

การวิเคราะห์โครงสร้างทางกลและเสถียรภาพของหุ่นยนต์เดินสองขา Analysis of Mechanical Structure and Stability for a Humanoid Robot

จิตติศักดิ์ จันท์พรหม ไพศาล สุวรรณเทพ และ ชิต เหล่าวัฒนา
ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีโบ้) คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 66(2)470-9335 โทรสาร 66(2)470-9339 , E-Mail: s1400172@cc.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนองานวิจัยพื้นฐานเชิงวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างทางกลและเสถียรภาพของหุ่นยนต์เดินสองขา (Humanoid robot) ที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นที่ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีโบ้) ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) และท่าการเดิน (Gait) ของหุ่นยนต์สองขาดังกล่าวส่งผลให้เกิดความซับซ้อนในการควบคุม เราได้ทำการวัดตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งเชิงมุมของข้อต่อต่างๆ ของขามนุษย์เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการเดินที่นำไปสู่การออกแบบทางเรขาคณิตของขาหุ่นยนต์ นอกจากนี้เรายังได้เสนอการวิเคราะห์ท่าการเดินของหุ่นยนต์ของแต่ละช่วงที่เกิดขึ้นขณะทำการเดินซึ่งมีความสัมพันธ์กับเสถียรภาพในทางจลศาสตร์ (Kinematic) และในทางพลศาสตร์ (Dynamic) ท้ายสุดแบบจำลองทางพลศาสตร์การทรงตัวของหุ่นยนต์หนึ่งขาบนระนาบ (PTIP) ซึ่งเป็นชุดทดสอบที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบระบบควบคุมการทรงตัวของลำตัวของหุ่นยนต์ ทั้งนี้ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองถูกแสดงไว้ในบทความนี้แล้ว

Abstract

This paper describes our preliminary research in analyzing mechanical structure and its stability of a humanoid robot, to be 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 the 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 our controller for balancing a robot body. Simulation and experimental results of PTIP are included herein.

1. บทนำ

การขยายตัวทางอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติจึงเข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมเทคโนโลยีหุ่นยนต์ (Robotics technology) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติได้ถูกนำมาช่วยในการผลิตโดยหุ่นยนต์ส่วนใหญ่เป็นแขนกลชนิดยึดอยู่กับที่ (Fixed Robot) แต่เนื่องจากการผลิตบางประเภทต้องการการขนย้าย เช่น การขนถ่ายวัสดุที่มีความร้อนสูง การนำวัตถุเข้าสู่สายการผลิต หรือแม้กระทั่ง การสำรวจในพื้นที่อันตรายเป็นต้นทำให้หุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ (Mobile Robot) ถูกนำมาใช้กับงานดังกล่าว โดยทั่วไปหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ที่นิยมนำมาใช้เป็นแบบหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ด้วยล้อ (Wheeled robot) และหุ่นยนต์

แบบเคลื่อนที่ด้วยขา (Walking Robot)

หุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ด้วยล้อที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีตั้งแต่ล้อเดียวไปจนถึงหลายล้อเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนให้หุ่นไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ หุ่นยนต์แบบล้อนี้สามารถเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ค่อนข้างราบเรียบได้ดีแต่เนื่องจากสภาพภูมิประเทศไม่ได้ราบเรียบเสมอไปจึงทำให้หุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ด้วยล้อมีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่เช่น ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงเกินกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อได้ ทำให้หุ่นยนต์แบบล้อไม่เหมาะสมกับภูมิประเทศที่สลับซับซ้อนและขรุขระ ดังนั้นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาจึงมีความเหมาะสมกับภูมิประเทศดังกล่าวมากกว่าหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อ โดยสามารถเคลื่อนที่ได้ในภูมิประเทศที่มีความขรุขระ พื้นที่ต่างระดับ พื้นที่ที่เป็นหลุมเป็นบ่อ และยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านหรือข้ามสิ่งกีดขวางได้ (Traversability) ลักษณะเฉพาะคือ การเคลื่อนที่แบบค่อยเป็นค่อยไป (Incremental Motion) ในทิศทางใดก็ได้ หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาที่ทำการวิจัยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีจำนวนตั้งแต่หนึ่งขาเป็นต้นไป ยิ่งจำนวนขาน้อยยิ่งส่งผลให้ความคล่องตัวในการเคลื่อนที่มีมากขึ้นเท่านั้น

หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาสองขา (Humanoid Robot) มีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ได้ดีกว่าหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาแบบอื่น แต่เนื่องจากหุ่นยนต์สองขามีส่วนประกอบของโครงสร้างหลายชิ้นส่วนจึงทำให้การควบคุมให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพทั้งขณะที่อยู่กับที่และขณะก้าวเดินเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากและสลับซับซ้อนดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยการควบคุมดังกล่าว

2. ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

สำหรับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเดินโดยใช้ขาสองขาได้มีงานวิจัย พัฒนา ออกแบบและสร้างกันมาก่อนหน้านี้แล้วดังต่อไปนี้

H. Hemami และ B. F. Wyman [1] ได้ทำการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์สองขาเคลื่อนที่บนระนาบโดยใช้วิธีของลากรางจ์ (Lagrange) และทำการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ด้วยวิธีป้อนกลับสถานะ (State feedback control)

P. F. Muir และ C. P. Neuman [2] แห่งสถาบันหุ่นยนต์มหาวิทยาลัยคานะกิเมลลอน ได้คิดวิธีการใหม่เพื่อหาแบบ

จำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อมีชื่อว่า ยูเรนัส (Uranus) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ ที่มีกลไกหลายส่วนประกอบ (Multibody robotic mechanism) โดยอาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของนิวตัน (Newtonian dynamics) หลักการกระจายของแรง (Force / Torque propagation) และการวิเคราะห์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนแต่ละข้อต่อของระบบซึ่งการหาคำตอบของระบบได้ใช้หลักการวิเคราะห์สมการพีชคณิตเชิงเส้น (Linear algebraic equations) นอกจากนี้ยังได้แสดงการใช้วิธีการดังกล่าวกับหุ่นยนต์สองขาที่พิจารณาบนระนาบ

B. Perrin, C. Chevallereau และ C. Verdier [3] ได้เปรียบเทียบวิธีการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขา โดยวิธีแรกเป็นวิธีของ Walker และ Orin ซึ่งใช้ทฤษฎีพื้นฐานของ Newton-Euler และวิธีที่สองเป็นวิธีของ Featherstone ซึ่งใช้หลักการหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้นของแต่ละข้อต่อ (Joint accelerations) ของหุ่นยนต์โดยตรง ผลการเปรียบเทียบทั้งสองวิธีได้แสดงให้เห็นวิธีการของ Featherstone เหมาะสมกับระบบที่มีโครงสร้างเชื่อมต่อกันจำนวนมาก

T. McGeer [4] ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์และสร้างหุ่นยนต์สองขา จากนั้นได้ทดลองให้หุ่นยนต์เดินลงจากพื้นเอียงโดยอาศัยพลังงานจากแรงโน้มถ่วงเท่านั้น นอกจากนั้นยังสามารถติดตั้งตัวกำเนิดพลังงานเข้าไปในตัวหุ่นยนต์ได้เพื่อให้หุ่นยนต์เดินบนพื้นราบได้อย่างคล่องแคล่วและมีประสิทธิภาพ M. H. Raibert [5] ทำการสร้างและทดสอบหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่แบบกระโดดตั้งแต่หนึ่งขาจนถึงสี่ขาโดยอาศัยการสปริงตัวของขาและควบคุมช่วงกระโดดของหุ่นยนต์โดยการปรับมุมของขาขณะลอยตัวอยู่ในอากาศ

A. Takanishi และคณะ [6]–[8] แห่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยวาเซดะ ได้วิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์และสร้างหุ่นยนต์สองขาชื่อ WABIAN โดยการทรงตัวของหุ่นยนต์ใช้หลักการควบคุมการเคลื่อนไหวของลำตัว (Trunk Motion) และการควบคุมการวางตำแหน่งเท้าของหุ่นยนต์ เพื่อให้จุดโมเมนต์รวมเป็นศูนย์ (Zero moment point :ZMP) อยู่ในบริเวณพื้นที่ของฝ่าเท้า ต่อมาได้ทำการออกแบบกลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยใช้สปริงเพื่อเลียนแบบการทำงานของกล้ามเนื้อมนุษย์

C. Shih และ W. A. Gruver [9] ทำการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์สองขาที่มีจำนวน 12 องศาความเป็นอิสระ

โดยพิจารณาการควบคุมในช่วงที่ขาทั้งสองข้างติดอยู่กับพื้น และใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับของสถานะแบบเชิงเส้น (Linear state feedback) ต่อมา K. Mitobe และคณะ [10] แห่งมหาวิทยาลัยยามากาตะ ประเทศญี่ปุ่น ได้ทดสอบการควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นของสถานะ (State feedback linearization) กับหุ่นยนต์สองขาที่มีการเคลื่อนที่เฉพาะระนาบด้านข้าง S. Kajita และ K. Tani [11] สร้างหุ่นยนต์สองขาชื่อ Meltran 2 ที่มีจำนวนองศาความเป็นอิสระและพัฒนาาระบบควบคุมโดยใช้ทฤษฎี Linear inverted pendulum mode ซึ่งพิจารณาจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์อยู่ที่บริเวณสะโพกและไม่พิจารณามวลของขาทั้งสองข้าง ซึ่งเมื่อหุ่นยนต์ยืนหรือเดินก็สามารถอาศัยหลักการควบคุมการทรงตัวเช่นเดียวกันกับ Inverted pendulum

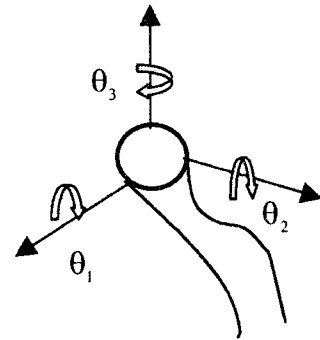
K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa และ T. Takenaka [12] แห่งศูนย์วิจัย Wako บริษัทฮอนด้า ได้ทำการวิจัยสร้างหุ่นยนต์สองขาที่มีชื่อว่า Honda Humanoid Robot หุ่นยนต์ตัวนี้มีโครงสร้างและมีความสามารถในการเคลื่อนที่คล้ายคนมากที่สุด นอกจากนั้นยังสามารถรักษาความสมดุลแบบพลศาสตร์ (Dynamic stability) ขณะเดินแบบปกติ เดินขึ้นบนพื้นเอียง เดินบนพื้นผิวขรุขระและเดินขึ้นลงบันได การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถทำได้โดยการวางแผนการเดินโดยการโปรแกรมล่วงหน้า และจากการใช้วิธีควบคุมทางไกลอย่างใดก็ตามต้นทุนการสร้างหุ่นยนต์ของบริษัทฮอนด้า สูงมากถึง 300 ล้านดอลลาร์สหรัฐ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ด้านโครงสร้างและการควบคุมของหุ่นยนต์เดินสองขาเพื่อสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนจนสามารถออกแบบระบบควบคุมราคาถูกลงได้ นอกจากนี้ศาสตร์ทางด้านการพัฒนาระบบมองเห็นได้ (Vision system) ให้สามารถทำงานร่วมกับการรักษาสมดุลทางพลศาสตร์ ยังเป็นเรื่องที่ทางบริษัทฮอนด้าไม่ยอมเปิดเผย รายงานการวิจัยขั้นต้นฉบับนี้ จะได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์พื้นฐานด้านโครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบข้างดังกล่าว

3. การวิเคราะห์องศาอิสระของมนุษย์

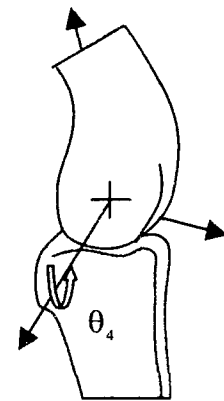
สิ่งสำคัญที่ทำให้มนุษย์เคลื่อนที่ได้คือการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อต่อบนขาซึ่งประกอบด้วยข้อต่อส่วนของสะโพก ข้อต่อส่วนของหัวเข่า ข้อต่อส่วนของข้อเท้าและนิ้วเท้า แรงบิดของแต่ละข้อตอดังกล่าวขณะเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์ต่อกันส่งผลให้เกิดเสถียรภาพในการเดินของมนุษย์ เมื่อเราวิเคราะห์

ลักษณะเชิงโครงสร้างในแต่ละส่วนพบว่าในส่วนสะโพกเป็นข้อต่อที่มีลักษณะเป็นทรงกลม (Ball joint) เมื่ออ้างอิงกับทิศทางการเคลื่อนที่พบว่าข้อต่อส่วนสะโพกสามารถหมุนได้สามองศาอิสระ ($\theta_a: a = 1, 2, 3$) ดังรูปที่ 3.1

สำหรับข้อต่อส่วนหัวเข่า ข้อต่อของข้อมีลักษณะเป็นทรงกลมสองลูกประกอบเข้าด้วยกันทำให้การเคลื่อนที่ถูกระงับให้สามารถเคลื่อนที่ได้เพียงหนึ่งองศาอิสระ (θ_4) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 จำนวนองศาอิสระของการหมุนในส่วนของข้อต่อสะโพก

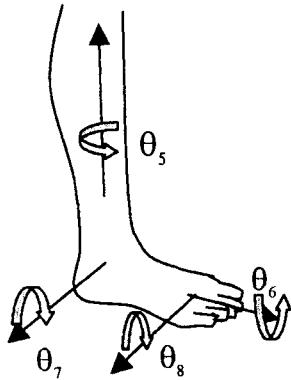


รูปที่ 3.2 จำนวนองศาอิสระของการหมุนในส่วนของข้อต่อหัวเข่า

ในส่วนของข้อเท้ามีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับสะโพกคือสามารถเคลื่อนที่ได้สามองศาอิสระ ($\theta_b: b = 5, 6, 7$) และสุดท้ายคือข้อต่อในส่วนของนิ้วเท้าซึ่งถูกพิจารณาให้มีการเคลื่อนที่หนึ่งองศาอิสระ (θ_8) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่านิ้วเท้าทุกนิ้วมีการเคลื่อนที่เหมือนกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.3

จากทั้งหมดที่ได้ทำการวิเคราะห์มาข้างต้นพบว่าในขาหนึ่งข้างของมนุษย์ประกอบด้วยแปดองศาอิสระของการหมุน

ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ของมนุษย์มีความคล่องแคล่วสูง แต่ในทางออกแบบกลไกการเดินและการควบคุมของหุ่นยนต์สองขาถือว่ามีจำนวนองศาอิสระเกินความจำเป็นในการเคลื่อนที่บนปริภูมิ (Space) และยากต่อการควบคุม ดังนั้นการกำหนดจำนวนองศาอิสระเพื่อให้หุ่นยนต์เดินได้เสมือนมนุษย์จึงมีผลในการออกแบบกลไกทางกลและการควบคุมของหุ่นยนต์สองขาตั้งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.3 จำนวนองศาอิสระของการหมุน
ในส่วนข้อเท้าและนิ้วเท้า

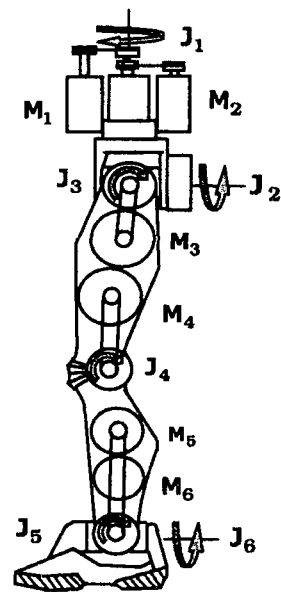
3.1 การออกแบบกลไกการเดินของหุ่นยนต์สองขา

ในการออกแบบหุ่นยนต์ให้สามารถเดินได้เสมือนมนุษย์โดยใช้จำนวนองศาอิสระดังกล่าวข้างต้นพบว่ามีข้อจำกัดด้านการออกแบบเนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนข้อต่อต่างๆ มีอยู่อย่างจำกัด รวมถึงข้อจำกัดทางด้านน้ำหนักของหุ่นยนต์ กระบวนการผลิต การประมวลผลและการควบคุม ดังนั้นเราจึงทำการออกแบบหุ่นยนต์ให้มีองศาอิสระของข้อต่อในขาหนึ่งข้างทั้งหมดหกองศาอิสระ ในส่วนนี้ได้ต่างไปจากมนุษย์คือเราได้ตัดส่วนของนิ้วเท้าและส่วนของการหมุนรอบข้อเท้าออกไป ทั้งนี้หุ่นยนต์ยังสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริภูมิ (Space) เนื่องจากองศาอิสระที่มีอยู่เท่ากับองศาที่ใช้ในการทำงาน การออกแบบให้หุ่นยนต์เหมือนมนุษย์ทุกประการนั้นมีความเป็นไปได้ในอนาคตเมื่อเรามีความรู้ ประสบการณ์และเทคโนโลยีเพียงพอ

จากการศึกษาของสาการเคลื่อนที่ของมนุษย์และทฤษฎีทางด้านหุ่นยนต์เราได้ข้อสรุปในการออกแบบขาหนึ่งข้างของหุ่นยนต์ให้มีหกองศาอิสระดังรูปที่ 3.4 กำหนดให้ M แทนมอเตอร์กระแสตรง โดย M_1 และ M_2 เป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบทั่วไป ส่วน M_3 ถึง M_6 เป็นมอเตอร์แบบพิเศษมีลักษณะบางแต่มีความกว้างเป็นพิเศษ (Ultra slim type DC

motor) และมีอัตราส่วนกำลังเมื่อเทียบกับน้ำหนักค่อนข้างสูง จึงมีความเหมาะสมที่จะทำการติดตั้งในขาที่มีพื้นที่จำกัด และ J แทนข้อต่อหรือองศาอิสระของหุ่นยนต์ โดยข้อต่อ J_1, J_3, J_4 และ J_5 ถูกส่งถ่ายกำลังผ่านสายพานไปยังชุดเฟืองฮาร์โมนิก (Harmonic gear) แต่ข้อต่อ J_2 และ J_6 ไม่สามารถทำอย่างนั้นได้เนื่องจากปัญหาทางด้านข้อจำกัดในการติดตั้งมอเตอร์ ซึ่งการออกแบบโครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์สองขานี้มุ่งเน้นให้มีรูปทรงเหมือนมนุษย์มากที่สุด ดังนั้นเราจึงได้ออกแบบการส่งกำลังไปยังข้อต่อ J_2 ถูกขับผ่านข้อต่อ J_1 และข้อต่อ J_6 ถูกขับผ่านข้อต่อ J_5 โดยใช้สายพานและเฟืองตอกจอก (Bevel gear)

วัสดุที่ใช้ในการสร้างเป็นอลูมิเนียมออกแบบให้ได้รูปร่างดังรูปที่ 3.4 ในส่วนของเท้ามียางกันกระแทกและมีอุปกรณ์ตรวจวัดแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่เท้า โดยรายละเอียดดังกล่าวกำลังอยู่ในขั้นตอนการออกแบบซึ่งจะได้นำเสนอต่อไปในรายงานวิจัยฉบับหน้า



รูปที่ 3.4 แนวความคิดด้านกลไกทางกลและจำนวนองศาอิสระของหุ่นยนต์สองขาที่จะสร้างขึ้นที่ FIBO

4. การหาตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งเชิงมุมของข้อต่อโดยการวัดค่าจริงของโครงสร้างมนุษย์

4.1 เครื่องมือวัด

ความจำเป็นที่เราต้องทำการวัดการเคลื่อนที่ข้อต่อในส่วนต่างๆ ของมนุษย์เนื่องจากเราต้องการสร้างหุ่นยนต์ที่มีการเดินคล้ายมนุษย์ ในหนึ่งวงรอบการเดินของมนุษย์

(Gait cycle) สามารถแบ่งช่วงการเดินออกเป็นสองช่วงได้แก่ ช่วงที่เท้ารับภาระด้วยเท้าทั้งสองเท้า (Double support phase) และช่วงที่เท้ารับภาระแบบเท้าเดียว (Single support phase) ช่วงที่เท้ารับภาระด้วยเท้าทั้งสองเท้าเกิดขึ้นประมาณ ยี่สิบเปอร์เซ็นต์ของวงรอบการเดินและช่วงเท้าที่รับภาระแบบเท้าเดียวเกิดขึ้นประมาณแปดสิบเปอร์เซ็นต์ของวงรอบการเดินโดยในช่วงนี้เท้าอีกข้างต้องทำการก้าวไปตำแหน่งใหม่ ขณะทำการก้าวเดิน การออกแบบเครื่องมือวัดต้องสามารถทำให้ผู้สวมใส่เดินได้อย่างปกติอีกทั้งมุมที่จะทำการวัดต้องชัดเจนโดยอ้างอิงกับองศาอิสระของหุ่นยนต์ที่สำคัญทั้งหมดแปดองศาอิสระดังแสดงดังรูปที่ 4.1

ตัวตรวจวัดการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อต่อต่างๆที่ใช้วัดคือ โพเทนซีโอมิเตอร์ จากนั้นได้ทำการแปลงสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog) ให้เป็นแบบเป็นช่วง (Digital) และทำการเชื่อมโยงข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการประมวลผล หลังจากนั้นได้นำค่าที่ได้ไปการอนุพันธ์เทียบกับเวลาเพื่อหาความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมตามลำดับดังแสดงการทำงานในรูปที่ 4.2



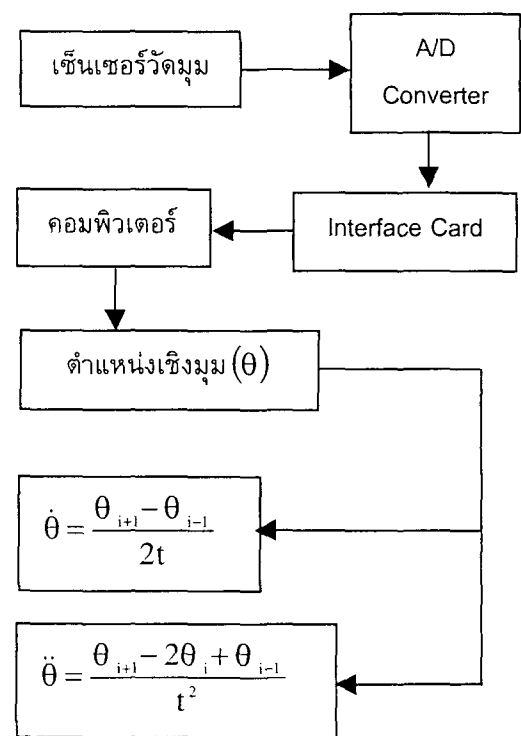
รูปที่ 4.1 เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของข้อต่อมนุษย์

4.2 ผลการทดลอง

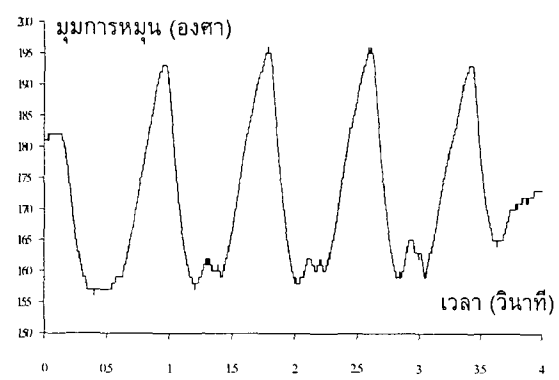
หลังจากทำการติดตั้งเครื่องมือวัดเข้ากับผู้ทดลองและกำหนดให้ผู้ทดลองทำการก้าวเดินด้วยความเร็ว 2.5 เมตรต่อ

วินาที เราสามารถวัดมุมของข้อต่อแต่ละข้อดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5

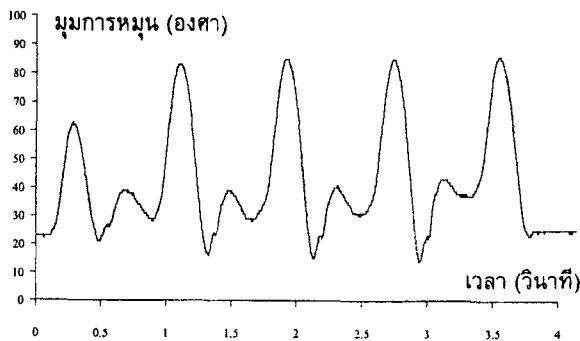
ข้อมูลที่ได้จากการวัดเป็นหนึ่งในข้อมูลที่จะนำไปช่วยในการออกแบบมุมการหมุนสูงสุดและค่าแรงบิดที่ต้องการของข้อต่อแต่ละข้อของหุ่นยนต์ ลักษณะทางเรขาคณิต (Geometry) ขนาดของระบบต้นกำลัง (Actuation System) และนำไปสร้างทางเดิน (Gait trajectory) ของหุ่นยนต์ต่อไป



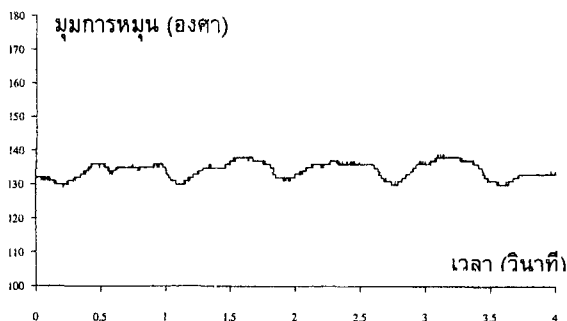
รูปที่ 4.2 การหาค่าตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งเชิงมุมของข้อต่อมนุษย์โดยใช้เครื่องมือวัด



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อสะโพกในระนาบด้านข้าง



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อหัวเข่าในระนาบด้านข้าง

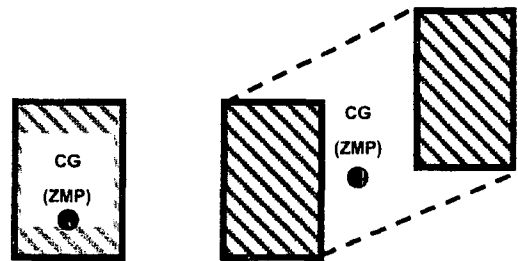


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อสะโพกในระนาบด้านหน้า

5. เสถียรภาพในการเดินของหุ่นยนต์สองขาและการควบคุม

เสถียรภาพในการเดิน (Gait stability) ถูกนิยามโดย M. Vukobratovic [13] นักวิจัยชาวยูโกสลาเวีย ซึ่งได้พิจารณาการเดินของหุ่นยนต์สองขาออกเป็นสองชนิด คือ การเดินแบบสถิตศาสตร์ (Static walking) เป็นการเดินที่ไม่คำนึงถึงผลของความเฉื่อยที่เกิดขึ้นกับมวลของหุ่นยนต์ และการเดินแบบพลศาสตร์ (Dynamic walking) เป็นการเดินที่คำนึงถึงผลของความเฉื่อยที่เกิดขึ้นกับมวลของหุ่นยนต์ เสถียรภาพในการเดินแบบสถิตศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity: CG) ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจตุรกรับ (Supporting polygon) ซึ่งแทนด้วยจุด CG ตรงกับใดที่พื้นที่ของรูปเหลี่ยมของจตุรกรับมากและจุดศูนย์ถ่วงต่ำ โอกาสที่หุ่นยนต์จะเกิดการพลิกคว่ำ (Tip-over) ก็น้อยลง สำหรับเสถียรภาพในการเดินแบบพลศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อจุดผลรวมของโมเมนต์เป็นศูนย์ (Zero moment point :ZMP) ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจตุรกรับโดยจุด ZMP เป็นจุดที่เกิดจากผลรวมของ

โมเมนต์ที่เกิดจากความเฉื่อยและผลรวมโมเมนต์ที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์ถ่วงมีค่าเป็นศูนย์



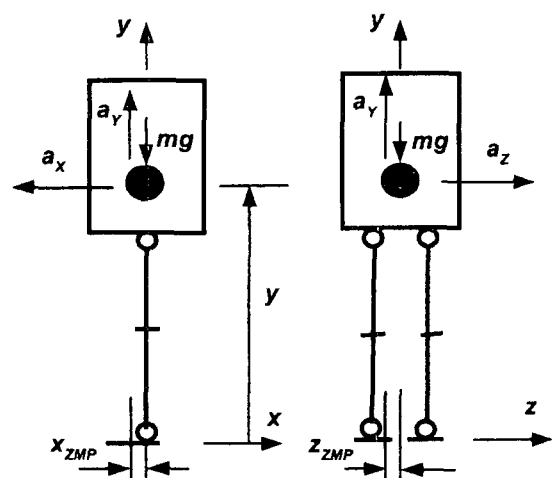
รูปที่ 5.1 ภาพด้านบน (Top view) ของตำแหน่งเท้าของหุ่นยนต์ จุด CG และจุด ZMP

5.1 การวิเคราะห์ ZMP ของแต่ละท่าทางการเดิน

เราได้ทำการวิเคราะห์ ZMP โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อดู ZMP ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการเดินโดยได้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดสี่ช่วงดังนี้

5.1.1 ช่วงสมดุลแบบสถิตศาสตร์

ช่วงนี้เป็นช่วงที่มนุษย์ยืนอยู่นิ่ง ๆ หรือขณะเตรียมก้าวเดิน โดยอวัยวะต่างๆของร่างกายที่มีผลต่อการก้าวเดินจะถูกจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมอัตราเร่งที่เกิดขึ้นในช่วงนี้มีน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ การควบคุมความสมดุลทำได้โดยควบคุมเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity) ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจตุรกรับ ดังรูปที่ 5.2 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้



รูปที่ 5.2 การยืนแบบสมดุลสถิตศาสตร์

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

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

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

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

โดยที่ ZMP คือจุดรวมโมเมนต์เป็นศูนย์ R คือแรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำกับเท้า a คืออัตราเร่งเชิงเส้น m คือมวลของลำตัว g คืออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกและ y คือระยะในแนวดิ่งของมวลเทียบกับจุด ZMP ในการทำสมดุลในช่วงนี้สามารถพิจารณาให้เป็นการทำสมดุลแบบสถิตศาสตร์ซึ่งอัตราเร่ง a_x และ a_y มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจุดผลรวมโมเมนต์เป็นศูนย์ x_{ZMP} และ z_{ZMP} ในช่วงสมดุลแบบสถิตศาสตร์จึงมีค่าเป็นศูนย์

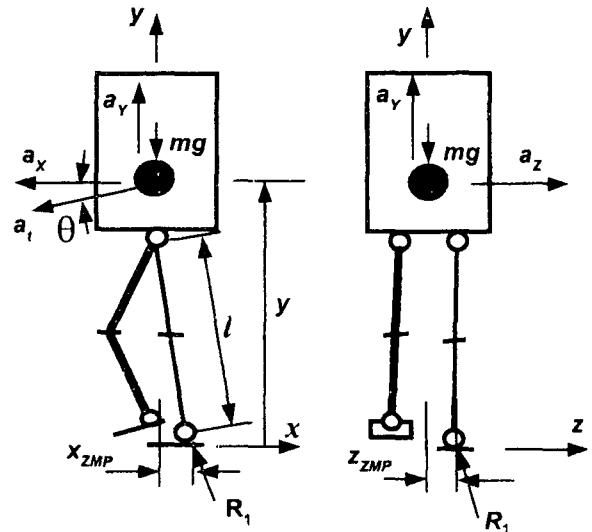
5.1.2 ช่วงการก้าวเดิน

การรับภาระของเท้าในช่วงนี้เป็นแบบเท้าเดียว ส่วนเท้าอีกข้างทำการแกว่งเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งการรองรับใหม่ดังรูปที่ 5.3 การก้าวเดินในช่วงนี้ส่งผลให้หุ่นยนต์เกิดการล้ม (Tipping) ไปในทิศทางของการเดินและในทิศทางตั้งฉากกับการเดิน มุมเอียงที่เกิดจากการล้มส่งผลโดยตรงกับอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้ l คือระยะจากข้อหมุนสะโพกถึงข้อเท้าและในช่วงที่กำลังพิจารณาไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาว และ θ คือมุมการเอียงของมวลในแนวดิ่งโดยมีจุดหมุนที่ ZMP a_x คืออัตราเร่งเชิงเส้นที่ตั้งฉากกับระยะ l ดังนั้นช่วงการรับภาระแบบเท้าเดียวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

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

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



รูปที่ 5.3 ช่วงการรับภาระแบบเท้าเดียว

และในทำนองเดียวกันการเคลื่อนที่ในระนาบ z, y สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

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

จากสมการที่ (6) และ (7) เห็นได้ว่านอกจาก ZMP แล้ว มุมการล้ม θ ยังมีผลโดยตรงกับอัตราเร่งที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ด้วย ในทางปฏิบัติเมื่อต้องการเพิ่มหรือลดความเร็วสามารถทำได้โดยการควบคุมมุมการล้มก่อนเข้าสู่ช่วงการรับภาระแบบสองเท้าหรือช่วงกระแทกซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

5.1.3 ช่วงการรับภาระแบบสองเท้า

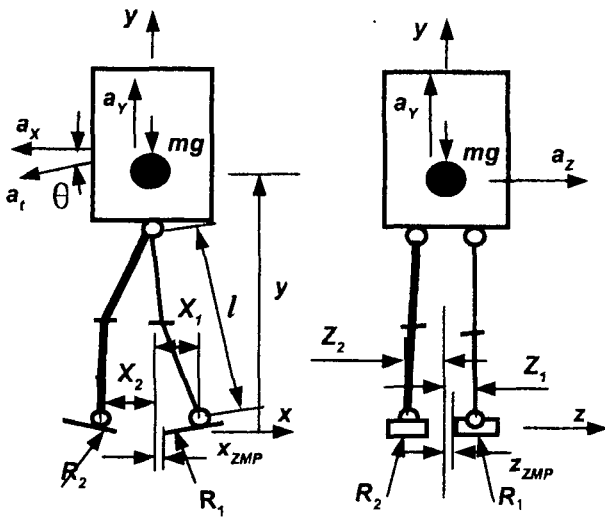
ช่วงการรับภาระแบบเท้าเดียวสิ้นสุดเมื่อเท้าที่แกว่งก้าวมาสัมผัสพื้น โดยในช่วงที่เริ่มสัมผัสมีการกระแทกของเท้าดังกล่าวเกิดขึ้น หลังจากนั้นเป็นการรับภาระแบบสองเท้า โดยเฉลี่ยในช่วงนี้เกิดประมาณย์ลึบเปอร์เซ็นต์ของวงรอบการเดินและน้อยลงเมื่อเดินด้วยความเร็วที่สูงขึ้น

จากรูปที่ 5.4 สามารถเขียนให้อยู่ในสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \sum M_{ZMP} = 0; \\ (ma_y + mg)x_{ZMP} + R_{y1}(x_1 - x_{ZMP}) \\ - R_{y2}(x_2 + x_{ZMP}) = ma_x y \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Sigma F_y = ma_y;$$

$$R_{y1} + R_{y2} - mg = ma_y \quad (9)$$



รูปที่ 5.4 ช่วงการรับภาระแบบสองเท้า

จัดรูปสมการที่ (8) ได้ดังนี้

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

แทนสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (10) ได้คือ

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

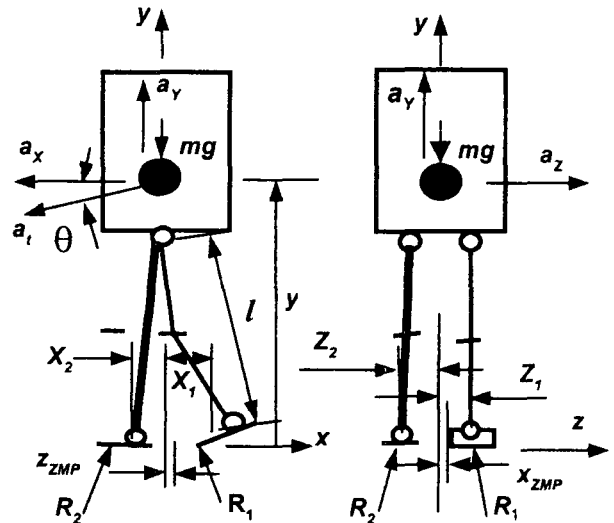
และในทำนองเดียวกันเราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ในระนาบ y, z ได้เช่นเดียวกัน คือ

$$\frac{R_{y1}z_1 - R_{y2}z_2}{my} = a_z \quad (12)$$

เห็นได้ว่าจากสมการที่ (11) และ (12) ไม่มี ZMP อยู่ในสมการ ดังนั้นอัตราเร่งที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์มีผลโดยตรงมาจากแรงปฏิกิริยาในแนวแกน y (R_{y1}, R_{y2}) ซึ่งเครื่องหมายหน้า R_{y1} และ R_{y2} เป็นตัวบ่งบอกทิศทางที่ได้มาจากแรงปฏิกิริยาจากการกระทำที่ข้อต่อต่างๆ

5.1.4 ช่วงออกแรงส่ง

เป็นช่วงรอยต่อระหว่างช่วงรองรับภาระแบบสองเท้ามาสู่ช่วงรองรับแบบเท้าเดียวอีกครั้ง การเดินของมนุษย์ก็เหมือนการทำงานของระบบทางกลทั่วไปที่มีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องจากผลของความเสียดทาน ดังนั้นในหนึ่งวงรอบของการเดินจึงมีช่วงหนึ่งที่ต้องออกแรงชดเชยเพื่อรักษาความเร็วการเดินให้คงที่หรือออกแรงเพิ่มเพื่อเพิ่มความเร็วในการเดิน



รูปที่ 5.5 การให้แรงส่งที่ปลายเท้า

เนื่องจากในช่วงนี้ยังเป็นการรับภาระแบบสองเท้าอยู่จึงสามารถนำสมการในช่วงการรับภาระแบบสองเท้ามาพิจารณาได้ดังนี้คือ

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

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

ในช่วงนี้เกิดขึ้นก่อนที่เท้าที่ทำการให้แรงเริ่มแกว่งเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ จากรูปที่ 5.5 แรงปฏิกิริยา R_1 มีขนาดเพิ่มขึ้นชั่วขณะโดยได้แสดงเป็นเส้นประขณะเมื่อทำการออกแรงส่งซึ่งทำให้อัตราเร่งเพิ่มขึ้นตามโดยจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับให้การให้แรงในช่วงนี้

5.2 การควบคุม ZMP

เมื่อเรารู้ถึงตำแหน่งของ ZMP ที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้างต้นก็สามารถทำการควบคุมความสมดุลของหุ่นยนต์สองขาได้

ซึ่งวิธีการควบคุมสามารถกระทำได้สองวิธี โดยวิธีแรกเป็นการให้แรงบิดที่ข้อเท้าเพื่อให้ ZMP เปลี่ยนตำแหน่งไปยังจุดที่ต้องการโดยไม่มีการเคลื่อนไหวในส่วนต่างๆ ของร่างกาย วิธีที่สองเป็นการสร้างโมเมนต์ขึ้นมาจากการเคลื่อนย้ายมวลในส่วนของร่างกายเพื่อให้แขนงมีการเปลี่ยนแปลงระยะ และยังรวมถึงการเคลื่อนที่ของส่วนต่างๆ ด้วยความเร่ง ในรายงานฉบับนี้เราได้ทำการจำลองการควบคุม ZMP โดยเลียนแบบการทำสมดุลของมนุษย์ด้วยวิธีเคลื่อนย้ายลำตัวส่วนบน (Trunk motion) เพื่อทำให้เกิดเสถียรภาพในการทรงตัวดังจะได้กล่าวต่อไป

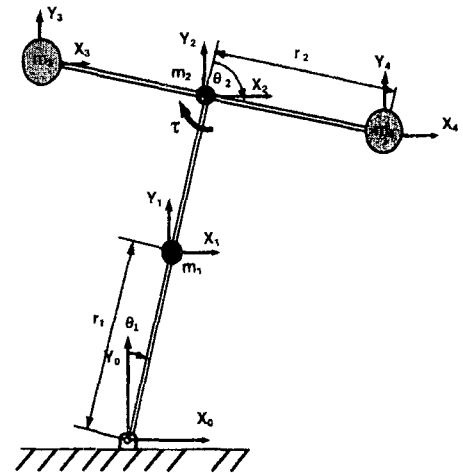
6. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลและการควบคุม

การศึกษาการทำสมดุลของหุ่นยนต์สองขา ส่วนหนึ่งสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมของมนุษย์ได้โดยตรงซึ่งสามารถแยกการสมดุลออกเป็นสองช่วง คือ การสมดุลในช่วงการเดินและการสมดุลในช่วงที่ยืนอยู่กับที่และเมื่อทำการพิจารณาตัวแปรที่ทำให้เกิดการสมดุลพบว่า การเคลื่อนที่ของลำตัว (Trunk motion) ซึ่งถูกพิจารณาเป็นจุดศูนย์กลางมวล มีผลต่อการรักษาความสมดุลของมนุษย์ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งสามารถจำลองแบบการรักษาความสมดุลดังกล่าวให้เป็นระบบกลไกทางกลที่มีชื่อว่า A Planar Two Degree of Freedom Inverted Pendulum: PTIP โดยระบบนี้ประกอบด้วยคานสองคาน โดยคานที่หนึ่งมีความยาว $2r_1$ มีการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมเป็น θ_1 เทียบกับระนาบอ้างอิงและมีจุดศูนย์กลางมวล m_1 อยู่ตรงกลางคาน ส่วนคานที่สองหนึ่งมีความยาว $2r_2$ มีการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมเป็น θ_2 เทียบกับ



รูปที่ 6.1 พฤติกรรมการทรงตัวของมนุษย์โดยใช้การเคลื่อนไหวของลำตัวส่วนบน

ระนาบอ้างอิงและมีจุดศูนย์กลางมวล m_2 อยู่ตรงกลางคาน นอกจากนี้ยังมีลูกตุ้มมวล m_3 และ m_4 แขนงอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านของคานที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ส่วนวิธีการควบคุมความสมดุลระบบดังกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.2 แบบจำลอง PTIP

6.1 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของ PTIP

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

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

เมื่อ L คือ ผลต่างระหว่างพลังงาน จลน์ ($T(q, \dot{q})$) และพลังงานศักย์ ($V(q)$) ซึ่งเขียนเป็น สมการได้ดังนี้คือ

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \quad (16)$$

τ_i และ q_i คือ Generalized Force และ Generalized Coordinate ที่ i ในระบบ จากรูปที่ 6.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของพลังงาน จลน์และพลังงานศักย์ได้ดังนี้คือ

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

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

นำสมการที่ (17) และ (18) แทนลงในสมการที่ (16) และกำหนดให้มวล m_3 เท่ากับมวล m_4 ดังนั้นสามารถเขียนสมการทางพลศาสตร์ของระบบในสมการที่ (15) ได้ดังนี้ คือ

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

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

เมื่อ g คืออัตราเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก เห็นได้ว่าสมการพลศาสตร์ของระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นตรงในขั้นแรกนี้เราทำการศึกษากำหนดให้ระบบมีความเป็นเชิงเส้นที่ตำแหน่งสมดุลที่มุม θ_1 มีค่าเป็นศูนย์โดยใช้วิธีการของ Taylor Series และอนุโลมให้มุมดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากตำแหน่งสมดุล ดังนั้นสมการที่ (19) และ (20) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการของสถานะ (State Equation) แบบเชิงเส้นได้ดังนี้

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

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

เมื่อ $x = [\theta_1 \ \dot{\theta}_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_2]^T$ คือตัวแปรสถานะ (State variable) $u = \tau_2$ คือ สัญญาณที่ป้อนให้กับระบบ A คือ เมตริกซ์ของระบบ (System matrix) และ B คือ เมตริกซ์อินพุต (Input matrix) H คือเอาต์พุตเมตริกซ์ของระบบ (Output matrix) โดยในที่นี้เราสนใจการเปลี่ยนแปลงของมุม θ_1 เมื่อแทนค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆจากตารางที่ (1) ลงในสมการที่ (21) และ (22) จะได้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 26.5687 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -26.5687 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -10.4167 \\ 0 \\ 158.5648 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$Y = [1 \ 0 \ 0 \ 0][\theta_1 \ \dot{\theta}_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_2]^T \quad (25)$$

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 ²

เมื่อหารากของเมตริกซ์ของระบบ (Characteristic Equation) พบว่ามีรากที่มีค่าเป็นบวกอยู่หนึ่งตัว ซึ่งแสดงได้ว่าระบบมีความไม่เสถียรเมื่อทำการควบคุมแบบระบบเปิด (Open-loop control) ดังนั้นจึงต้องใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop control) ดังนี้

6.2 การควบคุมแบบป้อนกลับและผลจำลองการตอบสนองของระบบ

การควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นของระบบดังกล่าวสามารถเลือกใช้ได้หลายวิธีซึ่งในที่นี้เลือกใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ (State feedback control) ชนิดควบคุมระบบ (Regulator system) ก่อนทำการควบคุมระบบแบบป้อนกลับดังกล่าว เราต้องทำการพิจารณาว่าระบบสามารถควบคุมได้หรือไม่ (System controllable: C) และระบบสามารถสังเกตการณ์ได้หรือไม่ (System observable: O) ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (26) และ (27) ตามลำดับ

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

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

ระบบสามารถควบคุมได้ก็ต่อเมื่อค่า ดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) ของเมตริกซ์ C มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (26) พบว่าค่า ดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ C มีค่าเท่ากับ 1.7×10^9 ซึ่งแสดงว่าระบบนี้สามารถควบคุมแบบป้อนกลับสถานะได้ และระบบสามารถสังเกตการณ์ได้ก็ต่อเมื่อค่าดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) ของเมตริกซ์ O มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (27) พบว่าค่า ดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ O มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งแสดงว่าระบบนี้ไม่สามารถสังเกตการณ์ได้ แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถติดตัวตรวจจับเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสถานะได้โดยตรงที่จุดหมุนของคานทั้งสอง

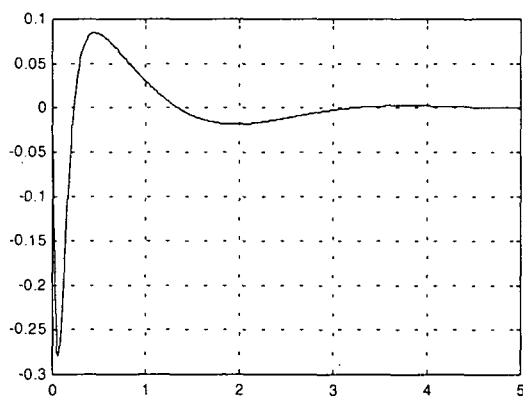
กฎการควบคุม (Control law) แบบป้อนกลับสถานะคือ

$$u = -Kx = \begin{bmatrix} k_{p1} & k_{d1} & k_{p2} & k_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 & \dot{\theta}_1 & \theta_2 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

เมื่อ k_p และ k_d คือ Proportional gain และ Derivative gain ตามลำดับซึ่งสามารถหาได้ด้วยวิธี Pole placement กำหนดตำแหน่งของ Pole ใน S-domain และได้อัตราขยาย (Gain: K) ดังนี้คือ

$$K = \begin{bmatrix} -1.337 + 2.208j & -1.337 - 2.208j & -15 & -15 \\ -129.27 & -23.992 & 1.166 & 0.623 \end{bmatrix}$$

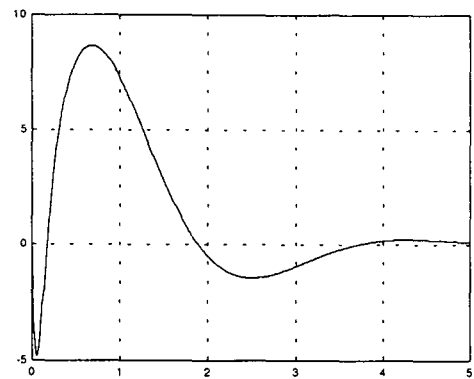
การทดสอบการตอบสนองของระบบโดยกำหนดสถานะเริ่มต้นของระบบให้ระยะจัดของมุม θ_1 และ θ_2 เท่ากับ ศูนย์ ซึ่งเป็นสภาวะสมดุลของระบบ จากนั้นได้ทำการรบกวนระบบให้เสียสมดุลและเมื่อพิจารณาการตอบสนองของระบบจากผลจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ดีดังแสดงจากกราฟรูปที่ 6.4 และ 6.5



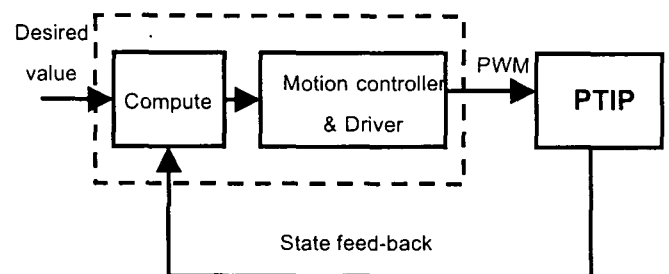
รูปที่ 6.4 การตอบสนองของมุม θ_1 เมื่อให้ Impulse input

6.3 ผลการทดลอง

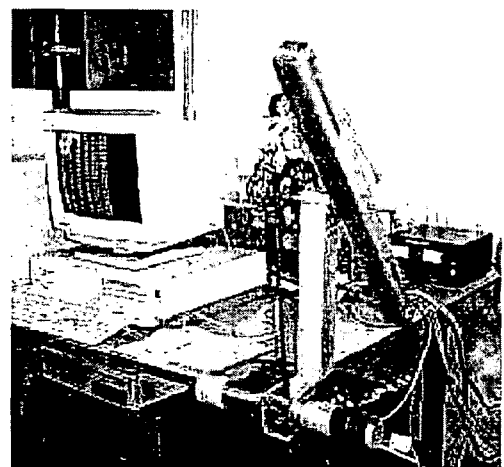
เราได้ทำการสร้างระบบจริงดังรูปที่ 6.7 ซึ่งประกอบด้วย คันที่หนึ่งและสองทำจากอลูมิเนียมกล่อง ลูกตุ้มมวล m_3 และ m_4 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าและใช้มอเตอร์กระแสตรงในการส่งถ่ายแรงบิดผ่านโซ่ไปยังคันที่สอง ในส่วนชุดควบคุมประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่รับค่าป้อนกลับสถานะของระบบและประมวลผลส่งสัญญาณกลับไปยังระบบดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 การตอบสนองของมุม θ_2 เมื่อให้ impulse input



รูปที่ 6.6 ชุดควบคุมของ PTIP



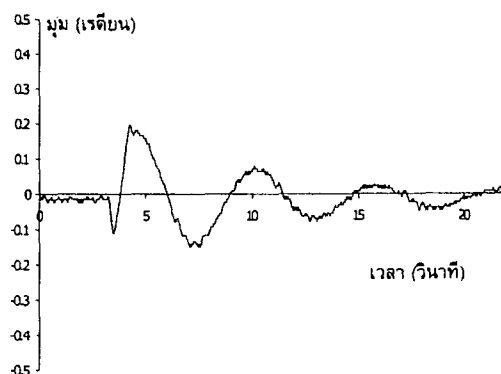
รูปที่ 6.7 PTIP และระบบควบคุมที่ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.8 และ 6.9 เมื่อทำการรบกวนระบบให้เสียสมดุลพบว่าระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้า จากนั้นทำการเพิ่มขนาดของมวล m_3 และ m_4 เป็น 0.5 กิโลกรัม และทำการทดลองรบกวนระบบอีกครั้งพบว่าระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้าลงและมีการสั่นมากขึ้น ทั้งนี้มวลมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับความถี่ธรรมชาติ

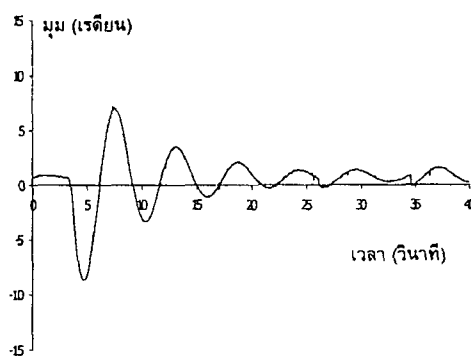
(Natural frequency) ของระบบโดยรวมดังแสดงดังรูปที่ 6.10 และ 6.11 ซึ่งผลของความล่าช้าในการตอบสนองของระบบ อาจเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของชุดส่งถ่ายกำลัง (Backlash) ผลของแรงเสียดทานและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากระบบเอง

7. สรุป

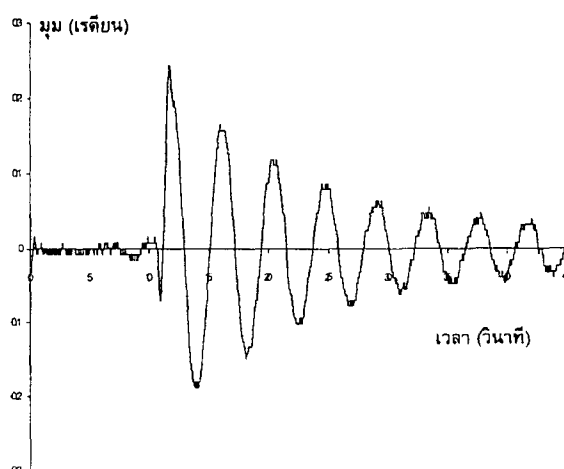
งานวิจัยนี้ได้ทำการได้ทำการวิเคราะห์หองศาอิสระของมนุษย์พบว่าท่าที่มนุษย์เดินได้อย่างสมบูรณ์และมีเสถียรภาพนั้น ขาหนึ่งข้างต้องมีแปดองศาอิสระ ในการออกแบบหุ่นยนต์เราต้องพยายามลดองศาอิสระให้มากที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมซึ่งการออกแบบหุ่นยนต์ให้มีองศาอิสระสามารถทำให้หุ่นยนต์เดินได้อย่างมีเสถียรภาพและคล้ายการเดินของมนุษย์มากที่สุด การวัดมุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อต่างๆ พบว่ากราฟที่ได้เป็นวงรอบที่ค่อนข้างเหมือนเดิมและมีกราฟบางช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นหนึ่งในข้อมูลนำไปช่วยในการออกแบบมุมการหมุนสูงสุดและค่าแรงบิดที่ต้องการของข้อต่อแต่ละข้อของหุ่นยนต์ ลักษณะทางเรขาคณิต (Geometry) ขนาดของระบบต้นกำลัง (Actuation System) และนำไปสร้างทางเดิน (Gait trajectory) ของหุ่นยนต์ต่อไป เสถียรภาพการเดินแบบสถิตศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อทำการควบคุมเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงที่กระทำที่จุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity) ให้ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับ (Supporting polygon) ส่วนเสถียรภาพการเดินแบบพลศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อทำการควบคุมจุดผลรวมของโมเมนต์เป็นศูนย์ (Zero moment point: ZMP) ให้ตกอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจุดรองรับ ซึ่งวิธีการควบคุมจุด ZMP สามารถทำได้โดยการให้แรงบิดที่ข้อเท้าโดยตรงเพื่อให้ ZMP เปลี่ยนตำแหน่งไปยังจุดที่ต้องการ หรือสามารถสร้างโมเมนต์ขึ้นมาจากเคลื่อนย้ายมวลในส่วนต่างๆ ของร่างกาย เพื่อให้แขนแรงมีการเปลี่ยนแปลงเปรียบเสมือนการเคลื่อนที่ของลำตัวส่วนบนของร่างกายมนุษย์ขณะยืนหรือก้าวเดินบนพื้นที่จำกัดซึ่งสามารถจำลองให้เป็นการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง A planar two degree of freedom inverted pendulum: PTIP จากนั้นได้ทำการทดลองระบบควบคุมโดยผลจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจากระบบจริงแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมแบบจำลองดังกล่าวดังกล่าวได้



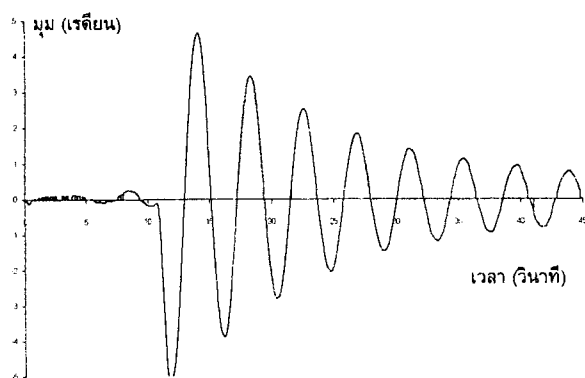
รูปที่ 6.8 ผลการทดลองการตอบสนองของมุม θ_1 เมื่อให้ Impulse input



รูปที่ 6.9 ผลการทดลองการตอบสนองของมุม θ_2 เมื่อให้ Impulse input



รูปที่ 6.10 ผลการทดลองการตอบสนองของมุม θ_1 เมื่อเพิ่มมวล m_3 และ m_4



รูปที่ 6.11 ผลการทดลองการตอบสนองของมุม θ_2
เมื่อเพิ่มมวล m_3 และ m_4

8. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยโครงการ Image guided motion of a humanoid robot

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Hemami and B. F. Wyman, "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 1979. pp. 526-535.
- [2] P. F. Muir and C. P. Neuman, "Dynamic Modeling of Multibody Robotic Mechanism", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-24, No. 4, August 1979. pp. 1546-1551.
- [3] B. Perrin, C. Chevallereau and C. Verdier, "Calculation of the Direct Dynamic Model of Walking Robots: Comparison Between Two Method", IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 1997. pp.1088-1093.
- [4] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking" The International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 2, April 1990. pp. 62-82.
- [5] M. H. Raibert. 1986. "Legged Robot That Balance", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, America.
- [6] A. Takanishi and others, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion" Ro. Man. sy. September 1988.
- [7] J. Yamaguchi and A. takanishi "Design of Biped Walking Robots Having Antagonistic Driven Joints Using Nonlinear Spring Mechanism", Proc. IROS, 1997. pp. 251-259.
- [8] J. Yamaguchi, D. Nishino and A. Takanishi, "Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Driven Joints", IEEE Transaction on Automatic Control, May 1998. pp. 2022-2029.
- [9] C. Shih and W. A. Gruver, "Control of a Biped Robot in the Double-Support Phase", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 22, No. 4, July/August 1992. pp. 729-735.
- [10] K. Mitobe, N. Mori and Y. Nasu, "Nonlinear Feedback Control of a Biped Walking Robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. pp. 2865-2870.
- [11] S. Kajita and K. Tani, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking", IEEE International Conference on Robotics and Automation, February 1996.
- [12] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. pp. 1321-1326.
- [13] M. Vukobratovic, D. Stokic, "Is Dynamic Control Needed in Robotic Systems, and, if So, to What Extent?", The International Journal of Robotics Research, Vol. 2, No. 2, Summer 1983. pp. 18-34.

ประวัตินักวิจัย

Djitt Laowattana

Dr. Laowattana's research is primarily in fundamental areas of robotic dexterity, design for manufacturing / assembly and nonlinear control theory. He was awarded an honor with his B.Eng. from King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT). Under the Monbusho Program, he carried out research in robot force control at Kyoto University, Japan during 1986-1988. He received PhD. in 1994 from Carnegie Mellon University, USA under financial support from the Fullbright Fellowship Program and the AT&T Advanced Research Program. In 1996, he obtained a certificate in Management of Technology from Massachusetts Institute of Technology USA. He holds two US patents and has founded the Center of Operation for Field Robotics Development (FIBO) at KMUTT, Thailand, where he is serving as a research scientist.



Thitisak Chanprom

Mr. Thitisak graduated from King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMINB) with a Bachelor Degree in Production Engineering. He is a member of the Thai team in the RoboCon 1998, held in Osaka, after becoming champion in the TPA Robot Contest. His interest includes controller design and robotic programming. Currently he is a graduate student at Department of Mechanical Engineering at KMUTT, working on control of a humanoid robot with stabilized gait locomotion. His research is under a financial support from the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC). He is a research assistant at Center of Operation for Field Robotics Development (FIBO) at KMUTT, Thailand.



Paisarn Suwanthep

Mr. Paisarn graduated from King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMINB) with a Bachelor Degree in Production Engineering. He is a member of the Thai team in the RoboCon 1998, held in Osaka, after becoming champion in the TPA Robot Contest. His interest includes mechanical design and robot control. Currently he is a graduate student at Department of Mechanical Engineering at KMUTT, working on dynamic stability based design of a humanoid robot. His research is under a financial support from the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC). He is a research assistant at Center of Operation for Field Robotics Development (FIBO) at KMUTT, Thailand.

