

ระบบควบคุมแบบตามนุษย์สำหรับหัวหุ่นยนต์ PTV



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-560-6

HUMAN-LIKE CONTROL FOR PAN-TILT-VERGE HEAD SYSTEM

SILA SORNSUJITRA



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical

Suranaree University of Technology

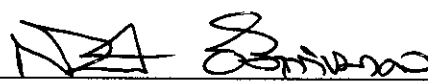
Academic Year 2005

ISBN 974-533-560-6

ระบบควบคุมแบบตามนุษย์สำหรับหัวหุ่นยนต์ PTV

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



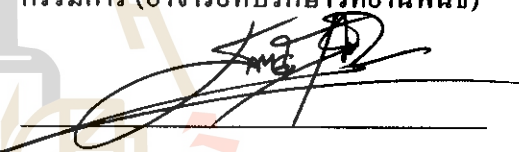
(ผศ. ดร.กิตติ อัดถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.รณดชัย กุลวรรณิพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานิ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิลา สอนสุจิตรา : ระบบควบคุมแบบตามนุษย์สำหรับหัวหุ่นยนต์ PTV

(HUMAN-LIKE CONTROL FOR PAN-TILT-VERGE HEAD SYSTEM)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, 95 หน้า, ISBN 974-533-560-6

ในงานวิจัยทางด้านระบบการมองเห็นแบบสเตอริโอแอคทีฟ (stereo active) จำเป็นจะต้องมีระบบกล้องที่เคลื่อนที่ตามการเคลื่อนไหวของวัตถุที่ถูกติดตามได้ เพื่อเป็นการขยายขอบเขตการมองเห็นของระบบ เปรียบได้กับการที่มนุษย์มีโครงสร้างที่รองรับการเคลื่อนไหวของลูกตา ไม่ว่าจะเป็นส่วนคอสำหรับก้ม เงย หันซ้ายหรือหันขวา การกรอกลูกตา หรือแม้แต่การเอี้ยวหรือหันตัวเพื่อมองตามวัตถุที่สนใจ การเคลื่อนไหวส่วนต่างๆ ของร่างกายเป็นการเพิ่มมุมมองการจดจ้อง (fixate) วัตถุที่สนใจ ทำให้ระบบได้รับข้อมูลของวัตถุเพิ่มเติม อันได้แก่ตำแหน่งและความเร็ว เพื่อใช้ในการจัดการ (manipulate) หรือประมวลผล (process) ต่อไป

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบการมองเห็นของหัวหุ่นยนต์ PTV (Pan-Tilt-Verge vision system) ขึ้นมาเพื่อให้มีรูปแบบของพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่คล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่ของตามนุษย์ หัวหุ่นยนต์ PTV ประกอบด้วยกล้องสีแบบ CCD จำนวน 2 ตัวทำหน้าที่เป็นตาของหัวหุ่นยนต์ กล้องดังกล่าวได้รับการติดตั้งอยู่บนโครงสร้างแบบ 4 มุมอิสระ ซึ่งการขับเร้ามุมอิสระต่างๆ ของหัวหุ่นยนต์นี้อาศัยมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงจำนวน 4 ตัว เพื่อใช้ในการหันซ้าย-ขวา (pan) ใช้ในการก้ม-เงย (tilt) และกรอกตาซ้าย-ขวา (verge) ระบบควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV ได้รับการขับเคลื่อนโดยตรงจากตัวควบคุมที่มีการป้อนกลับด้วยภาพ ระบบควบคุมดังกล่าวออกแบบโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมประเภทจัดการตัวเอง ที่เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน ซึ่งเครือข่ายประสาทเทียมดังกล่าวใช้กฎการเรียนรู้ของเครื่องจักร เพื่อการประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัต และนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ จากผลการทดสอบระบบควบคุมดังกล่าวพบว่า ทั้งสมรรถนะและความเร็วของการเรียนรู้ของระบบให้ผลเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ นอกไปจากนั้นแล้วระบบควบคุมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นยังสามารถเคลื่อนที่และเฝ้าติดตามวัตถุเป้าหมายโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์แต่อย่างใด เป็นผลให้ลดภาระในการคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวหุ่นยนต์และการปรับเทียบทางฮาร์ดแวร์ ทำให้การออกแบบและสร้างหัวหุ่นยนต์มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา ศิลา สอนสุจิตรา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อาทิตย์ ศรีแก้ว

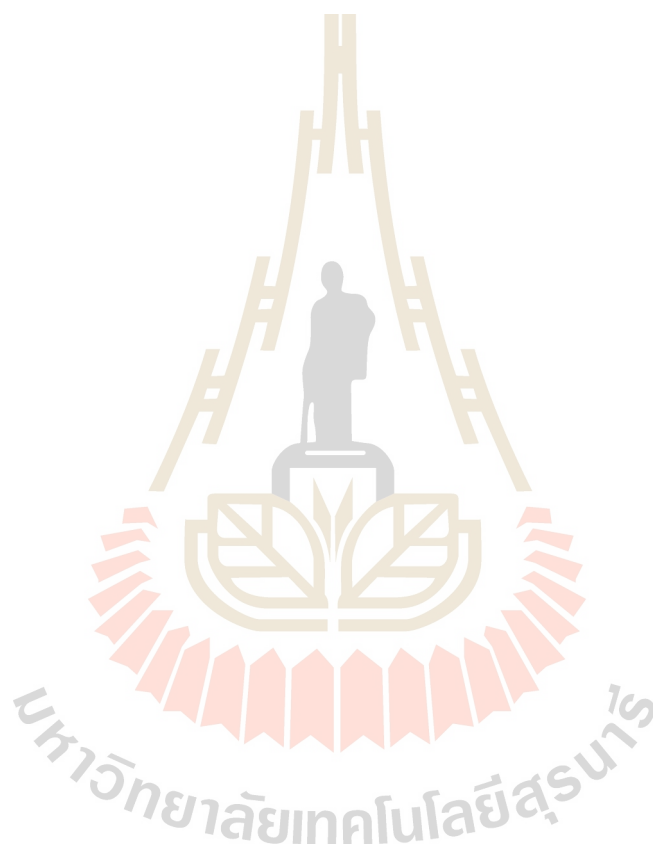
SILA SORNSUJITRA : HUMAN-LIKE CONTROL FOR PAN-TILT-
VERGE HEAD SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ARTHIT
SRIKAEW, Ph.D. 95 PP. ISBN 974-533-560-6

PAN-TILT-VERGE HEAD/ARTIFICIAL NEURAL NETWORK/MACHINE
LEARNING/SELF-ORGANIZING MAP NETWORK/DYNAMIC JACOBIAN
ESTIMATION/VISUAL FEEDBACK CONTROL

In stereo active vision field of study, most systems require an ability to move cameras to track moving objects. Like any human vision, this is for expanding the coverage of vision system. Besides the eyes movement, the body movements also allow greater field of view e.g. turning left and right or tilting up and down by the neck or the torso. By having such capability to move the eyes, the vision system can obtain more information of objects of interest. Typically, these are position and velocity for further manipulating or processing.

This thesis presents design and development of Pan-Tilt-Verge (PTV) vision system for a robot head. The main objective is to achieve two of human-like eye movement behaviors i.e. saccade and smooth pursuit. The PTV head consists of two color CCD cameras used as robot's eyes. These two cameras are mounted on a 4 degree-of-freedom head. These are one degree for pan angle (left/right), one degree of tilt angle (up/down) and two degree for verge angle (left/right for each eye). Each degree is actuated by a DC-servo motor which is directly driven from a controller using visual feedback. By using the proposed unsupervised learning scheme, a dynamic Jacobian estimation can be obtained from a self-organizing map artificial

neural network and then used to control all motors. The results show that performance and speed of learning process are desirable. Also, the proposed system shows that both saccadic and smooth-pursuit behaviors are obviously obtained. Moreover, the system can eventually perform tracking without using any knowledge of robot head structure. Thus, any mathematical model of the head and hardware calibration are not required. The system can then conveniently be implemented.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2005

Student's Signature ศิริ งามวิจิตร

Advisor's Signature นิพนธ์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ล่วงหน้าด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในทุกๆ ด้าน ที่เกิดประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยคงมีอาจะเลยที่จะกล่าวถึง บุคคล กลุ่มบุคคล และคณะ ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ได้สอนให้ข้าพเจ้าได้รู้จักความรับผิดชอบในการทำวิจัย ด้วยความเมตตาเสมอมา และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัครกิจมงคล ดร.ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณอัญชลี รักด่านกลาง คุณภัทรวรรณ สิทธิวินกุล และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ภาณุพงษ์ เพชรเลิศ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและคอยช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในทุกๆ ด้านจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจ รวมทั้งคอยช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ ไม่ว่าผู้วิจัยจะเกิดปัญหาอะไรก็เข้าใจผู้วิจัยเสมอมา อีกทั้งให้การอบรม เลี้ยงดู และส่งเสริมทางการศึกษาของผู้วิจัยอย่างดีที่สุดมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศิลา สอนสุจิตรา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 การจัดรูปแบบวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้แบบตามนุษย์.....	4
2.2.1 การเคลื่อนที่แบบ SC.....	6
2.2.2 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SC.....	7
2.2.3 การเคลื่อนที่แบบ SP.....	10
2.2.4 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SP.....	10
2.3 สรุป.....	11
3 โครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ PVT.....	12
3.1 บทนำ.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างหัวหุ่นยนต์.....	12
3.2.1 โครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ PTV.....	14
3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง.....	16
3.2.3 ปัญหาหลังจากการประกอบชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์.....	20
3.3 ชุดควบคุมหัวหุ่นยนต์.....	21
3.3.1 ชุดประมวลผล.....	21
3.3.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง.....	22
3.3.3 การควบคุมหัวหุ่นยนต์จากชุดประมวลผล.....	22
3.3.4 การรับส่งข้อมูลของชุดประมวลผล.....	25
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของหัวหุ่นยนต์ PTV.....	29
3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวหุ่นยนต์ PTV.....	30
3.6 สรุป.....	32
4 ทฤษฎีการควบคุมหัวหุ่นยนต์ PVT.....	34
4.1 บทนำ.....	34
4.2 พื้นฐานเครือข่ายประสาทเทียม.....	34
4.3 เครือข่ายแบบแข่งขัน.....	37
4.4 การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ.....	38
4.4.1 จาโคเบียนรูปภาพ.....	38
4.4.2 การประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัต.....	40
4.4.3 การประมาณค่าจาโคเบียนแบบพลวัตสำหรับกฎการเรียนรู้.....	43
4.5 การรับข้อมูลภาพจากกล้องเพื่อเป็นตัวแทนป้อนกลับ.....	46
4.6 สรุป.....	47
5 การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์.....	49
5.1 บทนำ.....	49
5.2 ความสัมพันธ์ของภาพวัตถุเป้าหมายและน้ำหนักระสาท.....	49
5.3 การเรียนรู้ให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.1 การเคลื่อนที่แบบ SC โดยใช้มอเตอร์ดำสองตัว.....	51
5.3.2 การเคลื่อนที่แบบ SC โดยใช้มอเตอร์สามตัว.....	59
5.3.3 การชดเชยการหมุนของมอเตอร์ดำเมื่อเกิดการหมุนของมอเตอร์ค่อ.....	62
5.4 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SP.....	66
5.5 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบ SC และ SP.....	68
5.6 สรุป.....	71
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	73
6.1 สรุป.....	73
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การประมวลผลภาพ.....	79
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างผลทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม.....	84
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การทำงานการรับส่งข้อมูลของชุดประมวลกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล..... 28
3.2	ประสิทธิภาพของหัวหุ่นยนต์..... 29
3.3	พารามิเตอร์ของชิ้นส่วนสำหรับหัวหุ่นยนต์..... 30
4.1	ความแตกต่างระหว่างการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนและการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน..... 36
5.1	ปริมาณการขดเชยการหมุนของมอเตอร์ดาทั้งสองข้าง..... 65
5.2	ระยะทางจากวัตถุถึงจุดศูนย์กลางภาพหลังจากการเคลื่อนที่แบบ SC และ SP..... 71



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบายแกนหมุนของตา (ตาขวา).....	5
2.2 ระบบการมองของตามนุษย์ที่มีความสัมพันธ์กัน.....	8
2.3 แบบจำลอง OCS.....	9
3.1 กลไกพื้นฐานของหัวหุ่นยนต์.....	13
3.2 ภาพจำลองหัวหุ่นยนต์ต้นแบบพร้อมตัวขับเคลื่อน.....	13
3.3 การกระจายชิ้นส่วนของภาพจำลองหัวหุ่นยนต์.....	14
3.4 การกระจายชิ้นส่วนของภาพจำลองหัวหุ่นยนต์ (ต่อ).....	15
3.3 การกระจายชิ้นส่วนของภาพจำลองหัวหุ่นยนต์ (ต่อ).....	15
3.6 การยึดกลิ้งและจุดเชื่อมอะลูมิเนียม.....	17
3.7 จุดหมุนบริเวณคอ.....	17
3.8 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป.....	18
3.9 ชุดเฟืองและเกลิยตัวหนอน.....	18
3.10 หัวหุ่นยนต์ที่ประกอบเสร็จแล้ว.....	19
3.11 มอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงรุ่นต่างๆ ที่ติดตั้งบนหัวหุ่นยนต์ PTV.....	20
3.12 ชุดประมวลผล.....	21
3.13 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์.....	22
3.14 ผังงานการทำงานของโปรแกรมส่วนหลักและส่วน ISR.....	23
3.15 ระบบการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง.....	24
3.16 รูปคลื่นการถอดรหัสจากมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง.....	24
3.17 ช่วงเวลาการทำงานของชุดประมวลผล.....	25
3.18 ผังงานระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์.....	26
3.19 การรับส่งข้อมูลตำแหน่งระหว่างชุดประมวลผลและคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	27
3.20 พิสัยการทำงานของหัวหุ่นยนต์ TV.....	29
3.21 การกำหนดเฟรมให้กับหัวหุ่นยนต์.....	31
4.1 การเชื่อมต่อกันของนิรอน.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	เครือข่ายโคโฮเนน..... 38
4.3	แผนภาพการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ..... 41
4.4	การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ และพารามิเตอร์รูปภาพ DF 42
4.5	แผนภาพระบบการควบคุมระบบที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม..... 45
4.6	การควบคุมระบบที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม..... 46
4.7	โครงสร้างภายในของตัวควบคุมนิวโรล..... 46
4.8	แฟงฟังก์ของระบบการควบคุมหุ่นยนต์..... 47
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุเป้าหมายและน้ำหนักประสาทในภาพ..... 50
5.2	แผนภาพระบบการควบคุมหุ่นยนต์ PTV..... 50
5.3	แผนภาพการฝึกสอนการเคลื่อนที่ โดยการฝึกสอนแต่ละครั้งต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้น..... 53
5.4	กราฟระยะห่างของวัตถุจากจุดกึ่งกลางภาพ..... 54
5.5	แผนภาพการฝึกสอนการเคลื่อนที่ โดยการฝึกสอนแต่ละครั้ง ไม่ต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้น..... 56
5.6	กราฟระยะห่างของวัตถุจากจุดกึ่งกลางภาพ..... 57
5.7	น้ำหนักประสาทของตาซ้าย..... 58
5.8	น้ำหนักประสาทของตาขวา..... 58
5.9	ระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพหลังจากตัวควบคุมทำงาน..... 60
5.10	การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในแนวราบแบบสุ่ม..... 60
5.11	ระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพหลังจากตัวควบคุมทำงาน..... 61
5.12	การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายเป็นลักษณะวงกลม..... 62
5.13	แผนภาพการเรียนรู้เพื่อการประมาณขนาด..... 64
5.14	มุมขนาดของตาซ้ายและตาขวาเมื่อมอเตอร์ค่อหมุน..... 65
5.15	วัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณน้ำหนักประสาทกึ่งกลางภาพ..... 66
5.16	ระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพ..... 67
5.17	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของมอเตอร์ในเทอมน้ำหนักประสาทขณะเรียนรู้ด้วยตัวเอง..... 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 ระยะห่างของวัตถุเป้าหมายถึงจุดศูนย์กลางภาพด้านซ้าย.....	69
5.19 (ก) การก้าวเดินของหัวหุ่นยนต์เพิ่มนำพาวัตถุมาบริเวณกึ่งกลางภาพ.....	69
5.19 (ข) การก้าวเดินของหัวหุ่นยนต์เพิ่มนำพาวัตถุมาบริเวณกึ่งกลางภาพ(ต่อ).....	70
5.20 ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์จากจุดศูนย์กลางถึงวัตถุเป้าหมาย.....	70
ก.1 แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง/เลนส์.....	81
ก.2 ตัวอย่างการหาวัตถุเป้าหมายจากกล้องสองตัวพร้อมกัน.....	83
ข.1 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	85
ข.2 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	86
ข.3 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	87
ข.4 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	88
ข.5 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	89
ข.6 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	90
ข.7 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	91
ข.8 มิตินองขึ้นงาน (หน่วย : เซนติเมตร).....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในงานวิจัยทางด้านการมองเห็นแบบสเตอริโอแอคทีฟ (stereo active) จำเป็นจะต้องมีระบบกล้องที่เคลื่อนที่ตามการเคลื่อนไหวของวัตถุเป้าหมายได้ เพื่อเป็นการขยายขอบเขตการมองเห็นของระบบ เปรียบได้กับการที่มนุษย์มีโครงสร้างที่รองรับการเคลื่อนไหวของลูกตา ไม่ว่าจะเป็นส่วนคอสำหรับก้ม เงย หันซ้ายหรือหันขวา การกรอกลูกตา หรือแม้แต่การเอี้ยวหรือหันตัวเพื่อมองตามวัตถุที่สนใจ การเคลื่อนไหวส่วนต่างๆ ของร่างกายเป็นการเพิ่มมุมมองการจดจ้อง (fixate) วัตถุที่เป้าหมายที่สนใจ ทำให้ระบบได้รับข้อมูลของวัตถุเพิ่มเติมมากขึ้น อันได้แก่ตำแหน่ง (position) และความเร็ว (speed) เพื่อใช้ในการจัดการ (manipulate) หรือประมวลผล (process) ต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาและสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบ ประกอบไปด้วยกล้องชนิดที่ติดตั้งอยู่บนโครงสร้างขนาด 4 มุมอิสระ (degree of freedom หรือ DOF) ที่ซึ่งสามารถหันซ้าย-ขวา (pan) ก้ม-เงย (tilt) และเหลือบซ้าย-ขวา (verge) ได้ ระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ใช้หลักการเคลื่อนที่ของตามนุษย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ กล้องที่ติดบนโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ต้นแบบทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ เปรียบเสมือนดวงตาของมนุษย์ กล้องทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ ในสภาพแวดล้อมโดยกล้องจะบันทึกข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลเพื่อนำมาประมวลผล โดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลคอมพิวเตอร์ซึ่งในปัจจุบันมีสมรรถนะที่สูงมาก อีกทั้งตัวกล้องและคอมพิวเตอร์ยังมีราคาไม่สูงมากนัก ดังนั้นเมื่อมีอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาต่ำจึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แต่เนื่องจากตัวกล้องมีความโค้งมนของเลนส์ทำให้เวลานำไปใช้งานต้องทำการปรับเทียบเพื่อให้การใช้งานกล้องถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด ขั้นตอนและอัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับเทียบกล้องนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับทางเลือกของผู้ใช้และงานที่จะนำกล้องไปใช้งาน

หัวหุ่นยนต์ต้นแบบที่ถูกทำขึ้นนั้น ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนโลหะชนิดต่างๆ ที่ถูกขึ้นรูปกล่าวก๊อผ่านกระบวนการทางกลด้วยเครื่องมือกลมากกว่า 1 ชนิด ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วมีความคลาดเคลื่อนและเมื่อนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบกันเป็นหัวหุ่นยนต์ มีผลทำให้หัวหุ่นยนต์มีความผิดพลาดหรือผิดเพี้ยนไปจากที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจะเป็นการยากที่จะหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อใช้แบบจำลองดังกล่าวในการควบคุมหัวหุ่นยนต์ต้นแบบ เพื่อลดความ

ยุ่งยากซับซ้อนและปัญหาต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นอันได้แก่ ปัญหาการปรับเทียบกล้องและปัญหาการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการควบคุมหัวหุ่นยนต์แบบใหม่โดยใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอนร่วมกับการใช้การประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัต (dynamic estimation of image Jacobian) เมื่อใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมแบบใหม่ที่มีการเรียนรู้ด้วยตัวเอง ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากตัวควบคุมมีคุณสมบัติที่ดีคือสามารถรองรับปัญหาต่างๆ ที่ซับซ้อนได้ มีการปรับตัวเองได้ และยังมีความทนทานต่อการความบกพร่องได้ดีอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบ
- 2) เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์โดยใช้วิธีการเรียนรู้ของเครื่องจักร
- 3) เพื่อพัฒนาระบบติดตามวัตถุเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์
- 4) เพื่อพัฒนาการเคลื่อนที่ของตาหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้เสมือนตามนุษย์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) กล้องที่ใช้ทำหน้าที่แทนตามนุษย์ในหัวหุ่นยนต์นี้เป็นกล้องชนิดสีจำนวน 2 ตัว
- 2) กล้องชนิดสีจะได้รับการติดตั้งอยู่บนโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ขนาด 4 มุมอิสระ (degree of freedom) ที่ซึ่งสามารถหันซ้าย-ขวา (pan) ก้ม-เงย (tilt) และเหลื่อมซ้าย-ขวา (verge)
- 3) หัวหุ่นยนต์จะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามรูปแบบต่าง ๆ ของตามนุษย์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ใช้โปรแกรมภาษา C แบบ Visual C++ 6.0 ของไมโครซอฟต์ และโปรแกรมภาษา C18 ของไมโครชิพ ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมหัวหุ่นยนต์
- 2) ใช้กล้องชนิดสีจำนวน 2 ตัวทำหน้าที่เป็นตัวตรวจรู้ (ตา) ของหุ่นยนต์
- 3) หัวหุ่นยนต์ประกอบด้วยดีซีเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัว
- 4) เทคนิคการควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องจักร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถออกแบบและสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบที่มีการเคลื่อนที่แบบตามนุษย์ได้
- 2) สามารถพัฒนาระบบควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยใช้วิธีการเรียนรู้ของเครื่องจักร

3) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยใช้วิธีการเรียนรู้ของเครื่องจักร

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 3 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขยที่ป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวถึงประวัติการวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องการควบคุมและการสร้างหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้แบบมนุษย์ในอดีต

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ การสร้าง การประกอบและการควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยคอมพิวเตอร์ ในบทนี้ยังกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆ ของหัวหุ่นยนต์ ชุดประมวลผล และการทำงานของส่วนต่างๆ อีกด้วย

บทที่ 4 กล่าวถึงเครือข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้ของเครือข่าย รวมถึงการประยุกต์กฎการเรียนรู้แบบใหม่โดยอาศัยการประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัต ซึ่งนำมาใช้ร่วมกันเป็นการเรียนรู้ของเครื่องจักร

บทที่ 5 นำเสนอผลทดสอบการควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียม โดยนำเสนอผลการทดสอบในรูปแบบของกราฟการเคลื่อนที่

บทที่ 6 เป็นการสรุปและให้ข้อเสนอแนะ

การประมวลผลภาพ

แบบมิติชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การมองเห็นแบบไวงาน (active vision) คือการมองเห็นแบบไม่หยุดนิ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับการศึกษาการมองเห็นเหมือนการมองเห็นของมนุษย์ การใช้ระบบการมองเห็นที่มีกล้องสองตาที่เคลื่อนที่ได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการมองเห็น ซึ่งอุปกรณ์การมองเห็นที่ถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์สามารถอธิบายการมองเห็นและการเคลื่อนที่ซึ่งมีผลต่อกันได้ ในบทนี้จะนำเสนอการเคลื่อนที่ของตามนุษย์ที่มีคุณลักษณะในการเคลื่อนที่ทั้งหมดห้าแบบด้วยกันคือ Saccades (หรือ SC) Smooth-pursuit (หรือ SP) Vergence (หรือ VG) Vestibulo–Ocular Reflex (หรือ VOR) และ Opto–Kinetic Reflex (หรือ OKR) นอกเหนือจากนั้นแล้วยังอภิปรายงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ที่มีกล้องสองตัวในการมองเห็น งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมหัวหุ่นยนต์ซึ่งเคลื่อนที่เหมือนตามนุษย์ และเปรียบเทียบงานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมหัวหุ่นยนต์

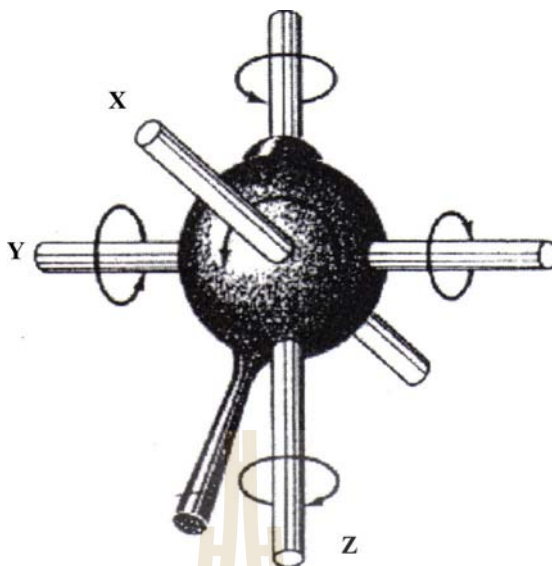
2.2 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้แบบตามนุษย์

การศึกษาการเคลื่อนที่ของตามนุษย์มีการศึกษากันอย่างมากในหลายมุมมอง การศึกษาการเคลื่อนที่ของตามนุษย์เป็นการศึกษาที่สำคัญที่สามารถทำให้เข้าใจถึงคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ของตามนุษย์และทำให้สามารถสร้างระบบการเคลื่อนที่ที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าเทียมการเคลื่อนที่ของตามนุษย์ รายละเอียดของดวงตามนุษย์สามารถดูได้จาก Wandell (1995), Mark , Bear และ Barry (1996) และ Gouras (1985)

แบบจำลองของตามนุษย์สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองสามมิติซึ่งมีแกนเสมือนตัดกันสามแกนที่จุดกึ่งกลางลูกตาคือ แกนแกนตั้ง (vertical) แกนแนนอน (horizontal) และในแนวนบิด (torsional) การเคลื่อนที่ของลูกตาทั้งสามแกนสามารถอธิบายได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 2.1)

การเคลื่อนที่ของลูกตารอบแกนแนนอน (X axis) จะเคลื่อนที่กลอกลูกตาเข้า (adducting) และกลอกลูกตาออก (abducting) จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

การเคลื่อนที่ของลูกตารอบแกนตั้ง (Y axis) เป็นการเคลื่อนที่ของลูกตาในทิศทางของมุมเงย (elevation) และมุมก้ม (depression) หรือการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของลูกตา



รูปที่ 2.1 ระนาบแกนหมุนของตา (ตาขวา) (Gouras, 1985)

การเคลื่อนที่ของลูกตารอบแกนหน้า-หลัง (anterior-posterior, Z axis) เป็นการเคลื่อนที่ระหว่างตามเข็มนาฬิกา (intorsion) และทวนเข็มนาฬิกา (extorsion)

การเคลื่อนที่ของตามนุษย์โดยส่วนมากจะเคลื่อนที่เป็นคู่ (conjugate) คือเคลื่อนที่พร้อมกันทั้งสองลูกตาในทิศทางเดียวกัน แต่ในบางกรณีลูกตาแต่ละข้างก็อาจสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้าม (disjunctive) กันได้

ในแต่ละส่วนของก้านสมองที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของตาเราเรียกว่า ระบบกลอกตา (oculomotor system) จุดหมายหลักของการกลอกตาก็คือรักษาคู่จุดกึ่งกลางภาพให้อยู่บริเวณจอตา (retinal) ซึ่งเป็นบริเวณที่สามารถมองเห็นได้อย่างรวดเร็ว แม้ว่าวัตถุที่เราสนใจจะสามารถสังเกตได้ในบริเวณมุมการมองเห็นที่กว้าง (ประมาณ 200 องศา) แต่บริเวณที่สามารถมองเห็นได้ชัดที่สุดกลับมีมุมการมองเห็นเพียงแค่ 5 องศาเท่านั้น ถ้าวัตถุที่เราสนใจอยู่นอกบริเวณรอยบ่มุมจอตา ระบบการมองเห็นก็สามารถขับเคลื่อนศีรษะ ร่างกาย หรือตาเพื่อจดจ้องไปยังวัตถุได้ ระบบกลอกตาสามารถรักษาวัตถุที่เราสนใจให้อยู่บริเวณรอยบ่มุมจอตา โดยใช้เครือข่ายประสาทควบคุมการเคลื่อนที่ที่แยกจากกันห้าแบบซึ่งก็คือ SC SP VG VOR และ OKR โดยการเคลื่อนที่แต่ละแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- SC เป็นการเคลื่อนที่ของตาแต่ละข้างจากจุดที่ตาจดจ้องอยู่ไปยังจุดจดจ้องอื่นหรือจุดที่สะดุดตาอย่างทันทีหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการกระโดดของดวงตาจากจุดจดจ้องหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง การมองภาพในขณะที่ตัวเราเคลื่อนที่นั้น ดวงตาจะ

กระโดดไปยังจุดสนใจเป็นระยะอย่างรวดเร็ว เช่น ในขณะที่นั่งรถแล้วมองวิวตาเราจะมองวิวเป็นจุดๆ และกระโดดข้ามวิวที่ผ่านมาเรื่อยๆ เป็นต้น โดยตาของมนุษย์นั้นสามารถเคลื่อนที่แบบ SC อย่างรวดเร็วได้ถึง 900 องศาต่อวินาที

- SP เป็นการมองวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ ซึ่งจะทำให้การรักษาการจจจของวัตถุให้อยู่ภายในกึ่งกลางการมองเห็นของดวงตาอยู่เสมอ ถือเป็นการเคลื่อนที่ที่มีปริมาณการขยับของดวงตานั้นน้อยกว่าการเคลื่อนที่แบบ SC ในช่วงแรกของการมองอาจทำได้ไม่คล่อง แต่จะกลอกตาได้คล่องขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเพราะระบบประสาทที่ควบคุมการเคลื่อนที่แบบ SC เริ่มปรับตัวดีขึ้น
- VG เป็นการเคลื่อนที่ของดวงตาทั้งสองข้างเพื่อรักษาแกนการมองของดวงตาทั้งสองข้างให้ตัดกับเป้าหมายในขณะที่ความลึกของเป้าหมายเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือดวงตาทั้งสองต้องจจจอยู่ที่เป้าหมายเดียวกันอยู่ตลอดเวลา
- VOR และ OKR เป็นการเคลื่อนที่เพื่อรักษาเสถียรภาพเป้าหมายในขณะที่ศีรษะกำลังเคลื่อนที่
 - VOR ใช้ประโยชน์จากข้อมูลความเร็วของศีรษะโดยรับความเร็วมาจากอวัยวะภายในศีรษะ เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของศีรษะให้มีเสถียรภาพ
 - OKR ใช้ประโยชน์จากการเลื่อน (slip) ของภาพจากรอยบุ่มจอตา (fovea) เพื่อชดเชยการเคลื่อนที่ในขณะที่ศีรษะกำลังเคลื่อนไหวนอยู่

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้มีการเคลื่อนที่สองแบบคือแบบ SC และ SP โดยลักษณะการเคลื่อนที่และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของทั้งสองแบบนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 การเคลื่อนที่แบบ SC

SC เป็นการเคลื่อนที่ของลูกตาอย่างทันทีทันใดกล่าวคือ เป็นการเคลื่อนที่แบบกระโดดจากจุดจจจหนึ่งไปยังจุดอื่นโดยเป็นการเคลื่อนที่อย่างตั้งใจหรือเรียกว่า “voluntary movement” หรือเป็นการเคลื่อนที่โดยอยู่ภายใต้อำนาจจิตใจ กล่าวคือในขณะที่วัตถุที่เคลื่อนที่เข้ามายังมุมมองของตาอย่างไม่คาดคิดการเคลื่อนที่เป็นคู่และการเคลื่อนที่อย่างทันทีของลูกตาเกิดจากระบบการเคลื่อนที่แบบ SC ด้วยความเร็ว 600 องศาถึง 900 องศาต่อวินาที การเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีการหน่วงเวลาประมาณ 0.2 วินาทีระหว่างเมื่อพบจุดภาพและขณะเริ่มการเคลื่อนที่ SC หลังจากนั้นการเคลื่อนที่จะเสร็จสิ้นภายใน 0.05 วินาที สำหรับการเคลื่อนที่แบบ SC ในแต่ละครั้งระบบจะไม่สามารถดำเนินการ SC อื่นๆ ได้จนกระทั่งเวลาผ่านไป 0.2 วินาที การเคลื่อนที่แบบ SC จะไม่คำนึงถึงพฤติกรรมของเป้าหมาย และถือเป็นการเคลื่อนที่ที่อยู่ภายใต้อำนาจจิตใจและสามารถเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีได้หรือเคลื่อนที่แม้ในขณะที่หลับตาก็ได้

ระบบการเคลื่อนที่ของลูกตาแบบ SC จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจอตาและลูกตาทั้งสองข้าง ความต้องการของการเคลื่อนที่แบบ SC คือตำแหน่งของเป้าหมายที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มองเห็นได้ซึ่งสามารถตรวจจับโดยจอตา อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งเริ่มต้นของลูกตาในขณะที่วัตถุเข้ามาอย่างรวดเร็วด้วย ตำแหน่งของจอตาและลูกตาจะถูกนำมาประมวลก่อนที่คำสั่งสำหรับ SC จะเริ่มขึ้น ก้านสมองจะต้องคอยตรวจสอบตำแหน่งของตาทั้งสองข้างเพื่อที่จะสามารถส่งคำสั่ง SC ออกมาอย่างเหมาะสม คำสั่งที่ส่งออกมาจะประกอบด้วยข้อมูลของขนาดและทิศทางของการเคลื่อนที่แบบของแต่ละลูกตา

2.2.2 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SC

การเคลื่อนที่ของตามนุษย์แบบ SC เป็นการเคลื่อนที่แบบหนึ่งที่สำคัญมากของดวงตา เพราะดวงตาของมนุษย์จะเคลื่อนที่แบบ SC อยู่ตลอดเวลา การเคลื่อนที่แบบ SC จะเริ่มต้นหลังจากที่ระบบเจอเป้าหมาย คำสั่งของ SC จะอาศัยข้อมูลตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายและค่าเริ่มต้นของดวงตา ซึ่งคำสั่งจะประกอบไปด้วยขนาดและทิศทางสำหรับการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว เพื่อนำพาวัตถุเป้าหมายมาสู่บริเวณรอยนูนของจอตา การเคลื่อนที่แบบ SC เป็นการเคลื่อนที่ๆ เป็นพื้นฐานของการสร้างหัวหุ่นยนต์ มีผู้ทำการวิจัยและทำการสร้างหัวหุ่นยนต์ให้มีการเคลื่อนที่แบบ SC เป็นจำนวนมาก

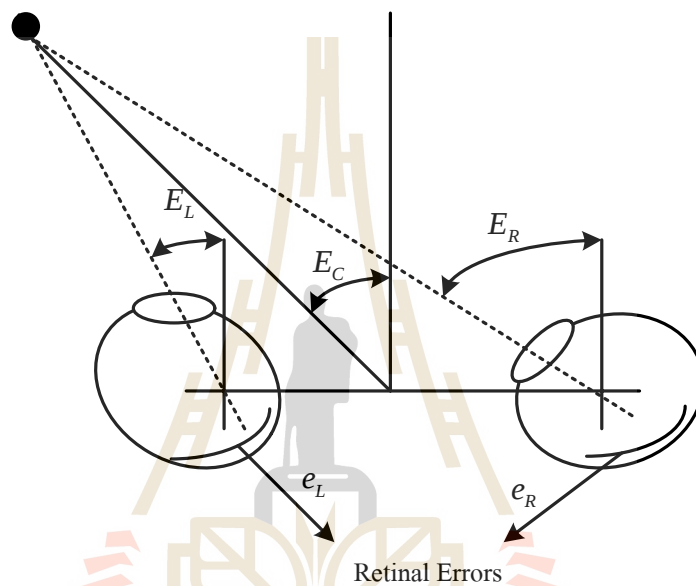
Wessler (1995) ได้สร้างการเคลื่อนที่แบบ SC บนหุ่นยนต์ชื่อ Reubens (Breazeal, Scassellati and Williamson, 1998) และได้สร้างตารางการเคลื่อนที่แบบ SC ขนาด 15 x 13 ช่อง โดยในแต่ละช่องของตารางมีขนาด 32 x 16 จุภาพ ค่าที่บรรจุอยู่ในแต่ละช่องประกอบด้วยคำสั่งของมอเตอร์สำหรับการหันและเงยเพื่อที่จะทำให้สามารถจดจ้องไปยังวัตถุได้ การทำงานอันดับแรกคือเมื่อสามารถระบุวัตถุเป้าหมายได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการหันและเงยจะสามารถคำนวณได้โดยการประมาณแบบเชิงเส้น (bilinear interpolation) จากตาราง 4 ช่องที่อยู่รอบๆ เป้าหมายที่กำหนดนั้น ความเร็วจากเป้าหมายจะเป็นตัวทำนายตำแหน่งที่แท้จริงของเป้าหมาย ด้วยเหตุนี้ค่าที่ได้จากตารางการเคลื่อนที่แบบ SC จะรวมเอาข้อมูลของความเร็วของเป้าหมายไว้ด้วย การเลือกค่าจากตารางการเคลื่อนที่แบบ SC จะทำในระหว่างที่มองเป้าหมาย ในขณะที่เป้าหมายไม่ได้เคลื่อนที่และเป้าหมายอยู่ในบริเวณที่กล้องสามารถตรวจจับได้ วิธีนี้จำเป็นต้องทำการปรับเทียบ (calibration) กล้อง ซึ่งเป็นวิธีที่ยุ่งยากและยังมีความแม่นยำน้อยอีกด้วย

Sharma และ Shrinivasa (1996) ได้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบ Self-Organizing Invertible Map (SOIM) ในการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ SC โดยไม่จำเป็นต้องมีการปรับเทียบ ใช้กล้องสองตัวและการเรียนรู้ยังเป็นแบบออฟไลน์

Peng และคณะ (2000) ได้สร้างหัวหุ่นยนต์ชื่อ ISAC การเคลื่อนที่แบบ SC และ SP จะพิจารณาการส่งผ่านพิกัดของเป้าหมายในรูปภาพไปยังคำสั่งของมอเตอร์ โดยการส่งผ่านฟังก์ชัน

จะใช้เครือข่ายประสาทเทียมซึ่งสามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นได้อีกทั้งยังไม่ต้องใช้การปรับเทียบกล้องอีกด้วย และยังสามารถฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียมได้ทั้งแบบออฟไลน์และแบบออนไลน์อีกด้วย แต่ขั้นตอนการเรียนรู้ยังอาศัยเวลานาน

Lee และ Galiana (2004) ได้สร้างแบบจำลองสองด้าน (bilateral model) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่แบบ SC และ SP โดยอาศัยพิกัดของอินพุตจากกล้องทั้งสองกล้องโดยใช้โปรแกรม MATLAB จำลองผล โดยพิกัดของอินพุตสามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบการมองของตามนุษย์ที่มีความสัมพันธ์กัน (Lee และ Galiana, 2004)

จากรูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์จะได้สมการพิกัดดังนี้

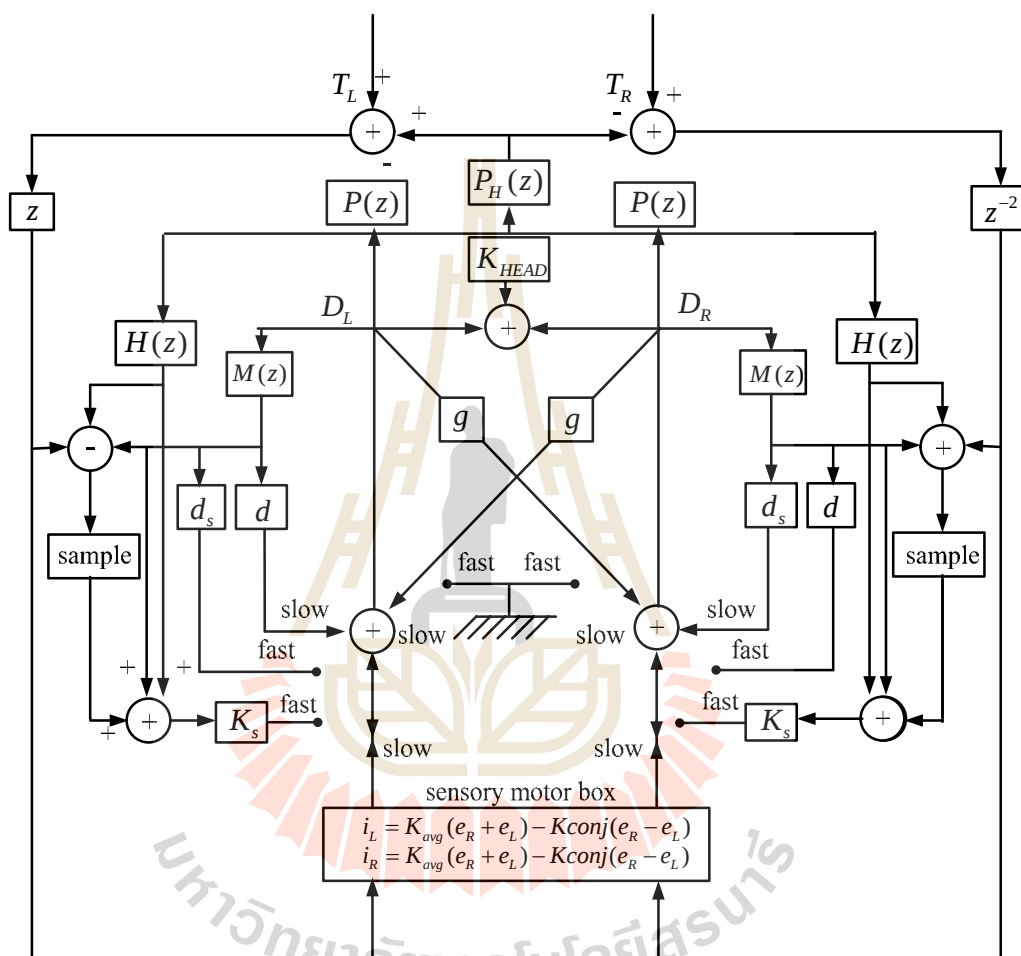
$$E_{differrnce} = E_{conj} = 0.5(E_R - E_L) \quad (2.1)$$

$$E_{common} = E_{vreg} = -(E_R + E_L) \quad (2.2)$$

จะได้การแปลงดังนี้

$$i_R - i_L = f(e_R - e_L); i_R + i_L = g(e_R + e_L) \quad (2.3)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นสามารถสร้างแบบจำลอง Oculomotor Control System (OCS) สำหรับควบคุมหัวหุ่นยนต์ได้โดยที่ i_R และ i_L ถูกส่งผ่านจาก e_R และ e_L ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยแบบจำลอง OCS นี้สามารถติดตามเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและยังมีความผิดพลาดน้อยอีกด้วย



รูปที่ 2.3 แบบจำลอง OCS (Lee and Galiana, 2004)

ในการวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมหัวหุ่นยนต์แบบ SC นั้น ส่วนใหญ่ใช้การเปรียบเทียบและการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์เพื่อทำการควบคุม เช่น Neubert และ Ferrier (2002) ใช้วิธีเปรียบเทียบกล้องและหาจำลองจลนศาสตร์ของหัวหุ่นยนต์เพื่อควบคุม Gardel และคณะ (2002) ใช้วิธีการเปรียบเทียบของหัวหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบภาพที่ได้รับมาจากกล้องแต่กระบวนการดังกล่าวต้องทำแบบออฟไลน์ David และ Myron (2003) ใช้การเปรียบเทียบกล้องเพื่อควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้มองตามการเคลื่อนที่ของเป้าหมาย เป็นต้น ซึ่งการเปรียบเทียบและการหา

แบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ต้องอาศัยการวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนอีกทั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดอีกด้วย เพราะในกรณีที่การสร้างหัวหุ่นยนต์มีข้อผิดพลาดเช่น ขนาดของอุปกรณ์ไม่ตรงกับที่คำนวณไว้ เป็นต้น ซึ่งข้อผิดพลาดดังกล่าวทำให้การหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ผิดพลาดทำให้การควบคุมหัวหุ่นยนต์ผิดพลาดไปด้วย

2.2.3 การเคลื่อนที่แบบ SP

ระบบการเคลื่อนที่ลูกตาแบบ SP เป็นการเคลื่อนของดวงตาที่แม่นยำสำหรับการจดจ้องวัตถุเป้าหมายให้อยู่บริเวณรอยนูนจอตาหลังจากที่สามารถหาพิกัดของวัตถุได้แล้ว ระบบการเคลื่อนที่แบบ SP นี้ใช้กระบวนการติดตามแบบคงสภาพเพื่อให้เหมือนกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในสภาวะปกติถ้าลูกตาทั้งสองข้างและเป้าหมายอยู่กับที่ เราสามารถรักษาสภาพการจดจ้องนั้นด้วยความรู้สึก โดยไม่มีการเคลื่อนที่แบบ SC แต่อย่างไรก็ตามทั้งหมดนี้เป็นการกระทำที่ต่อเนื่องซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของลูกตาทั้งสองข้างที่ละน้อยโดยไม่รู้สึกตัว ในขณะนั้นดวงตาก็ยังคงจดจ้องเป้าหมายต่อไป การเคลื่อนที่แบบ SP เป็นการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะพิเศษคือ เป็นการเคลื่อนที่แบบเลื่อน (drift) ไปเป็นแนวแบบช้าๆ และสั้นไปอย่างรวดเร็ว การเลื่อนของรอยนูนจอตาเล็กน้อยรวมกับการสั้นไหวในปริมาณน้อยๆ ของการเคลื่อนที่แบบ SC จะนำพาเป้าหมายสู่บริเวณรอยนูนจอตา เพราะการสั้นของดวงตาเป็นการจดจ้องเป้าหมายให้อยู่บริเวณศูนย์กลางได้ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาผู้มองยังคงอยู่นิ่งๆ ในขณะที่วัตถุเป้าหมายเคลื่อนที่ สมองจะคำนวณความเร็วและทิศทางของภาพที่อยู่ในจอตาเพื่อใช้ในการจดจ้องให้วัตถุเป้าหมายอยู่ในรอยนูนจอตา ระบบการเคลื่อนที่ดวงตาแบบ SP จะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อวัตถุเป้าหมายอยู่ในบริเวณจอตา และระบบการเคลื่อนที่แบบ SP จะทำงานไม่ได้ถ้าอยู่ในสภาวะที่มีด

2.2.4 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SP

SP เป็นการเคลื่อนที่ที่จดจ้องเป้าหมายให้อยู่บริเวณรอยนูนจอตาหลังจากที่หาตำแหน่งของเป้าหมายได้ SP เป็นการเคลื่อนที่ที่ช้าและจำกัดบริเวณกว่าแบบ SC อย่างมาก แต่ให้ความแม่นยำสูงกว่าการเคลื่อนที่แบบ SC หลักการเคลื่อนที่แบบ SP สามารถอธิบายอย่างคร่าวๆ คือ การหาตำแหน่งและความเร็วของวัตถุเป้าหมายรวมกับตัวช่วยที่ใช้ในการทำนาย โดยจะใช้ตำแหน่งและความเร็วเพื่อเป็นแนวทางการเคลื่อนที่ของกล้องที่ใช้แทนดวงตา แบบจำลองระบบการเคลื่อนที่แบบ SP ถูกนำเสนอใน Krauzlis และ Lisberger (1989) Lisberger, Morris และ Tychsen (1987) มีผู้วิจัยเกี่ยวกับการทำการควบคุมแบบ SP อยู่มากมาย การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SP นี้คือการรักษาดำแหน่งของวัตถุเป้าหมายให้อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางภาพ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมหัวหุ่นยนต์แบบ SP มากมายดังนี้

Brooks และคณะ (1998) สร้างการเคลื่อนที่แบบ SP บน COG โดยอาศัยพื้นฐานสหสัมพันธ์ของภาพ (image correlation) วิธีนี้ใช้การลำดับ (priori) การรู้จักวัตถุเป้าหมายเพื่อหา

แบบจำลองของภาพและหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายบนภาพ Coombs และ Brown (1993) Rougeaux และคณะ(1994) Yamato (1998) Rougeaux และ Kuniyoshi (1996) Westelius (1995) Pahlavan, Uhlin และ Eklundh (1996) ใช้ความไม่เสมอกันของกล้องสองตา (binocular disparity) โดยวิธีนี้ใช้เทคนิคการกรองความไม่เป็นคู่ศูนย์ (zero disparity filter) เพื่อหาตำแหน่งของภาพ โดยวิธีนี้ทำให้การเคลื่อนที่ดียิ่งขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้การจัดลำดับ Laplante และ Stoyenko (1996) Murray (1995) Bradshaw และคณะ (1994) ใช้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ (motion analysis) โดยวิธีนี้จะหาเป้าหมายจากข้อมูลการไหลของสายตา (optical flow) โดยที่การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของภาพทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบต่างๆของภาพได้ ซึ่งวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมานี้มีวิธีการคำนวณซึ่งค่อนข้างยุ่งยากเป็นอย่างมากอีกทั้งยังต้องอาศัยการปรับเทียบของกล้องซึ่งใช้แทนดวงตาอีกด้วย

2.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรูปแบบการเคลื่อนที่แบบต่างๆ ของตามนุษย์ รวมถึงงานวิจัยต่างๆ ที่มีผู้นิพนธ์ทำการศึกษา ค้นคว้าเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบ SP และ SC นอกจากนี้ผู้นิพนธ์บางท่านยังทำการสร้างหุ่นยนต์เพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ดังกล่าวด้วย โดยวิธีการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ของทั้งสองแบบนี้แตกต่างกันไป เช่น บางวิธีใช้การปรับเทียบกล้อง บางวิธีใช้การหาแบบจำลองของหุ่นยนต์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีความยุ่งยากและซับซ้อน บางวิธีใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อลดขั้นตอนที่ซับซ้อนดังกล่าว เป็นต้น

บทที่ 3

โครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ PTV

3.1 บทนำ

การสร้างหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้แบบตามมนุษย์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่จะทำให้โครงสร้างเหมือนของศีรษะมนุษย์นั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากว่าโครงสร้างของศีรษะมนุษย์นั้นมีมุมอิสระเป็นจำนวนนับไม่ถ้วน โดยปกติในงานวิจัยต่างๆ ไปแล้วจะใช้โครงสร้างที่ไม่ยุ่งยาก โดยมีมุมอิสระที่ไม่มากนัก กล่าวคือให้มีลักษณะการเคลื่อนที่หลัก เช่น การก้ม การเงย การหันซ้าย การหันขวา เป็นต้น ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถออกแบบสร้างได้ด้วยมุมอิสระที่ไม่มากนัก

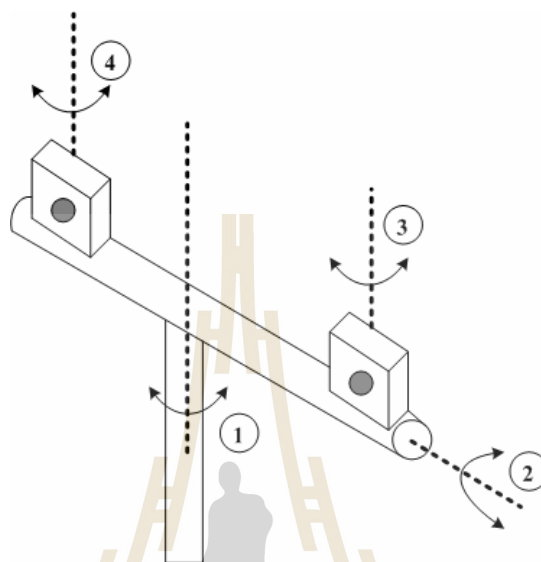
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดการสร้างหัวหุ่นยนต์ PTV (Pan-Tilt-Verge) โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบ การขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆ รวมไปถึงจนถึงระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV โดยขั้นตอนการสร้างทั้งหมดอาศัยเครื่องมือที่หาได้ในโรงเครื่องมือกลทั่วไป อีกทั้งอุปกรณ์และวงจรควบคุมต่างก็จัดทำขึ้นเองโดยทั้งสิ้น มีเพียงแต่มอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์ (DC servo motor) ที่จำเป็นต้องอาศัยจากต่างประเทศเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ

3.2 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างหัวหุ่นยนต์

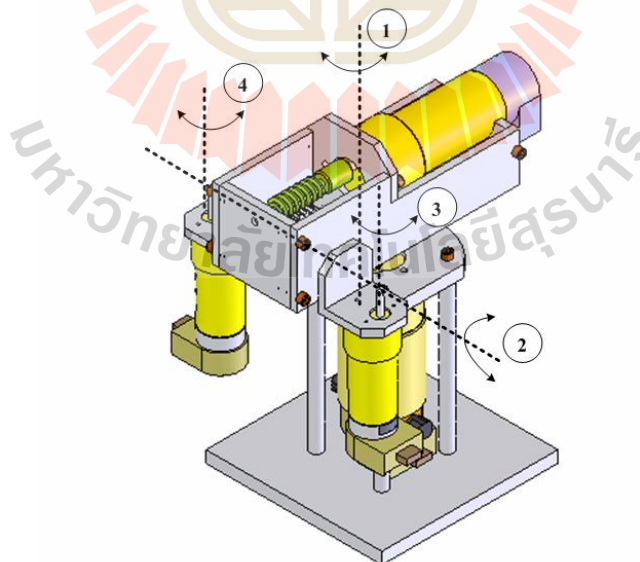
ในการออกแบบและสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบนั้น หัวหุ่นยนต์ต้นแบบต้องมีลักษณะการทำงานหรือการเคลื่อนที่ๆ ใกล้เคียงกับโครงสร้างของศีรษะมนุษย์มากที่สุด อีกทั้งต้องคำนึงถึงการใช้วัสดุที่น้อยที่สุดเพราะการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มากเป็นการเพิ่มเวลาและขั้นตอนในการขึ้นรูป วัสดุแต่ละชิ้นต้องสามารถหาได้ง่าย การขึ้นรูปชิ้นงานต้องทำได้อย่างไม่ยุ่งยาก โดยสามารถใช้เครื่องมือทางกลทั่วไปก็สามารถขึ้นรูปได้ และสุดท้ายต้องง่ายต่อการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันอีกด้วย ดังนั้นจากข้อพึงประสงค์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการออกแบบและการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ นั้นเน้นที่ความง่ายเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งอาจนำมาซึ่งค่าความผิดพลาดต่างๆ ตามมา เช่น ความถูกต้องแม่นยำของขนาดชิ้นงาน ขนาดรูหรือรูเกลียวที่คลาดเคลื่อน เป็นต้น

จากจุดประสงค์ที่ต้องออกแบบหัวหุ่นยนต์ให้มีลักษณะโครงสร้างคล้ายศีรษะมนุษย์ ดังนั้นหัวหุ่นยนต์ที่ออกแบบจะต้องมีพฤติกรรมเคลื่อนที่พื้นฐานได้แก่ การก้ม การเงย หันซ้าย หันขวาและการขยับลูกตาซ้ายขวา จึงทำให้หัวหุ่นยนต์ต้นแบบที่ได้มีโครงสร้างการเคลื่อนที่ 4 มุมอิสระ (4 degree of freedom) โดยที่มุมอิสระแรกใช้หันซ้ายและหันขวา มุมอิสระที่สองใช้ก้มและ

เงย มุมอิสระที่สามและสี่เป็นตาข่ายและตาขาวตามลำดับ โดยในแต่ละมุมอิสระมีตัวขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง ที่มีขนาดและกำลังขับเคลื่อนที่ต่างกัน ส่วนกล้องชนิดสีแบบ CMOS ขนาดเล็กจำนวน 2 ตัวถูกติดตั้งในตำแหน่งที่แทนดวงตา



รูปที่ 3.1 มุมอิสระของหัวหุ่นยนต์



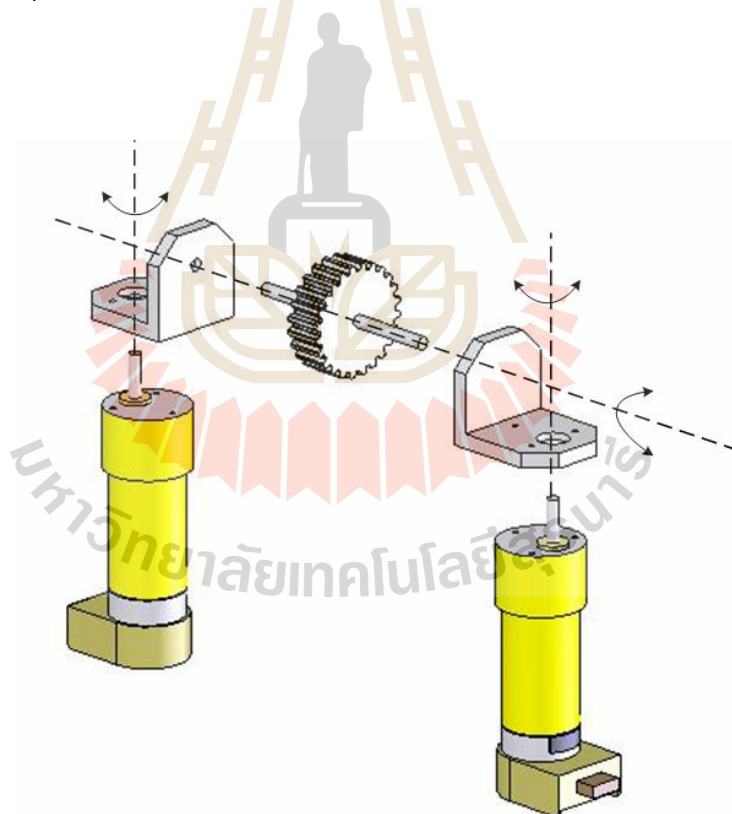
รูปที่ 3.2 ภาพจำลองหัวหุ่นยนต์ต้นแบบพร้อมการติดตั้งมอเตอร์ 4 ตัว

3.2.1 โครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ PTV

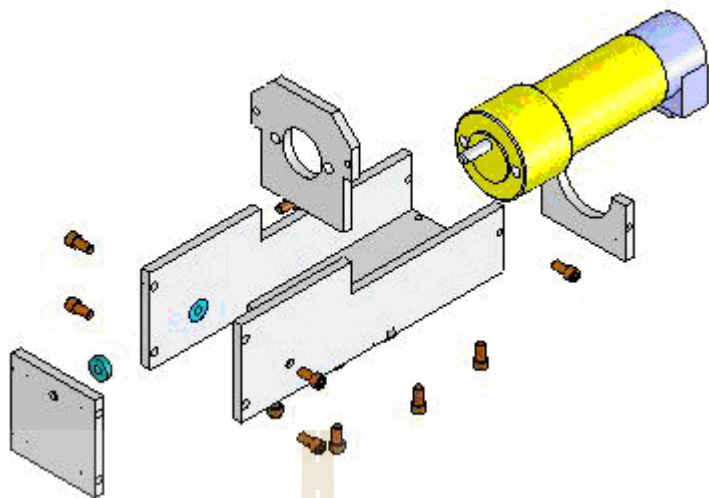
จากภาพแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ที่ได้จะถูกนำมากระจายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถแสดงรายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วนให้ดียิ่งขึ้น รูปที่ 3.3 แสดงการกระจายชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์รวมถึงภาพจำลองตัวขับเคลื่อนในส่วนที่ใช้สำหรับการก้มและการเงย ที่ปลายของมอเตอร์แต่ละตัวถูกติดตั้งกลิ้งเพื่อใช้แทนดวงตา โดยในส่วนที่ใช้สำหรับการก้มและการเงยนั้นจะใช้ชุดเฟืองเกียร์ตัวหนอนที่มีอัตราทด ในรูปที่ 3.3 ได้แสดงเฉพาะตัวเฟืองที่มีแกนทั้งสองข้างยื่นต่อกับอะลูมิเนียมฉากที่ใช้ในการยึดตัวขับเคลื่อนกลิ้ง

รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์รวมถึงภาพจำลองตัวขับเคลื่อน โดยตัวขับเคลื่อนตัวนี้จะถูกต่อเข้ากับเกียร์ตัวหนอนเพื่อใช้ขับเคลื่อนในส่วนที่กล่าวมาข้างต้น

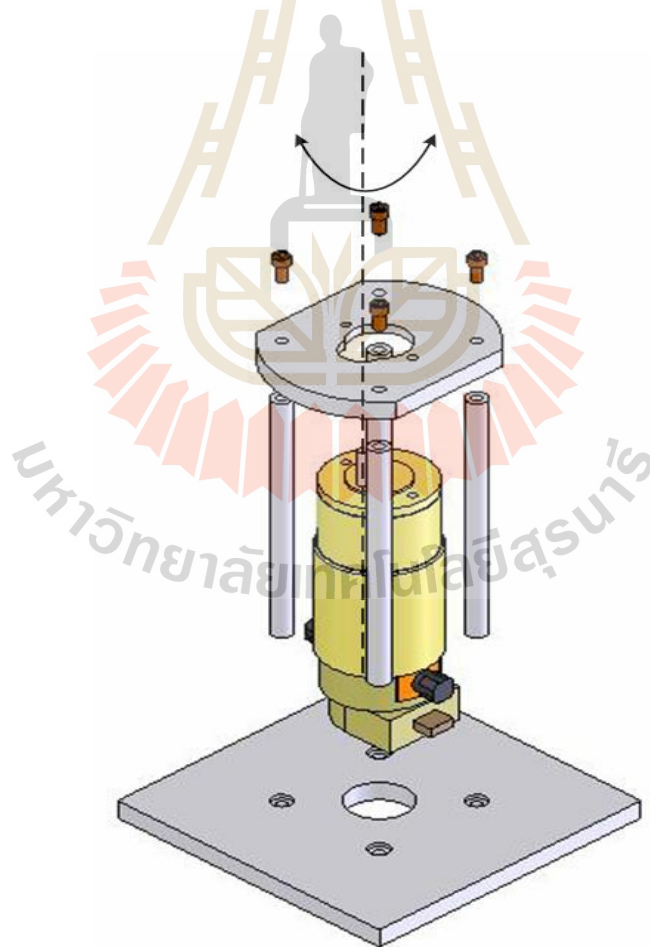
รูปที่ 3.5 แสดงการกระจายชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์รวมถึงภาพจำลองตัวขับเคลื่อนในบริเวณฐานของหัวหุ่นยนต์ ในส่วนฐานนี้ตัวขับเคลื่อนทำหน้าที่หันซ้าย-ขวา และที่ปลายของตัวขับเคลื่อนจะเป็นจุดเชื่อมต่อกับบริเวณส่วนด้านบนดังที่กล่าวมา ซึ่งส่วนนี้เองที่มีการรับน้ำหนักมากที่สุด



รูปที่ 3.3 การกระจายชิ้นส่วนของภาพจำลองหัวหุ่นยนต์



รูปที่ 3.4 รูปการกระจายชิ้นส่วนของภาพจำลองหัวหุ่นยนต์ (ต่อ)



รูปที่ 3.5 รูปการกระจายชิ้นส่วนของภาพจำลองหัวหุ่นยนต์ (ต่อ)

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง

การเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้างชิ้นส่วนหัวหุ่นยนต์ต้นแบบนั้น จะเลือกใช้แบบที่หาซื้อได้ง่ายหรือออกแบบทำขึ้นได้ง่าย เช่น ชิ้นส่วนต่างๆ ที่นำมาประกอบส่วนใหญ่เป็นแผ่นอะลูมิเนียมที่หาซื้อได้ง่ายและขึ้นรูปได้ง่ายกว่าเหล็ก เป็นต้น

แผ่นอะลูมิเนียม

วัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์เกือบทั้งหมดจะเลือกใช้อะลูมิเนียมที่มีขนาดตามแบบที่ออกแบบมา ซึ่งมีอยู่เพียงขนาดเดียวคือแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนา 0.6 มิลลิเมตร แผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นส่วนประกอบนี้มีข้อดีหลายๆ อย่าง เช่น แข็งแรง น้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม มีความยืดหยุ่นดี เจาะรู ทำเกลียว ขึ้นรูปได้ง่าย และราคาไม่สูงมากนัก เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังที่กล่าวมานี้เป็นข้อดีสำหรับการนำมาประกอบเป็นหัวหุ่นยนต์เป็นอย่างมาก

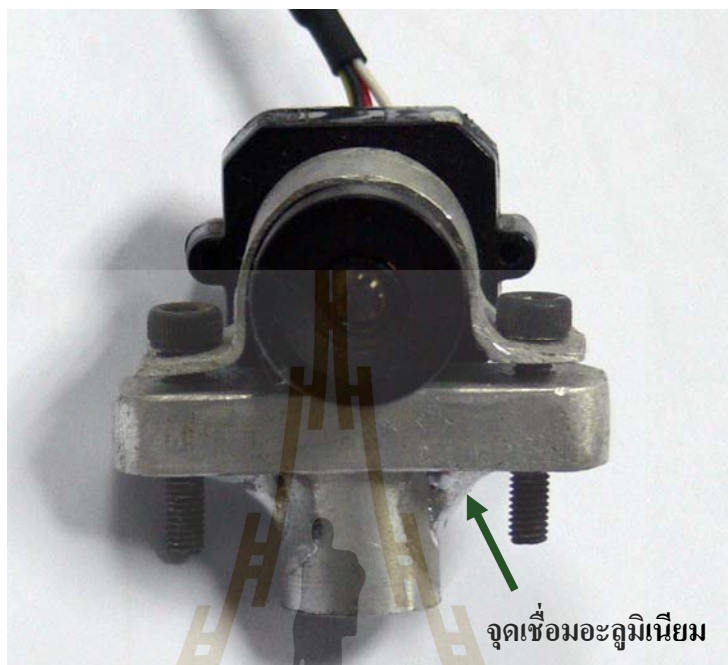
การขึ้นรูปและการประกอบชิ้นงาน

การขึ้นรูปแผ่นอะลูมิเนียมนั้นเริ่มจากการตัดแผ่นอะลูมิเนียมให้มีขนาดใหญ่กว่าในแบบเล็กน้อย จากนั้นนำไปกัดทีละด้านเพื่อให้ได้แผ่นอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมตามแบบ โดยที่ทั้งสี่ด้านทำมุมตั้งฉากกันพอดี ซึ่งแผ่นอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมที่ได้นี้จะป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของชิ้นส่วนที่ออกแบบไว้ว่าโครงร่างของชิ้นส่วนนั้นๆ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปสี่เหลี่ยมชนิดใด จากนั้นนำชิ้นส่วนอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมที่ได้ไปกัดหรือตัดเพื่อให้ได้รูปทรงตามออกแบบไว้ จากนั้นนำชิ้นส่วนที่ได้ไปเจาะรูและทำเกลียวตามลำดับ ส่วนที่เป็นตัวยึดคล้องกับตัวขับเคลื่อนนั้นจำเป็นต้องเชื่อมอะลูมิเนียมเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.6 การเชื่อมต้องใช้เครื่องเชื่อมชนิดพิเศษ เนื่องจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้เร็วกว่าเหล็ก ดังนั้นจะไม่สามารถใช้เครื่องเชื่อมเหล็กได้ ในโครงสร้างหัวหุ่นยนต์จะมีชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กอยู่ 1 ชิ้นคือจุดหมุนบริเวณคอแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งจุดหมุนบริเวณนี้รับน้ำหนักมากกว่าจุดอื่น จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงกว่าอะลูมิเนียม

ในการยึดชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันนอกจากการใช้เชื่อมแล้วจะใช้น็อต (screw) ในการยึดไม่ว่าจะเป็นระหว่างอะลูมิเนียมกับอะลูมิเนียมหรือระหว่างอะลูมิเนียมกับมอเตอร์เซอร์โว กระแสตรง โดยเพื่อความสะดวกนั้นจะใช้ขนาดเกลียวเดียวกันทั้งหมดคือขนาด M3 x 0.5 มิลลิเมตร

หัวหุ่นยนต์ต้นแบบนี้มีมุมอิสระทั้งหมด 4 มุม โดยมี 3 มุมอิสระที่ต่อตรงกับการหมุนของมอเตอร์มุมเหล่านี้ไม่มีอัตราทด ดังนั้นเมื่อมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงหมุน แกนก็หมุนตามด้วยอัตราเท่ากันกล่าวคือเมื่อมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงหมุน 10 องศา แกนก็จะหมุนไป 10 องศาด้วย แต่มีอีก 1 มุมอิสระคือมุมอิสระที่ใช้จะใช้ชุดเฟืองและเกลียวตัวหนอนเป็นตัวทำให้หมุน ซึ่งชุด

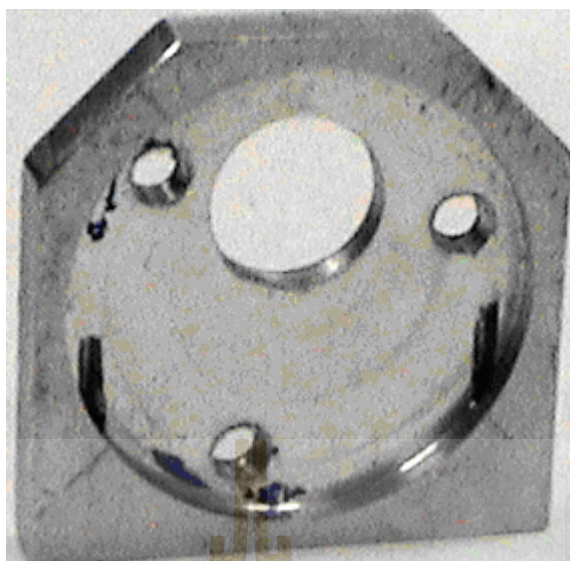
จับเฟืองและเกลียวตัวหนอนนี้หาได้ทั่วไปหรือสามารถคำนวณและสร้างโดยการกัดจากช่างที่ชำนาญงาน



รูปที่ 3.6 การยึดกลิ้งและจุดเชื่อมอะลูมิเนียม

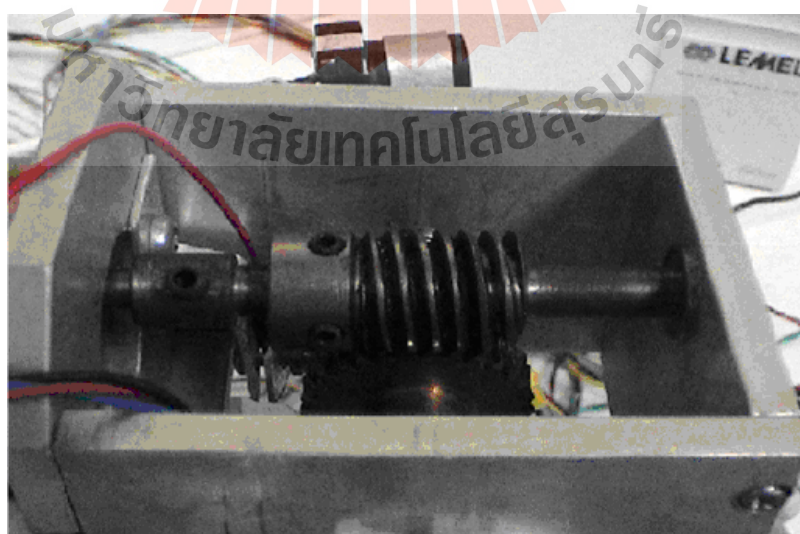


รูปที่ 3.7 จุดหมุนบริเวณคอ

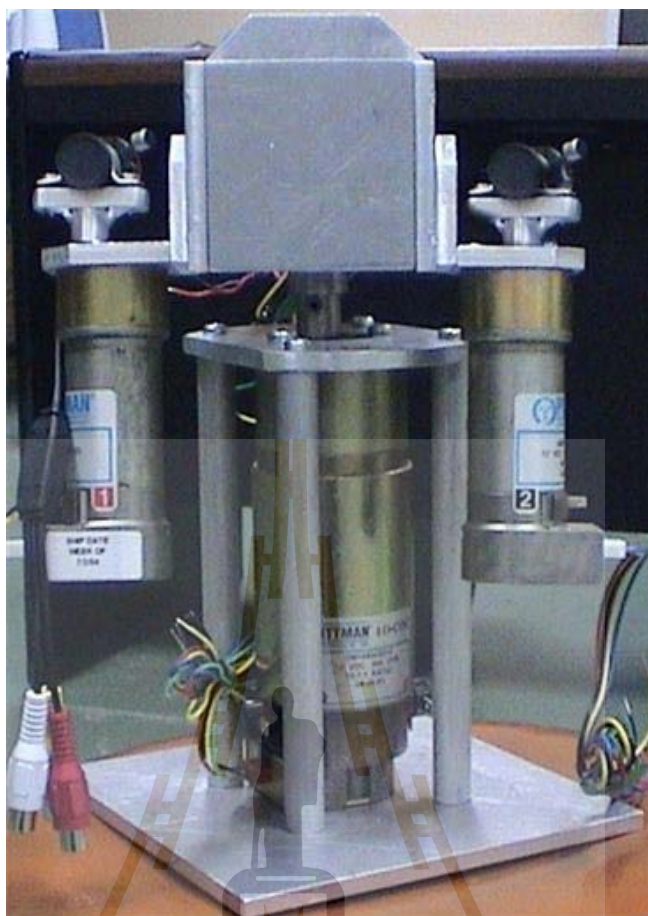


รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป

รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจากการ กัด เจาะและกลึง อะลูมิเนียม รูปที่ 3.9 แสดงการประกอบชิ้นส่วนของชุดเฟืองและเกลิยตัวหนอน เฟืองและเกลิยตัวหนอนนี้จะมีการขบกันอยู่ โดยที่ตามปกติแล้วจะมีส่วนของช่องว่างระหว่างเฟืองและเกลิยตัวหนอน ซึ่งช่องว่างดังกล่าวถ้ามีมากเกินไปจะส่งผลต่อการควบคุม กล่าวคือความแม่นยำในการควบคุมจะน้อยลงในระหว่างการกัมหรือการเร่ง



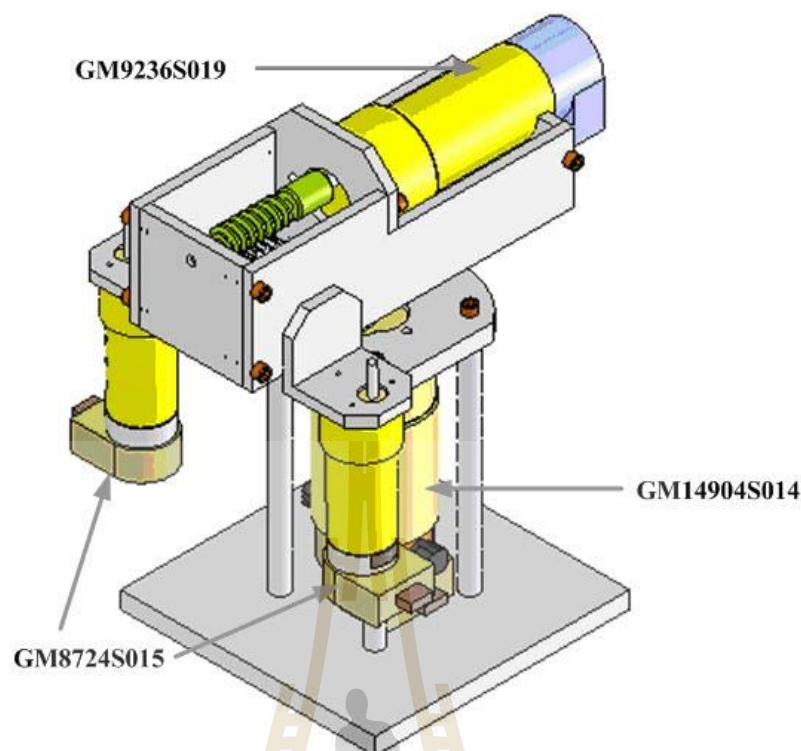
รูปที่ 3.9 ชุดเฟืองและเกลิยตัวหนอน



รูปที่ 3.10 หัวหุ่นยนต์ที่ประกอบเสร็จแล้ว

มอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรง

มอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนหัวหุ่นยนต์นั้นมีทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน โดยมีขนาดที่แตกต่างกันไปเพราะในแต่ละมุมอิสระนั้นให้แรงขับเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน มอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงแต่ละตัวจะมีชุดเฟืองขับ (gear box) ประกอบอยู่ด้วยเพื่อเพิ่มแรงบิด อีกทั้งยังมีตัวเข้ารหัส (encoder) เพื่อบอกตำแหน่งสำหรับมอเตอร์สำหรับการควบคุม โดยตัวขับเคลื่อนทั้งหมดมี 4 ตัว 3 รุ่น โดยมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนกล้อง (ดวงตา) ใช้ยี่ห้อ PITTMAN รุ่น GM8724S015 2 ตัว มอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงที่ใช้ในการก้มและเงยใช้ยี่ห้อ PITTMAN รุ่น GM9236S019 1 ตัว และมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงที่ใช้ในการหันซ้ายและขวาใช้ยี่ห้อ PITTMAN รุ่น GM14904S014 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 มอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงรุ่นต่างๆ ที่ติดตั้งบนหัวหุ่นยนต์ PTV

3.2.3 ปัญหาหลังจากการประกอบชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์

หลังจากการประกอบหัวหุ่นยนต์เสร็จเรียบร้อยแล้ว เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบที่ได้ออกแบบไว้พบว่า มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น

1. ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากอุปกรณ์การวัด
2. ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือซึ่งมีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นส่วน
3. ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการใช้สายตาสั่งของผู้ควบคุมเครื่องมือต่างๆ
4. ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเชื่อมวัสดุที่ไม่ได้แนวระนาบ

ดังนั้นระยะต่างๆ หลังจากการประกอบเสร็จอาจผิดพลาด ข้อต่อหรือจุดหมุนต่างๆ มีระยะห่าง (clearance) ทำให้เวลาหมุนข้อต่อวิธีการหมุนไม่ได้แนวระนาบตั้งฉาก ชุดเฟืองและเกสียวตัวหนอนขบกันไม่พอดี รวมถึงในชุดเฟืองของตัวขับเคลื่อนเองก็มีระยะห่างระหว่างเฟืองต่อเฟือง เป็นต้น ความผิดพลาดรวมดังกล่าวข้างต้นเป็นผลให้ในการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์จะมีความผิดพลาดในแบบจำลองที่ได้ค่อนข้างมาก

3.3 ชุดควบคุมหัวหุ่นยนต์

ในการควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่นั้นสามารถทำได้โดยควบคุมการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงให้เคลื่อนที่ ซึ่งการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงจะแยกอิสระจากกัน กล่าวคือมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง 1 ตัวจะใช้ชุดควบคุม 1 ชุด โดยที่ชุดควบคุมจะประกอบไปด้วยชุดประมวลผลและชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งในชุดประมวลผลนั้นจะบรรจุโปรแกรมซึ่งสามารถเขียนสั่งงานได้อย่างอิสระเพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ชุดประมวลผลจะรับตำแหน่งของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงมาจากวงจรถอดรหัส โดยที่วงจรถอดรหัสนี้จะรับข้อมูลตำแหน่งการหมุนจากตัวเข้ารหัสของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง จากนั้นชุดประมวลผลจะทำการประมวลผลเพื่อสั่งให้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไปสั่งงานตัวขับเคลื่อนต่อไป

3.3.1 ชุดประมวลผล

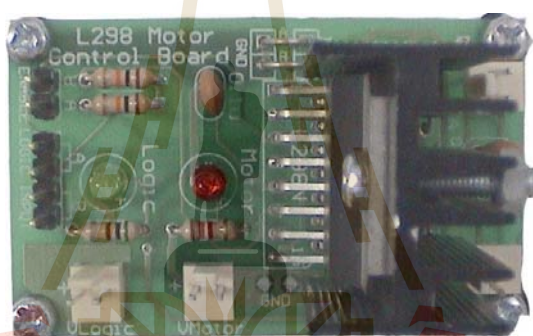
ชุดประมวลผลที่ใช้นี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือตัวประมวลผลซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ของบริษัท Microchip ซึ่งรหัสของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F458 ซึ่งเป็นที่นิยมและมีประสิทธิภาพในการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเป็นอย่างมาก เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวมีความสามารถในการผลิตสัญญาณ Pulse Width Modulation (หรือ PWM) เพื่อใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงได้ อีกทั้งยังมีความเร็วในการคำนวณทางคณิตศาสตร์สูง การทำงานของชุดประมวลผลนั้นจะขึ้นอยู่กับชุดคำสั่งที่ถูกบรรจุอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ และด้วยคุณสมบัติดังที่กล่าวมารวมถึงคุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งคือสามารถเขียนทับโปรแกรมเดิมได้ถึง 1,000 ครั้งทำให้การพัฒนาที่มีความยืดหยุ่นและอ่อนตัวมากยิ่งขึ้น รูปที่ 3.12 แสดงชุดประมวลผลที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.12 ชุดประมวลผล

3.3.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นจะใช้วงจรรวม (integrated circuit หรือ IC) เบอร์ L298N โดยมีคุณสมบัติเด่นคือสามารถขับกระแสสูงสุดได้ถึง 2 แอมแปร์ต่อช่อง ซึ่งตัววงจรรวมเองมีช่องการทำงาน 2 ช่อง ดังนั้นสามารถขับมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงได้ถึง 2 ตัวในชุดขับเคลื่อน 1 ชุด นอกจากจะขับกระแสได้สูงแล้วชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงชุดนี้สามารถสั่งงานได้ง่ายด้วย กล่าวคือสามารถควบคุมทิศทางหมุน การหยุด และการหยุดแบบกะทันหันด้วยสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถควบคุมความเร็วด้วยสายสัญญาณเพียงเส้นเดียว ทำให้ลดความยุ่งยากในการเชื่อมต่อวงจรเป็นอย่างมาก ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงจะรับสัญญาณอินพุตจากชุดประมวลผลทั้งสัญญาณทิศทางและสัญญาณความเร็ว ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.13



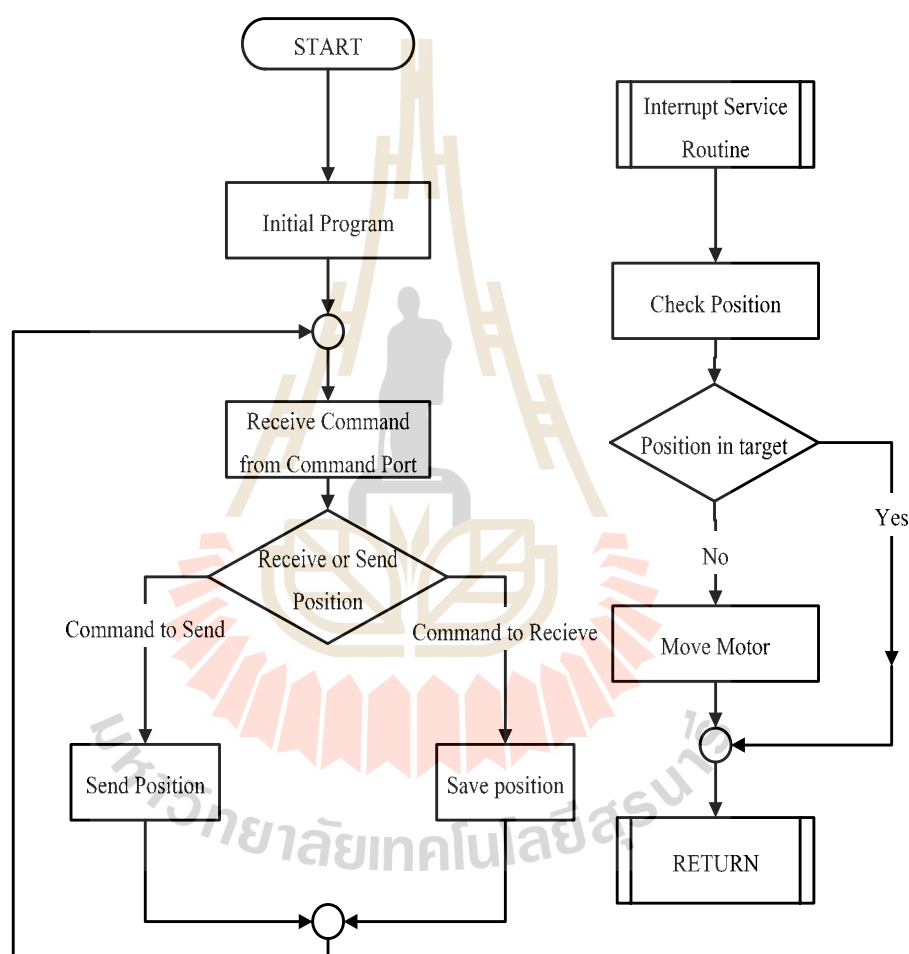
รูปที่ 3.13 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

3.3.3 การควบคุมหัวหุ่นยนต์จากชุดประมวลผล

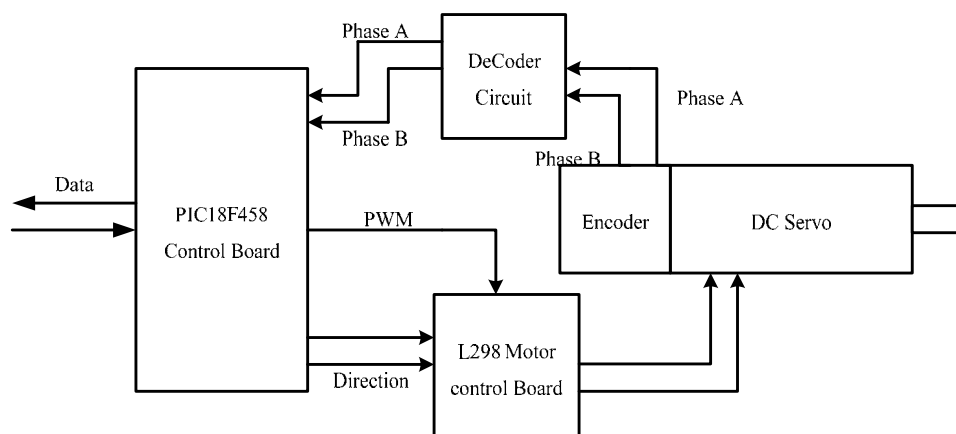
การควบคุมหัวหุ่นยนต์จากชุดประมวลผลนั้นจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมที่บรรจุอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยชุดประมวลผลจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด โดยการพัฒนาตัวโปรแกรมนั้นสามารถพัฒนาได้บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั่วไป การพัฒนาโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลนั้นยังสามารถพัฒนาได้หลากหลายภาษาทั้งภาษาระดับสูง ภาษาระดับกลาง และภาษาระดับต่ำ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกทำการพัฒนาด้วยภาษาระดับกลางคือภาษา C ซึ่งเป็นชุดพัฒนาเป็นของบริษัทผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์เอง เพราะช่วยลดความซับซ้อนของตัวโปรแกรมได้ดีกว่าการใช้ภาษาระดับต่ำ

การทำงานของโปรแกรมนั้นจะแยกเป็นสองตัวคือส่วนหลัก (main) และส่วนรoutines แบบบริการขอขัดจังหวะ (Interrupt Service Routine หรือ ISR) โดยที่ส่วนหลักของโปรแกรมจะทำหน้าที่รับตำแหน่งตัวขับเคลื่อนผ่านอินพุตของบอร์ดและส่งตำแหน่งตัวขับเคลื่อนผ่านเอาต์พุต

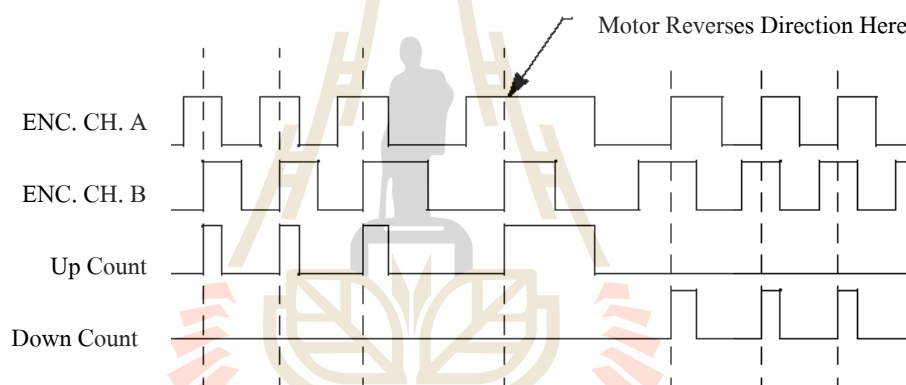
โดยข้อมูลตำแหน่งที่รับและส่งนั้นจะมาจากคอมพิวเตอร์ และในส่วนที่เป็น ISR นั้นจะทำการอ่านตำแหน่งจากมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้รับมาเพื่อควบคุมให้ตำแหน่งมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ได้รับมามากที่สุด อยู่ตลอดเวลา การควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงนั้นจะทำการส่งความเร็วและทิศทางไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ฝั่งงาน (flowchart) การควบคุมแสดงในรูปที่ 3.14 และมีแผนภาพระบบการควบคุมแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ฝั่งงานการทำงานของโปรแกรมส่วนหลักและส่วน ISR



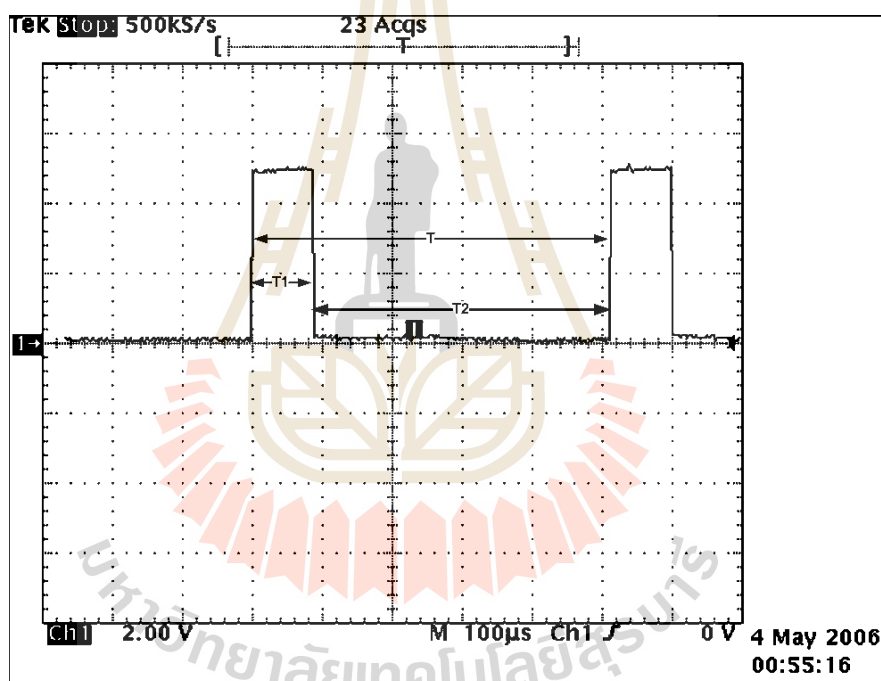
รูปที่ 3.15 ระบบการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นการถอดรหัสจากมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง

จากรูปที่ 3.16 เป็นรูปของลูกคลื่นที่ออกมาจากมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงสองช่อง คือช่อง A และช่อง B ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกล่าวคือเฟสของช่อง A และเฟสของช่อง B เป็นตัวบ่งบอกถึงทิศทางการหมุนของตัวมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง โดยที่ถ้าเฟสของช่อง A นำหน้าเฟสของช่อง B มอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงจะหมุนตามเข็มนาฬิกา ในทางกลับกันถ้าเฟสของช่อง B นำหน้าเฟสของช่อง A มอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อลูกคลื่นที่ออกมาจากมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงสองช่องผ่านวงจรถอดรหัสแล้ว เมื่อส่งเข้าชุดประมวลผลจะทำให้การประมวลผลเร็วขึ้น กล่าวคือชุดประมวลผลจะได้รับสัญญาณการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเพียงช่องสัญญาณเดียวเท่านั้นคือช่อง A หรือช่อง B

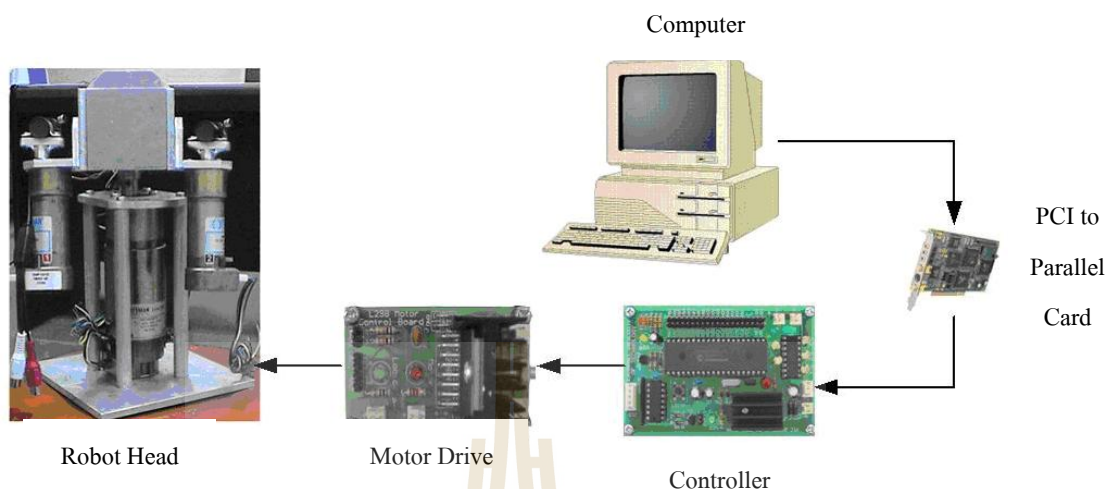
จากรูปที่ 3.17 เป็นรูปแสดงเวลาการทำงานของตัวโปรแกรมของชุดควบคุม โดยช่วงเวลา T เป็นช่วงเวลาที่ทั้งหมดของวงรอบการทำงาน ช่วงเวลา T1 เป็นช่วงเวลาสำหรับในส่วน ของ ISR และช่วงเวลา T2 เป็นช่วงเวลาส่วนการทำงานของส่วนโปรแกรมหลัก การออกแบบ ช่วงเวลาการทำงานนี้มีความสำคัญมากเพราะถ้าช่วงเวลาในการทำงานไม่เหมาะสมกันจะทำให้โปรแกรม ในชุดควบคุมทำงานผิดพลาดได้ เช่นถ้าออกแบบช่วงเวลา T2 ให้มากกว่า T จะทำให้เกิดการ ขัดจังหวะ ซ้อนทับขึ้น โปรแกรมก็จะทำงานผิดพลาด ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ช่วงเวลาการทำงานใน ส่วนของ ISR เป็นต้น ดังนั้นจากแผนภาพช่วงเวลาการทำงานของชุดประมวลผล ช่วงเวลา T1 คือ ช่วงเวลาที่ชุดประมวลผลทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดงส่วนช่วงเวลา T2 คือช่วงเวลาที่ชุดประมวลผลทำการรับหรือส่งข้อมูล



รูปที่ 3.17 ช่วงเวลาการทำงานของชุดประมวลผล

3.3.4 การรับส่งข้อมูลของชุดประมวลผล

นอกเหนือไปจากการควบคุมหัวหุ่นยนต์แล้ว อีกประเด็นที่สำคัญในการออกแบบ การควบคุมก็คือข้อมูลต่างๆ ที่รับส่งระหว่างชุดประมวลผลกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพราะข้อมูล ดังกล่าวจะใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมหัวหุ่นยนต์ นั่นก็คือข้อมูลตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนนั่นเอง ดังนั้นถ้าการส่งข้อมูลผิดพลาดจะทำให้การเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ผิดพลาดไปด้วย ผังงานการ ควบคุมหัวหุ่นยนต์แสดงในรูปที่ 3.18

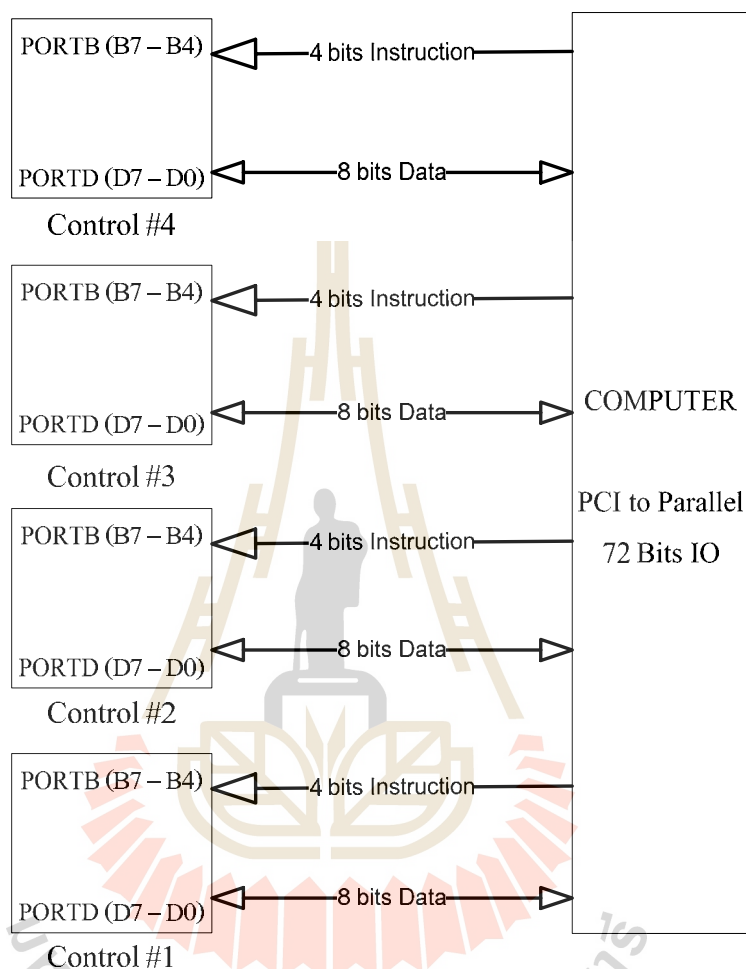


รูปที่ 3.18 ผังงานระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์

เมื่อพิจารณาการรับส่งข้อมูลตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนกับคอมพิวเตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงทั้งหมด 4 ตัวนั้น จำเป็นต้องใช้ชุดควบคุม 4 ชุดเช่นกัน โดยแต่ละชุดควบคุมสามารถสั่งงานมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเคลื่อนที่ด้วยความละเอียดสูงถึง 64 บิต ของตำแหน่งการหมุน กล่าวคือ เมื่อมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงหมุน 1 รอบ มอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงจะส่งลูกคลื่น (pulse) ซึ่งเป็นสัญญาณลักษณะสี่เหลี่ยมกลับมา 9,750 ลูกคลื่น ดังนั้นจะใช้ประโยชน์จากลูกคลื่นเหล่านี้มาควบคุมตำแหน่ง โดยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสามารถอ่านและส่งจำนวนลูกคลื่นที่ต้องการให้มอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเคลื่อนที่

ดังนั้นการส่งข้อมูลในการควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง 1 ตัวต้องใช้ข้อมูล 64 บิต เมื่อมีตัวขับเคลื่อน 4 ตัวจึงต้องรับส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ถึง 256 บิต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการส่งข้อมูลแบบขนาน ซึ่งการส่งข้อมูลแบบขนานทำให้การส่งข้อมูลรวดเร็วขึ้น และเพิ่มความสามารถในการควบคุมให้ทั้งแม่นยำและรวดเร็ว ในการส่งข้อมูลแบบขนานในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเพิ่มการ์ดอินพุต/เอาต์พุตแบบพีซีไอ (Peripheral Component Interface หรือ PCI) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งทำให้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีจำนวนพอร์ตขนานความเร็วสูงถึง 72 อินพุต/เอาต์พุต โดยที่ชุดควบคุมใช้ทั้งหมด 12 บิตโดยที่ 8 บิตเป็นข้อมูลซึ่งใช้พอร์ต D (D7 – D0) และมีบิตควบคุม 4 บิตซึ่งใช้พอร์ต B (B7-B4) ดังนั้นเมื่อมีชุดควบคุมมี 4 ชุด จะต้องใช้จำนวนบิตทั้งหมด 48 บิต โดยที่คอมพิวเตอร์จะส่งชุดประมวลผลทางบิตควบคุม การส่งข้อมูลระหว่างชุด

ประมวลผลและคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแสดงในรูปที่ 3.19 โดยที่มีรายละเอียดการทำงานการรับส่งข้อมูลของชุดประมวลผลกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.19 การรับส่งข้อมูลตำแหน่งระหว่างชุดประมวลผลและคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ความถูกต้องในการรับส่งข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยในหลายๆ ด้านด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของโปรแกรมที่อยู่ในชุดประมวลผลเองที่ต้องจัดลำดับการส่งข้อมูลให้เป็นไปตามขั้นตอน เพราะในส่วนของโปรแกรมในชุดประมวลผลนั้นไม่ได้ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียว แต่หากยังทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสดรงอีกด้วย ดังนั้นถ้าลำดับขั้นตอนเวลาไม่เหมาะสมระหว่างการรับส่งข้อมูลโปรแกรมอาจจะข้ามไปยังส่วน ISR ทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลที่ส่งได้ อีกส่วนที่สำคัญคือ (รูปที่ 3.19) ตัวชุดประมวลผลจะทำการรับส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ผ่านช่องสัญญาณพีซีไอ ซึ่งช่องสัญญาณพีซีไอนี้ในคอมพิวเตอร์จะมีหลาย

ช่องสัญญาณด้วยกัน โดยช่องสัญญาณดังกล่าวจะถูกควบคุมผ่านทางไบออส (BIOS หรือ Basic Input/Output System) ของคอมพิวเตอร์อีกต่อหนึ่ง ซึ่งการทำงานของช่องสัญญาณพีซีไอนี้จะถูกกำหนดด้วยสายสัญญาณขอขัดจังหวะ (IRQ หรือ Interrupt Request Line) ดังนั้นในกรณีที่มีการทำงานพร้อมกันของช่องสัญญาณ PCI หลายช่อง อาจทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลก็เป็นได้ เช่น ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ช่องสัญญาณพีซีไอสามช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยเป็นช่องสัญญาณของการ์ด อินพุต/เอาต์พุต หนึ่งช่องสัญญาณ อีกสองช่องสัญญาณเป็นของการ์ดอ่านสัญญาณภาพดังนั้น อาจเกิดปัญหาการสูญเสียข้อมูลการรับส่งตำแหน่งในระหว่างการรับส่งข้อมูลได้

ตารางที่ 3.1 การทำงานการรับส่งข้อมูลของชุดประมวลกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

บิตควบคุม(B7 - B4)	สถานะพอร์ต D	ความหมายของคำสั่ง
0000	OUTPUT	No operation
0001	OUTPUT	ชุดควบคุมส่งตำแหน่ง BYTE 0
0010	OUTPUT	ชุดควบคุมส่งตำแหน่ง BYTE 1
0011	OUTPUT	ชุดควบคุมส่งตำแหน่ง BYTE 2
0100	OUTPUT	ชุดควบคุมส่งตำแหน่ง BYTE 3
0101	OUTPUT	For future use
0110	OUTPUT	For future use
0111	OUTPUT	For future use
1000	INPUT	No operation
1001	INPUT	ชุดควบคุมรับตำแหน่ง BYTE 0
1010	INPUT	ชุดควบคุมรับตำแหน่ง BYTE 1
1011	INPUT	ชุดควบคุมรับตำแหน่ง BYTE 2
1100	INPUT	ชุดควบคุมรับตำแหน่ง BYTE 3
1101	INPUT	For future use
1110	INPUT	For future use
1111	INPUT	For future use

นอกจากปัญหาดังกล่าวข้างต้นแล้ว ในส่วนของระบบปฏิบัติการ (Operating System) ของคอมพิวเตอร์ก็มีส่วนสำคัญ เนื่องจากในบางระบบปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์อาจไม่สนใจ

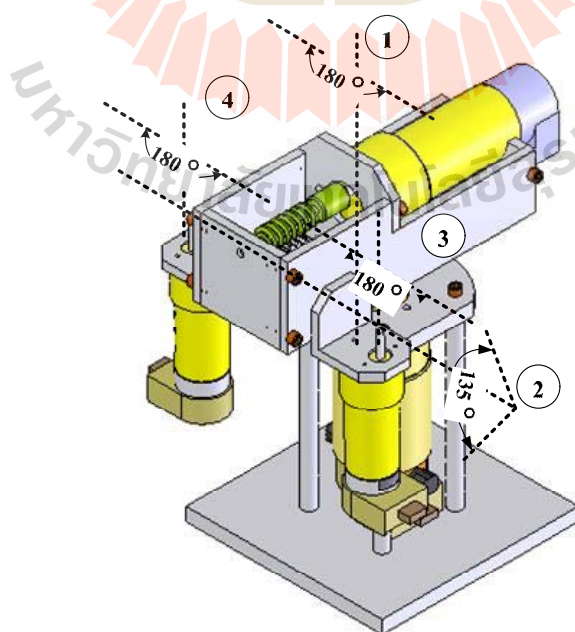
ไบออส ตัวระบบปฏิบัติการเองจะมองข้ามการควบคุมของไบออส กล่าวคือตัวระบบปฏิบัติการจะทำการควบคุมช่องสัญญาณพีซีไอโดยตรง ซึ่งในบางกรณีผู้ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดดังกล่าวได้ ทำให้เมื่อมีการการใช้ช่องสัญญาณพีซีไอพร้อมกันหลายช่องสัญญาณ ทำให้เกิดกันชนกันของข้อมูล เนื่องจากตัวระบบปฏิบัติการเองต้องทำหน้าที่ในการควบคุมหลายๆ โปรแกรมพร้อมกัน ทำให้ในส่วนของฮาร์ดแวร์อาจมีการเพิกเฉยของตัวระบบปฏิบัติการเองด้วย ดังนั้นเพื่อทำการรับส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพเพียงพอในการจัดลำดับการรับส่งข้อมูลของชุดประมวลผลควรมีการออกแบบและตรวจสอบอย่างระมัดระวัง

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของหัวหุ่นยนต์ PTV

เมื่อทำการทดสอบการเคลื่อนที่หัวหุ่นยนต์ PTV โดยชุดควบคุมหัวหุ่นยนต์ผ่านทางคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และได้ทำการเก็บข้อมูลผลการทดสอบต่างๆ ทั้งพิสัยการเคลื่อนที่ของมุมองศาอิสระต่างๆ รวมถึงพิสัยการหมุนของมุมอิสระดังกล่าว ทำให้ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพของหัวหุ่นยนต์

	หันซ้าย-ขวา(PAN)	ก้ม-เงย(TILT)	เหลือบ(VERGE)	หน่วย
ความเร็วสูงสุด	23	30	15	เรเดียน/วินาที
พิสัย	0-180	0-135	0-180	องศา



รูปที่ 3.20 พิสูจน์การทำงานของหัวหุ่นยนต์ PTV

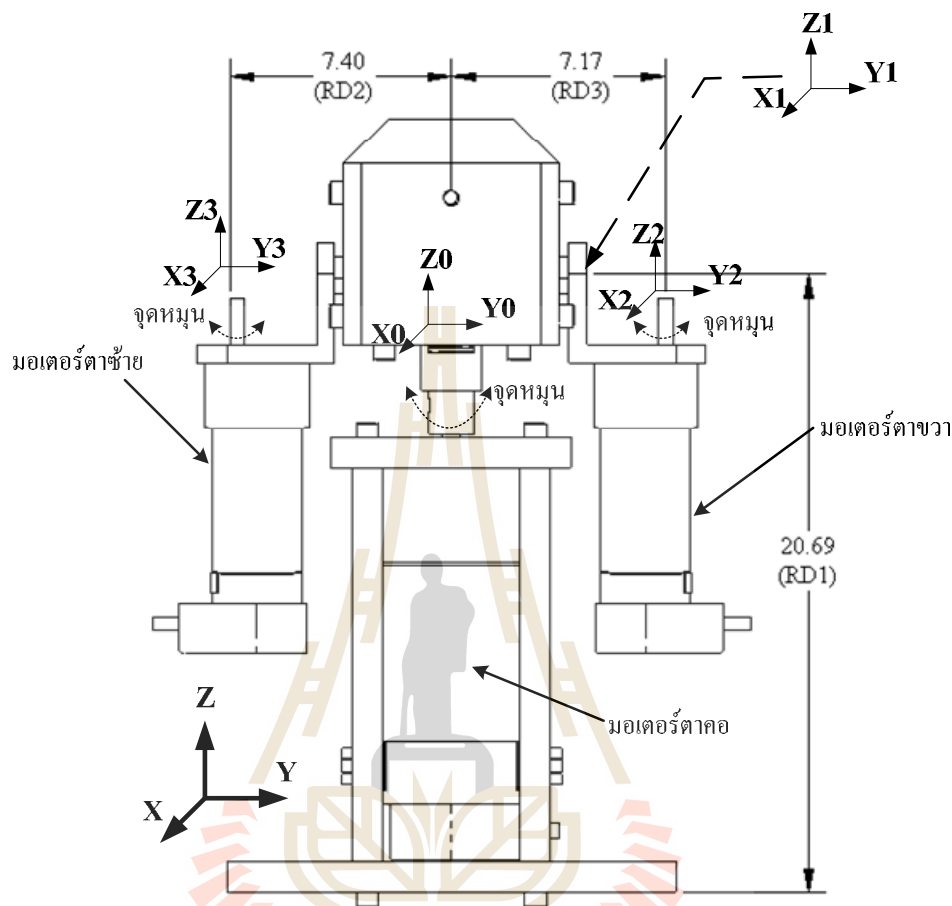
3.5 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหัวหุ่นยนต์ PTV

เมื่อกล่าวถึงทฤษฎีของแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหัวหุ่นยนต์ที่นำมาทดสอบ โดยในการออกแบบโครงสร้างและการควบคุมหัวหุ่นยนต์นั้น จำเป็นจะต้องมีความเข้าใจในแบบจำลองพื้นฐานของหัวหุ่นยนต์ ซึ่งประกอบไปด้วย การกำหนดตำแหน่งส่วนประกอบของหัวหุ่นยนต์และการแปลงตำแหน่งในระนาบ 3 มิติ จลนศาสตร์ไปหน้า และจลนศาสตร์ผกผัน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของจลนศาสตร์ไปหน้าเท่านั้น ทั้งนี้เพราะการจะหาจลนศาสตร์ไปหน้าได้ ต้องมีความรู้ในเรื่องของการกำหนดตำแหน่งส่วนประกอบของหัวหุ่นยนต์และการแปลงตำแหน่งในระนาบ 3 มิติ และเราสามารถที่จะหาจลนศาสตร์ผกผันได้โดยง่ายจากจลนศาสตร์ไปหน้า

จลนศาสตร์ไปหน้า เป็นการคำนวณตำแหน่งพิกัดปลายของหัวหุ่นยนต์เมื่อกำหนดค่าตำแหน่งและการวางตัวของส่วนประกอบต่าง ๆ มาให้ โดยปกติแล้วส่วนประกอบดังกล่าวจะประกอบไปด้วยชิ้นเชื่อมต่อ (link) และข้อต่อ (joint) จลนศาสตร์เป็นการศึกษาถึงตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งและปริมาณในอันดับสูงของตัวแปรตำแหน่ง ดังนั้นในการศึกษาจลนศาสตร์ของหัวหุ่นยนต์จึงเกี่ยวข้องกับเรขาคณิตและคุณสมบัติของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนหัวหุ่นยนต์ โดยในที่นี้จะประกอบไปด้วยการศึกษาถึงตำแหน่งและการวางตัวของหัวหุ่นยนต์ ในรูปตัวแปรของข้อต่อหัวหุ่นยนต์ โดยเทียบกับฐานบริเวณคอของหัวหุ่นยนต์ตามรูปที่ 3.21 ได้เป็นพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนสำหรับหัวหุ่นยนต์ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของชิ้นส่วนสำหรับหัวหุ่นยนต์

Joint i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	RD3	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	$-\pi/2$	0	RD2	θ_3
4	$-\pi/2$	0	RD1	θ_4



รูปที่ 3.21 การกำหนดเฟรมให้กับหัวหุ่นยนต์ (หน่วย: เซนติเมตร)

รูปที่ 3.21 เป็นรูปของโครงสร้างและการกำหนดเฟรมของหัวหุ่นยนต์ที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีองศาอิสระและข้อต่อทั้งหมดเป็นข้อต่อแบบหมุน (revolute link) ในกรณีนี้มีการกำหนดให้เฟรมทั้งหมดอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน แต่ไม่ทับกัน

ตารางที่ 3.3 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ของแขนกล โดย α_i คือมุมระหว่างแกน Z_i และ Z_{i+1} โดยวัดรอบแกน X_i , a_i คือระยะระหว่างแกน Z_i และ Z_{i+1} โดยวัดในทิศทางของแกน X_i , d_i คือระยะระหว่างแกน X_{i-1} และ X_i โดยวัดในทิศทางของแกน Z_i และ θ_i คือมุมระหว่างแกน X_{i-1} และ X_i โดยวัดรอบแกน Z_i

หลังจากที่ทำการกำหนดพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์แล้ว สามารถที่จะคำนวณหาการแปลงระหว่างเฟรม และนำการแปลงดังกล่าวไปรวมกันเพื่อหาเป็นการแปลงรวม

หรือเป็นการแปลงระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับตำแหน่งฐานได้โดยใช้สมการการแปลงที่เรียกว่า Transformation operator ในวิธีการของ Denavit-Hartenberg ดังสมการที่ 3.1

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ดังนั้นจะทำการควบคุมเฟรมที่ 2 สามารถทำได้โดยการรวมกันโดยใช้รูปแบบการรวมกันของการแปลงหลายต่อ (compound transformation) ตามสมการ

$${}^0_nT = {}^0_1T {}^1_2T \dots {}^{n-1}_nT \quad (3.2)$$

เมื่อการควบคุมหัวหุ่นยนต์ซึ่งอยู่ที่บริเวณคานทั้งสองข้างจะได้เฟรมการควบคุมดังนี้

$${}^0_2T = {}^0_1T {}^1_2T \quad (3.3)$$

และ

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_3T \quad (3.4)$$

เมื่อนำ 0_2T และ 0_3T ไปทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์พบว่าหัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้คลาดเคลื่อนจากค่าที่คาดหวังเป็นอย่างมากเป็นเพราะระยะต่างๆ ที่วัดจากแบบนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากหัวหุ่นยนต์ที่ประกอบขึ้นจริงเป็นอย่างมาก

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบโดยมีองค์ประกอบของชิ้นส่วนต่างๆ รวมถึงการขึ้นรูป การประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน เมื่อชิ้นส่วนแต่ละชิ้น มีค่าความผิดพลาดต่างไปจากแบบที่ออกแบบไว้ทำให้เมื่อประกอบกันเป็นหัวหุ่นยนต์ ลักษณะทางกายภาพของหัวหุ่นยนต์จึงเกิดความผิดพลาดตามไปด้วย ทำให้การหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์เป็นไปได้ยากมากขึ้นหรือผิดเพี้ยนไปมาก ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมหัวหุ่นยนต์

ในส่วนของคุณสมบัติที่ทำการควบคุมการหมุนของมอเตอร์เซอร์โว กระแสนั้นจะทำการรับและส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ซึ่งในระหว่างการรับและส่งข้อมูลอาจเกิดการสูญเสียข้อมูลด้วยปัจจัยหลายๆ อย่างตามที่กล่าวมา ดังนั้นโดยรวมแล้วการจะควบคุมหัวหุ่นยนต์ในตัวควบคุมที่สามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์ได้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้นด้วย เพื่อที่จะสามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ



บทที่ 4

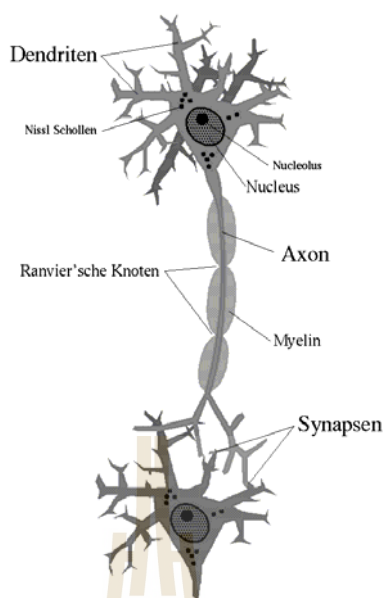
ตัวควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องจักร

4.1 บทนำ

การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่นั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี บทนี้ได้กล่าวถึงการควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้ของเครื่องจักรแบบใหม่ เครือข่ายประสาทเทียมนั้นมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน แต่ละประเภทก็มีการทำงานที่แตกต่างกันไป แต่เครือข่ายประสาทเทียมนั้นมีข้อดีที่เป็นจุดเด่นคือมีความสามารถในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่ซับซ้อนได้ มีการปรับตัวเองได้ อีกทั้งยังมีความทนทานต่อการความบกพร่องได้ดีอีกด้วย การปรับตัวเองของเครือข่ายจะเกิดจากการเรียนรู้ของเครือข่าย โดยอาศัยกฎการเรียนรู้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาการเรียนรู้แบบใหม่ขึ้นมา เพื่อใช้กับเครือข่ายประสาทเทียมแบบแข่งขัน การเรียนรู้ดังกล่าวเป็นการเรียนรู้โดยไม่ต้องมีผู้ฝึกสอนจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายประสาทเทียมให้ทำงานได้ถูกต้องและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังได้อธิบายถึงการรับภาพจากกล้องเพื่อนำมาป้อนกลับสำหรับควบคุมหัวหุ่นยนต์อีกด้วย

4.2 พื้นฐานเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียมถูกคิดค้นพัฒนาขึ้นเพื่อเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์โดยประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทหรือนิวรอน (neuron) ที่เชื่อมต่อระหว่างกันเป็นหน่วยประมวลผลอยู่มากมายดังแสดงรูปการเชื่อมต่อของนิวรอนดังรูปที่ 4.1 เป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างนิวรอนโดยแต่ละนิวรอนจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยแกนประสาท (axon) ดังนั้นสมองของมนุษย์จึงมีการเชื่อมต่อกันอยู่ของนิวรอนเป็นปริมาณมากมาย ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าสมองมนุษย์เป็นคอมพิวเตอร์ที่มีการปรับตัวแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นการทำงานแบบขนาน จุดเด่นที่สำคัญของเครือข่ายประสาทเทียมก็คือความสามารถในการเรียนรู้จากตัวอย่างและการทำให้เป็นกรณีทั่วไป เครือข่ายจะถูกฝึกสอนด้วยกฎการเรียนรู้ โดยขบวนการใช้กฎการเรียนรู้จะแตกต่างกันไปตามโปรแกรมการทำงานของคอมพิวเตอร์ และการที่เครือข่ายถูกทำให้เป็นกรณีทั่วไปจะทำให้เครือข่ายสามารถที่จะจำแนกแยกแยะรูปแบบของอินพุตแบบใหม่ๆ ที่ตัวเครือข่ายไม่รู้จักมาก่อนได้



รูปที่ 4.1 การเชื่อมต่อกันของนิวรอน (<http://www.ims.uni-stuttgart.de>)

การประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมได้มีมาอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นทางวิศวกรรม ฟิสิกส์ จิตวิทยา การแพทย์ คณิตศาสตร์ วิทยาการคอมพิวเตอร์ เคมี หรือเศรษฐศาสตร์ เพราะการใช้เครือข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างดี นอกจากนี้แล้วตัวเครือข่ายยังมีความทนทานต่อความบกพร่อง (fault tolerance) คือเมื่อเกิดความเสียหายที่นิวรอนในเครือข่าย ระบบจะยังคงทำงานต่อไปได้อีก ซึ่งคุณลักษณะความทนทาน (robust) นี้เป็นลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายประเทียมอยู่แล้ว ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลภายในเครือข่ายถูกกระจายไปตามนิวรอนต่างๆ ทั้งเครือข่ายนั่นเอง อีกประการหนึ่งที่เป็นข้อดีของเครือข่ายประสาทเทียมก็คือมีการปรับตัวได้ (adaptive) กล่าวคือเครือข่ายมีความสามารถโต้ตอบ (interact) และตอบสนอง (response) ต่อสภาวะแวดล้อมได้ เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไปตัวเครือข่ายจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ และทำการปรับตัวเองเพื่อให้ทำงานเข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ได้ ดังนั้นเครือข่ายบางเครือข่ายสามารถออกแบบให้มีการปรับตัวในเวลาจริง (real – time adaptation) ได้อีกด้วย เครือข่ายประสาทเทียมนี้มีหลายชนิด การแบ่งชนิดของเครือข่ายประสาทเทียมนั้นพิจารณาได้หลายวิธี เช่น วิธีการฝึกสอน วิธีการเรียนรู้ การประยุกต์ใช้งาน ชนิดของอินพุตหรือสถาปัตยกรรมของเครือข่าย เป็นต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ไม่มีการจำแนกชนิดเครือข่ายประสาทเทียมที่แน่นอน แต่ถ้าเป็นที่ยอมรับและแบ่งแยกได้ง่ายคือการแบ่งแยกตามวิธีการเรียนรู้ ซึ่งมีอยู่สองแบบคือการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (supervised learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (unsupervised learning หรือ self-organizing) สามารถแสดงรายละเอียดเปรียบเทียบเครือข่ายทั้งสองแบบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างระหว่างการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนและการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน

	การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน	การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน
คุณลักษณะ	- เรียนรู้ที่จะสร้างผลลัพธ์ที่ต้องการให้ได้ตามตัวอย่างที่ได้รับ	- จัดข้อมูลอินพุตของระบบด้วยตัวเอง - ค้นหาคุณสมบัติของตัวเองจากอินพุต
ตัวอย่างกฎการเรียนรู้	- วิธีปรับแก้ค่าความผิดพลาด (error correction) โดยลดความผิดพลาดของเอาต์พุตให้น้อยที่สุดโดยเทียบกับจุดประสาท - วิธีเทียบความคล้ายโดยปรับจุดประสาทตามระดับความคล้าย	- วิธีสหสัมพันธ์ (correlation) โดยใช้กฎการเรียนรู้ของ Hebb - วิธีแข่งขัน (competitive) โดยนิวรอนที่เป็นเอาต์พุตแข่งขันกันเองจนกระทั่งได้ผู้ชนะ
ตัวอย่างเครือข่าย	- เพอร์เซ็ปตรอน (perceptron) - ADALINE (ADaptive LInear NEuron) - RBF Network (radial basis function) - เครือข่ายไปข้างหน้าพร้อมการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (backpropagation feedforward network) - Fuzzy - ARTMAP - LAPART	- PCA - ART (adaptive resonance theory) - แบบแผนฟังก์ชันลักษณะ (feature map)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน เพราะการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอนนี้สามารถปรับตัวเข้าหาคำตอบได้ด้วยตัวของเครือข่ายเอง เช่นเดียวกับการเรียนรู้ในการเคลื่อนที่ของดวงตามนุษย์ที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง

4.3 เครือข่ายแบบแข่งขัน (Competitive Network)

การเรียนรู้แบบแข่งขัน (competitive learning) เป็นการเรียนรู้แบบหนึ่งที่ใช้ในเครือข่ายที่ต้องการการเรียนรู้ที่ไม่ต้องมีผู้ฝึกสอน ซึ่งเป็นเครือข่ายประเภทจัดการตัวเอง (self-organization) โดยที่เครือข่ายสามารถรับอินพุตแล้วทำการคัดแยกอินพุตไว้ด้วยโครงสร้างภายในตัวมันเอง โดยโครงสร้างดังกล่าวมีหลักการคล้ายคลึงกับสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถแยกแยะรายละเอียดของสภาวะแวดล้อมได้ ถึงแม้ว่าจะไม่เคยเห็นมาก่อนก็ตาม

เครือข่ายที่ไม่ต้องมีผู้ฝึกสอนเครือข่ายหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือเครือข่ายโคโฮเนน (Kohonen network) โดยที่เครือข่ายโคโฮเนน (รูปที่ 4.2) มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับประสาทรับรู้ของตา เครือข่ายจะมีการเรียนรู้แบบแข่งขันกล่าวคือ เมื่อมีอินพุตป้อนเข้าสู่เครือข่าย จะมีเพียงนิวรอนผู้ชนะเท่านั้นที่ได้รับการเรียนรู้ โดยอินพุตที่เข้าสู่นิวรอน j ในเครือข่ายโคโฮเนนคือ I_j สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_j = \sum_{i=1}^N w_{ij} x_i \quad (4.1)$$

โดยที่

N คือจำนวนอินพุตของเครือข่าย

w_{ij} คือค่าน้ำหนักประสาทของนิวรอน

x_i คืออินพุตตัวที่ i

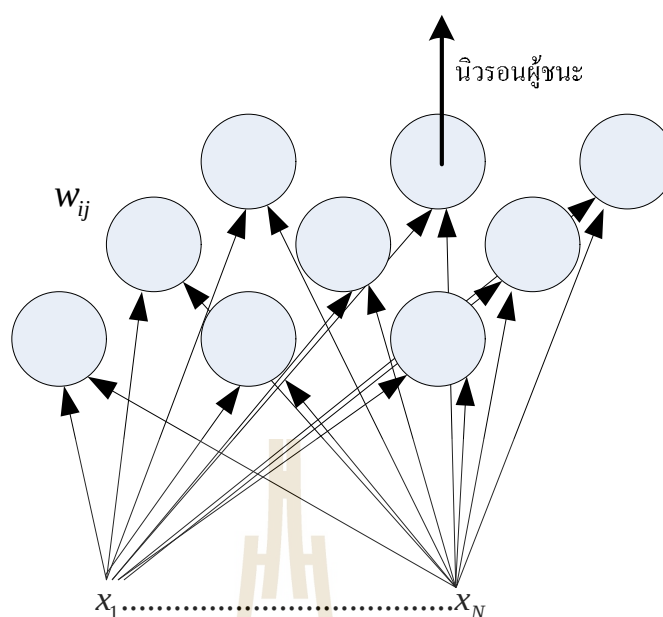
จากกฎการเรียนรู้แบบแข่งขันเราสามารถตัดสินหานิวรอนผู้ชนะได้จากนิวรอนที่มีขนาดของ I_j ใหญ่ที่สุด โดยที่นิวรอนผู้ชนะจะสามารถพิจารณาได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับอินพุตที่กำลังป้อนให้กับเครือข่าย ดังนั้นนิวรอนอื่นที่ไม่ใช่ นิวรอนผู้ชนะจะ ไม่มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบอินพุตและจะ ไม่ได้รับการเรียนรู้หรือปรับค่าน้ำหนักประสาทแต่อย่างใด ดังนั้นเราสามารถปรับค่าน้ำหนักประสาทของนิวรอน j ที่ชนะการแข่งขันได้ดังนี้

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \eta(x_i - w_{ij}^{old}) \quad (4.2)$$

โดยที่ η คือค่าคงที่การเรียนรู้

w_{ij}^{new} คือค่าน้ำหนักประสาทของนิวรอนตัวใหม่

w_{ij}^{old} คือค่าน้ำหนักประสาทของนิวรอนตัวเดิม



รูปที่ 4.2 เครือข่ายโคโฮเนน

สมการข้างต้นแสดงถึงการเรียนรู้ด้วยตัวเองของเครือข่ายแบบแข่งขันและการปรับน้ำหนักประสาทของนิวรอน หัวข้อดังที่กล่าวมาคือ เป็นการนำทฤษฎีการเรียนรู้ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับการประมาณค่าจาโคเบียนแบบพลวัตและจะทำให้ได้ทฤษฎีการเรียนรู้แบบใหม่เพื่อใช้ในการควบคุมหัวหุ่นยนต์ต่อไป

4.4 การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ (Image Jacobian Estimation)

4.4.1 จาโคเบียนรูปภาพ (image jacobian)

การควบคุมหุ่นยนต์โดยทั่วไปนั้นเมื่อข้อต่อต่างๆ ภายในหุ่นยนต์เกิดเปลี่ยนแปลงไป ตำแหน่งปลายที่อ้างอิงของหุ่นยนต์ย่อมเปลี่ยนแปลงในระนาบอ้างอิงคาร์ทีเซียนไปด้วย ซึ่งจะเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า จาโคเบียนของหุ่นยนต์ (robot Jacobian) (Corke Hutchinson and Hager, 1996) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งปลายที่อ้างอิงของหุ่นยนต์ย่อมจะทำให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า จาโคเบียนรูปภาพ (image Jacobian) โดยจาโคเบียนรูปภาพนั้นเกิดจากการนำเอาแบบจำลองภาพฉาย (projection model) เข้าไปรวมกับจาโคเบียนของหุ่นยนต์ (Craig, 1989)

ถ้าการควบคุมหุ่นยนต์มี $\bar{\theta}$ เป็นเวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของข้อต่อของหุ่นยนต์และมี $\bar{r}$ เป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ p แสดงตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหุ่นยนต์เทียบกับแกนอ้างอิงคาร์ทีเซียนที่มีขนาด p และมี $\bar{f}$ เป็นเวกเตอร์ที่แสดงค่าพารามิเตอร์รูปภาพ เราจะได้

ความสัมพันธ์ความเร็วของข้อต่อของหุ่นยนต์ $\dot{\theta}$ กับเวกเตอร์ของความเร็วของปลายข้อต่อหุ่นยนต์ คือ J (robot Jacobian) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\dot{r} = J \cdot \dot{\theta} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$J = \frac{\dot{r}}{\dot{\theta}} \quad (4.4)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งข้อต่อของหุ่นยนต์จะส่งผลให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนแปลงไปด้วย จากความสัมพันธ์นี้จะทำให้ค่าอนุพันธ์ของพารามิเตอร์รูปภาพเทียบกับเวลา $\dot{f}$ สัมพันธ์กับความเร็วของข้อต่อหุ่นยนต์ $\dot{r}$ ดังสมการ

$$\dot{f} = J_r \cdot \dot{r} \quad (4.5)$$

โดยที่

$$J_r = \frac{\dot{f}}{\dot{r}} \quad (4.6)$$

ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ $\dot{f}$ กับความเร็วข้อต่อของหุ่นยนต์ $\dot{\theta}$ ในเทอมของจาโคเบียนผสม ซึ่งเรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพ โดยมี J_r คือเวลาที่สัมพันธ์กับความเร็วของหุ่นยนต์ ได้ดังสมการ

$$\dot{f} = J_q \cdot \dot{\theta} \quad (4.7)$$

โดย J_q เป็นจาโคเบียนผสมโดยที่

$$J_q = J_r \cdot J \quad (4.8)$$

ดังนั้นจะได้

$$J_r = \frac{\dot{f}}{\dot{\theta}} \quad (4.9)$$

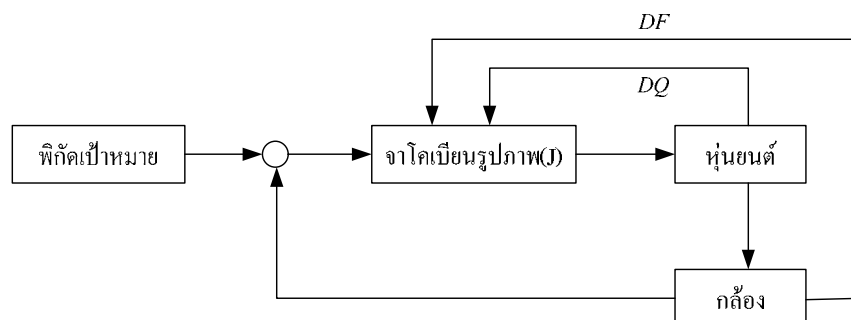
4.4.2 การประมาณค่าของจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต (Dynamic Estimation of Image Jacobian)

จาโคเบียนรูปภาพสามารถที่จะถูกประมาณค่าแบบพลวัตได้โดยพิจารณาใช้พื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงข้อต่อของหุ่นยนต์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ จากความสัมพันธ์ $\dot{f} = J_q \cdot \dot{\theta}$ ซึ่งความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ $\dot{f}$ จะสัมพันธ์กับความเร็วข้อต่อของหุ่นยนต์ $\dot{\theta}$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจะทำให้เกิดความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ Δf เทียบกับความเร็วข้อต่อของหุ่นยนต์ $\Delta \theta$ คือ

$$\Delta \theta = J_q^{-1} \Delta f \quad (4.10)$$

ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถควบคุมข้อต่อของหุ่นยนต์ได้ จำเป็นต้องมีเวกเตอร์ของพารามิเตอร์รูปภาพและเวกเตอร์ข้อต่อของหุ่นยนต์ โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์รูปภาพและการเปลี่ยนแปลงข้อต่อของหุ่นยนต์เพื่อคำนวณค่าจาโคเบียน กำหนดให้ DF เป็นพารามิเตอร์รูปภาพและ DQ เป็นพารามิเตอร์ข้อต่อของหุ่นยนต์ ดังนั้นเราจะได้การประมาณจาโคเบียนรูปภาพคือ

$$J = \frac{DF}{DQ} \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.3 แผนภาพการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ

แผนผังในรูปที่ 4.3 เป็นแสดงการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ จะเห็นว่าเมื่อหุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ และพารามิเตอร์รูปภาพ DF ดังแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ในรูปที่ 4.4 เป็นการเคลื่อนที่ของข้อต่อต่างๆ จากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์นี้จะนำไปคำนวณเพื่อหาจาโคเบียนรูปภาพต่อไป

พิจารณารูปที่ 4.4 เป็นโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ โดยสามารถหาการประมาณค่าจาโคเบียน J โดยการแยกเป็นจุดหมุนต่างๆ ได้ดังนี้

จุดหมุนที่ 1 การเคลื่อนที่ของข้อต่อนี้มีผลทำให้พารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ_1 และพารามิเตอร์รูปภาพ DF_{x1} เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะได้

$$J_1 = \frac{DF_{x1}}{DQ_1} \quad (4.12)$$

จุดหมุนที่ 2 การเคลื่อนที่ของข้อต่อนี้มีผลทำให้พารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ_2 และพารามิเตอร์รูปภาพ DF_{x2} เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะได้

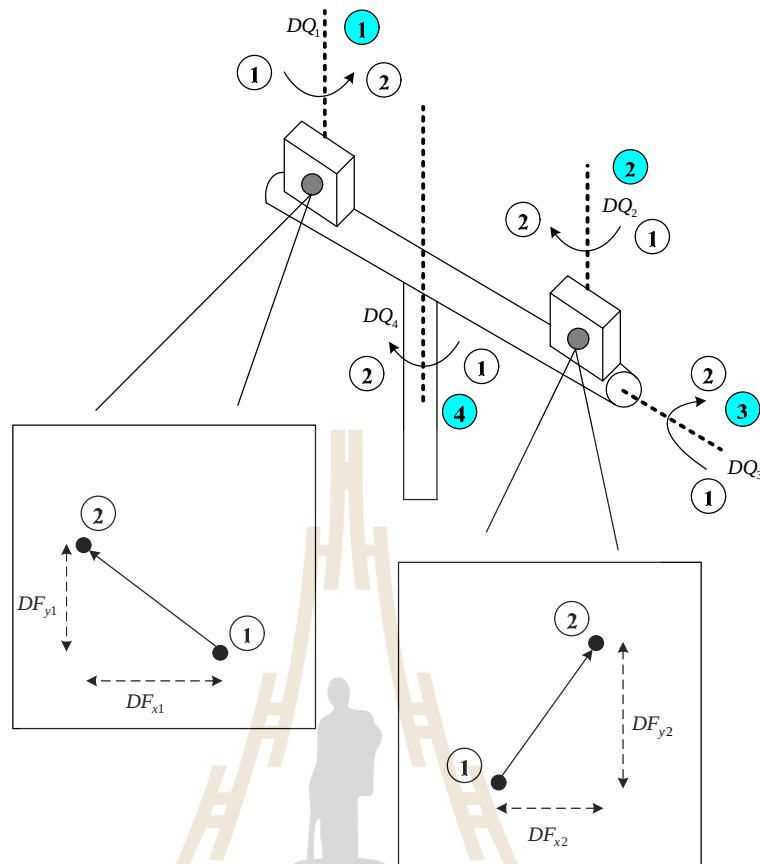
$$J_2 = \frac{DF_{x2}}{DQ_2} \quad (4.13)$$

จุดหมุนที่ 3 การเคลื่อนที่ของข้อต่อนี้มีผลทำให้พารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ_3 พารามิเตอร์รูปภาพ DF_{y1} และพารามิเตอร์รูปภาพ DF_{y2} เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะได้

$$J_{31} = \frac{DF_{y1}}{DQ_3} \quad (4.14)$$

หรือ

$$J_{32} = \frac{DF_{y2}}{DQ_3} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ และพารามิเตอร์รูปภาพ DF

จุดหมุนที่ 4 การเคลื่อนที่ของข้อต่อนี้มีผลทำให้พารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ_4 พารามิเตอร์รูปภาพ DF_{x1} และพารามิเตอร์รูปภาพ DF_{x2} เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะได้

$$J_{41} = \frac{DF_{x1}}{DQ_4} \quad (4.16)$$

หรือ

$$J_{42} = \frac{DF_{x2}}{DQ_4} \quad (4.17)$$

4.4.3 การประมาณค่าจาโคเบียนแบบพลวัตสำหรับกฎการเรียนรู้

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้นำเสนอการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ โดยที่ DQ เป็น พารามิเตอร์ข้อต่อของหัวหุ่นยนต์ซึ่งคือปริมาณที่ข้อต่อของหัวหุ่นยนต์หมุน ส่วนพารามิเตอร์ รูปภาพ DF คือปริมาณจุดภาพที่เปลี่ยนแปลงเมื่อหัวหุ่นยนต์เปลี่ยนเป็นปริมาณ DQ จากนั้นเราสามารถคำนวณหาปริมาณมอเตอร์ที่ต้องเคลื่อนที่ครั้งต่อไปซึ่งกำหนดให้เป็น DQ' ได้ดังนี้

$$DQ' = \frac{DF'}{J} \quad (4.18)$$

โดยที่

DF' คือพารามิเตอร์รูปภาพที่ชี้เทียบไปที่จุดศูนย์กลางภาพ

J คือการประมาณจาโคเบียน

DQ' คือปริมาณของมอเตอร์ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไปที่จุดศูนย์กลางภาพ

ดังนั้นจากสมการที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อสั่งให้ข้อต่อหัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นปริมาณ DQ' ก็จะทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บรรลุเป้าหมายในทันที ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพเทียบกับความเร็วข้อต่อของหุ่นยนต์ แต่ในความเป็นจริงแล้ว การเคลื่อนที่โดยอาศัยหลักการประมาณค่าของจาโคเบียนนั้นย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นตามสมการ $\Delta\theta = J_q^{-1}\Delta f$ ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงนำการประมาณจาโคเบียนแบบพลวัตมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียม โดยการปรับน้ำหนักประสาทผู้ชนะตามกฎการเรียนรู้แบบแข่งขันของนิวรอน w_{ij} ตามสมการ

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \eta(x_i - w_{ij}^{old}) \quad (4.19)$$

เมื่อ x_i และ w_{ij} คือปริมาณการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดังนั้นจะได้

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \eta\Delta w_{ij} \quad (4.20)$$

โดยที่

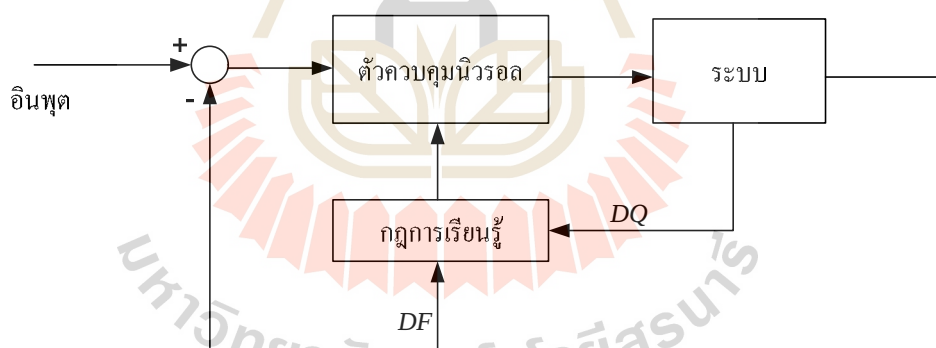
η คือเป็นค่าคงที่การเรียนรู้

Δw_{ij} คือปริมาณที่มอเตอร์เซอร์โวกระแสดังนั้นจะต้องเคลื่อนที่ครั้งต่อไป

โดยที่น้ำหนักประสาท Δw_{ij} คือปริมาณมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงที่หมุนไปนั่นเอง ดังนั้นกฎการเรียนรู้จะถูกปรับเปลี่ยนเป็นกฎใหม่นี้

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \eta DQ' \quad (4.21)$$

สมการที่ 4.21 สามารถนำไปใช้เป็นกฎการเรียนรู้ได้ทันที จะเห็นว่าค่า w_{ij} เป็นค่าปริมาณน้ำหนักประสาท ซึ่งก็คือปริมาณการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงนั่นเอง ส่วนค่าคงที่การเรียนรู้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยจะเห็นว่าค่าคงที่การเรียนรู้นี้จะคูณอยู่กับปริมาณการหมุนครั้งต่อไปของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรง ดังนั้นถ้าค่าคงที่การเรียนรู้มีค่ามากจะทำให้การเรียนรู้ทำได้รวดเร็วขึ้นหรือก็คือทำให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงไปยังเป้าหมายได้รวดเร็วขึ้น แต่ทว่าการที่ค่าคงที่มีค่ามากนั้นก็อาจทำให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงเลยเป้าหมายก็เป็นได้ ทำให้ไม่เกิดการลู่เข้าแต่หากจะเกิดการแกว่งกลับไปมารอบจุดเป้าหมาย ดังนั้นการที่ให้ค่าคงที่การเรียนรู้มีค่าน้อยๆ จะทำให้มอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรงเคลื่อนที่ถึงเป้าหมายได้ช้าแต่แม่นยำมากกว่า



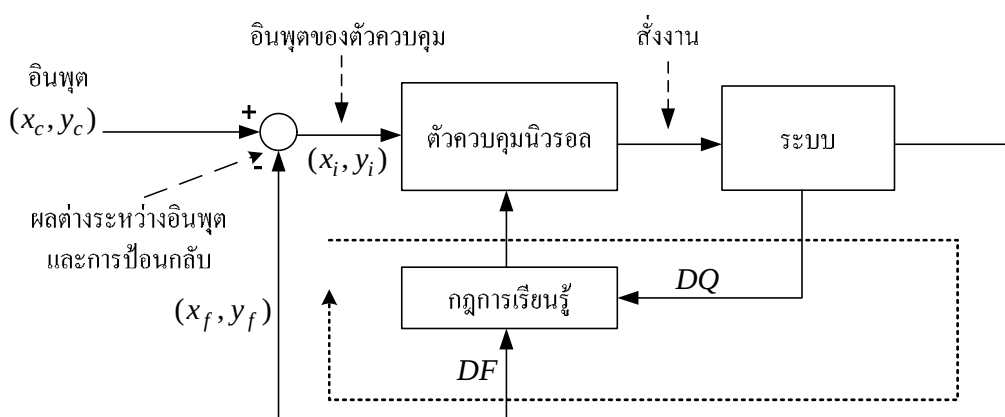
รูปที่ 4.5 แผนภาพระบบการควบคุมระบบที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 4.5 แสดงระบบการควบคุมระบบที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม เมื่อตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมรับอินพุตเข้ามาจะสั่งงานให้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ต่างๆ เมื่อระบบทำงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ DF และพารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ ค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองจะถูกใช้ในการปรับน้ำหนักประสาทของตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมเป็นอันดับต่อไป

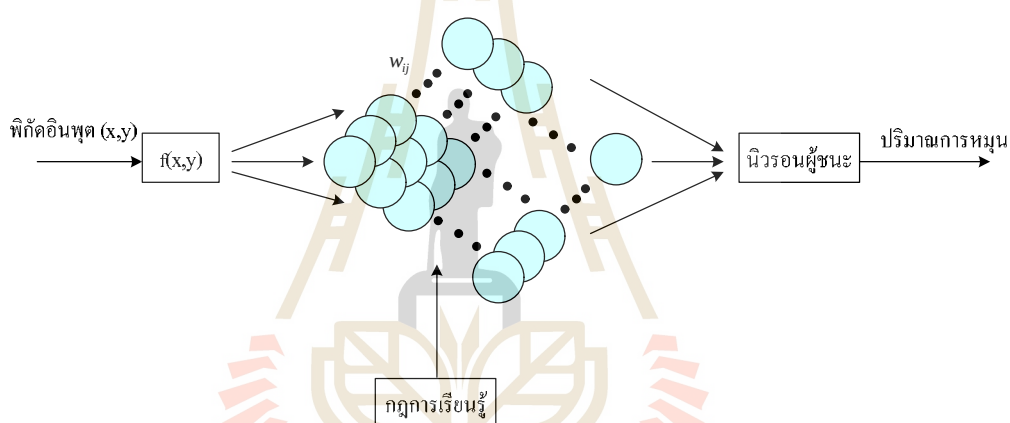
ปริมาณน้ำหนักระสาทที่เป็นปริมาณการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสนั้น อาจแตกต่างกันไปเช่น ปริมาณน้ำหนักระสาทของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนดวงตาของหัวหุ่นยนต์มี ปริมาณเป็นองศา แต่ปริมาณน้ำหนักระสาทของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนการก้ม-เงยอาจมีปริมาณ เป็นลูกกลั่นการหมุน เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าน้ำหนักระสาทตามโครงสร้างของหัว หุ่นยนต์ตามความเหมาะสม

พิจารณาเมื่อตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมสั่งงานให้ระบบทำงานแล้วนั้น จำเป็น ที่จะต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ DF เพราะถ้าไม่มีการเกิดการเปลี่ยนแปลง ของพารามิเตอร์รูปภาพ DF จากสมการที่ 4.11 จะมีผลทำให้การประมาณค่าจาโคเบียน J มีค่า เป็นศูนย์จะส่งผลต่อสมการที่ 4.18 ซึ่งเป็นปริมาณมอเตอร์ที่ต้องเคลื่อนที่ครั้งต่อไปหาคำตอบไม่ได้ กล่าวคือ เมื่อค่า J มีค่าเท่ากับศูนย์แล้ว การเคลื่อนที่ครั้งต่อไปของข้อต่อหุ่นยนต์จะมีค่ามากไม่รู้ จบ ดังนั้นในการนำตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมนี้ไปใช้ ต้องสังเกตการเปลี่ยนแปลงข้อต่อ ของหัวหุ่นยนต์ให้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการเรียนรู้ มิเช่นนั้นแล้วจะทำให้ กระบวนการการเรียนรู้เกิดการผิดพลาด ทำให้ระบบทำงานผิดพลาดตามไปด้วย

จากระบบการเรียนรู้ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นถือได้ว่าเป็นระบบการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ ฝึกสอนเพราะตัวควบคุมไม่มีตัวอย่างในการเรียนรู้ กล่าวคือในรูปที่ 4.6 แสดงถึงตัวอย่างการ ควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุมนิวรอล เมื่อได้รับอินพุตที่เป็นพิกัดภาพ โดยสมมุติให้อินพุตคือ พิกัดของจุดศูนย์กลางภาพโดยมีพิกัดเป็น (x_c, y_c) จากนั้นอินพุตดังกล่าวจะนำไปลบออกจากพิกัด ภาพปัจจุบันคือพิกัด (x_f, y_f) โดยพิกัดนี้เป็นพิกัดจากการป้อนกลับของระบบด้วย เมื่อนำมาลบ กันแล้วได้เป็นอินพุตของตัวควบคุม ซึ่งกำหนดให้เป็น (x_i, y_i) ตัวควบคุมนิวรอลจะสั่งงานให้ ระบบทำงาน เมื่อระบบทำงานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ DF และ พารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้นำไปสู่การปรับน้ำหนักระสาทของตัวควบคุมตามกฎการเรียนรู้ที่ได้กล่าวมา ในที่สุดแล้วเมื่ออินพุตของตัวควบคุมคือ (x_i, y_i) มีค่าเป็นศูนย์ตัวควบคุมจะหยุดปรับน้ำหนักระสาทเพราะตัวควบคุมสามารถนำพารามิเตอร์ที่ ไปยังจุดกึ่งกลางภาพได้ ซึ่งคือตำแหน่งปัจจุบัน (x_f, y_f) มีค่าเท่ากับตำแหน่งอินพุต (x_c, y_c) โครงสร้างภายในของตัวควบคุมนิวรอลสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การควบคุมระบบที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม

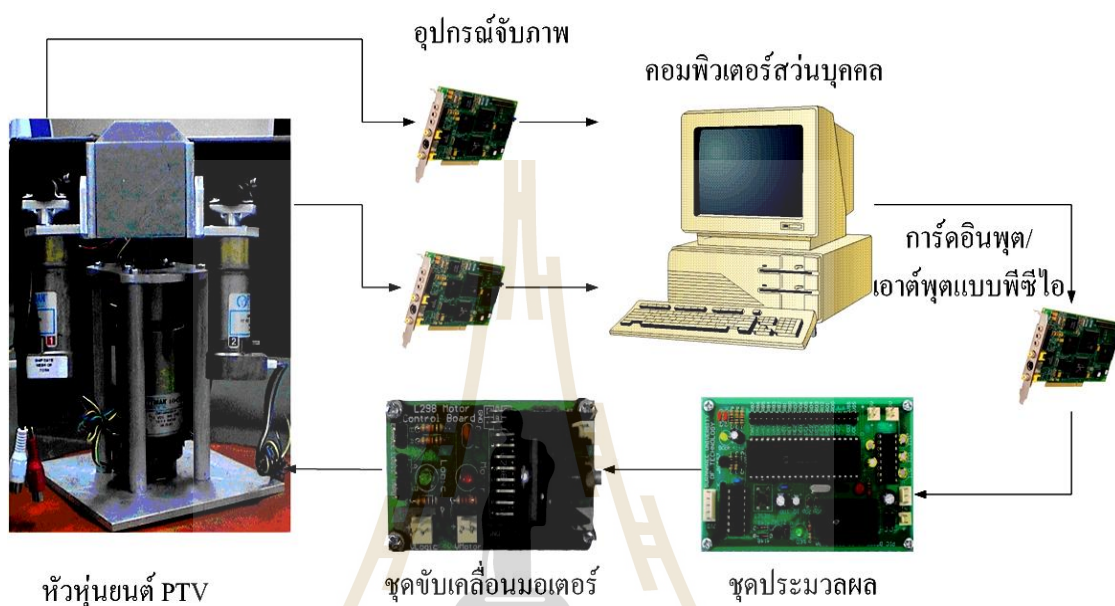


รูปที่ 4.7 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมนิวรอล

4.5 การรับข้อมูลจากกล้องเพื่อเป็นตัวป้อนกลับ

จากโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ เมื่อติดตั้งกล้องสองตัวบนโครงสร้างเพื่อที่ให้กล้องทั้งสองทำหน้าที่เป็นเสมือนตาทั้งสองข้างของมนุษย์ดังรูปที่ 3.6 โดยสามารถอธิบายโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ให้มีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนที่ของศีรษะมนุษย์ได้ดังนี้ มอเตอร์สองตัวที่เชื่อมต่อกับกล้องโดยตรงนั้นทำหน้าที่คล้ายการเหลือบตาซ้าย-ขวา มอเตอร์ที่ต่ออยู่กับชุดเฟืองเกลียวตัวหนอนนั้นทำหน้าที่คล้ายกับการก้ม-เงย โดยที่เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ตัวนี้จะทำให้มอเตอร์ตาทั้งสองเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวมอเตอร์เองด้วย และมอเตอร์ตัวสุดท้ายซึ่งเป็นมอเตอร์ที่รองรับส่วนโครงสร้างที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำหน้าที่คล้ายคอ เพื่อทำหน้าที่หันซ้าย-ขวา โดยที่เมื่อมอเตอร์คอเกิดการเคลื่อนที่จะทำให้ในส่วนโครงสร้างที่อยู่ด้านบนของมอเตอร์คอเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามไปด้วย ซึ่งส่วนที่อยู่บนโครงสร้างดังกล่าวคือส่วนมอเตอร์ตาทั้งสองและมอเตอร์ที่ใช้สำหรับ

การแยกนั้นเอง จากโครงสร้างดังกล่าวอาจสรุปได้ดังนี้ มอเตอร์แต่ละข้างมีโครงสร้างที่ขนานกัน กล่าวคือการเคลื่อนมอเตอร์แต่ละข้างไม่ส่งผลกระทบถึงกันของแต่ละส่วน โครงสร้างที่อนุกรมกัน นั้นคือชุดของมอเตอร์ค่อ มอเตอร์เวยและมอเตอร์ตา กล่าวคือเมื่อมอเตอร์ค่อเคลื่อนที่จะส่งผลถึง มอเตอร์เวยและมอเตอร์ตาทั้งสอง และเมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่จะส่งผลถึงมอเตอร์ตาทั้งสองด้วย



รูปที่ 4.8 แผนผังของระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์

รูปที่ 4.8 แผนผังการควบคุมหัวหุ่นยนต์ โดยคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมหลัก ซึ่งตัวควบคุมนี้เป็นตัวควบคุมแบบเครือข่ายประสาทเทียมตามที่ได้กล่าวมา คอมพิวเตอร์จะทำการอ่านสัญญาณภาพจากกล้องสองตัวที่อยู่บนโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ผ่านอุปกรณ์จับภาพ (capture card) จากนั้นจะนำข้อมูลภาพดังกล่าวมาประมวลผลด้วยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณภาพเพื่อให้ได้พิกัดของวัตถุที่อยู่ในภาพ (ดูได้จากภาคผนวก ก) และนำไปประมวลผลด้วยตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมจะสั่งงานการหมุนของมอเตอร์ตัวต่างๆ ผ่านทางชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงพื้นฐานของเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นตัวควบคุมหัวหุ่นยนต์ ซึ่งเครือข่ายประสาทเทียมที่เลือกใช้ดังกล่าวเป็นเครือข่ายแบบไม่ต้องมีผู้ฝึกสอน โดยประยุกต์การประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัตมาเป็นกฎการเรียนรู้ เพื่อให้เป็นการเรียนรู้แบบใหม่ โดยการประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัตนี้เป็นตัวที่ใช้ส่งต่อระหว่างค่าพารามิเตอร์รูปภาพและ

ค่าพารามิเตอร์หัวหุ่นยนต์ เมื่อใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมเป็นตัวควบคุม การควบคุมหัวหุ่นยนต์จึงไม่จำเป็นต้องทำการปรับเทียบกล้องและหาแบบจำลองของหุ่นยนต์แต่อย่างใด ทำให้สามารถลดความยุ่งยากและซับซ้อนจากปัญหาดังกล่าวมาได้มาก



บทที่ 5

การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์

5.1 บทนำ

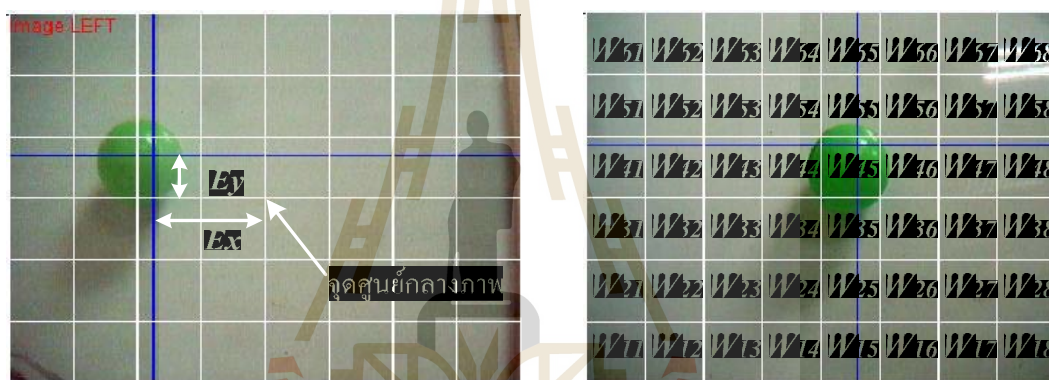
การเคลื่อนที่ของตามนุษย์นั้นโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ด้วยกัน 5 แบบดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 การเคลื่อนที่ดังกล่าวได้แก่ Saccades (หรือ SC) Smooth-pursuit (หรือ SP) Vergence (หรือ VG) Vestibulo-Ocular Reflex (หรือ VOR) และ Opto-Kinetic Reflex (หรือ OKR) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบตัวควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามแบบตาของมนุษย์ 2 แบบด้วยกัน คือ การเคลื่อนที่แบบ SC และการเคลื่อนที่แบบ SP โดยการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แบบดังกล่าวใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบเครื่องจักรดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมดังกล่าว มาใช้ควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV ให้เคลื่อนที่ได้แบบตามนุษย์ทั้ง 2 แบบ โดยเริ่มจากการให้เครือข่ายเรียนรู้การเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ การเรียนรู้การเคลื่อนที่นั้นจะถูกแบ่งแยกออกเป็นส่วนๆ กล่าวคือ ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมจะทำการเรียนรู้การเคลื่อนที่ที่ละส่วนของหัวหุ่นยนต์ โดยเริ่มแรกจะทำการเรียนรู้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ตาทั้งสองข้าง จากนั้นตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมจะทำการเรียนรู้ในส่วนของมอเตอร์ที่ใช้ในการก้มและเงย และสุดท้ายจะทำการเรียนรู้เพื่อชดเชยการหมุนของมอเตอร์ คอตตามลำดับ นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ในบทนี้ยังกล่าวถึงประสิทธิภาพของการควบคุมหัวหุ่นยนต์ทั้ง 2 แบบ โดยนำเสนอในรูปแบบของกราฟและตาราง

5.2 ความสัมพันธ์ของภาพวัตถุเป้าหมายและนำหนักประสาท

การเคลื่อนที่ของดวงตาและศีรษะมนุษย์นั้นจะอาศัยภาพที่ได้จากดวงตาเพื่อที่จะจดจ้องหรือมองวัตถุเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง เช่นเดียวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ หัวหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามวัตถุเป้าหมายโดยวัตถุเป้าหมายดังกล่าวจะถูกตรวจจับโดยกล้อง 2 ตัวที่ติดตั้งอยู่บนหัวหุ่นยนต์ และการที่หัวหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ติดตามวัตถุเป้าหมายได้นั้น วัตถุเป้าหมายจะต้องอยู่ในบริเวณภาพที่กล้องตรวจจับได้ทั้งสองกล้องพร้อมกัน ดังเช่นตาของมนุษย์ที่จะมองวัตถุได้นั้น เป้าหมายจะต้องอยู่ในบริเวณที่ตาสามารถมองเห็นได้

รูปที่ 5.1 แสดงวัตถุเป้าหมายที่ถูกค้นพบในภาพนั้นจะมีพิกัดเพื่อบ่งบอกตำแหน่งเพียงตำแหน่งเดียว กล่าวคือวัตถุจากกล้องด้านซ้ายและกล้องด้านขวาจะมีพิกัด x และ y เป็นตัวบ่งบอกว่าวัตถุเป้าหมายนั้นอยู่ส่วนใดของภาพ ขนาดภาพของกล้องด้านซ้ายและกล้องด้านขวามีขนาด

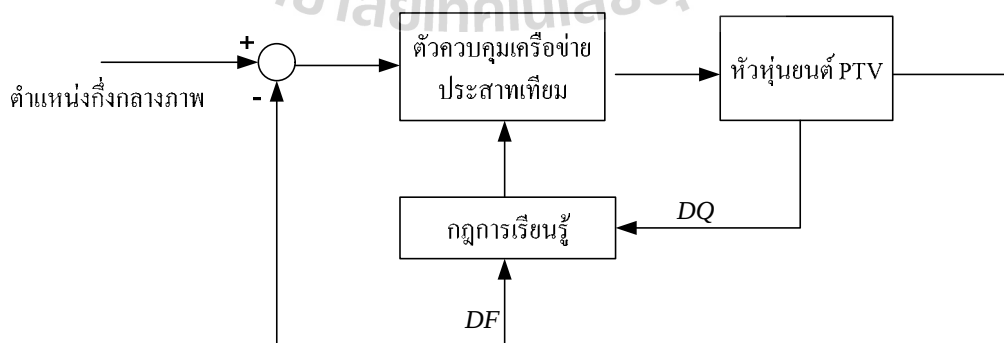
320x240 จุดภาพ จากรูปที่ 5.1 (ก) พบว่าตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายห่างจากจุดศูนย์กลางภาพเป็นปริมาณ E_x และ E_y จากนั้นจะทำการแบ่งภาพเป็นส่วนย่อยๆ แสดงดังรูปที่ 5.1 (ข) โดยแต่ละส่วนย่อยจะมีขนาด 40x40 จุดภาพ ดังนั้นในภาพหนึ่งภาพจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ทั้งหมด 48 ส่วนด้วยกัน โดยในแต่ละส่วนย่อยๆ นั้นจะมีค่าน้ำหนักประสาทเทียมซึ่งเป็นปริมาณการหมุนของมอเตอร์ตัวหุ่นยนต์บรรจุอยู่ โดยภาพ 2 ภาพจากกล้องซ้ายและขวาจะมีน้ำหนักประสาททั้งหมด 96 น้ำหนักประสาท เมื่อตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายตกอยู่ที่น้ำหนักประสาทใด ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมจะเรียกค่าปริมาณการหมุนของมอเตอร์ที่ถูกบรรจุอยู่ในน้ำหนักประสาทร้านั้นออกมาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักประสาทนั้นๆ (กรณีเป็นการฝึกสอน) หรือทำการคำนวณปริมาณการหมุนของมอเตอร์ให้สัมพันธ์กับค่าน้ำหนักประสาทร้านั้นๆ (กรณีเป็นการติดตามวัตถุ)



(ก) ภาพจากกล้องด้านซ้าย

(ข) ภาพจากกล้องด้านขวา

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุเป้าหมายและน้ำหนักประสาทในภาพ



รูปที่ 5.2 แผนภาพระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV

รูปที่ 5.2 เป็นแผนภาพระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV โดยมีตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมเป็นตัวควบคุมหัวหุ่นยนต์ PTV เมื่อตัวควบคุมสั่งงานหรือหัวหุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ทุกครั้ง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ DF และพารามิเตอร์หุ่นยนต์ DQ มีผลทำให้ระบบจะทำการเรียนรู้ทุกครั้งด้วย แต่ไม่จำเป็นว่าการเรียนรู้ทุกครั้งจำเป็นต้องมีการปรับน้ำหนักประสาททุกครั้งไป การปรับน้ำหนักประสาทรุนั้นจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ ถ้าหัวหุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดหรือเคลื่อนที่ไม่ถูกต้อง ตัวควบคุมจะทำการปรับน้ำหนักประสาทเพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวลง จึงสามารถกล่าวได้ว่าตัวควบคุมจะตรวจสอบระบบเพื่อให้ทำงานถูกต้องอยู่ตลอดเวลา

5.3 การเรียนรู้ให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่

เมื่อได้ความสัมพันธ์ของวัตถุเป้าหมายกับน้ำหนักประสาทในภาพแล้ว ในการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ SC นั้นจะอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าวเพื่อใช้ในการควบคุม โดยที่การเคลื่อนที่แบบ SC นั้นเป็นการเคลื่อนที่ที่ต้องอาศัยการสั่งงานเพียงครั้งเดียวจากตัวควบคุม โดยสั่งงานให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ให้วัตถุเป้าหมายที่อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ของภาพหรือในตำแหน่งน้ำหนักประสาทใดๆ มายังบริเวณกึ่งกลางรูปภาพ โดยการเรียนรู้ดังกล่าวจะถูกแยกเป็นส่วนๆ ดังต่อไปนี้

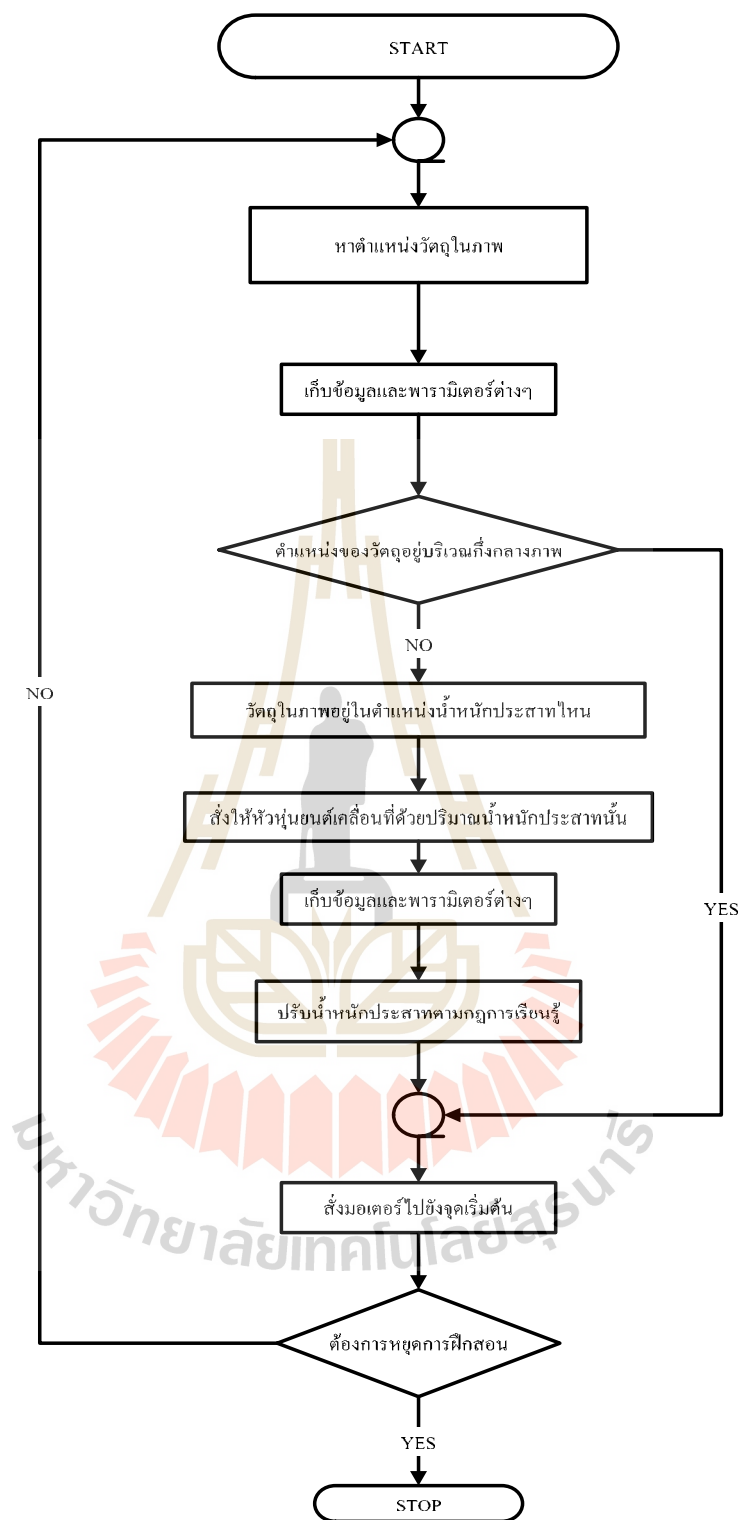
5.3.1 การเคลื่อนที่แบบ SC โดยใช้มอเตอร์ตาสองตัว

การควบคุมมอเตอร์ตาสองตัวให้เคลื่อนที่ได้แบบ SC นั้น ในแต่ละน้ำหนักประสาทจะต้องเก็บค่าปริมาณการหมุนของมอเตอร์ตาซ้ายและตาขวาของภาพนั้นๆ ไว้ กล่าวคือ ในภาพด้านซ้าย น้ำหนักประสาทบรรจุปริมาณการหมุนของมอเตอร์ตาซ้ายไว้ และในภาพด้านขวา น้ำหนักประสาทเก็บค่าปริมาณการหมุนของมอเตอร์ตาขวา โดยในส่วนของเรียนรู้เริ่มแรกนี้ ปริมาณดังกล่าวต้องเป็นปริมาณเพื่อนำพาวัตถุมาอยู่บริเวณกึ่งกลางภาพในแนวแกน x พอดี เพราะการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะแนวแกน x ของรูปภาพเท่านั้น โดยตำแหน่งของวัตถุตอนเริ่มต้นนั้นจะวางอยู่ใดๆ ในตำแหน่งใดๆ ที่กล้องสามารถจับภาพได้ทั้งสองกล้องพร้อมกัน (ดังเช่นรูปที่ 5.1) ในการเริ่มทำการฝึกสอนนั้นจะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับน้ำหนักประสาทแต่ละตัว โดยน้ำหนักประสาทแต่ละตัวคือปริมาณองศาของการหมุนของมอเตอร์ จากนั้นทำการฝึกสอนตัวควบคุมดังนี้ เริ่มจากเมื่อหาพิกัดของวัตถุในภาพได้แล้ว นำพิกัดดังกล่าวมาตรวจสอบว่าพิกัดนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางภาพหรือไม่ ถ้าพิกัดดังกล่าวไม่อยู่บริเวณกึ่งกลางภาพตัวควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์ตาเคลื่อนที่ด้วยปริมาณน้ำหนักประสาท โดยตำแหน่งน้ำหนักประสาทดังกล่าวได้จากการประมวลผลภาพของพิกัดวัตถุเป้าหมาย จากนั้นทำการปรับน้ำหนักประสาทดังกล่าว เมื่อทำการปรับน้ำหนักประสาทเรียบร้อยแล้ว ตัวควบคุมจะสั่งงานให้มอเตอร์หมุนกลับไปยังจุดเริ่มต้นใหม่ ขั้นตอนการฝึกสอนดังกล่าวมานี้สามารถแสดงในรูปที่ 5.3

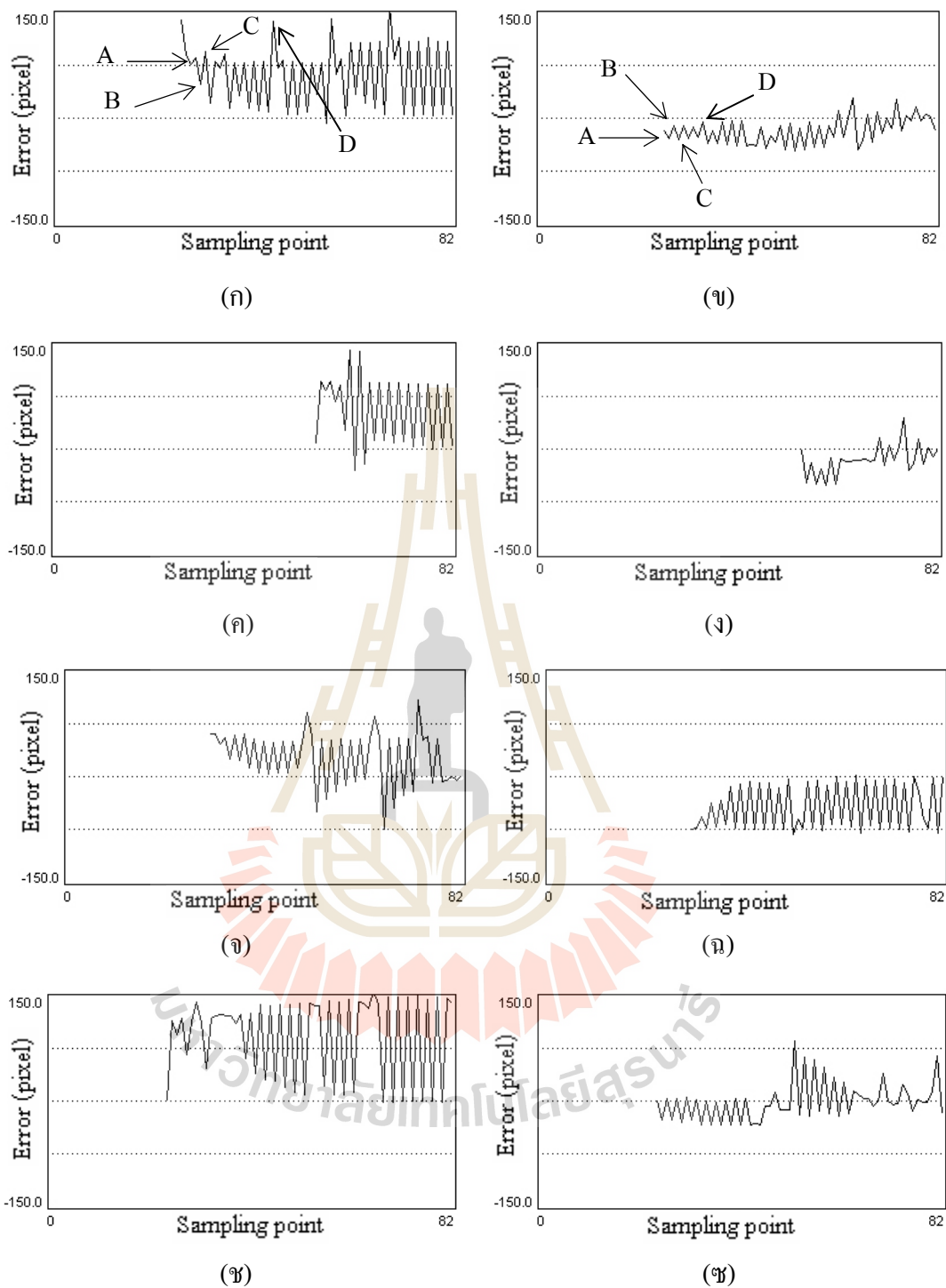
สังเกตได้ว่าในขณะที่ทำการเรียนรู้ เมื่อสั่งมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ด้วยปริมาณน้ำหนักระสาทและทำการปรับน้ำหนักประสาทตามกฎการเรียนรู้เรียบร้อยแล้วนั้น ระบบจะสั่งงานให้มอเตอร์หมุนกลับไปยังจุดเริ่มต้น พบว่าในระหว่างดำเนินการฝึกสอนแม้จะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปยังจุดเริ่มต้นเดิมแล้วก็ตาม ระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางในแนวแกน x ก็อาจไม่เท่าเดิม ทั้งที่เป็นจุดเริ่มต้นเดียวกัน โดยสามารถอธิบายผลการทดสอบดังกล่าวได้ด้วยระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพในแนวแกนในรูปที่ 5.4 (ก) เมื่อจุด A เป็นจุดเริ่มต้นของการพบพิศอกเป้าหมาย จุด B คือพิศอกเป้าหมายหลังจากตัวควบคุมสั่งให้มอเตอร์หมุน จุด C คือจุดที่ตัวควบคุมสั่งงานให้มอเตอร์กลับไปยังจุดเริ่มต้น และจุด D คือจุดที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของเป้าหมายให้เป้าหมายอยู่ตำแหน่งใหม่ รูปที่ 5.4 (ค)(ง) รูปที่ 5.4 (จ)(ฉ) และรูปที่ 5.4 (ช)(ซ) เป็นรูปที่แสดงลักษณะพิศอกของวัตถุเป้าหมายและลักษณะการเรียนรู้ของตัวควบคุมที่แตกต่างกัน

ปัญหาดังกล่าวอาจเกิดเนื่องจากสาเหตุหลายกรณีเช่น ความคลาดเคลื่อนของข้อต่อหัวหุ่นยนต์ต่างๆ ความคลาดเคลื่อนระหว่างการส่งข้อมูล หรือจุดวัตถุเป้าหมายเปลี่ยนไปตามสภาพของแสงที่อาจมีการปรับเปลี่ยนได้ เป็นต้น จากปัญหาที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมทำการปรับค่าน้ำหนักประสาทเพื่อให้ปริมาณน้ำหนักระสาทที่ปรับค่าแล้วนั้นเหมาะสมกับการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดของหัวหุ่นยนต์ ทำให้หัวหุ่นยนต์ทำงานถูกต้องตลอดเวลาหรือลดค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่

จากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมสามารถปรับปริมาณของน้ำหนักประสาทเพื่อให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ถูกต้องหรือมีการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดน้อยลง ทั้งนี้เพราะตัวควบคุมมีความอ่อนตัวและสามารถปรับปริมาณน้ำหนักประสาทให้เหมาะสมกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของหัวหุ่นยนต์ แสดงให้เห็นถึงควมมีประสิทธิภาพและความคงทนของตัวควบคุม



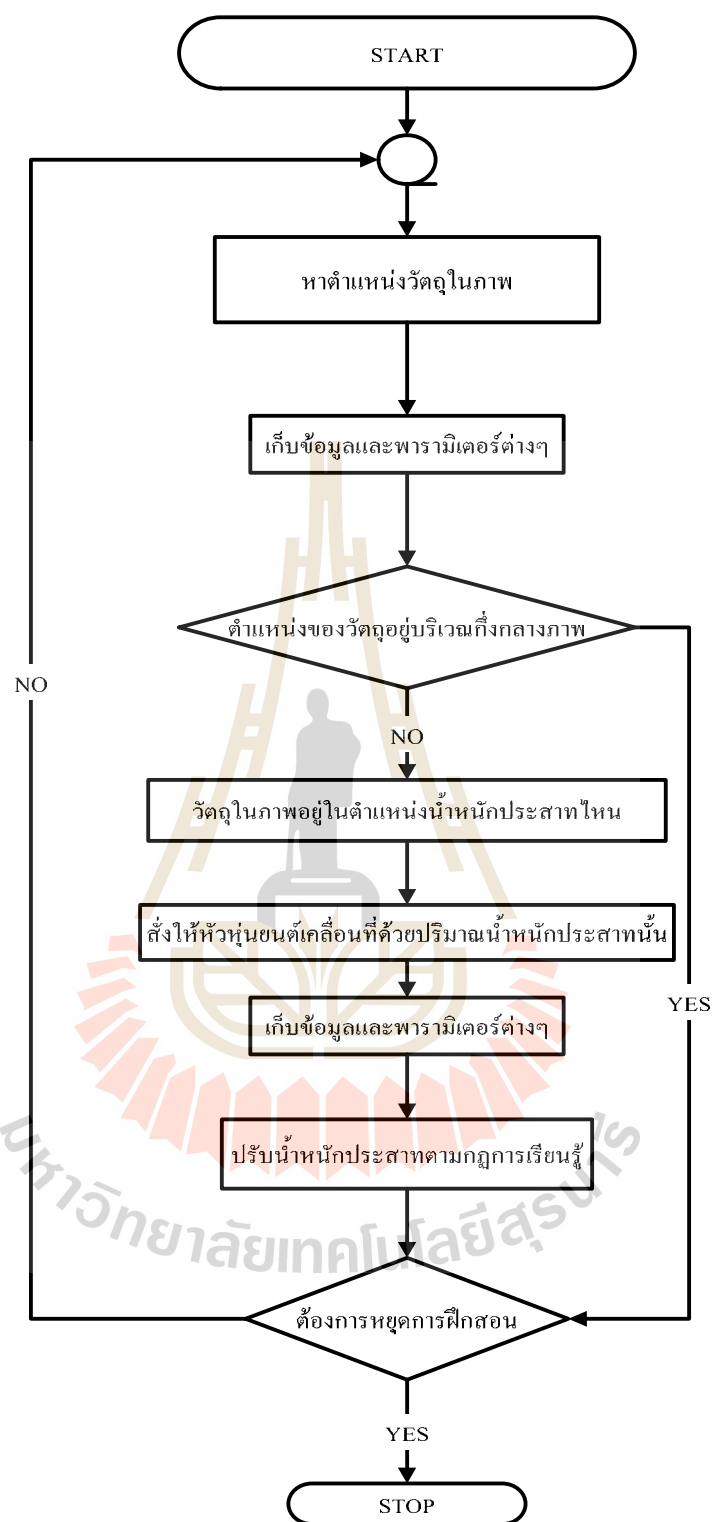
รูปที่ 5.3 แผนภาพการฝึกสอนการเคลื่อนที่โดยการฝึกสอนแต่ละครั้งต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้น



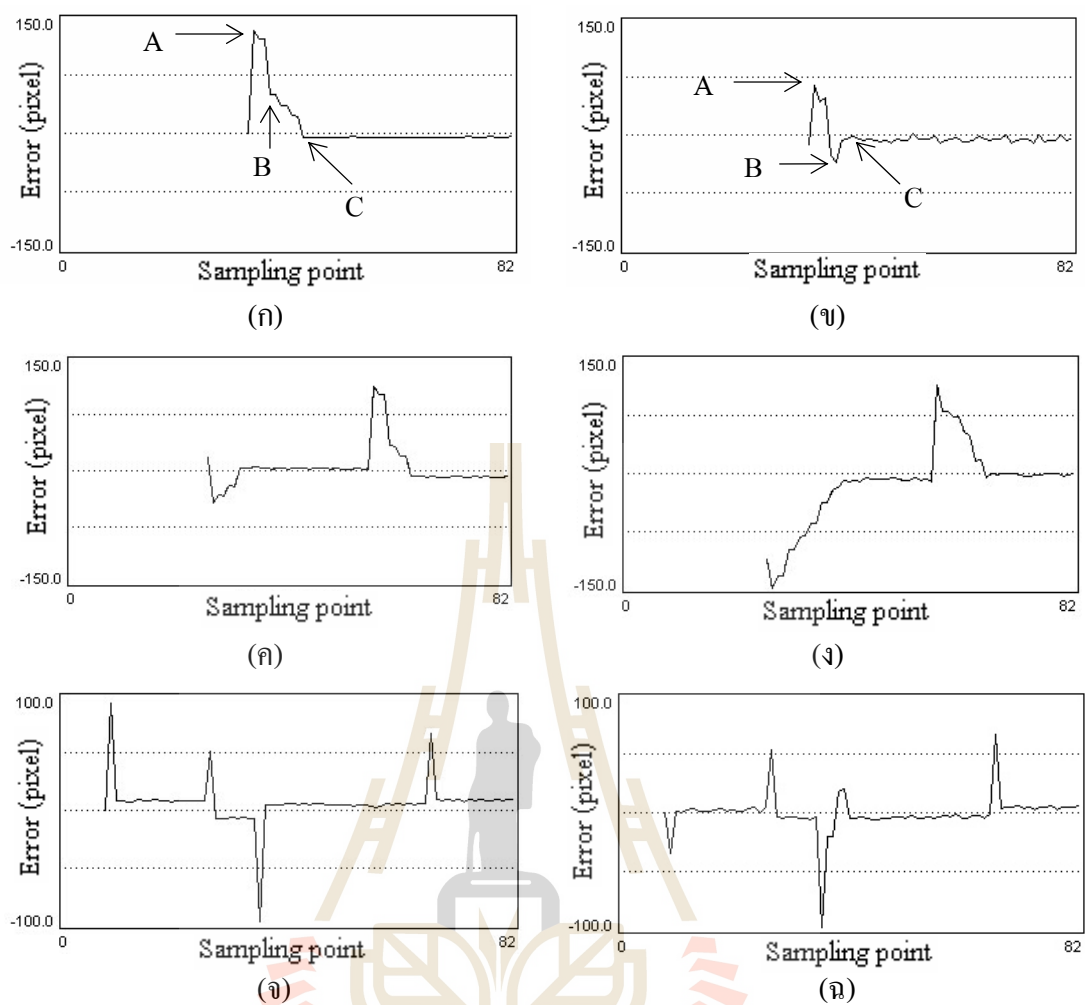
รูปที่ 5.4 กราฟระยะห่างของวัตถุจากจุดกึ่งกลางภาพ (ก)(ค)(จ)(ช) ตาซ้าย และ (ข)(ง)(ฉ)(ซ) ตาขวา

จากการฝึกสอนตัวควบคุมที่กล่าวผ่านมา เมื่อทำการปรับน้ำหนักระสาทของเครือข่ายหนึ่งครั้งก็จำเป็นต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้นใหม่ทุกครั้ง ซึ่งเรียกว่าเป็นการฝึกสอนแบบออฟไลน์ (offline) ทำให้การฝึกสอนล่าช้าเพราะจำนวนน้ำหนักระสาทที่ค่อนข้างมาก อีกทั้งยังไม่สะดวกต่อการฝึกสอนเนื่องมาจากผู้ทำการฝึกสอนต้องคอยควบคุมหรือสั่งงานตัวควบคุมอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อให้การฝึกสอนเร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงปรับปรุงวิธีการฝึกสอนใหม่เป็นการฝึกสอนแบบออนไลน์ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยการฝึกสอนแบบออนไลน์นี้ ในระหว่างการเรียนรู้ตัวควบคุมจะไม่สั่งงานให้มอเตอร์หมุนกลับมายังจุดเริ่มต้นใหม่ โดยเมื่อตัวควบคุมเกิดการสั่งให้มอเตอร์หมุนและปรับค่าน้ำหนักระสาทแล้ว จึงทำให้พิกัดของวัตถุเป้าหมายไปตกอยู่ที่น้ำหนักระสาทค่าใหม่ ดังนั้นยังคงวิธีการฝึกสอนแบบเดิมไว้ แต่หากตัดขั้นตอนที่สั่งให้มอเตอร์ทั้งสองกลับไปยังจุดเริ่มต้นทิ้งไป เมื่อตัดขั้นตอนการกลับไปยังจุดเริ่มต้นใหม่ทิ้งไปแล้วนั้นจึงทำให้การปรับน้ำหนักระสาทเป็นไปได้รวดเร็วขึ้น โดยในระหว่างการสอนเพื่อนำวัตถุไปที่จุดกึ่งภาพได้นั้น จำนวนน้ำหนักระสาทจะถูกปรับค่าจำนวนหลายน้ำหนักระสาทด้วยกัน กล่าวคือในรูปที่ 5.6 (ก)(ข) จุด A คือจุดที่พบพิกัดเป้าหมาย เมื่อพบพิกัดเป้าหมายตัวควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์หมุนพร้อมปรับค่าน้ำหนักระสาท เมื่อมอเตอร์หมุนมายังจุด B ซึ่งจุดนี้เป็นตำแหน่งของน้ำหนักระสาทตัวใหม่ พิกัดเป้าหมายยังคงไม่ใช่พิกัดจุดกึ่งกลางภาพก็จะต้องปรับน้ำหนักระสาทตัวใหม่นี้อีก ทำให้เมื่อพิกัดเป้าหมายถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดบริเวณกึ่งกลางภาพแล้ว จะมีจำนวนน้ำหนักระสาทที่ถูกปรับค่าหลายจำนวนด้วยกัน รูปที่ 5.6 (ค)(ง) แสดงผลการฝึกสอนเมื่อพิกัดของวัตถุเป้าหมายเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม

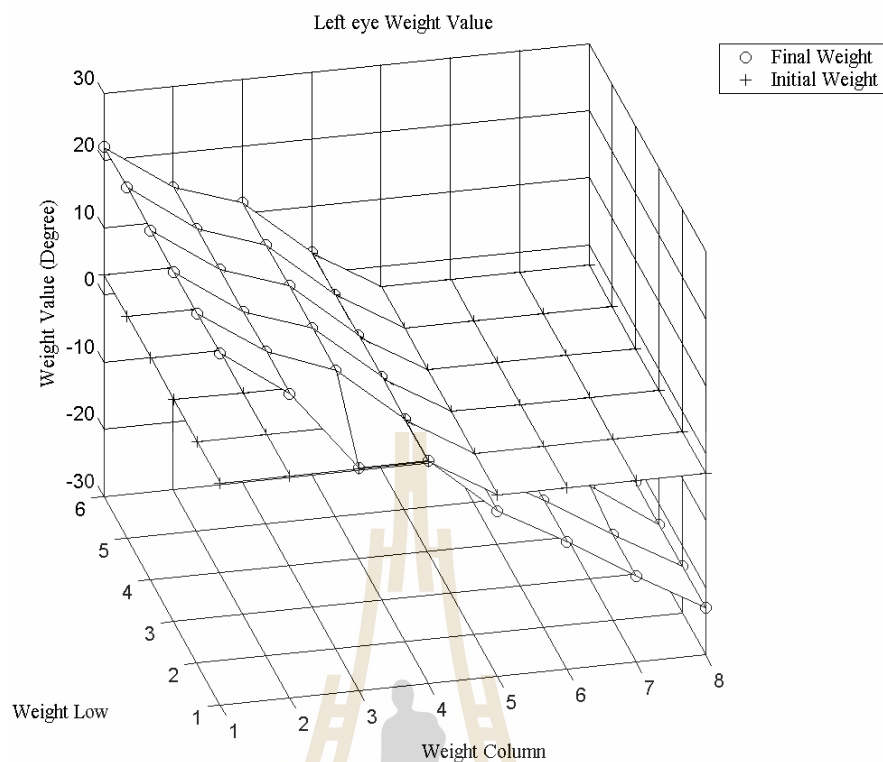
เมื่อทำการฝึกสอนจนเสร็จสมบูรณ์โดยที่ปรับน้ำหนักระสาทจนครบทุกน้ำหนักระสาทแล้ว ทำการทดสอบให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามวัตถุเมื่อวัตถุเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.6 (จ)(ฉ) ซึ่งหัวหุ่นยนต์สามารถนำพาเป้าหมายมายังบริเวณกึ่งกลางภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยกราฟรูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8 แสดงค่าน้ำหนักระสาททุกน้ำหนักระสาทหลังจากเรียนรู้เสร็จสิ้นแล้วเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักระสาทเริ่มต้น ดังนั้นจากผลการทดสอบการควบคุมหัวหุ่นยนต์แบบออนไลน์ แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถทำการเรียนรู้ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น



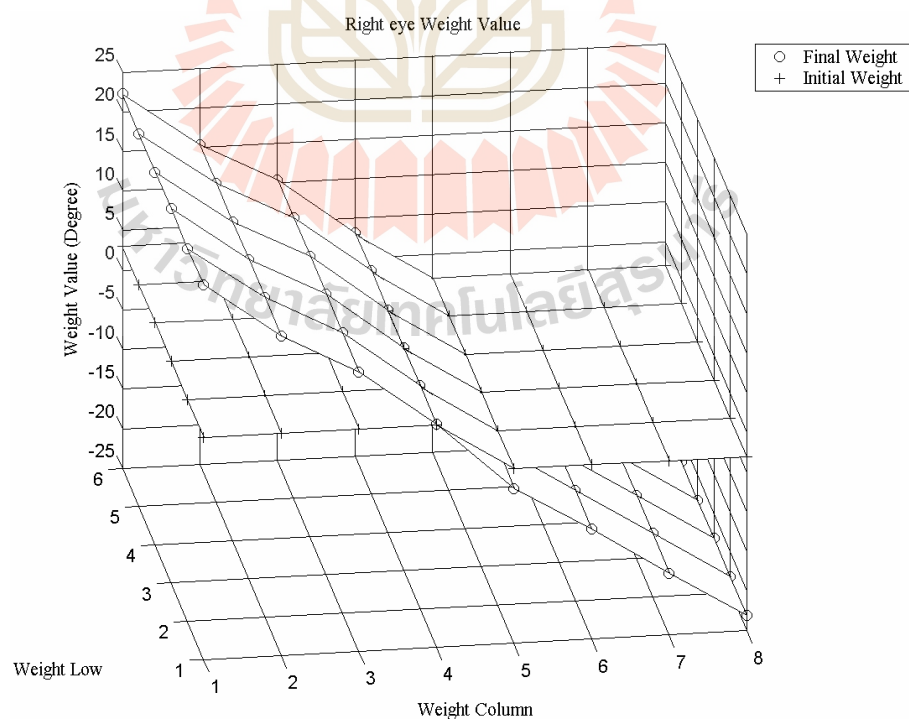
รูปที่ 5.5 แผนภาพการฝึกสอนการเคลื่อนที่โดยการฝึกสอนแต่ละครั้งไม่ต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้น



รูปที่ 5.6 กราฟระยะห่างของวัตถุจากจุดกึ่งกลางภาพ (ก)(ค)(จ) กล้องซ้าย (ข)(ง)(ฉ) กล้องขวา



รูปที่ 5.7 น้ำหนักประสาทของตาซ้าย



รูปที่ 5.8 น้ำหนักประสาทของตาขวา

5.3.2 การเคลื่อนที่แบบ SC โดยใช้มอเตอร์สามตัว

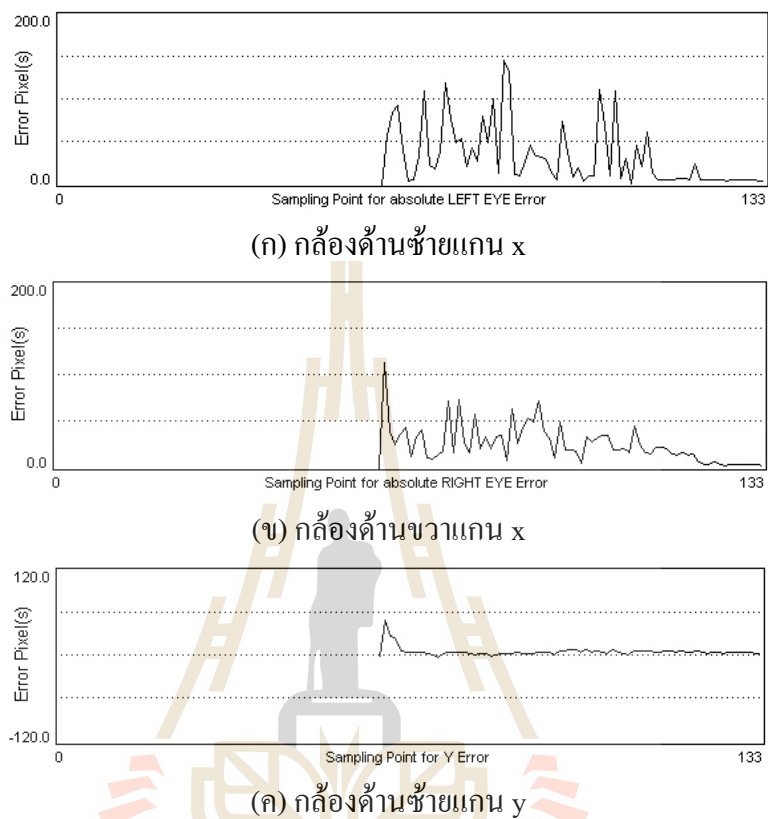
จากการทดสอบที่ผ่านมาเป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์เพื่อให้ นำพาวัตถุมายังจุดกึ่งกลางภาพตามแนวแกน x โดยใช้มอเตอร์เพียงสองตัวดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถพิสูจน์ได้ว่ากฎการเรียนรู้ที่ใช้เหมาะสำหรับการควบคุมหัวหุ่นยนต์ทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ เมื่อสามารถพิสูจน์ได้เป็นอย่างดีว่าตัวควบคุมรวมถึงกฎการเรียนรู้ที่ใช้มีประสิทธิภาพและใช้งานได้ดีเป็นอย่างดี การทดสอบการเรียนรู้ในส่วนต่อไปจะทำการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้สำหรับการก้ม-เงยเมื่อมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมกล้องตาสองตัวนำพาวัตถุมาสู่จุดศูนย์กลางภาพตามแนวแกน x มอเตอร์ที่ใช้สำหรับก้ม-เงยจะทำหน้าที่นำพาวัตถุมาสู่จุดศูนย์กลางภาพตามแนวแกน y โดยจะยึดจุดศูนย์กลางของภาพตามแนวแกน y ของภาพด้านซ้ายเป็นหลัก ซึ่งยังคงใช้กฎการเรียนรู้และวิธีการเรียนรู้เหมือนเดิมทุกประการแต่หากแตกต่างกันตรงที่จำนวนน้ำหนักประสาทที่ใช้เก็บปริมาณการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ก้ม-เงย

จำนวนน้ำหนักประสาทที่ใช้ในการหมุนของมอเตอร์เงยนี้จะมีเพียง 6 ตัวเท่านั้นแบ่งตามแนวแกน y เป็นแถวๆ ละ 40 จุดภาพ (รูปที่ 5.1 ประกอบ) และปริมาณที่อยู่ในน้ำหนักประสาทนั้นจะไม่ใช้ปริมาณองศาการหมุน โดยการใช้ปริมาณที่อยู่ในน้ำหนักประสาทเป็นจำนวนลูกคลื่นที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์โดยตรงเป็นการเหมาะสมกว่า เพราะมอเตอร์ที่ใช้สำหรับการก้ม-เงยนั้นมีการถูกทดด้วยเฟืองเกลิยตัวหนอนซึ่งไม่สามารถระบุอัตราทดได้ทำให้ไม่สามารถบอกองศาที่ก้มเงยได้

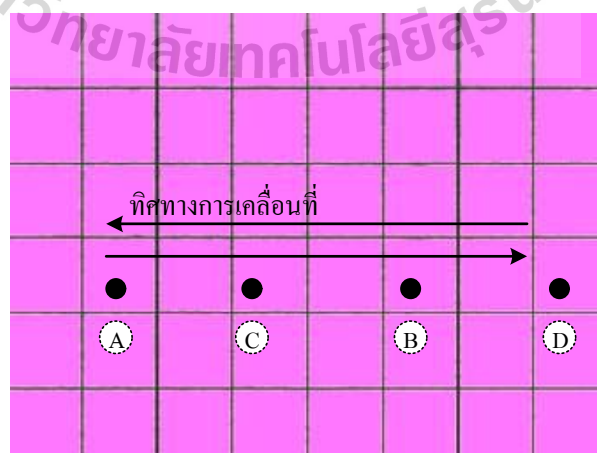
รูปที่ 5.9 แสดงระยะห่างจากวัตถุถึงจุดศูนย์กลางภาพซึ่งเป็นผลการฝึกสอนมอเตอร์ทั้งสามตัวพร้อมกัน คือมอเตอร์ตาสองตัวและมอเตอร์ที่ใช้สำหรับเงย โดยก่อนทำการฝึกสอนนั้นกำหนดให้ค่าน้ำหนักประสาทเป็นค่าน้ำหนักประสาทเริ่มต้น ในขณะที่ทำการฝึกสอนนั้น ทุกครั้งของการฝึกสอนหรือทุกครั้งที่มีการปรับค่าน้ำหนักประสาทจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งวัตถุเป้าหมายในแนวราบแบบสุ่มทุกครั้ง แสดงตัวอย่างของการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในแนวราบแบบสุ่มได้ดังรูปที่ 5.10 โดยจุด A เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของวัตถุเป้าหมาย จากนั้นจะเลื่อนวัตถุไปยังจุด B และจุด C ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งตัวควบคุมสามารถเรียนรู้เสร็จสิ้น กล่าวคือไม่ว่าวัตถุเป้าหมายจะอยู่ตำแหน่งใด ตัวควบคุมก็สามารถสั่งงานให้หัวหุ่นยนต์นำพาวัตถุเป้าหมายมายังบริเวณกึ่งกลางภาพได้

รูปที่ 5.9 แสดงระยะห่างจากวัตถุถึงจุดศูนย์กลางภาพ เห็นว่าเมื่อตำแหน่งของวัตถุเปลี่ยนไป ตัวควบคุมจะเรียกปริมาณที่อยู่ในน้ำหนักประสาทออกมาควบคุมมอเตอร์ และน้ำหนักประสาทนั้นจะถูกปรับเปลี่ยน เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุไปน้ำหนักประสาทอื่นๆ ก็จะถูกปรับเปลี่ยนจนเกิดการปรับเปลี่ยนของทุกๆ น้ำหนักประสาทที่วัตถุไปตกอยู่บริเวณนั้นเข้าไปเข้ามา

สุดท้ายนี้ให้นักประสาที่มีปริมาณพอดีที่สามารถสั่งงานหัวหุ่นยนต์เพียงครั้งเดียวก็สามารถนำพาวัตถุมาสู่บริเวณกึ่งกลางภาพได้

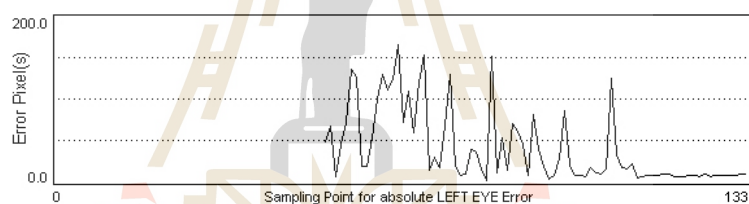


รูปที่ 5.9 ระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพหลังจากตัวควบคุมทำงาน

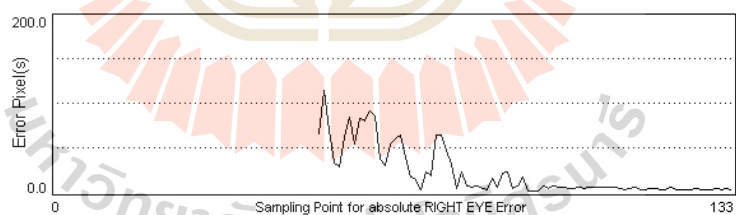


รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในแนวราบแบบสุ่ม

รูปที่ 5.11 แสดงผลการฝึกสอนมอเตอร์ทั้งสามตัวพร้อมกันดังเช่นกรณีที่แล้ว หากแต่ทุกครั้งที่มีการปรับน้ำหนักประสาทในแต่ละครั้งเรียบร้อยแล้วจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายเป็นลักษณะคล้ายวงกลมดังแสดงในรูปที่ 5.12 โดยวัตถุเป้าหมายจะเริ่มเคลื่อนที่จากจุด A ไปจุด B และไปยังจุดต่อๆ ไปเรื่อยๆ เป็นลักษณะคล้ายวงกลม เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในรูป 5.11 เมื่อเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายเป็นลักษณะวงกลมตลอดเวลา ตัวควบคุมเกิดการปรับค่าน้ำหนักประสาททุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งสุดท้ายเมื่อเคลื่อนวัตถุไปที่ตำแหน่งใดๆ ตัวควบคุมสามารถสั่งมอเตอร์ทั้งสามตัวนำพาวัตถุมายังจุดศูนย์กลางภาพได้ เมื่อการปรับค่าน้ำหนักประสาทของตัวควบคุมมีความพอดีแล้ว จากผลการทดสอบการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายเป็นลักษณะวงกลม จะเห็นว่าเมื่อลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุเปลี่ยนแปลงไปในกรณีที่ซับซ้อนขึ้นกว่าในกรณีที่ผ่านมา พบว่าตัวควบคุมก็ยังสามารถทำการเรียนรู้และสามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่นำพาวัตถุเป้าหมายมายังกึ่งกลางภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา



(ก) กร็อตด้านซ้ายแกน x

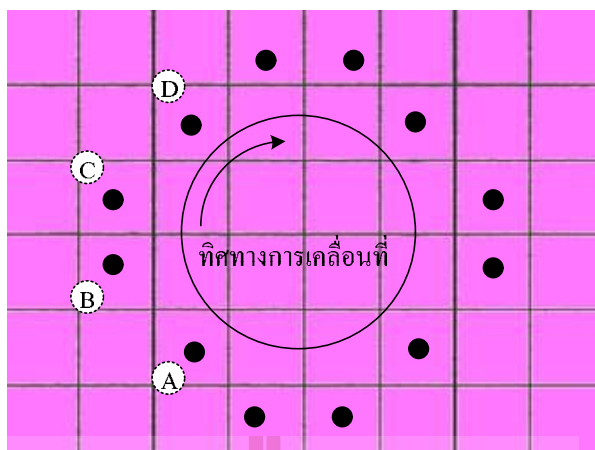


(ข) กร็อตด้านขวาแกน x



(ค) กร็อตด้านซ้ายแกน y

รูปที่ 5.11 ระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพหลังจากตัวควบคุมทำงาน



รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายเป็นลักษณะวงกลม

5.3.3 การชดเชยการหมุนของมอเตอร์ตาเมื่อเกิดการหมุนของมอเตอร์คอ

การทดสอบที่ผ่านมารอบคลุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ทั้งสามตัวคือมอเตอร์ตา สองตัวและมอเตอร์ที่ใช้กัม-เงย ในส่วนมอเตอร์ที่ใช้กัม-เงยนั้นเพื่อควบคุมแนวของวัตถุในแนว y มอเตอร์ตาสองตัวนั้นใช้ควบคุมแนวของวัตถุในแนวแกน x การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ตาทั้งสองตัวนี้จะไปสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์คอด้วย กล่าวคือด้วยโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์เมื่อมอเตอร์คอเกิดการเคลื่อนที่จะส่งผลต่อมอเตอร์ที่อยู่บนโครงสร้างของมอเตอร์คอ เมื่อมอเตอร์คอเคลื่อนที่มอเตอร์ทั้งสามย่อมเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไป ทำให้ผลการควบคุมที่ผ่านมามีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นระบบต้องทำการชดเชยเมื่อเกิดการหมุนของมอเตอร์คอ การหมุนของมอเตอร์นี้จะประโยชน์อย่างมากเนื่องจากจะทำให้ระบบได้มุมมองมากขึ้น

เนื่องจากมอเตอร์คอจะส่งผลโดยตรงกับระนาบ x ซึ่งการควบคุมระนาบ x โดยปกติจะถูกควบคุมโดยมอเตอร์ตา ดังนั้นเมื่อมอเตอร์คอหมุนไม่ว่าจะทิศทางใดและเป็นปริมาณเท่าใด จะส่งผลให้ปริมาณการหมุนของมอเตอร์ตาที่จะนำพาวัตถุมาสู่บริเวณกึ่งกลางภาพเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเมื่อมอเตอร์คอเกิดการหมุนเราจำเป็นต้องหาปริมาณที่พอเหมาะมาชดเชยการหมุนของมอเตอร์ตาทั้งสองข้างที่ระบบได้ตั้งออกไป เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำการกำหนดน้ำหนักประสาทสำหรับการชดเชยปริมาณมอเตอร์ตาทั้งสองเมื่อมอเตอร์คอเกิดการหมุน โดยจะใช้การเรียนรู้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการเรียนรู้เดิม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. หาพิกัดของวัตถุเป้าหมายในภาพ
2. ถ้าพิกัดของวัตถุเป้าหมายไม่ได้อยู่บริเวณกึ่งกลางภาพ ให้ตัวควบคุมสั่งให้มอเตอร์คอหมุนด้วยปริมาณ V พร้อมกับสั่งให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่มอเตอร์ตาทั้งสองข้าง

ด้วยปริมาณน้ำนักประสาทที่วัดดูเป้าหมายต่อนั้นรวมกับปริมาณที่ต้องชดเชย
การหมุนของมอเตอร์ทั้งสอง

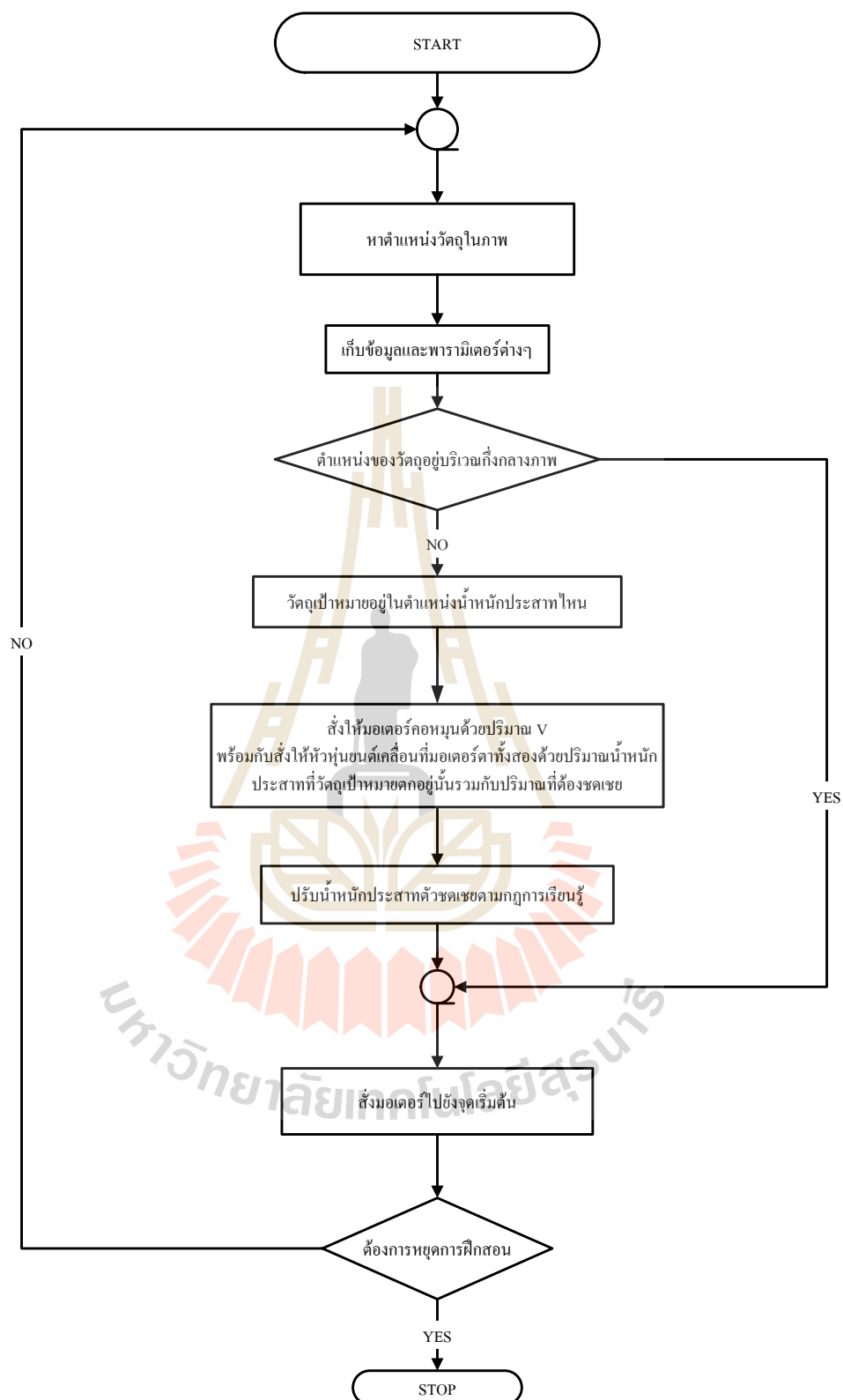
3. ปรับน้ำนักประสาทตัวชดเชยของมอเตอร์ทั้งสอง

4. ล้างมอเตอร์ทุกตัวไปยังจุดเริ่มต้น

จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะทำขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอน 4 จนกระทั่งเมื่อปรับ
น้ำนักประสาทของตัวชดเชยตามกฎการเรียนรู้แล้วสามารถสั่งให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่นำพาวัตถุ
มายังบริเวณกึ่งกลางภาพได้ จะสังเกตเห็นว่าในขั้นตอนที่ 2 มีการสั่งให้มอเตอร์ทั้งสองเคลื่อนที่นั้น
ทั้งนี้ค่าน้ำนักประสาทที่ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ทั้งสอง ต้องเป็นค่าน้ำนักประสาทที่
ได้รับการเรียนรู้ในหัวข้อที่ 3.3.1 มาแล้วเท่านั้น เพราะในหัวข้อนี้จะทำการหาค่าน้ำนักประสาทที่
ต้องชดเชยเท่านั้น และในขั้นตอนที่ 2 นี้ สั่งงานให้มอเตอร์คอกหมุนด้วยปริมาณ n เนื่องจากปริมาณ
การหมุนของมอเตอร์คอกสามารถหมุนได้หลายค่า ดังนั้นในการฝึกสอน 1 รอบสามารถได้ปริมาณ
การชดเชยการหมุนของมอเตอร์ 1 ค่าด้วยกัน

หลังจากที่ทำการฝึกสอนตัวควบคุมเพื่อหาปริมาณการหมุนชดเชยเสร็จสิ้นแล้ว
ได้ผลปริมาณการชดเชยการหมุนของมอเตอร์ทั้งสองข้างแสดงดังตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.13
แสดงความสัมพันธ์ของมุมชดเชยของตาซ้ายและตาขวาเมื่อมอเตอร์คอกหมุนไปเป็นปริมาณหนึ่งๆ
เห็นว่ามุมที่มอเตอร์ตาซ้ายและมอเตอร์ตาขวาต้องหมุนชดเชยเมื่อมอเตอร์คอกหมุนจะมีปริมาณ
ใกล้เคียงกันและค่อนข้างเป็นเชิงเส้น แต่มีขนาดที่ไม่เท่ากันของระหว่างตาทั้งสองข้าง

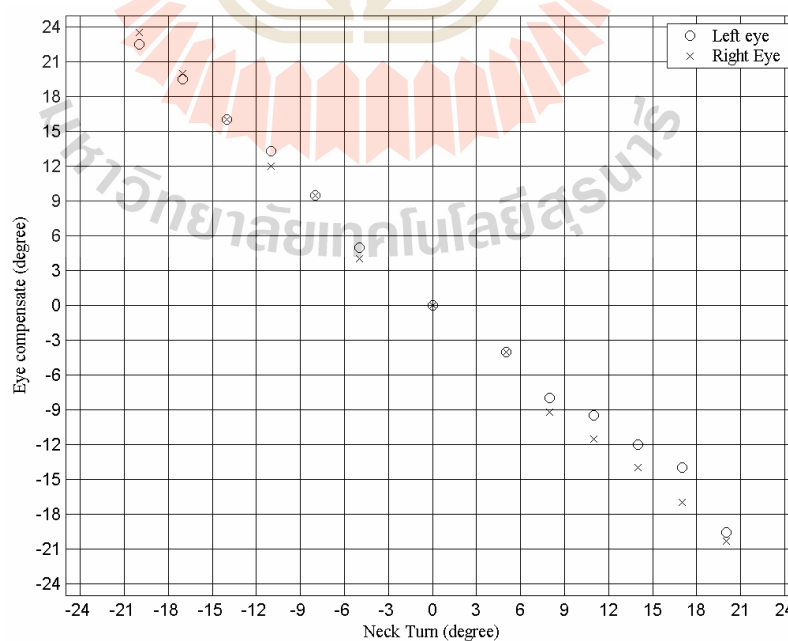




รูปที่ 5.13 แผนภาพการเรียนรู้เพื่อหาปริมาณชดเชย

ตารางที่ 5.1 ปริมาณการชดเชยการหมุนของมอเตอร์ตาทั้งสองข้าง

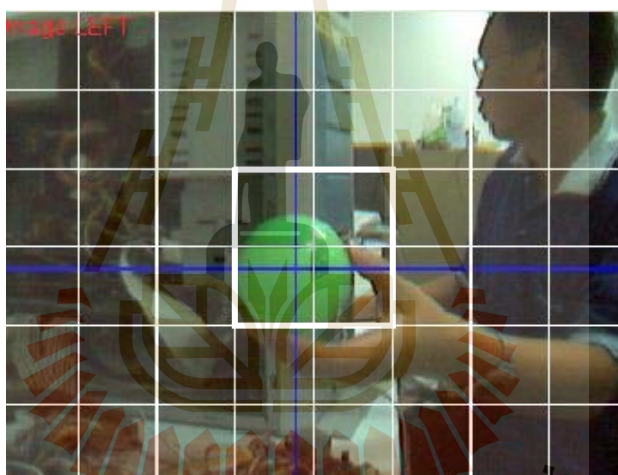
ปริมาณที่มอเตอร์ค้อมุน (องศา)	มุมชดเชยของมอเตอร์ตาซ้าย (องศา)	มุมชดเชยของมอเตอร์ตาขวา (องศา)
5	-4.0	-4.0
8	-8.0	-9.2
11	-9.5	-11.5
14	-12.0	-14.0
17	-14.0	-17.0
20	-19.6	-20.3
-5	5.0	4.0
-8	9.5	9.5
-11	13.3	12.0
-14	16.0	16.0
-17	19.5	20.0
-20	22.5	23.5



รูปที่ 5.14 มุมชดเชยของตาซ้ายและตาขวาเมื่อมอเตอร์ค้อมุน

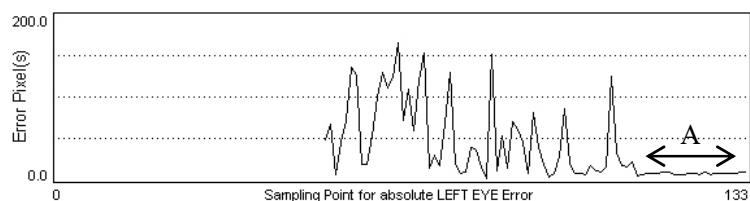
5.4 การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบ SP

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ที่ผ่านมาเป็นการทดสอบให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้แบบ SC แต่ในการสั่งงานให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อให้นำวัตถุเป้าหมายมายังบริเวณกึ่งกลางภาพนั้น จะมีการเคลื่อนที่แบบ SP รวมอยู่ด้วย พิจารณารูปที่ 5.15 แสดงวัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณน้ำหนักระสาทกึ่งกลางภาพ จะเห็นว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่แบบ SC มายังบริเวณกึ่งกลางภาพแล้วนั้น ตัวควบคุมจะทำการอ่านค่าน้ำหนักระสาทในบริเวณตำแหน่งที่วัตถุคอยู่เพื่อสั่งงานให้หัวหุ่นยนต์รักษาวัตถุเป้าหมายให้อยู่บริเวณกึ่งกลางภาพตลอดเวลา ดังนั้นเห็นได้ว่าน้ำหนักระสาทบริเวณกึ่งกลางภาพจะถูกปรับเปลี่ยนตลอดเวลาตามสถานะตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย เนื่องจากในบริเวณจุดกึ่งกลางภาพนั้นมีน้ำหนักระสาทอยู่ 4 ค่า ค่าน้ำหนักระสาทเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่อวัตถุเป้าหมายเคลื่อนที่อยู่บริเวณค่าน้ำหนักระสาทนั้นๆ

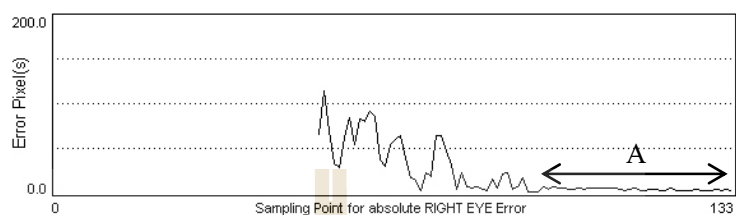


รูปที่ 5.15 วัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณน้ำหนักระสาทกึ่งกลางภาพ

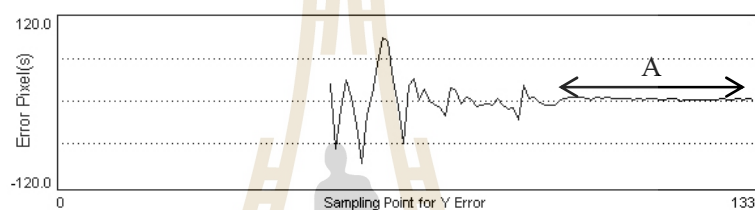
พิจารณาผลการทดสอบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ในรูปที่ 5.16 เป็นผลการทดสอบการเรียนรู้ของตัวควบคุมเมื่อเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายให้มีลักษณะคล้ายวงกลม (สามารถดูได้ในหัวข้อ 5.3.2) จะเห็นช่วงการเคลื่อนที่ A เป็นการสั่งให้หัวหุ่นยนต์ติดตามวัตถุเป้าหมายที่เปลี่ยนตำแหน่งไป ซึ่งในช่วงการเคลื่อนที่ A นี้ มีการผสมผสานของการเคลื่อนที่ทั้งแบบ SC และแบบ SP โดยการเคลื่อนที่แบบ SC นั้นจะนำพาวัตถุเป้าหมายมายังบริเวณกึ่งกลางภาพ เมื่อวัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณกึ่งกลางของภาพ ตัวควบคุมจะทำการปรับน้ำหนักระสาทบริเวณกึ่งกลางภาพเพื่อให้ปริมาณของน้ำหนักระสาทดังกล่าวสามารถนำพาวัตถุเข้าสู่จุดศูนย์กลางภาพได้มากขึ้นอีก



(ก) กล้องด้านซ้ายแกน x



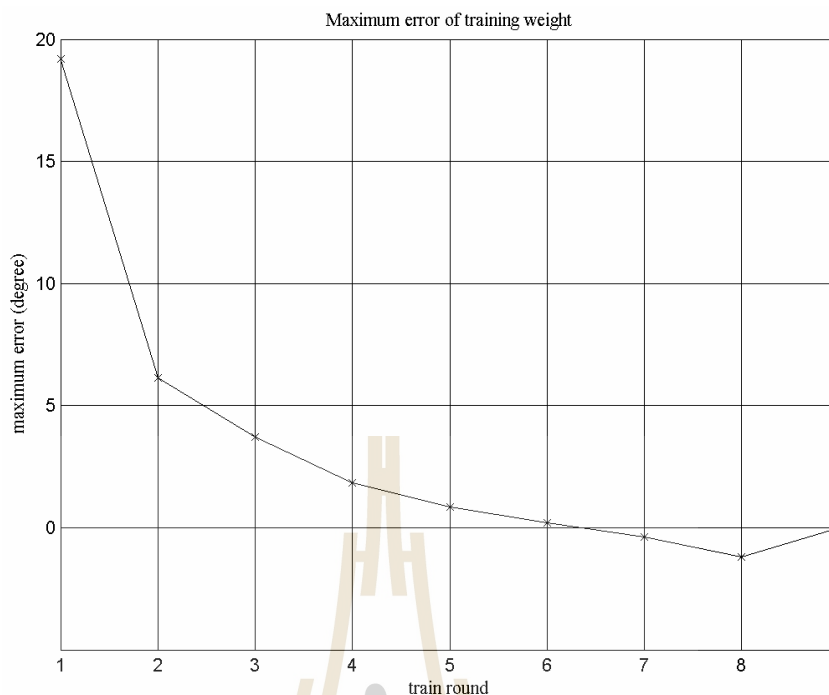
(ข) กล้องด้านขวาแกน x



(ค) กล้องด้านซ้ายแกน y

รูปที่ 5.16 ระยะห่างของวัตถุจากจุดศูนย์กลางภาพ

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ข้างต้น จะเห็นว่าปริมาณน้ำหนักระสาทของตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ข้อต่อต่างๆ ของหัวหุ่นยนต์ โดยการเรียนรู้ของเครือข่ายจะทำการปรับค่าปริมาณน้ำหนักระสาทจากปริมาณค่าน้ำหนักระสาทเริ่มต้นจนถึงปริมาณน้ำหนักระสาทที่สามารถทำให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ถูกต้อง ในรูปที่ 5.17 แสดงค่าความผิดพลาดสูงสุดของมอเตอร์ในเทอมของน้ำหนักระสาทขณะเรียนรู้ด้วยตัวเอง จะเห็นได้ว่าการปรับตัวของปริมาณน้ำหนักระสาทจะมีลักษณะลู่เข้าหาคำตอบที่ถูกต้องจนกระทั่งมีความผิดพลาดเป็นศูนย์



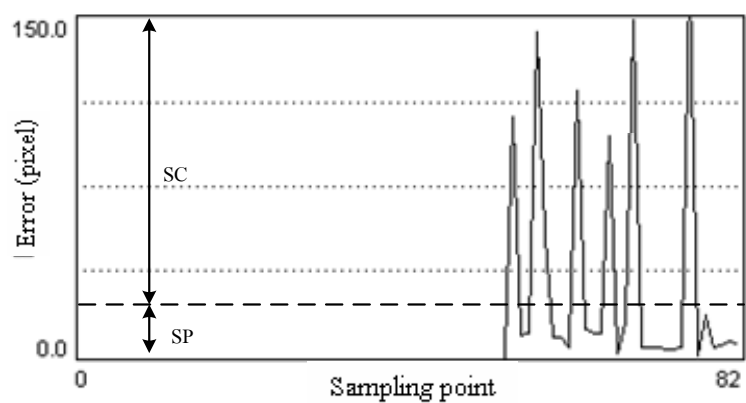
รูปที่ 5.17 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของมอเตอร์ในเทอมน้ำหนักประสาทขณะเรียนรู้ด้วยตัวเอง

5.5 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบ SC และ SP

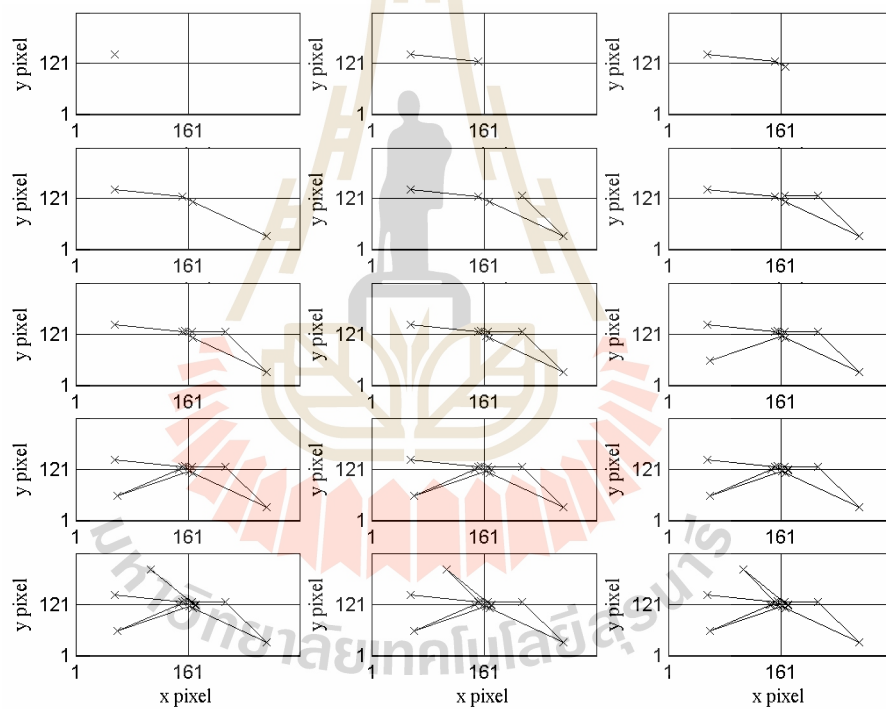
เมื่อทำการฝึกสอนตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้นทุกส่วนแล้ว ทำการทดสอบให้หัวหุ่นยนต์ติดตามวัตถุ โดยที่วัตถุเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปด้วย จากรูปที่ 5.18 เป็นรูปที่แสดงระยะห่างจากวัตถุเป้าหมายถึงจุดศูนย์กลางภาพแบบกำลังสองสมมาตรของภาพด้านซ้าย เห็นได้ว่าระยะห่างจากจุดศูนย์กลางภาพแบ่งออกเป็น 2 เขตคือ เขต SP และ เขต SC โดยที่ถ้าวัตถุอยู่ในเขต SC ตัวควบคุมก็จะใช้การเคลื่อนที่แบบ SC และถ้าวัตถุอยู่ในเขต SP ตัวควบคุมจะใช้การปรับน้ำหนักประสาทเพื่อให้เคลื่อนที่แบบ SP

รูปที่ 5.19 (ก) และรูปที่ 5.19 (ข) เป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ซึ่งมีความสัมพันธ์เดียวกันกับรูปที่ 5.18 หากแต่เป็นการแสดงการก้าวเดินของหัวหุ่นยนต์เมื่อวัตถุเปลี่ยนตำแหน่งไป จะเห็นว่า ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมจะควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้นำพาวัตถุมายังบริเวณจุดกึ่งกลางภาพอย่างแม่นยำเมื่อวัตถุไม่ได้้อยู่ภายในบริเวณจุดกึ่งกลางภาพ

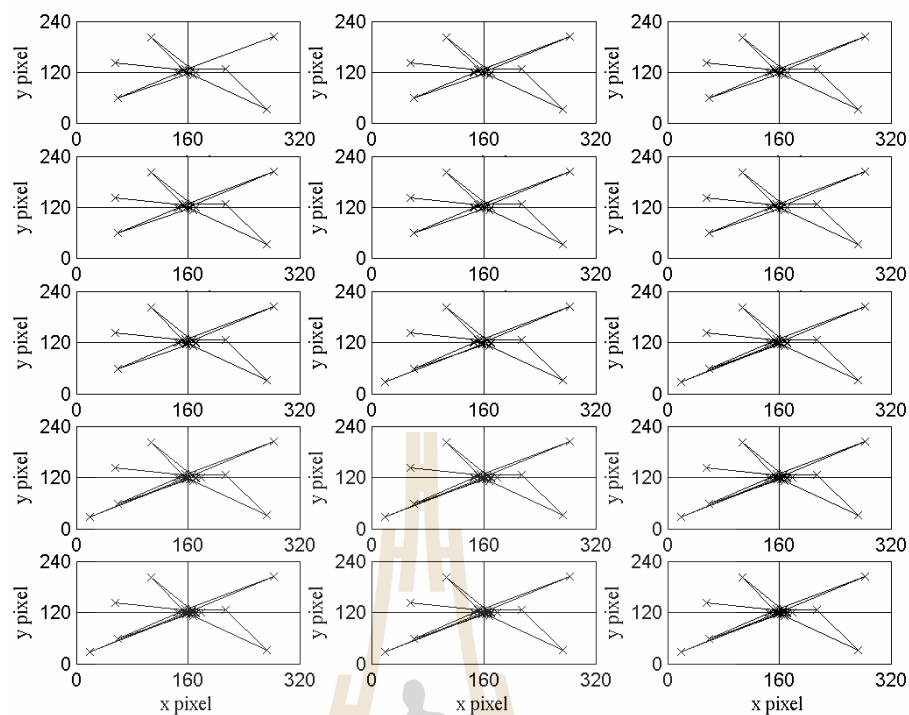
จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์ทั้งแบบ SC และแบบ SP จะเห็นว่าหัวหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่นำพาวัตถุเป้าหมายมายังจุดศูนย์กลางได้อย่างแม่นยำ โดยมีตัวอย่างความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์จากจุดศูนย์กลางถึงวัตถุเป้าหมายแต่ละครั้งแสดงได้ ในรูปที่ 5.20 และสามารถแสดงระยะทางจากวัตถุถึงจุดศูนย์กลางภาพหลังจากการเคลื่อนที่แบบ SC และ SP แสดงในตารางที่ 5.2



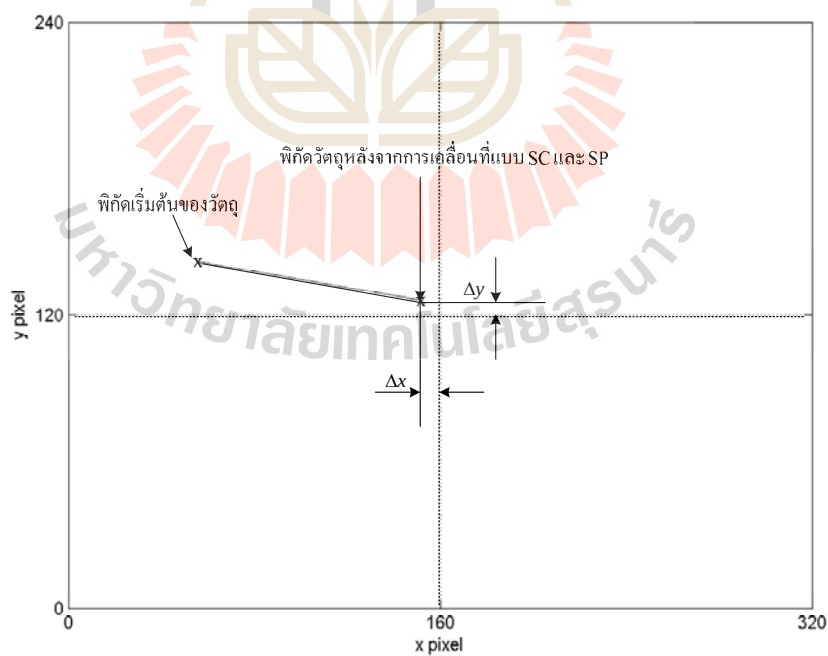
รูปที่ 5.18 ระยะห่างของวัตถุเป้าหมายถึงจุดศูนย์กลางภาพด้านซ้าย



รูปที่ 5.19 (ก) การก้าวเดินของหัวหุ่นยนต์เพื่อนำพาวัตถุมาบริเวณกึ่งกลางภาพ



รูปที่ 5.19 (ข) การก้าวเดินของหัวหุ่นยนต์เพื่อนำพาวัตถุมาบริเวณกึ่งกลางภาพ (ต่อ)



รูปที่ 5.20 ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหัวหุ่นยนต์จากจุดศูนย์กลางถึงวัตถุเป้าหมาย

ตารางที่ 5.2 ระยะทางจากวัตถุถึงจุดศูนย์กลางภาพหลังจากการเคลื่อนที่แบบ SC และ SP

พิกัด x	พิกัด y	Δx (จุดภาพ)	Δy (จุดภาพ)	$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$
152	126	8	-6	10.00
168	112	-8	8	11.31
166	127	-6	-7	9.22
156	128	4	-8	8.94
163	116	-3	4	5.00
158	118	2	2	2.83
156	117	4	3	5.00
158	116	2	4	4.47
159	120	1	0	1.00
165	122	-5	-2	5.39
166	119	-6	1	6.08
167	121	-7	-1	7.07
166	120	-6	0	6.00
ความผิดพลาดจากจุดกึ่งกลางภาพเฉลี่ย				6.33

5.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการนำองค์ประกอบต่างๆ ทั้งทางด้านโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์ และ ทฤษฎีการควบคุมมาสร้างเป็นตัวควบคุมที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม โดยตัวควบคุมดังกล่าวใช้การเรียนรู้ของเครื่องจักรเพื่อปรับตัวให้ทำงานได้กับระบบ โดยการเรียนรู้ดังกล่าวสามารถแยกออกเป็น ส่วนๆ ได้ กล่าวคือ ให้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ที่ละส่วนของระบบการเคลื่อนที่ของ หัวหุ่นยนต์ ซึ่งการเรียนรู้ทุกๆ ส่วนให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในการควบคุมให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ทั้งแบบ SC และแบบ SP ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมนอกจากจะสามารถสั่งงานให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ดังกล่าวได้แล้ว ตัวควบคุมยังสามารถปรับน้ำหนักประสาทของตัวควบคุมเมื่อหัวหุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดอีกด้วย อีกทั้งการเรียนรู้ยังสามารถทำงานได้ทั้งแบบออนไลน์และแบบออฟไลน์ ผลทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความอ่อนตัว ความคงทนและความมีเสถียรภาพของตัวควบคุมที่ใช้ว่าตัวควบคุมมีประสิทธิภาพสูง และนอกจากจะมีประสิทธิภาพสูงแล้วขั้นตอนการเรียนรู้และขั้นตอนการควบคุมยังไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถใช้งานตัวควบคุมได้ง่าย

อีกด้วย อีกทั้งจากการทดสอบการควบคุมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าไม่ต้องทำการปรับเทียบกล้องและไม่ต้องทำการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนลงไปได้อย่างมากอีกด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์และทำการปรับเทียบกล้องเพื่อให้การควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพ



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้แบบตามนุษย์แบบใหม่ โดยใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมและการเรียนรู้ของเครื่องจักร รวมถึงได้ทำการทดสอบการควบคุมดังกล่าวด้วยการสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบขึ้นโดยเริ่มจากการออกแบบเพื่อสร้างหัวหุ่นยนต์ต้นแบบโดยมีองค์ประกอบของชิ้นส่วนต่างๆ รวมถึงการขึ้นรูป การประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน เมื่อชิ้นส่วนแต่ละชิ้น มีค่าความผิดพลาดต่างไปจากแบบที่ออกแบบไว้ ทำให้เมื่อประกอบกันเป็นหัวหุ่นยนต์ ลักษณะทางกายภาพของหัวหุ่นยนต์จึงเกิดความผิดพลาดตามไปด้วย ทำให้การหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์เป็นไปได้ยากมากขึ้น จากนั้นทำการสร้างชุดควบคุมหัวหุ่นยนต์ที่ทำการควบคุมการหมุนของมอเตอร์เซอร์โวกระแสดตรง โดยชุดควบคุมดังกล่าวทำการรับและส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งในระหว่างการรับและส่งข้อมูลอาจเกิดการสูญเสียข้อมูลด้วยปัจจัยหลายๆ ปัจจัย ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพตามต้องการ จำเป็นต้องคำนึงถึงแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ซึ่งหาได้ค่อนข้างยาก อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงการรับส่งข้อมูลเพื่อควบคุมหัวหุ่นยนต์อีกด้วย

ทฤษฎีที่ใช้ควบคุมหัวหุ่นยนต์นั้นเป็นทฤษฎีแบบใหม่ซึ่งเกิดขึ้นจากการผสมผสานระหว่างเครือข่ายประสาทเทียมแบบแข่งขันและการใช้กฎการเรียนรู้ของการประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัต ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวสามารถผสมผสานกันได้อย่างลงตัว เนื่องจากการประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัตนี้เป็นตัวที่ใช้ส่งต่อระหว่างค่าพารามิเตอร์รูปภาพและค่าพารามิเตอร์หัวหุ่นยนต์ ทำให้สามารถลดความยุ่งยากในการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์และการปรับเทียบกล้อง ซึ่งความยุ่งยากดังกล่าวมักเป็นเป็นปัญหาของระบบการเคลื่อนที่ที่ใช้ควบคุมไปกลับกล้อง ดังนั้นเมื่อนำเครือข่ายประสาทเทียมซึ่งมีข้อดีหลายด้าน เช่น มีความสามารถในการเรียนรู้จากตัวอย่าง การทำให้เป็นกรณีทั่วไป มีความทนทานต่อความบกพร่องและเครือข่ายมีการปรับตัวได้ไปรวมกับข้อดีของการใช้กฎการเรียนรู้ของการประมาณค่าของจาโคเบียนแบบพลวัต ทำให้ตัวควบคุมแบบใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพอย่างแท้จริง

และเมื่อนำตัวควบคุมดังกล่าวไปควบคุมหัวหุ่นยนต์ โดยตัวควบคุมดังกล่าวสามารถใช้การเรียนรู้เพื่อสั่งงานหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้ทั้งแบบ SC (saccade) และแบบ SP (smooth pursuit) โดยการเรียนรู้ดังกล่าวสามารถแยกออกเป็นส่วนๆ ได้ กล่าวคือ ให้ตัวควบคุมเรียนรู้ทีละส่วนของ

ระบบเพื่อให้ตัวควบคุมเรียนรู้การเคลื่อนที่ของส่วนต่างๆ ของระบบหัวหุ่นยนต์ ซึ่งหลังจากการเรียนรู้ทุกๆ ส่วนเสร็จสมบูรณ์แล้ว การควบคุมหัวหุ่นยนต์โดยตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจอย่างมาก และในการควบคุมให้หัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ทั้งแบบ SC และแบบ SP ตัวควบคุมนอกจากจะสามารถสั่งงานระบบหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ตัวควบคุมยังสามารถปรับตัวเองเมื่อระบบเกิดการเคลื่อนที่ที่ผิดเพี้ยนไปอีกด้วย อีกทั้งการเรียนรู้ยังสามารถทำงานได้ทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ ผลทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความอ่อนตัว ความคงทนและความมีเสถียรภาพของตัวควบคุมที่ใช้ว่าตัวควบคุมมีประสิทธิภาพสูง และนอกจากจะมีประสิทธิภาพสูงแล้วขั้นตอนการเรียนรู้และขั้นตอนการควบคุมยังไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อน ทำให้ใช้งานได้ง่ายอีกด้วย รวมทั้งจากการทดสอบการควบคุมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าไม่ต้องทำการปรับเทียบกล้องและไม่ต้องทำการหาแบบจำลองของหัวหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนลงไปได้อย่างมากอีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบใหม่นี้กับงานนิพนธ์ที่ผ่านมา งานนิพนธ์ฉบับนี้ได้ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าทั้งในเรื่องความง่ายของการใช้ตัวควบคุม ความมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพของตัวควบคุมรวมถึงการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง ดังนั้นตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมแบบใหม่ซึ่งอาศัยการเรียนรู้ของเครื่องจักรตัวนี้มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้งานได้ ในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานทางด้านการมองเห็นแบบไวงานต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการผลทดสอบการควบคุมหัวหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่แบบตามมนุษย์โดยใช้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียม มีข้อเสนอแนะเป็นข้อๆ ได้ดังนี้ คือ

1. องค์ประกอบระบบของหัวหุ่นยนต์ดังกล่าวข้างต้น เพื่อที่จะสามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น นอกจากจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่สมบูรณ์แบบแล้ว องค์ประกอบส่วนอื่นๆ ต้องสมบูรณ์แบบเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นตัวโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์หรือชุดประมวลผลที่ใช้ควบคุมการหมุนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงที่ต้องขับเคลื่อนหัวหุ่นยนต์ กล่าวคือในส่วนประกอบของโครงสร้างของหัวหุ่นยนต์นั้นต้องมีความแม่นยำมากในทุกๆ ชิ้นส่วนประกอบ เพื่อให้เมื่อประกอบเป็นหัวหุ่นยนต์ขึ้นมาแล้วนั้นหัวหุ่นยนต์จะมีความผิดพลาดโดยรวมน้อยที่สุด เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมเพราะจะสามารถควบคุมได้ง่ายขึ้น ในส่วนของชุดประมวลผลที่ใช้ควบคุมหัวหุ่นยนต์ ต้องอาศัยความรู้ทั้งในด้านวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และความรู้ทางด้านซอฟต์แวร์เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมนั้น จะต้องมีความแม่นยำทั้งในการออกแบบวงจรและออกแบบการเขียนโปรแกรมให้เป็นลำดับขั้นตอนอย่างดีเพื่อให้ทำงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

2. เห็นได้ว่าการสร้างระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์นั้นต้องอาศัยทั้งความรู้ทางด้านการออกแบบชิ้นงาน ทางด้านระบบควบคุม ทางด้านวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ทางด้านโปรแกรมควบคุมวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และทางด้านคอมพิวเตอร์ทั้งในด้านของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้ทุกส่วนมีประสิทธิภาพสูงสุด อาจจำเป็นต้องใช้ทีมวิจัยที่มากกว่าหนึ่งคน ซึ่งจะสามารถมีความรู้ทางด้านต่างๆ โดยรวมอย่างครบถ้วนและจะสามารถพัฒนาระบบการควบคุมหัวหุ่นยนต์นี้ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นไป

3. ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นมานั้น สามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์เพื่อจัดจ้องให้วัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณกึ่งกลางภาพ แต่ไม่สามารถจัดจ้องวัตถุเป้าหมายให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางภาพได้พอดี ถ้าสามารถพัฒนาตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมโดยให้ตัวควบคุมเครือข่ายประสาทสามารถควบคุมหัวหุ่นยนต์จัดจ้องวัตถุเป้าหมายให้อยู่กึ่งกลางภาพได้ จะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการมองของหัวหุ่นยนต์และสามารถทำให้ระบบการมองของหัวหุ่นยนต์มีลักษณะที่เทียบเคียงกับการมองเห็นของมนุษย์มากขึ้นอีก

4. เนื่องจากในปัจจุบันนี้ระบบฝังตัว (embedded system) ได้มีการพัฒนามากขึ้นทั้งในด้านความเร็วที่สูงขึ้น ความจุของหน่วยความจำที่มากขึ้น ขนาดที่เล็กลงและราคาที่ต่ำลง ซึ่งถ้าสามารถพัฒนาตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมแบบใหม่นี้ให้ไปอยู่ในระบบฝังตัวแทนเครื่องคอมพิวเตอร์จะสามารถใช้งานได้หลากหลายและเยอะมากขึ้น เพราะด้วยข้อจำกัดเรื่องขนาดที่ถ้าสามารถพัฒนาไปอยู่ในระบบฝังตัวได้จะทำให้ขนาดเล็กลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องคอมพิวเตอร์ อีกทั้งเมื่อตัวควบคุมแบบใหม่นี้มีราคาที่ถูกลงอย่างมากก็เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หวังว่าการพัฒนาให้ตัวควบคุมแบบใหม่นี้ลงไปอยู่ในระบบฝังตัวจะเกิดขึ้นโดยเร็วเพื่อพัฒนาระบบการมองเห็นแบบไวงานให้มีประสิทธิภาพต่อไป

รายการอ้างอิง

- Peng, J., Srikaew, A., Wilkes, M., Kawamura, K., Peters, A., "An active vision system for mobile robots", Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on Volume 2, 8-11 Oct. 2000
- Lee, J., Galiana, H.L., "A biologically inspired model of binocular control on a free head", Engineering in Medicine and Biology Society, 2004.EMBC 2004. Conference Proceedings. 26th Annual International Conference of the Volume 2, 1-5 Sept. 2004
- Danese, G., Lombardi, R., Morizio, M., Revelli, C., "PAVIA: a control system for active vision", Computer Architectures for Machine Perception, 1995. Proceedings. CAMP '95 18-20 Sept. 1995
- Sharma, R., Shrinivasa, N., "Saccade control for an active stereo head using a learned spatial representation", Intelligent Control, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium.
- Sung, E., "Stereo head/face tracking and pose estimation", Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002. 7th International Conference
- T. Kohonen, "Self-organized formation of topologically correct feature maps", *Biol. Cybern.*, 1982.
- Shah-Hosseini, H., Safabakhsh, R., "TASOM: the time adaptive self-organizing map", Information Technology: Coding and Computing, 2000. Proceedings. International Conference on 27-29 March 2000
- Shah-Hosseini, H., Safabakhsh, R., "TASOM: a new time adaptive self-organizing map", Systems, Man and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on Volume 33, Issue 2, April 2003
- Sharkey, P.M., Murray, D.W., Heuring, J.J., "On the kinematics of robot heads", Robotics and Automation, IEEE Transactions on Volume 13, Issue 3, June 1997

- Gardel, A., Lazaro, J.L., Lavest, J.M., Collange, F., **"Multiview calibration of an active vision head"**, IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the Volume 4, 5-8 Nov. 2002
- Neubert, J., Ferrier, N.J., **"Robust active stereo calibration"**, Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on Volume 3, 11-15 May 2002
- Beymer, D., Flickner, M., **"Eye gaze tracking using an active stereo head"**, Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on Volume 2, 18-20 June 2003
- Cicero, T., **"Design of a stereo robot head: hardware and software issues"**, WESCON/96 22-24 Oct. 1996
- Changjiang Yang, Zhanyi Hu, **"An intrinsic parameters self-calibration technique for active vision system"**, Pattern Recognition, 1998. Proceedings. Fourteenth International Conference on Volume 1, 16-20 Aug. 1998
- Wandell B.A., **"Foundation of Vision."**, Sinauer Associates, Inc., 1995
- Mark M.A.P., Bear F., Barry W., **"Neuroscience, Exploring the Brain."**, Williams & Wilkins, 1996
- Gouras P., **"Principles of Neural Science."**, Elsevier, 2nd ed., 1985
- Wessler M., **"A modular visual tracking system."**, Master's thesis Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology. June 1995
- Brooks R.A., Breazeal C., Marjanovic M., Scassellati B., Williamson M.M., **"The cog project: Building a humanoid robot."**, in IAPR First International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, pp. 1-36, October 1998.
- Krauzlis R. and Lisberger S., **"A control system model of smooth pursuit eye movement with realistic emergent properties."**, in neural Computation. Vol. 1, 1989.
- Lisberger S., Morris E. and Tychsen L., **"Visual motion processing and sensory motor integration for smooth pursuit eye movement."**, in Ann. Rev. Neurosci., vol. 10, pp. 97-129, 1987.
- Coombs D.J. and Brown C.M., **"Real-time binocular smooth pursuit."**, International Journal of Computer Vision, vol. 11, pp. 147-164, 1993.

- Pahlavan K., Uhlin T. and Eklundh J.O., **"Dynamic fixation and active perception."**, International Journal of Computer Vision, vol. 17, pp. 113-135, 1996.
- Westelius C.J., **"Focus of Attention and Gaze Control for Robot Vision."**, PhD thesis, Electrical Engineering, Linköping University, Sweden, 1995.
- Rougeaux S., Kita N., Kuniyoshi Y., Sakane S. and Chavand F., **"Binocular tracking based on virtual horopters."**, IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2052-2057, 1994.
- Yamato J., **"Tracking moving object by stereo vision head with vergence for humanoid robot."**, Master's thesis, Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- Rougeaux S. and Kuniyoshi Y., **"Robust real-time tracking on an active vision head."**, Proceedings International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1996
- Laplante P.A. and Stoyenko A.D., **"Real-time Imaging: Theory, Techniques and Application."**, IEEE Press, 1996
- Murray D., **"Driving saccade to pursuit using image motion."**, International Journal of Computer Vision, vol. 16, pp. 205-228, 1995.
- Bradshaw K., McLauchlan P., Reid I. and Murray D., **"Saccade and pursuit on an active head/eye platform."**, Image and Vision Computing Journal, vol. 12, pp. 155-163, 1994.
- Corke P.I., Hutchinson S. and Hager G., **"A Tutorial on Visual Servo Control"**, IEEE Trans. On Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5, 1996, pp. 651-670.
- Craig J.J., **"Introduction to ROBOTICS: mechanics and control"**, Addison-Wesley Publishing company, 1989.



ภาคผนวก ก
การประมวลผลภาพ

ก.1 บทนำ

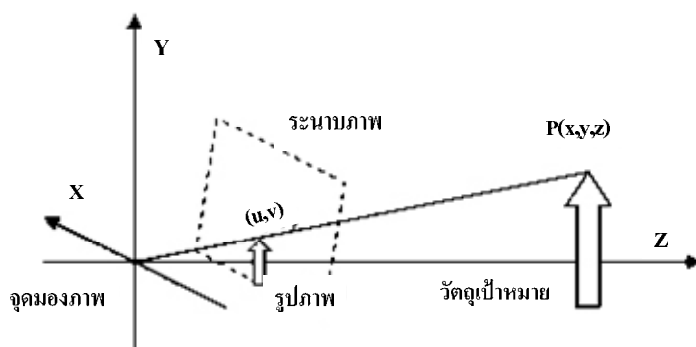
ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงวิธีการกล้องดิจิทัล มาใช้ในการหาวัตถุเป้าหมายเพื่อใช้ในการควบคุมหัวหุ่นยนต์ ระบบกล้องดิจิทัลจะมีจุดเด่นตรงที่เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบโดยไม่ต้องสัมผัสชิ้นงาน มีความยืดหยุ่นสูง และเหมาะสำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมหรือตำแหน่งของวัตถุที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามระบบกล้องดิจิทัลก็มีข้อเสียคือ มีความละเอียดต่ำกว่าตัวตรวจสอบแบบอื่นๆ ทำการเปรียบเทียบได้ยาก และมีความถี่ในการตรวจวัดต่ำ

ระบบที่ใช้กล้องดิจิทัลในการป้อนกลับจะมีความซับซ้อนกว่าระบบโดยทั่วไป เนื่องจากระบบกล้องดิจิทัลจะมีความถี่ในการวัดที่ต่ำ และข้อมูลที่ได้มีความล่าช้ากว่าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นปัญหาดังกล่าวจะทำให้จำกัดระบบควบคุมที่ใช้ระบบกล้องดิจิทัลเฉพาะกับงานที่มีการเคลื่อนที่ไม่เร็วมากนัก กล้องดิจิทัลในทางการค้าโดยทั่วไปจะมีอัตราในการบันทึกภาพ 60 ภาพต่อวินาที และจะมีความละเอียด 480 x 512 จุดสี ระบบกล้องดิจิทัลที่มีความเร็วและความละเอียดสูงกว่านี้จะมีราคาที่สูงขึ้นมาก

ก.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้อง

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกล้อง ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุบนแกนอ้างอิงกับตำแหน่งของวัตถุที่ปรากฏบนฉากรับภาพหรือบนภาพที่บันทึกได้จากกล้อง กล้องจะมีเลนส์ที่โปรเจกต์วัตถุจริง 3 มิติมาปรากฏเป็นรูป 2 มิติบนฉากรับภาพ ลักษณะการโปรเจกต์ภาพแบบนี้จะทำให้ข้อมูลความลึกของวัตถุหายไป และตำแหน่งบนภาพก็จะสัมพันธ์กับเส้นทางเดินแสงใน 3 มิติ ดังนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลอื่นประกอบ เพื่อระบุตำแหน่งใน 3 มิติของจุดๆหนึ่งในภาพ ข้อมูลนี้อาจมาจากกล้องหลายตัวหรือใช้กล้องตัวเดียวแต่ถ่ายหลายๆมุมมอง หรืออาศัยลักษณะรูปร่างของวัตถุที่ทราบมาก่อนล่วงหน้ามาพิจารณาประกอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุจริงกับตำแหน่งของวัตถุบนภาพที่บันทึกได้ที่ใช้กันโดยทั่วไปมี 3 แบบจำลองคือ แบบจำลองเพอร์สเปกทีฟ (Perspective projection) แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาด (Scaled Orthographic projection) และแบบจำลองแอฟฟิน (Affine projection) โดยต่อไปจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของแบบจำลองทั้งสามแบบสั้นๆ

สำหรับแบบจำลองทั้งสามที่จะกล่าวถึง กำหนดให้ฉากรับภาพอยู่บนระนาบที่ขนานกับระนาบ xy และอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเป็นระยะทาง λ (ระยะโฟกัส) ในขณะที่แกน z จะตั้งฉากกับระนาบนี้ ตำแหน่งของวัตถุบนฉากรับภาพจะถูกระบุด้วยแกน u และ v ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง/เลนส์

ก.2.1 แบบจำลองเพอร์สเปกทีฟ

แบบจำลองนี้จะมีลักษณะเหมือนของจริงที่สุดโดยใช้หลักการพิจารณาทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งที่ทางเดินนี้ตัดกับฉากรับภาพ จุด ${}^c\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ ซึ่งมีตำแหน่งสัมพันธ์กับแกนอ้างอิงของกล้อง โดยจะโปรเจกต์ลงบนฉากรับภาพที่ตำแหน่ง $\mathbf{p} = [u, v]^T$ ตามสมการ

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{ก.1})$$

ก.2.2 แบบจำลองออร์ทोगราฟิคแบบลดขนาด

แบบจำลองเพอร์สเปกทีฟจะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นซึ่งแม้ว่าจะมีความสมบูรณ์ แต่ก็มีความซับซ้อน ในบางกรณีอาจประมาณความสัมพันธ์ให้เป็นแบบเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองมีโครงสร้างที่ง่ายขึ้น ในแบบจำลองนี้ จุด ${}^c\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ จะได้จาก

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{ก.2})$$

โดยที่ s คือตัวปรับลดที่มีค่าคงที่

แบบจำลองออร์ทोगราฟิคแบบลดขนาดนี้จะมีคามแม่นยำในกรณีที่ความลึกสัมพันธ์ระหว่างจุดต่าง ๆ คำน้อย เมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างกล้องกับฉากรับภาพ

ก.2.3 แบบจำลองแอฟฟิน

เป็นแบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้ในการประมาณเพอร์สเปกทีฟโปรเจกชันในอีกลักษณะหนึ่ง หรืออาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองออร์ทोगราฟิคแบบลดขนาดก็เป็นแบบจำลองแอฟฟินแบบ

หนึ่ง แบบจำลองแอฟฟินเป็นเพียงการประมาณเชิงเส้นโดยไม่คำนึงถึงลักษณะในการบันทึกภาพ จุด ${}^c\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ จะได้จาก

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{A} {}^c\mathbf{P} + \mathbf{c} \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่ $\mathbf{A}$ คือเมทริกซ์ขนาด 2×3 และ $\mathbf{c}$ เป็นเวกเตอร์ 1×2

แบบจำลองแอฟฟินจะรวมทั้งโครงสร้างภายใน (เช่นเลนส์) และโครงสร้างภายนอก (เช่นตำแหน่งของกล้อง) ของกล้อง และเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณค่า $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{c}$ ได้อย่างง่ายโดยใช้วิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Technique) และจะ
ทำให้สามารถปรับเทียบกล้องได้อย่างง่าย

ก.3 การประมวลรูปภาพเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย

ในส่วนนี้จะอธิบายขั้นตอนในการหาตำแหน่งของวัตถุจากรูปภาพอย่างละเอียด โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การแยกวัตถุเป้าหมายออกจากสิ่งแวดล้อม และการหาจุดศูนย์กลางรวมมวลของวัตถุ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การแยกวัตถุเป้าหมายออกจากสิ่งแวดล้อม วัตถุที่ใช้เป็นเป้าหมายในการค้นหานั้นจะใช้วัตถุที่มีลักษณะเป็นสีเดียว ซึ่งจะมีช่วงสีของ R G และ B แตกต่างจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่อยู่ในภาพ จากนั้นทำการหาค่าช่วงสีของวัตถุเป้าหมายว่ามีช่วงสีของ R G และ B อยู่ในช่วงใด หลังจากนั้น ทำการอ่านค่าสีภายในภาพทุกๆจุดสี แล้วนำแต่ละจุดสีที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าของช่วงสีของวัตถุเป้าหมายที่สนใจ

การหาจุดศูนย์กลางรวมมวลของวัตถุ หลังจากได้ทำการแยกวัตถุเป้าหมายออกจาก สิ่งแวดล้อม แล้ว ทำการบันทึกผลรวมตำแหน่งที่พบจุดที่คาดว่าเป็นวัตถุเป้าหมายโดยแยกรวมเป็นผลรวมตามแนวตั้งและแนวนอนพร้อมทั้งเก็บจำนวนจุดที่พบ หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนในการกำหนดว่าวัตถุเป้าหมายดังกล่าวมีจุดศูนย์กลางรวมมวลอยู่ที่ใดในตำแหน่งของภาพโดยสามารถบ่งบอกพิกัดได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอนโดยอาศัยสมการดังนี้

$$X_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_i}{n} \quad (\text{ก.4})$$

และ

$$Y_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} Y_i}{n} \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่

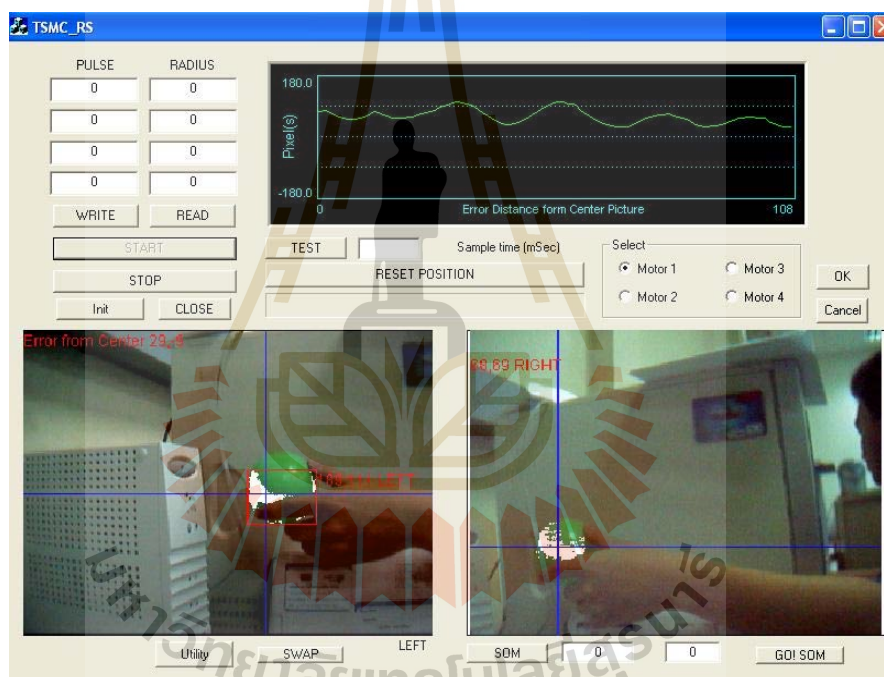
X_c = จุดศูนย์กลางรวมมวลตามแนวนอน

X_i = จุดที่พบช่วงสีของวัตถุเป้าหมายตามแนวนอน

Y_c = จุดศูนย์กลางรวมมวลตามแนวตั้ง

Y_i = จุดที่พบช่วงสีของวัตถุเป้าหมายตามแนวตั้ง

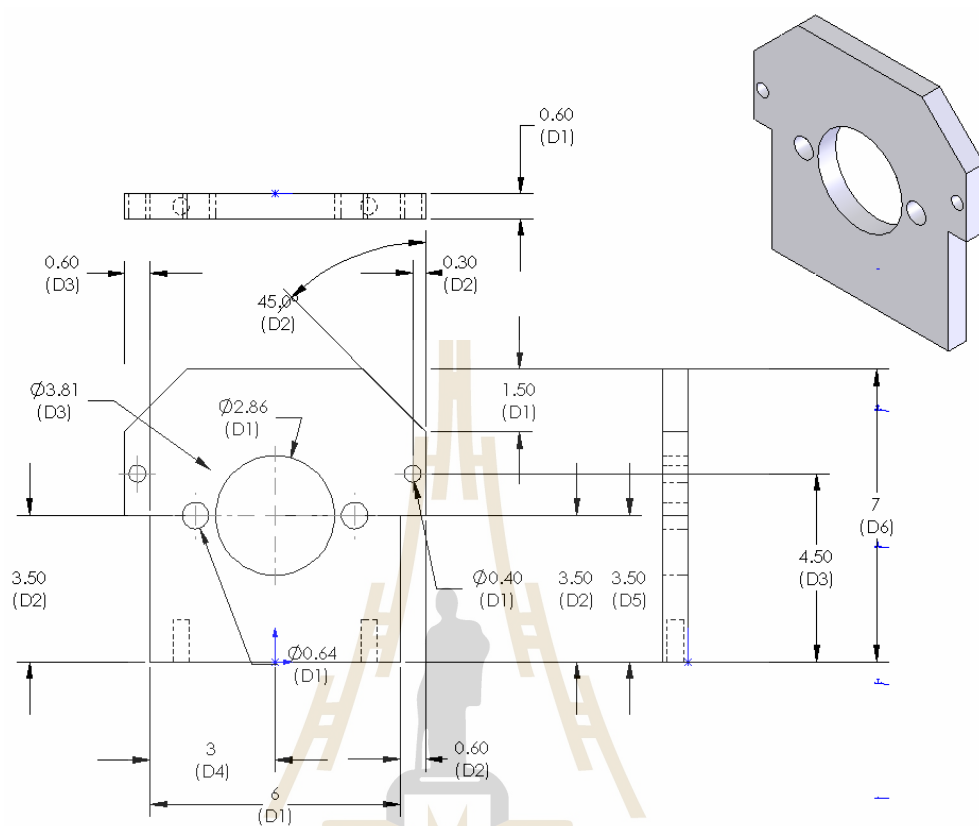
n = จำนวนจุดสีของวัตถุเป้าหมายที่พบในภาพ



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างการหาวัตถุเป้าหมายจากกล้องสองตัวพร้อมกัน

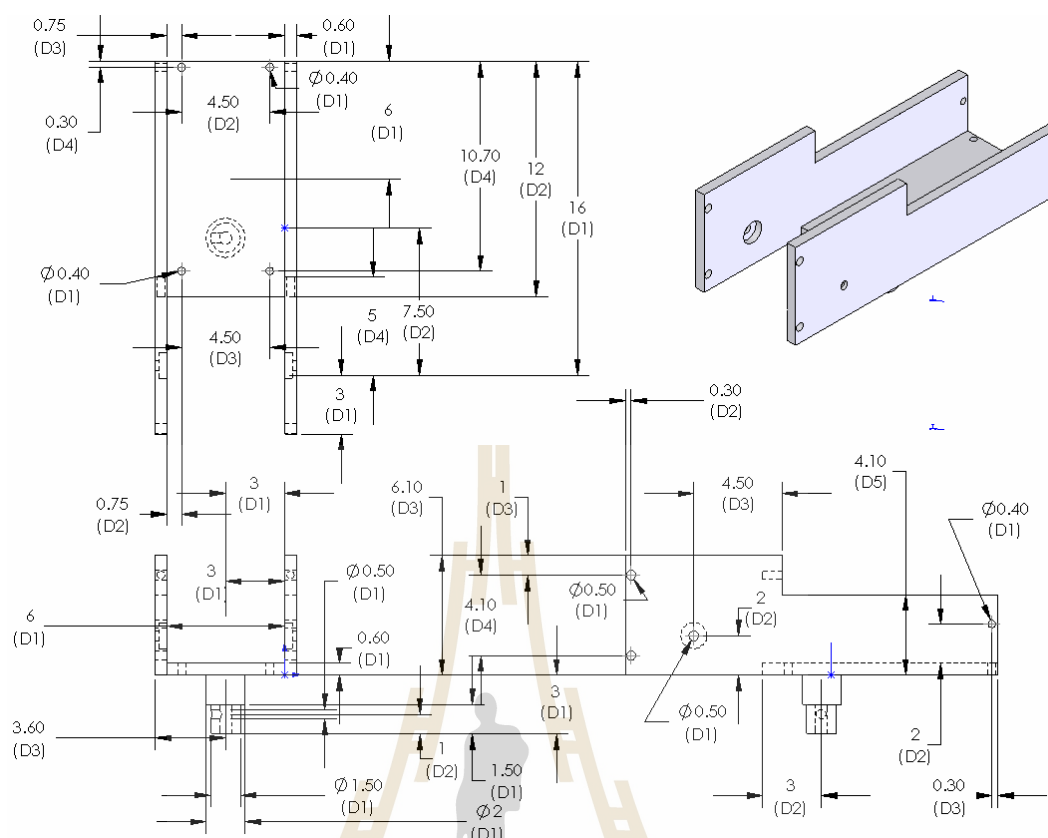
ภาคผนวก ข
แบบมิติชิ้นส่วนของหัวหุ่นยนต์



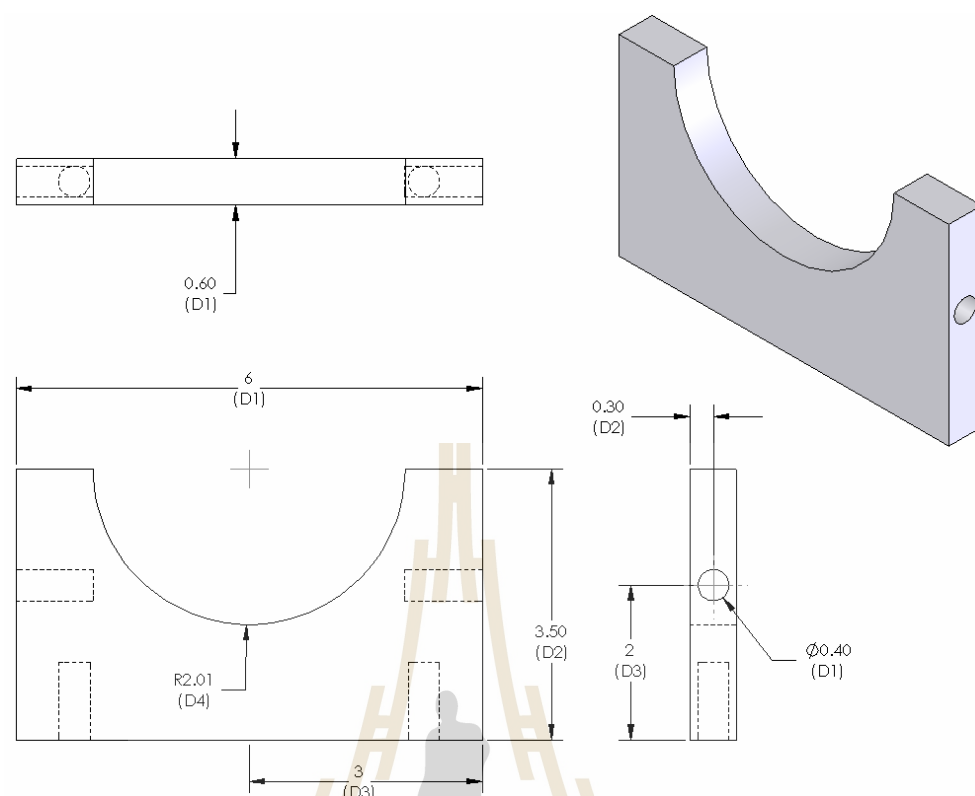


รูปที่ ข.1 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

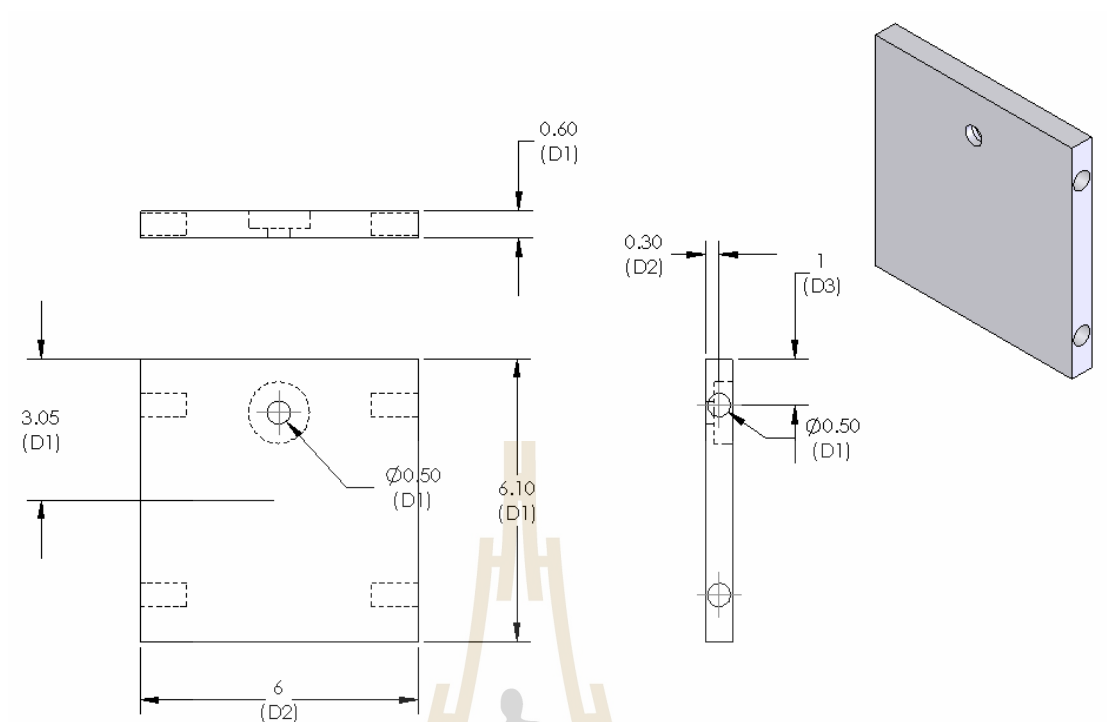


รูปที่ ข.2 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)

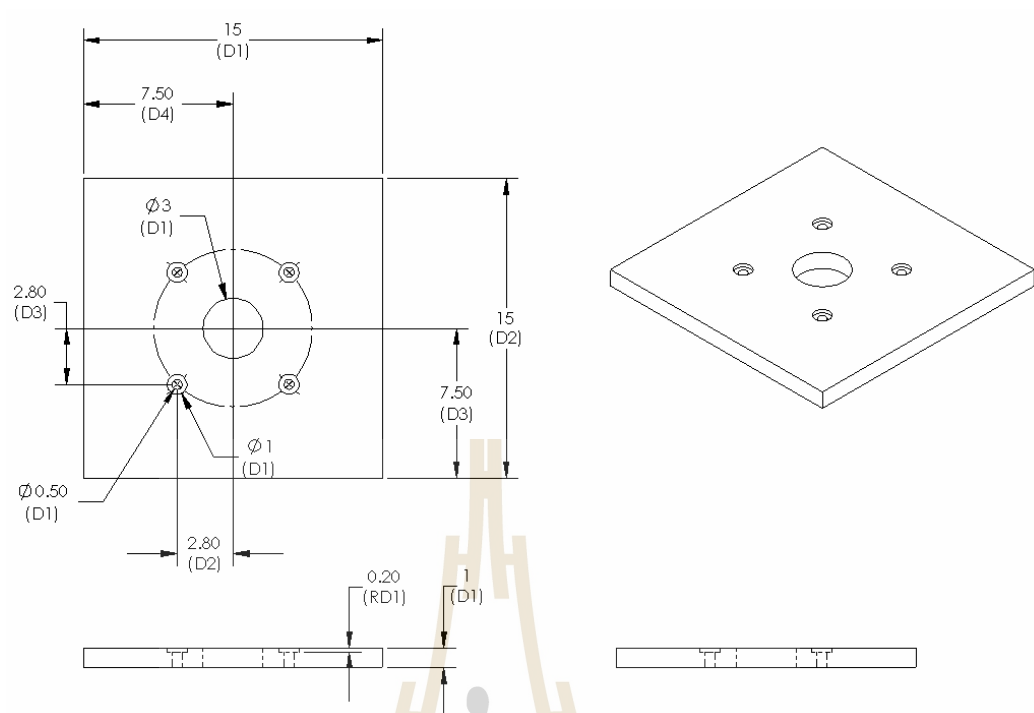


รูปที่ ข.3 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)



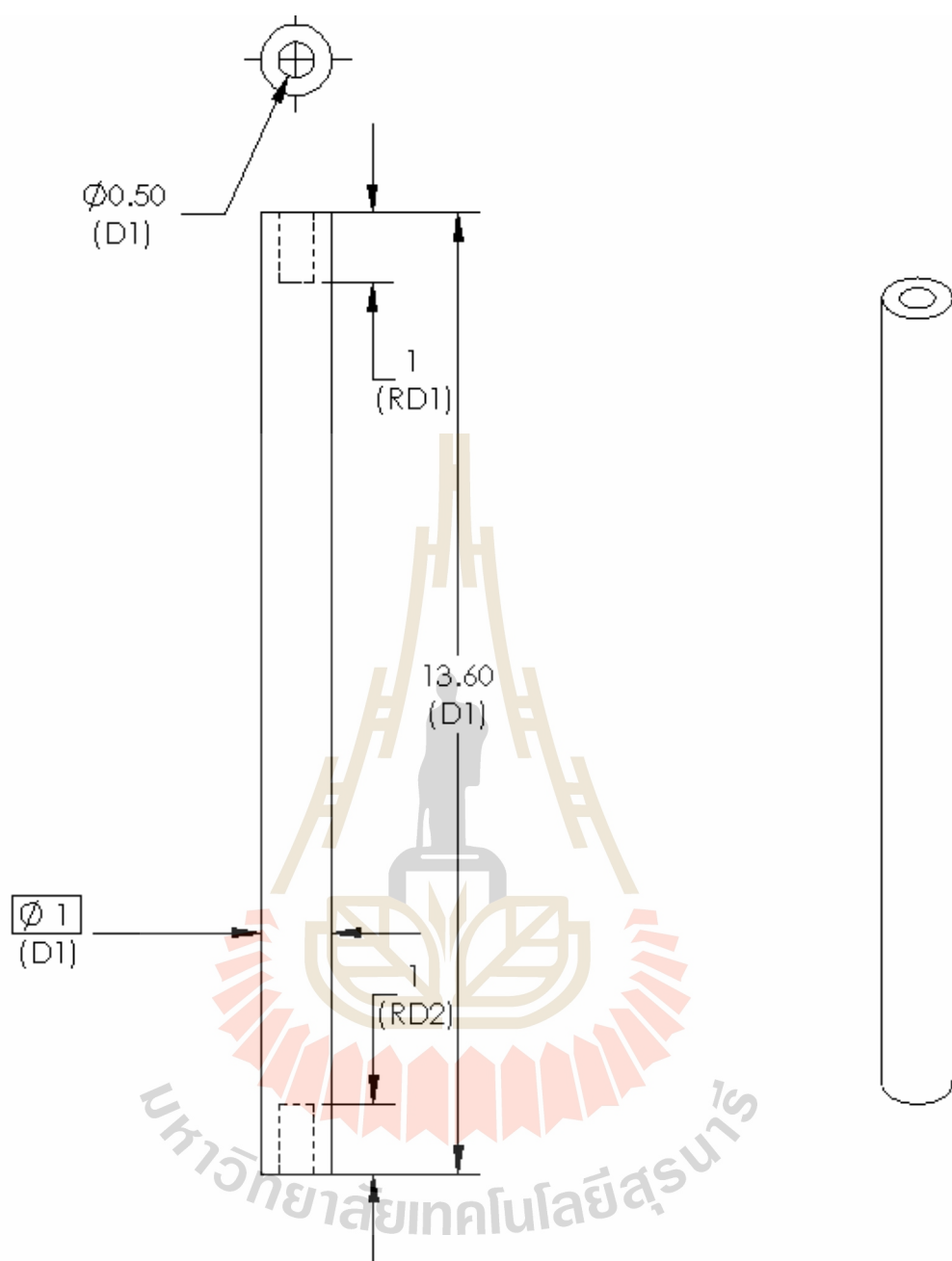


รูปที่ ข.4 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)

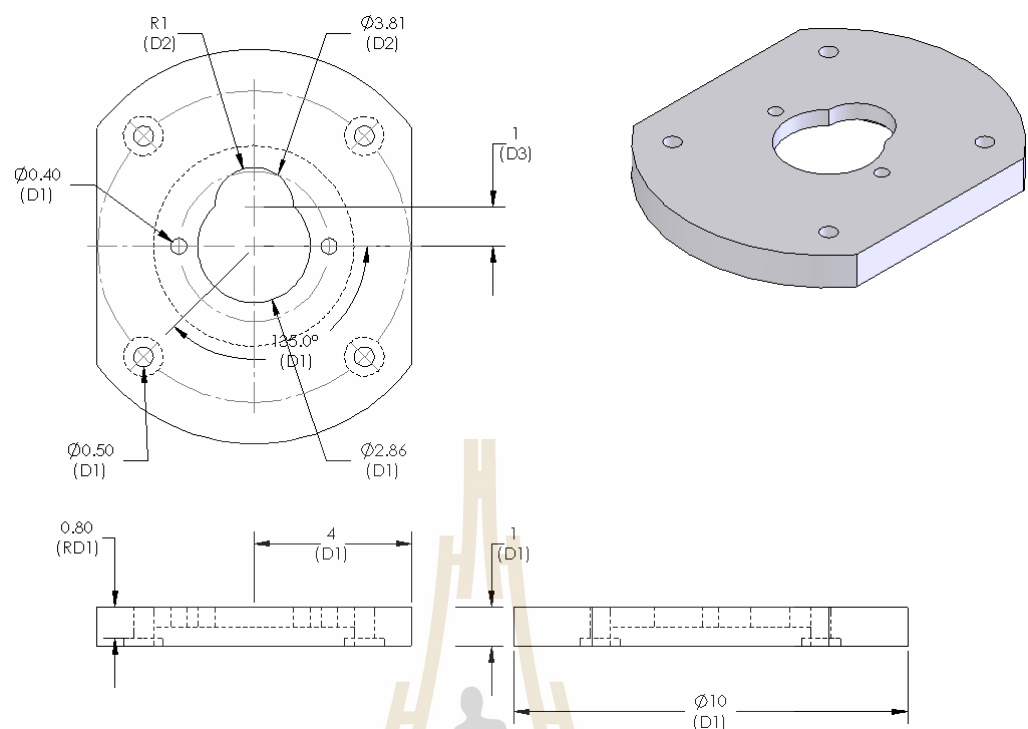


รูปที่ ข.5 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

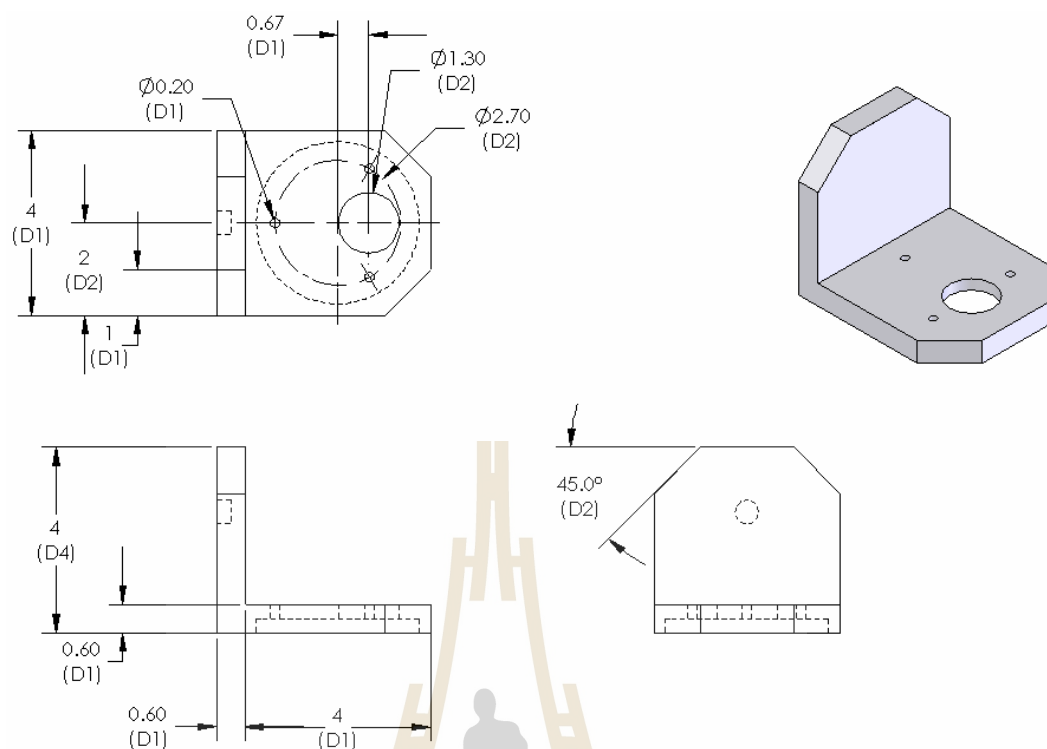


รูปที่ ข.6 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)



รูปที่ ข.7 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.8 มิติของชิ้นงาน (หน่วย:เซนติเมตร)

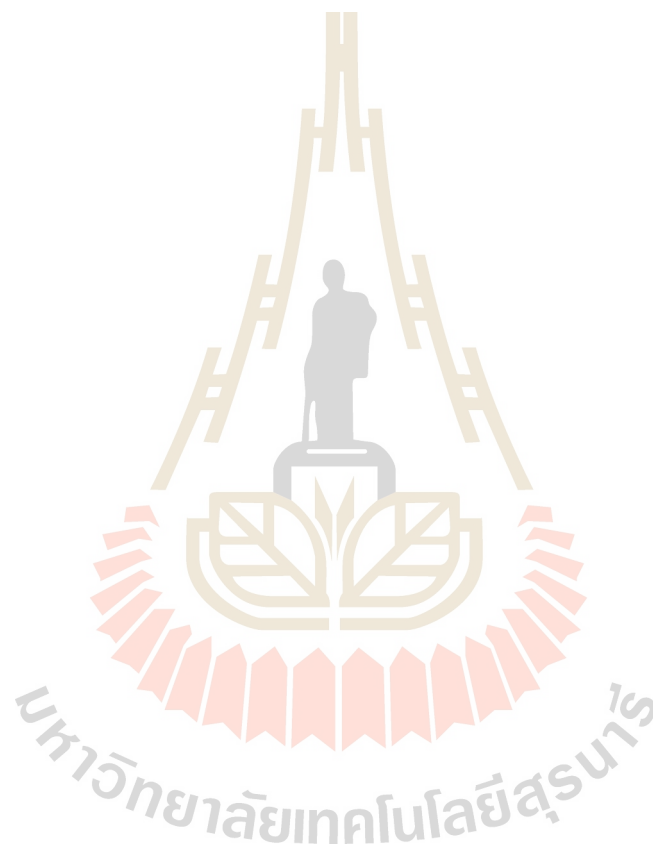
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “Dynamic Learning-Based Jacobian Estimation for Pan-Tilt-Verge Head Control” 8th WSEAS International Transaction on system, 12-14 March 2006, Issue 5 , Vol. 5, pp. 1066-1072.



ประวัติผู้เขียน

นายศิลา สอนสุจิตรา เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2524 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศึกษาระดับปริญญาโท ได้สอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก ก.

