การควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบสององศาอิสระ

นายภาวิต สุวจิตตานนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROLLING APPEARANCE INERTIA OF A 2-DOF COBOT

Mr. Parvit Suvachittanont

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบสององศาอิสระ
โดย	นายภาวิต สุวจิตตานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาวิต สุวจิตตานนท์ : การควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบสององศาอิสระ. (CONTROLLING APPEARANCE INERTIA OF A 2-DOF COBOT) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์, 140 หน้า.

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการปรากฏของความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ หุ่นยนต์โคบอท (Cobot) เป็นเทคโนโลยีรูปแบบใหม่ที่ช่วยให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย หุ่นยนต์โคบอทมีคุณสมบัติของระบบเป็นแบบแพสซิฟ (Passive) ซึ่งแตกต่างไปจากหุ่นยนต์ทั่วไปคือแทนที่ส่งกำลังงานที่แต่ละข้อต่อโดยตรง หุ่นยนต์โคบอทใช้วิธีสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อด้วยการปรับอัตราทด โดยอาศัยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องมาต่อเข้ากับข้อต่อในลักษณะรูปแบบต่างๆ วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานวิเคราะห์หาข้อบกพร่องพร้อมปรับปรุงข้อบกพร่องของหุ่นยนต์ต้นแบบ วิเคราะห์หาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท เพื่อที่จะพัฒนาและออกแบบระบบควบคุมการปรากฏของความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ โดยใช้ตัวแปรองศาอิสระที่เหลือจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นจากหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติให้มีค่ามากน้อยตามต้องการได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต...

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...

47705947 21 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: COBOT / CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSSMISSION / APPEARANCE INERTIA

PARVIT SUVACHITTANONT: CONTROLLING APPEARANCE INERTIA OF A 2-DOF COBOT. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.WITAYA WANNASUPHOPRASIT, 140 pp.

This research aims to study and develop an appearance inertia control for a 2-DOF parallel Cobot. Cobots are a class of passive robots designed to work directly with human operator. Instead of actuating each joint directly, Cobots use CVTs (Continuous Variable Transmissions) to create velocity relations between joints. This research studied and derived kinematics for the 2 DOF parallel Cobot. Dynamic Equation of these parallel Cobot was also developed. In our configuration, there is redundant CVT. Thus by vary redundant ratios, we can effective control appearance inertia along a predefine path.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Mechanical Engineering Student's signature..
Field of study Mechanical Engineer Advisor's signature..
Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆในงานวิทยานิพนธ์นี้พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบผลสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความความช่วยเหลือจากบิดา มารดา ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านข้อเสนอแนะตลอดจนกำลังใจต่างๆแต่ผู้เขียนเสมอมา ในที่นี้ผู้เขียนขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์ ที่ได้ให้ความรู้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้มาตลอด และขอบคุณสำหรับทุกๆท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียน ไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนิสิต รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ภายในห้องปฏิบัติการ สหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ

กิตติกรรมประกาศ..ฉ

สารบัญ..ช

สารบัญตาราง..ญ

สารบัญภาพ..ฎ

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 ความเป็นมา...1

1.2 วัตถุประสงค์..1

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์..2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน...2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..3

บทที่ 2 หุ่นยนต์โคบอตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......................................4

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของหุ่นยนต์โคบอท..4

2.2 งานวิจัยด้าน CVT...6

2.2.1 Rubber V-belt CVT...7

2.2.2 Toroidal CVT...7

2.2.3 Hydrostatic CVT...8

2.2.4 Ratcheting CVT..9

2.2.5 Spherical CVT: หลักการทำงาน...10

2.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ISVT....................................11

บทที่ 3 การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีที..14

3.1 การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีทีแบบอนุกรม...14

3.2 การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีทีแบบขนาน..16

3.3 โคบอทแบบใส่กำลัง...18

บทที่ 4 จลน์ศาสตร์ของโคบอทแบบขนาน...19

4.1 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกล...19

4.1.1 เรขาคณิตวิเคราะห์...20

หน้า

4.1.2 สมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า..23
4.1.3 สมการเคลื่อนที่แบบผกผัน..24
4.2 กาวิเคราะห์จลน์ศาสตร์การเคลื่อนที่ของโคบอท..25
4.2.1 ปริภูมิตำแหน่งปลาย...25
4.2.2 ปริภูมิจอยท์...26
4.2.3 ปริภูมิการจับคู่...31
4.2.4 ปริภูมิของมุมปรับอัตราทด...32
4.3 การเลือกใช้ค่าอัดตราทดของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ............................34
บทที่ 5 การปรับปรุงหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ...35
5.1 ล้อของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ : ข้อบกพร่องและการแก้ปัญหา...................35
5.1.1 ผลการปรับปรุง..37
5.2 โครงสร้างการยึดของชุดปรับแกนหมุน: ข้อบกพร่องและการแก้ไข.........................39
5.2.1 ผลการปรับปรุง..39
บทที่ 6 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ...................................40
6.1 สมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง...40
6.2 ผลเฉลยจากสมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง..41
6.3 การหาสมการบังคับ...43
6.4 ทำการหาสมการลากรานจ์ L..43
6.4.1 หา Total Kinetic Energy of Pantograph Cobot...................................43
6.4.2 หา Total Potential Energy Pantograph Cobot....................................44
6.5 ฟังก์ชันลากรานจ์...44
6.6 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอตแบบขนานสองมิติ..................................47
บทที่ 7 การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ...48
7.1 ทฤษฏีการควบคุม...48
7.2 การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ..50
บทที่ 8 การควบคุมความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ...................................51
8.1 ความเฉื่อยกับหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ...51
8.2 สมการความเฉื่อยของชุด CVT..51

หน้า

8.3 สมการความเฉื่อย จากสมการการเคลื่อนที่.....55
8.4 การควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ.....56
8.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ 57
8.6 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ 62
8.7 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง.....63
8.7.1 ความสามารถของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ.....64
8.7.2 วิธีการสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ..62
8.7.3 ความสามารถของการสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ.....66
8.7.4 ผลการควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏแบบป้อนกลับ.....67
8.7.4.1 กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.063 N.m 67
8.7.4.2 กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.0675 N.m 69
8.7.4.3 กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.0735 N.m 71
8.7.4.4 กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.0775 N.m 72
บทที่ 9 ข้อสรุปการวิจัยและข้อแนะนำ.....73
9.1 ข้อสรุปงานวิจัย.....73
9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....75
รายการอ้างอิง.....76
ภาคผนวก.....77
ภาคผนวก ก. รายละเอียดอุปกรณ์.....78
ก.1 แผงวงจร ADlink PCI-9112 Multifunction DAS Card 78
ก.2 แผงวงจร ADlink PCI -8133 PCI Bus Advanced Data Acquisition Card 79
ภาคผนวก ข. ความเฉื่อย.....80
ข.1 ตัวอย่างการหาค่าความเฉื่อยของวัตถุ.....80
ข.1.1 แขนของหุ่นยนต์ (Link).....80
ข.2 ความเฉื่อยของชุดเฟือง.....82
ข.3 การนำเฟืองมารวมเป็นระบบมากขึ้น.....82

หน้า

ข.4 การคำนวนหาค่า Inertia ของระบบซีวีที....................................84
ภาคผนวก ค. โปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ..............89
ค.1 โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติในส่วนของการแปลงกรอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท..................................89
ค.2 โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติในส่วนของการหา Forward Kinematic ของหุ่นยนต์โคบอท....................................98
ค.3 โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติในส่วนของการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท.........................103
ค.4 โปรแกรมการควบคุมความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ 108
ค.5 โปรแกรมการสร้างระยะทางที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติเคลื่อนที่ 112

ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์...116
ง.1 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องแบบไม่จำกัด....................117
ง.2 การจำลองเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Pantograph Cobot...........122
ง.3 แนวคิดในการควบคุมความเฉื่อยปรากฏสำหรับหุ่นยนต์โคบอทแบบแพนโทกราฟ..129
ง.4 การหาสมการความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์ Pantograph Cobot.....135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์...140

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบซีวีที……..……………………….......9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทกับการวาดเส้นตรงโดยไม้บรรทัด.............4
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว..5
รูปที่ 2.3 การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว..6
รูปที่ 2.4 Rubber V-Belt CVT..7
รูปที่ 2.5 Toroidal CVT 7
รูปที่ 2.6 Hydrostatic CVT 8
รูปที่ 2.7 Ratcheting CVT 9
รูปที่ 2.8 หลักการของ Spherical CVT 10
รูปที่ 2.9 Tetrahedral CVT 11
รูปที่ 2.10 แสดงถึงรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ ISVT...11
รูปที่ 2.11 รูปต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็วแบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double ISVT...12
รูปที่ 3.1 การต่อโครงข่ายของซีวีทีแบบอนุกรมในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์ 14
รูปที่ 3.2 การต่อซีวีที 2 ตัวในลักษณะของอนุกรมเข้ากับแขนกล 3 จอยท์...........................15
รูปที่ 3.3 การต่อโครงข่ายของซีวีทีแบบขนานในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์......................17
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการต่อซีวีที 3 ตัวเข้ากับแขนกล 3 จอยท์แบบขนาน...............................17
รูปที่ 3.5 การใส่กำลังในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์...18
รูปที่ 4.1 โคบอทแบบขนาน 2 มิติ...20
รูปที่ 4.2 แบบจำลองของโคบอท 2 มิติ..20
รูปที่ 4.3 รูปแบบแขนกลแบบห้าเหลี่ยม...20
รูปที่ 4.4 สามเหลี่ยม ABE ที่สร้างเพื่อใช้ในการคำนวณ...21
รูปที่ 4.5 สามเหลี่ยม BED ที่สร้างเพื่อใช้ในการคำนวณ...21
รูปที่ 4.6 สามเหลี่ยม BCD ที่สร้างเพื่อใช้ในการคำนวณ...22
รูปที่ 4.7 แบบจำลองแขนกลเพื่อใช้ในการคำนวณสมการไปข้างหน้า..................................23
รูปที่ 4.8 การเคลื่อนที่ในปริภูมิตำแหน่งปลาย 25
รูปที่ 4.9 การเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์ 26
รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่ของโคบอทแบบขนาน 2 มิติ 33

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.11 การสร้างอัตราทดของซีวีทีแต่ละตัวโดยการปรับค่ามุม Phi 2 (Φ)
มีค่าเท่ากับ 45 องศา....................34
รูปที่ 5.1 ล้อยูริเทนที่มีความแข็งน้อยเกินไป....................35
รูปที่ 5.2 ล้อยูริเทนที่มีความแข็งน้อยเกินไป เมื่อประกอบกับชุด ISVT....................36
รูปที่ 5.3 ล้อยูรีเทนที่มีความแข็ง 95 Shore A....................36
รูปที่ 5.4 ล้อยูรีเทนที่มีความแข็ง 95 Shore A เมื่อประกอบกับชุด ISVT....................36
รูปที่ 5.5 ล้อยูรีเทนเก่า....................37
รูปที่ 5.6 ล้อยูรีเทนใหม่....................37
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าอัตราทดที่ได้ของล้อยูริเทนก่อนเปลี่ยน....................38
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าอัตราทดที่ได้ของล้อยูริเทนหลังเปลี่ยน....................38
รูปที่ 5.9 จุดยึดของชุดปรับแกนหมุนที่ต้องปรับปรุง....................39
รูปที่ 6.1 Pantograph....................42
รูปที่ 7.1 เส้นทางการเดินของโคบอท....................48
รูปที่ 8.1 ระบบซีวีที....................51
รูปที่ 8.2 ทรงกลมซีวีที 1....................53
รูปที่ 8.3 ทรงกลมซีวีที 2....................54
รูปที่ 8.4 ชุดอุปกรณ์หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ 58
รูปที่ 8.5 Host PC และ Taget PC 58
รูปที่ 8.6 Pantograph Cobot 59
รูปที่ 8.7 มอเตอร์ขับชุดซีวีที และ Encoder 60
รูปที่ 8.8 Encoder ที่ติดกับ Output Shaft ทั้งสองข้าง 60
รูปที่ 8.9 Encoder ที่ติดกับเพลากลาง 61
รูปที่ 8.10 Encoder ที่ติดระหว่างข้อต่อของ Pantograph 61
รูปที่ 8.11 Block โปรแกรมที่ใช้ควบคุม 62
รูปที่ 8.12 เส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง 63
รูปที่ 8.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเฉื่อยกับค่าอัตราทด 64
รูปที่ 8.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแกนหมุนของซีวีทีกับค่าความเฉื่อยปรากฏ 65
รูปที่ 8.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราทดกับค่าแรงเคลื่อนที่ปลายแขน 66
รูปที่ 8.16 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขน เมื่อ I =0.063 N.m 67

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 8.17 ค่าความเฉื่อยปรากฏที่ได้จากการทดลอง 68
รูปที่ 8.18 ค่ามุม ϕ_1 เมื่อ I =0.063 N.m 68
รูปที่ 8.19 ค่ามุม ϕ_2 เมื่อ I =0.063 N.m 69
รูปที่ 8.20 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยเท่ากับ 0.0675 N.m...............................70
รูปที่ 8.21 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยเท่ากับ 0.0735 N.m...............................71
รูปที่ 8.22 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยเท่ากับ 0.0775 N.m...............................72
รูปที่ ก.1 Multifunction DAS Card...78
รูปที่ ก.2 PCI Bus Advanced Data Acquisition Card...79
รูปที่ ข.1แขนของหุ่นยนต์...80
รูปที่ ข.2 การย้ายจุดหมุนของแขนหุ่นยนต์..81
รูปที่ ข.3 เฟือง...82
รูปที่ ข.4 ชุดเฟืองสองตัวขบกัน...82
รูปที่ ข.5 FBD 1..83
รูปที่ ข.6 FBD 2..83
รูปที่ ข.7 ระบบซีวีที...84
รูปที่ ข.8 FBD 1..85
รูปที่ ข.9 FBD 2..85
รูปที่ ข.10 Common Shaft...86
รูปที่ ข.11 ทรงกลม 2..86
รูปที่ ข.12 Shaft 2..87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ระบบทางกลในปัจจุบัน เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ได้นำระบบส่งถ่ายกำลัง (transmission) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆเป็นอย่างมาก แต่ระบบส่งถ่ายกำลัง ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นมีข้อจำกัดในด้านของอัตราทด (transmission ratio) เป็นอย่างมาก โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีอัตราทดคงที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร หรือเป็นชุดของเกียร์ซึ่งปรับอัตราทดได้แบบขั้นบันได เช่นเกียร์รถยนต์ และต่อมาได้พัฒนาระบบส่งกำลังที่สามารถปรับค่าอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องเช่น CVT (Continuous Variable Transmission) งานวิจัยนี้ได้นำ Spherical CVT ซึ่งสามารถปรับค่าอัตราทดได้อย่างต่อเนื่อง (0 ถึง ∞) มาใช้ในงานทางด้านหุ่นยนต์โคบอท (Cobot: :*Collaborative Robot*) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมา เพื่อที่จะสามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรงบนพื้นที่การทำงานเดียวกันได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากโคบอทจะเป็นอุปกรณ์ทางด้านหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมเป็นแพสซิฟ (Passive) ไม่มีต้นกำเนิดกำลังในตัวเอง อาศัยกำลังจากมนุษย์ในการเคลื่อนที่ ในขณะที่โคบอทจะทำหน้าที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ไปพร้อมกันในพื้นที่การทำงานเดียวกัน หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์โคบอทชนิดขนาน เคลื่อนที่ในสองมิติ โดยข้อต่อของโคบอทจะใช้ Spherical CVT มาเป็นข้อต่อของหุ่นยนต์

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรากฏของความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ซึ่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ในระนาบสองมิตินั้นความเฉื่อยปรากฏในแต่ละตำแหน่งจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจะทำการใช้ตัวแปรองศาอิสระที่เหลือจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่อง (Redundant CVTs) มาทำการควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาและพัฒนาปรับปรุงต้นแบบหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

2) ศึกษาและเขียนสมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

3) เพื่อศึกษาออกแบบระบบควบคุมความเฉื่อยปรากฏหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1) พัฒนาและปรับปรุงหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

2) ศึกษาระบบการควบคุมหุ่นยนต์โคบอท และจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

3) เขียนสมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

4) ออกแบบระบบควบคุมการปรากฏของความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1) ศึกษาและวิเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบและควบคุม

2) ศึกษาและวิเคราะห์ข้อบกพร่องหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

3) ทำการปรับปรุงข้อบกพร่องของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

4) ทำการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอท

5) เขียนสมการพลศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

6) ศึกษาการปรากฏของความเฉื่อยของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

7) ทำการออกแบบระบบควบคุมการปรากฏของความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

8) ทดสอบการควบคุมการปรากฏของความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

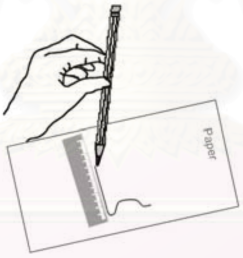
1) เข้าใจหลักการทำงานและสามารถใช้งานหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานได้
2) เข้าใจและสามารถเขียนสมการพลศาสตร์ของระบบแขนกลแบบขนานสองมิติได้
3) เข้าใจและสามารถออกแบบระบบควบคุมความเฉื่อยปรากฏของโคบอทแบบขนานได้
4) ผู้วิจัยในอนาคตสามารถที่จะนำวิทยานิพนธ์เรื่องไปศึกษา เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีให้ดีขึ้นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
หุ่นยนต์โคบอทและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทคือแนวคิดการพัฒนารูปแบบของหุ่นยนต์ที่ออกแบบมาให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ใน พื้นที่ทำงาน (workspace) เดียวกันได้อย่างปลอดภัย หุ่นยนต์โคบอทแตกต่างกับหุ่นยนต์หรืออุปกรณ์แฮปติคอินเทอร์เฟซ (Haptic Interface) ทั่วไปตรงที่หุ่นยนต์โคบอทจะไม่สร้างแรงมากระทำที่ผู้ใช้งานโดยตรง แต่จะทำเพียงเปลี่ยนทิศทางแรงของผู้ใช้งานตามเส้นทางที่โปรแกรมไว้ โดยผู้ใช้งานเป็นผู้ควบคุมแรงในทิศทางการเคลื่อนที่เอง การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจึงเป็นการทำงานในระบบแพสซีฟ (Passive) ซึ่งปลอดภัยต่อผู้ใช้งานในการทำงานดังกล่าวเปรียบได้กับการใช้ไม้บรรทัดวาดเส้นตรง โดยหุ่นยนต์โคบอททำหน้าที่เสมือนไม้บรรทัดส่วนผู้ที่ลงมือวาดคือผู้ใช้เอง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1



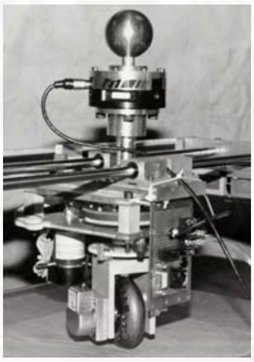
รูปที่ 2.1 การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทกับการวาดเส้นตรงโดยไม้บรรทัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทไม่ได้ใช้มอเตอร์หรืออุปกรณ์ต้นกำลัง (Actuators) เพื่อส่งกำลังให้กับจอยท์ (joints) แต่หุ่นยนต์โคบอทจะใช้ซีวีที (CVTs: Continuous Variable Transmission) ในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของแต่ละจอยท์ ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทได้ อุปกรณ์ซีวีทีนี้จะสร้างสร้างข้อบังคับแบบนอนโฮโลโนมิค (nonholonomic constraints) ให้กับหุ่นยนต์โคบอททำให้ไม่ว่าหุ่นยนต์โคบอทจะมีจำนวนมิติการทำงาน (task space) เท่าไรก็ตาม หุ่นยนต์โคบอทจะมีการเคลื่อนที่เพียง 1 องศาอิสระ (Degree of Freedom) เท่านั้น

อุปกรณ์แฮปติคอินเทอร์เฟซโดยทั่วไปสามารถสร้างสภาวะจำลอง (virtual environment) ต่างๆ ได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมมอเตอร์เพื่อสร้างแรงเสมือนกระทำต่อผู้ใช้งานโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น การสร้างพื้นผิวหรือกำแพงจำลอง (virtual surfaces, virtual walls) ในขณะที่มนุษย์เคลื่อนจับตำแหน่งปลาย (end effecter) ของอุปกรณ์แฮปติคอินเทอร์เฟซไปชนหรือผ่านเข้าไปในกำแพงจำลอง คอมพิวเตอร์จะสั่งให้มอเตอร์ใช้แรงผลักต้านดันให้ตำแหน่งปลายออกนอกกำแพง ถ้าเราต้องการจำลองกำแพงเสมือน ให้เหมือนกำแพงจริงแล้ว กำแพงจำลองต้องมีความแข็ง (stiffness) สูงมาก มอเตอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะขับแรงต้านได้เพียงพอและต้องใช้อัตราการขยายสัญญาณ (gain) ในการควบคุมสูงทำให้เกิดสภาวะไม่เสถียร (instability) ได้ง่าย ในขณะที่ หุ่นยนต์โคบอทไม่ได้ใช้มอเตอร์ขับจอยท์ โดยตรง แต่ใช้ในซีวีทีเท่านั้น ทำให้ไม่ต้องใช้มอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่มาก จึงไม่เกิดปัญหาดังกล่าว

เพื่อให้เข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทได้ดีขึ้น จะขอยกตัวอย่างการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทที่ง่ายที่สุดนั่นคือหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot) [10] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว[10]

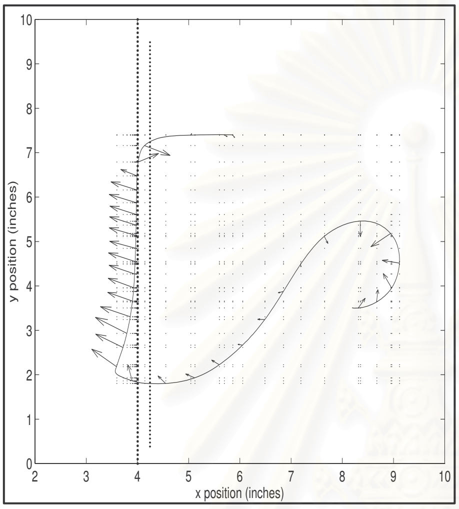
จากรูปที่ 2.2 เป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว ซึ่งมีลักษณะคือเป็นหุ่นยนต์ล้อเดียวเคลื่อนที่ในระนาบ x-y แกนของล้อหุ่นยนต์โคบอทจะตั้งตรงอยู่ตลอดเวลา มอเตอร์ของหุ่นยนต์โคบอทจะไม่สามารถขับเคลื่อนหุ่นยนต์โคบอทได้ จะทำได้เพียงเปลี่ยนทิศทางของล้อเท่านั้น ที่มือจับของหุ่นยนต์โคบอทจะมีอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force Sensor) ติดอยู่เพื่อวัดแรงในแนวแกน x-y ทำให้หุ่นยนต์โคบอท สามารถวัดขนาดและทิศทางของแรงรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์โคบอทได้ หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวสามารถทำงานทั้ง 2 ลักษณะได้ดังนี้คือ

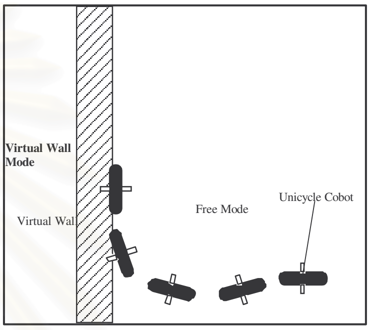
1) การทำงานแบบอิสระ (Virtual Caster)

หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวสามารถทำงานแบบอิสระได้โดยการหมุนแกนของล้อให้เป็นไปตามทิศทางแรงของผู้ใช้ ซึ่งสามารถหาได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

2) การทำงานแบบบังคับ (Virtual Wall)

เมื่อผู้ใช้ออกแรงเคลื่อนเข้าหากำแพงเสมือน (ซึ่งสามารถหาได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรง) หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะหมุนล้อให้มีทิศทางสัมผัสกับกำแพงเสมือน ทำให้ผู้ใช้เสมือนว่าเคลื่อนที่ไถลไปตามกำแพง แต่ถ้าผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากกำแพง หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวก็จะกลับไปทำงานในแบบอิสระการทำงานของ หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวสามารถจำลองได้ดังรูปที่ 2.3





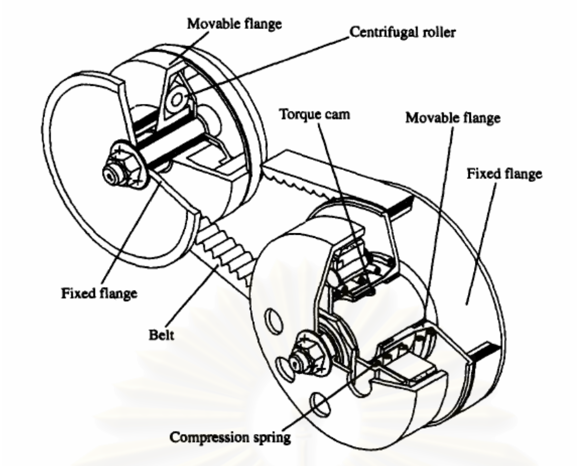
รูปที่ 2.3 การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว[10]

ในรูปที่ 2.3 รูปซ้ายแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว ลูกศรในรูปแสดงแรงที่ผู้ใช้กระทำ สมมติให้กำแพงเสมือนอยู่ที่ตำแหน่ง x = 4 จะเห็นได้ว่าในการทำงานแบบอิสระหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะเคลื่อนที่ตามแรงของผู้ใช้ แต่เมื่อไปชนกำแพงเสมือนหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะต้านแรงไว้ รูปขวาแสดงทิศทางของล้อของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว

2.2 งานวิจัยทางด้าน ซีวีที

ซีวีที คืออุปกรณ์ส่งถ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่อง ในการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท ซีวีทีจะทำหน้าที่สร้าง สร้างข้อบังคับแบบนอนโฮโลโนมิคขึ้นมาเพื่อบังคับให้หุ่นยนต์โคบอทมีองศาอิสระเหลือเพียง 1 เท่านั้น ซีวีทีมีการออกแบบและจัดสร้างไว้หลายแบบดังนี้

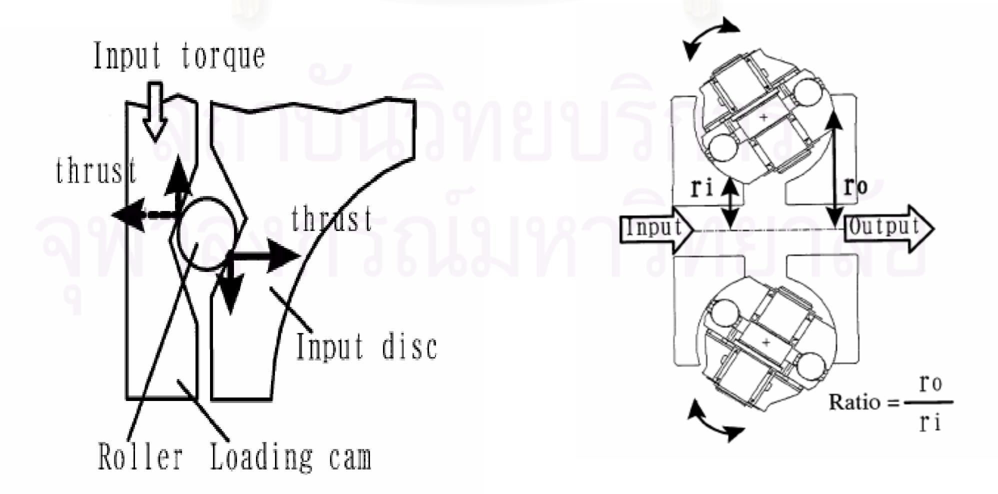
2.2.1 RUBBER V-BELT CVT



รูปที่ 2.4 Rubber V-Belt CVT [1]

RUBBER V-BELT CVT [1] เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีการใช้งานกันแพร่หลายในปัจจุบัน ประกอบด้วยพู่เล่ ตัวขับและตัวตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งพู่เล่จะประกอบไปด้วยขอบที่อยู่นิ่งกับขอบที่เคลื่อนที่ได้ โดยการเคลื่อนที่ของขอบพู่เล่นั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรัศมีของตัวพู่เล่ซึ่งสายพานยางจะวางอยู่บนพู่เล่เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของขอบพู่เล่ทั้งสองที่สัมพันธ์กัน ก็จะเกิดการเปลี่ยนอัตราทดได้ โดยอัตราทดคือ อัตราส่วนระหว่าง รัศมีพู่เล่ตัวตามกับพู่เล่ตัวขับนั้นเอง

2.2.2 TOROIDAL CVT

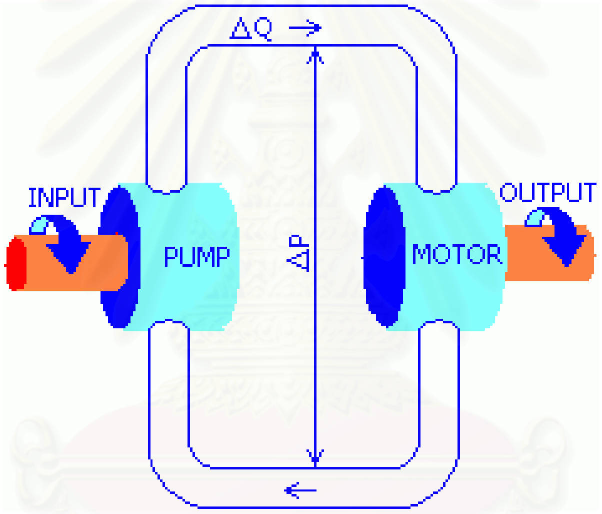


รูปที่ 2.5 Toroidal CVT [2]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Toroidal CVT [2] จะแบ่งเป็น Half-Toroidal CVT และ Full-Toroidal CVT ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของ variator พิจารณารูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ Half-Toroidal CVT จะใช้ตัว Loading Cam เปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ให้เป็นแรงในแนวแกน (Thrust) Input และ Output Disc ที่รับแรงมาจาก Loading Cam และ Power Roller 2 ลูก ที่อยู่ระหว่าง Disc ทั้งสองก็จะส่งแรงขับเคลื่อนโดยจะอาศัยจากน้ำมันชนิดพิเศษ ที่สามารถสร้างแรงต้านการเฉือนได้อย่างมาก ก่อให้เกิดแรงดันสูงในการส่งถ่ายกำลังของ ซีวีที นี้ (โดยปราศจากการสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ) วิธีการเปลี่ยนอัตราทดของ Half-Toroidal CVT นี้ทำโดยการบิดตัว Power Roller รอบแกนหมุน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรัศมีของจุดสัมผัสระหว่าง Power Roller กับ Input และ Output Disc ดังภาพ โดยอัตราทดนั้นคือ อัตราส่วนระหว่าง r_o กับ r_i

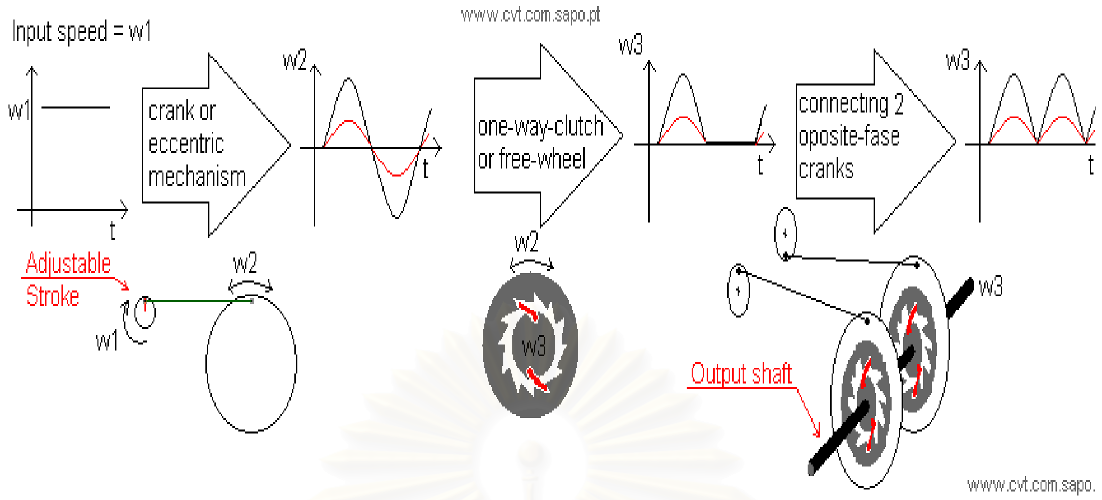
2.2.3 HYDROSTATIC CVT



รูปที่ 2.6 Hydrostatic CVT [3]

รูปที่ 2.6 คือ Hydrostatic CVT [3] ประกอบไปด้วย hydrostatic pump และ hydrostatic motor เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการทำงานของ Hydrostatic CVT คือ input จะทำการขับ pump เพื่อเป็นการส่งถ่ายพลังงานไปยังของไหล โดยของไหลจะมีแรงดันเพิ่มขึ้นไปหมุนตัว motor เพื่อไปขับ output ต่อไป โดยจะมีตัว variable displacement unit เพื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราทดอีกตัวหนึ่งหรือเป็นตัวเดียวกับ Motor เลยก็ได้ โดยอัตราทดนั้นก็คือผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นเอง

2.2.4 RATCHETING CVT



รูปที่ 2.7 Ratcheting CVT [4]

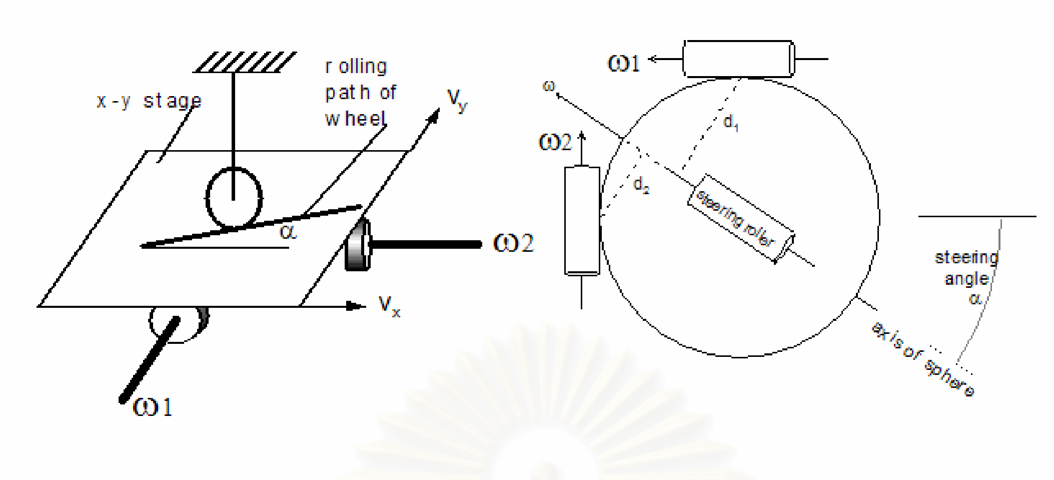
Ratcheting CVT [4] ที่แสดงในรูปที่ 2.7 มีอีกชื่อหนึ่งว่า Crank-CVT, Variable-Stroke CVT จะทำงานโดยการเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนไปเป็นการเคลื่อน ที่แบบกลับไปกลับมา แล้วทำการเรียงการเคลื่อนที่ให้กลับไปเป็นแบบหมุนตามเดิม โดยในขั้นแรก กลไกจะสร้างการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาจากการเคลื่อนที่แบบหมุน ต่อมาการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาก็จะถูกเรียงด้วยกลไก เช่น one-way-clutch (or free-wheel) เพื่อที่จะเรียงการเคลื่อนที่กลับไปเป็นแบบหมุนตามเดิม เพื่อที่จะให้การเคลื่อนที่ราบ เรียบต้องใช้ several out-of-phase cranks [4] ด้วย

เมื่อทำการศึกษา ซีวีที ชนิดต่างๆข้างต้นแล้ว ก็นำมาวิเคราะห์สรุป ข้อดี ข้อเสียของแต่ละชนิดดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของระบบ ซีวีที

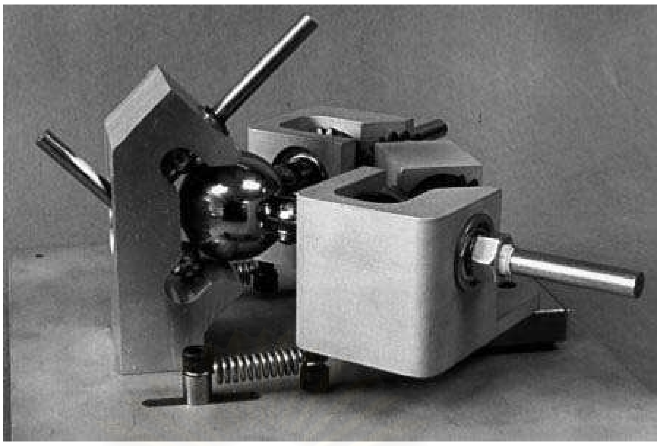
ชนิดของ ซีวีที	ข้อดี	ข้อเสีย
1. RUBBER V-BELT CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด
2.Toroidal CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด มีขนาดเล็ก ส่งกำลังได้สูงสุด	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด
3. Hydrostatic CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด ระบบมีประสิทธิภาพเพียง 60 – 80%
4. Ratcheting CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด กำลังที่ได้ออกมาไม่สม่ำเสมอ

2.2.5 Spherical CVT : **หลักการทำงาน**



รูปที่ 2.8 หลักการของ Spherical CVT [5]

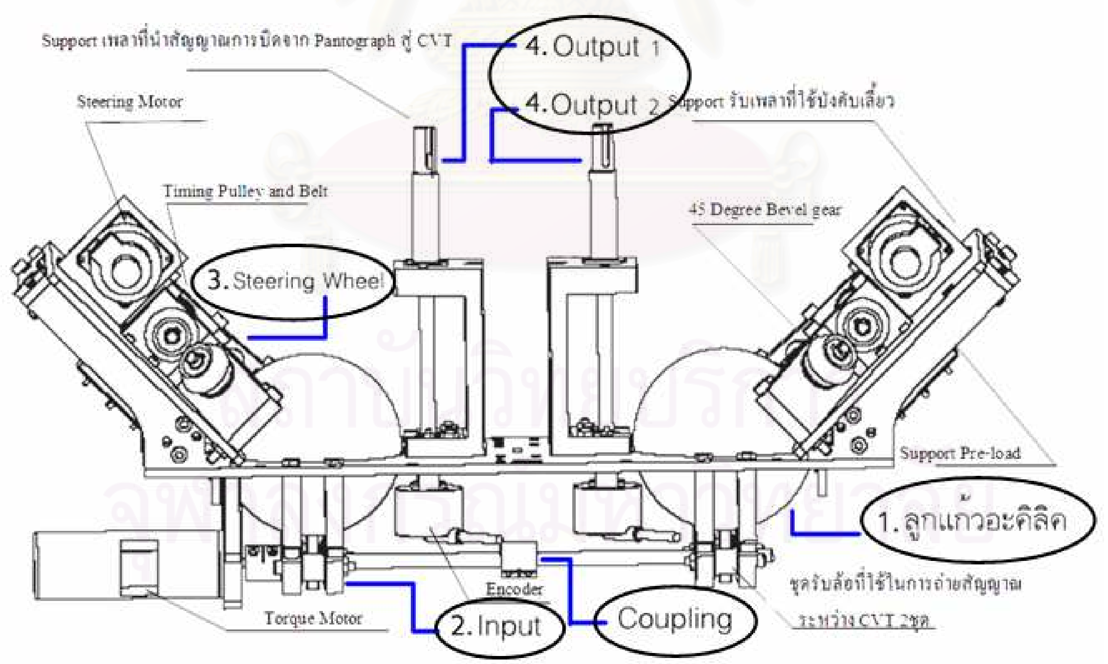
พิจารณารูปที่ 2.8 (ซ้าย) ถ้านำเอาล้อมาใช้เป็น ซีวีที ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ V_y และ V_x จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม α (steering angle) ของล้อโดยที่ $V_y / V_x = \tan(\alpha)$ ในขณะเดียวกันถ้าใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น V_x และ V_y ให้เป็นความเร็วเชิงมุม w_1 และ w_2 ดังรูปที่ 2.8 (ซ้าย) เราจะได้ ซีวีที ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ ถ้าม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ ซีวีที เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของ steering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle (α) แกนของ steering rollers (ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับล้อในรูปซ้าย) ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ d_1 และ d_2 (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ w_1 และ ล้อขับ w_2) เปลี่ยนไป มีผลทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด w_1/w_2 เท่ากับ d_1 / d_2 เราเรียก ซีวีที ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ ซีวีที เสมอ ดังรูปที่ 2.9 ที่ Moore [5] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด1.5นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ และเรียกว่า Tetrahedral CVT



รูปที่ 2.9 Tetrahedral CVT [5]

2.3 ต้นแบบ Double CVT

อุปกรณ์ต้นแบบ Double CVT นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย [12] อุปกรณ์นี้ประกอบไปด้วย Tetrahedral CVT 2 ชุดมาต่อเข้าด้วยกันโดยมีแกนสมมาตรอยู่ตรงกึ่งกลางของอุปกรณ์ โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นมาแสดงดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงถึงรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT [12]

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดอุปกรณ์หลักๆของ Double CVT คือ

1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทำจากอะคิลิค ที่มีความกลมเที่ยงตรงสูง
2. ชุด Input ที่ประกอบด้วยมอเตอร์ ที่ใช้สำหรับส่งกำลังให้กับ ISVT และล้อยูลิเทนสำหรับใช้หมุนลูกแก้วอะคิลิค
3. ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทด (Steering Wheel) ที่ประกอบด้วย Steering motor ที่ใช้สำหรับปรับมุมของล้อปรับอัตราทด และล้อยูลิเทนสำหรับปรับแกนหมุนของลูกแก้วอะคิลิค
4. ชุด Output ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ชุด ประกอบด้วยล้อยูลิเทนสำหรับรับอัตราทดจากลูกแก้วอะคิลิค และเพลา Output สำหรับ ต่ออุปกรณ์นำอัตราทดที่ส่งออกจาก ISVT ไปใช้งาน

อุปกรณ์ Double CVT ที่ออกแบบนี้แต่ละข้างของ Double CVT สามารถทำงานร่วมกันหรือแยกกันอย่างอิสระได้โดยปลดตัว coupling ที่ต่ออยู่ที่ชุด Input ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.10 ส่วนชุด Steering Wheel นั้นทั้งสองข้างใช้มอเตอร์ควบคุมอิสระต่อกัน เพียงสั่งการให้มอเตอร์หมุนไปเป็นมุมที่เท่ากันหรือต่างกัน ก็จะสามารถกำหนดให้ Output ทั้งสองข้างของ Double CVT มีอัตราทดที่เท่ากันหรือต่างกัน อุปกรณ์ต้นแบบ Double CVT นี้แสดงในรูปที่ 2.11

รูปที่ 2.11 ต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็ว
แบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double CVT

ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT นี้ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยแผ่นฐาน (Base) นั้นทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เพื่อความแข็งแรง เพลาต่างๆที่ใช้ ทำมาจาก เหล็กกล้า ส่วนประกอบขึ้นรูปอื่นๆใช้ อลูมินัม เป็นวัสดุหลัก ลูกแก้วที่ใช้ทำมาจาก อะคิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และลูกล้อที่ใช้ทำโดยการเคลือบยูลิเทนที่ความแข็ง CHA80 ลงบนแกนล้อที่ทำจากเหล็ก

หลักการทำงานของ Double CVT คือ เมื่อมี Input จากมอเตอร์ขับ เพื่อให้ลูกทรงกลมอะคิกลิกหมุน แกนหมุนของลูกแก้วจะถูกกำหนดด้วยการปรับมุมของชุดบังคับเลี้ยว (Steering wheel) ไปเป็นมุม (α) ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2. ทำให้ได้ความเร็วที่ออกทาง Output นั้นมีค่าต่างๆกันออกไป ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดอัตราส่วนการทดรอบระหว่างล้อ input และล้อ output โดยการปรับเปลี่ยนมุมของคู่ล้อบังคับเลี้ยว (α) นั้นเอง

ข้อดีของระบบการขับเคลื่อนที่ใช้ในอุปกรณ์นี้ คือ มีความต่อเนื่องระหว่างการเปลี่ยนความเร็ว แต่มีข้อเสียคือ การถ่ายทอดกำลังขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียดังกล่าวมิได้เป็นข้อจำกัดในการออกแบบเพราะในภายหลังสามารถพิจารณาใช้วัสดุที่มีความความเสียดทานและคงทนสูง

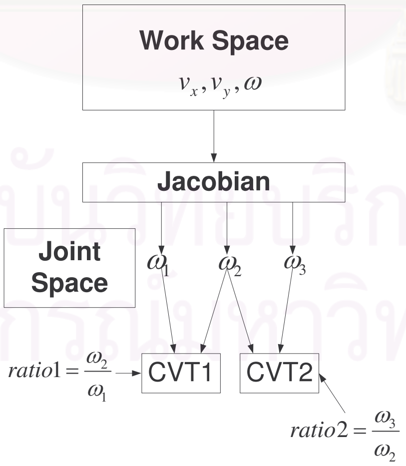
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีที

การทำงานของซีวีที (CVTs :Continuous Variable Transmission) นั้นเป็นการควบคุมอัตราทดระหว่างความเร็ว 2 แกน ในกรณีที่ต้องการควบคุมอัตราทดของความเร็วมากกว่า 2 แกนขึ้นไปนั้นจำเป็นต้องใช้ซีวีทีมากกว่า 1 ตัว ดังนั้นในการทำงานดังกล่าวจึงต้องอาศัยการเชื่อมโยงโครงข่ายของซีวีทีในการทำงาน การเชื่อมโยงโครงข่ายนั้นอาจทำได้โดยการเชื่อมโยงซีวีทีแต่ละตัวเข้ากับความเร็วที่ต้องการควบคุมอัตราทดทีละคู่ๆซึ่งก็เรียกว่าการต่อเชื่อมโครงข่ายแบบอนุกรม หรืออาจทำโดยการเชื่อมโยงซีวีทีทุกตัวเข้ากับแกนหมุนร่วมตัวกลาง โดยควบคุมอัตราทดระหว่างความเร็วทุกแกนกับความเร็วของแกนหมุนตัวกลาง ซึ่งเรียกว่าการต่อเชื่อมโครงข่ายแบบขนาน การเชื่อมโยงโครงข่ายของซีวีทีทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน มีรายละเอียดดังนี้จะอธิบายดังต่อไปนี้

3.1 การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีทีแบบอนุกรม

การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีทีแบบอนุกรมเป็นการเชื่อมจอยท์ (Joint) เข้ากับซีวีทีแต่ละตัว ทีละคู่จนได้อัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของทุกคู่จอยท์ ดังนั้นถ้าหุ่นยนต์โคบอทมีอยู่ n จอยท์ จะต้องใช้ซีวีทีทั้งสิ้น n-1 ตัว

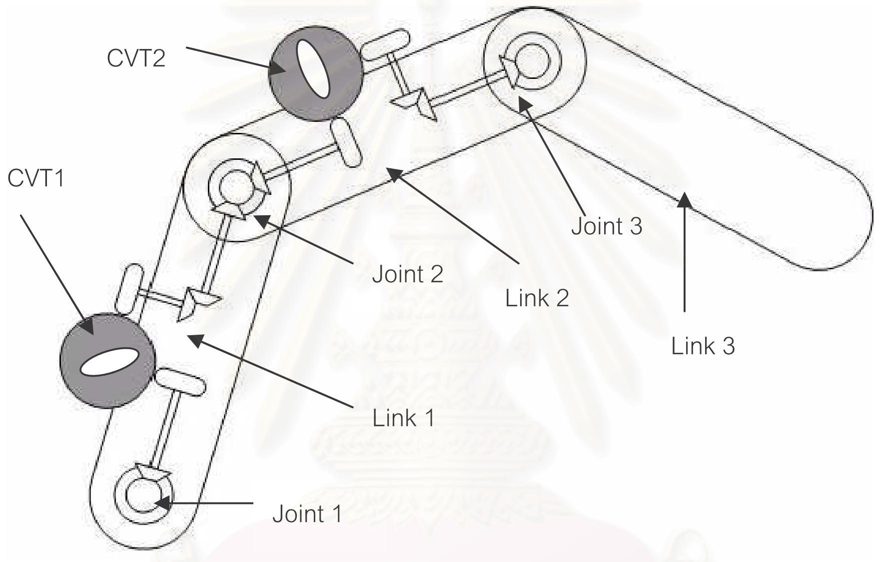


รูปที่ 3.1 การต่อโครงข่ายของซีวีทีแบบอนุกรมในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์

พิจารณารูปที่ 3.1 เป็นตัวอย่างการต่อโครงข่ายซีวีทีแบบอนุกรมของหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์ โดยความเร็วที่ตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์โคบอทคือ v_x, v_y และ ω ตามลำดับ และ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเร็วเชิงมุมของจอยท์ทั้ง 3 คือ ω_1, ω_2 และ ω_3 ตามลำดับ ซีวีทีตัวแรกต่อเข้ากับจอยท์ 1 และ 2 ซีวีทีอีกตัวต่อเข้ากับจอยท์ 2 และ 3 ทำให้สามารถหาอัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมระหว่างจอยท์ 1 และ จอยท์ 2 และระหว่างจอยท์ 2 และ จอยท์ 3 ทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของจอยท์ทั้งสามได้ เมื่อความเร็วเชิงมุมทั้ง 3 ผ่านจาโคเบียน (Jacobian) ก็จะสามารถควบคุมความสัมพันธ์ระหว่าง v_x, v_y และ ω ทำให้สามารถควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์โคบอทได้ และในทางกลับกันถ้าต้องการความสัมพันธ์ระหว่าง v_x, v_y และ ω ก็สามารถส่งผ่านค่าดังกล่าวผ่านจาโคเบียนผกผัน (Jacobian Inverse) เพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่าง ω_1, ω_2 และ ω_3 ได้



รูปที่ 3.2 การต่อซีวีที 2 ตัวในลักษณะของอนุกรมเข้ากับแขนกล 3 จอยท์

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการต่อซีวีที 2 ตัวแบบอนุกรมเข้ากับโคบอท 3 จอยท์ แกนหมุนของจอยท์ 1 ต่อผ่านเฟืองทดเข้ากับซีวีทีตัวแรก แกนหมุนของจอยท์ 2 ต่อผ่านเฟืองทดเข้ากับซีวีที 2 ตัว เมื่อต่อเข้าซีวีทีตัวแรกจะทำให้ควบคุมอัตราทดของความเร็วเชิงมุมของจอยท์ 1 และจอยท์ 2 ได้ จากซีวีทีตัวแรก ส่วนซีวีทีอีกตัวต่อเข้ากับจอยท์ 2 และ จอยท์ 3 ทำให้ควบคุมอัตราทดของความเร็วเชิงมุมของจอยท์ 2 และ จอยท์ 3

3.2 การต่อเชื่อมโครงข่ายซีวีทีแบบขนาน

การต่อโครงข่ายซีวีทีแบบขนานนี้จะมีเพลากลาง (Common shaft) อยู่โดยซีวีทีทุกตัวต่อเข้ากับ เพลากลางด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับจอยท์แต่ละจอยท์ ซีวีทีแต่ละชุดสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของแต่ละจอยท์กับความเร็วเชิงมุมของเพลากลาง ในการต่อแบบนี้ถ้าหุ่นยนต์โคบอทมี n จอยท์จะต้องมีจำนวนซีวีทีทั้งสิ้น n ซีวีที ซึ่งจะมีซีวีทีที่เกินความจำเป็นมา 1 ตัว เหตุผลที่ออกแบบวิธีต่อวิธีนี้ก็คือ เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราทดที่ซีวีทีสร้างขึ้นมีค่ามากเกินไป[6] เช่นในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์ ถ้าอัตราเร็วเชิงมุมของจอยท์ 2 มีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ จะได้ว่า ซีวีที 2 ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของจอยท์ 3 และจอยท์ 2 จะต้องมีค่าเป็นอนันต์

$$\omega_2 \rightarrow 0....\mathrm{T}_2 = \frac{\omega_3}{\omega_2} \rightarrow \infty \tag{3.1}$$

ในกรณีที่มีเพลากลางจะได้ว่าความเร็วของเพลากลางคือ

$$\omega_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \omega_i}{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{T}_i} \tag{3.2}$$

เมื่อ ω_0 คือความเร็วเชิงมุมของเพลากลาง

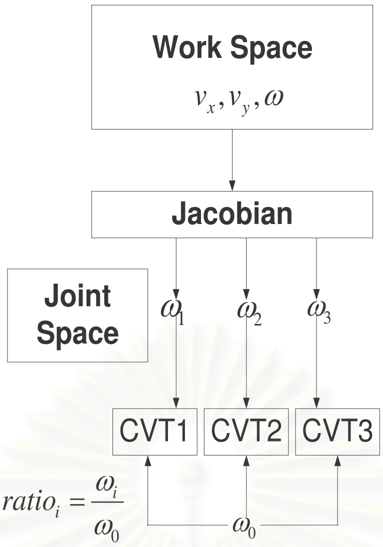
ω_i คือความเร็วเชิงมุมของแต่ละจอยท์ที่ต่อเข้ากับซีวีทีแต่ละตัว

T_i คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของแต่ละจอยท์กับความเร็วเชิงมุมของเพลากลาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

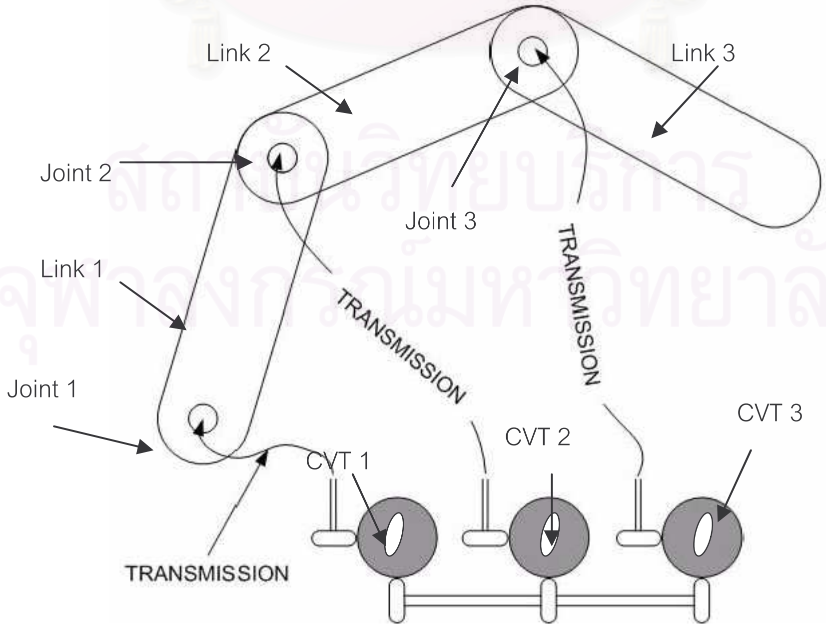
จากสมการ (3.2) จะเห็นได้ว่าค่า ω_0 ซึ่งเป็นตัวหารในการหาอัตราทดจะไม่เป็น 0 ถ้าจอยท์ทั้งหลายมีความเร็ว ดังนั้นอัตราทดที่ซีวีทีแต่ละตัวสร้างขึ้นจึงจะไม่มีค่าเข้าใกล้อนันต์

ตัวอย่างโครงข่ายของซีวีทีแบบขนานในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การต่อโครงข่ายของซีวีทีแบบขนานในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์

ดังเช่นในกรณีของการต่อแบบอนุกรม รูปที่ 3.3 แสดงหลักการควบคุมทางเดินและการส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ผ่านจาโคเบียนก็เป็นเช่นเดียวกัน แต่ในกรณีการต่อแบบขนานนี้ ความเร็วเชิงมุมของจอยท์ทั้ง 3 จะส่งผ่านเข้ากับซีวีทีแต่ละตัวโดยไม่ต้องจับกันเป็นคู่ๆก่อน จากนั้นเมื่อซีวีทีแต่ละตัวสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของแต่ละจอยท์กับความเร็วเชิงมุมของเพลากลางซึ่งความเร็วเชิงมุมของเพลากลางก็เป็นผลมาจากความเร็วเชิงมุมของทุกจอยท์ ดังสมการ (3.2) ก็จะทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของทุกจอยท์ได้อิสระ



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการต่อซีวีที 3 ตัวเข้ากับแขนกล 3 จอยท์แบบขนาน

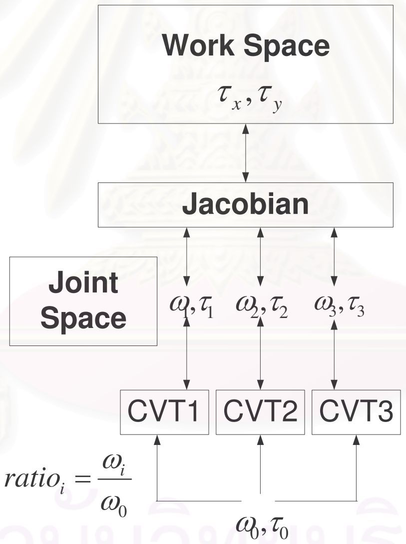
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการต่อซีวีทีแบบขนานกับแขนกล 3 จอยท์ การออกแบบค่อนข้างจะมีความซับซ้อนมากกว่าแบบอนุกรม ซีวีทีทั้ง 3 จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปกับแขนกลได้ มิฉะนั้นก็ต้องออกแบบระบบส่งกำลัง (Transmission) ของซีวีทีกับเพลากลางเป็นแบบพิเศษ จากรูปที่ 3.4 เมื่อซีวีทีไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้ไม่สามารถใช้เฟืองทดส่งกำลังได้ จึงต้องอาศัยระบบส่งกำลังที่สามารถทำให้แขนกลเคลื่อนที่ไปได้ซึ่งอาจจะเป็นการใช้สายเคเบิลเป็นต้น

นอกจากนี้การต่อแบบขนานจะทำให้สามารถใส่กำลัง (Power) เข้าไปได้อีก ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.3 โคบอทแบบใส่กำลัง (Power Cobot)

ในการต่อแบบขนานถ้าเราใส่กำลังให้กับเพลากลางจะทำให้สามารถส่งถ่ายกำลังขึ้นที่ตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์โคบอท แต่ทิศทางการเคลื่อนที่ยังควบคุมเหมือนเดิม ตัวอย่างของการต่อโครงข่ายในกรณีโคบอทแบบใส่กำลัง 3 จอยท์แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การใส่กำลังในกรณีหุ่นยนต์โคบอท 3 จอยท์

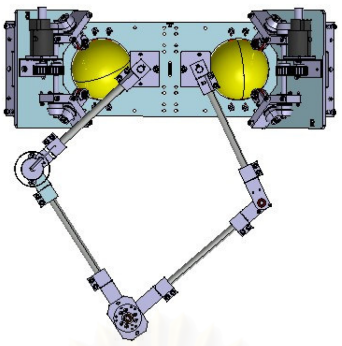
ในกรณีนี้ดังรูปที่ 3.5 นอกจากจะต้องส่งผ่านความเร็วแล้วยังต้องส่งผ่านค่าแรงบิดที่ปลายแขนทั้งในแนวแกน x และ y คือ τ_x และ τ_y ตามลำดับ ส่งผ่านกับค่าแรงบิดที่จอยท์ทั้ง 3 และแรงบิดที่ เพลากลางคือ τ_1 τ_2 τ_3 และ τ_0 ตามลำดับ การส่งผ่านค่าแรงบิดทั้ง 2 กรอบการทำงานทำได้โดยการส่งผ่านจาโคเบียนผกผัน เมื่อต้องการให้เกิดกำลังที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทก็ทำได้โดยใส่แรงบิดให้กับเพลากลางและผ่านจาโคเบียนผกผันกำลังที่ได้นี้จะเป็นกำลังที่เกิดขึ้นในทิศทางการเคลื่อนที่ของโคบอทเท่านั้น ซึ่งการควบคุมทิศทางก็ทำได้เช่นเดิม การที่กำลังที่เกิดขึ้นเกิดในทิศทางการเคลื่อนที่เท่านั้นทำให้เกิดความปลอดภัยในการทำงาน

บทที่ 4
จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

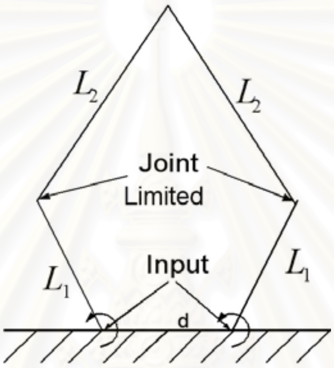
ในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งแขนกลแบบขนานสองมิติในรูปแบบของ Pantograph เข้ากับอุปกรณ์ต้นแบบ Double CVT เพื่อใช้เป็นต้นแบบหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ในการวิเคราะห์จลศาสตร์การเคลื่อนที่นั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทคือการวิเคราะห์จลศาสตร์การเคลื่อนที่ของแขนกลและการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกลแบ่งเป็นการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และสมการการเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ (Inverse Kinematics) การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งของแขนกลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์จลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทต่อไป การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทนั้นจะไม่วิเคราะห์เพียงแค่ตำแหน่ง แต่จะเป็นการวิเคราะห์ในมิติการเคลื่อนที่อื่นๆด้วยได้แก่ ความเร็วทั้งขนาดและทิศทาง ความโค้ง เวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ และระยะทางที่หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ไป การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการแปลงกรอบการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ทั้งของแขนกลและของโคบอทที่ใช้การต่อเชื่อมซีวีทีแบบขนาน[13] หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ในบทนี้เป็นหุ่นยนต์โคบอท 2 มิติ มีลักษณะเป็นรูปห้าเหลี่ยม (Pantograph) ซึ่งจะทำการอธิบายต่อไป

4.1 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกล

หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานนี้ จะเป็นหุ่นยนต์โคบอทแบบ 2 มิติ ลักษณะภายนอกของหุ่นยนต์โคบอทเป็นแขนกลแบบห้าแขน (5 Bars) ที่มีการต่อกันของกลไกแบบขนาน โดยข้อต่อ (Joint) ล่างทั้งสองของโคบอทจะต่อตรงกับเพลาขาออก (Output Shaft) ของ ซีวีที (CVTs: Continuous Variable Transmission) ที่วางอยู่ด้านล่างสุดดังแสดงในรูปที่ 4.2 โคบอทลักษณะของโคบอทดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 การออกแบบในลักษณะนี้มีข้อดีกว่าการออกแบบให้เป็นกลไกแบบแขนกล (Serial Link) คือ ไม่ต้องติดตั้งซีวีทีเข้าไปในแขนโดยตรง แต่ตั้งไว้ตรงฐานจะทำให้กลไกที่ได้มีน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกในการทดลองเกี่ยวกับพลวัตร



รูปที่ 4.1 โคบอทแบบขนาน 2 มิติ

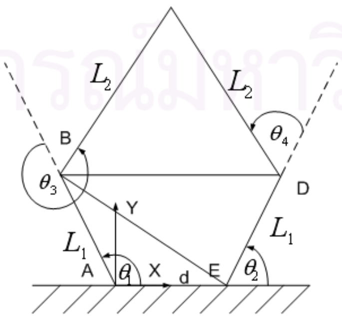


รูปที่ 4.2 แบบจำลองของโคบอท 2 มิติ

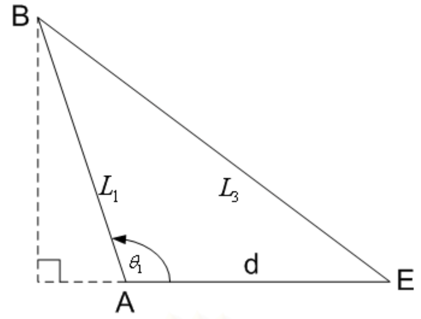
การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโคบอทนี้สามารถทำได้ดังนี้

4.1.1 เรขาคณิตวิเคราะห์

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์หาค่ามุมต่างๆของแขนกลก่อนเพื่อใช้ค่ามุมที่ได้ในการหาสมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าต่อไป พิจารณาดูรูปที่ 4.3 แขนกลวางตัวเป็นลักษณะห้าเหลี่ยม



รูปที่ 4.3 รูปแบบแขนกลแบบห้าเหลี่ยม



รูปที่ 4.4 สามเหลี่ยม ABE ที่สร้างเพื่อใช้ในการคำนวณ

สมมติมุมต่างๆแทนด้วยอักษร A B C D E ดังรูปที่ 4.3 พิจารณาสามเหลี่ยม ABE ดังรูปที่ 4.4 จะได้ว่าค่ามุมต่างๆสามารถคำนวณได้ดังนี้

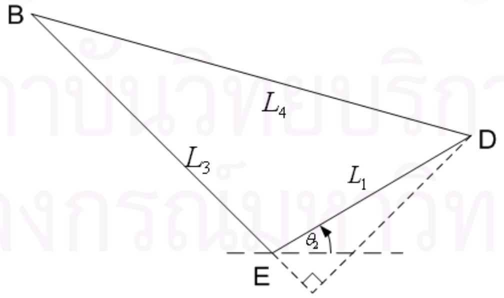
$$A\hat{E}B = a\tan 2\left(\frac{L_1 \sin(\theta_1)}{d - L_1\cos(\theta_1)}\right) \tag{4.1}$$

$$A\hat{B}E = 180 - \theta_1 - a\tan 2\left(\frac{L_1 \sin(\theta_1)}{d - L_1\cos(\theta_1)}\right) \tag{4.2}$$

และสามารถคำนวณค่าระยะทาง L_3 ได้ดังนี้

$$L_3 = d\cos(A\hat{E}B) + L_1\cos(A\hat{B}E) \tag{4.3}$$

เมื่อได้ค่า L_3 แล้ว พิจารณาสามเหลี่ยม BED สามารถคำนวณค่ามุมต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 สามเหลี่ยม BED ที่สร้างเพื่อใช้ในการคำนวณ

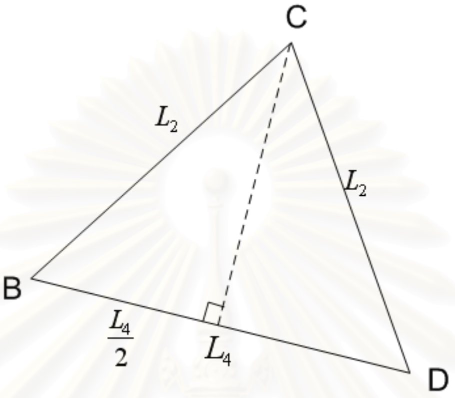
จากรูปที่ 4.5 จะได้

$$E\hat{B}D = a\tan 2\left(\frac{L_1 \sin(\theta_1)}{L_3 + L_1\cos(\theta_2 + A\hat{B}E)}\right) \tag{4.4}$$

$$E\hat{D}B = \theta_2 + A\hat{E}B - E\hat{B}D \tag{4.5}$$

และสามารถคำนวณค่าระยะทาง L_4 ได้ดังนี้

$$L_4 = L_1\cos(E\hat{D}B) + L_3\cos(E\hat{B}D) \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.6 สามเหลี่ยม BCD ที่สร้างเพื่อใช้ในการคำนวณ

เมื่อได้ค่า L_4 แล้ว พิจารณารูปที่ 4.6 สามเหลี่ยม BCD สามารถคำนวณค่ามุมต่างๆได้ดังนี้

$$D\hat{B}C = A\cos\left(\frac{L_4}{2L_2}\right) \tag{4.7}$$

$$B\hat{C}D = 180 - 2D\hat{B}C \tag{4.8}$$

ดังนั้นจะได้ว่าค่ามุม ABC และมุม EDC สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A\hat{B}C = A\hat{B}E + E\hat{B}D + D\hat{B}C = A\hat{B}C(\theta_1, \theta_2) \tag{4.9}$$

$$E\hat{D}C = E\hat{D}B + D\hat{B}C = E\hat{D}C(\theta_1, \theta_2) \tag{4.10}$$

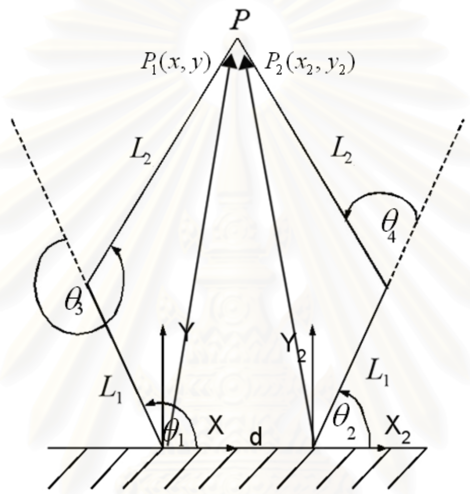
ซึ่งจะทำให้เราได้ว่าจากค่าตัวแปรต้นคือ θ_1 และ θ_2 จะสามารถคำนวณค่ามุม θ_3 และ θ_4 ได้ดังนี้

$$\theta_3 = 180 + A\hat{B}C(\theta_1, \theta_2) \tag{4.11}$$

$$\theta_4 = 180 - E\hat{D}C \tag{4.12}$$

4.1.2 สมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

เมื่อวิเคราะห์หาค่ามุมต่างๆของแขนกลได้แล้ว เราสามารถคำนวณตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลได้ การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์เสมือนว่าแขนกลที่ใช้นั้น เป็นแขนกลแบบแขนกล 2 ชุดต่อกัน ชุดแรกจะเป็นแขนกล 2 ข้อต่อโดยมุมของข้อต่อแต่ละอันคือ θ_1 และ θ_3 ส่วนชุดที่ 2 จะเป็นแขนกล 2 ข้อต่อโดยมุมของข้อต่อแต่ละอันคือ θ_2 และ θ_4 การคำนวณระยะทางของปลายแขนสามารถทำได้โดยการคำนวณจากชุดไหนก็ได้



รูปที่ 4.7 แบบจำลองแขนกลเพื่อใช้ในการคำนวณสมการไปข้างหน้า

จากรูปที่ 4.7 ตำแหน่งปลายแขน P จะมีเวคเตอร์บอกตำแหน่ง $P_1(x, y)$ จากพิกัดแขนด้านซ้าย และ $P_2(x_2, y_2)$ จากพิกัดแขนด้านขวา ซึ่งค่าเวคเตอร์ทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$x_2 = x - d \quad (4.13)$$

$$y_2 = y \quad (4.14)$$

จากมุมที่คำนวณได้สามารถคำนวณหาตำแหน่งปลายแขนทั้งจากการคิดสัมพัทธ์กับทั้ง 2 ชุดได้โดยใช้วิธีการทางหุ่นยนต์ (Robotics) [6] ได้ผลดังนี้

$$x = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_3) \quad (4.15)$$

$$y = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_3) \quad (4.16)$$

$$x_2 = L_1 \cos(\theta_2) + L_2 \cos(\theta_2 + \theta_4) \quad (4.17)$$

$$y_2 = L_1 \sin(\theta_2) + L_2 \sin(\theta_2 + \theta_4) \quad (4.18)$$

4.1.3 **สมการเคลื่อนที่แบบผกผัน** (Inverse Kinematics)

จากสมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เราสามารถคำนวณค่าสมการการเคลื่อนที่แบบผกผันได้ดังนี้

ค่าผกผันของ θ_3 หาได้ดังนี้

$$\cos(\theta_3) = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \tag{4.19}$$

$$\sin(\theta_3) = -\sqrt{1-\cos^2(\theta_3)} \tag{4.20}$$

$$\theta_3 = a\cos(\theta_3) \tag{4.21}$$

และจะได้ว่าค่าผกผันของ θ_1 คือ

$$\theta_1 = a\tan 2\begin{pmatrix} L_1 y + L_2\cos(\theta_3)\,y + L_2\sin(\theta_3)\,x, \\ L_1 x + L_2\cos(\theta_3)\,x - L_2\sin(\theta_3)\,y \end{pmatrix} \tag{4.22}$$

ค่าผกผันของ θ_4 หาได้ดังนี้

$$\cos(\theta_4) = \frac{(x-d)^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \tag{4.23}$$

$$\sin(\theta_4) = \sqrt{1-\cos(\theta_4^2)} \tag{4.24}$$

$$\theta_4 = a\cos(\theta_4) \tag{4.25}$$

และจะได้ว่าค่าผกผันของ θ_2 คือ

$$\theta_2 = a\tan 2\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} L_1 y + L_2\cos(\theta_4)\,y \\ -L_2\sin(\theta_4)(x-d) \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} L_1(x-d) + L_2\cos(\theta_4)(x-d) \\ +L_2\sin(\theta_4)\,y \end{pmatrix} \end{pmatrix} \tag{4.26}$$

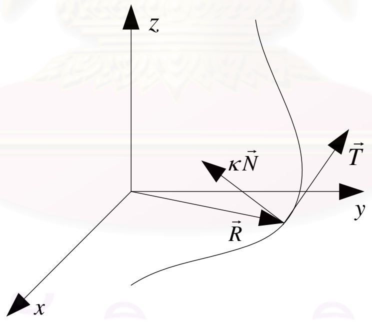
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การวิเคราะห์จลศาสตร์การเคลื่อนที่ของโคบอท

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโคบอทแบบขนานจะมีหลักการวิเคราะห์คล้ายกับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโคบอทแบบอนุกรม กล่าวคือจะมีการวิเคราะห์หาจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและย้อนกลับของตัวหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ นอกจากนี้แล้วต้องมีการแปลงรูปจากกรอบการทำงานหนึ่งไปยังอีกกรอบการทำงานต่อไป กรอบการทำงานในกรณีแบบขนานนี้ก็มี 4 ประเภทคือ ปริภูมิตำแหน่งปลาย (Configuration Space : C_T) บอกถึงการเคลื่อนที่ของปลายแขนของโคบอท ปริภูมิจอยท์ (Joint Space : C_J) บอกถึงการเคลื่อนที่ของจอยท์ของโคบอท ปริภูมิการจับคู่ (Coupling Space : Σ_i) บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของข้อต่อแต่ละคู่ซึ่งสร้างความสัมพันธ์กันโดยผ่านกลไกของซีวีที และ ปริภูมิของมุมปรับอัตราทด (Steering Space : Φ) บอกถึงมุมที่ซีวีทีต้องหมุนปรับไป แต่ในรายละเอียดของปริภูมิของมุมปรับอัตราทด จะมีความแตกต่างกัน รายละเอียดดังกล่าวเป็นดังนี้

4.2.1 ปริภูมิตำแหน่งปลาย (Configuration Space : C_T)

กรอบการเคลื่อนที่นี้จะเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเคลื่อนที่ในปริภูมิตำแหน่งปลาย

จากรูปที่ 4.8 สามารถกำหนดตำแหน่งที่ปลายแขนของโคบอทที่ใช้วิเคราะห์ในบทนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T \tag{4.27}$$

เมื่อ $\vec{R}$ คือเวคเตอร์ที่ระบุตำแหน่งที่ปลายแขน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว สำหรับหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่สำคัญคือการวิเคราะห์หาทิศทางการเคลื่อนที่ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องทำการวิเคราะห์หาเวคเตอร์สัมผัสกับการเคลื่อนที่ $\vec{T}$ และเวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ $\kappa\vec{N}$ (เคอร์เวเจอร์เวคเตอร์) ซึ่งหาได้จาก

$$\vec{T} = \frac{d\vec{R}}{ds} \tag{4.28}$$

$$\kappa\vec{N} = \frac{d\vec{T}}{ds} \tag{4.29}$$

เมื่อ s คือระยะทางที่ปลายแขนเคลื่อนที่ไป

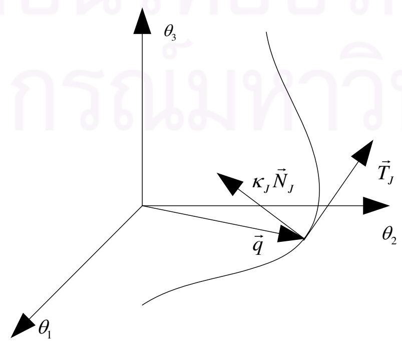
κ คือความโค้งของการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นค่าผกผันกับรัศมีความโค้งของการเคลื่อนที่

$\vec{N}$ คือเวคเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

ซึ่งเมื่อทำการหาค่าเวคเตอร์สัมผัสกับทิศทางการเคลื่อนที่ได้แล้วก็จะสามารถทราบถึงทิศทางที่ปลายแขนจะทำการเคลื่อนที่ไป ส่วนเวคเตอร์ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ เอาไว้ใช้เป็นสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท ที่จะกล่าวถึงในส่วนของการควบคุมหุ่นยนต์ต่อไป

4.2.2 **ปริภูมิจอยท์** (Joint Space : C_J)

กรอบการเคลื่อนที่นี้จะเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจอยท์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติดังในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์

จากรูปที่ 4.9 สามารถกำหนดเวคเตอร์ตำแหน่งของจอยท์ของโคบอทที่ใช้วิเคราะห์ในบทนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T \tag{4.30}$$

และ $\vec{q}$ มีความสัมพันธ์กับเวคเตอร์การเคลื่อนที่ที่ปลายแขน $\vec{R}$ ดังนี้

$$\vec{q} = L(\vec{R}) \tag{4.31}$$

เมื่อ L คือจลนศาสตร์แบบผกผันดังที่ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.1.3

สามารถหาเวคเตอร์การเคลื่อนที่ใน C_J ได้จากสมการดังข้างล่างนี้ เพื่อหาเวคเตอร์สัมผัสกับทิศทางการเคลื่อนที่ $\vec{T}_J$ และเวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่คือ $\kappa_J \vec{N}_J$ ได้ดังนี้

$$\vec{T}_J = \frac{d\vec{q}}{ds_J} \tag{4.32}$$

$$\kappa \vec{N}_J = \frac{d\vec{T}_J}{ds_J} \tag{4.33}$$

โดยที่ s_J คือระยะทางการเคลื่อนที่ที่วัดได้ในกรอบการเคลื่อนที่ของปริภูมิจอยท์

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวคเตอร์การเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์กับเวคเตอร์การเคลื่อนที่ในปริภูมิตำแหน่งปลายได้จากสมการ ดังนี้

$$\vec{T}_J = \frac{J\vec{T}}{\left|J\vec{T}\right|} \tag{4.34}$$

$$\kappa_J \vec{N}_J = \frac{\left[\mathrm{I} - \vec{T}_J \vec{T}_J^T \right]}{\left|J\vec{T}\right|^2} \left[\vec{T}^T H_i \vec{T} + J\kappa \vec{N} \right] \tag{4.35}$$

โดยการแทนค่า θ_1 และ θ_2 สามารถคำนวณหาจาโคเบียนเมตริกซ์และเฮเซียนเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$J = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \theta_1}{\partial x} & \dfrac{\partial \theta_1}{\partial y} \\ \dfrac{\partial \theta_2}{\partial x} & \dfrac{\partial \theta_2}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2} & \frac{\partial^2\theta_1}{\partial x\partial y} \\ \frac{\partial^2\theta_1}{\partial y\partial x} & \frac{\partial^2\theta_1}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2\theta_2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2\theta_2}{\partial x\partial y} \\ \frac{\partial^2\theta_2}{\partial y\partial x} & \frac{\partial^2\theta_2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

ต่อมาทำการแทนค่า $\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4$ เพื่อหาค่าเมตริกซ์ดังกล่าวได้ค่าดังต่อไปนี้

จากสมการ (4.22) และ (4.26) กำหนดให้

$$U_1 = L_1 y + L_2 K_1 y + L_2\sqrt{1-K_1^2}\,x \quad (4.39)$$

$$V_1 = L_1 x + L_2 K_1 x - L_2\sqrt{1-K_1^2}\,y \quad (4.40)$$

$$U_2 = L_1 y + L_2 K_2 y + L_2\sqrt{1-K_2^2}\,(x-d) \quad (4.41)$$

$$V_2 = L_1(x-d) + L_2 K_2 (x-d) - L_2\sqrt{1-K_2^2}\,y \quad (4.42)$$

โดยที่

$$K_1 = \cos(\theta_3) = \frac{x^2+y^2-L_1^2-L_2^2}{2L_1L_2} \quad (4.43)$$

$$K_2 = \cos(\theta_4) = \frac{(x-d)^2+y^2-L_1^2-L_2^2}{2L_1L_2} \quad (4.44)$$

จะได้ว่า

$$J_{(11)} = \frac{\partial\theta_1}{\partial x} = \frac{V_1\frac{\partial U_1}{\partial x} - U_1\frac{\partial V_1}{\partial x}}{U_1^2+V_1^2} \quad (4.45)$$

$$J_{(12)} = \frac{\partial\theta_1}{\partial y} = \frac{V_1\frac{\partial U_1}{\partial y} - U_1\frac{\partial V_1}{\partial y}}{U_1^2+V_1^2} \quad (4.46)$$

$$J_{(21)} = \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = \frac{V_2 \dfrac{\partial U_2}{\partial x} - U_2 \dfrac{\partial V_2}{\partial x}}{U_2^2 + V_2^2} \tag{4.47}$$

$$J_{(22)} = \frac{\partial \theta_2}{\partial y} = \frac{V_2 \dfrac{\partial U_2}{\partial y} - U_2 \dfrac{\partial V_2}{\partial y}}{U_2^2 + V_2^2} \tag{4.48}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} J_{(11)} & J_{(12)} \\ J_{(21)} & J_{(22)} \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

$$H_{1(11)} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = \frac{\left(\left(U_1^2 + V_1^2\right)\left(V_1 \dfrac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} - U_1 \dfrac{\partial^2 V_1}{\partial x^2}\right) - 2\left(V_1 \dfrac{\partial U_1}{\partial x} - U_1 \dfrac{\partial V_1}{\partial x}\right)\left(U_1 \dfrac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \dfrac{\partial V_1}{\partial x}\right) \right)}{(U_1^2 + V_1^2)^2} \tag{4.50}$$

$$H_{1(22)} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} = \frac{\left(\left(U_1^2 + V_1^2\right)\left(V_1 \dfrac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} - U_1 \dfrac{\partial^2 V_1}{\partial y^2}\right) - 2\left(V_1 \dfrac{\partial U_1}{\partial y} - U_1 \dfrac{\partial V_1}{\partial y}\right)\left(U_1 \dfrac{\partial U_1}{\partial y} + V_1 \dfrac{\partial V_1}{\partial y}\right) \right)}{(U_1^2 + V_1^2)^2} \tag{4.51}$$

$$H_{1(12)} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x \partial y} = \frac{\left(\left(U_1^2 + V_1^2\right)\left(\dfrac{\partial V_1}{\partial y}\dfrac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \dfrac{\partial^2 U_1}{\partial x \partial y} - \dfrac{\partial U_1}{\partial y}\dfrac{\partial V_1}{\partial x} - U_1 \dfrac{\partial^2 V_1}{\partial x \partial y}\right) - 2\left(V_1 \dfrac{\partial U_1}{\partial x} - U_1 \dfrac{\partial V_1}{\partial x}\right)\left(U_1 \dfrac{\partial U_1}{\partial y} + V_1 \dfrac{\partial V_1}{\partial y}\right) \right)}{(U_1^2 + V_1^2)^2} \tag{4.52}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$H_{1(21)} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y \partial x} = \frac{\left(U_1^2 + V_1^2\right)\left(\begin{array}{l} \frac{\partial V_1}{\partial x}\frac{\partial U_1}{\partial y} + V_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial y \partial x} \\ -\frac{\partial U_1}{\partial x}\frac{\partial V_1}{\partial y} - U_1 \frac{\partial^2 V_1}{\partial y \partial x} \end{array}\right) - 2\left(\begin{array}{l} V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} \\ -U_1 \frac{\partial V_1}{\partial y} \end{array}\right)\left(\begin{array}{l} U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \\ +V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} \end{array}\right)}{(U_1^2 + V_1^2)^2} \tag{4.53}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} H_{1(11)} & H_{1(12)} \\ H_{1(21)} & H_{1(22)} \end{bmatrix} \tag{4.54}$$

$$H_2(11) = \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} = \frac{\left(U_2^2 + V_2^2\right)\left(V_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} - U_2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial x^2}\right) - 2\left(\begin{array}{l} V_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} \\ -U_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} \end{array}\right)\left(\begin{array}{l} U_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} \\ +V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} \end{array}\right)}{(U_2^2 + V_2^2)^2} \tag{4.55}$$

$$H_{2(22)} = \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} = \frac{\left(U_2^2 + V_2^2\right)\left(V_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} - U_2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial y^2}\right) - 2\left(\begin{array}{l} V_2 \frac{\partial U_2}{\partial y} \\ -U_2 \frac{\partial V_2}{\partial y} \end{array}\right)\left(\begin{array}{l} U_2 \frac{\partial U_2}{\partial y} \\ +V_2 \frac{\partial V_2}{\partial y} \end{array}\right)}{(U_2^2 + V_2^2)^2} \tag{4.56}$$

$$H_{2(12)} = \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x \partial y} = \frac{\left(U_2^2 + V_2^2\right)\left(\begin{array}{l} \frac{\partial V_2}{\partial y}\frac{\partial U_2}{\partial x} + V_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial x \partial y} \\ -\frac{\partial U_2}{\partial y}\frac{\partial V_2}{\partial x} - U_2 \frac{\partial^2 V_2}{\partial x \partial y} \end{array}\right) - 2\left(\begin{array}{l} V_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} \\ -U_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} \end{array}\right)\left(\begin{array}{l} U_2 \frac{\partial U_2}{\partial y} \\ +V_2 \frac{\partial V_2}{\partial y} \end{array}\right)}{(U_2^2 + V_2^2)^2} \tag{4.57}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$H_{2(21)}=\frac{\partial^2\theta_2}{\partial y\partial x}=\frac{\begin{pmatrix}\left(U_2^2+V_2^2\right)\begin{pmatrix}\frac{\partial V_2}{\partial x}\frac{\partial U_2}{\partial y}+V_2\frac{\partial^2 U_2}{\partial y\partial x}\\-\frac{\partial U_2}{\partial x}\frac{\partial V_2}{\partial y}-U_2\frac{\partial^2 V_2}{\partial y\partial x}\end{pmatrix}\\-2\begin{pmatrix}V_2\frac{\partial U_2}{\partial y}\\-U_2\frac{\partial V_2}{\partial y}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}U_2\frac{\partial U_2}{\partial x}\\+V_2\frac{\partial V_2}{\partial x}\end{pmatrix}\end{pmatrix}}{(U_2^2+V_2^2)^2} \tag{4.58}$$

$$H_2=\begin{bmatrix}H_{2(11)} & H_{2(12)}\\H_{2(21)} & H_{2(22)}\end{bmatrix} \tag{4.59}$$

โดยที่ $A_{(ij)}$ คือสมาชิกในแถวที่ i หลักที่ j ของเมตริกซ์ A

4.2.3 **ปริภูมิการจับคู่** (Coupling Space : Σ_i)

ปริภูมิการจับคู่ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของจอยท์ทีละคู่ ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ในกรณีการต่อแบบนี้ก็จะได้ว่าเวคเตอร์ที่ระบุตำแหน่งในปริภูมิการจับคู่เป็นดังสมการ (4.60) คือ

$$r_i=\mathrm{M}_i(q) \tag{4.60}$$

เมื่อ M_i เป็นเมตริกซ์ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของจอยท์เป็นคู่ๆ

ในกรณีตัวอย่างนี้ซึ่งมีจอยท์อยู่ 2 ตัวคือ θ_1 และ θ_2 จะได้ว่า

$$\vec{r}=\begin{bmatrix}\theta_1\\\theta_2\end{bmatrix} \tag{4.61}$$

ปริภูมิการจับคู่จะมีเวคเตอร์สัมผัสกับทิศทางการเคลื่อนที่ $\vec{t}_i$ และเวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่คือ $\kappa_i\vec{n}_i$ ซึ่งสัมพันธ์กับเวคเตอร์ในปริภูมิจอยท์เหมือนในกรณีการต่อแบบอนุกรมดังนี้

$$\vec{t}_i = \frac{D_i\vec{T}_J}{\left|D_i\vec{T}_J\right|} \tag{4.62}$$

$$\kappa_i\vec{n}_i = \frac{\left[\mathrm{I}-\vec{t}_i\vec{t}_i^{\,T}\right]}{\left|D\vec{T}_J\right|^2}\left[D_i\kappa_J\vec{N}_J\right] \tag{4.63}$$

โดยที่

$$D_i = \frac{\partial \mathrm{M}_i}{\partial \vec{q}} \tag{4.64}$$

ในกรณีตัวอย่างนี้ซึ่งมีจอยท์อยู่ 2 ตัวคือ θ_1 และ θ_2 จะสามารถหาเมตริกซ์ D ได้ดังนี้

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.65}$$

แต่สำหรับโคบอทที่เราวิเคราะห์ในบทนี้มีเพียง 2 จอยท์ซึ่งก็คือ θ_1 และ θ_2 ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องจับคู่การเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์อีกต่อไป เพราะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของจอยท์อยู่เพียงคู่เดียว ดังนั้นจึงได้ว่าในที่นี้ปริภูมิจอยท์ของเราจึงเป็นปริภูมิการจับคู่ไปในตัวนั่นเอง

4.2.4 **ปริภูมิของมุมปรับอัตราทด** (Steering Space : Φ_i)

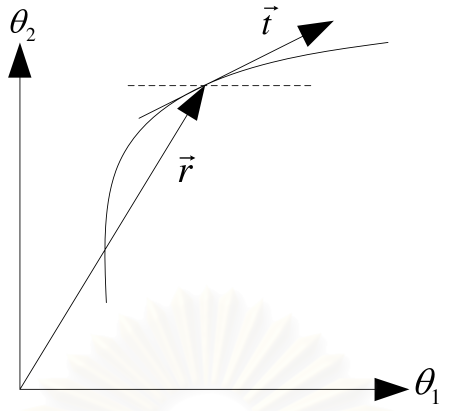
การเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่ในกรณีตัวอย่างเป็นดังรูปที่ 4.10 เวคเตอร์สัมผัสกับการเคลื่อนที่ $\vec{t}$ สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\vec{t}_i = \left[t_{i1} \quad t_{i2}\right]^T \tag{4.66}$$

โดยที่ t_{i1} คือสมาชิกตัวแรกของเวคเตอร์ $\vec{t}_i$

t_{i2} คือสมาชิกตัวที่ 2 ของเวคเตอร์ $\vec{t}_i$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่ของโคบอทแบบขนาน 2 มิติ

ดังเช่นในแบบอนุกรมจะได้ว่าอัตราทดระหว่างความเร็วของจอยท์แต่ละคู่เป็นดังนี้

$$\mathrm{T}r_i = \frac{t_{i2}}{t_{i1}} \tag{4.67}$$

เมื่อ $\mathrm{T}r_i$ คืออัตราทดระหว่างความเร็วของจอยท์แต่ละคู่

จากค่าอัตราทดที่ได้จากสมการ (4.67) ทำให้เราทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของจอยท์แต่ละคู่ แต่ในกรณีโคบอทแบบขนานนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่สามารถนำไปสู่การคำนวณค่ามุมปรับอัตราทดของซีวีทีแต่ละตัวได้เนื่องจากซีวีทีแต่ละตัวไม่ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของจอยท์แต่ละคู่ แต่จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแต่ละจอยท์กับความเร็วของเพลากลางดังสมการ (4.68)

$$\mathrm{T}r_{ci} = \frac{\omega_i}{\omega_0} \tag{4.68}$$

เมื่อ $\mathrm{T}r_{ci}$ คืออัตราทดระหว่างความเร็วของจอยท์ที่ i กับความเร็วของเพลากลาง

ω_i คือความเร็วของจอยท์ที่ i

ω_0 คือความเร็วของเพลากลาง

ในกรณีที่มีซีวีทีอยู่จำนวน n ตัว จะได้ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแต่ละจอยท์กับความเร็วของเพลากลางทั้งสิ้นอยู่ n ความสัมพันธ์ แต่จำนวนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของจอยท์แต่ละคู่มีทั้งสิ้น n-1 ความสัมพันธ์ ดังนั้นการจะหาค่าอัตราทดของซีวีที $\mathrm{T}r_{ci}$ จากอัตราทดระหว่างจอยท์แต่ละคู่ $\mathrm{T}r_i$ จึงยังไม่สามารถทำได้เนื่องจากจำนวนสมการไม่เพียงพอ

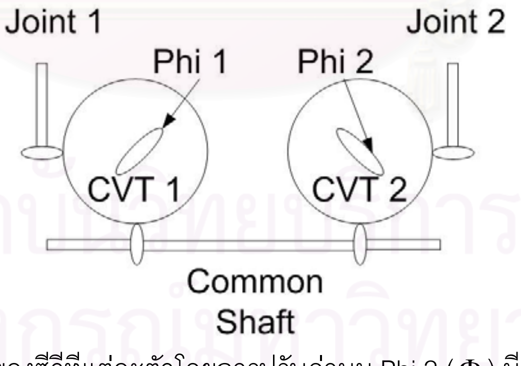
ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการสำหรับการหาค่าอัตราทดของซีวีทีเพิ่มเติมเช่น การกำหนดให้อัตราทดของซีวีทีตัวนึงมีค่าเท่ากับ 1 ดังเช่นที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ก็ทำให้สามารถหาผลเฉลยของค่าอัตราทดของซีวีทีทุกค่าได้ และเมื่อทราบค่าอัตราทดของซีวีทีทุกค่าแล้วก็สามารถหาค่ามุมปรับอัตราทดของซีวีทีแต่ละตัวได้ดังนี้

$$\mathrm{T}r_{ci} = \frac{\tan\Phi_i - \sqrt{2}}{\tan\Phi_i + \sqrt{2}} \tag{4.69}$$

$$\Phi_i = a\tan\left(\sqrt{2}\times\tan\left(a\tan\left(\mathrm{T}r_{ci}\right)+\frac{\pi}{4}\right)\right)+\frac{\pi}{4} \tag{4.70}$$

4.3 การเลือกใช้ค่าอัตราทดของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ เลือกใช้ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทดถึงสองชุดก็เนื่องจากต้องการที่จะนำไปใช้ในการควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอท ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทต่อไป แต่ในที่นี้ต้องการที่จะควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ดังนั้นจึงกำหนดให้ ชุด CVT ชุดหนึ่งมีค่าอัตราทดคงที่เท่ากับ 1 ตลอด เช่นให้ CVT 2 มีค่าอัตราทดเท่ากับ 1 หรือ ค่ามุม Φ ของ CVT 2 มีค่าเท่ากับ 45 องศา เพื่อที่จะให้ความเร็วของเพลากลางมีค่าเท่ากับความเร็วที่ข้อต่อที่ 2 จึงทำให้เปรียบเสมือนว่า มี CVT เพียงชุดเดียวมาทำการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การสร้างอัตราทดของซีวีทีแต่ละตัวโดยการปรับค่ามุม Phi 2 (Φ) มีค่าเท่ากับ 45 องศา

บทที่ 5
การปรับปรุงหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

จากการศึกษาต้นแบบหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ พบว่าอุปกรณ์ซีวีทีนั้นมีข้อบกพร่องหลายประการ ข้อบกพร่องหลักของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติคือชุดล้อยางยูริเทนที่สัมผัสและควบคุมการหมุนของซีวีทีทั้งสองชุด คณะวิจัยได้ทำการแก้ไข ปรับปรุง พัฒนาหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ล้อของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ: ข้อบกพร่องและการแก้ปัญหา

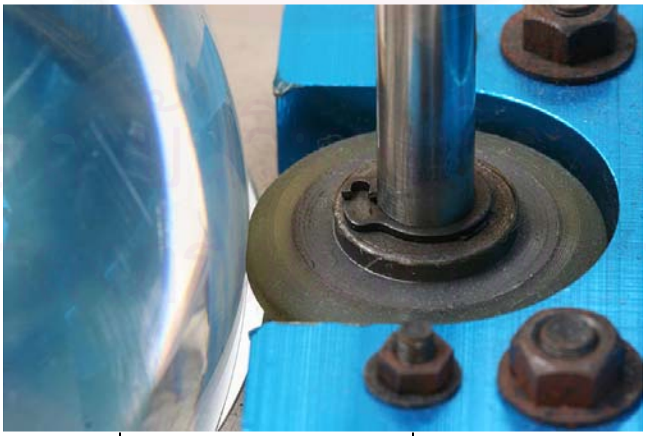
ล้อของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติทำมาจากแกนเหล็กตันที่หุ้มด้วยยางยูริเทนล้อนี้เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการส่งถ่ายกำลังของระบบส่งกำลังของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ แรงเสียดทานที่เกิดจากล้อยูริเทนกับลูกแก้วทรงกลมเป็นตัวกำหนดค่าอัตราทดที่ซีวีทีสามารถสร้างได้ จากการทดลองพบว่าล้อยูริเทนเดิมสามารถสร้างอัตราทดได้เพียง 1.5 ซึ่งน้อยเกินไปโดยสาเหตุที่สำคัญคือยางยูรีเทนมีความแข็งน้อยไป ทำให้เวลามีแรงกดเข้าไปที่ล้อยูรีเทนแล้วส่วนที่เป็นยางยูรีเทนเกิดการยุบตัว และมีผิวสัมผัสระหว่างตัวล้อกับตัวทรงกลมอะคิลิค เกิดเป็นพื้นที่สัมผัสขึ้นมาแทนที่จะเป็นจุดสัมผัสตามทฤษฎี รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงล้อยูริเทนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน สังเกตเห็นได้ว่ามีพื้นที่สัมผัสเกิดขึ้นมากระหว่างล้อกับลูกทรงกลม

หลังจากได้ทำการศึกษาวิเคราะห์แล้ว จึงได้ทำการออกแบบล้อของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติขึ้นมาใหม่ ให้มีรูปร่างหน้าตัดของผิวล้อ เป็นรูปโค้งพาราโบล่าเพื่อให้หน้าสัมผัสให้เป็นจุดมากขึ้นและเปลี่ยนความแข็งของยูรีเทนให้มีความแข็งมากขึ้น จะเดิมมีความแข็งที่ระดับ 80 Shore A มาเป็นความแข็งที่ระดับ 95 Shore A ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4

รูปที่ 5.1 ล้อยูริเทนที่มีความแข็งน้อยเกินไป

รูปที่ 5.2 ล้อยูริเทนที่มีความแข็งน้อยเกินไป เมื่อประกอบกับชุด Double CVT

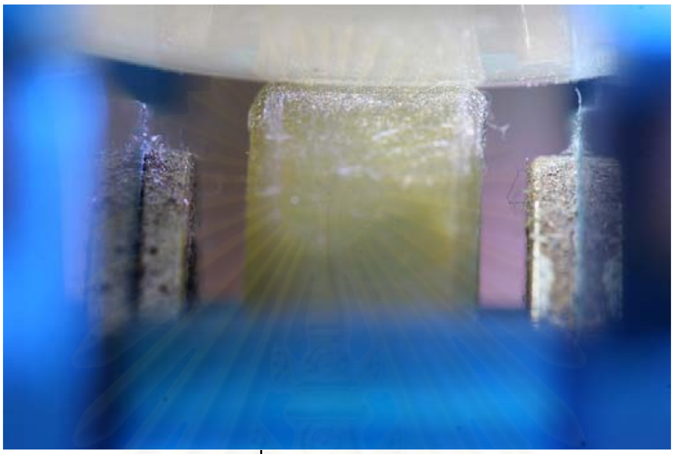
รูปที่ 5.3 ล้อยูรีเทนที่มีความแข็ง 95 Shore A



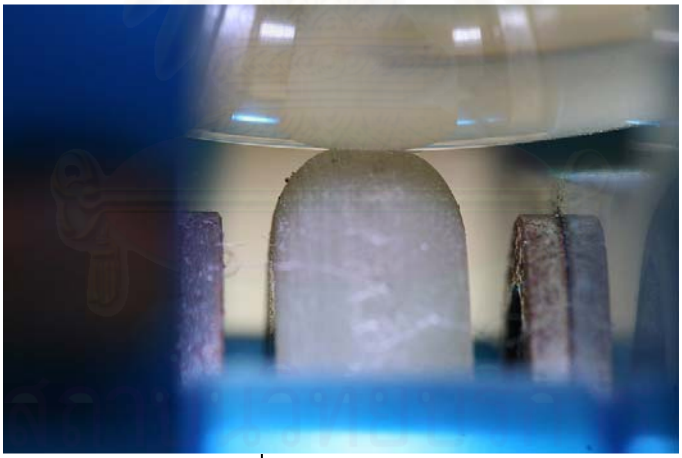
รูปที่ 5.4 ล้อยูรีเทนที่มีความแข็ง 95 Shore A เมื่อประกอบกับชุด Double CVT

5.1.1 ผลการปรับปรุง

เมื่อทำการเปลี่ยนล้อชุดใหม่เข้าไปในหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ พบว่าล้อยูริเทนสร้างพื้นที่ผิวสัมผัสกับลูกทรงกลมน้อยลงมากทำให้หน้าสัมผัสมีพื้นที่ใกล้จุดทางทฤษฎีมากขึ้น รูป 5.5 และ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัสของล้อกับทรงกลมก่อนและหลังการเปลี่ยนล้อ



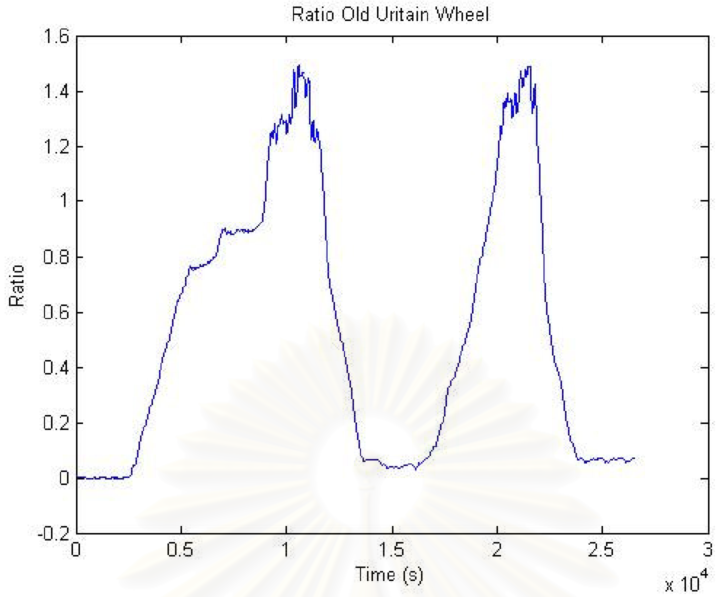
รูปที่ 5.5 ล้อยูรีเทนเก่า



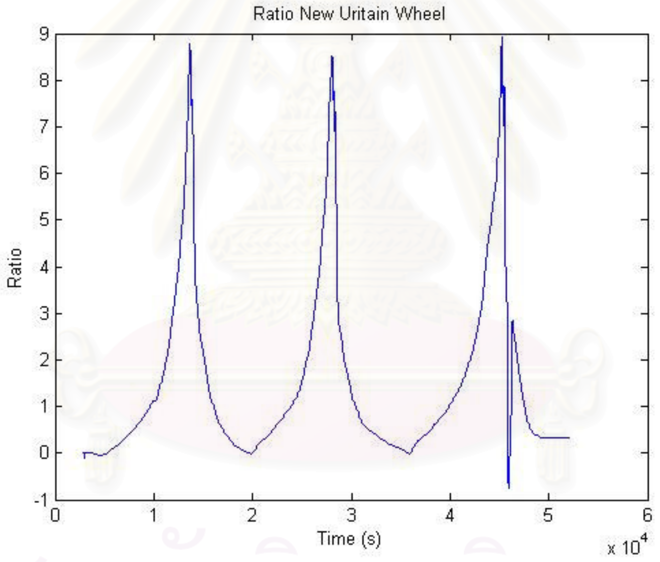
รูปที่ 5.6 ล้อยูรีเทนใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของล้อยูริเทนเก่ากับของใหม่ที่เปลี่ยนเข้าไปได้ โดยวัดจากอัตราทดที่สร้างได้จากซีวีที พบว่าอัตราทดที่สร้างได้จากล้อยูริเทนอันใหม่มีค่าสูงมากกว่าเดิมมาก ดังผลกราฟการทดลองข้างล่าง



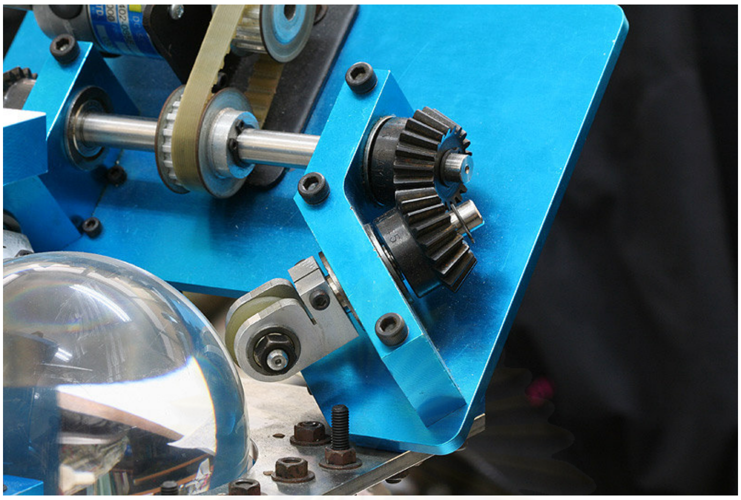
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าอัตราทดที่ได้ของล้อยูริเทนก่อนเปลี่ยน



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าอัตราทดที่ได้ของล้อยูริเทนหลังเปลี่ยน

จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 สังเกตได้ว่าล้อยูริเทนก่อนเปลี่ยนมีประสิทธิภาพที่น้อยมาก คือสร้างอัตราทดสูงสุดได้แค่ 1.5 เท่า แต่พอได้เปลี่ยนล้อยูริเทนใหม่ที่ใส่เข้าไปแล้วสามารถกสร้างอัตราทดได้สูงสุดถึง 9 เท่า แสดงให้เห็นว่าล้องยูริเทนที่เปลี่ยนเข้าไปใหม่สามารถส่งถ่ายกำลังจากลูกทรงกลมไปยังล้อยูริเทนได้มากขึ้น เกิดการลื้นไถลน้อยลง รับแรงบัดได้มากขึ้น ทำให้สรุปได้ว่าการเปลี่ยนล้อยูริเทนใหม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางที่ดีขึ้นมาก ประสิทธิภาพการทำงานดีมาก

5.2 โครงสร้างการยึดของชุดปรับแกนหมุน: ข้อบกพร่องและการแก้ไข



รูปที่ 5.9 จุดยึดของชุดปรับแกนหมุนที่ต้องปรับปรุง

นอกจากล้อยูริเทนแล้วพบว่าโครงสร้างการยึดของชุดปรับแกนหมุนเกิดการคลอน ทำให้การปรับเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลมมีค่าที่ผิดพลาดไปจากค่าที่ต้องการ เมื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิดการคลอน พบว่าแกนเพลาของชุดหมุนล้อปรับแกนหมุนของทรงกลมเกิดการขยับได้เล็กน้อย เนื่องจาก อาจเกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงานมาไม่พอดี ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบใหม่เพื่อให้แกนเพลาของชุดหมุนสวมเข้าไปให้พอดี

5.2.1 ผลการปรับปรุง

เมื่อทำแกนเพลามาใหม่แล้วทำการประกอบเข้าไปแทนที่ของเดิม แล้วได้ผลว่าอาการคลอนของแกนเพลาลดลงไปอย่างมาก ทำให้ความแม่นยำของการเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลมมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

การหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้น ไม่สามารถที่จะหาได้จากการหาสมการการเคลื่อนที่ทั่วๆไปเหมือนหุ่นยนต์แบบอนุกรม สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานมีอยู่หลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของ สมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง (Lagrangian Equation of the first type) [11]

6.1 สมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง

สมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง (Lagrangian Equation of the first type) [11] จะเขียนอยู่ในรูปแบบของ ชุดของค่าพิกัดเกิน (set of redundant coordinate) ซึ่งรูปแบบของสมการต้องการชุดสองสมการบังคับ (set of constraint equation) ซึ่งสามารถหาได้จาก กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของกลไก

สมการลากรานจ์แบบที่หนึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{d}{d}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_j}\right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\delta \Gamma_i}{\delta q_j} \qquad \text{สำหรับ } j = 1 \text{ ถึง } n \qquad (6.1)$$

เมื่อ L คือ ลากรานจ์ ฟังก์ชัน

Q_j คือ Generalized force

Γ คือ ฟังก์ชันบังคับ (Constraint function)

k คือ จำนวนของฟังก์ชันบังคับ

λ คือ ตัวคูณลากรานจ์ (Lagrangian multiplier)

n คือ จำนวนของค่าพิกัด (Coordinate)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 ผลเฉลยจากสมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง

การหาคำตอบของผลเฉลยจากสมการลากรานจ์แบบที่หนึ่งสามารถทำได้ด้วยการจัดรูปแบบของสมการออกเป็นสองชุด

ชุดแรกจะจัดสมการ (6.1) ให้มีแต่ ตัวคูณลากรานจ์ (λ) เป็นตัวแปรต้องการหาค่า ส่วนชุดที่สองก็จะทำการจัดรูปแบบสมการ (6.1) ให้อยู่ในรูปที่มีแต่แรงที่มาขับข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอทซึ่งก็คือ แรงบิดที่ขับหุ่นยนต์นั้นเอง โดยให้ k สมการแรก เป็นชุดสมการที่เกี่ยวข้องกับ ตัวแปร Redundant Coordinate ส่วน n-k สมการที่เหลือ เป็นชุดสมการที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรของแรงที่มาขับที่แขนของหุ่นยนต์

ชุดสมการแรกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\delta \Gamma_i}{\delta q_j} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_j}\right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} - Q_j \qquad \text{สำหรับ j= 1 ถึง k} \qquad (6.2)$$

โดยที่ Q_j คือ แรงภายนอกที่กระทำที่ปลายแขนของหุ่นยนต์

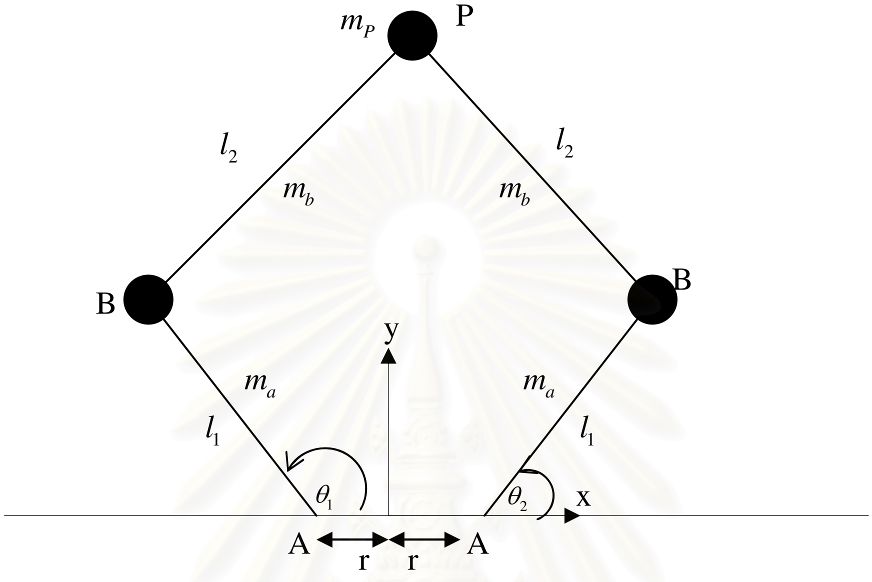
ทางด้านขวาของสมการ (6.2) เป็นค่าที่เราสามารถหาค่ามาได้ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดภายหลัง ดังนั้นชุดสมการนี้จะมี k สมการ ซึ่งจะมีตัวที่ไม่รู้ค่าคือ λ อยู่ k ตัว ซึ่งสามารถที่จะหาค่าได้จากชุดสมการนี้

เมื่อสามารถหาค่า λ จากชุดสมการที่หนึ่งแล้ว แรงขับของชุดขับของหุ่นยนต์โคบอทก็สามารถหาได้จากชุดสมการที่เหลือคือ

$$Q_j = \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_j}\right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} - \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\delta \Gamma_i}{\delta q_j} \qquad \text{สำหรับ j= k+1 ถึง n} \qquad (6.3)$$

โดยที่ Q_j คือแรงขับของชุดขับของหุ่นยนต์โคบอทที่ต้องการ

เมื่อทำความเข้าใจกับรูปแบบของสมการลากรานจ์แบบที่หนึ่งแล้ว นำมาใช้งานในการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 Pantograph

จากรูปที่ 6.1 เริ่มต้นทำการวิเคราะห์การหาการเคลื่อนที่โดย ใช้ ค่าพิกัดทั่วไป (Generalized Coordinates) สองตัว เนื่องจากเป็นหุ่นยนต์โคบอทสองมิติ ในที่นี้คือ ค่ามุม θ_1 และ θ_2 ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์โคบอท

และในการใช้วิธีของสมการลากรานจ์แบบที่หนึ่งนั้น จะมีตัวแปรเพิ่มอีกตัวแปรสองตัว เรียกว่า ค่าพิกัดเกิน (Redundant Coordinate) คือ P_x และ P_y เพราะฉะนั้นสามารถหาตัวแปร Generalized Coordinates ทั้งหมด 4 ตัว คือ P_x P_y θ_1 θ_2

สมการ (6.1) เป็นระบบสมการทั้งหมด 4 สมการ ในตัวแปร 4 ตัว โดยสองตัวแปรแรกคือ λ_1 และ λ_2 สองตัวแปรต่อมาคือแรงขับแขนของหุ่นยนต์โคบอท Q_3 และ Q_4 โดยที่ Generalized Force Q_1 และ Q_2 คือ แรงในแนวแกน x และแรงในแนวแกน y ที่ออกแรงที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอท ที่จุด P

6.3 การหาสมการบังคับ

ชุดสมการลากรานจ์แบบที่หนึ่ง ต้องการ สมการบังคับ 2 สมการ คือ Γ_1 และ Γ_2 ซึ่งสามารถหาสมการทั้งสามได้จากข้อเท็จจริงที่ว่า ระยะทางระหว่าง ข้อต่อ B กับ P มีค่าเท่ากับความยาวของแขนของหุ่นยนต์ท่อนบน ซึ่งก็คือ

$$\Gamma_i = \overline{BP}^2 - l_2^2 = 0$$

ทำการแทนค่าจะได้

$$\Gamma_i = (P_x - r - l_1\cos\theta_i)^2 + (P_y - l_1\sin\theta_i)^2 - l_2^2 = 0 \qquad (6.4)$$

6.4 การหาสมการลากรานจ์ L

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาสมการการเคลื่อนที่ กำหนดให้มวลของแขนท่อนบน (Link 2) ถูกแบ่งครึ่งให้ไปอยู่ตรงที่ตำแหน่งปลายทั่งสองข้างของแขนซึ่งก็คือตำแหน่งของข้อต่อทั้งสองข้าง ดังนั้นสามารถหาสมการลากรานจ์ ได้ดังนี้

6.4.1 การหา Total Kinetic Energy of Pantograph Cobot

สามารถหาพลังงานจลน์ทั้งหมดของหุ่นยนต์โคบอทได้คือ

$$K = k_p + \sum_{i=1}^{2}(k_{ai} + k_{bi}) \qquad (6.5)$$

k_p คือ พลังงานจลน์ที่จุด P

k_{ai} คือ พลังงานจลน์ของแขนท่อนล่าง

k_{bi} คือ พลังงานจลน์ของแขนท่อนบน

$$k_p = \tfrac{1}{2} m_p (\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2) \qquad (6.6)$$

$$k_{ai} = \Sigma(I\dot{\theta}^2)$$

โดยที่ $I = I_{link1} + I_{CVT}$

จะได้ว่า $$k_{ai} = \frac{1}{2}\left(I_{CVTi} + \frac{1}{3} m l_1^{\,2} \right) \dot{\theta}_i^2 \tag{6.7}$$

โดยที่ I_{CVTi} คือ ความเฉื่อยของชุด CVT ซึ่งได้ทำการหาค่าเอาไว้ในภาคผนวก

$$k_{bi} = \tfrac{1}{2} m_b \left(\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2 \right) + \tfrac{1}{2} m_b l_1^{\,2} \dot{\theta}_i^2 \tag{6.8}$$

เมื่อ m_P คือมวลของจุด P

m_a คือมวลของแขนท่อนล่าง

m_b คือมวลของแขนท่อนบน

6.4.2 **การหา** Total Potential Energy Pantograph Cobot

เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ เคลื่อนที่ในระนาบ X-Y ซึ่งเป็นระนาบตั้งฉากกับทิศทางของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) ดังนั้น ค่า Total Potential Energy จึงมีค่าเป็น

6.5 ฟังก์ชันลากรานจ์

เมื่อทำการหาค่าพลังงานทั้งสองส่วนแล้ว ก็สามารถหาค่า ฟังก์ชันลากรานจ์ คือ

$L = K - P$

$$L = k_p + k_{a1} + k_{a2} + k_{b1} + k_{b2}$$

$$L = \tfrac{1}{2} m_p (\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2) + \frac{1}{2}\left(I_{CVT1} + \frac{1}{3} m l_1^2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}\left(I_{CVT2} + \frac{1}{3} m l_1^2 \right) \dot{\theta}_2^2 + \tfrac{1}{2} m_b \left(\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2 \right) + \tfrac{1}{2} m_b l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \tfrac{1}{2} m_b \left(\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2 \right) + \tfrac{1}{2} m_b l_1^2 \dot{\theta}_2^2$$

ทำการจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$L = \frac{1}{2}(m_p + 2m_b)(\dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2) + \frac{1}{2}\left(I_{CVT1} + \frac{1}{3} m l_1^2 + m_b l_1^2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}\left(I_{CVT2} + \frac{1}{3} m l_1^2 + m_b l_1^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \tag{6.9}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันลากรานจ์ ด้วยค่าพิกัดทั่วไปทั้ง 4 จะได้

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{P}_x}\right) = (m_p + 2m_b)\ddot{P}_x \qquad \frac{\delta L}{\delta P_x} = 0$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{P}_y}\right) = (m_p + 2m_b)\ddot{P}_y \qquad \frac{\delta L}{\delta P_y} = 0$$

(6.10)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_1}\right) = \left(I_{CVT1} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_1 \qquad \frac{\delta L}{\delta \theta_1} = 0$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_2}\right) = \left(I_{CVT2} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_2 \qquad \frac{\delta L}{\delta \theta_2} = 0$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันบังคับ ด้วยค่าพิกัดทั่วไปทั้ง 4 จะได้

$$\frac{\delta \Gamma_1}{\delta P_x} = 2(P_x - r - l_1 \cos\theta_1) \qquad \frac{\delta \Gamma_2}{\delta P_x} = 2(P_x - r - l_1 \cos\theta_2)$$

$$\frac{\delta \Gamma_1}{\delta P_y} = 2(P_y - r - l_1 \cos\theta_1) \qquad \frac{\delta \Gamma_2}{\delta P_y} = 2(P_y - r - l_1 \cos\theta_2)$$

(6.11)

$$\frac{\delta \Gamma_1}{\delta \theta_1} = 2l_1\left((P_x - r)\sin\theta_1 - P_y \cos\theta_1\right) \qquad \frac{\delta \Gamma_2}{\delta \theta_1} = 0$$

$$\frac{\delta \Gamma_1}{\delta \theta_2} = 0 \qquad \frac{\delta \Gamma_2}{\delta \theta_2} = 2l_1\left((P_x - r)\sin\theta_2 - P_y \cos\theta_2\right)$$

แทนค่าต่างๆที่หาได้ในชุดสมการ (6.10) และ (6.11) ลงในสมการ (6.2)

$$\sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\delta \Gamma_i}{\delta q_j} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_j}\right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} - Q_j \quad \text{เมื่อ j= 1 ถึง k} \tag{6.2}$$

เมื่อ j=1;

$$\sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\delta \Gamma_i}{\delta q_1} = 2\lambda_1\left(P_x - r - l_1 \cos\theta_1\right) + 2\lambda_2\left(P_x - r - l_1 \cos\theta_2\right)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_1}\right) = \left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_x \qquad \frac{\delta L}{\delta q_1} = 0$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉะนั้นจะได้สมการ(6.2) เมื่อ j=1 ออกมาคือ

$$2\lambda_1\left(P_x - r - l_1\cos\theta_1\right) + 2\lambda_2\left(P_x - r - l_1\cos\theta_2\right) = \left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_x - f_{P_x} \qquad (6.12)$$

เมื่อ j=2;

$$\sum_{i=1}^{k}\lambda_i\frac{\delta\Gamma_i}{\delta q_2} = 2\lambda_1\left(P_y - l_1\sin\theta_1\right) + 2\lambda_2\left(P_y - l_1\sin\theta_2\right)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta\dot{q}_2}\right) = \left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_y \qquad \frac{\delta L}{\delta q_2} = 0$$

ฉะนั้นจะได้สมการ(6.2) เมื่อ j=2 ออกมาคือ

$$2\lambda_1\left(P_y - l_1\sin\theta_1\right) + 2\lambda_2\left(P_y - l_1\sin\theta_2\right) = \left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_y - f_{P_y} \qquad (6.13)$$

โดยที่ f_{P_x} คือแรงกระทำภายนอกที่จุด P ในแนวแกน X (Q_1)

f_{P_y} คือแรงกระทำภายนอกที่จุด P ในแนวแกน Y (Q_2)

ทำการแก้สมการ (6.12) และ (6.13) ออกมาเพื่อหาค่า $\lambda_1\ \lambda_2$ จะได้

$$\lambda_1 = \frac{\left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_x - f_{P_x} - 2\lambda_2\left(P_x - r - l_1\cos\theta_2\right)}{2\left(P_x - r - l_1\cos\theta_1\right)} \qquad (6.14)$$

$$\lambda_2 = \frac{\left(\left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_y - f_{P_y}\right)\left(P_x - r - l_1\cos\theta_1\right) - \left(\left(m_p + 2m_b\right)\ddot{P}_x - f_{P_x}\right)\left(P_y - l_1\sin\theta_1\right)}{2\left[\left(P_x - r - l_1\cos\theta_1\right)\left(P_y - l_1\sin\theta_2\right) - \left(P_x - r - l_1\cos\theta_2\right)\left(P_y - l_1\sin\theta_1\right)\right]} \qquad (6.15)$$

แทนค่าต่างๆที่หาได้ในชุดสมการ (6.10) และ (6.11) ลงในสมการ (6.3)

$$Q_j = \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta\dot{q}_j}\right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} - \sum_{i=1}^{k}\lambda_i\frac{\delta\Gamma_i}{\delta q_j}$$ เมื่อ j= k+1 ถึง n (6.3)

เมื่อ j=3;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta\dot{q}_3}\right) = \left(I_{CVT1} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_1$$

$$\frac{\delta L}{\delta q_3}=0 \quad \sum_{i=1}^{k}\lambda_i\frac{\delta\Gamma_i}{\delta q_3}=2l_1\lambda_1\left((P_x-r)\sin\theta_1-P_y\cos\theta_1\right)$$

ฉะนั้นจะได้สมการ(6.3) เมื่อ j=3 ออกมาคือ

$$Q_3=\left(I_{CVT1}+\frac{1}{3}m_a l_1^2+m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_1-2l_1\lambda_1\left((P_x-r)\sin\theta_1-P_y\cos\theta_1\right) \tag{6.16}$$

เมื่อ j=4;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_4}\right)=\left(I_{CVT2}+\frac{1}{3}m_a l_1^2+m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_2$$

$$\frac{\delta L}{\delta q_4}=0 \quad \sum_{i=1}^{k}\lambda_i\frac{\delta\Gamma_i}{\delta q_4}=2l_1\lambda_2\left((P_x-r)\sin\theta_2-P_y\cos\theta_2\right)$$

ฉะนั้นจะได้สมการ(6.3) เมื่อ j=4 ออกมาคือ

$$Q_4=\left(I_{CVT2}+\frac{1}{3}m_a l_1^2+m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_2-2l_1\lambda_2\left((P_x-r)\sin\theta_2-P_y\cos\theta_2\right) \tag{6.17}$$

โดยที่ Q_3 Q_4 คือ แรงบิด(Torque) ที่แกนหมุนของแขนท่อนล่าง

6.6 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

จากสมการข้างต้นทั้งหมด เป็นการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ด้วยวิธีการของ สมาการลากรานจ์แบบที่หนึ่งซึ่งจะได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$\mathrm{T}_1=\left(I_{CVT1}+\frac{1}{3}m_a l_1^2+m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_1-2l_1\lambda_1\left((P_x-r)\sin\theta_1-P_y\cos\theta_1\right) \tag{6.18}$$

$$\mathrm{T}_2=\left(I_{CVT2}+\frac{1}{3}m_a l_1^2+m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_2-2l_1\lambda_2\left((P_x-r)\sin\theta_2-P_y\cos\theta_2\right) \tag{6.19}$$

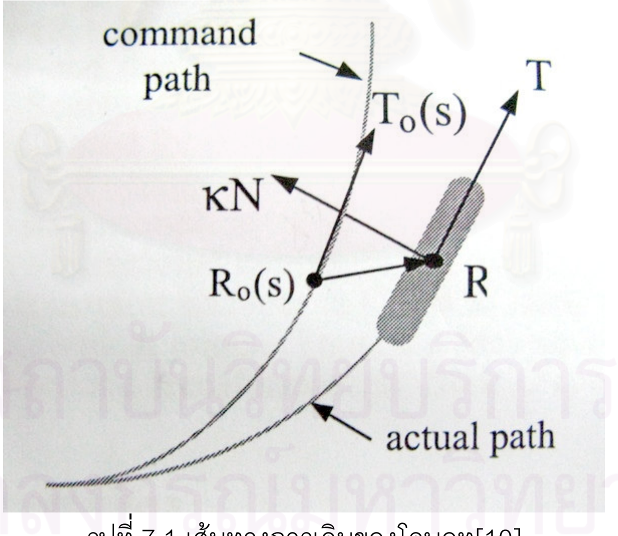
โดยที่ T_1 T_2 คือ แรงบิด (Torque) ที่แกนหมุนของแขนท่อนล่าง

บทที่ 7
การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นแตกต่างจากการควบคุมหุ่นยนต์ทั่วไป กล่าวคือนอกจากจะต้องทำการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์แล้ว ยังต้องควบคุมให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทหันไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ ณ ตำแหน่งที่กำหนดอีกด้วย ดังนั้นตัวแปรต้นที่ใช้ในการควบคุมจึงไม่ใช่เวลา แต่เป็นตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอท การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทจะใช้วิธีการควบคุมแบบให้เคลื่อนตามเส้นทาง (Path Following Control) คือการกำหนดเส้นทางที่ต้องการเอาไว้แล้วให้หุ่นยนต์โคบอทวิ่งตามเส้นทาง แล้วจึงควบคุมให้หุ่นยนต์โคบอทวิ่งเข้าสู่เส้นทางนั้น

7.1 ทฤษฎีการควบคุม

การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ล่วงหน้าแล้ว ดังเช่นในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 เส้นทางการเดินของโคบอท[10]

รูปที่ 7.1 เป็นรูปของ Unicycle Cobot [10] ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ออกจากเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้ ซึ่งในกรณีนี้ ค่าเวคเตอร์บอกตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอท คือ $R=[x,y]^T$ ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ออกจากเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้ คือ $R_0(s)$ เมื่อ ค่า s คือปริมาณการวัดของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป ซึ่งจะมี เวคเตอร์ T เป็นตัวบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

โดยปกติแล้วเวคเตอร์ T จะไม่มีทิศทางขนานกับเวคเตอร์ T_0 ซึ่งวิธีการที่จะควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้องประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ

1. s จะถูกแทนที่ด้วย s' เมื่อ $R_0(s')$ คือตำแหน่งบนเส้นทางที่ออกแบบไว้ที่ใกล้กับตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปจริงบนเส้นทางจริง (R)
2. k คือปริมาณบอกถึงความโค้งของเส้นทาง ซึ่งมีค่าเป็นส่วนกลับของรัศมีความโค้ง ซึ่งจะแทนด้วย $k+\delta k$ เมื่อ δk คือค่าที่คำนวณจากค่าผิดพลาดจาก ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำให้ล้อของ Unicycle จะหมุนเข้าหาเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้

ในความเป็นจริง การหาค่า s' ทำได้ยาก แต่ถ้าเรามีสมมติฐานที่น่าเชื่อถือก็สามารถที่จะประมาณค่า s' ได้ โดยการ แบ่งเส้นทางการเคลื่อนที่ให้เล็กมากๆ ดังในรูปที่ 7.1 จะทำให้ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ $(s'-s)$ เข้าใกล้ระยะของ $(R-R_0(s))$ ที่โปรเจคชันลงบน T_0

ดังนั้นจะได้

$$s' = s + (R - R_0(s)) \cdot T_0(s) \qquad (7.1)$$

เมื่อเส้นทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จริงเมื่อเทียบกับ $R_0(s')$ ก็ยังคงมีค่าที่ผิดพลาดอยู่ ซึ่งค่าที่ผิดพลาดแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ

- ค่าผิดพลาดในระยะทาง $\Delta R = R - R_0(s')$ คือเวคเตอร์ที่ใกล้เคียงเวคเตอร์ตั้งฉากกับเส้นทางที่ออกแบบเอาไว้ซึ่งจะบอกถึงระยะทางที่ผิดพลาดจากเส้นทางนั้น
- ค่าผิดพลาดในทิศทาง $\Delta T = T - T_0(s')$ คือเวคเตอร์ที่ใกล้เคียงเวคเตอร์ตั้งฉากกับเส้นทางที่ออกแบบเอาไว้ซึ่งจะบอกถึงทิศทางที่ผิดพลาดจากเส้นทางนั้น

สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) นั้นทำได้โดยการปรับอัตราเร็วเชิงมุม (ω) ในรูปแบบของการชดเชยค่าผิดพลาดทั้งสองชนิด

ในความเป็นจริงแล้วสามารถนำค่าความโค้งของเส้นทาง (k) มาใช้ในการควบคุมได้ เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ u ยากที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น จึงสามารถประมาณรูปแบบของการควบคุมได้ว่า

$$\omega = u\left[\kappa_0(s') - N_0(s') \cdot \left(\frac{G_1}{L^2}\Delta R + \frac{G_2}{L}\Delta T\right)\right] \qquad (7.2)$$

เมื่อค่า $\kappa_0(s')$ เป็นค่าความโค้งของเส้นทาง ณ ตำแหน่ง s'

G_1 และ G_2 เป็นค่าเกนของการควบคุม

L เป็นค่าคงที่ ซึ่งนัยว่าเป็นค่าระยะทางข้างหน้า

7.2 การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

วิธีการควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้น จะมีวิธีที่คล้ายกับ Unicycle Cobot คือจะทำการหาค่าผิดพลาดของระยะทาง $\Delta R = R - R_0(s')$ และค่าผิดพลาดของทิศทาง $\Delta T = T - T_0(s')$ แล้วนำมาหาค่า $\delta(\kappa N)$ โดย คูณกับค่าเกน G_1 และ G_2 ดังนี้

$$\delta(\kappa N) = -\frac{G_1}{L^2}\Delta R - \frac{G_2}{L}\Delta T \tag{7.3}$$

แล้วก็นำค่า $\delta(\kappa N)$ ที่ได้ไปรวมกับค่า $\kappa(s')N(s')$ ก็จะได้สัญญาณควบคุม $\kappa(s')N(s') + \delta(\kappa N)$ ในรูปแบบ ของ ปริภูมิการเคลื่อนที่ (C_T) ต่อมาก็ทำการแปลง ปริภูมิการเคลื่อนที่ไปเป็นปริภูมิข้อต่อ (C_J) จะได้อยู่ในรูปของ $\kappa_J(s')N_J(s') + \delta(\kappa_J N_J)$ ต่อมาก็ทำการแปลงค่าไปอยู่ในปริภูมิการจับคู่ (Σ_i) จะได้อยู่ในรูปของ

$$\kappa_i(s')n_i(s') + \delta(\kappa_i n_i) \tag{7.4}$$

ส่วนค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ u ก็ทำการแปลงให้เป็นความเร็วของข้อต่อ V_J ของปริภูมิข้อต่อ ได้เป็น $V_J = Ju$ ต่อมาก็ทำการแปลง ให้อยู่ในปริภูมิการจับคู่ ได้เป็น

$$u_i = J_i V_J \tag{7.5}$$

หลังจากนั้นก็นำค่า $\kappa_i(s') + \delta\kappa_i$ มาคูณกับค่า u_i ก็จะได้ค่าความเร็วของการหมุนล้อซีวีที ออกมาคือ

$$\dot{\phi} = u_i(\kappa_i + \delta\kappa_i) \tag{7.6}$$

หลังจากที่เราได้ค่า $\dot{\phi}$ มาแล้วซึ่งเป็นสัญญาณของการควบคุมนั้นเอง

บทที่ 8
การควบคุมความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

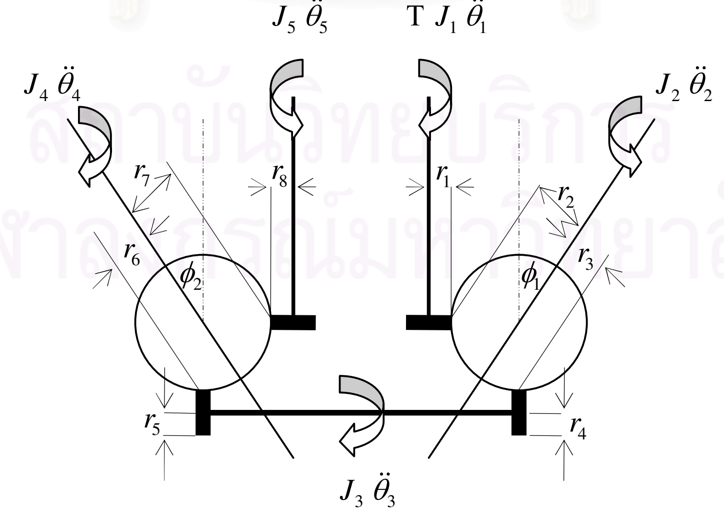
8.1 ความเฉื่อยกับหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

วัตถุเมื่อเกิดการเคลื่อนที่จะเกิดความเฉื่อยของวัตถุเกิดขึ้น หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติก็เช่นกัน เมื่อหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานเคลื่อนที่ในพื้นที่การทำงาน (Work Space) จะเกิดความเฉื่อยปรากฏขึ้น ซึ่งความเฉื่อยที่ปรากฏขึ้นในแต่ละตำแหน่งในพื้นที่การทำงาน จะไม่เท่ากัน เนื่องจากโครงสร้างของหุ่นยนต์โคบอทเองซึ่งมาจากทั่ง ความเฉื่อยจากแขนของหุ่นยนต์โคบอท และชุดซีวีที (CVTs: Continuous Variable Transmission) ของหุ่นยนต์โคบอทด้วย ซึ่งเป็นเป้าหมายการศึกษาของงานวิจัยชิ้นนี้นั้นเอง

ผลกระทบจากความเฉื่อยปรากฏที่ไม่เท่ากันในพื้นที่การทำงานจะทำให้การออกแรงสำหรับเคลื่อนที่ปลายแขนไม่เท่ากัน ส่งผลให้คนที่ออกแรงที่ปลายแขนรู้สึกว่าการออกแรงเคลื่อนที่โคบอทในแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่เท่ากัน ตำแหน่งนี้รู้สึกหนักกว่า ตำแหน่งนี้เบากว่า

8.2 สมการความเฉื่อยของชุดซีวีที

การควบคุมความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นสามารถหาได้จากการคำนวณค่าความเฉื่อยจากภาคผนวก ข. ดังรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 ระบบซีวีที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาคผนวก ข. สามารถหาสมการความเฉื่อยของชุดซีวีที ได้ดังนี้

$$J_{equ1} = J_1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 J_2 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 J_3 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 \left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 \left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2 \left(\frac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5 \quad (8.1)$$

โดยที่ J_1 คือ Inertia ของ Output shaft 1

J_2 คือ Inertia ของทรงกลม 1 มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{5}mR^2$

J_3 คือ Inertia ของ Common Shaft

J_4 คือ Inertia ของทรงกลม 2 มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{5}mR^2$

J_5 คือ Inertia ของ Output shaft 2

r_i คือ ค่ารัศมีของล้อและทรงกลม เมื่อ i = 1 ถึง 8

สมการ 8.1 เป็นสมการความเฉื่อยของระบบซีวีที ทั้งระบบคือตั้งแต่ปลาย Output 1 ถึงปลาย Output 2 แต่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นเป็นหุ่นยนต์แบบขนาน จึงต้องแบ่งการหาค่าความเฉื่อยออกเป็นสองข้าง โดยจะแบ่งครึ่งของเพลากลาง จะได้สมการความเฉื่อยของชุดซีวีที 1 เป็น

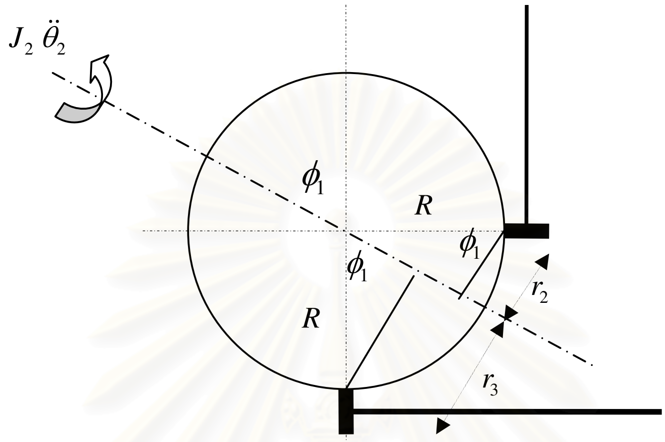
$$J_{equ1} = J_1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 J_2 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 \frac{J_3}{2} \quad (8.2)$$

เนื่องจากความเฉื่อยในแนวแกน x ของเพลามีค่าน้อยเมื่อรัศมีของเพลามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความยาว ดังนั้นจึงสามารถคิดได้ว่า ค่า J_1 J_3 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า J_2 ซึ่งก็คือความเฉื่อยของทรงกลมนั้นเอง

จะได้สมการความเฉื่อยของชุดซีวีที 1 ได้เป็น

$$I_{CVT1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 J_2 \quad (8.3)$$

จากสมการ 8.2 พิจารณาจะได้ว่า ค่า r_1 มีค่าคงที่ เนื่องจากเป็นรัศมีของล้อยูรีเทน ส่วนค่า r_2 จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่ามุม ϕ คือมุมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลมนั้นเอง โดยจะมีค่าดังนี้



รูปที่ 8.2 ทรงกลมซีวีที 1

จากรูปจะได้ว่า

$$r_2 = R\cos\phi_1 \tag{8.4}$$

จากความสัมพันธ์ของ r_2 r_3 จะได้ว่า

$$\frac{r_3}{r_2} = \tan\phi_1 = \eta_1 \quad \text{คืออัตราทดของซีวีที 1} \tag{8.5}$$

จะได้สมการความเฉื่อยของซีวีที 1 คือ

$$I_{CVT1} = \left(\frac{r_1}{R\cos\phi_1}\right)^2 J_2 \tag{8.6}$$

ในทำนองเดียวกันกับซีวีที 1 สำหรับซีวีที 2 คือ

$$I_{CVT2} = J_5 + \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2 J_4 + \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2 \left(\frac{r_6}{r_5}\right)^2 \frac{J_3}{2} \tag{8.7}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ J_3 คือ Inertia ของ Common Shaft

J_4 คือ Inertia ของทรงกลม 2 มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{5}mR^2$

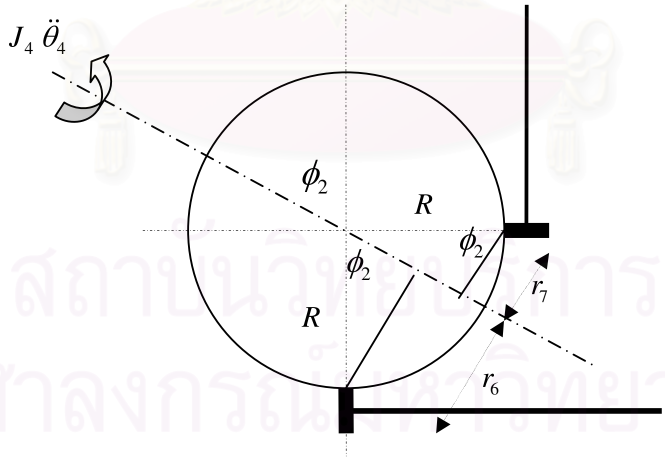
J_5 คือ Inertia ของ Output shaft 2

เนื่องจากความเฉื่อยในแนวแกน x ของเพลามีค่าน้อยเมื่อรัศมีของเพลามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความยาว ดังนั้นจึงสามารถคิดได้ว่า ค่า J_3 J_5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า J_4 ซึ่งก็คือความเฉื่อยของทรงกลมนั้นเอง

จะได้สมการความเฉื่อยของชุดซีวีที 2 ได้เป็น

$$I_{CVT2} = \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2 J_4 \tag{8.8}$$

จากสมการ 8.8 พิจารณาจะได้ว่า ค่า r_8 มีค่าคงที่ เนื่องจากเป็นรัศมีของล้อยูรีเทน ส่วนค่า r_7 จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่ามุม ϕ คือมุมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลมนั้นเอง โดยจะมีค่าดังนี้



รูปที่ 8.3 ทรงกลมซีวีที 2

จากรูปจะได้ว่า

$$r_7 = R\cos\phi_2 \tag{8.9}$$

$$r_6 = R\sin\phi_2 \tag{8.10}$$

จากความสัมพันธ์ของ r_7 r_8 จะได้ว่า

$$\frac{r_6}{r_7} = \tan\phi_2 = \eta_2 \quad \text{คืออัตราทดของซีวีที 2} \tag{8.11}$$

จะได้สมการความเฉื่อยของซีวีที 2 คือ

$$I_{CVT2} = \left(\frac{r_8}{R\cos\phi_2}\right)^2 J_4 \tag{8.12}$$

จากสมการข้างต้น สามารถหาสมการความเฉื่อยที่เกิดจากชุดซีวีที 1 และซีวีที 2 ได้ตามสมการ 8.6 และ 8.12 ตามลำดับ

8.3 **สมการความเฉื่อย จากสมการการเคลื่อนที่**

จากบทที่ 7 ที่ได้ทำการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติเอาไว้แล้วนั้น จะได้สมการการเคลื่อนที่ออกมาสองสมการดังนี้

$$\mathrm{T}_1 = \left(I_{CVT1} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_1 - 2l_1\lambda_1\left((P_x - r)\sin\theta_1 - P_y\cos\theta_1\right) \tag{8.13}$$

$$\mathrm{T}_2 = \left(I_{CVT2} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2\right)\ddot{\theta}_2 - 2l_1\lambda_2\left((P_x - r)\sin\theta_2 - P_y\cos\theta_2\right) \tag{8.14}$$

โดยที่ T_1 T_2 คือ แรงบิด (Torque) ที่แกนหมุนของแขนท่อนล่าง

เมื่อนำมาจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของ Matrix จะได้

$$\begin{pmatrix}\mathrm{T}_1\\ \mathrm{T}_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{CVT1} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2 & 0 \\ 0 & I_{CVT2} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2l_1\left((P_x - r)\sin\theta_1 - P_y\cos\theta_1\right) & 0 \\ 0 & 2l_1\left((P_x - r)\sin\theta_2 - P_y\cos\theta_2\right)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\lambda_1\\ \lambda_2\end{pmatrix}$$

(8.15)

โดยที่พจน์แรกของสมการคือ Inertia Matrix ของหุ่นยนต์โคบอทแบบสองมิติ นั้นเอง

8.4 การควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติที่ใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอันตราทดอย่างต่อเนื่องชนิดทรงกลมนี้ จะทำการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขน ได้โดยการปรับมุมของแกนการเคลื่อนที่ของทรงกลมในชุดซีวีที เรียกว่าการปรับอัตราทดของซีวีที ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดซีวีที 2 ชุด

ซึ่งสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินี้ให้เคลื่อนที่ในระนาบ x-y โดยปกติใช้ชุดซีวีที เพียงชุดเดียวก็สามารถให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปในพื้นที่การทำงานได้ (คือการควบคุมค่ามุม ϕ เพื่อให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ) แต่จะไม่สามารถทำการควบคุมความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการที่ใช้ซีวีที สองชุดโดยทำการกำหนดการปรับอัตราทดของซีวีที ทั่งสองให้มีค่าที่เหมาะสมก็จะสามารถควบคุมความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นได้ (คือการควบคุมค่า ϕ_1 และ ϕ_2 ของซีวีที ทั้งสองชุด เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการและได้ค่าความเฉื่อยตามที่ต้องการด้วย)

จากสมการ 8.15 เราจะได้ Inertia Matrix คือ

$$I_{Cobot} = \begin{pmatrix} I_{CVT1} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2 & 0 \\ 0 & I_{CVT2} + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2 \end{pmatrix} \tag{8.16}$$

จากสมการ 8.16 จะสังเกตได้ว่า ค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติจะประกอบไปด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นค่าคงที่ คือมีค่าคงที่ตลอดไม่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่ปลายแขนเคลื่อนที่ไป กับส่วนที่มีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งปลายแขนที่เคลื่อนที่ไป

ดังนั้นเมื่อต้องการที่จะควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติให้ได้ค่าตามที่ต้องการจะต้องทำการควบคุมในส่วนที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งปลายแขนที่เคลื่อนที่ไป ซึ่งก็คือส่วนของ ความเฉื่อยที่ชุดขับซีวีที ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นเอง จึงทำให้สมการ 8.16 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม ค่าความเฉื่อยของชุดขับ I_{CVT1} และ I_{CVT2} นั้นเอง

สมการ I_{CVT1} และ I_{CVT2} ที่หามาได้ตามสมการ 8.6 และ 8.12 ตามลำดับเป็นสมการฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าตัวแปรสองตัวคือ ค่า ϕ_1 และ ϕ_2 ตามลำดับ ซึ่งก็คือค่ามุมแกนหมุนของทรงกลมซีวีที

ดังนั้นสมการที่ใช้ในการควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ นั้นคือ

$$I_{Cobot} = I_1 + I_2 \tag{8.17}$$

โดยที่
$$I_1 = \left(\frac{r_1}{R\cos\phi_1}\right)^2 J_2 + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2$$
$$I_2 = \left(\frac{r_8}{R\cos\phi_2}\right)^2 J_4 + \frac{1}{3}m_a l_1^2 + m_b l_1^2$$

เมื่อเราต้องการควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ให้ได้ตามที่ต้องการ ทำได้โดยการควบคุม ค่า ϕ_1 และ ϕ_2

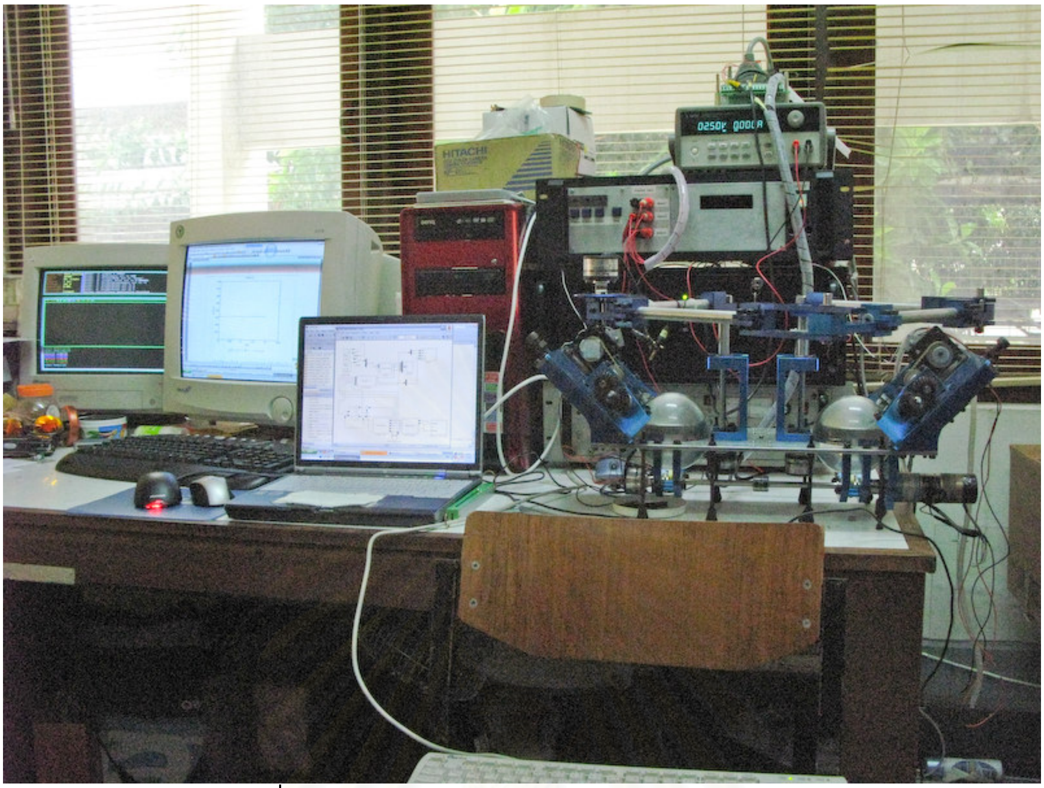
เนื่องจากค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 เป็นมุมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ดั้งนั้นการที่จะทำการเลือกค่า ϕ_1 และ ϕ_2 ใดๆ จะต้องสอดคล้องทั้งค่าความเฉื่อยที่ต้องการแล้วก็ให้ได้ตำแหน่งปลายแขนที่ต้องการด้วย ดั้งนี้

เมื่อใช้ซีวีที ชุดเดียวในการควบคุม ค่าอัตราทด $N = \tan\phi$ แต่เมื่อใช้ซีวีที ทั้งสองชุด จะได้ $\eta_1 = \tan\phi_1$ $\eta_2 = \tan\phi_2$ โดยที่ $N = \frac{\eta_1}{\eta_2}$ เพื่อให้ได้การควบคุมทิศทางตำแหน่งเหมือนการใช้ซีวีทีเพียงชุดเดียว และยังสามารถควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏไปด้วยพร้อมกัน

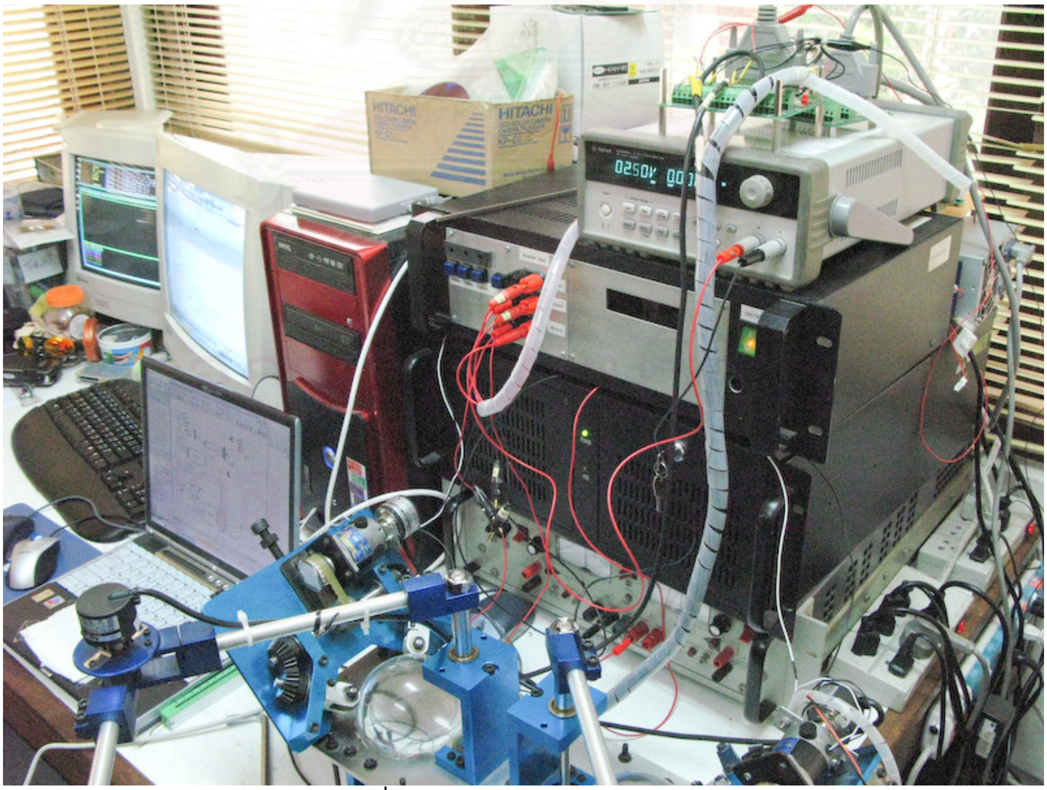
8.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ต้องอาศัยการควบคุมแบบ Real time งานวิจัยนี้ได้ตัดสินในเลือกใช้เครื่องมือในการควบคุมด้วย xPC target ของ โปรแกรม MatLab

การใช้ xPC target ในการควบคุมนั้นต้องอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวนสองชุด เพื่อใช้เป็น Host PC และ Target PC อย่างละชุด โดยจะใช้ TCP/IP ในการสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทั้งสองชุด โดยมี Host PC ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนชุดคำสั่งและแปลงรหัส ส่งผ่าน TCP/IP ไปยัง Taget PC ที่ทำหน้าที่ควบคุมชุดหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ในงานวิจัยนี้ใช้ Notebook PC เป็น Host PC และใช้ Industrial PC เป็น Target PC ดังรูปที่ 8.4 และ 8.5

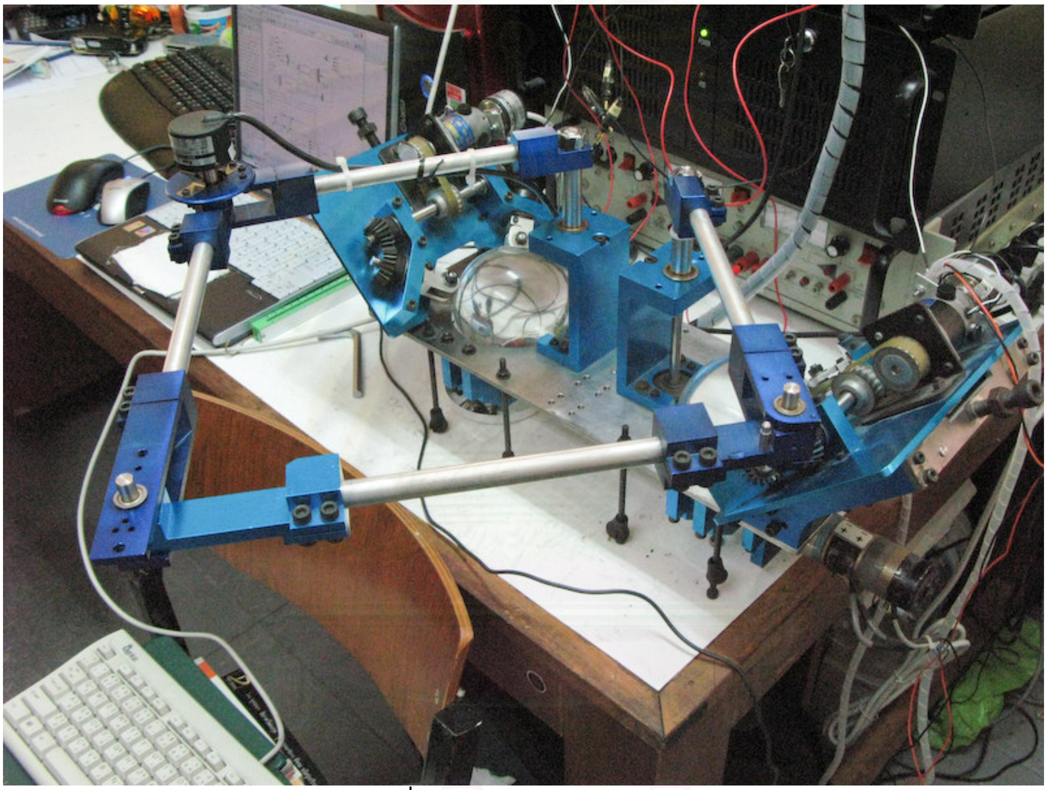


รูปที่ 8.4 ชุดอุปกรณ์หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ



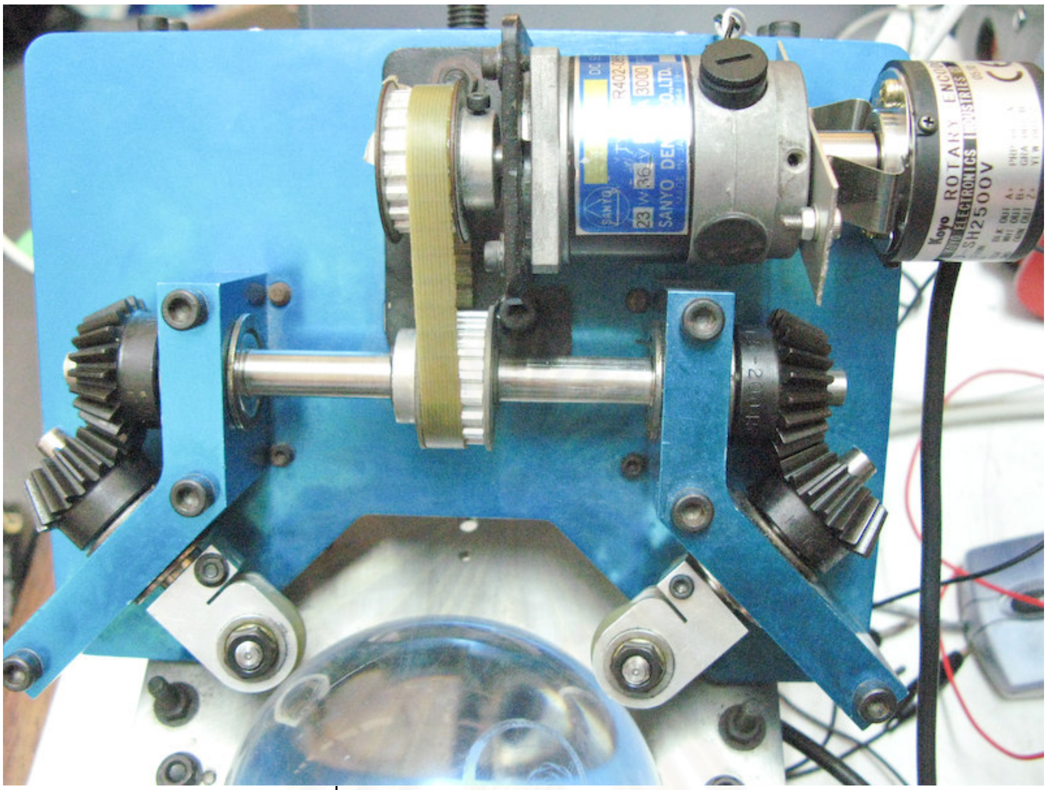
รูปที่ 8.5 Host PC และ Taget PC

การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ จะควบคุมโดยการปรับเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลม ทั้งสองชุด ซึ่งจะใช้มอเตอร์สองตัวในการขับชุดปรับเปลี่ยนแกนหมุนทั้งสองข้างอย่างละตัว และมีตัวถอดรหัส (Encoder) ทั้งหมด 6 ตัวที่ตำแหน่ง ต่างๆ คือติดที่ Output Shaft ทั้งสองข้างอย่างละตัว ติดที่มอเตอร์ทั้งสองข้างของชุดปรับมุมอัตราทดอย่างละตัว ติดที่เพลากลางหนึ่งตัว สุดท้ายติดที่ข้อต่อกลางระหว่างแขนท่อนล่างกับแขนท่อนบนของ Pantograph ใช้สำหรับเก็บข้อมูลของมุมที่หมุนไปและความเร็วการหมุนของจุดนั้นๆ ดังรูปที่ 8.6 ถึง รูปที่ 8.10

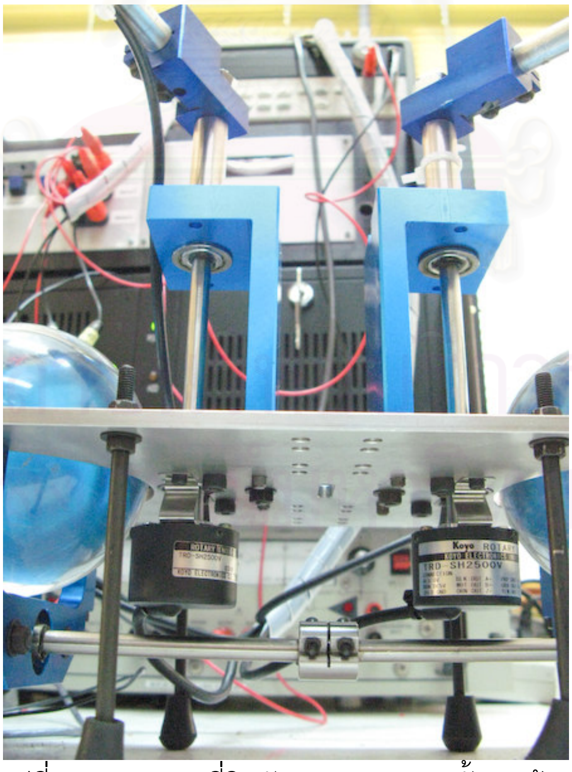


รูปที่ 8.6 Pantograph Cobot

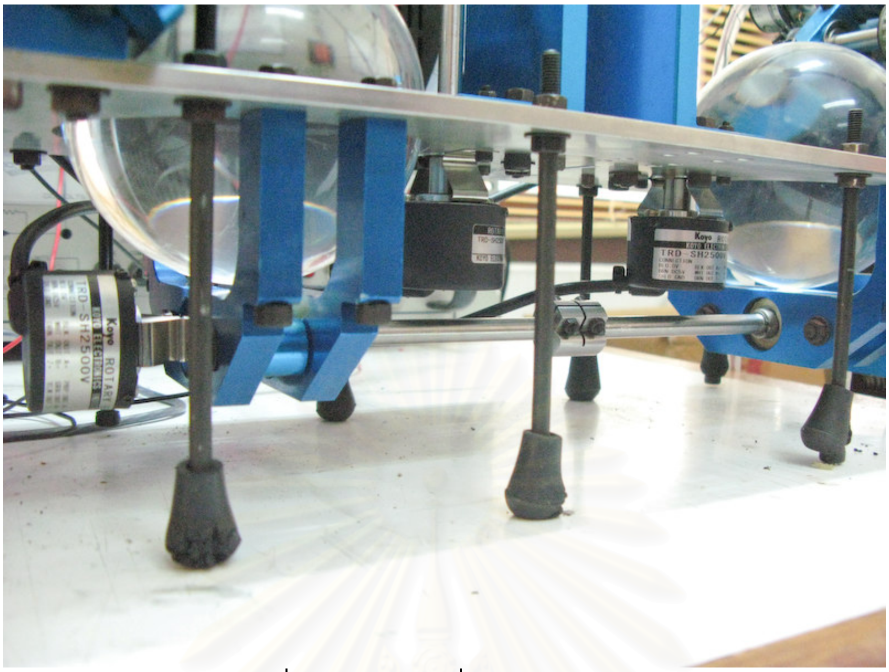
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



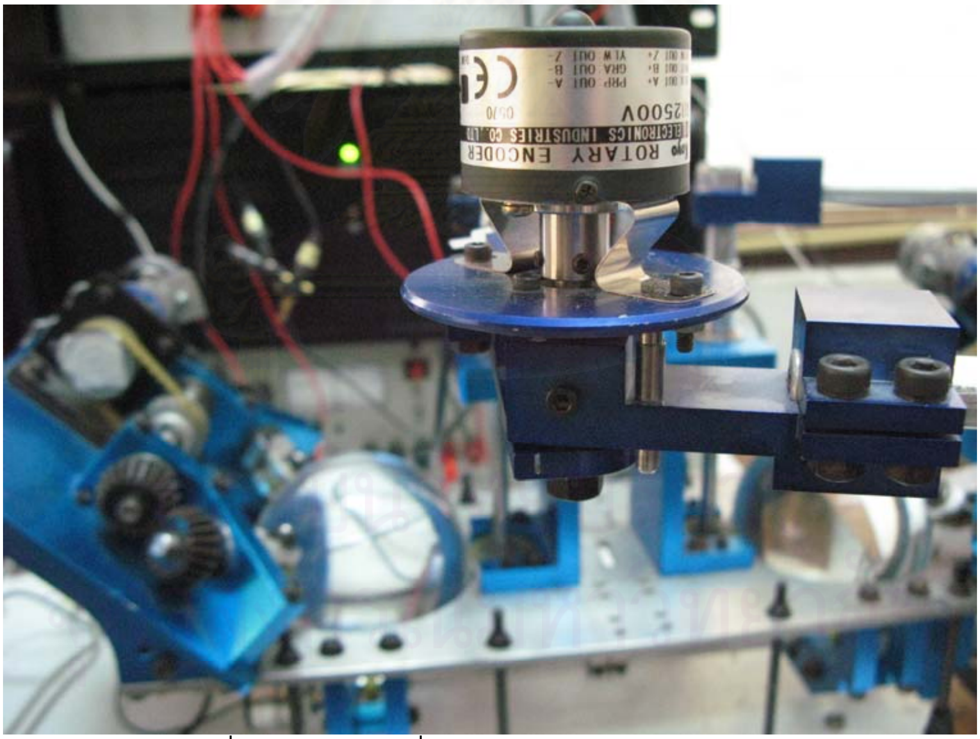
รูปที่ 8.7 มอเตอร์ขับชุดซีวีที และ Encoder



รูปที่ 8.8 Encoder ที่ติดกับ Output Shaft ทั้งสองข้าง



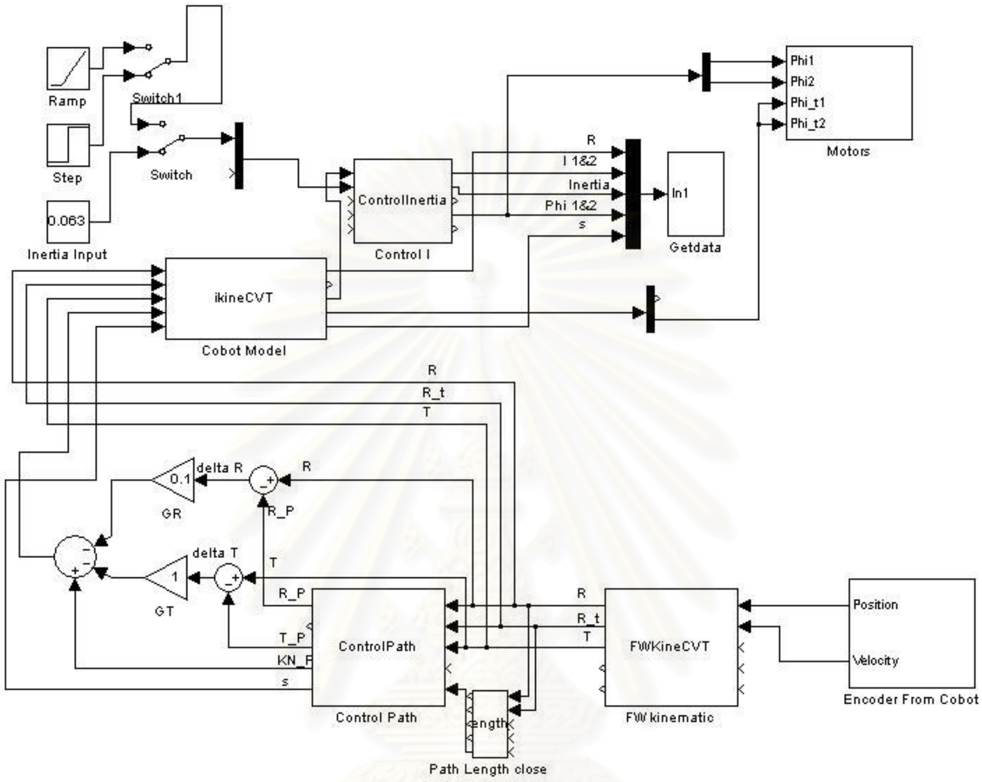
รูปที่ 8.9 Encoder ที่ติดกับเพลากลาง



รูปที่ 8.10 Encoder ที่ติดระหว่างข้อต่อของ Pantograph

8.6 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

การเขียนโปรแกรมควบคุม จะทำการเขียนบนโปรแกรม Matlab ในส่วนของ Simulink ที่เขียนโปรแกรมขึ้นมาเป็น Block แล้วนำมาต่อกัน ดังรูป



รูปที่ 8.11 Block โปรแกรมที่ใช้ควบคุม

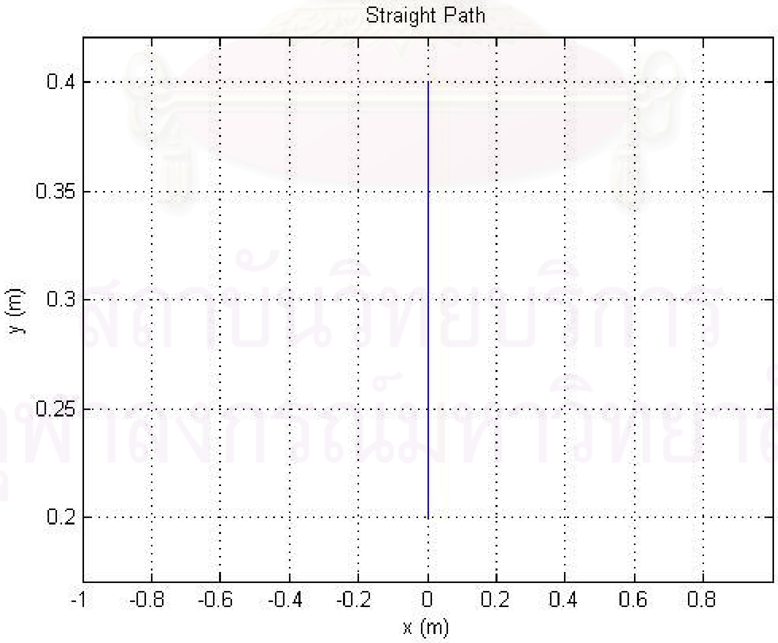
จากรูป 8.11 Block ของโปรแกรมประกอบไปด้วย Block ย่อยๆ ดังนี้

- Block Encoder จะทำหน้าที่รับค่ามุม และค่าความเร็วเชิงมุม ของชุดหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ทั้ง 6 จุด
- Block FW kinematics ทำหน้าที่ แปลงค่าที่ได้จาก Block Encoder ที่อยู่ในรูปของเชิงมุม ให้เป็นเชิงเส้นที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ
- Block Path Length ทำหน้าที่คำนวณหาค่า s' สำหรับใช้บอกตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ
- Block Control Path ทำหน้าที่สร้างเส้นทางให้ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ เคลื่อนที่ตาม

- Block Control Model ทำหน้าที่ในการแปลงปริภูมิการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนไปเป็นปริภูมิของมุมอัตราทด สำหรับใช้ควบคุมการปรับเปลี่ยนชุดอัตราทดทั้งสองข้างของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ
- Block Control I ทำหน้าที่คำนวณหาค่ามุมการปรับเปลี่ยนชุดอัตราทดทั้งสองข้างของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ เมื่อทำการกำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏตามที่ต้องการ
- Block Motors ทำหน้าที่รับค่าสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ของชุดปรับเปลี่ยนอัตราทดทั้งสองข้าง แล้วไปควบคุมการเปลี่ยนมุม และความเร็วในการเปลี่ยนมุมของแกนหมุนของทรงกลมในชุดซีวีที ทั้งสอง
- Block Getdata ทำหน้าที่ในการรับค่าต่างๆจากการทดลองที่ Target PC แล้วส่งกลับมาที่ Host PC

8.7 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

กำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ เป็นเส้นตรง ขนานกับแกน y ที่ x = 0 จุดเริ่มต้นที่ $[0 \quad 0.4]^T$ แล้วลากปลายแขนลงมาที่ตำแหน่ง $[0 \quad 0.2]^T$ เป็นระยะทาง 20 ซม. ดังรูปที่ 8.12



รูปที่ 8.12 เส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

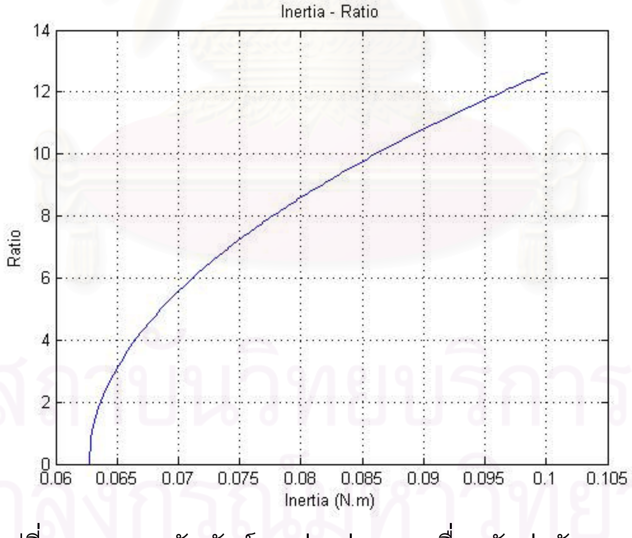
8.7.1 ความสามารถของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

หลังจากที่ได้กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติแล้ว จึงมาทำการทดลองหาความสามารถในการสร้างความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

การเคลื่อนที่ของปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นเกิดจากการปรับเปลี่ยนอัตราทดของชุดซีวีที ทั้งสองข้าง ซึ่งค่าอัตราทดที่ชุดซีวีที ที่สร้างได้นั้นหลังจากการปรับปรุงชุดอุปกรณ์ ทีกล่าวไปแล้วในบทที่ 5 จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.5 ดังแสดงในรูปที่ 5.8

การควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นก็อาศัยการปรับเปลี่ยนอัตราทดของชุดซีวีที ทั้งสองข้าง เช่นกัน ดังนั้นสามารถหาค่าความเฉื่อยปรากฏที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสามารถทำได้โดยไม่เกิดการลื่นไถลได้ดังนี้

ทำการหาความสัมพันธ์ของค่าความเฉื่อยปรากฏกับค่าอัตราทดที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสร้างได้โดยการกำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏน้อยที่สุดที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสามารถทำได้ แล้วทำการเพิ่มค่าความเฉื่อยปรากฏเรื่อยๆ พร้อมสังเกต ค่าอัตราทดที่ซีวีที แต่ละข้างทำได้ เมื่อถึงค่าอัตราทด เท่ากับ 8.5 ก็ดูว่าค่าความเฉื่อยปรากฏสูงสุดที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ทำได้มีค่าเท่าใด ได้ผลทางทฤษฎีดังรูปที่ 8.13

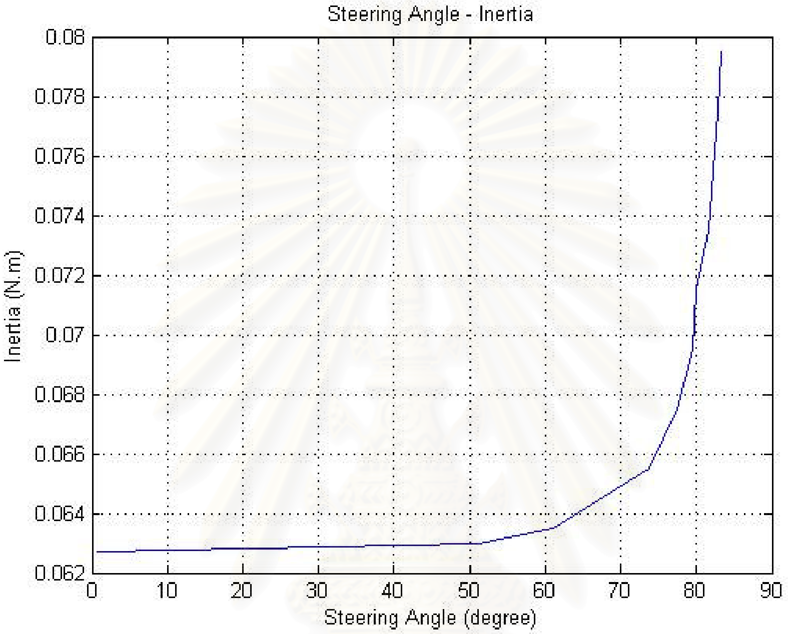


รูปที่ 8.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเฉื่อยกับค่าอัตราทด

จากรูปที่ 8.13 เมื่อค่าอัตราทดสูงสุดมีค่า 8.5 จะหาค่าความเฉื่อยปรากฏสูงสุดของชุดอุปกรณ์ทำได้คือ 0.078 N.m จะได้ว่า หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินี้สามารถสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏได้ระหว่าง 0.0625-0.078 N.m สำหรับเส้นทางเป็นเส้นตรงตามที่ได้ออกแบบเอาไว้

8.7.2 วิธีการสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติจะสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏ ได้จากการควบคุมการปรับเปลี่ยนแกนหมุนของชุดซีวีที ทั้งสองข้าง คือการปรับเปลี่ยนมุมของแกนหมุนของลูกทรงกลม ทั้งสอง (ϕ_1 และ ϕ_2) ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าความเฉื่อยปรากฏกับมุมของแกนหมุนของชุดซีวีที ได้ดังนี้



รูปที่ 8.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแกนหมุนของซีวีที กับค่าความเฉื่อยปรากฏ

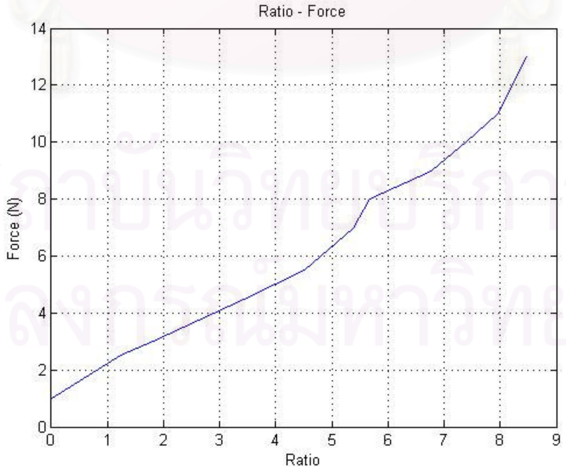
จากรูปที่ 8.14 พบว่าเมื่อ มุมปรับแกนหมุนของทรงกลมในชุดซีวีที หรือการปรับเปลี่ยนมุมของค่า ϕ_1 และ ϕ_2 นั้นจะเป็นการปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดของชุดซีวีที ทั้งสองข้าง ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ค่าความเฉื่อยปรากฏนั้นมีค่าเปลี่ยนไปด้วยดังนี้ เมื่อค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 มีค่าน้อยคือ 0 องศา ค่าความเฉื่อยปรากฏที่ได้ คือค่าที่น้อยสุด ต่อมาได้เพิ่มค่าของมุมไปเรื่อยๆ จนถึงค่าประมาณ 60 องศา ค่าความเฉื่อยปรากฏที่ได้ออกมามีค่าที่เพิ่มขึ้นที่ละไม่มาก แต่หลังจากมุม 60 องศาเป็นต้นไปจนถึงมุมเข้าใกล้ค่า 90 องศา ค่าความเฉื่อยปรากฏที่สร้างได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากว่า ค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ นั้นขึ้นอยู่กับค่าการปรับเปลี่ยนมุม หรือค่าปรับเปลี่ยนอัตราทด ยกกำลังสอง ซึ่งเมื่อค่ามุมมีค่าน้อย ค่าความเฉื่อยปรากฏก็มีค่าที่น้อยตาม แต่เมื่อค่ามุมมีค่ามากๆ เมื่อยกกำลังสองเข้าไปแล้วทำให้ค่าความเฉื่อยปรากฏที่ได้ออกมานั้นมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมาก

8.7.3 ความสามารถของการสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

เมื่อทราบขอบเขตของค่าความเฉื่อยที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสามารถทำได้แล้ว และความสัมพันธ์ระหว่างการปรับเปลี่ยนมุมอัตราทดกับค่าความเฉื่อยปรากฏแล้ว ต่อมาจะทำการทดลองวัดค่าแรงดึงที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

- กำหนดค่าอัตราทดที่มีค่าน้อยสุด คือ 0
- ทำการทดลองเคลื่อนที่ปลายแขนให้ไปตามเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้
- ในขณะที่เคลื่อนที่ปลายแขนก็จะดึงปลายแขนผ่านตาชั่งสปริง เพื่อหาค่าแรงที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ออกมา
- ทำการทดลองซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงที่ใช้เคลื่อนที่ปลายแขน
- ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนค่าอัตราทดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสร้างได้คือ 8.5

หลังจากที่ได้ทำการทดลองแล้ว นำค่าแรงดึงที่ใช้เคลื่อนที่มาหาความสัมพันธ์กับค่าอัตราทดได้ดังนี้



รูปที่ 8.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราทดกับค่าแรงเคลื่อนที่ปลายแขน

จากรูปที่ 8.15 จากรูปพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราทดของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติแล้ว ค่าแรงในการเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นจะมีค่า

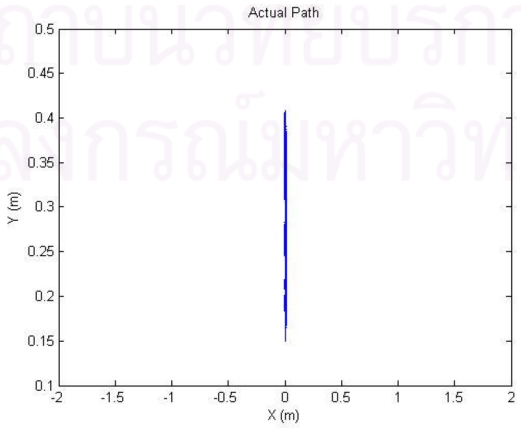
เพิ่มขึ้นด้วย แต่เนื่องจากค่าอัตราทดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความเฉื่อยปรากฏที่ได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 8.6.1 ซึ่งหมายความได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราทด เปรียบได้ว่าค่าความเฉื่อยปรากฏมากขึ้น ซึ่งก็คือจะทำให้ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติหนักขึ้นจึงทำให้ต้องเพิ่มแรงในการเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสร้างให้ปลายแขนมีความรู้สึกว่าหนักขึ้นจากต้องใช้แรงเคลื่อนที่ปลายแขน 1 N เสมือนว่าเคลื่อนที่ปลายแทนที่หนักขึ้น ต้องเพิ่มแรงเคลื่อนที่ปลายแขนได้ถึง 13 N

8.7.4 ผลการควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏแบบป้อนกลับ

การควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติโดยวิธีการป้อนกลับ โดยกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ตามที่ได้ออกแบบไว้คือเส้นตรง สามารถทำได้โดยการควบคุมค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 และค่า $\dot{\phi}_1$ และ $\dot{\phi}_2$ ที่ทำให้ปลายแขนนั้นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ ดังที่ได้กล่าวเอาไว้แล้วในบทที่ 7 แต่เนื่องจากการความควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏนั้น ทำโดยการควบคุมค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 เช่นกัน ดังนั้นเมื่อทำการควบคุมให้ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ พร้อมกับกำหนดค่าความเฉื่อยที่ต้องการสร้างไปพร้อมกันนั้น จะต้องทำการควบคุม ค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 ให้ได้ทั้งการเคลื่อนที่ตามเส้นทางและได้ทั้งค่าความเฉื่อยปรากฏตามที่ต้องการในเวลาเดียวกัน

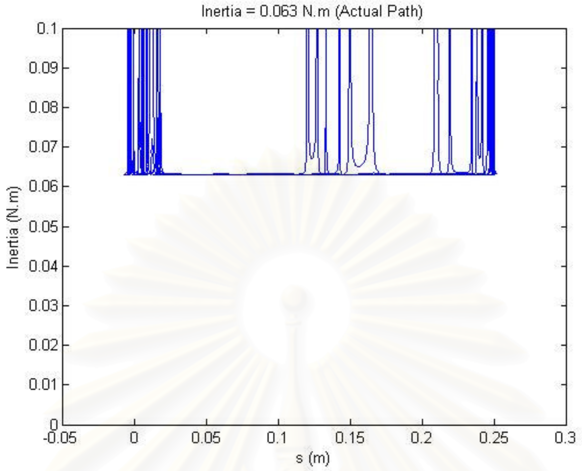
8.7.4.1 กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.063 N.m

เมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.063 N.m แล้วให้ปลายแขนเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยระหว่างทางได้ทำการลองเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางบ้าง ได้ผลการทดลองดังนี้



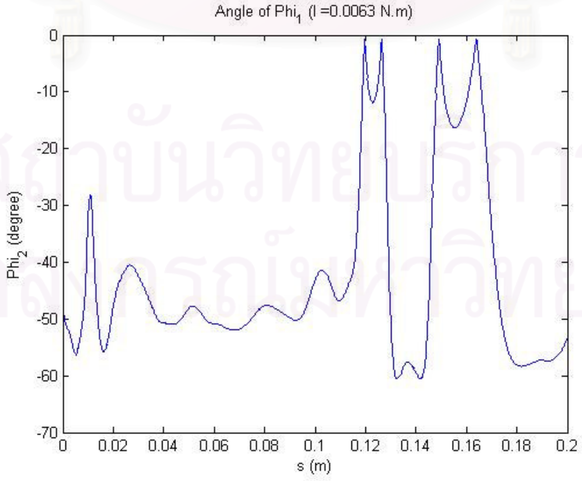
รูปที่ 8.16 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขน เมื่อ I =0.063 N.m

จากรูปที่ 8.16 พบว่า เมื่อทำการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นแล้วเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้ ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดเอาไว้ได้อย่างถูกต้อง

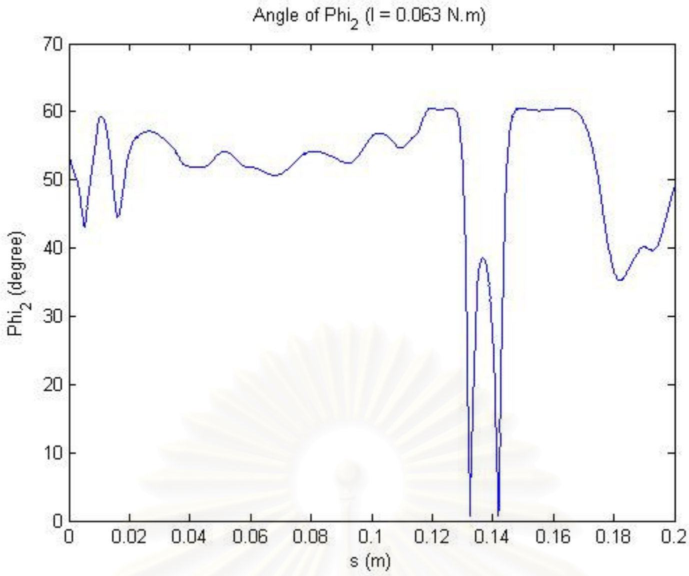


รูปที่ 8.17 ค่าความเฉื่อยปรากฏที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 8.17 พบว่า เมื่อเริ่มทำการเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้ออกแบบเอาไว้นั้น หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติก็ได้สร้างค่าความเฉื่อยปรากฏขึ้นเพื่อต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งจากรูปจะสังเกตว่า โดยรวมแล้วค่าความเฉื่อยปรากฏที่สร้างออกมาได้นั้นจะมีค่าตามที่ได้กำหนดเอาไว้ แต่บางตำแหน่งที่มีค่าเพิ่มมากกว่าปกติ เนื่องจากเมื่อทำการเคลื่อนที่ปลายแขน ได้มีการเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางที่กำหนดไว้ ล้อของชุดปรับอัตราทดจึงได้หมุนเพื่อปรับให้ปลายแขนเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งที่ถูกต้อง ทำให้ของค่าความเฉื่อยปรากฏเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 8.18 ค่ามุม ϕ_1 เมื่อ I =0.063 N.m



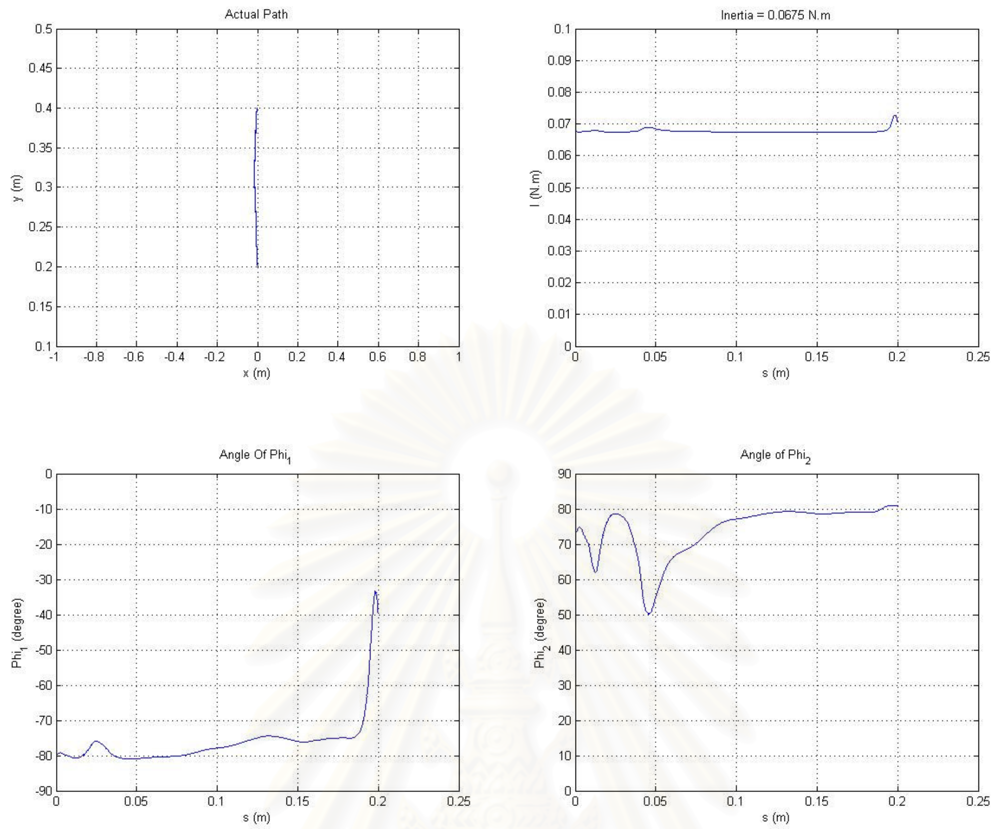
รูปที่ 8.19 ค่ามุม ϕ_2 เมื่อ I =0.063 N.m

จากรูปที่ 8.18 และ 8.19 แสดงค่ามุมของแกนหมุนของชุดซีวีที คือมุม ϕ_1 และ มุม ϕ_2 ตามลำดับ พบว่าค่ามุมที่ได้นั้นไม่ได้มีค่าเท่ากับ 61.07 องศา ตามที่ได้ทำการทดลองเอาไว้แล้วในรูปที่ 8.14 เป็นเพราะว่า ปลายแขนได้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดเอาไว้จริง แต่ไม่ได้เคลื่อนที่บนเส้นทางที่ได้กำหนดเอาไว้ถูกต้องตลอดเวลา เมื่อปลายแขนเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางที่ไดกำหนดเอาไว้ ระบบก็ได้ทำการควบคุมให้ปลายแขนเคลื่อนที่กลับเข้าไปยังเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้ จึงได้มีการปรับค่ามุมเป็นค่าที่ทำให้ปลายแขนนั้นกลับมายังเส้นทางที่กำหนด จึงทำให้ค่ามุมที่ออกมานั้นไมได้มีค่าที่คงที่ตลอดเวลา

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติที่กำหนดให้ค่าความเฉื่อยปรากฏมีเท่ากับ 0.063 N.m ต่อมาได้ทำการทดลองเช่นเดิมแต่ทำการเปลี่ยนค่าความเฉื่อยปรากฏเป็นค่าต่างๆ เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุดที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสามารถสร้างได้ ดังนี้

8.7.4.2 **กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.0675 N.m**

กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏให้มีค่าเท่ากับ 0.0675 N.m แล้วทำการทดลองเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ ผลที่ได้จากการทดลองมีดังนี้



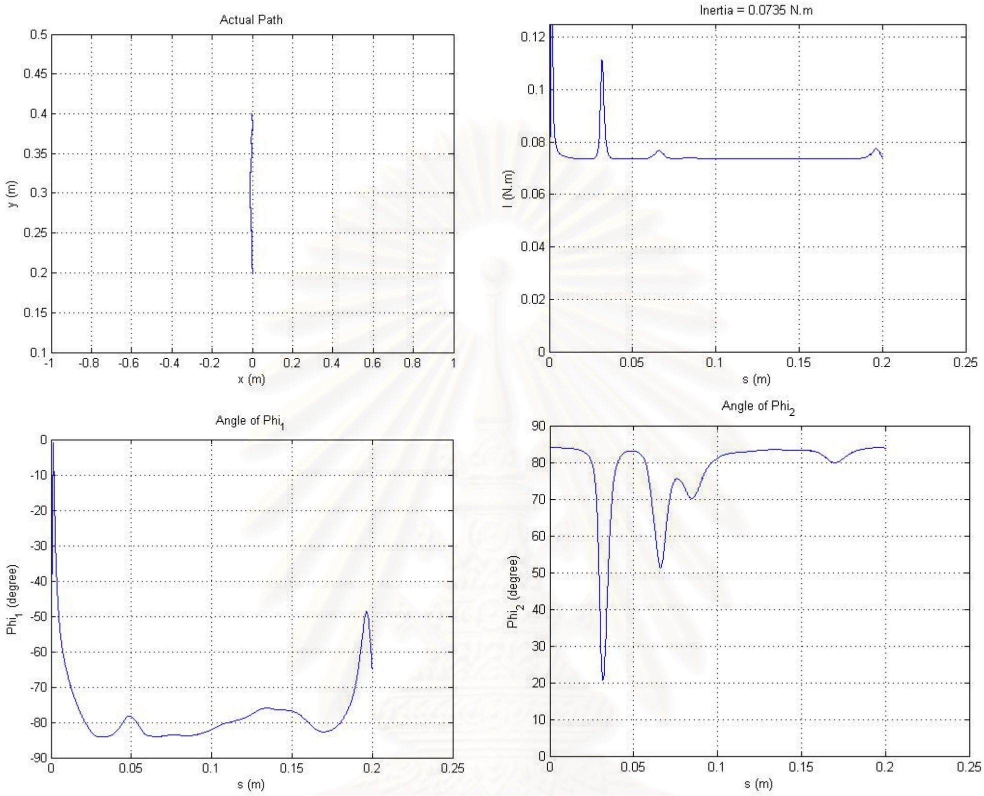
รูปที่ 8.20 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยเท่ากับ 0.0675 N.m

หลังจากทำการทดลองแล้วได้ผลดังรูปที่ 8.20 พบว่าเมื่อเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางที่ออกแบบไว้คือจากตำแหน่ง$[0 \quad 0.4]^T$ ไปยังตำแหน่ง $[0 \quad 0.2]^T$ เป็นระยะทาง 20 ซม. หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสามารถควบคุมให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการเคลื่อนที่ในช่วงระยะทางตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงระยะ 10 ซม.ผู้ทดลองได้เคลื่อนที่ปลายแขนออกไปจากเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้เล็กน้อย หุ่นยนต์โคบอทได้ทำการควบคุมปรับมุม ϕ_1 และ ϕ_2 เพื่อให้ปลายแขนเคลื่อนที่กลับมายังเส้นทางได้อย่างถูกต้อง แต่ในช่วงปลายของการเคลื่อนที่ ในช่วงใกล้ 20 ซม. ผู้ทดสอบได้ทำการปล่อยมือออกจากปลายแขน จึงทำให้ ค่ามุม ϕ_1 จึงเกิดการผิดพลาดเกิดขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.7.4.3 กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.0735 N.m

ต่อมาได้ทำการกำหนดให้ค่าความเฉื่อยปรากฏ มีค่าเท่ากับ 0.0735 N.m แล้วทำการเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ ได้ผลดังนี้

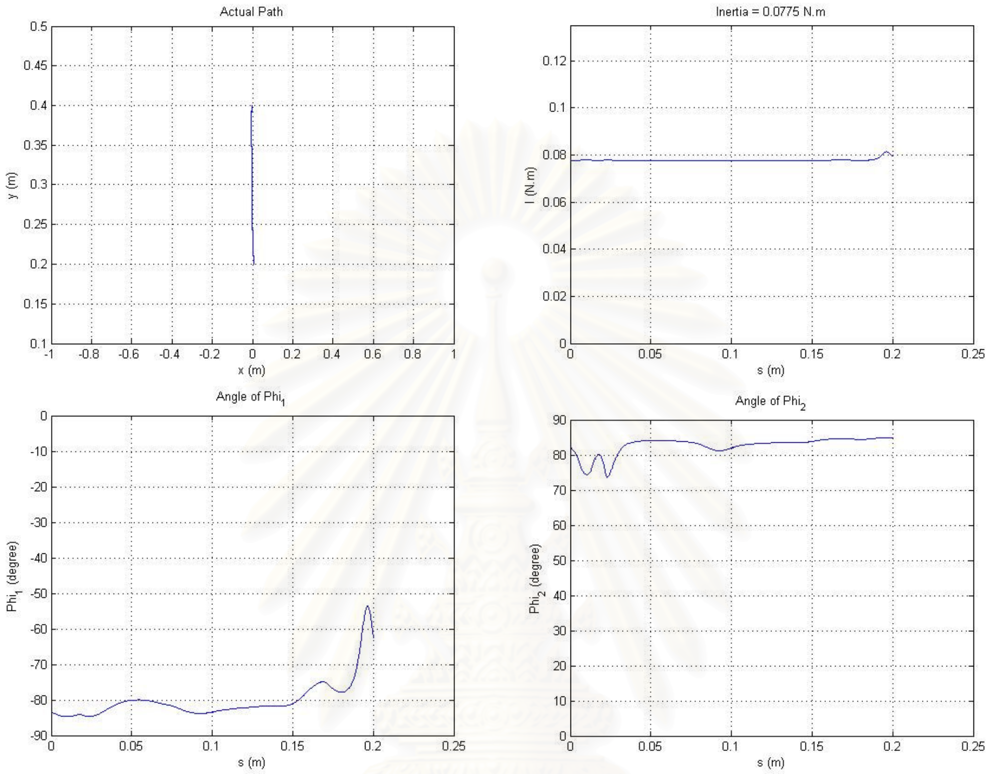


รูปที่ 8.21 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยเท่ากับ 0.0735 N.m

จากรูปที่ 8.21 พบว่าจากการทดลองกำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏให้มีค่าเท่ากับ 0.0735 N.m แล้วให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ จะได้ค่าความเฉื่อยปรากฏจากการทดลองมีค่าเท่ากับ ค่าที่ได้กำหนดไว้ และ ปลายแขนเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้ออกแบบเอาไว้ และเมื่อถึงระยะประมาณ 3 ซม.ผู้ทดลองได้ทำการรบกวนการเคลื่อนที่โดยการเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางที่กำหนดไว้ หุ่นยนต์โคบอทจึงได้ทำการควบคุมค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 ให้เพิ่มค่าความเฉื่อย ณ ตำแหน่งดังกล่าว ในทิศทางที่ออกนอกเส้นทางการเคลื่อนที่ พร้อมทั้งทำการปรับค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 เพื่อให้ปลายแขนเคลื่อนที่เข้าหาเส้นทางที่ได้กำหนดเอาไว้

8.7.4.4 **กำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏ เท่ากับ 0.0775 N.m**

ต่อมาได้ทำการกำหนดให้ค่าความเฉื่อยปรากฏ มีค่าเท่ากับ 0.0775 N.m แล้วทำการเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ ได้ผลดังนี้



รูปที่ 8.22 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าความเฉื่อยเท่ากับ 0.0775 N.m

เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ 8.22 เมื่อให้ผู้ทดลองออกแรงเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติได้ทำการควบคุมการปรับค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 เพื่อบังคับให้ผู้ทดลองเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ พร้อมกับสามารถสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏให้ได้ตามที่กำหนดไว้เช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 9
ข้อสรุปการวิจัยและข้อแนะนำ

9.1 ข้อสรุปงานวิจัย

หุ่นยนต์โคบอทเป็นหุ่นยนต์ประเภทหนึ่ง ที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ด้วยความปลอดภัย เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ใช้ต้นกำลังสำหรับการเคลื่อนที่ แต่จะมีชุดปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่อง หรือซีวีทีใช้สำหรับการกำหนดเส้นทางหรือแนวการเคลื่อนที่ โดยมนุษย์จะเป็นผู้ควบคุมแรงของการเคลื่อนที่เอง

ในการเคลื่อนที่ในระนาบ X-Y หุ่นยนต์โคบอทต้องการใช้ซีวีที เพียงชุดเดียว ก็สามารถที่จะควบคุมปลายแขนให้เคลื่อนที่ไปในระนาบภายในพื้นที่การทำงานได้อย่างปกติ แต่ในงานวิจัยนี้หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติที่เคลื่อนที่ในระนาบ X-Y ประกอบไปด้วย ชุดซีวีที จำนวนสองชุดต่อขนานกัน โดยข้างหนึ่งของซีวีที จะต่อกับ เพลากลางที่ทำหน้าที่เชื่อมซีวีที เอาไว้ด้วยกัน ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งต่อกับแขนกลแบบขนานชนิด Five Bar เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปในระนาบสองมิติได้ ดังนั้น หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ จึงจัดเป็น Redundant CVTs ในระนาบสองมิติ โดยมีจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือใช้ Redundant CVTs ในการควบคุมความเฉื่อย ปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

อุปกรณ์ต้นแบบหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้น เดิมมีข้อบกพร่องหลายอย่าง จึงไม่สามารถที่จะทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของอุปกรณ์ ปัญหาหลักๆที่พบคือเกิดการลื่นไถลระหว่างล้อยูริเทนกับลูกทรงกลม ชนิดของยางยูริเทนเดิมที่ยังไม่ดีพอกับการใช้งานนี้ จึงได้ทำการเปลี่ยนคุณสมบัติและรูปทรงยางหุ้มล้อใหม่ เป็นยางยูริเทนที่มีความแข็งมากขึ้นกว่าเดิม ผลจากการเปลี่ยนล้อแล้วสรุปได้ว่า พื้นที่สัมผัสระหว่างล้อยูริเทนกับลูกแก้วมีค่าเข้าใกล้จุดมากขึ้นตามทฤษฎี จึงทำให้ประสิทธิภาพของการปรับเปลี่ยนอัตราทดมีค่าสูงกว่าเดิมมาก เกิดการลื่นไถลน้อยลง สามารถรับแรงบิดได้มากขึ้น ปัญหาอีกประการหนึ่งคือตัวยึดแกนล้อปรับเปลี่ยนแกนหมุนของทรงกลมเกิดการสั่นคลอนเกิดขึ้น จึงได้เปลี่ยนขนาดพิกัดการสวมและทำชิ้นงานขึ้นมาใหม่ เมื่อเปลี่ยนชิ้นงานแล้ว อาการคลอนลดลงอย่างมาก การปรับปรุงอุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จึงประสบผลสำเร็จเพิ่มประสิทธิภาพช่วงการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทขึ้นเป็นอย่างมาก สามารถเพิ่มอัตราทดของซีวีที จาก 1.5 เป็น 8.5

การหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบอนุกรมสามารถหาได้ง่าย ไม่มีความซับซ้อนอะไรมาก แต่สำหรับหุ่นยนต์แบบขนาน ไม่สามารถใช้วิธีการมาตรฐานดังกล่าวได้ สมการการเคลื่อนที่จะซับซ้อนกว่า ซึ่งการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบขนานสามารถหาได้หลายวิธี งานวิจัยนี้ได้เลือกเอาการหาสมการการเคลื่อนที่แบบใช้สมการลากรานจ์ แบบที่หนึ่ง มาเป็นเครื่องมือในการหาสมการการเคลื่อนที่ หลังจากหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติออกมาได้แล้ว สามารถแยกเมทริกซ์ความเฉื่อย(Inertia) ออกมาเพื่อที่จะมาศึกษาหาวิธีการควบคุมค่าความเฉื่อยที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามค่าที่กำหนด โดยจะทำการควบคุมความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติได้ด้วยการใช้ Redundant CVT ก็คือให้ค่าอัตราทดของซีวีทีทั้งสองข้าง สร้างค่าความเฉื่อยปรากฏขึ้นมา ซึ่งการควบคุมนี้จะมีส่วนที่ควบคุมได้กะส่วนที่เป็นค่าคงที่ไม่สามารถควบคุมได้ นั้นก็คือค่าความเฉื่อยของแขนกล Five Bar ที่มีค่าคงที่ตลอดไม่ว่าจะกำหนดค่าอัตราทดเป็นค่าใดก็ตาม ไม่สามารถที่จะหักล้าง หรือชดเชยค่าความเฉื่อยตรงนี้ไปได้หมด สรุปคือ ต่อให้ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทดทั้งสองไม่สร้างค่าความเฉื่อยขึ้นมาก็ยังจะมีค่าความเฉื่อยปริมาณนี้อยู่ตลอด

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราทดของซีวีที กับค่าความเฉื่อยพบว่า ค่าความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราทดกำลังสอง หมายความว่า ถ้าค่าอัตราทดมีค่าน้อยๆ ค่าความเฉื่อยก็มีค่าน้อยๆ แต่ถ้าเมื่อใดที่ค่าอัตราทดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความเฉื่อย ก็จะเพิ่มมากขึ้นเป็นกำลังสอง หลังจากที่ได้ทำการทดลองกำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏเป็นค่าต่างๆ สรุปได้ว่า เมื่อค่ามุมปรับเปลี่ยนแกนหมุน (ϕ) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความเฉื่อยปรากฏก็จะมาขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากกราฟจะสังเกตได้ว่า ค่าความเฉื่อยสูงๆ จะมีค่ามุม ϕ ที่เข้าใกล้ ค่า 90 องศา ส่วนย่านที่มุมหมุนไปเป็นมุมน้อยๆ ค่าความเฉื่อยปรากฏจะไม่ค่อยมีค่าต่างกันมากนัก ซึ่งจากการที่เมื่อต้องการค่าความเฉื่อยสูงๆ มุม ϕ จะมีค่าเข้าใกล้ 90 ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างล้อยูริเทนกับลูกแก้วเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งก็คือชุดซีวีที มีค่าอัตราทดที่มากเกินกว่าที่ชุดอุปกรณ์จะรองรับได้ ซึ่งชุดอุปกรณ์สามารถรองรับได้สูงสุด ประมาณ 8.5 เท่า จึงส่งผลให้สามารถสร้างค่าความเฉื่อยปรากฏมาได้สูงสุดที่ 0.078 N.m ซึ่งถ้าเกิดมากกว่านี้จะทำให้เกิดการลื่นไถลเกิดขึ้น จึงจะให้ผลที่ออกมาไม่ค่อยดีนัก คือค่าความเฉื่อยที่เกิดขึ้นต้านการเคลื่อนที่ของปลายแขนไม่ได้มากกันตามทฤษฎี ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดของวิธีการส่งถ่ายกำลังด้วยผิวสัมผัสชนิดนี้

ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติสำหรับทดลองนี้ ใช้วิธีควบคุมแบบป้อนกลับ ในการทดลองการควบคุมความเฉื่อย ได้กำหนดเส้นทางให้ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขนานกับแกน y จากตำแหน่ง $[0 \quad 0.4]^T$ ไปถึง

ตำแหน่ง $[0 \quad 0.2]^T$ เป็นระยะทาง 20 ซม. หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความเฉื่อยปรากฏแล้ว หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ สามารถเคลื่อนที่ปลายแขนไปตามเส้นทางได้อยู่ถูกต้อง เมื่อปลายแขนทำการเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้ ระบบควบคุมก็จะปรับค่ามุม ϕ_1 และ ϕ_2 เพื่อให้ปลายแขนเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งในเส้นทางได้อย่างถูกต้อง โดยที่ยังสามารถควบคุมค่าความเฉื่อยปรากฏให้ได้ค่าตามที่กำหนดไปพร้อมๆ กัน

9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การส่งถ่ายกำลังด้วยวิธีการใช้แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง คือ ลูกแก้วอะคิลิคกับล้อยางยูริเทน นั้นมีข้อจำกัดอยู่ในระดับหนึ่งคือสามารถส่งถ่ายกำลังได้ค่าสูงสุดเท่ากับค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสนั้นสามารถสร้างได้ ดังนั้นควรหาวิธีที่จะเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างลูกแก้วกับล้อยางยูริเทนเพื่อเพิ่มอัตราทดของซีวีที ให้สูงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ล้อยูริเทนส่งกำลังที่อยู่ตรงแกนข้อต่อแรกของแขนกลมีความยืดหยุ่นในแนวรัศมีซึ่งมีผลทำให้ข้อต่อของแขนกลให้ตัวมากเกินไปยังผลให้ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทมีข้อจำกัดในการสร้างเส้นทาง ดังนั้นควรปรับปรุงให้มีความแข็งเกร็งมากขึ้น

เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพของการสร้างค่าอัตราทดของชุดซีวีที อย่างถูกต้อง ควรที่จะทำการทดลองวัดค่าประสิทธิภาพของการส่งกำลังในระบบซีวีที ด้วยการหาค่ากำลังที่ออกจากชุดซีวีที เทียบกับค่ากำลังที่ใส่เข้าไปในชุดซีวีที เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของการทำงานของชุดซีวีทีชนิด Spherical CVT แล้วเทียบกับ ซีวีทีชนิดอื่นๆ ที่ได้ทำศึกษามา เพื่อจะได้เป็นมาตรฐานได้ว่า ชุดซีวีทีแบบต่างๆกัน จะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างไร ชนิดใดให้ประสิทธิภาพสูงสุด ชนิดใดต่ำสุด และ Spherical CVT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในระดับใด สามารถนำมาใช้งานในการสร้างอัตราทดได้ตามที่ต้องการหรือไม่

เพื่อการวิจัยที่สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้นควรที่จะทำการหาค่าความเฉื่อยปรากฏ ณ ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติที่ จุดหมุนทั้งสองของฐานแกนกล Pantograph เท่านั้น จึงยังไม่สามารถหาค่าความเฉื่อยปรากฏที่ปลายแขนอย่างแท้จริงได้

หลังจากหาค่าความเฉื่อยปรากฏที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติได้แล้ว ก็จะสามารถที่จะหาค่าแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ได้ เมื่อทำการกำหนดค่าความเฉื่อยที่ปลายแขนตามค่าที่ต้องการ แล้วทำการวัดค่าแรงดึงที่ปลายแขน มาเทียบกับค่าแรงที่ได้จากการคำนวณว่า สอดคล้องกันหรือไม่

รายการอ้างอิง

[1] T. F. CHEN, D. W. LEE and C. K. SUNG. AN EXPERIMENTAL STUDY ON TRANSMISSION EFFICIENCY OF A RUBBER V-BELT CVT. Mach. Theory 33, 4 (1998).

[2] Haruhito Mori, Tsutomu Yamazaki, Katsuya Kobayashi, Toshifumi Hibi. A study on the layout and ratio change characteristics of a dual-cavity half-toroidal CVT.JSAE Review 22 (2001):299 – 303.

[3] http://cvt.com.sapo.pt/hydrostatic/hydrostatic.htm.

[4] http://cvt.com.sapo.pt/ratcheting/ratcheting.htm.

[5] C. Moore. Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March (1997).

[6] John J. Craig. Introuction to Robotics mechanics and control: Addison-Wesley. (1955).

[7] เสถียร วงศ์สารเสริฐ . กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคพลศาสตร์: ซีเอ็ด, 2538

[8] ดร.อิทธิพล ปานงาม ประเสริฐ เสริมศรีสุวรรณ. กลศาสตร์เครื่องจักรกล.

[9] M. A. Peshkin .J. E. Colgate and R. B. Gillespie (2001). A General Framework for Cobot Control. IEEE Transactions on Robotics and Automation 17. Aug. (2001):391-401

[10] Wannasuphoprasit W, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, Cobot Control. Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation (1997):3571-3576.

[11] Lung-Wen Tssai. ROBOT ANALYSIS: Wiley Interscience3. (1999).

[12] ภาณุ บุญวัฒโนภาส , ภูพิงค์ แต้ปิติกุล , ยงยุทธ กุลสราวุธ. การพัฒนาอุปกรณ์ CVT สำหรับระบบสร้างความรู้สึกเสมือนจริง. ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2004).

[13] นายธนโชติ ชีพสุมล. การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ข้อต่อทรงกลมแบบขนาน. ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2003).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์

ก.1 แผงวงจร ADlink PCI-9112 Multifunction DAS Card

รูปที่ ก.1 Multifunction DAS Card

รายละเอียดของ Multifunction DAS Card

- ใช้ช่องเสียบบนคอมพิวเตอร์แบบ PCI แบบ 32-bit
- มีความละเอียดของภาครับแบบ อนาลอก 12-bit
- มี A/D FIFO Memory อยู่บนตัวแผงวงจร
- มีระบบเลือกค้นหาช่องสัญญาณ แบบอัตโนมัติ
- มีช่องสัญญาณรับแบบ อนาลอก 16 Single –End/8 Differential
- มีช่องสัญญาณส่งออกแบบ อนาลอก 12-bit monolithic multiplying 2 ช่อง
- มีช่องสัญญาณรับแบบ ดิจิตอล 16 ช่อง
- มีช่องสัญญาณส่งออกแบบ ดิจิตอล 16 ช่อง
- มีเต้าเชื่อมต่อสายแบบ D-Type 37 pin

ก.2 แผงวงจร ADlink PCI -8133 PCI Bus Advanced Data Acquisition Card

รูปที่ ก.2 PCI Bus Advanced Data Acquisition Card

รายละเอียดของ PCI Bus Advanced Data Acquisition Card

- ใช้ช่องเสียบบนคอมพิวเตอร์แบบ PCI แบบ 32-bit
- มีช่องต่อตัวนับตัวเข้ารหัส แบบ quadruple AB phase 3 ชุด
- มีวงจร 5000V rms isolation สำหรับ สัญญาณการเข้ารหัสในตัว
- มีตัวนับ ขึ้น-ลงแบบ 16-bit
- มีตัวกรองสัญญาณแบบดิจิตอล de-glitch สำหรับทุกช่องสัญญาณเข้า
- สามารถโปรแกรมความถี่สำหรับ ตัวกรองสัญญาณแบบดิจิตอล de-glitch ล่วงหน้าได้
- มีตัวสร้าง 12-bit PWM waveform 3 ชุด
- มีตัวรับสัญญาณแทรกจากสัญญาณนาฬิกาแบบตัวล่วงหน้าได้ 2 ชุด

ภาคผนวก ข.

ความเฉื่อย

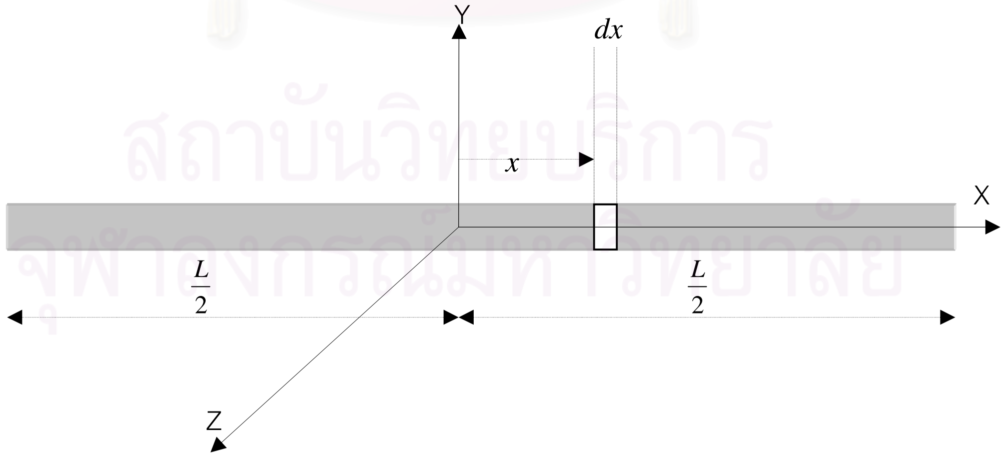
ความเฉื่อย (Inertia) คือ ปริมาณๆหนึ่งทำหน้าที่ในการต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ ความเฉื่อยเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัตถุนั้นๆ โดยความเฉื่อยจะต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุทั้งในเชิงเส้นและเชิงมุม ซึ่งในเชิงเส้น“มวล”จะเป็นตัววัดหรือบ่งบอกถึงปริมาณของความเฉื่อย ส่วนในเชิงมุม ความเฉื่อยจะอยู่ในรูปของ “โมเมนต์ของความเฉื่อย” ของวัตถุนั้นเอง

ข.1 ตัวอย่างการหาค่าความเฉื่อยของวัตถุ

ตัวอย่างต่อไปนี้จะเป็นวิธีการคำนวณหาค่าความเฉื่อยของวัตถุหรือระบบที่เคลื่อนที่ในเชิงมุม

ข.1.1 แขนของหุ่นยนต์ (Link)

กำหนดให้แขนหุ่นยนต์มีขนาดเล็ก คือ ค่ารัศมีมีค่าน้อยๆเมื่อเทียบกับความยาวของแขนหุ่นยนต์



รูปที่ ข.1แขนของหุ่นยนต์

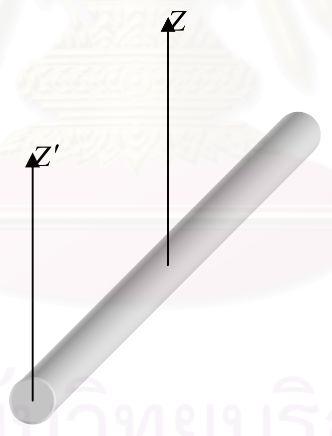
I หาได้จาก Mass moment of Inertia

$$
\begin{aligned}
I_x &= \int r_x^2 dm = \int (y^2 + z^2) dm = 0 \\
I_z &= \int r_z^2 dm \\
&= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 dm = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 \rho dx \\
&= \frac{1}{12} mL^2 \\
I_z &= I_y = \frac{1}{12} mL^2
\end{aligned}
$$

จะได้ค่าความเฉื่อยของการหมุนของแขนหุ่นยนต์ณ จุด CG ของแขนออกมามีค่าเท่ากับ

$$I = \frac{1}{12} mL^2 \qquad (ข.1)$$

โดยส่วนมากแขนหุ่นยนต์จะเกิดการหมุนที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ไม่ใช่ที่จุด CG ของแขนหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงต้องทำการย้ายแกนหมุนจากจุด CG ของแขนมายังที่ปลายของแขนหุ่นยนต์



รูปที่ ข.2 การย้ายจุดหมุนของแขนหุ่นยนต์

จากรูป จะทำการย้ายแกนหมุนจาก $I_z \rightarrow I'_z$ โดยใช้ หลักการของ Parallel Axis Theorem Mass Moment

จาก $$I' = I + md^2$$

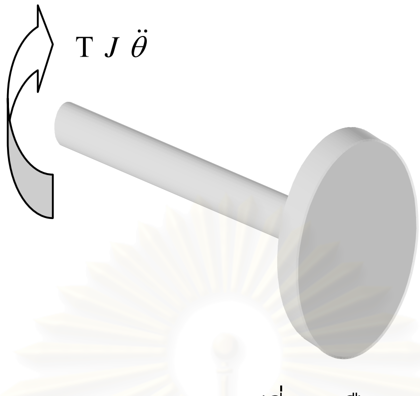
$$
\begin{aligned}
I'_z &= \tfrac{1}{12} mL^2 + m \tfrac{L}{2}^2 \\
&= \tfrac{1}{12} mL^2 + \tfrac{1}{4} mL^2
\end{aligned}
$$

จะได้ $$I'_z = \tfrac{1}{3} mL^2 \qquad (ข.2)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 ความเฉื่อยของชุดเฟือง

เช่นดังรูป

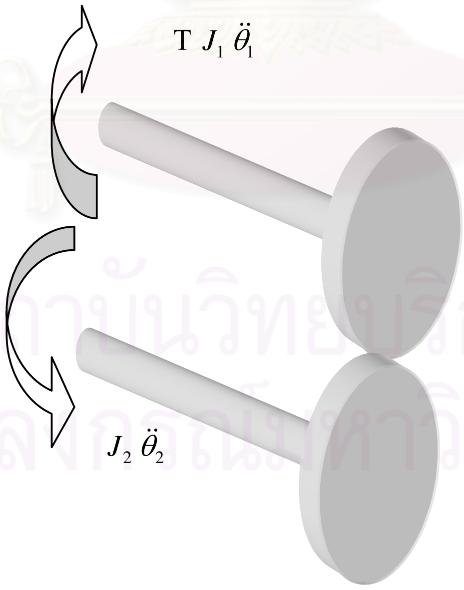


รูปที่ ข.3 เฟือง

มีวัตถุๆหนึ่งอยู่ ใส่แรงบิดเข้าไปที่วัตถุค่าๆหนึ่ง วัตถุซึ่งมีค่าความเฉื่อย J อยู่ก็จะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร่งเชิงมุมค่าๆหนึ่ง $\ddot{\theta}$ ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$\mathrm{T} = J\ddot{\theta} \qquad \text{(ข.3)}$$

ข.3 การนำเฟืองมารวมเป็นระบบมากขึ้น



รูปที่ ข.4 ชุดเฟืองสองตัวขบกัน

จากรูป ระบบประกอบไปด้วยชุดเฟืองสองตัวขบกันอยู่ เฟืองตัวที่หนึ่งมีค่าความเฉื่อย J_1 หมุนด้วยความเร่งเชิงมุม $\ddot{\theta}_1$ โดยที่เฟืองตัวแรกมีจำนวนฟันเท่ากับ N_1 เฟืองตัวที่สองมีค่าความเฉื่อย J_2 หมุนด้วยความเร่งเชิงมุม $\ddot{\theta}_2$ มีจำนวนฟันเท่ากับ N_2

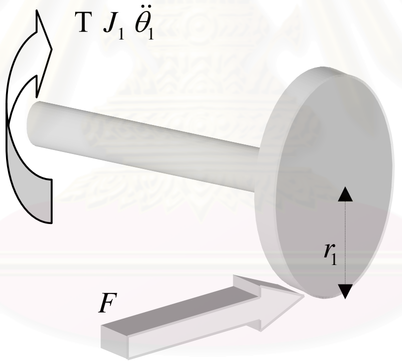
เฟืองชุดนี้จะมีอัตราทดออกมาคือ $\dfrac{\ddot{\theta}_2}{\ddot{\theta}_1} = \dfrac{N_1}{N_2}$

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้สมการคือ

$$T = J_1\ddot{\theta}_1 + J_2\ddot{\theta}_2 \qquad (ข.4)$$

เนื่องจากความเฉื่อยของเฟืองตัวที่หนึ่งกับตัวที่สองอยู่กันคนละแกน (Coordinate) ดังนั้นต้อง Free body diagram ของเฟืองแต่ละตัวออกมา ดังนี้

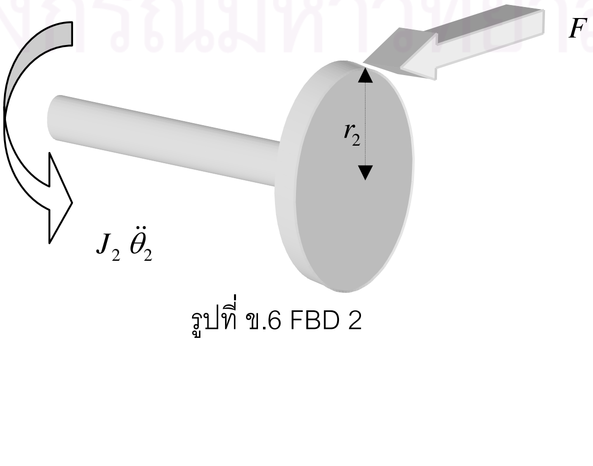
FBD 1



รูปที่ ข.5 FBD 1

จากรูปจะได้ว่า $T = J_1\ddot{\theta}_1 + Fr_1$ (ข.5)

FBD 2



รูปที่ ข.6 FBD 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปจะได้ว่า $$Fr_2 = J_2\ddot{\theta}_2 \qquad (ข.6)$$

$$F = \frac{J_2\ddot{\theta}_2}{r_2}$$ แทนค่าลงในสมการ (1.3)

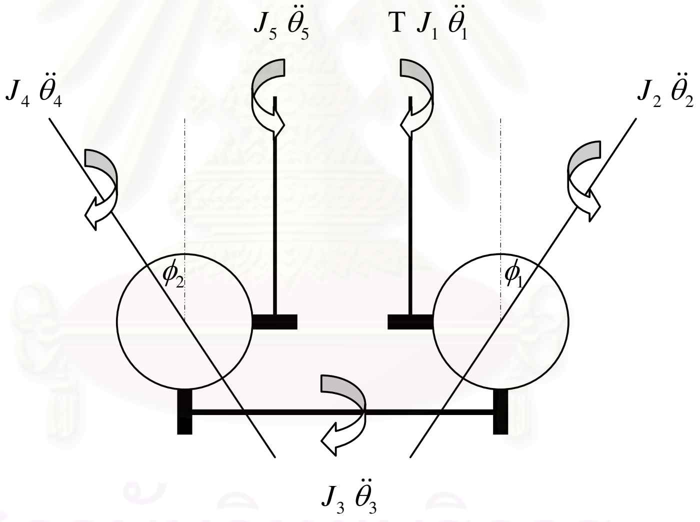
จะได้ $$T = J_1\ddot{\theta}_1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)J_2\ddot{\theta}_2$$

$$= J_1\ddot{\theta}_1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)\left(\frac{N_1}{N_2}\right)J_2\ddot{\theta}_1$$

เนื่องจาก $\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)$ = อัตราทด $= \eta$

จะได้ว่า $$T = \left(J_1 + \eta^2 J_2\right)\ddot{\theta}_1 \qquad (ข.7)$$

ข.4 การคำนวนหาค่า Inertia **ของระบบซีวีที**

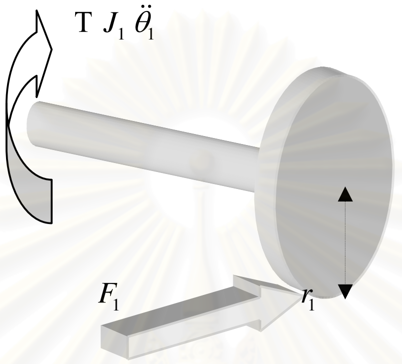


รูปที่ ข.7 ระบบซีวีที

จากรูป ระบบซีวีที ประกอบด้วย แกนเพลา 1 ที่มีค่าความเฉื่อย J_1 หมุนไปเป็นมุม θ_1 ไปขับให้ทรงกลม 1 ที่มีความเฉื่อย J_2 หมุนไปเป็นมุม θ_2 และส่งไปยัง เพลากลาง Common Shaft ที่มีความเฉื่อย J_3 หมุนไปเป็นมุม θ_3 แล้วส่งต่อไปยังทรงกลม 2 ที่มีค่าความเฉื่อย J_4 หมุนไปเป็นมุม θ_4 และสุดท้ายส่งต่อไปยังแกนเพลา 2 ที่มีค่าความเฉื่อย J_5 หมุนไปเป็นมุม θ_5 ตามลำดับ

เนื่องจากระบบซีวีที ประกอบด้วยระบบย่อยๆ หลายระบบ ดังนั้นสามารถเขียน Free body diagram (FBD) เป็นระบบย่อยๆ ได้ดังนี้

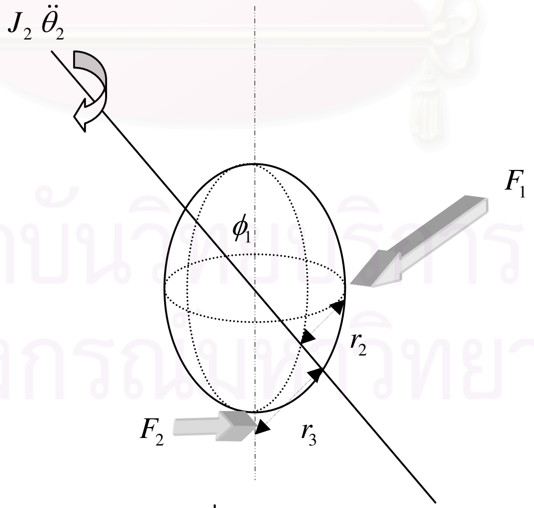
FBD 1 Shaft 1



รูปที่ ข.8 FBD 1

จะได้ว่า $T = J_1\ddot{\theta}_1 + F_1 r_1$ (ข.8)

FBD 2 ทรงกลม 1



รูปที่ ข.9 FBD 2

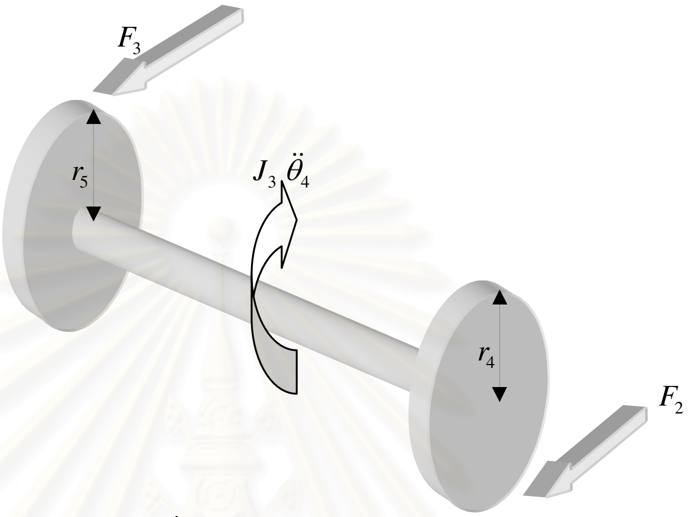
จะได้ว่า $F_1 r_2 = J_2\ddot{\theta}_2 + F_2 r_3$ (ข.9)

และ $r_2 = R\cos\phi_1$

$$r_3 = R\sin\phi_1$$

$$\frac{r_3}{r_2} = \tan\phi_1$$

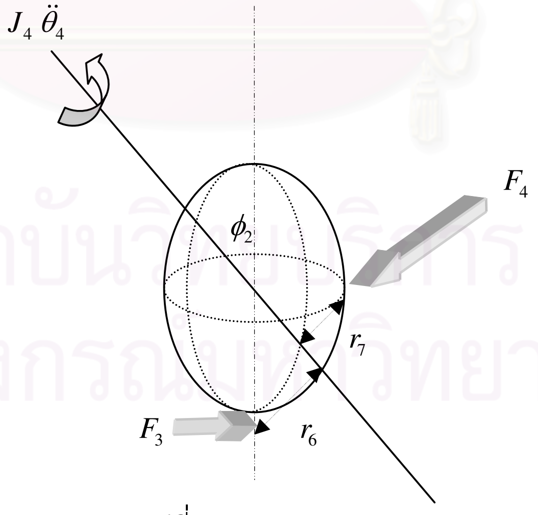
FBD 3 Common Shaft



รูปที่ ข.10 Common Shaft

จะได้ว่า $F_2 r_4 = J_3\ddot{\theta}_3 + F_3 r_5$ (ข.10)

FBD 4 **ทรงกลม 2**



รูปที่ ข.11 ทรงกลม 2

จะได้ว่า $F_3 r_6 = J_4\ddot{\theta}_4 + F_4 r_7$ (ข.11)

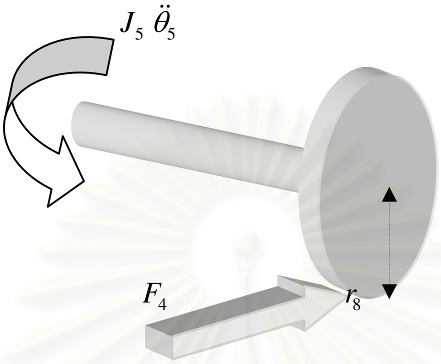
และ $r_7 = R\cos\phi_2$

$r_6 = R\sin\phi_2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{r_7}{r_6} = \tan\phi_2$$

FBD 5 Shaft 2



รูปที่ ข.12 Shaft 2

จะได้ว่า $$F_4 r_8 = J_5\ddot{\theta}_5 \qquad \text{(ข.12)}$$

ต่อมาทำการแทนค่าสมการต่างๆ ดังนี้

จากสมการ (2.5)

จะได้ $F_4 = \dfrac{J_5\ddot{\theta}_5}{r_8}$ แทนค่าลงในสมการ (ข.11)

จะได้ $F_3 r_6 = J_4\ddot{\theta}_4 + \dfrac{r_7}{r_8}J_5\ddot{\theta}_5$ แต่ $\ddot{\theta}_5 = \dfrac{r_7}{r_8}\ddot{\theta}_4$

จะได้ $F_3 = \dfrac{1}{r_6}\left(J_4 + (\dfrac{r_7}{r_8})^2 J_5\right)\ddot{\theta}_4$ แทนค่าลงในสมการ (ข.10)

จะได้ $F_2 r_4 = J_3\ddot{\theta}_3 + \dfrac{r_5}{r_6}\left(J_4 + \left(\dfrac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5\right)\ddot{\theta}_4$ แต่ $\ddot{\theta}_4 = \dfrac{r_5}{r_6}\ddot{\theta}_3$

จะได้ $F_2 = \dfrac{1}{r_4}\left(J_3 + \left(\dfrac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\dfrac{r_5}{r_6}\right)^2\left(\dfrac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5\right)\ddot{\theta}_3$ แทนค่าลงในสมการ (ข.9)

จะได้ $F_1 r_2 = J_2\ddot{\theta}_2 + \dfrac{r_3}{r_4}\left(J_3 + \left(\dfrac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\dfrac{r_5}{r_6}\right)^2\left(\dfrac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5\right)\ddot{\theta}_3$ แต่ $\ddot{\theta}_3 = \dfrac{r_3}{r_4}\ddot{\theta}_2$

จะได้ $F_1 = \dfrac{1}{r_2}\left(J_2 + \left(\dfrac{r_3}{r_4}\right)^2 J_3 + \left(\dfrac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\dfrac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\dfrac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\dfrac{r_5}{r_6}\right)^2\left(\dfrac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5\right)\ddot{\theta}_2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แทนค่าลงในสมการ (ข.8) จะได้

$$T = J_1\ddot{\theta}_1 + \frac{r_1}{r_2}\left(J_2 + \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 J_3 + \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2\left(\frac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5 \right)\ddot{\theta}_2$$

แต่ $\ddot{\theta}_2 = \frac{r_1}{r_2}\ddot{\theta}_1$ จะได้

$$T = \left(J_1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 J_2 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 J_3 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2\left(\frac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5 \right)\ddot{\theta}_1$$

(ข.13)

$\therefore$ จะได้ Intertia Equivalent คือ

$$J_{equ1} = J_1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 J_2 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2 J_3 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2 J_4 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\left(\frac{r_3}{r_4}\right)^2\left(\frac{r_5}{r_6}\right)^2\left(\frac{r_7}{r_8}\right)^2 J_5$$

(ข.14)

ต่อมาทำการหาค่า J_{equ2} ซึ่งสามารถหาได้ด้วยวิธีข้างต้น แต่เริ่มวิเคราะห์จากอีกด้านหนึ่ง จะได้

$$J_{equ2} = J_5 + \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2 J_4 + \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2\left(\frac{r_6}{r_5}\right)^2 J_3 + \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2\left(\frac{r_6}{r_5}\right)^2\left(\frac{r_4}{r_3}\right)^2 J_2 + \left(\frac{r_8}{r_7}\right)^2\left(\frac{r_6}{r_5}\right)^2\left(\frac{r_4}{r_3}\right)^2\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 J_1$$

(ข.15)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

ในภาคผนวกนี้จะเป็นการแสดงโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ โดยโปรแกรมที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิตินั้น จะใช้โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Real Time Work Shop ที่เรียกว่า xPC ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอท

ซึ่งการใช้ xPC ในการควบคุมนั้น จะใช้พื้นฐานของการเขียน s-function ในภาษา C ในการสร้าง Block ขึ้นมาใช้สำหรับควบคุมในส่วนต่างๆ ดังนี้

ค.1 โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติในส่วนของการแปลงกรอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท

```
/* sinesolve.c- xPC Target, non-inlined S-function for CVT Model  */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME  ikineCVT

#include    <stddef.h>
#include    <stdlib.h>
#include    <math.h>

#include    "simstruc.h"

#ifdef      MATLAB_MEX_FILE
#include    "mex.h"
#else
#include    <windows.h>
#endif

/* Input Arguments */
#define NUM_PARAMS                 (1)
#define SAMPLE_TIME_PARAM          (ssGetSFcnParam(S,0))

/* Convert S Function Parameters to Varibles */

#define SAMPLE_TIME                ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[0])
#define SAMPLE_OFFSET              ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[1])
#define NUM_IN                     (5)
#define NUM_OUT                    (5)
#define pi                         (3.141592)
static char_T msg[256];

/*====================*
 * S-function methods *
 *====================*/
```

```
static void mdlCheckParameters(SimStruct *S)
{
}
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    uint_T i;

    ssSetNumSFcnParams(S, NUM_PARAMS);
    if (ssGetNumSFcnParams(S) == ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        mdlCheckParameters(S);
        if (ssGetErrorStatus(S) != NULL) {
            return;
        }
    } else {
        return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
    }

    ssSetNumContStates(S, 0);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, NUM_IN)) return;

    for (i=0;i<NUM_IN-1;i++) {
        ssSetInputPortWidth(S, i, 2);
        ssSetInputPortDirectFeedThrough(S,i,1);
    }
     ssSetInputPortWidth(S, 4, 1);
 if (!ssSetNumOutputPorts(S, NUM_OUT)) return;

    for (i=0;i<NUM_OUT-3;i++) {
        ssSetOutputPortWidth(S, i, 2);
    }
     ssSetOutputPortWidth(S, 2, 2);
     ssSetOutputPortWidth(S, 3, 2);
     ssSetOutputPortWidth(S, 4, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumRWork(S, 0);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetSFcnParamNotTunable(S,0);


    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE |
SS_OPTION_PLACE_ASAP);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, SAMPLE_OFFSET);
}

#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE
#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}
```

```
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE

real_T *zeta1,*zeta2,*zeta3,*zeta4,*zeta5;
//,x,y,z,r,phi,beta,omega,pitch,yaw;

real_T
s,L1,L2,d,x,y,K1,K2,sk1,sk2,U1,U2,V1,V2,U1_x,U1_y,V1_x,V1_y,U2_x,U2_y
,V2_x,V2_y;
real_T
U1_xx,U1_yy,V1_xx,V1_yy,U1_xy,V1_xy,U2_xx,U2_yy,V2_xx,V2_yy,U2_xy,V2_
xy,ui,ki;
real_T the1,the2,the3,the4,s3,c3,s4,c4,Tri,Phi,Phi_t,normJT,normDTj;
real_T normR_t,V;

real_T
R[2][1],T[2][1],kN[2][1],R_t[2][1],Vj[2][1],Vi[2][1],Tj[2][1],kNj[2][
1],ti[2][1],kni[2][1];
real_T JT[2][1],JkN[2][1],DTj[2][1],DkNj[2][1];
real_T Tbar[1][2],Tjbar[1][2],tibar[1][2];
real_T
J[2][2],H1[2][2],H2[2][2],D[2][2],q[4][1],eye[2][2],TjTjbar[2][2],tit
ibar[2][2];
real_T AA[2][2],BB[1][2],CC[1][2],DD[2][1],EE[2][1],AAA[2][2];

InputRealPtrsType A;
InputRealPtrsType B;
InputRealPtrsType C;
InputRealPtrsType E;
InputRealPtrsType F;

    A=ssGetInputPortSignal(S,0);
    B=ssGetInputPortSignal(S,1);
    C=ssGetInputPortSignal(S,2);
    E=ssGetInputPortSignal(S,3);
    F=ssGetInputPortSignal(S,4);

    zeta1=ssGetOutputPortSignal(S,0);
    zeta2=ssGetOutputPortSignal(S,1);
    zeta3=ssGetOutputPortSignal(S,2);
    zeta4=ssGetOutputPortSignal(S,3);
    zeta5=ssGetOutputPortSignal(S,4);

    //Define Parameter
    R[0][0]=*A[0];
    R[1][0]=*A[1];
    R_t[0][0]=*B[0];
    R_t[1][0]=*B[1];
    T[0][0]=*C[0];
    T[1][0]=*C[1];
    kN[0][0]=*E[0];
    kN[1][0]=*E[1];
    s=*F[0];


    L1=0.25;
    L2=0.3;
    d=0.1;
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
    //Define
    x=R[0][0];
    y=R[1][0];
    x=x+d/2;

    //Find Constant
     K1=(pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2))/(2*L1*L2);
     K2=(pow((x-d),2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2))/(2*L1*L2);

     sk1=sqrt(1-pow(K1,2));
     sk2=sqrt(1-pow(K2,2));


     U1=L1*y+L2*K1*y+L2*sk1*x;
     V1=L1*x+L2*K1*x-L2*sk1*y;
     U2=L1*y+L2*K2*y-L2*sk2*(x-d);
     V2=L1*(x-d)+L2*K2*(x-d)+L2*sk2*y;

   //First Derivative
    U1_x=x*y/L1+L2*sk1-(K1*pow(x,2))/(L1*sk1);
    U1_y=L1+L2*K1+pow(y,2)/L1-(K1*x*y)/(L1*sk1);
    V1_x=L1+L2*K1+pow(x,2)/L1+(K1*x*y)/(L1*sk1);
    V1_y=x*y/L1-L2*sk1+(K1*pow(y,2))/(L1*sk1);
    U2_x=(x-d)*y/L1-L2*sk2+(K2*pow((x-d),2))/(L1*sk2);
    U2_y=L1+L2*K2+pow(y,2)/L1+(K2*(x-d)*y)/(L1*sk2);
    V2_x=L1+L2*K2+pow((x-d),2)/L1-(K2*(x-d)*y)/(L1*sk2);
    V2_y=(x-d)*y/L1+L2*sk2-(K2*pow(y,2))/(L1*sk2);

    //Second Derivative
    U1_xx=1/L1*y-2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*pow(x,3)*pow((pow(x,2)+pow(
y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)-3/L2/pow((4-
pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*x*(pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)-2/L2/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*pow(x,3)/pow(L1,2);
    U1_yy=3/L1*y-2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*x*pow((pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*pow(y,2)-2/L2/pow((4-
pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*x*pow(y,2)/pow(L1,2)-
1/L2/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*x*(pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2);
    V1_xx=3*x/L1+2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*pow(x,2)*pow((pow(x,2)+pow(
y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*y+1/L2/pow((4-
pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)*y+2/L2/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*pow(x,2)/pow(L1,2)*y;
    V1_yy=x/L1+2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*pow(y,3)*pow((pow(x,2)+pow(
y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)+3/L2/pow((4-
pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)*y+2/L2/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-
```

```
pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*pow(y,3)/pow(L1,2);
     U1_xy=x/L1-2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*pow(x,2)*pow((pow(x,2)+pow(
y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*y-2/L2/pow((4-
pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*pow(x,2)/pow(L1,2)*y-
1/L2/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)*y;
     V1_xy=1/L1*y+2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*x*pow((pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*pow(y,2)+2/L2/pow((4-
pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*x*pow(y,2)/pow(L1,2)+1/L2/p
ow((4-pow((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*x*(pow(x,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2);

     U2_xx=1/L1*y+1/2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*(x-d)*pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*pow((2*x-
2*d),2)+1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)*(2*x-2*d)+1/2/L2/pow((4-pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(x-
d)*pow((2*x-2*d),2)/pow(L1,2)+1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(x-d)*(pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2);
     U2_yy=3/L1*y+2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*(x-d)*pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*pow(y,2)+2/L2/pow((4-
pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(x-
d)*pow(y,2)/pow(L1,2)+1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(x-d)*(pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2);
     V2_xx=1/L1*(x-d)+(2*x-2*d)/L1-1/2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*y*pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*pow((2*x-2*d),2)-1/2/L2/pow((4-
pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*y*pow((2*x-
2*d),2)/pow(L1,2)-1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*y*(pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2);
     V2_yy=1/L1*(x-d)-2/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*pow(y,3)*pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)-3/L2/pow((4-
pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*y*(pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)-2/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*pow(y,3)/pow(L1,2);
     U2_xy=1/2*(2*x-2*d)/L1+1/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*(x-
d)*pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*(2*x-
2*d)*y+1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(x-d)*y/pow(L1,2)*(2*x-
2*d)+1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
```

```
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*y*(pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2);
    V2_xy=1/L1*y-1/pow(L2,3)/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(3/2))*pow(y,2)*pow((pow(x-
d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2)),2)/pow(L1,4)*(2*x-2*d)-
1/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*pow(y,2)*(2*x-
2*d)/pow(L1,2)-1/2/L2/pow((4-pow((pow(x-d,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-
pow(L2,2)),2)/pow(L1,2)/pow(L2,2)),(1/2))*(pow(x-d,2)+pow(y,2)-
pow(L1,2)-pow(L2,2))/pow(L1,2)*(2*x-2*d);

    //Jacobian
    J[0][0]=(V1*U1_x-U1*V1_x)/(pow(U1,2)+pow(V1,2));
    J[0][1]=(V1*U1_y-U1*V1_y)/(pow(U1,2)+pow(V1,2));
    J[1][0]=(V2*U2_x-U2*V2_x)/(pow(U2,2)+pow(V2,2));
    J[1][1]=(V2*U2_y-U2*V2_y)/(pow(U2,2)+pow(V2,2));

    //Hesian
    H1[0][0]=((pow(U1,2)+pow(V1,2))*(V1*U1_xx-U1*V1_xx)-2*(V1*U1_x-
U1*V1_x)*(U1*U1_x+V1*V1_x))/pow(pow(U1,2)+pow(V1,2),2);
    H1[1][1]=((pow(U1,2)+pow(V1,2))*(V1*U1_yy-U1*V1_yy)-2*(V1*U1_y-
U1*V1_y)*(U1*U1_y+V1*V1_y))/pow(pow(U1,2)+pow(V1,2),2);
    H1[0][1]=((pow(U1,2)+pow(V1,2))*(V1_x*U1_y+V1*U1_xy-U1_x*V1_y-
U1*V1_xy)-2*(V1*U1_y-
U1*V1_y)*(U1*U1_x+V1*V1_x))/pow(pow(U1,2)+pow(V1,2),2);
    H1[1][0]=((pow(U1,2)+pow(V1,2))*(V1_y*U1_x+V1*U1_xy-U1_y*V1_x-
U1*V1_xy)-2*(V1*U1_x-
U1*V1_x)*(U1*U1_y+V1*V1_y))/pow(pow(U1,2)+pow(V1,2),2);

    H2[0][0]=((pow(U2,2)+pow(V2,2))*(V2*U2_xx-U2*V2_xx)-2*(V2*U2_x-
U2*V2_x)*(U2*U2_x+V2*V2_x))/pow(pow(U2,2)+pow(V2,2),2);
    H2[1][1]=((pow(U2,2)+pow(V2,2))*(V2*U2_yy-U2*V2_yy)-2*(V2*U2_y-
U2*V2_y)*(U2*U2_y+V2*V2_y))/pow(pow(U2,2)+pow(V2,2),2);
    H2[0][1]=((pow(U2,2)+pow(V2,2))*(V2_x*U2_y+V2*U2_xy-U2_x*V2_y-
U2*V2_xy)-2*(V2*U2_y-
U2*V2_y)*(U2*U2_x+V2*V2_x))/pow(pow(U2,2)+pow(V2,2),2);
    H2[1][0]=((pow(U2,2)+pow(V2,2))*(V2_y*U2_x+V2*U2_xy-U2_y*V2_x-
U2*V2_xy)-2*(V2*U2_x-
U2*V2_x)*(U2*U2_y+V2*V2_y))/pow(pow(U2,2)+pow(V2,2),2);

    //find Tj=JT/normJT
    JT[0][0]=J[0][0]*T[0][0]+J[0][1]*T[1][0];
    JT[1][0]=J[1][0]*T[0][0]+J[1][1]*T[1][0];
    normJT=sqrt(pow(JT[0][0],2)+pow(JT[1][0],2));

    if (normJT!=0.0)
    {
        Tj[0][0]=JT[0][0]/normJT;
        Tj[1][0]=JT[1][0]/normJT;
    }
    else
    {   /*normJT=0.000001;*/
        Tj[0][0]=JT[0][0]/0.000001;
        Tj[1][0]=JT[1][0]/0.000001;
    }

    // FInd kNj=1/pow(normJT,2)*([eye-
TjTjbar]*([T'*H1*T;T'*H2*T]+J*kN));
    //begin
```

```
//Idendity Matrix 2x2
eye[0][0]=1;
eye[0][1]=0;
eye[1][0]=0;
eye[1][1]=1;



Tbar[0][0]=T[0][0];
Tbar[0][1]=T[1][0];

Tjbar[0][0]=Tj[0][0];
Tjbar[0][1]=Tj[1][0];
TjTjbar[0][0]=Tj[0][0]*Tjbar[0][0];
TjTjbar[0][1]=Tj[0][0]*Tjbar[0][1];
TjTjbar[1][0]=Tj[1][0]*Tjbar[0][0];
TjTjbar[1][1]=Tj[1][0]*Tjbar[0][1];

//AA =(eye-TjTjbar)/pow(normJT,2)

if (normJT!=0.0)
{
    AA[0][0]=(eye[0][0]-TjTjbar[0][0])/pow(normJT,2);
    AA[0][1]=(eye[0][1]-TjTjbar[0][1])/pow(normJT,2);
    AA[1][0]=(eye[1][0]-TjTjbar[1][0])/pow(normJT,2);
    AA[0][1]=(eye[0][1]-TjTjbar[0][1])/pow(normJT,2);
}
else
{   /*normJT=0.000001;*/
    AA[0][0]=(eye[0][0]-TjTjbar[0][0])/0.000001;
    AA[0][1]=(eye[0][1]-TjTjbar[0][1])/0.000001;
    AA[1][0]=(eye[1][0]-TjTjbar[1][0])/0.000001;
    AA[0][1]=(eye[0][1]-TjTjbar[0][1])/0.000001;
}


//BB =Tbar*H1
BB[0][0]=Tbar[0][0]*H1[0][0]+Tbar[0][1]*H1[1][0];
BB[0][1]=Tbar[0][0]*H1[0][1]+Tbar[0][1]*H1[1][1];

//CC =Tbar*H2
CC[0][0]=Tbar[0][0]*H2[0][0]+Tbar[0][1]*H2[1][0];
CC[0][1]=Tbar[0][0]*H2[0][1]+Tbar[0][1]*H2[1][1];

//DD DD[0][0]=BB*T [Tbar*H1*T] DD[1][0]=CC*T [Tbar*H2*T]
DD[0][0]=BB[0][0]*T[0][0]+BB[0][1]*T[1][0];
DD[1][0]=CC[0][0]*T[0][0]+CC[0][1]*T[1][0];

//J*kN
JkN[0][0]=J[0][0]*kN[0][0]+J[0][1]*kN[1][0];
JkN[1][0]=J[1][0]*kN[0][0]+J[1][1]*kN[1][0];

//EE [T'*H1*T;T'*H2*T]+J*kN
EE[0][0]=DD[0][0]+JkN[0][0];
EE[1][0]=DD[1][0]+JkN[1][0];

kNj[0][0]=AA[0][0]*EE[0][0]+AA[0][1]*EE[1][0];
kNj[1][0]=AA[1][0]*EE[0][0]+AA[1][1]*EE[1][0];
//End
```

```
//coupling Space
D[0][0]=1;
D[0][1]=0;
D[1][0]=0;
D[1][1]=1;

DTj[0][0]=D[0][0]*Tj[0][0]+D[0][1]*Tj[1][0];
DTj[1][0]=D[1][0]*Tj[0][0]+D[1][1]*Tj[1][0];
normDTj=sqrt(pow(DTj[0][0],2)+pow(DTj[1][0],2));

if (normDTj!=0.0)
{
    ti[0][0]=DTj[0][0]/normDTj;
    ti[1][0]=DTj[1][0]/normDTj;
}
else
{   normDTj=0.000001;
    ti[0][0]=DTj[0][0]/normDTj;
    ti[1][0]=DTj[1][0]/normDTj;
}


tibar[0][0]=ti[0][0];
tibar[0][1]=ti[1][0];

// FInd knj=1/pow(norm(D*ti),2)*([eye-ti*ti']*(D*kNj));
//begin
titibar[0][0]=ti[0][0]*tibar[0][0];
titibar[0][1]=ti[0][0]*tibar[0][1];
titibar[1][0]=ti[1][0]*tibar[0][0];
titibar[1][1]=ti[1][0]*tibar[0][1];

//AAA =(eye-titibar)/pow(normDTj,2)
    if (normDTj!=0.0)
{
    AAA[0][0]=(eye[0][0]-titibar[0][0])/pow(normDTj,2);
    AAA[0][1]=(eye[0][1]-titibar[0][1])/pow(normDTj,2);
    AAA[1][0]=(eye[1][0]-titibar[1][0])/pow(normDTj,2);
    AAA[0][1]=(eye[0][1]-titibar[0][1])/pow(normDTj,2);
}
else
{   normDTj=0.000001;
    AAA[0][0]=(eye[0][0]-titibar[0][0])/pow(normDTj,2);
    AAA[0][1]=(eye[0][1]-titibar[0][1])/pow(normDTj,2);
    AAA[1][0]=(eye[1][0]-titibar[1][0])/pow(normDTj,2);
    AAA[0][1]=(eye[0][1]-titibar[0][1])/pow(normDTj,2);
}


//D*kNj
DkNj[0][0]=D[0][0]*kNj[0][0]+D[0][1]*kNj[1][0];
DkNj[1][0]=D[1][0]*kNj[0][0]+D[1][1]*kNj[1][0];

kni[0][0]=AAA[0][0]*DkNj[0][0]+AAA[0][1]*DkNj[1][0];
kni[1][0]=AAA[1][0]*DkNj[0][0]+AAA[1][1]*DkNj[1][0];

//find magnitude of kni
ki=sqrt(pow(kni[0][0],2)+pow(kni[1][0],2));
```

```
//End

//Steering Space
if (ti[0][0]!=0)
    Tri=ti[0][1]/ti[0][0];
else Tri=ti[0][1]/0.00001;


//Tri=R_t[1][0]/R_t[0][0];

//Phi=atan(sqrt(2)*((1+Tri)/(1-Tri)));
//Phi=atan(sqrt(2)*tan(atan(Tri)+pi/4))+pi/2;
Phi=atan(sqrt(2)*tan(atan(Tri)+pi/4))+pi/4;

//check forward kinematic
//xr=L1*cos(q(1)*pi/180)+L2*cos(q(1)+q(3)*pi/180);
//yr=L1*sin(q(1)*pi/180)+L2*sin(q(1)+q(3)*pi/180);

//Invert Kinematics

c3=(pow(x,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2))/(2*L1*L2);
s3=sqrt(1-pow(c3,2));
the3=(180/pi)*(-acos(c3));
if (the3>0)
     the3=the3;
else the3=360+the3;

the1=(180/pi)*atan2(L1*y+L2*c3*y+L2*s3*x,L1*x+L2*c3*x-L2*s3*y);
if (the1>0)
     the1=the1;
else the1=360+the1;

c4=(pow((x-d),2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2))/(2*L1*L2);
s4=sqrt(1-pow(c4,2));
the4=(180/pi)*acos(c4);
the2=(180/pi)*atan2(L1*y+L2*c4*y-L2*s4*(x-d),L1*(x-d)+L2*c4*(x-
d)+L2*s4*y);

q[0][0]=the1;
q[1][0]=the2;
q[2][0]=the3;
q[3][0]=the4;

//Find joint velocity vector Vj=J*V
Vj[0][0]=J[0][0]*R_t[0][0]+J[0][1]*R_t[1][0];
Vj[1][0]=J[1][0]*R_t[0][0]+J[1][1]*R_t[1][0];

//find Wheel speed ui=tibar*D*Vj
//ui=tibar[0][0]*Vj[0][0]+tibar[0][1]*Vj[1][0];
ui=sqrt(pow(Vj[0][0],2)+pow(Vj[1][0],2));

//find velocity of steering
Phi_t=ui*ki;

//Output parameter

zeta1[0]=R[0][0];
zeta1[1]=R[1][0];
```

```
    zeta2[0]=T[0][0];
    zeta2[1]=T[1][0];

    zeta3[0]=Phi;
    zeta3[1]=0;

    zeta4[0]=Phi*180/pi;
    zeta4[1]=Phi_t*180/pi;

    zeta5[0]=s;


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE

#endif /* MATLAB_MEX_FILE */
}

#ifdef  MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-
file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function
*/
#endif
```

ค.2 โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติในส่วนของการหา Forward Kinematic ของหุ่นยนต์โคบอท

```
/* sinesolve.c- xPC Target, non-inlined S-function for CVT Model  */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME  FWKineCVT

#include    <stddef.h>
#include    <stdlib.h>
#include    <math.h>

#include    "simstruc.h"

#ifdef      MATLAB_MEX_FILE
#include    "mex.h"
#else
#include    <windows.h>
#endif

/* Input Arguments */
#define NUM_PARAMS              (1)
#define SAMPLE_TIME_PARAM       (ssGetSFcnParam(S,0))
```

```
/* Convert S Function Parameters to Varibles */

#define SAMPLE_TIME                 ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[0])
#define SAMPLE_OFFSET               ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[1])
#define NUM_IN                      (5)
#define NUM_OUT                     (5)
#define pi                          (3.141592)
static char_T msg[256];

/*====================*
 * S-function methods *
 *====================*/

static void mdlCheckParameters(SimStruct *S)
{
}

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    uint_T i;

    ssSetNumSFcnParams(S, NUM_PARAMS);
    if (ssGetNumSFcnParams(S) == ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        mdlCheckParameters(S);
        if (ssGetErrorStatus(S) != NULL) {
            return;
        }
    } else {
        return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
    }

    ssSetNumContStates(S, 0);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, NUM_IN)) return;

    for (i=0;i<NUM_IN-1;i++) {
        ssSetInputPortWidth(S, i, 6);
        ssSetInputPortDirectFeedThrough(S,i,1);
    }
     ssSetInputPortWidth(S, 4, 1);
 if (!ssSetNumOutputPorts(S, NUM_OUT)) return;

    for (i=0;i<NUM_OUT-1;i++) {
        ssSetOutputPortWidth(S, i, 2);
    }
     ssSetOutputPortWidth(S, 4, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumRWork(S, 2);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetSFcnParamNotTunable(S,0);

    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE |
SS_OPTION_PLACE_ASAP);
}
```

```
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, SAMPLE_OFFSET);
}


#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
{

#ifndef MATLAB_MEX_FILE
    real_T  *RWork  =   ssGetRWork(S);
    RWork[0] = 0;/* initial state  T[0][0]*/
    RWork[1] = -1;/* initial state  T[1][0]*/


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}

static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE

real_T  *RWork  =   ssGetRWork(S);
real_T *zeta1,*zeta2,*zeta3,*zeta4,*zeta5;
//,x,y,z,r,phi,beta,omega,pitch,yaw;
real_T s,L1,L2,d,x,x1,x2,y,y1,y2,s3,c3;
real_T
the1,the2,the3,the4,theta1,theta2,theta3,theta4,x_theta1,x_theta2,y_t
heta1,y_theta2,normR_t;
real_T R[2][1],q[6][1],R_t[2][1],q_t[6][1],J[2][2],T[2][1];
real_T Encoder[6][1],dEncoder[6][1];
real_T R_tt[2][1];


InputRealPtrsType A;
InputRealPtrsType B;
InputRealPtrsType C;
InputRealPtrsType E;
InputRealPtrsType F;

    A=ssGetInputPortSignal(S,0);
    B=ssGetInputPortSignal(S,1);
    C=ssGetInputPortSignal(S,2);
    E=ssGetInputPortSignal(S,3);
    F=ssGetInputPortSignal(S,4);
    T[0][0]=ssGetRWorkValue(S, 0);
    T[1][0]=ssGetRWorkValue(S, 1);

    zeta1=ssGetOutputPortSignal(S,0);
    zeta2=ssGetOutputPortSignal(S,1);
    zeta3=ssGetOutputPortSignal(S,2);
    zeta4=ssGetOutputPortSignal(S,3);
    zeta5=ssGetOutputPortSignal(S,4);
```

```
//Define Parameter
Encoder[0][0]=*A[0];
Encoder[1][0]=*A[1];
Encoder[2][0]=*A[2];
Encoder[3][0]=*A[3];
Encoder[4][0]=*A[4];
Encoder[5][0]=*A[5];

dEncoder[0][0]=*B[0];
dEncoder[1][0]=*B[1];
dEncoder[2][0]=*B[2];
dEncoder[3][0]=*B[3];
dEncoder[4][0]=*B[4];
dEncoder[5][0]=*B[5];


s=*F[0];

//Define
theta1=Encoder[0][0];
theta2=Encoder[1][0];
theta3=275;
theta4=Encoder[2][0];

//degree to RAD
the1=theta1*pi/180;
the2=theta2*pi/180;
the3=theta3*pi/180;
the4=theta4*pi/180;

//Velcocity of angle in rad/s
q_t[0][0]=dEncoder[0][0];
q_t[1][0]=dEncoder[1][0];
q_t[2][0]=0;
q_t[3][0]=dEncoder[2][0];


L1=0.25;
L2=0.3;
d=0.1;

//Forward kinematic
//xr=L1*cos(q(1)*pi/180)+L2*cos(q(1)+q(3)*pi/180);
//yr=L1*sin(q(1)*pi/180)+L2*sin(q(1)+q(3)*pi/180);

//x1=L1*cos(theta1*pi/180)+L2*cos((theta1+theta3)*pi/180);
//y1=L1*sin(theta1*pi/180)+L2*sin((theta1+theta3)*pi/180);

x2=L1*cos(the2)+L2*cos(the2+the4);
y2=L1*sin(the2)+L2*sin(the2+the4);

//x=x1-d/2;
x=x2+d/2;
x1=x2+d;
//y=y1;
y=y2;

//find theta3
c3=(pow(x1,2)+pow(y,2)-pow(L1,2)-pow(L2,2))/(2*L1*L2);
```

```
    s3=sqrt(1-pow(c3,2));
    theta3=(180/pi)*(-acos(c3));
    if (theta3>=0)
         theta3=theta3;
    else theta3=360+theta3;

    the3=theta3*pi/180;


    R[0][0]=x;
    R[1][0]=y;

    x_theta1=-L1*sin(the1)-L2*sin(the1+the3);
    x_theta2=-L1*sin(the2)-L2*sin(the2+the4);
    y_theta1=L1*cos(the1)+L2*cos(the1+the3);
    y_theta2=L1*cos(the2)+L2*cos(the2+the4);

    //J[0][0]=x_theta1;
    //J[0][1]=x_theta2;
    //J[1][0]=y_theta1;
    //J[1][1]=y_theta2;

    //find R_t from J*q_t
    //R_t[0][0]=J[0][0]*q_t[0][0]+J[0][1]*q_t[1][0];
    //R_t[1][0]=J[1][0]*q_t[0][0]+J[1][1]*q_t[1][0];
    R_t[0][0]=-L1*sin(the2)*q_t[1][0]-
L2*sin((the2+the4))*(q_t[1][0]+q_t[3][0]);

R_t[1][0]=L1*cos(the2)*q_t[1][0]+L2*cos(the2+the4)*(q_t[1][0]+q_t[3][
0]);

    //Find T from R_t/norm(R_t)
    normR_t=sqrt(pow(R_t[0][0],2)+pow(R_t[1][0],2));


    if (normR_t!=0.0)
    {
        T[0][0]=R_t[0][0]/normR_t;
        T[1][0]=R_t[1][0]/normR_t;
    }
    else
    {
        T[0][0]=R_t[0][0]/0.000001;
        T[1][0]=R_t[1][0]/0.000001;
    }


    //Output Parameter

    RWork[0] = T[0][0];/* initial indexdata T[0][0]*/
    RWork[1] = T[1][0];/* initial indexdata T[1][0]*/

    zeta1[0]=R[0][0];
    zeta1[1]=R[1][0];
    //zeta1[0]=dEncoder[0][0];
    //zeta1[1]=dEncoder[5][0];
```

```
    zeta2[0]=R_t[0][0];
    zeta2[1]=R_t[1][0];
    //zeta2[0]=dEncoder[1][0];
    //zeta2[1]=dEncoder[5][0];


    zeta3[0]=T[0][0];
    zeta3[1]=T[1][0];

    zeta4[0]=sqrt(pow(R_t[0][0],2)+pow(R_t[1][0],2));
    zeta4[1]=sqrt(pow(T[0][0],2)+pow(T[1][0],2));

    zeta5[0]=s;


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}


static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */
}

#ifdef  MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-
file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function
*/
#endif
```

ค.3 โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติในส่วนของการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท

```
/* sinesolve.c- xPC Target, non-inlined S-function for CVT Model  */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME  ControlPath

#include    <stddef.h>
#include    <stdlib.h>
#include    <math.h>

#include    "simstruc.h"

#ifdef      MATLAB_MEX_FILE
#include    "mex.h"
#else
#include    <windows.h>
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#endif

/* Input Arguments */
#define NUM_PARAMS              (1)
#define SAMPLE_TIME_PARAM       (ssGetSFcnParam(S,0))

/* Convert S Function Parameters to Varibles */

#define SAMPLE_TIME             ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[0])
#define SAMPLE_OFFSET           ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[1])
#define NUM_IN                  (5)
#define NUM_OUT                 (5)
#define pi                      (3.141592)
static char_T msg[256];


/*====================*
 * S-function methods *
 *====================*/

static void mdlCheckParameters(SimStruct *S)
{
}

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    uint_T i;


    ssSetNumSFcnParams(S, NUM_PARAMS);
    if (ssGetNumSFcnParams(S) == ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        mdlCheckParameters(S);
        if (ssGetErrorStatus(S) != NULL) {
            return;
        }
    } else {
        return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
    }

    ssSetNumContStates(S, 0);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, NUM_IN)) return;

    for (i=0;i<NUM_IN-1;i++) {
        ssSetInputPortWidth(S, i, 2);
        ssSetInputPortDirectFeedThrough(S,i,1);
    }
     ssSetInputPortWidth(S, 4, 1);
 if (!ssSetNumOutputPorts(S, NUM_OUT)) return;

    for (i=0;i<NUM_OUT-1;i++) {
        ssSetOutputPortWidth(S, i, 2);
    }
    ssSetOutputPortWidth(S, 4, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumIWork(S, 0);
```

```
    ssSetNumRWork(S, 0);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetSFcnParamNotTunable(S,0);


    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE |
SS_OPTION_PLACE_ASAP);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, SAMPLE_OFFSET);
}


#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
{

#ifndef MATLAB_MEX_FILE


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}

static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE


real_T *zeta1,*zeta2,*zeta3,*zeta4,*zeta5;
//,x,y,z,r,phi,beta,omega,pitch,yaw;
real_T s,sp;
real_T a,d1,d2;
real_T
R[2][1],R_t[2][1],Rp[2][1],T[2][1],Tp[2][1],kNp[2][1],Np[2][1];
real_T normkNp;


InputRealPtrsType A;
InputRealPtrsType B;
InputRealPtrsType C;
InputRealPtrsType E;
InputRealPtrsType F;

    A=ssGetInputPortSignal(S,0);
    B=ssGetInputPortSignal(S,1);
    C=ssGetInputPortSignal(S,2);
    E=ssGetInputPortSignal(S,3);
    F=ssGetInputPortSignal(S,4);

    zeta1=ssGetOutputPortSignal(S,0);
    zeta2=ssGetOutputPortSignal(S,1);
    zeta3=ssGetOutputPortSignal(S,2);
    zeta4=ssGetOutputPortSignal(S,3);
    zeta5=ssGetOutputPortSignal(S,4);
```

```
    //Defind Parameter

    R[0][0]=*A[0];
    R[1][0]=*A[1];
    R_t[0][0]=*B[0];
    R_t[1][0]=*B[1];
    T[0][0]=*C[0];
    T[1][0]=*C[1];
    //V[0][0]=*E[0];
    //V[1][0]=*E[1];
    sp=*F[0];

    //defind Path sp
    //sp=sp+((R[0][0]-Rp[0][0])*Tp[0][0])+((R[1][0]-
Rp[1][0])*Tp[1][0]);


    //Circle Path
    a=0.05;
    d1=-0.05;
    d2=0.4;

    Rp[0][0]=a*cos(sp/a)+d1;
    Rp[1][0]=a*sin(sp/a)+d2;

    Tp[0][0]=-sin(sp/a);
    Tp[1][0]=cos(sp/a);

    kNp[0][0]=(1/a)*-cos(sp/a);
    kNp[1][0]=(1/a)*-sin(sp/a);

 /*  //linear Path
    d1=0;
    d2=0.4;
    Rp[0][0]=d1;
    Rp[1][0]=-sp+d2;

    Tp[0][0]=0;
    Tp[1][0]=-1;

    kNp[0][0]=0;
    kNp[1][0]=0;
   */


   /* //linear Path
    d1=0;
    d2=0;
    Rp[0][0]=sp+d1;
    Rp[1][0]=sp+d2;

    Tp[0][0]=1;
    Tp[1][0]=1;

    kNp[0][0]=0;
    kNp[1][0]=0;
   */
```

```
    normkNp=sqrt(pow(kNp[0][0],2)+pow(kNp[1][0],2));
    if (normkNp!=0.0)
    {
       Np[0][0]=kNp[0][0]/normkNp;
       Np[1][0]=kNp[1][0]/normkNp;
    }
    else
    {
       Np[0][0]=kNp[0][0]/0.00001;
       Np[1][0]=kNp[1][0]/0.00001;
    }

    //Output Parameter


    zeta1[0]=Rp[0][0];
    zeta1[1]=Rp[1][0];

    zeta2[0]=Np[0][0];
    zeta2[1]=Np[1][0];

    zeta3[0]=Tp[0][0];
    zeta3[1]=Tp[1][0];

    zeta4[0]=kNp[0][0];
    zeta4[1]=kNp[1][0];

    zeta5[0]=sp;


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}


static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */
}

#ifdef  MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-
file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function
*/
#endif
```

ค.4 โปรแกรมการควบคุมความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

```
/* sinesolve.c- xPC Target, non-inlined S-function for CVT Model  */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME  ControlInertia

#include    <stddef.h>
#include    <stdlib.h>
#include    <math.h>

#include    "simstruc.h"

#ifdef      MATLAB_MEX_FILE
#include    "mex.h"
#else
#include    <windows.h>
#endif

/* Input Arguments */
#define NUM_PARAMS              (1)
#define SAMPLE_TIME_PARAM       (ssGetSFcnParam(S,0))

/* Convert S Function Parameters to Varibles */

#define SAMPLE_TIME             ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[0])
#define SAMPLE_OFFSET           ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[1])
#define NUM_IN                  (5)
#define NUM_OUT                 (5)
#define pi                      (3.141592)
static char_T msg[256];

/*====================*
 * S-function methods *
 *====================*/

static void mdlCheckParameters(SimStruct *S)
{
}

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    uint_T i;

    ssSetNumSFcnParams(S, NUM_PARAMS);
    if (ssGetNumSFcnParams(S) == ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        mdlCheckParameters(S);
        if (ssGetErrorStatus(S) != NULL) {
            return;
        }
    } else {
        return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
    }
    ssSetNumContStates(S, 0);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);
```

```
    if (!ssSetNumInputPorts(S, NUM_IN)) return;

    for (i=0;i<NUM_IN-1;i++) {
        ssSetInputPortWidth(S, i, 2);
        ssSetInputPortDirectFeedThrough(S,i,1);
    }
     ssSetInputPortWidth(S, 4, 1);
 if (!ssSetNumOutputPorts(S, NUM_OUT)) return;

    for (i=0;i<NUM_OUT-1;i++) {
        ssSetOutputPortWidth(S, i, 2);
    }
    ssSetOutputPortWidth(S, 4, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumRWork(S, 2);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetSFcnParamNotTunable(S,0);

    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE |
SS_OPTION_PLACE_ASAP);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, SAMPLE_OFFSET);
}

#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
{

#ifndef MATLAB_MEX_FILE

    real_T  *RWork  =   ssGetRWork(S);
    RWork[0] = 0;/* initial state  S*/
    RWork[1] = 0;/* initial state  dS*/

#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}
 static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE
real_T  *RWork  =   ssGetRWork(S);
real_T *zeta1,*zeta2,*zeta3,*zeta4,*zeta5;
//,x,y,z,r,phi,beta,omega,pitch,yaw;
real_T Icvt1,Icvt2,I,I1,I2,Phi,Phi1,Phi2,Phi_t;
real_T L1,L2,d,R,r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,r8,J2,J4;
real_T N,n1,n2,m,ma,mb,s,ds;
real_T c1,c2;

InputRealPtrsType A;
InputRealPtrsType B;
InputRealPtrsType C;
InputRealPtrsType E;
InputRealPtrsType F;
```

```
    A=ssGetInputPortSignal(S,0);
    B=ssGetInputPortSignal(S,1);
    C=ssGetInputPortSignal(S,2);
    E=ssGetInputPortSignal(S,3);
    F=ssGetInputPortSignal(S,4);
    s=ssGetRWorkValue(S, 0);
    ds=ssGetRWorkValue(S, 1);

    zeta1=ssGetOutputPortSignal(S,0);
    zeta2=ssGetOutputPortSignal(S,1);
    zeta3=ssGetOutputPortSignal(S,2);
    zeta4=ssGetOutputPortSignal(S,3);
    zeta5=ssGetOutputPortSignal(S,4);

    //Defind Parameter

    Phi=*A[0];
    I=*B[0];
    s=*F[0];

    //parameter
    L1=0.25;
    L2=0.3;
    d=0.1;
    m=0.65;
    ma=0.5;
    mb=0.5;
    R=0.12;
    r1=0.015;
    r4=0.015;
    r5=0.015;
    r8=0.015;
    J2=(0.4)*m*pow(R,2);
    J4=(0.4)*m*pow(R,2);


    I=I-2*((1/3)*ma*pow(L1,2)+mb*pow(L1,2));
    //Find n1 , n2
    N=tan(Phi);

    c1=sqrt((pow(r1,2)*J2+pow(r8/N,2)*J4)/(pow(R,2)*I+(1/pow(N,2)-
1)*pow(r8,2)*J4));
    c2=sqrt((pow(N*r1,2)*J2+pow(r8,2)*J4)/(pow(R,2)*I+(pow(N,2)-
1)*pow(r8,2)*J4));
    if (c1>=0.9999)
        c1=0.9999;
    if (c2>=0.9999)
        c2=0.9999;
    Phi1=-acos(c1);
    Phi2=acos(c2);

    //Find Inertia CVT

Icvt1=pow((r1/(R*cos(Phi1))),2)*J2+pow((tan(Phi1)),2)*pow((r1/r4),2)*
pow((r5/(R*sin(Phi2))),2)*J4;

Icvt2=pow((r8/(R*cos(Phi2))),2)*J4+pow((tan(Phi2)),2)*pow((r8/r5),2)*
pow((r4/(R*sin(Phi1))),2)*J2;
```

```
    */
    //Inertia
    I1=Icvt1+(1/3)*ma*pow(L1,2)+mb*pow(L1,2);
    I2=Icvt2+(1/3)*ma*pow(L1,2)+mb*pow(L1,2);

    //Output Parameter
    RWork[0] = 0;/* initial indexdata s*/
    RWork[1] = 0;/* initial indexdata ds*/

    zeta1[0]=tan(Phi1);
    zeta1[1]=tan(Phi2);

    zeta2[0]=I1+I2;
    zeta2[1]=Phi*180/pi;

    zeta3[0]=tan(Phi1);
    zeta3[1]=tan(Phi2);


    zeta4[0]=Phi1*180/pi;
    zeta4[1]=Phi2*180/pi;

    //zeta5[0]=Phi*180/pi;


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE

#endif /* MATLAB_MEX_FILE */
}

#ifdef  MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-
file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function
*/
#endif
```

ค.5 โปรแกรมการสร้างระยะทางที่หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติเคลื่อนที่

```
/* sinesolve.c- xPC Target, non-inlined S-function for CVT Model  */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME  Path_Length_Close

#include    <stddef.h>
#include    <stdlib.h>
#include    <math.h>

#include    "simstruc.h"

#ifdef      MATLAB_MEX_FILE
#include    "mex.h"
#else
#include    <windows.h>
#endif

/* Input Arguments */
#define NUM_PARAMS                (1)
#define SAMPLE_TIME_PARAM         (ssGetSFcnParam(S,0))

/* Convert S Function Parameters to Varibles */

#define SAMPLE_TIME               ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[0])
#define SAMPLE_OFFSET             ((real_T)
mxGetPr(SAMPLE_TIME_PARAM)[1])
#define NUM_IN                    (5)
#define NUM_OUT                   (5)
#define pi                        (3.141592)
static char_T msg[256];


/*====================*
 * S-function methods *
 *====================*/

static void mdlCheckParameters(SimStruct *S)
{
}
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    uint_T i;

    ssSetNumSFcnParams(S, NUM_PARAMS);
    if (ssGetNumSFcnParams(S) == ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        mdlCheckParameters(S);
        if (ssGetErrorStatus(S) != NULL) {
            return;
        }
    } else {
        return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
    }
    ssSetNumContStates(S, 0);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);
```

```
    if (!ssSetNumInputPorts(S, NUM_IN)) return;

    for (i=0;i<NUM_IN-1;i++) {
        ssSetInputPortWidth(S, i, 2);
        ssSetInputPortDirectFeedThrough(S,i,1);
    }
     ssSetInputPortWidth(S, 4, 1);
 if (!ssSetNumOutputPorts(S, NUM_OUT)) return;

    for (i=0;i<NUM_OUT-1;i++) {
        ssSetOutputPortWidth(S, i, 2);
    }
    ssSetOutputPortWidth(S, 4, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumRWork(S, 2);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetSFcnParamNotTunable(S,0);

    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE |
SS_OPTION_PLACE_ASAP);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, SAMPLE_OFFSET);
}
#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
 #ifndef MATLAB_MEX_FILE
     real_T  *RWork  =   ssGetRWork(S);
    RWork[0] = 0;/* initial state  S*/
    RWork[1] = 0;/* initial state  dS*/

#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE
real_T  *RWork  =   ssGetRWork(S);
real_T *zeta1,*zeta2,*zeta3,*zeta4,*zeta5;
//,x,y,z,r,phi,beta,omega,pitch,yaw;
real_T t,s,s1,ds,sp,normR_t;
real_T a,d1,d2;
real_T R[2][1],R_t[2][1],Rp[2][1],Tp[2][1],kNp[2][1];

InputRealPtrsType A;
InputRealPtrsType B;
InputRealPtrsType C;
InputRealPtrsType E;
InputRealPtrsType F;

    A=ssGetInputPortSignal(S,0);
    B=ssGetInputPortSignal(S,1);
    C=ssGetInputPortSignal(S,2);
```

```
    E=ssGetInputPortSignal(S,3);
    F=ssGetInputPortSignal(S,4);
    s=ssGetRWorkValue(S, 0);
    ds=ssGetRWorkValue(S, 1);

    zeta1=ssGetOutputPortSignal(S,0);
    zeta2=ssGetOutputPortSignal(S,1);
    zeta3=ssGetOutputPortSignal(S,2);
    zeta4=ssGetOutputPortSignal(S,3);
    zeta5=ssGetOutputPortSignal(S,4);

    //Defind Parameter
    R[0][0]=*A[0];
    R[1][0]=*A[1];
    R_t[0][0]=*B[0];
    R_t[1][0]=*B[1];
    Rp[0][0]=*C[0];
    Rp[1][0]=*C[1];
    Tp[0][0]=*E[0];
    Tp[1][0]=*E[1];

    //defind Path sp
    a=0.05;
    d1=0;
    d2=0.3;
    t=0.001;

    normR_t=sqrt(pow(R_t[0][0],2)+pow(R_t[1][0],2));
     if (normR_t<=0.0001)
    {
        normR_t=0;
        ds=0;
    }
     else
    {
        ds=normR_t*t;
        s=s+ds;
    }
      //Circle Path
    a=0.05;
    d1=-0.05;
    d2=0.4;

    Rp[0][0]=a*cos(s/a)+d1;
    Rp[1][0]=a*sin(s/a)+d2;

    Tp[0][0]=-sin(s/a);
    Tp[1][0]=cos(s/a);

    kNp[0][0]=(1/a)*-cos(s/a);
    kNp[1][0]=(1/a)*-sin(s/a);

/*   //linear Path
    d1=0;
    d2=0.4;
    Rp[0][0]=d1;
    Rp[1][0]=-s+d2;

    Tp[0][0]=0;
```

```
    Tp[1][0]=-1;

    kNp[0][0]=0;
    kNp[1][0]=0;
   */


   /* //linear Path
    d1=0;
    d2=0;
    Rp[0][0]=s+d1;
    Rp[1][0]=s+d2;

    Tp[0][0]=1;
    Tp[1][0]=1;

    kNp[0][0]=0;
    kNp[1][0]=0;
   */
     //defind Path sp
    sp=s+((R[0][0]-Rp[0][0])*Tp[0][0])+((R[1][0]-Rp[1][0])*Tp[1][0]);

    //Output Parameter
    RWork[0] = sp;/* initial indexdata s*/
    RWork[1] = ds;/* initial indexdata ds*/

    zeta1[0]=normR_t;
    zeta1[1]=0;

    zeta2[0]=sp;
    zeta2[1]=ds;

    zeta3[0]=0;
    zeta3[1]=0;

    zeta4[0]=0;
    zeta4[1]=0;

    zeta5[0]=s;


#endif /* MATLAB_MEX_FILE */

}
 static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifndef MATLAB_MEX_FILE

#endif /* MATLAB_MEX_FILE */
}

#ifdef  MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-
file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function
*/
#endif
```

ภาคผนวก ง.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องแบบไม่จำกัด

Infinitely Stepless Variable Transmission

วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ ภานุ บุญวัฒโนภาส ภูพิงค์ แต้ปิติกุล ยงยุทธ กุลสราวุธ ภาวิต สุวจิตตานนท์
ห้องปฏิบัติการ สหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889 E-mail: witaya.w@eng.chula.ac.th

Witaya Wannasuphoprasit , Panu Boonwattanopas , Phuping Taepeetikul , Yongyoot Kulsarawut , Parvit Suvachittanont
Human Robotics Laboratory
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Payathai Rd. Patumwan Bangkok Thailand 10330
Tel (66)2 218-6610-1, Fax (66)2 252-8889 E-mail: witaya.w@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษา ออกแบบ พัฒนา และควบคุม อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องแบบไม่จำกัด Double ISVT : Double Infinitely Stepless Variable Transmission ซึ่งเป็นระบบถ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องและมีช่วงอัตราทด จาก $-\infty$ ถึง ∞ ISVT นั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการทำงานวิจัยขั้นสูงที่จะทำต่อเนื่องจากโครงงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย Haptic Interface, Passive Robots, รวมถึงการทำงานของมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Cobot) บทความนี้จะกล่าวถึงระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องแบบอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงหลักการทำงาน และอธิบายถึงหลักการทำงาน การออกแบบ และการสร้างประกอบของ ISVT แบบทรงกลม ซึ่งได้สร้างต้นแบบจนแล้วเสร็จ ในส่วนสุดท้ายได้ทำการทดลองกับต้นแบบ ISVT และนำเสนอผลการทดลอง วิเคราะห์ผลและสรุปผลของงานวิจัย

Abstract

This paper presents design and development of a double – ISVT (Infinitely Stepless Variable Transmission). The mechanism enables users to adjust transmission ratio form $-\infty$ to ∞. A ISVT is a key element for research area of Haptic Interface, Passive Robots, and Collaborative Robot (Cobot). We reviewed and compared several types of CVTs. In addition we present the design and construction of the double ISVT prototype. Then, we performed transmission experiment. The results, discussion, and future work are provided.

1.บทนำ

ในปัจจุบันระบบทางกล (เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม) ได้มีการนำระบบส่งถ่ายกำลัง (transmission) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ อย่างมาก แต่อัตราทดที่ได้จากระบบส่งถ่ายกำลัง ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นจะมีข้อจำกัดในด้านของอัตราทด (transmission ratio) เป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น อัตราทดคงที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร หรืออัตราทดปรับได้แบบขั้นบันไดในเกียร์รถยนต์ และอัตราทดปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องเช่น CVT (Continuous Variable Transmission)

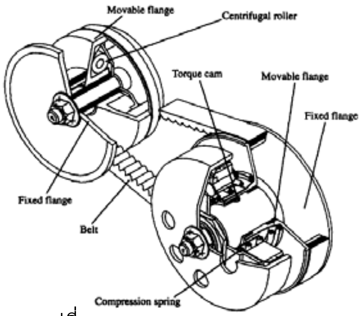
จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนอัตราทดจาก $-\infty$ ถึง ∞ ซึ่งหมายความว่า อุปกรณ์นี้สามารถปรับอัตราทดให้ Output มีค่าบวก (เมื่อเทียบกับ Input) และ มีค่าลบ ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้ใน งานวิจัยระดับสูงเช่น หุ่นยนต์ Cobot [7,8,9]

2. ตัวอย่างการศึกษา CVT

ปัจจุบัน CVT ก็มีใช้กันอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งตัวอย่างของ CVT ที่ได้ศึกษามาพอสังเขปมีดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

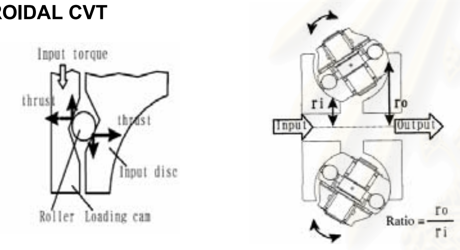
2.1 RUBBER V-BELT CVT



รูปที่ 1 Rubber V-Belt CVT [1]

ตัว RUBBER V-BELT CVT [1] นั้นประกอบด้วย Pulley ตัวขับและตัวตาม ซึ่ง Pulley จะประกอบไปด้วยขอบที่อยู่นิ่งกับขอบที่เคลื่อนที่ได้ โดยการเคลื่อนที่ของขอบ Pulley นั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรัศมีของตัว Pulley ซึ่งสายพานยางจะวางอยู่บน Pulley เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของขอบ Pulley ทั้งสองที่สัมพันธ์กัน ก็จะเกิดการเปลี่ยนอัตราทดได้ โดยอัตราทดคือ อัตราส่วนระหว่าง รัศมี Pulley ตัวตาม กับ Pulley ตัวขับ นั่นเอง

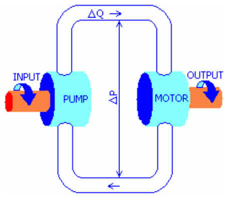
2.2 TOROIDAL CVT



รูปที่ 2 Toroidal CVT [2]

Toroidal CVT [2] นี้จะแบ่งเป็น Half-Toroidal CVT และ Full-Toroidal CVT ขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางกายภาพของ variator หลักการทำงานของ Half-Toroidal CVT จะใช้ตัว Loading Cam เปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ให้เป็นแรงในแนวแกน (Thrust) Input และ Output Disc ที่รับแรงมาจาก Loading Cam และ Power Roller 2 ลูก ที่อยู่ระหว่าง Disc ทั้งสอง ก็จะส่งแรงขับเคลื่อนโดยจะอาศัยจากน้ำมันชนิดพิเศษ ที่สามารถสร้างแรงต้านการเฉือนได้อย่างมาก ก่อให้เกิดแรงดันสูงในการส่งถ่ายกำลังของ CVT นี้ (โดยปราศจากการสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ) วิธีการเปลี่ยนอัตราทดของ Half-Toroidal CVT นี้ทำโดยการบิดตัว Power Roller รอบแกนหมุน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรัศมีของจุดสัมผัสระหว่าง Power Roller กับ Input และ Output Disc ดังภาพ โดยอัตราทดนั้นคือ อัตราส่วนระหว่าง r_o กับ r_i

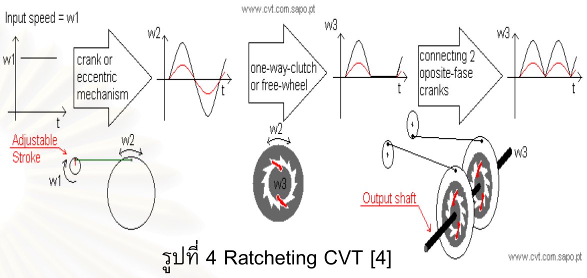
2.3 HYDROSTATIC CVT



รูปที่ 3 Hydrostatic CVT [3]

Hydrostatic CVT [3] นี้ประกอบไปด้วย hydrostatic pump และ hydrostatic motor เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการทำงานของ Hydrostatic CVT คือ input จะทำการขับ pump เพื่อเป็นการส่งถ่ายพลังงานไปยังของไหล โดยของไหลจะมีแรงดันเพิ่มขึ้นไปหมุนตัว motor เพื่อไปขับ output ต่อไป โดยจะมีตัว variable displacement unit เพื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราทดอีกตัวหนึ่งหรือเป็นตัวเดียวกับ Motor เลยก็ได้ โดยอัตราทดนั้นก็คือผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนั้นเอง

2.4 RATCHETING CVT



รูปที่ 4 Ratcheting CVT [4]

Ratcheting CVT [4] มีอีกชื่อหนึ่งว่า Crank-CVT, Variable-Stroke CVT จะทำงานโดยการเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนไปเป็นการเคลื่อน ที่แบบกลับไปกลับมา แล้วทำการเรียงการเคลื่อนที่ ให้กลับไปเป็นแบบหมุนตามเดิม โดยในขั้นแรก กลไกจะสร้างการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาจากการเคลื่อนที่แบบหมุน ต่อมาการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาก็จะถูกเรียงด้วยกลไกเช่น one-way-clutch (or free-wheel) เพื่อที่จะเรียงการเคลื่อนที่กลับไปเป็นแบบหมุนตามเดิม เพื่อที่จะให้การเคลื่อนที่ราบ เรียบต้องใช้ several out-of-phase cranks [4] ด้วย

เมื่อทำการศึกษา CVT ชนิดต่างๆข้างต้นแล้ว ก็นำมาวิเคราะห์สรุป ข้อดี ข้อเสียของแต่ละชนิดดังในตารางที่ 1

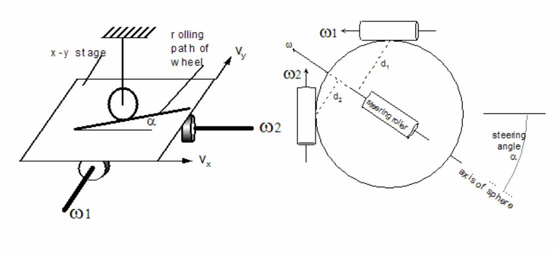
ตารางที่ 1 แสดงถึงข้อดี ข้อเสียของ CVT แบบต่างๆ

ชนิดของ CVT	ข้อดี	ข้อเสีย
1. RUBBER V-BELT CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด
2.Toroidal CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด มีขนาดเล็ก ส่งกำลังได้สูงสุด	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด
3. Hydrostatic CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด ระบบมีประสิทธิภาพเพียง 60 – 80%
4. Ratcheting CVT	ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด	มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด กำลังที่ได้ออกมาไม่สม่ำเสมอ

จากการพิจารณาแล้วสรุปว่าไม่มีชนิดใดเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็น ISVT ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องและมีช่วงอัตราทดจาก $-\infty$ ถึง ∞ เนื่องจาก CVT ในแต่ละชนิด มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทดซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยชิ้นนี้ ดังนั้นจึงต้องศึกษาหาวิธีการที่จะสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดให้ได้ตามที่ต้องการ จากการศึกษาหาข้อมูลและวิธีตลอดจน ทฤษฎีต่างๆ โดยท้ายสุด คณะวิจัยได้เลือกที่จะพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่อง

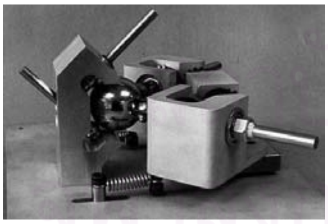
ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวโดยใช้ Spherical CVT ดังรายละเอียดที่แสดงในหัวข้อถัดไป

3. Spherical CVT : หลักการทำงาน



รูปที่ 5 หลักการของ Spherical CVT [5]

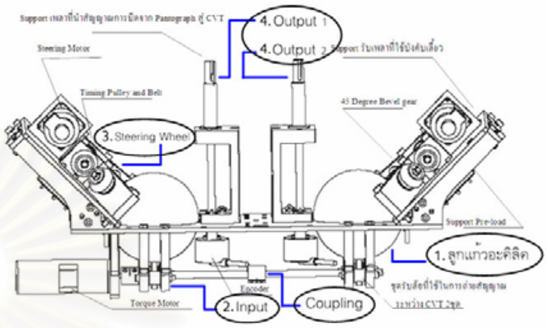
พิจารณารูปที่ 5 (ซ้าย) ถ้านำเอา wheel มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ V_y และ V_x จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม α (steering angle) ของล้อโดยที่ $V_y / V_x = \tan(\alpha)$ ในขณะเดียวกันถ้าใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น V_x และ V_y ให้เป็นความเร็วเชิงมุม w_1 และ w_2 ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ ถ้าม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูปที่ 5 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของ steering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle (α) แกนของ steering rollers (ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับ wheel ในรูปซ้าย) ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ d_1 และ d_2 (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ w_1 และ ล้อขับ w_2) เปลี่ยนไป มีผลทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด w_1/w_2 เท่ากับ d_1 / d_2 เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ ดังรูปที่ 6 ที่ Moore [5] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด1.5นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ และเรียกว่า Tetrahedral CVT



รูปที่ 6 Tetrahedral CVT [5]

4. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ISVT

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณ ออกแบบ และสร้างชุด อุปกรณ์ ISVT ที่ได้ใช้หลักการเดียวกันกับ Tetrahedral CVT ขึ้นมา วัตถุประสงค์อีกประการหนึ่งของงานวิจัยนี้คือ สามารถนำต้นแบบ ISVT นี้ไปใช้ในงานวิจัยที่มีการพัฒนาทางด้านหุ่นยนต์โคบอทต่อไปได้ ซึ่งเป็นส่วนที่จะส่งกำลังระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอท โดยการออกแบบอุปกรณ์นั้นจะประกอบด้วยการนำ Tetrahedral CVT 2 ชุดมาทำงานด้วยกัน เพื่อเพิ่มวิธีการเชื่อมต่อในการส่งถ่ายกำลัง ที่เรียกว่า Double CVT ที่มีลักษณะเหมือนกับการนำ Tetrahedral CVT 2 ชุดมาต่อเข้าด้วยกันโดยมีแกนสมมาตรอยู่ตรงกึ่งกลางของอุปกรณ์ เพื่อ ที่จะสามารถต่อแขนกลกับทาง Output ออกไปเป็น Five bar linkage เป็น Pentograph สำหรับงานวิจับระดับสูงต่อไป โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบ



รูปที่ 7 ถึงรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ ISVT

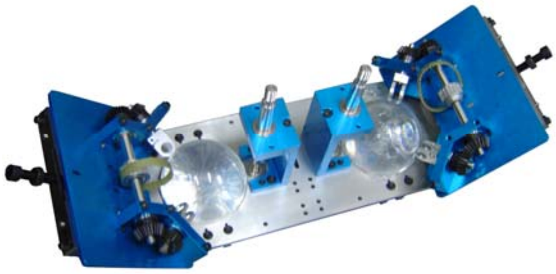
ขึ้นมา แสดง ดังในรูปที่ 7

ชุดอุปกรณ์หลักๆของ ISVT คือ

1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทำจากอะคิลิค ที่มีความกลมเที่ยงตรงสูง
2. ชุด Input ที่ประกอบด้วย Torque motor ที่ใช้สำหรับส่งกำลังให้กับ ISVT และล้อยูลิเทนสำหรับใช้หมุนลูกแก้วอะคิลิค
3. ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทด (Steering Wheel) ที่ประกอบด้วย Steering motor ที่ใช้สำหรับปรับมุมของล้อปรับอัตราทด และล้อยูลิเทนสำหรับปรับแกนหมุนของลูกแก้วอะคิลิค
4. ชุด Output ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ชุด ประกอบด้วยล้อยูลิเทนสำหรับรับอัตราทดจากลูกแก้วอะคิลิค และเพลา Output สำหรับ ต่ออุปกรณ์นำอัตราทดที่ส่งออกจาก ISVT ไปใช้งาน

อุปกรณ์ ISVT ที่ออกแบบนี้แต่ละข้างของ Double ISVT สามารถทำงานร่วมกันหรือแยกกันอย่างอิสระได้โดยปลดตัว Coupling ที่ต่ออยู่ที่ชุด Input ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 7 ส่วนชุด Steering Wheel นั้นทั้งสองข้างใช้ motor ควบคุมอิสระต่อกัน เพียงสั่งการให้ motor หมุนไปเป็นมุมที่เท่ากันหรือต่างกัน ก็จะสามารถกำหนดให้ Output ทั้งสองข้างของ ISVT มีอัตราทดที่เท่ากันหรือต่างกัน

หลังจากที่ได้ทำการประเมินและวิเคราะห์การออกแบบ (Design



รูปที่ 8 รูปต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็วแบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double ISVT

review) ต่อมาจึงทำการสร้างแบบ (Drawing) และกำหนดรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ ISVT ทำการขึ้นรูป จัดซื้ออุปกรณ์ และประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 8

ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ ISVT นี้ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยแผ่นฐาน (Base) นั้นทำมาจาก Stainless Steel เพื่อความแข็งแรง เพลาต่างๆที่ใช้ ทำมาจากเหล็กกล้า ส่วนประกอบขึ้นรูปอื่นๆใช้ อลูมินัม เป็นวัสดุหลัก ลูกแก้วที่ใช้ทำมาจาก อะคิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และลูกล้อที่ใช้ทำโดยการเคลือบยูลิเทนที่ความแข็ง CHA80 ลงบนแกนล้อที่ทำจากเหล็ก

หลักการทำงานของ ISVT คือ เราทำการใส่ Input เข้าไปทาง Torque motor เพื่อให้ลูกทรงกลมอะคิกลิกหมุน แล้วทำการปรับมุมของชุดบังคับเลี้ยว (Steering wheel) ไปเป็นมุม (α) ต่างๆ ส่งผลให้แกนหมุนของลูกแก้วเปลี่ยนไป ทำให้ได้ความเร็วที่ออกทาง Output นั้นมีค่าต่างๆกันออกไป ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดอัตราส่วนการทดรอบระหว่าง input wheel และ out put wheel โดยการปรับเปลี่ยนมุมของคู่ล้อบังคับเลี้ยว (α) นั้นเอง

ข้อดีของระบบการขับเคลื่อนที่ใช้ในอุปกรณ์ ISVT คือ มีความต่อเนื่องระหว่างการเปลี่ยนความเร็ว แต่มีข้อเสียคือ การถ่ายทอดกำลังขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียดังกล่าวมิได้เป็นข้อจำกัดในการออกแบบเพราะในภายหลังสามารถพิจารณาใช้วัสดุที่มีความความเสียดทานและคงทนสูง

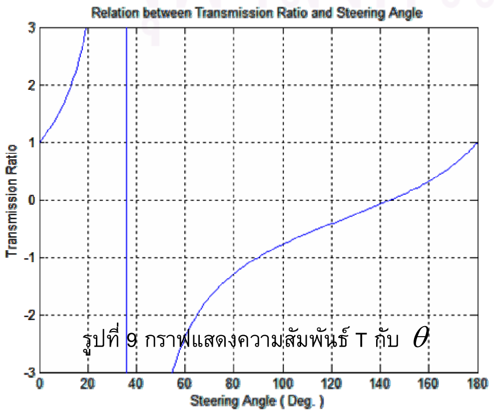
5. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

จาการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างอัตราทดกับตำแหน่งแกนหมุนของ Steering shaft [6] สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็นสมการ

$$T = \tan\left[\tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta}{\sqrt{2}}\right) - 45^\circ\right] \qquad (1)$$

เมื่อ T = อัตราทด ; θ = Steering Angle

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่ามุมของลูกล้อชุด Steering Angle (θ) กับอัตราทด (T) มีความสัมพันธ์ต่อกันโดยตรง ดังนั้นเมื่อ $0 \le \theta \le 2\pi$ จะทำให้อัตราทดมีค่าอยู่ในช่วง $-\infty$ ถึง ∞ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในทางทฤษฎีระบบ ISVT นี้สามารถที่จะให้ผลลัพธ์เป็นไปตามความต้องการ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทด (T) และ Steering Angle (θ) แสดงเป็นกราฟในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ T กับ θ

จะเห็นว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่า Steering Angle (θ) เริ่มจาก 0 ไปถึง 180 องศา อัตราทด (T) ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในช่วง $-\infty$ ถึง ∞ ตามที่ต้องการ

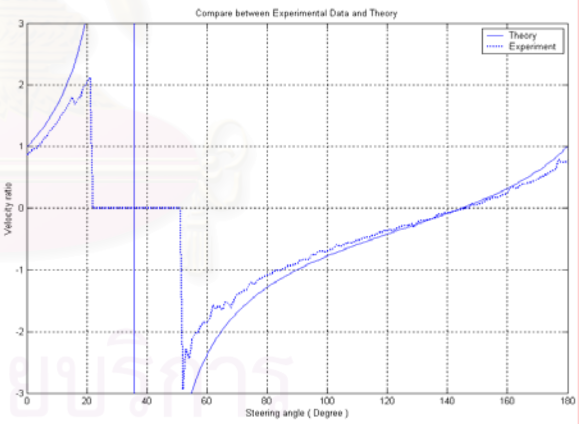
6. การทดลองหาอัตราทดของอุปกรณ์ ISVT

เมื่อได้สร้างตัวอุปกรณ์แล้ว การควมคุมชิ้นอุปกรณ์นี้โดยเราเลือกใช้โปรแกรม Visual C++ ซึ่งโดยเราทำการออกคำสั่งผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของชุด CVT ผ่าน Card ควบคุม (Spii PCI Controller)

วิธีการทดลองหาอัตราทดของอุปกรณ์ ISVT ทำโดยกำหนดมุมของ Steering wheel (α) โดยเริ่มที่ค่า 0 องศา แล้วทำการใส่ Input เข้าไปที่ความเร็วค่าหนึ่งแล้วทำการวัดค่าความเร็วที่ได้ออกมาจาก Output แล้วนำมาหาอัตราทด แล้วบันทึกค่าอัตราทดเอาไว้ แล้วลองเปลี่ยนความเร็ว Input เป็นค่าต่างๆหลายๆค่า เพื่อนำมาหาค่าอัตราทดเฉลี่ยที่ตำแหน่ง Steering wheel (α) หนึ่งๆ ต่อมาก็ทำการปรับเพิ่มค่า Steering wheel (α) จาก 0 องศา แล้วทำการหาค่าอัตราทดเฉลี่ย ที่แต่ละองศา โดยการเปลี่ยนความเร็ว Input หลายๆค่า แล้วทำการบันทึกค่าเอาไว้จนครบ 180 องศา

7. ผลการทดลอง

จากการทดลอง เราได้ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ คือ Velocity ของ Input, Output และ Steering angle หลังจากนั้นนำค่าต่าง ๆ มาทำการพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับผลทางทฤษฎี ในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟการเปรียบเทียบทฤษฎีกับผลการทดลอง

8. สรุปและการวิเคราะห์ผล

ช่วงที่ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับทางทฤษฎี คือที่มุม Steer มีค่าอยู่ในช่วง 0-15 และ 70-180 องศา ซึ่งค่า Maximum velocity ratio ที่ชุดอุปกรณ์ CVT สร้างได้จะมีค่าประมาณ ±1.8 ซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเล็กน้อยอาจเกิดจากผลของการสลิประหว่างล้อ Input, Output กับลูกทรงกลม ทำให้ค่า Velocity ratio มีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎีอยู่เล็กน้อย

ช่วงที่ได้ค่าผิดพลาดจากทางทฤษฎี คือที่มุม Steer มีค่าอยู่ในช่วง 16- 21 และ 52-69 องศา ที่มีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎีและช่วงที่

ไม่สามารถวัดค่าได้ คือที่มุม Steer มีค่าอยู่ในช่วง 22-51 องศา มีผลเนื่องมาจาก ข้อจำกัดของอุปกรณ์ต้นแบบซึ่งได้แก่ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็กเกิดไป มีกระแสไฟฟ้าจำกัด ส่งผลให้ Torque ที่สร้างขึ้นได้มีขนาดไม่เพียงพอต่อการขับชุด CVT ทำงาน และล้อที่ทำจากพอลิยูรีเทนที่มีความแข็งน้อยเกินไปทำให้จุดสัมผัสระหว่างลูกทรงกลมและล้อต่าง ๆ มีลักษณะเป็นพื้นที่ไม่ได้เป็นจุดตามทฤษฎี ซึ่งส่งผลให้จุดตัดของแกนการหมุนทั้ง 3 ไม่เป็นเส้นแต่เป็นระนาบๆหนึ่ง ทำให้แกนการหมุนของลูกทรงกลมไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปบนระนาบดังกล่าว ทำให้ ณ ช่วงมุม Steer ที่กล่าวมา ค่า Velocity ratio จึงมีค่าผิดพลาดไปจากทฤษฎีตามที่กล่าวมาข้างต้น

9.การวิจัยในอนาคต

การวิจัยในอนาคตข้างหน้าของอุปกรณ์ ISVT นี้จะเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้สูงขึ้น ข้อจำกัดของอุปกรณ์ ISVT นี้อยู่ที่การส่งกำลังด้วยแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวทรงกลมกับล้อยูลิเทน ที่ยังมีค่าน้อยอยู่ และเกิดการลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัสดังกล่าว คณะวิจัยได้เตรียมที่จะพัฒนาในส่วนนี้ โดยการออกแบบล้อยูลิเทนให้มีความแข็งที่สูงขึ้น พร้อมกับเพิ่มแรงกดขณะใช้งาน (Preload) ให้สูงขึ้น แต่ไม่ถึงกับทำให้รูปทรงของล้อยูลิเทนที่ผิวสัมผัสเกิดการเปลี่ยนรูปไป ซึ่งถ้าสามารถพัฒนาตามที่กล่าวมาจะทำให้ อุปกรณ์ ISVT มีอัตราทดที่ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากยิ่งขึ้น พร้อมกับสามารถส่งถ่ายกำลังออกจากตัวอุปกรณ์ ISVT ที่มีค่าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

อุปกรณ์ ISVT ที่คณะวิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถนำไปต่อเชื่อมกับ Five bar linkage เป็น Pentograph manipulator ซึ่งจะใช้การปรับเปลี่ยนอัตราทดของอุปกรณ์ ISVT ในการควบคุมมุมของข้อต่อ (Joint) ทั้งสองเพื่อให้ปลายแกนกล (Tool tip) ของ Pentograph มีทิศทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ ระบบนี้สามารถเป็นได้ทั้ง Active และ Passive สำหรับระบบ Active ชุดควบคุมจะสั่งให้ Torque motor ส่งกำลังไปที่ ISVT ถ้าตัดการของ Torque motor ระบบก็จะเป็น Passive โดยจะควบคุมทิศทางของ Tool tip ได้ด้วยการควบคุมอัตราทดระหว่างข้อต่อ โดยการปรับค่ามุม steering ของ ISVT นั้นเอง

เอกสารอ้างอิง

[1] T. F. CHEN, D. W. LEE and C. K. SUNG, "AN EXPERIMENTAL STUDY ON TRANSMISSION EFFICIENCY OF A RUBBER V-BELT CVT", Mech. Mach. Theory , 1998,Vol. 33, No. 4, pp. 351-363

[2] Haruhito Mori, Tsutomu Yamazaki, Katsuya Kobayashi, Toshifumi Hibi "A study on the layout and ratio change characteristics of a dual-cavity half-toroidal CVT" , JSAE Review 22,2001,pp 299–303

[3] http://cvt.com.sapo.pt/hydrostatic/hydrostatic.htm

[4] http://cvt.com.sapo.pt/ratcheting/ratcheting.htm

[5] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.

[6] ภาณุ บุญวัฒโนภาส , ภูพิงค์ แต้ปิติกุล , ยงยุทธ กุลสราวุธ ,"การพัฒนาอุปกรณ์ CVT สำหรับระบบสร้างความรู้สึกเสมือนจริง"ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2004

[7] Peshkin, M.A, Colgate, J.E, Wannasuphoprasit, W., Moore, C.A, Gillespie, R.B and Akella, P. 2001. Cobot architecture, IEEE Transactions on Robotics and Automation. vol. 17, no. 4, August 2001, pp. 377-390.

[8] Wannasuphoprasit, W. and Chanphat, S. 2002. "A study and develop of fluid cobot" , Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2002). New Orleans, Louisiana

[9] วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล, "หุ่นยนต์โคบอทแบบขนาน", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 2546

การงานประชุมวิชาการสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย 2006
1-2 มิถุนายน 2549 ศูนย์ประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ

การจำลองเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Pantograph Cobot

Path Simulation of Pantograph Cobot

ภาวิต สุวจิตตานนท์ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์*
ห้องปฏิบัติการ สหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889 E-mail: witaya.w@chula.ac.th

Parvit Suvachittanont, Witaya Wannasuphoprasit*
Human Robotics Laboratory
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Payathai Rd. Patumwan Bangkok Thailand 10330
Tel (66)2 218-6610-1, Fax (66)2 252-8889 E-mail: witaya.w@chula.ac.th
Corresponding Author*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทต้นแบบสองมิติและการจำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์นี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือส่วนแรกเรียกว่า Double CVT สร้างจากข้อต่อแบบ Spherical CVT จำนวนสองชุดที่ต่อกันแบบขนาน ส่วนที่สองเป็นแขนกล pantograph เมื่อติดตั้งบน Double CVT ปลายแขนจะเคลื่อนที่ได้สองมิติในระนาบ นอกจากนี้ได้อธิบายหลักสำคัญการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการควบคุมของหุ่นยนต์ และได้จำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของเส้นทางวงกลมของหุ่นยนต์ได้ผลตามดีและสอดคล้องกับการวิเคราะห์

1. ความเป็นมา

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำ Spherical CVT[2] มาใช้ในงานทางด้านหุ่นยนต์โคบอท (Cobot: :*Collaborative Robot*) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรงบนพื้นที่การทำงานเดียวกันอย่างปลอดภัย หุ่นยนต์โคบอทเป็นอุปกรณ์ทางด้านหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมเป็นแพสซิฟ (Passive) ไม่มีต้นกำเนิดส่งกำลังสู่ระบบ อาศัยกำลังจากมนุษย์ในการเคลื่อนที่ โคบอทเพียงทำหน้าที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ไปพร้อมกันในพื้นที่การทำงานเดียวกัน หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์โคบอทชนิดขนานเคลื่อนที่ในสองมิติในรูปแบบของแขนกล pantograph

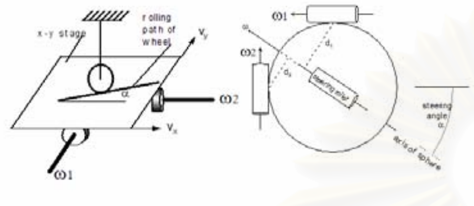
2. แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ในพื้นที่ทำงาน(workspace)เดียวกัน หุ่นยนต์โคบอทแตกต่างกับหุ่นยนต์หรืออุปกรณ์แฮปติคอินเทอร์เฟซ (Haptic Interface) ทั่วไปตรงที่หุ่นยนต์โคบอทจะไม่สร้างแรงปฏิกิริยาตรงมาบังคับการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานแต่จะทำเพียงเปลี่ยนทิศทางแรงของผู้ใช้งานเป็นหลักเท่านั้น ผู้ใช้งานจะเป็นผู้กำหนดการเคลื่อนที่เอง การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจึงเป็นการทำงานในระบบแพสซีฟ (Passive) ซึ่งปลอดภัยต่อผู้ใช้ในการทำงาน

หุ่นยนต์โคบอทไม่ใช้มอเตอร์หรืออุปกรณ์ต้นกำลัง (actuators) เพื่อส่งกำลังให้กับจอยท์ (joints) แต่หุ่นยนต์โคบอทจะใช้ซีวีที (CVTs : Continuous Variable Transmission) ในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของแต่ละจอยท์ ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทได้ อุปกรณ์ซีวีทีนี้จะสร้างสร้างข้อบังคับแบบนอนโฮโลโนมิค (nonholonomic constraints) ให้กับหุ่นยนต์โคบอทโดยที่ว่าไม่ว่าหุ่นยนต์โคบอทจะมีจำนวนมิติการทำงาน (task space) เท่าไรก็ตาม การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทจะมีเพียง 1 องศาอิสระ (Degree of Freedom) เท่านั้น การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจะมีการทำงาน 2 ลักษณะคือ 1) การทำงานแบบอิสระ (Virtual Caster) การทำงานในลักษณะนี้ ผู้ใช้จะรู้สึกเหมือนกับสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หุ่นยนต์โคบอทจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ และ2) การทำงานแบบบังคับ (Virtual Wall) ซึ่งจะบังคับทิศ

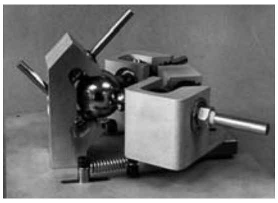
ทางการเคลื่อนที่ของมนุษย์ พิจารณาตัวอย่างในการสร้างกำแพงเสมือน เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่เข้าหากำแพงเสมือน ผู้ใช้จะไม่สามารถเคลื่อนหุ่นยนต์โคบอทให้ทะลุกำแพงได้ แต่จะไถลไปตามกำแพง และถ้าเคลื่อนออกจากกำแพงหุ่นยนต์โคบอทจะกลับไปทำงานในแบบอิสระ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในบทความ [7]

3. Spherical CVT



รูปที่ 1 หลักการของ Spherical CVT [1]

พิจารณารูปที่ 1 (ซ้าย) ถ้านำเอาล้อ [5,6] มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ V_y และ V_x จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม α (steering angle) ของล้อโดยที่ $V_y / V_x = \tan(\alpha)$ ในขณะเดียวกันถ้าใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น V_x และ V_y ให้เป็นความเร็วเชิงมุม w_1 และ w_2 ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ ถ้าม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูปที่ 1 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเอง และแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของ steering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle (α) แกนของ steering rollers (ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับ wheel ในรูปซ้าย) ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ d_1 และ d_2 (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ w_1 และ ล้อขับ w_2) เปลี่ยนไป มีผลทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด w_1 / w_2 เท่ากับ d_1 / d_2 เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ ดังรูปที่ 4 ที่ Moore [2] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด1.5นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ และเรียกว่า Tetrahedral CVT

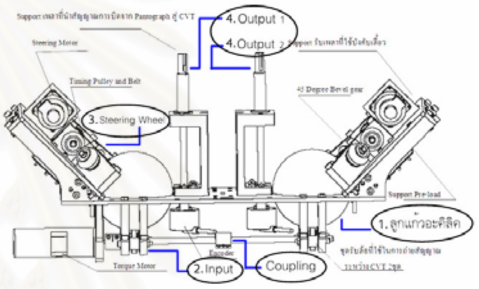


รูปที่ 2 Tetrahedral CVT [2]

4. แนวคิดในการออกแบบของ Pantograph Cobot

Cheepsumol และคณะ [7] ได้พัฒนาและออกแบบหุ่นยนต์โคบอทสองมิติโดยใช้ Spherical CVT จำนวนสองชุดต่อแบบขนานกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณ ออกแบบ และสร้างชุด อุปกรณ์ CVT ที่ได้ใช้หลักการเดียวกันกับ Tetrahedral CVT ขึ้นมา 2 ชุด ในแต่ละชุดของ CVT จะมีเพลาอินพุตและเพลาเอาท์พุต อัตราทดของเพลาทั้งสองปรับได้ด้วย steering wheel.

ในการออกแบบนี้เชื่อมเพลากลางเอาท์พุตของ CVT ชุดที่หนึ่งเข้ากับเพลากลางอินพุตของ CVT ชุดที่สอง เพื่อการส่งถ่ายกำลังเข้าด้วยกันเราเรียกว่า Double CVT



รูปที่ 3 รายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT

ชุดอุปกรณ์หลักๆของ Double CVT คือ

1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วจำนวนสองลูกที่มีความกลมเที่ยงตรงสูง
2. ชุด Input ที่ประกอบด้วย Torque motor ขับที่เพลากลาง ใช้สำหรับส่งกำลังให้กับ Double CVT และล้อยูลิเทนสำหรับใช้หมุนลูกแก้วอะคิลิค
3. ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทด (Steering Wheel) ที่ประกอบด้วย Steering motor ที่ใช้สำหรับปรับมุมของล้อปรับอัตราทด และล้อยูลิเทนสำหรับปรับแกนหมุนของลูกแก้วอะคิลิค
4. ชุด Output ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ชุด ประกอบด้วยล้อยูลิเทนสำหรับรับถ่ายกำลังจากลูกแก้วอะคิลิค และเพลา Output สำหรับ ต่ออุปกรณ์นำอัตราทดที่ส่งออกจาก Double CVT ไปใช้งาน

แต่ละข้างของ Double CVT สามารถทำงานร่วมกันหรือแยกกันอย่างอิสระได้โดยปลดตัว Coupling ที่ต่ออยู่ที่ชุด Input ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3 ส่วนชุด Steering Wheel นั้นทั้งสองข้างใช้ motor ควบคุมอิสระต่อกัน เพียงสั่งการให้ motor หมุนไปเป็นมุมที่เท่ากันหรือต่างกัน ก็จะสามารถกำหนดให้ Output ทั้งสองข้างของ CVT มีอัตราทดที่เท่ากันหรือต่างกันตามต้องการ ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT นี้ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC

เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยแผ่นฐาน (Base) นั้นทำมาจาก Stainless Steel เพื่อความแข็งแรง เพลาต่างๆที่ใช้ ทำมาจาก เหล็กกล้า ส่วนประกอบขึ้นรูปอื่นๆใช้ อลูมินัม เป็นวัสดุหลัก ลูกแก้วที่ใช้ทำมาจากอะคิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และลูกล้อใช้ยูลิเทนความแข็ง CHA80 หล่อลงบนแกนล้อที่ทำจากเหล็ก ต้นแบบของ Double CVT แสดงในรูปที่ 4

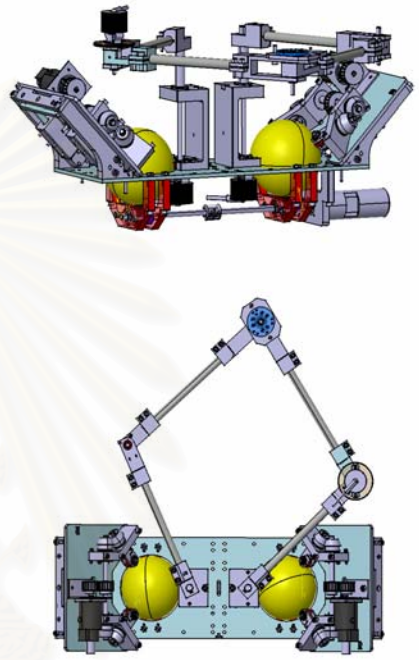
รูปที่ 4 รูปต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็วแบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double CVT

หลักการทำงานอันหนึ่งของ Double CVT คือการให้ Input จาก Torque motor ไปที่เพลากลาง เพื่อส่งกำลังให้ลูกทรงกลมอะคิกลิกทั้งสองลูกในเวลาเดียวกัน แล้วกำหนดอัตราทดของแต่ CVT ละโดยปรับมุมของชุดบังคับเลี้ยว (Steering wheel) ไปเป็นมุม (α) ต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วที่ออกทาง Output1 และ Output2 ดังนั้นจึงสามารถกำหนดอัตราส่วนการทดรอบระหว่าง Input กับ Output1 และกับ Output2 ในกรณีนี้อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เสมือนกับอุปกรณ์ส่งกำลังแบบปรับความเร็วสองแกน (Output สองแกน) ที่ปรับได้อย่างต่อเนื่องและอิสระโดยมีแกน Input ร่วมกันอันเดียว

5. Pantograph Cobot

รูปแบบทำงานที่สำคัญอีกลักษณะหนึ่งซึ่งนำมาใช้กับหลักการของหุ่นยนต์โคบอท โดยเพลากลางมิได้ทำหน้าที่รับ Input แต่จะทำหน้าที่แค่เชื่อมต่อ CVT ทั้งสองชุด ในกรณีนี้จะต่อกลไกแขนกลเข้ากับแกนเพลา Output1 และ Output2 ของ Double CVT ทิศทางของแขนกลจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนความเร็วของ Output1 และกับ Output2 ซึ่งเกิดจากการการควบคุมอัตราทดของ CVT ทั้งสอง เมื่อเรานำเอา Five bar linkage มาต่อกับทางด้าน output ของชุด CVT ทั้งสองก็จะได้เป็น หุ่นยนต์โคบอทในรูปแบบ Pantograph Cobot ดังในรูปที่ 5

ปลายแขนของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ได้ในระนาบ X-Y โดยเราจะควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนจากการปรับมุมอัตราทดของ CVT ในขณะทำงานร่วมกับมนุษย์ ผู้ใช้จะออกแรงขับเคลื่อนที่ปลายแขนแต่ทิศทางการเคลื่อนที่จะเป็นตามอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ Output1 กับ Output2 ซึ่งระบบเป็นผู้ควบคุม ในขณะเคลื่อนที่ระบบควบคุมปรับมุมอัตราทดเป็นค่าต่างๆ เพื่อบังคับทิศทางให้แขนกลตามเส้นทางที่โปรแกรมไว้ รูปที่ 5 ได้แสดงหุ่นยนต์แขนกล Pantograph Cobot

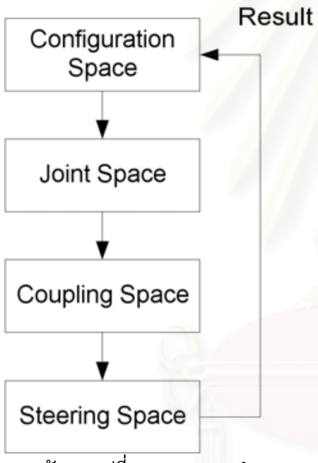


รูปที่ 5 Pantograph Cobot

6. หลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนาน

การทำงานของโคบอทนั้นจะไม่ใช่การบังคับอุปกรณ์ต้นกำลังเพื่อให้เกิดการทำงานโดยตรง แต่จะเป็นการทำงานโดยการสร้างข้อบังคับแบบนอนโฮโลโนมิค เพื่อบังคับทางเดินของโคบอท กล่าวคือโคบอทจะไม่ได้บังคับตำแหน่งที่ปลายแขน แต่จะบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขน ดังนั้นนอกจากต้องหาจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและย้อนกลับของแขนกลดังเช่นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั่วไป ต้องวิเคราะห์จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทซึ่งไม่ได้ใช้เวลาแต่ใช้ระยะตำแหน่งเป็นตัวแปร การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโคบอทนั้นจะไม่วิเคราะห์เพียงแค่ตำแหน่ง แต่จะเป็นการวิเคราะห์ในมิติการเคลื่อนที่อื่นๆด้วยได้แก่ ความเร็วทั้งขนาดและทิศทาง ความโค้ง เวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ และระยะทางที่โคบอทเคลื่อนที่ไป การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการแปลงกรอบการทำงานของโคบอท

กรอบการเคลื่อนที่ของโคบอทโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 4 ประเภทด้วยกัน [3,5] คือ ปริภูมิตำแหน่งปลาย (Configuration Space : C_T) บอกถึงการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายของโคบอท ปริภูมิจอยท์ (Joint Space : C_j) บอกถึงการเคลื่อนที่ของข้อต่อของโคบอท ปริภูมิการจับคู่ (Coupling Space : $\sum_i$) บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อซึ่งสร้างความสัมพันธ์กันโดยผ่านกลไกของซีวีทีและ ปริภูมิของมุมปรับอัตราทด (Steering Space : Φ) บอกถึงมุมที่ซีวีทีต้องหมุนปรับไป ซึ่งก็คือค่าสัญญาณที่เราต้องควบคุม ลำดับการแปลงรูปจะเริ่มต้นจากการหาการเคลื่อนที่ในปริภูมิตำแหน่งปลาย จากนั้นแปลงไปเป็นการเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์ จากนั้นทำการจับคู่การเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์ทีละคู่ทุกคู่ซึ่งก็จะได้เป็นการเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่เมื่อได้การเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่แล้วก็สามารถทำการคำนวณมุมที่ซีวีทีต้องหมุนปรับไปซึ่งก็คือปริภูมิของมุมปรับอัตราทดนั่นเอง ลำดับการแปลงรูปเป็นดังรูปที่ 6

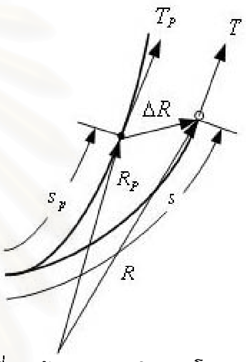


รูปที่ 6 แผนผังการเปลี่ยนกรอบการทำงานของโคบอท

7. การควบคุมและการจำลองการควบคุม

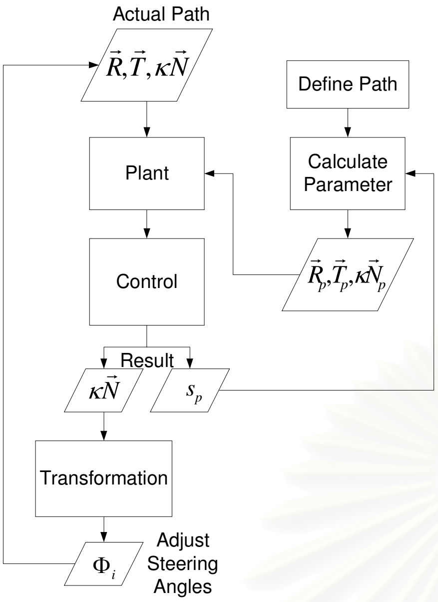
การควบคุมโคบอทนั้นแตกต่างจากการควบคุมหุ่นยนต์ทั่วไป กล่าวคือนอกจากจะต้องทำการควบคุมตำแหน่งแล้ว ยังต้องควบคุมให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของโคบอทไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ ณ ตำแหน่งที่กำหนดอีกด้วย ดังนั้นตัวแปรต้นเป็นระยะตำแหน่งของโคบอท การควบคุมโคบอทจะใช้วิธีการควบคุมแบบให้เคลื่อนตามเส้นทาง (Path Following Control) คือการกำหนดเส้นทางที่ต้องการในโปรแกรม แล้วจึงควบคุมทิศทางให้โคบอทวิ่งเข้าสู่เส้นทางนั้น โดยใช้พื้นฐานของวิธีการป้อนกลับให้เป็นเชิงเส้น (Feedback Linearization) และการแปลงการเคลื่อนที่ (Curvature Transformation) [3,5] ดังจะได้อธิบายโดยย่อต่อไป

กำหนดให้เส้นทางที่โคบอทต้องเดินไปคือ S_p โดยที่ตำแหน่งของโคบอทจริงเดินอยู่บนเส้นทาง S ดังรูปที่ 7 วิธีการควบคุมทางเดินของโคบอทก็คือต้องปรับทิศทางการเดินของโคบอทจริงให้หันเข้าหาเส้นทางที่ต้องการและเมื่อโคบอทวิ่งเข้าสู่เส้นทางที่ต้องการแล้วจึงทำการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามเส้นทางที่ต้องการ วิธีการดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับให้เวคเตอร์ $\vec{T}$ มีทิศทางพุ่งเข้าหา S_p จากนั้นเมื่อโคบอทเคลื่อนที่อยู่บน S_p แล้ว ก็ทำการปรับเวคเตอร์ $\vec{T}$ ให้เป็นไปตามเวคเตอร์ $\vec{T}_p$ ก็จะทำให้โคบอทเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ต้องการโดยการปรับค่าเกณฑ์ป้อนกลับ



รูปที่ 7 เส้นทางการเดินของโคบอท

การปรับทิศทางของเวคเตอร์ $\vec{T}$ ในทางปฏิบัติก็สามารถทำได้โดยการปรับอัตราทดของซีวีทีโดยการแปลงรูประหว่างปริภูมิตำแหน่งปลายและปริภูมิของค่ามุมปรับอัตราทด ค่ามุมปรับอัตราทดทำให้ได้ค่าเวคเตอร์ $\vec{T}$ ที่ต้องการจุดประสงค์หลักในการควบคุมก็คือการคำนวณหาค่าเวคเตอร์ $\vec{T}$ ออกมานั่นเอง แต่เพื่อให้การควบคุมมีความราบเรียบในลำดับของอนุกรม จึงต้องคำนวณหาค่าอนุพันธ์ของค่าเวคเตอร์ $\vec{T}$ ออกมาด้วยซึ่งก็คือค่าเวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ $\kappa\vec{N}$ (Curvature Vector) นั่นเอง นอกจากการคำนวณหาค่าเวคเตอร์ $\kappa\vec{N}$ แล้วก็ควรจะต้องคำนวณหาตำแหน่งบนเส้นทางที่ต้องการที่จะให้โคบอทเคลื่อนที่เข้าหาด้วยเพื่อให้โคบอทสามารถเคลื่อนเข้าสู่เส้นทางที่ต้องการได้อย่างราบเรียบ การคำนวณหาตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาได้โดยการคำนวณหาค่าระยะทางบนเส้นทางที่ต้องการ s_p ดังนั้นในการคำนวณจึงจำเป็นต้องคำนวณค่าเวคเตอร์ $\kappa\vec{N}$ และระยะ s_p ออกมาให้ได้ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วิธีป้อนกลับให้เป็นเชิงเส้น (Feedback Linearization) ดังแผนภูมิการควบคุมในรูปที่ 10



รูปที่ 8 แผนผังการควบคุม

8. การจำลองการเคลื่อนที่ของ Pantograph Cobot

ในส่วนนี้นำเสนอการจำลองผลการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับหุ่นยนต์ Pantograph Cobot ดังที่ได้นำเสนอไปแล้ว ในตัวอย่างนี้เรากำหนดให้เส้นทางที่เราต้องการให้โคบอทวิ่งเข้าหาคือเส้นวงกลมดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\vec{R}_p(t) = (A\cos t + d_1, A\sin t + d_2) \tag{1}$$

เมื่อ t คือเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่

เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ในหัวข้อที่แล้ว เส้นทางที่ต้องการนี้มีรวมผลของความเร็วเข้าไปด้วย ในการควบคุมจะไม่สามารถควบคุมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเวลาได้เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่จะกำหนดมาจากผู้ใช้งาน ดังนั้นการควบคุมจึงต้องทำให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของระยะทาง ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\vec{R}'_p = A\left(-\sin(t), \cos(t)\right)$$

$$s_p = \int_0^t \left\|\vec{R}'_p\right\| dt = \int_0^t A\,dt = At \tag{2}$$

$$t = \frac{s_p}{A} \tag{3}$$

แทนค่า t จะได้ว่า

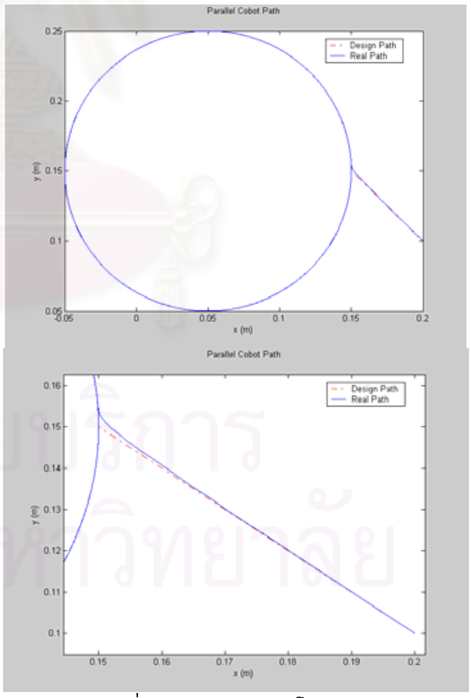
$$\vec{R}_p(s_p) = \left(A\cos\left(\frac{s_p}{A}\right) + d_1, A\sin\left(\frac{s_p}{A}\right) + d_2\right) \tag{4}$$

$$\vec{T}_p = \left(-\sin\left(\frac{s_p}{A}\right), \cos\left(\frac{s_p}{A}\right)\right) \tag{5}$$

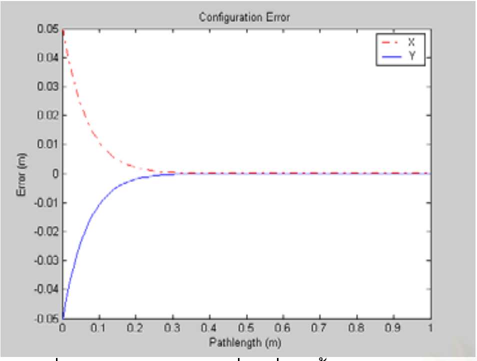
$$\kappa_p\vec{N}_p = \frac{1}{A}\left(-\cos\left(\frac{s_p}{A}\right), -\sin\left(\frac{s_p}{A}\right)\right) \tag{6}$$

ในการควบคุมกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของแขนกลคือความยาวของแขนกล L_1 และ L_2 รวมทั้งค่าระยะห่างระหว่างจอยท์ 1 และจอยท์ 2 คือค่า d เป็นไปตามการออกแบบจริงทั้งหมดคือ $L_1 = 0.25$ $L_2 = 0.3$ และ $d = 0.1$

เส้นทางเดินจำลองของหุ่นยนต์โคบอทได้แสดงไว้ในรูป 9 โคบอทเริ่มต้นที่ตำแหน่ง [0.2 0.1] จากนั้นโคบอทจึงเคลื่อนลู่เข้าหาเส้นวงกลมที่ตำแหน่งโดยประมาณที่จุด [0.15 0.15] ผลของค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกน x และ y เป็นไปดังรูปที่ 10 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดในแนวแกน x และ y ลดลงนั้นมีการตอบสนองลู่เข้าสู่ค่า 0 ได้เร็วและไม่มีค่าโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการออกแบบในการควบคุมนั่นเอง



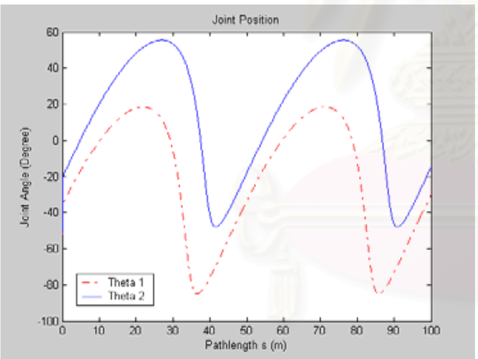
รูปที่ 9 เส้นทางเดินของโคบอทแบบขนาน 2 มิติ (ด้านล่างคือรูปขยาย)



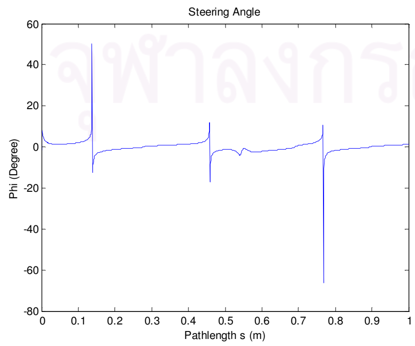
รูปที่ 10 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการควบคุมปลายแขนโคบอทแบบขนาน 2 มิติ

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทั้งในแนวแกน x และ y ค่าผิดพลาดในแนวแกน x เริ่มที่ 0.05 เมตรและเป็นค่าสูงสุด ค่าผิดพลาดในแนวแกน y เริ่มที่ -0.05 เมตรและมีขนาดสูงสุด ค่าผิดพลาดทั้ง 2 เข้าสู่ค่า 0 เมื่อเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางประมาณ 0.3 เมตร

ในรูปที่ 11 แสดงการเคลื่อนที่ของจอยท์แต่ละจอยท์ และรูปที่ 12 ได้แสดงมุมที่ซีวีทีที่ระบบใช้ปรับอัตราทดในที่นี้เพื่อความสะดวก เราได้กำหนดให้อัตราทดของซีวีทีทั้งสองชุดมีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 11 การเคลื่อนที่ของจอยท์ของโคบอทแบบขนาน 2 มิติแต่ละจอยท์



รูปที่ 12 มุมซีวีทีสำหรับโคบอทแบบขนาน 2 มิติ

9. สรุป

บทความนี้นำเสนอ การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ Pantograph Cobot หลักการในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการควบคุม นอกจากนี้ได้จำลองการเคลื่อนที่โดยใช้เส้นทางวงกลม ผลการจำลองแสดงถึงสอดคล้องกับการวิเคราะห์และการควบคุมการเคลื่อนที่

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphoprasit, W., "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on, Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544., 1996

[2] Moore, C., "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997

[3] Peshkin M. A. ,Colgate, J. E. and Gillespie, R. B. (2001). "A General Framework for Cobot Control", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, Aug. 2001, pp. 391-401

[4] Moore, C.A., Peshkin, M.A., Colgate, J.E. "A Three Revolute Cobot Using CVTs in Parallel", Proceeding of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, (1999)

[5] Wannasuphoprasit, W, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.

[6] Wannasuphoprasit, W. and Chanphat, S. "T-Cobot: Transformable collaborative robot", Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2005). Orlando, Florida, USA, 5-11 November 2005, code IMECE2005-82027, (2005)

[7] Wannasuphoprasit, W. and Cheepsumol, T. 2004. Parallel CVT mechanisms, Proceedings of the

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2004 JSAE Annual Congress. JSAE Annual Congress Proceedings No. 64-04, Pacific Convention Plaza, Yokohama, Japan, 18-21 May 2004, code 20045459.

[8] ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข และ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ “หุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่ใช้ CVT เกินจำนวน” Proceedings of 2006 Thai Robotics Society Conference

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20
18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา

แนวคิดในการควบคุมความเฉื่อยปรากฏสำหรับหุ่นยนต์โคบอทแบบแพนโทกราฟ
Control Concept of Apparent Inertia for Pantograph Cobot

ภาวิต สุวจิตตานนท์ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ *
ห้องปฏิบัติการ สหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889 E-mail: witaya.w@chula.ac.th

Parvit Suvachittanont, Witaya Wannasuphoprasit*
Human Robotics Laboratory
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Payathai Rd. Patumwan Bangkok Thailand 10330
Tel (66)2 218-6610-1, Fax (66)2 252-8889 E-mail: witaya.w@chula.ac.th
*Corresponding Author

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทแพนโทกราฟต้นแบบสองมิติ ซึ่งประกอบด้วย Spherical CVT จำนวนสองชุดที่ต่อกันแบบขนาน เรียกว่า Double CVTs โดยเพลาด้านขาออกของแต่และ CVTs เชื่อมกับข้อต่อแรกของแขนกล pantograph ทำให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ได้สองมิติในระนาบ นอกจากนี้ได้อธิบายหลักสำคัญการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการควบคุมของหุ่นยนต์ ศึกษาความสัมพันธ์ของความเฉื่อยปรากฏที่มีผลต่อหุ่นยนต์โคบอทต้นแบบสองมิติ และแนวคิดที่จะควบคุมความเฉื่อยปรากฏกับหุ่นยนต์โคบอทต้นแบบสองมิติ

Abstract

This paper presents the development of a 2-DOF Pantograph Cobot. The cobot consists of two Spherical CVTs connecting in parallel. Outputs of each CVT are connected to joints of a pantograph linkage. The end effector can move in two dimensional planar workspace. Here motion analysis, path control, and control concept of apparent inertia are presented.

1. ความเป็นมา

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอหุ่นยนต์โคบอทสองมิติ (2-DOF Cobot: :*Collaborative Robot*) ที่ใช้ Spherical CVT[2] ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรงบนพื้นที่การทำงานเดียวกันอย่างปลอดภัย โดยปกติหุ่นยนต์โคบอทเป็นอุปกรณ์ทางด้านหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมเป็นแพสซิฟ (Passive) ไม่มีต้นกำเนิดส่งกำลังสู่ระบบ หุ่นยนต์ใช้กำลังจากมนุษย์ในการเคลื่อนที่และทำหน้าที่เพียงกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์โคบอทชนิดขนานเคลื่อนที่ในสองมิติในรูปแบบของแขนกล pantograph อย่างไรก็ตามหุ่นยนต์ต้นแบบนี้ออกแบบให้สามารถเพิ่มกำลังแก่ระบบได้ แต่ยังไม่ขอกล่าวรายละเอียดในบทความนี้

2. แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์โคบอท

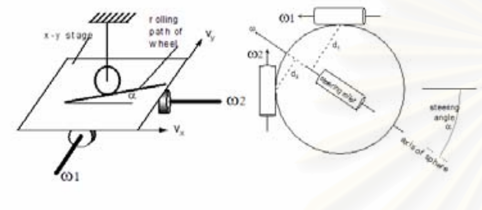
หุ่นยนต์โคบอทแตกต่างกับหุ่นยนต์หรืออุปกรณ์แฮปติค (Haptic Interface) ทั่วไปตรงที่หุ่นยนต์โคบอทจะไม่สร้างแรงปฏิกิริยาตรงมาบังคับการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานแต่จะทำเพียงเปลี่ยนทิศทางแรงของผู้ใช้งานเป็นหลักเท่านั้น ผู้ใช้งานจะเป็นผู้กำหนดการเคลื่อนที่เอง การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจึงเป็นการทำงานในระบบแพสซีฟ (Passive) ซึ่งปลอดภัยต่อผู้ใช้ในการทำงาน

หุ่นยนต์โคบอทไม่ใช้มอเตอร์หรืออุปกรณ์ต้นกำลัง (actuators) เพื่อส่งกำลังให้กับจอยท์ (joints) แต่หุ่นยนต์โคบอทจะใช้ซีวีที (CVTs : Continuous Variable Transmission) ในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของแต่ละจอยท์ ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทได้ อุปกรณ์ซีวีทีนี้จะสร้างสร้างข้อบังคับแบบนอนโฮโลโนมิค (nonholonomic constraints) ให้กับหุ่นยนต์โคบอทโดยที่ว่าไม่ว่าหุ่นยนต์โคบอทจะมีจำนวนมิติการทำงาน (task space) เท่าไรก็ตาม การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทจะมีเพียง 1 องศาอิสระ (Degree of Freedom) เท่านั้นซึ่งคือในทิศทางการเคลื่อนที่นั่นเอง การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจะมีการทำงาน 2 ลักษณะคือ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทำงานแบบอิสระ (Virtual Caster) การทำงานในลักษณะนี้ ผู้ใช้จะรู้สึกเหมือนกับสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หุ่นยนต์โคบอทจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ และ 2) การทำงานแบบบังคับ (Virtual Wall) ซึ่งจะบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของมนุษย์ พิจารณาตัวอย่างในการสร้างกำแพงเสมือน เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่เข้าหากำแพงเสมือน ผู้ใช้จะไม่สามารถเคลื่อนหุ่นยนต์โคบอทให้ทะลุกำแพงได้ แต่จะไถลไปตามกำแพง และถ้าเคลื่อนออกจากกำแพงหุ่นยนต์โคบอทจะกลับไปทำงานในแบบอิสระ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในบทความ [7]

3. Spherical CVT



รูปที่ 1 หลักการของ Spherical CVT [1]

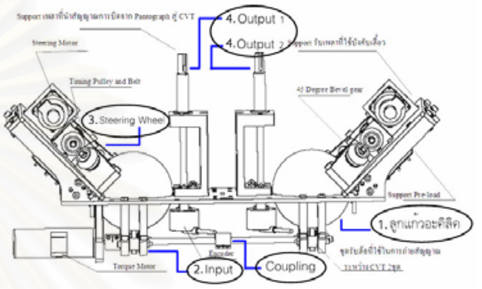
พิจารณารูปที่ 1 (ซ้าย) ถ้านำเอาล้อ [5,6] มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ V_y และ V_x จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม α (steering angle) ของล้อโดยที่ $V_y / V_x = \tan(\alpha)$ ในขณะเดียวกันถ้าใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น V_x และ V_y ให้เป็นความเร็วเชิงมุม w_1 และ w_2 ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ ถ้าม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูปที่ 1 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของ steering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle (α) แกนของ steering rollers (ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับ wheel ในรูปซ้าย) ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ d_1 และ d_2 (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ w_1 และ ล้อขับ w_2) เปลี่ยนไป มีผลทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด w_1/w_2 เท่ากับ d_1 / d_2 เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ ดังรูปที่ 2 Moore [2] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด1.5นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะและเรียกว่า Tetrahedral CVT

รูปที่ 2 Tetrahedral CVT [2]

4. แนวคิดในการออกแบบของ Pantograph Cobot

Cheepsumol และคณะ [7] ได้พัฒนาและออกแบบหุ่นยนต์โคบอทสองมิติโดยใช้ Spherical CVT จำนวนสองชุดต่อแบบขนานกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณ ออกแบบ และสร้างชุด อุปกรณ์ CVT ที่ใช้หลักการเดียวกันกับ Tetrahedral CVT ขึ้นมา 2 ชุด ในแต่ละชุดของ CVT จะมีเพลาอินพุตและเพลาเอาท์พุต อัตราทดของเพลาทั้งสองปรับได้ด้วย steering wheel.

ในการออกแบบนี้เชื่อมเพลากลางเอาท์พุตของ CVT ชุดที่หนึ่งเข้ากับเพลากลางอินพุตของ CVT ชุดที่สอง เพื่อการส่งถ่ายกำลังเข้าด้วยกันเราเรียกว่า Double CVT



รูปที่ 3 รายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT

ชุดอุปกรณ์หลักๆของ Double CVT คือ

1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วจำนวนสองลูกที่มีความกลมเที่ยงตรงสูง
2. ชุด Input ที่ประกอบด้วย Torque motor ขับที่เพลากลาง ใช้สำหรับส่งกำลังให้กับ Double CVT และล้อยูลิเทนสำหรับใช้หมุนลูกแก้วอะคิลิค
3. ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทด (Steering Wheel) ที่ประกอบด้วย Steering motor ที่ใช้สำหรับปรับมุมของล้อปรับอัตราทด และล้อยูลิเทนสำหรับปรับแกนหมุนของลูกแก้วอะคิลิค
4. ชุด Output ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ชุด ประกอบด้วยล้อยูลิเทนสำหรับรับถ่ายกำลังจากลูกแก้วอะคิลิค และเพลา Output สำหรับ ต่ออุปกรณ์นำอัตราทดที่ส่งออกจาก Double CVT ไปใช้งาน

แต่ละข้างของ Double CVT สามารถทำงานร่วมกันหรือแยกกันอย่างอิสระได้โดยปลดตัว Coupling ที่ต่ออยู่ที่ชุด Input ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3 ส่วนชุด Steering Wheel นั้นทั้งสองข้างใช้ motor ควบคุมอิสระต่อกัน เพียงสั่งการให้ motor หมุนไปเป็นมุมที่เท่ากันหรือต่างกัน ก็จะสามารถกำหนดให้ Output ทั้งสองข้างของ CVT มีอัตราทดที่เท่ากันหรือต่างกันตามต้องการ ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT นี้ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยแผ่นฐาน (Base) นั้นทำมาจาก Stainless Steel เพื่อความแข็งแรง เพลาต่างๆที่ใช้ ทำมาจาก เหล็กกล้า ส่วนประกอบขึ้นรูปอื่นๆใช้ อลูมินัมเป็นวัสดุหลัก ลูกแก้วที่ใช้ทำมาจากอะคิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และลูกล้อใช้ยูลิเทนความแข็ง CHA90 หล่อลงบนแกนล้อที่ทำจากเหล็ก ต้นแบบของ Double CVT แสดงในรูปที่ 4

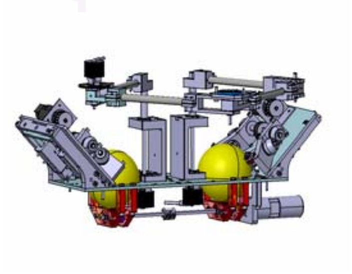
รูปที่ 4 รูปต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็วแบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double CVT

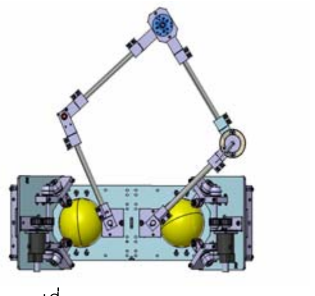
หลักการทำงานอันหนึ่งของ Double CVT คือการให้ Input จาก Torque motor ไปที่เพลากลาง เพื่อส่งกำลังให้ลูกทรงกลมอะคิกลิกทั้งสองลูกในเวลาเดียวกัน แล้วกำหนดอัตราทดของแต่ CVT ละโดยปรับมุมของชุดบังคับเลี้ยว (Steering wheel) ไปเป็นมุม (α) ต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วที่ออกทาง Output1 และ Output2 ดังนั้นจึงสามารถกำหนดอัตราส่วนการทดรอบระหว่าง Input กับ Output1 และกับ Output2 ในกรณีนี้อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เสมือนกับอุปกรณ์ส่งกำลังแบบปรับความเร็วสองแกน (Output สองแกน) ที่ปรับได้อย่างต่อเนื่องและอิสระโดยมีแกน Input ร่วมกันอันเดียว

5. Pantograph Cobot

รูปแบบทำงานที่สำคัญอีกลักษณะหนึ่งซึ่งนำมาใช้กับหลักการของหุ่นยนต์โคบอท โดยเพลากลางมิได้ทำหน้าที่รับ Input แต่จะทำหน้าที่แค่เชื่อมต่อ CVT ทั้งสองชุด ในกรณีนี้จะต่อกลไกแขนกล Pantograph เข้ากับแกนเพลา Output1 และ Output2 ของ Double CVT ทิศทางของแขนกลจะถูกควมคุมด้วยอัตราส่วนความเร็วของ Output1 และกับ Output2 ซึ่งเกิดจากการการควบคุมอัตราทดของ CVT ทั้งสอง เมื่อเรานำเอา Five bar linkage มาต่อกับทางด้าน output ของชุด CVT ทั้งสองก็จะได้เป็น หุ่นยนต์โคบอทในรูปแบบ Pantograph Cobot ดังในรูปที่ 5

ปลายแขนของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ได้ในระนาบ X-Y โดยเราจะควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนจากการปรับมุมอัตราทดของ CVT ในขณะทำงานร่วมกับมนุษย์ ผู้ใช้จะออกแรงขับเคลื่อนที่ปลายแขนแต่ทิศทางการเคลื่อนที่จะเป็นตามอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ Output1 กับ Output2 ซึ่งระบบเป็นผู้ควบคุม ในระหว่างการเคลื่อนที่ระบบควบคุมปรับมุมอัตราทดเป็นค่าต่างๆ เพื่อบังคับทิศทางให้แขนกลตามเส้นทางที่โปรแกรมไว้ รูปที่ 5 ได้แสดงหุ่นยนต์แขนกล Pantograph Cobot





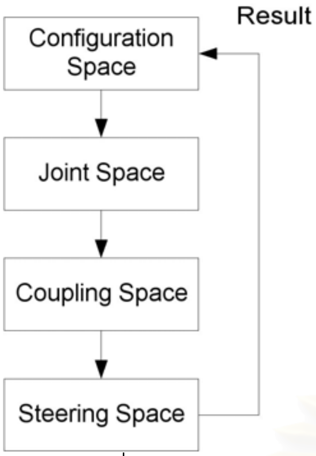
รูปที่ 5 Pantograph Cobot

6. หลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนาน

การทำงานของโคบอทนั้นจะไม่ใช่การบังคับอุปกรณ์ต้นกำลังเพื่อให้เกิดการทำงานโดยตรง แต่จะบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขน ดังนั้นนอกจากต้องหาจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและย้อนกลับของแขนกลดังเช่นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั่วไปต้องวิเคราะห์จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทซึ่งไม่ได้ใช้เวลาแต่ใช้ระยะตำแหน่ง (pathlength) เป็นตัวแปร การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโคบอทนั้นจะไม่วิเคราะห์เพียงแค่ตำแหน่ง แต่จะเป็นการวิเคราะห์ในมิติการเคลื่อนที่อื่นๆด้วยได้แก่ ความเร็วทั้งขนาดและทิศทาง ความโค้งเวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ และระยะทางที่โคบอทเคลื่อนที่ไป การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการแปลงกรอบการทำงานของโคบอท

กรอบการเคลื่อนที่ของหุ่ยบนต์โคบอทโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 4 ประเภทด้วยกัน [3,5] คือ ปริภูมิตำแหน่งปลาย (Configuration Space : C_T) บอกถึงการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายของโคบอท ปริภูมิจอยท์ (Joint Space : C_j) บอกถึงการเคลื่อนที่ของข้อต่อของโคบอท ปริภูมิการจับคู่ (Coupling Space : $\sum_i$) บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อซึ่งสร้างความสัมพันธ์กันโดยผ่านกลไกของซีวีทีและ ปริภูมิของมุมปรับอัตราทด (Steering Space : Φ) บอกถึงมุมที่ซีวีทีต้องหมุนปรับไปซึ่งก็คือค่าสัญญาณที่เราต้องควบคุม ลำดับการแปลงรูปจะเริ่มต้นจากการหาการเคลื่อนที่ในปริภูมิตำแหน่งปลาย จากนั้นแปลงไปเป็นการเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์ จากนั้นทำการจับคู่การเคลื่อนที่ในปริภูมิจอยท์ทีละคู่ทุกคู่ซึ่งก็จะได้เป็นการเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่เมื่อได้การเคลื่อนที่ในปริภูมิการจับคู่แล้วก็สามารถทำการคำนวณมุมที่ซีวีทีต้องหมุนปรับไปซึ่งก็คือปริภูมิของมุมปรับอัตราทดนั่นเอง ลำดับการแปลงรูปเป็นดังรูปที่ 6

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

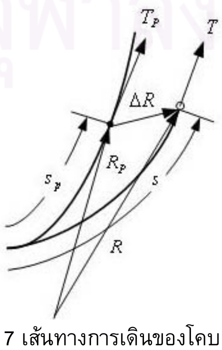


รูปที่ 6 แผนผังการเปลี่ยนกรอบการทำงานของโคบอท

7. การควบคุม Pantograph

การควบคุมโคบอทนั้นแตกต่างจากการควบคุมหุ่นยนต์ทั่วไป กล่าวคือนอกจากจะต้องทำการควบคุมตำแหน่งแล้ว ยังต้องควบคุมให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของโคบอทไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ ณ ตำแหน่งที่กำหนดอีกด้วย ดังนั้นตัวแปรต้นเป็นระยะตำแหน่งของโคบอท การควบคุมโคบอทจะใช้วิธีการควบคุมแบบให้เคลื่อนตามเส้นทาง (Path Following Control) คือการกำหนดเส้นทางที่ต้องการในโปรแกรม แล้วจึงควบคุมทิศทางให้โคบอทวิ่งเข้าสู่เส้นทางนั้น โดยใช้พื้นฐานของวิธีการป้อนกลับให้เป็นเชิงเส้น (Feedback Linearization) และการแปลงการเคลื่อนที่ (Curvature Transformation) [3,5] ดังจะได้อธิบายโดยย่อต่อไป

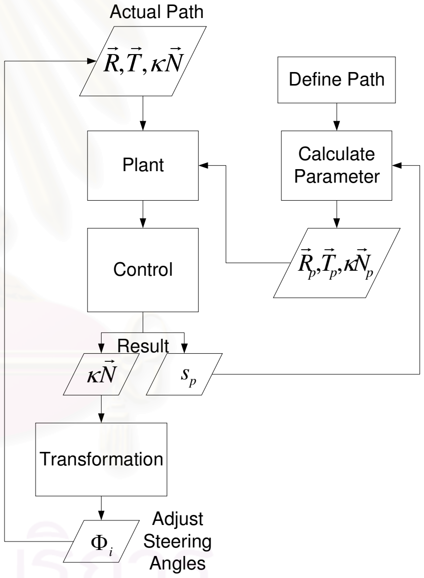
กำหนดให้เส้นทางที่โคบอทต้องเดินไปคือ S_p โดยที่ตำแหน่งของโคบอทจริงเดินอยู่บนเส้นทาง S ดังรูปที่ 7 วิธีการควบคุมทางเดินของโคบอทก็คือต้องปรับทิศทางการเดินของโคบอทจริงให้หันเข้าหาเส้นทางที่ต้องการ และเมื่อโคบอทวิ่งเข้าสู่เส้นทางที่ต้องการแล้วจึงทำการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามเส้นทางที่ต้องการ วิธีการดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับให้เวคเตอร์ $\vec{T}$ มีทิศทางพุ่งเข้าหา S_p จากนั้นเมื่อโคบอทเคลื่อนที่อยู่บน S_p แล้ว ก็ทำการปรับเวคเตอร์ $\vec{T}$ ให้เป็นไปตามเวคเตอร์ $\vec{T}_p$ ก็จะทำให้โคบอทเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ต้องการโดยการปรับค่าเกณฑ์ป้อนกลับ



รูปที่ 7 เส้นทางการเดินของโคบอท

การปรับทิศทางของเวคเตอร์ $\vec{T}$ ในทางปฏิบัติก็สามารถทำได้โดยการปรับอัตราทดของซีวีทีโดยการแปลงรูประหว่างปริภูมิตำแหน่งปลายและปริภูมิของค่ามุมปรับอัตราทด ค่ามุมปรับอัตราทดทำให้ได้ค่าเวคเตอร์ $\vec{T}$ ที่ต้องการ จุดประสงค์หลักในการควบคุมก็คือการคำนวณหาค่าเวคเตอร์ $\vec{T}$ ออกมานั่นเอง แต่เพื่อให้การควบคุมมีความราบเรียบในลำดับของอนุกรม จึงต้องคำนวณหาค่าอนุพันธ์ของค่าเวคเตอร์ $\vec{T}$ ออกมาด้วยซึ่งก็คือค่าเวคเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ $\kappa\vec{N}$ (Curvature Vector) นั่นเอง นอกจากการคำนวณหาค่าเวคเตอร์ $\kappa\vec{N}$ แล้วก็ควรจะต้องคำนวณหาตำแหน่งบนเส้นทางที่ต้องการที่จะให้โคบอทเคลื่อนที่เข้าหาด้วยเพื่อให้โคบอทสามารถเคลื่อนเข้าสู่เส้นทางที่ต้องการได้อย่างราบเรียบ การคำนวณหาตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาได้โดยการคำนวณหาค่าระยะทางบนเส้นทางที่ต้องการ s_p

ดังนั้นในการคำนวณจึงจำเป็นต้องคำนวณค่าเวคเตอร์ $\kappa\vec{N}$ และระยะ s_p ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วิธีป้อนกลับให้เป็นเชิงเส้น (Feedback Linearization) ดังแผนภูมิการควบคุมในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนผังการควบคุม [4]

รายละเอียดและผลการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ pantograph โคบอท ที่ใช้โครงสร้างการควบคุมดังกล่าวนี้อยู่ในบทความ [11]

8. ความเฉื่อย (Inertia)

เป้าหมายอีกประการของงานวิจัยนี้คือการศึกษาความเฉื่อยของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเฉื่อยที่ปรากฏในขณะที่มนุษย์เคลื่อนปลายแขนองหุ่นยนต์ ความเฉื่อยคือคุณสมบัติของสสารที่พยายามต้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น[7] หมายความว่า ในวัตถุใดๆ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่วัตถุจะออกแรงต้านการเคลื่อนที่

8.1 แรงเฉื่อยและแรงบิดเฉื่อย(Inertia force and Inertia torque)

เมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบ Plane Motion [9,10] แล้วจะได้สมการของการเคลื่อนที่ดังนี้

$$\sum F = mA_G \tag{1}$$

$$\sum M_G = I_G \alpha \tag{2}$$

โดยที่ $\sum F$ คือผลรวมของแรงกระทำจากภายนอกวัตถุทั้งหมดที่กระทำกับวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่

M คือมวลของวัตถุ

A_G คือความเร่งของจุด G ซึ่งเป็นจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ

$\sum M_G$ คือผลรวมของโมเมนต์ของแรงกระทำจากภายนอกวัตถุทั้งหมดรอบแกนที่ผ่าน จุด G ซึ่งจะตั้งฉากกับระนาบของการเคลื่อนที่ของวัตถุ

I_G คือ Mass Moment of Inertia ของวัตถุรอบแกนที่ผ่านจุด G

α คือความเร่งเชิงมุมของวัตถุ

8.2 ความเฉื่อยกับหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

วัตถุเมื่อเกิดการเคลื่อนที่จะเกิดความเฉื่อยของวัตถุ หุ่นยนต์โคบอทเมื่อเคลื่อนที่ในพื้นที่การทำงาน (Work Space) จะเกิดความเฉื่อยปรากฏขึ้น ซึ่งความเฉื่อยที่ปรากฏขึ้นในแต่ละตำแหน่งในพื้นที่การทำงานนั้นไม่เท่ากัน เนื่องจากโครงสร้างของโคบอทเองซึ่งมาจากทั้งความเฉื่อยจากแขนของโคบอท และชุด CVT ของโคบอทด้วย

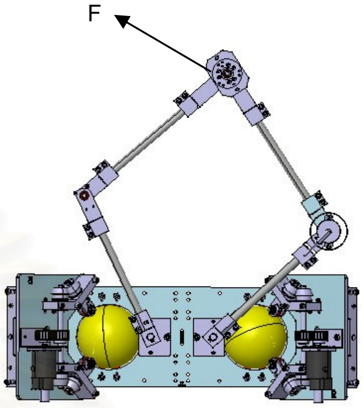
ผลกระทบจากความเฉื่อยปรากฏที่ไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่การทำงานมีผลให้มนุษย์ที่ออกแรงที่ปลายแขนรู้สึกว่าการต้านการเคลื่อนที่ของโคบอทในแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่เท่ากัน เช่นบางตำแหน่งรู้สึกหนักและบางตำแหน่งเบากว่า

ประเด็นหนึ่งที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือทำการศึกษาความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นจากหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ และทำการออกแบบระบบควบคุมให้ความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันทั้งหมดในพื้นที่การทำงาน ทำให้คนที่ออกแรงที่ปลายแขนไม่รู้สึกถึงความแตกต่างของความเฉื่อยเมื่อเคลื่อนที่ในพื้นที่การทำงานในแต่ละตำแหน่ง

อีกประเด็นหนึ่งของการศึกษาความเฉื่อยปรากฏของอุปกรณ์ เราสามารถควาคุมความเฉื่อยปรากฏนี้มาใช้ในการจำลองน้ำหนักเสมือนของวัตถุได้ในสถานะการณ์ต่างๆกันได้โดยการควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทในขณะที่ทำงานร่วมกับมนุษย์

8.3 แนวคิดในการควบคุมความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติ

หุ่นยนต์โคบอทแบบขนานสองมิติที่ใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องชนิดทรงกลมนี้ จะกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนโดยการปรับอัตราทดของ CVT ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุด CVT 2 ชุด ซึ่งสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอท (ตามปกติแล้วนี้ใช้ชุด CVT เพียงชุดเดียวก็สามารถให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปในพื้นที่การทำงานได้แต่จะไม่สามารถทำการควบคุมความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นได้) ดังนั้นการที่ใช้ CVT สองชุดโดยทำการกำหนดการปรับอัตราทดของ CVT ทั้งสองให้มีค่าที่เหมาะสมก็จะสามารถควบคุมความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นได้ และถ้าต้องการสามารถเพิ่มกำลังแก่ระบบเพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 9 แสดงการเคลื่อนที่ของปลายแขน

พิจารณาจากรูปในขณะที่มนุษย์ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์โคบอท ชุด CVT ของโคบอทจะทำหน้าที่กำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ ส่วนแรงที่ทำให้ปลายแขนเคลื่อนที่นั้นมนุษย์ส่งแรงเข้าไปให้เกิดการเคลื่อนที่ตามสมการ

$$F = I(C_j, r_1, r_2)a \tag{3}$$

โดยที่ I คือความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นของโคบอท ซึ่งค่าความเฉื่อยนี้จะเปลี่ยนไปตาม โครงสร้าง (Configuration) ของโคบอท ซึ่งค่า I นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ตามฟังก์ชั่น $I(C_J, r_1, r_2)$ โดยที่ C_J คือ Joint Space ของ โคบอท

r_1 คือ อัตราทดระหว่างความเร็วของ จอยท์ 1 และ ความเร็วของเพลากลาง ซึ่งก็คือ อัตราทดของ CVT1 ที่ปรับได้

r_2 คือ อัตราทดระหว่างความเร็วของเพลากลาง และความเร็วของ จอยท์ 2 ซึ่งก็คือ อัตราทดของ CVT2 ที่ปรับได้

โดยที่ $$R = r_1 \times r_2 \tag{4}$$

R คืออัตราทดรวมของระบบซึ่งก็คืออัตราทดระหว่างOutput1 และOutput2 (ดูในรูปที่ 3)

ค่าความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นของแขนกลเองเป็นฟังก์ชันของตัวแปรตามที่ได้กล่าวไปแล้ว คือ C_J ได้แก่ θ_1 θ_2 θ_3 θ_4 ตัวแปรจอยซ์ของแขนโคบอท ซึ่งค่ามุมต่างๆ จะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของปลายแขนโคบอท และเปลี่ยนไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้ออกแบบเอาไว้ ค่าความเฉื่อยปรากฏของแขนกลสามารถคำณวนได้ แต่ไม่สามารถควบคุมความเฉื่อยปรากฏให้เป็นไปตามค่าที่ต้องการให้ อย่างไรก็ตามความเฉื่อยปรากฏของทั้งระบบขึ้นอยู่กับอัตราทดของ CVT ทั้งสองด้วย

ดังนั้นเราสามารถควบคุมความเฉื่อยปรากฏของทั้งระบบได้ โดยการปรับมุมอัตราทดของ CVT ทั้งสองด้วยค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ความเฉื่อยปรากฏที่เกิดขึ้นมีค่าตามที่เราต้องการ ในการปรับค่า r_1 และ r_2 นั้นเราจะปรับค่าไปตามที่เราได้ออกแบบเอาไว้ให้สัมพันธ์กัน โดยที่ค่าอัตราทดรวมของระบบ (R) ไม่เปลี่ยนไปเพื่อให้โคบอทเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ออกแบบเอาไว้

9. สรุป และงานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์ Pantograph Cobot สองมิติที่ใช้ Spherical CVTจำนวนสองชุด โดยนำเสนอหลักการในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการควบคุม นอกจากนี้ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเฉื่อยกับหุ่นยนต์ และแนวคิดที่จะนำความเฉื่อยปรากฏ มาใช้ควบคุมหุ่นยนต์โคบอท

งานวิจัยที่กำลังดำเนินอยู่นี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ความเฉื่อยปรากฏ ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทสองมิติ ซึ่งจะทำการหาความสัมพันธ์ของความเฉื่อย กับค่าตัวแปรต่างๆ ตามฟังก์ชั่น $I(C_J, r_1, r_2)$ รวมทั้งการหาสมการพลศาสตร์ของระบบ เมื่อหาความสัมพันธ์ของความเฉื่อยปรากฏกับค่าตัวแปรต่างๆได้แล้ว เราก็สามารถที่จะนำสมการหรือความสัมพันธ์นี้มาใช้ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ โดยจะนำมาร่วมกับการจำลองเคลื่อนที่ในคอมพิวเตอร์ที่ดำเนินการล่วงหน้าแล้ว และทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้และปรับปรุงประเด็นด้านต่างๆ

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphoprasit, W., “Nonholonomic Haptic Display,” IEEE International Conference on, Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544., 1996

[2] Moore, C., “Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures”, Master’s thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997

[3] Peshkin M. A. ,Colgate, J. E. and Gillespie, R. B. (2001). “A General Framework for Cobot Control”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, Aug. 2001, pp. 391-401

[4] Moore, C.A., Peshkin, M.A., Colgate, J.E. “A Three Revolute Cobot Using CVTs in Parallel”, Proceeding of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, (1999)

[5] Wannasuphoprasit, W, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, “Cobot Control”, Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.

[6] Wannasuphoprasit, W. and Chanphat, S. “T-Cobot: Transformable collaborative robot”, Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2005). Orlando, Florida, USA, 5-11 November 2005, code IMECE2005-82027, (2005)

[7] Wannasuphoprasit, W. and Cheepsumol, T. 2004. Parallel CVT mechanisms, Proceedings of the 2004 JSAE Annual Congress. JSAE Annual Congress Proceedings No. 64-04, Pacific Convention Plaza, Yokohama, Japan, 18-21 May 2004, code 20045459.

[8] ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข และ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ “หุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่ใช้ CVT เกินจำนวน” Proceedings of 2006 TRS Conference on Robotics and Industrial Technology

[9] ดร.อิทธิพล ปานงาม ประเสริฐ เสริมศรีสุวรรณ ,กลศาสตร์เครื่องจักรกล

[10] Saeed B. Niku “Introduction to Rebotics Analysis, System, Application” Prentice Hall Upper Saddle River, NJ 07458

[11] ภาวิต สุวจิตตานนท์ และ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ “การจำลองเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Pantograph Cobot” Proceedings of 2006 TRS Conference on Robotics and Industrial Technology

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

การหาสมการความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์ Pantograph Cobot

Equation of Appearance Inertia of Pantograph Cobot

ภาวิต สุวจิตตานนท์ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์*
ห้องปฏิบัติการ สหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889 E-mail: witaya.w@chula.ac.th
*Corresponding Author

Parvit Suvachittanont, Witaya Wannasuphoprasit
Human Robotics Laboratory
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Payathai Rd. Patumwan Bangkok Thailand 10330
Tel (66)2 218-6610-1, Fax (66)2 252-8889 E-mail: witaya.w@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทต้นแบบสองมิติและวิธีการหาสมการของความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอทต้นแบบสองมิติ หุ่นยนต์นี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือส่วนแรกเรียกว่า Double CVT สร้างจากข้อต่อแบบ Spherical CVT จำนวนสองชุดที่ต่อกันแบบขนาน ส่วนที่สองเป็นแขนกล pantograph เมื่อติดตั้งบน Double CVT ปลายแขนจะเคลื่อนที่ได้สองมิติในระนาบ หุ่นยนต์โคบอททำงานร่วมกับมนุษย์ดังนั้นมนุษย์จะรับรู้ถึงความเฉื่อยที่ปลายแขนหุ่นยนต์ เพื่อศึกษาและควบคุมความเฉื่อยปรากฏจึงจำเป็นต้องหาสมการพลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ แต่เนื่องจากเป็นแขนกลแบบขนานดังนั้นในการหาสมการความเฉื่อยปรากฏนั้นจะใช้วิธีลากรานฟอมูเลชั่น (Lagrangian Formulation)

Abstract

This paper presents the development of a 2-DOF Cobot and also describes equations of appearance inertia of a 2-DOF Cobot. The cobot's mechanism consists of two parts. The first part is called Double CVT which made from two Spherical CVTs connected in parallel. The second part is a pantograph manipulator. When installing the pantograph manipulator on Double CVT, the end effectors can move in x-y horizontal plane. Since the Cobot works directly with human operator, he/she will sense different inertia in different configurations. In order to control the apparent inertia, we derive dynamics equation of the patograph using Lagrangian Formulation.

1. บทนำ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำ Spherical CVT[1] มาใช้ในงานทางด้านหุ่นยนต์โคบอท (Cobot: :*Collaborative Robot*) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรงบนพื้นที่การทำงานเดียวกันอย่างปลอดภัย หุ่นยนต์โคบอทเป็นอุปกรณ์ทางด้านหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมเป็นแพสซิฟ (Passive) ไม่มีต้นกำเนิดส่งกำลังสู่ระบบ อาศัยกำลังจากมนุษย์ในการเคลื่อนที่ โคบอทเพียงทำหน้าที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ไปพร้อมกันในพื้นที่การทำงานเดียวกัน หุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์โคบอทชนิดขนานเคลื่อนที่ในสองมิติในรูปแบบของแขนกล pantograph ซึ่งเคลื่อนที่ในระนาบสองมิติ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธีการของแขนกลแบบอนุกรมทั่วไปในการหาสมการพลศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของลากรานฟอมูเลชั่นที่จัดรูปแบบให้ตัวคูณลากราน

2. แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอทถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ในพื้นที่ทำงาน(workspace)เดียวกัน หุ่นยนต์โคบอทแตกต่างกับหุ่นยนต์หรืออุปกรณ์แฮปติคอินเทอร์เฟซ (Haptic Interface) ทั่วไปตรงที่หุ่นยนต์โคบอทจะไม่สร้างแรงปฏิกิริยาตรงมาบังคับการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานแต่จะทำเพียงเปลี่ยนทิศทางแรงของผู้ใช้งานเป็นหลักเท่านั้น

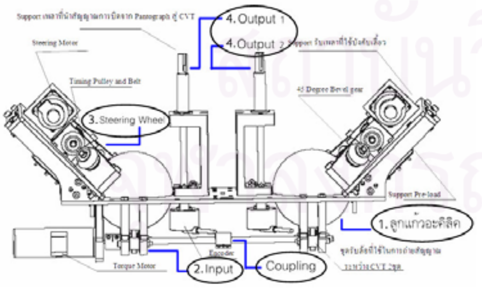
ผู้ใช้งานจะเป็นผู้กำหนดการเคลื่อนที่เอง การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจึงเป็นการทำงานในระบบแพสซีฟ (Passive) ซึ่งปลอดภัยต่อผู้ใช้ในการทำงาน

หุ่นยนต์โคบอทไม่ใช้มอเตอร์หรืออุปกรณ์ต้นกำลัง (actuators) เพื่อส่งกำลังให้กับข้อต่อ (joints) แต่หุ่นยนต์โคบอทจะใช้ซีวีที (CVTs : Continuous Variable Transmission) ในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของแต่ละข้อต่อ ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทได้ อุปกรณ์ซีวีทีนี้จะสร้างสร้างข้อบังคับแบบนอนโฮโลโนมิค (nonholonomic constraints) ให้กับหุ่นยนต์โคบอทโดยที่ว่าไม่ว่าหุ่นยนต์โคบอทจะมีจำนวนมิติการทำงาน (task space) เท่าไรก็ตาม การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทจะมีเพียง 1 องศาอิสระ (Degree of Freedom) เท่านั้น การทำงานของ หุ่นยนต์โคบอทจะมีการทำงาน 2 ลักษณะคือ 1) การทำงานแบบอิสระ (Virtual Caster) การทำงานในลักษณะนี้ ผู้ใช้จะรู้สึกเหมือนกับสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หุ่นยนต์โคบอทจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ และ 2) การทำงานแบบบังคับ (Virtual Wall) ซึ่งจะบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของมนุษย์ พิจารณาตัวอย่างในการสร้างกำแพงเสมือน เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่เข้าหากำแพงเสมือน ผู้ใช้จะไม่สามารถเคลื่อนหุ่นยนต์โคบอทให้ทะลุกำแพงได้ แต่จะไถลไปตามกำแพง และถ้าเคลื่อนออกจากกำแพงหุ่นยนต์โคบอทจะกลับไปทำงานในแบบอิสระ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในบทความ [4]

3. แนวคิดในการออกแบบของ Pantograph Cobot

Cheepsumol และคณะ [4] ได้พัฒนาและออกแบบหุ่นยนต์โคบอทสองมิติโดยใช้ Spherical CVT จำนวนสองชุดต่อแบบขนานกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณ ออกแบบ และสร้างชุด อุปกรณ์ CVT ที่ได้ใช้หลักการเดียวกันกับ Tetrahedral CVT ขึ้นมา 2 ชุด ในแต่ละชุดของ CVT จะมีเพลาอินพุตและเพลาเอาท์พุต อัตราทดของเพลาทั้งสองปรับได้ด้วย steering wheel.

ในการออกแบบนี้เชื่อมเพลากลางเอาท์พุตของ CVT ชุดที่หนึ่งเข้ากับเพลากลางอินพุตของ CVT ชุดที่สอง เพื่อการส่งถ่ายกำลังเข้าด้วยกันเราเรียกว่า Double CVT



รูปที่ 1 รายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT

ชุดอุปกรณ์หลักๆของ Double CVT คือ

1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วจำนวนสองลูกที่มีความกลมเที่ยงตรงสูง
2. ชุด Input ที่ประกอบด้วย Torque motor ขับที่เพลากลาง ใช้สำหรับส่งกำลังให้กับ Double CVT และล้อยูลิเทนสำหรับใช้หมุนลูกแก้วอะคิลิค
3. ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทด (Steering Wheel) ที่ประกอบด้วย Steering motor ที่ใช้สำหรับปรับมุมของล้อปรับอัตราทด และล้อยูลิเทนสำหรับปรับแกนหมุนของลูกแก้วอะคิลิค
4. ชุด Output ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ชุด ประกอบด้วยล้อยูลิเทนสำหรับรับถ่ายกำลังจากลูกแก้วอะคิลิค และเพลา Output สำหรับ ต่ออุปกรณ์นำอัตราทดที่ส่งออกจาก Double CVT ไปใช้งาน

แต่ละข้างของ Double CVT สามารถทำงานร่วมกันหรือแยกกันอย่างอิสระได้โดยปลดตัว Coupling ที่ต่ออยู่ที่ชุด Input ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3 ส่วนชุด Steering Wheel นั้นทั้งสองข้างใช้ motor ควบคุมอิสระต่อกัน เพียงสั่งการให้ motor หมุนไปเป็นมุมที่เท่ากันหรือต่างกัน ก็จะสามารถกำหนดให้ Output ทั้งสองข้างของ CVT มีอัตราทดที่เท่ากันหรือต่างกันตามต้องการ ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ Double CVT นี้ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยแผ่นฐาน (Base) นั้นทำมาจาก Stainless Steel เพื่อความแข็งแรง เพลาต่างๆที่ใช้ ทำมาจาก เหล็กกล้า ส่วนประกอบขึ้นรูปอื่นๆใช้ อลูมินัมเป็นวัสดุหลัก ลูกแก้วที่ใช้ทำมาจากอะคิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และลูกล้อใช้ยูลิเทนความแข็ง CHA90 หล่อลงบนแกนล้อที่ทำจากเหล็ก ต้นแบบของ Double CVT แสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 รูปต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็วแบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double CVT

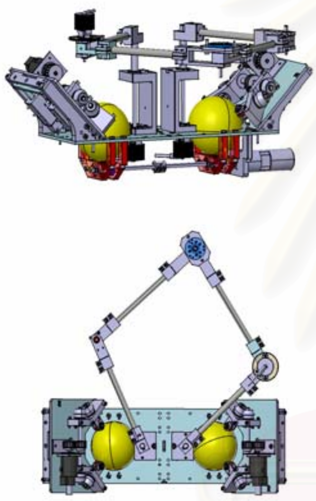
หลักการทำงานอันหนึ่งของ Double CVT คือการให้ Input จาก Torque motor ไปที่เพลากลาง เพื่อส่งกำลังให้ลูกทรงกลมอะคิลิคทั้งสองลูกในเวลาเดียวกัน แล้วกำหนดอัตราทดของแต่ CVT ละโดยปรับมุมของชุดบังคับเลี้ยว (Steering wheel) ไปเป็นมุม (α) ต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วที่ออกทาง Output1 และ Output2 ดังนั้นจึงสามารถกำหนดอัตราส่วนการทดรอบระหว่าง Input กับ Output1 และกับ Output2 ในกรณีนี้อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เสมือนกับอุปกรณ์ส่งกำลังแบบปรับความเร็วสองแกน (Output สองแกน) ที่ปรับได้อย่างต่อเนื่องและอิสระโดยมีแกน Input ร่วมกันอันเดียว

4. Pantograph Cobot

รูปแบบทำงานที่สำคัญอีกลักษณะหนึ่งซึ่งนำมาใช้กับหลักการของหุ่นยนต์โคบอท โดยเพลากลางมิได้ทำหน้าที่รับ Input แต่จะทำหน้าที่แค่เชื่อมต่อ CVT ทั้งสองชุด ในกรณีนี้จะต่อกลไกแขนกลเข้ากับ

แกนเพลา Output1 และ Output2 ของ Double CVT ทิศทางของแขนกลจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนความเร็วของ Output1 และกับ Output2 ซึ่งเกิดจากการการควบคุมอัตราทดของ CVT ทั้งสอง เมื่อเรานำเอา Five bar linkage มาต่อกับทางด้าน output ของชุด CVT ทั้งสองก็จะได้เป็น หุ่นยนต์โคบอทในรูปแบบ Pantograph Cobot ดังในรูปที่ 3

ปลายแขนของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ได้ในระนาบ X-Y โดยเราจะควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนจากการปรับมุมอัตราทดของ CVT ในขณะทำงานร่วมกับมนุษย์ ผู้ใช้จะออกแรงขับเคลื่อนที่ปลายแขนแต่ทิศทางการเคลื่อนที่จะเป็นตามอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ Output1 กับ Output2 ซึ่งระบบเป็นผู้ควบคุม ในขณะเคลื่อนที่ระบบควบคุมปรับมุมอัตราทดเป็นค่าต่างๆ เพื่อบังคับทิศทางให้แขนกลตามเส้นทางที่โปรแกรมไว้ รูปที่ 3 ได้แสดงหุ่นยนต์แขนกล Pantograph Cobot



รูปที่ 3 Pantograph Cobot

5. Lagrangian Dynamic of the Pantograph

เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทแบบ Pantograph เป็นกลไกแบบขนาน ดังนั้นจึงใช้ทฤษฎีและหลักการการวิเคราะห์ของแขนกลแบบอนุกรมโดยตรงไม่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการของ Lagrangian Formulation[2]

Lagrangian เป็นวิธีการหาจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ประเภทหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการคิดของผลต่างระหว่างพลังงานเทียบกับ ตัวแปรของระบบและเวลา มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเราจะนิยาม ลากราน (L) ดังนี้

$$L = K - P$$

โดยที่ L คือ ตัวลากราน K คือ พลังงานจลน์ P คือ พลังงานศักย์

โดยที่สมการ ลากราน ที่เลือกมาใช้เป็นชนิด ที่ 1 (Lagrangian equation of the first type)[2] ซึ่งรูปแบบของสมการมีดังนี้

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \qquad (1)$$

สำหรับ j = 1 ถึง n

เมื่อ Γ_i คือ ฟังก์ชั่นเงื่อนไข สมการที่ i

k คือ จำนวนของฟังก์ชั่นเงื่อนไข

λ_i คือ ตัวคูณลากราน

n คือ จำนวนของพิกัดฉาก(Coordinate)

วิธีในการแก้สมการคือ การจัดสมการลากรานให้อยู่ใน 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือการจัดรูปแบบให้ตัวคูณลากราน เป็นตัวแปรที่ต้องการหาค่า ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งคือการจัดรูปให้แรงที่มอเตอร์กระทำเป็นตัวแปรที่ต้องการหาค่า โดยที่ จำนวน k สมการแรก เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับพิกัดอิสระที่เหลือจากการควบคุม(Redundant Coordinate) และจำนวน n – k สมการที่เหลือเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรของแรงที่ข้อต่อของหุ่นยนต์ ซึ่งรูปแบบแรกของสมการมีดังนี้

$$\sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - Q_j \qquad (2)$$

โดยที่ Q_j คือแรงทั่วไป ที่เป็นแรงภายนอก

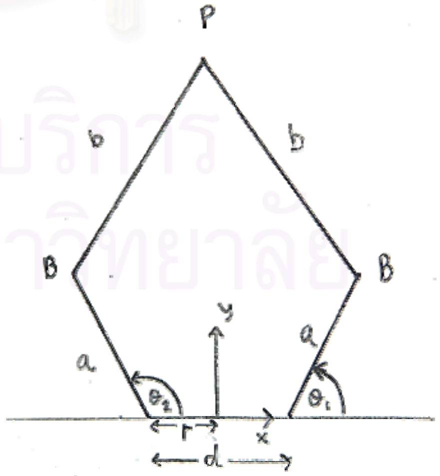
รูปแบบที่สองของสมการคือ

$$Q_j = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} - \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\partial \Gamma_i}{\partial q_j} \qquad (3)$$

เมื่อ Q_j คือ แรงที่ขับโดยมอเตอร์ (Actuator Force or Torque)

6. สมการความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์โคบอท

Pantograph Cobot เป็นหุ่นยนต์แบบขนาน ซึ่งมีโครงสร้างของแขนของหุ่นยนต์ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างของแขนหุ่นยนต์โคบอทสองมิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ input ของระบบจะเคลื่อนที่เป็นมุม θ_1 และ θ_2 จากซ้ายไปขวาตามลำดับ โดยที่จุดบนสุดเป็นจุด P ซึ่งเป็นจุดปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอท โดยที่ระยะระหว่าง input ทั้งสองคือ d และกำหนดจุด Origin X –Y เอาไว้ที่ตรงกลางระหว่าง input ทั้งสอง เป็นระยะทาง r_1 r_2 ตามลำดับ

วิธีการหาสมการจลนศาสตร์ จึงมีความซับซ้อนมากกว่าหุ่นยนต์แบบอนุกรม ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการหาสมการจลนศาสตร์ ด้วยวิธีทาง ลากราน ชนิดที่ 1[2]

อับดับแรก ทำการกำหนด Redundant Coordinate คือจุดปลายของโคบอท p_x และ p_y ดังนั้น จะได้ p_x p_y θ_1 θ_2 เป็น generalized coordinate

จากสมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่ามีระบบสมการทั้งหมด 4 สมการใน 4 ตัวแปร ตัวแปรทั้ง 4 ได้แต่ λ_1 λ_2 และ actuator torques Q_3 Q_4 โดยที่มี generalized forces Q_1 Q_2 เป็นแรงภายนอกออกแรงในแนวแกน x y ของจุด P ของโคบอท

การหาจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์วิธีนี้ต้องการสมการควบคุม (Constraint Equations) Γ_1 Γ_2 โดยที่สมการควบคุมนี้หามาได้จากระยะทางระหว่าง ข้อต่อ B และ P จะมีความยาวเท่ากับความยาวของ link 2 นั้นก็คือ

$$\Gamma_i = \overline{B_i P_i}^2 - b^2 = 0 \quad (4)$$

$$\Gamma_i = (P_x + r_i - ac\theta_i)^2 + (P_y - as\theta_i)^2 - b^2 = 0 \quad (5)$$

โดยที่ i = 1 ถึง 2

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ กำหนดให้มวลของแขนโคบอท อยู่ที่จุดหมุนของแขนทั้งหมด ดังนั้น ทำการหาสมการ ลากราน (L) ได้ดังนี้

หา Total Kinetic Energy ของโคบอท จากสมการ

$$K = K_p + \sum_{i=1}^{2}(K_{ai} + K_{bi}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_p &= \tfrac{1}{2}m_p(\dot{P}_x^{\,2} - \dot{P}_y^{\,2}) \\ K_{ai} &= \tfrac{1}{2}(I_m + \tfrac{1}{3}m_a a^2)\dot{\theta}_i^2 \\ K_{bi} &= \tfrac{1}{2}m_b(P_x^{\,2} - P_y^{\,2}) + \tfrac{1}{2}m_b a^2\dot{\theta}_i^2 \end{aligned} \quad (7)$$

K_p คือ Kinetic Energy ที่จุด P

K_{ai} คือ Kinetic Energy ของ link 1

K_{bi} คือ Kinetic Energy ของ link 2

m_p คือ มวลของจุด P

m_a คือ มวลของ link 1

m_b คือ มวลของ link 2

I_m คือ Inertia ของ โคบอท

เนื่องจาก หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ X-Y ที่ตั้งจากกับแรงดึงดูดของโลก ดังนั้น Potential Energy ของระบบ จึงมีค่าเป็น 0

ดังนั้น สมการลากราน $L = K - P$ คือ

$$L = \tfrac{1}{2}(m_p + 2m_b)(\dot{P}_x^{\,2} - \dot{P}_y^{\,2}) + \tfrac{1}{2}(I_m + \tfrac{1}{3}m_a a^2 + m_b a^2)(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \quad (8)$$

ทำการ derivatives สมการลากราน ด้วย 4 generalized coordinates ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} &\tfrac{d}{dt}\left(\tfrac{\partial L}{\partial \dot{P}_x}\right) = (m_p + 2m_b)\ddot{P}_x \\ &\tfrac{\partial L}{\partial P_x} = 0 \\ &\tfrac{d}{dt}\left(\tfrac{\partial L}{\partial \dot{P}_y}\right) = (m_p + 2m_b)\ddot{P}_y \\ &\tfrac{\partial L}{\partial P_y} = 0 \\ &\tfrac{d}{dt}\left(\tfrac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right) = (I_m + \tfrac{1}{3}m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_1 \\ &\tfrac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0 \\ &\tfrac{d}{dt}\left(\tfrac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}\right) = (I_m + \tfrac{1}{3}m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_2 \\ &\tfrac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ทำการ partial derivatives สมการควบคุม ด้วย 4 generalized coordinates ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} &\tfrac{\partial \Gamma_i}{\partial P_x} = 2(P_x - r - ac\theta_i) \\ &\tfrac{\partial \Gamma_i}{\partial P_y} = 2(P_y - r - as\theta_i) \\ &\tfrac{\partial \Gamma_1}{\partial \theta_1} = 2a\left[\left(P_x - r\right)s\theta_1 - P_y c\theta_1\right] \\ &\tfrac{\partial \Gamma_1}{\partial \theta_2} = 0 \\ &\tfrac{\partial \Gamma_2}{\partial \theta_1} = 0 \\ &\tfrac{\partial \Gamma_2}{\partial \theta_2} = 2a\left[\left(P_x - r\right)s\theta_2 - P_y c\theta_2\right] \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ i = 1 ถึง 2

ทำการแทนค่า derivatives ที่หามาลงในสมการ (2) เมื่อ i = 1 ถึง 2 จะได้

$$\begin{aligned} 2\sum_{i=1}^{2}\lambda_i(P_x - r - ac\theta_i) &= (m_p + 2m_b)\ddot{P}_x - f_{P_x} \\ 2\sum_{i=1}^{2}\lambda_i(P_y - r - as\theta_i) &= (m_p + 2m_b)\ddot{P}_y - f_{P_y} \end{aligned} \quad (11)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ f_{P_x} f_{P_y} คือแรงภายนอกที่กระทำต่อจุด P ในแนวแกน X Y ตามลำดับ

จากชุดสมการที่ 11 จะสามารถหา ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าได้คือ ตัวคูณลากราน (λ_1 λ_2) ได้

ต่อมาทำการแทนค่า derivatives ที่หามาลงในสมการ (3) เมื่อ i = 3 ถึง 4 จะได้

$$\tau_1 = (I_m + \tfrac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_1 - 2a\lambda_1 \left[\left(P_x - r \right) s\theta_1 - P_y c\theta_1 \right] \quad (12)$$

$$\tau_2 = (I_m + \tfrac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2)\ddot{\theta}_2 - 2a\lambda_2 \left[\left(P_x - r \right) s\theta_2 - P_y c\theta_2 \right] \quad (13)$$

หลังจากที่ได้ทำการหาจลนศาสตร์ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทแบบสองมิติออกมาแล้ว ก็จะได้สมการการเคลื่อนที่อย่างง่ายอยู่ในรูปแบบของ สมการเมตริกซ์ สองมิติ[3] ดังนี้

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ii} & D_{ij} \\ D_{ji} & D_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_i \\ \ddot{\theta}_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{iii} & D_{ijj} \\ D_{jji} & D_{jjj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

โดยที่ พจน์ D_{ii} คือพจน์ของ ความเฉื่อยปรากฏของหุ่นยนต์ ที่ข้อต่อ i ดังนั้น ความเร่งที่ข้อต่อ i เนื่องจากแรงมอเตอร์ที่ข้อต่อ i คือ $D_{ii}\ddot{\theta}_i$ ส่วนพจน์ D_{ij} คือ Coupling Inertia ระหว่างข้อต่อ i กับข้อต่อ j ดังนั้นความเร่งที่ข้อต่อ i หรือ j เนื่องจากแรงมอเตอร์ที่ข้อต่อ j หรือ i ตามลำดับคือ $D_{ij}\ddot{\theta}_i$ และ $D_{ji}\ddot{\theta}_j$ ตามลำดับ ส่วน $D_{ijj}\dot{\theta}_j^2$ คือแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง ที่กระทำที่ข้อต่อ i เนื่องจากความเร็วที่ข้อต่อ j

7.สรุป และ งานวิจัยในอนาคต

บทความนี้นำเสนอ การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ Pantograph Cobot หลักการในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ และการควบคุม และได้แสดงถึงวิธีและขั้นตอนการหาสมการความเฉื่อยของหุ่นยนต์โคบอทแบบสองมิติด้วยวิธีการของลากรานฟอมูเลชั่นที่จัดรูปแบบให้ตัวคูณลากราน โดยสามารถหาและนำเสนอสมการพลศาสตร์ของแขนกลโคบอทแบบขนาน

ปัจจุบันงานวิจัยกำลังศึกษาใช้ความเฉื่อยปรากฏในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทสองมิติ ซึ่งจะทำการหาสมการของความเฉื่อย กับค่าตัวแปรต่างๆ ตามฟังก์ชั่น ที่ได้ทำการคิดขึ้น ซึ่งเมื่อทำการหาสมการได้แล้ว หลังจากนั้นก็จะทำการสร้างระบบควบคุมหุ่นยนต์โคบอทของจริงแล้วก็ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Moore, C., “Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures”, Master’s thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997

[2] Lung-Wen Tsai, “Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators” ,A Wiley-Interscience Publication Joh Wiley & Sons, INC.

[3] Saeed B. Niku , “Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications” ,Prentice Hall Upper Saddle River , NJ 07458

[4] Wannasuphoprasit, W. and Cheepsumol, T. 2004. Parallel CVT mechanisms, Proceedings of the 2004 JSAE Annual Congress. JSAE Annual Congress Proceedings No. 64-04, Pacific Convention Plaza, Yokohama, Japan, 18-21 May 2004, code 20045459.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาวิต สุวจิตตานนท์ เกิดวันเสาร์ที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2525 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของนายสุวิช สุวจิตตานนท์ และนางศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ มีพี่น้องสองคน เป็นน้องสาวหนึ่งคน ระดับอนุบาล ประถม ได้รับการศึกษาที่โรงเรียนถนอมพิศวิทยา จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา พ.ศ.2536 ระดับมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา พ.ศ.2542 ระดับปริญญาบัณฑิตศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในปีการศึกษา พ.ศ.2546 และได้เข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย