

การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด



นายจอมมูทธา จำปาเหลือง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

CONTROL DEVELOPMENT FOR A RESIZABLE COBOT

Mr. Jommuta Jumpaluang



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอลต์ปรับขนาด

โดย

นายจอมมูธา จำปาเหลือง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ จันทรานูวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.กฤษณันท์ มะลิทอง)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จอมมูทธา จำปาเหลือง : การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด.
(CONTROL DEVELOPMENT FOR A RESIZABLE COBOT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผศ. ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, 70 หน้า.

โคบอท คือ อุปกรณ์ชนิดพาสซีฟ (Passive device) ซึ่งได้รับการออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับผู้ปฏิบัติงานได้โดยตรง ทั้งนี้เทคโนโลยีโคบอทยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็น แอสติคอินเทอร์เฟซ (Haptic interface) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robotic Interaction) การขนถ่ายวัสดุ การประกอบชิ้นงาน และการนำไปใช้ในทางการแพทย์ เป็นต้น งานวิจัยนี้นำเสนอหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (Resizable Cobot) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์โคบอทที่ทำงานบนระนาบสามมิติ หุ่นยนต์โคบอทนี้สามารถขยายออกหรือลดขนาดขณะทำงาน ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ทำให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้บนระนาบการทำงานที่มีพื้นที่จำกัด สำหรับในส่วนของ การควบคุม นั้น ในปัจจุบัน หุ่นยนต์โคบอทใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed forward control) ซึ่งทำการคำนวณจากจลนศาสตร์ (Kinematics) และ การควบคุมป้อนกลับ (Feedback control) ในปริภูมิการทำงาน (Configuration space) เพียงเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดที่ผ่านมาไม่สามารถชดเชยค่าความผิดพลาดได้ดีเพียงพอ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา การควบคุมป้อนกลับ โดยทำการเพิ่มการพัฒนาการควบคุมแบบป้อนกลับในปริภูมิล้อ (Wheel space) นอกจากนั้นได้นำเสนอการควบคุมวิธีการใหม่ที่ใช้กับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการรวมกันของปริภูมิโครงแบบและปริภูมิปรับขนาดด้วยการนำหลักการของปริภูมิ 4 มิติ มาประยุกต์ใช้ จากนั้นทำการจำลองในคอมพิวเตอร์และทำการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด ซึ่งผลการทดสอบจริงแสดงให้เห็นถึงค่าผิดพลาดที่มีค่าน้อย โดยหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงและสามารถ รักษาการปรับขนาดตามคำสั่งการปรับขนาดได้อย่างถูกต้องขณะที่มีการเคลื่อนที่อีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5370213521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: RESIZABLE COBOT / WHEEL SPACE FEEDBACK / CONFIGURATION SPACE / EXPANSION SPACE / 4-DIMENSIONAL WORKSPACE

JOMMUTTA JUMPALUANG: CONTROL DEVELOPMENT FOR A RESIZABLE COBOT. ADVISOR: ASST. PROF. WITAYA WANNASUPHOPRASIT, Ph.D., 70 pp.

Cobots (Collaborative Robot) are passive devices that designed to work directly with an operator. Cobot technology can be applied to several areas ranging from haptic interface, human-robot interaction, ergonomic material handling, assembly operations, medical applications, and assistive devices. This paper presents a resizable Cobot that has a three dimensional planar workspace. The Cobot can change its size so that it can maneuver effectively in a tight space. Current Cobot controls are based on feed forward and feedback controls. The feed forward command is mainly calculated from Cobot kinematics, and the feedback control is implemented within its configuration space. However, previous feedback control is insufficient to compensate the error that occurs when the resizable Cobot moves along a complex reference path. In this work, we improve the control with additional feedback in the wheel space. Furthermore, in this research, the new 4-dimensional control (combination of configuration space and the expansion space) is presented. The experiment with wheel space feedback and 4-dimensional path planning provide satisfactory results with low tracking error. The resizable Cobot can follow along command paths and preserve its expansion according to the reference.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผศ.ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากท่านซึ่งได้เสียสละร่างกาย แรงใจ และเวลาอันมีค่าให้ความกรุณาในการช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา ในการแก้ไขปัญหาในวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งช่วยอนุเคราะห์ในการจัดหาแหล่งเงินทุนที่ใช้ในการวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอกราบบูญคุณบิดามารดาในการให้ความรัก ส่งเสริม ให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสในการได้รับการศึกษาที่ดี รวมทั้งสมาชิกในครอบครัว คนรัก ที่ให้กำลังใจ แรงผลักดัน ในการวิจัย นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จึงทำให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปด้วยดี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท	2
1.1.1 สกูตเตอร์โคบอท (The Scooter Cobot)	2
1.1.2 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (Resizable Cobot).....	2
1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ปรัชศาสตร์วรรณกรรม	5
2.1 อุปกรณ์ปรับอัตราทดแบบต่อเนื่อง (Continuous Variable Transmission, CVT).....	5
2.2 หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ซีวีทีชนิดล้อ.....	6
2.2.1 ยูนิไซเคิลโคบอท.....	6
2.2.2 สกูตเตอร์โคบอท	7
2.2.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด.....	8
2.3 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์โคบอท	9
2.4 การทำงาน (mode) ของหุ่นยนต์โคบอท.....	13
2.4.1 การทำงานในแบบเคลื่อนที่โดยอิสระ (Virtual Caster Mode)	13
2.4.2 การทำงานในแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Virtual Path Mode)	13
2.4.3 การทำงานแบบการสร้างกำแพงเสมือน (Virtual Wall Mode).....	14
บทที่ 3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด และจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด.....	15
3.1 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551).....	15
3.2 จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด	18

3.3 การนำปริภูมิโครงแบบและปริภูมิปรับขนาดของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมาผนวกกัน	21
บทที่ 4 การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด	27
4.1 การประมาณค่าความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ (Path length estimation).....	27
4.2 ค่าผิดพลาดของหุ่นยนต์โคบอทบนเส้นทางการเคลื่อนที่	28
4.3 การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ	29
4.3.1 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด (แบบทั่วไป)	29
4.3.2 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด	32
4.3.3 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดที่เพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับ ในปริภูมิล้อ	34
4.4 การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ.....	37
บทที่ 5 การจำลองการพัฒนาการควบคุม และ ผลการทดสอบจริงของการพัฒนาการควบคุม	40
5.1 การจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด	40
5.1.1 การจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ	40
5.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด	42
5.2.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ.....	42
5.2.1.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง	42
5.2.1.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง.....	46
5.2.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อด้วยการใช้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดไม่คงที่.....	49
5.2.2.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อด้วยการใช้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดไม่คงที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง	49

5.3 การจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ.....	55
5.4 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ	58
5.4.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง.....	58
5.4.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง.....	60
สรุปผลการทดลอง	62
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
6.2 ข้อเสนอแนะ	66
รายการอ้างอิง	67
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	71

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 การใช้โคบอทในภาคอุตสาหกรรม (Akella et al., 1999).....	1
รูปที่ 1.2 สกุตเตอร์โคบอท (Wannasuphoprasit et al., 1997).....	2
รูปที่ 1.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551).....	3
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดและมุมเลี้ยวของล้อ.....	6
รูปที่ 2.2 ยูนิไซเคิลโคบอท (Colgate et al, 1996).....	6
รูปที่ 2.3 UTLA โคบอท (Yambay Valiente, 2001).....	7
รูปที่ 2.4 สกุตเตอร์โคบอท (Wannasuphoprasit et al., 1997)	7
รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551).....	8
รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนผ่านสิ่งกีดขวาง.....	8
รูปที่ 2.7 การทดสอบจริงของงานวิจัย (Boy et al., 2007).....	9
รูปที่ 2.8 โคบอทแขนกล 4 องศาอิสระ (Store et al., 2009).....	9
รูปที่ 2.9 แขนกลของ The Arm Cobot (Moore et al., 1999).....	10
รูปที่ 2.10 ชุดซีวีที (Moore et al., 1999).....	10
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ The Arm Cobot (Moore et al., 1999).....	11
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของโคบอทชนิดสวมใส่ส่วนไหล่ (Chua, 2006).....	11
รูปที่ 2.13 แอสติกโคบอท 6 องศาอิสระ (Faulring et al, 2004).....	12
รูปที่ 2.14 3DC Cobot manipulator (Sirikasemsuk and Wannasuphoprasit, 2011).....	12
รูปที่ 2.15 (a) โคบอทเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทึบและตรวจพบแรงตามแนวเส้นประ (b) โคบอทปรับมุมเลี้ยวของล้อให้เคลื่อนที่ตามแนวแรง(เส้นประ).....	13
รูปที่ 2.16 โคบอทเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางบังคับ.....	13
รูปที่ 2.17 (a) โคบอทเคลื่อนที่ในรูปแบบอิสระเมื่ออยู่ห่างจากแนวกำแพงเสมือน (b) โคบอทเคลื่อนที่ในรูปแบบบังคับเส้นทางเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในแนวกำแพงเสมือน.....	14
รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (Chanpat and Wannasuphoprasit, 2009).....	15
รูปที่ 3.2 กลไกการปรับขนาด (ศุภพน, 2551).....	16
รูปที่ 3.3 แสดงแนววัดตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด.....	16
รูปที่ 3.4 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดขณะเคลื่อนที่ตามเส้นทางและปรับขนาดในเวลาเดียวกัน.....	16
รูปที่ 3.5 ค่าตัวแปรที่นำมาใช้ในการคำนวณจลนศาสตร์.....	18

รูปที่ 4.1 การประมาณค่าความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่.....27

รูปที่ 4.2 ค่าผิดพลาดบนเส้นทางการเคลื่อนที่.....28

รูปที่ 4.3ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด.....29

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาดเส้นทึบแสดง
เส้นทางการทำงานจริง เครื่องหมาย '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง.....31

รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด.....32

รูปที่ 4.6ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด:เส้นประแสดงระบบควบคุมย้อนกลับที่เพิ่ม
เข้าไปบนปริภูมิล้อ.....34

รูปที่ 4.7 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิสี่มิติ.....37

รูปที่ 5.1 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดทำการปรับขนาดบนเส้นทางการเคลื่อนที่เส้นตรง
..... 41

รูปที่ 5.2 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดรักษาระยะปรับขนาดบนเส้นทางการเคลื่อนที่เส้น
โค้ง.....42

รูปที่ 5.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรงเส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....43

รูปที่ 5.4 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรง เส้นประแสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง
เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง.....44

รูปที่ 5.5 : (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ 45

รูปที่ 5.6 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงโค้ง.....47

รูปที่ 5.7 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้ง เส้น '+' แสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง
เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง.....47

รูปที่ 5.8: (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ 48

รูปที่ 5.9 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรงเส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....49

รูปที่ 5.10 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรง เส้นประแสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง
เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง50

รูปที่ 5.11 : (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ 51

รูปที่ 5.12 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงโค้งเส้น ‘+’ แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....52

รูปที่ 5.13 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้ง เส้นประแสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง
เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง.....53

รูปที่ 5.14 : (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ 54

รูปที่ 5.15 การใช้เวกเตอร์ประกอบลำดับที่ 4 กำหนดฟังก์ชันระยะปรับขนาด 56

รูปที่ 5.16 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนปริภูมิ 4 มิติตามสมการที่ 5.9
เส้นทึบแสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นประแสดงการจำลองการเคลื่อนที่.....57

รูปที่ 5.17 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนปริภูมิ 4 มิติตามสมการที่ 5.10
เส้นทึบแสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นประแสดงการจำลองการเคลื่อนที่.....58

รูปที่ 5.18 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงโค้งเส้น ‘+’ แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....59

รูปที่ 5.19 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้ง เส้น ‘+’ แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....59

รูปที่ 5.20 ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ 60

รูปที่ 5.21 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรงเส้น ‘+’ แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....61

รูปที่ 5.22 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรง เส้น ‘+’ แสดงเส้นทางอ้างอิง
เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง.....61

รูปที่ 5.23 ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ 62

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของภาคอุตสาหกรรมมีความเจริญก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก โรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องมืออัตโนมัติและหุ่นยนต์มาช่วยในการผลิต หุ่นยนต์มีความสามารถในการรับภาระงานที่มีความลำบากและมีความรวดเร็วในการทำงาน ตัวอย่างการใช้งานของหุ่นยนต์เช่น หุ่นยนต์เชื่อมชิ้นส่วนรถยนต์บนสายพานการผลิต หุ่นยนต์พ่นสีชิ้นงาน นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เป็นขีดจำกัดของมนุษย์ เช่น การใช้หุ่นยนต์นำเครื่องมือลงไปตรวจรอยร้าวในท่อลึก

ปกติพื้นที่การปฏิบัติงานของหุ่นยนต์ (Workspace) กับมนุษย์ไม่มีความเกี่ยวข้องกัน แต่ด้วยข้อจำกัดของชิ้นงานในด้านความซับซ้อนและการมีเหลี่ยมหรือมุม หุ่นยนต์จึงปฏิบัติงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ มนุษย์จึงมีความจำเป็นในพื้นที่ปฏิบัติงานร่วมกับหุ่นยนต์ในบางภารกิจ อย่างไรก็ตามสภาพแวดล้อมในการทำงานสามารถเกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ เนื่องจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้และปฏิบัติงานโดยปราศจากความนึกคิดนอกเหนือจากที่ได้โปรแกรมไว้ ดังนั้นความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของมนุษย์ร่วมกับหุ่นยนต์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

โคบอท (Cobot หรือ Collaborative Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบพาสซีฟ (Passive) โดยทำหน้าที่ในการกำหนดทิศทางให้มนุษย์ทำงาน ส่วนการเคลื่อนของหุ่นยนต์โคบอทได้จากแรงกระทำของมนุษย์ ดังนั้นถ้าหุ่นยนต์เกิดความผิดพลาดด้านการควบคุมหรือความไม่เสถียรจึงไม่เคลื่อนที่ด้วยตนเองขณะที่ปฏิบัติงานร่วมกับมนุษย์ เช่น ขั้นตอนบนสายพานของการประกอบรถยนต์ที่ต้องนำชิ้นส่วนของประตูมาประกอบกับตัวรถ หุ่นยนต์โคบอทจะทำหน้าที่สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และรับน้ำหนักชิ้นส่วนประตู ส่วนมนุษย์ทำหน้าที่ในการควบคุมความเร็วและนำชิ้นส่วนประตูเข้าประกอบกับตัวรถ ดังรูปที่ 1.1



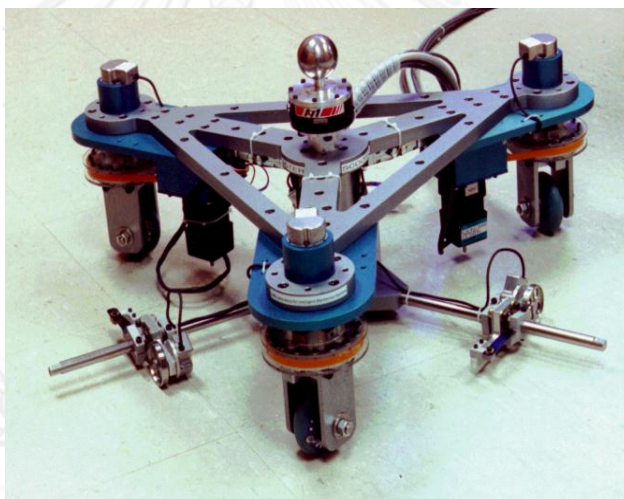
รูปที่ 1.1 การใช้โคบอทในภาคอุตสาหกรรม (Akella et al., 1999)

1.1 หลักการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทมีการทำงานที่ต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าซีวีที (CVT: Continuous Variable Transmission) ในการสร้างอัตราทดระหว่างข้อต่อเพื่อเป็นเงื่อนไขบังคับและลดองศาอิสระในการเคลื่อนที่ที่เหลือเพียงองศาอิสระเดียว เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทไม่มีระบบส่งกำลังในตัวเอง แรงที่ใช้ในการปฏิบัติงานมาจากผู้ใช้งาน หุ่นยนต์โคบอทที่เกี่ยวข้องของและใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะดังนี้

1.1.1 สกูตเตอร์โคบอท (The Scooter Cobot)

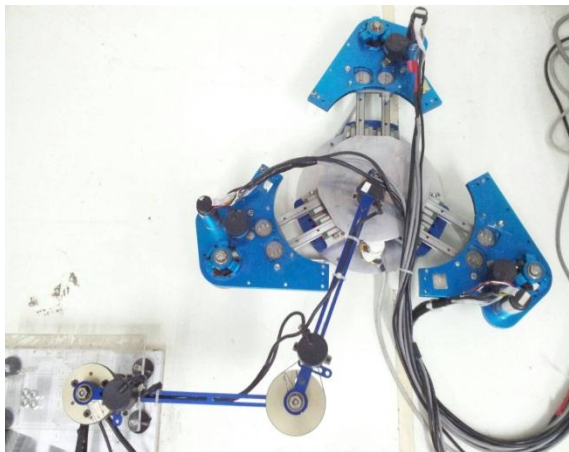
เป็นโคบอทที่เคลื่อนบนพื้นราบ โดยใช้ซีวีทีประเภทล้อและมอเตอร์ในการควบคุมองศาอิสระของล้อจำนวนสามชุดที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายทั้งสามด้านเพื่อควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ สกูตเตอร์โคบอทมีสามองศาอิสระ สามารถเคลื่อนที่บนพื้นในระนาบ $x-y$ และหมุนรอบตัวเองได้ (หมุนรอบแกนแนวตั้ง) สกูตเตอร์โคบอทดังแสดงรูปที่ 1.2 ถูกพัฒนาขึ้นก่อนงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างที่คงตัว



รูปที่ 1.2 สกูตเตอร์โคบอท (Wannasuphoprasit et al., 1997)

1.1.2 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (Resizable Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551) เป็นหุ่นยนต์โคบอทประเภทล้อที่ใช้ซีวีทีแบบล้อจำนวน 3 ชุด พัฒนาต่อยอดมาจากสกูตเตอร์โคบอท เพื่อให้โครงสร้างขยายตัวได้ มีการออกแบบแบ่งออกเป็นโมดูลล้อ 3 โมดูล และโมดูลฐาน 1 โมดูล และมีการติดตั้งกลไกปรับขนาดระหว่างโมดูลล้อและโมดูลฐาน เพื่อให้หุ่นยนต์โคบอทสามารถเคลื่อนที่เข้าออกจากโมดูลฐานได้ หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดนี้มีปริภูมิการทำงานบนพื้นราบ มีขนาดพอเหมาะสำหรับทำงานบนโต๊ะ และสามารถเคลื่อนย้ายการปฏิบัติได้สะดวก ดังรูป 1.3



รูปที่ 1.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551)

1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

จากผลงานวิจัยของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดพบว่า ระบบควบคุมย้อนกลับแบบเดิมไม่สามารถทำการชดเชยค่าความผิดพลาดได้ดีเพียงพอ การวิจัยในครั้งนี้จึงมีความต้องการพัฒนาวิธีการควบคุมย้อนกลับของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด และประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาการควบคุมระยะขยายเข้าออกของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด ในขณะที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ในเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้พัฒนาการควบคุมการเคลื่อนที่เข้าออกของโมดูลล้อปรับขนาดทั้ง 3 โมดูล โดยทดสอบกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดที่มีพื้นที่การทำงานในปริภูมิโครงแบบ $[x, y, \theta]^T$ และปริภูมิปรับขนาด $[l, \alpha]^T$ ขณะที่หุ่นมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงโดยมีขอบเขตดังนี้

1. พัฒนาการควบคุมระยะปรับขนาด
2. การทดสอบการควบคุมการปรับขนาดด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์
3. การเขียนโปรแกรมการควบคุมการปรับขนาดกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด
4. การทดลองและวิเคราะห์ผลการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

1.5 ประโยชน์ของงานวิจัย

พัฒนาการควบคุมการปรับขนาดของหุ่นยนต์โคบอทนี้ให้มีลักษณะการทำงานเพิ่มหลากหลายมากขึ้น สามารถปฏิบัติงานที่มีความซับซ้อน เช่น หดตัวเพื่อหลบสิ่งกีดขวาง และ ขยายตัวเพื่อสร้างเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ และเพื่อเป็นพื้นฐานในการนำหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดไปใช้ในการทำงานต่อไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

หุ่นยนต์โคบอทคือหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบพาสซีฟ ทำหน้าที่เฉพาะการกำหนดทิศทาง ส่วนการเคลื่อนที่เกิดจากแรงกระทำของมนุษย์ การบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทเกิดจากซีวีทีซึ่งมีหน้าที่สร้างอัตราทดระหว่างข้อต่อ เพื่อเป็นเงื่อนไขบังคับในการลดองศาอิสระในการเคลื่อนที่ให้เหลือเพียงองศาอิสระเดียว เพื่อปรับทิศทางขององศาอิสระให้อยู่ในแนวเดียวกับทิศที่ต้องการให้หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ หุ่นยนต์โคบอทจึงทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรงในพื้นที่ทำงานเดียวกันได้อย่างปลอดภัย เพราะแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากหุ่นยนต์โคบอทไม่สามารถทำอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากซีวีทีเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เพียงปรับอัตราทดระหว่างความเร็วสองความเร็วเท่านั้น ซึ่งต่างจากมอเตอร์หรืออุปกรณ์ส่งกำลังที่ใช้ในหุ่นยนต์ทั่วไปที่ส่งกำลังผ่านกลไกมายังผู้ปฏิบัติงานเมื่อเกิดความผิดพลาดจึงทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานได้

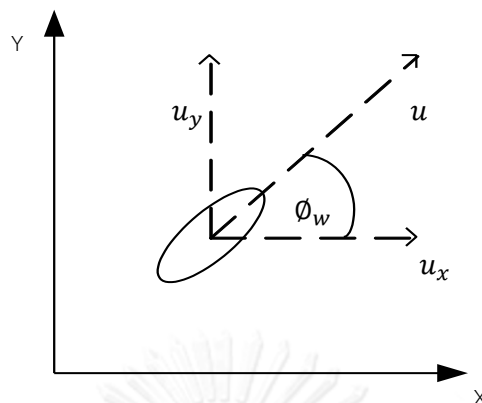
2.1 อุปกรณ์ปรับอัตราทดแบบต่อเนื่อง (Continuous Variable Transmission, CVT)

อุปกรณ์ปรับอัตราทดแบบต่อเนื่อง (Moore et al., 1999; Peshkin et al., 2001) ทำหน้าที่ปรับอัตราทดระหว่างความเร็วสองความเร็วตามองศาอิสระอย่างต่อเนื่อง ซีวีทีที่ใช้ในหุ่นยนต์โคบอทต้องเป็นชนิดที่สามารถปรับอัตราทดได้ในช่วง $-\infty$ ถึง ∞ ได้อย่างต่อเนื่องเพื่อควบคุมอัตราทดระหว่างความเร็วระหว่างข้อต่อต่างๆของหุ่นยนต์โคบอท ปัจจุบันซีวีทีที่ใช้ในการพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทมี 2 ประเภท ได้แก่ ซีวีทีประเภทล้อ และ ซีวีทีประเภททรงกลม การวิจัยครั้งนี้จะสรุปรายละเอียดของซีวีทีประเภทล้อ ดังนี้

2.1.1 ซีวีทีประเภทล้อ

ซีวีทีประเภทล้อ (Yambay Valiente, 2001) คืออุปกรณ์ที่ใช้ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงเส้นได้อย่างต่อเนื่อง มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ล้อ และมอเตอร์ปรับมุมเลี้ยว มอเตอร์ปรับมุมเลี้ยวทำหน้าที่ในการปรับมุมเลี้ยว เพื่อให้ได้อัตราทดตามที่ต้องการ ส่วนล้อใช้เป็นกลไกในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อเชิงเส้นในการควบคุมอัตราทดระหว่างความเร็ว u_x และ u_y อัตราทดของความเร็วถูกกำหนดด้วยมุมล้อ ϕ_w ตามสมการที่ 2.1 และรูป 2. 1

$$\tan \phi_w = \frac{u_y}{u_x} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดและมุมเฉลี่ยของล้อ

2.2 หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ชีวิตที่ชนิดล้อ

2.2.1 ยูนิไซเคิลโคบอท

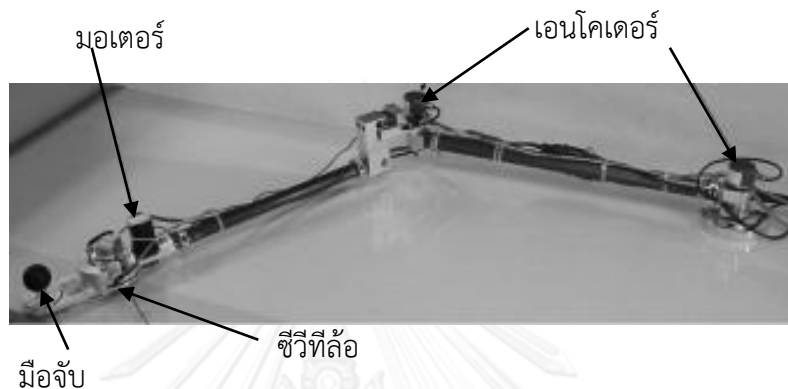
ยูนิไซเคิลโคบอทมีการสร้างขึ้นมาสองรูปแบบในห้องปฏิบัติการ Intelligent Mechanical Systems (LIMS) ที่มหาวิทยาลัย Northwestern สหรัฐอเมริกา โดยทั้งสองรูปแบบใช้ชีวิตที่ประเภทล้อในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่และมีปริภูมิการทำงานอยู่ในแนวระนาบ x-y

รูปแบบที่หนึ่ง เป็นยูนิไซเคิลโคบอท (Colgate et al, 1996) ที่มีการใช้ชีวิตที่แบบล้อในการจำกัดองศาอิสระเพื่อสร้างทิศทางเคลื่อนที่อ้างอิง โดยตัวหุ่นถูกวางอยู่บนรางรองรับ x-y และมีอุปกรณ์ตรวจรู้แรงติดอยู่ด้านบน โคบอทแบบนี้มีข้อเสียเรื่องแรงเสียดทานของรางในระบบและมีพื้นที่ในการปฏิบัติงานน้อยดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ยูนิไซเคิลโคบอท (Colgate et al, 1996)

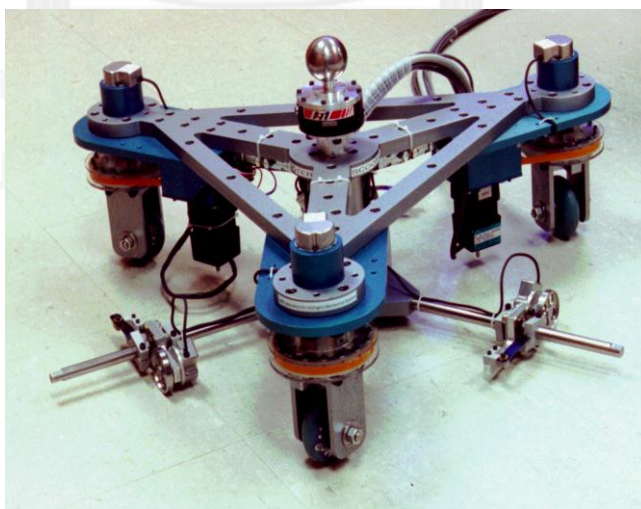
รูปแบบที่สอง เป็นยูนิไซเคิลโคบอทที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการวิจัย มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างแขน (link) สองแขน กับข้อต่อ (joint) แบบหมุนจำนวนสองข้อต่อ โคบอทรูปแบบนี้เรียกว่า “Unicycle Two-Link Arm Cobot” หรือ UTLA-Cobot (Yambay Valiente, 2001) ในขณะที่ปฏิบัติงานมีแรงเสียดทานในระบบน้อยและมีพื้นที่ในการปฏิบัติงานมาก ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 UTLA โคบอท (Yambay Valiente, 2001)

2.2.2 สกุตเตอร์โคบอท

สกุตเตอร์โคบอท (Wannasuphoprasit et al., 1997) เป็นโคบอทที่เคลื่อนบนพื้นราบ โดยใช้ซีวีทีประเภทล้อจำนวนสามชุด มีมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมองศาอิสระของล้อที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายทั้งสามด้านของโคบอท สกุตเตอร์โคบอทมีสามองศาอิสระ สามารถควบคุมทิศทางเคลื่อนที่บนพื้นในระนาบ $x-y$ และ θ มีระบบวัดตำแหน่งติดตั้งในตัว ทำให้มีพื้นที่ทำงานมากดังรูปที่ 2.4

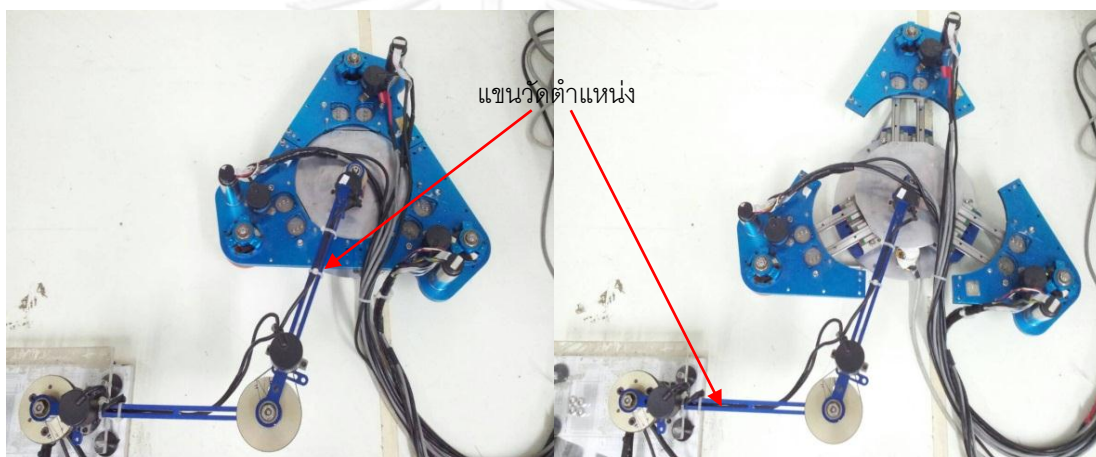


รูปที่ 2.4 สกุตเตอร์โคบอท (Wannasuphoprasit et al., 1997)

2.2.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

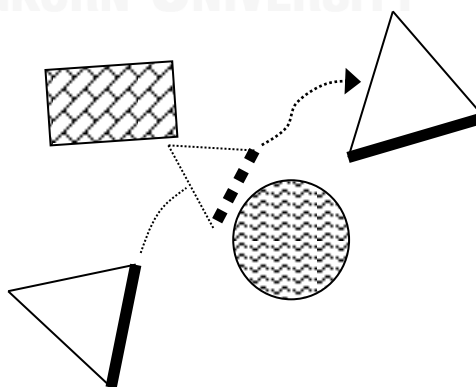
หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551) เป็นหุ่นยนต์โคบอทประเภทล้อที่ใช้ซีวีทีแบบล้อจำนวน 3 ชุด พัฒนาต่อยอดมาจากสกูตเตอร์โคบอทซึ่งมีโครงสร้างฐานคงตัว

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด มีการออกแบบแบ่งออกเป็นโมดูลล้อ 3 โมดูล และโมดูลฐาน 1 โมดูล และมีการติดตั้งกลไกปรับขนาดระหว่างโมดูลล้อและโมดูลฐาน เพื่อให้หุ่นยนต์โคบอทสามารถเคลื่อนที่เข้าออกจากโมดูลฐานได้ หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีก้านต่อ 2 ก้านต่อประกอบกันเป็นแขนวัดตำแหน่งติดตั้งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของโมดูลฐานทำหน้าที่วัดตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทประเภทนี้จึงมีปริภูมิการทำงานบนพื้นราบมีขนาดพอเหมาะสำหรับทำงานบนโต๊ะและสามารถเคลื่อนย้ายการปฏิบัติได้สะดวก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551)

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีข้อดีของการนำความสามารถในการปรับขนาดประยุกต์ใช้ ได้แก่ การปรับขนาดเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ตัวอย่างเช่น เมื่อหุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่พบกับสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดทำการปรับลดขนาดเพื่อเคลื่อนที่ผ่านอุปสรรค เมื่อเคลื่อนที่ผ่านอุปสรรคแล้วจึงทำการปรับขยายขนาดต่อไป ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง

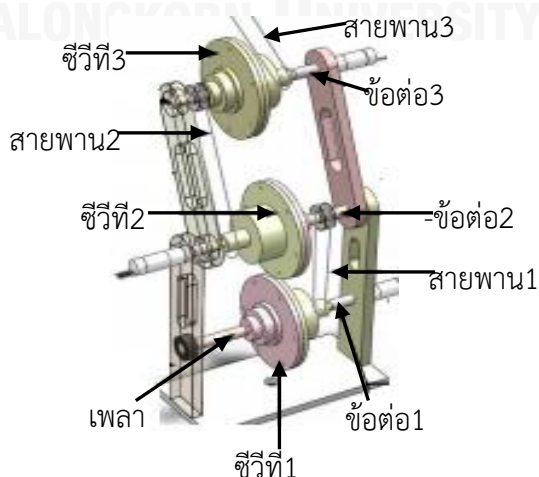
2.3 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์โคบอท

การวิจัยเรื่อง Investigation of Motion Guidance With Scooter Cobot and Collaborative Learning (Boy et al., 2007) ได้ใช้สกูตเตอร์โคบอทที่เคลื่อนที่ในรูปแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่และรูปแบบการเคลื่อนที่โดยอิสระ เพื่อทำการวิจัยสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ 2 แบบ ได้แก่ การเคลื่อนที่อ้างอิง และการเคลื่อนที่อ้างอิงแบบเอโกโนมิกเพื่อลดการบาดเจ็บของกระดูกสันหลังของผู้ปฏิบัติงานการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.7



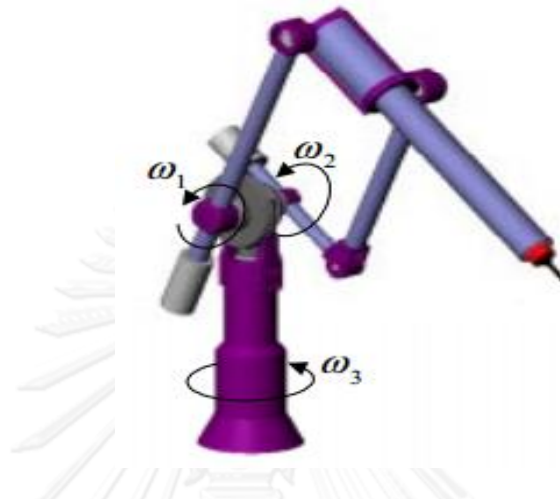
รูปที่ 2.7 การทดสอบจริงของงานวิจัย (Boy et al., 2007)

การออกแบบโคบอทรูปแบบของแขนกล ที่เรียกว่า “โคบอทแขนกล 4 องศาอิสระ” (Store et al., 2009) ด้วยการใช้ซีวีที 3 ชุด ข้อต่อ 4 ชุด มีสายพาน 3 เส้นเพื่อเชื่อมการเคลื่อนที่ไปยังก้านต่อ โคบอทแขนกลมีพื้นฐานการทำงานเหมือนกับหุ่นยนต์โคบอทชนิดอื่นๆ คือ แขนกลทำหน้าที่กำหนดทิศทางเคลื่อนที่ให้กับมนุษย์ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ โดยผู้ปฏิบัติงานทำหน้าที่ออกแรงที่จุดปลายแขน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โคบอทแขนกล 4 องศาอิสระ (Store et al., 2009)

The Arm Cobot (Moore et al., 1999) มีแขนกลที่ออกแบบด้วยโครงสร้างแบบขนาน 3 ข้อต่อ ที่ฐานมีชุดซีวีที 3 ชุดโดยแต่ละชุดประกอบด้วย ลูกทรงกลม ล้อขับ และลื่อนำดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 แขนกลของ The Arm Cobot
(Moore et al., 1999)



รูปที่ 2.10 ชุดซีวีที (Moore et al., 1999)

การทำงานของ The Arm Cobot มีความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ ลื่อนำ ชุดซีวีที ลูกทรงกลม ล้อขับ ข้อต่อของแขนกล และเพลา โดยลื่อนำของชุดซีวีทีแต่ละชุดทำหน้าที่ควบคุมทิศทางแกนมุมของลูกทรงกลม ลูกทรงกลมถ่ายโอนการเคลื่อนที่ไปยังล้อขับ ล้อขับมีเพลาเชื่อมไปยังข้อต่อ 1,2 และ 3 ของแขนกลซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.11



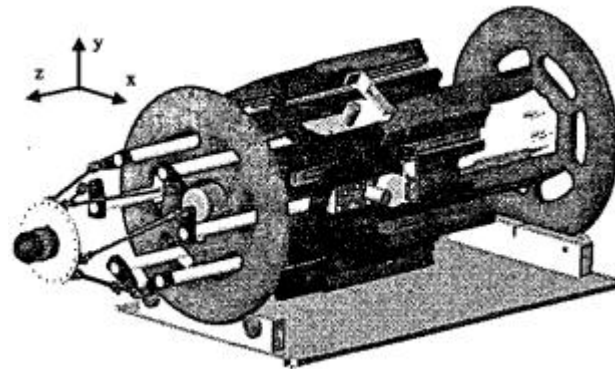
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ The Arm Cobot (Moore et al., 1999)

โคบอทชนิดสวมใส่ได้ หรือ Wearable Cobot (Chua, 2006) ออกแบบและสร้างต้นแบบโคบอทแบบสวมใส่ในส่วนข้อต่อไหล่ซึ่งมี 3 องศาอิสระ โดยการใช้เส้นเคเบิลสลิงในการบังคับการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.12



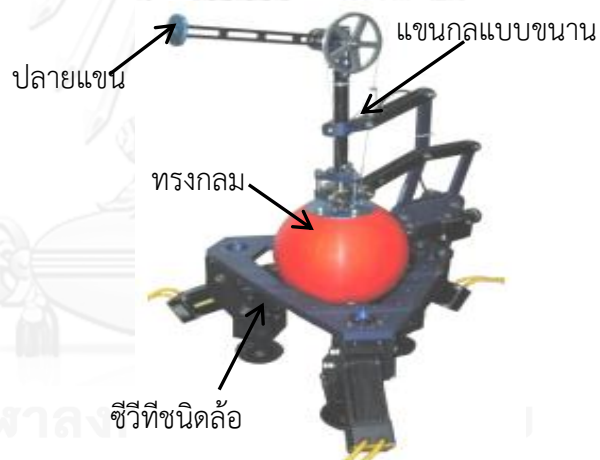
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของโคบอทชนิดสวมใส่ส่วนไหล่ (Chua, 2006)

(Faulring et al, 2004) พัฒนาแฮปติกโคบอท ออกแบบโดยใช้ซีวีที่จำนวนหกชุดแบบขนาน เรียงตัวแบบเชิงเส้น ทั้งหกตัวยึดติดกับทรงกระบอกหมุนที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นฐานและให้เกิดความแข็งแรงแฮปติกโคบอท (รูปที่ 2.13) สามารถการกำหนดทิศทางเคลื่อนที่อ้างอิงให้กับผู้ปฏิบัติงานในปริภูมิ 6 องศาอิสระ



รูปที่ 2.13 แอปติกโคบอท 6 องศาอิสระ (Faulring et al, 2004)

3-DC Cobotic manipulator (Sirikasemsuk and Wannasuphoprasit, 2011) เป็นโคบอทที่มีหลักการทำงานโดยใช้ซีวีทีชนิดล้อควบคุมแกนการหมุนของทรงกลมตรงกลาง การเคลื่อนที่แบบหมุนของทรงกลมถูกเปลี่ยนไปเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นในพิกัดคาร์ทีเซียนโดยผ่านแกนกลแบบขนานดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 3DC Cobotic manipulator

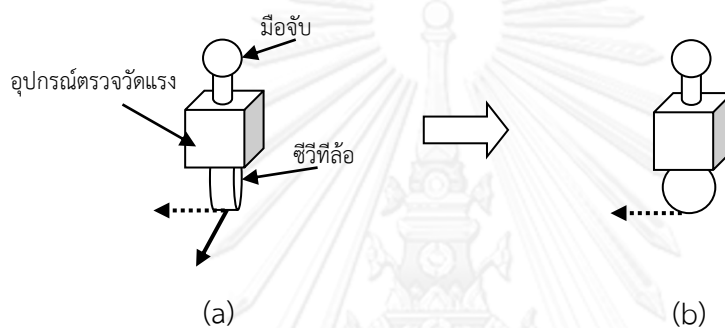
(Sirikasemsuk and Wannasuphoprasit, 2011)

2.4 การทำงาน (mode) ของหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของการทำงาน แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

2.4.1 การทำงานในแบบเคลื่อนที่โดยอิสระ (Virtual Caster Mode)

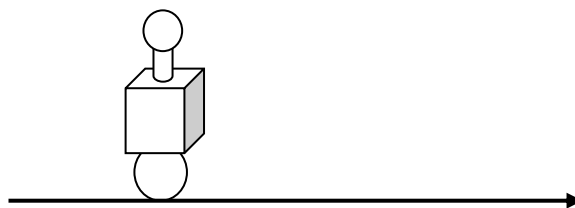
การทำงานในแบบเคลื่อนที่โดยอิสระของหุ่นยนต์โคบอทผู้ใช้สามารถเคลื่อนที่หุ่นยนต์โคบอทได้อย่างอิสระในทุกทิศทางเหมือนกับการเคลื่อนที่ของล้อรถเข็น(Caster wheel) มีอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force sensor) จากผู้ใช้ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของล้อดังรูปที่ 2.15a โคบอทเคลื่อนที่ในแนวเส้นทึบในขณะที่เดียวกันอุปกรณ์ตรวจวัดแรงตรวจพบแรงตามแนวเส้นประ และพยายามทำให้แรงนั้นเป็นศูนย์โดยการปรับมุมเลี้ยวของล้อให้มีทิศทางเดียวกับแรงนั้นดังรูปที่ 2.15b



รูปที่ 2.15 (a) โคบอทเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทึบและตรวจพบแรงตามแนวเส้นประ
(b) โคบอทปรับมุมเลี้ยวของล้อให้เคลื่อนที่ตามแนวแรง(เส้นประ)

2.4.2 การทำงานในแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Virtual Path Mode)

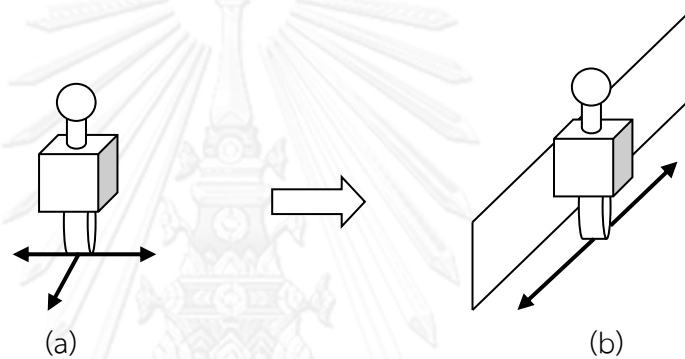
การทำงานในแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่หุ่นยนต์โคบอทเป็นผู้กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่โดยการปรับมุมเลี้ยวของล้อหรืออัตราทดของซีวีที ล้อของหุ่นยนต์โคบอทจะบังคับสร้างเส้นทางโดยให้การเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดเท่านั้นดังรูปที่ 2.16 ในกรณีที่ผู้ใช้เคลื่อนหุ่นยนต์โคบอทออกนอกเส้นทางระบบควบคุมจะนำทางให้ผู้ใช้กลับเข้าสู่เส้นทาง



รูปที่ 2.16 โคบอทเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางบังคับ

2.4.3 การทำงานแบบการสร้างกำแพงเสมือน (Virtual Wall Mode)

การทำงานแบบการสร้างกำแพงเสมือนเป็นการรวมการทำงานแบบเคลื่อนที่โดยอิสระ (Virtual Caster Mode) และแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Virtual Path Mode) เมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทอยู่ห่างจากตำแหน่งของกำแพงเสมือนจะมีลักษณะการทำงานในแบบการเคลื่อนที่โดยอิสระดังรูปที่ 2.17a แต่เมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทอยู่ในตำแหน่งเดียวกับกำแพงเสมือน (Virtual Wall) หุ่นยนต์โคบอทจะมีความทำงานแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่โดยการใช้วิธีที่ปรับอัตราทดให้มุมเลี้ยวของล้อให้ขนานกับกำแพงเสมือนทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถเคลื่อนหุ่นยนต์โคบอทเข้าไปในกำแพงเสมือนได้เนื่องจากแรงเสียดทานของล้อกับผิวสัมผัสดังรูปที่ 2,17b และเมื่อผู้ใช้ต้องการดึงหุ่นยนต์โคบอทออกจากแนวกำแพงเสมือนหุ่นยนต์โคบอทจะปรับเข้าสู่โหมดการเคลื่อนที่แบบอิสระ



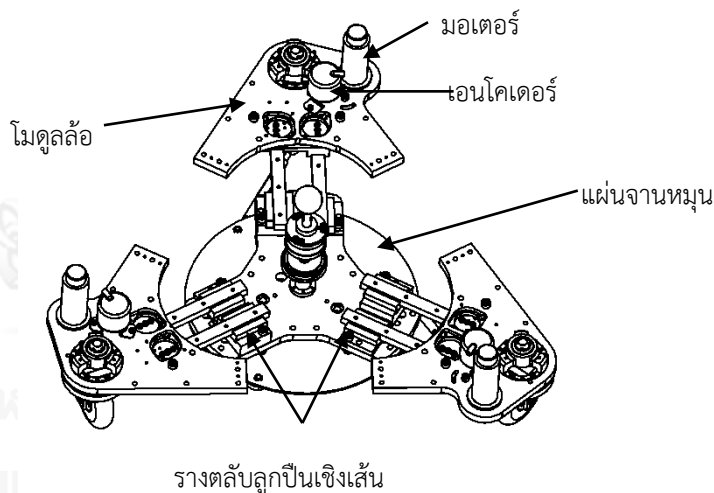
รูปที่ 2.17 (a) โคบอทเคลื่อนที่ในรูปแบบอิสระเมื่ออยู่ห่างจากแนวกำแพงเสมือน
(b) โคบอทเคลื่อนที่ในรูปแบบบังคับเส้นทางการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในแนวกำแพงเสมือน

บทที่ 3

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

และจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

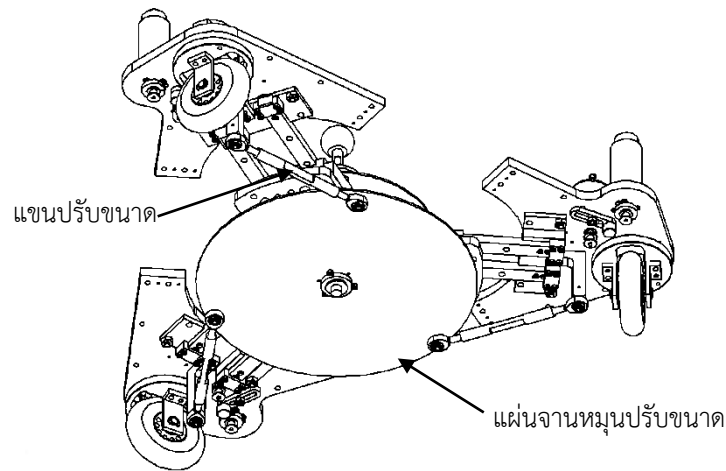
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทแบบสามล้อซึ่งมีการทำงานอยู่บนระนาบสามมิติ และติดตั้งกลไกบังคับการปรับขนาด (ศุภพน, 2551) ซึ่งสามารถทำให้โมดูลล้อทั้งสามโมดูลเคลื่อนที่เข้าออกจากโมดูลฐานระหว่างเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงได้ หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีปริภูมิการทำงาน ประกอบไปด้วย ปริภูมิโครงแบบ (Configuration space) สามมิติคือ (X, Y, θ) และปริภูมิปรับขนาด (l, α) ซึ่งทำให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถทำงานบนระนาบได้ด้วย 3 องศาอิสระ (3-Degree Of Freedom) และสามารถปรับขนาดเคลื่อนที่เข้าและออกจากโมดูลฐานได้ด้วยการใช้ CVT (Continuous Variable Transmission) ชนิดล้อซึ่งติดตั้งอยู่บนโมดูลล้อทั้งสามโมดูล โดยแต่ละโมดูลประกอบด้วย มอเตอร์บังคับทิศทาง สายพานไหม่มิ่ง และเอนโคเดอร์มีหน้าที่ในการวัดมุมเลี้ยวของล้อ ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (Chanpat and Wannasuphprasit, 2009)

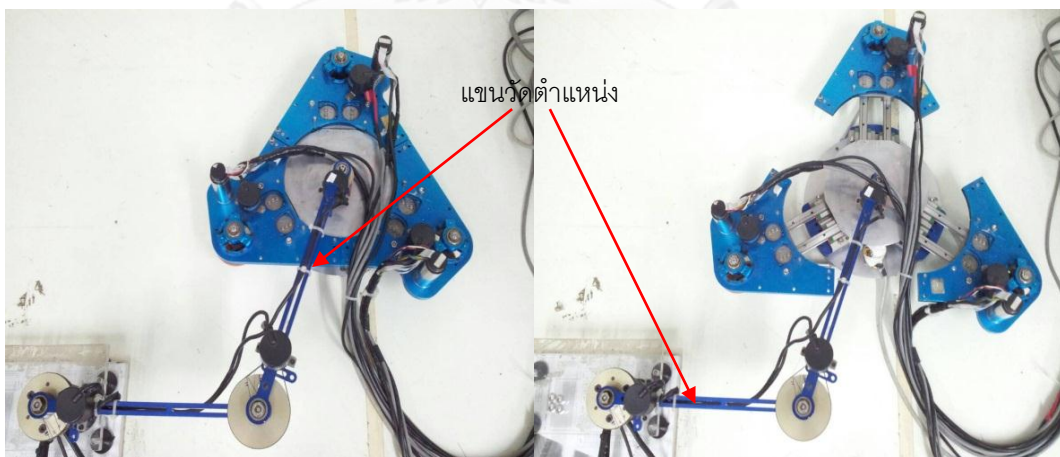
3.1 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (ศุภพน, 2551)

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีกลไกการปรับขนาดติดตั้งอยู่บนโมดูลฐานปรับขนาด กลไกการปรับขนาดประกอบด้วย แผ่นจานหมุนปรับขนาด แขนปรับขนาด และโมดูลฐานที่มีการเชื่อมต่อกับโมดูลล้อทั้งสามโมดูลด้วยร่างตลับลูกปืนเชิงเส้นเพื่อให้ระยะปรับขนาดเท่ากันทุกโมดูลล้อดังรูป 3.2

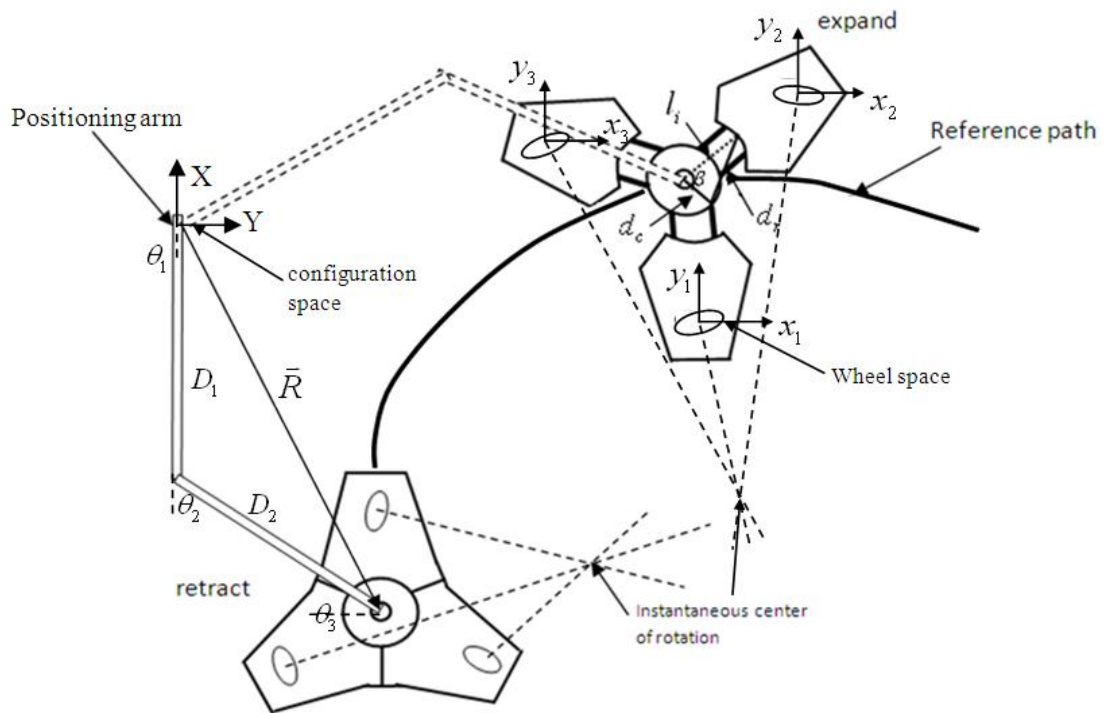


รูปที่ 3.2 กลไกการปรับขนาด (ศุภพน, 2551)

การวัดตำแหน่ง (X, Y, θ) ของปริภูมิโคจรแบบ (Configuration space) ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถทำได้โดยใช้แขนวัดตำแหน่ง (Positioning arm) ที่ติดตั้งอยู่บนศูนย์กลางของตัวหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด การวัดตำแหน่งจะเกิดขณะที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่ตามเส้นทางหรือผ่านสิ่งกีดขวาง ทิศทางของการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดจากทิศทางที่เส้นแกนล้อทั้งสามตัดกัน ณ จุดใดจุดหนึ่งที่เป็นจุดศูนย์กลางการหมุน (Instantaneous center of rotation) ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด ณ จุดนั้นดังรูป 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 แสดงแขนวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด



รูปที่ 3.4 การวัดตำแหน่งบนเส้นทางการเคลื่อนที่

การวัดระยะของการปรับขนาด (Expansion length: l_i) มีความสัมพันธ์กับมุม (β) ของแผ่นงานหมุนปรับขนาด ดังรูป 3.4 และสามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$l_i = d_r \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{d_c \sin(\beta)}{d_r} \right) + d_c \cos(\beta) \right] \quad (3.1)$$

d_r = ความยาวแขนปรับขนาดมีค่าเท่ากับ 0.1475 เมตร

d_c = รัศมีของแผ่นงานหมุนปรับขนาดมีค่าเท่ากับ 0.125 เมตร

ตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

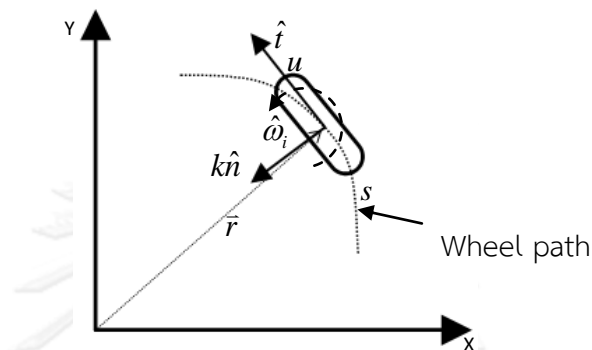
$$X = D_1 \cos(\theta_1) + D_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.2)$$

$$Y = D_1 \sin(\theta_1) + D_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.3)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (3.4)$$

3.2 จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด(ศุภพน, 2551; Chanpat and Wannasuphoprasit, 2006; Chanpat and Wannasuphoprasit,2009) ไม่ได้คำนวณจากตัวแปรเวลา แต่ใช้ฟังก์ชันของค่าตัวแปรพารามิเตอร์ความยาวโค้ง (s , Path length parameter) มาใช้เป็นหลักในการคำนวณหาจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ปรับขนาด



รูปที่ 3.5 ค่าตัวแปรที่นำมาใช้ในการคำนวณจลนศาสตร์

จากหลักการของหุ่นยนต์โคบอทที่มีหน้าที่เพียงกำหนดเส้นทางในการเคลื่อนที่ให้ผู้ปฏิบัติงาน ส่วนแรงที่กระทำนั้นมาจากผู้ใช้งานเพียงอย่างเดียว ดังนั้นตัวควบคุม(Controller) จะทำหน้าที่เพียงควบคุมมุมเลี้ยวของล้อ

ค่าความเร็วมุมเลี้ยวของล้อ ($\dot{\omega}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\dot{\omega} = \dot{u} \hat{t} \times k \hat{n} \quad (3.5)$$

กำหนดให้

u	หมายถึง	ความเร็วบนปริภูมิล้อ (Wheel space),
\vec{r}	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position vector) บนปริภูมิล้อ,
\hat{t}	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัส (Tangent vector) ณ จุดใดๆบนตำแหน่งบนปริภูมิล้อ
$k \hat{n}$	หมายถึง	เวกเตอร์ส่วนกลับของรัศมีความโค้ง (Curvature vector) บนปริภูมิล้อ

จากสมการ 3.5 ค่าความเร็วมุมเลี้ยวของล้อ ($\dot{\omega}$) มีที่มาของการคำนวณดังนี้

โดยทั่วไปแล้วจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดจะทำการแมปอิงจากปริภูมิการทำงานซึ่งประกอบด้วย ปริภูมิโครงแบบและปริภูมิปรับขนาดไปยังปริภูมิล้อ

สมการปริภูมิโครงแบบ

$$\bar{\mathbf{R}}(s) = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ m\theta \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{T}} = \frac{d\bar{\mathbf{R}}}{ds}, \quad \text{and} \quad k\hat{\mathbf{N}} = \frac{d\hat{\mathbf{T}}}{ds} \quad (3.6)$$

กำหนดให้

$\bar{\mathbf{R}}$	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position vector) บนปริภูมิโครงแบบ $[X, Y, m\theta]^T$
X	หมายถึง	ตำแหน่งบนแกน X
Y	หมายถึง	ตำแหน่งบนแกน Y
θ	หมายถึง	มุมการวางตัวของหุ่นขณะเคลื่อนที่มีหน่วยเป็นเรเดียน
m	หมายถึง	ค่าคงที่สำหรับแปลงหน่วยจากเรเดียนให้อยู่ในหน่วยเมตร และกำหนดให้ค่าเป็น 1 เมตรต่อเรเดียน เพื่อให้ไม่มีผลต่อการคำนวณ
$\hat{\mathbf{T}}$	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัส (Tangent vector) ณ จุดใดๆ บนปริภูมิโครงแบบ
$k\hat{\mathbf{N}}$	หมายถึง	เวกเตอร์ส่วนกลับรัศมีความโค้ง (Curvature vector) บนปริภูมิโครงแบบ

สมการปริภูมิปรับขนาด

$$\bar{\mathbf{E}}_i(s) = \begin{bmatrix} l_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

กำหนดให้

$\bar{\mathbf{E}}_i$	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งของการปรับขนาด $[l_i, \alpha_i]^T$
l_i	หมายถึง	ค่าความยาวระยะปรับขนาด
α_i	หมายถึง	ค่ามุมที่โมดูลล้อทำมุมต่อศูนย์กลางของโมดูลฐานโดยเป็นค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
i	หมายถึง	แสดงลำดับที่ของล้อ

ตำแหน่งของล้อย สามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์ของตำแหน่งบนแกน x และ y บนปริภูมิล้อยโดยมีสมการดังนี้

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ix}(\vec{R}, \vec{E}_i) \\ L_{iy}(\vec{R}, \vec{E}_i) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

กำหนดให้

L_i	หมายถึง	ตัวดำเนินการ
\vec{r}_i	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งของล้อย
x_i	หมายถึง	ตำแหน่งบนแกน x บนปริภูมิล้อย
y_i	หมายถึง	ตำแหน่งบนแกน y บนปริภูมิล้อย

ค่าของเวกเตอร์สัมผัสบนปริภูมิล้อย (\hat{t}_i) สามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์ตำแหน่งของล้อย จากสมการ ดังนี้

$$\hat{t}_i = \frac{d\vec{r}_i}{ds_i} = \begin{bmatrix} \frac{dx_i}{ds_i} \\ \frac{dy_i}{ds_i} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\hat{t}_i = J_{i(R)} \hat{T} \frac{ds}{ds_i} + J_{i(E)} \frac{d\vec{E}}{ds} \frac{ds}{ds_i} \quad (3.10)$$

กำหนดให้

\hat{t}_i	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัสของล้อย
$J_{i(R)}$	หมายถึง	จาโคเบียนบนปริภูมิโครงแบบ
$J_{i(E)}$	หมายถึง	จาโคเบียนบนปริภูมิปรับขนาด

ค่าเวกเตอร์ส่วนกลับปริมาตรความโค้งของล้อย ($k_i \hat{n}_i$) สามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์อันดับสองของเวกเตอร์ตำแหน่งของล้อย จากสมการ ดังนี้

$$k_i \hat{n}_i = \frac{d\vec{t}_i}{ds_i} = \begin{bmatrix} \frac{d^2 x_i}{ds_i^2} \\ \frac{d^2 y_i}{ds_i^2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

กำหนดให้

$k_i \hat{n}_i$ หมายถึง เวกเตอร์ส่วนกลับรัศมีความโค้งของล้อย
 ดังนั้นคำสั่งควบคุมความเร็วมุมเฉลี่ยของล้อยจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{\omega}_i = u_i \hat{t}_i \times k_i \hat{n}_i \quad (3.12)$$

3.3 การนำปริภูมิโค้งแบบและปริภูมิปรับขนาดของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมาผนวกกัน

ปริภูมิโค้งแบบและปริภูมิปรับขนาดมีสมการ (3.6, 3.7) การคำนวณแยกกันอย่างชัดเจน
 การนำปริภูมิสองปริภูมิมาผนวกให้อยู่ในปริภูมิเดียวกัน มีรายละเอียด ดังนี้

การรวมเวกเตอร์ของปริภูมิโค้งแบบและปริภูมิปรับขนาด ดังสมการ

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ m\theta \\ l_i \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

กำหนดให้

\vec{R} หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position vector) $[X \ Y \ m\theta \ l_i]^T$ บน
 ปริภูมิโค้งแบบ

X หมายถึง ตำแหน่งบนแกน X

Y หมายถึง ตำแหน่งบนแกน Y

θ หมายถึง มุมการวางตัวของหุ่นขณะเคลื่อนที่มีหน่วยเป็นเรเดียน

m หมายถึง ค่าคงที่สำหรับแปลงหน่วยจากเรเดียนให้อยู่ในหน่วยเมตรและ
 กำหนดให้มีค่าเป็น 1 เมตรต่อเรเดียน เพื่อให้ไม่มีผลต่อการคำนวณ

ตำแหน่งของล้อ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\bar{r}_i = \begin{bmatrix} L_{ix}(\bar{R}) \\ L_{iy}(\bar{R}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

กำหนดให้

- L_i หมายถึง ตัวดำเนินการ
- \bar{r}_i หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งของล้อ
- x_i หมายถึง ตำแหน่งบนแกน x บนปริภูมิล้อ
- y_i หมายถึง ตำแหน่งบนแกน y บนปริภูมิล้อ

ค่าของเวกเตอร์สัมผัสบนปริภูมิล้อ (\hat{t}_i) สามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์ตำแหน่งของล้อจากสมการดังนี้

$$\hat{t}_i = \frac{d\bar{r}_i}{ds_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial X} \frac{dX}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial x_i}{\partial Y} \frac{dY}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial x_i}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} \frac{ds}{ds_i} & \dots \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial y_i}{\partial X} \frac{dX}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial y_i}{\partial Y} \frac{dY}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial y_i}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} \frac{ds}{ds_i} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

จัดรูปเมทริกเวกเตอร์สัมผัสโค้งของล้อ

$$\frac{d\bar{r}_i}{ds_i} = \begin{bmatrix} \frac{dx_i}{ds_i} \\ \frac{dy_i}{ds_i} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial X} & \frac{\partial x_i}{\partial Y} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta} & \frac{\partial x_i}{\partial l_i} \\ \frac{\partial y_i}{\partial X} & \frac{\partial y_i}{\partial Y} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta} & \frac{\partial y_i}{\partial l_i} \end{bmatrix}}_{J_i} \begin{bmatrix} \frac{dX}{ds} \\ \frac{dY}{ds} \\ \frac{d\theta}{ds} \\ \frac{dl_i}{ds} \end{bmatrix} \frac{ds}{ds_i} \quad (3.16)$$

เวกเตอร์ส่วนกลับรัศมีมีความโค้งของล้อยู่ ($k_i \hat{n}_i$) สามารถคำนวณดังนี้

$$k_i \hat{n}_i = \frac{d\hat{t}_i}{ds_i} = \begin{bmatrix} \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial X} \frac{dX}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial x_i}{\partial Y} \frac{dY}{ds} \frac{ds}{ds_i} \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{\partial x_i}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial x_i}{\partial l_i} \frac{dl_i}{ds} \frac{ds}{ds_i} \right) \\ \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial X} \frac{dX}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial y_i}{\partial Y} \frac{dY}{ds} \frac{ds}{ds_i} \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{\partial y_i}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} \frac{ds}{ds_i} + \frac{\partial y_i}{\partial l_i} \frac{dl_i}{ds} \frac{ds}{ds_i} \right) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

จัดรูปเมทริกเวกเตอร์ส่วนกลับรัศมีมีความโค้งดังสมการที่ 3.18

$$\begin{aligned}
\kappa_i \bar{n}_i = & \underbrace{\left[\begin{array}{cccc} \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial X} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial Y} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial \theta} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial l_i} \right) \\ \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial X} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial Y} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial \theta} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial l_i} \right) \end{array} \right]}_{\frac{dJ_i}{ds_i}} \underbrace{\left[\begin{array}{c} \frac{dX}{ds} \\ \frac{dY}{ds} \\ \frac{d\theta}{ds} \\ \frac{dl_i}{ds} \end{array} \right]}_{\hat{t}} \frac{ds}{ds_i} \dots \\
\dots + & \underbrace{\left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial x_i}{\partial X} & \frac{\partial x_i}{\partial Y} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta} & \frac{\partial x_i}{\partial l_i} \\ \frac{\partial y_i}{\partial X} & \frac{\partial y_i}{\partial Y} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta} & \frac{\partial y_i}{\partial l_i} \end{array} \right]}_{J_i} \underbrace{\left[\begin{array}{c} \frac{d^2 X}{ds^2} \\ \frac{d^2 Y}{ds^2} \\ \frac{d^2 \theta}{ds^2} \\ \frac{d^2 l_i}{ds^2} \end{array} \right]}_{\kappa \bar{N}} \left(\frac{ds}{ds_i} \right)^2 \dots \\
\dots + & \underbrace{\left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial x_i}{\partial X} & \frac{\partial x_i}{\partial Y} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta} & \frac{\partial x_i}{\partial l_i} \\ \frac{\partial y_i}{\partial X} & \frac{\partial y_i}{\partial Y} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta} & \frac{\partial y_i}{\partial l_i} \end{array} \right]}_{J_i} \underbrace{\left[\begin{array}{c} \frac{dX}{ds} \\ \frac{dY}{ds} \\ \frac{d\theta}{ds} \\ \frac{dl_i}{ds} \end{array} \right]}_{\hat{t}} \frac{d^2 s}{ds_i^2}
\end{aligned} \tag{3.18}$$

พิจารณากลุ่มอนุพันธ์ของเมทริกจาโคเบียน $\frac{dJ_i}{ds_i}$ ทำการหาอนุพันธ์อันดับสองโดยใช้กฎ

ลูกโซ่และการหาอนุพันธ์ย่อยดังนี้

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial X} \right) = \left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial X^2} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y \partial X} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta \partial X} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i \partial X} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \tag{3.19}$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial Y} \right) = \left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial X \partial Y} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y^2} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta \partial Y} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i \partial Y} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.20)$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial \theta} \right) = \left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial X \partial \theta} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y \partial \theta} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta^2} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i \partial \theta} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.21)$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial l_i} \right) = \left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial X \partial l_i} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y \partial l_i} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta \partial l_i} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i^2} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.22)$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial X} \right) = \left(\frac{\partial^2 y_i}{\partial X^2} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y \partial X} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta \partial X} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i \partial X} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.23)$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial Y} \right) = \left(\frac{\partial^2 y_i}{\partial X \partial Y} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y^2} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta \partial Y} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i \partial Y} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.24)$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial \theta} \right) = \left(\frac{\partial^2 y_i}{\partial X \partial \theta} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y \partial \theta} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta^2} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i \partial \theta} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.25)$$

$$\frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial l_i} \right) = \left(\frac{\partial^2 y_i}{\partial X \partial l_i} \frac{dX}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y \partial l_i} \frac{dY}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta \partial l_i} \frac{d\theta}{ds} + \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i^2} \frac{dl_i}{ds} \right) \frac{ds}{ds_i} \quad (3.26)$$

นำสมการ 3.19-3.26 แทนกลับในสมการ 3.18 ได้เป็นความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{dJ_i}{ds_i} = \begin{bmatrix} \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial X} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial Y} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial \theta} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial x_i}{\partial l_i} \right) \\ \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial X} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial Y} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial \theta} \right) & \frac{d}{ds_i} \left(\frac{\partial y_i}{\partial l_i} \right) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

โดยสามารถกระจายและจัดกลุ่มดังสมการ 3.28

$$\begin{aligned}
&= \left[\begin{array}{c} \underbrace{\left[\frac{dX}{ds} \quad \frac{dY}{ds} \quad \frac{d\theta}{ds} \quad \frac{dl_i}{ds} \right]}_{\hat{T}^T} \underbrace{\left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial^2 x_i}{\partial X^2} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial X \partial Y} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial X \partial \theta} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial X \partial l_i} \\ \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y \partial X} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y^2} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y \partial \theta} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial Y \partial l_i} \\ \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta \partial X} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta \partial Y} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta^2} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial \theta \partial l_i} \\ \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i \partial X} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i \partial Y} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i \partial \theta} & \frac{\partial^2 x_i}{\partial l_i^2} \end{array} \right]}_{H_{ix}} \\ \\ \underbrace{\left[\frac{dX}{ds} \quad \frac{dY}{ds} \quad \frac{d\theta}{ds} \quad \frac{dl_i}{ds} \right]}_{\hat{T}^T} \underbrace{\left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial^2 y_i}{\partial X^2} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial X \partial Y} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial X \partial \theta} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial X \partial l_i} \\ \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y \partial X} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y^2} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y \partial \theta} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial Y \partial l_i} \\ \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta \partial X} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta \partial Y} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta^2} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial \theta \partial l_i} \\ \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i \partial X} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i \partial Y} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i \partial \theta} & \frac{\partial^2 y_i}{\partial l_i^2} \end{array} \right]}_{H_{iy}} \end{array} \right] \frac{ds}{ds_i} \quad (3.28)
\end{aligned}$$

สามารถเขียนสมการเวกเตอร์ 3.28 ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$k_i \hat{n}_i = \begin{bmatrix} \bar{T}^T H_{ix} \\ \bar{T}^T H_{iy} \end{bmatrix} \bar{T} \left(\frac{ds}{ds_i} \right)^2 + J_i \kappa \bar{N} \left(\frac{ds}{ds_i} \right)^2 + J_i \bar{T} \frac{d^2 s}{ds_i^2} \quad (3.29)$$

คำสั่งเวกเตอร์ความเร็วมุมเฉลี่ยคำนวณโดย

$$\bar{\omega}_i = u_i \hat{t}_i \times k_i \hat{n}_i \quad (3.30)$$

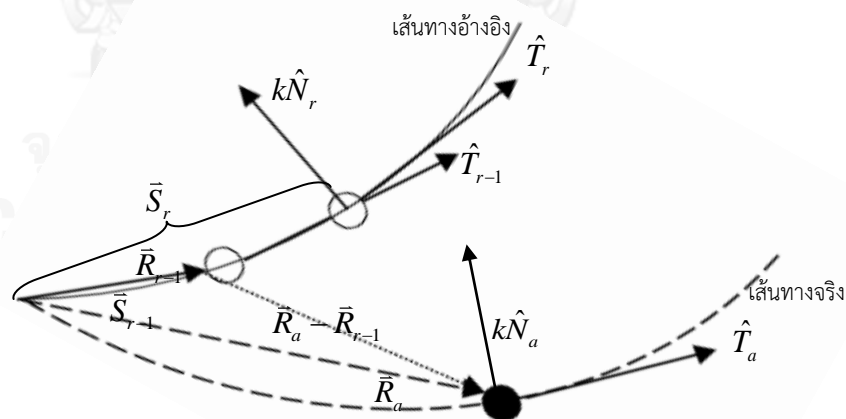
บทที่ 4

การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

โดยพื้นฐานแล้ว หุ่นยนต์โคบอทไม่มีการสร้างการเคลื่อนที่ในตัวเอง มนุษย์เป็นผู้ออกแรงกระทำให้หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ หุ่นยนต์โคบอททำหน้าที่ควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ให้กับมนุษย์ ในการทำงานร่วมกัน หุ่นยนต์โคบอทต้องควบคุมทิศทางบนเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อไปสู่เส้นทางที่กำหนดไว้ ทั้งนี้หุ่นยนต์โคบอทจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งเทียบกับเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง เพื่อใช้ข้อมูลสำหรับการควบคุม เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทถูกคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ของความยาวโค้ง โดยทำการหาค่าความยาวโค้งการเคลื่อนที่ถึงจุดบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงซึ่งใกล้กับตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์โคบอทมากที่สุด

4.1 การประมาณค่าความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ (Path length estimation)

หุ่นยนต์โคบอทใช้พารามิเตอร์ความยาวโค้ง S ในการประมาณค่าความยาวโค้งบนเส้นทางการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามการประมาณค่าความยาวโค้งโดยตรงจากจุดเริ่มต้นถึงจุดเป้าหมายบนเส้นทางอ้างอิงที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โคบอทมากที่สุดมีความซับซ้อน การประมาณค่าความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทจึงมีวิธีการคำนวณโดยการนำความยาวโค้งของชั้นเวลาก่อนหน้ารวมกับผลต่างระหว่างเวกเตอร์ตำแหน่งจริงกับเวกเตอร์ตำแหน่งของชั้นเวลาก่อนหน้าบนเส้นทางอ้างอิง ที่ฉายลงบนเส้นทางอ้างอิง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การประมาณค่าความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่

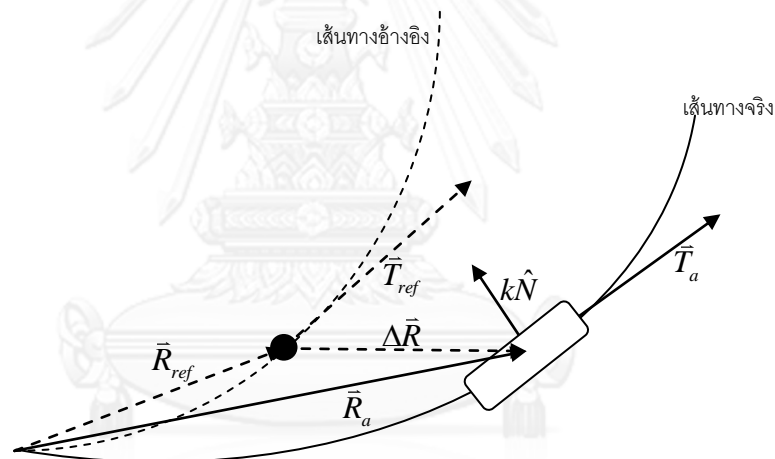
จากรูปที่ 4.1 การคำนวณการประมาณค่าความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแสดงดังสมการที่ 4.1

$$\bar{S}_r = \bar{S}_{r-1} + (\bar{R}_a - \bar{R}_{r-1}) \cdot \hat{T}_{r-1} \quad (4.1)$$

กำหนดให้

\bar{S}_r	หมายถึง	ค่าความยาวโค้ง
\bar{R}_a	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งจริงของหุ่นขณะเคลื่อนที่
\hat{T}_a	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัสโค้งจริง
\bar{R}_{r-1}, \bar{R}_r	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงของชั้นเวลาที่แล้วและชั้นเวลาปัจจุบัน
\hat{T}_{r-1}, \hat{T}_r	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัสโค้งอ้างอิงของชั้นเวลาที่แล้วและชั้นเวลาปัจจุบัน

4.2 ค่าผิดพลาดของหุ่นยนต์โคบอทบนเส้นทางการเคลื่อนที่



รูปที่ 4.2 ค่าผิดพลาดบนเส้นทางการเคลื่อนที่

ค่าผิดพลาดของหุ่นยนต์โคบอทบนปริภูมิการทำงาน ประกอบด้วยค่าผิดพลาด 2 ประเภท ได้แก่ค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ($\Delta \bar{R}$) และค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ($\Delta \hat{T}$)

ค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง

$$\Delta \bar{R} = \bar{R}_a - \bar{R}_{ref} \quad (4.2)$$

\bar{R}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งบนเส้นทางอ้างอิง

\bar{R}_a หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งบนเส้นทางจริง

ค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง

$$\Delta \bar{T} = \bar{T}_a - \bar{T}_{ref} \quad (4.3)$$

\bar{T}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์สัมพัทธ์บนเส้นทางอ้างอิง

\bar{T}_a หมายถึง เวกเตอร์สัมพัทธ์บนเส้นทางจริง

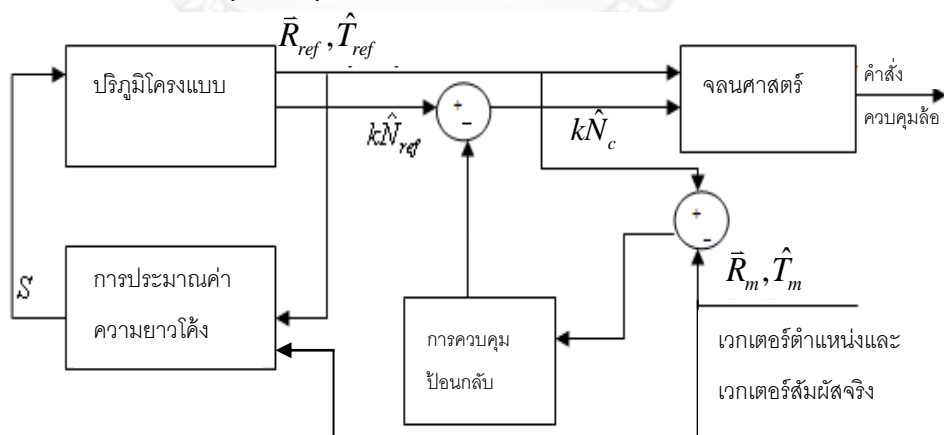
การควบคุมโคบอทใช้วิธีการปรับเวกเตอร์ความโค้ง ($k\hat{N}$) เพื่อควบคุมให้เข้าสู่เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง ระบบควบคุมป้อนกลับของหุ่นยนต์โคบอทมีหน้าที่ในการชดเชยค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่งและค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ด้วยการแทนเวกเตอร์ความโค้งด้วยเวกเตอร์ความโค้งบวกด้วยค่าชดเชยความโค้ง $k\hat{N} + dk\hat{N}$

ในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยแบ่งออกเป็นสองหัวข้อคือ การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับบนปริภูมิล้อและการพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้หลักการของปริภูมิสี่มิติ

4.3 การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ

ก่อนที่จะกล่าวถึงระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด จะขอกล่าวถึงระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด ซึ่งเป็นระบบควบคุมพื้นฐานของหุ่นยนต์โคบอทดังนี้

4.3.1 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด (แบบทั่วไป)



รูปที่ 4.3 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด

กำหนดให้

\bar{R}_m หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โคบอท

\hat{T}_m หมายถึง เวกเตอร์สัมพัทธ์จริงของหุ่นยนต์โคบอท

\vec{R}_{ref}	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอท
\hat{T}_{ref}	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอท
$k\hat{N}_{ref}$	หมายถึง	เวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอท
S	หมายถึง	ค่าความยาวโค้ง

ขณะที่หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ตัวควบคุม (Controller) ทำการวัดค่าเวกเตอร์จริง 2 ประเภท ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งจริง (\vec{R}_m) และเวกเตอร์สัมผัสจริง (\hat{T}_m)

ค่าเวกเตอร์ตำแหน่งจริงและเวกเตอร์สัมผัสจริงถูกนำไปใช้ในการคำนวณการประมาณค่าความยาวเส้นโค้ง (S) ค่าความยาวเส้นโค้งถูกป้อนเข้าไปในปริภูมิโครงแบบเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์อ้างอิง 3 ประเภท ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิง (\vec{R}_{ref}) เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิง (\hat{T}_{ref}) และค่าเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิง ($k\hat{N}_{ref}$)

ค่าความผิดพลาดในระบบควบคุมแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ($\Delta\vec{R}$) และค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ($\Delta\hat{T}$) ค่าผิดพลาดทั้งสองประเภทนี้จะถูกชดเชยในการควบคุมป้อนกลับ ดังสมการที่ 4.4

$$dk\hat{N} = G_1\Delta\vec{R} + G_2\Delta\hat{T} \quad (4.4)$$

G_1 หมายถึง ค่าเกนชดเชยค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง

G_2 หมายถึง ค่าเกนชดเชยค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง

เมื่อชดเชยค่าผิดพลาดแล้ว ค่าชดเชยค่าผิดพลาดถูกส่งไปชดเชยเปรียบเทียบกับค่าเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิง ($k\hat{N}_{ref}$) ดังสมการที่ (4.5)

$$k\hat{N}_c = k\hat{N}_{ref} - (G_1\Delta\vec{R} + G_2\Delta\hat{T}) \quad (4.5)$$

แล้วจึงนำมาคำนวณในระบบจลนศาสตร์เพื่อเป็นคำสั่งในการควบคุมความเร็วมุมเฉลี่ยของล้อต่อไป การทดสอบรูปแบบเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง กำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเป็นเส้นโค้งเกลียววนขึ้น (Helix path) (Kreuzig, 1988)

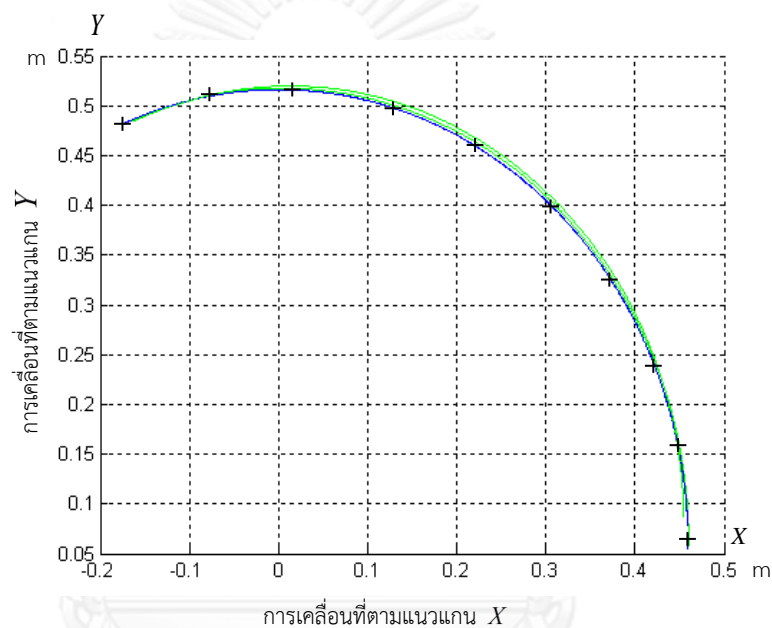
$$\vec{R} = \begin{bmatrix} a \cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ a \sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ c\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \end{bmatrix}, \hat{T} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \end{bmatrix}, k\hat{N} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{a^2 + c^2} \sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ \frac{a}{a^2 + c^2} \cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

a หมายถึง ค่ารัศมีของเกลียว

c หมายถึง จำนวนการวนรอบของเกลียว

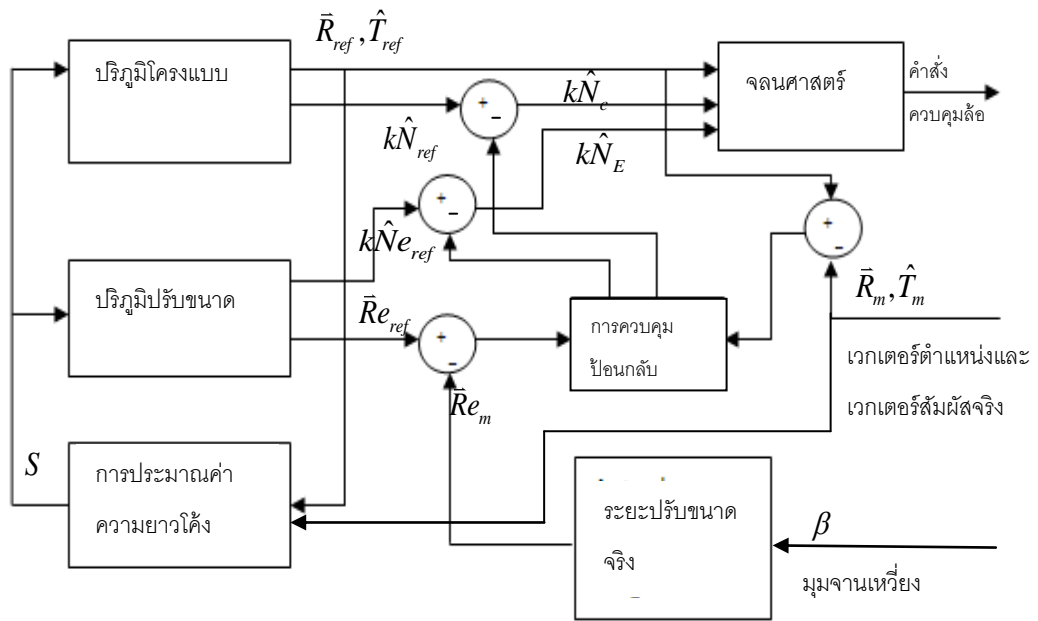
ในการทดสอบจริงค่า c คือค่าที่กำหนดการหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด กำหนดให้ค่า $a = 0.46$ m. , $c = 0$ หุ่นยนต์โคบอทเริ่มต้นที่พิกัด $(0.46, 0.05, 0)$ หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง (+) เส้นที่บแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่จริง แกน x แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y ผลการทดสอบจริงแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของระบบควบคุมดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด
เส้นที่บแสดงเส้นทางการทำงานจริง เครื่องหมาย '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง

ตัวอย่างของหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้การควบคุมแบบนี้คือ หุ่นยนต์สกุตเตอร์โคบอท (Wannasuphprasit et al., 1997) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์แบบแบบ 3 ล้อที่ไม่มีการปรับขนาด ในหัวข้อต่อไป จะอธิบายถึงระบบควบคุมของหุ่นยนต์ปรับขนาด ซึ่งเป็นส่วนหลักที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้

4.3.2 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด



รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

กำหนดให้

\bar{R}_m หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

\hat{T}_m หมายถึง เวกเตอร์สัมผัสจริงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

\bar{R}_e หมายถึง เวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง

\bar{R}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

\hat{T}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

$k\hat{N}_{ref}$ หมายถึง เวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

$\bar{R}_{e_{ref}}$ หมายถึง เวกเตอร์ระยะปรับขนาดอ้างอิง

$k\hat{N}_{e_{ref}}$ หมายถึง เวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของระยะปรับขนาดอ้างอิง

S หมายถึง ค่าความยาวโค้ง

β หมายถึง มุมของจานเหยียงปรับขนาด

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดใช้ซีวีทีชนิดล้อ 3 ล้อในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่และควบคุมระยะปรับขนาด ขณะที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ตัวควบคุมทำการ

วัดค่ามุมของงานเหวี่ยงปรับขนาด (β) ค่าเวกเตอร์จริง 2 ประเภท ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งจริง (\bar{R}_m) และเวกเตอร์สัมผัสจริง (\hat{T}_m)

ค่ามุมของงานเหวี่ยงปรับขนาดถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง (\bar{R}_e) ค่าเวกเตอร์ตำแหน่งจริง (\bar{R}_m) และเวกเตอร์สัมผัสจริง (\hat{T}_m) ถูกนำไปใช้ในการคำนวณการประมาณค่าความยาวเส้นโค้ง (S) ค่าความยาวเส้นโค้งถูกป้อนเข้าไปในปริภูมิการทำงาน 2 ประเภท ได้แก่ ปริภูมิโครงแบบเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์อ้างอิง 3 ชนิด ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิง (\bar{R}_{ref}) เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิง (\hat{T}_{ref}) และค่าเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิง ($k\hat{N}_{ref}$) และปริภูมิปรับขนาดเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์ระยะปรับขนาดอ้างอิง (\bar{R}_e) กับเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของระยะปรับขนาดอ้างอิง ($k\hat{N}_e$)

ค่าความผิดพลาดในระบบควบคุมแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ($\Delta\bar{R}$) ค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ($\Delta\hat{T}$) และค่าผิดพลาดระยะปรับขนาด ($\Delta\bar{E} = \bar{R}_{ref} - \bar{R}_m$) สามารถทำการชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิโครงแบบดังสมการที่ 4.6 และการชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิปรับขนาดดังสมการที่ 4.7

$$dk\hat{N} = G_1\Delta\bar{R} + G_2\Delta\hat{T} \quad (4.6)$$

$$dk\hat{N}_e = G_3\Delta\bar{E} \quad (4.7)$$

G_1, G_2, G_3 หมายถึง ค่าเกนในการชดเชยค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง และค่าผิดพลาดระยะปรับขนาดตามลำดับ

เมื่อชดเชยค่าผิดพลาดแล้ว ค่าชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิโครงแบบถูกส่งไปชดเชยเปรียบเทียบกับค่าเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิง ($k\hat{N}_{ref}$) ดังสมการที่ 4.8 ค่าชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิปรับขนาดถูกส่งไปชดเชยเปรียบเทียบกับเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของระยะปรับขนาดอ้างอิง ($k\hat{N}_e$) ดังสมการที่ 4.9

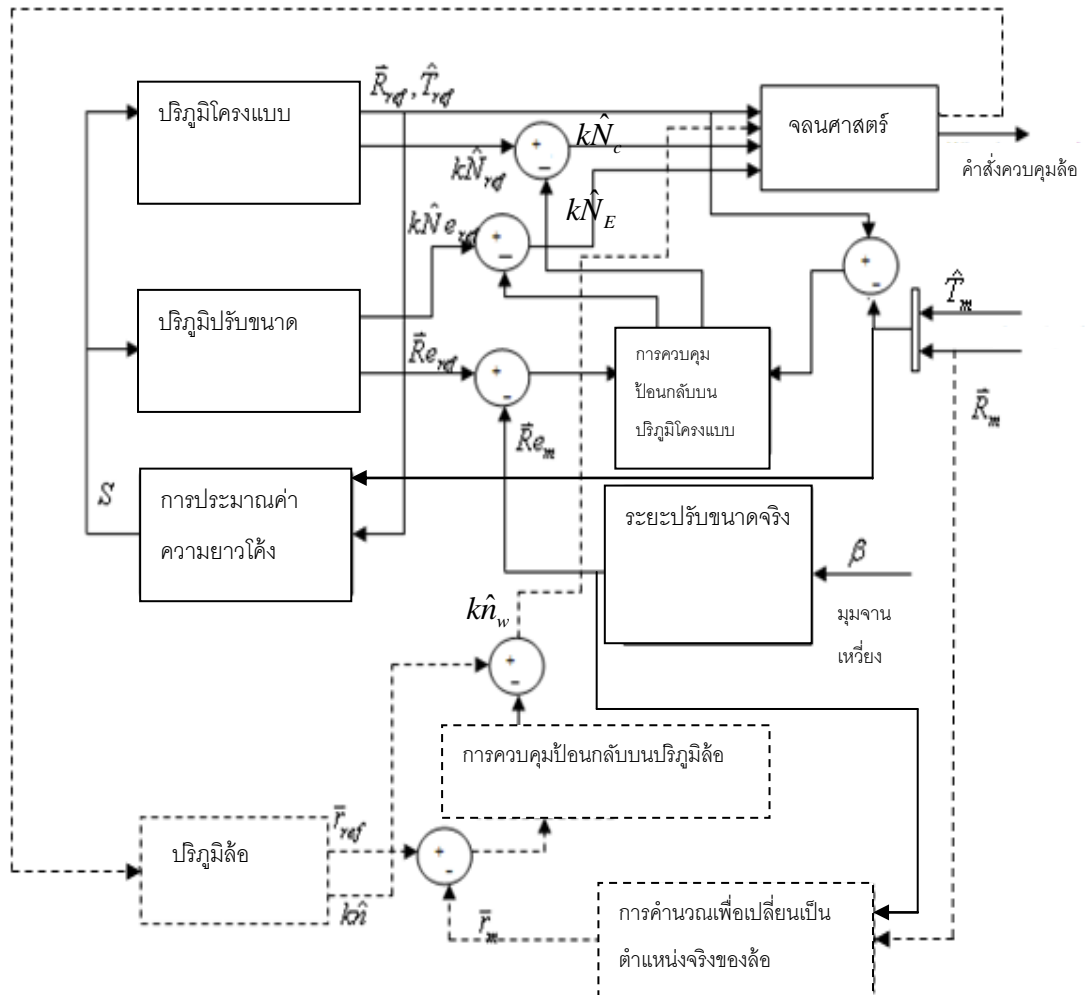
$$k\hat{N}_c = k\hat{N}_{ref} - (G_1\Delta\bar{R} + G_2\Delta\hat{T}) \quad (4.8)$$

$$k\hat{N}_E = k\hat{N}_e - (G_3\Delta\bar{E}) \quad (4.9)$$

แล้วจึงนำมาคำนวณในระบบจลนศาสตร์เพื่อเป็นคำสั่งในการควบคุมความเร็วมุมเลี้ยวของล้อต่อไป

อย่างไรก็ตามเมื่อหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดได้รับคำสั่งให้เคลื่อนที่บนเส้นทาง การเคลื่อนที่อ้างอิง ด้วยรูปแบบในการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดการควบคุมระยะปรับขนาดไปพร้อมๆกันพบว่า ระบบควบคุมที่ใช้ดังรูปที่ 4.5 ไม่สามารถควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดได้ดีพอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาระบบควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยเน้นไปที่ระบบควบคุมป้อนกลับของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

4.3.3 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดที่เพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับ ในปริภูมิล้อ



รูปที่ 4.6 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด: เส้นประแสดงระบบควบคุมป้อนกลับที่เพิ่มเข้าไปบนปริภูมิล้อ

เมื่อหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง ส่วนที่ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางและระยะปรับขนาดคือชีวิตีล้อ การปรับขนาดทำให้การเคลื่อนที่ด้วยความซับซ้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม ทั้งนี้ชีวิตีล้อต้องรับภาระทั้งในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่และกำหนดระยะปรับขนาดไปพร้อมๆกัน

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับบนปริภูมิล้อเพื่อให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถควบคุมการขยายเข้าออกขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่ได้

กำหนดให้

\bar{R}_m	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด
\hat{T}_m	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัสจริงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด
$\bar{R}e_m$	หมายถึง	เวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง
\bar{r}_m	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งจริงของล้อ
\bar{R}_{ref}	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด
\hat{T}_{ref}	หมายถึง	เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด
$k\hat{N}_{ref}$	หมายถึง	เวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด
$\bar{R}e_{ref}$	หมายถึง	เวกเตอร์ระยะปรับขนาดอ้างอิง
$k\hat{N}e_{ref}$	หมายถึง	เวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของระยะปรับขนาดอ้างอิง
\bar{r}_{ref}	หมายถึง	เวกเตอร์ตำแหน่งของล้ออ้างอิง
$k\hat{n}$	หมายถึง	เวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงของล้อ
S	หมายถึง	ค่าความยาวโค้ง
β	หมายถึง	มุมของจานเหวี่ยงปรับขนาด

ขณะที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่ ตัวควบคุมทำการวัดค่ามุมของจานเหวี่ยงปรับขนาด (β) ค่าเวกเตอร์จริง 2 ประเภท ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งจริง (\bar{R}_m) และเวกเตอร์สัมผัสจริง (\hat{T}_m)

ค่ามุมของจานเหวี่ยงปรับขนาดถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง ($\bar{R}e_m$) ค่าเวกเตอร์ตำแหน่งจริง (\bar{R}_m) และเวกเตอร์สัมผัสจริง (\hat{T}_m) ถูกนำไปใช้ในการคำนวณการประมาณค่าความยาวเส้นโค้ง (S) ค่าความยาวเส้นโค้งถูกป้อนเข้าไปในปริภูมิการทำงาน 2 ประเภท ได้แก่ ปริภูมิโครงแบบเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์อ้างอิง 3 ชนิด ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิง (\bar{R}_{ref}) เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิง (\hat{T}_{ref}) และค่าเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิง ($k\hat{N}_{ref}$) และปริภูมิปรับขนาดเพื่อใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์ระยะปรับขนาดอ้างอิง ($\bar{R}e_{ref}$) กับ เวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของระยะปรับขนาดอ้างอิง ($k\hat{N}e_{ref}$)

การเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ ค่าเวกเตอร์ตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โคบอท (\bar{R}_m) ถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์ตำแหน่งจริงของล้อ (\bar{r}_m) ส่วนค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง

อ้างอิงของล้อ (\vec{r}_{ref}) ได้มาจากค่าจลนศาสตร์ ค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของล้อสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 4.10 และสมการที่ 4.11

$$x_i = X + l_i \cos(\theta + \alpha) \quad (4.10)$$

$$y_i = Y + l_i \sin(\theta + \alpha) \quad (4.11)$$

กำหนดให้

x_i	หมายถึง	ตำแหน่งของล้อบนแกน X
y_i	หมายถึง	ตำแหน่งของล้อบนแกน Y
X	หมายถึง	ตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนแกน X
Y	หมายถึง	ตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนแกน Y
l_i	หมายถึง	ระยะปรับขนาด
θ	หมายถึง	มุมวางตัวของหุ่น
α	หมายถึง	มุมของโมดูลล้อวัดเทียบกับโมดูลฐานของหุ่น

ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมแบ่งได้ 4 ประเภท ได้แก่ ค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ($\Delta\bar{R}$) ค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ($\Delta\hat{T}$) และค่าผิดพลาดระยะปรับขนาด ($\Delta\bar{E} = \bar{R}_{ref} - \bar{R}_m$) และค่าผิดพลาดตำแหน่งของล้อ ($\Delta\vec{r}_{err} = \vec{r}_{ref} - \vec{r}_m$) สามารถทำการชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิโครงแบบตั้งสมการที่ 4.12 การชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิปรับขนาดตั้งสมการที่ 4.13 และการชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิล้อตั้งสมการที่ 4.14

$$dk\hat{N} = G_1\Delta\bar{R} + G_2\Delta\hat{T} \quad (4.12)$$

$$dk\hat{N}_E = G_3\Delta\bar{E} \quad (4.13)$$

$$dk\hat{n}_w = G_4\Delta\vec{r} \quad (4.14)$$

G_1, G_2, G_3, G_4 หมายถึง ค่าเกนในการชดเชยค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ค่าผิดพลาดระยะปรับขนาด และค่าผิดพลาดตำแหน่งของล้อ ตามลำดับ

เมื่อชดเชยค่าผิดพลาดแล้ว ค่าชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิโครงแบบถูกส่งไปชดเชยเปรียบเทียบกับค่าเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงในปริภูมิโครงแบบ ($k\hat{N}_{ref}$) ตั้งสมการที่ 4.15 ค่าชดเชยค่าผิดพลาดในปริภูมิปรับขนาดถูกส่งไปชดเชยเปรียบเทียบกับเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของระยะปรับขนาดอ้างอิง ($k\hat{N}_{e_{ref}}$) ตั้งสมการที่ 4.16 และค่าชดเชยค่าผิดพลาดตำแหน่งของล้อถูกส่งไปชดเชยเปรียบเทียบกับเวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงในปริภูมิล้อ ($k\hat{n}$) ตั้งสมการที่ 4.17

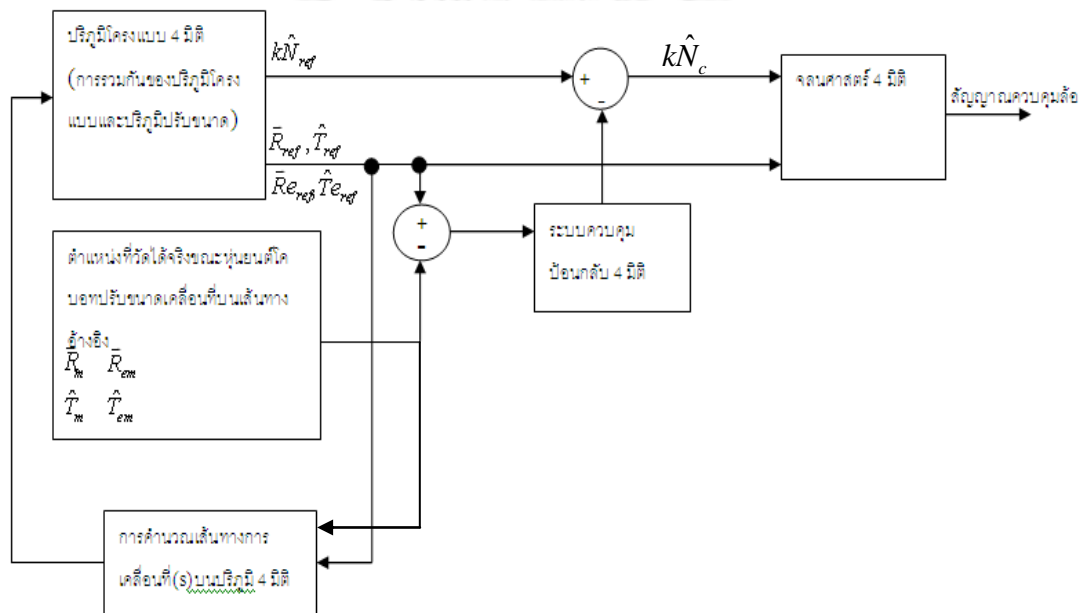
$$k\hat{N}_c = k\hat{N}_{ref} - (G_1\Delta\bar{R} + G_2\Delta\hat{T}) \quad (4.15)$$

$$k\hat{N}_E = k\hat{N}_{e_{ref}} - (G_3\Delta\bar{E}) \quad (4.16)$$

$$k\hat{n}_w = k\hat{n} - (G_4\Delta\bar{r}_{err}) \quad (4.17)$$

แล้วจึงนำมาคำนวณในระบบจลนศาสตร์เพื่อเป็นคำสั่งในการควบคุมความเร็วมุมเฉลี่ยของล้อต่อไป การเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับบนปริภูมิล้อยยังแสดงให้เห็นถึงข้อเสียเปรียบบางประการ คือการกำหนดค่าเกณฑ์เพื่อชดเชยความผิดพลาดให้กับระบบควบคุมป้อนกลับทั้งระบบ โดยต้องทำการกำหนดทั้งบนปริภูมิโครงแบบ ปริภูมิปรับขนาด รวมไปถึงปริภูมิล้อย ทำให้มีความไม่สะดวกอย่างมากผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดในการนำปริภูมิโครงแบบและปริภูมิขนาดมารวมกัน

4.4 การพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ



รูปที่ 4.7 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิสี่มิติ

จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดแบบที่ผ่านมามีการแยกปริภูมิโครงแบบ (Configuration space) ซึ่งจัดเป็นปริภูมิ 3 มิติ (x, y, θ) กับปริภูมิปรับขนาด (Expansion space) ซึ่งเป็นปริภูมิ 2 มิติ (l, α) โดยในปริภูมิปรับขนาดค่า α เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ตลอดการเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง คือไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรค่าความยาวของการเคลื่อนที่ จึงสามารถนำหลักการของสมการเส้นโค้งบนปริภูมิ 4 มิติ (Öztürk et al., 2008; O'Neill, 1969; Yew) มาประยุกต์ใช้ได้

เพื่อทำการรวมทั้งสองปริภูมิการทำงานนี้เข้าด้วยกัน งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการทางคณิตศาสตร์ของปริภูมิ 4 มิติ (4-Dimensional space) มาทำการประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

กำหนดให้

\bar{R}_m หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

$\bar{R}e_m$ หมายถึง เวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง

\hat{T}_m หมายถึง เวกเตอร์สัมพัทธ์จริงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

\hat{T}_{em} หมายถึง เวกเตอร์อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะปรับขนาดจริง

\bar{R}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

\hat{T}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์สัมพัทธ์อ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

$k\hat{N}_{ref}$ หมายถึง เวกเตอร์ความโค้งอ้างอิงของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

$\bar{R}e_{ref}$ หมายถึง เวกเตอร์ระยะปรับขนาดอ้างอิง

\hat{T}_{ref} หมายถึง เวกเตอร์อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะปรับขนาดอ้างอิง

ขณะที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่อยู่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง ตัวควบคุมทำการวัดค่ามุมของงานเหยียงปรับขนาด (β) ค่าเวกเตอร์จริง 2 ประเภท ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งจริง (\bar{R}_m) และเวกเตอร์สัมพัทธ์จริง (\hat{T}_m)

ค่ามุมของงานเหยียงปรับขนาดถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าเวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง ($\bar{R}e_m$) และค่าเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะปรับขนาดจริง (\hat{T}_{em})

การนำเวกเตอร์มารวมกันเพื่อให้จัดให้เป็นปริภูมิ 4 มิติสามารถจัดเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เวกเตอร์ตำแหน่งจริงถูกนำมารวมกับเวกเตอร์ระยะปรับขนาดจริง และเวกเตอร์สัมพัทธ์จริงถูกนำมารวมกับเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะปรับขนาดจริง เวกเตอร์ที่จัดกลุ่มแล้วทั้ง 2 กลุ่มนำไปใช้เพื่อคำนวณการประมาณค่าความยาวเส้นโค้ง (S) ค่าความยาวเส้นโค้งถูกป้อนเข้าไปในปริภูมิการทำงานเพื่อคำนวณค่าเวกเตอร์อ้างอิงในปริภูมิ 4 มิติ

ค่าความผิดพลาดในระบบควบคุมแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ($\Delta\bar{R}$) และค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง ($\Delta\hat{T}$) ค่าผิดพลาดทั้งสองประเภทนี้จะถูกชดเชยในการควบคุมป้อนกลับ ดังสมการที่ 4.18

$$dk\hat{N} = G_1\Delta\bar{R} + G_2\Delta\hat{T} \quad (4.18)$$

G_1 หมายถึง ค่าเกนชดเชยค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง

G_2 หมายถึง ค่าเกณฑ์เซยค่าผิดพลาดเชิงทิศทาง

เมื่อเซยค่าผิดพลาดแล้วค่าเซยค่าผิดพลาดถูกส่งไปเซยเปรียบเทียบกับค่า
เวกเตอร์ความโค้งอ้างอิง ($k\hat{N}_{ref}$) ดังสมการที่ 4.19

$$k\hat{N}_c = k\hat{N}_{ref} - (G_1\Delta\bar{R} + G_2\Delta\hat{T}) \quad (4.19)$$

แล้วจึงนำมาคำนวณในระบบจลนศาสตร์เพื่อเป็นคำสั่งในการควบคุมความเร็วมุมเลี้ยวของล้อต่อไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5

การจำลองการพัฒนาการควบคุม และ ผลการทดสอบจริงของการพัฒนาการควบคุม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างการจำลองในคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการพัฒนาการควบคุมโดยแบ่งเป็นสองประเภทคือ การจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ และการจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ

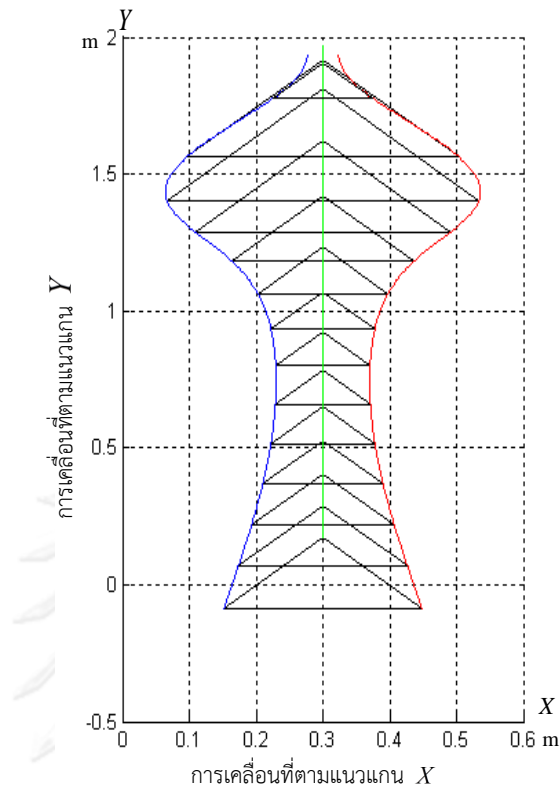
หลังจากทำการจำลองในคอมพิวเตอร์เสร็จสิ้นแล้ว จึงทำการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด โดยแบ่งการทดสอบจริงออกเป็นสองประเภทเช่นกัน คือ การทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ และการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ

5.1 การจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

5.1.1 การจำลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ

การจำลองที่ 1 ทำการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเป็นเส้นทางตรง $X = 0.3$ m. กำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปตามแนวแกน Y โดยการกำหนดเวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิง เวกเตอร์สัมผัสอ้างอิงและเวกเตอร์ส่วนกลับของรัศมีอ้างอิง $(\bar{R}_{ref}, \hat{T}_{ref}, k\hat{N}_{ref})$ ในปริภูมิโครงแบบดังสมการที่ 5.1 และในขณะที่เคลื่อนที่ตามเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงนั้น ได้ทำการกำหนดให้ปรับขนาดตามฟังก์ชันการปรับขนาดโดยฟังก์ชันการปรับขนาดเป็นฟังก์ชันของเส้นทางการเคลื่อนที่ $S: \beta(s) = e^s \cos(c_{freq}s)$ ผลการจำลองดังรูปที่ 5.1 แกน x แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y

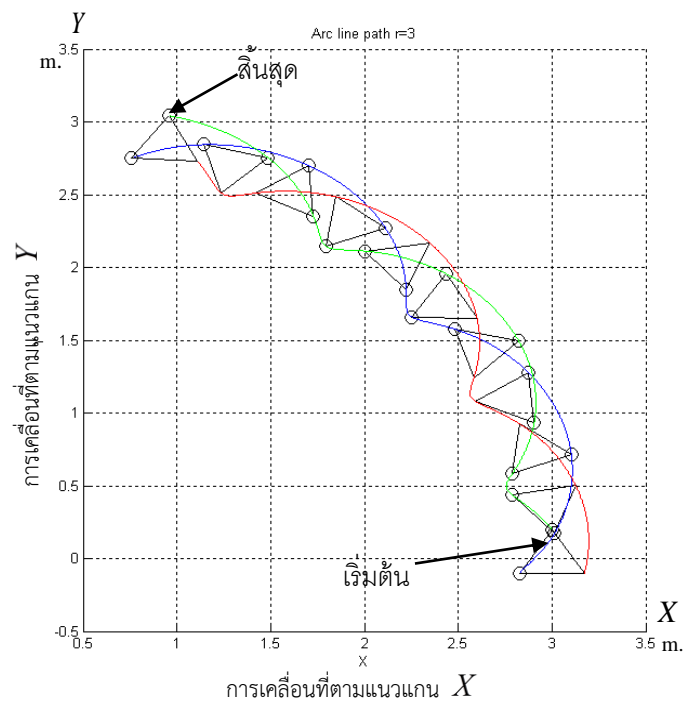
$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 0.300 \\ s \\ 0.000 \end{bmatrix}, \hat{T} = \begin{bmatrix} 0.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{bmatrix}, k\hat{N} = \begin{bmatrix} 0.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดทำการปรับขนาดบนเส้นทางการเคลื่อนที่เส้นตรง

การจำลองที่ 2 กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงให้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นโดยการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงให้เป็นเส้นโค้งที่มีรัศมี 0.3 m. โดยค่าเวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงดังสมการที่ 5.2 และกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดรักษาระยะการปรับขนาดตลอดการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 5.2 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} 3 \cos(0.1s) \\ 3 \sin(0.1s) \\ 0.1s \end{bmatrix}, \vec{T} = \begin{bmatrix} -0.3 \sin(0.1s) \\ 0.3 \cos(0.1s) \\ 0.1 \end{bmatrix}, k\hat{N} = \begin{bmatrix} -0.03 \cos(0.1s) \\ -0.03 \sin(0.1s) \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดรักษาระยะปรับขนาด บนเส้นทางการเคลื่อนที่เส้นโค้ง

5.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

5.2.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ

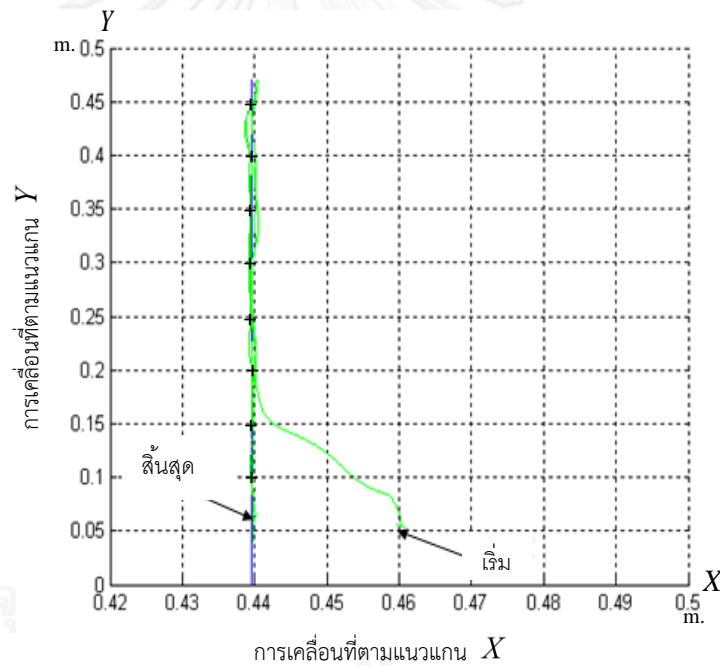
จุดประสงค์ในการทดสอบจริงเพื่อทดสอบระบบทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด และเพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพของระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อที่ใช้กับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

5.2.1.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง

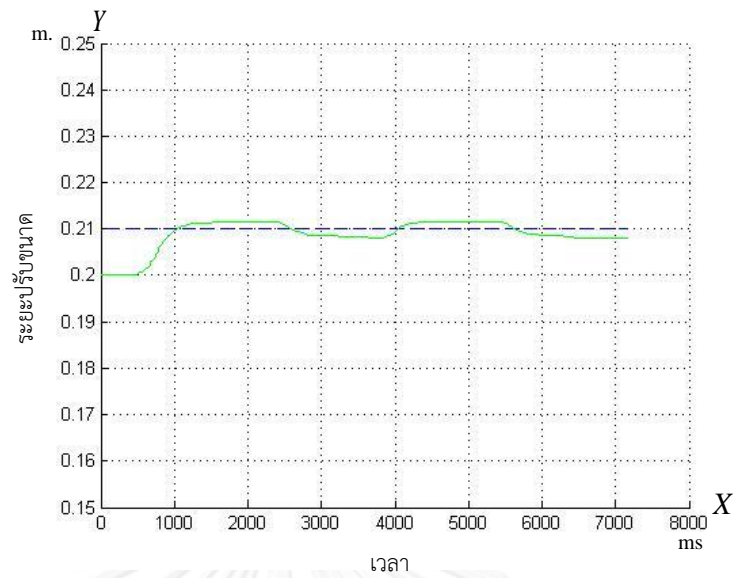
กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเป็นเส้นตรงดังสมการที่ (5.3) และกำหนดให้ระยะปรับขนาดอ้างอิงมีค่าเป็น 0.21m. โดยหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเริ่มต้นที่พิกัด (0.46, 0.05, 0.0) และระยะปรับขนาดเริ่มต้นมีค่าเป็น 0.20m.

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 0.439 \\ s \\ 0.000 \end{bmatrix}, \hat{T} = \begin{bmatrix} 0.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{bmatrix}, k\hat{N} = \begin{bmatrix} 0.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

ณ พิกัดเริ่มต้น ทำการผลักหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงผลการทดลอง ดังรูป 5.3 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีทิศทางเข้าสู่เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงโดยอัตโนมัติ พร้อมกันนั้นหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดทำการปรับขนาดจากระยะปรับขนาดเริ่มต้นไปสู่ระยะปรับขนาดอ้างอิง และรักษา ระยะปรับขนาดอ้างอิงขณะปฏิบัติงานดังรูป 5.4 แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดง ระยะปรับขนาด

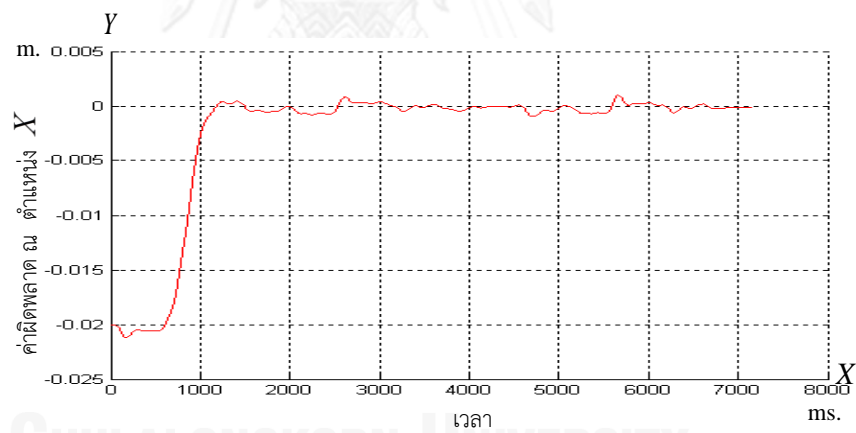


รูปที่ 5.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรง
เส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง

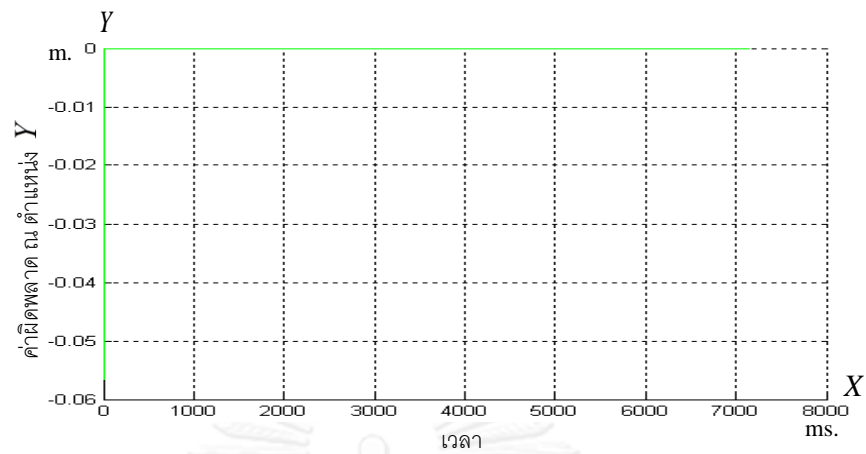


รูปที่ 5.4 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรง เส้นประแสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง

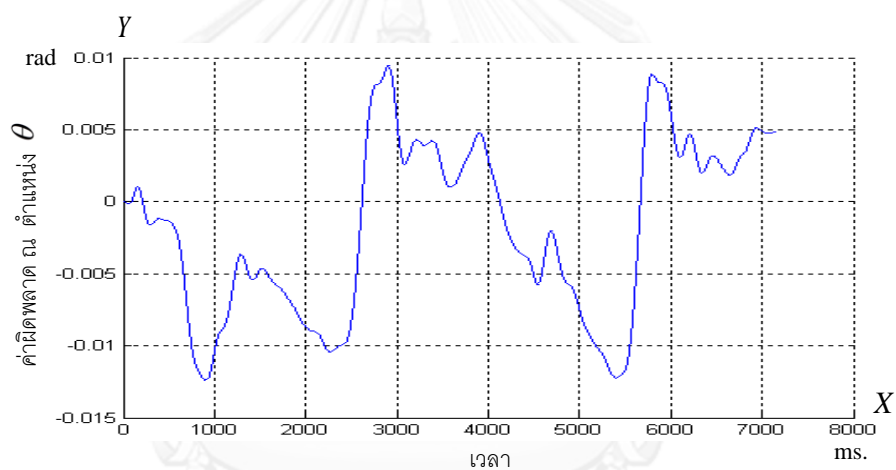
รูปที่ 5.5a, 5.5b, 5.5c แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X, Y, θ ตามลำดับ



(a) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X



(b) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y



(c) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

รูปที่ 5.5 : (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

5.2.1.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิสลับบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง

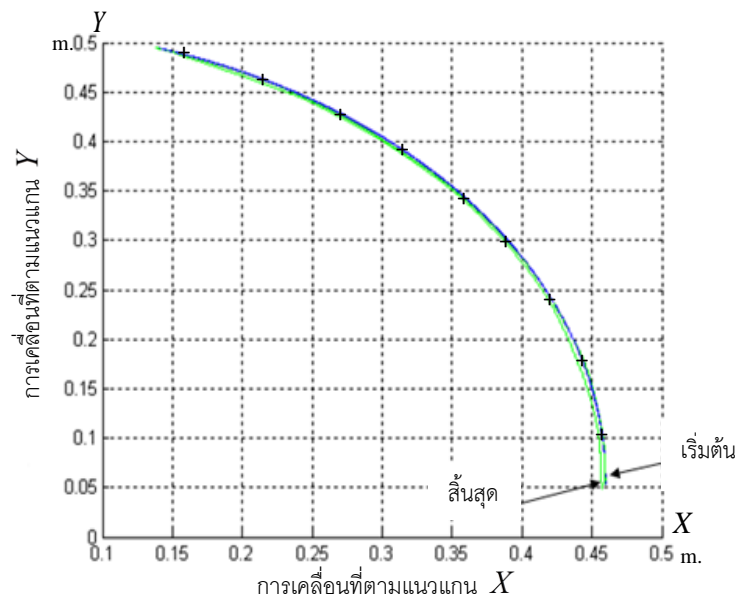
การทดสอบรูปแบบเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง กำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเป็นเส้นโค้งเกลียววนขึ้น (Kreyzig, 1988) โดยกำหนดตามสมการที่ (5.4)

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} a \cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ a \sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ c\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \end{bmatrix}, \hat{T} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \end{bmatrix}, k\hat{N} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{a^2 + c^2} \sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ \frac{a}{a^2 + c^2} \cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2 + c^2}}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

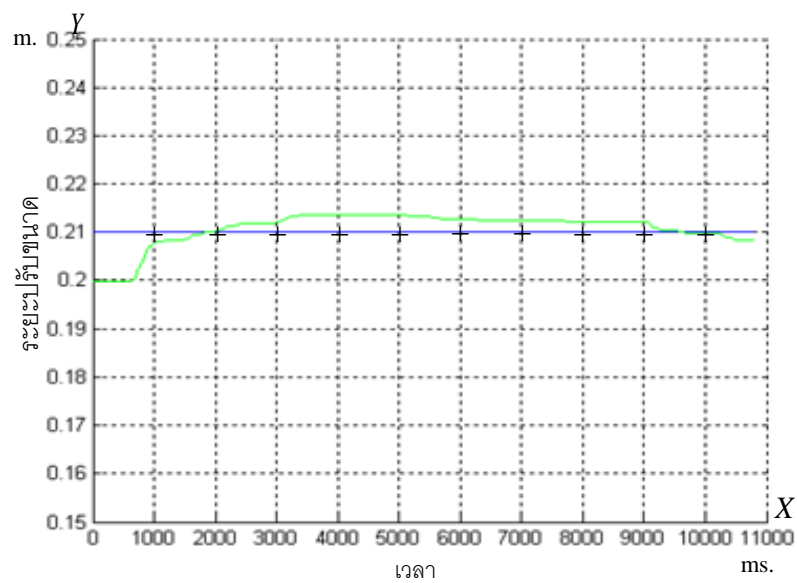
กำหนดให้

- a หมายถึง ค่ารัดศิมิของเกลียว
- c หมายถึง จำนวนการวนรอบของเกลียว

ในการทดสอบจริงค่า c คือค่าที่กำหนดการหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด กำหนดให้ค่า $a = 0.46$ m. , $c = 1.5$ ระยะปรับขนาดอ้างอิงมีค่าเป็น 0.21m. หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเริ่มต้นที่พิกัด (0.46, 0.05, 0) มีระยะปรับขนาดเริ่มต้น 0.20m. การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้งแสดงดังรูปที่ 5.6 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และการปรับขนาดตามระยะปรับขนาดอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 5.7 แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงระยะปรับขนาด

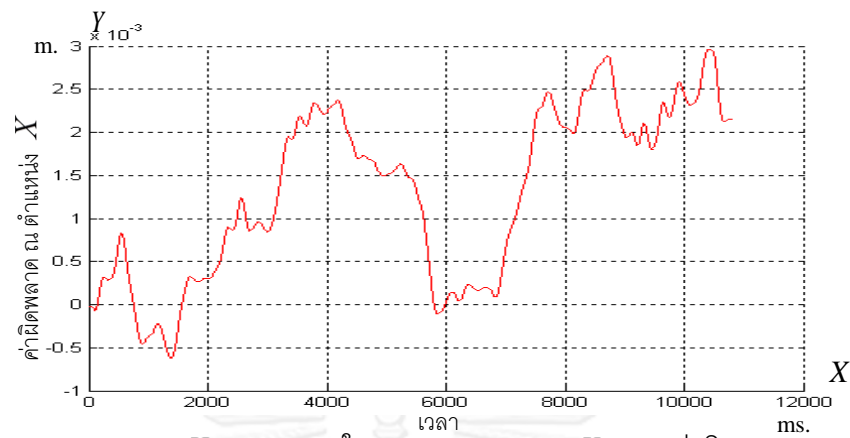


รูปที่ 5.6 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงโค้ง
เส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง

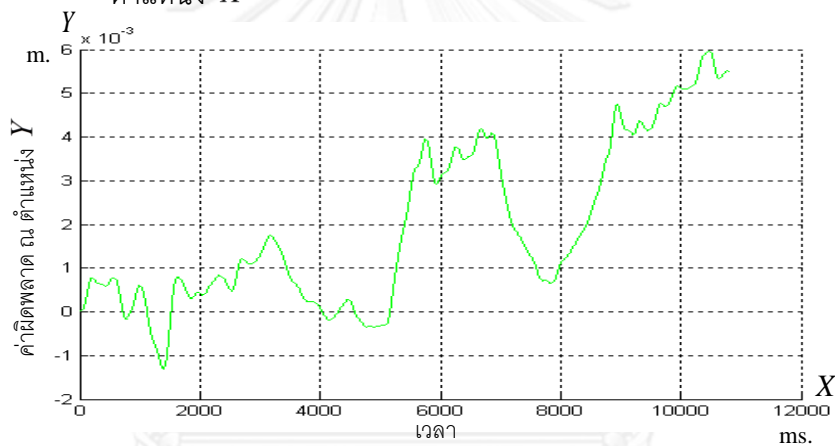


รูปที่ 5.7 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้ง เส้น '+' แสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง
เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง

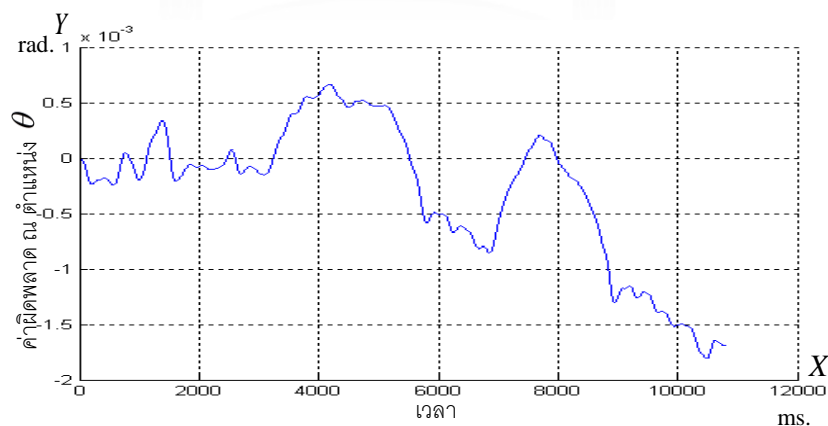
รูปที่ 5.8a, 5.8b, 5.8c แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X, Y, θ ตามลำดับ



(a) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X



(b) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y



(c) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

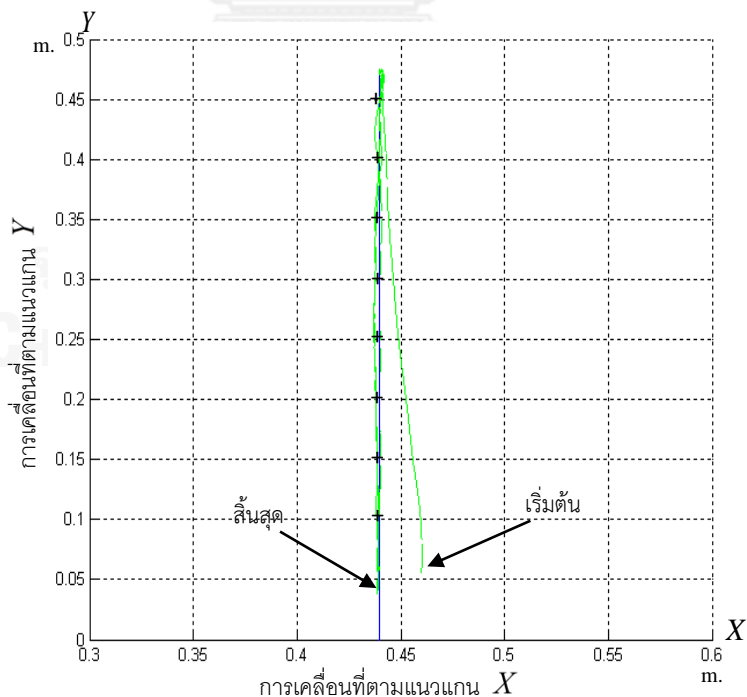
รูปที่ 5.8: (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

5.2.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อด้วยการใช้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดไม่คงที่

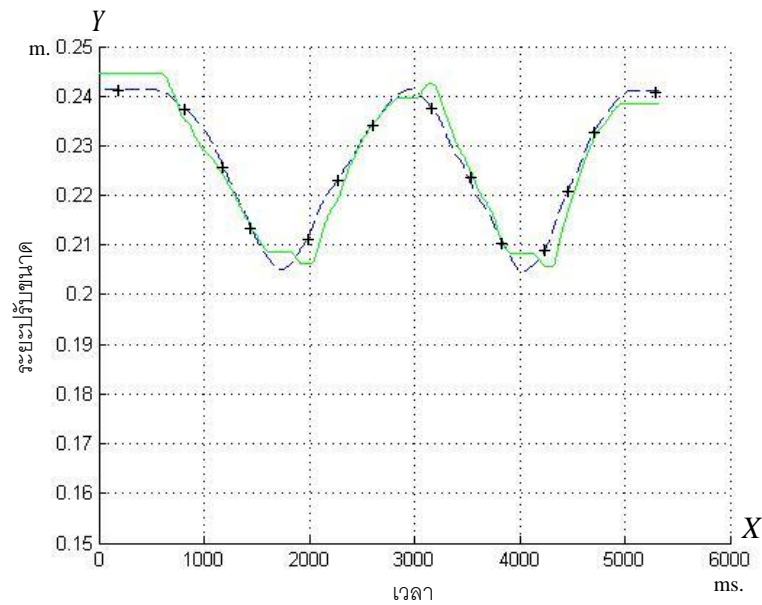
เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมมากยิ่งขึ้น จึงได้ทำการเพิ่มเงื่อนไขของการปรับขนาดขณะที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่อยู่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง ด้วยการให้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดแบบเอกซ์โปเนนเชียลโคไซน์ : $\beta(s) = \frac{e^s \cos(c_{freq}s)}{2}$ โดยการทดสอบเป็นสองประเภทคือ เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง และเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง

5.2.2.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อด้วยการใช้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดไม่คงที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง

สำหรับการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง ทำการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงดังสมการที่ 5.5 ระยะปรับขนาดเริ่มต้นของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดคือ 0.24 m. และหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเริ่มต้นที่พิกัด (0.46, 0.05, 0.0) ผลการทดสอบ หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรงแสดงในรูปที่ 5.9 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรงแสดงในรูปที่ 5.10 แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงระยะปรับขนาด

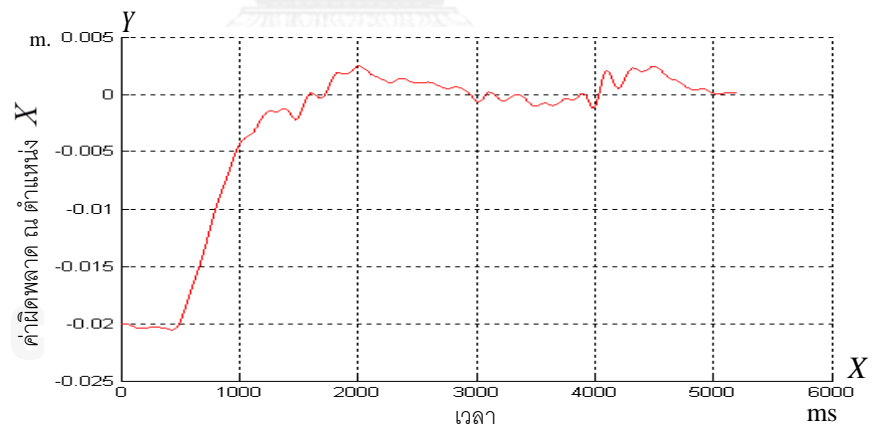


รูปที่ 5.9 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรง
เส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง

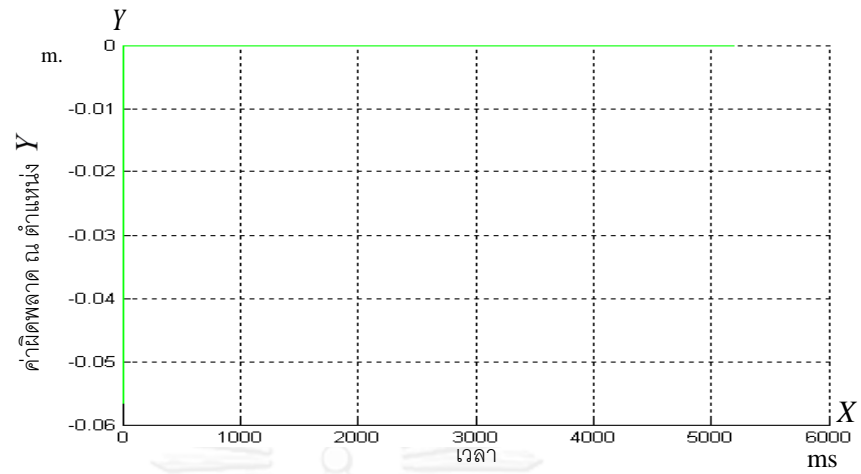


รูปที่ 5.10 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรง เส้นประแสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง

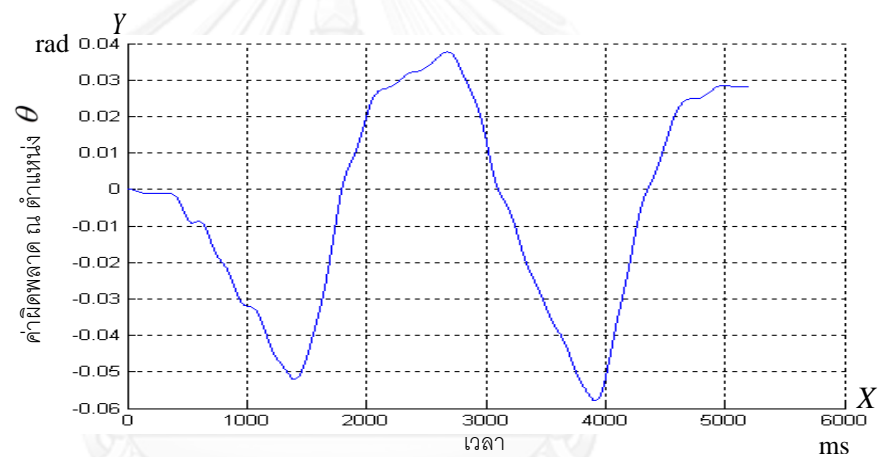
รูปที่ 5.11a, 5.11b, 5.11c แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X, Y, θ ตามลำดับ



(a) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X



(b) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y

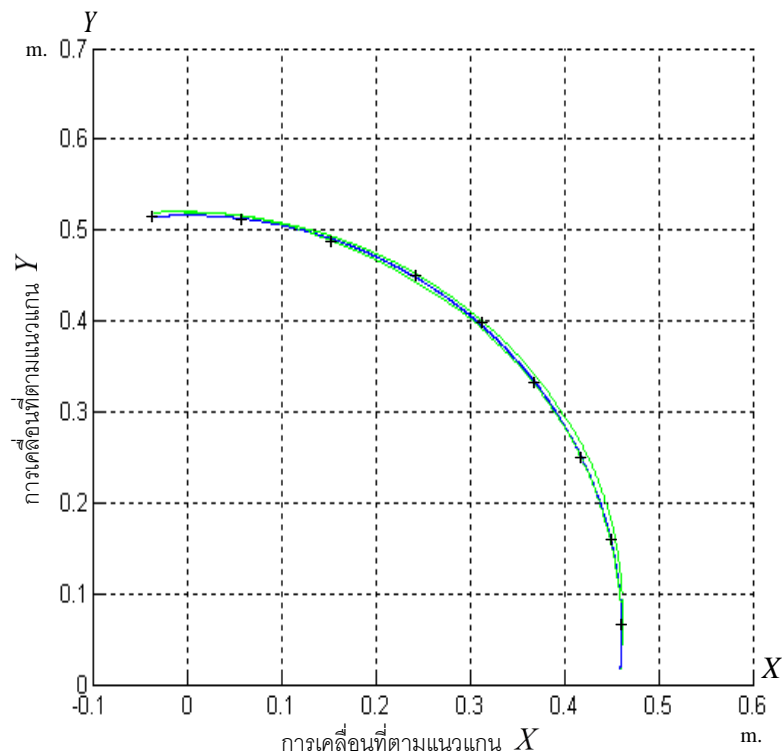


(c) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

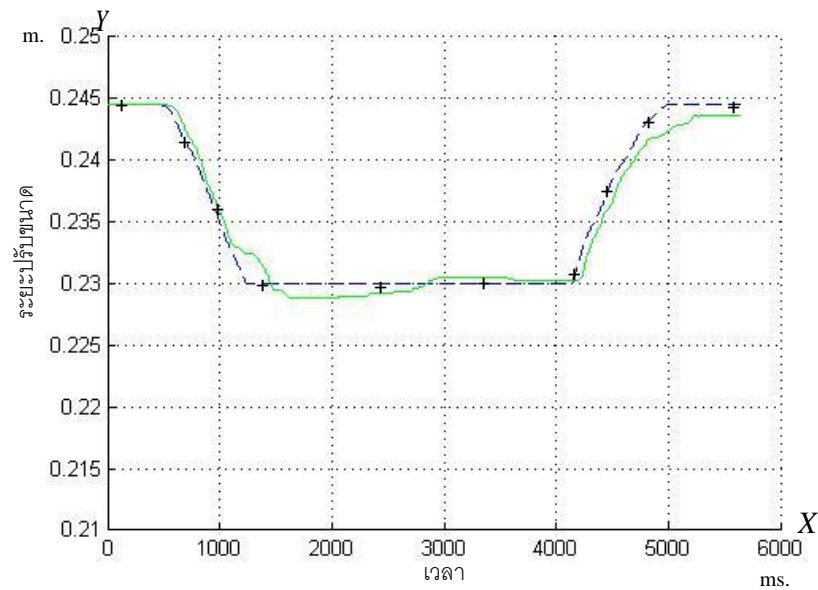
รูปที่ 5.11 : (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

5.2.2.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อด้วยการใช้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดไม่คงที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง

ในการทดสอบนี้ ได้เปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเป็นแบบเส้นโค้งเกลียววนขึ้นดังสมการที่ 5.4 กำหนดค่า $a = 0.46$ m. และค่า $c = 0$ ซึ่งหมายความว่าหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดไม่มีการหมุนรอบตัวเอง และกำหนดระยะปรับขนาดเริ่มต้นที่ 0.24 m. หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเริ่มต้นที่พิกัด (0.46, 0.05, 0.0) หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงโค้งแสดงดังรูปที่ 5.12 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้งแสดงดังรูปที่ 5.13 แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงระยะปรับขนาด

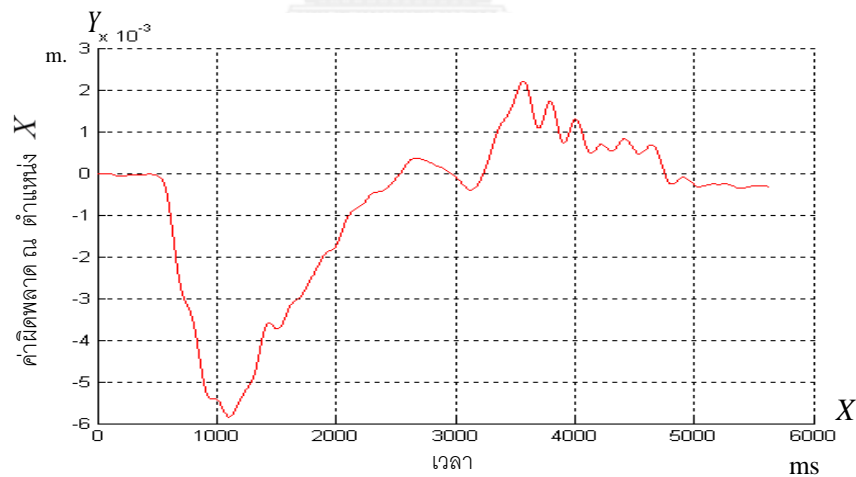


รูปที่ 5.12 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงโค้ง
เส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง

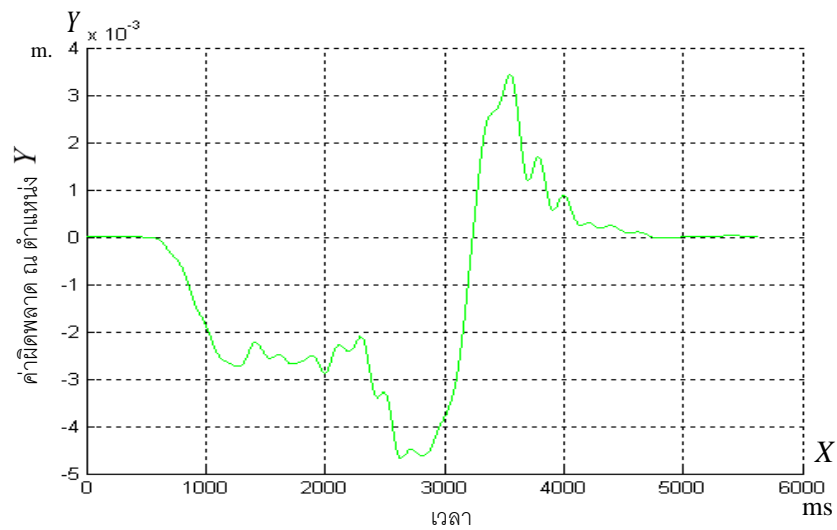


รูปที่ 5.13 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้ง เส้นประแสดงระยะปรับขนาดอ้างอิง เส้นทึบแสดงระยะปรับขนาดจริง

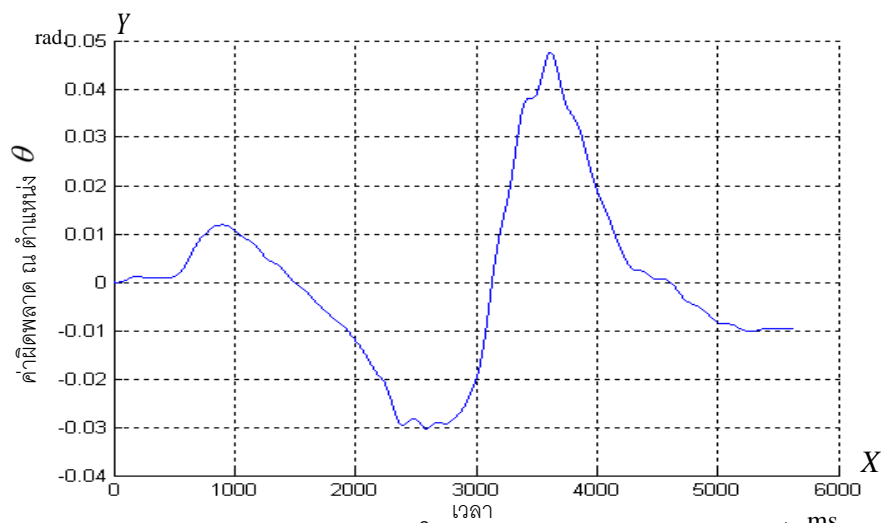
รูปที่ 5.14a, 5.14b, 5.14c แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X, Y, θ ตามลำดับ



(a) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X



(b) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y



(c) แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

รูปที่ 5.14 : (a) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง X , (b) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง Y
(c) ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

5.3 การจำลองการพัฒนาคอมพิวเตอร์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ

จากการนำหลักการทางคณิตศาสตร์ปริภูมิ 4 มิติ มาประยุกต์ใช้ในการรวมปริภูมิโครงแบบ และปริภูมิปรับขนาดเข้าด้วยกัน แล้วจึงทำการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ โดยการใช้รูปแบบสมการที่ 5.5 (Öztürk et al., 2008) โดยเป็นฟังก์ชันของค่าความยาวของเส้นทาง (s)

$$\psi(s) = \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \left(\frac{r_1}{m_1} \sin(m_1 s), -\frac{r_1}{m_1} \cos(m_1 s), \frac{r_2}{m_2} \sin(m_2 s), -\frac{r_2}{m_2} \cos(m_2 s) \right) \quad (5.5)$$

ค่า r_1, r_2, m_1, m_2 เป็นค่าคงที่โดยถูกกำหนดอยู่ในเงื่อนไข $r_1^2 m_2^2 + r_2^2 m_1^2 = m_1^2 m_2^2 (r_1^2 + r_2^2)$ ซึ่งทำให้ค่าเวกเตอร์อ้างอิงในปริภูมิโครงแบบอยู่ในรูปแบบสมการที่ 5.6, 5.7, 5.8

เวกเตอร์ตำแหน่งอ้างอิง

$$\bar{R}(s) = \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \begin{bmatrix} \frac{r_1}{m_1} \sin(m_1 s) \\ -\frac{r_1}{m_1} \cos(m_1 s) \\ \frac{r_2}{m_2} \sin(m_2 s) \\ -\frac{r_2}{m_2} \cos(m_2 s) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

เวกเตอร์สัมผัสโค้งอ้างอิง

$$\hat{T}(s) = \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \begin{bmatrix} r_1 \cos(m_1 s) \\ r_1 \sin(m_1 s) \\ r_2 \cos(m_2 s) \\ r_2 \sin(m_2 s) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

เวกเตอร์ส่วนกลับของรัศมีอ้างอิง

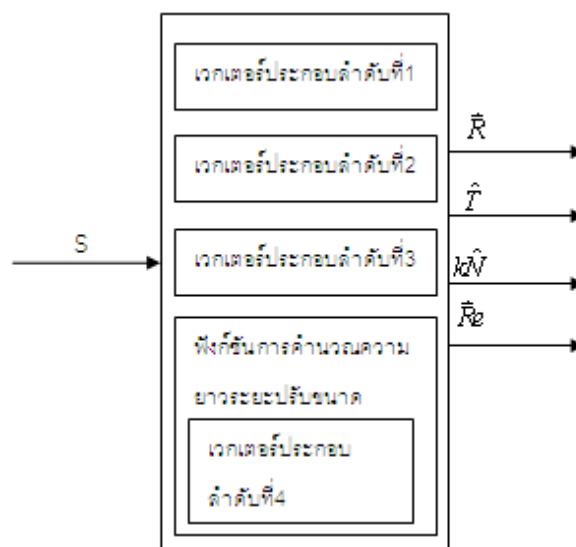
$$k\hat{N}(s) = \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \begin{bmatrix} -r_1 m_1 \sin(m_1 s) \\ r_1 m_1 \cos(m_1 s) \\ -r_2 m_2 \sin(m_2 s) \\ r_2 m_2 \cos(m_2 s) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\text{กำหนดให้ } r_1 = 2, r_2 = 2, m_1 = 2, m = \frac{2}{\sqrt{7}}$$

ได้ค่าเวกเตอร์อ้างอิงในปริภูมิโครบแบบดังสมการที่ 5.9

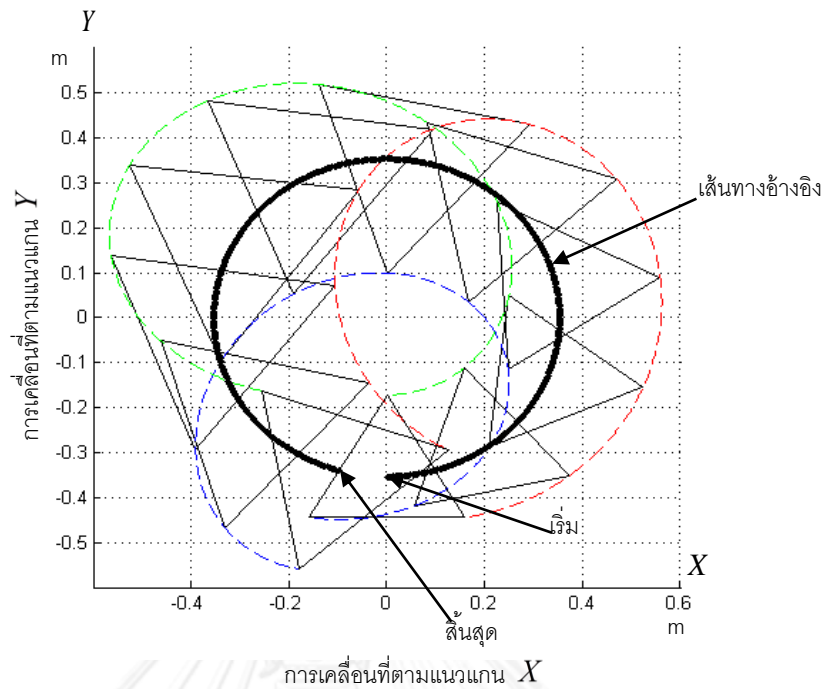
$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\sqrt{2}} \sin(2s) \\ -\frac{1}{2\sqrt{2}} \cos(2s) \\ \frac{\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} \sin\left(\frac{2}{\sqrt{7}}s\right) \\ -\frac{\sqrt{7}}{2\sqrt{2}} \cos\left(\frac{2}{\sqrt{7}}s\right) \end{bmatrix}, \hat{T} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(2s) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(2s) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{2}{\sqrt{7}}s\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{2}{\sqrt{7}}s\right) \end{bmatrix}, k\hat{N} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{\sqrt{2}} \sin(2s) \\ \frac{2}{\sqrt{2}} \cos(2s) \\ -\frac{2}{\sqrt{14}} \sin\left(\frac{2}{\sqrt{7}}s\right) \\ \frac{2}{\sqrt{14}} \cos\left(\frac{2}{\sqrt{7}}s\right) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

ในการคำนวณระยะปรับขนาดในปริภูมิ 4 มิติต้องนำสมการการที่ 3.1 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณคำนวณระยะปรับขนาดมาใช้ทำการคำนวณ โดยกำหนดให้เวกเตอร์ประกอบลำดับที่ 4 ในปริภูมิ 4 มิติเป็นค่าที่กำหนดฟังก์ชันระยะปรับขนาด แสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 การใช้เวกเตอร์ประกอบลำดับที่ 4 กำหนดฟังก์ชันระยะปรับขนาด

ผลของการใช้สมการที่ 5.9 ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.16 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y

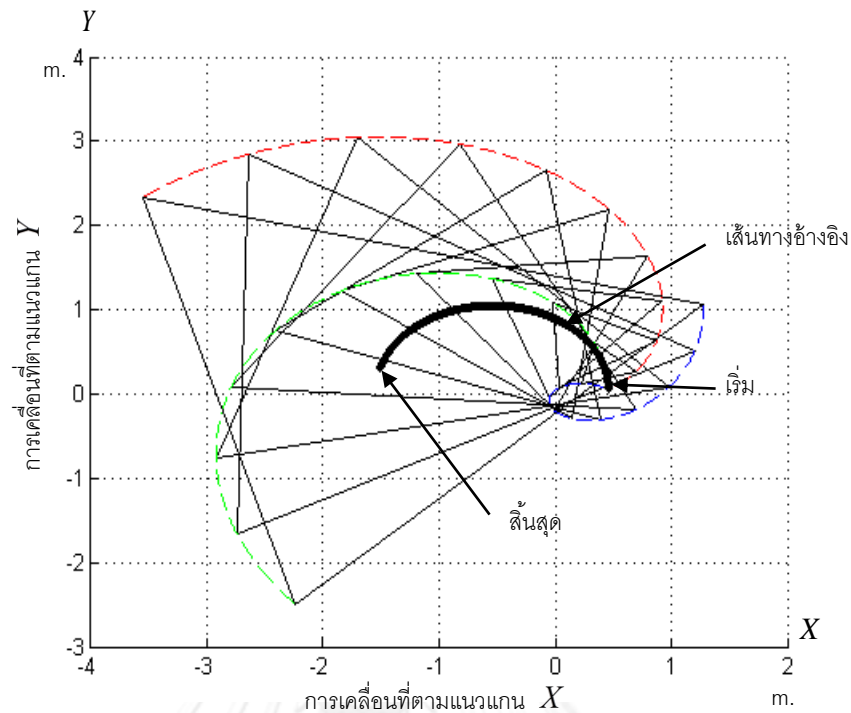


รูปที่ 5.16 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนปริภูมิ 4 มิติตามสมการที่ 5.9
เส้นทึบแสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นประแสดงการจำลองการเคลื่อนที่

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีโครงสร้างแขนวัดตำแหน่งและกลไกบังคับการปรับขนาดที่มีความยาวจำกัด ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีขอบเขตที่กว้างมากนัก ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงและรูปแบบการปรับขนาด ต้องได้รับการกำหนดโดยให้ความซับซ้อนที่ไม่มากเกินไป ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้สมการ 4 มิติเส้นโค้งควอดเทอร์นารีโอนิกเบอร์แทรนด์ (Gök et al., 2013) มาใช้ในการจำลองดังสมการที่ 5.10

$$\bar{R}(s) = \begin{bmatrix} \cos \frac{s}{\sqrt{3}} \\ \sin \frac{s}{\sqrt{3}} \\ \frac{s}{\sqrt{3}} \\ \frac{s}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}, \hat{T}(s) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{s}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \frac{s}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}, k\hat{N}(s) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} \cos \frac{s}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{s}{\sqrt{3}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.17 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y



รูปที่ 5.17 ผลการจำลองหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนปริภูมิ 4 มิติตามสมการที่ 5.10
เส้นทึบแสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นประแสดงการจำลองการเคลื่อนที่

รูปที่ 5.17 แสดงผลของการจำลองที่เห็นได้ว่า ระยะปรับขนาดในการจำลองเมื่อเวลาผ่านไปมีการปรับขนาดที่เกินขอบเขตจากระยะปรับขนาดที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถปฏิบัติได้ ในการทดสอบจริงจึงต้องมีการกำหนดระยะการปรับขนาดให้มีความสอดคล้องกับขอบเขตของการปรับขนาดที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

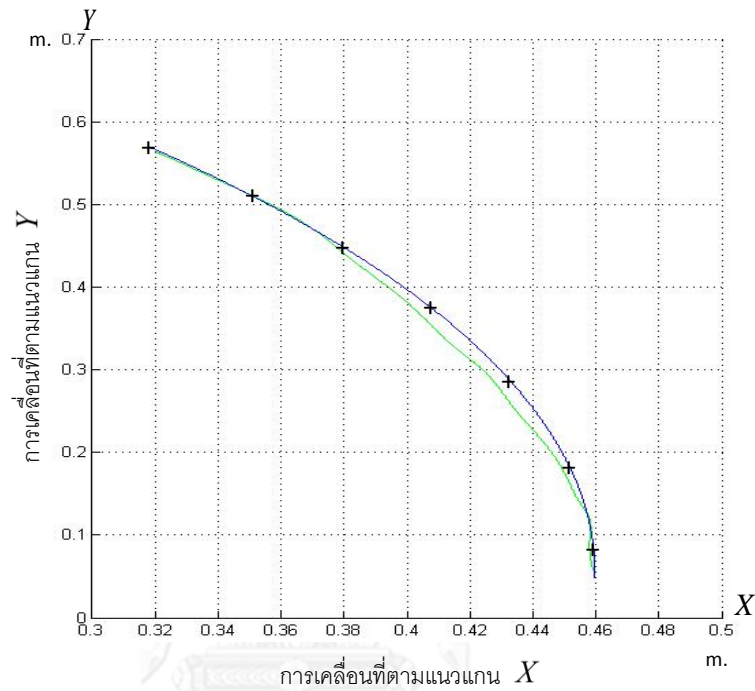
5.4 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ

5.4.1 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้ง

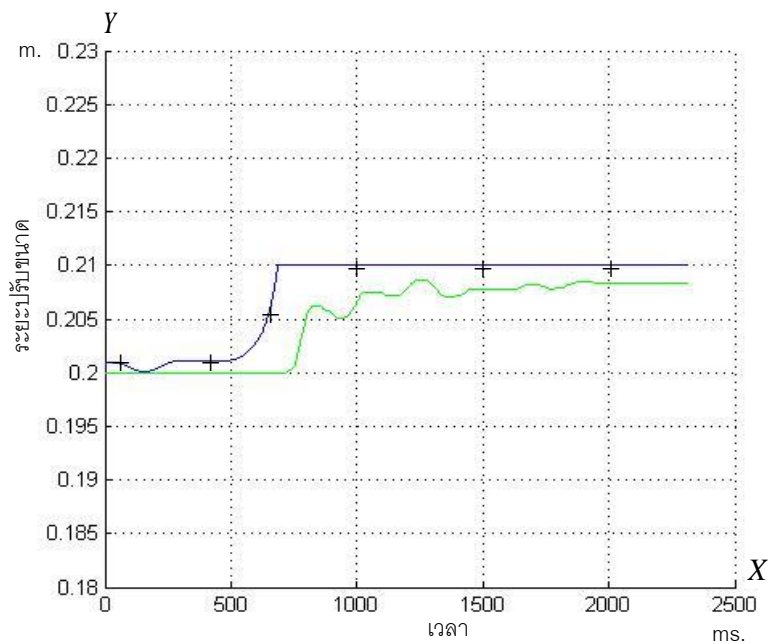
การทดสอบจริงบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นโค้งกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด นำเวกเตอร์บนปริภูมิ 4 มิติที่เป็นฟังก์ชันของความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 5.10 มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงโค้ง

กำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเริ่มต้นที่พิกัด (0.46, 0.05, 0.0) ระยะปรับขนาดเริ่มต้นคือ 0.2 m. เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงดังสมการที่ 5.10 และ ระยะปรับขนาดอ้างอิงคือ

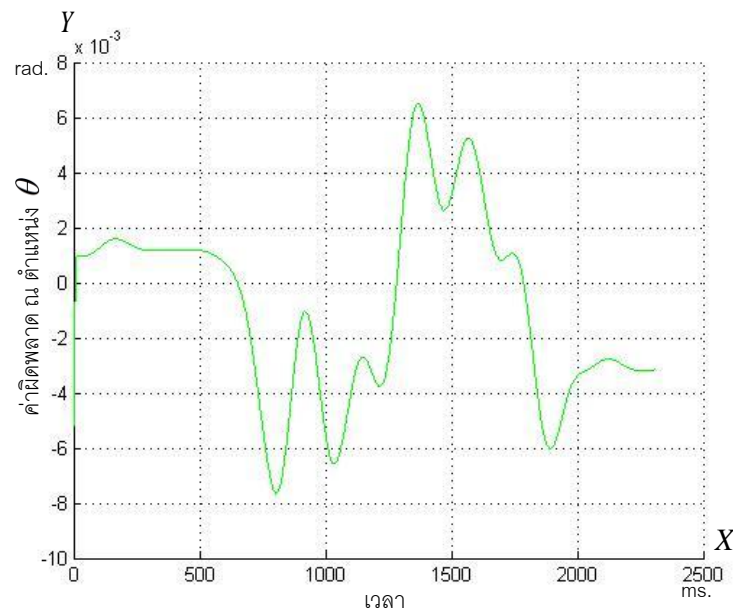
0.21 m. ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนเส้นทางเคลื่อนที่อ้างอิงโค้ง แสดงดังรูปที่ 5.18 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และระยะปรับขนาดบนเส้นทางเคลื่อนที่อ้างอิงโค้งแสดงดังรูปที่ 5.19 แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงระยะปรับขนาด รูปที่ 5.20 แสดงค่าผิดพลาดที่ตำแหน่ง θ



รูปที่ 5.18 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงโค้ง
เส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง



รูปที่ 5.19 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงโค้ง เส้น '+' แสดง
เส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง



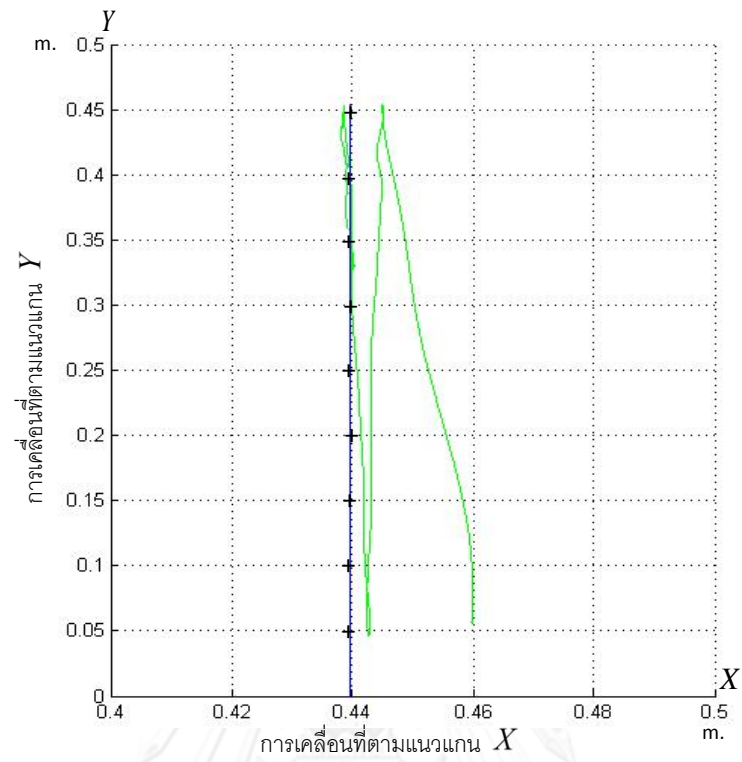
รูปที่ 5.20 ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

5.4.2 ผลการทดสอบจริงการพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงเส้นตรง

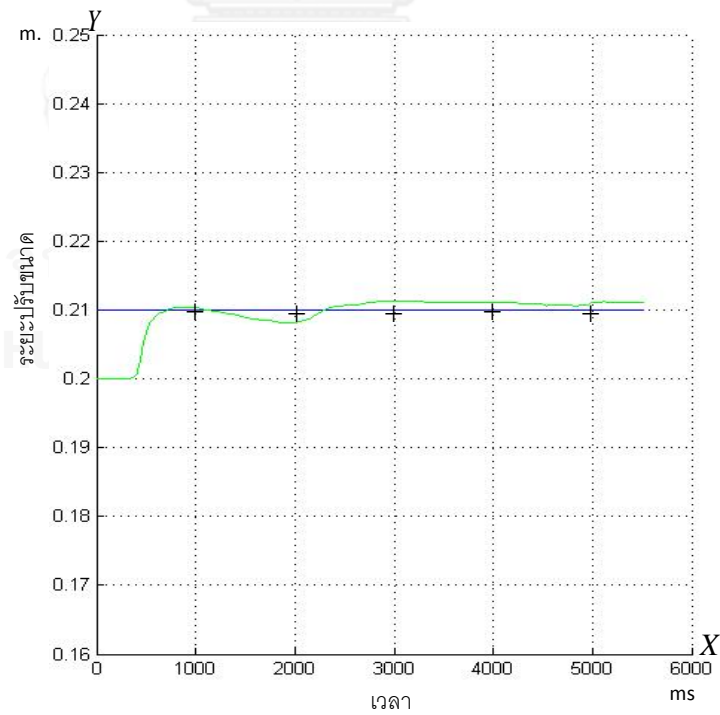
การทดสอบจริงรูปแบบเส้นตรง กำหนดเส้นทางอ้างอิงดังสมการที่ 5.11

$$\bar{R}(s) = \begin{bmatrix} 0.4396 \\ s \\ 0 \\ 0.21 \end{bmatrix}, \hat{T}(s) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, k\hat{N}(s) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

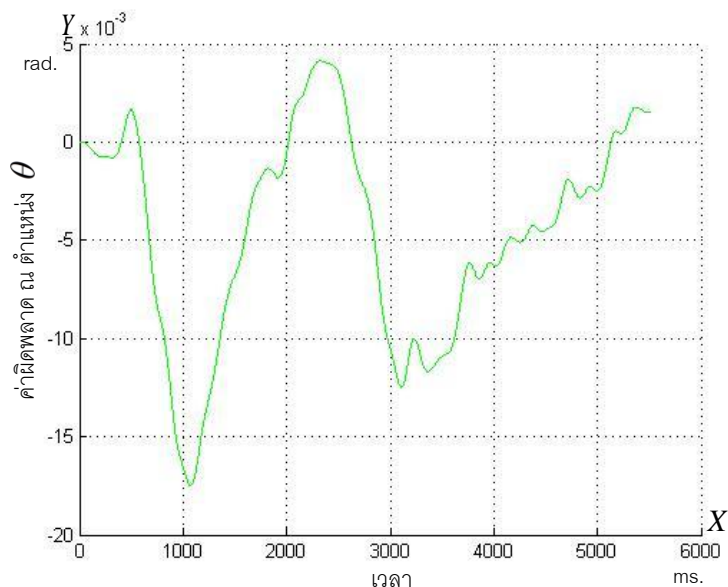
จุดเริ่มต้นของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดอยู่ที่พิกัด (0.46, 0.05, 0.0) ระยะปรับขนาดเริ่มต้นคือ 0.2 m. ระยะปรับขนาดอ้างอิงคือ 0.21 m. ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงตรงแสดงดังรูปที่ 5.20 แกน X แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X แกน Y แสดงการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และ ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรงแสดงดังรูปที่ 5.21 แกน X แสดงเวลาในการทดสอบ แกน Y แสดงระยะปรับขนาด รูปที่ 5.23 แสดงค่าผิดพลาดที่ตำแหน่ง θ



รูปที่ 5.21 หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางอ้างอิงตรง
เส้น '+' แสดงเส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง



รูปที่ 5.22 ระยะปรับขนาดบนเส้นทางอ้างอิงตรง เส้น '+' แสดง
เส้นทางอ้างอิง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนที่จริง



รูปที่ 5.23 ค่าผิดพลาด ณ ตำแหน่ง θ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการพัฒนาการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อพบว่าหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถปฏิบัติงานที่มีลักษณะพื้นฐานคือสามารถเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่เส้นตรงและเส้นโค้งโดยมีระยะใกล้กับตำแหน่งที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง ไปพร้อมกับการรักษาระยะการปรับขนาดแบบคงที่และไม่มีการหมุนรอบตัวเองของหุ่นตลอดเส้นทาง โดยมีค่าความผิดพลาดจากระยะปรับขนาดอ้างอิงที่น้อย

สำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้น กำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงโค้งไปพร้อมกับการหมุนรอบตัวเองในขณะเดียวกันก็ทำการรักษาระยะการปรับขนาดไปด้วย นอกจากนี้ยังกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงตรงและโค้ง ไปพร้อมกับการกำหนดระยะปรับขนาดแบบไม่คงที่โดยการกำหนดฟังก์ชันระยะการปรับขนาด จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ สามารถทำให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถเคลื่อนที่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงได้อย่างถูกต้องและสามารถปรับขนาดไปตามฟังก์ชันการปรับขนาดแบบไม่คงที่ได้อย่างถูกต้องโดยในการทดสอบจริงมีค่าความผิดพลาดเชิงเส้นอยู่ที่ 1 มม. - 2 มม. และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน 0.1 เรเดียน

อย่างไรก็ตามการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ แม้สามารถทำให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถปฏิบัติงานได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ แต่ในการกำหนดค่าในการชดเชยค่าความผิดพลาดมีความซับซ้อน เนื่องจากต้องทำการกำหนดค่าชดเชยทั้งในปริภูมิโครงแบบ ปริภูมิปรับขนาด และในปริภูมิล้อ

การพัฒนาการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ โดยการรวมปริภูมิโครงแบบและปริภูมิปรับขนาดเข้าด้วยกัน พบว่า หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงได้และควบคุมระยะการปรับขนาดให้เข้าสู่ระยะปรับขนาดอ้างอิงได้อย่างถูกต้องโดยในการทดสอบจริงมีค่าผิดพลาดประมาณ 2 มม. - 3 มม.และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน 0.1เรเดียน ซึ่งในงานที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (mobile robots) ทั่วไปนับว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงการสรุปภาพรวมของการวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการทดสอบจริง รวมทั้งได้มีการเสนอข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

6.1 สรุปผลการวิจัย

หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเป็นหุ่นยนต์โคบอทที่ได้รับการติดตั้งกลไกการปรับขนาด ทำงานอยู่บนระนาบสามมิติโดยมีปริภูมิการทำงานแบ่งออกเป็นสองปริภูมิ คือปริภูมิโคจรแบบบนระนาบสามมิติ (x, y, θ) และปริภูมิปรับขนาด (l, α)

ผู้วิจัยได้ศึกษาระบบควบคุมของงานวิจัยหุ่นยนต์โคบอทชนิดที่ผ่านมา เช่น หุ่นยนต์โคบอทแบบไม่มีการปรับขนาด หุ่นยนต์สกรูเตอร์โคบอท โดยเน้นหนักไปที่การศึกษาระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยเฉพาะ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด

ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดชนิดที่ผ่านมา ใช้ระบบควบคุมป้อนกลับทำการชดเชยค่าความผิดพลาดบนปริภูมิโคจรแบบเพียงเท่านั้น โดยการชดเชยค่าความผิดพลาดเชิงตำแหน่งและค่าความผิดพลาดเชิงทิศทาง อย่างไรก็ตามการปฏิบัติงานที่มีความซับซ้อน เช่น การกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่ในเส้นทางสามมิติ (X, Y, θ) พร้อมกับการรักษาระยะการปรับขนาดให้เป็นที่ไปตามระยะปรับขนาดอ้างอิง สามารถทำได้ยากและเกิดค่าความผิดพลาดขึ้นได้

ผู้วิจัยทำการศึกษาระบบควบคุมป้อนกลับของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดบนพื้นฐานที่ว่าหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดใช้มุมเลี้ยวของล้อในการในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่และควบคุมระยะปรับขนาด

งานวิจัยนี้พัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ ด้วยการนำตำแหน่งของล้อที่วัดได้จริงมาทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกับตำแหน่งอ้างอิงของล้อ จากนั้นชดเชยค่าความผิดพลาดด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วน แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกับเวกเตอร์ส่วนกลับรัศมีความโค้ง เมื่อทำการชดเชยค่าความผิดพลาดเสร็จสิ้นแล้ว สัญญาณจะถูกส่งไปเพื่อใช้คำนวณความเร็วมุมเลี้ยวของล้อต่อไป

การจำลองการพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อ ได้กำหนดการจำลองเป็นสองรูปแบบคือ รูปแบบที่หนึ่งทำการจำลองโดยกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางเคลื่อนที่อ้างอิงตรง ในขณะที่เดียวกันทำการกำหนดฟังก์ชันการปรับขนาดของหุ่นยนต์ให้ทำการเคลื่อนที่ขยายออกและลดขนาด การจำลองในรูปแบบที่สองกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่บนเส้นทางเคลื่อนที่อ้างอิง

โค้ง และทำการรักษาระยะปรับขนาดให้คงที่ตลอดการจำลองการเคลื่อนที่ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อสามารถนำมาใช้กับจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดได้เป็นอย่างดี

จากผลการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด โดยการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงทั้งตรงและโค้ง กำหนดให้หุ่นปฏิบัติงานที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นโดยการกำหนดการทดสอบจริงครั้งที่หนึ่ง ด้วยการกำหนดให้หุ่นหมุนรอบแกนแนวตั้งของตนเองขณะเคลื่อนที่โดยรักษาระยะปรับขนาดแบบคงที่และกำหนดการทดสอบครั้งที่สองโดยการกำหนดให้ฟังก์ชันระยะการปรับขนาดไม่คงที่ขณะอยู่บนเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิง พบว่าการเพิ่มระบบควบคุมป้อนกลับในปริภูมิล้อสามารถควบคุมให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงได้อย่างถูกต้อง ได้เป็นที่น่าพอใจ โดยมีความผิดพลาดอยู่ที่ 1 มม. - 2 มม. และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน 0.1 เรเดียน

อย่างไรก็ตามมีความซับซ้อนในการกำหนดค่าชดเชยความผิดพลาดในระบบควบคุมป้อนกลับบนปริภูมิล้อ เนื่องจากต้องทำการกำหนดค่าชดเชยทั้งในปริภูมิโครงสร้าง และในปริภูมิล้อ

เพื่อพัฒนาปรับปรุงการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดให้ดียิ่งขึ้น จึงทำการรวมปริภูมิโครงสร้างและปริภูมิปรับขนาดเข้าด้วยกัน เป็นการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดโดยการประยุกต์ใช้ปริภูมิ 4 มิติ

สำหรับหลักการในการควบคุมของการนำปริภูมิ 4 มิติ มาประยุกต์ใช้ในการควบคุม ขณะที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่ ระบบควบคุมทำหน้าที่วัดตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด (x, y, θ) และระยะขยาย (l) ที่วัดได้จริง นำมาผนวกรวมกันเป็นปริภูมิ 4 มิติ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้ แล้วจึงชดเชยด้วยระบบควบคุมป้อนกลับ จากนั้นจะถูกส่งค่าไปเปรียบเทียบกับเวกเตอร์ส่วนกลับรัศมีความโค้งเพื่อส่งไปคำนวณเพื่อควบคุมความเร็วของล้อต่อไป โดยการคำนวณของระบบจลนศาสตร์และระบบควบคุมป้อนกลับจะกระทำโดยใช้ปริภูมิ 4 มิติทั้งหมด

การจำลองระบบจลนศาสตร์ปริภูมิ 4 มิติ กำหนดรูปแบบการจำลองเป็นสองรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งใช้สมการเส้นโค้งเฟรเนตพารามิเตอร์ไรเซชัน 4 มิติ ผลของการจำลองทำให้ได้รูปแบบการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนในระดับหนึ่ง ส่วนการจำลองรูปแบบที่สองผู้วิจัยทำการจำลองโดยใช้สมการเส้นโค้งควอเตอร์นิกอนิค ซึ่งเป็นสมการ 4 มิติเช่นเดียวกัน ผลของการจำลองในรูปแบบที่สองแสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนในการเคลื่อนที่เช่นกันแต่อยู่ในระดับที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าการจำลองรูปแบบที่หนึ่ง ผลการจำลองทั้งสองรูปแบบแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของจลนศาสตร์ 4 มิติ

ในการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด ได้ทำการกำหนดเส้นทางอ้างอิงโค้งและเส้นทางอ้างอิงตรง การทดสอบจริงครั้งที่หนึ่ง ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาและเลือกใช้สมการเส้นโค้งควอเตอร์นิกอนิคในการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด โดยกำหนดให้หุ่นเคลื่อนที่ตามเส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงซึ่งเป็นรูปแบบเส้นทางอ้างอิงโค้งและกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอททำการปรับขนาดตามระยะการปรับขนาดอ้างอิง ส่วนในการทดสอบจริงรูปแบบที่สองซึ่งเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่

อ้างอิงตรง กำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดมีจุดเริ่มต้นห่างจากเส้นทางอ้างอิงและผู้วิจัยออกแรง ผลักให้กับตัวหุ่น พร้อมกับการกำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดทำการปรับขนาดตามระยะปรับขนาดอ้างอิง ผลการทดลองพบว่ามีความผิดพลาดอยู่ที่ 2 มม. – 3 มม. และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน 0.1เรเดียน

ผลการทดสอบจริงของการนำปริภูมิ 4 มิติมาประยุกต์ใช้นั้นเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่งเท่านั้น ด้วยมีข้อจำกัดในหลายด้าน เช่น แขนปรับขนาดที่มีความยาวไม่เพียงพอทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางอย่างกะทันหัน ระบบควบคุมยังไม่สามารถควบคุมให้หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นทางการเคลื่อนที่อ้างอิงได้รวดเร็วเพียงพอ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การปรับค่าเกณฑ์ในระบบควบคุมควบคุมมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดทั้งระบบควบคุมบนปริภูมิล้อและระบบควบคุมบนปริภูมิ 4 มิติ การปรับเกณฑ์สูงขึ้นทำให้มีค่าผิดพลาดลดลงแต่เส้นทางการเคลื่อนที่จะไม่ราบเรียบ ผู้ทดลองต้องคำนึงถึงความราบเรียบของการเคลื่อนที่และเวลาที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดใช้ในการเคลื่อนที่เข้าหาเส้นทางอ้างอิง

2. การเพิ่มความยาวของแขนวัดตำแหน่ง เนื่องจากแขนวัดตำแหน่งเดิมมีความยาวในระดับหนึ่งเท่านั้นทำให้ต้องเคลื่อนที่หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด ไปกลับขณะทำการทดลอง ระบบควบคุมที่มีความรวดเร็วไม่เพียงพอจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทาง หรืออาจใช้การหา ระบบการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์โคบอทวิธีอื่นๆ แทนการใช้แขนวัด เช่น การใช้กล้องวัดตำแหน่ง เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- ธนโชติ ชีพสุมล (2546). การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ข้อต่อทรงกลมแบบขนาน. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
ศุภพน จันทร์พัฒน์ (2551). หุ่นยนต์โคบอทปรับขนาด. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Akella, P., Wannasuphoprasit, W., Peshkin, M., Colgate. (1999). Cobots for the automobile assembly line. IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Bi, Z. M., Lang, Sherman, Y.T. and Lihui Wang. (2008). Improved control and simulation models of a tricycle collaborative robot. **19**: 715-722.
- Bi, Z. M., and Lihui Wang. (2010). "Dynamic control model of a cobot with three omni-wheels." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **26**(6): 558-563.
- Bosscher, P. a. L., E. (2006). Haptic Cobot Exoskeleton: Concepts and Mechanism Design. ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Philadelphia, Pennsylvania, USA. **Volume 2: 30th Annual Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B**: 867-876.
- Boy, E. S., Burdet, E., Teo, C. L. and Colgate, J.E. (2002). The Learning Cobot. ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, Louisiana, USA: 867-873.
- Boy, E. S., Burdet, E., Teo, C. L. and Colgate, J.E. (2007). "Investigation of Motion Guidance with Scooter Cobot and Collaborative Learning." IEEE Transaction on Robotics **23**(2).
- Buerger, S. P., and Neville Hogan (2010). "Novel Actuation Methods for High Force Haptics." 1-29.
- Carmichael, M. G., Dikai Liu, and Kenneth J. Waldron (2010). Investigation of reducing fatigue and musculoskeletal disorder with passive actuators. Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference.
- Chanpat, S. a. W., W (2006). A Novel Transformable Cobot. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics: 1-6.
- Chanpat, S. a. W., W (2009). "Kinematics and Control of A Resizable Cobot." AJSTPME **2**(4): 71-83.
- Chua, J. Y. (2006). Design of a Wearable Cobot. Department of Mechanical Engineering Florida State University. **Master**.

- Colgate, J. E., Peshkin, M. A., and Wannasuphprasit, W. (1996). Cobots: Robots for collaboration with human operators. International Mechanical Engineering Congress and exposition ASME Atlanta 58: 433-440
- Colgate, J. E. a. P., M.A (2008). " Intelligent assistdevices: revolutionary technology formaterialhandling." from www.stanleyassembly.com/documents/en/Cobotics%20IAD%20White%20Paper.pdf.
- Faulring ., C., J, E. and Peskin, M, A (2004). A High Performance 6-DOF Haptic Cobot. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA
- Fontanelli, D., et al (2013). Unicycle steering by brakes: a passive guidance support for an assistive cart. Decision and Control (cdc2013), Proc. of 53nd IEEE Conference.
- Gao, D., and Wayne J. Book (2010). "Steerability in planar dissipative passive robots." The International Journal of Robotics Research **29**(4): 353-366.
- Gök, I., and Ferdağ, K, A (2013). "Characterization of the Quaternionic Bertrand Curve in Euclidean Space E^4 ."
- Hirata, Y., Song, H., Kosuge, K. (2007). Motion Control of Passive Robot Porter with Variable Motion Characteristics for Handling a Single Object. International Conference on Robotics and Biomimetics, Sanya, China.
- Hirata, Y., Ojima, Y., and Kosuge, K. (2009). Coordinated Motion Control of Multiple Passive Object Handling Robots based on Environment Information. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe International Conference Center, Japan.
- Hirata, Y., Wang Z., and Kosuge, K (2012). "Motion Control of Caster-Type Passive Mobile Robot with Servo Brake." Advance Robotics **26**: 1271-1290.
- Koskinen, J., Heikkilä, T. and Pulkkinen, T. (2010). A Monitoring Concept for Co-operative Assembly Tasks. Frontiers of Assembly and Manufacturing. R. S. Sukhan Lee, Byung-Wook Choi, Springer: 172-184.
- Kreuzig, E. (1988). Vector Calculus. Advanced Engineering Mathematics. New York, John Wiley & Sons: 460-470.
- Li, X. (2009). Modeling and Control of a Powered Cobot, Florida State University Doctoral.
- Liu, X., g. (2012). Design a Combined Active and Passive Robotic System for Laser-based Therapies. The 31st Chinese Control Conference, Hefei, China.
- Melo, J., Emilio Sanchez, and Inaki Diaz (2012). Adaptive admittance control to generate real-time assistive fixtures for a COBOT in transpedicular fixation surgery. Biomedical

- Robotics and Biomechatronics (BioRob), 4th IEEE RAS & EMBS International Conference.
- Moore, C., A., Peshkin, M, A. and Colgate, J, E. (1999). Design of 3R Cobot Using Continuous Variable Transmission. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit: 3249-3254.
- Moore, C. A., Peshkin, M.A., Colgate, J.E. (1999). A Three Revolute Cobot Using CVTs in Parallel. IMECE.
- Moore Jr, C. A. (1997). Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures. Department of Mechanical Engineering Northwestern University. Master.
- O'Neill, B. (1969). Elementary Differential Geometry, Academic Press.
- Öztürk, G., Arslan , K., Hacisalihoglu, H (2008). A Characterization of ccr-curves. Proceeding of the Estonian Academy of Sciences.
- Pan, P., Lynch K. M., Peshkin M.A., and Colgate J.E (2005). Human Interaction with Passive Assistive Robots. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics.
- Peshkin, M. A., Moore, C. A. ,Colgate, J. E. and Wannasuphprasit (2001). Cobot Architecture. IEEE Transactions on Robotics and Automation. **17**: 377-390.
- Santos, P. G., Garcia E., Sarria, F.,Ponticelli, R., and Reviejo, J (2010). "A New Manipulator Structure for Power-Assist Devices. Industrial Robot." An International Journal **37**(5): 452-458.
- Santos-Munné, J. J. (1998). Extreme Joystick : A Cobot with Stored Energy. Department of Mechanical Engineering Northwestern University. Doctoral.
- Sirikasemsuk, S. a. W., W (2011). "3DC-Cobotic Manipulator." Thammasat Int. J. Sc. Tech.
- Store, N., Cruz-Villar, C.A., Rodriguez-Angeles, A. (2009). Optimal design of a three dimensional 4 dof cobot with differential gears. 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control,CCE, IEEE: 1-6.
- Valiente Yambay, M. Y. (2001). Design of a Unicycle Cobot. Department of Mechanical Engineering, Northwestern University. Master.
- Wannasuphprasit, W., Colgate, J.E., Peshkin, M.A (1997). The Design and Control of Scooter, a Tricycle Cobot. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation.
- Wannasuphprasit, W., Gillespie, R.B, Colgate, J.E., Peshkin, M.A (1997). Cobot Control. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation.
- Wannasuphprat. W. (1999). Cobot: Collaborative Robots. Department of Mechanical Engineering, Northwestern University. Doctoral.

Worsnopp, T. (2003). Design of a Unicycle Cobot Controller. Department of Mechanical Engineering Northwestern University. **Master.**

Yew, L., M Curve in Four-Dimensional Space, The Science Enrichment Programme jointly by Faculty of Science, National University of Singapore and the Ministry Education, Singapore.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจอมมูธา จำปาเหลือง เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดตราด ได้เข้าศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ในปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีถัดมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY