

การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์เดินบนระนาบแบบขนาน

Design and Development of a Parallel Planar Walking Robot

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ณัฐดนัย ดันตวิรุฬห์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Email: fmevsv@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้โดยใช้ขา หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นกรอบสองกรอบที่เชื่อมต่อกันโดยใช้กลไกแบบขนาน (Parallel link mechanism) และหุ่นยนต์สามารถเดินได้โดยควบคุมการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของแต่ละกรอบสลับกัน ทำให้หุ่นยนต์ที่สร้างมีจำนวนองศาความอิสระน้อยเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ที่ใช้กลไกขาแต่ละขาแบบแยกอิสระ คล้ายแมลง ในรายงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการออกแบบกลไก การหาสมการแสดงการเคลื่อนที่ (Kinematics) ของหุ่นยนต์ รูปแบบการควบคุมหุ่นยนต์ การทดสอบและการผลการทดสอบ

การทดสอบหุ่นยนต์ประกอบด้วยการเคลื่อนที่ในลักษณะต่าง ๆ และการหมุนตัว หลังจากนั้นจึงวัดความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ จากการทดสอบความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่สูงสุดมีค่าไม่เกิน 1.5% ภายในระยะทางการเคลื่อนที่ 2.0 เมตร และความผิดพลาดเชิงมุมสูงสุดไม่เกิน 2.5 องศาต่อการหมุนตัว 1 รอบ งานวิจัยในอนาคตสามารถเพิ่มความถูกต้องในการเคลื่อนที่ได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensors) ต่าง ๆ เพื่อป้องกันข้อมูลของสถานะแวดล้อม อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของหุ่นยนต์อีกด้วย

Abstract

The design of a walking robot is studied in this research. The study includes mechanism design, kinematics design and motion controller. The walking robot consists of two parallel planar frames with will be formed a 3-DOF motion, the position in planes at centroid and a rotation angle of the plane relative to the other. Controlling the relative motion of the two

planar frames generates the robot motion. The advantage of parallel frames walking robot over the insect-like robot is the fewer degree of freedoms needed in the parallel frames walking robot. This means that fewer actuators required.

The accuracy tests of the robot itself consist of the measurement of motion error in different type of walking and turning or body rotation. The maximum error of walking in a 2-meter straight line is less than 1.5% and the error of turning or body rotation is less than 2.5 degree per revolution. This error dominated from the environment because of the lack of environment sensors such as sensors to detect robot positions relative to the reference frame.

1. บทนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทแทนมนุษย์ในด้านต่าง ๆ มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม การก่อสร้าง หรือ การสำรวจ หนึ่งในหุ่นยนต์เหล่านี้คือ หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) สามารถทำงานสำรวจหรือ การขนวัสดุในพื้นที่ที่เป็นอันตรายแทนคนได้ ส่วนประกอบสำคัญของหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งลักษณะคล้ายล้อของยานพาหนะ หรือคล้ายขาของแมลง เห็นได้ว่าข้อได้เปรียบของ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ที่ใช้ขาในการเคลื่อนที่คือ ความสามารถในการเดินไปบนภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ มีลักษณะลาดชัน ได้ดีกว่าการใช้ล้อ ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงขอเสนอการออกแบบ และการสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ด้วยขาเดิน (Walking robot) ที่ใช้งานได้จริง

ลักษณะหุ่นยนต์ที่ใช้ขาในการเดิน อาจมีตั้งแต่ หนึ่งขา ไปจนถึง แปดขา โดยทั่วไปมักเป็น สี่และ หกขา เนื่องจากสามารถรักษาสสมดุลไว้ได้ตลอดเวลา โดยใช้ 3 ขาวางบนพื้นในขณะที่อีก 3 ขา ทำหน้าที่ก้าวเดิน ตัวอย่างหุ่นยนต์ที่ใช้ขาที่ได้มีการค้นคว้าวิจัยมาแล้วได้แก่ MECANT I [1], TITAN VI [2], TITAN VIII [3], Hexax-I [4] และ TUM [5] ข้อดีของหุ่นยนต์ที่ใช้ขาเดินคือสามารถเคลื่อนที่ไปในภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ ในกรณีหุ่นยนต์สองขา มักมุ่งเน้นไปทางด้าน การพัฒนาหุ่นยนต์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับมนุษย์ โดยอาศัยวิธีการควบคุมขั้นสูง เนื่องจาก การเดินจะเป็นลักษณะกึ่งเสถียรภาพ (quasi dynamic) กล่าวคือ ในขณะที่ก้าวเดินจะมีเพียงขาเดียวที่ตั้งอยู่บนพื้น ในกรณีของหุ่นยนต์สองขา ซึ่งจะต้องมีการรักษาสสมดุล เช่นเดียวกับการเดินของมนุษย์

1.1 หุ่นยนต์ที่มีสี่ขา

หุ่นยนต์ที่มีสี่ขาจะสามารถเดินในลักษณะสมดุลได้ โดย หนึ่งขาจะมีอิสระในการก้าวเดิน ในขณะที่อีกสามขา จะอยู่บนพื้นการรักษาสสมดุล ต้องอาศัยการย้ายจุดศูนย์กลางมวล ให้อยู่ภายในพื้นที่สามเหลี่ยม ที่เกิดจากการวางตำแหน่งของขาทั้งสาม (Triangle of support) ตลอดเวลา แต่ละขาจะมีลักษณะคล้ายแมลง ทำให้สามารถปรับท่าเดิน (Gait) ให้เหมาะสมกับพื้นผิวง่าย งานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ TITAN VI [2], TURTLE-1 [6] มีกลไกขาที่ง่าย และ มีความแข็งแรง

1.2 หุ่นยนต์ที่มีหกขา

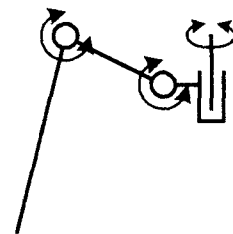
หุ่นยนต์ที่มีหกขาจะสามารถเดินในลักษณะสมดุลได้ โดย จะมีขาที่มีอิสระในการก้าวเดินสามขา ในขณะที่อีกสามขาจะอยู่บนพื้น ซึ่งเห็นได้ว่า จุดศูนย์กลางมวลจะอยู่ภายใน Triangle of Support

HEXAX-I [4] เป็นหุ่นยนต์หกขาที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน เนื่องจากมีข้อดีคืออัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักดีกว่ามอเตอร์กระแสตรง TUM [5] เป็นหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการวิเคราะห์การเดินจากแมลง Walking Stick (Carausius Morosus) ลักษณะพิเศษคือขาหุ่นยนต์ซึ่งได้รับการออกแบบให้รับน้ำหนักได้มาก และมีองศาอิสระมากกว่าสาม

1.3 งานวิจัยด้านการออกแบบขาหุ่นยนต์

งานวิจัยของ HIROSE [7], [8] กล่าวถึงการออกแบบขาโดยใช้หลัก GDA (Gravitationally Decoupled Actuation) เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นราบ ในทางทฤษฎี จะไม่ต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อน เนื่องจากทิศทางของความเร็ว (ทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่) ตั้งฉากกับทิศทางของแรง (น้ำหนักของหุ่นยนต์) แสดงให้เห็นว่าผลรวมกำลังทั้งหมดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อนจ่ายออกมาจะมีค่าเป็นศูนย์

ข้อดีของหุ่นยนต์เดินที่มีกลไกและการควบคุมแต่ละขาแยกเป็นอิสระคือ มีความสามารถในการปรับท่าเดินให้เหมาะสมกับพื้นผิว แต่ข้อด้อยที่ต้องพิจารณาคือ กลไกและการควบคุมขาหุ่นยนต์มีความสลับซับซ้อน ในกรณีที่ต้องการให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง (3-Dimensional space) แต่ละขาของหุ่นยนต์ต้องมีองศาอิสระอย่างต่ำสามเปรียบได้กับการเคลื่อนที่ภายใน space ของ manipulator arm ดังรูปที่ 1 ดังนั้นถ้าหุ่นยนต์มี 6 ขา จะต้องควบคุมข้อต่อต่างๆ ถึง 18 แห่ง!



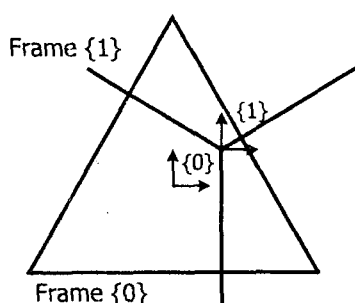
รูปที่ 1 ตัวอย่างขาหุ่นยนต์ที่มี 3 องศาอิสระ

1.4 หุ่นยนต์ที่ใช้กลไกแบบขนาน (Parallel link robot)

เปรียบเทียบระหว่างกลไกแบบขนานกับกลไกแบบอนุกรม (Serial) เช่น กลไกของแขนกลโดยทั่วไป ข้อต่อหนึ่งของกลไกแบบขนาน จะมีจุดต่อกับข้อต่ออื่นๆ มากกว่าสองจุดขึ้นไป แต่แบบอนุกรมมีจุดต่อเพียงจุดเดียว ซึ่งกลไกขาตามรูปที่ 1 จะเป็นแบบอนุกรมเช่นกัน

งานวิจัย [9], [10] เสนอรูปแบบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้ขาซึ่งประกอบด้วยกรอบ (Frame) สองกรอบเคลื่อนที่สัมผัสกัน โดยใช้กลไกข้อต่อแบบขนานและให้ขาแต่ละขายึดติดกับแต่ละกรอบ การเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นเมื่อให้กรอบหนึ่งเป็นกรอบอ้างอิง (reference frame) และอีกกรอบหนึ่งเคลื่อนที่สัมผัสกับกรอบอ้างอิงดังรูปที่ 2 .ในลักษณะของการเลื่อนตำแหน่ง และการหมุน

(translation and rotation) ดังนั้น ถ้าให้กรอบอ้างอิงยึดติดกับพื้น จะทำให้เกิดการเดินในลักษณะเดียวกับการก้าวเท้าของมนุษย์นั่นเอง หุ่นยนต์ที่เดินในลักษณะนี้ เรียกว่า หุ่นยนต์เดินแบบเฟรม (frame walking robot) ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถเลือกตำแหน่งวางเท้าได้อย่างอิสระ แต่ก็มีเสถียรภาพ โดยแต่ละกรอบยึดติดกับขาสามขา อีกทั้งเมื่อให้แต่ละขาสสามารถยืดหดได้อย่างอิสระ จะทำให้ควบคุมความลาดเอียงของแต่ละกรอบได้ โดยสรุปจะใช้ 2-3 องศาความอิสระ ในการเคลื่อนกรอบสัมพัทธ์กันและ 6 องศาความอิสระ ของขาหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงควบคุมข้อต่อทั้งหมดเพียง 8-9 แห่ง



รูปที่ 2 หุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่แบบ Relative frames

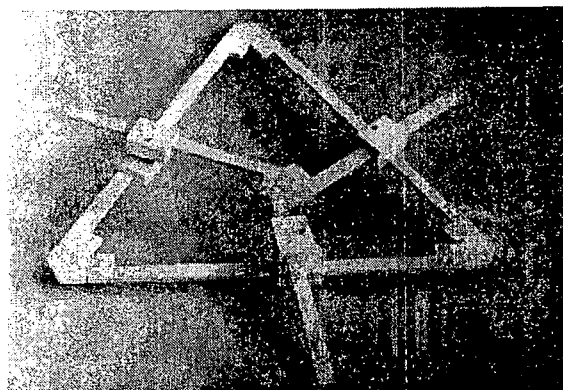
2. การออกแบบ

2.1 กลไกการเคลื่อนที่

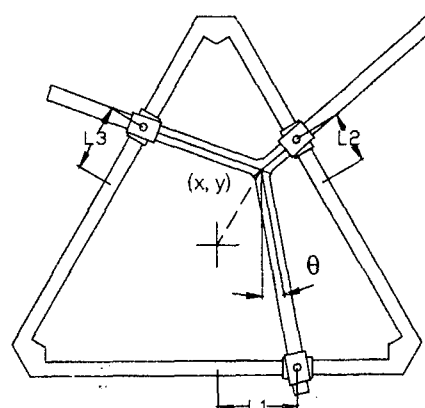
ในเบื้องต้น ต้องการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ และสามารถหมุนตัวไปในทิศทางที่ต้องการได้ นั่นคือกรอบสองกรอบที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันประกอบด้วย องศาความอิสระ เป็น 3 ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) เช่น มอเตอร์จำนวน 3 ตัว หลักการออกแบบโดยทั่วไปคือให้ลักษณะของกลไกไม่มีการขัดกัน และ ให้มีผลลัพธ์เป็นค่าเดียว (เมื่อกำหนดค่าอินพุต ให้หนึ่งชุด คือตำแหน่งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งสาม จะได้เอาท์พุตคือ ตำแหน่งและการหมุนของกรอบ เพียงชุดเดียว)

กลไกที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 4 ใช้กลไกแบบ PRP จากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นตามรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ลักษณะกลไกเช่นนี้สามารถทำงานได้ดี และสามารถลดปัญหาการโก่งตัวซึ่งเกิดจากน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ได้

เนื่องจากมีการยึดที่ปลายข้อต่อเลื่อนทั้งสองด้าน โครงสร้างมีความสลับซับซ้อนน้อย และมีน้ำหนักเบา



รูปที่ 3 แบบจำลองของกลไก



รูปที่ 4 รูปแบบของกลไกของหุ่นยนต์ที่ได้สร้างขึ้น

2.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อน

อุปกรณ์ขับเคลื่อนโดยทั่วไปได้แก่ เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ซึ่งสามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราสามารถแบ่งประเภทเซอร์โวมอเตอร์ ตามลักษณะการทำงานได้คือ DC Servo Motor และ DC Brushless Servo Motor ซึ่งมีข้อได้เปรียบ DC Servo Motor คือ สามารถจ่ายกำลังได้มากกว่า DC Servo Motor ที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน หรือกล่าวคือมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักดีกว่า DC Servo Motor แต่ก็มีข้อเสียคือ มีราคาแพงทั้งตัวมอเตอร์และวงจรขับ เนื่องจากมีการแปลงกระแส ไฟที่จะส่งให้มอเตอร์ ให้เป็นรูปคลื่น 3 เฟส เรียงลำดับกันอย่างถูกต้อง ทำให้วงจรขับมีความซับซ้อน

เนื่องจากหุ่นยนต์เดินไม่ต้องการกำลังขับและความเร็วที่สูง เมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ เห็นได้ว่า DC

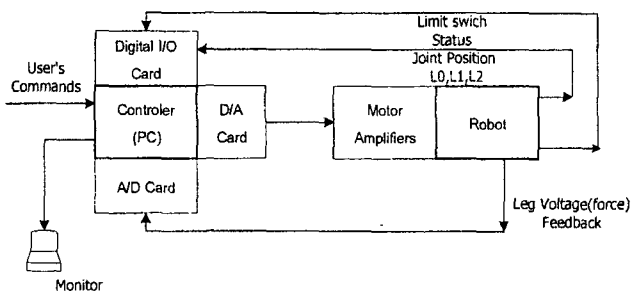
Servo Motor มีความสามารถเพียงพอในการใช้งาน และราคาไม่สูงเกินไป

2.3 อุปกรณ์ตรวจรู้

ในการวัดตำแหน่งของข้อต่อเลื่อนจะใช้ฮอปติคัลเอ็นโคเดอร์ (Optical Encoder) และวัดสถานะของขาหุ่นยนต์เมื่อกดบนพื้นโดยวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานซึ่งแปรผันกับแรงของมอเตอร์ที่ควบคุมขาหุ่นยนต์

2.4 ระบบควบคุม

ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุม โดยรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้แล้วประมวลผลส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ทั้ง 9 ตัวผ่านทางตัวขับมอเตอร์

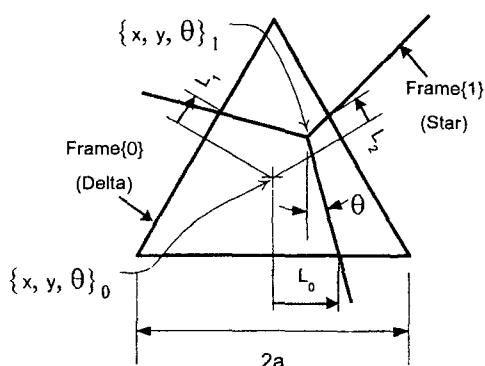


รูปที่ 5 รูปแบบการควบคุมโดยใช้พีซี

ใช้คอมพิวเตอร์ 486 และมีอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลและดิจิตอลเป็นแอนาล็อกเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

3. สมการการเคลื่อนที่ของกลไก

รูปที่ 5 แสดงการตั้งแกนและกำหนดตัวแปรในการคำนวณสมการการเคลื่อนที่ของกลไกที่ได้สร้างขึ้น



รูปที่ 6 การตั้งแกนและกำหนดตัวแปรในการคำนวณสมการการเคลื่อนที่

สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์

$$L_0 = x + \left(y + \frac{a}{\sqrt{3}} \right) \tan \theta \quad (3.1)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$L_1 = \left(-\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan \theta \quad (3.2)$$

และ

$$L_2 = \left(-\frac{x}{2} + \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan \theta \quad (3.3)$$

ในการประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ จะใช้สมการที่ 3.1 ถึง 3.3 เพื่อคำนวณตำแหน่งของข้อต่อเลื่อน จากตำแหน่งกรอบที่กำหนดให้

เนื่องจากในการสร้างหุ่นยนต์ ส่วนประกอบต่างๆย่อมมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นสมการที่ (3.1) ถึง (3.3) ย่อมคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเล็กน้อย ความผิดพลาดทางด้านโครงสร้างของหุ่นยนต์ได้แก่ ความผิดพลาดเชิงมุม และระยะของกรอบ

ความผิดพลาดของกรอบสามเหลี่ยม (Delta frame) มีค่าน้อย เนื่องจากทั้งสามด้านของสามเหลี่ยมมีความยาวมาก (มากกว่า 40 เซนติเมตร) และแต่ละด้านมีความคลาดเคลื่อนน้อย (ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร) ความเบี่ยงเบนจากความเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่าจะน้อย

พิจารณาความผิดพลาดเชิงมุมของกรอบ Star ให้มุมคลาดเคลื่อนเป็น γ_1 และ γ_2 และกำหนดให้จุดศูนย์กลาง (x, y, θ) ผ่านแกนที่ 0 ซึ่งเป็นแกนที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนเชิงมุม จะได้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ดังนี้

$$L'_0 = x + \left(y + \frac{a}{\sqrt{3}} \right) \tan \theta \quad (3.1)^*$$

$$L'_1 = \left(-\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan (\theta + \gamma_1) \quad (3.2)^*$$

$$L'_2 = \left(-\frac{x}{2} + \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan (\theta + \gamma_2) \quad (3.3)^*$$

สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

จากสมการที่ (3.1) ถึง (3.3) สามารถหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ได้ดังนี้

$$x = \frac{\sqrt{3}L_0 - (L_2 - L_1) \tan \theta - a \tan^3 \theta}{\sqrt{3}(1 + \tan^2 \theta)} \quad (3.4)$$

$$y = \frac{\sqrt{3}L_0 \tan \theta + L_2 - L_1 - a \tan^3 \theta}{\sqrt{3}(1 + \tan^2 \theta)} \quad (3.5)$$

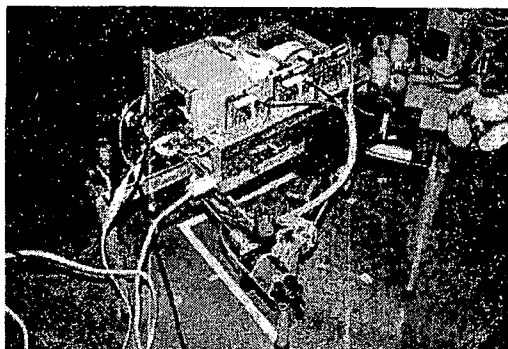
และ

$$\tan \theta = \frac{L_0 + L_1 + L_2}{\sqrt{3}a} \quad (3.6.1)$$

หรือ

$$\theta = \arctan\left(\frac{L_0 + L_1 + L_2}{\sqrt{3}a}\right) \quad (3.6.2)$$

4. การทดสอบ



รูปที่ 7 หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น

เป้าหมายของการทดสอบหุ่นยนต์ เพื่อต้องการทราบว่า หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดหรือไม่ พิจารณาจากลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติของหุ่นยนต์ ข้อกำหนดมีดังนี้

1. หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ไม่เกิน ± 5 (ความผิดพลาด ไม่เกิน 5 เซนติเมตร ต่อระยะทางการเคลื่อนที่ 1 เมตร)
 2. ความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน ± 5 องศา ต่อการหมุนหนึ่งรอบ (360 องศา)
 3. ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ถึง 2 เมตรต่อนาที่
- การทดสอบแบ่งเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การทดสอบการเคลื่อนจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดใด ๆ หรือ การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

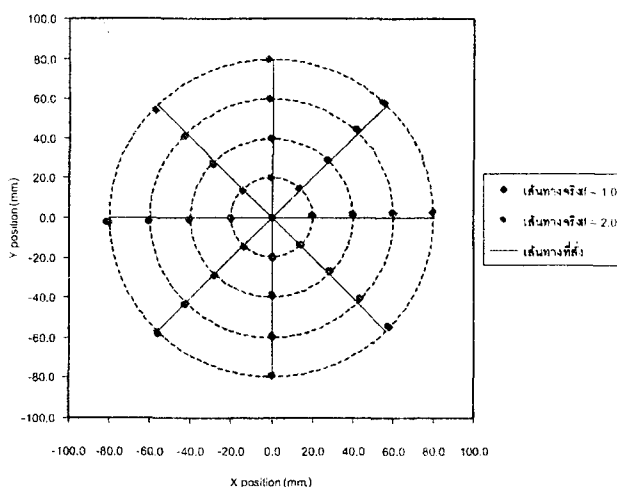
- การเลื่อนตำแหน่งภายในกรอบ วัดตำแหน่งและความเร็วของกรอบ ความเร็วที่ได้จะเป็นความเร็วเฉลี่ยของหุ่นยนต์
- การเลื่อนตำแหน่งใด ๆ เป็นตำแหน่งซึ่งมีระยะห่างออกไปภายนอกกรอบ การเคลื่อนที่จึงต้องเลื่อนแต่ละกรอบสลับกัน ในลักษณะของการเดินอย่างแท้จริง ซึ่งจะทดสอบการเดินในสองลักษณะคือ การเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางที่ต้องการโดยตรง และ การหมุนทิศด้านหน้าของหุ่นยนต์ให้ตรงกับทิศทางการเคลื่อนที่ก่อนแล้วจึงเคลื่อนที่

2. การทดสอบการหมุน โดยหมุนเป็นมุมต่าง ๆ กัน มุมมากที่สุดคือ 360 องศา

การวัดผลการทดสอบใช้หัวเลเซอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ด้านล่างของหุ่นยนต์เพื่อวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เทียบกับพื้น

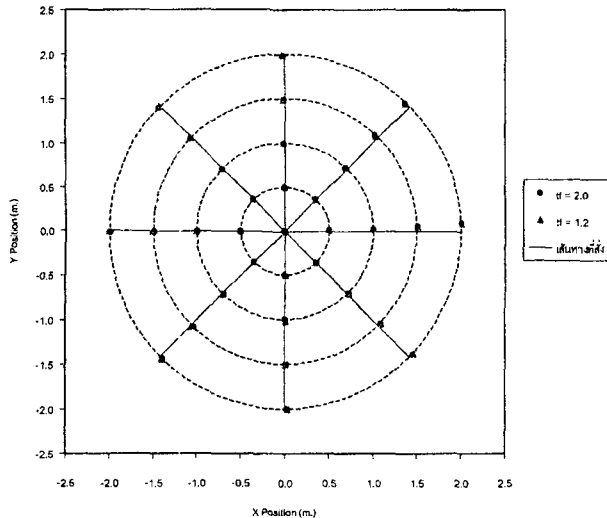
4.1 การทดสอบการเลื่อนตำแหน่งของหุ่นยนต์

4.1.1 การเลื่อนตำแหน่งภายในกรอบของหุ่นยนต์ ทำการทดสอบการเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางต่าง ๆ ที่ความเร็วต่าง ๆ โดยวัดตำแหน่งเทียบกับพื้นเป็นระยะ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 8

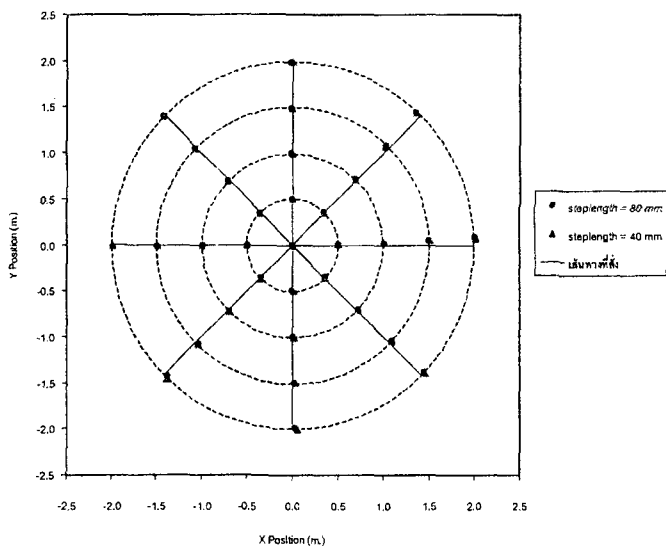


รูปที่ 8 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ภายในกรอบที่ความเร็วต่าง ๆ

4.1.2 การเลื่อนตำแหน่งภายนอกกรอบของหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ซึ่งเป็นการทดสอบการเดินโดยไม่มีการหันหน้าโดยแปรผันความเร็วและระยะก้าวเดินตามลำดับ

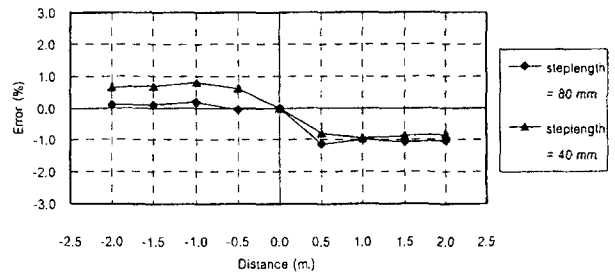


รูปที่ 9 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ โดยแปรผันความเร็ว

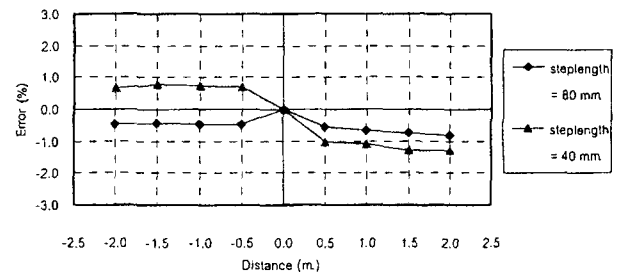


รูปที่ 10 เส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในทิศทางต่าง ๆ โดยแปรผันระยะก้าวเดิน

ความผิดพลาดของทิศทางจากทั้งสองการทดสอบมีค่าไม่เกิน 2 องศา และความผิดพลาดของระยะทางสูงสุดประมาณ 1.5% ของระยะทางที่เคลื่อนที่



รูปที่ 11 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 90 และ -90 องศา



รูปที่ 12 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 45 และ -135 องศา

รูปที่ 11 และ 12 แสดงความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่เป็นร้อยละของระยะทางที่เคลื่อนที่ไป พบว่าการด้วยระยะก้าวสั้นมีความผิดพลาดสูงกว่าการเดินด้วยระยะก้าวที่ยาวภายในระยะทางการเคลื่อนที่ที่เท่ากัน

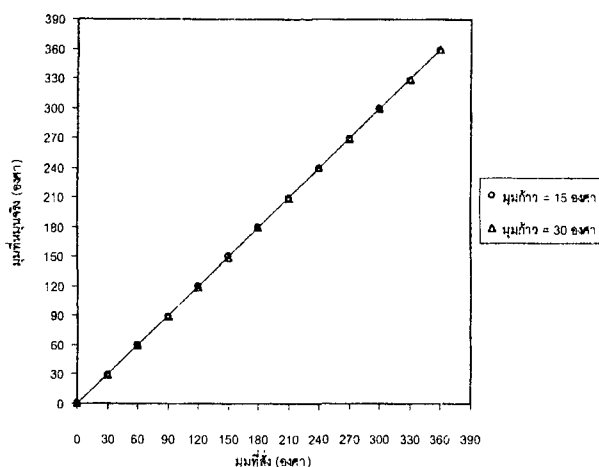
การเดินโดนหันหน้าไปในทิศทางที่จะเดินก่อน มีความผิดพลาดของทิศทางเคลื่อนที่ประมาณ 2.5 องศา ความผิดพลาดดังกล่าวเกิดจากความผิดพลาดในการหมุนรวมกับความผิดพลาดในการเดินโดยไม่หันทิศทาง 90 และ -90 องศาแสดงในรูปที่ 9 และ 10

4.2 การทดสอบการหมุน

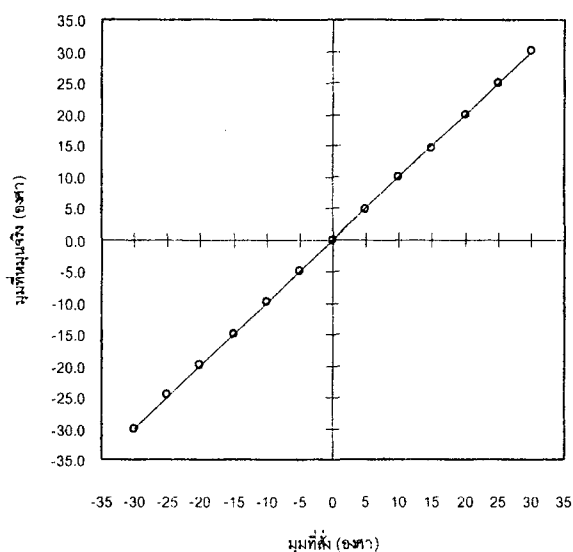
การทดสอบการหมุนของหุ่นยนต์ ทำได้โดยการสั่งให้หุ่นยนต์หมุนด้วยมุมขนาดต่าง ๆ แล้ววัดมุมที่หุ่นยนต์หมุนจริง

การทดสอบแบ่งเป็นสองส่วนคือ มุมไม่เกิน 30° ซึ่งเป็นมุมมากที่สุดที่กรอบทั้งสองจะหมุนสัมพันธ์กันได้ และมุมเกิน 30° ซึ่งต้องยกขาและหมุนแต่ละกรอบสลับกัน เช่นเดียวกับการเดิน ทดสอบที่มุมก้าว 15 และ 30 องศา ที่มุมก้าว 15 องศา มุมที่หมุนไปจะเริ่มจาก 0 องศา แล้วเพิ่มทีละ 15 องศาโดยหยุดการหมุนเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 30 องศาเพื่อวัดมุม มุมที่วัดมาได้จะเป็นมุมของการหมุนที่ 30 60 90 ... 360 องศา จำนวนก้าวทั้งหมดในการหมุน 1

รอบ (360 องศา) คือ 24 ก้าว และกรณีมุมก้าว 30 องศา จะใช้จำนวนก้าว 12 ก้าว การทดสอบทั้งสองกรณีใช้ความเร็วเชิงมุม 15 องศาต่อวินาที ผลการทดสอบการหมุนแสดงในรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 การหมุนของหุ่นยนต์ มุมมากกว่า 30 องศา ระยะก้าวการหมุนเป็นมุมต่าง ๆ



รูปที่ 14 การหมุนของหุ่นยนต์ มุมไม่เกิน 30 องศา

ความผิดพลาดจากการทดสอบการหมุนมีค่าไม่เกิน 2.5 องศาโดยหมุนที่ละ 15 องศา

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบทุกกรณีข้างต้นมีผลเป็นที่น่าพอใจ ความผิดพลาดของหุ่นยนต์จากการทดสอบที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์ กล่าวคือการควบคุมหุ่นยนต์เป็นแบบวงปิด (Close loop) ภายในตัวหุ่นยนต์ แต่เป็นแบบวงเปิด (Open loop) กับสิ่งแวดล้อม โดย

ความผิดพลาดของระยะทางสูงสุดไม่เกิน $\pm 1.5\%$ ภายในพื้นที่ของการเคลื่อนที่วงกลมรัศมี 2 เมตร และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน 2.5 องศาต่อการหมุน 1 รอบ ตารางสรุปค่าความผิดพลาดในการทดสอบต่าง ๆ คือ

ค่าพารามิเตอร์ ของหุ่นยนต์	$\gamma_1 = 0.03, \gamma_2 = 0.03, a = 327.0$	
ความเร็วเฉลี่ย สูงสุดในการ ทดสอบ	4 เมตรต่อนาที ความผิดพลาดของทิศทางสูง สุด 2 องศา ความผิดพลาดของระยะทางสูงสุด $\pm 1\%$ ของระยะทาง	
การเดินทางโดยไม่มีการหัน		
ความผิดพลาด ของทิศทางสูง สุด	2 องศา	ระยะก้าว 40 มิลลิเมตร ระยะเวลาการเคลื่อนที่ 0.8 วินาที
ความผิดพลาด ของระยะทางสูง สุด	$\pm 1.5\%$ ของระยะ ทาง	
การเดินทางโดยหันหน้าไปในทิศทางที่จะเดิน		
ความผิดพลาด ของทิศทางสูง สุด	2.5 องศา	ระยะก้าว 120 มิลลิเมตร ระยะเวลา การเคลื่อนที่ 3.0 วินาที
การหมุน		
ความผิดพลาด เชิงมุม	-2.5 องศา ที่มุม หมุน 360 องศา	มุมก้าว 15 องศา

6. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้อาจแบ่งได้ดังนี้

1. การปรับปรุงความถูกต้องในการเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ
2. การเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบ
3. การเพิ่มความสามารถในการตัดสินใจ โดยการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ส่วนใหญ่มาจากความผิดรูปของกลไก ดังนั้นหากสามารถสร้างกลไกที่มีความผิดรูปน้อยมาก หรือสามารถจำลองความผิดรูปออกมาเป็นสมการได้ใกล้เคียงกับความจริง จะสามารถลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ได้ การปรับปรุงนี้จะช่วยเพิ่มความถูกต้องของการเคลื่อนที่แบบไม่มีการป้อนกลับ (การสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดยไม่มีการวัดตำแหน่ง

ที่เคลื่อนที่จริงกลับมาเปรียบเทียบ ผิดกับกรณีการควบคุมแบบป้อนกลับ) มีความถูกต้องมากขึ้น

โดยทั่วไปการการนำร่องของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้ จะใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งอื่น ๆ ช่วยในการวัดตำแหน่งจริง เช่นระบบหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Positioning System, GPS และ Local Positioning System, LPS) หรือการหาตำแหน่งโดยใช้เข็มทิศร่วมกับเอ็นโคเดอร์ [11] ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์สามารถปรับตัวได้ดีในสภาวะที่จะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ เปรียบได้กับการควบคุมแบบป้อนกลับ

หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงไม่เกินระยะเคลื่อนที่ของขา แต่สำหรับสิ่งกีดขวางที่มีความสูงมากกว่า หรือพื้นที่ที่มีความลาดชัน ต้องควบคุมระนาบของกรอบหุ่นยนต์ด้วย ดังนั้นจึงต้องติดอุปกรณ์วัดความเอียงของระนาบ [11] และอุปกรณ์วัดระยะขาหุ่นยนต์ด้วย ระนาบสามารถหมุนได้ในสองแกน

อีกหนทางในการเพิ่มความสามารถในการเดินบนพื้นที่ลาดชันคือ การเปลี่ยนกลไกจากกลไกแบบขนานบนระนาบ ที่มีสามองศาความอิสระ เป็นกลไกแบบขนานที่มีหกองศาความอิสระ เช่นกลไกแบบสจ๊วต (Stewart Platform) [12]

การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ จะทำให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการตัดสินใจสูงขึ้น เช่นการหลบเลี่ยงสิ่งกีดขวาง การวางแผนการเคลื่อนที่ (Path planning) ระบบที่ใช้คือระบบการมองของหุ่นยนต์ (Robot vision) โดยใช้กระบวนการทางภาพ (Image Processing) เพื่อวิเคราะห์พื้นที่หรือสิ่งกีดขวาง หรืออาจใช้ระบบโซนาร์หาระยะทาง (Sonar Range Finder System) เพื่อหาระยะทางระหว่างสิ่งกีดขวางและหุ่นยนต์ [11]

7. รายการอ้างอิง

- [1] Hartikainen, K. K.; Halme, A. J.; Lehtinen, H.; and Koskinen, K. O. MECANT I: A Six Legged Walking Machine for Research Purposes in Outdoor Environment. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1 (1992): 157-163.
- [2] Shigeo Hirose, Kan Yoneda, Kazuhiko Arai and Tomoyoshi Ibe. Design of Prismatic Quadraped Walking Vehicle TITAN VI. Fifth International Conference on Advanced Robotics. Vol. 1 (1991): 723-728.
- [3] Keisuke Arikawa and Shigeo Hirose. Development of Quadraped Walking Robot TITAN-VIII. Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1 (1996): 208-214.
- [4] Hisato Kobayashi and Katsuhiko Inagaki. Development of a Hexapod Walking Robot: "Hexax-I". Proc. of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Vol. 3 (1991): 1545-1549.
- [5] Weidemann, H. J.; Pfeiffer, F.; and Eltze, J. The Six-Legged TUM Walking Robot. Proc. of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 2 (1994): 1026-1033.
- [6] Hironari Adachi, Noriho Koyachi and Eiji Nakano. Mechanism and Control of a Quadraped Walking Robot. IEEE Control Systems Magazine. Vol. 8 (October 1988): 14-19.
- [7] Keisuke Arikawa and Shigeo Hirose. Study of Walking Robot for 3 Dimensional Terrain (Optimization of walking motion based on GDA and Coupled Drive). IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol.1 (1995): 703-708.
- [8] Shigeo Hirose. A New Design Criterion in Robotic Mechanism (Prevention of Negative, Power Consumption). Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1 (1993): 131-135.
- [9] Toshio Fukada, Yuji Adachi, Haruo Hoshino, Kazuhiro Kosuke, Isao Matsunaga and Fumihito Arai. Posture Control of 6-leg Walking Robot. Proc. of the IEEE

International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1 (1995): 1006-1011.

- [10] Yusuke Ota, Yoshihiko Inagaki, Ken Yoneda and Shigeo Hirose. Research on a Six-Legged Walking Robot with Parallel Mechanism. Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1 (1998): 241-248.
- [11] He Kezhong, Sun Haihang, Guo Muhe and Wang Hong. Research of Intelligent Mobile Robot Key Techniques. Proc. Of IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 503-507, 1996.
- [12] Kok-Meng Lee and Dharman K. Shah. Kinematic Analysis of a Three-Degree-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator. IEEE Journal of Robotics and Automation 5 (1998): 354-360.