

หุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย

ชิต เหล่าวัฒนา¹ และ ทศพร บุญแท้²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีของหุ่นยนต์ มาใช้กับงานรักษาความปลอดภัย โดยทำการพัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบ ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยล้อ แบบทุกทิศทาง (Omni-directional wheel 45°) มาเพิ่มความปลอดภัยให้แก่เจ้าหน้าที่กู้ระเบิด เมื่อจำเป็นต้องเข้าไปสำรวจในบริเวณที่สงสัยว่ามีวัตถุระเบิด และหรือสารพิษต่างๆ

ในการปฏิบัติงาน เจ้าหน้าที่ตำรวจควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้ก้านควบคุม (joystick) ควบคุมบังคับทิศทางและความเร็วของหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นสามารถใช้เครื่องฉายรังสี X-ray ฉายรังสีออกไปเพื่อตรวจเช็ควัตถุที่ต้องสงสัย หากเป็นวัตถุระเบิดเจ้าหน้าที่ตำรวจจะปรับมุมของปืนยิงน้ำความดันสูงไปยังตำแหน่งวงจรของวัตถุระเบิดเพื่อทำลายระเบิด โดยเจ้าหน้าที่ตำรวจอาศัยสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องที่ติดตั้งอยู่บนตัวหุ่นยนต์ในการช่วยตัดสินใจ ผู้เขียนอาศัยข้อมูลพื้นฐานด้านแบบจำลองคณิตศาสตร์คิเนแมติกส์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นอกจากนี้ ได้ทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ปรากฏว่าผลการทดสอบด้านความเร็ว มีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 30.73 การทดสอบบริฟที่อะเบลิตีมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 6.65

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

Security Enhancement through Robotics Technology : SEBOT

Djitt Laowattana¹ and Thodsaporn Bunthae²

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

Abstract

We implement robotics technology to enhance security in detrimental tasks. Our prototype: SEBOT benefits from a specially designed Omni-directional wheel 45° . SEBOT is capable of assisting security officers in investigating bombs and toxic substances. This research project reveals a control approach for the SEBOT. Operators are able to control desired directions and velocities of the SEBOT by using a joystick. An X-ray device could be used to detect any suspect object. In addition, image from a wireless camera will promote effective path planning. The test results on average velocity error and average positional error are 30.73% and 6.65%, respectively.

¹ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering.

² Graduate Student, Department of Mechanical Engineering.

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำหุ่นยนต์และอุปกรณ์แมคคาทรอนิกส์มาใช้ในงานหลายประเภท ส่วนใหญ่เป็นงานทางด้านอุตสาหกรรม เพื่อลดต้นทุนในการผลิต แต่ยังมีงานบางประเภทที่ต้องใช้หุ่นยนต์ทำงานแทนมนุษย์ เนื่องจากลักษณะมีความเสี่ยงภัยสูง หรือสถานที่ที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการปฏิบัติงานของมนุษย์ งานดังกล่าวได้แก่ งานสำรวจอวกาศ งานสำรวจขั้วโลก และการทำงานในโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นต้น ดังนั้นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่ามาปฏิบัติงานแทนมนุษย์ เนื่องจากมีความคล่องตัวสูง ในต่างประเทศได้มีการศึกษา ล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (Wheel Mobile Robots : WMR) มาเป็นเวลานานแล้ว ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวกับล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ ได้แก่ Terregator [1] เป็นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อหกล้อ นำไปประยุกต์ใช้งานในการลำเลียง ขนถ่าย วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในบริเวณโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ หุ่นยนต์ APRA's UGV [2] เป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ในการสำรวจภูมิประเทศที่เป็นทุ่งหญ้า หุ่นยนต์ Hero2000 [3] เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ด้วยตัวเอง Harunobu [4] เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามท้องถนน โดยสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนไหวได้

บทความนี้ได้นำข้อมูลพื้นฐานจากงานวิจัยเรื่อง MOBO 2.0 An Omni-directional Wheeled Mobile Robot มาพัฒนาสร้างเป็นหุ่นยนต์ต้นแบบ เพื่อใช้งานจริง โดยเป็นการนำเอาความสามารถพิเศษของฐานเคลื่อนที่ได้ (mobile base) แบบ อมนิ (Omni-directional wheel) 45 องศา ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ได้ทุกทิศทาง เพื่อลดระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ นำทฤษฎีการควบคุมความเร็วมาใช้กับตัวหุ่นยนต์ และมีการเลือกใช้อัลกอริทึมวงจรมิด (CCTV) แบบไร้สาย อุปกรณ์ควบคุมระยะไกล โดยติดตั้งเข้ากับตัวหุ่นยนต์ เพื่อสามารถควบคุมและส่งภาพได้ในระยะ 150-200 เมตร

คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและวิจัยลักษณะของล้อ อมนิ แบบ 45 องศา ทฤษฎีทางด้านการออกแบบคิเนแมติกส์ของฐานเคลื่อนที่ได้ ที่อธิบายเชิงคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบต่างๆ ของล้อและส่วนที่ล้อสัมผัสกับพื้นให้มาอยู่ในรูปของเมตริกซ์พีชคณิต (matrix algebra) และการสร้าง เมตริกซ์จาร์โคเบียน (Jacobian matrix) ของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย

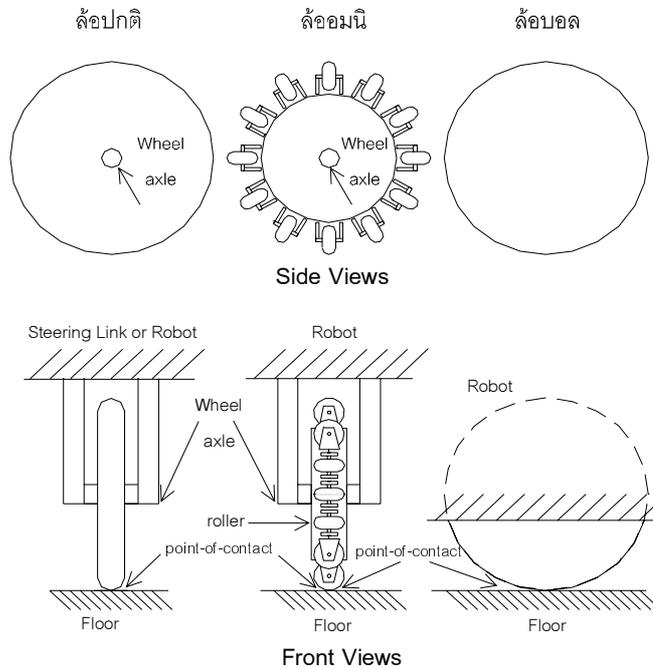
2. ทฤษฎีพื้นฐาน

ล้อที่ใช้กับฐานเคลื่อนที่ได้ [5]-[8] มี 3 แบบ คือ

1 ล้อปกติ (conventional wheel) มีสององศาอิสระ คือมีการเคลื่อนที่ตามแนวพื้นที่ผิวของล้อตามแนวการวางล้อ และการหมุนที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับพื้น โดยในการใช้งานจริงมีการติดตั้งกลไกการหมุน (steering mechanism) เพื่อเพิ่มองศาอิสระขึ้นเป็นสามองศาอิสระ

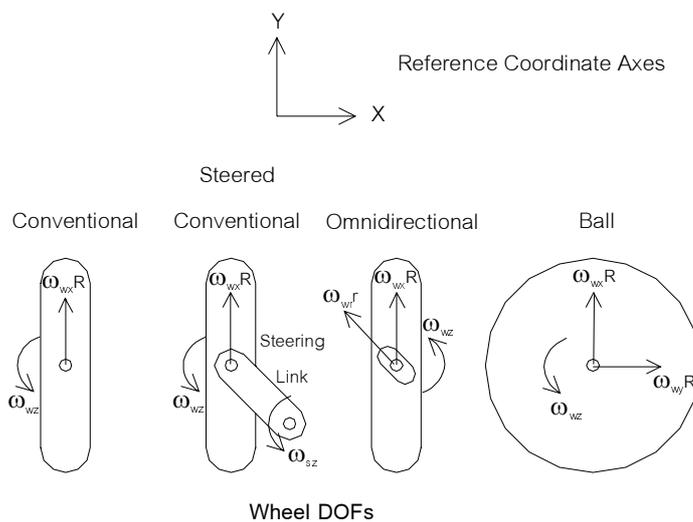
2 ล้ออมนิ (Omni-direction wheel) มีสามองศาอิสระ ประกอบด้วยองศาอิสระที่หนึ่ง คือทิศทางตามแนวการวางล้อ องศาอิสระที่สองเกิดจากการหมุนของลูกกลิ้งที่ติดอยู่รอบๆ ของล้อ ในทางทฤษฎีมุมของลูกกลิ้ง สามารถทำมุมเท่าไรก็ได้ นอกจากศูนย์ และองศาอิสระที่สามเกิดจากการหมุนที่จุดสัมผัสระหว่างลูกกลิ้งและพื้น

3 ล้อบอล (ball wheel) ซึ่งมีความสามารถในการทำการเคลื่อนที่ได้มากที่สุด มีสามองศาอิสระ โดยไม่มีการลื่น (Slip) แต่มีความสามารถในการรับน้ำหนักจำกัด และมีความยากลำบากพอสมควร ในการบำรุงรักษา



รูปที่ 1 ล้อปกติ ล้ออมนิ และล้อบอล

ความสัมพันธ์ทางด้านคิเนแมติกส์ของล้อแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ทางด้านคิเนแมติกส์ของล้อแบบต่างๆ

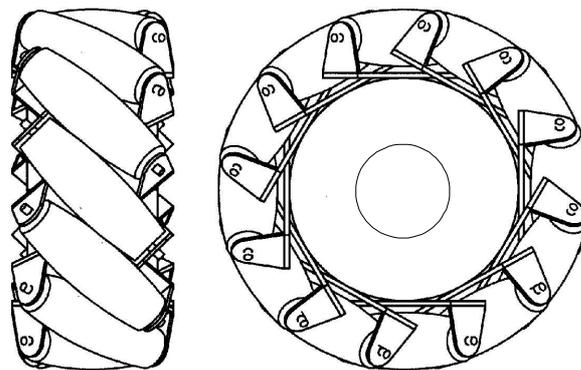
จากรูปสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางด้านคิเนแมติกส์ได้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ทางด้านคิเนแมติกส์ของล้อแบบต่างๆ

ล้อปกติ	ล้อมณี	ล้อบอล
$V_y = \omega_{wx}R$ $V_x = 0$ $\omega_z = \omega_{wz}$	$V_y = \omega_{wx}R - \omega_{wr}r \cos(\eta)$ $V_x = \omega_{wr}r \sin(\eta)$ $\omega_z = \omega_{wz}$	$V_y = \omega_{wR}$ $V_x = \omega_{xy}R$ $\omega_z = \omega_{wz}$

- เมื่อ V_x และ V_y คือ ส่วนประกอบตามแนวแกน x และ y ของความเร็วของล้อที่จุดสัมผัส
- ω_z คือ ส่วนประกอบตามแนวแกน z ของความเร็วเชิงมุมของล้อที่จุดสัมผัส
- ω_{wr} คือ ความเร็วเชิงมุมของลูกกลิ้งรอบแกน
- $\omega_{wx}, \omega_{wy}, \omega_{wz}$ คือ ส่วนประกอบตามแนวแกน x , y และ z ของความเร็วเชิงมุมของล้อรอบจุดศูนย์กลาง
- ω_{sz} คือ ความเร็วเชิงมุมของกลไกการหมุน (steering mechanism) รอบแกนหมุน
- η คือ มุมของแกนลูกกลิ้งที่กระทำกับแกนล้อ
- R และ r คือ รัศมีของล้อ และ ลูกกลิ้ง ตามลำดับ

ลักษณะของล้อมณีที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะของ ล้อมณี (Omni-directional wheel 45°)

2.1 รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของคิเนแมติกส์

ในบทความนี้เราจะแสดงวิธีการในการจำลองคิเนแมติกส์ของ ล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (Wheel Mobile Robot : WMR) โดยให้ส่วนที่ล้อสัมผัสกับพื้น เป็นแบบการต่อโยงแบบหลายชั้นต่อโยง (higher-pair joint) และแปลงให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์

2.1.1 นิยามและข้อสมมุติ

ล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (WMR) สามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวโดยผ่านการหมุนของล้อที่ประกอบอยู่บนตัวหุ่นยนต์ และสัมผัสกับพื้นผิวล้อมรวมเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่ง ซึ่งยอมให้การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างตัวมันเองและพื้นผิว มีจุดสัมผัสการหมุนเพียงจุดเดียว

ข้อสมมุติในการออกแบบ

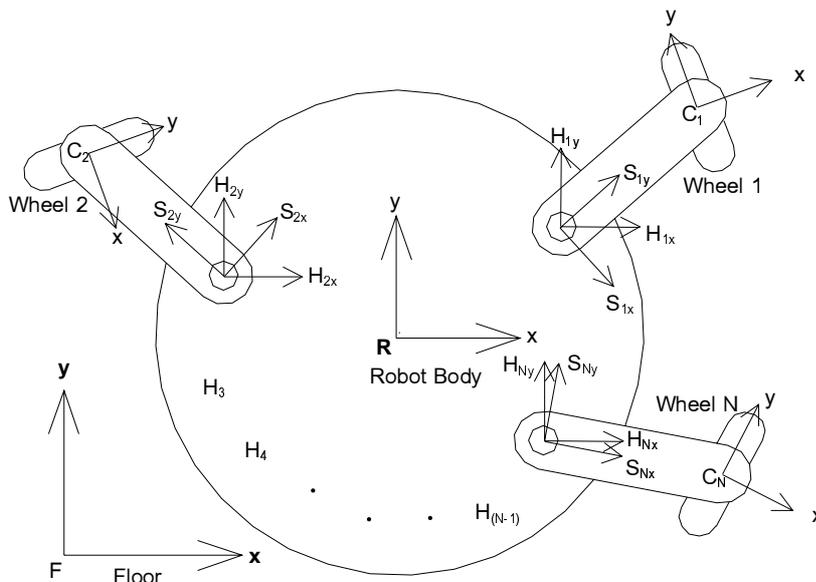
1. ล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ ต้องไม่เป็นชิ้นส่วนที่ยึดหุ่น
2. ล้อแต่ละล้อสามารถมีชั้นต่อโยงบังคับเลี้ยวเพียงหนึ่งชั้นต่อโยง หรือไม่มีเลย
3. แกนบังคับเลี้ยวทั้งหมดต้องตั้งฉากกับพื้นผิว

ข้อสมมุติในการทำงาน

1. ล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เคลื่อนที่บนพื้นผิวระนาบ
2. ความเสียหายของการเคลื่อนที่ที่จุดสัมผัสระหว่างล้อและพื้นผิวต้องมากพอที่ไม่ทำให้เกิดการลื่นไถล
3. ความเสียหายของการหมุนที่จุดสัมผัสระหว่างล้อและพื้นผิวต้องมีค่าน้อยเพียงพอที่ทำให้เกิดการไถลของการหมุนได้

2.1.2 ระบบพิกัดฉากของล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้

รูปที่ 4 แสดงระบบพิกัดฉากที่ปลายทั้งคู่ของทุกชั้นต่อโยงของล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ ชั้นต่อโยงของกลไกปิด (closed-link chain) ของล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ พื้น ตัวหุ่นยนต์และชั้นต่อโยงบังคับเลี้ยวข้อต่อเป็นแบบหมุน (revolute) สำหรับล้อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้มีจำนวน N ล้อ การกำหนดระบบพิกัดฉากจำนวนแกนจึงเป็น $3N+1$ กับตัวหุ่นยนต์และหนึ่งแกนที่ใช้อ้างอิง



รูปที่ 4 การตั้งแกนของระบบพิกัดฉาก

2.2 จาโคเบียนของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย

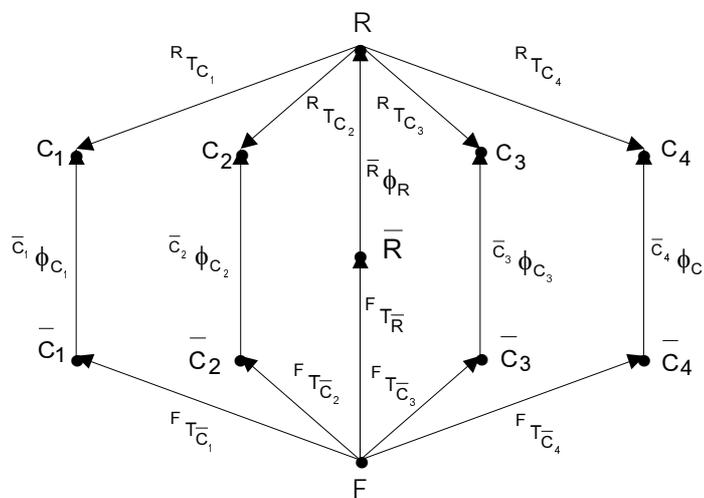


รูปที่ 5 ลักษณะของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย

รูปที่ 5 แสดงหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนได้ทุกทิศทางโดยใช้ล้อ 45 องศา โดยการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถควบคุมบังคับด้วยก้านควบคุมผ่านอุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สาย นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังส่งภาพที่รับได้จากกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) แบบไร้สายกลับมายังเจ้าหน้าที่ที่กระเปาะเปิด

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อแบบอสมิสามารถเคลื่อนที่ได้สามองศาอิสระบนระนาบ คือ การเคลื่อนที่เดินหน้า-ถอยหลัง การเคลื่อนที่ด้านข้างซ้าย-ขวา และการหมุนรอบตัวเอง ซึ่งการเคลื่อนที่ในทั้งสามทิศทางนั้นเกิดจากผลรวมของการหมุนล้อของทั้งสี่ล้อ

จาโคเบียน เป็นสมการที่ใช้ในการเปลี่ยนการหมุนของล้อแต่ละล้อซึ่งอยู่ในจอยท์สเปซ (joint space) ให้เป็นการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในคาร์ทีเซียนสเปซ (cartesian space) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิทรานส์ฟอร์มเมชันของหุ่นยนต์ (Transformation Diagram of Security Robot)

ตารางที่ 2 การกำหนดสัญลักษณ์ในระบบพิกัดฉากของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย

F = floor : ระบบพิกัดอ้างอิงที่หยุดนิ่ง ซึ่งแกนตั้งฉากกับเส้นทางเดิน
R = Robot : ระบบพิกัดซึ่งเคลื่อนที่ไปกับตัวหุ่นยนต์ ซึ่งแกนตั้งฉากกับพื้นของเส้นทางเดิน
C = Contact Point (for =1,...,n) : ระบบพิกัดที่เคลื่อนที่ไปกับ ชั้นต่อโยงบังคับเลี้ยวจุด origin ที่จุดสัมผัสระหว่างล้อและพื้นผิว แกน y ขนานไปกับล้อ และระนาบ xy สัมผัสกับพื้นผิว
\bar{R} = Instantaneously Coincident Robot : ระบบพิกัดที่ทับกันสนิทกับระบบพิกัด R และหยุดนิ่งขณะเทียบกับระบบพิกัด F
\bar{C}_i = Instantaneously Coincident Contact Point (for I= 1,...,n) : ระบบพิกัดที่ทับกันสนิทกับ C_i และหยุดนิ่งขณะเทียบกับระบบพิกัด F
$\bar{R}\Pi_R$ = ผลรวมของการทรานสฟอร์มเมชันจาก \bar{R} ไปยัง R
ω = ความเร็วเชิงมุม
V = ความเร็วเชิงเส้น
\dot{P} = ความเร็วใน คาร์ทีเซียนสเปซ
J = จาร์โคเบียน
r = รัศมีของล้อหุ่นยนต์
l = ระยะระหว่างจุด CG ของหุ่นยนต์ กับจุดที่ล้อสัมผัสพื้น

Transformation Matrices

เป็นนิยามที่ชี้เฉพาะถึงตำแหน่งสัมพัทธ์ และการหมุนของระบบพิกัดฉาก โดย Transformation Matrix ${}^A T_B$ เป็นผลการแปลงของพิกัดของจุด B (${}^B P$) ลงในพิกัดเฟรม B ให้สอดคล้องกับจุด A ในพิกัดเฟรม A

$${}^A P = {}^A T_B \cdot {}^B P \quad (1)$$

โดย Transformation Matrix ${}^A T_B$ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} s_x & t_x & u_x & d_x \\ s_y & t_y & u_y & d_y \\ s_z & t_z & u_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยเวกเตอร์ $s \ t \ u$ เป็นเมตริกซ์ของการหมุน (rotation matrix) ของการหมุนรอบแกน x y z ของระบบพิกัดฉาก B สัมพัทธ์กับระบบพิกัดฉาก A และ $d_x \ d_y \ d_z$ เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนที่ (translation matrix) ของระยะทางจากจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉาก B สัมพัทธ์กับจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉาก A ตามแนวแกน x y และ z ตามลำดับ

สำหรับหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย มีระบบพิกัดฉากที่สามารถหมุนได้รอบแกน z เท่านั้น ซึ่งแสดงระบบพิกัดฉากต่างๆ ไว้ในรูปที่ 4 ดังนั้น Transformation Matrix ของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย สามารถแสดงได้ดังนี้

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} \cos^A \theta_B & -\sin^A \theta_B & 0 & {}^A d_{Bx} \\ \sin^A \theta_B & \cos^A \theta_B & 0 & {}^A d_{By} \\ 0 & 0 & 1 & {}^A d_{Bz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Transformation Matrix ของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัย แสดงได้ดังนี้

$$\bar{R} \Pi_R = {}^F T_R^{-1} \cdot {}^F T_{C_i} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i} \cdot {}^R T_{C_i}^{-1} \quad (4)$$

$$\bar{R} \Pi_R = {}^F T_R^{-1} \cdot {}^F T_{C_i} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i} \cdot {}^R T_{C_i}^{-1} \quad (5)$$

$${}^F T_{C_i} = {}^F T_R \cdot \bar{R} \Phi_R \cdot {}^R T_{C_i} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i}^{-1} \quad (6)$$

นำตัวแปรของสมการที่ (6) แทนค่าในสมการที่ (5)

$$\bar{R} \Pi_R = {}^F T_R^{-1} \cdot {}^F T_R \cdot \bar{R} \Phi_R \cdot {}^R T_{C_i} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i}^{-1} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i} \cdot {}^R T_{C_i}^{-1} \quad (7)$$

$$\bar{R} \Pi_R = {}^R T_{C_i} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i}^{-1} \cdot \bar{C}_i \Phi_{C_i} \cdot {}^R T_{C_i}^{-1} \quad (8)$$

เมื่อนำค่าเฉพาะกรณีของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัยมาแทนในสมการที่ (8) ได้

$$\begin{bmatrix} 0 & -\bar{R} \omega_R & 0 & \bar{R} V_{R_x} \\ \bar{R} \omega_R & 0 & 0 & \bar{R} V_{R_y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{C}_i \omega_{C_i} & 0 & \bar{C}_i \omega_{C_i} \cdot {}^R d_{C_{iy}} + \bar{C}_i V_{C_{ix}} \\ \bar{C}_i \omega_{C_i} & 0 & 0 & -\bar{C}_i \omega_{C_i} \cdot {}^R d_{C_{ix}} + \bar{C}_i V_{C_{iy}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{R} V_{R_y} = -\bar{C}_i \omega_{C_i} \cdot {}^R d_{C_{iy}} + \bar{C}_i V_{C_{ix}} \quad (10)$$

$$\bar{R} V_{R_x} = \bar{C}_i \omega_{C_i} \cdot {}^R d_{C_{ix}} + \bar{C}_i V_{C_{iy}} \quad (11)$$

$$\bar{R} \omega_R = \bar{C}_i \omega_{C_i} \quad (12)$$

นำค่าเฉพาะกรณีของล้อทั้ง 4 ล้อมาแทนในสมการที่ (10) (11) และ (12) เพื่อให้ได้สมการจาร์โคเบียนของหุ่นยนต์ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (13)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{R_x} \\ \mathbf{V}_{R_y} \\ \omega_{R_z} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} -\mathbf{r} & -\mathbf{r} & \mathbf{r} & \mathbf{r} \\ \mathbf{r} & -\mathbf{r} & -\mathbf{r} & \mathbf{r} \\ -\frac{\mathbf{r}}{2I} & -\frac{\mathbf{r}}{2I} & -\frac{\mathbf{r}}{2I} & -\frac{\mathbf{r}}{2I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{R_1} \\ \omega_{R_2} \\ \omega_{R_3} \\ \omega_{R_4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

สามารถเขียนสมการที่ (13) ให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (14)$$

ซึ่งสมการจาร์โคเบียนย้อนกลับของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัยแสดงได้ดังสมการที่ (15) และ (16)

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\mathbf{r}} & \frac{1}{\mathbf{r}} & -\frac{2I}{\mathbf{r}} \\ \frac{\mathbf{r}}{1} & \frac{\mathbf{r}}{1} & \frac{\mathbf{r}}{2I} \\ \frac{1}{\mathbf{r}} & -\frac{1}{\mathbf{r}} & -\frac{2I}{\mathbf{r}} \\ \frac{\mathbf{r}}{1} & \frac{\mathbf{r}}{1} & \frac{\mathbf{r}}{2I} \\ \frac{1}{\mathbf{r}} & \frac{1}{\mathbf{r}} & -\frac{2I}{\mathbf{r}} \\ \frac{\mathbf{r}}{1} & \frac{\mathbf{r}}{1} & \frac{\mathbf{r}}{2I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{R_x} \\ \mathbf{V}_{R_y} \\ \omega_{R_z} \end{bmatrix} \quad (15)$$

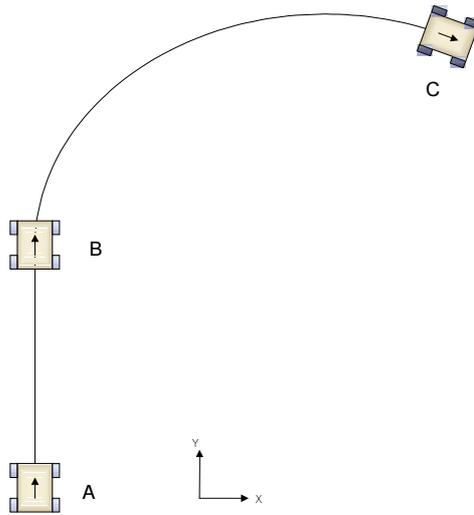
$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{P}} \quad (16)$$

2.3 ตัวอย่างการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

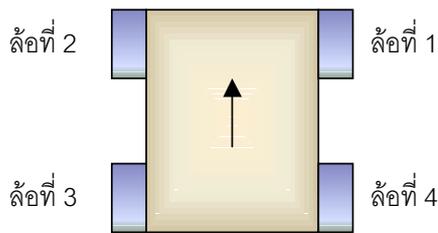
ในการคำนวณหาค่าความเร็วของล้อที่ใช้ในการเคลื่อนที่ได้ใช้สมการที่ (15) ในการคำนวณหาความเร็วของล้อในแต่ละความเร็วที่ต้องการ โดยสมมุติให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เดินทาง โดยเพิ่มความเร็วจาก 0 (จุด A) จนถึง 1 เมตร/วินาที อัตราการเพิ่มความเร็ว 0.01 ต่อ 1 วินาที เป็นเวลา 100 วินาที (จุด B)

หลังจากนั้นให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เดินทาง พร้อมทั้งหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็ว 1 เมตร/วินาที และ 2 รอบต่อนาที ตามลำดับ เป็นเวลา 100 วินาที (จุด C)

เมื่อทำการทดลองแล้ว ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นดังรูปที่ 7

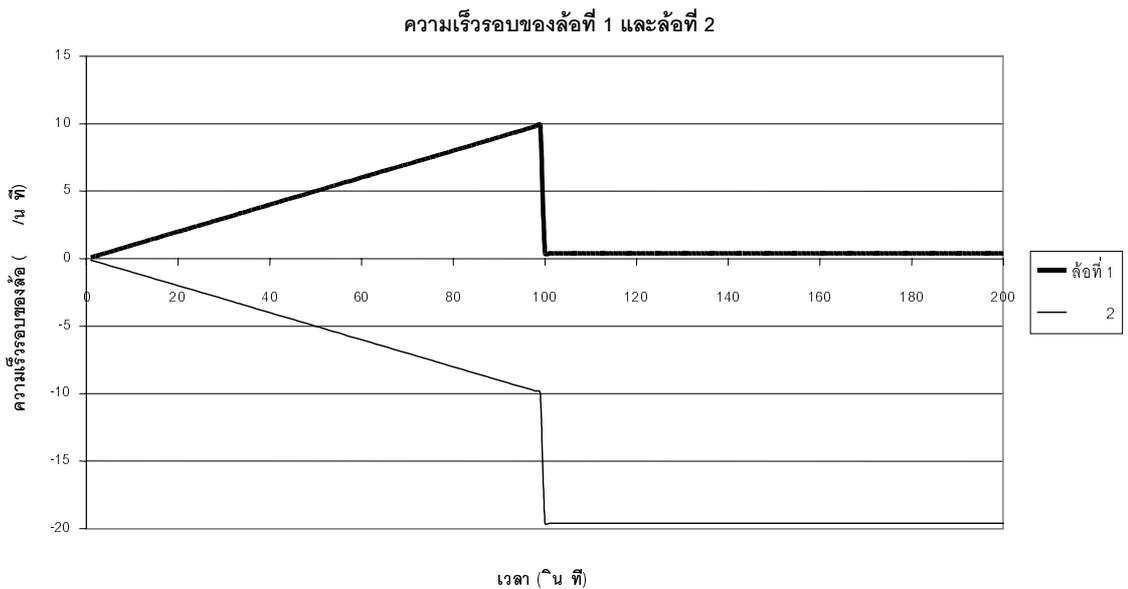


รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ตามผลการจำลอง

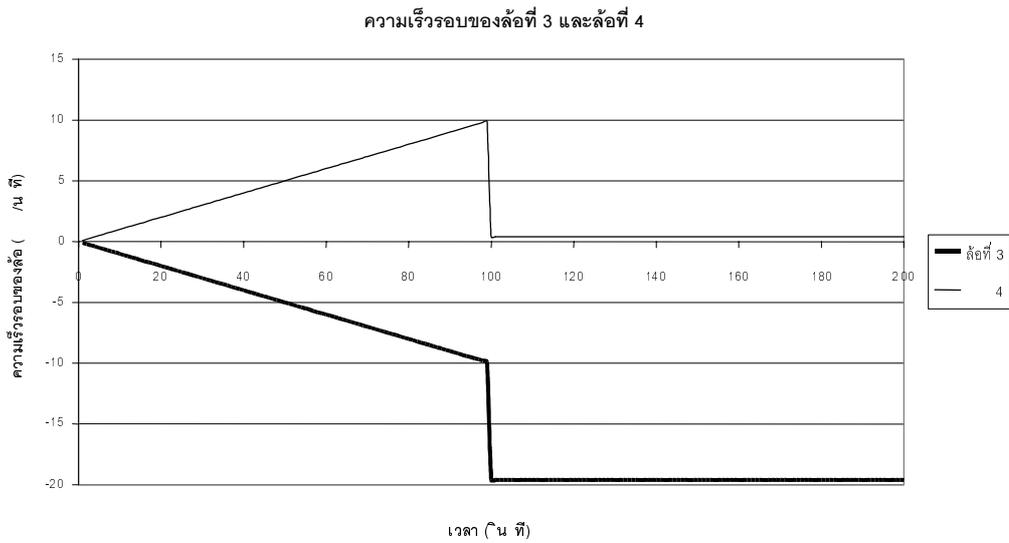


รูปที่ 8 แสดงตำแหน่งของแต่ละล้อ

ผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แสดงไว้ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 แสดงผลการจำลองความเร็วของล้อที่ 1 และล้อที่ 2

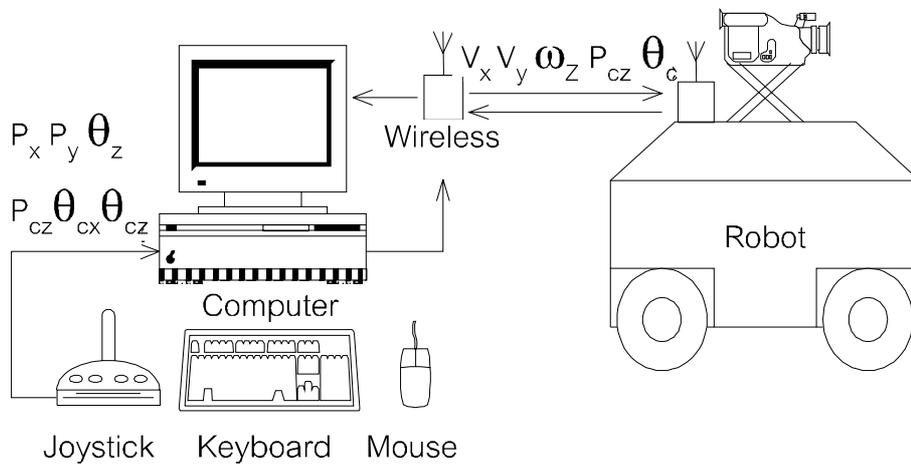


รูปที่ 10 แสดงผลการจำลองความเร็วของล้อที่ 3 และล้อที่ 4

2.4 การส่งข้อมูลการเคลื่อนที่และภาพ

การส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้ใช้ระบบส่งข้อมูลแบบไร้สาย ซึ่งได้ทำการส่งข้อมูลแบบ RS-232 โดยขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

1. คอมพิวเตอร์รับข้อมูลตำแหน่งคั่นโยกของก้านควบคุมแล้วเปลี่ยนให้เป็นความเร็วของหุ่นยนต์ในคาร์ทีเซียนสเปซ
2. คอมพิวเตอร์ทำการเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์ ให้เป็นการหมุนของล้อในจอยท์สเปซ โดยใช้จาร์โคเบียนย้อนกลับในการคำนวณ
3. ส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์แบบ RS-232 โดยใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สาย
4. หุ่นยนต์รับข้อมูล แล้วควบคุมมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วที่ต้องการ
5. หุ่นยนต์ส่งข้อมูลย้อนกลับมายังคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ควบคุมบังคับรับรู้สภาวะต่างๆ ของหุ่นยนต์ เช่น ความเร็วที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้จริง ระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ เป็นต้น



รูปที่ 11 แสดงการส่งข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์กับคอมพิวเตอร์

การส่งสัญญาณภาพจากกล้องโทรทัศน์วงจรปิด ได้ใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สายมายังผู้ควบคุม โดยเครื่องรับสัญญาณได้ถูกติดตั้งไว้ในคอมพิวเตอร์ และยังสามารถรับภาพโดยใช้เครื่องรับโทรทัศน์ แสดงดังรูปที่ 11

3. การทดสอบ

3.1 การหาความผิดพลาดด้านความเร็ว

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความผิดพลาด ณ ความเร็วต่างๆ ว่าความเร็วที่ต้องการกับความเร็วที่หุ่นยนต์สามารถทำได้มีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงไร และเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมในการทำงานของหุ่นยนต์

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. กำหนดความเร็วที่ต้องการ (V desire) ให้หุ่นยนต์ทำงาน เพื่อใช้เป็นความเร็วอ้างอิง
2. ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามความเร็วที่ได้กำหนดไว้
3. บันทึกค่าความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้จริง (V actual) โดยทำการเปรียบเทียบระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่กับเวลาที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้นาฬิกาจับเวลา
4. เปรียบเทียบค่าความเร็วที่ได้กับความเร็วที่ต้องการ
5. คำนวณค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบ

3.2 การทดสอบบริบทอะเบลิตี (Repeatability)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ซ้ำตำแหน่งเดิม

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. กำหนดระยะทางการเคลื่อนที่เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการทดสอบ
2. ทำการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
3. ปลดปล่อยหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามระยะทางที่กำหนดไว้ โดยติดปากกาไว้ที่ด้านหลังของหุ่นยนต์ เพื่อแสดงแนวการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
4. ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่กลับในทิศทางเดิม
5. วัดระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผิดพลาด โดยวัดระยะทางเทียบจากจุดเริ่มต้น ไปสู่จุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ และบันทึกผล
6. คำนวณค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบ

4. ผลการทดสอบ

ตัวแปรของการทดสอบการหาความผิดพลาดด้านความเร็ว

V_{desire} คือ ความเร็วที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และเป็นความเร็วอ้างอิงในการทดสอบการหาความผิดพลาดด้านความเร็ว

V_{actual} คือ ความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้จริง ซึ่งเป็นความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากข้อมูลของการทดสอบ 3 ครั้งนำมาหาค่าเฉลี่ย

Error คือ ความแตกต่างกันของความเร็วที่ต้องการกับความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้ ซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\mathbf{Error} = \mathbf{V}_{desire} - \mathbf{V}_{actual} \quad (17)$$

Error(%) คือ ความแตกต่างกันของความเร็วที่ต้องการกับความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้ โดยเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเร็วที่ต้องการซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\mathbf{Error(\%)} = \left(\frac{\mathbf{V}_{desire} - \mathbf{V}_{actual}}{\mathbf{V}_{desire}} \right) \times 100 \% \quad (18)$$

ตัวแปรของการทดสอบปริมาตรหีบอบเบลีตี

Distance คือ ระยะทางที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และเป็นระยะทางอ้างอิงของการทดสอบปริมาตรหีบอบเบลีตี

Revolute คือ จำนวนของการหมุนรอบตัวเองที่ต้องการให้หุ่นยนต์หมุน และเป็นจำนวนรอบอ้างอิงของการทดสอบปริมาตรหีบอบเบลีตี

Error คือ ความแตกต่างกันของตำแหน่งจุดเริ่มต้นกับตำแหน่งจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

Error(%) คือ ความแตกต่างกันของตำแหน่งจุดเริ่มต้นกับตำแหน่งจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ โดยเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของระยะทางการเคลื่อนที่ และจำนวนรอบที่หมุน ซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแนวแกน Y

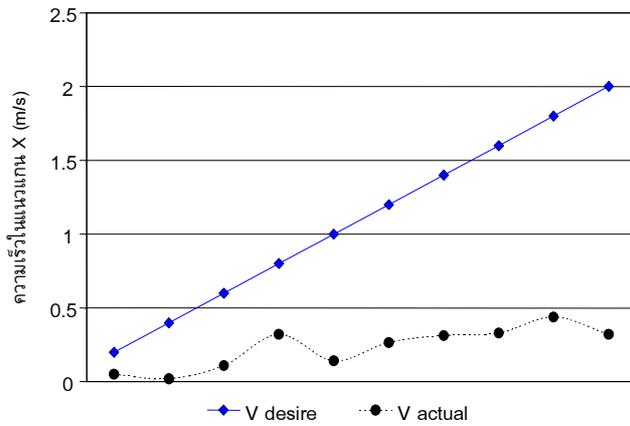
$$\mathbf{Error(\%)} = \left(\frac{\mathbf{Error}}{\mathbf{Distance}} \right) \times 100 \% \quad (19)$$

สำหรับการหมุนรอบตัวเอง

$$\mathbf{Error(\%)} = \left(\frac{\mathbf{Error}}{\mathbf{Revolute}} \right) \times 100 \% \quad (20)$$

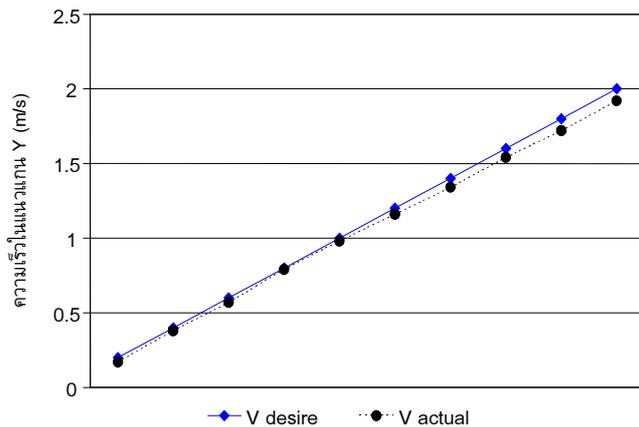
ตารางและกราฟแสดงผลการทดสอบ

ความเร็วในแนวแกน X (m/s)			
V desire	V actual	error	error(%)
0.2	0.05	0.15	75.00
0.4	0.02	0.38	95.00
0.6	0.11	0.49	81.67
0.8	0.32	0.48	59.88
1	0.14	0.86	85.80
1.2	0.27	0.93	77.83
1.4	0.31	1.09	77.64
1.6	0.33	1.27	79.44
1.8	0.44	1.36	75.61
2	0.32	1.68	83.95



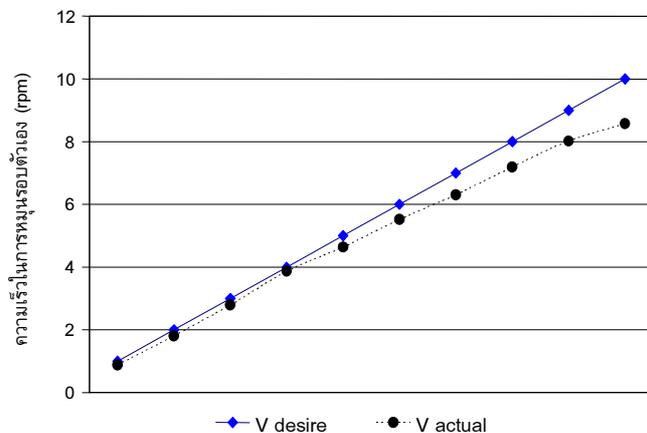
รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกน X

ความเร็วในแนวแกน Y (m/s)			
V desire	V actual	error	error(%)
0.2	0.17	0.03	15.00
0.4	0.38	0.02	5.00
0.6	0.57	0.03	5.00
0.8	0.79	0.01	1.25
1	0.98	0.02	2.00
1.2	1.16	0.04	3.33
1.4	1.34	0.06	4.29
1.6	1.54	0.06	3.75
1.8	1.72	0.08	4.44
2	1.92	0.08	4.00



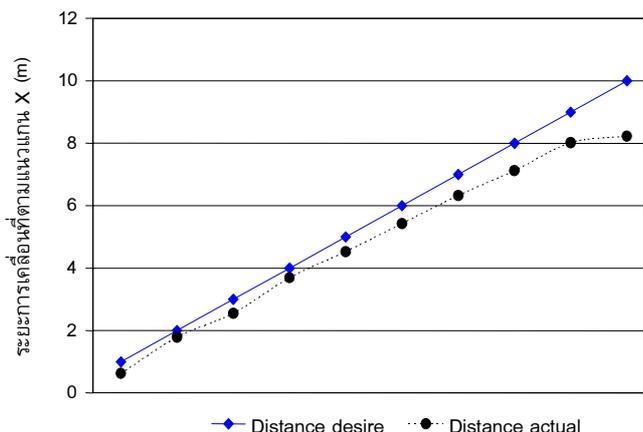
รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกน Y

ความเร็วในการหมุนรอบตัวเอง (rpm)			
V desire	V actual	error	error(%)
1	0.88	0.02	2.00
2	1.81	0.19	9.50
3	2.79	0.21	7.00
4	3.87	0.13	3.25
5	4.64	0.36	7.20
6	5.52	0.48	8.00
7	6.31	0.69	9.86
8	7.19	0.81	10.13
9	8.02	0.98	10.89
10	8.57	1.43	14.30



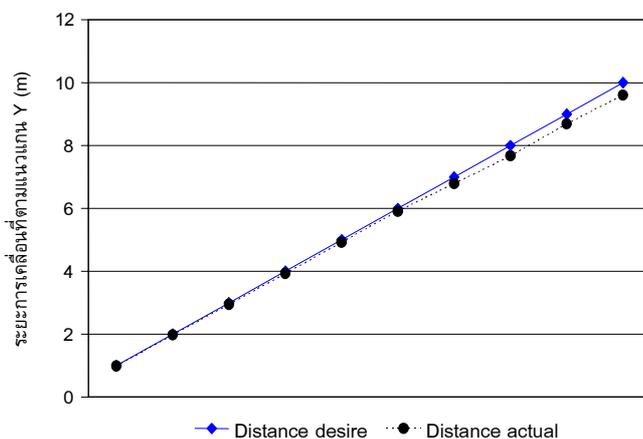
รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วในการหมุนรอบตัวเอง

ระยะทาง(m) การเคลื่อนที่	เคลื่อนที่ตามแนวแกน X	
	error (m)	error (%)
1	0.372	37.200
2	0.212	10.600
3	0.446	14.867
4	0.311	7.775
5	0.473	9.460
6	0.574	9.567
7	0.673	9.614
8	1.463	18.288
9	0.986	10.956
10	1.772	17.720



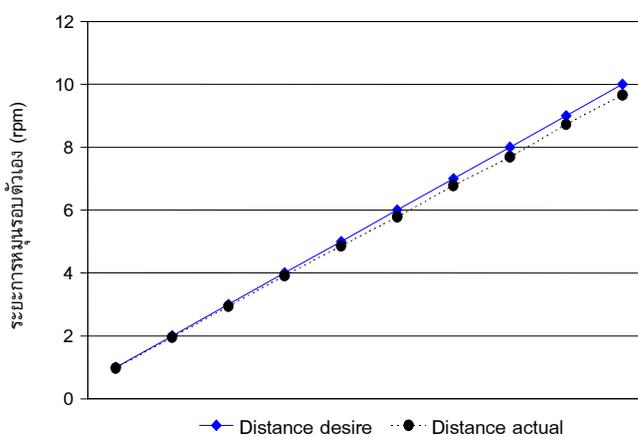
รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบ รีฟิทอะเบลิตีที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวแกน X

ระยะทาง(m) การเคลื่อนที่	เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y	
	error (m)	error (%)
1	0.017	1.700
2	0.026	1.300
3	0.055	1.833
4	0.076	1.900
5	0.080	1.600
6	0.097	1.617
7	0.210	3.000
8	0.322	4.025
9	0.316	3.511
10	0.400	4.000



รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบ รีฟิทอะเบลิตีที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวแกน Y

หมุนรอบตัวเอง (รอบ)		
จำนวนรอบ	error (m)	error (%)
1.000	0.026	2.600
2.000	0.047	2.350
3.000	0.061	2.033
4.000	0.084	2.100
5.000	0.143	2.860
6.000	0.220	3.667
7.000	0.220	3.143
8.000	0.312	3.900
9.000	0.276	3.067
10.000	0.345	3.450



รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบ รีฟิทอะเบลิตีที่หุ่นยนต์หมุนรอบตัวเอง

การหาความผิดพลาดเฉลี่ยของการทดสอบด้านความเร็ว แสดงได้ดังนี้

$$Error(average) = \left(\frac{\sum Error(\%) overall \text{ of velocity}}{30} \right) \quad (21)$$

$$Error(average) = \left(\frac{791.82 + 48.06 + 82.12}{30} \right)$$

$$Error(average) = 30.73\%$$

การหาความผิดพลาดเฉลี่ยของการทดสอบรีฟิโอะเบลิตี

$$Error(average) = \left(\frac{\sum Error(\%) overall \text{ of distance}}{30} \right) \quad (22)$$

$$Error(average) = \left(\frac{146.046 + 24.486 + 29.170}{30} \right)$$

$$Error(average) = 6.65\%$$

5. สรุป

จากการทดสอบได้ผลการทดสอบเฉลี่ยในแต่ละการทดสอบดังนี้

ทิศทางของการทดสอบความผิดพลาด	ผลรวมของ error (%) / 10	
	ด้านความเร็ว	ด้านรีฟิโอะเบลิตี
แนวแกน X	79.1820	14.6046
แนวแกน Y	4.8060	2.4486
หมุนรอบตัวเอง	8.2120	2.9170
เฉลี่ย	30.73	6.65

จากการทดสอบหาความผิดพลาดด้านความเร็ว ปรากฏว่าความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้จริงในแนวแกน Y และการหมุนรอบตัวเอง มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับความเร็วที่ต้องการ แต่ยังมีผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้จริงในแนวแกน X ไม่มีความสัมพันธ์กับความเร็วที่ต้องการ

จากการทดสอบ รีฟิทอะเบลิตีปรากฏว่าการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y และการหมุนรอบตัวเอง มีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย แต่ความผิดพลาดสามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวแกน X

โดยความผิดพลาดของทั้ง 2 การทดสอบ เป็นผลมาจาก

1 การสั่นไถลของล้อ เนื่องจากเมื่อล้อกับพื้นมีการสั่นไถลเกิดขึ้น ความเร็วที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสของล้อกับพื้นจะลดต่ำลงไป เป็นผลให้ความเร็วของหุ่นยนต์ ซึ่งได้จากการรวมความเร็วของแต่ละล้อไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

2 พื้นที่ทำทดสอบไม่เรียบ เนื่องจากคิเนแมติกส์ของงานวิจัยนี้ได้ตั้งข้อสมมุติฐานไว้คือ หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่บนพื้นราบเรียบเท่านั้น แต่พื้นที่ที่ได้ทำการทดสอบอาจไม่ราบเรียบตามที่ได้ตั้งสมมุติฐาน ทำให้ล้อไม่สัมผัสกับพื้นตลอดเวลา เป็นผลให้ความเร็วของหุ่นยนต์ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งพิสูจน์ได้ดังนี้

เมื่อทำการแก้สมการจาร์โคเบียนของหุ่นยนต์ในสมการที่ (13) ปรากฏว่าได้สมการย่อย 3 สมการดังนี้

$$V_{R_x} = \frac{1}{4} \cdot (-r\omega_{R1} - r\omega_{R2} + r\omega_{R3} + r\omega_{R4}) \quad (13.1)$$

$$V_{R_y} = \frac{1}{4} \cdot (r\omega_{R1} - r\omega_{R2} - r\omega_{R3} + r\omega_{R4}) \quad (13.2)$$

$$\omega_{R_z} = \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{r\omega_{R1}}{2l} - \frac{r\omega_{R2}}{2l} - \frac{r\omega_{R3}}{2l} - \frac{r\omega_{R4}}{2l} \right) \quad (13.3)$$

จากสมการ (13.1) (13.2) และ (13.3) เห็นได้ว่าความเร็วที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นผลรวมที่เกิดจากการหมุนของล้อทั้ง 4 แต่เมื่อใดที่ล้อไม่สัมผัสพื้นทั้ง 4 ล้อ ความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้จริงจะไม่เท่ากับความเร็วที่ต้องการ

ตัวอย่างเช่น พิจารณาความเร็วในแนวแกน y

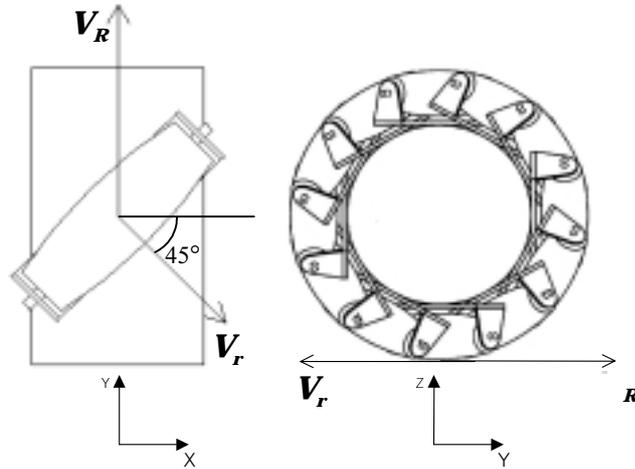
$$(V_{desire}) = V_{R_y} = \frac{1}{4} \cdot (r\omega_{R1} - r\omega_{R2} - r\omega_{R3} + r\omega_{R4}) \quad (13.4)$$

สมมุติว่าล้อที่ 2 ไม่สัมผัสกับพื้น ดังนั้นความเร็วที่หุ่นยนต์ทำได้จริงมีค่าดังนี้

$$(V_{actual}) = V_{R_y} = \frac{1}{4} \cdot (r\omega_{R1} - r\omega_{R3} + r\omega_{R4}) \quad (13.5)$$

3 ความผิดพลาดในการจัดสร้างล้อของหุ่นยนต์ เนื่องจากความเร็วของหุ่นยนต์เป็นผลจากการหมุนของล้อและลูกกิ้ง โดยล้อของหุ่นยนต์ช่วยรักษาความปลอดภัยเกิดความผิดพลาด

ในการจัดวางตำแหน่งของลูกกลิ้ง ทำให้ลูกกลิ้งบางตำแหน่งไม่สามารถหมุนได้อย่างอิสระ เป็นผลให้ความเร็วในแนวแกน X และความเร็วในแนวแกน Y ในทุกๆ การทดสอบแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ล้อสัมผัสพื้น แสดงไว้ในรูปที่ 18 ดังนี้



รูปที่ 18 แสดงความเร็วที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ล้อสัมผัสกับพื้น

ทำการสมมูลความเร็ว ที่เกิดจากการหมุนของล้อ

$$\mathbf{V}_X = \mathbf{V}_R \cdot \cos 45 \quad (23)$$

$$\mathbf{V}_Y = \mathbf{V}_R - \mathbf{V}_R \cdot \sin 45 \quad (24)$$

จากสมการที่ (23) และ (24) เห็นได้ว่า ความเร็วในแนวแกน X และความเร็วในแนวแกน Y ในแต่ละล้อมีผลของความเร็วที่เกิดจากลูกกลิ้ง แต่เมื่อใดที่ลูกกลิ้งไม่หมุน

$$\mathbf{V}_X = \mathbf{V}_R \cdot \cos 45 = 0 \quad (23.1)$$

$$\mathbf{V}_Y = \mathbf{V}_R = r\omega_R \quad (24.1)$$

จากสมการที่ (23.1) และ (24.1) เห็นได้ว่าถ้าลูกกลิ้งไม่หมุนจะเป็นผลให้ไม่เกิดความเร็วในแนวแกน X ตามสมการที่ (23.1) แต่ทำให้ความเร็วในแนวแกน Y มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามสมการที่ (24.1) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความผิดพลาดในแนวแกน X และแนวแกน Y แตกต่างกันในทุกการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ มูลนิธิวิจัยเทคโนโลยีสารสนเทศ (Foundation for Research in Information Technology: FRIT) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. Whittaker, W. L. 1985, "Cognitive Robots for Construction," *Annual Research Review*, pp. 11-14.
2. Cook, D. J., Gmytrasiewicz, P., and Holder, L. B., "Decision-Theoretic Cooperative Sensor Planning", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, pp. 1013-1022.
3. Maeda, Y., Tanabe, M., Yuta, M., Takagi, T., 1992, "Hierarchical Control for Autonomous Mobile Robots with Behavior-Decision Fuzzy Algorithm," *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 135-140.
4. Mori, H. "Recent Progress in Mobile Robot Harunobu-4", *Vision-base Vehicle Guidance*, pp. 204-221.
5. Dickerson, S. L. and Lapin, B. D., 1991, *Control of an Omnidirectional Robotic Vehicle with Macanum Wheels*, Atlanta, Georgia Institute of Technology, pp. 0323-0328.
6. Holland, J. M., 1983, *Basic Robotic Concepts*, Howard W.Sams&Co., Indianapolis IN, pp. 107-170.
7. Muir, P. F. and Neuman, C. P., 1986, *Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robotics*, Pittsburgh, Carnegie-Mellon University, pp. 5-41.
8. Pin, F. G. and Killough, S. M., 1994, "A New Family an Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robot", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, August, pp. 480-489.