

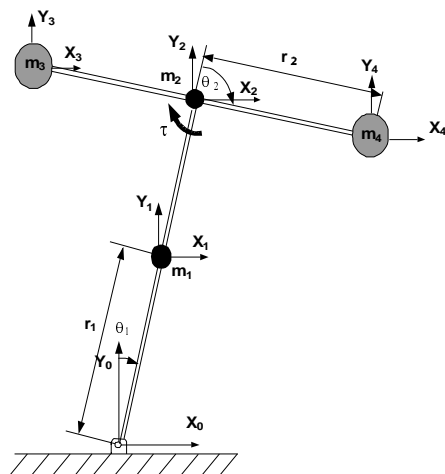
## 5.2 การควบคุม ZMP

เมื่อเรารู้ถึงตำแหน่งของ ZMP ที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้างต้นก็สามารถทำการควบคุมความสมดุลของหุ่นยนต์สองขาได้ ซึ่งวิธีการควบคุมสามารถกระทำได้สองวิธี โดยวิธีแรกเป็นการให้แรงบิดที่ข้อเท้าเพื่อให้ ZMP เปลี่ยนตำแหน่งไปยังจุดที่ต้องการโดยไม่มีการเคลื่อนไหวในส่วนต่างๆ ของร่างกาย วิธีที่สองเป็นการสร้างโมเมนต์ขึ้นมาจากการเคลื่อนย้ายมวลในส่วนของร่างกายเพื่อให้แขนแรงมีการเปลี่ยนแปลงระยะและยังรวมถึงการเคลื่อนที่ของส่วนต่างๆ ด้วยความเร่งในบทความได้จำลองการควบคุม ZMP โดยเลียนแบบการทำสมดุลของมนุษย์ด้วยวิธีเคลื่อนย้ายลำตัวส่วนบน

## 6. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลและการควบคุม

การศึกษาการทำสมดุลของหุ่นยนต์สองขา ส่วนหนึ่งสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมของมนุษย์ได้โดยตรงซึ่งสามารถแยกการสมดุลออกเป็นสองช่วง คือ การสมดุลในช่วงการเดินและการสมดุลในช่วงที่ยืนอยู่กับที่และเมื่อทำการพิจารณาตัวแปรที่ทำให้เกิดการสมดุลพบว่าการเคลื่อนที่ของลำตัว ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางมวล มีผลต่อการรักษาความสมดุลของมนุษย์

ผู้เขียนจำลองแบบการรักษาความสมดุลให้เป็นระบบกลไกทางกลที่มีชื่อว่า A Planar Two Degree of Freedom Inverted Pendulum: PTIP ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยระบบนี้ประกอบด้วยคานสองคาน โดยคานที่หนึ่งมีความยาว  $2r_1$  มีการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมเป็น  $\theta_1$  เทียบกับระนาบอ้างอิงและมีจุดศูนย์กลางมวล  $m_1$  อยู่ตรงกลางคาน ส่วนคานที่สองหนึ่งมีความยาว  $2r_2$  มีการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมเป็น  $\theta_2$  เทียบกับระนาบอ้างอิงและมีจุดศูนย์กลางมวล  $m_2$  อยู่ตรงกลางคาน นอกจากนี้ยังมีลูกตุ้มมวล  $m_3$  และ  $m_4$  แขนงอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านของคานที่สอง



รูปที่ 12 แบบจำลอง PTIP

### 6.1 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของ PTIP

การหาสมการทางพลศาสตร์สามารถใช้การวิเคราะห์ได้จากแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อระบบ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในสมการของนิวตัน (Newton) และ ออยเลอร์ (Euler) นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ระบบด้วยวิธีพลังงานโดยใช้สมการของ ลากรางจ์ (Lagrange) ซึ่งวิธีนี้ถูกนำมาใช้พิจารณาหาสมการทางพลศาสตร์ของ PTIP โดยสมการของ Lagrange's สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2 \tag{15}$$

เมื่อ \$L\$ คือ ผลต่างระหว่างพลังงานจลน์ (\$T(\theta, \dot{\theta})\$) และพลังงานศักย์ (\$V(\theta)\$) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$L(\theta, \dot{\theta}) = T(\theta, \dot{\theta}) - V(\theta) \tag{16}$$

\$\tau\_i\$ และ \$\theta\_i\$ คือ Generalized Force และ Generalized Coordinate ที่ \$i\$ ในระบบ จากรูปที่ 12 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ได้ดังนี้คือ

$$T(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 (m_j (\dot{r}_{jx}^2 + \dot{r}_{jy}^2)) \tag{17}$$

$$V(\theta) = \sum_{j=1}^4 m_j g r_{jy} \tag{18}$$

นำสมการที่ (17) และ (18) แทนลงในสมการที่ (16) และกำหนดให้มวล \$m\_3\$ เท่ากับมวล \$m\_4\$ ดังนั้นสามารถเขียน สมการทางพลศาสตร์ของระบบในสมการที่ (15) ได้ดังนี้ คือ

$$-r_1 g(m_1 + 2m_2 + 4m_3) \sin \theta_1(t) + r_1^2 (m_1 + 4m_2 + 8m_3) \ddot{\theta}_1(t) + 2r_2^2 m_3 (\ddot{\theta}_1(t) + \ddot{\theta}_2(t)) = 0 \quad (19)$$

$$2r_2^2 m_3 (\ddot{\theta}_1(t) + \ddot{\theta}_2(t)) = \tau(t) \quad (20)$$

เมื่อ  $g$  คืออัตราเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก เห็นได้ว่าสมการพลศาสตร์ของระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นตรง ในขั้นแรกศึกษาการทำให้ระบบมีความเป็นเชิงเส้นที่ตำแหน่งสมดุลงที่มุม  $\theta_1$  มีค่าเป็นศูนย์โดยใช้วิธีการของ Taylor Series และอนุโลมให้มุมดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากตำแหน่งสมดุลง ดังนั้นสมการที่ (19) และ (20) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการของสถานะ (State Equation) แบบเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (21)$$

$$y(t) = Hx(t) \quad (22)$$

เมื่อ  $x(t) = [\theta_1 \dot{\theta}_1 \theta_2 \dot{\theta}_2]^T$  คือตัวแปรสถานะ

$u(t) = \tau(t)$  คือสัญญาณที่ป้อนให้กับระบบ

A คือเมตริกซ์ของระบบ

B คืออินพุทเมตริกซ์

H คือเอาต์พุทเมตริกซ์

โดยในที่นี้สนใจการเปลี่ยนแปลงของมุม  $\theta_1$  เมื่อแทนค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ (1) ลงในสมการที่ (21) และ (22) จะได้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 17.68 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -17.68 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -3 \\ 0 \\ 49.17 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆ

ตัวแปร	ค่าคงที่	ตัวแปร	ค่าคงที่
$m_1$	0.3 kg.	$r_1$	0.3 m.
$m_2$	0.25 kg.	$r_2$	0.19 m.
$m_3, m_4$	0.3 kg.	G	9.81 m/s <sup>2</sup>

เมื่อหารากของเมตริกซ์ของระบบ (characteristic equation) พบว่ามีรากที่มีค่าเป็นบวก อยู่หนึ่งตัวซึ่งแสดงได้ว่าระบบมีความไม่เสถียรเมื่อทำการควบคุมแบบระบบเปิด (open-loop control) ดังนั้นจึงต้องใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (closed-loop control) ดังนี้

## 6.2 การควบคุมแบบป้อนกลับและผลจำลองการตอบสนองของระบบ

เลือกใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ ก่อนควบคุมระบบแบบป้อนกลับต้องพิจารณาว่า ระบบสามารถควบคุมได้หรือไม่ (system controllable : C) และระบบสามารถสร้างตัวประมาณค่าของสถานะได้หรือไม่ (system observable : O) ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (26) และ (27) ตามลำดับ

$$C = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B] \quad (26)$$

$$O = [Y \quad YA \quad YA^2 \quad YA^3]^T \quad (27)$$

ระบบสามารถควบคุมได้ก็ต่อเมื่อแรงค์ (rank) ของเมตริกซ์ C มีค่าเต็ม (full rank) เมื่อแทนค่าคงที่ลงในสมการที่ (26) พบว่าค่าแรงค์ของเมตริกซ์ C มีค่าเท่ากับสี่ แสดงว่าระบบนี้สามารถควบคุมแบบป้อนกลับสถานะได้ และระบบสามารถสังเกตการณ์ได้ก็ต่อเมื่อแรงค์ของเมตริกซ์ O มีค่าเต็ม เมื่อแทนค่าคงที่ลงในสมการที่ (27) พบว่าค่าตัวกำหนดของเมตริกซ์ O มีค่าเท่ากับสี่เช่นกัน แสดงว่าระบบนี้สามารถสร้างตัวประมาณค่าของสถานะได้ ในการทดลองระบบจริงได้ติดตั้งตัวตรวจจับเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสถานะโดยตรงที่จุดหมุนของคาน

กฎการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะคือ

$$u(t) = -Kx(t) = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4] [\theta_1 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_2]^T \quad (28)$$

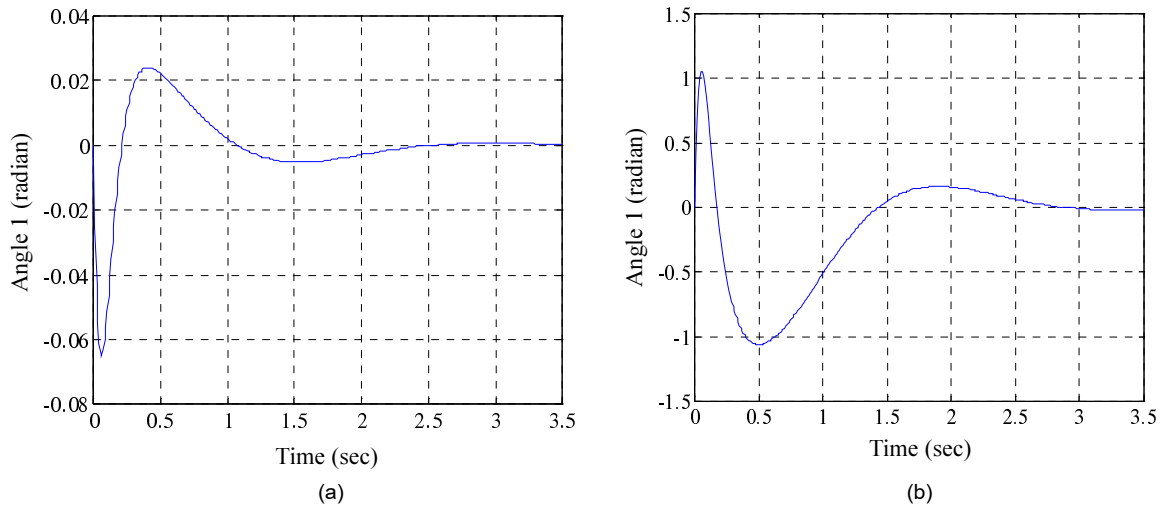
เมื่อ K คือ proportional gain ซึ่งสามารถหาได้ด้วยวิธี pole placement กำหนดตำแหน่งของ pole (p) ใน S-domain และได้อัตราขยาย (gain: K) ดังนี้คือ

$$p = [1.337 + 2.208j \quad 1.337 - 2.208j \quad 15 \quad 15]$$

$$K = [-139.82 \quad -26.96 \quad -1.84 \quad -0.98]$$



การทดสอบการตอบสนองของระบบโดยกำหนดสภาวะเริ่มต้นของระบบให้ระยะขจัดของมุม  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  เท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นสภาวะสมดุลของระบบ จากนั้นรบกวนระบบให้เสียสมดุลและเมื่อพิจารณาการตอบสนองของระบบจากผลจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ดี ดังแสดงจากกราฟรูปที่ 13



รูปที่ 13 การตอบสนองของมุม  $\theta$  เมื่อให้ Impulse input

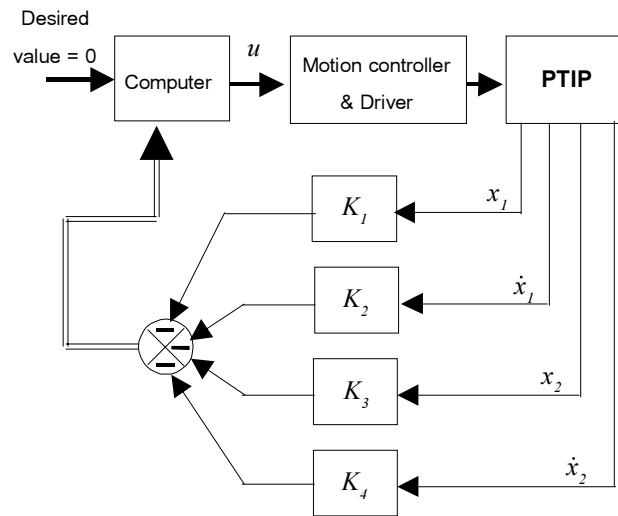
(a) มุม  $\theta_1$  (b) มุม  $\theta_2$

### 6.3 ผลการทดลอง

ได้ทำการสร้างระบบจริงดังรูปที่ 14 ประกอบด้วยคานที่หนึ่งและสองทำจากอลูมิเนียมกลึง ลูกตุ้มมวล  $m_3$  และ  $m_4$  มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าและใช้มอเตอร์กระแสตรงในการส่งถ่ายแรงบิดผ่านโซ่ไปยังคานที่สอง ในส่วนชุดควบคุมประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่รับค่าป้อนกลับสถานะของระบบและประมวลผลส่งสัญญาณกลับไปยังระบบ ดังแสดงในรูปที่ 15

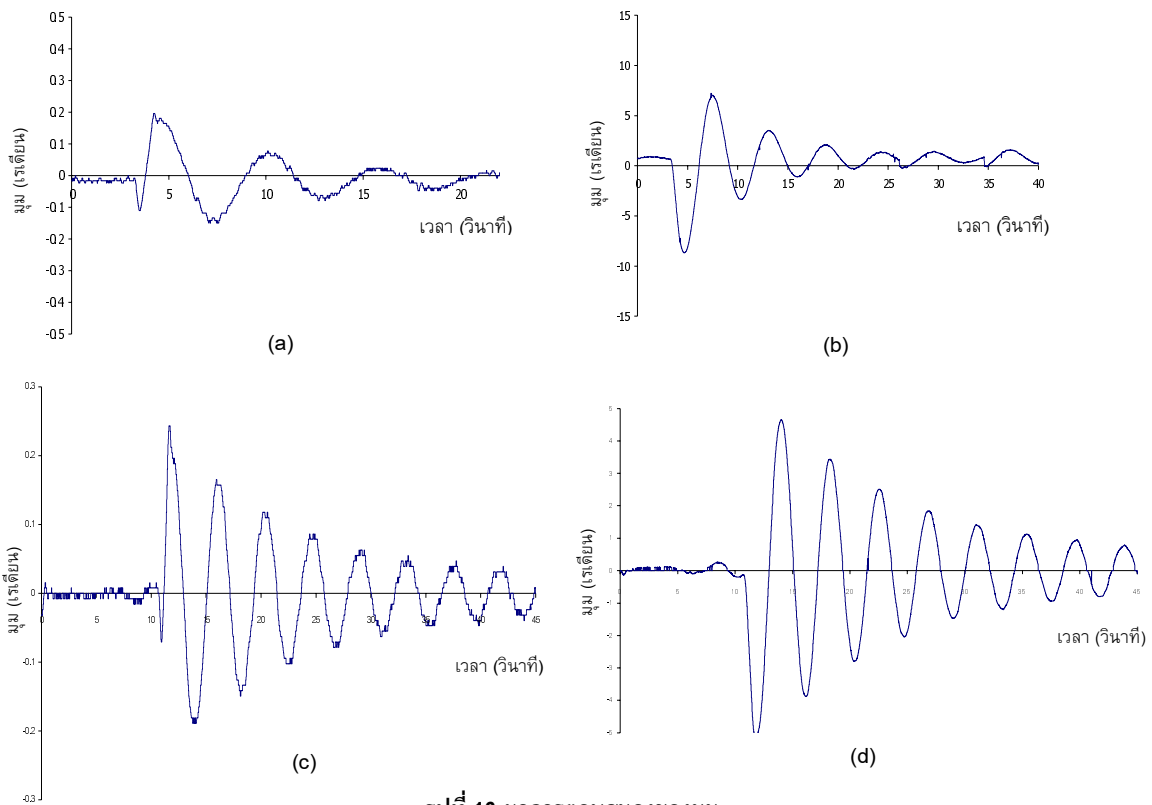


รูปที่ 14 PTIP และระบบควบคุมที่ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม



รูปที่ 15 ชุดควบคุมของ PTIP

เมื่อทำการกวนระบบให้เสียสมดุลพบว่าระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้า โดยใช้เวลาประมาณ 12 วินาที จากนั้นทำการเพิ่มขนาดของมวล  $m_3$  และ  $m_4$  เป็น 0.5 กิโลกรัม และทำการทดลองกวนระบบอีกครั้งพบว่าระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้าลงโดยใช้เวลาถึง 30 วินาทีและมีการสั่นมากขึ้น ทั้งนี้มวลมีส่วนเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบโดยรวม ซึ่งผลของความล่าช้าในการตอบสนองของระบบอาจเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของชุดส่งถ่ายกำลัง (backlash) ผลของแรงเสียดทานและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบเอง ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลการตอบสนองของมุม

- (a) มุม  $\theta_1$  เมื่อให้ Impulse input
- (b) มุม  $\theta_2$  เมื่อให้ Impulse input
- (c) มุม  $\theta_1$  เมื่อเพิ่มมวล  $m_3$  และ  $m_4$
- (d) มุม  $\theta_2$  เมื่อเพิ่มมวล  $m_3$  และ  $m_4$

## 7. สรุปและขอเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า

1. การที่มีมนุษย์เดินได้อย่างสมบูรณ์และมีเสถียรภาพนั้น ขาหนึ่งข้างต้องมีแปดองศาอิสระในการออกแบบหุ่นยนต์ต้องพยายามลดองศาอิสระให้มากที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม ซึ่งการออกแบบหุ่นยนต์ให้มีหกองศาอิสระทำให้หุ่นยนต์เดินได้อย่างมีเสถียรภาพและคล้ายการเดินของมนุษย์มากที่สุด

2. การวัดมุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อต่างๆ พบว่ากราฟที่ได้เป็นวงรอบที่ค่อนข้างเหมือนเดิม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลหนึ่งที่น่าไปช่วยออกแบบมุมการหมุนสูงสุดและค่าแรงบิดที่ต้องการของข้อต่อแต่ละข้อของหุ่นยนต์ ลักษณะทางเรขาคณิตขนาดของระบบต้นกำลัง และสร้างทางเดินของหุ่นยนต์ต่อไป

3. เสถียรภาพการเดินแบบสถิตศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อทำการควบคุมเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์กลางให้ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับ ส่วนเสถียรภาพการเดินแบบพลศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อควบคุมจุดผลรวมของโมเมนต์เป็นศูนย์ (ZMP) ให้ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับ ซึ่งวิธีการควบคุมจุด ZMP สามารถทำได้โดยการให้แรงบิดที่ข้อเท้าโดยตรงเพื่อให้ ZMP เปลี่ยนตำแหน่งไปยังจุดที่ต้องการ หรือสามารถสร้างโมเมนต์ขึ้นมาจากการเคลื่อนย้ายมวลในส่วนต่างๆ ของร่างกาย เพื่อให้แขนแรงมีการเปลี่ยนแปลงเปรียบเสมือนการเคลื่อนที่ของลำตัวส่วนบนของร่างกายมนุษย์ ขณะยืนหรือก้าวเดินบนพื้นที่จำกัด ซึ่งสามารถจำลองให้เป็นการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง a planar two degree of freedom inverted pendulum: PTIP

4. การทดลองระบบควบคุมโดยการกวนระบบให้เสียสมดุลพบว่าระบบใช้เวลา 12 วินาทีในการกลับเข้าสู่สภาวะสมดุล

5. การเพิ่มขนาดของมวล  $m_3$  และ  $m_4$  เป็น 0.5 กิโลกรัม และทำการทดลองกวนระบบอีกครั้งพบว่าระบบมีการสั่นมากขึ้นและกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้าลงโดยใช้เวลาถึง 30 วินาที ทั้งนี้มวลมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับความถี่ธรรมชาติ

6. ความล่าช้าในการตอบสนองของระบบเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบซึ่งได้แก่ ชุดส่งถ่ายกำลังผลของแรงเสียดทานและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวตรวจวัดและชุดควบคุม ทั้งนี้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้โดยใช้วิธีควบคุมแบบคงทน (robust control) รวมถึงการออกแบบชุดทดลองทั้งทางด้านกลไกและด้านอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำมากกว่าเดิม

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยโครงการ Image guided motion of a humanoid robot

## 9. เอกสารอ้างอิง

1. Hemami, H. and Wyman, B. F., 1979, "Modeling and Control of Constrained Dynamic System with Application to Biped Locomotion in the Frontal Plane", *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-24, No. 4, August, pp. 526-535.
2. Muir, P. F. and Neuman, C. P., 1979, "Dynamic Modeling of Multibody Robotic Mechanism", *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-24, No. 4, August, pp. 1546-1551.
3. Takanishi, A. et al., 1988, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion" *Ro. Man. Sy.* September.
4. Yamaguchi, J. and Takanishi, A., 1997, "Design of Biped Walking Robots Having Antagonistic Driven Joints Using Nonlinear Spring Mechanism", *Proc. IROS*, pp. 251-259.
5. Yamaguchi, J., Nishino, D., and Takanishi, A., 1998, "Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Driven Joints", *IEEE Transaction on Automatic Control*, May, pp. 2022-2029.
6. Shih, C. and Gruver, W. A., 1992, "Control of a Biped Robot in the Double-Support Phase", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 22, No. 4, July/August, pp. 729-735.
7. Mitobe, K., Mori, N., and Nasu, Y., 1995, "Nonlinear Feedback Control of a Biped Walking Robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2865-2870.
8. Kajita, S. and Tani, K., 1996, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, February.
9. Hirai, K., Hirose, M., Hakata, Y., and Takenaka, T., 1998, "The Development of Honda Humanoid Robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1321-1326.
10. Vukobratovic, M., Stokic, D., 1983, "Is Dynamic Control Needed in Robotic Systems, and, if So, to What Extent?", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 18-34.