

การควบคุมขั้นสูงกับการจัดการรบกวนในระบบรักษาเสถียรภาพของกิมเบล

นายกฤษณ์ท์ มะลิตอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADVANCED CONTROL WITH DISTURBANCE REJECTION IN
AN INERTIAL STABILIZATION SYSTEM

Mr. Kritsanun Malithong

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมขั้นสูงกับการจัดการรบกวนในระบบรักษาเสถียรภาพของกิมเบล
โดย	นายกฤษณ์นัท มะลิทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาตรี

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสาทพร วงษ์คำข้าง)

กฤษฎนันท์ มะลิทอง : การควบคุมขั้นสูงกับการจัดการรบกวนในระบบรักษาเสถียรภาพของกิมเบล. (ADVANCED CONTROL WITH DISTURBANCE REJECTION IN AN INERTIAL STABILIZATION SYSTEM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 97 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามวัตถุด้วยภาพของอุปกรณ์การภาพซึ่งเป็นระบบกล้องที่ติดตั้งกับอากาศยาน โดยใช้ภาพวิดีโอสี่จากกล้องวิดีโอ วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือการวิเคราะห์โครงสร้างกิมเบล การออกแบบระบบควบคุม และการควบคุมอุปกรณ์ทางภาพในการติดตามเป้าอัตโนมัติ ส่วนวิเคราะห์โครงสร้างกิมเบลกล่าวถึง ผลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกิมเบล และการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้าง ส่วนที่สองเราได้ศึกษาทั้งระบบควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics และระบบควบคุมแบบ Sliding mode สำหรับใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ระบบชั้นในหรือตัวกิมเบล และออกแบบระบบควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพแบบ Indirect LOS (Line of Sight) ในการควบคุมชั้นนอก อุปกรณ์ตรวจจู้และช่วยในการรักษาเสถียรภาพจะถูกนำไปติดตั้งที่ส่วนฐานของระบบ เพื่อทำการวัดอัตราเร็วเชิงมุมและมุมที่เปลี่ยนแปลงของส่วนฐานเทียบกับแกนอ้างอิงคงที่ใดๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ออกแบบมานั้นสามารถที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนที่มาจากภายนอก ในการทดลองนี้ระบบควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าระบบควบคุมแบบ Sliding mode อยู่เล็กน้อยเนื่องจากการชดเชยเทอมที่ไม่เชิงเส้นของระบบควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าการปรับค่าตัวแปรของระบบควบคุมแบบ Sliding mode ส่วนสุดท้ายการติดตามวัตถุด้วยภาพ เราใช้ทฤษฎี Camshift algorithm ในการติดตามวัตถุ ซึ่งวิธีนี้มีจุดเด่นคือสามารถติดตามตำแหน่งวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ปรากฏบนภาพได้ โดยข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งวัตถุในภาพ และแปลงเป็นคำสั่งสำหรับควบคุม โดยส่งไปยังส่วนควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพให้เคลื่อนที่ติดตามวัตถุได้ ทั้งยังควบคุมตำแหน่งวัตถุเป้าหมายในภาพให้อยู่บริเวณกลางภาพ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบแบบต่างๆ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการติดตามวัตถุด้วยภาพโดยที่วัตถุเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง การถูกบดบังบางส่วน และการติดตามวัตถุในขณะที่ระบบกล้องมีการเคลื่อนที่ด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553.....

4971802621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GIMBAL / INERTIAL STABILIZATION / ROBUST CONTROL/ SLIDING MODE CONTROL
/CAM-SHIFT ALGORITHM

KRITSANUN MALITHONG : ADVANCED CONTROL WITH DISTURBANCE
REJECTION IN AN INERTIAL STABILIZATION SYSTEM. ADVISOR :
ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI,Ph.D., 97 pp.

This thesis presents an approach to the image tracking for an inertial stabilization system, comprised of a camera system set up into the aircraft structure. This thesis consists of three portions; the structure analysis, the controller design and the autonomous tracking objects. The first portion consists the effects of the motion of the support on the gimbal structure and developing the dynamics modeling of system. For the second portion, we study both robust inverse dynamics control and sliding mode control for controlling the gimbal servo-system. The indirect line of sight (LOS) stabilization will be controlled by the outer loop controller. A stabilizer is mounted on the base of the system in order to measure base rate and orientation of the gimbal reference to the fixed reference frame. The experimental results show that the proposed controllers are capable enough to overcome the disturbances. In our case, the robust inverse dynamics control performs better than the sliding mode control with small margin due to the compensation of nonlinear terms for robust inverse dynamics is more efficient than the parameters adaption in the sliding mode control case. The last portion, we propose an object tracking algorithm based on a Camshift algorithm, applications can track objects presenting strong modifications of shape. We can quote the management of the target appearance changes during the sequence. The feedback control loop for the pan-tilt unit would send rate commands to move the camera position in order to keep the target in the center of the camera image. The experiment results are presented to verify the effectiveness of the proposed method in image tracking object.

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

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย ด้วยดีมาโดยตลอด จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ทั้งความรู้ ความเข้าใจ และประสบการณ์แก่ผู้วิจัย จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอบพระคุณพี่ น.ต. ผศ.ดร. ประสาทพร วงษ์คำซ่าง ผู้เริ่มโครงการงานวิจัยนี้ได้ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์การทำงานให้แก่ผู้วิจัย ทั้งยังให้เกียรติมาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องๆ นิสิตปริญญาเอกและนิสิตปริญญาโทที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและความช่วยเหลือต่างๆ มา โดยตลอด โดยเฉพาะนายพงศกร บำรุงไทย เพื่อนสนิทซึ่งเกื้อกูลกันมาตั้งแต่เรียนปริญญาตรีจนกระทั่งปริญญาเอก

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และขอขอบใจน้องๆ ของผู้วิจัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ.....	5
2.1.1 โครงสร้างกิมเบล.....	6
2.1.2 โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน.....	7
2.2 การควบคุมอุปกรณ์การภาพ.....	12
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบการมองเห็นและการประมวลผลภาพ.....	14
2.3.1 ภาพและความหมายของพิกเซล.....	16
2.3.2 แบบจำลองสี.....	17
2.3.3 การปรับค่าขีดแบ่ง.....	19
2.3.4 ตัวกรองค่าเฉลี่ย.....	21
2.3.5 ตัวกรองกึ่งกลาง.....	22
2.3.6 ฮิสโทแกรมของสี.....	22
2.3.7 กระบวนการแคมชิฟ.....	24
2.3.8 การทำการฉายกลับ.....	24

บทที่	ช หน้า
2.3.9 กระบวนการมินิชิฟ.....	24
2.4 ตัวกรองคาลมาน.....	26
3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างอุปกรณ์การภาพ.....	31
3.1 สมการของลากรางจ์.....	31
3.2 โครงสร้างส่วนลดการสั่นสะเทือน.....	32
3.3 การส่งถ่ายแรงไปยังส่วนโครงสร้างกิมเบล.....	33
3.4 ส่วนโครงสร้างกิมเบล.....	38
3.4.1 การคำนวณพลังงานจลน์.....	38
3.4.2 การคำนวณพลังงานศักย์.....	40
3.4.3 การคำนวณสมการของลากรองจ์.....	40
4 ระบบติดตามวัตถุด้วยภาพ.....	44
4.1 บทนำเกี่ยวกับการติดตามวัตถุด้วยภาพ.....	44
4.2 วิธีการแคมชิฟ.....	45
4.2.1. เลือกเป้าหมายและสร้างภาพฮีสโทแกรมของวัตถุเป้าหมาย.....	46
4.2.2. หาความน่าจะเป็นที่แต่ละพิกเซลบนภาพจะเป็นวัตถุเป้าหมาย.....	46
4.2.3. คำนวณซ้ำโดยใช้วิธีการมินิชิฟในการหาพิกเซลซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของ วัตถุเป้าหมาย และทำการเลื่อนตำแหน่งหน้าต่างระบุเป้าหมาย.....	48
4.2.4. คำนวณขนาดสัดส่วน (scale) และมุมการเอียง (orientation).....	49
5 การออกแบบระบบควบคุม.....	52
5.1 ตัวควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control.....	53
5.2 ตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control.....	54
5.3 ตัวควบคุมแบบ Sliding mode Control.....	58
5.3.1 การออกแบบระนาบสไลด์คิง.....	58
5.3.2 การออกแบบกฎการควบคุม.....	61
5.3.3 การประมาณค่าขอบเขตของความไม่แน่นอน และพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบ ค่า.....	64
5.4 ระบบควบคุม Indirect LOS Stabilization Control.....	66
6 การทดลองและผลการทดลอง.....	68
6.1 การทดสอบระบบควบคุม.....	68

บทที่	ณ หน้า
6.1.1 การทดสอบเคลื่อนที่กิมเบลไปยังมุมที่ต้องการ.....	70
6.1.2 การทดสอบควบคุมแบบ Indirect LOS Stabilization Control.....	73
6.2 การทดสอบส่วนการติดตามวัตถุด้วยภาพ.....	78
6.2.1 การติดตามวัตถุด้วยภาพ แบบไม่บังคับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ	78
6.2.2 การติดตามวัตถุด้วยภาพ แบบบังคับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ...	81
6.2.3 การติดตามวัตถุด้วยภาพ ขณะพื้นฐานของอุปกรณ์การภาพมีการเคลื่อนที่.	82
7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม.....	92
ภาคผนวก ข โอเพนซีวี (OpenCV).....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ ข-1 แสดงความสามารถของ OpenCV Library.....	95

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1	สภาพแวดล้อมของการทดลองในห้องปฏิบัติการ..... 2
รูปที่ 2.1	โครงสร้างแบบกิมเบลที่มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ 3..... 5
รูปที่ 2.2	แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ ที่มีตัวขับ 2 ตัว..... 6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ..... 6
รูปที่ 2.4	โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน..... 7
รูปที่ 2.5	โครงสร้างส่วนฐานเคฟล่าและสปริง..... 8
รูปที่ 2.6	การเคลื่อนที่ก้านต่อโยงของวัตต์..... 9
รูปที่ 2.7	ก้านต่อโยงของวัตต์ในระบบกันสะเทือนของรถยนต์..... 9
รูปที่ 2.8	การเคลื่อนที่ก้านต่อโยงไฮเคน..... 10
รูปที่ 2.9	การเคลื่อนที่ก้านต่อโยงเซปีเซฟ..... 10
รูปที่ 2.10	มุมมองด้านต่างๆของโครงสร้างส่วนลดการสั่นสะเทือน..... 11
รูปที่ 2.11	ระบบรักษาเสถียรภาพในการติดตามเป้า..... 12
รูปที่ 2.12	กระบวนการทำงานของระบบติดตามวัตถุ..... 13
รูปที่ 2.13	พิกเซลของภาพสี..... 17
รูปที่ 2.14	แบบจำลองสีอาร์จีบี..... 17
รูปที่ 2.15	แบบจำลองสี HSV..... 19
รูปที่ 2.16	ภาพต้นฉบับขาวดำ และภาพผ่านการปรับค่าขีดแบ่ง..... 20
รูปที่ 2.17	ภาพต้นฉบับ และภาพผ่านการปรับค่าขีดแบ่ง..... 20
รูปที่ 2.18	ภาพต้นฉบับ (ซ้ายมือสุด) และภาพผ่านการปรับค่าขีดแบ่งที่ค่าต่างๆกัน..... 21
รูปที่ 2.19	ภาพต้นฉบับ และภาพผ่านตัวกรองค่าเฉลี่ย..... 21
รูปที่ 2.20	ภาพต้นฉบับ และภาพผ่านตัวกรองกึ่งกลาง..... 22
รูปที่ 2.21	ตัวอย่างการสร้างฮิสโทแกรม 1 มิติ..... 23
รูปที่ 2.22	ฮิสโทแกรมของสีแบบแยกตามแม่สี..... 23
รูปที่ 2.23	ฮิสโทแกรมของสีแบบรวมแม่สี 1 มิติ และ 2 มิติ..... 23
รูปที่ 2.24	แสดงลำดับการค้นหาความหนาแน่นของกลุ่มพิกเซลด้วยวิธีมีนชิฟจาก (ก) ถึง (ง)..... 25
รูปที่ 2.25	ขั้นตอนการคำนวณตัวกรองของคาลมาน..... 29

รูปที่ 3.1	สภาพแวดล้อมของการทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	32
รูปที่ 3.2	แบบจำลองของระบบภายใต้การสั่งสะท้อนที่ส่วนฐาน.....	33
รูปที่ 3.3	กราฟของสมการที่ (3.29) และ (3.30) ที่มีการเปลี่ยนค่าของตัวห้วง.....	36
รูปที่ 3.4	ผลกระทบจากการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นที่ใบพัด.....	37
รูปที่ 3.5	สเปกตัมของขนาดการสั่งสะท้อนของเฮลิคอปเตอร์ รุ่น BO 105.....	37
รูปที่ 3.6	การเคลื่อนที่ของก้านต่อโยงใน 3 มิติ.....	39
รูปที่ 4.1	การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบกล้องกิมเบล.....	44
รูปที่ 4.2	กรอบหน้าต่างระบุเป้าหมายและหน้าต่างติดตามวัตถุ.....	46
รูปที่ 4.3	ตัวอย่างแบบง่าย ๆ ของฮีสโทแกรมของสีของภาพตุ๊กตา.....	47
รูปที่ 4.4	ภาพสี และภาพฉายกลับของฮีสโทแกรม.....	47
รูปที่ 4.5	ขั้นตอนการสร้างภาพฉายกลับ.....	48
รูปที่ 4.6	ขั้นตอนกระบวนการแคมชิฟ.....	50
รูปที่ 5.1	แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพแบบติดตามเป้า.....	52
รูปที่ 5.2	แผนภาพการควบคุมแบบ Indirect LOS Stabilization.....	53
รูปที่ 5.3	แผนภาพระบบควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control.....	58
รูปที่ 5.4	ระนาบสไลด์ดิงสำหรับระบบพลวัตลำดับสอง.....	59
รูปที่ 5.5	การเคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิง.....	61
รูปที่ 5.6	ขอบเขตของระนาบสไลด์ดิง.....	63
รูปที่ 5.7	แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบสไลด์ดิง.....	64
รูปที่ 5.8	แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบพีดีที่ใช้ในการหาสัญญาณความไม่แน่นอน.	65
รูปที่ 5.9	สัญญาณ $ \Gamma $ ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Azimuth และ Pitch.....	66
รูปที่ 5.10	แผนภาพการควบคุมแบบ Indirect LOS.....	66
รูปที่ 5.11	แผนภาพระบบควบคุมแบบ Robust inverse dynamics control.....	67
รูปที่ 5.12	แผนภาพระบบควบคุมแบบสไลด์ดิง.....	67
รูปที่ 6.1	สภาพแวดล้อมของการทดลอง.....	68
รูปที่ 6.2	การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ส่วนฐานของโครงสร้างกิมเบล.....	69
รูปที่ 6.3	ผลการควบคุม Inverse Dynamics Control ในแนวแกน azimuth.....	71
รูปที่ 6.4	ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control ในแนวแกน azimuth....	71
รูปที่ 6.5	ผลการควบคุม Sliding Mode Control ในแนวแกน azimuth.....	72

รูปที่ 6.6	ผลการควบคุม Inverse Dynamics Control ในแนวแกน pitch.....	72
รูปที่ 6.7	ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control ในแนวแกน pitch.....	72
รูปที่ 6.8	ผลการควบคุม Sliding Mode Control ในแนวแกน pitch.....	72
รูปที่ 6.9	ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control เมื่อมีการรบกวนที่ฐาน..	74
รูปที่ 6.10	ผลการควบคุม Sliding Mode Control เมื่อมีการรบกวนที่ฐาน.....	74
รูปที่ 6.11	ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบ s-curve และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน.....	75
รูปที่ 6.12	ผลการควบคุม Sliding Mode Control เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบ s-curve และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน.....	75
รูปที่ 6.13	ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบไซน์ และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน.....	76
รูปที่ 6.14	ผลการควบคุม Sliding Mode Control เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบไซน์ และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน.....	77
รูปที่ 6.15	ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง.....	78
รูปที่ 6.16	ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง.....	79
รูปที่ 6.17	ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่ถูกดบังบางส่วน.....	79
รูปที่ 6.18	ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่ถูกดบังบางส่วน.....	80
รูปที่ 6.19	ผลการทดสอบติดตามวัตถุที่มีลักษณะเหมือนกันกับวัตถุอื่นที่ปรากฏบนภาพ.	80
รูปที่ 6.20	ผลการทดสอบติดตามวัตถุ โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ.....	82
รูปที่ 6.21	การติดตั้งอุปกรณ์การภาพบนเฮลิคอปเตอร์ในการทดสอบภาคสนาม.....	83
รูปที่ 6.22	การติดตั้งอุปกรณ์การภาพในห้องปฏิบัติ.....	83
รูปที่ 6.23	แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศในการทดสอบในห้องปฏิบัติ.....	84
รูปที่ 6.24	ผลการทดสอบติดตามวัตถุ โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ.....	85
รูปที่ 6.25	การเคลื่อนที่ของตำแหน่งพิกเซลของกึ่งกลางเป้าหมายบนภาพในแนวแกนนอน.....	86
รูปที่ 6.26	การเคลื่อนที่ของตำแหน่งพิกเซลของกึ่งกลางเป้าหมายบนภาพในแนวแกนตั้ง.	86
รูปที่ ก.1	แผ่นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลนะล็อก.....	92

	หน้า
รูปที่ ก.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	92
รูปที่ ก.3 ชุดขยายกระแสไฟฟ้าขั้วมอเตอร์กระแสตรง.....	93
รูปที่ ก.4 อุปกรณ์เสถียรภาพ.....	93
รูปที่ ก.5 อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม.....	94
รูปที่ ก.6 กล้องวิดีโอสี ยี่ห้อโซนี่ รุ่น FCB-EX980.....	94
รูปที่ ก.7 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณวิดีโอแบบต่อภายนอก.....	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การถ่ายภาพทางอากาศได้เริ่มต้นแพร่หลายมากในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 วิชาการเกี่ยวกับการถ่ายภาพทางอากาศได้รับความสนใจและเจริญก้าวหน้ามาก เพราะภาพถ่ายทางอากาศมีประโยชน์ทางด้านความมั่นคงของประเทศชาติและทางทหาร การถ่ายภาพทางอากาศได้พัฒนามาเป็นลำดับนับตั้งแต่การใช้บอลูนเป็นพาหนะ หรือใช้พื้นที่สูงในการถ่ายรูป ต่อมาได้พัฒนาเป็นเครื่องบิน ยานอวกาศ และดาวเทียม ในปัจจุบันธุรกิจการถ่ายภาพทางอากาศเป็นอีกหนึ่งธุรกิจที่น่าสนใจ เพราะมีหน่วยงานรัฐและเอกชนที่ต้องการให้ปฏิบัติภารกิจเฉพาะด้าน ซึ่งต้องอาศัยการถ่ายภาพจากมุมสูง อาทิเช่น การทำแผนที่ทางอากาศ การถ่ายทำภาพยนตร์ การรายงานข่าว การสำรวจทรัพยากรป่าไม้ สำรวจมลภาวะ หรือภัยธรรมชาติทั้งไฟป่าและน้ำท่วม การโฆษณาและนำเสนอโรงแรมหรือสถานที่ท่องเที่ยว เป็นต้น ซึ่งการถ่ายภาพทางอากาศสามารถใช้อุปกรณ์ควบคุมด้วยวิทยุบังคับจากระยะไกล โดยใช้เฮลิคอปเตอร์บังคับด้วยวิทยุ เครื่องบินเล็ก เรือเหาะ ว่าว พารามอเตอร์ พาราเพลน เป็นพาหนะบรรทุกกล้องถ่ายภาพหรือกล้องวิดีโอ

ในปัจจุบันนี้การพัฒนาอากาศยานก้าวหน้าไปเป็นอันมาก ซึ่งรูปแบบหนึ่งคือการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับ ยานบินไร้คนขับหรือ UAV (Unmanned Aerial Vehicle) เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการอยู่บนเครื่อง อาศัยการบังคับระยะไกลจากฐานปฏิบัติการภาคพื้นดิน ร่วมกับคอมพิวเตอร์ควบคุมการบินและควบคุมการปฏิบัติภารกิจที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยาน มีการติดตั้งอุปกรณ์การภาพหรือกิมเบล (Gimbal) ไว้กับโครงสร้างของอากาศยาน และสามารถที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของกล้องไปตามทิศทางที่ผู้ควบคุมทำการบังคับ อุปกรณ์การภาพนี้ยังสามารถส่งภาพเคลื่อนไหวยังภาคพื้นดินได้โดยอาศัยระบบการสื่อสารข้อมูลที่ติดตั้งบนอากาศยาน จึงเป็นเครื่องอำนวยความสะดวกอย่างยิ่งในงานด้านการสำรวจต่างๆ

ห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและระบบควบคุมอัตโนมัติ มีงานวิจัยก่อนหน้านี เรื่องระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับระบบรักษาเสถียรภาพของกิมเบล (ประสาทพร วงศ์คำ ช้าง, 2549: 91) ได้ออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์การภาพ และระบบควบคุมที่เหมาะสมกับการใช้งานในการติดตามเป้า โดยขอบเขตของการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์การภาพคือ ต้องการนำไปติดตั้งบนยานบินไร้คนขับขนาดใหญ่ที่ใช้ในทางทหาร ซึ่งสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มาก และโครงสร้างกิมเบลต้องมีความแข็งแรง โครงสร้างกิมเบลที่สร้างขึ้นจึงมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก

ถึง 12 กิโลกรัม ทำให้ไม่สะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องบินหรือหุ่นยนต์ขนาดเล็ก และขอบเขตของการออกแบบระบบควบคุมคือ ต้องการให้โครงสร้างของอุปกรณ์การภาพเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการได้ แม้มีการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนที่ของส่วนฐานโครง

โดยการทดสอบระบบควบคุมทำขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยแขวนกิมเบลกับโครงเหล็กในลักษณะห้อยหัวลงมาดังแสดงในรูปที่ 1.1 การทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบเมื่อส่วนฐานที่โครงสร้างกิมเบลติดตั้งไม่มีการเคลื่อนที่ และการทดสอบเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากระทำต่อส่วนฐานที่โครงสร้างกิมเบลติดตั้ง เพื่อทดสอบว่าระบบควบคุมนั้นสามารถที่จะรักษาแนวการมองเห็นหรือ LOS (Line Of Sight) ไว้ได้ในขณะที่มีสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน และทดสอบว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ เมื่อมีการรบกวนจากการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน



รูปที่ 1.1 สภาพแวดล้อมของการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบภาคสนาม ได้นำอุปกรณ์การภาพซึ่งพัฒนาขึ้นจากห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมขั้นสูง และอุปกรณ์ของบริษัทโพลิเทค เอบี ประเทศสวีเดน โดยติดตั้งเข้ากับแท่นที่ยึดเข้ากับเฮลิคอปเตอร์ทางทหาร โดยทดลองถ่ายภาพวีดีโอจากมุมสูง เพื่อเปรียบเทียบภาพที่ได้จากอุปกรณ์การภาพที่พัฒนาขึ้นเองกับอุปกรณ์การภาพของบริษัทโพลิเทค เอบี พบว่าภาพที่ได้จากอุปกรณ์การภาพของบริษัทโพลิเทค เอบี มีการสั่นไหวน้อยกว่าภาพที่ได้จากอุปกรณ์การภาพที่พัฒนาขึ้นเอง ถึงแม้ภาพที่ได้จากอุปกรณ์การภาพที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถนำไปใช้งานได้ก็ตาม โดยการทำ Image stabilization แต่ถ้าสามารถพัฒนาให้การสั่นไหวนี้น้อยลง ก็สามารถที่จะพัฒนา Image stabilization ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ การสั่นไหวของอุปกรณ์การภาพที่พัฒนาขึ้นนี้เมื่อติดตั้งใช้งานจริงเป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยหลายประการคือ ประการแรกได้มีการเปลี่ยนกล้องถ่ายวีดีโอใหม่ ซึ่งขนาดและน้ำหนักต่างกันมาก ทำให้ต้องปรับสมดุลของโครงสร้าง

โดยการถ่วงน้ำหนัก ทำให้สมดุลของโครงสร้างไม่ดีเท่าที่ควร ประการที่สองกล้องวิดีโอที่ใช้ไม่มีระบบป้องกันการสั่นไหว ประการที่สามภาพที่ได้จากอุปกรณ์การภาพที่พัฒนาขึ้นเอง ยังไม่ได้้นำการประมวลผลทางภาพเข้ามาช่วยลดการสั่นไหวของภาพ ประการที่สี่ระบบควบคุมยังไม่ได้นำการประมวลผลทางภาพเข้ามาควบคุมในส่วนของการติดตามเป้า ซึ่งถ้าต้องการติดตามเป้าผู้ควบคุมกล้องต้องบังคับทิศทางของอุปกรณ์การภาพเอง จึงมีการสั่นไหวในช่วง transient response จึงไม่สะดวกกับการใช้งานจริง

งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาต่อยอดงานวิจัยที่พัฒนาโดยน.ต. ผศ. ดร. ประสาทพร ซึ่งทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกิมเบล เพื่อให้สามารถออกแบบและปรับเปลี่ยนโครงสร้างและระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สร้างโปรแกรมเพื่อควบคุมการถ่ายภาพ แสดงผลและประมวลผลภาพ ทำการออกแบบระบบควบคุมที่มีการนำการประมวลผลทางภาพเข้ามาควบคุมอุปกรณ์ทางภาพในการติดตามเป้าอัตโนมัติ ซึ่งคาดหวังว่าในอนาคตจะทำการออกแบบสร้างโครงสร้างอุปกรณ์การภาพที่มีขนาดเล็กกลง และเหมาะสมกับการติดตั้งบนเครื่องบินบังคับวิทยุหรือหุ่นยนต์ขนาดเล็ก เพื่อให้มีอิสระในการนำไปประยุกต์ใช้ทำงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน คือ การวิเคราะห์โครงสร้างกิมเบล การออกแบบระบบควบคุม และการควบคุมอุปกรณ์ทางภาพในการติดตามเป้าอัตโนมัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบชุดอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอุปกรณ์การภาพ โดยเน้นความเหมาะสมของโครงสร้างและระบบควบคุมที่จะช่วยในการกำจัดหรือลดผลกระทบที่เกิดจากการสั่นไหวของอุปกรณ์การภาพ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอากาศยานและการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอากาศยาน
2. ศึกษาและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างกิมเบล และผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกิมเบล
3. ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพที่จะช่วยลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาอุปกรณ์ที่ช่วยในการดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorption) ที่ติดตั้งระหว่างโครงสร้างของอุปกรณ์การภาพกับแท่นยึดของอากาศยานที่เหมาะสม โดยนำการ

วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างกิมเบลเข้ามาช่วย เพื่อนำข้อมูลมาช่วยในการ ออกแบบต่อไป

2. ออกแบบระบบควบคุมที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพที่จะช่วยลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่อาจยังหลงเหลืออยู่หลังจากผ่านอุปกรณ์ที่ช่วยในการดูดซับการสั่นสะเทือน
3. ศึกษาแบบประมวลผลภาพ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพในการติดตาม เป้าและการรักษาสมดุลของภาพ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของอุปกรณ์การภาพที่ผ่านมา
2. ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างของกิมเบลและอุปกรณ์ที่ช่วยในการดูดซับการสั่นสะเทือน เพื่อพิจารณาผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกิมเบล และความสามารถของ อุปกรณ์ที่ช่วยในการดูดซับการสั่นสะเทือน
3. ออกแบบและพัฒนาโครงสร้างของอุปกรณ์การภาพและอุปกรณ์ที่ช่วยในการดูดซับการ สั่นสะเทือน
4. ศึกษาทฤษฎีและเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลภาพโดยใช้วิธีของ Digital Image Processing เพื่อให้สามารถคำนวณค่าพิกัดของตำแหน่งที่กำหนดบน ภาพถ่าย
5. ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมอุปกรณ์การภาพใน การติดตามเป้าหมาย
6. ทดสอบการทำงานของระบบทั้งหมดและปรับปรุงแก้ไข
7. สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

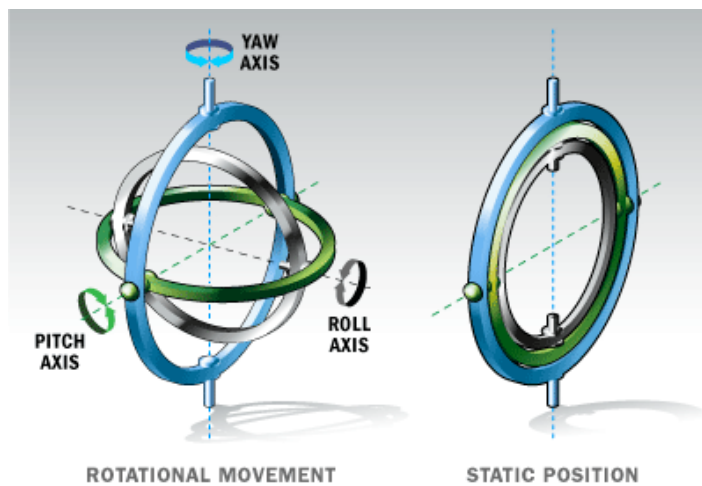
1. ได้ชุดอุปกรณ์การภาพที่สามารถติดตั้งเข้ากับอากาศยาน เพื่อใช้ในการเก็บ ภาพเคลื่อนไหว (Video image) ตามบริเวณตำแหน่งที่กำหนด
2. ได้ระบบควบคุมขั้นสูงที่เหมาะสมสำหรับรักษาสมดุลที่ใช้กับโครงสร้างของอุปกรณ์การ ภาพที่พัฒนาขึ้น
3. สามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการถ่ายภาพและภาพเคลื่อนไหวทางอากาศหรือทาง ภาคพื้นดินจากระยะไกลได้
4. สามารถพัฒนาต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ

ส่วนประกอบของอุปกรณ์การภาพ โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนโครง อุปกรณ์การภาพซึ่งประกอบขึ้นโดยมีแบเรจช่วยรองรับหรือช่วยยึดชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างที่มีการหมุน และมีมอเตอร์เป็นตัวขับที่แกนหมุน ซึ่งโครงสร้างนี้เรียกว่า กิมเบล (Gimbal) โดยกิมเบลเป็นโครงสร้างที่มี ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นการหมุนรอบแกน โดยมีการจัดเรียงเป็นวงหลายๆ วงซ้อนกัน โดยที่แนวการหมุนของแต่ละวงตัดกันที่จุดๆหนึ่ง การเรียงตัวของแต่ละวงนั้นจะมีจุดหมุนเชื่อมต่อกับอีกวงหนึ่ง และแนวการหมุนของแต่ละวงนั้นทำมุม 90 องศากับแนวการหมุนของวงที่อยู่ถัดไปดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนที่สองคือ เครื่องมือวัดการหมุนรอบ (gyroscope) ซึ่งติดตั้งไว้ที่ส่วนฐานของกิมเบล หรือภายในโครงสร้างกิมเบล โดยอุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่วัดสัญญาณรบกวนของส่วนฐานที่โครงสร้างกิมเบลนี้ติดตั้งอยู่ในรูปของมุม และความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนสุดท้ายคือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการรับภาพหรือชี้เป้า เช่น กล้องวิดีโอ ซึ่งติดตั้งอยู่กึ่งกลางในแนวของการหมุน



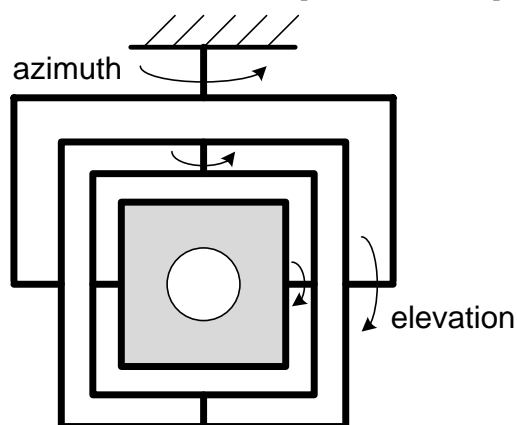
รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบกิมเบลที่มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ 3

โครงสร้างอุปกรณ์การภาพ ประกอบไปด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนโครงสร้างกิมเบลซึ่งทำหน้าที่บังคับการเคลื่อนที่ของกล้องและลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง และส่วนโครงสร้างลดการสั่นสะเทือน (ส่วนฐาน) ซึ่งประกอบด้วยกลไกสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง และสปริง ซึ่งโครงสร้างนี้ทำหน้าที่รับการสั่นสะเทือนที่รุนแรงหรือการกระแทก ทำให้การสั่นสะเทือน

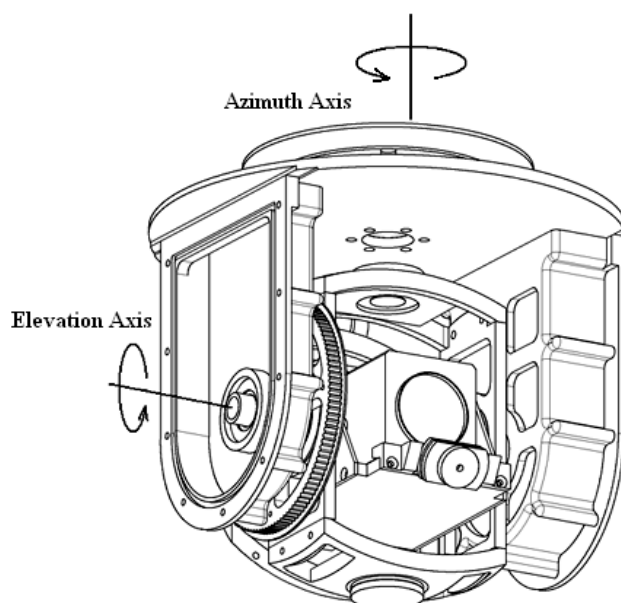
ที่มารบวงระบบลดความแรงลง ทั้งยังปรับให้การสั่นสะเทือนในแนวต่างให้ลดลงเหลือเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวขึ้น-ลง เพียงอย่างเดียว

2.1.1 โครงสร้างกิมเบล

โครงสร้างกิมเบลมีการเคลื่อนที่แบบหมุนอยู่ 2 แนวคือ แนวก้มเงย (Elevation) หรือหมุนในแนวแกน pitch และแนวหมุนรอบตัว (Azimuth) หรือหมุนในแนวแกน yaw และจะมีกลิ้งติดตั้งอยู่ที่กึ่งกลางในแนวของการหมุน ตามแบบโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 รูปนี้แสดงถึงโครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ ที่มีการเคลื่อนที่ 2 แนวแกน โดยติดตั้งตัวขับเคลื่อนหรือมอเตอร์เข้ากับโครงสร้าง เพื่อให้กลิ้งเคลื่อนที่ได้ตามที่ต้องการ โดยมีวงแหวนหมุนได้อิสระภายในอีก 2 วง ซึ่งจะหมุนได้เป็นมุมเล็ก เพื่อช่วยลดความสั่นสะเทือนที่มีแอมพลิจูดต่ำ แต่ความถี่สูง



รูปที่ 2.2 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ ที่มีตัวขับเคลื่อน 2 ตัว

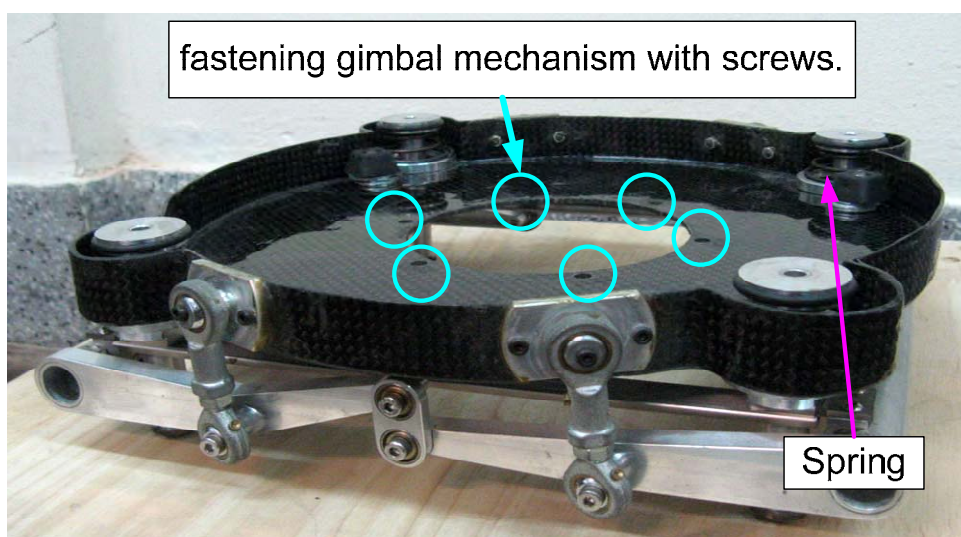


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอุปกรณ์การภาพ

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์การภาพในวิจัยก่อนหน้านี้ได้พัฒนาขึ้น เป็นโครงสร้างที่สามารถเคลื่อนที่แบบหมุนได้ 2 แนวแกน ซึ่งควบคุมโดยมอเตอร์ไฟฟ้าทั้ง 2 แนวแกน และมีกลองติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางของโครงสร้าง โดยโครงสร้างหลักส่วนใหญ่เป็นอลูมิเนียมทำให้มีน้ำหนักมาก

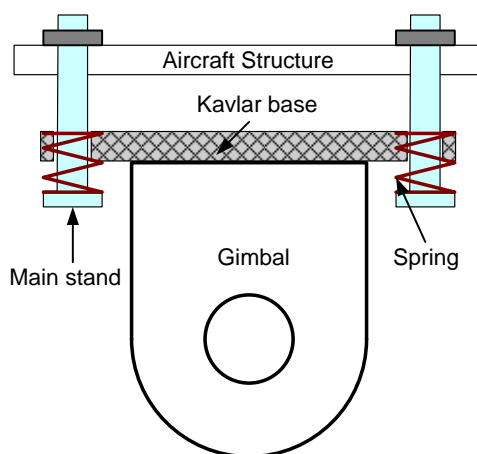
2.1.2 โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน

สิ่งรบกวนที่มีผลกระทบกับโครงสร้างอุปกรณ์การภาพ มีหลายลักษณะด้วยกัน เช่นการสั่นสะเทือนจากอากาศยาน แรงที่เกิดจากความเร่ง และการเลี้ยวของอากาศยาน แรงปะทะจากอากาศ เป็นต้น ระบบลดการสั่นสะเทือนที่ดีมีส่วนช่วยอย่างมากในการลดผลกระทบจากสิ่งรบกวน ทำให้การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสิ่งรบกวนเหล่านี้กระทำกับระบบในหลายแนวแกนด้วยกัน กลไกสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะใช้บังคับการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆให้เหลือการเคลื่อนที่เพียงแนวแกนเดียว



รูปที่ 2.4 โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน

โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน ยังแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนฐานเคฟล่าและสปริง และส่วนกลไกสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง โดยส่วนฐานเคฟล่าและสปริงประกอบไปด้วยฐานซึ่งทำจากการหล่อเรซินและแผ่นเคฟล่า ซึ่งโครงสร้างจะมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง เพราะโครงสร้างกิมเบลหรือน้ำหนักเกือบทั้งหมดจะยึดกับโครงนี้ และมีสปริง 4 อันรองรับที่มุมของฐาน ดังรูปที่ 2.5 แบบจำลองของโครงสร้างส่วนฐานเคฟล่าและสปริง



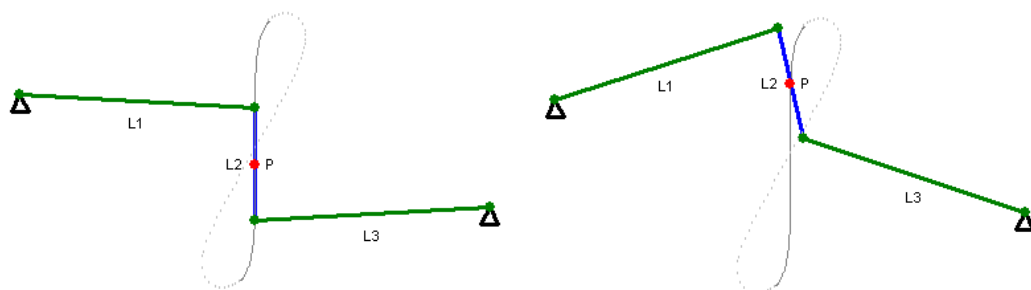
รูปที่ 2.5 โครงสร้างส่วนฐานเคฟล่าและสปริง

กลไกสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง (Straight line mechanism) เป็นกลไกสร้างการเคลื่อนที่หรือบังคับการเคลื่อนที่ให้เป็นเส้นตรง หรือใกล้เคียงเส้นตรง โดยเกิดจากชิ้นส่วนหรือกลไกที่มีการหมุน การสั่นหรือมีการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปกลไกจะมีลักษณะเป็นก้านต่อโยง เกียร์ ลูกเบี้ยว ในปลายศตวรรษที่สิบเจ็ด ก่อนที่จะมีการพัฒนาเครื่องกัด เป็นเรื่องยากมากที่จะกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง และมีผิวเรียบ ด้วยเหตุนี้ การสร้างกระดูกงูที่มีคุณภาพดีจึงไม่ใช่เรื่องง่าย ในยุคนั้น แนวคิดการออกแบบกลไกส่วนมากจึงเป็นการแก้ปัญหาการสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง โดยการหมุนของกลไกก้านต่อโยง โดยกลไกซึ่งนิยมใช้มากที่สุด คือกลไกสร้างเส้นตรงของวัตต์ (Watt's straight-line mechanism) ซึ่งนำมาใช้ในเครื่องจักรไอน้ำ แม้ว่ามันจะไม่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงได้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่ก็สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี แม้กลไกก้านต่อโยงพื้นฐานไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินเป็นเส้นตรงอย่างแท้จริง แต่ก็สามารถสร้างการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงเส้นตรงได้ในช่วงระยะเวลาการเคลื่อนที่สั้นๆ ซึ่งการสร้างการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงอย่างแท้จริงต้องอาศัยกลไกที่ซับซ้อนกว่า

กลไกสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้สองประเภทคือ ก้านต่อโยงที่สร้างการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงบางส่วน และแบบสมบูรณ์แบบ โดยก้านต่อโยงที่สร้างการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงบางส่วน จะมีบางช่วงการเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง ได้แก่ ก้านต่อโยงของวัตต์ (Watt's linkage), ก้านต่อโยงโฮเคน (Hoekens linkage), ก้านต่อโยงเชบีเชฟ (Chebyshev linkage) ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนากลไกให้การเคลื่อนที่เชิงเส้นผลลัพธ์ที่สมบูรณ์แบบ ได้แก่ ก้านต่อโยงซาร์รัส (Sarrus linkage), ก้านต่อโยงเพอเซลลิเออร์-ลิปคิน (Peaucellier–Lipkin linkage)

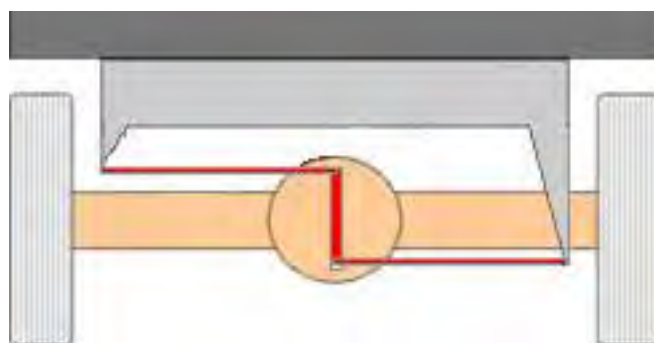
ก้านต่อโยงของวัตต์ (Watt's linkage) เป็นกลไกก้านต่อโยงที่ออกแบบโดยเจมส์วัตต์ เพื่อใช้บังคับการเคลื่อนที่ของลูกสูบเครื่องจักรไอน้ำให้เคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรง โดยลักษณะเป็น

กลไกต่อโยง 4 ชั้นแบบ double-rocker type โดยมีก้านต่อโยงยาว (rocker) 2 อันที่เชื่อมต่อกันโดยก้านต่อสั้น (coupler) 1 อัน เมื่อสองก้านต่อโยงยาวเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของก้านต่อสั้นจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.6



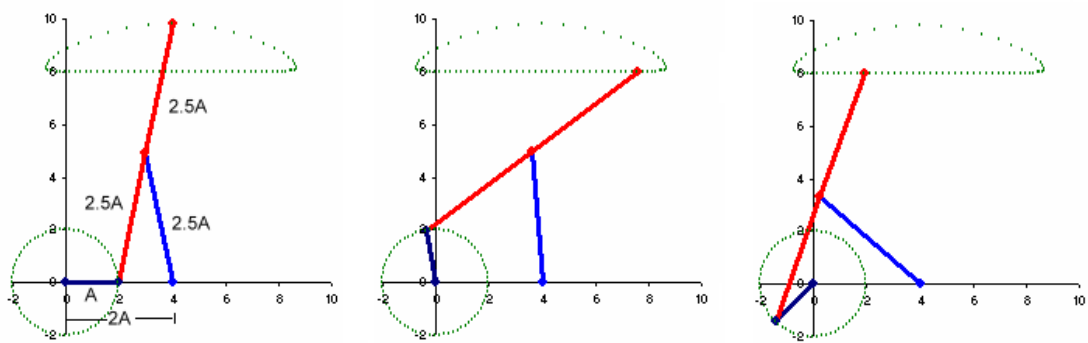
รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ที่ก้านต่อโยงของวัตต์

ในปัจจุบันก้านต่อโยงของวัตต์ยังมีใช้ระบบกันสะเทือนของรถยนต์ ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า อุปกรณ์กันโคลง (Panhard rod) ที่คิดค้นขึ้นต้นศตวรรษที่ 20 โดยทั้งสองวิธีใช้ในการป้องกันการโคลงที่ด้านข้างของตัวรถยนต์



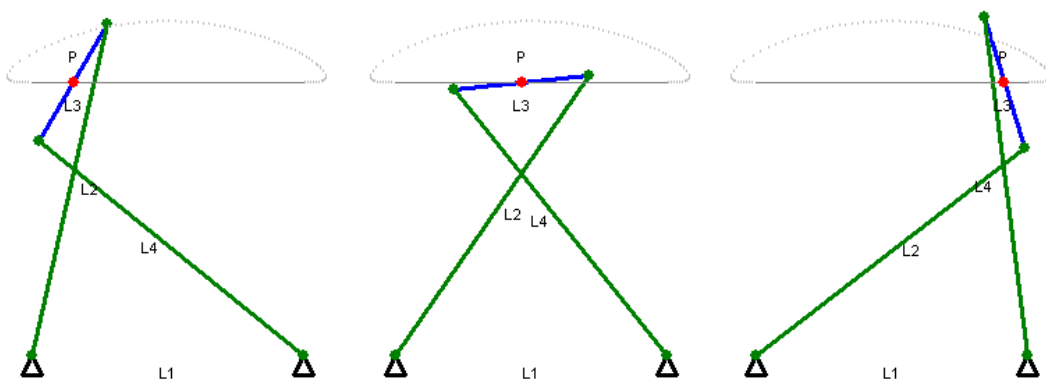
รูปที่ 2.7 ก้านต่อโยงของวัตต์ในระบบกันสะเทือนของรถยนต์

ก้านต่อโยงโฮเคน (Hoekens linkage) เป็นกลไกสร้างการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ซึ่งเกิดจากกลไกก้านต่อโยงมีการหมุน มีลักษณะเป็นกลไกต่อโยง 4 ชั้นเช่นเดียวกับก้านต่อโยงของวัตต์ โดยมีลักษณะพื้นฐานของก้านต่อโยงเหมือนกับก้านต่อโยงเชปีเซฟ



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ที่ก้านต่อโยงโยเคน

ก้านต่อโยงเชบีเชฟ (Chebyshev linkage) เป็นกลไกสร้างการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ซึ่งเกิดจากกลไกก้านต่อโยงมีการหมุน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ออกแบบขึ้นภายหลังก้านต่อโยงของวัตต์ โดยนักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซีย พาฟนุติ เชบีเชฟ (Pafnuty Chebyshev) ซึ่งมีข้อดีเหนือกว่าก้านต่อโยงของวัตต์คือ เส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดจากก้านต่อโยงของเชบีเชฟมีส่วนที่เป็นเส้นตรงที่มากกว่า และฐานจุดหมุนของก้านต่อโยงยาวตั้งอยู่ในด้านเดียวกัน สัดส่วนความยาวของก้านต่อโยงที่เหมาะสมคือ $L1 = 2$, $L2=L4 = 2.5$ and $L3 = 1$



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ที่ก้านต่อโยงเชบีเชฟ

สำหรับกลไกสร้างการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยไม่ต้องการให้ผู้อื่นลอกเลียนแบบเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์จึงขออธิบายกลไกนี้โดยย่อและแสดงภาพประกอบเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยวัตถุประสงค์ของกลไกนี้เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่หลายแนวแกนจึงต้องประกอบด้วยกลไกก้านต่อโยงหลายลักษณะ จากรูปที่ 2.10 (ก) มุมมองด้านหน้า กลไกก้านต่อโยงมีลักษณะเป็นก้านต่อโยงของวัตต์ ทั้งในมุมมองด้านหน้าและด้านหลังจะมีก้านต่อโยงในแนวตั้งอยู่ 4 อัน ยังช่วยลดการหมุนในแนวรอบตัวอีกด้วย ถ้ามองจากมุมมองด้านล่างมีแผ่นอลูมิเนียม

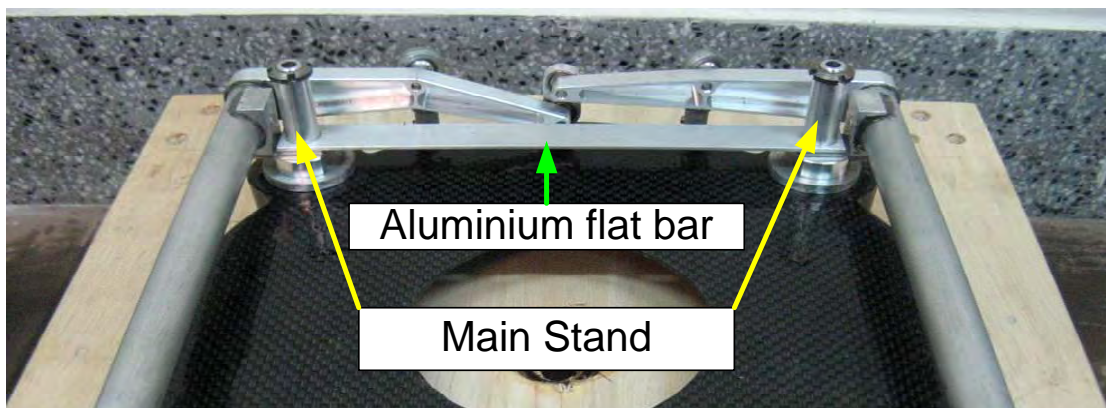
บาง และท่ออลูมิเนียมซึ่งเชื่อมติดกันต่อโยงช่วยบังคับให้แท่งรองรับสปริง (main stand) ตั้งอยู่ในแนวตั้งไม่เกิดการเอียงขึ้น



(ก) มุมมองด้านหน้าของโครงสร้างลดการสั่นสะเทือน



(ข) มุมมองด้านหลังของโครงสร้างลดการสั่นสะเทือน

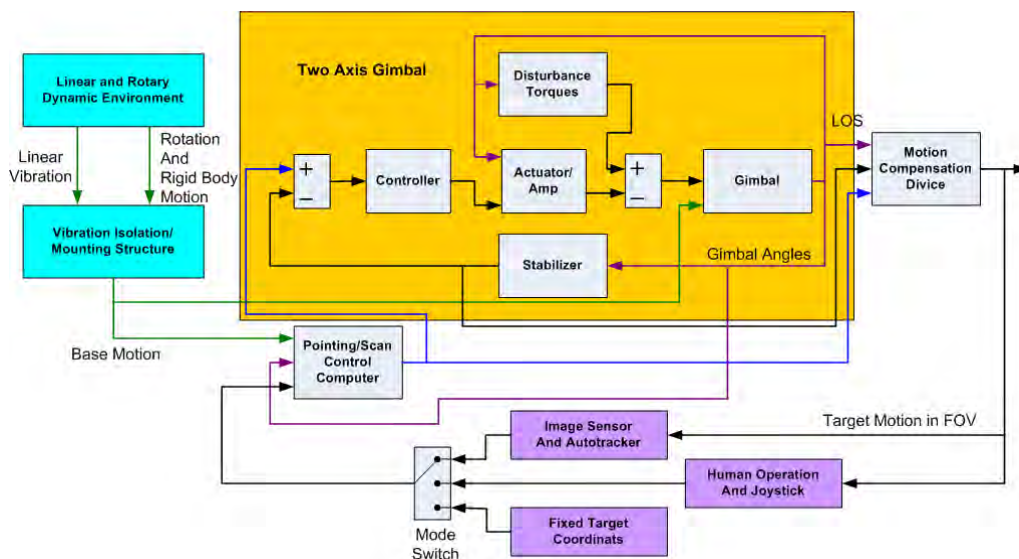


(ค) มุมมองด้านล่างของโครงสร้างลดการสั่นสะเทือน

รูปที่ 2.10 มุมมองด้านต่างๆของโครงสร้างลดการสั่นสะเทือน

2.2 การควบคุมอุปกรณ์การภาพ

ในการรักษาแนวการมองเห็น (LOS) มีสองสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ แนวการมองเห็น ต้องชี้ไปที่วัตถุที่ถูกเลือก โดยที่ภาพของวัตถุนั้นปรากฏอยู่ตรงกึ่งกลางของพื้นที่การมองเห็น หรือ Field of view (FOV) และรักษาหรือควบคุมแนวการมองเห็นให้ชี้ไปที่วัตถุนั้นตลอดเวลาในทิศทางหรือลักษณะที่ได้เลือกไว้ โดยประสิทธิภาพจะวัดจากความผิดพลาดในการติดตามเป้า (tricking error) และการสั่นไหวของภาพ (jitter) ซึ่งทั้งสองสิ่งนี้จะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของวัตถุเป้าหมาย (target motion) การเคลื่อนที่ของยานบิน (host vehicle motion) และสภาพแวดล้อมที่ปฏิบัติงาน (operation environment)



รูปที่ 2.11 ระบบรักษาเสถียรภาพในการติดตามเป้า

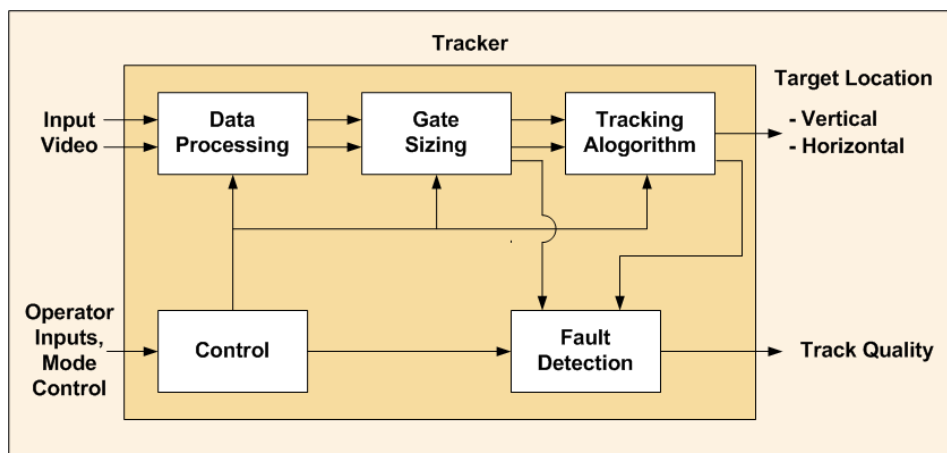
โดยทั่วไป โครงสร้างอุปกรณ์การภาพไม่เพียงแต่จะป้องกันการหมุน หรือการสั่นไหวของกล้องเมื่ออากาศยานที่โครงสร้างอุปกรณ์การภาพติดตั้งอยู่มีการเคลื่อนที่เท่านั้น แต่ต้องสามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยลักษณะการควบคุมอุปกรณ์การภาพแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ ควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงานหรือใช้จอยสติค (joystick) ควบคุมโดยระบบประมวลผลภาพและติดตามเป้า และควบคุมโดยกำหนดให้ชี้เป้าที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11

วิธีค้นหาและติดตามวัตถุเป้าหมายในภาพ ที่นิยมในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น Contrast edge, Contrast centroid, Adaptive gate centroid (AGCT), Correlation, Exceedance integration, Histogram projection, Extended Kalman trackers, Mean-Shift tracking and Multimode ซึ่งจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะวัตถุเป้าหมาย สภาพแวดล้อม

และทัศนวิสัย (กลางวัน, กลางคืน) วิธีติดตามวัตถุบางวิธีใช้ได้กับภาพวัตถุที่มีความคมชัดสูง บางวิธีใช้ได้กับวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ บางวิธีสามารถปรับวิธีการติดตามวัตถุให้เหมาะสมกับสถานะที่ปฏิบัติงาน

แม้ว่าอุปกรณ์การภาพจะเป็นระบบติดตามเป้าอัตโนมัติ ก็ยังต้องอาศัยมนุษย์ในการควบคุม เนื่องจากก่อนที่ระบบจะดำเนินการติดตามวัตถุ ต้องมีผู้บังคับให้อุปกรณ์การภาพชี้ไปยังวัตถุเป้าหมาย และทำการเลือกเป้าหมายเสียก่อน หลังจากนั้นเมื่อกระบวนการติดตามวัตถุเริ่มขึ้น ระบบติดตามวัตถุจะหาลักษณะเฉพาะของเป้าหมาย เพื่อใช้ในการแยกแยะวัตถุเป้าหมายออกจากภาพพื้นหลัง ซึ่งแต่ละวิธีการจะใช้ลักษณะเฉพาะเพื่อระบุเป้าหมายแตกต่างกันออกไป ถ้าลักษณะเฉพาะที่ระบุเพียงพอต่อความต้องการของแต่ละวิธีการแล้ว ระบบติดตามวัตถุจะสามารถทำงานได้ โดยกระบวนการพื้นฐานของระบบติดตามวัตถุคือ ประเมินค่าตำแหน่งของเป้าหมายบนภาพในแต่ละเฟรมซึ่งรับมาจากกล้องวิดีโอ โดยระบบที่ได้นั้นไม่เพียงแต่ติดตามเป้าหมายจากลักษณะเฉพาะในแต่ละเฟรมเท่านั้น ยังต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของการติดตามวัตถุด้วย

วิธีการติดตามวัตถุมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีใช้หลักการพื้นฐานแตกต่างกัน โดยทั่วไปการจะเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุด ต้องพิจารณาจากสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องเป็นสำคัญ เช่น ขนาดและรูปร่างของวัตถุที่เป็นเป้าหมาย สัดส่วนของสัญญาณและสัญญาณรบกวน คุณลักษณะของสัญญาณรบกวนในภาพ ทั้งยังต้องคำนึงถึงความเร็ว และประสิทธิภาพในการประมวลผลด้วย โดยทั่วไประบบติดตามวัตถุจะแบ่งหน้าที่การทำงานออกเป็น 5 ส่วนซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของระบบติดตามวัตถุ

- การประมวลผลข้อมูล เป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพข้อมูล เช่น แปลงสัญญาณวิดีโอแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีคุณภาพ และมีความชัดเจนของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น หรือบีบอัดข้อมูลดิบให้มีขนาดเล็กลง เพื่อความรวดเร็วการสื่อสารและลดทรัพยากรในการจัดเก็บข้อมูล

- กำหนดขอบเขตค้นหา เนื่องจากขั้นตอนการหาตำแหน่งเป้าหมายบนภาพ ถ้าทำการประมวลผลทั้งภาพซึ่งมีขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาาน ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตค้นหา เพื่อเลือกที่จะประมวลผลภายในขอบเขตที่สนใจก่อน ทำให้ลดเวลาในการประมวลผล

- กระบวนการติดตามวัตถุ เป็นกระบวนการที่จะประมาณค่าตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในขอบเขตค้นหา โดยผลลัพธ์ที่ได้คือ ตำแหน่งในแนวนอนและแนวตั้งบนภาพในแต่ละเฟรม ทำให้ทราบทิศทางการเคลื่อนที่ของเป้าหมายใน 2 มิติ ซึ่งจะนำไปใช้ในการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพให้เคลื่อนที่ตามวัตถุเป้าหมายต่อไป

- การตรวจสอบความผิดพลาด เป็นขั้นตอนวัดระดับความมั่นใจว่าตำแหน่งเป้าหมายที่คำนวณได้มานั้นถูกต้องเพียงใด

- ส่วนการควบคุม เป็นส่วนที่ควบคุมระบบโดยรวม ในการติดต่อกับผู้ใช้งาน และส่วนอื่น โดยเฉพาะการตรวจสอบความผิดพลาด หากเกิดกรณีที่ไม่สามารถติดตามวัตถุได้ ส่วนควบคุมจะเตือนขึ้น ให้ผู้ใช้งานเลือกเป้าหมายใหม่อีกครั้ง ซึ่งในกรณีนี้มักเกิดเมื่อเป้าหมายถูกบังหรือไม่ปรากฏบนจอภาพ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบการมองเห็นและการประมวลผลภาพ

ในปัจจุบันเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์คำนวณดิจิทัลที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวาง ประกอบกับความเร็วในการประมวลผลเทียบกับราคาแล้วถือได้ว่ามีต้นทุนในการคำนวณต่ำ และเมื่อทำงานร่วมกับระบบปฏิบัติการในปัจจุบันที่มีความสามารถในการแสดงผลแบบกราฟิก ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณออกจากจอภาพได้ทันที อีกทั้งยังสามารถดัดแปลงขั้นตอนวิธีการคำนวณได้โดยการเขียนโปรแกรมใหม่ซึ่งสามารถออกแบบให้มีความซับซ้อนได้และแก้ไขได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีแบบแอนะล็อก ด้วยข้อดีหลายประการที่กล่าวข้างต้นจึงทำให้ การศึกษาและการทดลองประมวลผลภาพนิยมกระทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนวิธีการประมวลผลภาพที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลากหลาย แต่โดยภาพรวมจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามลักษณะการดำเนินการ ได้แก่

point operation – เป็นการดำเนินการที่ค่าจุดภาพที่ตำแหน่งหนึ่งของภาพผลลัพธ์เกิดจากค่าจุดภาพของภาพนำเข้าที่ตำแหน่งเดียวกันเท่านั้น เช่น การนำภาพ 2 ภาพมารวมกัน ซึ่งเป็นการนำค่าจุดภาพของภาพทั้งสองที่ตำแหน่งแถวและสดมภ์เดียวกันมารวมกัน เป็นต้น

local operation – เป็นการดำเนินการที่ค่าจุดภาพที่ตำแหน่งหนึ่งของภาพผลลัพธ์เกิดจากค่าจุดภาพของภาพนำเข้าที่ตำแหน่งเดียวกันและตำแหน่งรอบข้างของจุดนั้น เช่น การทำการประสานภาพกับตัวกรอง (filter) เพื่อทำการหาขอบของภาพ (edge detection) เป็นต้น

global operation – เป็นการดำเนินการที่ค่าจุดภาพที่ตำแหน่งหนึ่งของภาพผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่าจุดภาพเดิมที่ตำแหน่งนั้นเทียบกับค่าของจุดภาพทั้งหมดของภาพ เช่น การปรับฮิสโทแกรมของภาพซึ่งเป็นแผนภาพที่แสดงความถี่ของค่าจุดภาพทั้งหมดของภาพ คล้ายกับการวัดระดับคะแนนในการเรียนแบบอิงกลุ่มที่ระดับคะแนนของแต่ละคนจะขึ้นอยู่กับคะแนนของผู้อื่นด้วย

จุดประสงค์ของการประมวลผลภาพมีหลายประการด้วยกัน แตกต่างกันไปตามการประยุกต์ใช้ ดังจะยกตัวอย่างประกอบดังนี้

- การแก้ไขความเปรียบต่างของภาพ (contrast) เพื่อทำการปรับแก้ภาพที่ถูกถ่ายภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ดี ได้แก่ ภาพที่มืดไปหรือสว่างไปซึ่งทำให้ภาพมีรายละเอียดน้อยให้มีรายละเอียดของภาพที่ดีขึ้น เช่นการทำฮิสโทแกรมอีควอลไลเซชัน (histogram equalization)

- การส่งข้อมูลภาพระยะไกล เช่น การส่งข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนบิน (Unmanned Aerial Vehicles : UAVs) ไปสถานีภาคพื้นดิน หรือการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตซึ่งจำเป็นต้องทำการบีบอัดข้อมูลภาพดิบให้มีขนาดเล็กลงเพื่อความรวดเร็วในการสื่อสารและลดทรัพยากรในด้านการสื่อสารและการจัดเก็บ

- การวัดโดยอาศัยข้อมูลภาพ เช่น การวัดขนาดหรือตำแหน่งของวัตถุในภาพ แม้จะทำการจัดสภาพแวดล้อมสำหรับการถ่ายภาพอย่างดีแล้ว ภาพดิจิทัลที่ได้มักจะมีข้อมูลมากกว่าที่ต้องการ หรือไม่สามารถหาปริมาณที่สนใจได้จากข้อมูลภาพโดยตรง จึงจะต้องมีวิธีซึ่งจะเปิดเผยถึงลักษณะเฉพาะที่สนใจในภาพออกมาให้เด่นชัดขึ้น เพื่อจะสามารถนำข้อมูลที่สนใจออกมาจากภาพได้ง่ายยิ่งขึ้น

โดยทั่วไปการใช้ขั้นตอนวิธีใดวิธีหนึ่งในการประมวลผลจะไม่เพียงพอเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ ภาพนำเข้าจะต้องผ่านการประมวลผลหลายขั้น เนื่องจากการประมวลผลภาพแต่ละวิธีเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาพอสมควร ทำให้เวลารวมในการประมวลผลเพิ่มมากขึ้น สำหรับงานที่ต้องคำนึงถึงเวลาเป็นสิ่งสำคัญ หากสามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมการทำงานได้ก็ควรจะจัดอุปกรณ์แสงหรืออุปกรณ์ใดๆ เพื่อช่วยทำให้การประมวลผลสามารถสำเร็จด้วยขั้นตอนที่น้อยที่สุด สำหรับในงานที่ไม่สามารถจัดสภาวะแวดล้อมได้ อาจจะต้องตัดสินใจเลือกใช้เป็นแผนวงจรประมวลผลภาพซึ่งสามารถลดเวลาในการประมวลผลได้มาก แต่ก็มีราคาที่สูงพอสมควร

ในการติดตามวัตถุด้วยภาพซึ่งเป็นการค้นหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพวิดีโอในแต่ละเฟรม โดยทฤษฎีที่ใช้ในการติดตามวัตถุด้วยภาพมีมากมายหลายวิธีซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมตามการใช้งาน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการแคมชิฟ (Camshift algorithm) ซึ่งวิธีนี้เป็นการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของตำแหน่งวัตถุจากภาพสีฮิสโทแกรม และมีจุดเด่นคือสามารถติดตามตำแหน่งวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ปรากฏบนภาพได้ โดยข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งวัตถุในภาพ และแปลงเป็นชุดคำสั่งสำหรับควบคุมโดยส่งไปยังส่วนควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพให้ติดตามวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ได้ ทั้งยังควบคุมตำแหน่งวัตถุเป้าหมายในภาพให้อยู่บริเวณกลางภาพได้

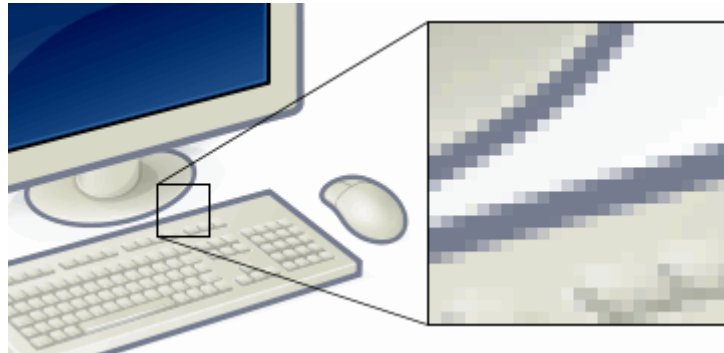
ก่อนอื่นจะขอเกริ่นนำในส่วนของความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับภาพดิจิทัล และขั้นตอนการทำงานของวิธีการแคมชิฟแบบย่อก่อน

2.3.1 ภาพและความหมายของพิกเซล

ภาพดิจิทัลจะแทนด้วยเมตริกซ์ใน 2 มิติ โดยแต่ละหน่วยในเมตริกซ์จะเรียกว่าพิกเซล (pixel) กระบวนการแสดงภาพให้ปรากฏขึ้นมานั้นก็คือการแสดงค่าของเมตริกซ์ โดยแต่ละพิกเซลจะมีค่าเฉพาะตัวแสดงถึงสีต่างๆ โดยปกติภาพขาว-ดำ แต่ละพิกเซลจะประกอบไปด้วย 8 บิต หรือ 1 ไบต์ (Byte) คือมีค่าของพิกเซล อยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 ส่วนภาพสีนั้นแต่ละพิกเซลจะประกอบไปด้วย 24 บิต หรือ 3 ไบต์ จะแทนด้วยค่าสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน (RGB) โดยแต่ละสีจะมีค่าของพิกเซล อยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 เช่นกัน

พิกเซลถือเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดของรูปภาพ เป็นจุดเล็กๆ ที่รวมกันทำให้เกิดภาพขึ้น ซึ่งแต่ละภาพที่สร้างขึ้นจะมีความหนาแน่นของจุดพิกเซลเหล่านั้นแตกต่างกันไป ความหนาแน่นของจุดนี้เป็นตัวบอกถึงความละเอียดของภาพ หากจำนวนพิกเซลมีมาก ภาพก็จะ

ละเอียดมากกว่าภาพที่มีจำนวนพิกเซลน้อย นอกจากนี้ยังขึ้นกับระยะห่างในการมองภาพอีกด้วย จำนวนพิกเซลในภาพจะนับเป็นด้านกว้าง x ด้านยาว เมื่อคูณกันจะได้จำนวนพิกเซลทั้งหมด เช่น ภาพมีขนาด 640x480 pixels มีจำนวนพิกเซลทั้งหมด 307,200 พิกเซล

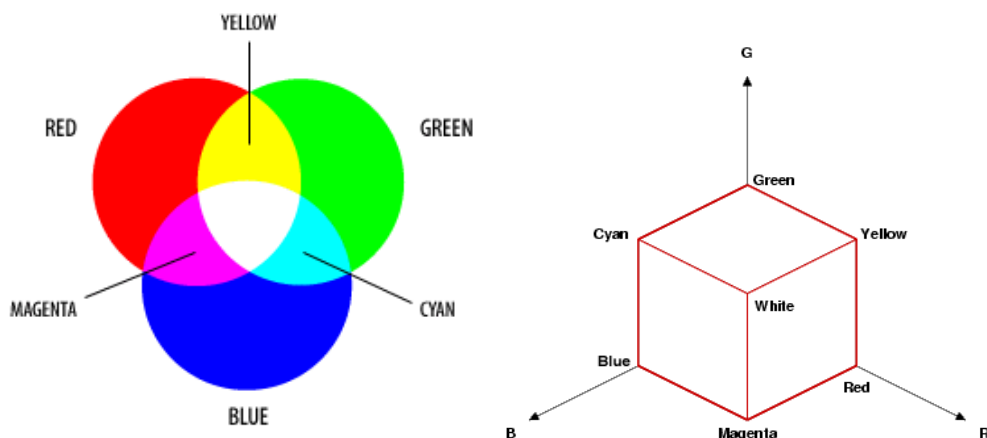


รูปที่ 2.13 พิกเซลของภาพสี

2.3.2 แบบจำลองสี (color model)

แบบจำลองสี คือ รูปแบบสี รูปแบบแม่สี รูปแบบการผสมสี แบบจำลองสี ทำขึ้นเพื่อบอกว่าสีนั้นๆ แทนด้วยตัวเลขอะไรตัวเลขชุดนั้นมีความสัมพันธ์กับสีต่างๆ ความสว่างต่างๆ ใดๆ ซึ่งแบบจำลองสีมีหลายชนิดในที่นี้จะกล่าวถึง 2 ชนิดที่นิยมใช้กันมากคือ

แบบจำลองสีอาร์จีบี (RGB color model) เป็นโมเดลของแสงสีที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยแสงสีต่างๆ จะเกิดจากการผสมกันระหว่างแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน ภาพที่นำมาประมวลผลนั้นจะเก็บค่าสีในลักษณะแบบจำลองสีอาร์จีบี ซึ่งแบบจำลองสีอาร์จีบีนี้ค่าของสีแดง เขียว และเหลืองจะเปลี่ยนไปตามความเข้มแสง ดังรูปที่ 2.14 กล่าวคือ ถ้าแสงสว่างมาก ค่าของสีทั้งสามสีจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่หากมีแสงสว่างน้อย ค่าของสีทั้งสามจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.14 แบบจำลองสีอาร์จีบี

แบบจำลองสีเอชเอสวี (HSV color model) แบบจำลองสีเอชเอสวีถูกเสนอโดยเออาร์ สมิท (A.R. Smith) ในปี ค.ศ. 1978 มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้สะดวกในการใช้สีต่างๆ มากกว่าที่ใช้เฉพาะแม่สีทั้งสาม เป็นแบบจำลองสีที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกโดยแบบจำลองสีเอชเอสวี ดังภาพประกอบที่ 2.15 จะให้ความหมายที่ดีกว่าเมื่อกล่าวถึง สีต่าง ๆ ในเชิงศิลปะ เช่น เมื่อพูดถึงสีเหลืองในทางศิลปะจะมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาสีเหลืองอ่อน สีเหลืองแก่ หรือสีน้ำตาลว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร จะพบว่าทุกสี คือสีเหลืองนั่นเอง ที่มีระดับความเข้มหรือมีความอิ่มตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นสีในแบบจำลองสีเอชเอสวี จึงให้ความรู้สึกที่เข้าใจได้มากกว่า สำหรับมนุษย์ โมเดลสีนี้ประกอบด้วยค่า 3 ค่า ได้แก่

H หมายถึง Hue คือค่าสีของสีหลัก (สีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน) วัดเป็นมุม คือ 0 – 360 องศา ซึ่งสีแดงเท่ากับ 0 องศา สีเขียวเท่ากับ 120 องศา และสีนํ้าเงินเท่ากับ 240 องศา ในทางปฏิบัติจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 ซึ่งถ้า Hue มีค่าเท่ากับ 0 จะแทนสีแดง Hue สามารถคำนวณได้จากระบบสี RGB ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} red_h &= red - \min(red, green, blue) \\ green_h &= green - \min(red, green, blue) \\ blue_h &= blue - \min(red, green, blue) \end{aligned} \quad (2.1)$$

จากลักษณะโมเดลของระบบ Hue พบว่าจะมีค่าอย่างน้อยหนึ่งค่าที่จะเท่ากับ 0 แต่ถ้ามีสองค่าเท่ากับ 0 แล้ว Hue จะเป็นมุมของสี (ค่าสี) มีค่าเป็นไปตามสีที่สาม และถ้าสามสีมีค่าเท่ากับ 0 แล้วจะทำให้ไม่มีค่าของ Hue หรือสีที่ได้จะมีค่าเท่ากับสีขาวนั่นเอง การให้นํ้าหนักในการพิจารณาเมื่อสีแดงมีค่าเท่ากับ 0 คำนวณดังนี้

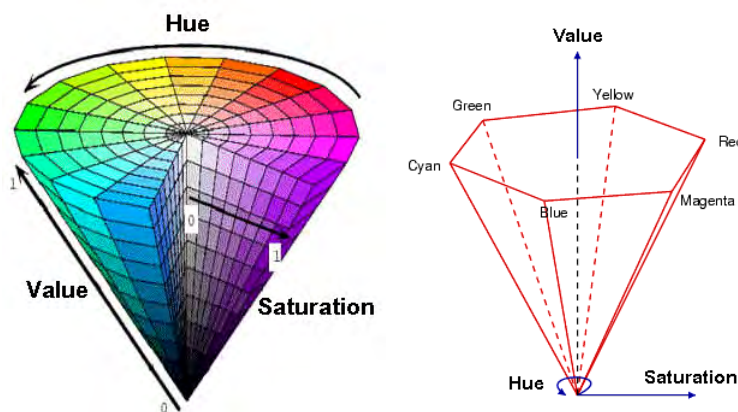
$$\frac{(240 \times blue_h) + (120 \times green_h)}{blue_h + green_h} \quad (2.2)$$

S หมายถึง Saturation คือค่าความเข้มของเนื้อสี หรือค่าความบริสุทธิ์ของสี มีค่าเท่ากับ 0 แล้วสีที่ได้จะไม่มี Hue ซึ่งจะเป็นสีขาวล้วนแต่ถ้า Saturation มีค่าเท่ากับ 255 แสดงว่า จะไม่มีแสงสีขาวผสมอยู่เลย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Saturation = \frac{\max(red, green, blue) - \min(red, green, blue)}{\max(red, green, blue)} \quad (2.3)$$

V หมายถึง Value หรือ Brightness คือ ความสว่างของสี มีค่าตั้งแต่ 0 – 100 โดยภาพจะสว่างมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Brightness มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสามารถวัดได้โดยค่าความเข้มของความสว่างของแต่ละสีที่ประกอบกันสามารถคำนวณได้จาก

$$value = \max(red, green, blue) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.15 แบบจำลองสี HSV

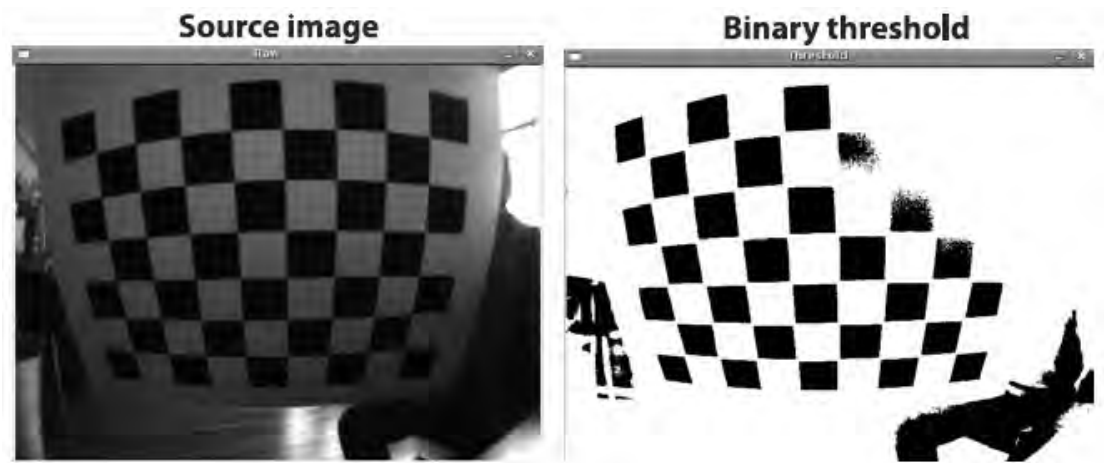
2.3.3 การปรับค่าขีดแบ่ง (thresholding)

การปรับค่าขีดแบ่งเป็นวิธีที่สำคัญวิธีหนึ่งในการแยกส่วนประกอบของภาพ เช่น การแยกวัตถุที่สนใจออกจากพื้นหลัง โดยการพิจารณาค่าจุดภาพเทียบกับค่าคงตัวค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าค่าขีดแบ่ง โดยผ่านกฎเกณฑ์ที่ตั้งขึ้น ตัวอย่างหนึ่งของการปรับค่าขีดแบ่งที่ง่ายที่สุดคือการแปลงภาพสีเทาเป็นภาพขาวดำ (binary image) การเลือกค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมจะทำให้ภาพขาวดำที่ได้สามารถแยกวัตถุที่กำลังสนใจออกจากพื้นหลังได้ชัดเจน การเปลี่ยนภาพสีให้เป็นภาพที่มีแต่สีขาวดำโดยใช้ค่าขีดแบ่งเป็นตัวกำหนด มี contrast threshold เป็นค่าเปรียบเทียบของความสว่าง (contrast of luminance) น้อยที่สุดที่ทำให้ตาเปล่าสามารถมองเห็นวัตถุเป้าหมายโดยแยกวัตถุนั้นจากภาพเบื้องหลังในภายใต้สภาวะของความสว่างที่เหมาะสม (adaptation luminance) และมุมของการมองเห็น (visual angle) ที่เจาะจงลงไป

วิธีการนี้จะทำโดยการเลือกค่าขีดแบ่งมาหนึ่งค่าจากค่าความเข้มของภาพสีเทา (0-255) ซึ่งค่าความเข้มที่เลือกจะถูกนำมาใช้เป็นจุดแบ่ง คือ จากแต่ละพิกเซลในภาพถ้าจุดใดมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าขีดแบ่ง จุดนั้นจะถูกกำหนดให้มีค่าความเข้มเป็น 0 (สีดำ) ถ้าจุดใดมีค่ามากกว่าค่าขีดแบ่งจุดนั้นจะถูกกำหนดให้มีค่าความเข้มเป็น 255 (สีขาว) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือภาพไบนารี (ภาพขาวดำ) ถ้ากำหนดให้ $F(x, y)$ เป็นระดับความเข้มของภาพที่จุด (x, y) นั้นๆ $T(x, y)$

เป็นระดับความเข้มหลังจากปรับค่าขีดแบ่งที่จุด (x, y) นั้นๆ โดยค่า T เป็นค่าขีดแบ่งที่เลือกมาใช้แบ่งภาพแล้ว ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าขีดแบ่งคือ

$$T(x, y) = \begin{cases} 0 & F(x, y) \leq T \\ 255 & F(x, y) > T \end{cases} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.16 ภาพต้นฉบับขาวดำ และภาพผ่านการปรับค่าขีดแบ่ง

ในการปรับค่าขีดแบ่งภาพสีโดยใช้ค่าขีดแบ่งของสีแดง เขียว น้ำเงิน ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าขีดแบ่งคือ

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f_R(x, y) \geq T_R, f_G(x, y) \geq T_G, f_B(x, y) \geq T_B \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

$g(x, y)$ ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าขีดแบ่งของภาพที่จุด (x, y) ค่า $f(x, y)$ เป็นระดับความเข้มของภาพที่จุด (x, y) นั้นๆ โดยค่า T_R, T_G, T_B เป็นค่าขีดแบ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าสีในแต่ละพิกเซล ของสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินตามลำดับ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ภาพต้นฉบับ และภาพผ่านการปรับค่าขีดแบ่ง

การปรับค่าขีดแบ่งภาพสี นอกจากจะใช้ค่าสีแดงเขียวและน้ำเงินแล้ว ยังสามารถทำได้ด้วยวิธีอื่น อีกเช่น การใช้ฟังก์ชันตรวจค่าในช่วงที่สนใจของภาพสี และการจัดกลุ่มพิกเซลที่มีสีเหมือนกัน รวมกลุ่มเดียวกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพต้นฉบับ (ซ้ายมือสุด) และภาพผ่านการปรับค่าขีดแบ่งที่ค่าต่างๆกัน

2.3.4 ตัวกรองค่าเฉลี่ย (mean filter)

เป็นตัวกรองที่ทำการแทนที่ค่าจุดภาพจุดเดิมด้วยค่าเฉลี่ยของจุดภาพนั้นกับ จุดภาพรอบข้าง ประโยชน์ของตัวกรองนี้คือการลดสัญญาณรบกวนบนภาพที่เกิดจากหลอดฟลูออ เรสเซนซ์ หรือแสงสะท้อน แต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้รายละเอียดของภาพลดลงไปได้ ตัวอย่าง ของตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3×3

ตัวอย่าง ตัวกรองค่าเฉลี่ย ให้รูปขนาด 3×3 พิกเซลมีค่าพิกเซลดังตารางด้านล่าง

22	77	48
150	77	158
0	77	219

ค่าของพิกเซลกึ่งกลางภาพคือ $(22+77+48+150+77+158+0+77+219)/9$ ซึ่งค่าของพิกเซล กึ่งกลางจะถูกเปลี่ยนจาก 77 เป็น 92



รูปที่ 2.19 ภาพต้นฉบับ และภาพผ่านตัวกรองค่าเฉลี่ย

2.3.5 ตัวกรองกึ่งกลาง (median filter)

เป็นตัวกรองที่ทำการแทนที่ค่าจุดภาพจุดเดิมด้วยค่ากึ่งกลางของจุดภาพนั้นกับจุดภาพรอบข้าง ประโยชน์ของตัวกรองนี้คือการลดสัญญาณรบกวนบนภาพโดยไม่ทำลายความคมชัดของเส้นขอบในรูป ตัวอย่างของตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 3×3

ตัวอย่าง ตัวกรองค่าเฉลี่ย ให้รูปขนาด 3×3 พิกเซลมีค่าพิกเซลดังตารางด้านล่าง

22	70	48
150	77	158
0	75	219

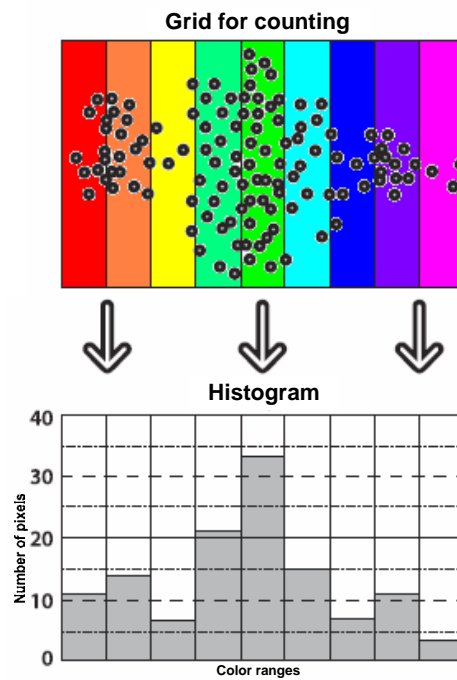
ค่าของพิกเซลกึ่งกลางคือ 0, 22, 48, 70, [75], 77, 150, 158, 219 ซึ่งค่าของพิกเซลกึ่งกลางภาพจะถูกเปลี่ยนจาก 77 เป็น 75 ซึ่งเป็นค่ากลางจากการเรียงลำดับ



รูปที่ 2.20 ภาพต้นฉบับ และภาพผ่านตัวกรองกึ่งกลาง

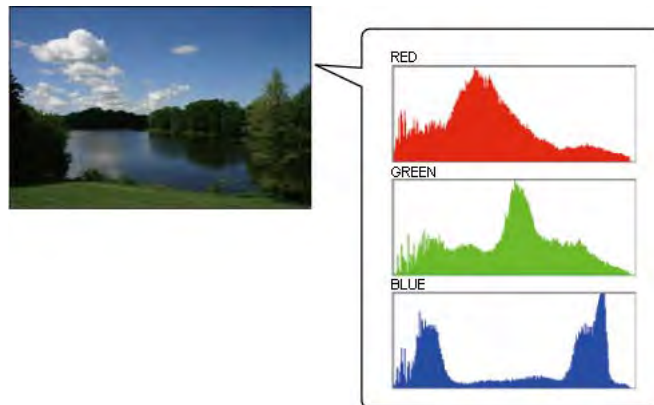
2.3.6 ฮิสโทแกรมของสี (color histogram)

ฮิสโทแกรมเป็นกราฟแสดงความถี่หรือความหนาแน่นของค่าสี (gray level) สามารถสร้างได้โดยการนับจำนวนพิกเซลของแต่ละค่าสีบนภาพ โดยแกนนอนคือค่าความเข้มสีหรือส่วนประกอบของสี และแกนตั้งคือค่าความถี่ (จำนวนพิกเซล) ของแต่ละสี เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจจะยกตัวอย่างการสร้างฮิสโทแกรมแบบ 1 มิติ โดยภาพสีซึ่งประกอบด้วยพิกเซลมากมายเพื่อให้เกิดเป็นภาพขึ้นมาแต่ละพิกเซลจะมีการแสดงค่าสี (hue) ต่างกัน การสร้างฮิสโทแกรมของสีเริ่มจากทำการจัดกลุ่มพิกเซลลงตามกลุ่มค่าสี (bin) ดังรูปที่ 2.21 เมื่อจัดกลุ่มเสร็จทุกพิกเซลแล้วทำการนับจำนวนพิกเซลในแต่ละกลุ่มสี แล้วนำมาสร้างกราฟแสดงความถี่

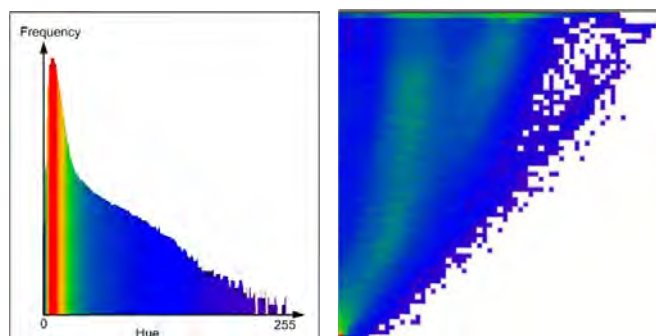


รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการสร้างฮิสโทแกรม 1 มิติ

ฮิสโทแกรมของสีแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ แบบแยกตามแม่สีซึ่งสร้างมาจากแบบจำลองสีอาร์จีบี และแบบรวมแม่สี ซึ่งสร้างมาจากแบบจำลองสีเอชเอสวี



รูปที่ 2.22 ฮิสโทแกรมของสีแบบแยกตามแม่สี



รูปที่ 2.23 ฮิสโทแกรมของสีแบบรวมแม่สี 1 มิติ และ 2 มิติ

2.3.7 กระบวนการแคมชิฟ (CAMShift Algorithm)

กระบวนการแคมชิฟ มาจากคำภาษาอังกฤษว่า Continuously Adaptive Mean Shift algorithm ซึ่งเรียกอ่อสั้นๆว่า แคมชิฟ (CAMShift) เป็นวิธีการที่ปรับปรุงมาจากวิธีการมินชิฟ (Mean-Shift algorithm) กับการปรับขนาดพื้นที่ (adaptive region-sizing) เพื่อใช้ในการติดตามวัตถุโดยเฉพาะหัวหรือหน้าของมนุษย์

2.3.8 การทำการฉายกลับ (Back-Projection)

เพื่อจะใช้กระบวนการมินชิฟได้อย่างเหมาะสมจะต้องใช้วิธีการทำการฉายกลับซึ่งเป็นกระบวนการแยกวัตถุเป้าหมายออกจากภาพพื้นหลัง เป็นขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างค่าพิกเซลในภาพกับค่าที่คำนวณในฮิสโตแกรมของสี ซึ่งการทำการฉายกลับของฮิสโตแกรมของสีเพื่อหาวัตถุเป้าหมายในเฟรมถัดๆมา จะสร้างรูปความน่าจะเป็นที่หาว่าคุณสมบัติในพิกเซลมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายมากน้อยเพียงใด

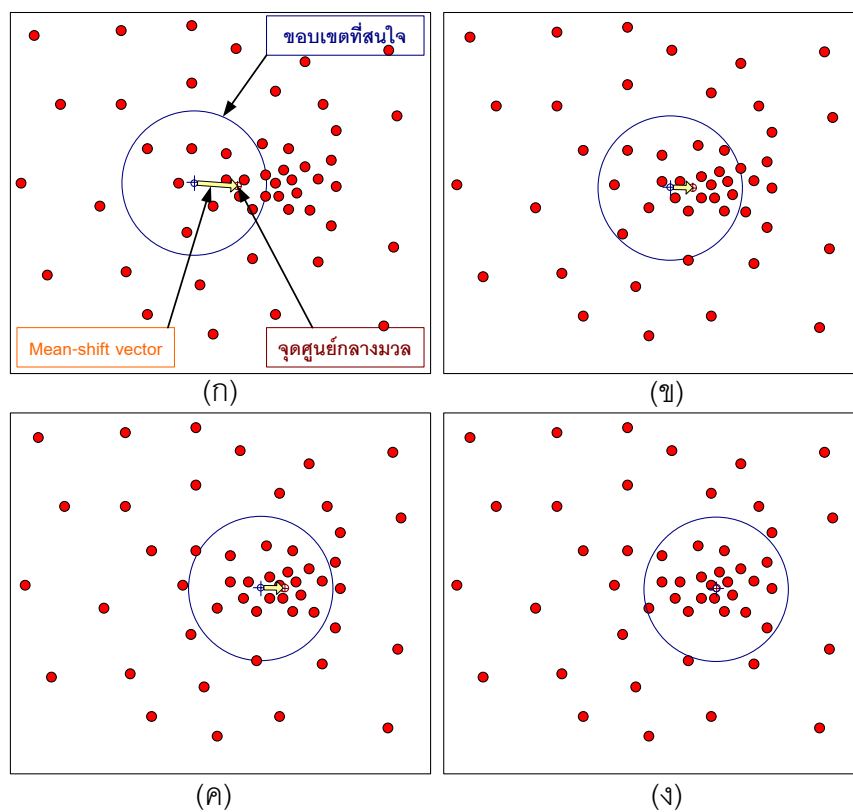
โดยวิธีการนี้จะต้องสร้างฮิสโตแกรมของวัตถุเป้าหมาย แล้วนับดูว่าในวัตถุเป้าหมายมีสีใดบ้าง สีละกี่พิกเซล จากนั้นหาอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของแต่ละสีในฮิสโตแกรม โดยกำหนดให้จำนวนพิกเซลทั้งหมดบริเวณที่เลือกเป็นวัตถุเป้าหมายเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการเปรียบเทียบกับแต่ละพิกเซลในรูปโดยใช้หลักการของความน่าจะเป็นเพื่อสร้างภาพฉายกลับซึ่งเป็นภาพขาวดำ มีค่าสีระหว่าง 0-255 และค่าความน่าจะเป็นอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้าค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 1 พิกเซลในภาพฉายกลับจะมีค่าสี 255 หรือเป็นสีขาว ถ้าค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0 พิกเซลในภาพฉายกลับจะมีค่าสี 0 หรือเป็นสีดำ และถ้าค่าความน่าจะเป็นเป็นค่าอื่น พิกเซลในภาพฉายกลับจะมีค่าสีระหว่าง 0-255 ตามช่วงความน่าจะเป็น

2.3.9 กระบวนการมินชิฟ (Mean-Shift Algorithm)

กระบวนการมินชิฟเป็นวิธีการทางสถิติในการหาบริเวณที่ค่าการกระจายของความน่าจะเป็นมีค่าสูงสุด โดย Fukunaga เป็นผู้เสนอวิธีนี้เป็นครั้งแรก แต่ก็ไม่ได้รับความนิยมจนกระทั่ง Y. Chen ได้สรุปและปรับปรุงวิธีการ วิธีการมินชิฟใช้ความชันของการกระจายของความน่าจะเป็นตัวดำเนินการ โดยการทำงานจะมีกรอบหน้าต่างที่ใช้ในการค้นหา ซึ่งเป็นตัวบอกตำแหน่งบริเวณที่มีค่าการกระจายมากที่สุด กรอบหน้าต่างนี้จะเคลื่อนที่จากจุดที่มีค่าการกระจายมากที่สุดไปสู่จุดที่มีค่าการกระจายมากที่สุดอันใหม่ โดยกระบวนการนี้จะทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าการกระจายมากที่สุดในบริเวณนั้น (local maximum) และค่าลู่เข้าแล้ว (converges) ข้อดีที่เห็นได้

ชัดของวิธีนี้คือมีความเร็วมากในการลู่เข้าแล้ว(converges) จึงนิยมใช้อย่างกว้างขวาง ในการกรองภาพ(image filtering),การแยกภาพออกเป็นส่วน ๆ (Image Segmentation) และระบบติดตาม (object tracking)

กระบวนการมินชิฟเป็นวิธีการหาจุดที่มีความหนาแน่นของข้อมูลมากที่สุดโดยการย้ายจุดศูนย์กลางของการคำนวณแต่ละรอบไปตามเส้นทางของข้อมูลที่มีความหนาแน่นของข้อมูลมาก จนจุดศูนย์กลางของการคำนวณไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่ง ก็ถือว่าจุดศูนย์กลางนั้นเป็นจุดที่มีความหนาแน่นของข้อมูลอยู่ในบริเวณใกล้เคียงสูงสุด



รูปที่ 2.24 แสดงลำดับการค้นหาค่าความหนาแน่นของกลุ่มพิกเซลด้วยวิธีมินชิฟจาก (ก) ถึง (ง)

กระบวนการมินชิฟคำนวณได้จากสมการดังนี้ สมมติว่ามีข้อมูล n ชุด ประกอบไปด้วย x_1, \dots, x_n ซึ่งมี d มิติ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล (Sample mean) รอบจุด x ใดๆ แทนด้วยสมการ

$$m(x) = \frac{\sum_{x_i \in x} K(x_i - x)x_i}{\sum_{x_i \in x} K(x_i - x)} \quad (2.7)$$

$m(x)$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลรอบจุด x ใดๆ

x_1, \dots, x_n คือพิกเซลที่มีสีของวัตถุเป้าหมาย

เมื่อ $K(x)$ คือฟังก์ชันหลักในการคำนวณ (kernel function) ที่นิยมใช้จะมีฟังก์ชัน λ -ball

$$K(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } \|x\| \leq \lambda \\ 0 & \text{if } \|x\| > \lambda \end{cases} \quad (2.8)$$

$\|x\|$ คือระยะยูคลิดีเนียน (Euclidean distance)

$$\|x\|^2 = \sum_{i=1}^n |x_i|^2 \quad (2.9)$$

ผลต่างระหว่าง $m(x) - x$ เรียกว่า มีนชิฟ การคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลแล้วย้ายจุด x มาที่ค่าเฉลี่ยจนกระทั่งไม่มีการย้าย x อีก เราเรียกรวีนี้อีกว่าวิธีการย้ายตามค่าเฉลี่ย (Mean-Shift Algorithm) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกจุดศูนย์กลางการคำนวณเริ่มต้น x
2. คำนวณหา $m(x)$ จากสมการที่ (2.7)
3. กำหนดให้ $m(x)$ เป็นจุดศูนย์กลางการคำนวณใหม่

$$x^{(t+1)} = m(x^{(t)})$$

4. คำนวณระยะจากจุดศูนย์กลางใหม่กับจุดศูนย์กลางเดิม

$$\Delta x^{(t)} = m(x^{(t)}) - x^{(t)}$$

5. ทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 จนกระทั่งจุดศูนย์กลางการคำนวณไม่ย้าย หรือย้ายน้อยกว่าค่าที่กำหนด

2.4 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

เนื่องจากสิ่งที่เราต้องการรู้เมื่อวิเคราะห์ระบบก็คือ ณ เวลาหนึ่งๆ ระบบมีสถานะ (States) เป็นอย่างไร และสถานะของระบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไร ในทางปฏิบัติบ่อยครั้ง

การหาสถานะของระบบไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะมีข้อจำกัดหลายปัจจัย เช่น ความไม่สมบูรณ์ของเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดสถานะของระบบและความคลาดเคลื่อนในการวัด ผลลัพธ์จากการวัดย่อมมีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามาอยู่เสมอ วิธีหนึ่งสำหรับหาสถานะของระบบคือใช้ตัวกรองคาลมาน ซึ่งเป็นสูตรทางคณิตศาสตร์ซึ่งพัฒนาโดย ดร. R. E. Kalman ปัจจุบันตัวกรองคาลมาน ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อใช้ประมวลข้อมูลจากเซ็นเซอร์หลายประเภทภายใต้สัญญาณรบกวน การวัดตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพก็เช่นกัน การใช้ตัวกรองคาลมานจะทำให้ตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

สำหรับการควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง (model-based control) ในทางปฏิบัติแล้วการหาแบบจำลองของระบบ (system model) ให้มีความถูกต้องแม่นยำนั้นเป็นเรื่องยาก อีกทั้งการวัดค่าตัวแปรสถานะ (state variable) ด้วยอุปกรณ์รับรู้ย่อมมีสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปนอยู่ด้วยเสมอ การศึกษาทฤษฎีการประมาณค่าอย่างเหมาะสม (optimal estimation theory) ของระบบพลวัตคือการประมาณค่าตัวแปรสถานะที่เหมาะสม ภายใต้สมมติฐานที่มีความไม่แน่นอนของแบบจำลองของระบบและความไม่แน่นอนจากการวัด ตัวกรองคาลมานเป็นตัวประมาณค่า (estimator) ซึ่งพัฒนาจากวิธีการกำลังสองน้อยสุดโดยการลดค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสองให้มีค่าน้อยสุด ทำให้ตัวกรองคาลมานเป็นตัวประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของสถิติต่อไปจะกล่าวถึงตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete Kalman filter)

พิจารณาระบบพลวัตในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะแสดงด้วยระบบสมการผลต่างสืบเนื่อง

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.11)$$

เมทริกซ์ \mathbf{A} ในสมการผลต่างสืบเนื่อง (2.10) เรียกว่าเมทริกซ์การเปลี่ยนตัวแปรสถานะ (state transition matrix) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะขั้นที่ $k-1$ กับตัวแปรสถานะขั้นที่ k และเมทริกซ์ \mathbf{B} แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมและตัวแปรสถานะของระบบเมื่อปราศจากสัญญาณรบกวน

เมทริกซ์ \mathbf{H} แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะของระบบกับตัวแปรการวัดที่สามารถวัดได้ เมทริกซ์ \mathbf{A} และ \mathbf{H} อาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาหรืออาจจะกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาได้

เวกเตอร์ \mathbf{w}_k และ \mathbf{v}_k คือสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของแบบจำลอง และสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการวัด ตามลำดับ ซึ่งมีเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance matrix) เป็น \mathbf{Q}_k และ \mathbf{R}_k ตามลำดับ โดยที่

$$\mathbf{Q}_k = E\{\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T\} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{R}_k = E\{\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T\} \quad (2.13)$$

ซึ่งอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรืออาจจะกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาได้เช่นกัน โดยที่ $E\{\}$ แทนการคำนวณหาค่าคาดหวัง (expected value)

ต่อไปจะขออนุญาต ค่าผิดพลาดการประมาณก่อน (priori estimate error)

$$\mathbf{e}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^- \quad (2.14)$$

และค่าผิดพลาดการประมาณหลัง (posteriori estimate error)

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k \quad (2.15)$$

ทำให้สามารถเขียนเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของค่าผิดพลาดการประมาณก่อน (priori estimate error covariance)

$$\mathbf{P}_k^- = E\{\mathbf{e}_k^- \mathbf{e}_k^{-T}\} \quad (2.16)$$

และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของค่าผิดพลาดการประมาณหลัง (posteriori estimate error covariance)

$$\mathbf{P}_k = E\{\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T\} \quad (2.17)$$

ในการพิสูจน์สมการของตัวกรองคาลมาน เริ่มจากการหาสมการที่คำนวณค่าตัวแปรสถานะหลัง $\hat{\mathbf{x}}_k$ จากผลรวมเชิงเส้นระหว่างตัวแปรสถานะก่อน $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ กับผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้ \mathbf{z}_k กับค่าวัดจากการทำนายล่วงหน้า $\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$ ดังแสดงในสมการ (2.18)

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (2.18)$$

เมทริกซ์ \mathbf{K}_k ถูกเรียกว่า อัตราขยายคาลมาน (Kalman gain) ซึ่งถูกเลือกเป็นค่าที่ทำให้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของค่าผิดพลาดการประมาณหลัง ตามสมการ (2.17) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งมีคำตอบรูปแบบหนึ่งคือ

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ &= \frac{\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T}{\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ขั้นตอนการคำนวณเพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะที่เหมาะสม จะเริ่มจากค่าเริ่มต้นของ \mathbf{x}_{k-1} และ \mathbf{P}_{k-1} และในแต่ละรอบการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่

1. **ช่วงทำนาย** จะทำนายค่าตัวแปรสถานะล่วงหน้าจากค่าตัวแปรสถานะปัจจุบัน ชุดของสมการประกอบด้วย

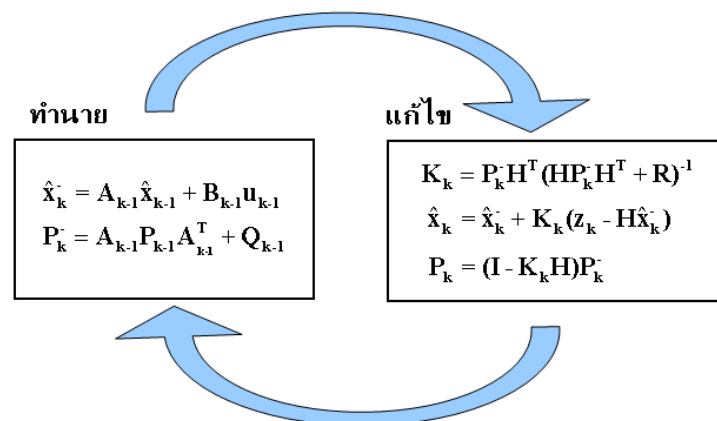
$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}_{k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1}\mathbf{u}_{k-1} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (2.21)$$

2. **ช่วงแก้ไข** จะทำหน้าที่คำนวณค่าตัวแปรสถานะที่เหมาะสม โดยป้อนกลับค่าที่วัดได้ใหม่ ร่วมกับค่าตัวแปรสถานะล่วงหน้าที่คำนวณได้จากช่วงทำนาย ชุดของสมการประกอบด้วยการคำนวณอัตราขยายคาลมานตามสมการที่ (2.17) และ

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (2.22)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_k^- \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการคำนวณตัวกรองของคาลมาน

เนื่องจากโครงสร้างกิมเบลควรทำการติดตามอนุภาคในภาพ 2 มิติ ได้โดยไม่ต้องทราบการเคลื่อนที่ของอนุภาคล่วงหน้า ทำให้ไม่สามารถหาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ปรากฏบนภาพได้อย่างแม่นยำ แต่เพื่อความง่ายในการคำนวณ ผู้วิจัยจะขอตั้งข้อสันนิษฐานว่าอัตราการติดตามมีค่ามากเพียงพอเมื่อเทียบกับอัตราเร็วของวัตถุที่ไม่มากนัก จึงสามารถจะ สมมติได้ว่าอนุภาคมีอัตราเร็วคงที่ในช่วงเวลาแคบๆ ระหว่างการสุ่ม 2 ครั้ง ทำให้ได้แบบจำลองแบบตัวแปรสถานะอันดับ 4 ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \dot{x}_{k+1} \\ \dot{y}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \end{bmatrix} + \mathbf{w}_{k-1}$$

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k$$

โดยที่ x_k และ y_k คือตำแหน่งของจุดภาพของอนุภาคที่ปรากฏบนภาพตามแนวแกนนอนและแกนตั้ง ตามลำดับ

\dot{x}_k และ \dot{y}_k คืออัตราเร็วของจุดภาพของอนุภาคที่ปรากฏบนภาพตามแนวแกนนอนและแกนตั้ง ตามลำดับ

และ \mathbf{z}_k คือจุดภาพที่ได้หลังจากการกรอง จุดนี้จะถือว่าเป็นตำแหน่งของอนุภาคบนภาพ

บทที่ 3

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างอุปกรณ์การภาพ

การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์การภาพ สามารถแยกวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน (ส่วนฐาน) ซึ่งประกอบด้วยกลไก และสปริง โดยโครงสร้างนี้ทำหน้าที่ รับการสั่นสะเทือนที่รุนแรงหรือการกระแทก จะทำให้การสั่นสะเทือนที่มารบกวนนี้ลดความแรงลง แล้วปรับให้เหลือการสั่นอยู่ในแนวขึ้น-ลง เพียงอย่างเดียว และส่วนโครงสร้าง กิมเบลซึ่งทำหน้าที่ บังคับการเคลื่อนที่ของกล้อง และลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง

3.1 สมการของลากรางจ์ (Lagrange Equations)

สมการของลากรางจ์นั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของระบบ ทางกล การอธิบายการเคลื่อนที่โดยใช้วิธีนี้จะอธิบายในรูปของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ดังนั้นในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการของลากรางจ์นี้จะต้องหาพลังงานจลน์และ พลังงานศักย์ของระบบทางกลนี้ก่อน และจะสามารถหาลากรางจ์เจียน (Lagrangian) จากสมการ

$$L = K - V \quad (3.1)$$

เมื่อ K และ V คือพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบตามลำดับ และเมื่อได้พลังงานทั้งสองแล้วก็จะสามารถคำนวณหาผลศาสตร์ของระบบทางกลนี้ได้จากสมการของลากรางจ์คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

เมื่อ λ_i คือ พิกัดทั่วไป (generalized coordinate)

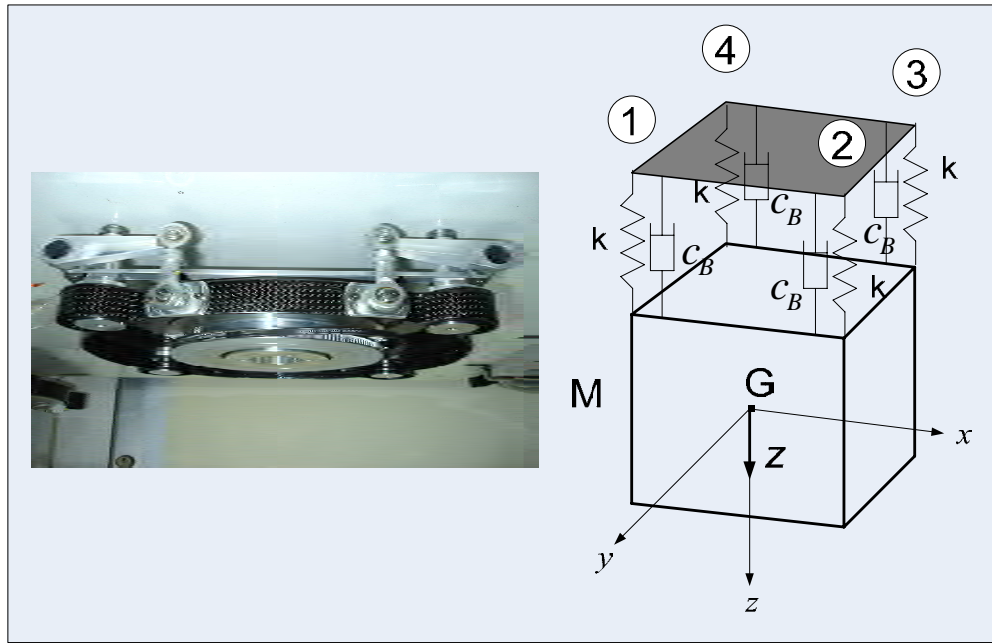
ในการคำนวณเกี่ยวกับแขนกลนั้น พิกัดทั่วไปก็คือ joint variable (q) นั้นเองและ generalize force นั้นก็คือแรง หรือทอร์กที่เกิดจากตัวขับแต่ละตัว

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_i} &= Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} &= Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ F คือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากตัวหน่วง

Q_i คือ แรง หรือทอร์คจากภายนอก ที่กระทำสอดคล้องกับพิกัดทั่วไป q_i

3.2 โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.1 แบบจำลองโครงสร้างลดการสั่นสะเทือน

กำหนดให้ ส่วนของโครงสร้างอุปกรณ์การภาพที่เป็นโครงสร้างกิมเบลมีมวล M กิโลกรัม ซึ่งติดเข้ากับโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนที่มีสปริง 4 อันรองรับ และชุดโครงสร้างที่ช่วยลดการสั่นสะเทือน (ตัวหน่วง) 4 ชุด สมมติว่า มวล M เคลื่อนที่ตามแนวแกน z เป็นระยะทาง z ใดๆ

จากรูปที่ 3.1 พิกัดวางนัยทั่วไปของมวล M คือ z พลังงานจลน์ของระบบเป็น

$$K = \frac{1}{2} M \dot{z}^2$$

พลังงานศักย์ของระบบเป็น

$$V = \frac{1}{2} k z^2 + \frac{1}{2} k z^2 + \frac{1}{2} k z^2 + \frac{1}{2} k z^2 = 2kz^2$$

พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากตัวหน่วงเป็น

$$F = \frac{1}{2} c_B \dot{z}^2 + \frac{1}{2} c_B \dot{z}^2 + \frac{1}{2} c_B \dot{z}^2 + \frac{1}{2} c_B \dot{z}^2 = 2c_B \dot{z}^2$$

แทน T, V และ F ในสมการที่ (3.3) จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} = M\dot{z}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = M\ddot{z}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{z}} = 4c_B \dot{z}, \quad \frac{\partial V}{\partial z} = 4kz$$

ที่พิกัด z

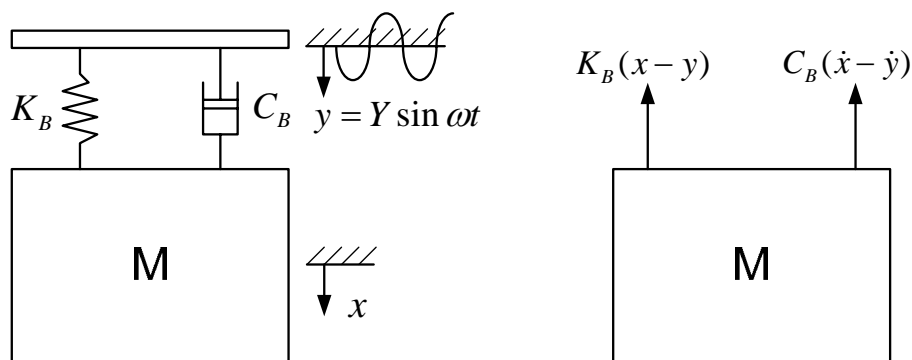
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) + \frac{\partial F}{\partial \dot{z}} + \frac{\partial V}{\partial z} = 0$$

$$M\ddot{z} + 4c_B \dot{z} + 4kz = 0$$

$$M\ddot{z} + C_B \dot{z} + K_B z = 0, \quad C_B = 4c_B, K_B = 4k \quad (3.4)$$

3.3 การส่งถ่ายแรงไปยังส่วนโครงสร้างกิมเบล

การที่ระบบถูกกระทำด้วยแรงภายนอกที่เป็นฟังก์ชันของเวลา อาจอยู่ในรูปของฟังก์ชันแบบฮาร์มอนิก ไม่ฮาร์มอนิก หรือแบบสุ่มก็ได้ การที่ระบบถูกกระทำจากแรงภายนอกจึงทำให้ระบบมีการตอบสนองออกมา การตอบสนองของระบบที่มีผลมาจากแรงภายนอกนี้ก็คือการสั่นสะเทือนนั่นเอง เนื่องจากโครงสร้างกิมเบลติดอยู่บนโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนซึ่งติดตั้งบนโครงสร้างอากาศยาน ขณะอากาศยานกำลังติดเครื่องยนต์หรือบินอยู่ อากาศยานจะมีการสั่นสะเทือนด้วยความถี่หลายค่า ซึ่งเป็นความถี่เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับอากาศยานลำนั้นๆ ความถี่นี้จะส่งผลมายังโครงสร้างกิมเบล ดังนั้นเพื่อให้แรงจากภายนอกที่ส่งผ่านโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนไปยังโครงสร้างกิมเบลมีค่าน้อยจึงต้องเลือกใช้สปริงและตัวหน่วงของโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนให้เหมาะสม



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของระบบภายใต้การสั่นสะเทือนที่ส่วนฐาน

ระบบที่มีการติดตั้งกับพื้นที่มีการเคลื่อนไหวได้ ผลของการเคลื่อนไหวของพื้นจะทำให้ระบบเกิดการสั่นสะเทือน ปกติการเคลื่อนที่ของพื้นจะอยู่ในลักษณะฟังก์ชันแบบฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนซึ่งประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง ส่วนโครงสร้างกิมเบลแทนด้วยมวล M ถูกติดตั้งไว้บนโครงสร้างอากาศยานที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกโดยให้ค่า $y = Y \sin \omega t$ ถ้ามวล M เคลื่อนที่เทียบกับจุดหยุดนิ่งเป็น x สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่เป็น

$$M\ddot{x} = -K_B(x - y) - C_B(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3.5)$$

ถ้า z เป็นผลต่างระหว่าง x และ y เป็น

$$z = x - y$$

สมการที่ (3.5) ได้

$$M\ddot{z} + C_B\dot{z} + K_B z = -M\ddot{y} \quad (3.6)$$

แทน $y = Y \sin \omega t$ ในสมการที่ (3.6) จะได้สมการการเคลื่อนที่เป็น

$$\begin{aligned} M\ddot{z} + C_B\dot{z} + K_B z &= M\omega^2 Y \sin \omega t \\ \ddot{z} + 2\zeta\omega_n\dot{z} + \omega_n^2 z &= Y\omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (3.7)$$

ในที่นี้ $Y\omega^2 \sin \omega t$ เปรียบเสมือนกับแรงภายนอกที่กระทำกับระบบ และ z เป็นการกระจัดสัมพัทธ์ของมวล M กับพื้น การตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัวจะได้

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \phi) \quad (3.8)$$

แอมพลิจูดของการตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัว Z จะได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} Z &= \frac{MY\omega^2}{\sqrt{(K_B - M\omega^2)^2 + (C_B\omega)^2}} \\ &= \frac{MY\omega^2}{M\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\tan \phi = \frac{C_B\omega}{K_B - M\omega^2} = \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

ค่าการกระจัดสัมพัทธ์ x ของมวล M กับพื้นสามารถหาได้จาก $x = z + y$

$$y = Ye^{j\omega t}$$

$$z = Ze^{i(\omega t - \phi)} = (Ze^{-i\phi})e^{i\omega t} \quad (3.8)$$

$$x = Xe^{i(\omega t - \psi)} = (Xe^{-i\psi})e^{i\omega t}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$Ze^{-i\phi} = \frac{MY\omega^2}{K_B - M\omega^2 + i\omega C_B}$$

และ

$$\begin{aligned} x &= (Ze^{-i\phi} + Y)e^{i\omega t} \\ &= \left(\frac{K_B + i\omega C_B}{K_B - M\omega^2 + i\omega C_B} \right) Ye^{i\omega t} \end{aligned} \quad (3.9)$$

อัตราส่วนของแอมพลิจูดของการตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัว และมุมเฟสสามารถหาได้จาก

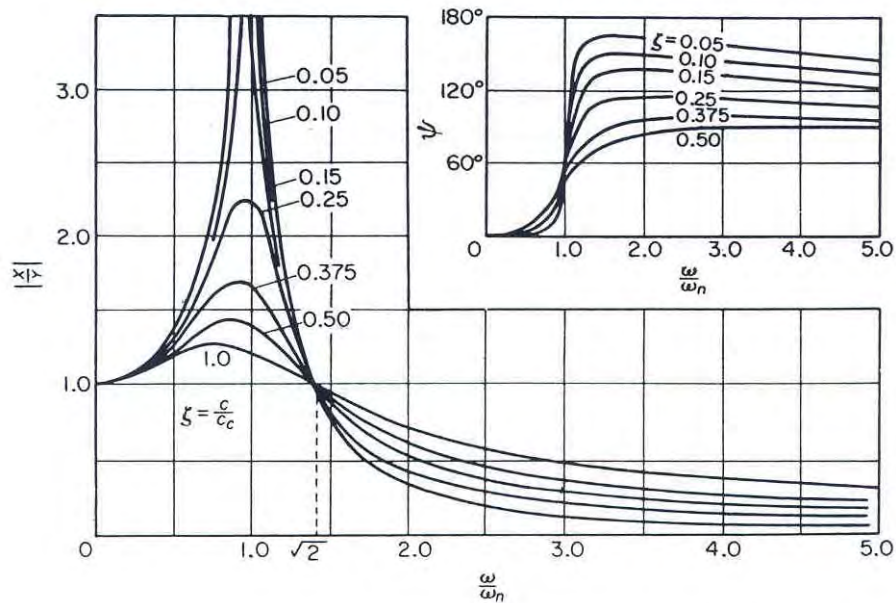
$$\begin{aligned} \left| \frac{X}{Y} \right| &= \sqrt{\frac{K_B^2 + (\omega C_B)^2}{(K_B - M\omega^2)^2 + (\omega C_B)^2}} \\ &= \sqrt{\frac{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

และ

$$\tan \psi = \frac{MC_B\omega^3}{K_B(K_B - M\omega^2) + (\omega C_B)^2} \quad (3.11)$$

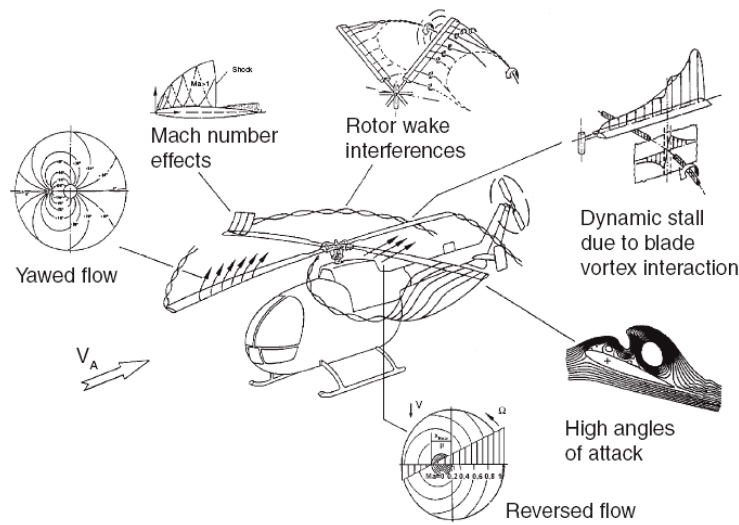
จากสมการที่ (3.10) และ (3.11) สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแอมพลิจูดและมุมเฟส กับอัตราส่วนของความถี่ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าของตัวหน่วงได้ ดังรูปที่ 3.3

จากกราฟ มีข้อสังเกตคือ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของการตอบสนองแบบสถานะ อยู่ตัวในทุกค่าของตัวหน่วงจะมีค่าเท่ากับ 1 ที่อัตราส่วนของความถี่ $\omega/\omega_n = \sqrt{2}$ และถ้าต้องการ ให้แรงจากโครงสร้างอากาศยานที่ส่งผ่านไปยังโครงสร้างกิมเบลมีค่าน้อยๆ เราต้องเลือกค่า อัตราส่วนของความถี่ ω/ω_n ที่มีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$



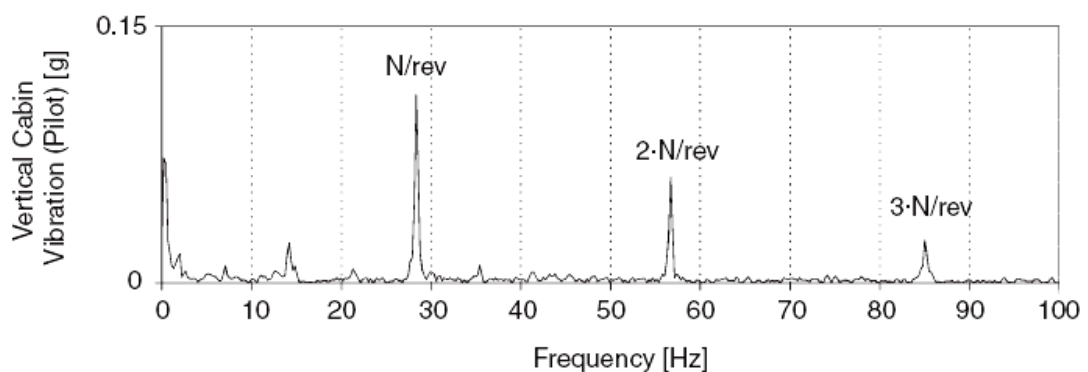
รูปที่ 3.3 กราฟของสมการที่ (3.29) และ (3.30) ที่มีการเปลี่ยนค่าของตัวหน่วง

ในการวิเคราะห์ผลจากการสั่นสะเทือนจากอากาศยาน เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง เฮลิคอปเตอร์กับเครื่องบินแบบมีปีกแล้ว พบว่าเฮลิคอปเตอร์มีความคล่องตัวมากกว่าและเหมาะ สำหรับใช้ในเมืองเนื่องจากสามารถบินขึ้นลงในแนวดิ่งได้ แต่มีการไหลของอากาศที่ซับซ้อนและมีการ สั่นสะเทือนที่มากกว่าจึงขอใช้เฮลิคอปเตอร์เป็นตัวอย่าง เฮลิคอปเตอร์เป็นอากาศยานไม่มีปีก มี ใบพัดขนาดใหญ่ติดตั้งเหนือลำตัว อีกใบพัดหมุนรอบตัวในแนวนอน ทำหน้าที่ช่วยพยุงตัวและ บังคับให้บินไปตามทิศทางที่ต้องการได้ ใช้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนและบินขึ้นลงในแนวดิ่งได้ โดยการ สั่นสะเทือนหลักๆ เกิดจากการหมุนของใบพัด



รูปที่ 3.4 ผลกระทบจากการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นที่ใบพัด

ในสภาพการบินตรงระดับ (steady flight) ใบพัดจะหมุนและมีแรงกระทำเกิดขึ้นเป็นค่าๆหนึ่ง ถ้าไม่มีการหมุนแบบไม่สมมูล แรงจากใบพัดทุกใบจะถูกหักล้างให้หมดไปตรงที่ยึดใบ (hub) ยกเว้นแรงที่ความถี่การสั่นพ้องที่มีหน่วยครั้งต่อรอบ (pN/rev) โดย p คือตัวคูณจำนวนเต็ม N คือจำนวนใบพัด และ 1/rev คือความถี่ของแกนหมุนต่อรอบ ยกตัวอย่าง เฮลิคอปเตอร์แบบ 4 ใบพัด รุ่น BO 105 มีความถี่ของแกนหมุนต่อรอบคือ 7.066 Hz ดังนั้นความถี่การสั่นพ้องแรกที่จะส่งจากใบพัดมายังตัวเครื่องคือ $1 \times 4 \times 7.066 = 28.264$ Hz ซึ่งเป็นความถี่สำคัญที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์การภาพ จากรูปที่ 3.5 แสดงค่าสเปกตรัมของขนาดการสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์



รูปที่ 3.5 สเปกตรัมของขนาดการสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ รุ่น BO 105

เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างลดการสั่นสะเทือน เนื่องจากสปริงที่ใช้เป็นสปริงที่ทำจากเหล็กเส้นนำมาขดไม่ทราบค่านิจสปริง จึงได้ทำการทดลองหาค่านิจสปริงโดยใช้ตุ้มน้ำหนักกดที่สปริงและวัดระยะหดตัว และแทนค่าในสูตร $k = F/x$ ได้ค่านิจสปริง $K_B = 7.55$ KN/m

และได้คำนวณค่านิจสปริงจากสูตรแรงที่กระทำต่อระยะหดของสปริง

$$k = \frac{P}{f} = \frac{Gd^4}{8D^3N_a} \quad (3.12)$$

เมื่อ G คือค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (shear modulus)

d คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริง

D คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริง

N_a คือจำนวนขดสปริงที่ทำงาน (number of active coils)

ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำสปริงคือเหล็กที่มีค่าโมดูลัสของแรงเฉือนเท่ากับ 79.3 GPa ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริง 2.4 เซนติเมตร โดยมีขดสปริงที่ทำงาน 1.5 ขด

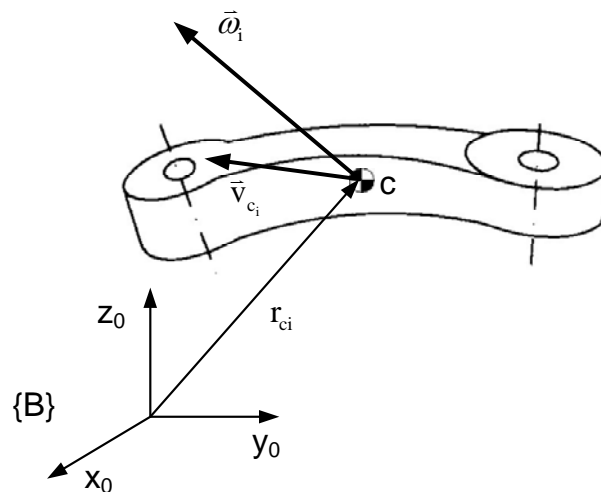
$$K_B = \frac{79.3 \times 10^9 \times (2 \times 10^{-3})^4}{8 \times (2.4 \times 10^{-2})^3 \times 1.5} = 7.65 \text{ KN/m}$$

ซึ่งค่านิจสปริงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จึงใช้ค่า $K_B = 7.55 \text{ KN/m}$ ซึ่งเป็นค่าจากการทดลอง ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ $\omega_n = \sqrt{K_B/M} = 22.98 \text{ Hz}$ ในการพบว่ามวล $M = 14.3 \text{ Kg}$ แลเมื่อทดลองนำมาใช้กับเฮลิคอปเตอร์ รุ่น BO 105 จะได้ค่า $\omega/\omega_n = 1.22$ ซึ่งมีค่าน้อยไป อาจต้องมีการปรับเปลี่ยนสปริงให้เหมาะสม โดยเลือกค่าแอมพลิจูดของการตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัวให้ต่ำกว่าค่าการสั่นสะเทือนของเฮลิคอปเตอร์ 20% หรือ $|X/Y| = 0.8$ จึงเลือกค่า $\omega/\omega_n = 1.5$ ดังนั้นค่า K_B ที่ควรประมาณ 5 KN/m

3.4 ส่วนโครงสร้างกิมเบล

3.4.1 การคำนวณพลังงานจลน์

ในการคำนวณหาพลังงานจลน์ของวัตถุเก็ริงนั้น เราจะสมมติว่าได้ติดตั้งระบบพิกัดฉากโดยให้จุดเริ่มต้น (origin) อยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุเก็ริงนั้น และวัตถุแก็งเก็ริงนี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงเส้น v และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของก้านต่อโยงใน 3 มิติ

และจะสามารถคำนวณหาพลังงานจลน์ได้จากสมการ

$$K = \frac{1}{2} \int_B v^T(x, y, z) v(x, y, z) dm \quad (3.12)$$

เมื่อความเร็วของตำแหน่งใดๆ บนวัตถุแข็งเกร็งเท่ากับ

$$v = v_C + \omega \times r \quad (3.13)$$

เมื่อ v_C แทนความเร็วของจุดศูนย์กลางมวล และเมื่อกำหนดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของก้านต่อโยงให้เท่ากับ

$$I = \begin{bmatrix} \int y^2 + z^2 dm & -\int xy dm & -\int xz dm \\ -\int xy dm & \int x^2 + z^2 dm & -\int yz dm \\ -\int xz dm & -\int yz dm & \int x^2 + y^2 dm \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่าพลังงานจลน์ของแขนกลแต่ละก้านต่อโยงนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k_i = \frac{1}{2} m_i v_{C_i}^T v_{C_i} + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i \quad (3.15)$$

เมื่อเทอมแรกนั้นคือพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัวด้วยความเร็วที่จุดศูนย์กลางมวลเท่ากับ v และเทอมที่สองนั้นคือพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยความเร็วเชิงมุม ω และพลังงานจลน์รวมทั้งหมดของแขนกลจะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์ของแต่ละก้านต่อโยงนั้นคือ

$$K = \sum_{i=1}^n k_i \quad (3.16)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของตัวขับแต่ละตัวกับความเร็วที่ปลายแขนกลนั้นอธิบายได้ด้วยสมการ

$$v_i = J_{v_i}(q)\dot{q} \quad (3.17a)$$

$$\omega_i = R_i^T(q)J_{\omega_i}(q)\dot{q} \quad (3.17b)$$

ดังนั้นเราสามารถหาสมการพลังงานจลน์ของแขนกลที่มีก้านต่อโยงหลายๆ อันที่อยู่ในเทอมของจาโคเบียนและ generalized coordinate จะมีรูปแบบดังนี้

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{\omega_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{\omega_i}(q)] \dot{q} \quad (3.18)$$

และรูปแบบของสมการพลังงานจลน์ของแขนกลเขียนอยู่ในรูปของ quadratic form นั้นมีรูปแบบคือ

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.19)$$

หรือ

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (3.20)$$

เมื่อ $D(q)$ คือ inertia matrix และเป็น symmetric positive definite matrix

3.4.2 การคำนวณพลังงานศักย์

พลังงานศักย์ของแขนกลที่มีก้านต่อโยงหลายอันนั้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานศักย์ของก้านต่อโยงแต่ละอันซึ่งมีสมการคือ

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.21)$$

เมื่อ V_i คือพลังงานศักย์ของก้านต่อโยงที่ i และถ้าก้านต่อโยงทั้งหมดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ดังนั้นพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกคือ

$$V_i = \int_{B_i} g^T r_i dm = g^T \int_{B_i} r_i dm = g^T r_{c_i} m_i \quad (3.22)$$

เมื่อ g คือเวกเตอร์ของความแรงเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

3.4.3 การคำนวณสมการของลากรองจ์

เมื่อได้สมการพลังงานจลน์และสมการพลังงานศักย์ของแขนกลแล้ว เราสามารถคำนวณหา Lagrangian ของก้านต่อโยงได้จากสมการ

$$L = K - V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - V(q) \quad (3.23)$$

และจากสมการของลากรองจ์

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_i} - \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = F_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.24)$$

เมื่อแทนค่าในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\sum_j d_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + g_i(q) = \tau_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.25)$$

เมื่อ c_{ijk} คือ สัญลักษณ์คริสตอฟเฟิล (Christoffel symbols) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial d_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{jk}}{\partial q_i} \right) \quad (3.26)$$

และ

$$g_i(q) = \frac{\partial V}{\partial q_i} \quad (3.27)$$

และจากสมการการเคลื่อนที่ของก้านต่อโยง

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau \quad (3.28)$$

โดยที่เมตริกซ์ C จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_k \quad (3.29)$$

สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้นมีสมการอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F_v \dot{q} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) + g(q) = \tau_a \quad (3.30)$$

เมื่อ

d_{ii} คือโมเมนต์ของความเฉื่อยของก้านต่อโยง i

d_{ij} คือความเร่งของก้านต่อโยง i ที่อยู่บนก้านต่อโยง j

$c_{ijj} \dot{q}_j^2$ คือแรงสู่ศูนย์กลางที่กระทำต่อก้านต่อโยง i ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของก้านต่อโยง j

$c_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$ แทนผลจาก coriolis ที่กระทำต่อก้านต่อโยง i ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของก้านต่อ

โยง j และ k

F_v คือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด (viscous friction) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ทแยงมุม
ขนาด $n \times n$

F_s คือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิต (static friction) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ทแยงมุม
ขนาด $n \times n$

$\text{sgn}(\dot{q})$ คือตัวประกอบซึ่งจะนำเอาเฉพาะเครื่องหมายของ \dot{q} มาใช้ในการคำนวณซึ่ง
จะมีค่าเป็น $+$ เมื่อ $\dot{q} > 0$ และจะมีค่าเป็น $-$ เมื่อ $\dot{q} < 0$ เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times 1$

$g(q)$ คือแรงที่เป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วง

τ_a คือแรงบิดที่เกิดจากตัวขับ

และสามารถลดรูปได้ดังนี้

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$\tau = \tau_a - F_v \dot{q} - F_s \text{sgn}(\dot{q}) \quad (3.32)$$

ในการคำนวณหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้างแบบกิมเบลนั้นใน
เบื้องต้นนี้เราจะหาค่า $D(q)$ ก่อนโดยคำนวณจากสมการ

$$\begin{aligned} D(q) &= \sum_{i=1}^n \left[m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{\omega_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{\omega_i}(q) \right] \\ &= \sum_{i=1}^n J_{\omega_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{\omega_i}(q) \end{aligned} \quad (3.33)$$

เมื่อโมเมนต์ของความเฉื่อยของก้านต่อที่ 1 และก้านต่อที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$I_1 = \text{diag} \left[I_{1,11}, I_{1,22}, I_{1,33} \right] \quad (3.34a)$$

$$I_2 = \text{diag} \left[I_{2,11}, I_{2,22}, I_{2,33} \right] \quad (3.34b)$$

เนื่องจากความเร็วเชิงเส้นของก้านต่อโยง i มีค่าเท่ากับศูนย์เพราะโครงสร้างมีแต่
การหมุนดังนั้นจึงทำให้ $J_{v_i} = 0$ จากการคำนวณจะได้ $D(q)$

$$D(q) = \begin{bmatrix} I_{1,22} + I_{2,11} \sin^2 \theta_2 + I_{2,33} \cos^2 \theta_2 & 0 \\ 0 & I_{2,22} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

และสามารถคำนวณหา $C(q, \dot{q})$ ได้เท่ากับ

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \omega_2 (I_{2_{11}} - I_{2_{33}}) \sin(2\theta_2) & \frac{1}{2} \omega_1 (I_{2_{11}} - I_{2_{33}}) \sin(2\theta_2) \\ -\frac{1}{2} \omega_1 (I_{2_{11}} - I_{2_{33}}) \sin(2\theta_2) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

ในการตรวจสอบว่าการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ นั้นถูกต้องหรือไม่นั้นเรามีหลักเกณฑ์คือค่า $N(q, \dot{q}) = \dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ จะต้องเป็น skew-symmetry matrix และเมื่อลองแทนค่าจะได้ว่า

$$N(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_1 (I_{2_{11}} - I_{2_{33}}) \sin 2\theta_2 \\ \omega_1 (I_{2_{11}} - I_{2_{33}}) \sin 2\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

เป็น skew-symmetry matrix ซึ่งจะหมายความว่าค่า $D(q)$ และ $C(q, \dot{q})$ ที่คำนวณได้นั้น ถูกต้อง และจากการออกแบบโครงสร้างกิมเบลจากคอมพิวเตอร์จะสามารถหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยได้เท่ากับ

$$\mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} 0.065 & 0 & 0 \\ 0 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0 & 0.07 \end{bmatrix} \text{ kg.m}^2 \quad \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} 0.018 & 0 & 0 \\ 0 & 0.024 & 0 \\ 0 & 0 & 0.025 \end{bmatrix} \text{ kg.m}^2 \quad (3.38)$$

โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้างแบบกิมเบลที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

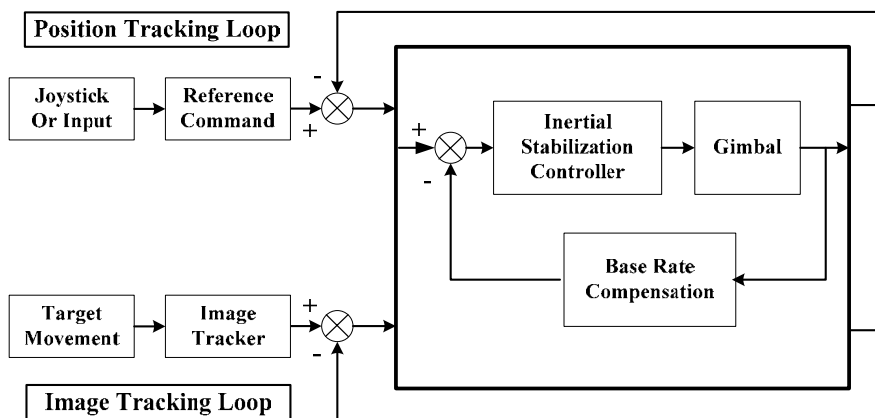
บทที่ 4

ระบบติดตามวัตถุด้วยภาพ

การพัฒนา ระบบติดตามวัตถุด้วยภาพของอุปกรณ์การภาพโดยใช้ภาพวิดีโอสี จากกล้องวิดีโอ ซึ่งการควบคุมระบบกล้องแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ และส่วนการติดตามวัตถุด้วยภาพซึ่งเป็นการค้นหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพวิดีโอในแต่ละเฟรม โดยทฤษฎีที่ใช้ในการติดตามวัตถุด้วยภาพคือ วิธีการแคมชิฟ (Camshift algorithm) ซึ่งวิธีนี้เป็นการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของตำแหน่งวัตถุจากภาพสีฮิสโตแกรม และมีจุดเด่นคือสามารถติดตามตำแหน่งวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ปรากฏบนภาพได้ โดยข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งวัตถุในภาพ และแปลงเป็นชุดคำสั่งสำหรับควบคุมส่งไปยังส่วนควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพให้ติดตามวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ได้ ทั้งยังควบคุมตำแหน่งวัตถุเป้าหมายในภาพให้อยู่บริเวณกลางภาพ

4.1 บทนำเกี่ยวกับการติดตามวัตถุด้วยภาพ

อากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี เป็นอากาศยานที่ถูกบังคับการบินด้วยสัญญาณวิทยุจากฐานปฏิบัติการภาคพื้นดิน โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นในการปฏิบัติการกิจ เช่นระบบกล้อง อุปกรณ์สื่อสาร อุปกรณ์ตรวจจู้ต่างๆ เป็นต้น โดยภารกิจหลักคือการลาดตระเวนสำรวจ และการถ่ายภาพทางอากาศ โดยอุปกรณ์การภาพหรือระบบกล้องจะสามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ได้



รูปที่ 4.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบกล้องกิมเบล

จากรูปที่ 4.1 การควบคุมระบบกล้องกิมเบลประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่และรักษาเสถียรภาพของอุปกรณ์การภาพ โดยรับสัญญาณคำสั่งจากจอยสติค หรือเครื่องบังคับการเคลื่อนที่ ส่วนที่สองคือส่วนการประมวลผลภาพและการติดตามวัตถุเป้าหมายด้วยภาพซึ่งเป็นการค้นหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพวิดีโอ เมื่อผู้บังคับระบบกล้องได้ระบุวัตถุเป้าหมายในภาพแล้ว

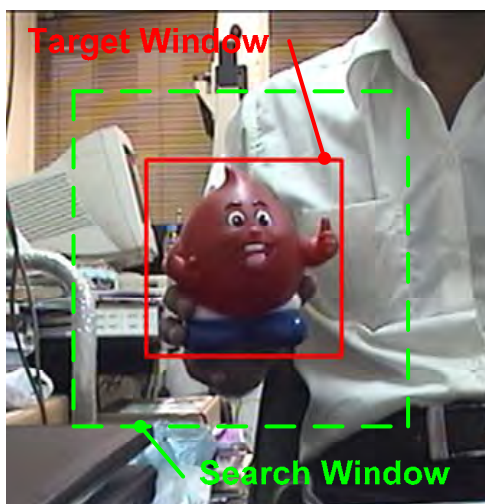
ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตามวัตถุก่อนหน้านี้ โดยมากเป็นเทคนิคที่กล้องอยู่กับที่หรือภาพพื้นหลัง (background) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปัจจุบันการติดตามวัตถุในขณะที่กล้องเคลื่อนที่ไปด้วยก็เริ่มมีผู้ให้ความสนใจ เช่น โคเฮน เบลและคณะ ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการติดตามวัตถุด้วยภาพโดยระบบกล้องติดกับอากาศยาน สำหรับวิธีการแคมชิฟ ซึ่งเป็นเทคนิคอนุพาราเมตริก (nonparametric technique) ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ถูกใช้ครั้งแรกในงานด้านประมวลผลภาพโดยเบลดสกี เพื่อใช้ติดตามความเคลื่อนไหวสีระจะจะใช้เฉพาะค่าของสี (hue) ในแบบจำลองสีแบบ HSV เท่านั้น ซึ่งถ้าต้องการให้การติดตามมีประสิทธิภาพสูงขึ้นจำเป็นต้องใช้สร้างภาพฮิสโตแกรมแบบหลายมิติ ในงานวิจัยของจอห์นและคณะ ได้ใช้วิธีการแคมชิฟที่ใช้ภาพสีฮิสโตแกรมแบบ 3 มิติ ในการหาตำแหน่งวัตถุเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากข้อมูลในการประมวลผลมากทำให้มีปัญหาในการติดตามวัตถุเป้าหมายแบบเวลาจริง (real-time) ในงานวิจัยของเซ็ง และเบรดสกี ใช้วิธีการแคมชิฟแบบการฉายกลับของฮิสโตแกรม (histogram back-projection) ในการหาความน่าจะเป็นสูงสุดในการติดตามวัตถุเป้าหมาย เนื่องจากประสิทธิภาพและความเร็วของวิธีการแคมชิฟทางบริษัทอินเทลคอร์เปอเรชัน ได้ออกผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์โอเพนซีวี (OpenCV) ซึ่งเป็นประเภทเปิดเผยรหัส (open source) เพื่อเป็นซอฟต์แวร์พื้นฐานเกี่ยวกับการประมวลผลภาพและงานเกี่ยวกับทางด้านระบบการมองเห็น ก็มีโมดูลที่ใช้วิธีการแคมชิฟที่ใช้ภาพสีฮิสโตแกรมแบบ 1 มิติ ในการหาตำแหน่งวัตถุเป้าหมายด้วย

4.2 วิธีการแคมชิฟ

เนื่องจากวิธีการแคมชิฟเป็นการติดตามวัตถุด้วยภาพโดยใช้องค์ประกอบของสี (combination of colors) จึงสามารถติดตามวัตถุเป้าหมายที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง มีการหมุน การถูกบดบังบางส่วน และการที่ระบบกล้องมีการเคลื่อนที่ไปด้วยขณะประมวลผลได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการแคมชิฟที่ใช้ภาพสีฮิสโตแกรมแบบ 2 มิติ ในการติดตามแบบเวลาจริงกับวัตถุเป้าหมายที่มีรูปร่างไม่คงที่ (non-rigid object) และฐานที่ระบบกล้องติดตั้งอยู่มีการเคลื่อนที่ โดยขั้นตอนการทำงานของวิธีการแคมชิฟมีขั้นตอนดังนี้

4.2.1. เลือกเป้าหมายและสร้างภาพฮีสโตแกรมของวัตถุเป้าหมาย

หลังจากระบุวัตถุเป้าหมายโดยใช้เมาส์เลือกแล้ว โปรแกรมจะแสดงกรอบหน้าต่างระบุเป้าหมาย (target window) เพื่อให้ทราบตำแหน่งเป้าหมายบนภาพ ส่วนหน้าต่างติดตามวัตถุ (search window) เป็นหน้าต่างที่ไม่ได้แสดงให้เห็น แต่เป็นขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ ทำให้ลดเวลาในการคำนวณลงไม่ต้องนำข้อมูลภาพทั้งภาพมาคำนวณ ซึ่งปกติจะมีขนาดใหญ่กว่าหน้าต่างระบุเป้าหมาย 2 เท่า ดังรูปที่ 4.2 วิธีการแค้มชิฟจะแทนวัตถุเป้าหมายที่ต้องการติดตามด้วยภาพฮีสโตแกรมของสี (ภาพการกระจายของสี) เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นจะใช้อธิบายพร้อมยกตัวอย่างประกอบโดยใช้ฮีสโตแกรมแบบ 1 มิติ จากรูปที่ 4.3 แสดงรูปฮีสโตแกรมของวัตถุภายในหน้าต่างระบุเป้าหมาย โดยความสูงของแต่ละแท่งสีจะบอกถึงจำนวนพิกเซลบนภาพที่แสดงค่าสีในช่วงต่างๆ

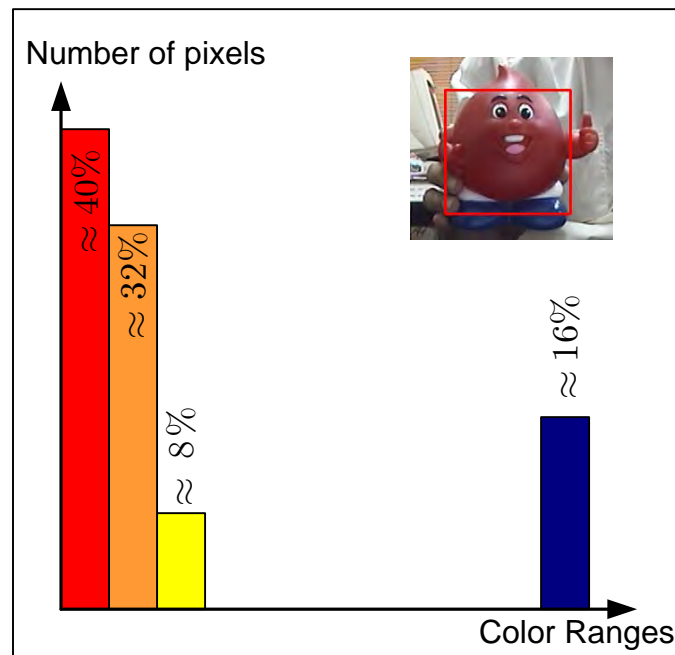


รูปที่ 4.2 กรอบหน้าต่างระบุเป้าหมายและหน้าต่างติดตามวัตถุ

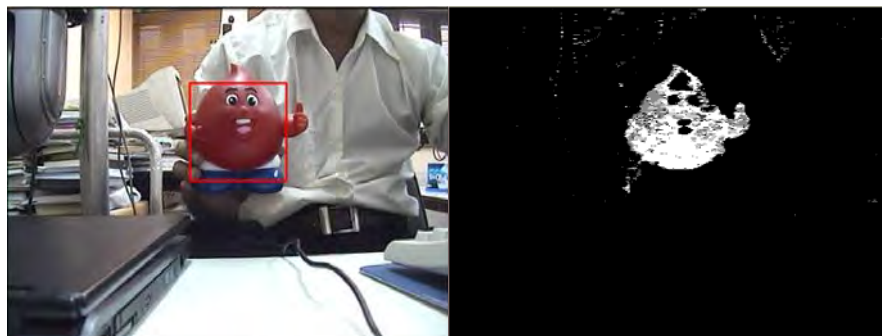
4.2.2. หาความน่าจะเป็นที่แต่ละพิกเซลบนภาพจะเป็นวัตถุเป้าหมาย

ภาพฮีสโตแกรมจะสร้างขึ้นในครั้งแรกเพียงครั้งเดียวตอนที่ผู้ใช้งานระบุเป้าหมาย โดยจะนำภาพวัตถุในหน้าต่างเลือกเป้าหมายมาหาฮีสโตแกรมของสี หลังจากนั้น ในแต่ละเฟรมถัดมาจะทำการหาความน่าจะเป็นของความเป็นวัตถุเป้าหมายของแต่ละพิกเซล จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพฮีสโตแกรมของวัตถุเป้าหมายในหน้าต่างระบุเป้าหมาย พบว่าแท่งจำนวนพิกเซลสีแดงมีค่าสูงสุดคิดเป็น 40 % ของจำนวนพิกเซลทั้งหมดในพื้นที่หน้าต่างระบุเป้าหมาย ซึ่งหมายความว่าพิกเซลที่มีค่าสีที่ตกในช่วงนี้จะมีความน่าจะเป็นวัตถุเป้าหมาย 40% ในทำนองเดียวกันในแท่งสีที่มีความสูงต่ำลงมา จะมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นวัตถุเป้าหมาย 32% ซึ่งในเฟรมถัดมา จะทำการหาเฉพาะค่าสีในแต่ละพิกเซลเท่านั้น แล้วจึงนำค่าสีที่ได้ในแต่ละพิกเซลมาเทียบกับค่าฮีสโตแกรม

ของวัตถุเป้าหมาย เพื่อหาความน่าจะเป็นที่จะเป็นวัตถุเป้าหมาย ขั้นตอนนี้เรียกว่า การฉายกลับของฮิสโตแกรม จากรูปที่ 4.4 ด้านซ้ายมือเป็นภาพแสดงการติดตามวัตถุ ด้านขวาเป็นภาพฉายกลับของฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายในภาพวิดีโอ โดยพิกเซลที่แสดงด้วยสีเขียวมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายสูงสุด พิกเซลสีดำมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายต่ำสุด และพิกเซลสีเทามีความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายระดับกลางๆ



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างแบบง่ายๆ ของฮิสโตแกรมของสีของภาพตุ๊กตา



รูปที่ 4.4 ภาพสี และภาพฉายกลับของฮิสโตแกรม

การทำการฉายกลับ (Back-Projection) หรือการแยกวัตถุเป้าหมายออกจากภาพพื้นหลัง เป็นขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างค่าพิกเซลในภาพกับค่าที่คำนวณในฮิสโตแกรมของสี ซึ่งการทำการฉายกลับของฮิสโตแกรมของสีเพื่อหาวัตถุเป้าหมายในเฟรมถัดๆมา จะสร้างรูปความน่าจะเป็นที่หาว่าคุณสมบัติในพิกเซลมีความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายมากน้อยเพียงใด

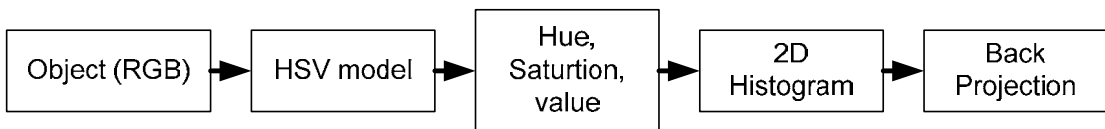
ขั้นตอนแรกภาพจะถูกแปลงให้อยู่ในแบบจำลองสีเอชเอสวี ขั้นที่ 2 จะทำการสร้างฮิสโทแกรมสีของวัตถุเป้าหมาย ให้ m เป็นจำนวนช่วงการจัดกลุ่ม (bin) ในฮิสโทแกรม $\{x_i\}_{i=1...m}$ เป็นตำแหน่งของพิกเซลบนภาพที่มีจำนวนพิกเซล n พิกเซล กำหนดให้ฟังก์ชัน $c: \mathbb{R}^2 \rightarrow \{1...m\}$ เป็นฟังก์ชันของค่าสีในช่วงการจัดกลุ่มที่ตำแหน่งพิกเซลที่ x_i^* โดยที่ δ เป็นฟังก์ชันครอนเนคเคอร์ เดลต้า (Kronecker delta function) และฮิสโทแกรม $\{\hat{q}_u\}_{u=1...m}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\hat{q}_u = \sum_{i=1}^n \delta[c(x_i^*) - u], u = 1...m \quad (4.1)$$

ขั้นตอนสุดท้าย ภาพการฉายกลับจะคำนวณได้จากข้อมูลของฮิสโทแกรมสีที่หามาก่อนหน้านี้ โดยค่าความน่าจะเป็นจะถูกปรับสเกลให้อยู่ในช่วงค่าพิกเซล เช่นถ้าค่าสีแบบ 8 บิต ค่าสีจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255

$$\hat{p}_u = \min\left(\frac{255}{\max(\hat{q})} \hat{q}_u, 255\right), u = 1...m \quad (4.2)$$

โดย $\max(\hat{q})$ คือค่ามากที่สุดของฮิสโทแกรม ขั้นตอนการสร้างภาพฉายกลับสามารถเขียนภาพขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการสร้างภาพฉายกลับ

โดยภาพวัตถุที่แสดงผลด้วยแบบจำลองสีอาร์จีบี จะถูกแปลงเป็นแบบจำลองสีเอชเอสวีซึ่งประกอบด้วยค่าของสี ค่าความเข้มของเนื้อสีและความสว่างของสี โดยจะนำเฉพาะค่าของสีและค่าความเข้มของเนื้อสีมาสร้างฮิสโทแกรมแบบ 2 มิติ ซึ่งจะนำมาสร้างภาพฉายกลับต่อไป

4.2.3. คำนวณซ้ำโดยใช้วิธีการมินชิพในการหาพิกเซลซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของวัตถุเป้าหมาย และทำการเลื่อนตำแหน่งหน้าต่างระบุเป้าหมาย

กระบวนการนี้จะทำการเลื่อนหน้าต่างระบุเป้าหมายให้เคลื่อนที่ติดตามวัตถุ โดยการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ในภาพฉายกลับที่มีความน่าจะเป็นที่จะเป็นเป้าหมายสูงสุดด้วยกระบวนการมินชิพซึ่งกล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ขั้นตอนนี้จะมีการคำนวณซ้ำเพื่อหาจุดที่

เหมาะสมที่สุด โดยทั่วไปจะทำซ้ำประมาณ 2-5 ครั้ง จนเกิดการลู่เข้าหรือไม่มีการเลื่อนหน้าต่างอีก โดยจำนวนครั้งมากที่สุดในการทำซ้ำคือ 10-20 รอบ

หลังจากสร้างภาพฉายกลับแล้ว กระบวนการมินิซิฟจึงเริ่มต้นขึ้นโดยการหาโมเมนต์ (moment) และศูนย์กลางมวล (mass center) ภายในหน้าต่างติดตามวัตถุ (search window) ในภาพฉายกลับ ซึ่งขั้นตอนแรกเริ่มจาก เมื่อทำการระบุวัตถุเป้าหมายโดยใช้แมสโปรแกรมจะสร้างหน้าต่างติดตามวัตถุขึ้น ขั้นตอนที่ 2 จึงหาค่าโมเมนต์และศูนย์กลางมวลภายในหน้าต่าง โดยที่ $I(x, y)$ คือ ความเข้มแสง (intensity) ในภาพฉายกลับที่ตำแหน่ง (x, y)

ค่าโมเมนต์ที่ 0 (the zeroth moment)

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (4.3)$$

ค่าโมเมนต์ที่ 1 (the first moment)

$$M_{10} = \sum_x \sum_y xI(x, y) \quad (4.4)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y yI(x, y) \quad (4.5)$$

ค่าศูนย์กลางมวลหรือ ตำแหน่งกึ่งกลางในหน้าต่างติดตามวัตถุ (mean search window location)

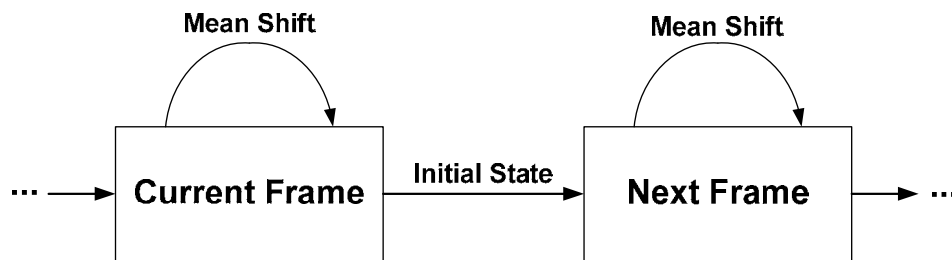
$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (4.6)$$

ซึ่งขั้นตอนที่ 3 จะทำการเลื่อนหน้าต่างติดตามวัตถุตามค่าศูนย์กลางมวล หลังจากนั้นทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 จนเกิดการลู่เข้า (convergence) เมื่อได้ตำแหน่งแล้วจะใช้ตัวประมาณค่าคาลมาน (Kalman estimator) ในการกรองสัญญาณรบกวน และประมาณค่าตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพทำให้ตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4.2.4 คำนวณขนาดสัดส่วน (scale) และมุมการเอียง (orientation)

กระบวนการแคมซิฟ เริ่มขั้นตอนแรก เมื่อทำการระบุวัตถุเป้าหมายโดยใช้แมส และกำหนดค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ ขั้นตอนที่ 2 ใช้วิธีการมินิซิฟในการหาตำแหน่งวัตถุใน

ภาพ และเก็บค่าโมเมนต์ที่ศูนย์ (ขนาดของหน้าต่างค้นหาวัตถุ) และตำแหน่งวัตถุในภาพ ขั้นตอนสุดท้าย นำค่าโมเมนต์ที่ศูนย์ (ขนาดของหน้าต่างค้นหาวัตถุ) และตำแหน่งวัตถุในภาพในเฟรมที่ผ่านมาเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณในเฟรมใหม่ ซึ่งเมื่อทำซ้ำกระบวนการนี้ก็จะสามารถติดตามวัตถุด้วยภาพได้ วิธีการแค้มชิฟจะมีกระบวนการดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนกระบวนการแค้มชิฟ

ความแตกต่างระหว่างแค้มชิฟและมินชิฟคือ วิธีการมินชิฟวิธีการแบบการกระจายคงที่ (static distributions) ซึ่งไม่มีการปรับการคำนวณตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขนาดและสีของวัตถุ ในขณะที่วิธีการแค้มชิฟใช้การกระจายของความน่าจะเป็นแบบปรับค่าได้อย่างต่อเนื่อง (Continuously adaptive probability distributions) ซึ่งจะมีการปรับขนาดสัดส่วนและมุมการเอียงหน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณให้สอดคล้องกับบริเวณที่เป็นพิกเซลสีขาวในภาพฉายกลับ (ความน่าจะเป็นที่จะเป็นวัตถุเป้าหมายมากที่สุด) เช่นเดียวกับกระบวนการสร้างภาพฉายกลับ การปรับขนาดและมุมจะหาได้จากโมเมนต์ ในส่วนของขนาดสัดส่วนและมุมการเอียงจะหาจากความกว้างของการกระจาย (equivalent rectangle) ซึ่งมีค่าโมเมนต์ในแกนเอ็กซ์และวายเท่ากันโดยวัดจากภาพฉายย้อนกลับแบบ 2 มิติ สามารถนิยามค่าโมเมนต์ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 ได้ดังนี้

$$M_{20} = \sum_x \sum_y x^2 I(x, y) \quad (4.7)$$

$$M_{02} = \sum_x \sum_y y^2 I(x, y) \quad (4.8)$$

$$M_{11} = \sum_x \sum_y xy I(x, y) \quad (4.9)$$

ค่าความยาวและความกว้างของการกระจายของความน่าจะเป็นสามารถหาได้จากตัวแปร a , b และ c

$$a = \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2 \quad (4.10)$$

$$b = 2 \left(\frac{M_{11}}{M_{00}} - x_c y_c \right) \quad (4.11)$$

$$c = \frac{M_{02}}{M_{00}} - y_c^2 \quad (4.12)$$

มุมการเอียงของวัตถุสามารถหาได้จาก

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{b}{a-c} \right) \quad (4.13)$$

ระยะทางที่วัดจากจุดศูนย์กลางการกระจายทั้ง 2 แนวแกน (ขนาดของความกว้างของการกระจาย) สามารถหาได้จาก

$$l_1 = \sqrt{\frac{(a+c) + \sqrt{b^2 + (a-c)^2}}{2}} \quad (4.14)$$

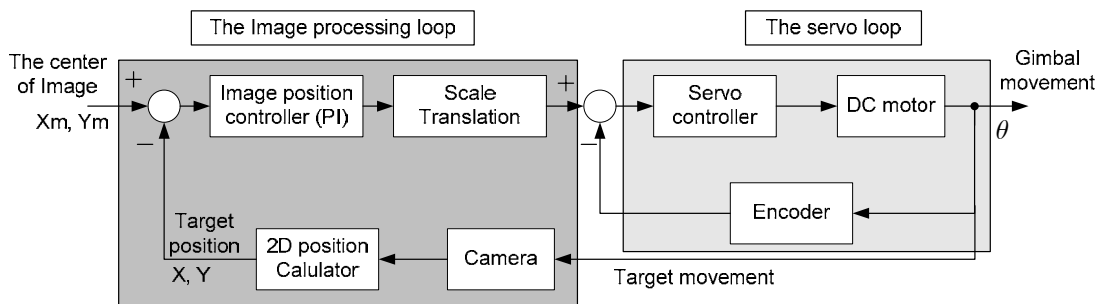
$$l_2 = \sqrt{\frac{(a+c) - \sqrt{b^2 + (a-c)^2}}{2}} \quad (4.15)$$

หลังจากขั้นตอนนี้ เมื่อรับภาพจากกล้องในเฟรมใหม่เข้ามา ก็จะเริ่มกระบวนการใหม่โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนที่ 4.2.2 การติดตามวัตถุจะดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อทราบค่าตำแหน่งกึ่งกลางวัตถุบนภาพ (x_c, y_c) ในแต่ละเฟรมแล้ว ก็สามารถสร้างชุดคำสั่งสำหรับควบคุมส่งไปยังมอเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพให้ติดตามวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ได้

บทที่ 5

การออกแบบระบบควบคุม

ลักษณะการควบคุมอุปกรณ์การภาพแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ การควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงานหรือใช้จอยสติค การควบคุมโดยกำหนดให้ชี้เป้าที่ตำแหน่งต่างๆ และการควบคุมโดยระบบประมวลผลภาพและติดตามเป้า ซึ่งทั้งสามแบบใช้โมดูลควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหมือนกัน การควบคุมแบบติดตามเป้าแตกต่างจากสองแบบแรกตรงที่มีโมดูลการประมวลผลภาพเพื่อหาตำแหน่งวัตถุในภาพเพิ่มขึ้นมา รูปที่ 5.1 แสดงแผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพแบบติดตามเป้า

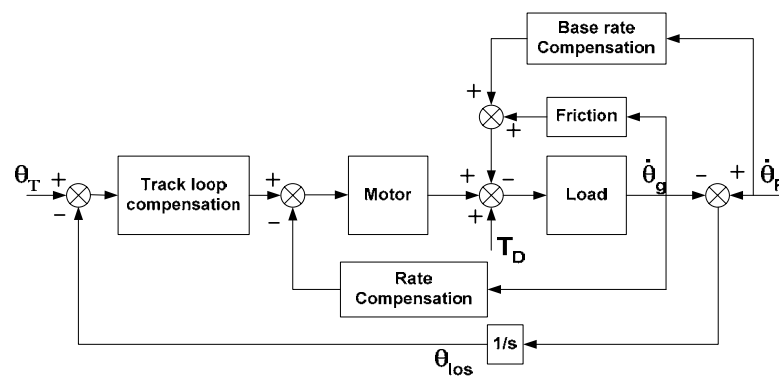


รูปที่ 5.1 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพแบบติดตามเป้า

โดยขั้นตอนการทำงานจะเริ่มจากกล้องถ่ายภาพวัตถุเป้าหมาย เมื่อมีการกำหนดวัตถุเป้าหมายแล้ว โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งพิกเซลที่เป็นจุดกึ่งกลางวัตถุ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งจุดกึ่งกลางของภาพ เพื่อจะควบคุมให้ตำแหน่งกึ่งกลางวัตถุที่ปรากฏในภาพให้อยู่ใกล้บริเวณจุดกึ่งกลางภาพมากที่สุด เป็นการป้องกันวัตถุหลุดออกนอกเฟรม จากนั้นทำการแปลงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในหน่วยพิกเซลให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมในหน่วยเรเดียน เพื่อส่งไปยังคีย์บอร์ดให้มอเตอร์ของอุปกรณ์การภาพเคลื่อนที่ติดตามเป้าหมายได้ จากแผนภาพระบบควบคุมแบ่งได้ 2 ส่วนคือ ระบบควบคุมวงนอกหรือส่วนติดตามวัตถุด้วยภาพ และระบบควบคุมวงในหรือส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ในระบบควบคุมวงนอกทำหน้าที่ควบคุมให้เส้นการมองเห็น (line of sight) ของกล้องกิมเบลชี้ไปยังกลางวัตถุเป้าหมายตลอดเวลาที่ใช้งานในโหมดติดตามวัตถุ ซึ่งระบบควบคุมที่เลือกใช้คือการควบคุมแบบพีไอ (PI control) ส่วนการควบคุมวงในซึ่งเป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของโครงสร้างกล้องกิมเบล

โครงสร้างแบบกิมเบลนี้ประกอบด้วยแกนหมุนจำนวน 2 แกน ที่สามารถหมุนรอบตัวเองได้อย่างอิสระ คือแนวการหมุนรอบตัวเอง (azimuth) และแนวการหมุนแบบปัดแกย (pitch)

ซึ่งการควบคุมทิศทางของแนวการมองเห็นนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมทิศทางของการหมุนของทั้งสองแนวแกนนี้ เนื่องจากระบบการรักษาเสถียรภาพของกิมเบลนี้จะมีสิ่งรบกวนที่มาจากภายนอกอยู่หลายประการที่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของโครงสร้าง การควบคุมการเคลื่อนที่ของโครงสร้างก้องกิมเบลจึงแบ่งเป็นสองส่วนเช่นกัน สำหรับการควบคุมชั้นใน (inner loop) ตัวระบบเป็นระบบไม่เชิงเส้น และการหาแบบจำลองของระบบที่ถูกต้องแม่นยำทำได้ยาก เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพที่ดีในการทดลองนั้นเราได้ใช้ตัวควบคุมแบบ robust inverse dynamics และตัวควบคุมแบบ sliding mode control ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ และใช้วิธีการ Indirect stabilization ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ในการควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งระบบเพื่อชดเชยสิ่งรบกวนที่มาจากภายนอก ดังนั้นกล่องที่ติดตั้งอยู่ภายในโครงสร้างจะสามารถติดตามหรือรักษาแนวการมองเห็นไว้ได้โดยการควบคุมนี้ เนื่องจากได้ติดตั้งเครื่องมือวัดการหมุนรอบในการรักษาเสถียรภาพของการเคลื่อนที่ไว้ที่ตำแหน่งของส่วนฐานของโครงสร้างดังนั้นจึงเรียกว่า indirect ซึ่งเครื่องมือวัดการหมุนรอบจะสามารถตรวจจับการรบกวนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของส่วนฐานได้ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐานอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอากาศยานที่ได้นำโครงสร้างแบบกิมเบลนี้ไปติดตั้ง เครื่องมือวัดการหมุนรอบนี้จะวัดค่าความเร็วเชิงมุมและมุมที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวควบคุมก็จะแปลงค่าที่ได้นี้ให้เป็นแนวการมองเห็น และส่งสัญญาณควบคุมมาควบคุมการหมุนของมอเตอร์ทั้งสองตัวเพื่อสามารถรักษาทิศทางของแนวการมองเห็น



รูปที่ 5.2 แผนภาพการควบคุมแบบ Indirect LOS Stabilization

5.1 ตัวควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control

จากระบบสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล

$$\mathbf{D}(q)\ddot{q} + \mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) + \mathbf{g}(q) = \boldsymbol{\tau} \quad (5.1)$$

ในการควบคุมเราต้องการที่จะควบคุมตำแหน่งของการหมุนของตัวขับเคลื่อนแต่ละตัวให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ ระบบของกิมเบลนี้เป็นระบบสมการไม่เชิงเส้นและเป็นระบบควบคุมหลายตัวแปรดังสมการที่ (5.1) การควบคุมการเคลื่อนที่นั้นเราจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบ nonlinear state feedback หรือเรียกว่า inverse dynamics control จากระบบสมการการเคลื่อนที่ (5.1) สัญญาณควบคุม τ นั้นเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสแตตที่มีรูปแบบคือ

$$\tau = \mathbf{D}(q)y + \mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) + \mathbf{g}(q) \quad (5.2)$$

แทนค่าสัญญาณควบคุมนี้ลงในสมการที่ (5.1) จะได้ว่า

$$\ddot{q} = y \quad (5.3)$$

เมื่อ y คือเวกเตอร์ตัวแปรของสัญญาณควบคุมตัวใหม่ซึ่งจะต้องหา โดยเลือกให้ y มีค่าเท่ากับ

$$y = \ddot{q}_d + K_p(q_d - q) + K_D(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_I \int_0^t (q_d - q) dt \quad (5.4)$$

เมื่อ $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ คือระยะการเคลื่อนที่ที่กำหนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ และความเร่งของการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการที่ (5.3) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์แบบต่อเนื่องได้เท่ากับ

$$\ddot{q} + K_D\dot{q} + K_p\tilde{q} + K_I \int_0^t \tilde{q} dt = 0 \quad (5.5)$$

เมื่อ $\tilde{q} = q_d - q$ ในสมการที่ (5.5) คือตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาด ในขณะที่ตำแหน่งความเร็วและความเร่งที่ต้องการคือ $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ และค่าเกนของตัวควบคุม K_p, K_I, K_D นั้นสามารถเลือกได้โดยเรากำหนดความเร็วของการตอบสนอง จากสมการที่ (5.2) สัญญาณควบคุมนั้นสามารถคำนวณได้ในเวลาจริงโดยใช้พื้นฐานของสมการของแบบจำลองของโครงสร้าง ในทางปฏิบัตินั้นการหาค่าของสมการแบบจำลองของโครงสร้างนั้นอาจไม่แม่นยำถูกต้อง ซึ่งก็ไม่เพียงแต่แบบจำลองที่ไม่ถูกต้องเท่านั้นยังมีตัวแปรที่ไม่สามารถหาได้อีกเช่นแรงเสียดทานที่มีในระบบรวมทั้งสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปอีกด้วย ดังนั้นจึงได้พิจารณาระบบควบคุมแบบ robust inverse dynamics และ sliding mode control มาใช้เพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของกิมเบลให้ดียิ่งขึ้น

5.2 ตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control

กำหนดให้เวกเตอร์ของสัญญาณควบคุมมีสมการคือ

$$\tau = \hat{\mathbf{D}}(q)y + \hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) \quad (5.6)$$

เมื่อ

$\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q})$ คือค่าประมาณของ $(\mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) + \mathbf{g}(q))$

$\hat{\mathbf{D}}(q)$ คือค่าประมาณของ $\mathbf{D}(q)$

การออกแบบระบบควบคุมนี้มีสมมติฐานว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการประมาณค่าตัวแปรในสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นมีขอบเขตหรือช่วงที่สามารถรู้ได้ถึงแม้ว่าจะเป็นค่าที่ไม่สามารถหาได้ก็ตาม แต่ก็อยู่ในช่วงที่ทราบคือ

ค่าสูงสุดของ \ddot{q}_d เป็นค่าที่ประเมินได้โดยมีค่าเท่ากับ

$$\sup_{t \geq 0} \|\ddot{q}_d\| \leq Q_m < \infty \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } \ddot{q}_d \quad (5.7)$$

ค่าขอบเขตของเมตริกซ์ของโมเมนต์ความเฉื่อย

$$\|\mathbf{I} - \mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q)\| \leq a \leq 1 \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } q \quad (5.8)$$

เมื่อ $\mathbf{D}(q)$ เป็นเมตริกซ์แบบ positive definite matrix ที่มีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่มีขอบเขต ดังนั้น

$$d_{\min} \leq \|\mathbf{D}^{-1}(q)\| \leq d_{\max} \quad (5.9)$$

$$\hat{\mathbf{D}} = \frac{2}{d_{\min} + d_{\max}} \mathbf{I} \quad (5.10)$$

$$\frac{2d_{\min}}{d_{\min} + d_{\max}} \leq \|\mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q)\| \leq \frac{2d_{\max}}{d_{\min} + d_{\max}} \quad (5.11)$$

จากสมการที่ (5.8), (5.9), และ (5.10) จะได้ข้อเท็จจริงคือ

$$\|\mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q) - \mathbf{I}\| \leq \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}} = a \leq 1 \quad (5.12)$$

เทอมที่ไม่เชิงเส้นที่มีขอบเขต

$$\|\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) - \mathbf{N}(q, \dot{q})\| < \infty \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } q, \dot{q} \quad (5.13)$$

แทนค่าสมการที่ (5.6) ลงในสมการที่ (5.1) จะได้ว่า

$$\mathbf{D}(q)\ddot{q} + \mathbf{N}(q, \dot{q}) = \hat{\mathbf{D}}(q)y + \hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) \quad (5.14)$$

จัดรูปแบบของสมการที่ (5.14) จะได้

$$\ddot{q} = y + (\mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q) - \mathbf{I})y + \mathbf{D}^{-1}(\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) - \mathbf{N}(q, \dot{q}))$$

หรือ

$$\ddot{q} = y - \Gamma \quad (5.15)$$

เมื่อ

$$\Gamma = (\mathbf{I} - \mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q))y - \mathbf{D}^{-1}(\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) - \mathbf{N}(q, \dot{q})) \quad (5.16)$$

จากสมการที่ (5.4) เลือกตัวแปร y โดยให้มีค่าเท่ากับ

$$y = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - q) + K_P(q_d - q) + K_I \int_0^t (q_d - q) dt \quad (5.17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (5.15) จะได้ว่า

$$\ddot{\tilde{q}} + K_D\dot{\tilde{q}} + K_P\tilde{q} + K_I \int_0^t \tilde{q} dt = \mathbf{N}(q, \dot{q}) \quad (5.18)$$

สมการที่ (5.18) ยังคงเป็นสมการไม่เชิงเส้นอยู่และยังมีเทอมที่ยัง coupled อยู่ ซึ่งไม่สามารถที่จะบอกได้ว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นจะลู่เข้าสู่ศูนย์

สมการที่ (5.15) สามารถเขียนได้ใหม่เท่ากับ

$$\ddot{q}_d - \ddot{q} = \ddot{q}_d - y + \Gamma \rightarrow \ddot{\tilde{q}} = \ddot{q}_d - y + \Gamma \quad (5.19)$$

ถ้ากำหนดให้ตัวแปรสแตตเท่ากับ $\eta = \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix}$

ดังนั้นสมการตัวแปรสแตตในสมการที่ (5.15) จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} (\ddot{q}_d - y + \Gamma) \quad (5.20)$$

เมื่อเลือกตัวแปร y ให้มีค่าเท่ากับ

$$y = \ddot{q}_d + K_D\dot{\tilde{q}} + K_P\tilde{q} + K_I \int_0^t \tilde{q} dt + w \quad (5.21)$$

เทอม w นี้เป็นเทอมที่ออกแบบมาเพื่อสร้างเสถียรภาพให้ระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของระบบ เมื่อแทนสมการที่ (5.21) ลงในสมการ (5.20) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \left(-K_D\dot{\tilde{q}} - K_P\tilde{q} - K_I \int_0^t \tilde{q} dt - w + \Gamma \right)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ -K_P & -K_D & -K_I \\ \mathbf{I} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix} (\Gamma - w) \quad (5.22)$$

เมื่อ $\beta = \int_0^t \tilde{q} dt$ ในสมการที่ (5.22) จะสามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$\dot{\zeta} = \mathbf{H}\zeta + \mathbf{G}(\Gamma - w) \quad (5.23)$$

$$\text{เมื่อ } \zeta = \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \\ \beta \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ -K_P & -K_D & -K_I \\ \mathbf{I} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix}$$

จากระบบสมการนี้ ζ เป็นเวกเตอร์ขนาด 6×1 เกนของระบบควบคุมคือ K_P, K_D, K_I จะถูกเลือกเพื่อที่จะค่าเมตริกซ์ \mathbf{H} มีค่า eigenvalues ของเมตริกซ์เป็นค่าจริงลบ

ใช้วิธีการ Lyapunov direct method ในการเลือกตัวแปรของระบบควบคุม w โดยเลือกฟังก์ชัน Lyapunov เท่ากับ

$$V = \zeta^T \mathbf{Q} \zeta > 0 \quad \forall \zeta \quad (5.24)$$

เมื่อ \mathbf{Q} เป็น symmetric positive definite matrix

$$\dot{V} = \zeta^T \mathbf{Q} \dot{\zeta} + \dot{\zeta}^T \mathbf{Q} \zeta \quad (5.25)$$

$$\dot{V} = \zeta^T (\mathbf{H}^T \mathbf{Q} + \mathbf{Q} \mathbf{H}) \zeta + 2\zeta^T \mathbf{Q} \mathbf{G} (\Gamma - w) \quad (5.26)$$

เนื่องจากเมตริกซ์ \mathbf{H} มีค่า eigenvalues ที่เป็นลบดังนั้นจะได้ว่า

$$(\mathbf{H}^T \mathbf{Q} + \mathbf{Q} \mathbf{H}) = -\mathbf{P} \quad (5.27)$$

เมื่อเมตริกซ์ \mathbf{P} เป็น symmetric positive definite matrix ดังนั้นสมการที่ (5.26) จะมีค่าเท่ากับ

$$\dot{V} = -\zeta^T \mathbf{P} \zeta + 2\zeta^T \mathbf{Q} \mathbf{G} (\Gamma - w) \quad (5.28)$$

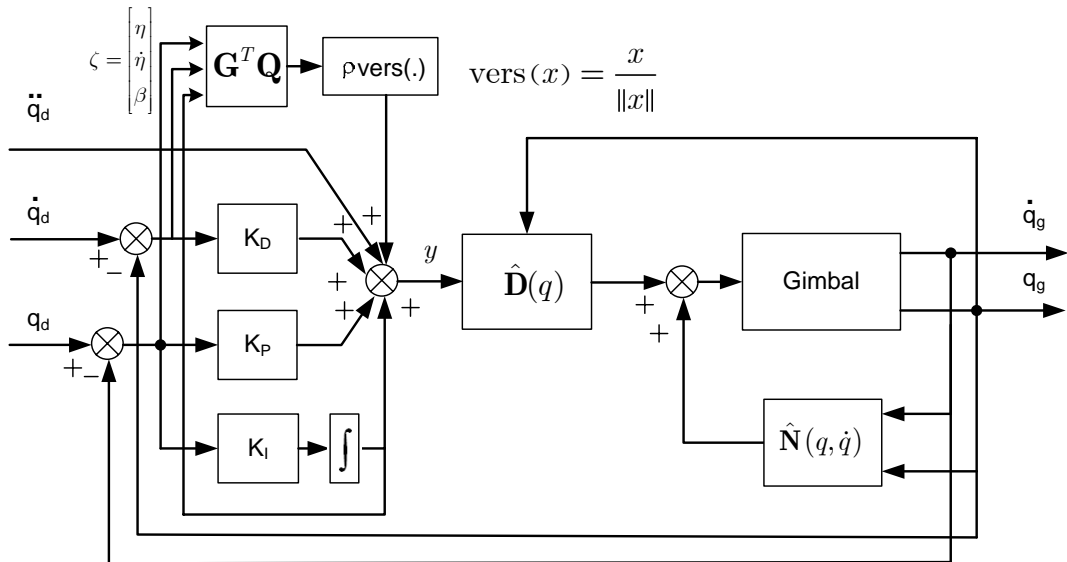
ในการเลือกค่า \dot{V} ให้มีค่าเป็นลบนั้น เราต้องการค่า $\|w\| \geq \|\Gamma\|$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$w = \frac{\rho}{\|\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \zeta\|} (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \zeta), \quad \rho \geq \|\Gamma\| \quad (5.29)$$

สำหรับค่าเล็กๆ ของ $\|\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \zeta\| < \varepsilon$ สมการที่ (5.29) จะลดรูปได้เท่ากับ

$$w = \frac{\rho}{\varepsilon} (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \zeta), \quad \|\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \zeta\| < \varepsilon \quad (5.30)$$

สมการที่ (5.30) นั้นเป็นตัวป้องกันการเกิด chattering รูปที่ 5.5 เป็นแผนภาพการควบคุมแบบ robust inverse dynamics control



รูปที่ 5.3 แผนภาพระบบควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control

5.3 ตัวควบคุมแบบ Sliding mode Control

5.3.1 การออกแบบระนาบสไลด์ดิง

ระนาบสไลด์ดิง เป็นระนาบที่กำหนดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดของระบบ ในลักษณะการรวมกันแบบเชิงเส้น (linear combination) โดยระบบสมการของระนาบสไลด์ดิงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + c \right)^{n-1} e = 0 \quad (5.31)$$

เมื่อ $s(x, t)$ คือ ระนาบสไลด์ดิง

n คือ ลำดับของสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบ

e คือ เวกเตอร์ของค่าความผิดพลาดของระบบ

c คือ รากลักษณะเฉพาะ (Characteristic root) ของระนาบสไลด์ดิง ซึ่งเป็นค่าคงที่

บวก

โดยกำหนดให้ $e = x_d - x$ เมื่อ x_d คือ เวกเตอร์ตัวสถานะอ้างอิง (state reference) และ x คือ เวกเตอร์ตัวสถานะ

เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่ของกิมเบลเป็นระบบพลวัตลำดับที่สอง เมื่อพิจารณาระบบพลวัตลำดับที่สอง สามารถเขียนสมการของระนาบสไลด์ได้ดังนี้

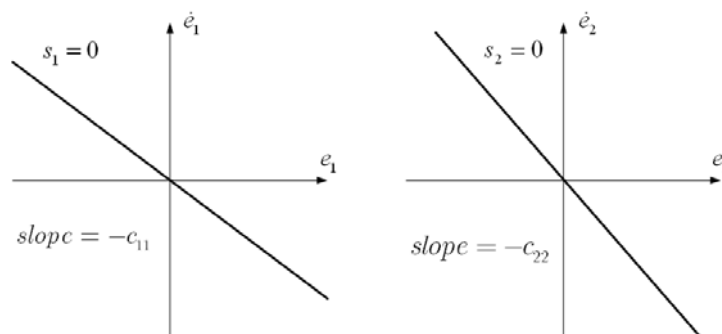
$$\begin{aligned} s &= \left(\frac{d}{dt} + c \right) e = 0 \\ &= \frac{de}{dt} + ce = 0 \\ &= \dot{e} + ce = 0 \end{aligned} \quad (5.32)$$

เมื่อพิจารณากิมเบลทั้งสองแนวแกน สามารถเขียนสมการของระนาบสไลด์ได้ดังนี้

$$s(x, t) = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = G_1 \dot{e} + G_2 e = 0 \quad (5.33)$$

$$\text{เมื่อ } G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ และ } G_2 = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (5.32) ระนาบสไลด์อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $\dot{e} + ce = 0$ ซึ่งอยู่ในควอดแดนต์ที่สอง และสี่ โดยสามารถแสดงไว้ในระนาบเฟส (phase plane) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง (e) และค่าผิดพลาดเชิงความเร็ว (\dot{e}) และกราฟของระนาบสไลด์สำหรับระบบพลวัตลำดับสอง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ระนาบสไลด์สำหรับระบบพลวัตลำดับสอง

จากสมการที่ (5.32) เป็นระบบสมการอนุพันธ์เชิงเส้นลำดับที่หนึ่ง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของระบบพลวัตของระนาบสไลด์ขึ้นอยู่กับค่าความชันของระนาบสไลด์ หรือค่า

คงตัวเวลา (time constant) ของระบบ ซึ่งการตอบสนองของระบบจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่าคงที่ c นั้นเอง เมื่อค่า c มากขึ้นระบบก็จะเร็วขึ้น และเมื่อระบบทำงานในช่วงสไลด์ดิ้งโหมด ($s(x, t) = 0$) หมายความว่าตัวสถานะของระบบลู่เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิ้ง และเคลื่อนที่อยู่บนระนาบสไลด์ดิ้ง ถ้าตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ตัวสถานะของระบบอยู่บนระนาบสไลด์ดิ้งได้ แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติกส์ (asymptotic stability) ซึ่งยืนยันได้ว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์

ในการพิจารณาความเสถียรภาพของระบบ สามารถใช้ทฤษฎีเสถียรภาพของไลปูนอฟ (Lyapunov stability theory) มาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม โดยใช้วิธี Direct method ในการหาคุณสมบัติเสถียรภาพของระบบไม่เชิงเส้นโดยการสร้างฟังก์ชันพลังงาน “Energy-like function” สำหรับระบบและหาฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หลักการของวิธีนี้จะพิจารณาความสัมพันธ์ของระบบในรูปของฟังก์ชันพลังงาน ซึ่งในความหมายทางคณิตศาสตร์คือ ฟังก์ชันในรูปแบบของ Positive definite และในการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันเทียบกับเวลาจะได้ ฟังก์ชันในรูปแบบของ Negative definite ซึ่งหมายถึงระบบเกิดการถ่ายเทพลังงาน และถ้าการทำงาน of ระบบเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพแบบแอสซิมโทติกส์ โดยฟังก์ชันที่ใช้นี้อยู่ในรูปแบบพลังงานจลน์ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของความเร็วกว่า ในลักษณะเดียวกันนี้ได้กำหนดให้ไลปูนอฟฟังก์ชันคือ $V(s)$ ในความสัมพันธ์ของระนาบสไลด์ดิ้ง ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระนาบสไลด์ดิ้งคือ

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (5.34)$$

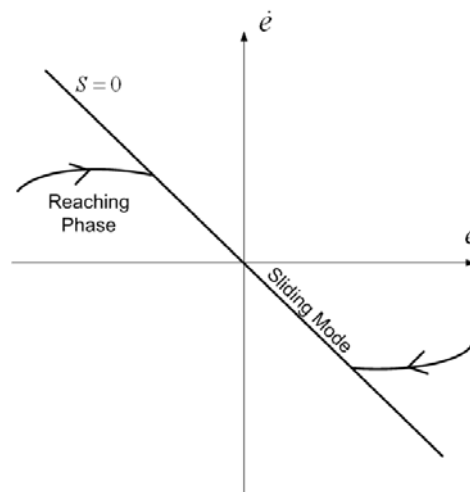
สมการอนุพันธ์ของไลปูนอฟฟังก์ชันเทียบกับเวลาคือ

$$\frac{dV}{dt} = s \cdot \frac{ds}{dt} \quad (5.35)$$

และกำหนดให้

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (5.36)$$

เมื่อ η มีค่าเป็นค่าคงที่บวก และระบบทำงานในช่วงนี้ แสดงว่าระบบอยู่ในสถานการณ์ทำงานแบบบริชชิงเฟส (reaching phase) หรือภาวะสไลด์ดิ้ง (Sliding condition) โดยตัวสถานะที่อยู่บนระนาบสไลด์ดิ้งถูกผลักดันให้เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิ้ง ดังได้แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การเคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิ่ง

5.3.2 การออกแบบกฎการควบคุม

เมื่อพิจารณาการทำงานในขอบเขตของทฤษฎีเสถียรภาพของไลปูนอฟแล้ว กำหนดให้

$$\frac{dV}{dt} = -s^T K \text{sign}(s) \quad (5.37)$$

จากสมการที่ (5.35) และสมการที่ (5.37) จัดรูปแบบใหม่ จะได้

$$\frac{ds}{dt} = -K \text{sign}(s) \quad (5.38)$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายการสวิตช์ ซึ่งเป็นค่าแอมพลิจูดของฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง โดยกำหนดให้มีค่ามากพอในการชดเชยค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น และค่าอัตราขยายนี้ยังบอกถึงความเร็วของระบบที่เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิ่ง

จากสมการของระนาบสไลด์ดิ่ง สมการที่ (5.32) สมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันนี้เทียบกับเวลาคือ

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} \quad (5.39)$$

จาก $\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q}$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{q}_d - \ddot{q} + c\dot{e} \\ &= \ddot{q}_d - \mathbf{D}^{-1}(x_1)[\tau - \mathbf{N}(x_1, x_2)] + c\dot{e} \end{aligned} \quad (5.40)$$

จากสมการที่ (5.38) เท้ากับสมการที่ (5.40) จะได้

$$-K \text{sign}(s) = \ddot{q}_d - \mathbf{D}^{-1}(x_1)[\tau - \mathbf{N}(x_1, x_2)] + c\dot{e}$$

$$= \ddot{q}_d - \mathbf{D}^{-1}(x_1)\tau + \mathbf{D}^{-1}(x_1)\mathbf{N}(x_1, x_2) + c\dot{e}$$

เมื่อจัดรูปสมการข้างต้น สามารถเขียนสมการในรูปของสมการกฎการควบคุมได้ดังนี้

$$\tau = \mathbf{D}(x_1)(c\dot{e} + \ddot{q}_d) + \mathbf{N}(x_1, x_2) + \mathbf{D}(x_1)K \operatorname{sgn}(s) \quad (5.41)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การควบคุมแบบสไลด์ดิงประกอบด้วยวิธีการควบคุม 2 รูปแบบ จากสมการที่ (5.41) ประกอบด้วยส่วนแรกคือ ตัวควบคุมแบบสมดุลง ซึ่งมีหน้าที่ในการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (nonlinear compensation) คือ

$$\tau_{eq} = \mathbf{D}(x_1)(c\dot{e} + \ddot{q}_d) + \mathbf{N}(x_1, x_2)$$

และส่วนที่สอง ตัวควบคุมแบบสวิตซ์ซิง คือ

$$\tau_{sw} = \mathbf{D}(x_1)K \operatorname{sgn}(s)$$

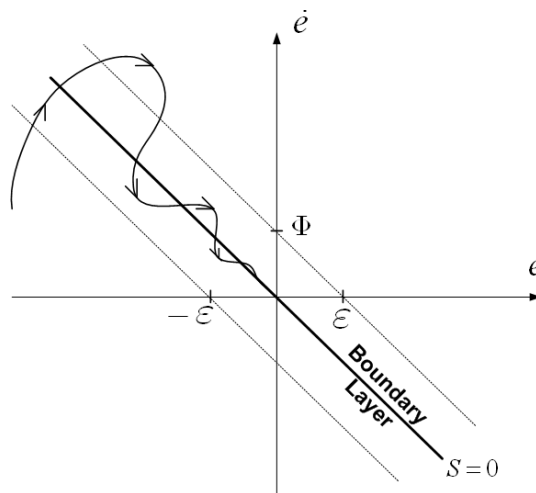
เนื่องจากตัวควบคุมแบบสวิตซ์ซิงซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง ($\operatorname{sgn}(s)$) ทำให้เกิดแซทเทอริงขึ้น เพื่อลดผลของแซทเทอริง จึงต้องควบคุมการทำงานให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดโดยใช้ฟังก์ชันอิมิตัวแทนฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง

การกำหนดค่าขอบเขต (boundary layer) ของระนาบสไลด์ดิง ของ Slotine และ Li, Asada และ Slotine ซึ่งได้อธิบายการควบคุมการทำงานของระบบให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ สามารถกำหนดขอบเขตได้ดังนี้

$$B(t) = \{x, |s(x, t)| \leq \Phi\} \quad (5.42)$$

เมื่อ Φ คือ ค่าความกว้างของค่าขอบเขตของระนาบสไลด์ดิง

โดยพิจารณาให้ตัวสถานะของระบบเปลี่ยนแปลงบนระนาบสไลด์ดิงภายในขอบเขตการทำงานดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ขอบเขตของระนาบสไลด์ดิ้ง

โดยกำหนดให้ฟังก์ชันอิมพัลส์ที่ใช้แทนฟังก์ชันแบบไม่ต่อเนื่อง ($\text{sgn}(s)$) คือ

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > \Phi \\ \frac{s}{\Phi} & \text{if } |s| \leq \Phi, \text{ เมื่อ } \Phi > 0 \\ -1 & \text{if } s < -\Phi \end{cases} \quad (5.43)$$

ซึ่งถ้าต้องการหาขอบเขตของค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่ง สามารถทำได้โดยแทนสมการที่ (5.32) ในสมการที่ (5.43) จะได้

$$\dot{e} + ce \leq \Phi \quad (5.44)$$

ซึ่งสามารถหาคำตอบของสมการที่ (5.44) ได้คือ

$$e(t) \leq \frac{\Phi}{c} [1 - \exp(-ct)] \quad (5.45)$$

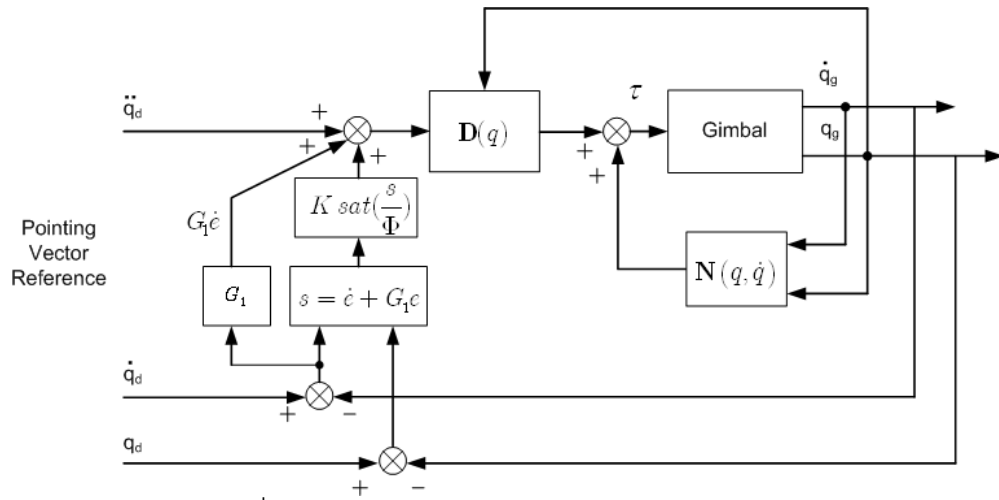
เมื่อพิจารณา $t \rightarrow \infty$ จะได้ขอบเขตของค่าผิดพลาดเชิงตำแหน่งคือ

$$e(t) = \varepsilon \leq \left| \frac{\Phi}{c} \right| \quad (5.46)$$

จากสมการที่ (5.43) สามารถเขียนสมการกฎการควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งในการควบคุมการเคลื่อนที่ของกิมเบลได้ดังนี้

$$\tau = \mathbf{D}(x_1)(c\dot{e} + \ddot{q}_d) + \mathbf{N}(x_1, x_2) + \mathbf{D}(x_1)K \text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) \quad (5.47)$$

ดังนั้นจากสมการกฎการควบคุม สามารถเขียนแผนภาพของการควบคุมการเคลื่อนที่ของกิมเบลได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบสไลด์ดิง

5.3.3 การประมาณค่าขอบเขตของความไม่แน่นอน และพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

การควบคุมโดยระบบควบคุมแบบสไลด์ดิงจะรับรองเสถียรภาพความคงทนในการควบคุมเคลื่อนที่เมื่อความไม่แน่นอนในระบบมีค่าขอบเขตจำกัด ซึ่งขอบเขตนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบตัวควบคุมแบบสวิตซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบคงทน ในการกำหนดค่าขอบเขตความไม่แน่นอนในระบบให้มีความมาก แม้ว่าระบบจะมีคุณสมบัติความคงทนที่ดี แต่ในทางปฏิบัติแล้วอาจพบข้อจำกัดในด้านขนาดของสัญญาณควบคุมที่มีความมาก หรืออัตราขยายของระบบที่มีค่าสูงเกินไปซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อชดเชยเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงต้องออกแบบและปรับให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ระบบเกิดค่าผิดพลาดน้อยที่สุด และสามารถรักษาคุณสมบัติความคงทนไว้ได้ การค่าขอบเขตความไม่แน่นอนสามารถทำได้หลายวิธี อาจได้จากการประมาณค่าขอบเขตการทำงาน และค่าขอบเขตสูงสุดของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า หรือหาโดยการทดลอง โดยในหัวข้อนี้เป็นการแสดงการประมาณค่าขอบเขตความไม่แน่นอนจากการทำการทดลอง

การทดลองหาค่าขอบเขตความไม่แน่นอน สามารถพิจารณาจากการควบคุมแบบ Inverse dynamic control (เมื่อค่านำเข้า \ddot{q}, \dot{q} และ q มีขอบเขต) โดยกำหนดให้เวกเตอร์ของสัญญาณควบคุมมีสมการคือ

$$\tau = \hat{D}(q)y + \hat{N}(q, \dot{q}) \quad (5.48)$$

เมื่อ $\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q})$ คือค่าประมาณของ $(\mathbf{C}(q, \dot{q})\dot{q} + F_s \text{sgn}(\dot{q}) + \mathbf{g}(q))$

$\hat{\mathbf{D}}(q)$ คือค่าประมาณของ $\mathbf{D}(q)$

แทนค่าสมการที่ (5.1) ลงในสมการที่ (5.48) เราจะได้ว่า

$$\mathbf{D}(q)\ddot{q} + \mathbf{N}(q, \dot{q}) = \hat{\mathbf{D}}(q)y + \hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) \quad (5.49)$$

จัดรูปแบบของสมการที่ (5.49) จะได้

$$\ddot{q} = y + (\mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q) - \mathbf{I})y + \mathbf{D}^{-1}(\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) - \mathbf{N}(q, \dot{q}))$$

หรือ

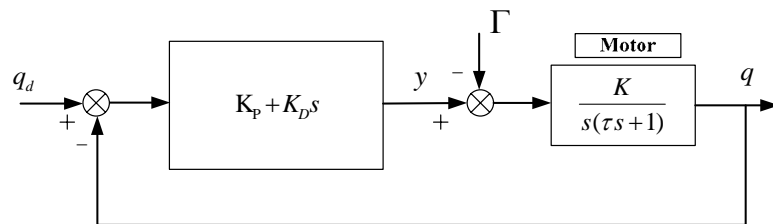
$$\ddot{q} = y - \Gamma \quad (5.50)$$

เมื่อเทอมความไม่แน่นอนคือ

$$\Gamma = (\mathbf{I} - \mathbf{D}^{-1}(q)\hat{\mathbf{D}}(q))y - \mathbf{D}^{-1}(\hat{\mathbf{N}}(q, \dot{q}) - \mathbf{N}(q, \dot{q})) \quad (5.51)$$

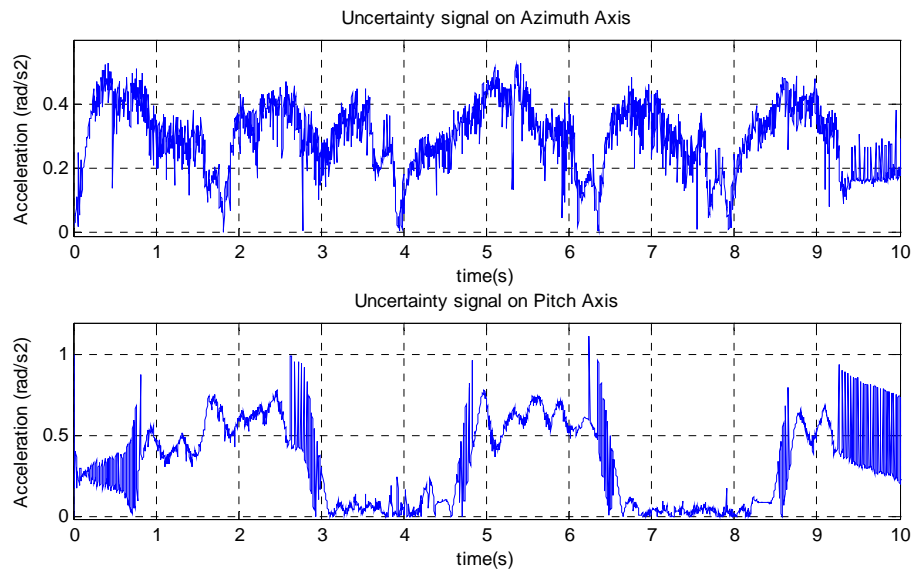
ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของระบบสามารถหาได้จาก $|y - \ddot{q}_d|$

แต่เนื่องจากระบบควบคุมแบบ Inverse dynamic control มีผลกระทบกับเทอมความไม่แน่นอนทำให้ยากต่อการวัดค่าที่ถูกต้อง เพื่อแก้ปัญหานี้จึงนำระบบควบคุมแบบพีดีดังรูปที่ 5.8 มาใช้หาเทอมความไม่แน่นอนของระบบในแต่ละแนวแกน



รูปที่ 5.8 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมแบบพีดีที่ใช้ในการหาสัญญาณความไม่แน่นอน

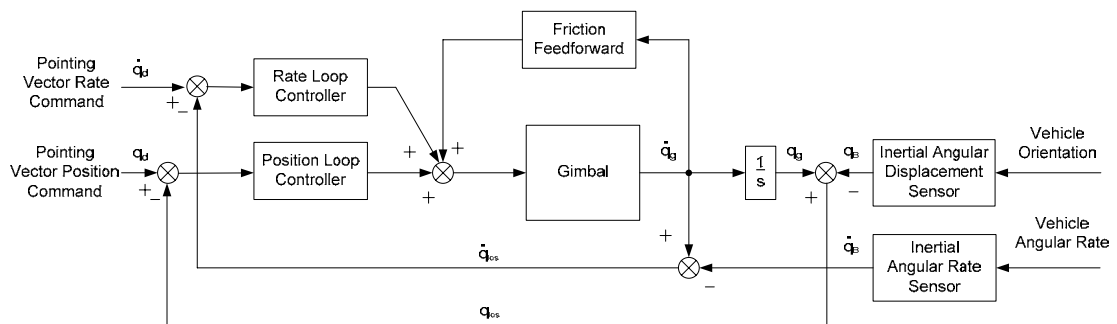
จากผลการทดลอง ได้สัญญาณความไม่แน่นอนของระบบในแนวแกน Azimuth และ Pitch ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถกำหนดขอบเขตความไม่แน่นอนของระบบแต่ละแนวแกนได้ คือ $|\Gamma_A| < 0.6$, $|\Gamma_P| < 1.2$ rad/s².



รูปที่ 5.9 สัญญาณ $|\Gamma|$ ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Azimuth และ Pitch

5.4 ระบบควบคุม Indirect LOS Stabilization Control

ในการควบคุมโครงสร้างแบบกิมเบลให้สามารถรักษาแนวการมองเห็นนั้นสามารถควบคุมได้โดยการนำตัวตรวจรู้ไปติดตั้งเข้ากับส่วนฐานที่เคลื่อนที่ เนื่องจากว่าส่วนฐานของโครงสร้างแบบกิมเบลนี้จะต้องนำไปติดตั้งเข้ากับอากาศยาน เมื่ออากาศยานเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือความหน่วงนั้นจะทำให้เกิดแรงบิดเกิดขึ้นที่โครงสร้างของกิมเบล อันเนื่องมาจากมวลที่ไม่สมดุล อีกทั้งการเลี้ยวหรือการเปลี่ยนแปลงทิศทางเคลื่อนที่ของอากาศยานนั้นจะทำให้แนวการมองเห็นนั้นไม่สามารถชี้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้

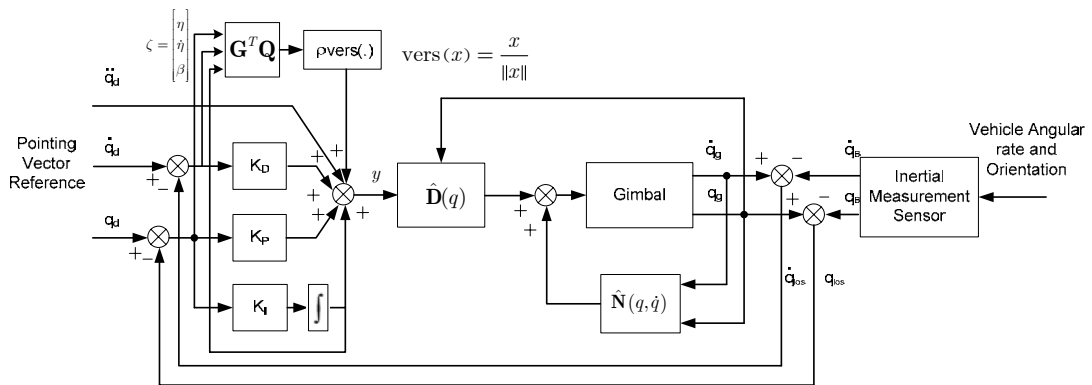


รูปที่ 5.10 แผนภาพการควบคุมแบบ Indirect LOS

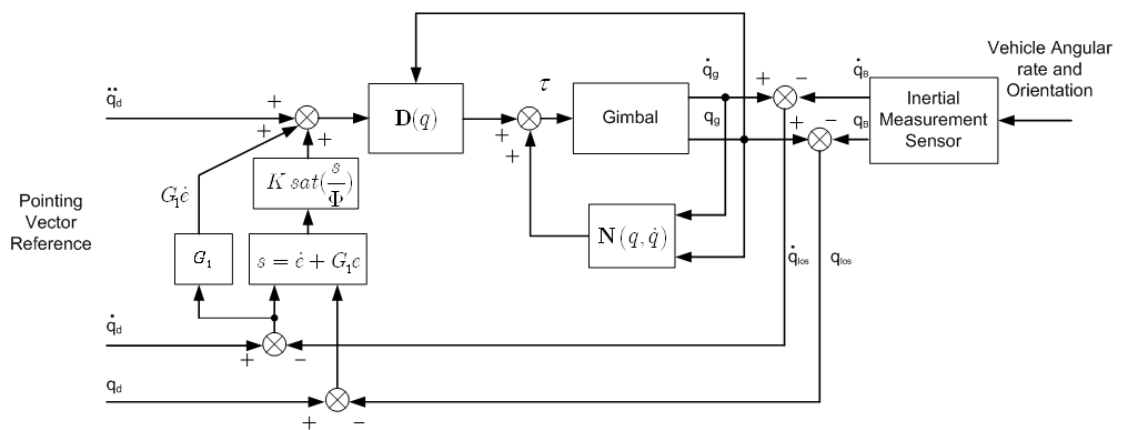
ในการควบคุมแบบ indirect นั้น ตัวตรวจรู้ที่ติดตั้งที่ส่วนฐานจะวัดมุมหรือทิศทางของอากาศยานเทียบกับแกนอ้างอิงอิสระแกนหนึ่ง (inertial frame) หลังจากนั้นก็จะแปลงมุมที่ได้นี้เป็นมุมที่เทียบกับแกนอ้างอิงที่ส่วนฐานของโครงสร้างกิมเบล และตัวควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุม

มุมของมอเตอร์ทั้งสองตัวเพื่อปรับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นให้สามารถรักษาทิศทางของแนวการมองเห็นได้ เนื่องจาก ว่าวิธีการนี้ไม่ได้ทำการวัดมุมของแนวการมองเห็นนี้ได้โดยตรงจึงเรียกวิธีการนี้ว่า indirect LOS ซึ่งแผนภาพการควบคุมนี้แสดงในรูปที่ 5.10

จากทฤษฎีของระบบควบคุมแบบ Robust inverse dynamics control และ Sliding mode control เมื่อนำมาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ indirect LOS นั้น ในการที่จะควบคุมแนวการมองเห็นของโครงสร้างแบบกิมเบลนั้น จะแบ่งเป็นสองระบบคือการควบคุมระบบภายใน (inner loop) เราจะใช้การควบคุมแบบ Robust inverse dynamics control และ Sliding mode control ส่วนการควบคุมระบบทั้งหมดหรือตัวทำหน้าที่แปลงมุมจากการเคลื่อนที่ของอากาศยานมาเป็นมุมในแนวการมองเห็นนั้นเราจะใช้วิธีการ indirect ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ซึ่งเป็นแผนภาพการควบคุมแบบ Robust inverse dynamics control และ Sliding mode control



รูปที่ 5.11 แผนภาพระบบควบคุมแบบ Robust inverse dynamics control



รูปที่ 5.12 แผนภาพระบบควบคุมแบบสไลด์ดีดิง

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

เนื่องจากการควบคุมระบบกล้องแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ และส่วนการติดตามวัตถุด้วยภาพ การทดลองจึงแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ และการทดสอบโปรแกรมการติดตามวัตถุด้วยภาพ

6.1 การทดสอบระบบควบคุม

ในการทดสอบระบบควบคุมกับโครงสร้างกิมเบลนั้น ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยได้สร้างโครงเหล็กขนาด $2.4 \times 2.4 \times 1.8$ เมตร แล้วแขวนโครงสร้างกิมเบลให้ห้อยหัวลงมาดังแสดงในรูปที่ 6.1 สำหรับการควบคุมในเบื้องต้นนี้ได้ใช้ชุดคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะเป็นตัวประมวลผลการควบคุมโครงสร้าง จากชุดโครงสร้างนี้จะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือชุดรับการสั่นสะเทือนซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการสั่นจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศยานโดยฉับพลันซึ่งก่อให้เกิดแรงกระชาก มาเป็นการเคลื่อนที่แนวตั้ง และได้ติดตั้งเครื่องมือวัดการหมุนรอบไว้ที่ส่วนฐานของกิมเบลดังแสดงในรูปที่ 6.2 เครื่องมือวัดการหมุนรอบนี้จะทำหน้าที่วัดสัญญาณรบกวนของส่วนฐานที่โครงสร้างกิมเบลนี้ติดตั้งอยู่



รูปที่ 6.1 สภาพแวดล้อมของการทดลอง

ในการควบคุมโครงสร้างแบบกิมเบลที่ติดตั้งกับอากาศยานหรือส่วนฐานที่มีการเคลื่อนที่นั้น ได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนคือ การทดสอบเมื่อส่วนฐานที่โครงสร้างกิมเบลนี้ติดตั้งไม่มีการเคลื่อนที่ และส่วนการทดสอบเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากกระทำต่อส่วนฐานที่

โครงสร้างกิมเบลนี้ติดตั้ง วัตถุประสงค์ในการทดลองคือ ต้องการควบคุมให้แนวการมองเห็น (LOS) ของโครงสร้างกิมเบลนี้ไปยังแนวที่ต้องการโดยการควบคุมที่ตัวขับทั้งสองตัวคือตัวขับทั้งสองตัวคือตัวขับในแนว azimuth และตัวขับในแนว pitch โดยทำการป้อนสัญญาณอ้างอิงแบบต่างๆ ให้กับตัวควบคุมเพื่อทำการควบคุมตัวขับทั้งสองตัวนี้ให้เคลื่อนที่ตามลักษณะที่ต้องการได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 6.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดการหมุนรอบที่ส่วนฐานของโครงสร้างกิมเบล

ส่วนที่ 1 ในเบื้องต้นนั้นได้ทดสอบโดยให้โครงสร้างแบบกิมเบลนี้เคลื่อนที่ไปเป็นมุมที่ต้องการ โดยการป้อนลักษณะการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนหมุนของโครงสร้างแบบ กิมเบลให้มีลักษณะเป็นแบบกราฟตัวเอส (s-curve) โดยกำหนดให้ค่าตำแหน่งสุดท้าย x_f ค่าความเร็วสูงสุด v_{\max} และ ค่าความเร่งสูงสุด a_{\max} มีค่าดังนี้

$$x_f = 1 \text{ rad}$$

$$v_{\max} = 0.5 \text{ rad/s}$$

$$a_{\max} = 0.8 \text{ rad/s}^2$$

ในการควบคุมนั้นได้ทดลองใช้ระบบควบคุม 3 แบบคือ

1. Inverse Dynamics Control
2. Robust Inverse Dynamics Control
3. Sliding Mode Control

ส่วนที่ 2 การทดสอบ Indirect LOS Stabilization Control โดยให้โครงสร้างแบบ กิมเบลนี้ สามารถรักษาแนวการมองเห็นเมื่อมีการรบกวนจากส่วนฐานมากระทำต่อโครงสร้าง กิมเบล ในการควบคุมนั้นได้ทดลองใช้ระบบควบคุม 2 แบบคือ

1. Robust Inverse Dynamics Control
2. Sliding Mode Control

โดยการทดลองนี้ได้ทำการป้อนสัญญาณนำเข้า 3 แบบคือสัญญาณนำเข้าแบบค่าคงที่ สัญญาณนำเข้าแบบ s-curve และสัญญาณนำเข้าแบบไซน์ (Sinusoidal input) ในขณะเดียวกันก็ได้ทำการ สันให้ส่วนฐานเคลื่อนที่เพื่อเป็นการสร้างสัญญาณรบกวน

6.1.1 การทดสอบเคลื่อนที่กิมเบลไปยังมุมที่ต้องการ

ในการควบคุมนั้นได้ป้อนสัญญาณนำเข้าแบบ s-curve โดยกำหนดให้ค่า ตำแหน่งสุดท้าย x_f ค่าความเร็วสูงสุด v_{\max} และ ค่าความเร่งสูงสุด a_{\max} มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}x_f &= 1 \text{ rad} \\v_{\max} &= 0.5 \text{ rad/s} \\a_{\max} &= 0.8 \text{ rad/s}^2\end{aligned}$$

เลือกค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม Inverse dynamics control คือ

$$K_P = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 260 \end{bmatrix}, \quad K_D = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad K_I = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

เลือกค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม Robust Inverse dynamics control คือ

$$K_P = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 260 \end{bmatrix}, \quad K_D = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad K_I = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 13.2523 & 0 & 0.6301 & 0 & 62.5090 & 0 \\ 0 & 27.3128 & 0 & 0.2423 & 0 & 62.5059 \\ 0.6301 & 0 & 0.2260 & 0 & 12.5000 & 0 \\ 0 & 0.2423 & 0 & 0.1485 & 0 & 12.5000 \\ 62.5059 & 0 & 12.5000 & 0 & 1,250.0252 & 0 \\ 0 & 62.5059 & 0 & 12.5000 & 0 & 3,250.0097 \end{bmatrix}$$

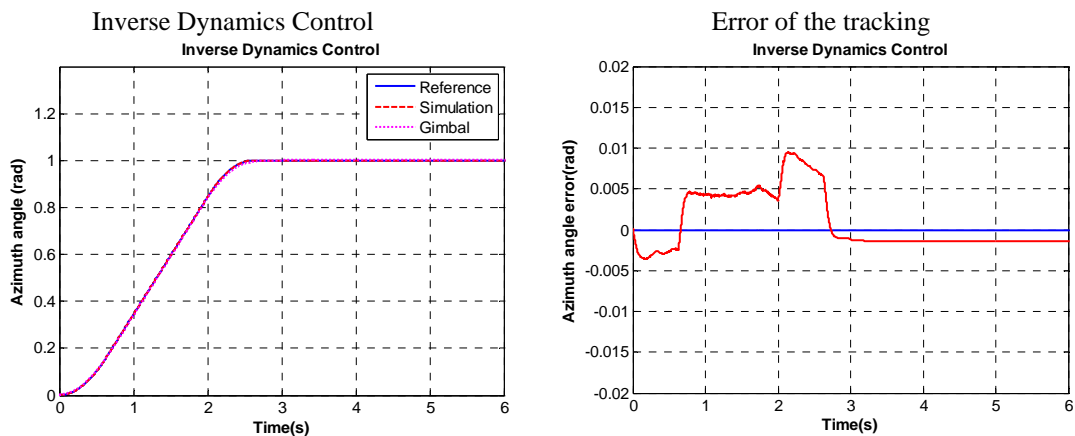
$$\rho = 10, \quad \varepsilon = 0.04, \quad \text{และ } \mathbf{P} = \text{diag}(10)$$

และเลือกค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม Sliding mode control คือ

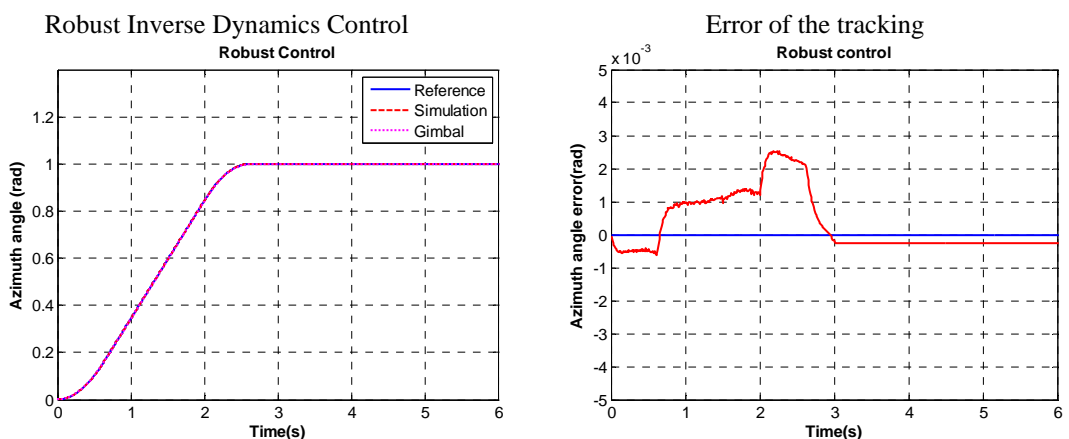
$$G = \begin{bmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 25 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 6.3-6.8

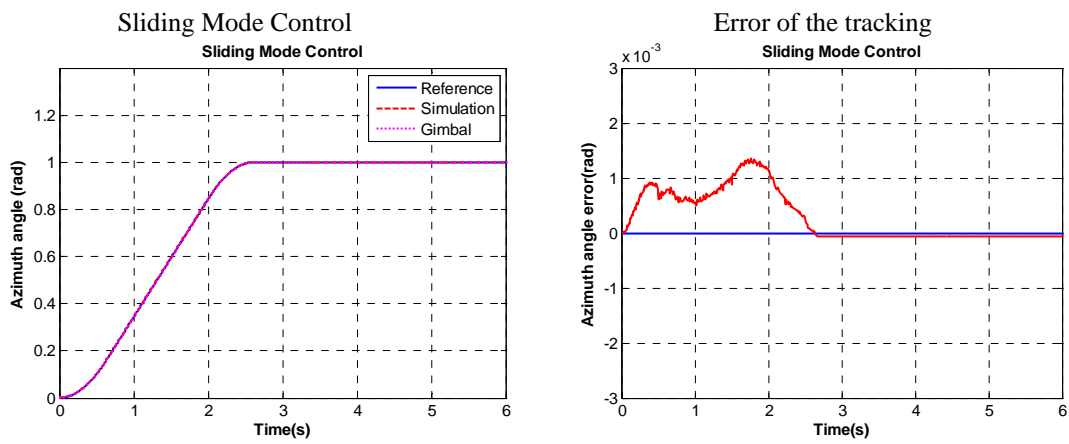
จากรูปที่ 6.3 - 6.8 นั้นเป็นการทดลองควบคุมให้โครงสร้างแบบกิมเบลนี้เคลื่อนที่ในแนวแกน azimuth และแนวแกน pitch โดยให้เคลื่อนที่เป็นมุม 1 เรเดียนด้วยความเร็วสูงสุด 0.5 เรเดียน/วินาที และความเร่งสูงสุด 0.8 เรเดียน/วินาที² โดยใช้ตัวควบคุมทั้งสามแบบ ซึ่งจะพบว่าตัวควบคุมนั้นสามารถควบคุมให้โครงสร้างแบบกิมเบลนี้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ จากการควบคุมการเคลื่อนที่นี้ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคือ ในช่วงของการเคลื่อนที่ประมาณ 0.001 เรเดียน ทั้งแนวการหมุนแบบ azimuth และแนวแกน pitch



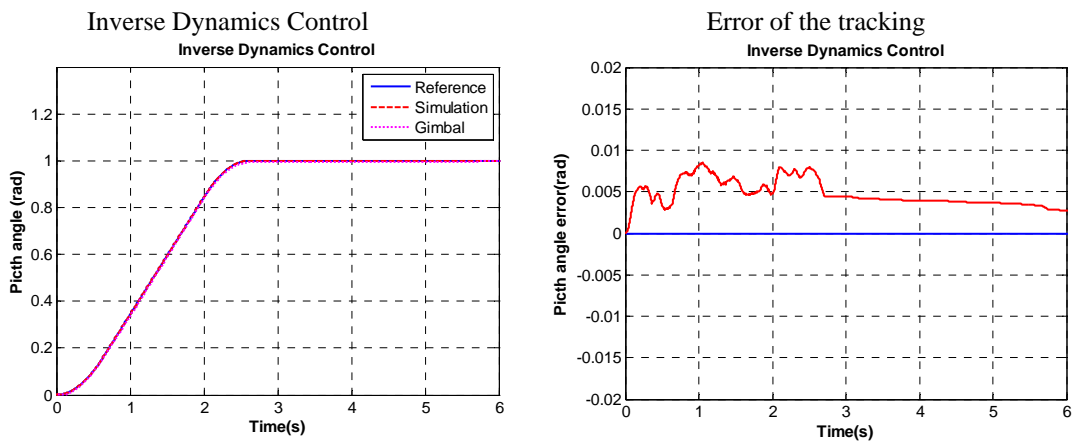
รูปที่ 6.3 ผลการควบคุม Inverse Dynamics Control ในแนวแกน azimuth



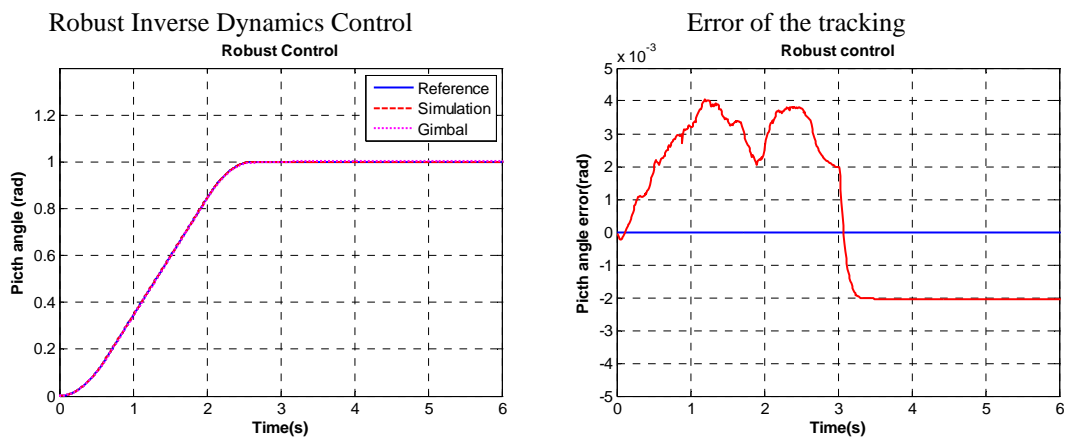
รูปที่ 6.4 ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control ในแนวแกน azimuth



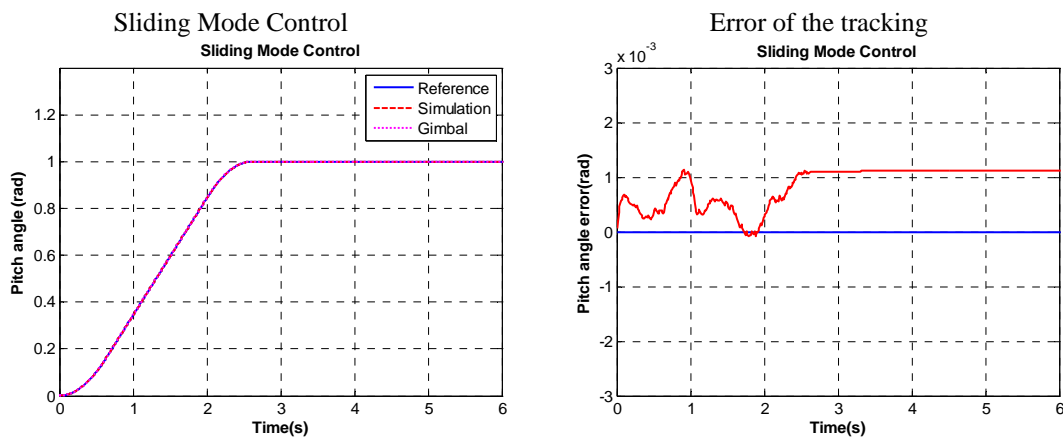
รูปที่ 6.5 ผลการควบคุม Sliding Mode Control ในแนวแกน azimuth



รูปที่ 6.6 ผลการควบคุม Inverse Dynamics Control ในแนวแกน pitch



รูปที่ 6.7 ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control ในแนวแกน pitch



รูปที่ 6.8 ผลการควบคุม Sliding Mode Control ในแนวแกน pitch

6.1.2 การทดสอบควบคุมแบบ Indirect LOS Stabilization Control

ในการควบคุมโครงสร้างแบบกิมเบลที่ติดตั้งกับอากาศยานหรือส่วนฐานที่มีการเคลื่อนที่นั้น เนื่องจากเราได้ติดตั้งเครื่องมือวัดการหมุนรอบไว้ที่ตำแหน่งของส่วนฐานเพื่อใช้ในการวัดมุมของส่วนฐานและวัดอัตราเชิงมุมที่มีการเคลื่อนที่ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ของส่วนฐานที่ได้มีการติดตั้งโครงสร้างแบบกิมเบลไว้ นั่น การทดสอบจะเลียนแบบเหมือนการปฏิบัติงานจริง โดยให้โครงสร้างแบบกิมเบลนี้เคลื่อนที่ไปเป็นมุมที่เราต้องการ โดยการป้อนลักษณะการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนหมุนของโครงสร้างเป็นแบบสัญญาณนำเข้าเป็นค่าคงที่ สัญญาณนำเข้าแบบ s-curve และสัญญาณนำเข้าแบบไซน์ ในขณะเดียวกันก็ได้ทำการสั่งให้ส่วนฐานเคลื่อนที่เพื่อเป็นการสร้างสัญญาณรบกวนซึ่งมีแอมพลิจูดมากกว่าการสั่งของอากาศยาน เพื่อยืนยันเมื่อติดตั้งบนอากาศยานแล้วจะสามารถรักษาเสถียรภาพการควบคุมไว้ได้ โดยทดลองใช้ระบบควบคุม 2 แบบคือ

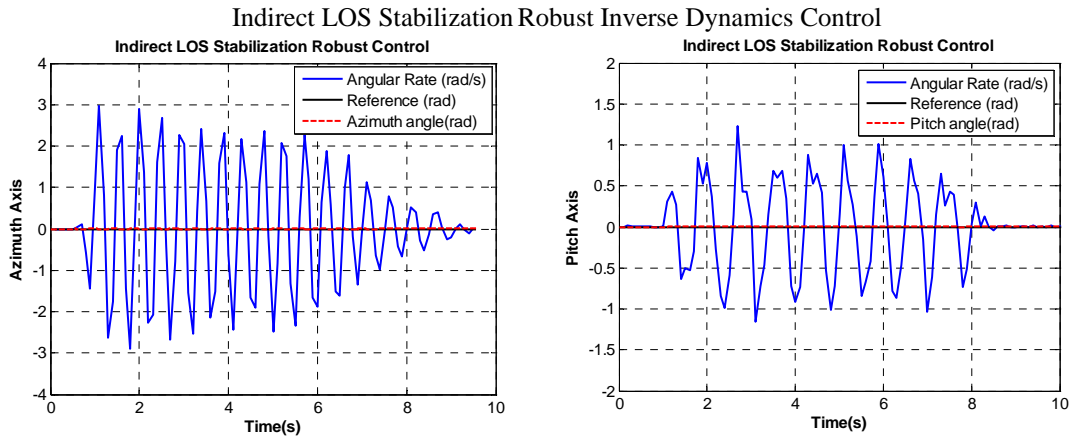
1. Robust Inverse Dynamics Control
2. Sliding Mode Control

เลือกค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมทั้งสองแบบเหมือนกับการทดสอบในหัวข้อที่ 6.1.1

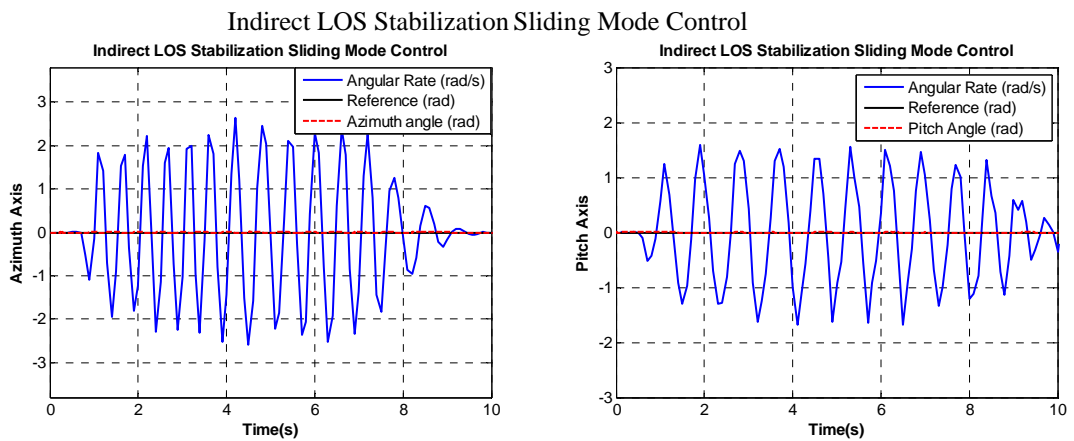
การควบคุมแบบสัญญาณนำเข้าเป็นค่าคงที่

การทดลองควบคุมให้โครงสร้างกิมเบลรักษาแนวการมองเห็น (LOS) ให้อยู่ในทิศทางเดิมโดยการป้อนสัญญาณอ้างอิงเท่ากับศูนย์ให้กับระบบควบคุมและสร้างสัญญาณรบกวนให้กับส่วนฐานของโครงสร้างโดยการแกว่งโครงสร้างไปมา โดยตัวควบคุมแบบ Robust Inverse

Dynamics Control และตัวควบคุมแบบ Sliding Mode Control ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control เมื่อมีการรบกวนพื้นฐาน



รูปที่ 6.10 ผลการควบคุม Sliding Mode Control เมื่อมีการรบกวนพื้นฐาน

รูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 แสดงผลการทดลองการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control และ Sliding Mode Control ให้โครงสร้างกิมเบลนี้รักษาแนวการมองเห็น โดยการลดสัญญาณการรบกวนที่มาจากเคลื่อนที่ของส่วนฐานในแนวแกน azimuth และแนวแกน pitch พบว่าระบบควบคุมทั้งสองสามารถรักษาตำแหน่งของแนวการมองเห็นให้คงที่ได้ในขณะที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกมากกระทำ

การควบคุมเมื่อสัญญาณนำเข้าเป็นแบบ s-curve

ในการควบคุมนี้ได้ป้อนสัญญาณนำเข้าแบบ s-curve โดยกำหนดให้ค่าตำแหน่งสุดท้าย x_f ค่าความเร็วสูงสุด v_{\max} และ ค่าความเร่งสูงสุด a_{\max} มีค่าดังนี้

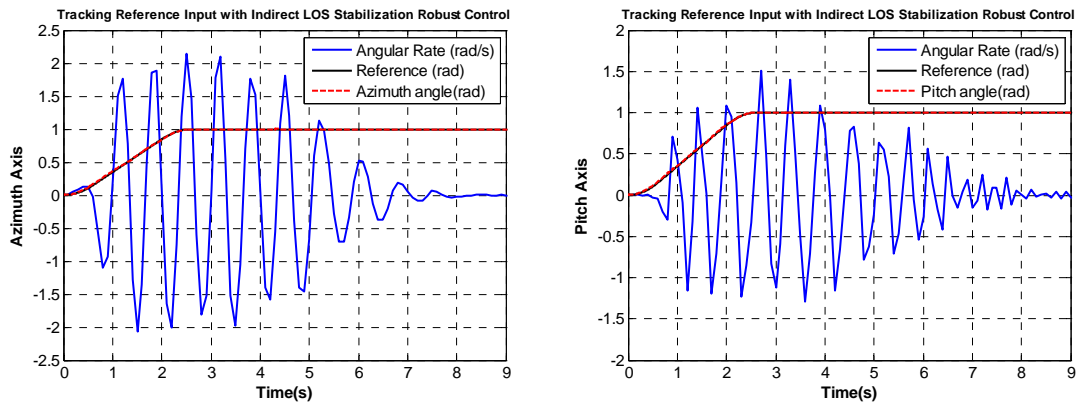
$$x_f = 1 \text{ rad}$$

$$v_{\max} = 0.5 \text{ rad/s}$$

$$a_{\max} = 0.8 \text{ rad/s}^2$$

โดยตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control และตัวควบคุมแบบ Sliding Mode Control ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 ตามลำดับ

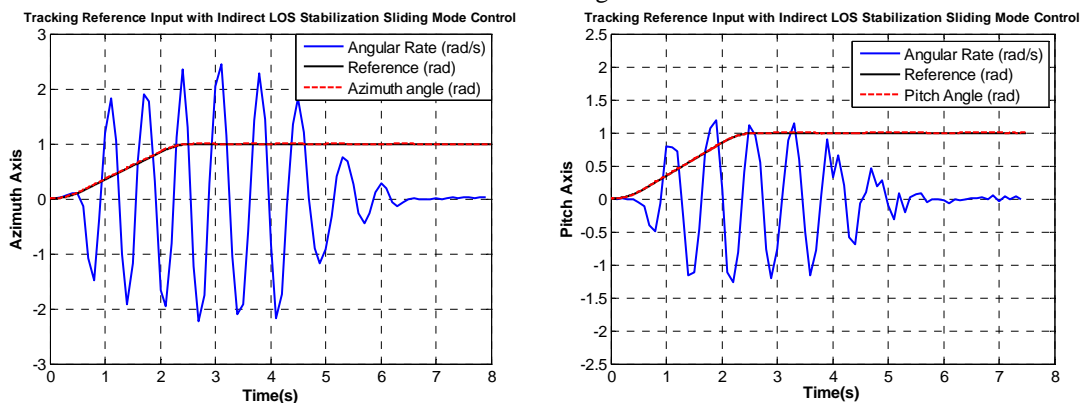
Indirect LOS Stabilization Robust Inverse Dynamics Control



รูปที่ 6.11 ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control

เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบ s-curve และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน

Indirect LOS Stabilization Sliding Mode Control



รูปที่ 6.12 ผลการควบคุม Sliding Mode Control

เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบ s-curve และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน

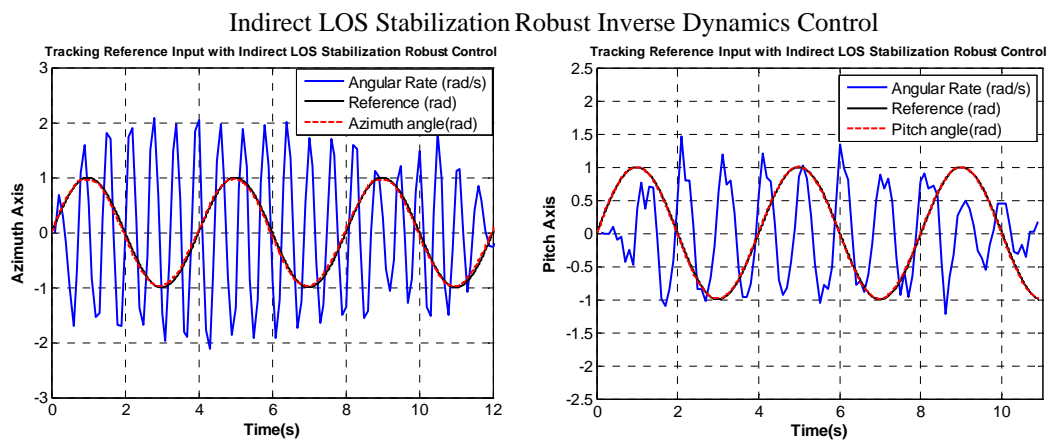
รูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 แสดงผลการทดลองการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control และ Sliding Mode Control ให้โครงสร้างกิมเบลนี้เคลื่อนที่ตามลักษณะของสัญญาณนำเข้าไปแบบ s-curve เพื่อควบคุมแนวการมองเห็น ขณะที่สัญญาณรบกวนมากระทำ พบว่าตัวควบคุมทั้งสองนั้นสามารถที่จะควบคุมให้โครงสร้างกิมเบลทั้งสองแนวแกนให้เคลื่อนที่ตามลักษณะของสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการได้และยังสามารถลดสัญญาณการรบกวนที่มาจากเคลื่อนที่ของส่วนฐานได้อีกด้วย

การควบคุมเมื่อสัญญาณนำเข้าไปเป็นฟังก์ชันไซน์

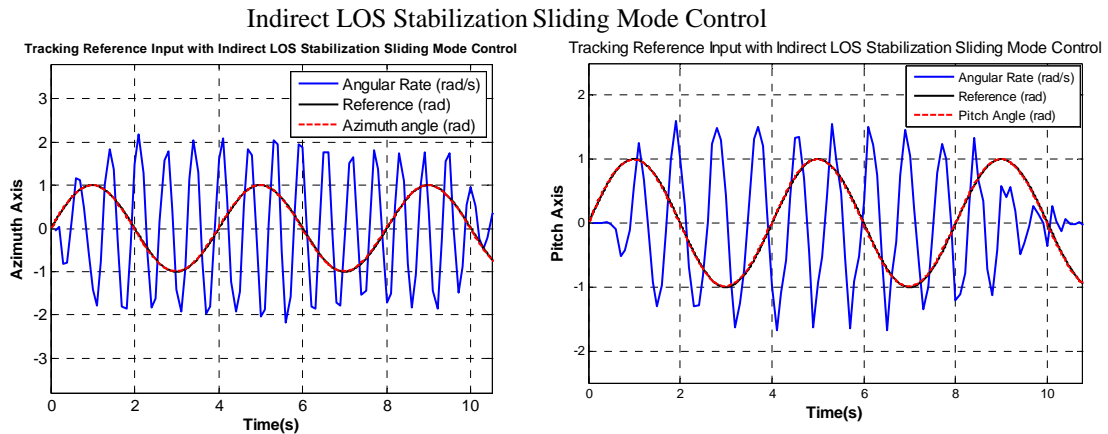
ในการควบคุมนั้นได้ป้อนสัญญาณนำเข้าไปแบบไซน์ โดยกำหนดให้รูปแบบของการเคลื่อนที่มีลักษณะดังนี้

$$x = \sin(0.5t)$$

โดยตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control และตัวควบคุมแบบ Sliding Mode Control ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 ตามลำดับ



รูปที่ 6.13 ผลการควบคุม Robust Inverse Dynamics Control เมื่อมีสัญญาณนำเข้าไปแบบไซน์ และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน



รูปที่ 6.14 ผลการควบคุม Sliding Mode Control

เมื่อมีสัญญาณนำเข้าแบบไซน์ และมีการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน

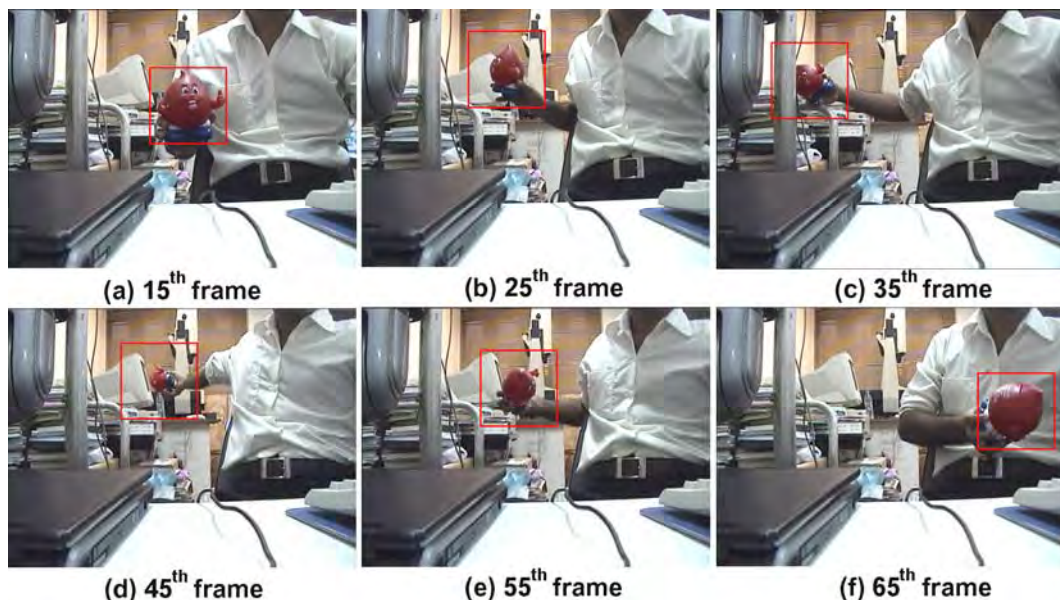
รูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 แสดงผลการทดลองการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control และ Sliding Mode Control ให้โครงสร้างกิมเบลนี้เคลื่อนที่ตามลักษณะของสัญญาณนำเข้าแบบไซน์ เพื่อควบคุมแนวการมองเห็น ขณะที่สัญญาณรบกวนมากกระทำ พบว่าตัวควบคุมทั้งสองนั้นสามารถที่จะควบคุมให้โครงสร้างกิมเบลทั้งสองแนวแกนให้เคลื่อนที่ตามลักษณะของสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการได้และยังสามารถลดสัญญาณการรบกวนที่มาจาก การเคลื่อนที่ของส่วนฐานได้อีกด้วย

6.2 การทดสอบส่วนการติดตามวัตถุด้วยภาพ

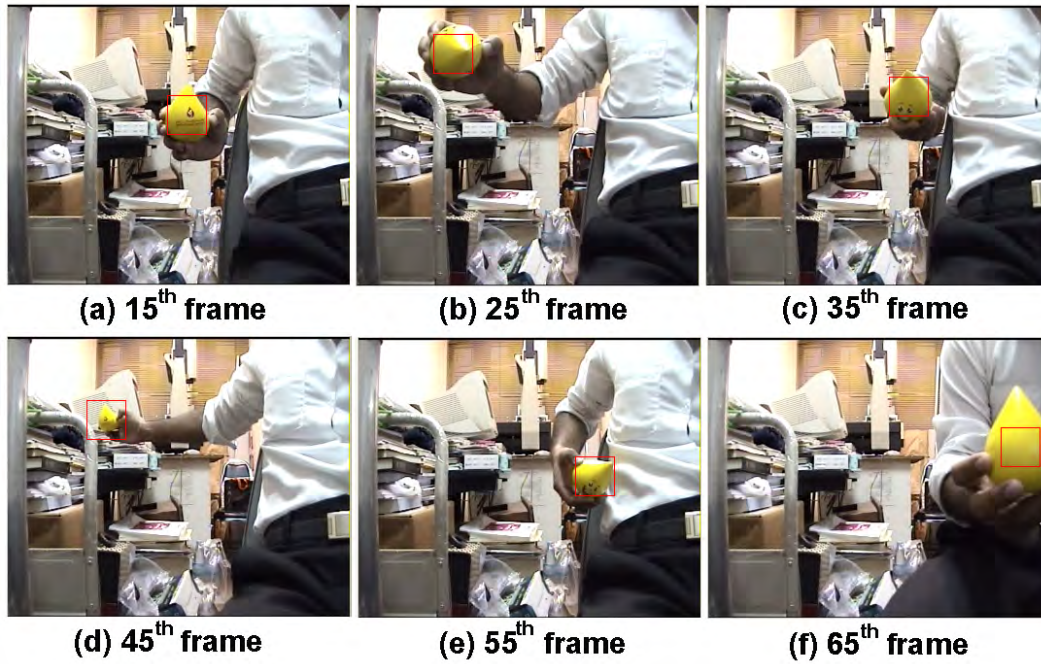
การทดลองติดตามวัตถุด้วยภาพ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับภาพวิดีโอขนาด 640X480 พิกเซล เมื่อเลือกโหมดการติดตามวัตถุ การติดตามจะเริ่มต้นเมื่อผู้ใช้งานใช้เมาส์กดลงบนภาพวัตถุเพื่อระบุเป้าหมาย โปรแกรมจะวาดกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อแสดงเป็นหน้าต่างระบุเป้าหมาย ซึ่งฮีสโตแกรมของวัตถุจะถูกสร้างจากภาพภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้ โดยการทดลองติดตามวัตถุด้วยภาพแบบเวลาจริง ความถี่ของการแสดงภาพแต่ละเฟรมอยู่ที่ประมาณ 20-30 เฟรมต่อวินาที บนไนต์บูคความเร็ว 2 GHz โดยการทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ 1.ทดสอบส่วนติดตามวัตถุ 2.ทดสอบส่วนติดตามวัตถุและการควบคุมการเคลื่อนที่ของกล้อง 3.ทดสอบส่วนติดตามวัตถุ ส่วนการควบคุมการเคลื่อนที่ของกล้อง และส่วนลดการสั่นสะเทือนจากภายนอก

6.2.1 การติดตามวัตถุด้วยภาพ แบบไม่บังคับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ

การทดลองส่วนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพเฉพาะส่วนติดตามวัตถุด้วยภาพเพียงอย่างเดียว โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. การทดสอบเมื่อวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง 2. การทดสอบเมื่อวัตถุถูกบดบังบางส่วน 3.การทดสอบติดตามวัตถุที่มีลักษณะเหมือนกันเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน

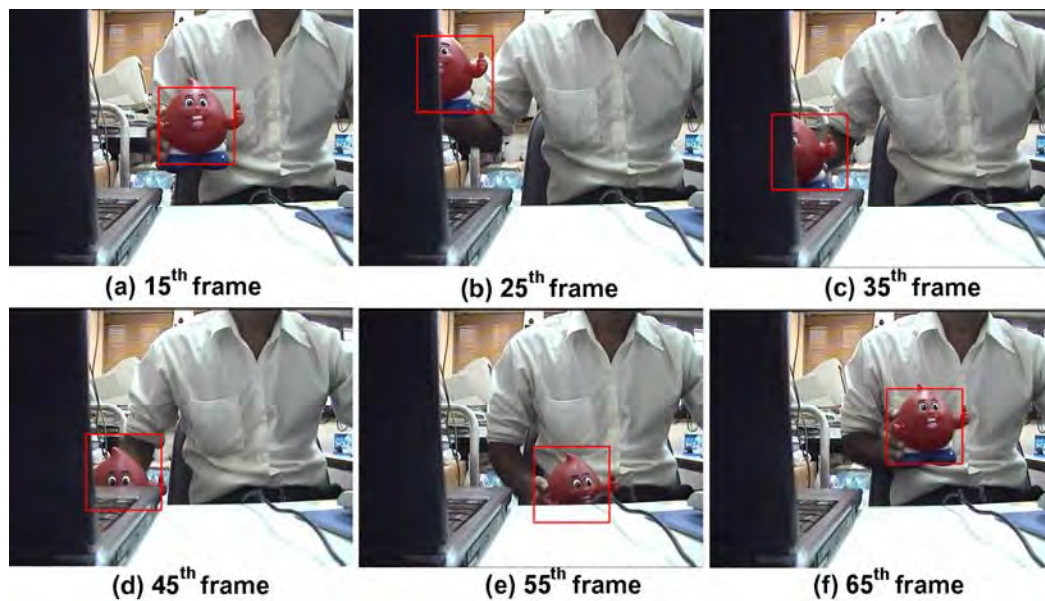


รูปที่ 6.15 ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง

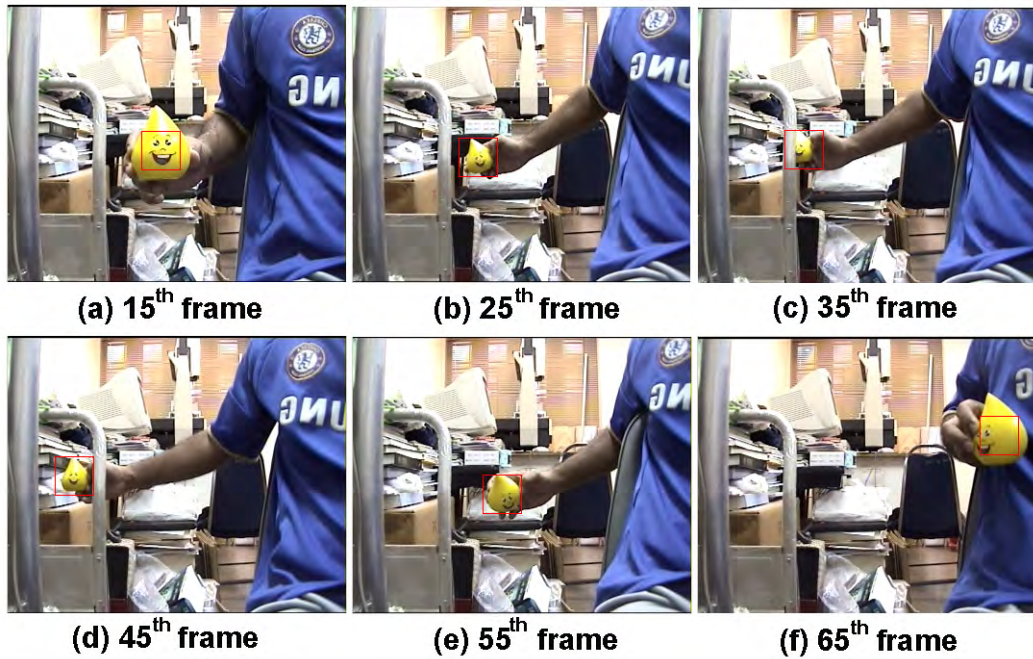


รูปที่ 6.16 ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง

รูปที่ 6.15 และ 6.16 เป็นผลการทดสอบการทดสอบการติดตามวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง โดยทดสอบกับตุ๊กตาที่มีรูปร่างไม่เป็นเรขาคณิต ภาพตุ๊กตาที่ปรากฏในเฟรมต่างมีการเคลื่อนที่ และเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไป ผลการติดตามวัตถุพบว่าสามารถติดตามวัตถุได้ 100 % ไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

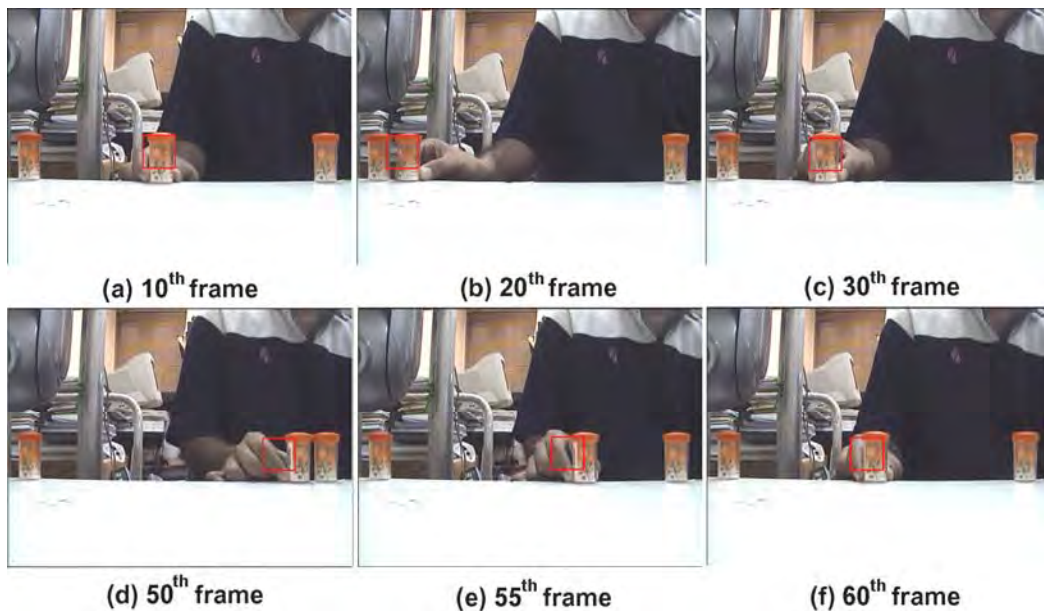


รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่ถูกบังบางส่วน



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่ถูกบังบางส่วน

รูปที่ 6.17 และ 6.18 เป็นผลการทดสอบการติดตามวัตถุที่ถูกบังบางส่วน ภาพตุ๊กตาที่ปรากฏในบางเฟรมจะถูกบังโดยสิ่งแวดล้อมไปบางส่วน ผลการติดตามวัตถุพบว่ายังสามารถติดตามวัตถุได้ แม้ว่าตุ๊กตาที่ปรากฏบนภาพจะเหลือเพียงครึ่งตัวก็ตาม



รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบติดตามวัตถุที่มีลักษณะเหมือนกันกับวัตถุอื่นที่ปรากฏบนภาพ

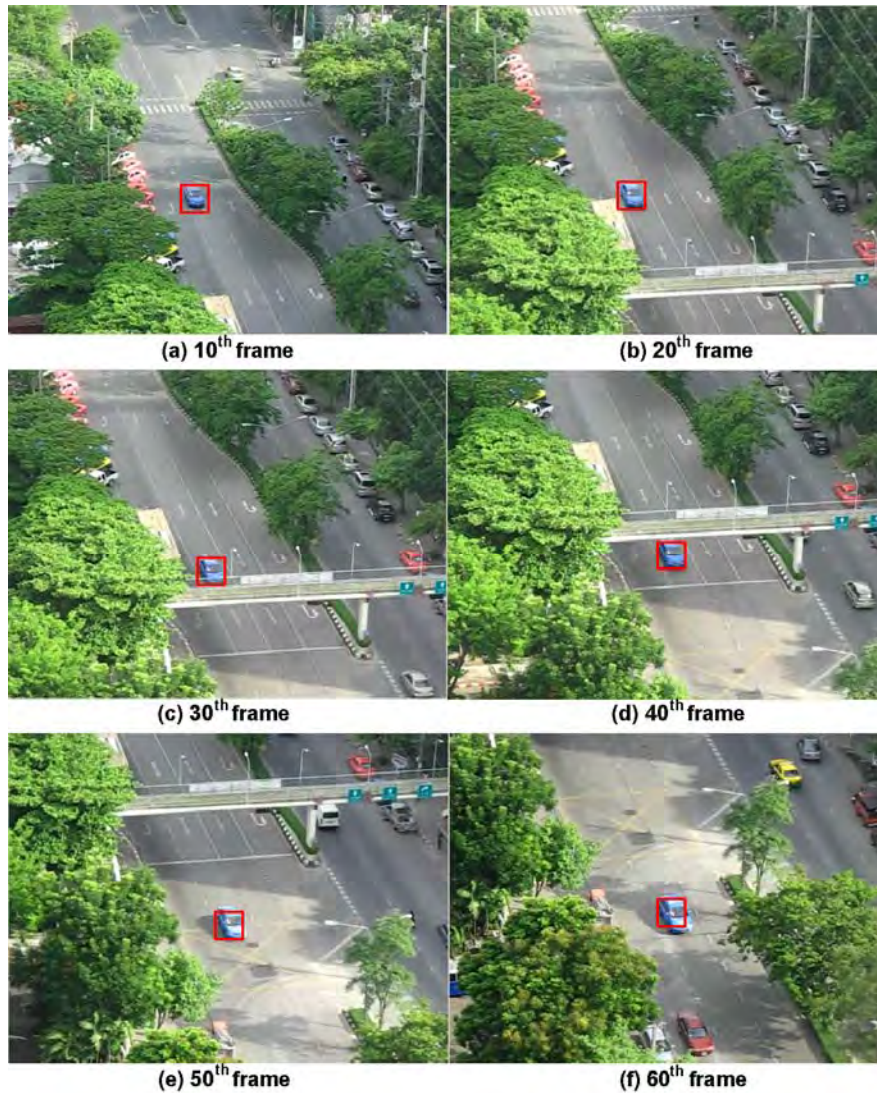
รูปที่ 6.19 เป็นผลการทดสอบติดตามวัตถุที่มีลักษณะเหมือนกันกับวัตถุอื่นที่ปรากฏบนภาพ ในการทดสอบได้ทดลองกับขด 3 ใบที่มีขนาดและรูปร่างเหมือนกัน ในขณะที่ขดเป้าหมายอยู่ห่างจากขดใบอื่นจะไม่เกิดปัญหาการติดตามผิดพลาด แต่ในกรณีที่ขดเป้าหมายเคลื่อนที่เข้ามาติดขดใบอื่นอาจเกิดปัญหาการติดตามผิดพลาดได้ เนื่องจากขดที่ไม่ใช่เป้าหมายเคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่หรือกรอบที่ใช้ในการคำนวณหา (ROI) ทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้ว่าวัตถุใดเป็นวัตถุเป้าหมาย โดยปัญหานี้สามารถลดความผิดพลาดได้โดยใช้ตัวประมาณค่าคาลมาน (Kalman estimator) ในการกรองสัญญาณรบกวน และประมาณค่าตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพทำให้ตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ปรากฏบนภาพมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

6.2.2 การติดตามวัตถุด้วยภาพ แบบบังคับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้ เพื่อบังคับการเคลื่อนที่ให้กล้องกิมเบลรักษาแนวการมองเห็นให้วัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณกึ่งกลางภาพและวัตถุเป้าหมายไม่หลุดออกจากเฟรม โดยใช้ระบบควบคุมสไลด์ดิงในการควบคุมการเคลื่อนที่โครงสร้างกล้องกิมเบล โดยสัญญาณนำเข้าสู่เส้นทางเคลื่อนที่สร้างจากส่วนการติดตามการเคลื่อนที่

การที่กล้องมีการเคลื่อนที่ย่อมมีผลต่อความคมชัดของภาพ และเพิ่มความยากให้การประมวลผลภาพ ประสิทธิภาพของการติดตามวัตถุก็ขึ้นกับปัจจัยสำคัญหลายประการเช่น ระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ ซึ่งถ้าวัตถุอยู่ใกล้กล้องมากทำให้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุในภาพมาก ยิ่งถ้าวัตถุมีความเร็วสูงการบังคับให้กล้องเคลื่อนที่ติดตามวัตถุก็จะยากขึ้นด้วยอีกประการหนึ่งคือตัววัตถุเป้าหมาย ซึ่งถ้าวัตถุมีความใกล้เคียงกับภาพพื้นหลังมาก ก็ทำให้ยากต่อการแยกวัตถุออกจากภาพพื้นหลัง ความผิดพลาดในการติดตามวัตถุเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น วัตถุถูกบัง สภาพแสงหรือสิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงมาก วัตถุเป้าหมายมีผิวมันวาวทำให้เกิดการสะท้อน หรือการติดตามวัตถุไม่ทันเนื่องจากวัตถุอยู่ใกล้กล้อง และวัตถุมีความเร็วสูง ซึ่งผู้บังคับกล้องกิมเบลสามารถบังคับการเคลื่อนที่ของกล้องให้เป้าหมายกลับเข้ามาอยู่ในเฟรมเพื่อให้โปรแกรมจะทำการค้นหาวัตถุได้อีกครั้ง

รูปที่ 6.20 เป็นผลการทดสอบติดตามวัตถุ โดยมีการควบคุมกล้องกิมเบลให้การเคลื่อนที่ติดตามวัตถุ พบว่ากล้องกิมเบลสามารถรักษาแนวการมองเห็นให้วัตถุเป้าหมายอยู่บริเวณกึ่งกลางภาพได้



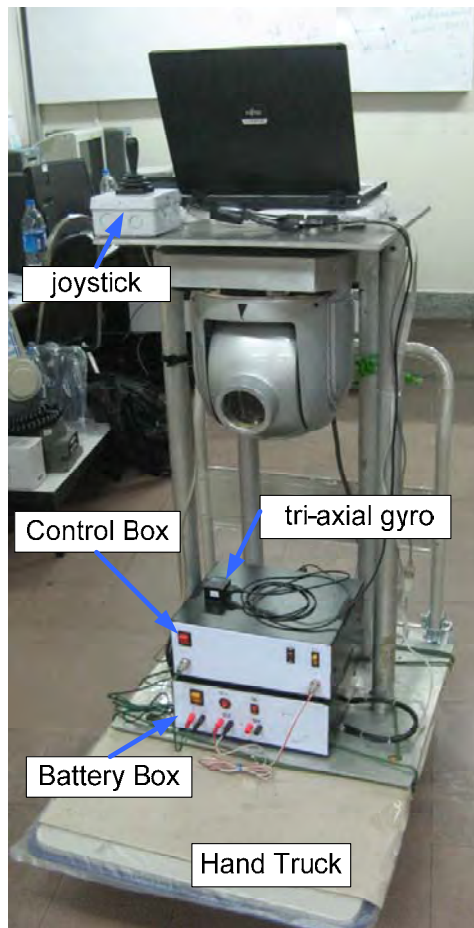
รูปที่ 6.20 ผลการทดสอบติดตามวัตถุ โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ

6.2.3 การติดตามวัตถุด้วยภาพ ขณะพื้นฐานของอุปกรณ์การภาพมีการเคลื่อนที่

ในการทดสอบภาคสนามอุปกรณ์การภาพจะถูกติดตั้งเข้ากับโครงสร้างของอากาศยาน เพื่อถ่ายภาพจากมุมสูงขณะที่อากาศยานกำลังบินอยู่ดังรูปที่ 6.21 แต่ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการอุปกรณ์การภาพถูกติดตั้งกับโครงสร้างอลูมิเนียมให้มีลักษณะห้อยหัวลง เหมือนกับการใช้งานจริงดังรูปที่ 6.22 และสามารถนำไปติดตั้งเข้ากับรถเข็นหรือรถยนต์ได้ ทำให้สามารถทดสอบการติดตามวัตถุขณะพื้นฐานของอุปกรณ์การภาพมีการเคลื่อนที่ได้ โดยในการทดสอบนี้ได้นำมาติดตั้งเข้ากับรถเข็นและทำการทดสอบบนชั้นดาดฟ้าของตึก 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งเป็นอาคารสูง 20 ชั้น



รูปที่ 6.21 การติดตั้งอุปกรณ์การถ่ายภาพบนเฮลิคอปเตอร์ในการทดสอบภาคสนาม



รูปที่ 6.22 การติดตั้งอุปกรณ์การภาพในห้องปฏิบัติ

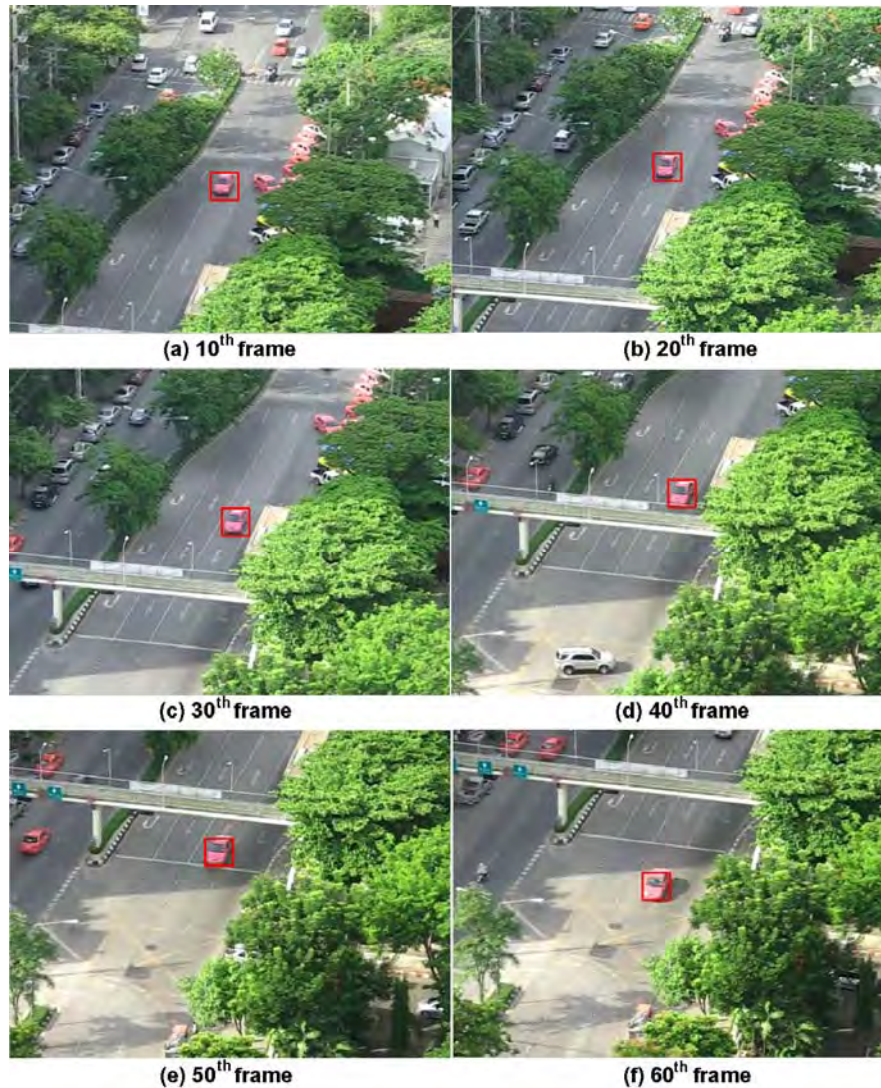
ในการทดสอบจะทำการระบุเป้าหมายซึ่งเป็นรถยนต์ที่วิ่งอยู่บนถนนอังรีดูนังต์ ในขณะเดียวกันนั้นก็เซ็นรถเซ็นไปข้างหน้าซึ่งเป็นทิศทางตรงข้ามกับการวิ่งของรถยนต์เป้าหมาย โดย

ระยะห่างระหว่างกล้องกับรถยนต์ประมาณ 200-300 เมตร รถยนต์วิ่งเร็วประมาณ 10-30 กิโลเมตร/ชั่วโมง ความเร็วของรถเซ็นประมาณ 1 เมตร/วินาที ลักษณะการวิ่งของรถเซ็นและรถยนต์เป้าหมายสามารถดูได้จากรูปที่ 6.23



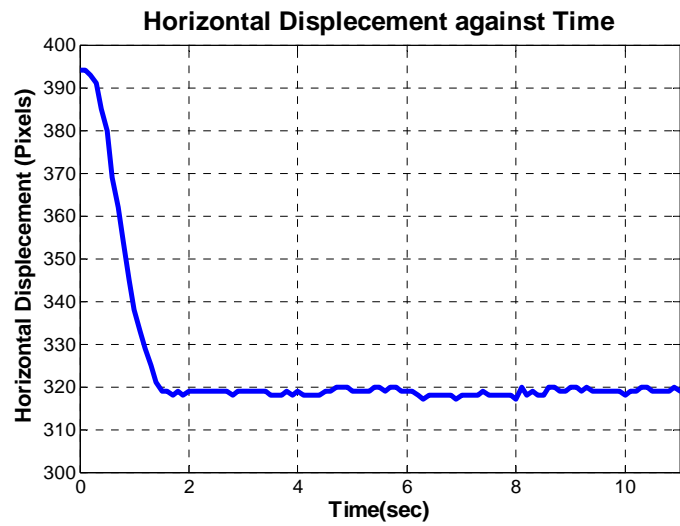
รูปที่ 6.23 แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศในการทดสอบในห้องปฏิบัติ

จากรูปที่ 6.24 ผลการทดสอบการติดตามวัตถุ ซึ่งเป็นการทดสอบระบบทั้ง 3 ส่วน คือ ส่วนติดตามวัตถุ ส่วนการควบคุมการเคลื่อนที่ของกล้อง และส่วนลดการสั่นสะเทือนจากภายนอก พบว่าระบบสามารถติดตามวัตถุด้วยในเวลาจริงได้ ส่วนติดตามวัตถุด้วยภาพสามารถหาตำแหน่งเป้าหมายบนภาพในขณะที่สไลด์ดิ้งโหมดคอนโทรลสามารถควบคุมอุปกรณ์การภาพให้สามารถรักษาแนวการมองเห็นให้เป้าหมายอยู่บริเวณกลางภาพได้ โดยส่วนลดการสั่นสะเทือนจากภายนอกช่วยลดผลกระทบจากการเคลื่อนที่และสั่นสะเทือนของส่วนฐาน โดยสร้างสร้างของกล้องกิมเบลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีเสถียรภาพในแนวราบเป็นมุม ± 60 องศา ในแนวก้มเงยเป็นมุม ± 35 องศา ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ 60 องศาต่อวินาที

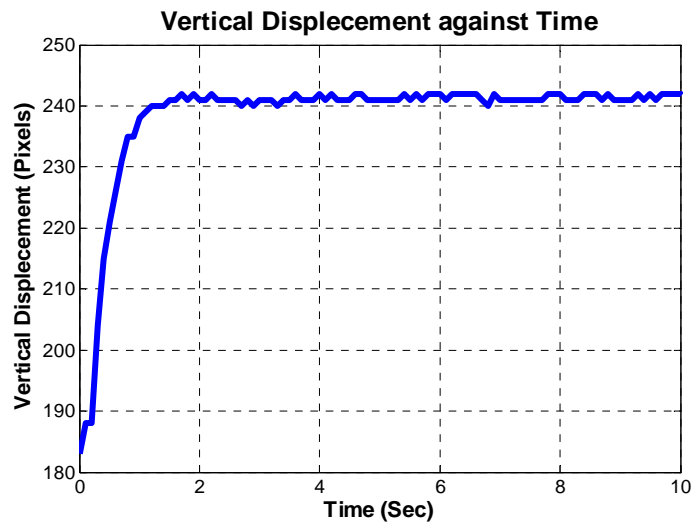


รูปที่ 6.24 ผลการทดสอบติดตามวัตถุ โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์การภาพ

ขนาดภาพวิดีโอที่ใช้ทำการทดลองคือ 640X480 พิกเซล ดังนั้นตำแหน่งกึ่งกลางภาพในแนวนอนคือพิกเซลที่ 320 และในแนวตั้งคือพิกเซลที่ 240 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการให้จุดกึ่งกลางของภาพวัตถุเป้าหมายอยู่ในบริเวณนี้ จากรูปที่ 6.25 และ 6.26 เป็นกราฟการเคลื่อนที่ของตำแหน่งพิกเซลของกึ่งกลางเป้าหมายบนภาพในแนวแกนแนวนอนและตั้ง จากรูปพบว่าในตอนที่ระบุเป้าหมายวัตถุไม่อยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของภาพ โดยจุดกึ่งกลางของภาพวัตถุเป้าหมายอยู่ในบริเวณจุดพิกเซลที่ (395,185) ระบบควบคุมจึงควบคุมให้ตำแหน่งวัตถุเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาพและรักษาค่าตำแหน่งให้คงที่ โดยใช้เวลาประมาณ 2 วินาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการควบคุมให้วัตถุเป้าหมายเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางภาพขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการระบุเป้าหมายว่าอยู่ห่างจากกึ่งกลางภาพมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 6.25 การเคลื่อนที่ของตำแหน่งพิกเซลของกึ่งกลางเป้าหมายบนภาพในแนวแกนนอน



รูปที่ 6.26 การเคลื่อนที่ของตำแหน่งพิกเซลของกึ่งกลางเป้าหมายบนภาพในแนวแกนตั้ง

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ที่โครงสร้างแบบกิมเบลและได้ออกแบบระบบควบคุมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของโครงสร้างให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่นั้น ได้ใช้หลักการของลากรองจ์ ในการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้างกิมเบลโดยและเมื่อได้สมการคณิตศาสตร์มาก็ได้นำมาใช้ในการจำลองการควบคุมและใช้ในการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ในการออกแบบระบบควบคุมได้ทำการออกแบบระบบควบคุม 3 แบบคือ ระบบควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control ระบบควบคุมแบบ Robust Inverse Dynamics Control และระบบควบคุมแบบ Sliding Mode Control ซึ่งผลการทดลองควบคุมโครงสร้างแบบกิมเบลนี้ได้ค่าความผิดพลาดในขณะทดลองกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของส่วนฐานและให้โครงสร้างกิมเบลนั้นเคลื่อนที่ไป 1 เมตรในแต่ละแนวแกนความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.8 เมตร/วินาที² นั้นไม่เกิน 0.005 เมตร/วินาที² ในแนวแกน azimuth และในแนวแกน pitch หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบโครงสร้างแบบกิมเบลนี้ให้สามารถรักษาทิศทางของ แนวการมองเห็น (LOS) โดยที่เขย่าให้ส่วนฐานนั้นมีการเคลื่อนไหว ปรากฏว่าระบบควบคุมนั้นสามารถที่จะรักษาแนวการมองเห็น (LOS) ไว้ได้ในขณะที่มีสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน และได้ทดลองเปลี่ยนค่าของแนวการมองเห็นโดยสัญญาณอ้างอิงที่ใช้คือกราฟฟังก์ชันแบบเอส (s-function) และสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ ผลการทดสอบจะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้เมื่อมีการรบกวนจากการเคลื่อนที่ของส่วนฐาน

ในงานวิจัยนี้ยังเสนอวิธีการในการติดตามวัตถุบนภาพสี่ที่ถ่ายด้วยกล้องวิดีโอ โดยใช้วิธีการแคมชิฟในการค้นหาตำแหน่งวัตถุในภาพ สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ที่จะบังคับให้โครงสร้างอุปกรณ์การภาพเคลื่อนที่ติดตามวัตถุ และได้แสดงผลการทดสอบระบบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการนี้ ซึ่งผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่าระบบควบคุมสามารถติดตามวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่วัตถุเป้าหมายจะถูกควบคุมให้อยู่บริเวณกึ่งกลางภาพ ทั้งยังสามารถรักษาเสถียรภาพของอุปกรณ์การภาพในขณะที่ติดตั้งบนพาหนะที่กำลังเคลื่อนที่ได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือวัดการหมุนรอบและรักษาเสถียรภาพที่ตัวเดิมที่ใช้การสื่อสารแบบ RS-232 ในการส่งชุดข้อมูล เกิดปัญหาทำให้ระบบของบัพเฟอริเต็มและเกิดการแฮงค์ของคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนมาใช้ในการสื่อสารผ่านพอร์ต USB เครื่องมือวัดการหมุนรอบที่สามารถส่งถ่ายข้อมูลได้เร็วและไม่เกิดปัญหาอีก

2. เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กในการควบคุมอุปกรณ์การภาพ เพื่อความสะดวกในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กและกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่นอุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งมุมของมอเตอร์ เครื่องมือวัดการหมุนรอบและรักษาเสถียรภาพ และอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพวิดีโอเป็นสัญญาณดิจิทัลจึงต้องใช้การสื่อสารผ่านพอร์ต USB แต่เนื่องจากมีอุปกรณ์มากกว่าจำนวนพอร์ต จึงต้องต่อพ่วงอุปกรณ์บางชิ้นจึงมีข้อจำกัดในการรับส่งข้อมูลอยู่บ้าง ในการต่อควรต่ออุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งมุมของมอเตอร์แยกต่างหากไม่ต่อพ่วงกับอุปกรณ์อื่น

3. เนื่องจากสัญญาณภาพจากกล้องส่งมาทางสายซึ่งรวมเข้ากับสายไฟเส้นอื่นๆ ทำให้เมื่อเปิดชุดขยายกระแสไฟฟ้าขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Amplifier) จึงเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นบนภาพ จึงควรแยกสายสัญญาณภาพออกต่างหากและควรเป็นสายที่มีฉนวน

4. อุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพวิดีโอเป็นสัญญาณดิจิทัลมีหลายชนิด หากใช้อุปกรณ์ที่ต่างรุ่นกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อาจมีผลกับการรับภาพได้และอาจต้องปรับในส่วนโปรแกรมด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธนุ ดุยฉาย. การค้นหาลักษณะเชิงกล. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี [ไทย-ญี่ปุ่น], 2541

ประสาทพร วงษ์คำซ่าง. ระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับระบบรักษาเสถียรภาพของกิมเบล.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทระดับบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาษาอังกฤษ

Asada, H., and Slotine, E. J. Robot Analysis and Control. New York : John Wiley & Sons, 1986.

Bradski, G. R. Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface. Intel Technology Journal. 2 (1998)

Cheng, Y. MeanShift, mode seeking, and clustering IEEE Trans. on PAMI 17 (1995): 790-799.

Edwards, C., and Spurgeon, K. S. Sliding Mode Control: Theory and Applications. T.J. International Ltd, Padstow, UK: Taylor & Francis, 1998.

Hilkert J.M. Inertially stabilized platform technology Concepts and principles. Control Systems Magazine, IEEE. 28, 1, (February 2008): 26-46.

Intel Corporation. Open Source Computer Vision Library Reference Manual [Online], 2001. Available from: <http://software.intel.com/en-us/> [2008, October]

John, A. G., Richard Xu, Y. D. and Jin Jesse S. Object Tracking Using CamShift Algorithm and Multiple Quantized Feature Spaces. Inc. Australian Computer Society. 36 (2004).

Nouar, O.-D., Ali, G. and Raphael, C. Improved Object Tracking With Camshift Algorithm. Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference, 2 (2006)

Park, C.W., Kim, J.H., Kwon, C., and Park, M. Tracking Control of a Robot Manipulator Using Sliding Mode Controller with Fast and Accurate Performance. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (1999): 305-310

- Sciavicco, L., and Siciliano, B. Modeling and control of robot manipulators. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- Shigley, E. J. Standard Handbook of Machine Design. 3rd Edition. New York : McGraw-Hill, 1996.
- Slotine, E. J., and Li, W. Applied Nonlinear Control. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1991.
- Strickland, J. What is a gimbal - and what does it have to do with NASA? [Online], 2008. Available from: <http://science.howstuffworks.com/gimbal.htm> [2008,December]
- Thomson, T. W. Theory of vibration with applications. 4th Edition. Englewood Cliff, N.J. : Prentice Hall, 1993.
- Wongkamchang, P., and Sangveraphunsiri, V. Control of inertial stabilization systems using robust inverse dynamics control and adaptive control. Thammasat International Journal of Science and Technology 13, 2 (April-June 2008): 20-32

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังต่อไปนี้

1. แผ่นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกรวม ทั้งตัวนับ (counter) ยี่ห้อ Data Translation รุ่น DT9813 เชื่อมต่อผ่านพอร์ต USB จำนวน 1 ชุด



รูปที่ ก.1 แผ่นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ Maxon รุ่น RE-max 29 กำลัง 22 วัตต์พร้อมเฟืองทด อัตราส่วน 1:21 พร้อม อุปกรณ์วัดมุมความละเอียด 512 พัลส์ต่อรอบ จำนวน 2 ชุด



รูปที่ ก.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ค่าคงที่ต่างๆ ของ RE-Max 29 motor

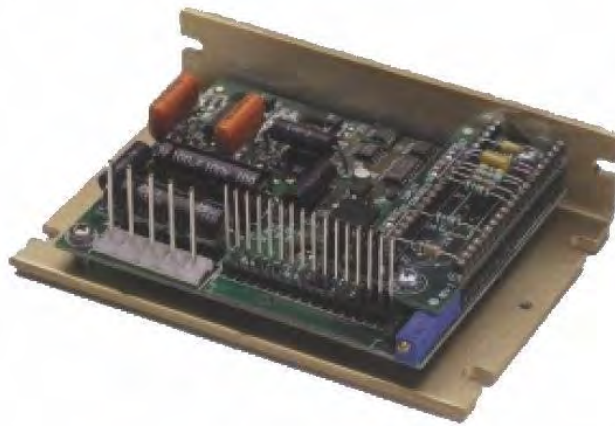
$$J_m = 12.4 \quad g \cdot cm^2$$

$$b = 46.5 \quad mN \cdot m / A$$

$$L = 0.77 \quad mH$$

$$R = 8.06 \quad ohm$$

3. ชุดขยายกระแสไฟฟ้าขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Amplifier) ยี่ห้อ Copley รุ่น 4122P สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้สูงสุด 10 แอมแปร์ จำนวน 2 ชุด



รูปที่ ก.3 ชุดขยายกระแสไฟฟ้าขับมอเตอร์กระแสตรง

4. อุปกรณ์เสถียรภาพ เป็นอุปกรณ์อเนกประสงค์ สามารถใช้วัดค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้น สนามแม่เหล็ก วัดความเร็ว อัตราเร่งเชิงมุม อัตราเร็วเชิงมุมและมุม ได้ 3 แกน โดยมุมที่วัดจะวัดเทียบกับแกนแม่เหล็กโลก ยี่ห้อ MicroStrain รุ่น 3DM-GX2 เชื่อมต่อผ่านพอร์ต USB



รูปที่ ก.4 อุปกรณ์เสถียรภาพ

5. อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม (encoder) เชื่อมต่อผ่านพอร์ต USB โดยสามารถรับอุปกรณ์วัดมุมได้ 4 ตัว ยี่ห้อ US Digital



รูปที่ ก.5 อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม

6. กล้องวิดีโอสี ยี่ห้อไซเนี่ รุ่น FCB-EX980 ความสามารถในการซูมสูง สามารถซูมออฟติคัล 26 เท่า ดิจิตอลซูม 12 เท่า มีระบบการป้องกันภาพสั่นไหว



รูปที่ ก.6 กล้องวิดีโอสี ยี่ห้อไซเนี่ รุ่น FCB-EX980

7. อุปกรณ์บันทึกสัญญาณวิดีโอแบบต่อภายนอก ยี่ห้อ Grab Show 110 โดยอุปกรณ์จะแปลงสัญญาณวิดีโอ Analog AV(composite/S-video) เป็นสัญญาณดิจิตอล ผ่านทาง USB 2.0



รูปที่ ก.7 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณวิดีโอแบบต่อภายนอก

ภาคผนวก ข

โอเพนซีวี (OpenCV)

โอเพนซีวี (OpenCV) เป็นผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ของบริษัทอินเทลคอร์ปอเรชัน ประเภทเปิดเผยแพร่ (open source) ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นซอฟต์แวร์พื้นฐาน สำหรับให้นักพัฒนาซอฟต์แวร์ใช้การพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพ (Image Processing) และงานเกี่ยวกับทางด้านระบบการมองเห็น (Computer Vision) โปรแกรมโอเพนซีวี เป็น Library ในภาษา C++ และ Python โดยสามารถพัฒนาได้ทั้งในระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) และระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Linux วิธีใช้งาน OpenCV ร่วมกับโปรแกรม Visual Studio C++ เพื่อใช้พัฒนาโปรแกรมนั้น เราจำเป็นต้องตั้งค่าให้กับโปรแกรม Visual Studio C++ ก่อน เพื่อระบุตำแหน่งของ Library ของ OpenCV ตำแหน่งของไฟล์ที่ต้องใช้ในโปรแกรม และตำแหน่งของ Source File ให้ตัวโปรแกรมทราบ และสามารถดึงมาใช้ได้

ตารางที่ ข-1 แสดงความสามารถของ OpenCV Library

Chapter	Content
Image function	Creation, allocation, destruction of image. Fast pixel access macros.
Data Structures	Static types and dynamic storage.
Contour Processing	Finding, display, manipulation and simplification of image contours.
Geometry	Line and ellipse fitting. Convex hull. Contour analysis.
Features	1 st & 2 nd Image Derivatives. Lines: Canny, Hough. Corners: finding, tracking
Image Statistics	In region of interest: Count, Mean, STD, Min, Max, Norm, Moment
Background differencing	Accumulate images and squared images. Running averages
Thresholding	Binary, inverse binary, truncated, to zero, to zero inverse.
Flood fill	4 and 8 connected

ตารางที่ ข-1 แสดงความสามารถของ OpenCV Library (ต่อ)

Camera Calibration	Intrinsic and extrinsic, Rodriguez, un-distortion, Finding checkerboard calibration pattern
View Morphing	8 point algorithm, Epipolar alignment of images
Motion Templates	Overlaying silhouettes: motion history image, gradient and weighted global motion.
CAMShift	Mean-Shift algorithm and variant
Active Contours	Snakes
Optical Flow	HS, L-K, BM and L-K in pyramid.
Estimators	Kalman and Condensation
POSIT	6 DOF model based estimate from 2D view
Histogram (Recognition)	Manipulation, comparison, backprojection, Earth Move's Distance (EMD)
Gesture Recognition	Stereo based: Finding hand mask. Image homography, bounding box.
Matrix	Matrix Math: SVD, inverse, cross-product, Mahalanobis, eigen values and vector. Perspective projection
Eigen Objects	Calc Cov Matrix, Calc Eigen objects, decomp. Coeffs. Decomposition and projection
Drawing Primitives	Line, rectangle, circle, ellipse, polygon. Text on image

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษณ์นัท มะลิทอง เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2521 เป็นชาวปทุมธานี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนปทุมวิไล สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2544 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 ทำงานเป็นนักวิจัยที่ห้องปฏิบัติการ Regional Center of Robotics Technology จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นเวลา 1 ปี และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2549