การควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

นายมนตรี บุญยะผลานันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-3772-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE TRAJECTORY CONTROL OF A ROBOT ARM FOR OBSTACLE AVOIDANCE

Mr. Montree Boonyapalanant

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 2005

ISBN 974-14-3772-2

481800

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง
โดย	นายมนตรี บุญยะผลานันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)	-

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

มนตรี บุญยะผลานันท์ : การควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง. (THE TRAJECTORY CONTROL OF A ROBOT ARM FOR OBSTACLE AVOIDANCE)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ, 104 หน้า. ISBN 974-14-3772-2.

งานวิทยานิพนธ์นี้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งสามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

การควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ในเบื้องต้นทำการศึกษา รวบรวมและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ของหุ่นยนต์แบบ 2-Link Planar Arm ที่มีองศาอิสระเท่ากับ 2 และหุ่นยนต์แบบ Articulated ที่มีองศาอิสระเท่ากับ 3 ซึ่งประกอบด้วย จลน์ศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ จาโคเบียนแรงและความเร็ว พลศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ หลังจากนั้นศึกษาการจำลองควบคุมหุ่นยนต์ทั้ง 2 แบบ บนเส้นทางเดินวงกลมและสี่เหลี่ยมบนระนาบเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยอาศัยเทคนิคการประมาณจาโคเบียนในขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่นำข้อมูลไปใช้ปรับแก้ไขเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ในแกนอ้างอิงแบบข้อต่อโดยตรงด้วยระเบียบวิธีเกรเดียนโปรเจคชัน

จากการพัฒนาและทดลองระบบควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ในการรับรู้สถานะของสิ่งแวดล้อม ซึ่งการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot ที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®) ให้เคลื่อนที่บนเส้นทางเดินวงกลมโดยนำข้อมูลสิ่งกีดขวางจากอุปกรณ์ตรวจรู้มาป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับทางเดินอ้างอิงโดยตรง ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะแปลงให้อยู่ในรูปของข้อต่อผ่านทางค่าผกผันจาโคเบียน (Inverse Jacobian) เพื่อปรับแก้ไขเส้นทางเดินใหม่ ส่วนการควบคุมแรงสัมผัสระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์ CRS Robot กับพื้นเอียงที่มีผิวสัมผัสไม่แข็งเกร็ง ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในการนำข้อมูลแรงสัมผัสป้อนกลับไปยังระบบควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลเพื่อควบคุมแรงสัมผัสให้มีค่าคงที่ตามต้องการ หลังจากนั้นทำการทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งของหุ่นยนต์ CRS Robot เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางพร้อมๆ กัน

ผลการทดลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot ที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®) แสดงให้เห็นถึงการออกแบบระบบควบคุมที่สามารถนำอุปกรณ์ต่างๆ มาใช้ในการประมวลผลร่วมกันได้ และระบบควบคุมสามารถควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์และควบคุมแรงสัมผัสเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปพร้อมกัน จึงสามารถนำระบบควบคุมดังกล่าวไปใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปเพื่อให้สามารถทำงานปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2548

4570480621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: OBSTACLE AVOIDANCE / FORCE CONTROL / POSITION CONTROL / ROBOT

MONTREE BOONYAPALANANT : THE TRAJECTORY CONTROL OF A ROBOT ARM FOR OBSTACLE AVOIDANCE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RATCHATIN CHANCHAROEN, Ph.D. , 104 pp. ISBN 974-14-3772-2.

This research presents about the technique of the trajectory control of a robot arm which can interact with an environment by installing the sensors for the obstacle avoidance.

Early study and develop Robot's Mathematical equations of 2-Link Planar Arm with 2 degrees of freedom and Articulated Model with 3 degrees of freedom which are composed of Forward and Inverse Kinematics, Force and Velocity Jacobian, Forward and Inverse Dynamics. After that Simulate circular and square trajectory control with obstacle avoidance by using the Jacobian Estimation Technique while Robot is moving to find modified trajectory of joint space control. This technique requires Gradient Projection method to adjust.

Consequently develop the control system for experimenting with CRS Robot which is installed Force sensor and Local Positioning Sensor (Fastrak®) to know the status of the environment or obstacle. First scheme, The CRS Robot with Local Positioning Sensor (Fastrak®) bring its feedback (Obstacle distance) to compare with desire trajectory. An Error is converted to Joint space by Inverse Jacobian and to find modified trajectory. In part of Second scheme, The contact force controlling between End effector and non-rigid angular surface install force sensor to feedback for Integral of Implicit force control to control of the desired force. Then control both of two scheme to CRS Robot for obstacle avoidance.

The result of controlling CRS Robot which is installed sensors show that the control design can compatible with any sensors and the control systems can control the trajectory of robot arm to avoid obstacle. Addition to the Controller can control the steady contact force on angular plate. So this method could be applied to use in any industrial robot for controlling to interact with the environment.

Department Mechanical Engineering Student's signature .....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านให้ความกรุณาจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และที่สำคัญที่สุด คือ ท่านให้ความกรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าของท่านในการถ่ายทอดความรู้ และคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ในที่นี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัย และคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทำวิจัย และบริษัท ซีเกต ที่อุทิศหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเพื่อใช้ในการทดลอง รวมทั้งคุณจารุบุตร คณะนัย ที่ช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและให้คำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี และคุณศักดิ์ชาย ฐิติกาล คุณประวัติ รวดเร็วที่ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและซ่อมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นแรงบันดาลใจและมอบความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งให้แก่ผู้วิจัยได้มีความเพียรพยายาม มุ่งมั่น ต่อสู้กับอุปสรรค จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนญาติ พี่น้อง และพี่ๆ ที่บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน) รวมทั้งเพื่อนนิสิตรุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอกและโท ที่เป็นกำลังใจและให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือที่ดียิ่งกับผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... 2

1.5 สิ่งริเริ่มในงานวิจัย..... 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 5

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.2.1 การควบคุมแรงและตำแหน่ง (Force/Position Control)..... 5

2.2.2 การควบคุมหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Obstacle Avoidance)..... 9

2.3 แนวทางในการทำวิจัย..... 11

3 ทฤษฎีพื้นฐาน..... 13

3.1 นำเรื่อง..... 13

3.2 การควบคุมติดตามเส้นทางเดิน (Trajectory Following Control)..... 13

3.2.1 การขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบข้อต่อ (Joint-based Control Scheme)..... 14

บทที่ หน้า

3.2.2 การขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น
(Cartesian-based Control Scheme)..... 15
3.3 การควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม..... 16
3.3.1 การควบคุมแรงทางตรง (Explicit Force Control)..... 16
3.3.2 การควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control)..... 16
3.3.2.1 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล (Integral Control)..... 17
3.4 การขับควบคุมจากสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจรู้
(Sensor-based Servoing Algorithm) 18
3.5 จาโคเบียน (Jacobian)..... 18
3.6 การประมาณจาโคเบียนออนไลน์ (Online Estimation of Jacobian)..... 19
3.7 เทคนิคการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Collision Avoidance Technique)..... 20
3.7.1 ระเบียบวิธีเกรเดียนโปรเจคชั่น (Gradient Projection Method)..... 20

4 การจำลองควบคุม..... 21
4.1 นำเรื่อง..... 21
4.2 การจำลองควบคุมแขนกล 2-Link Planar Arm เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 21
4.2.1 พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ (Robot Parameter)..... 22
4.2.2 ดี-เอชพารามิเตอร์ (D-H Parameter)..... 22
4.2.3 จลน์ศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ
(Forward and Inverse Kinematics)..... 23
4.2.4 จาโคเบียน (Jacobian)..... 24
4.2.5 พลศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ
(Forward and Inverse Dynamics)..... 25
4.2.6 วิธีการควบคุมเส้นทางเดินเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 26
4.2.7 ผลการจำลองควบคุมเส้นทางเดินแบบต่างๆ
เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง 30
4.2.8 สรุปผลการจำลองควบคุมเส้นทางเดินแบบวงกลมและสี่เหลี่ยม.. 32
4.3 การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ Articulated Robot เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 33
4.3.1 พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ (Robot Parameter)..... 33

บทที่ หน้า

4.3.2 ดี-เอชพารามิเตอร์ (D-H Parameter)..... 33
4.3.3 จลน์ศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ
(Forward and Inverse Kinematics)..... 35
4.3.4 จาโคเบียน (Jacobian)..... 36
4.3.5 พลศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ
(Forward and Inverse Dynamics)..... 37
4.3.6 วิธีการควบคุมเส้นทางเดินเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 38
4.3.7 ผลการจำลองควบคุมเส้นทางเดินแบบวงกลม
เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง 40
4.3.8 สรุปผลการจำลองควบคุมเส้นทางเดินแบบวงกลม..... 40
4.4 สรุปผลการจำลองควบคุม..... 41

5 การจัดเตรียมการทดลอง..... 42
5.1 นำเรื่อง..... 42
5.2 การติดตั้งฮาร์ดแวร์..... 42
5.2.1 ชุดอุปกรณ์หุ่นยนต์ CRS Robot.... 43
5.2.2 ชุดอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®)..... 43
5.2.3 ชุดอุปกรณ์ตรวจรู้แรง..... 45
5.3 การติดตั้งซอฟท์แวร์..... 46
5.3.1 โปรแกรม Matlab® (xPC)..... 46
5.3.2 โปรแกรม Labview®..... 48
5.4 ระบบการเชื่อมโยงอุปกรณ์ชุดทดลองหุ่นยนต์ CRS Robot..... 49

6 การทดลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot..... 50
6.1 การทดลองควบคุมแรง 50
6.1.1 นำเรื่อง..... 50
6.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 50
6.1.3 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง..... 51
6.1.4 ผลการทดลองควบคุมแรงในแนวแกน Z 52

บทที่ หน้า

6.1.5 สรุปผลการทดลอง..... 53
6.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 53
6.2.1 นำเรื่อง..... 53
6.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 54
6.2.3 การสร้างกำแพงเสมือน..... 55
6.2.4 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง..... 55
6.2.5 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งบนเส้นทางวงกลมเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 56
6.2.6 สรุปผลการทดลอง..... 58
6.3 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่ไม่ทราบล่วงหน้า..... 58
6.3.1 นำเรื่อง..... 58
6.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 59
6.3.3 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง..... 60
6.3.4 ผลการทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งบนเส้นทางวงกลมเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 60
6.3.5 สรุปผลการทดลอง..... 62

7 บทสรุป..... 63
7.1 วิเคราะห์และสรุปผล..... 63
7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง..... 65

รายการอ้างอิง..... 66
ภาคผนวก..... 69
ภาคผนวก ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ CRS Robot 70
ก.1 นำเรื่อง..... 70
ก.2 จลน์ศาสตร์ไปข้างหน้าและย้อนกลับ..... 70
ก.3 จาโคเบียน (Jacobian)..... 74
ก.4 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Robot Dynamics)..... 78

บทที่ หน้า

ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลเทคนิคของหุ่นยนต์ CRS Robot..... 80
ข.1 แขนหุ่นยนต์ CRS Robot..... 80
ข.2 ชุดอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®)..... 85
ข.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®)..... 85
ข.2.2 การใช้งานโปรแกรม FTGui ของชุดอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®)..... 87
ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง..... 90
ค.1 นำเรื่อง..... 90
ค.2 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองควบคุม..... 90
ค.2.1 โปรแกรมควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์ 2-Link Planar Arm 90
ค.2.2 โปรแกรมควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์ Articulated Robot 96
ค.2.3 ฟังก์ชันใน Robotic Toolbox ที่ใช้งาน..... 99
ค.3 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองควบคุมทางเดินของแขนหุ่นยนต์ CRS Robot เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 101
ค.3.1 ความรู้เบื้องต้นก่อนการใช้งาน Matlab® xPC 101
ค.3.2 โปรแกรมที่ใช้ทดลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot..... 102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 104

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 4.1	D-H parameter ของ 2-Link Planar Arm.....	22
ตารางที่ 4.2	D-H parameter ของ Articulated Robot.....	34
ตารางที่ ก.1	D-H parameter ของ Articulated Robot.....	71
ตารางที่ ข.1	รายละเอียดแขนหุ่นยนต์ CRS Robot.....	82

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 3.1	วงจรควบคุมพื้นฐานบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint-based Control Scheme).....	14
รูปที่ 3.2	วงจรควบคุมพื้นฐานบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian-based Control Scheme).....	15
รูปที่ 3.3	วงจรควบคุมโดยใช้ Inverse Jacobian ในการควบคุมแบบ Cartesian-based Control Scheme.....	15
รูปที่ 3.4	วงจรควบคุมโดยใช้ Transpose Jacobian ในการควบคุมแบบ Cartesian-based Control Scheme.....	16
รูปที่ 3.5	วงจรควบคุมโดยใช้ Inverse Jacobian ในการควบคุมแบบ Sensor-based Servoing.....	18
รูปที่ 3.6	หลักการของ Gradient Projection Method.....	20
รูปที่ 4.1	Kinematics Model ของแขนกลแบบ 2-Link Planar Arm	21
รูปที่ 4.2	การตั้งแกนอ้างอิงของแขนกลแบบ 2-Link Planar Arm.....	22
รูปที่ 4.3	แผนผังการควบคุม 2-Link Planar Arm ด้วยวิธี Global Collision Avoidance.....	27
รูปที่ 4.4	แผนผังการควบคุม 2-Link Planar Arm ด้วยวิธี Local Collision Avoidance.....	29
รูปที่ 4.5	เส้นทางเดินวงกลมของหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยวิธี Global เมื่อค่า Kp=100, Kv=20.....	30
รูปที่ 4.6	เส้นทางเดินสี่เหลี่ยมของหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยวิธี Global เมื่อค่า Kp=100, Kv=20.....	31
รูปที่ 4.7	เส้นทางเดินวงกลมของหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยวิธี Local เมื่อค่า Kp=95, Kv=19.5.....	31
รูปที่ 4.8	เส้นทางเดินสี่เหลี่ยมของหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยวิธี Local เมื่อค่า Kp = 35, Kv=11.83.....	32
รูปที่ 4.9	Kinematics Model ของแขนกลแบบ Articulated Robot.....	33
รูปที่ 4.10	การตั้งแกนอ้างอิงของแขนกลแบบ Articulated Robot.....	34
รูปที่ 4.11	แผนผังการควบคุม Articulated Robot ด้วยวิธี Local Collision Avoidance	39

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.12 เส้นทางเดินของหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางเมื่อค่า Kp=45, Kv=13.42 40
รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot..... 42
รูปที่ 5.2 ชุดอุปกรณ์หุ่นยนต์ CRS Robot.... 43
รูปที่ 5.3 ชุดอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®)..... 44
รูปที่ 5.4 แผนผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®)..... 44
รูปที่ 5.5 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรง..... 45
รูปที่ 5.6 แผนผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจรู้แรง..... 45
รูปที่ 5.7 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่าง Host PC และ Target PC ผ่านทาง TCP/IP..... 47
รูปที่ 5.8 โปรแกรมที่ใช้อ่านและเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®) อุปกรณ์ตรวจรู้แรง และ Encoder ของหุ่นยนต์ CRS Robot..... 48
รูปที่ 5.9 ระบบการเชื่อมโยงอุปกรณ์ชุดทดลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot..... 49
รูปที่ 6.1 อุปกรณ์ชุดทดลองควบคุมแรงสัมผัสบนทางเดินวงกลม..... 51
รูปที่ 6.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงสัมผัสที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางเดินวงกลม..... 52
รูปที่ 6.2 (ข) แรงสัมผัสของปลายแขนกล(Fz) บนเส้นทางเดินวงกลมที่ควบคุมให้มีขนาด -10 N..... 52
รูปที่ 6.3 อุปกรณ์ชุดทดลองควบคุมทางเดินวงกลมเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 54
รูปที่ 6.4 ชุดอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®) ที่ใช้ตรวจจับสิ่งกีดขวาง 55
รูปที่ 6.5 เส้นทางเดินวงกลมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่..... 56
รูปที่ 6.6 (ก) เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางเมื่อสิ่งกีดขวางเข้ามาในเส้นทางเดินวงกลมเป็นระยะทาง 3 cm..... 57
รูปที่ 6.6 (ข) เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในระนาบ XY ของปลายแขนกล เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่เข้ามาในเส้นทางเดินวงกลมเป็นระยะ 3 cm..... 57
รูปที่ 6.6 (ค) สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติที่ใช้ในการตรวจรู้ระยะสิ่งกีดขวาง..... 57
รูปที่ 6.7 อุปกรณ์ชุดทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 59
รูปที่ 6.8 (ก) เปรียบเทียบการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงของปลายแขนกลที่ควบคุมแรงและตำแหน่งเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง..... 61

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 6.8 (ช)	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงในแนวแกน XY ของปลายแขนกล.....	61
รูปที่ 6.8 (ค)	แรงสัมผัสที่ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ในระหว่างการเคลื่อนที่ปลายแขนกล.....	62
รูปที่ 6.8 (ง)	สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติที่ใช้ในการตรวจรู้ระยะสิ่งกีดขวาง.....	62
รูปที่ ก.1	Kinematics Model ของแขนกลแบบ Articulated Robot.....	70
รูปที่ ก.2	การตั้งแกนอ้างอิงของแขนกลแบบ Articulated Robot	71
รูปที่ ข.1	ชุดการทดลองควบคุมแขนหุ่นยนต์ CRS Robot.....	80
รูปที่ ข.2	ด้านบนของแขนหุ่นยนต์แบบ Articulated ของบริษัท CRS Robotics รุ่น 255	80
รูปที่ ข.3	ด้านข้างของแขนหุ่นยนต์แบบ Articulated ของบริษัท CRS Robotics รุ่น 255	81
รูปที่ ข.4	ข้อต่อและช่องสำหรับต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณ.....	85
รูปที่ ข.5	ตำแหน่งของการต่อสาย Power และสวิตช์เปิดปิด.....	85
รูปที่ ข.6	ตำแหน่งของสวิตช์เลือกคุณสมบัติของชุดควบคุม.....	85
รูปที่ ข.7	ตำแหน่งของช่องต่อสัญญาณแบบ RS-232.....	86
รูปที่ ข.8	การเลือก Baud Rate ของชุดควบคุม Fastrak® ที่ใช้งาน.....	87
รูปที่ ข.9	ประเภทของข้อมูลที่ต้องการรับค่าจาก Fastrak®.....	87
รูปที่ ข.10	การ Alignment ของตัวส่งสัญญาณ.....	88
รูปที่ ข.11	การตั้งแกนอ้างอิงของตัวส่งสัญญาณ.....	88
รูปที่ ข.12	ประเภทของข้อมูลส่งค่าออกมาจากชุดควบคุม Fastrak®	89
รูปที่ ข.13	ตรวจสอบสถานะของระบบรับส่งสัญญาณ Fastrak®.....	89
รูปที่ ค.1	IO Block Library ที่มีใช้ใน Simulink Library.....	102
รูปที่ ค.2	การเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลจาก Block Diagram ไปสู่ข้อมูลที่ใช้ใน xPC Target.....	102
รูปที่ ค.3	ระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์ CRS Robot ที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ.....	103