

การจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง
Simulation of Solar Tracking and Focusing with Planar Reflector

โดย

นายจารุเดช	วรสิทธิ์
นายเจษฎา	กรรณิกา
นายชวนากร	เขาวนันทกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง
Simulation of Solar Tracking and Focusing with Planar Reflector



T144378

โดย

นายจรรุเดช วรสีห์
นายเจษฎา กรรณิกา
นายชวนากร เขาวนันทกุล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144378
เลขวันที่ 24 พ.ย. 2559

b. 12820178
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

Simulation of Solar Tracking and Focusing With Planar Reflector

JARUDATE

VORASEE

JEDSADA

KANNIKA

CHAVANAKORN

CHAOVANUNTAKUL

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

ปีการศึกษา 2558

การจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง
Simulation of Solar Tracking and Focusing with Planar Reflector

โดย

นาย จารุเดช	วรสีห์
นาย เจษฎา	กรรณิกา
นาย ชวนากร	เขาวนันทกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง

ผู้จัดทำ

1. นาย จารุเดช วรสีห์
2. นาย เจษฎา กรรณิกา
3. นาย ชวนากร เขาวนันทกุล


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล)

การจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง

นาย จารุเดช วรสีห์

นาย เจษฎา กรรณิกา

นาย ชวนากร เขาวนันทกุล

ผศ.ดร. นิรุช จิรสวรรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการจำลองของระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง จุดประสงค์ของการออกแบบระบบเพื่อที่จะนำไปใช้กับตัวฮีลิโอสแตต ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการผลิตไฟฟ้าโดยการรวมแสงอาทิตย์ ระบบประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นตัวสะท้อนสองแกนถูกออกแบบให้ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยประมวลผลภาพแสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งและปรับตัวสะท้อน ส่วนที่สองเป็นโปรแกรมปรับแก้สองแกนถูกออกแบบให้ประมาณและปรับตำแหน่งตัวสะท้อนให้ตรงตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อกล้องไม่สามารถจับภาพแสงอาทิตย์ได้ ตัวสะท้อนเคลื่อนที่สองแนวคือ มุมอัลติจูด และ มุมอะซิมูท ซึ่งทั้งสองตำแหน่งจะถูกวิเคราะห์และควบคุมโดยการประมวลผลภาพและไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของระบบจึงจัดการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยใช้ไฟฉาย ส่วนที่สองเป็นการทดลองกับสถานการณ์จริง จากการทดลองทั้งสองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ออกแบบสามารถติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

Simulation of Solar Tracking and Focusing with Planar Reflector

Mr. Jarudate Vorasee
Mr. Jedsada Kannika
Mr. Chavanakorn Chaovanuntakul
Asst. Prof. Dr. Nirudh Jirasuwankul Supervisor
2015

ABSTRACT

This thesis proposes design and simulation of solar tracking and focusing system with planar reflector. Purpose of the system design is to apply for lab-scale heliostat which is a part of concentrating solar power generation (CSP). The system comprises of two parts. The first part is dual-axis reflecting platform which has been designed to follow the sun movement by processing the reflected image of the sun, analysis, and then positioning the platform. The second part is dual-axis correction program which has been designed to estimate and adjust the platform to the right position of the sun whenever the web-camera cannot capture image of the sun. The reflecting platform operates online with dual-axis movement, altitude and azimuth angles, which both positions will be analyzed and controlled by image processing and microcontroller. To illustrate an effectiveness of the system, two experiments had been defined. Firstly, lab test on simulation of an arbitrary movement of the sun by using LED light torch, and secondly, field test of real situation. The test results of both experiments illustrated that the designed system can perform reflective solar tracking precisely and effectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิรุช จิรสวรรณกุล เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างมากมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้คำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณ นครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เปิดใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณ กมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในการทำโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การใช้ประโยชน์จากแสงอาทิตย์ในด้านการผลิตไฟฟ้า	6
2.1.1 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	6
2.1.2 การใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง	8
2.2 ประสิทธิภาพและต้นทุนของโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่าน กระบวนการทางความร้อน	11
2.2.1 การพิจารณาความสูญเสียต่างๆในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน แบบหอคอยพลังงาน	11
2.2.2 ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ แบบรางพาราโบลิก	12
2.2.3 เปรียบเทียบเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์	13
2.2.4 แนวโน้มทางการตลาดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์	14
2.2.5 ค่าไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์	15
2.2.6 ตัวอย่างโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในต่างประเทศ	17
2.3 การเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้า พลังงานความร้อนแบบหอคอยพลังงาน	18
2.4 การติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงจากงานวิจัยที่มีมาก่อน	19
2.5 Machine Vision	21
2.6 การประมวลผลภาพ (Image Processing)	21
2.7 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิทัล	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 มาตรฐานของสี	25
2.8.1 ระบบสี RGB	25
2.8.2 ระบบสี HSL (Hue-Saturation-Lightness)	26
2.9 ซีชาร์ป (C#)	26
2.10 AForge.NET	27
2.11 การสะท้อนแสง	27
2.12 สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)	28
2.12.1 ชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์	31
2.12.2 การสั่งงานควบคุมการหมุนของสเต็ปป์มอเตอร์	33
2.13 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนโลก	35
2.14 การคำนวณการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์	37
บทที่ 3 เทคนิคการติดตามแสงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงและการออกแบบชิ้นงาน	40
3.1 การออกแบบชิ้นงาน	41
3.2 การทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพและการส่งข้อมูลไมโครคอนโทรลเลอร์	54
3.2.1 ไบบรารี (Library) ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม	55
3.2.2 การประมวลผลภาพแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่หอคอยรับแสง	57
3.2.2.1 กล้อง Logitech C270h	57
3.2.2.2 การแปลงภาพเป็นภาพระดับเทา (Gray Scale)	58
3.2.2.3 การกรองสีภาพด้วย HSL Filter	58
3.2.2.4 Blobcounter	59
3.2.3 การหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสงโดยการประมวลผลภาพ	59
3.2.4 การพิจารณาตำแหน่งแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสง	60
3.3 โปรแกรมที่ใช้ประมวลผลภาพ	61
3.3.1 ส่วนเลือกกล้อง	62
3.3.2 ส่วนเริ่มการทำงาน	63
3.3.3 ส่วนหยุดการทำงาน	63
3.3.4 ส่วนแสดงค่าพิกัดแกน X และ แกน Y	64
3.3.5 ส่วนแสดงขนาดกรอบสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบวัตถุ	64
3.3.6 ส่วนแสดงภาพที่รับจากกล้อง	65
3.3.7 ส่วนแสดงภาพระดับเทา	65
3.3.8 ส่วนปรับค่า HSL Filter	66
3.3.9 ส่วนแสดงค่าของสีที่เราต้องการจับ	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.10 ส่วนแสดงผลข้อมูลย้อนหลังและ Save ข้อมูล	67
3.3.11 ส่วนการปรับเวลาเพื่อให้โปรแกรมตรวจหาตำแหน่งแสงอาทิตย์	68
3.4 Flow Chart การทำงานของโปรแกรมควบคุมแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์	68
3.5 การส่งค่าออกจากโปรแกรมประมวลผลภาพ	71
3.5.1 เริ่มกด Start โปรแกรม	71
3.5.2 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $-10 < Y < 10$	73
3.5.3 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $-10 < Y < 10$	74
3.5.4 วัตถุอยู่ในแนวแกน $Y > 10$ และ $-10 < X < 10$	75
3.5.5 วัตถุอยู่ในแนวแกน $Y < -10$ และ $-10 < X < 10$	76
3.5.6 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y > 10$	77
3.5.7 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $Y > 10$	78
3.5.8 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $Y < -10$	79
3.5.9 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y < -10$	80
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	81
4.1 การทดลองครั้งที่ 1 ณ วันที่ 12/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.38 – 16.36 น.	82
4.2 การทดลองครั้งที่ 2 ณ วันที่ 14/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.24 – 14.24 น.	84
4.3 การทดลองครั้งที่ 3 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 12.36 – 13.36 น.	86
4.4 การทดลองครั้งที่ 4 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.12 – 14.24 น.	88
4.5 การทดลองครั้งที่ 5 ณ วันที่ 19/3/59 ตั้งแต่เวลา 10.48 – 11.48 น.	90
4.6 การทดลองครั้งที่ 6 ณ วันที่ 23/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.48 – 15.00 น.	94
4.7 การทดลองครั้งที่ 7 ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.24 – 15.24 น.	96
4.8 การทดลองครั้งที่ 8 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.36 – 16.00 น.	98
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	100
5.1 สรุปผลการทดลอง	100
5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางในการแก้ไข	101
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	102
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	105
ภาคผนวก ข รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	110
ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	129
ประวัติผู้เขียน	140

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System)	6
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System)	7
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System)	7
2.4 โรงไฟฟ้าแบบหอคอยพลังงาน	8
2.5 การประยุกต์ใช้งานระบบแผ่นรับแสงแบบรวมแสง ชนิด Parabolic Troughs	9
2.6 ลักษณะของโรงไฟฟ้าแบบจานพาราโบลา	10
2.7 รูปแบบการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์	11
2.8 กราฟความสูญเสียต่างๆในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบหอคอยพลังงาน	11
2.9 กราฟค่าไฟฟ้าของระบบรางพาราโบลาในปี 2011 และ 2015	16
2.10 กราฟค่าไฟฟ้าของระบบหอคอยพลังงานในปี 2011 และ 2015	16
2.11 การแปลงภาพแอนะล็อกให้เป็นภาพดิจิทัล	22
2.12 ภาพแบบ binary หรือ ภาพขาว-ดำ	23
2.13 ภาพแบบ Grayscale หรือ ภาพระดับเทา	23
2.14 ภาพแบบ RGB	24
2.15 ภาพแบบ indexed	24
2.16 ระบบสี RGB (Red-Green-Blue)	25
2.17 ระบบสี HSL (Hue-Saturation-Lightness)	26
2.18 สเต็ปป์มอเตอร์	29
2.19 โครงสร้างภายในสเต็ปป์มอเตอร์	29
2.20 วงจรการจ่ายไฟให้กับสเต็ปป์มอเตอร์	30
2.21 ลักษณะการพันขดลวดสเต็ปป์มอเตอร์แบบ Bipolar	32
2.22 ลักษณะการพันขดลวดสเต็ปป์มอเตอร์แบบ Unipolar	32
2.23 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์	35
2.24 การขึ้นและตกของดวงอาทิตย์ในวันที่ 21 มิ.ย. 20 มี.ค. 22 ก.ย. 21ธ.ค.	36
2.25 มุมอะซิมุทและมุมอัลติจูด	39
3.1 แผนผังการทำงาน	40
3.2 ชั้นส่วนของฐาน	41
3.3 ชั้นส่วนของฐานในมุมมอง 3 มิติ	42
3.4 ชั้นส่วนตัว U1	42
3.5 ชั้นส่วนตัว U2	43
3.6 ชั้นส่วนตัว U3	43
3.7 ชั้นส่วนตัว U ในมุมมอง 3 มิติ	44
3.8 ตัวยัดสเต็ปป์มอเตอร์ของมุมอะซิมุท	44
3.9 ตัวยัดสเต็ปป์มอเตอร์ของมุมอะซิมุทในมุมมอง 3 มิติ	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.10	ขึ้นส่วนตัว L1	45
3.11	ขึ้นส่วนตัว L2	46
3.12	ขึ้นส่วนตัว L3	46
3.13	ขึ้นส่วนตัว L ในมุมมอง 3 มิติ	47
3.14	ขึ้นส่วนตัวยึดสแต็ปปั๊มมอเตอร์ของมูมัลติตุล	47
3.15	ขึ้นส่วนตัวยึดสแต็ปปั๊มมอเตอร์ของมูมัลติตุล ในมุม 3 มิติ	48
3.16	ขึ้นส่วนแผ่นสะท้อน (Reflector)	48
3.17	ขึ้นส่วนแผ่นสะท้อน (Reflector) ในมุมมอง 3 มิติ	49
3.18	ขึ้นส่วนแท่งชาร์ปที่ตัวสะท้อน (Shaft Reflector)	49
3.19	ขึ้นส่วนแท่งชาร์ปที่ตัวสะท้อน (Shaft Reflector) ในมุมมอง 3 มิติ	50
3.20	ขึ้นส่วนแท่งชาร์ป (Shaft)	50
3.21	ขึ้นส่วนแท่งชาร์ป (Shaft) ในมุมมอง 3 มิติ	51
3.22	ขึ้นส่วนตัวช่วยแบร์ริง (Support Bearing) ชั้นที่ 1	51
3.23	ขึ้นส่วนตัวช่วยแบร์ริง (Support Bearing) ชั้นที่ 1 ในมุมมอง 3 มิติ	52
3.24	ขึ้นส่วนตัวช่วยแบร์ริง (Support Bearing) ชั้นที่ 2	52
3.25	ขึ้นส่วนตัวช่วยแบร์ริง (Support Bearing) ชั้นที่ 2 ในมุมมอง 3 มิติ	53
3.26	ตัวชิ้นงานทั้งหมด	53
3.27	ลำดับการทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพ	54
3.28	กล้อง Logitech C270h	57
3.29	ภาพที่ได้จากกล้องเว็บแคม (Webcam) โดยใช้ไฟฉายแทนดวงอาทิตย์	57
3.30	ภาพระดับเทา (Gray Scale) โดยใช้ไฟฉายแทนดวงอาทิตย์	58
3.31	ประมวลผลภาพโดยใช้ระบบ HSL Filter (Hue, Saturation, Lightness) และผ่านการทำให้เป็นภาพระดับเทา (Gray Scale)	58
3.32	วิธีการ Blobcounter ตีกรอบภาพ	59
3.33	ขอบเขตของแสงอาทิตย์ที่ยอมรับได้	60
3.34	หน้าต่างโปรแกรมสะท้อนแสงอาทิตย์	61
3.35	ส่วนเลือกกล้อง	62
3.36	การเริ่มการทำงานเมื่อกดปุ่ม Start	63
3.37	การหยุดการทำงานเมื่อกดปุ่ม Stop	63
3.38	ค่าพิกัดแกน X และ แกน Y	64
3.39	ค่าขนาดกรอบสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบวัตถุ	64
3.40	ภาพที่ได้รับจากกล้อง	65
3.41	ภาพระดับเทา	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.42 ส่วนปรับค่า HSL Filter	66
3.43 ค่าสีที่เราต้องการ	66
3.44 ผลข้อมูลย้อนหลัง	67
3.45 เวลาในการตรวจจับ	68
3.46 ผังการทำงานของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์	69
3.47 ผังการทำงานของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ (ต่อ)	70
3.48 เมื่อกดปุ่ม Start เริ่มต้น	72
3.49 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว M และ ตัว L	72
3.50 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $-10 < Y < 10$	73
3.51 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว a	73
3.52 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $-10 < Y < 10$	74
3.53 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว b	74
3.54 วัตถุอยู่ในแนวแกน $Y > 10$ และ $-10 < X < 10$	75
3.55 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว c	75
3.56 วัตถุอยู่ในแนวแกน $Y < -10$ และ $-10 < X < 10$	76
3.57 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว d	76
3.58 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y > 10$	77
3.59 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว a และ ตัว c	77
3.60 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y > 10$	78
3.61 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว b และ ตัว c	78
3.62 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $Y < -10$	79
3.63 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว b และ ตัว d	79
3.64 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y < -10$	80
3.65 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว a และ ตัว d	80
4.1 ตัวจำลอง Receiver และ กล้อง Webcam	81
4.2 ส่วนอุปกรณ์ Stepping motor driver, arduino, dc supply	81
4.3 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 15.47 น.	82
4.4 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 15.48 น.	82
4.5 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 15.38 – 16.36 น.	83
4.6 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 15.38 – 16.36 น.	83
4.7 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.35 น.	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.36 น.	84
4.9 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 13.24 – 14.24 น.	85
4.10 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 13.24 – 14.24 น.	85
4.11 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.23 น.	86
4.12 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.24 น.	86
4.13 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 12.36 – 13.36 น.	87
4.14 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 12.36 – 13.36 น.	87
4.15 เอากระดาศปิดกระจกสะท้อน ณ เวลา 14.13 น.	88
4.16 เอากระดาศออก ณ เวลา 14.25 น.	88
4.17 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 14.12 – 14.24 น.	89
4.18 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.47 น.	90
4.19 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.48 น.	90
4.20 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.11 น.	91
4.21 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.12 น.	91
4.22 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 10.48 – 11.48 น.	92
4.23 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 12.36 – 13.36 น.	93
4.24 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.11 น.	94
4.25 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.12 น.	94
4.26 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 13.48 – 15.00 น.	95
4.27 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 13.48 – 15.00 น.	95
4.28 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.35 น.	96
4.29 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.36 น.	96
4.30 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 14.24 – 15.24 น.	97
4.31 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 14.24 – 15.24 น.	97
4.32 เอากระดาศปิดกระจกสะท้อน ณ เวลา 15.37 น.	98
4.33 เอากระดาศออกเมื่อเวลาผ่านไปอีก 12 นาที ณ เวลา 15.48 น.	98
4.34 เอากระดาศออกเมื่อเวลาผ่านไปอีก 12 นาที ณ เวลา 16.00 น.	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 15.36 – 16.00 น.	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการประจำปี เดือน ส.ค. 2558 ถึง ธ.ค. 2558	3
1.2 แผนการดำเนินโครงการประจำปี เดือน ม.ค. 2559 ถึง มิ.ย. 2559	4
2.1 ขนาดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในแต่ละประเทศในปี 2012	14
2.2 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งในระบบรางพาราโบลาและระบบหอคอยพลังงานในปี 2011 และ 2015	15
2.3 การกระตุ้นแบบฟูลสเต็มปี 1 เฟส	33
2.4 การกระตุ้นแบบฟูลสเต็มปี 2 เฟส	34
2.5 การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็มปี	34
2.6 ค่ามุมอะซิมูทขณะขึ้น - ตก และมุมเงยสูงสุดของดวงอาทิตย์ วัดที่กรุงเทพมหานคร	37
4.1 ผลการทดลอง ณ วันที่ 12/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.38 - 16.36 น.	83
4.2 ผลการทดลอง ณ วันที่ 14/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.24 - 14.24 น.	85
4.3 ผลการทดลอง ณ วันที่ 14/3/59 ตั้งแต่เวลา 12.36 - 13.36 น.	87
4.4 ผลการทดลอง ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.12 - 14.24 น.	89
4.5 ผลการทดลอง ณ วันที่ 19/3/59 ตั้งแต่เวลา 10.48 - 11.48 น.	92
4.6 ผลการทดลอง ณ วันที่ 23/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.48 - 15.00 น.	95
4.7 ผลการทดลอง ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.24 - 15.24 น.	97
4.8 ผลการทดลอง ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.36 - 16.00 น.	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้เราสามารถสังเกตได้ว่า โลกของเรามีความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม คมนาคม เป็นต้น และด้วยความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีต่างๆ นี้เองที่ส่งผลทำให้โลกของเรามีความต้องการในการใช้พลังงานในแต่ละปีนั้นเราจะสังเกตได้ว่าในแต่ละปีมีความต้องการพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในอนาคตคาดว่าจะยังต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นต่อไปอีกเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องผลิตหรือหาพลังงานให้ได้เพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของผู้ใช้ แต่เนื่องจากเทคโนโลยีของเราปัจจุบันนี้ยังไม่เพียงพอเพื่อที่จะผลิตพลังงานออกมาให้เพียงพอต่อความต้องการ จึงทำให้เกิดภาวะวิกฤติและการขาดแคลนพลังงาน ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดการแสวงหาพลังงานทางเลือกต่างๆ โดยที่พลังงานทางเลือกแสงเป็นที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดและเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีวันหมด ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยจึงนำเสนอโครงการที่เกี่ยวกับการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

โดยที่ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ระบบแรก คือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ระบบไฟฟ้าผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบผสมผสาน (PV Hybrid System) ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV-Standalone System) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid-connected system) ระบบที่สอง คือ ระบบไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนแสงอาทิตย์ เช่น แบบตัวรับรังสีรวมกลาง (Central receivers) จานพาราโบลิก (Parabolic dishes) และ แบบรางพาราโบลิก (Parabolic – troughs) โดยระบบทั้งสองนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้จำเป็นต้องมีการพัฒนาติดตั้งระบบการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาในส่วนของการจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์ และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในส่วนของการผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนแสงอาทิตย์ แบบตัวรับรังสีรวม

ปริญญาณิพนธ์ได้มีการศึกษาและนำเสนอการสร้างระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง จากการประมวลผลของ Visual Studio ซึ่งทำงานในส่วน Machine Vision และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งสามารถติดตามดวงอาทิตย์ได้ในเวลาจริง (Real time) รวมทั้งยังสามารถเคลื่อนที่ตามการออกแบบสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตามปฏิทินเวลาจริง ในช่วงที่ไม่ใช้ระบบติดตามแสงอาทิตย์ได้ในเวลาจริง

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาเส้นทางการเดินทางดวงอาทิตย์ และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ปรากฏบนโลก

1.2.2 ศึกษาการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากสมการคณิตศาสตร์ และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ความต่อเนื่องในการติดตามแสงอาทิตย์

1.2.3 ใช้สัญญาณภาพจากกล้องที่จับภาพแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหอคอยรับแสงอาทิตย์ (Solar Tower Receiver) เพื่อสะท้อนแสงจากแผ่นสะท้อน (Reflector) ไปยังหอคอยรับแสงอาทิตย์ (Solar Tower Receiver)

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1.3.1 ใช้กล้องเว็บแคมเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณภาพแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสง

1.3.2 สร้างระบบซอฟต์แวร์โดยใช้โปรแกรม Visual Studio สำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องเว็บแคม เพื่อควบคุมแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์

1.3.3 เพิ่มความสามารถของซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพในการประมาณค่าตำแหน่งปัจจุบันของดวงอาทิตย์ได้จากปฏิทินเวลาจริง

1.3.4 ออกแบบระบบควบคุมแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์ที่มีการทำงานสองแกน

1.3.5 ทำการทดสอบชิ้นงานในการสะท้อนแสงอาทิตย์ให้อยู่ ณ จุดกึ่งกลางของหอคอยรับแสงมากที่สุด

1.4 วิธีการที่ใช้ในการทำโครงการ

เราใช้กล้องเว็บแคมเป็นตัวรับภาพของสัญญาณภาพตำแหน่งดวงอาทิตย์ และทำการส่งสัญญาณตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ได้ไปยังโปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Visual Studio ซึ่งทำงานในส่วน Machine Vision จากนั้นโปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งส่งข้อมูลไปยังตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อขับเคลื่อนระบบการสะท้อนแสงดวงอาทิตย์ไปยังหอคอยรับแสง (Solar Tower Receiver)

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานประจำปี ส.ค. 2558 ถึง ธ.ค. 2558

หัวข้อ	ส.ค. 58				ก.ย. 58				ต.ค. 58				พ.ย. 58				ธ.ค. 58			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ																				
2. เขียนโปรแกรมและออกแบบอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้กล่องเว็บแคม																				
3. สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแผ่นสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์																				
4. เชื่อมต่อโปรแกรมที่เขียนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแผ่นสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์																				
5. ทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์																				
6. ตรวจสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์																				
7. ทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์																				

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินโครงการประจำปี เดือน ม.ค. 2559 ถึง พ.ค. 2559

หัวข้อ	ม.ค. 59				ก.พ. 59				มี.ค. 59				เม.ย 59				พ.ค. 59			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ					←————→															
2. เขียนโปรแกรมและออกแบบอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้กล้องเว็บแคม	←————→																			
3. สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ขับเคลื่อนแผ่นสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์	←————→																			
4. เชื่อมต่อโปรแกรมที่เขียนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแผ่นสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์					←————→															
5. ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์					←————→															
6. ตรวจสอบ และ ปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์					←————→															
7. ทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									←————→											

1.6 ประโยชน์ที่รับจากการวิจัย

1.6.1 เป็นการประยุกต์วิธีการควบคุมแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์ระหว่าง การรับภาพแสงอาทิตย์จากหอคอยรับแสงผ่านทางกล้องเว็บแคม กับการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากปฏิทินเวลาจริงเข้าด้วยกัน

1.6.2 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานทางเลือกชนิดอื่นต่อไป

1.6.3 เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงด้วยเทคนิค Machine Vision โดยใช้โปรแกรม Visual Studio ในการพัฒนาระบบ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

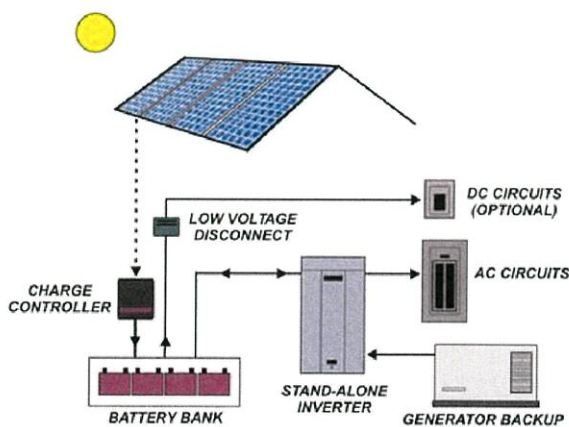
2.1 การใช้ประโยชน์จากแสงอาทิตย์ในด้านการผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าโดยอ้อมผ่านกระบวนการทางความร้อน

2.1.1 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง

วิธีแรก คือ ใช้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Device) หรือที่รู้จักกันในชื่อโซลาร์เซลล์ (Solar Cells) อุปกรณ์นี้จะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง เซลล์แต่ละเซลล์จะถูกเชื่อมเข้าไว้ด้วยกันเป็นแผงโซลาร์ ซึ่งสามารถนำไปวางไว้บนหลังคาบ้าน ในเครื่องคิดเลข หรือบนพื้นที่โล่งใหญ่ๆ เพื่อให้พลังงานกับเมืองทั้งเมืองก็ได้ พลังงานแสงอาทิตย์ไม่ผลิตมลพิษทางอากาศและไม่สร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเนื่องจากสามารถนำไปวางไว้บนอาคารที่ก่อสร้างเสร็จแล้วได้เลย เราจึงไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่เพิ่มเติมเพื่อสร้างโรงไฟฟ้า ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

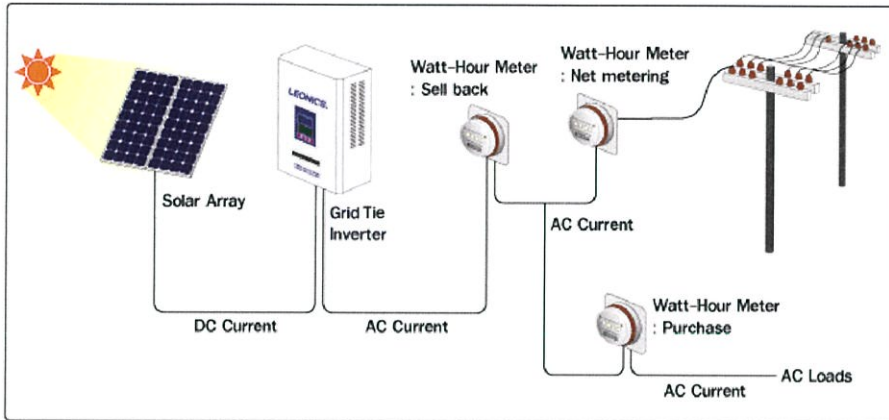
- เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ



รูปที่ 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System)

- เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System)

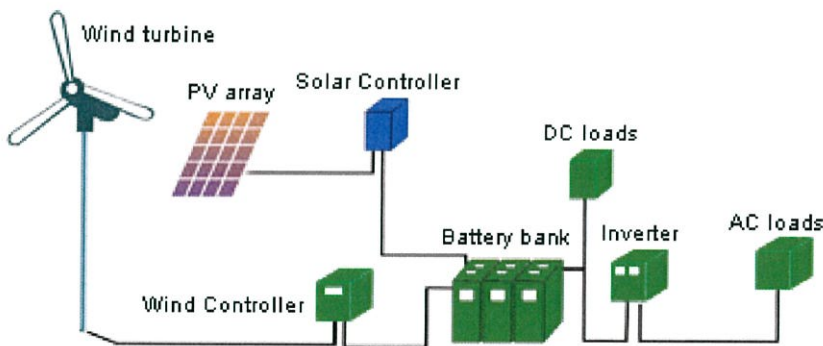
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System)

- เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูก

ออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ



รูปที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System)

2.1.2 การใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางความร้อน

อีกหนึ่งวิธีที่เราสามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ ก็คือใช้ประโยชน์จากความร้อนของแสงอาทิตย์ โรงงานไฟฟ้าพลังความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Thermal Electric power Plant) ผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยรวมพลังงานแสงอาทิตย์แล้วใช้ความร้อนทำให้น้ำเดือด ซึ่งทำให้เกิดไอน้ำ ไอน้ำนี้จะทำให้ใบพัดของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าหมุนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานไฟฟ้าพลังความร้อนจากแสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยกระจกหลายบานบนพื้นที่กว้างที่คอยสะท้อนแสงอาทิตย์ขึ้นไปยังเครื่องรับ ตัวเครื่องรับจะรับพลังงานแสงอาทิตย์นี้มาเพื่อเปลี่ยนเป็นความร้อน ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ชนิด

โรงไฟฟ้าแบบหอคอยพลังงาน หรือ อาจเรียกว่าแบบรับแสงที่ศูนย์รวม (Central receiver) คือ โรงผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นหอคอยสูง รับความร้อนที่เป็นรังสีจากดวงอาทิตย์จากกระจกเรียบจำนวนมากที่สามารถรับเข้าหาดวงอาทิตย์เสมอ (เรียกกระจกแบบนี้ว่า heliostat) ที่อยู่ด้านล่าง หอคอยนี้จะสะสมความร้อนและทำตัวเหมือนเตา ความร้อนสูง เปลี่ยนความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่ได้ ถือว่าเป็นพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนไร้มลพิษแบบหนึ่ง

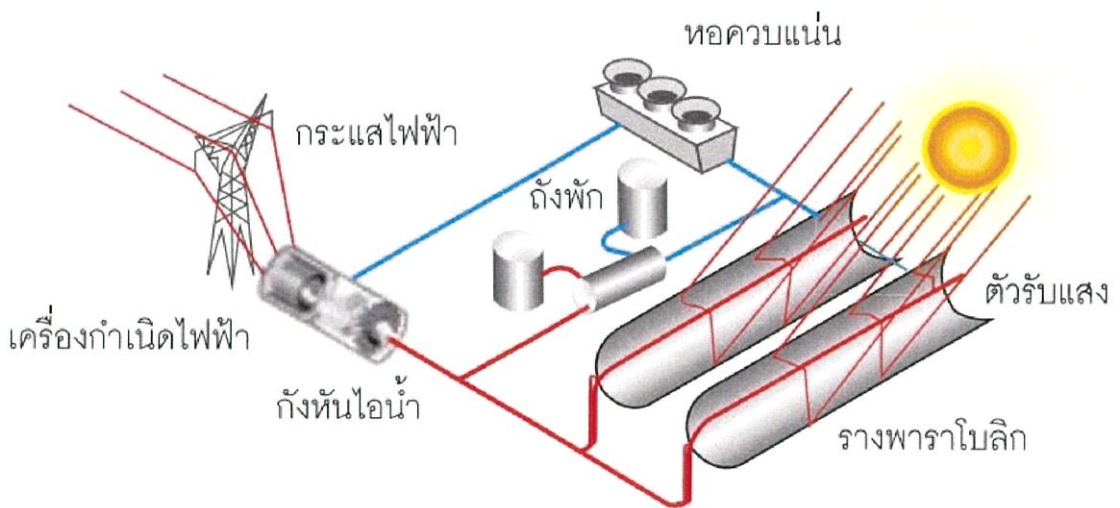
การออกแบบในตอนแรกๆ จะใช้แสงที่ถูกโฟกัสนี้ไปทำให้น้ำร้อน ไอน้ำที่ได้จะนำไปใช้หมุนกังหันไอน้ำ แต่ปัญหาคือ ถ้าไม่มีแสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าไม่ได้ การออกแบบใหม่โดยใช้โซเดียมเหลวเป็นตัวเก็บพลังงานความร้อนและได้รับการสาธิตให้เห็นจริง ต่อมาใช้เกลือหลอมเหลว (โพแทสเซียมไนเตรท 40% โซเดียมไนเตรท 60%) เป็นของเหลวใช้งานได้ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าในหอพลังความร้อนในปัจจุบัน ของเหลวใช้งานนี้มีความสามารถเก็บความร้อนได้สูงมาก ซึ่งใช้ในการเก็บพลังงานความร้อนก่อนที่จะใช้ต้มน้ำเพื่อขับกังหัน การออกแบบวิธีนี้จึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ แม้ไม่มีแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 โรงไฟฟ้าแบบหอคอยพลังงาน

ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าแบบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นในหลายพื้นที่ของหลายประเทศ บางแห่งเป็นโรงไฟฟ้าเชิงพาณิชย์เรียบร้อยแล้วและบางแห่งกำลังทำการวิจัยและพัฒนา โดยในปัจจุบันโรงไฟฟ้าแบบนี้สามารถทำอุณหภูมิได้สูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส และสามารถสร้างให้มีขนาดกำลังการผลิตสูงกว่า 200 เมกะวัตต์

โรงไฟฟ้าแบบรางพาราโบลิก (Parabolic Troughs) เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบรางพาราโบลิก (Parabolic Troughs) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยรางพาราโบลิก ถูกออกแบบโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จากพาราโบลิกร่วมกับเชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อเป็นระบบเสริมในกรณีที่แสงอาทิตย์มีความเข้มแสงไม่พอ หรือในเวลาากลางคืน ซึ่งไม่มีแสงอาทิตย์ ระบบจะทำงานโดย ปั๊มน้ำมัน Hot Oil จะส่งน้ำมันร้อน ซึ่งเป็นสารทำงานไปตามท่อ และผ่านไปยังท่อดูดซับรังสี (Receiver) ซึ่งวางในตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบลิก มีลักษณะเป็นรางโค้งรูปทรงพาราโบลาน้ำมันร้อนจะรับพลังงานความร้อนจากการรวมแสงของรางพาราโบลิก จนมีอุณหภูมิสูง อาจสูงถึง 400 °C และเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งใช้น้ำเป็นสารรับพลังงานความร้อนทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำ และจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องจักรไอน้ำ (Steam Turbine) ทำให้ใบพัดของเครื่องยนต์กังหันไอน้ำหมุน ซึ่งมีแกนต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ไอน้ำส่วนที่ผ่านใบกังหันไอน้ำจะถูกส่งให้กลั่นตัวในเครื่องควบแน่น (Condenser) ก่อนจะถูกปั๊มน้ำส่งเข้าระบบผลิตไอน้ำอีกครั้ง การทำงานในช่วงการผลิตไอน้ำ จะทำงานด้วยวัฏจักร Rankine



รูปที่ 2.5 การประยุกต์ใช้งานระบบแผ่นรับแสงแบบรวมแสง ชนิด Parabolic Troughs

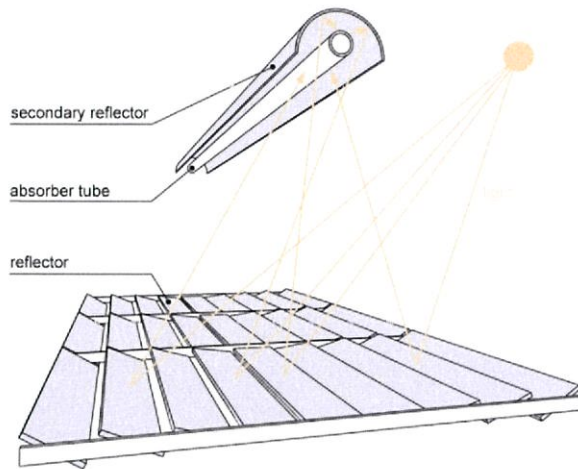
โรงไฟฟ้าแบบจานพาราโบลิก การผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบจานพาราโบลิก มีการประยุกต์ใช้ 2 ระบบ คือ ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายนอก (Stirling engine) กับเครื่องยนต์ไอน้ำขนาดเล็ก (Small stream engine) แต่ที่นิยมกันมาก คือ การใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายนอก เพราะสามารถทำอุณหภูมิให้สูงได้ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานถึงร้อยละ 30 ส่วนการประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์ไอน้ำขนาดเล็กนั้นจะมีความยุ่งยากเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป หลักการทำงานของระบบจานพาราโบลิกที่ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายนอก คือ เมื่อแสงสะท้อนมารวมกันที่ส่วนรับแสงสะท้อนสารทำงานซึ่งเป็นของเหลวที่บรรจุอยู่ในส่วนรับแสงสะท้อนได้รับพลังงานความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานความร้อนจากสารทำงานจะ

ถ่ายเทให้กับอากาศหรือก๊าซที่อยู่ภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เมื่อก๊าซได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวไปดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ และเมื่ออุณหภูมิของก๊าซลดลงลูกสูบก็จะเคลื่อนที่กลับ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบนี้เมื่อนำไปต่อเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบงานพาราโบลาแบบชุดเดียวที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 7 - 25 กิโลวัตต์ แต่สามารถทำให้ได้ขนาดกำลังการผลิตที่มากขึ้นโดยการประกอบต่อกันหลายๆ ชุด



รูปที่ 2.6 ลักษณะของโรงไฟฟ้าแบบงานพาราโบลา

โรงไฟฟ้าแบบเฟรสเนลแบบเส้นตรง Fresnel reflector เทคโนโลยีนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบรางพาราโบลา แต่แตกต่างกันตรงกระจกที่ใช้จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบ ไม่มีความโค้ง แสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนจากกระจกแล้วมารวมที่ตัวรับ ซึ่งจะวางเป็นแนวยาวตามกระจก และจะมีกระจกครอบไว้ด้านบนอีกชั้น เพื่อที่จะทำการรวมแสงที่ไม่ได้ส่งไปที่ตัวรับอีกรอบเทคโนโลยีนี้มีข้อดี คือ มีราคาการผลิตและโครงสร้างที่ถูกกว่า และพื้นที่ของกระจกต่อตัวรับมีปริมาณมากกว่า ทำให้สามารถรวมรังสีจากแสงได้ในปริมาณมาก เทคโนโลยีนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.4 เมกะวัตต์ ไปจนถึง 44 เมกะวัตต์ ปัจจุบันเทคโนโลยีการรวมความเข้มแสงอาทิตย์แบบเฟรสเนลแบบเส้นตรงได้มีการติดตั้งเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสเปน บริษัท Novatec Solar ได้ทำการติดตั้งเทคโนโลยีนี้ในปี พ.ศ.2555 โดยใช้เลนส์เฟรสเนลแบบเส้นตรงจำนวน 28 แถว ซึ่งมีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ทั้งหมด 302,000 ตารางเมตร ดำเนินงานที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ความดัน 55 บาร์ เทคโนโลยีจากบริษัทนี้กำลังการผลิต 30 เมกะวัตต์ ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 49 จิกะวัตต์ชั่วโมง

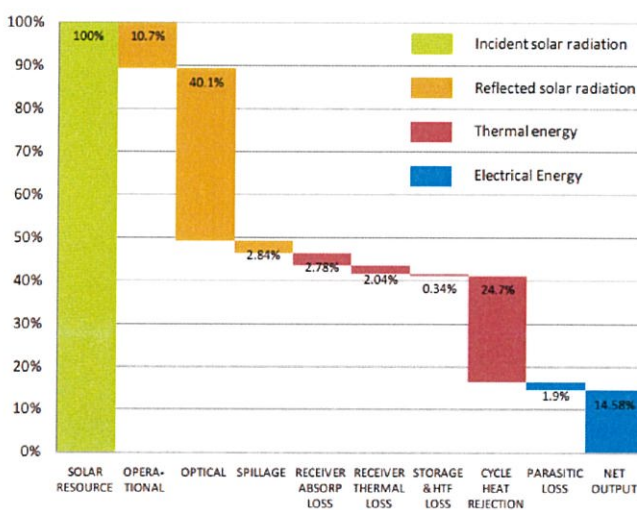


รูปที่ 2.7 รูปแบบการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์

โดยพื้นฐานแล้ว การผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ทำงานคล้ายกันกับโรงงานไฟฟ้าพลังงานเชื้อเพลิง แต่แทนที่จะสร้างไอน้ำโดยการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานแสงอาทิตย์จะถูกใช้สร้างไอน้ำแทน

2.2 ประสิทธิภาพและต้นทุนของโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ [11]

2.2.1 การพิจารณาความสูญเสียต่างๆในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบหอคอยพลังงาน



รูปที่ 2.8 กราฟความสูญเสียต่างๆในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบหอคอยพลังงาน

โดยจะมีความสูญเสียในแต่ละส่วนจากกราฟข้างต้นดังนี้

- Solar resource แสดงถึงจำนวนพลังงานที่มาจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผ่นสะท้อนทั้งหมด ซึ่งคำนวณแบบเฉลี่ยรายปี
- Operational แสดงถึงพลังงานที่ไม่ถูกเก็บอันเนื่องมาจากการไม่สามารถเก็บพลังงานของระบบทำความร้อน ซึ่งเกิดเมื่อ power cycle ทำงานเต็มกำลัง ดังนั้น พลังงานความร้อนจึงไม่ถูกนำมาเก็บในระบบซึ่งส่งผลให้ไม่มีการเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์
- Optical แสดงถึงจำนวนพลังงานที่สูญเสียอันเนื่องมาจาก geometric factor และ การสะท้อนแสงที่ไม่สมบูรณ์แบบของพลังงาน โดยมี cosine losses, reflectance, soiling, shading และ blocking และ ความไม่เหมาะสมของสภาพอากาศ เป็นต้น โดยที่ cosine losses เป็นความสูญเสียที่เกิดจากความสัมพันธ์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ ฮีลิโอสแตต กับตัวรับพลังงาน รวมทั้งยังมีความสูญเสียที่เกิดเนื่องมาจากการบดบังแสงอาทิตย์จากตำแหน่งการตั้งของฮีลิโอสแตต Reflectance เป็นความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนของพื้นผิวแผ่นกระจก แม้ว่าจะมีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนสูงแล้วก็ตาม แต่ก็ยังทำได้เพียงร้อยละ 96 โดยต่อไปเป็น Soiling ซึ่งคือการที่ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกปกคลุมพื้นผิวกระจกสะท้อนและยังมีในส่วนของระยะห่างระหว่างตัวรับพลังงานกับฮีลิโอสแตต
- Spillage เป็นพลังงานที่สูญเสียจากการสะท้อนแสงที่หลุดนอกพื้นผิวตัวรับพลังงานอันเนื่องมาจากคุณภาพของกระจกสะท้อนหรือการวางตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม
- Receiver absorption losses แม้ว่าแผ่นของตัวรับพลังงานจะมีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานสูงแล้วก็ตามแต่ยังคงดูดซับพลังงานได้เพียงร้อยละ 94 โดยร้อยละ 94 ในที่นี้เป็นลำแสงอาทิตย์ที่ถูกสะท้อนตกกระทบลงบนผิวตัวรับพลังงานที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน
- Receiver Thermal losses เป็นความสูญเสียอันเนื่องมาจากการแผ่ และแผ่รังสีของตัวรับพลังงาน
- Storage and HTF loss เป็นส่วนที่พลังงานสูญเสียในระบบท่อส่งและระบบเก็บพลังงานความร้อน แต่ความสูญเสียในระบบมีค่าน้อยมากเนื่องจากมีฉนวนความร้อนป้องกันอยู่
- Cycle heat rejection เป็นส่วนที่พลังงานความร้อนที่ไม่สามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะถูกส่งไปยังระบบทำความเย็น
- Parasitic loss เป็นพลังงานที่ถูกนำไปใช้ในระบบไฟฟ้าพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าและใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบท่อส่งของเหลวถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสูญเสียในระบบควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์
- Net output เป็นพลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้หลังจากที่ได้คำนวณความสูญเสียทั้งหมดแล้ว

2.2.2 ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

ประสิทธิภาพของระบบนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ การวางตำแหน่งของตัวรางพาราโบลิก ประสิทธิภาพวัฏจักรไอน้ำ โดยที่ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิตัวถังดูดซับความร้อนซึ่งประสิทธิภาพสามารถสูงถึงร้อยละ 75 ส่วนการสูญเสียจากการวางตำแหน่งปกติแล้วจะต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อคิดค่าความสูญเสียทั้งหมดแล้วมาคำนวณเป็นประสิทธิภาพของระบบในรายปีจะอยู่ที่ร้อยละ 15 การสูญเสียที่มีผลต่อระบบนี้มากที่สุดคือ วัฏจักรไอน้ำ โดยคิดเป็นร้อยละ 35 เมื่อเทียบ

กับระบบหอคอยพลังงานที่ทำงานในย่านที่อุณหภูมิที่สูงกว่าจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงกว่า

2.2.3 เปรียบเทียบเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะเด่นของแต่ละประเภทของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนอันได้แก่ แบบรางพาราโบลิก หอคอยพลังงาน แผ่นสะท้อนเฟรสเนล และจานพาราโบลิก ในการพิจารณาถึงคุณสมบัติในแต่ละด้านไม่ได้ใช้แค่เฉพาะแง่มุมของมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์และข้อมูลเชิงเทคนิค แต่ยังมีความเกี่ยวข้องถึงความเชื่อมั่น การเติบโตของแต่ละเทคโนโลยีและประสบการณ์ในการดำเนินการผลิตและพัฒนา

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบรางพาราโบลิกเป็นที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในเชิงพาณิชย์ แต่ในทางกลับกันการเติบโตทางด้านเทคโนโลยีและการพัฒนาเพื่อประสิทธิภาพที่มากขึ้นและการลดต้นทุนยังไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ โดยจะเห็นได้ว่าในระบบ PTC (Parabolic trough collector) ที่ไม่มีระบบเก็บพลังงานความร้อนจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าในเวลาที่ใช้แสงอาทิตย์เท่านั้น

ในปัจจุบันนี้โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้อยู่ระหว่างการก่อสร้างหรือพัฒนาโดยส่วนมากจะเป็นแบบรางพาราโบลิก เมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ทั้งแบบรางพาราโบลิกและหอคอยพลังงานได้เพิ่มระบบเก็บความร้อนจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานผลิตพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบหอคอยพลังงานและแผ่นสะท้อนเฟรสเนลยังอยู่ในช่วงของการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์มากยิ่งขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าศักยภาพในการลดต้นทุน และประสิทธิภาพในการผลิตของแบบหอคอยพลังงานนั้นเป็นที่น่าสนใจอย่างมากแม้ว่าแบบรางพาราโบลิกจะมีการนำไปใช้ในการผลิตเป็นเวลายาวนานกว่าแต่แบบหอคอยนั้นให้การตอบสนองและยืดหยุ่นมากกว่า

โดยจะเห็นได้ว่ามีความสนใจในระบบแบบหอคอยพลังงานที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เกลือหลอมละลายหรือน้ำมันสังเคราะห์ต่างๆเป็นของเหลวนำพาความร้อนและเป็นตัวกลางของระบบเก็บความร้อน ซึ่งตรงจุดนี้เองจะช่วยในการเพิ่มศักยภาพในการประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้น ยกற்பะสิทธิภาพมากขึ้นยิ่งขึ้น ดังนั้นในอนาคตอันใกล้นี้ระบบแบบหอคอยพลังงานจะเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยมีพื้นฐานมาจากต้นทุนของระบบเก็บพลังงานที่ต่ำ capacity factor ที่สูงขึ้นรวมทั้งวัฏจักรไอน้ำที่มีประสิทธิภาพและขนาดการผลิตที่สูง เมื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของระบบระหว่างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกกับหอคอยพลังงานจะพบว่ารางพาราโบลิกมีประสิทธิภาพร้อยละ 15 แต่แบบหอคอยพลังงานมีประสิทธิภาพร้อยละ 20 เลยทีเดียว

ในการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อให้ได้จุดที่คุ้มทุนในการสร้าง และความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์จะต้องมีขนาดมากกว่า 10 MW ขึ้นไป ในกรณีมีขนาดต่ำกว่า 10 MW ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าดูแลรักษาและดำเนินการจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับรายรับที่ได้รับรวมทั้งประสิทธิภาพของระบบยังต่ำ เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุดขนาดของโรงจักรควรอยู่ระหว่าง 50 ถึง 200 MW

โดยในขณะที่ค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบแบบโรงพาราโบลิคไม่มีแนวโน้มที่ราคา ลดลงในขณะที่ค่า capacity factor เพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของระบบแบบหอคอยพลังงานมีแนวโน้มที่ ลดลงในขณะที่ค่า capacity factor เพิ่มขึ้น ที่เป็นแบบนี้เนื่องมาจากต้นทุนของระบบเก็บความร้อนที่ ใช้เกลือหลอมละลายเป็นของเหลวถ่ายเทความร้อนในระบบหอคอยพลังงาน

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นสำคัญในการช่วยอุตสาหกรรม ท้องถิ่นในแหล่งต่างๆ ที่ซึ่งสามารถกระตุ้นเศรษฐกิจท้องถิ่นได้ โดยมีทั้งการสร้างงานในชุมชน และใน อนาคตอันใกล้นี้ได้มีการประมาณการว่าระบบหอคอยพลังงานนั้นจะมีศักยภาพในการสร้างโอกาสใน ด้านต่างๆมากกว่าระบบโรงพาราโบลิค

2.2.4 แนวโน้มทางการตลาดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

จาก 20 ปีที่ผ่านมาที่ได้ทำการสร้างโรงไฟฟ้าแบบหอคอยพลังงานขนาด 1 MW ที่ อลิโซนา และที่ประเทศสเปนขนาด 11 MW ที่มีชื่อว่า PS10 และที่ รัฐเนวาดาขนาด 64 MW ในปี 2006 หลังจากนั้นมาได้มีการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อีกหลายแห่ง และใน ปัจจุบันนี้มีประมาณ 10 กว่าแห่งที่อยู่ภายใต้การก่อสร้างและมากกว่า 20 GW ที่กำลังถูกพัฒนาเพื่อ นำไปใช้ทั่วโลก โดยผู้นำทางด้านโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีอยู่ 2 แห่งคือที่ประเทศ สหรัฐอเมริกาและที่ประเทศสเปน ประเทศทั้งสองนี้มีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์คิด รวมกันมากถึงร้อยละ 90 ของขนาดที่ติดตั้งในปัจจุบัน และที่เหลือนั้นยังมีที่ประเทศ แอลจีเรีย อียิปต์ และโมร็อกโคที่สร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมกับ ก๊าซธรรมชาติ แล้วก็มีการศึกษาแล้วพัฒนาเพื่อการพาณิชย์ในอนาคตอันใกล้นี้ทั้งในประเทศ ออสเตรเลีย จีน อินเดีย อิหร่าน อิตาลี จอร์แดน เม็กซิโก เป็นต้น

ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในประเทศสหรัฐอเมริกาและ สเปนได้มีการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างกว้างขวาง โดยความสำเร็จที่เกิดขึ้นของทั้งสองประเทศก็มา จากแสงอาทิตย์ที่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าและราคาที่ดินที่ถูก

ในปี 2010 มีประมาณ 1229 MW ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์โดยมี 749 MW ถูกติดตั้งที่ ประเทศสเปน 509 MW ถูกติดตั้งที่ประเทศสหรัฐอเมริกา และขนาด 4 MW ที่ประเทศออสเตรเลีย และในปี 2012 จะเพิ่มขนาดทั้งหมดเป็น 1.9 GW ซึ่งที่ประเทศสเปนจะเพิ่มขนาดเป็น 1331 MW ประเทศสหรัฐอเมริการองลงมาเป็นอันดับ 2 ที่ขนาด 518 MW

ตารางที่ 2.1 ขนาดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในแต่ละประเทศในปี 2012

Country	Operating
USA	518
Spain	1 331
Algeria, Australia, France, Italy and Morocco	75

Source: AEIST, 2012; NREL, 2012; and Photon International, 2009.

ในปัจจุบันนี้ร้อยละ 94 ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นแบบรางพาราโบลิกแล้วที่เหลืออีกร้อยละ 5 เป็นแบบหอคอยพลังงานแล้วอีกร้อยละ 1 เป็นแผ่นสะท้อนเพชรเนล

จากแนวโน้มที่มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องซึ่งทางองค์การในแถบทางยุโรปได้มีการคาดการณ์การเติบโตในส่วนของทวีปยุโรปว่าในปี 2020 จะมีขนาดการติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ 30 GW และในปี 2030 ขนาด 60 GW องค์พลังงานระหว่างประเทศ (IEA) ได้วางโรดแมปว่าภายในปี 2020 ทั้งโลกจะมีการเติบโตถึง 147 GW และในปี 2030 คาดการณ์ว่าจะเพิ่มถึง 337 GW แล้วจะเพิ่มขึ้นอีก 3 เท่าที่มีขนาด 1089 GW ในปี 2050

2.2.5 ค่าไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

ในระบบรางพาราโบลิกจะมีค่าไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ USD 0.20 ถึง USD 0.33/kWh ซึ่งขึ้นอยู่กับที่ตั้งของโรงไฟฟ้าว่ามีระบบเก็บพลังงานความร้อนหรือไม่ และในส่วนของระบบหอคอยพลังงานนั้นมีค่าไฟฟ้าอยู่ช่วงระหว่าง USD 0.16 และ USD 0.27/kWh ในปัจจุบัน

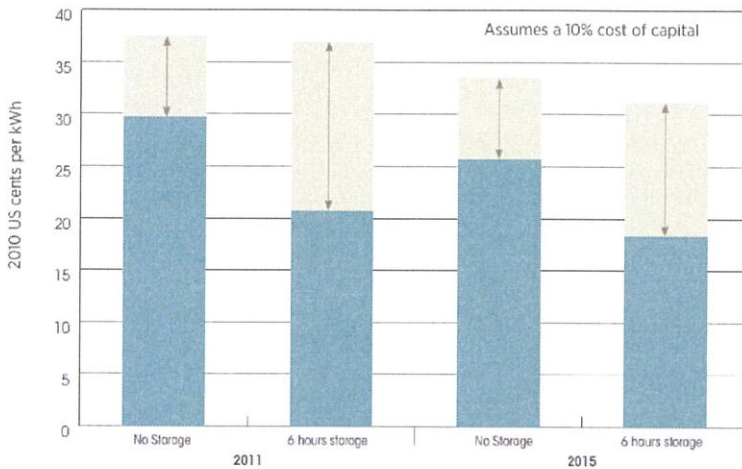
ค่าไฟฟ้าของระบบรางพาราโบลิกมีแนวโน้มที่จะลดลงในช่วงระหว่างร้อยละ 38 ถึง 50 ภายในปี 2020 อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่พัฒนาและเงินลงทุนในการสร้างที่ลดลง และในส่วนของระบบหอคอยพลังงานก็มีแนวโน้มที่ลดลงเช่นกันซึ่งลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 30 ถึง 50 ภายในปี 2020

ในส่วนของคาดการณ์ค่าใช้จ่ายในการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในระบบรางพาราโบลิกที่ไม่มีระบบเก็บพลังงานความร้อนอยู่ที่ USD 4600/kW มี capacity factor ที่ 0.2 ถึง 0.25 และในกรณีที่มีระบบเก็บพลังงานความร้อนที่เก็บได้ 6 ชั่วโมง มีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ประมาณ USD 7100 ถึง USD 9800/kW แม้ว่าราคาจะแพงขึ้นแต่ก็ช่วยในการเพิ่ม capacity factor ระหว่าง 0.4 ถึง 0.53

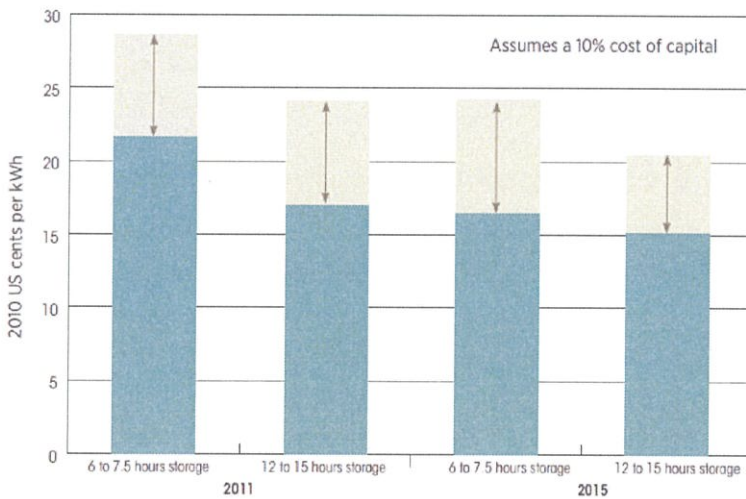
ในระบบหอคอยพลังงานทำงานในย่านที่อุณหภูมิที่สูงกว่าดังนั้นราคาของระบบเก็บพลังงานความร้อนมีราคาที่ถูกกว่าและศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าที่สูงกว่า ระบบหอคอยพลังงานที่เก็บได้ตั้งแต่ 6 ชั่วโมงถึง 7.5 ชั่วโมง มีราคาในการสร้างโรงไฟฟ้าที่ประมาณ USD 6300 ถึง 7500/kW และมี capacity factor ระหว่าง 0.4 ถึง 0.45 และในกรณีถ้าระบบเก็บความร้อนเก็บได้ยาวนานขึ้นที่ 9 ชั่วโมง มีราคาประมาณ USD 7400 ถึง 7700/kW มี capacity factor ระหว่าง 0.45 ถึง 0.55 การเพิ่มจำนวนชั่วโมงของระบบเก็บความร้อน ตั้งแต่ 12 ชั่วโมง ถึง 15 ชั่วโมง มีราคาในการสร้างระหว่าง USD 9000 ถึง USD 10500/kW เพิ่ม capacity factor สูงถึง 0.65 ถึง 0.8

ตารางที่ 2.2 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งในระบบรางพาราโบลิกและระบบหอคอยพลังงานในปี 2011 และ 2015

	2011		2015	
	2010 USD/kW	Capacity factor (%)	2010 USD/kW	Capacity factor (%)
Parabolic trough				
No storage	4 600	20 to 25	3 900 to 4 100	20 to 25
6 hours storage	7 100 to 9 800	40 to 53	6 300 to 8 300	40 to 53
Solar tower				
6 to 7.5 hours storage	6 300 to 7 500	40 to 45	5 700 to 6 400	40 to 53
12 to 15 hours storage	9 000 to 10 500	65 to 80	8 100 to 9 000	65 to 80



รูปที่ 2.9 กราฟค่าไฟฟ้าของระบบรางพาราโบลิกในปี 2011 และ 2015



รูปที่ 2.10 กราฟค่าไฟฟ้าของระบบหอคอยพลังงานในปี 2011 และ 2015

ค่าไฟฟ้าของระบบรางพาราโบลิกที่ผลิตได้โดยปราศจากระบบเก็บความร้อนได้ถูกประมาณไว้ระหว่าง USD 0.30 ถึง USD 0.37/kWh แล้วสามารถลดลงไปได้ถึงระหว่าง USD 0.26 ถึง USD 0.34/kWh ในปี 2015 ระบบรางพาราโบลิกที่มาพร้อมกับระบบเก็บความร้อนที่มีขนาด 6 ชั่วโมงได้ถูกประมาณค่าไฟฟ้าอยู่ที่ระหว่าง USD 0.21 ถึง USD 0.37/kWh ซึ่งขึ้นอยู่กับต้นทุนในการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และค่า capacity factor แล้วภายในปี 2015 ราคาไฟฟ้าจะถูกกลงอยู่ที่ประมาณ USD 0.18 ถึง 0.31/kWh

การประมาณค่าไฟฟ้าของระบบหอคอยพลังงานที่มีขนาดของระบบเก็บความร้อนอยู่ที่ 6 ถึง 7.5 ชั่วโมงในปี 2011 มีราคาอยู่ที่ระหว่าง USD 0.22 ถึง USD 0.29/kWh แล้วถ้ามีการติดตั้งระบบเก็บความร้อนที่ขนาด 12 ถึง 15 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้ายิ่งจะตกลงมาที่ระหว่าง USD 0.17 ถึง USD 0.24/kWh ในปี 2015 ต่อมาเมื่อต้นทุนในการสร้างโรงไฟฟ้าโรงไฟฟ้าที่มาพร้อมกับระบบเก็บความร้อนที่มีขนาด 12 ถึง 15 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าจะลดลงไปอยู่ที่ระหว่าง USD 0.15 ถึง USD 0.21/kWh ภายในปี 2015

ดังนั้น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ระบบหอคอยพลังงานมีศักยภาพในการลดต้นทุนในหลายๆด้านในจุดที่ว่าสามารถนำไปแข่งขันกับเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อโหลดปานกลางและพีคโหลดในช่วงตอนกลางวันทั้งในแง่ของช่วงระยะสั้นจนถึงระยะกลาง ในท้ายที่สุดนี้ภายในปี 2020 เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าพร้อมกันกับนโยบายภาครัฐที่ช่วยส่งเสริมต่อการขยายระบบจึงเป็นที่น่าจับตามองของระบบหอคอยพลังงานที่จะเป็นอีกส่วนหนึ่งที่จะเข้ามาเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศได้

ระบบแผ่นสะท้อนเฟรสเนลและจานพาราโบลาที่ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ริงต้นทุนในการสร้างและค่าไฟฟ้าในการผลิตยังไม่มีมีการวิเคราะห์และคาดการณ์ในงานวิจัยปัจจุบัน

2.2.6 ตัวอย่างโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในต่างประเทศ

โครงการ Solar Two – ใช้ระบบแบบหอคอยพลังงานมีที่ตั้งแถวบริเวณทะเลทรายโมแจฟ สามารถกำลังการผลิตขนาด 10 MW โดยในโครงการนี้มีฮีลิโอสแตตนับพันชั้นโดยอุณหภูมิของสารถ่ายเทความร้อนหรือเกลือหลอมละลายที่อยู่ในส่วนของถังเก็บความร้อนอุณหภูมิตำ่มีอุณหภูมิที่ 290 องศาเซลเซียส แล้วจะถูกปั๊มไปยังตัวรับความร้อนบนหอคอยที่มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 565 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเกลือหลอมละลายที่ถูกทำให้ร้อนก็จะเคลื่อนไปยังถังเก็บความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อระบบต้องการที่จะผลิตไฟฟ้าเกลือหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงก็จะถูกปั๊มไปยังเจเนอเรเตอร์เพื่อผลิตไอน้ำเพื่อไปปั่นเทอร์ไบน์แล้วหลังจากที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิเสร็จเกลือหลอมละลายก็จะกลับไปปรับความร้อยใหม่่วนเป็นวัฏจักร

การใช้ระบบเก็บความร้อนช่วยทำให้ระบบมีศักยภาพในผลิตไฟฟ้าร้อยละ 65 โดยปราศจากการใช้แหล่งเชื้อเพลิง ในกรณีที่ระบบปราศจากระบบเก็บพลังงานความร้อนมีค่า capacity factor อยู่ที่ร้อยละ 25 โดยที่ระบบเก็บพลังงานความร้อนมีขนาด 3 ชั่วโมง สามารถผลิตไฟฟ้าแม้ไม่มีแสงอาทิตย์

ในปี 1982 ถึง 1988 ได้พิสูจน์แล้วว่าระบบหอคอยพลังงานสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในโครงการ Solar One ใช้ น้ำหรือไอน้ำเป็นสารถ่ายเทความร้อนแต่เนื่องจากเกิดปัญหาหลายประการจึงได้มีการพัฒนาระบบ จึงเกิดมาเป็น Solar Two ที่เริ่มดำเนินการในช่วงปี 1996 ถึง 1999 ทั้งสองโครงการนี้ให้กำลังการผลิตอยู่ 10 MW แล้วก็มีมีการวิจัยอย่างเรื่อยมาขยายไปยังทวีปยุโรปโดยเฉพาะประเทศสเปนที่โครงการชื่อว่า Solar Tres ที่ลักษณะคล้ายกับโครงการ Solar Two ที่ใช้งานให้กับภาคอุตสาหกรรม

2.3 การเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบหอคอยพลังงาน

อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการดูดซับและสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลาง (medium) ที่ลำเลียงไปตามระบบท่อ ส่วนประกอบหลักของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้แก่

1. ตัวดูดกลืน (absorber) ทำหน้าที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีคลื่นสั้น (short wave radiation) ได้ดี สะท้อนแสงน้อย อัตราการปลดปล่อยพลังงานในรูปร่างคลื่นยาว (long wave radiation) ต่ำและไม่ยอมให้แสงส่องผ่าน ได้แก่ โลหะทองแดงหรืออลูมิเนียม เป็นต้น
2. อุปกรณ์นำความร้อน (heat carrier) ประกอบด้วยตัวกลางและระบบท่อนำความร้อน ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากตัวดูดกลืนไปยังอุปกรณ์ปลายทาง
3. อุปกรณ์เก็บความร้อน (energy storage) ทำหน้าที่เก็บสะสมความร้อนก่อนที่จะนำไปใช้งาน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งตามรูปทรงของตัวเก็บรังสี ได้แก่ ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบแบบท่อ และแบบรางพาราโบลา โดยอุปกรณ์เก็บความร้อนที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้จะใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบหอคอยพลังงานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

Two-tank direct system

พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จะถูกเก็บไว้ในของเหลวที่มีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่สามารถเก็บความร้อนเพื่อถ่ายเทไปยังถังเก็บความร้อน โดยระบบนี้จะมี 2 ถังซึ่งถังแรกจะมีอุณหภูมิสูงและอีกถังจะมีอุณหภูมิต่ำ ของเหลวที่รับความร้อนจากตัวดูดกลืนซึ่ง ณ ขณะนั้นจะมีอุณหภูมิสูงจะไหลผ่านไปยังถังที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อถ่ายเทความร้อนไปยังตัวแรกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) โดยส่วนนี้จะนำความร้อนที่ได้ไปสร้างไอน้ำร้อนเพื่อไปสร้างพลังงานไฟฟ้าจากเจนเนอเรเตอร์ (Generator) ของเหลวที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำไหลไปที่ถังอุณหภูมิต่ำเพื่อทำงานเป็นวัฏจักรในลำดับต่อไป

Two-tank indirect system

ระบบเก็บความร้อนนี้จะลักษณะคล้ายกับระบบที่กล่าวไปในข้างต้นเพียงแต่ใช้ของเหลวที่พาความร้อนต่างกันโดยอยู่ต่างบริเวณ คือ heat-transfer fluid และ storage fluid

โดยที่ storage fluids จากถังอุณหภูมิต่ำไหลผ่านไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อนยิ่งยวด (Extra heat transfer) ที่ heat-transfer fluid ที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทความร้อนไปยัง storage fluid ซึ่งจะไหลไปยังถังอุณหภูมิสูง heat-transfer fluid หลังจากที่มีอุณหภูมิต่ำลงก็จะไปยังตัวดูดกลืนเพื่อรับความร้อนอีกรอบและในส่วน storage fluid จะทำงานคล้ายกับระบบข้างต้นแบบนี้เป็นวัฏจักร

Single-tank thermocline system

ระบบนี้เก็บพลังงานความร้อนในตัวกลางของแข็ง โดยส่วนมากจะเป็นทรายซิลิกาที่ถูกเก็บไว้ในถัง โดยที่ ณ เวลาใดก็ตามในขณะที่ระบบทำงานอยู่ จะเกิดที่แบ่งชั้นของระดับอุณหภูมิ (temperature gradient) หรือที่เรียกว่า thermocline ของเหลวอุณหภูมิสูงไหลผ่านด้านบนของถังแล้วออกทางด้านล่าง จะทำให้ลักษณะของ thermocline เป็นแบบ downward ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนในถังเก็บความร้อน แต่ในทางกลับกันถ้า thermocline เป็นแบบ upward จะเป็น

การถ่ายเทพลังงานความร้อนไปสร้างไอน้ำร้อนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อที่มีการแบ่งชั้นของ thermocline อย่างชัดเจนจะมีการใช้ Buoyancy effects ที่ช่วยทำให้เกิดเสถียรภาพและรักษา ระดับของ thermocline

2.4 การติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงจากงานวิจัยที่มีมาก่อน

ธนาธิป และคณะ [2] ได้เสนอการออกแบบ และการจำลองระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วย Machine Vision System โดยใช้กล้องเว็บแคมในการรับภาพดวงอาทิตย์ และส่งสัญญาณที่ได้ไปยังโปรแกรมประมวลผลภาพ เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากนั้นโปรแกรมประมวลผลภาพจะส่งข้อมูลตำแหน่งของดวงอาทิตย์ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อขับระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยได้ออกแบบให้มีการทำงานสองแนวแกน คือ แกนอัลติจูด และแกนอะซิมูธ เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

ธเนศ และคณะ [3] ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ Machine Vision System สำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นระบบติดตามดวงอาทิตย์จากภาพที่ได้รับจากกล้องเว็บแคม กล้องเว็บแคมจะรับภาพจากดวงอาทิตย์ แล้วส่งสัญญาณภาพที่ได้รับไปยังโปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อประมวลผลตำแหน่งไปยังตัวควบคุมเพื่อขับระบบติดตามดวงอาทิตย์ ในส่วนที่สอง เป็นการแก้ไขข้อบกพร่องจากส่วนแรก คือกรณีที่กล้องไม่สามารถจับภาพดวงอาทิตย์ได้ซึ่งเกิดจากสภาวะอากาศที่ไม่เหมาะสมหรือเมฆบังดวงอาทิตย์ โปรแกรมประมวลผลจะคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากปฏิทินเวลาปัจจุบัน แล้วในท้ายที่สุดนำระบบทั้งสองระบบมาติดตามดวงอาทิตย์

มนัญศักดิ์ และคณะ [4] ได้เสนอการควบคุมด้วยภาพสำหรับระบบปรับตั้งสี่รวมกลาง โดยระบบแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ในระบบติดตามดวงอาทิตย์ โครงสร้างมีองศาอิสระเท่ากับ 2 และใช้กล้องดิจิตอลอุตสาหกรรมในการตรวจจับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ส่วนระบบสะท้อนแสงอาทิตย์มีองศาอิสระเท่ากับ 2 และติดตั้งแผ่นกระจกไว้ด้านบนโครงสร้างเพื่อเป็นตัวสะท้อนแสงอาทิตย์ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID – controller) และมีเป้าหมายต้องการควบคุมให้ตำแหน่งกึ่งกลางดวงอาทิตย์ที่ได้จากกล้องดิจิตอลอุตสาหกรรมอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางข้อมูลภาพ จากนั้นคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์เพื่อใช้ในการควบคุมการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ให้สะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังเป้าหมายที่ต้องการ

R.S. Beheti และ P.F. Scott [7] นำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตั้งอัตโนมัติ (Self-calibrating) เพื่อใช้ในการลดความผิดพลาดของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ (Heliostat) จากการติดตั้งและการขับ โดยตัวควบคุมถูกออกแบบเป็น 2 โหมด แรกเรียกว่า โหมดปรับตั้ง (Calibration mode) โหมดนี้เสาสะท้อนแสงอาทิตย์จะถูกควบคุมด้วยระบบวงจรรูปปิด (Open – loop system) และแบบจำลองของค่าความผิดพลาดของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ จากการติดตั้งและการขับจะถูกคำนวณหาเอกลักษณ์โดยใช้อัลกอริทึม Least – square เพื่อหาพารามิเตอร์ของโมเดล โหมดที่สองเรียกว่า โหมดติดตาม (Track mode) โหมดนี้เสาสะท้อนแสงอาทิตย์จะถูกควบคุมด้วยระบบวงจรรูปเปิด

รอบเปิด (Open loop - system) โดยพารามิเตอร์ของโมเดลที่ได้จากโหมตแรกมาชดเชยค่าความผิดพลาดของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์

Daniel James Murray [8] ได้ออกแบบโรงไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ โดยออกแบบเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ (Heliostat) ที่เคลื่อนที่ได้ 2 แกนและสามารถสะท้อนแสงอาทิตย์ได้เป็นสองเท่า โดยหมุนรอบแกนอะซิมุท ได้ 0-240 องศา และแกนอัลติจูด 0-90 องศา ส่วนการติดตามดวงอาทิตย์นั้นใช้พื้นฐานของสมการดาราศาสตร์ (Astronomical equation) และออกแบบตัวดูดซับความร้อนให้มีขนาดที่เหมาะสมกับแสงอาทิตย์ที่สะท้อนเข้ามาพร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ศกดิ์สิทธิ์ และคณะ [9] เสนอระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ได้ 2 แกนซึ่งใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ โดยในการติดตามดวงอาทิตย์ระบบจะใช้ภาพดวงอาทิตย์ซึ่งรับมาจากกล้องดิจิทัลเว็บแคมและใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลภาพ ส่วนการควบคุมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์

งานวิจัย [2] และ [9] เป็นการควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แบบเวลาจริง (Real time) โดยใช้กล้องเว็บแคมในรับภาพสัญญาณเพื่อใช้ในการประมวลผล แต่อย่างไรก็ตามถ้าในบางครั้งเกิดไม่มีแสงอาทิตย์ให้ใช้ในการติดตามระบบติดตามอาจจะมีการประมวลผลที่ผิดพลาดได้

งานวิจัย [3], [7] และ [8] มีการนำระบบติดตามแบบเวลาจริง (Real time) มาใช้ร่วมกับระบบการติดตามดวงอาทิตย์ตามปฏิทินเวลา โดยอิงสมการการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ในรอบ ซึ่งการรวมทั้งสองระบบนี้เข้าด้วยกันจะช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของระบบติดตามให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

งานวิจัย [4] เป็นการออกแบบตัวควบคุมสำหรับสะท้อนแสงอาทิตย์ จะเห็นว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์การนำค่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ได้จากระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ มาออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบสะท้อนแสง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามการติดตามดวงอาทิตย์ คือ ประเภทแรกจะเป็นการติดตามดวงอาทิตย์แบบเวลาจริง เช่น การใช้กล้องเว็บแคม ซึ่งระบบนี้ค่อนข้างดี มีความแม่นยำในการติดตาม แต่ถ้าเกิดในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือเกิดมีเมฆบังดวงอาทิตย์ก็อาจทำให้เกิดการติดตามที่คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงการประยุกต์นำการติดตามดวงอาทิตย์จากสมการการเคลื่อนที่ดวงอาทิตย์มาใช้ร่วม แต่ถ้าใช้เพียงแค่การคำนวณทางคณิตศาสตร์ติดตามดวงอาทิตย์ อาจมีข้อจำกัด คือ เมื่อมุมแกนหมุนของโลกเปลี่ยนทำให้ระบบมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาในการสร้างระบบติดตามที่รวมทั้งสองระบบจากข้างต้นเข้าด้วยกันเพื่อความสมบูรณ์และแม่นยำในการติดตามดวงอาทิตย์

2.5 Machine Vision

Machine Vision เป็นวิธีการที่ทำให้อุปกรณ์ประมวลผลภาพต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor, DSP) มีความสามารถในการ “รับรู้” ภาพ ซึ่งรวมทั้ง การทำให้อุปกรณ์ประมวลผลนั้นๆ สามารถตัดสินใจและสั่งงานกลไกส่วนต่างๆได้ จากข้อมูลที่ได้จากภาพหรือกลุ่มของภาพนั้นๆ จุดมุ่งหมายสูงสุดของ Machine Vision คือ ทำให้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ประมวลผลต่างๆ มีความสามารถให้ได้เทียบเท่ากับระบบมองเห็นของมนุษย์ ที่มีวิวัฒนาการต่อเนื่องมาหลายสิบปี อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยียังคงไม่สามารถทำให้เครื่องจักร สามารถมองเห็นและรับรู้ ได้เทียบเท่ากับความสามารถของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น ผู้อ่านที่เป็นมนุษย์ที่มีร่างกายปกติ จะสามารถแยกแยะสิ่งของที่ต้องการจากกองสิ่งของหลายๆ อย่างได้ หรือ สามารถแยกแยะหน้าคนที่คุ้นเคยได้ จากกลุ่มคนที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ฝนตกหรือหมอกลงจัด การทำกิจกรรมดังกล่าวนี้ ผู้อ่านจะสามารถทำได้โดยแทบจะไม่ต้องใช้ความพยายามมากเท่าไร ซึ่งหากต้องการให้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ประมวลผลมีความสามารถที่จะทำกิจกรรมดังกล่าวได้นั้น นอกจากจะต้องใช้ความพยายามอย่างมากแล้ว ยังต้องใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลและสมองมนุษย์ ที่แม้อุปกรณ์ประมวลผลภาพจะมีความเร็วในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์สูงกว่าสมองมนุษย์มาก ดังจะเห็นง่ายๆ จากการบวกเลข 20 หลักเข้าด้วยกัน จะพบว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีในปัจจุบันหรือแม้กระทั่งเครื่องคิดเลขธรรมดาๆ ทั่วไป จะสามารถทำงานดังกล่าวได้โดยใช้เวลาเพียงเสี้ยววินาทีเท่านั้น ซึ่งต่างตากสมองมนุษย์ที่มีหน่วยประมวลผลอย่างง่าย ๆ ใดๆก็ตาม เนื่องจากหน่วยย่อยของมนุษย์เหล่านี้ มีจำนวนมากมายมหาศาล และทำงานไปพร้อมๆ กัน (Parallel Processing) แทนที่จะทำงานทีละขั้นตอน (Serial Processing) ซึ่งเป็นวิธีการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลที่มีอยู่ในปัจจุบัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสมองมนุษย์สูงกว่าอุปกรณ์ประมวลผลที่อยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก

แม้ว่าเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันจะไม่สามารถพัฒนาความสามารถการมองเห็นและรับรู้ของเครื่องจักรให้เทียบเท่าสมองมนุษย์ แต่ผลที่ได้จากการพัฒนาความรู้ Machine Vision ก็สามารถนำไปใช้กับงานได้หลากหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การนำไปใช้กับระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ ใช้กับระบบรักษาความปลอดภัย หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ในเชิงอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.6 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

การประมวลผลภาพ (Image Processing) หมายถึง การนำภาพมาประมวลผลหรือคิดคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เรากำลังต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

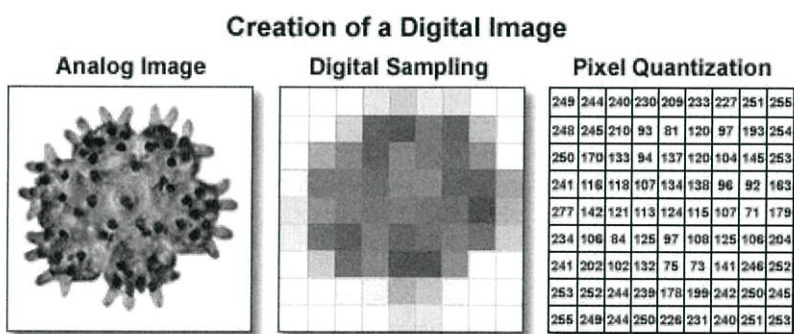
โดยมีขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญ คือ การทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น การกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ การแบ่งส่วนของวัตถุที่เราสนใจออกมาจากภาพ เพื่อนำภาพวัตถุที่ได้ไปวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่าง และทิศทางการเคลื่อนของวัตถุในภาพ จากนั้นเราสามารถนำข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์ และสร้างเป็นระบบ เพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ เช่น ระบบรู้จำลายนิ้วมือเพื่อตรวจสอบว่าภาพลายนิ้วมือที่มีอยู่นั้นเป็นของผู้ใด ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบคัดแยกเกรดหรือคุณภาพของพืชผลทางการเกษตร ระบบอ่านรหัสไปรษณีย์อัตโนมัติ เพื่อคัดแยกปลายทางของ

จดหมายที่มีจำนวนมากในแต่ละวันโดยใช้ภาพถ่ายของรหัสไปรษณีย์ที่อยู่บนซอง ระบบเก็บข้อมูลรถที่เข้าและออกอาคารโดยใช้ภาพถ่ายของป้ายทะเบียนรถเพื่อประโยชน์ในด้านความปลอดภัย ระบบดูแลและตรวจสอบสภาพการจราจรบนท้องถนนโดยการนับจำนวนรถบนท้องถนนในภาพถ่ายด้วยกล้องวงจรปิดในแต่ละช่วงเวลา ระบบรู้จำใบหน้าเพื่อเฝ้าระวังผู้ก่อการร้ายในอาคารสถานที่สำคัญ ๆ หรือในเขตคนเข้าเมือง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าระบบเหล่านี้จำเป็นต้องมีการประมวลผลภาพจำนวนมาก และเป็นกระบวนการที่ต้องทำซ้ำๆ กันในรูปแบบเดิมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งงานในลักษณะเหล่านี้ หากให้มนุษย์วิเคราะห์เอง มักต้องใช้เวลามากและใช้แรงงานสูง อีกทั้งหากจำเป็นต้องวิเคราะห์ภาพเป็นจำนวนมาก ผู้วิเคราะห์ภาพเองอาจเกิดอาการล้า ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นคอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เหล่านี้แทนมนุษย์ อีกทั้ง เป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่าคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการคำนวณและประมวลผลข้อมูลจำนวนมากในเวลาอันสั้น จึงมีประโยชน์อย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลภาพและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาพในระบบต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น

2.7 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิทัล

การประมวลผลภาพดิจิทัล เกี่ยวข้องกับการแปลงข้อมูลรูปที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก (Analogue signal) ให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล (Digital signal) เพื่อใช้ในการประมวลผลผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้ และยังสามารถนำมาใช้ในการลดปัญหาของภาพ เช่น ลดสัญญาณรบกวนภายในภาพ เป็นต้น

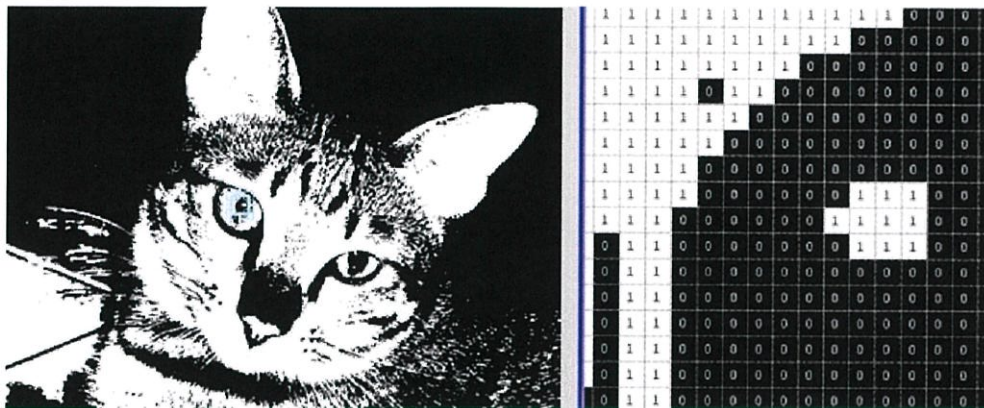
ในการแปลงภาพให้เป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นระบบจะนำรูปที่รับเข้ามาไปคำนวณโดยกระบวนการ Sampling และ Quantization และส่งข้อมูลออกมาในรูปแบบดิจิทัลจากนั้นคอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลภาพลงหน่วยความจำ โดยการจองหน่วยความจำภายในเครื่อง ในรูปแบบอาร์เรย์ โดยค่าในแต่ละช่องของอาร์เรย์แสดงถึงคุณสมบัติต่างๆ ของรูปที่จุดภาพนั้นๆ และตำแหน่งของช่องอาร์เรย์ก็เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุดภาพภายในภาพด้วย



รูปที่ 2.11 การแปลงภาพแอนะล็อกให้เป็นภาพดิจิทัล

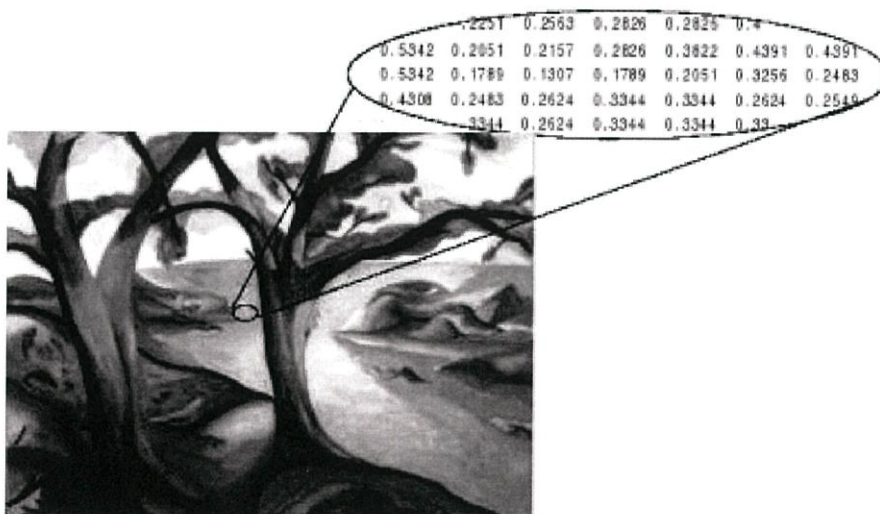
ภาพดิจิทัลที่ได้จะมีรูปแบบการเก็บเป็นเมทริกซ์ ซึ่งจะมีการจัดเก็บภาพแต่ละชนิดต่างกัน ขึ้นอยู่กับระบบสีของภาพดังกล่าว โดยแบ่งชนิดของภาพได้ดังนี้

- Binary image หรือ ภาพขาว-ดำ เป็นรูปที่ใช้เนื้อที่เพียง 1 บิต ต่อจุดภาพ โดยค่าสีจะมีแค่สองค่าคือ 0 สีดำ และ 1 สีขาว



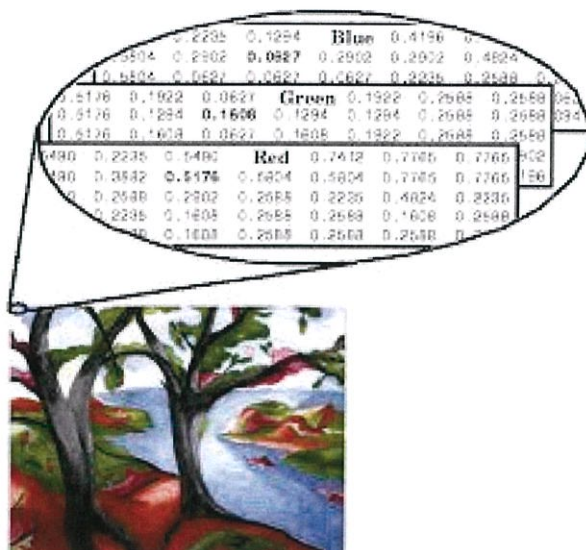
รูปที่ 2.12 ภาพแบบ binary หรือ ภาพขาว-ดำ

- Grayscale image เป็นรูปที่เก็บโดยใช้รูปแบบของอาร์เรย์ 2 มิติ โดยค่าที่เก็บจะมีค่าอยู่ในช่วงๆหนึ่ง ซึ่งระดับสีขึ้นอยู่กับขนาดของบิตที่ใช้เก็บค่าสี



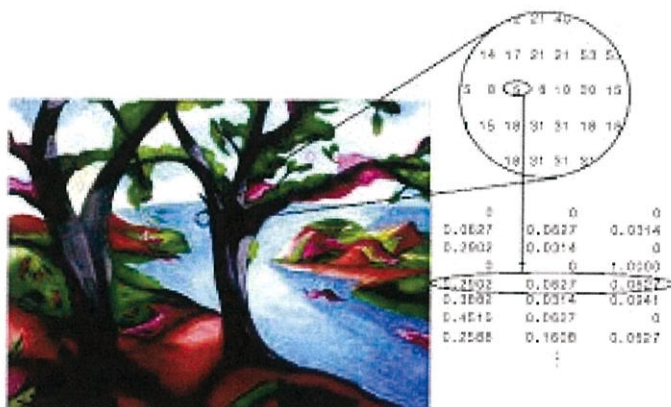
รูปที่ 2.13 ภาพแบบ Grayscale หรือ ภาพระดับเทา

- RGB Image หรือ True color Image เป็นรูปที่เก็บโดยใช้อาร์เรย์ 3 มิติ ขนาด $m \times n \times 3$ โดยที่ m คือ ความยาว และ n คือ ความกว้างของภาพในหน่วยจุดภาพ ส่วยมิติสุดท้ายนั้นในแต่ละมิติจะเก็บค่าสีแยกกัน คือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue)



รูปที่ 2.14 ภาพแบบ RGB

- Indexed Image เป็นรูปที่มีรูปแบบการเก็บแบบ indexed คือ ภาพประเภทนี้จะเก็บค่าสีเป็น indexed และในแต่ละช่องอาร์เรย์ จะเก็บตำแหน่งของสีใน indexed นั้นๆ ไว้



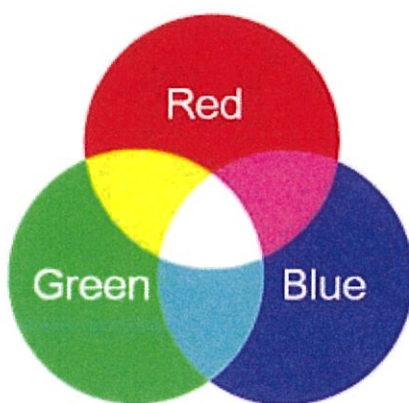
รูปที่ 2.15 ภาพแบบ indexed

2.8 มาตรฐานของสี

มาตรฐานของสีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอยู่หลายระบบ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับนำไปใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วทุกมาตรฐานจะมีแนวคิดเดียวกัน คือ การแทนจุดสีด้วยจุดที่อยู่ภายในสเปส 3 มิติโดยจะมีแกนอ้างอิงสำหรับจุดสีนั้นในสเปส ซึ่งแต่ละแกนมีความอิสระต่อกัน ตัวอย่างเช่นในระบบ RGB จะมีแกนสีคือ แกนสีแดง เขียว และน้ำเงิน ในระบบ HSL จะมีแกนเป็น ประเภทของสี (Hue) ความอิ่มตัวของสี (Saturation) และความสว่างของสี (Lightness)

2.8.1 ระบบสี RGB

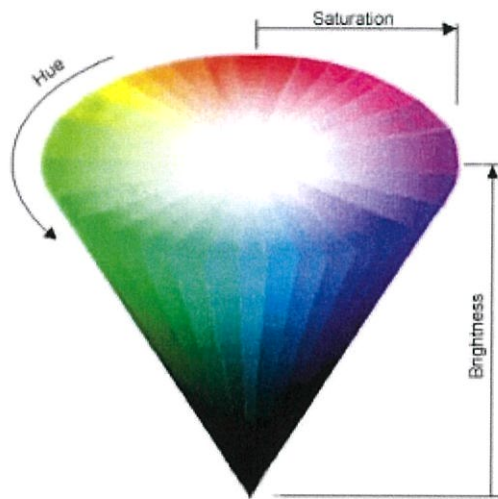
ระบบสี RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึม จะเกิดแถบสีที่เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งแยกสีตามทิวสายตามองเห็นได้ 7 สี คือ แดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ม่วง ซึ่งเป็นพลังงานอยู่ในรูปของรังสี ที่มีช่วงคลื่นที่สายตาสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงมีความถี่คลื่นสูงสุด คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วง เรียกว่า อัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet) และคลื่นแสงสีแดง มีความถี่คลื่นต่ำที่สุด คลื่นแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงเรียกว่า อินฟราเรด (Infrared) คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าสีม่วง และต่ำกว่าสีแดงนั้น สายตาของมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ และเมื่อศึกษาดูแล้วแสงสีทั้งหมดเกิดจากแสงสี 3 สี คือ สีแดง (Red) สีน้ำเงิน (Blue) และสีเขียว (Green) ทั้งสามสีถือเป็นแม่สีของแสง เมื่อนำมาฉายรวมกันจะทำให้เกิดสีใหม่ อีก 3 สี คือ สีแดงมาเจอน้ำเงิน สีฟ้าไซแอน และสีเหลือง และถ้าฉายแสงสีทั้งหมดรวมกันจะได้แสงสีขาว จากคุณสมบัติของแสงนี้เราได้นำมาใช้ประโยชน์ทั่วไป ในการฉายภาพยนตร์ การบันทึกภาพวิดีโอ ภาพโทรทัศน์ การสร้างภาพเพื่อการนำเสนอทางจอคอมพิวเตอร์ และการจัดแสงสีในการแสดง เป็นต้น



รูปที่ 2.16 ระบบสี RGB (Red-Green-Blue)

2.8.2 ระบบสี HSL (Hue-Saturation-Lightness)

- **ประเภทสีของ (Hue) :** คือ เฉดสี ซึ่งจากรูปนั้นค่า Hue คือ มุมของกรวยโดนที่ค่าของ Hue จะมีค่าของ Hue จะมีค่าระหว่าง 0 - 359 ซึ่งจะไล่ลำดับการเปลี่ยนแปลงของสีแดง (Hue = 0) ไปยังสีเขียว (Hue = 120) และจากสีเขียวไปยังสีน้ำเงิน (Hue = 240) และจากสีน้ำเงินไปยังสีแดง
- **ความอิ่มตัวของสี (Saturation) :** คือค่าที่ระบุว่าสีนั้นอยู่ห่างจากแกนกลางของกรวยมากเท่าใด โดยที่ถ้าค่า Saturation มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้สีที่ได้ใกล้เคียงกับเฉดสีที่แท้จริงมากขึ้น
- **ความสว่างของสี (Lightness/Brightness) :** คือค่าที่ใช้ระบุสีนั้นมีความสว่างมากเท่าใด ถ้าค่า Lightness มีค่ามากขึ้นจะทำให้สีที่ได้มีส่วนประกอบของสีขาวมากขึ้น ในทางกลับกันถ้าความสว่างมีค่าน้อยลงก็จะทำให้สีที่ได้มีส่วนประกอบของสีดำมากขึ้น



รูปที่ 2.17 ระบบสี HSL (Hue-Saturation-Lightness)

2.9 ซีชาร์ป (C#)

ภาษาซีชาร์ป (C# Programming Language) เป็นภาษาโปรแกรมเชิงวัตถุ ที่พัฒนาโดยบริษัทไมโครซอฟท์ และมี Anders Hejlsberge หัวหน้าโครงการ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของดอตเน็ตเฟรมเวิร์ค (.NetFramework) โดยมีรากฐานมาจากภาษาซีพลัสพลัส (C++) และภาษาจาวา (Java) ภาษาซีชาร์ป (C# Programming Language) เป็นภาษาใหม่ที่ทางไมโครซอฟท์ได้พัฒนาขึ้นมาพร้อมกับโปรแกรมชุด วิวอลสตูดิโอไอตอทเน็ต (Visual Studio .NET) โดยวัตถุประสงค์หลักของการพัฒนา คือ เพื่อให้เป็นภาษาใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานเทียบเท่าหรือเหนือกว่าภาษาซีพลัสพลัส (C++) แต่ในขณะเดียวกันจะต้องไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับภาษาซีพลัสพลัส โดยสามารถใช้งานได้ง่ายเหมือนภาษายอดนียมอย่างวิวอลเบสิก (Visual Basic) และสามารถขยายขีดความสามารถของวิวอลเบสิกได้ ให้สามารถพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ในระดับสูงได้ดียิ่งขึ้น ด้วย

เหตุผลเหล่านี้จึงทำให้ซีชาร์ป (C# Programming Language) เป็นภาษาที่มีความลงตัวมากที่สุดเมื่อเทียบกับภาษาอื่นๆ ซึ่งภาษาซีชาร์ป (C# Programming Language) ยังเป็นภาษาที่เกิดขึ้นพร้อมกับแนวคิดการเขียนโปรแกรมในยุคคอมพิวเตอร์อีกด้วย

2.10 AForge.NET

AForge.NET ได้ถูกเริ่มและพัฒนาโดย Andrew Kirillov โดย License ของ AForge.NET เป็นแบบ LGPL v3 license ซึ่งเป็น Open Source AForge.NET เป็นขอบเขตงานของภาษา C# ที่ใช้สำหรับนักพัฒนา และนักวิจัยในสาขาคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) และสาขาปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) เช่น image Processing, neural networks, genetic algorithm, machine learning , robotics เป็นต้น

AForge.NET framework เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม และส่วนของรูปแบบการมองเห็นในมุมมองของคอมพิวเตอร์ (ข้อมูลทาง digital) โดยเป็นตัวกลางเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ให้เกิดการสื่อสารกันได้อย่างง่ายมากยิ่งขึ้นโดย AForge.NET framework จะรวบรวม Library ทางด้าน Image Processing ในรูปแบบต่างๆไว้เพื่อที่ใช้เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ จึงทำให้การใช้ AForge.NET framework จะมีความง่ายในการทำงานและช่วยให้มีความเร็ว และความถูกต้อง ในส่วนของ Library จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ ดังต่อไปนี้

- AForge.Imaging เป็นชุดคำสั่งที่ใหญ่ที่สุดในขอบเขตงาน ประกอบไปด้วยชุดคำสั่งการประมวลผลภาพต่างๆ ซึ่งช่วยในการปรับแต่งภาพ และประมวลผลภาพต่างๆ
- AForge.Vision เป็นชุดคำสั่งที่ประกอบไปด้วยเครื่องตรวจจับการเคลื่อนไหว หรือท่าทางต่างๆ และชุดคำสั่งประมวลผลการเคลื่อนไหว
- AForge.Video เป็นชุดคำสั่งที่ประกอบไปด้วยคลาสต่างๆที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลวิดีโอ
- AForge.Robotics เป็นชุดคำสั่งที่ประกอบด้วยวิธีที่ทำโครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียม และขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ต่างๆ
- AForge.MachineLearning เป็นชุดคำสั่งที่ประกอบด้วยคลาสที่เกี่ยวกับการเรียนรู้ของเครื่อง

2.11 การสะท้อนแสง

แสงอาจเกิดการสะท้อนสมบูรณ์ (specular reflection) เช่น การสะท้อนผ่านกระจกเงา หรือสะท้อนไม่สมบูรณ์ (diffuse reflection) ซึ่งสูญเสียภาพเชิงฟิสิกส์แต่อนุรักษ์พลังงานขึ้นกับชนิดของตัวกลางที่บดแสงซึ่งแสงเกิดการสะท้อน

ถ้าแสงเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เดินทางในรูปคลื่นด้วยอัตราเร็วสูง 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที แหล่งกำเนิดแสงมีทั้งแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น แสงดวงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานของสิ่งมีชีวิต แหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น แสงสว่างจากหลอดไฟ เป็นต้น

เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มควันหรือฝุ่นละออง จะเห็นเป็นลำแสงเส้นตรง และสามารถทะลุผ่านวัตถุได้ วัตถุที่ยอมให้แสงเคลื่อนที่ผ่านเป็นเส้นตรงไปได้นั้น เราเรียกวัดภูนี้ว่า วัตถุโปร่งใสเช่น แก้ว อากาศ น้ำ เป็นต้น ถ้าแสงเคลื่อนที่ผ่านวัตถุบางชนิดแล้วเกิดการกระจายของแสงออกไปโดยรอบ ทำให้แสงเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง เราเรียกวัดภูนั้นว่า วัตถุโปร่งแสง เช่น กระจกฝ้า กระจาดาชไข พลาสติกฝ้า เป็นต้น ส่วนวัตถุที่ไม่ยอมให้แสงเคลื่อนที่ผ่านไปได้ เราเรียกว่า วัตถุทึบแสง เช่น ผนังคอนกรีต กระจาดาชแข็งหนาๆ เป็นต้น วัตถุทึบแสงจะสะท้อนแสงบางส่วนและดูดกลืนแสงบางส่วนไว้ทำให้เกิดเงาขึ้น การสะท้อนของแสง (Reflection) เป็นปรากฏการณ์ที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่งมายังตัวกลางที่มีความหนาแน่นอีกตัวหนึ่ง ทำให้แสงตกกระทบกับตัวกลางใหม่ แล้วสะท้อนกลับสู่ตัวเดิม เช่น การสะท้อนของแสงจากอากาศกับผิวหน้าของกระจกเงาจะเกิดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของกระจกเงาราบแล้วกลับสู่อากาศดังเดิม เมื่อแสงตกกระทบกับผิวหน้าของตัวกลางใดๆ ปริมาณและทิศทางของการสะท้อนของแสง จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวหน้าของตัวกลางที่ตกกระทบ เมื่อลำแสงขนานตกกระทบพื้นผิวหน้าวัตถุที่เรียบ แสงจะสะท้อนเป็นลำแสงขนานเหมือนกับลำแสงที่ตกกระทบ การสะท้อนบนพื้นผิวหน้าที่เรียบ โดยเรียกว่า การสะท้อนแบบสม่ำเสมอ

การสะท้อนของแสงเมื่อตกกระทบพื้นผิววัตถุที่เรียบ เกิดขึ้นเมื่อลำแสงตกกระทบไปยังพื้นกระจกหรือพื้นผิวที่ขรุขระจะส่งผลให้แสงสะท้อนกลับไปคนละทิศละทาง

- รังสีตกกระทบ (Incident Ray) คือ รังสีของแสงที่พุ่งเข้าหาพื้นผิวของวัตถุ
- รังสีสะท้อน (Reflected Ray) คือ รังสีของแสงที่พุ่งออกจากพื้นผิวของวัตถุ
- เส้นปกติ (Normal) คือ เส้นที่ลากตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุตรงจุดที่แสงกระทบ
- มุมตกกระทบ (Angle of Incidence) คือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ
- มุมสะท้อน (Angle of Reflection) คือ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับเส้นปกติ

กฎการสะท้อนสำหรับวัสดุผิวเรียบ การสะท้อนของแสง (หรือคลื่นอื่น) เกิดขึ้นในลักษณะไม่สมบูรณ์

- รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน เส้นตั้งฉากทั้งหมด ล้วนอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน
- มุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

2.12 สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

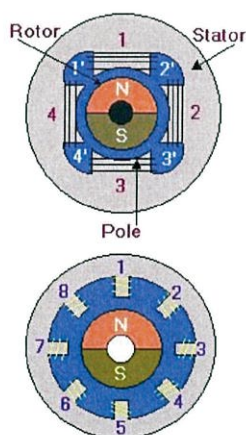
สเต็ปป์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่มีลักษณะการทำงานแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไป เพราะจะต้องป้อนสัญญาณเป็นพัลส์ให้แก่ขดลวดของมอเตอร์เป็นจังหวะอย่างเหมาะสม และการหมุนของมอเตอร์ชนิดนี้จะหมุนเป็นจังหวะตามพัลส์ที่ป้อนเข้ามา หากมีการป้อนสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง มอเตอร์ก็จะสามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่องเหมือนกับมอเตอร์ไฟตรงปกติ ดังนั้นด้วยจังหวะในการป้อนสัญญาณพัลส์จึงทำให้ผู้ควบคุมสามารถเลือกตำแหน่งที่ต้องการให้มอเตอร์หยุดหมุนได้ จังหวะการหมุนของสเต็ปป์มอเตอร์เรียกว่า สเต็ป (step) นั่นจึงเป็นที่มาของชื่อของมอเตอร์ชนิดนี้ ความละเอียดของมอเตอร์กำหนดเป็นองศาที่หมุนไปในหนึ่งสเต็ป หากมอเตอร์มีจำนวนองศาต่อสเต็ปมาก หมายความว่า มอเตอร์ตัวนี้มีควาละเอียดของการหมุนต่ำ ยกตัวอย่าง การหมุนครบ 1 รอบ

เท่ากับ 360 องศา หากมอเตอร์มีสเต็ปการหมุนเท่ากับ 7.5 องศาต่อสเต็ป มอเตอร์ตัวนี้มีความละเอียดของการหมุนเท่ากับ 48 ตำแหน่ง แต่ถ้าหากมีสเต็ปการหมุนกับ 1.8 องศาต่อสเต็ป ความละเอียดของการหมุนเท่ากับ 200 จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ตัวหลังมีความละเอียดสูงกว่าตัวแรกมาก ทำให้นำมาใช้ในงานที่ต้องการกำหนดตำแหน่งได้ดีกว่า แม่นยำกว่า ผนวกเข้ากับวงจรขับแบบครึ่งสเต็ป ความละเอียดของการหมุนจะเพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า ทำให้มีความละเอียดของการหมุนกลายเป็น 400 ตำแหน่ง ขนาดของสเต็ปปั๊มมอเตอร์ที่มีการผลิตและจำหน่ายในท้องตลาด มีตั้งแต่ขนาดแรงดันต่ำ 3V ไปจนถึง 24V และ 48V ส่วนขนาดของกระแสตั้งแต่ไม่กี่สิบลิลลิแอมป์อันเป็นสเต็ปปั๊มมอเตอร์ตัวเล็กไปจนถึงเป็นลิบแอมป์ ซึ่งมีขนาดของมอเตอร์ใหญ่โตขึ้นตามลำดับ ราคาอยู่ในหลักเป็นร้อยบาทขึ้นไปสำหรับของใหม่



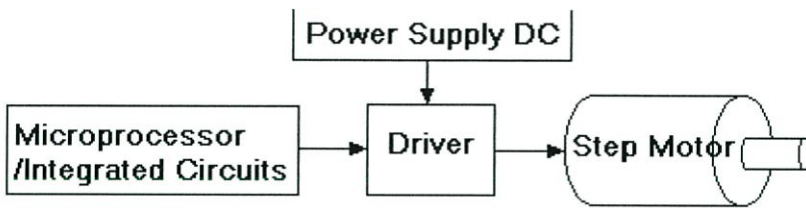
รูปที่ 2.18 สเต็ปปั๊มมอเตอร์

โครงสร้างของขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ทำมาจากแผ่นเหล็กวงแหวนที่มีซี่ยื่นออกมาประกอบ กันเป็นชั้นๆ โดยที่แต่ละซี่นั้นจะมีขดลวดพันสวมอยู่ เมื่อมีการป้อนกระแสผ่านขดลวดทำให้เกิด สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ดังรูปด้านล่างนี้จะแสดงถึงองค์ประกอบต่างๆ

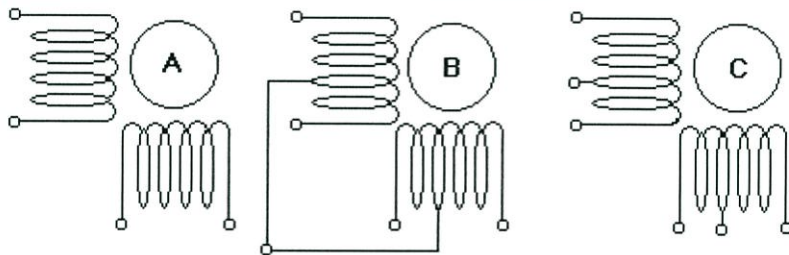


รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในสเต็ปปั๊มมอเตอร์

ในที่นี้ซึ่งถ้าเราเพิ่มจำนวนของขั้วแม่เหล็กมากขึ้นจะเพิ่มจำนวนของสเต็ปตอวงจรรอบมากขึ้นตามด้วยลองดูตาม รูปด้านบน ลักษณะการนำไปใช้งาน สเต็ปปิ้งมอเตอร์ ใช้งาน ลักษณะ Open Loop System แปลเป็นภาษาไทย ระบบเปิด คือ สเต็ปปิ้งมอเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการป้อนค่าพารามิเตอร์กลับมา (Feedback) แต่ทุกวิธีที่ต้องการกำหนดตำแหน่งที่แน่นอน จะต้องการป้อนกลับ ไปยังระบบและตัวบอก ตำแหน่งว่าถูกต้องหรือผิดพลาดให้รับทราบ ดังเช่นวิธีที่ใช้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์คือนำลิทสวิตชติดตามตำแหน่งที่จะตรวจจับ เมื่อสเต็ปปิ้งมอเตอร์เริ่มหมุนแล้วหมุนไปจนถึงตำแหน่ง ของสวิตชตรวจจับสัญญาณ สวิตชทำงานก็จะป้อนกลับไปสู่ระบบ ซึ่งก็จะทำให้รูการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ตลอดตัววงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ไว้ให้เริ่มต้นการทำงานและอ้างอิงตำแหน่งได้ถูกต้อง

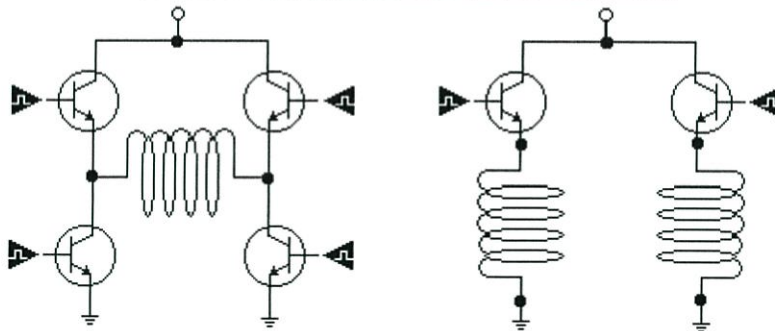


การควบคุมระบบสเต็ปมอเตอร์



A) แบบไฮโพลาร์ B)แบบขั้วโพลาร์ 5 สาย C)แบบขั้วโพลาร์ชนิด 6 สาย

การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปมอเตอร์



A) แบบไฮโพลาร์

B) แบบขั้วโพลาร์

▶ คือ ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟหรือจากพอร์ตพีซีเพื่อทริกทรานซิสเตอร์ให้ทำงาน

วงจรการจ่ายไฟให้กับสเต็ปมอเตอร์

รูปที่ 2.20 วงจรการจ่ายไฟให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์

2.12.1 ชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์

ในอดีตมีการแบ่งชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ตามลักษณะโครงสร้างซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ แบบแม่เหล็กถาวรหรือ PM (Permanent Magnet), แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็กได้หรือ VR (Variable Reluctance) และแบบผสมหรือไฮบริด (Hybrid) ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างแบบ PM และ VR ในปัจจุบันนี้สเต็ปป์มอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮบริด เนื่องจากสามารถทำให้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ของแกนได้สูงถึง 0.9 องศาต่อสเต็ป (ซึ่งเป็นข้อดีของแบบ VR) และให้แรงบิดหรือทอร์กที่สูง โดยใช้พลังงานต่ำ (เป็นข้อดีของแบบ PM)

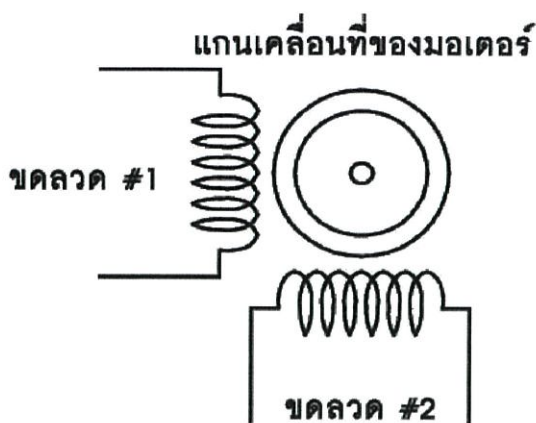
- สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Stepping Motor) สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบ ซี่ฟันของสเตเตอร์ถูกพันด้วยขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อต้องการให้สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีขนาดมุมสเต็ปเล็กลงจะต้องเพิ่มจำนวนซี่แม่เหล็กของโรเตอร์และจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ แต่ก็มีขีดจำกัดในการเพิ่มจำนวนซี่แม่เหล็กของโรเตอร์เนื่องจากการนำ มาสร้างให้มีซี่แม่เหล็กหลายซี่นั้นทำได้ยาก

- สเต็ปป์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ (Variable Reluctance Stepping Motor) โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์โรเตอร์และสเตเตอร์จะทำจากโลหะซิลิคอนซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพซึมซับได้ทาง แม่เหล็กสูงและยอมให้สนามแม่เหล็กจำนวนมากไหลผ่านได้ สำหรับคุณสมบัติพื้นฐานของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้จะต้องมีช่องว่างอากาศเล็กที่สุดเพื่อทำให้ค่าทอร์กมากและความถูกต้องของตำแหน่งสูงขึ้น

- สเต็ปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor) สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้จะเป็นการผสมผสานกันหรือการทำงานร่วมกันระหว่างมอเตอร์สองชนิดข้างต้น ทำให้ได้แรงบิดที่มากและความละเอียดสูงหรือมีจำนวนสเต็ปเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นการกำหนดชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ในยุคต่อมาจนถึงปัจจุบันจึงพิจารณาที่ลักษณะของการพันขดลวด, การต่อสายออกมาใช้งาน และวงจรขับ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ ชนิดไบโพลาร์ (bipolar) และชนิดยูนิโพลาร์ (unipolar)

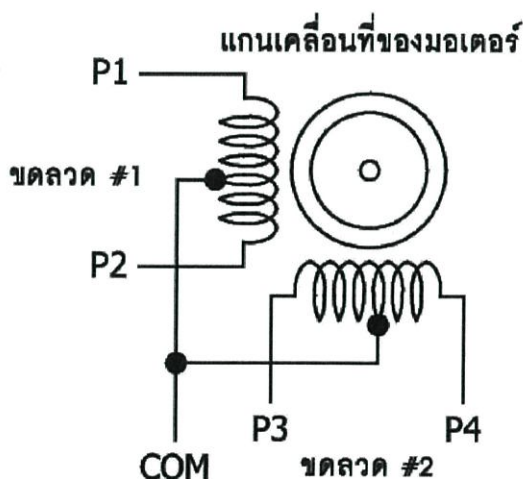
แบบ Bipolar มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.20 แบ่งออกเป็น 2 ขดที่ไม่มีแท่งกลาง ทำให้บางครั้งจึงเรียกสเต็ปป์มอเตอร์แบบนี้ว่า เป็นสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 2 เฟส การขับให้มอเตอร์แบบนี้หมุนจะต้องป้อนแรงดันต่างขั้วกันให้แก่ขดลวดแต่ละขด ทำให้วงจรขับสเต็ปป์มอเตอร์แบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน



รูปที่ 2.21 ลักษณะการพันขดลวดสเต็ปป์มอเตอร์แบบ Bipolar

แบบ Unipolar มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.18 มีด้วยกัน 2 แบบคือ แบบ 5 และ 6 สาย บางครั้งเรียกสเต็ปป์มอเตอร์แบบนี้ว่า เป็นสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส การขับจะต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้วหรือเฟสของมอเตอร์ให้เรียงลำดับอย่างถูกต้อง มอเตอร์จึงจะสามารถหมุนได้อย่างราบรื่น

สเต็ปป์มอเตอร์แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดแบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งตัวจะมี 4 เฟสคือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวดแต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเต็ปป์มอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว



รูปที่ 2.22 ลักษณะการพันขดลวดสเต็ปป์มอเตอร์แบบ Unipolar

2.12.2 การสั่งงานควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์

การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปแต่ละสเต็ปทำได้โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังลวดแต่ละขดบนสเตเตอร์ ซึ่งต้องป้อนแบบซีควนเชียลสามารถแบ่งเป็น 3 แบบคือ

- แบบฟูลสเต็ป 1 เฟส (Full-step 1 phase) การกระตุ้นแบบนี้จะเป็นแบบที่ง่ายที่สุดโดยทำการกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งไล่เรียงถัดกันไปดังตารางที่ 2.3 คือ เริ่มต้นที่ขด 1, 2, 3 และ 4 แล้ววนกลับมาเริ่มขดที่ 1 ใหม่เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

ตารางที่ 2.3 การกระตุ้นแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ON	-	-	-
2	-	ON	-	-
3	-	-	ON	-
4	-	-	-	ON

- แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส (Full-step 2 phase) แบบนี้จะคล้ายกับแบบแรกแต่การกระตุ้นจะต่างกันคือจะกระตุ้นทีละ 2 ขดในเวลาเดียวกันและเรียงถัดกันไปดังตารางที่ 2.4 การกระตุ้นแบบนี้สามารถเพิ่มแรงบิดได้ดีกว่าแบบแรก โรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกันและต่อไปด้วยแรงดึงอีก 2 ขดถัดไปดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มมากขึ้น 2 เท่า

ตารางที่ 2.4 การกระตุ้นแบบฟูลสเต็ป 2 เฟส

สเต็ป ที่	เฟส ที่ 1	เฟส ที่ 2	เฟส ที่ 3	เฟส ที่ 4
1	ON	ON	-	-
2	-	ON	ON	-
3	-	-	ON	ON
4	ON	-	-	ON

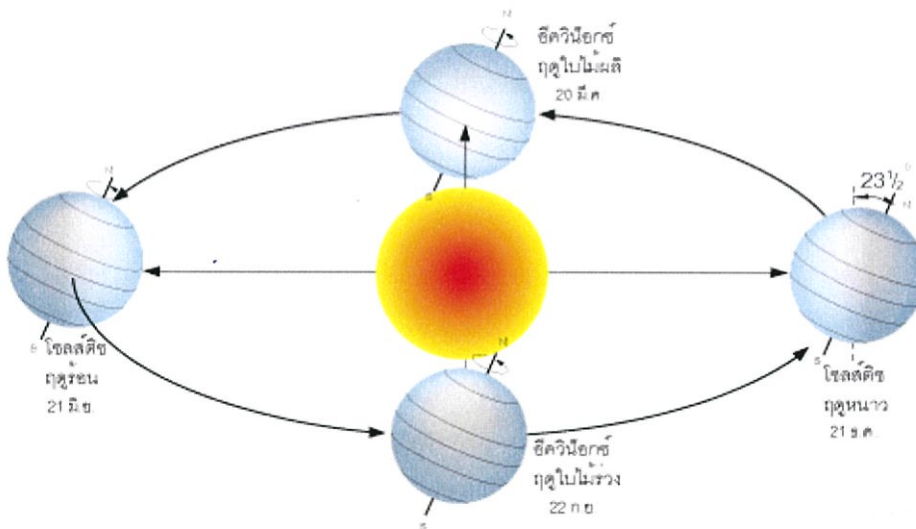
- แบบฮาร์ฟสเต็ป (Half-step) การกระตุ้นแบบนี้เป็นการผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ป 1 เฟสและ 2 เฟสทำให้จำนวนสเต็ปเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นอีก เพราะช่วงสเต็ปมีระยะสั้นลง แต่ละสเต็ปเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน ความถูกต้องมีมากขึ้นแต่กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะ เท่ากับแบบที่ 2 เป็นอย่างน้อย

ตารางที่ 2.5 การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป

สเต็ป ที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ON	-	-	-
2	ON	ON	-	-
3	-	ON	-	-
4	-	ON	ON	-
5	-	-	ON	-
6	-	-	ON	ON
7	-	-	-	ON
8	ON	-	-	ON

2.13 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนโลก

ในการคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยการวัดค่ามุมเงย และมุมอะซิมูทจากเงาของดวงอาทิตย์จะพบว่า ค่ามุมเงยของดวงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดแล้วจึงค่อยลดต่ำลงเรื่อยๆ จนดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้าไป สำหรับมุมอะซิมูทก็จะมีการเปลี่ยนค่าไปด้วยทุกครั้งที่วัด แสดงว่าดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตลอดเวลา เส้นที่ลากเชื่อมจุดต่างๆ บนแบบจำลองทรงกลมท้องฟ้า คือ แนวเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ในรอบวัน เส้นทางที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ปรากฏไปบนท้องฟ้าตลอดปีเรียกว่าเส้นสุริยวิถีหรือที่เรียกว่า เส้นอีคริปติก (Ecliptic) จากการสังเกตตำแหน่งขึ้นและตกของดวงอาทิตย์ และเส้นทางโคจรที่ปรากฏของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าตลอดปี พบว่าความจริงนั้นตำแหน่งขึ้น - ตกและเส้นทางโคจรของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปทุกฤดูกาล จากการวัดตำแหน่งของดวงอาทิตย์ขึ้นและตกพบว่าตำแหน่งเปลี่ยนไปทุกวัน วันละประมาณ 15 ลิปดา



รูปที่ 2.23 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

ณ ตำแหน่งของโลกภายในวันที่ 22 กันยายน โลกจะเอียงด้านข้างให้กับดวงอาทิตย์ และแกนของโลกจะอยู่ในระนาบตั้งฉากกับรัศมีจากดวงอาทิตย์พอดี ทำให้แนวของแสงอาทิตย์จะอยู่บนระนาบของเส้นศูนย์สูตร ณ วันนี้ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดี ซีกโลกด้านเหนือและซีกโลกด้านใต้จะได้รับแสงอาทิตย์เท่ากัน และช่วงเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากันเท่ากับ 12 ชั่วโมง เรียกตำแหน่งนี้ว่า ศารทวิษุวัต (Autumnal equinox)

ณ ตำแหน่งของโลกในวันที่ 21 ธันวาคม โลกจะเอียงหัวโลกได้เข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด ทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏอยู่ต่ำที่สุด เรียกตำแหน่งนี้ว่า วินเทอร์โซลสติซ (Winter solstice) ช่วงนี้ประเทศทางซีกโลกใต้จะเป็นฤดูร้อน มีเวลากลางวันนานกว่าเวลากลางคืน ส่วน

ตารางที่ 2.6 ค่ามุมอะซิมูทขณะขึ้น - ตก และมุมเงยสูงสุดของดวงอาทิตย์ วัดที่กรุงเทพมหานคร

วัน เดือน	อะซิมูท		มุมเงยสูงสุด(องศา)
	ขณะขึ้น	ขณะตก	
21 มีนาคม	90	270	76
27 เมษายน	76	284	90
20 พฤษภาคม	70	290	84
22 มิถุนายน	67	293	81
20 กรกฎาคม	69	291	83
16 สิงหาคม	76	284	90
23 กันยายน	90	270	76
20 ตุลาคม	100	260	66
20 พฤศจิกายน	110	250	56
22 ธันวาคม	113	247	52
20 มกราคม	110	250	56
20 กุมภาพันธ์	101	259	67

2.14 การคำนวณการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

Apparent Solar Time (AST) คือ เวลาสุริยะปรากฏเป็นเวลาที่สังเกตจากดวงอาทิตย์เป็นหลักโดยอ่านจากนาฬิกาแดดซึ่งในแต่ละตำแหน่งของผู้สังเกตจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งลองจิจูด นิยามของเวลาสุริยะปรากฏกำหนดว่าเป็นมุมชั่วโมง (Hour angle) ของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏจริงบนท้องฟ้า กล่าวคือเมื่อดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งเมริเดียนของท้องฟ้าพอดี เวลาสุริยะปรากฏจะมีค่าเป็น 0 ชั่วโมง

$$AST = LST + (4 \text{ min/deg})(LSTM - \text{Long}) + ET \quad (2.1)$$

โดย

LST คือ เวลาจริงของท้องถิ่นนั้น (Local standard time)

Long คือ Western Longitude

LSTM คือ Local longitude of standard time meridian

$$LSTM = 15^\circ \left(\frac{Long}{15^\circ} \right) \text{round to integer} \quad (2.2)$$

Equation of Time (ET) คือ สมการของเวลาที่ถูกแก้ไขแล้วเนื่องจากผลของวงโคจรของโลกและแกนของโลกที่เอียงไปจากเดิม มีหน่วยเป็น นาที

$$ET = 9.87 \sin(2D) - 7.53 \cos(D) - 1.5 \sin(D) \quad (2.3)$$

ซึ่ง $D = \frac{360^\circ}{365^\circ} (N - 81)$ มีหน่วยเป็น องศา (degrees)

N คือ ตัวเลขวันภายในปี โดย ให้ 1 มกราคม มีค่าเป็น 1

Hour Angle (H) คือมุมที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปเป็นมุมองศาต่อชั่วโมง โดยมุมของการเคลื่อนที่นั้นจะเปลี่ยนไปเป็นมุม 15 องศาต่อชั่วโมง โดยให้มุมในตอนเที่ยงเป็นมุม 0 องศา ดังนั้นเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ในตอนเช้า มุมจะเป็นค่าลบ แต่หากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ในตอนบ่าย มุมจะเป็นค่าบวก มีหน่วยเป็น องศา

$$H = \frac{(\text{No.of minutes past midnight,AST}) - 720 \text{ mins}}{4 \text{ min/deg}} \quad (2.4)$$

Declination (δ) คือ มุมเพียงเบน

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{N+284}{365} \times 360^\circ \right] \quad (2.5)$$

Altitude angle (β_1) คือ ระยะทางเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับพื้นราบโดยมุมอัลติจูดจะมีค่าเป็น 0 องศาที่เส้นขอบฟ้าเมื่อเงยขึ้นจากเส้นขอบฟ้าทำให้มุมอัลติจูดมีค่าเป็นบวก (ดังรูปที่ 2.25 เส้นสีเขียว) มุม Altitude จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ตลอดวันโดยจะขึ้นอยู่กับเส้นละติจูดและจำนวนวันของปี

$$\beta_1 = \arcsin[\cos(L) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(L) \sin(\delta)] \quad (2.6)$$

โดย

δ คือ Declination

L คือ Latitude

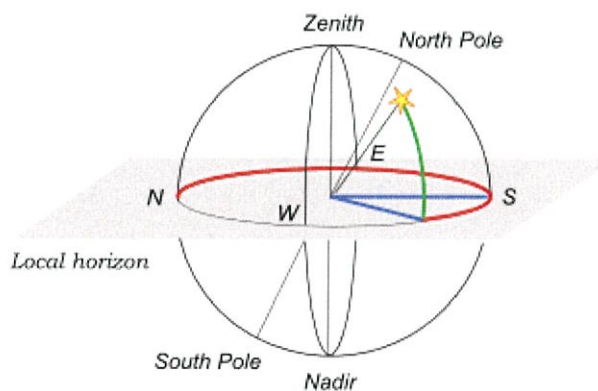
H คือ hour angle

Azimuth angle (α_1) ระยะเชิงมุมที่เบนไปจากเส้นแนว เหนือ - ใต้ เริ่มต้นทิศใต้ มุมอะซิมุทมีค่าเป็น 0 องศา (ถ้าเบนไปทางทิศตะวันออกเป็นลบ เบนไปทางทิศตะวันตกเป็นบวก) ดังนั้นที่ทิศตะวันออกมุมอะซิมุทจะมีค่าเท่ากับ -90 องศา และที่ทิศตะวันตกมุมอะซิมุทจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา (ดังรูปที่ 2.25 เส้นสีเขียว) และมุมAzimuthนี้จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆในระหว่างวันโดยมันจะ ขึ้นอยู่กับ ค่าละติจูดและเวลาในรอบปี

$$\alpha_1 = \arccos \left[\frac{\sin(\beta_1) \sin(L) - \sin(\delta)}{\sin(\beta_1) \cos(L)} \right] [\text{sgn}(H)] \quad (2.7)$$

โดย

β_1 คือ Altitude angle



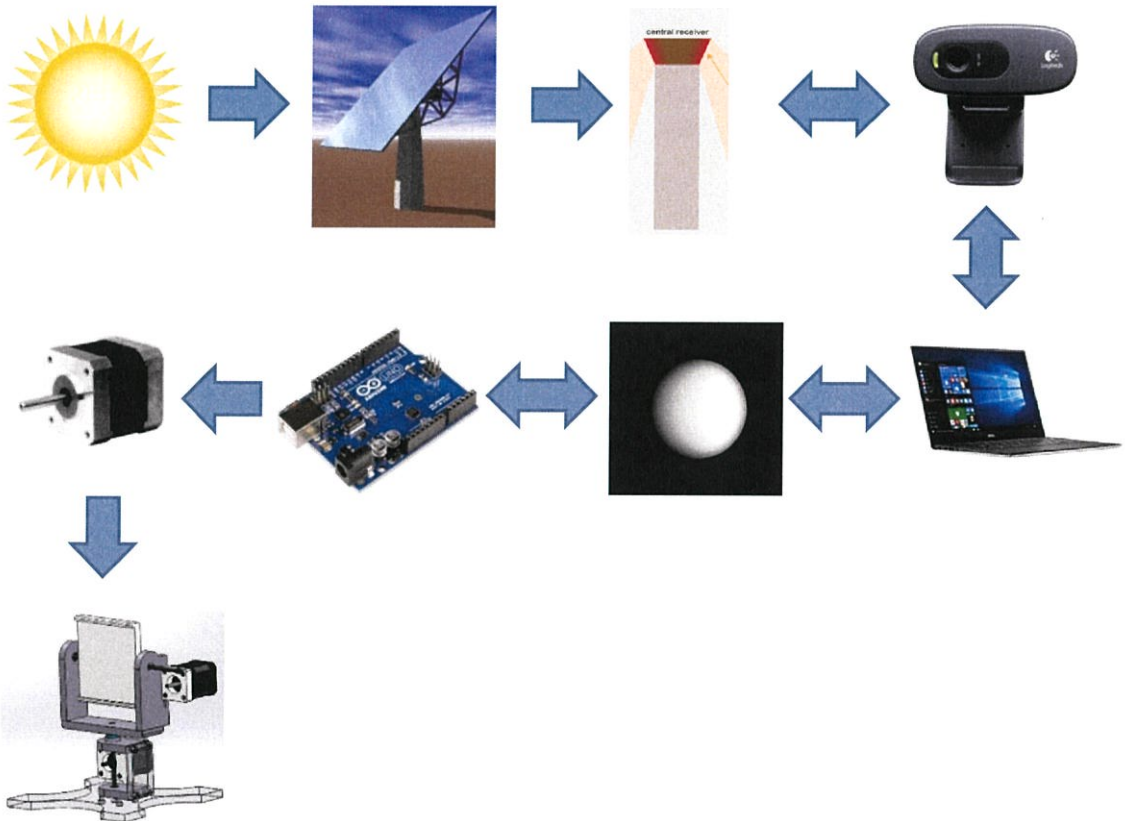
รูปที่ 2.25 มุมอะซิมุทและมุมอัลติจูด

บทที่ 3

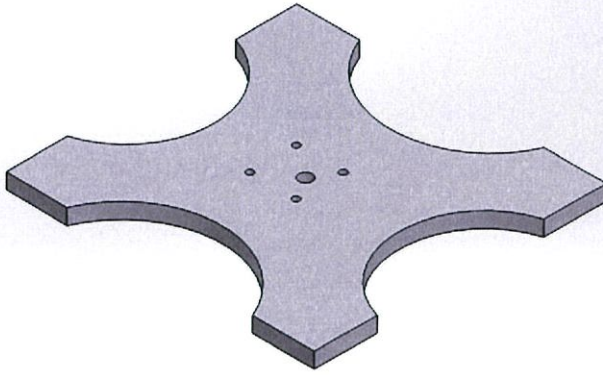
เทคนิคการติดตามแสงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงและการออกแบบชิ้นงาน

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงโดยการใช้เทคนิคสองรูปแบบผสมผสานเข้าด้วยกัน โดยเทคนิคแรก คือ การใช้กล้องเว็บแคมเพื่อประมวลผลภาพโดยใช้เทคนิคแมชชีนวิชัน (Machine Vision) และการประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยการรับภาพจากกล้องที่แสงอาทิตย์ตกกระทบสู่หอคอยรับแสงและทำการประมวลผลภาพดวงอาทิตย์จากนั้นเมื่อได้ตำแหน่งแสงที่ตกกระทบแล้วจะสั่งให้สเต็ปปีงมอเตอร์ (Stepping Motor) หมุนตำแหน่งตัวสะท้อนเพื่อให้แสงตกกระทบบนตรงกลางหอคอยรับแสง อีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ คือ การคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์จากสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งบางครั้งไม่มีแสงจากดวงอาทิตย์ หรือมีเมฆมาบังดวงอาทิตย์ ก็จะใช้วิธีการคำนวณเพื่อสั่งการสเต็ปปีงมอเตอร์แทน โดยใช้พิกัดที่ทำการทดลอง และเวลามาคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากนั้นเมื่อได้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์แล้วจะนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่ามุมสะท้อนแล้วส่งให้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนตำแหน่งตัวสะท้อนแสงเพื่อสะท้อนแสงสู่หอคอยรับแสง

เมื่อนำสองเทคนิคนี้มาใช้ร่วมกันแล้ว จะสามารถทำให้การติดตามดวงอาทิตย์มีความรวดเร็ว และแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยมีรูปแบบการรับ - ส่งข้อมูลดังนี้



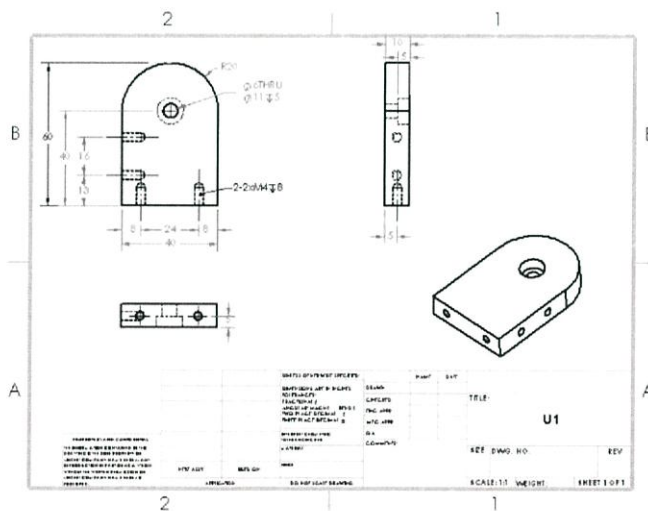
รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงาน



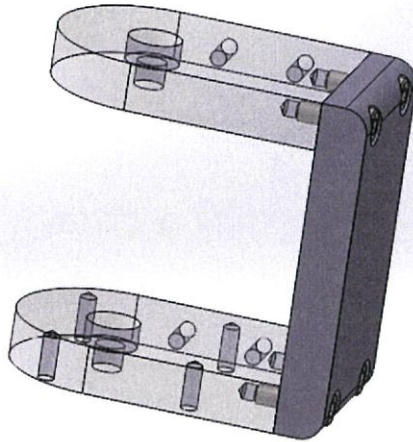
รูปที่ 3.3 ชั้นส่วนของฐานในมุมมอง 3 มิติ

ชั้นส่วนตัว U

ชั้นส่วนนี้ยึดติดกับชั้นส่วนฐานด้วยน็อต 6 เหลี่ยม 4 ตัว เป็นชั้นส่วนที่มีสเด็บบังมอเตอร์ที่หมุนชิ้นงานในแนวอะซิมุส โดยมี ความสูงและความกว้าง 70 มิลลิเมตร ใช้วัสดุ Bakelite ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน



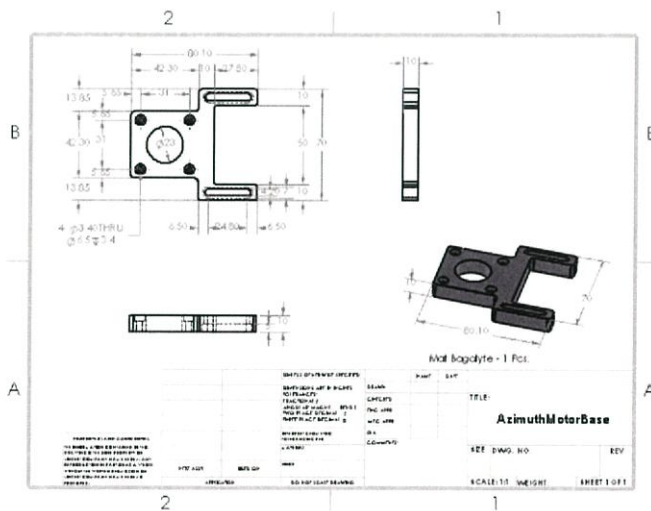
รูปที่ 3.4 ชั้นส่วนตัว U1



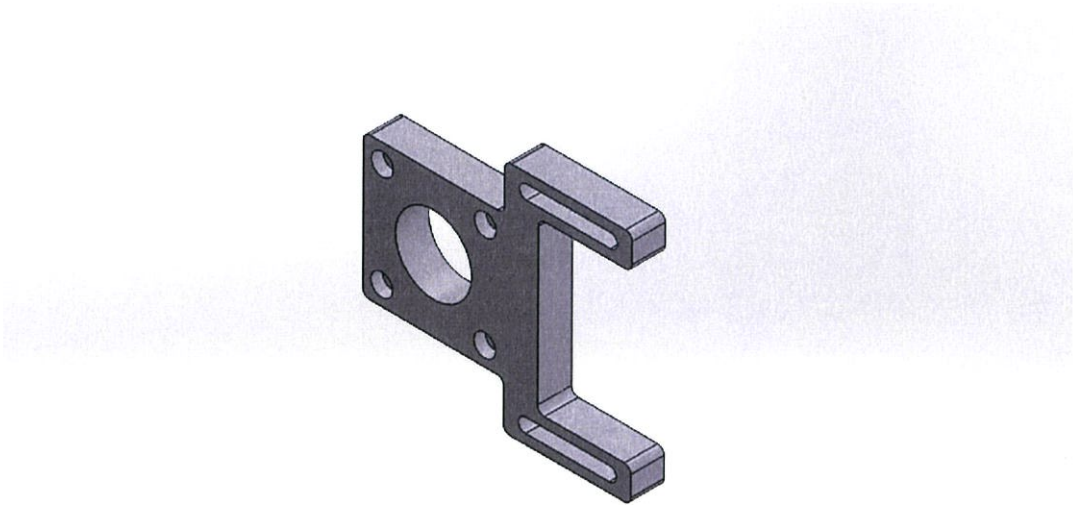
รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนตัว U ในมุมมอง 3 มิติ

ตัวยึดสแต็ปมอเตอร์ของมูมะอะซิมุท

สแต็ปมอเตอร์ที่ใช้เป็น NEMA 17 ซึ่งมีความกว้างและความยาวเท่ากัน คือ 42.3 มิลลิเมตร น็อตยึดสแต็ปมอเตอร์ใช้น็อต 6 เหลี่ยม ขนาด 3 มิลลิเมตร 4 ตัว ใช้วัสดุ Bakelite



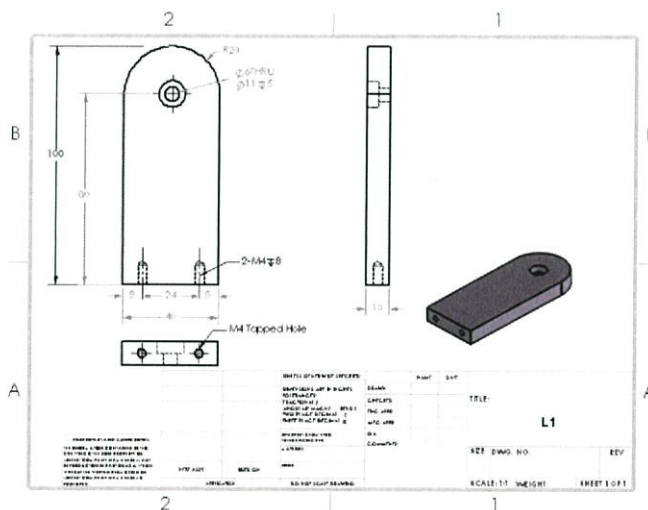
รูปที่ 3.8 ตัวยึดสแต็ปมอเตอร์ของมูมะอะซิมุท



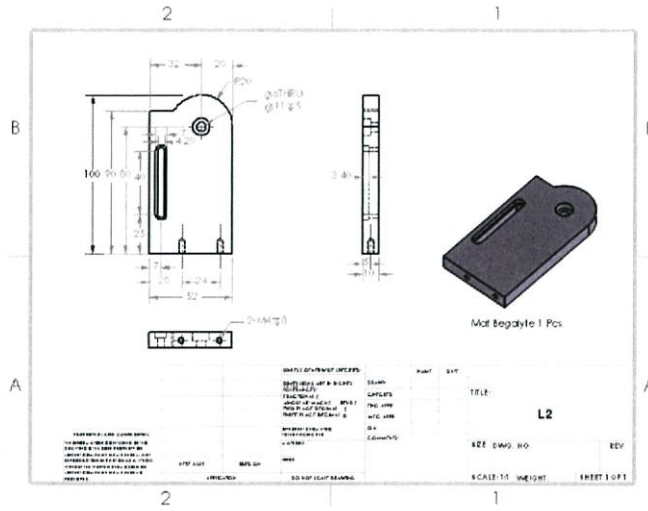
รูปที่ 3.9 ตัวยึดสแต็ปปีงมอเตอร์ของมอเตอร์ในมุมมอง 3 มิติ

ชิ้นส่วนตัว L

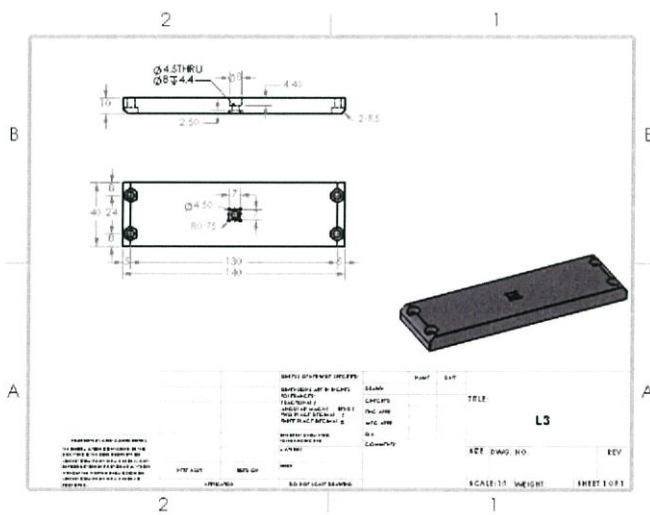
ชิ้นส่วนชิ้นนี้จะหมุนตาม สเต็ปปีงมอเตอร์ในแนวมอเตอร์ มีความสูง 100 มิลลิเมตร มีความกว้าง 140 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องใส่ Shaft 5 มิลลิเมตร ใช้วัสดุ Bakelite ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน



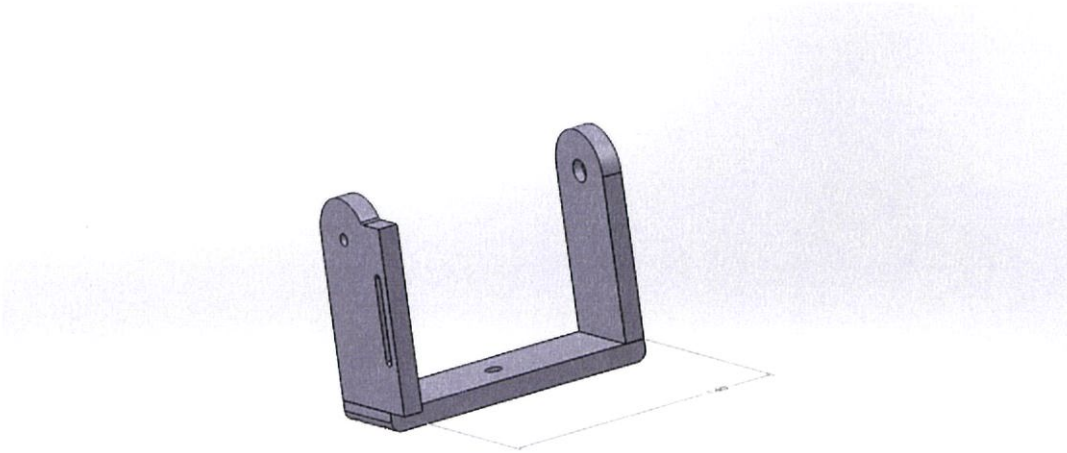
รูปที่ 3.10 ชิ้นส่วนตัว L1



รูปที่ 3.11 ชิ้นส่วนตัว L2



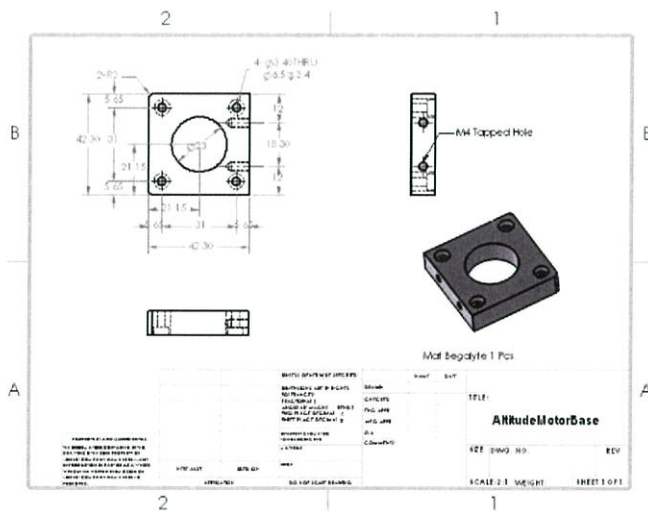
รูปที่ 3.12 ชิ้นส่วนตัว L3



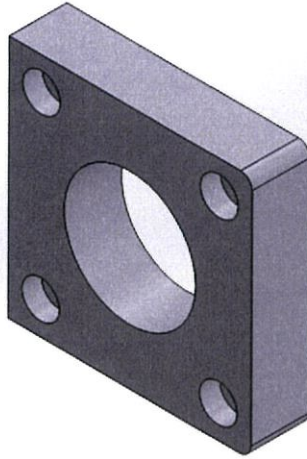
รูปที่ 3.13 ชิ้นส่วนตัว L ในมุมมอง 3 มิติ

ชิ้นส่วนตัวยึดสแต็ปมอเตอร์ของมอเตอร์อลติดูล

ตัวยึดสแต็ปมอเตอร์ซึ่งใช้ยึดติดกับชิ้นส่วนตัว L โดยสแต็ปมอเตอร์ที่ใช้จะเหมือนกันกับสแต็ปมอเตอร์ของมอเตอร์อะซิซ ใช้วัสดุ Bakelite



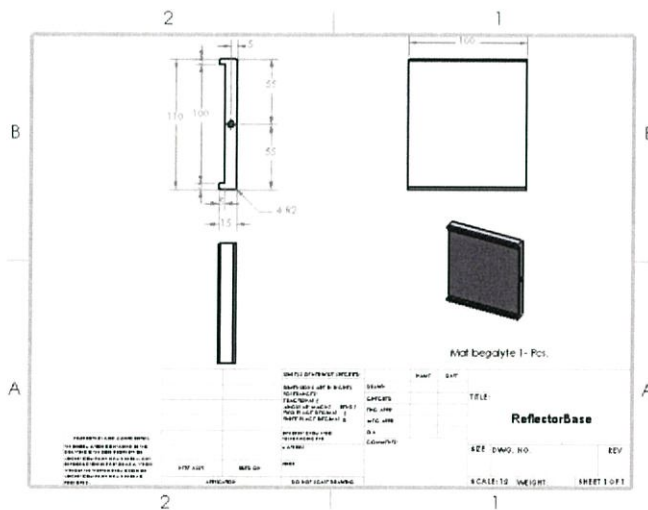
รูปที่ 3.14 ชิ้นส่วนตัวยึดสแต็ปมอเตอร์ของมอเตอร์อลติดูล



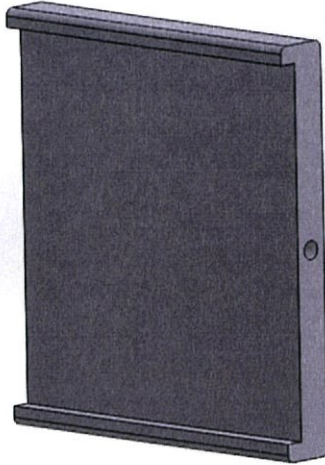
รูปที่ 3.15 ชั้นส่วนตัวยึดสตั๊ปิ่งมอเตอร์ของมูมอัลติจูล ในมูมมอ 3 มิติ

ชั้นส่วนแผ่นสะท้อน (Reflector)

ชั้นส่วนนี้จะหมุนในมูมอัลติจูลตามสตั๊ปิ่งมอเตอร์ โดยมีกระจกเงาติดตั้งอยู่มีขนาด 100x100 มิลลิเมตร เพื่อที่จะสะท้อนแสงไปยังหอคอยรับแสง ใช้วัสดุ Bakelite



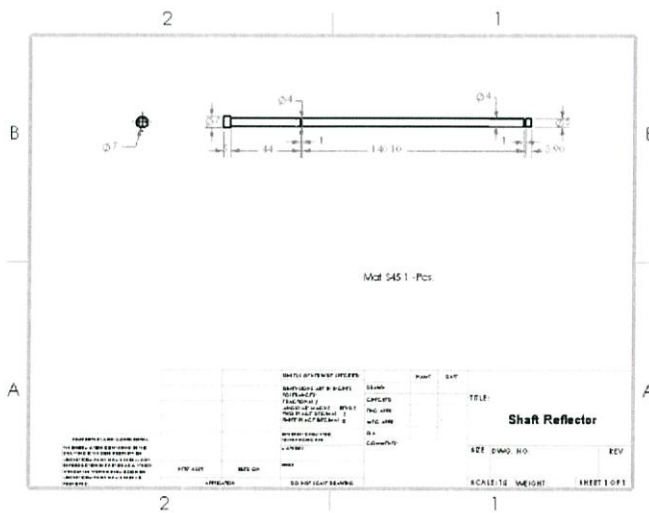
รูปที่ 3.16 ชั้นส่วนแผ่นสะท้อน (Reflector)



รูปที่ 3.17 ชั้นส่วนแผ่นสะท้อน (Reflector) ในมุมมอง 3 มิติ

ชั้นส่วนแท่งชาร์ปที่ตัวสะท้อน (Shaft Reflector)

ส่วนแท่งชาร์ปที่ยึดตัวสะท้อนแสงกับตัว L เพื่อให้ตัวสะท้อนแสงหมุนในแนวอัลติจูล ซึ่งมีความยาวทั้งหมด 195 มิลลิเมตร



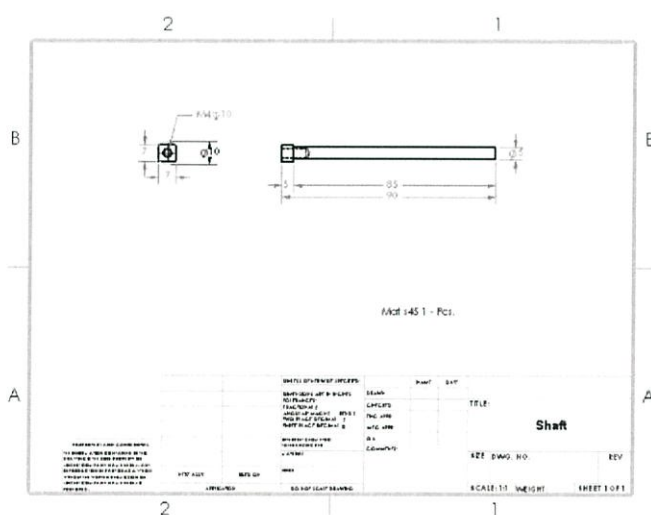
รูปที่ 3.18 ชั้นส่วนแท่งชาร์ปที่ตัวสะท้อน (Shaft Reflector)



รูปที่ 3.19 ชิ้นส่วนแท่งชาร์ปที่ตัวสะท้อน (Shaft Reflector) ในมุมมอง 3 มิติ

ชิ้นส่วนแท่งชาร์ปในแนวหมุนมุมอะซิมุท (Shaft)

แท่งชาร์ป เพื่อหมุนในแนวอะซิมุท ซึ่งมีความยาว 90 มิลลิเมตร

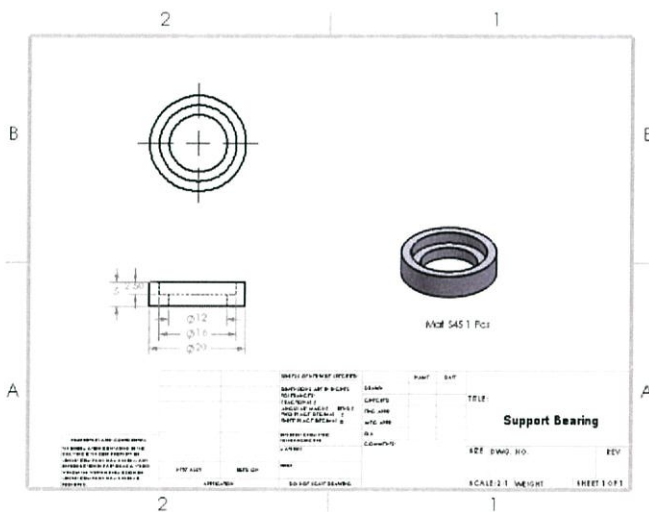


รูปที่ 3.20 ชิ้นส่วนแท่งชาร์ป (Shaft)

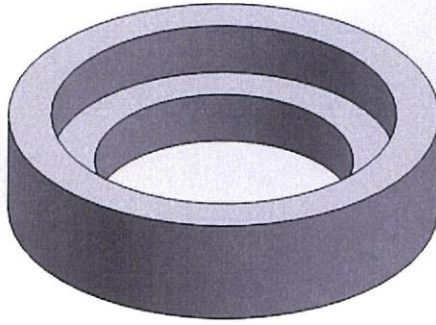


รูปที่ 3.21 ชิ้นส่วนแท่งชาร์ป (Shaft) ในมุมมอง 3 มิติ

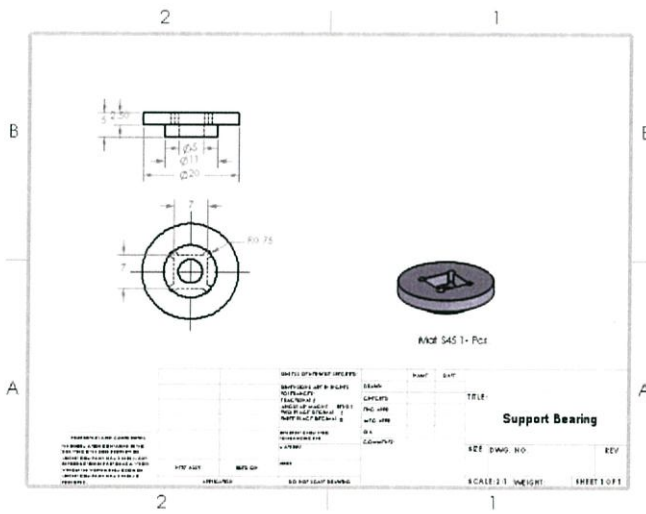
ชิ้นส่วนตัวช่วยแบร์ริง (Support Bearing)



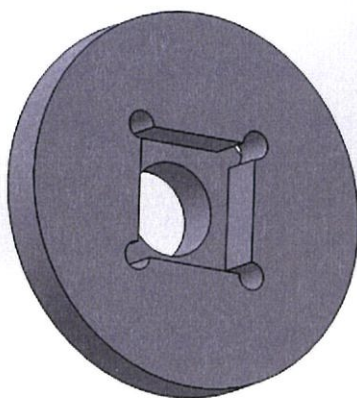
รูปที่ 3.22 ชิ้นส่วนตัวช่วยแบร์ริง (Support Bearing) ชิ้นที่ 1



รูปที่ 3.23 ชิ้นส่วนตัวช่วยแบริง (Support Bearing) ชั้นที่ 1 ในมุมมอง 3 มิติ



รูปที่ 3.24 ชิ้นส่วนตัวช่วยแบริง (Support Bearing) ชั้นที่ 2



รูปที่ 3.25 ชิ้นส่วนตัวช่วยแบริง (Support Bearing) ชั้นที่ 2 ในมุมมอง 3 มิติ

ตัวชิ้นงาน

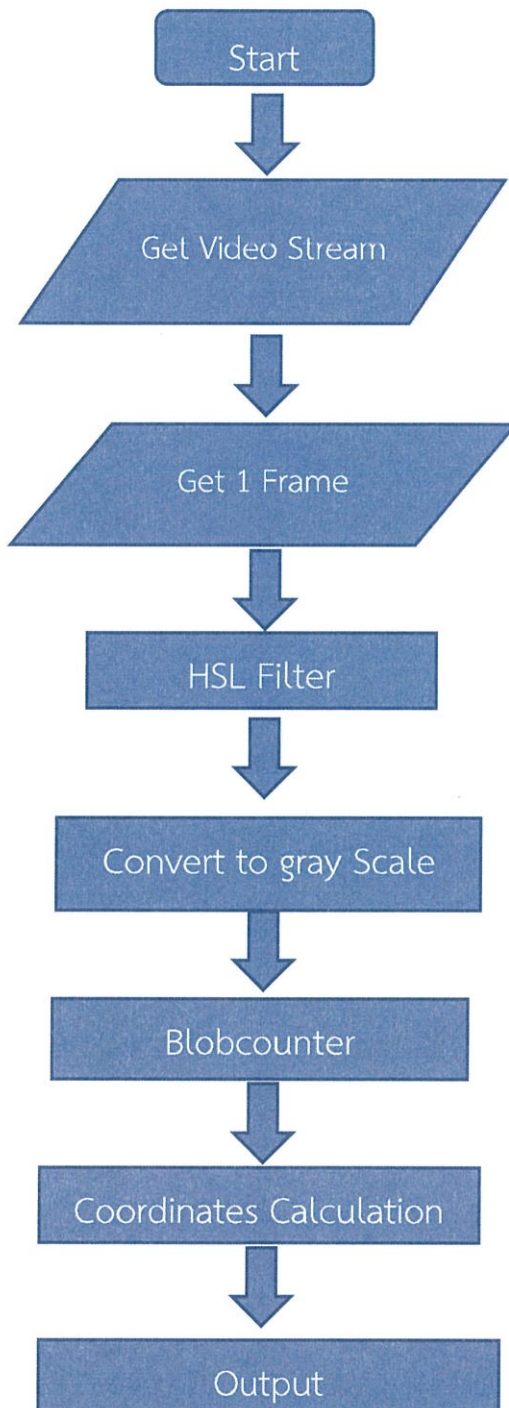
เมื่อรวมชิ้นงานทั้งหมดเข้าด้วยกันตัวชิ้นงานจะมีความสูง 230 มิลลิเมตร มีน้ำหนักประมาณ 4 กิโลกรัม



รูปที่ 3.26 ตัวชิ้นงานทั้งหมด

3.2 การทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพและการส่งข้อมูลไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพสามารถอธิบายเป็นแผนภาพ ดังนี้



รูปที่ 3.27 ลำดับการทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพ

1. Get Video Stream: การรับภาพจากกล้องเว็บแคม (Webcam) เข้ามายังโปรแกรม Visual Studio
2. Get 1 Frame: ดึงเฟรม (Frame) ของวิดีโอ เพื่อประมวลผลภาพ
3. HSL Filter: ใช้ HSL Filter ในการการแปลงสีให้เป็นสีขาวดำ ซึ่งโปรเจกต์นี้จะประมวลผลภาพที่สว่างที่สุดให้เป็นสีขาว ส่วนภาพที่เหลือแปลงให้เป็นสีดำ
4. Convert to gray scale: แปลงภาพที่รับมาเป็นภาพสีเทา
5. Blobcounter: นำภาพที่ได้จากการทำ HSL Filter มาใช้วิธีการ Blobcounter ซึ่งเป็นวิธีการนับจำนวนวัตถุที่ขาวสุดตัดกับพื้นหลังที่เป็นสีดำ และทำการตั้งค่าเข้าไปให้มีการนับเพียงจุดที่มีพื้นที่มากที่สุดเพียงจุดเดียว
6. Coordinate calculation: คำนวณหาพิกัดของแสงอาทิตย์ที่กล้องรับภาพได้
7. Output: ส่งตัวแปร Character ที่ตำแหน่งอยู่ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุน

3.2.1 ไบเบรารี (Library) ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม

ดอทเน็ตเฟรมเวิร์ค (.Net Framework)

ดอทเน็ตเฟรมเวิร์ค (.Net Framework) คือ แพลตฟอร์มสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์สร้างขึ้นโดยไมโครซอฟท์ โดยรองรับภาษามากกว่า 40 ภาษา เช่น C++, Visual Basic, Jscript, Delphi และอื่นๆ รวมถึงภาษา C# ที่นำมาใช้ในโครงการนี้ด้วย ซึ่งมีไลบรารี (Library) เป็นจำนวนมากสำหรับการเขียนโปรแกรม รวมถึงการบริหารการดำเนินการของโปรแกรมบนดอทเน็ตเฟรมเวิร์คโดย Library นั้นได้รวมถึงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ การเชื่อมต่อฐานข้อมูล วิทยาการเข้ารหัสลับ อัลกอริทึม การเชื่อมต่อเครือข่ายคอมพิวเตอร์ และการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันโดยดอทเน็ตเฟรมเวิร์คเป็นการจัดระเบียบครั้งใหญ่ของวงการพัฒนาซอฟต์แวร์ ทำให้รูปแบบของการพัฒนาโปรแกรมดูมีมาตรฐาน มีอนาคต สามารถต่อยอดเข้าใจได้เป็นอย่างดี มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับทุกคนที่ต้องการเป็นนักพัฒนาหรือนักโปรแกรมเมอร์

GDI+ (Graphics Device interface Plus)

GDI+ (Graphics Device interface Plus) เป็นไลบรารี (Library) สำหรับการทางด้านกราฟฟิก ที่ถูกจัดเตรียมโดยดอทเน็ตเฟรมเวิร์ค (.Net Framework) ความสามารถของ GDI+ (Graphics Device interface Plus) จะมีอยู่ 3 ส่วนหลักๆ คือ

- Vector Graphics

เป็นการสร้างกราฟิก 2 มิติด้วยรูปทรงพื้นฐาน เช่น เส้นตรง (Line) เส้นโค้ง (Curve) ซึ่งจะกำหนดขนาดตามระบบพิกัด เช่น การวาดเส้นตรงจะต้องกำหนดด้วย 2 จุด หรือการวาดสี่เหลี่ยมจะต้องกำหนดมุมบนซ้าย ความกว้าง ความสูง เป็นต้น

- Imaging

ด้วยความสามารถของ Vector Graphics อย่างเดียวคงไม่เพียงพอสำหรับกราฟิกที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การแสดงรูปภาพจะใช้ออบเจ็กต์ Bitmap ในการเก็บข้อมูลสีของพิกเซลต่างๆ และยังสามารถจัดการข้อมูลใน Bitmap นี้ได้ นอกจากนี้ความสามารถในส่วนของ Imaging ยังใช้จัดการเกี่ยวกับการระบายสีแบบไล่โทน (Gradient) หรือการ Transformation เป็นต้น

- Typography

เป็นการจัดการเกี่ยวกับฟอนต์ และสิ่งหนึ่งที่เพิ่มเติมมาจาก GDI ก็คือคุณสมบัติ Anti-aliasing ซึ่งช่วยให้แสดงข้อความได้เรียบขึ้น (Smooth) ขึ้น

AForge.NET framework

AForge.NET เป็น framework สำหรับภาษา C# ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นให้นำไปใช้งานทางด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence หรือ AI) โดยเฉพาะเรื่องการประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยที่ตัว AForge.NET framework จะมีความง่ายในการทำงานและช่วยให้ทำงานเร็วขึ้น และถูกต้องมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งผู้พัฒนาได้นำ Library มาใช้ในทางด้านประมวลผลวิดีโอ (Video Processing) ได้แก่ การค้นหากล้องเว็บแคม (Webcam) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถติดต่อได้, การทำภาพวิดีโอที่ได้ให้เป็นภาพระดับเทา (Gray Scale), การค้นหาตำแหน่งของภาพที่ต้องการโดยใช้ระบบสี HSL (Hue, Saturation, Luminance) ในส่วนของไลบรารี (Library) ของ AForge.NET framework ที่ได้ทำการเอามาใช้ในโครงการนี้ประกอบด้วยดังนี้

- AForge.Video

เป็นส่วนการประมวลผลทางด้านไฟล์วิดีโอ และวิดีโอสตรีมมิ่งเป็นหลัก นำมาใช้เพื่อการติดต่อผ่านกล้องเว็บแคม (Webcam) เพื่อดึงภาพวิดีโอมาใช้งาน

- AForge.Imaging

เป็นส่วนที่ทำงานกับการประมวลผลภาพเป็นหลัก จะประกอบไปด้วยไลบรารี (Library) ทางด้านชุดคำสั่งประมวลผลภาพ (Image Processing) ตัวอย่างเช่น การแปลงภาพ การประมวลผลภาพ และการกรองภาพ เป็นต้น

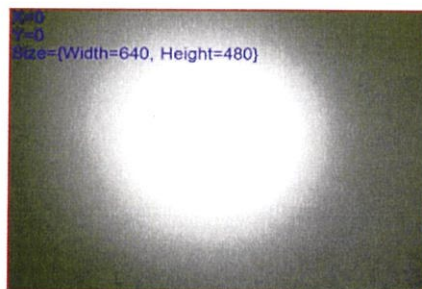
3.2.2 การประมวลผลภาพแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่หอคอยรับแสง

3.2.2.1 กล้อง Logitech C270h

ใช้ในการรับภาพของแสงอาทิตย์ แล้วจึงส่งภาพที่ได้ไปยังส่วนของโปรแกรม โดยกล้องมีความละเอียด 640 x 480 พิกเซล ชนิด RGB



รูปที่ 3.28 กล้อง Logitech C270h



รูปที่ 3.29 ภาพที่ได้จากกล้องเว็บแคม (Webcam) โดยใช้ไฟฉายแทนดวงอาทิตย์

3.2.2.2 การแปลงภาพเป็นภาพระดับเทา (Gray Scale)

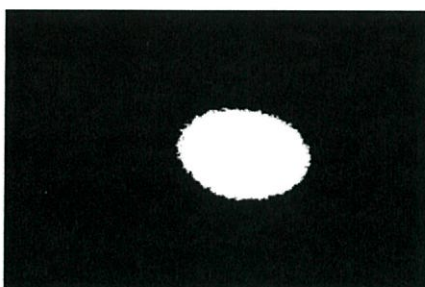
นำภาพที่ได้จากกล้องเว็บแคมมาแปลงให้เป็นภาพระดับเทา จะทำให้แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสงกลายเป็นสีขาวเด่นชัดขึ้นตัดกลับพื้นหลังที่เป็นสีเทา



รูปที่ 3.30 ภาพระดับเทา (Gray Scale) โดยใช้ไฟฉายแทนดวงอาทิตย์

3.2.2.3 การกรองสีภาพด้วย HSL Filter

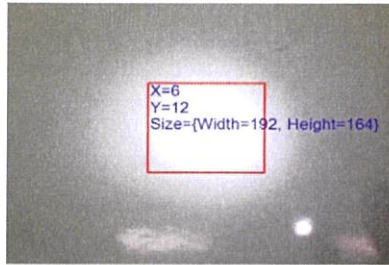
เริ่มต้นโดยการรับภาพแสงอาทิตย์ที่สะท้อนสู่หอคอยรับแสงจากกล้องเว็บแคม (Webcam) เข้าโปรแกรม Visual Studio ซึ่งภาพที่ได้นั้นจะเป็นสี หลังจากนั้นก็ทำการประมวลผลภาพโดยใช้ระบบ HSL Filter (Hue, Saturation, Lightness) ซึ่งหลักการของระบบ HSL Filter นั้นก็คือ การกรองหาพื้นที่ที่มีสีที่เราต้องการตามค่า HSL แต่ละค่าที่เหมาะสม โดยเปลี่ยนพื้นที่ที่เป็นสีอื่นให้กลายเป็นสีดำ จึงทำให้ภาพแสดงเพียงพื้นที่ที่เป็นสีที่เราต้องการบนพื้นหลังที่เป็นสีดำ และใช้ Blobcounter จับภาพสีขาวเพื่อเช็คระยะห่างจากจุดศูนย์กลางที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.31 ประมวลผลภาพโดยใช้ระบบ HSL Filter (Hue, Saturation, Lightness) และผ่านการทำเป็นภาพระดับเทา (Gray Scale)

3.2.2.4 Blobcounter

เป็นการนำภาพที่ได้จากการทำ HSL Filter มาใช้วิธีการ Blobcounter ซึ่งเป็นวิธีการนับจำนวนวัตถุที่สามารถแบ่งแยกออกจากพื้นหลังสีดำได้อย่างชัดเจน และทำการตั้งค่าเข้าไปให้มีการนับเพียงจุดที่มีพื้นที่มากที่สุดเพียงจุดเดียว เพื่อนำไปคำนวณหาจุดที่สนใจที่เกิดขึ้นในภาพ และทำการตีกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบจุดที่สนใจนั้นๆ



รูปที่ 3.32 วิธีการ Blobcounter ตีกรอบภาพ

3.2.3 การหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสงโดยการประมวลผลภาพ

ในการหาจุดศูนย์กลางของแสงอาทิตย์จะเริ่มจากการใช้วิธี Blobcounter ในการหาจุดที่สนใจเพียงจุดเดียวในภาพ นั่นคือ แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสง โดยวิธี Blobcounter เป็นวิธีการนับจำนวนวัตถุที่สามารถแบ่งแยกออกจากพื้นหลังสีดำได้อย่างชัดเจน และตั้งค่าเข้าไปให้มีการนับเพียงจุดที่มีพื้นที่มากที่สุดเพียงจุดเดียว หลังจากนั้นจะทำการตีกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบจุดสนใจนั้นๆ โดยเราสามารถหาพิกัดจุดศูนย์กลางของภาพได้จาก

$$X = object.X + \frac{object.Width}{2} - \frac{Video.Width}{2} \quad (3.1)$$

$$Y = \frac{Video.Height}{2} - \left(object.Y + \frac{object.Height}{2} \right) \quad (3.2)$$

โดย

X คือ พิกัดแกน X ของจุดศูนย์กลางของภาพที่สนใจ

Y คือ พิกัดแกน Y ของจุดศูนย์กลางของภาพที่สนใจ

Object.X คือ ค่าพิกัด X ของมุมบนซ้ายของกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบจุดที่สนใจ

Object.Y คือ ค่าพิกัด Y ของมุมบนซ้ายของกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบจุดที่สนใจ

Object.Width คือ ค่าความกว้างของกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบจุดที่สนใจ

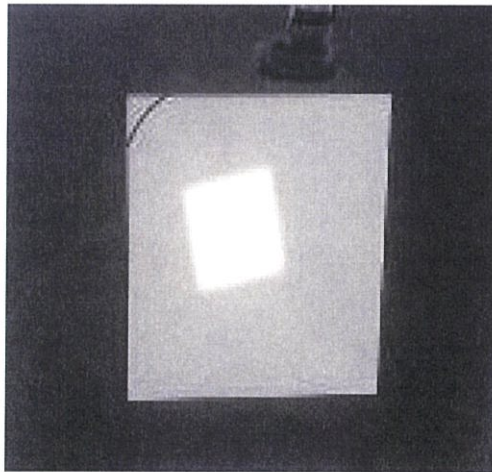
Object.Height คือ ค่าความสูงของกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบจุดที่สนใจ

Video.Width คือ ค่าความกว้างของภาพที่รับเข้ามาผ่านกล้องเว็บแคม

Video.Height คือ ค่าความสูงของภาพที่รับเข้ามาผ่านกล้องเว็บแคม

3.2.4 การพิจารณาดำแหน่งแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่หอคอยรับแสง

เมื่อสิ้นสุดการใช้สมการตำแหน่งของดวงอาทิตย์เพื่อหมุนสแต็ปมอเตอร์ไปยังหอคอยรับแสงเพื่อเป็นค่าเริ่มต้น เริ่มต้น และทุกๆ 12 นาที หรือสามารถปรับค่านาทีที่ต้องการเพื่อที่จะสั่งให้โปรแกรมทำการประมวลผลหาตำแหน่งแสงอาทิตย์ หลังจากนั้นก็จะเข้ากระบวนการประมวลผลภาพเพื่อปรับการสะท้อนแสงอาทิตย์ให้ตกกระทบสู่หอคอยรับแสง ณ จุดกึ่งกลาง ก็จะนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์หาตำแหน่งของวัตถุแล้วเข้าสู่กระบวนการควบคุมแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์ให้ตรงหอคอยรับแสง โดยมีการพิจารณาดำแหน่งของวัตถุได้ดังนี้



รูปที่ 3.33 ขอบเขตของแสงอาทิตย์ที่ยอมรับได้

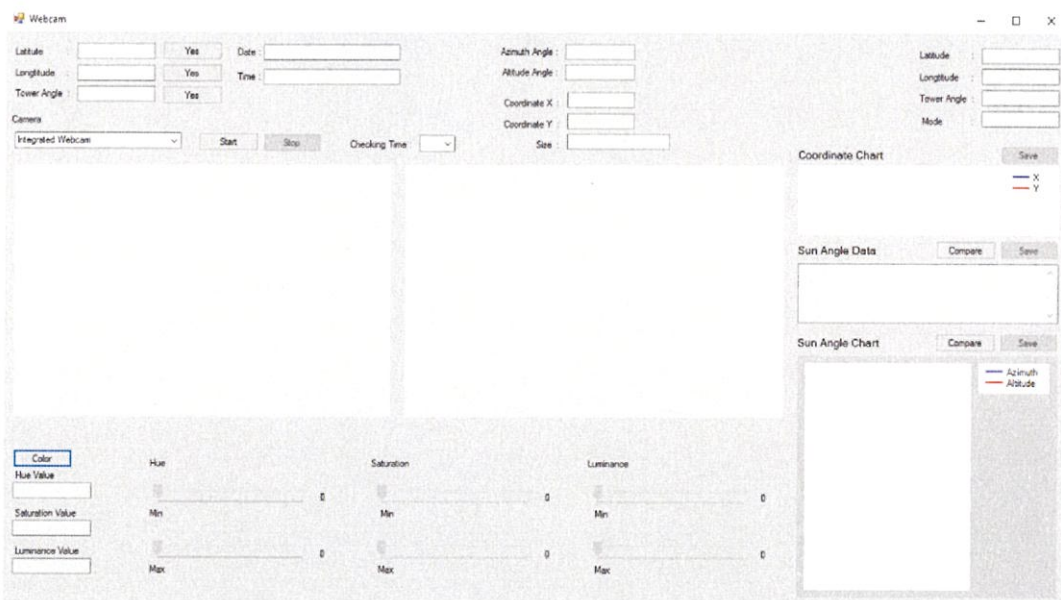
โดย พื้นที่ของภาพมี ขนาด 640×480 Pixels ซึ่งมีขอบเขตที่ยอมรับได้ในพื้นที่สีขาวและทุกครั้งที่โปรแกรมทำงานจะสั่งให้มาอยู่ในขอบเขต $-10 < X < 10$ และ $-10 < Y < 10$

กรณีต่างๆ

- $X > 10$ โปรแกรม Visual Studio จะส่งค่า a ไปเรื่อยๆ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้สเต็ปปั๊มมอเตอร์มุมอะซิมุท หมุนทวนเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆ จนแสงอาทิตย์เข้าอยู่ในขอบเขตที่ตั้งค่าไว้ ก็จะหยุดส่งค่า
- $X < -10$ โปรแกรม Visual Studio จะส่งค่า b ไปเรื่อยๆ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้สเต็ปปั๊มมอเตอร์มุมอะซิมุท หมุนตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆ จนแสงอาทิตย์เข้าอยู่ในขอบเขตที่ตั้งค่าไว้ ก็จะหยุดส่งค่า
- $Y > 10$ โปรแกรม Visual Studio จะส่งค่า c ไปเรื่อยๆ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้สเต็ปปั๊มมอเตอร์มุมอัลติจูด หมุนตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆ จนแสงอาทิตย์เข้าอยู่ในขอบเขตที่ตั้งค่าไว้ ก็จะหยุดส่งค่า
- $Y < -10$ โปรแกรม Visual Studio จะส่งค่า d ไปเรื่อยๆ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้สเต็ปปั๊มมอเตอร์มุมอัลติจูด หมุนทวนเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆ จนแสงอาทิตย์เข้าอยู่ในขอบเขตที่ตั้งค่าไว้ ก็จะหยุดส่งค่า
- เมฆมาบดบังกล้องหรือกล้องไม่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้ โปรแกรมประมวลผลภาพก็จะเปลี่ยนวิธีการระบุตำแหน่งแสงอาทิตย์มาใช้วิธีการระบุตำแหน่งแสงอาทิตย์จากการคำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์โดยอัตโนมัติ เพื่อเป็นการชดเชยที่แสงอาทิตย์หลุดกรอบของหอคอยรับแสง โดยที่ตัวอักษร 1 ตัวแทน 1 สเต็ป

3.3 โปรแกรมที่ใช้ประมวลผลภาพ

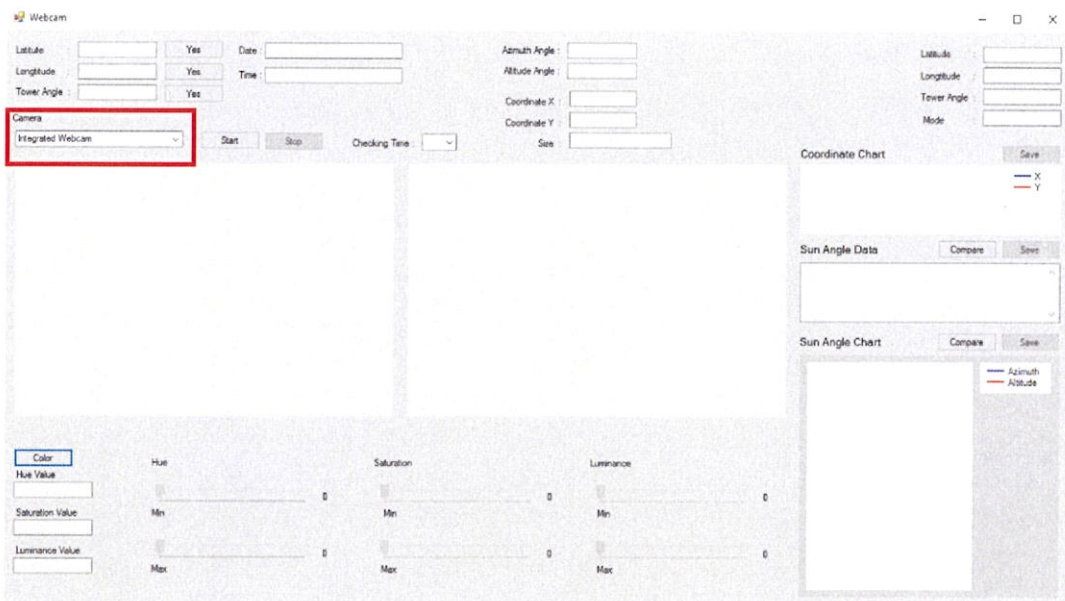
โปรแกรมติดตามแสงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงในปริศยานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้ Visual Studio ในการสร้างโปรแกรมสะท้อนแสงอาทิตย์ขึ้นมา โดยมีหน้าต่างของโปรแกรมหาดังรูป



รูปที่ 3.34 หน้าต่างโปรแกรมสะท้อนแสงอาทิตย์

3.3.1 ส่วนเลือกกล้อง

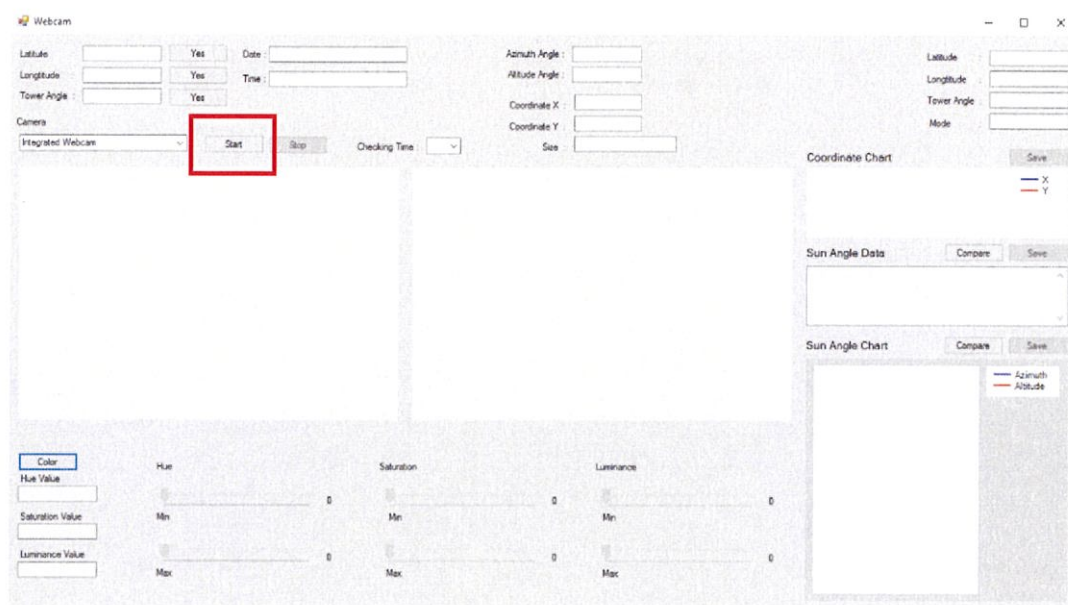
เนื่องจากกล้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์อาจจะมีได้หลายกล้อง เช่น กล้องที่ติดมากับเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่แล้ว และกล้องที่แยกออกมาจากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจากส่วนเลือกกล้องเราสามารถที่จะเลือกกล้องที่เราต้องการรับเข้ามายังโปรแกรมได้ เพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.35 ส่วนเลือกกล้อง

3.3.2 ส่วนเริ่มการทำงาน

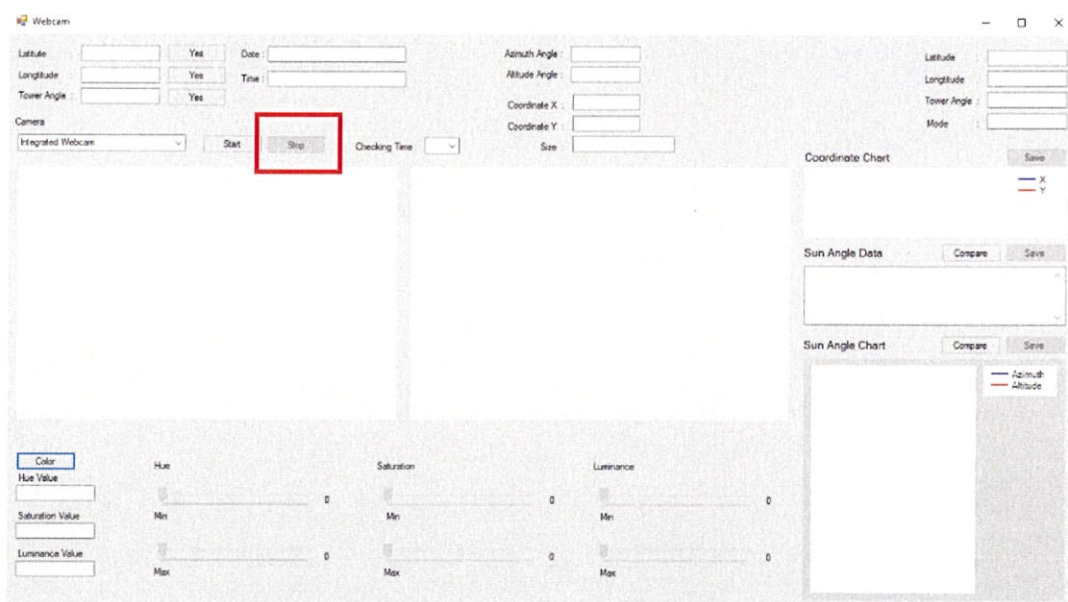
เมื่อเราเลือกกล้องแล้ว เราสามารถเริ่มการทำงานของกล้องได้โดยการคลิกที่ปุ่ม Start จะทำให้โปรแกรมติดตามแสงอาทิตย์โดยรับภาพจากกล้องที่เราเลือกใช้



รูปที่ 3.36 การเริ่มการทำงานเมื่อกดปุ่ม Start

3.3.3 ส่วนหยุดการทำงาน

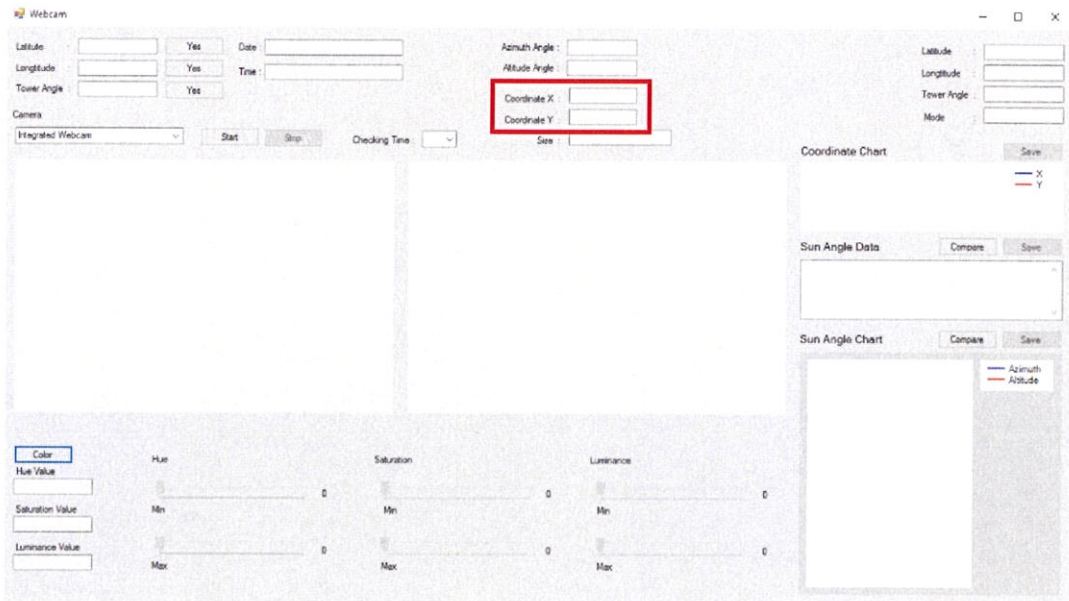
เราสามารถหยุดการทำงานของกล้องได้ โดยการกดปุ่ม Stop



รูปที่ 3.37 การหยุดการทำงานเมื่อกดปุ่ม Stop

3.3.4 ส่วนแสดงค่าพิกัดแกน X และ แกน Y

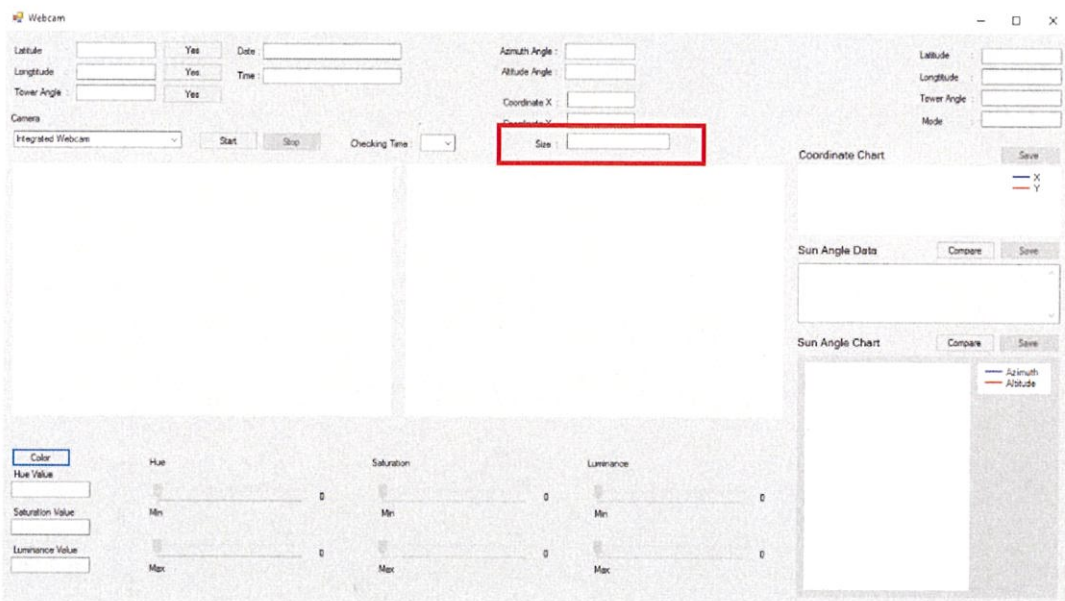
เป็นส่วนที่แสดงค่าตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับว่าอยู่ตำแหน่งใดของภาพ โดยตำแหน่งจุดกึ่งกลางของภาพ อยู่ที่ พิกัด $X = 0$ และ $Y = 0$



รูปที่ 3.38 ค่าพิกัดแกน X และ แกน Y

3.3.5 ส่วนแสดงขนาดกรอบสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบวัตถุ

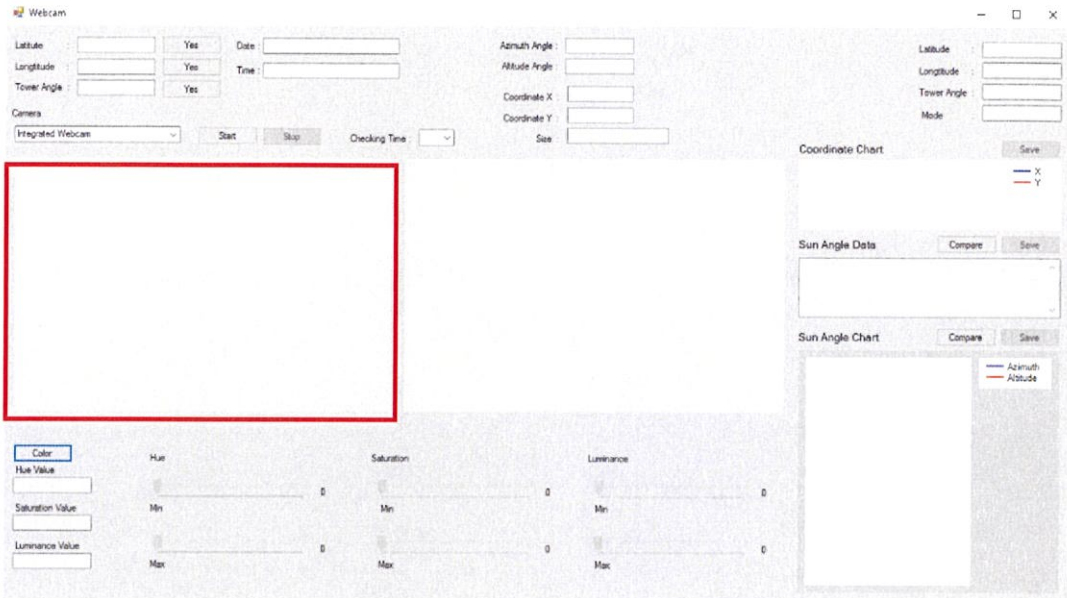
เป็นส่วนที่แสดงค่าขนาดความกว้างและความสูงของกรอบสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบวัตถุ



รูปที่ 3.39 ค่าขนาดกรอบสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบวัตถุ

3.3.6 ส่วนแสดงภาพที่รับจากกล้อง

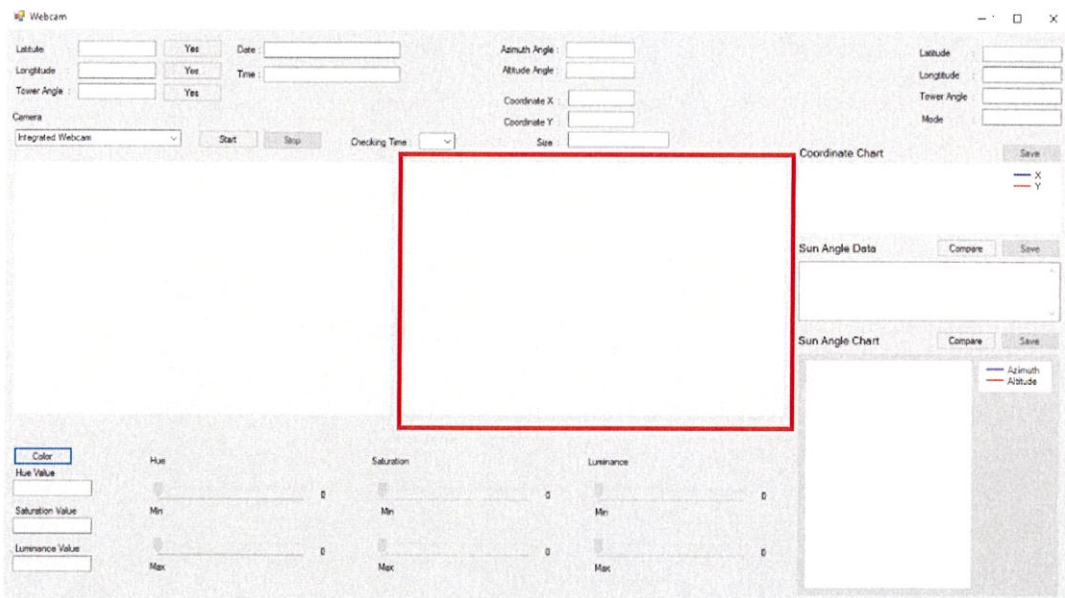
เป็นส่วนที่แสดงภาพที่ได้รับจากกล้อง ที่มีการแสดงผลของตำแหน่งของวัตถุ



รูปที่ 3.40 ภาพที่ได้รับจากกล้อง

3.3.7 ส่วนแสดงภาพระดับเทา

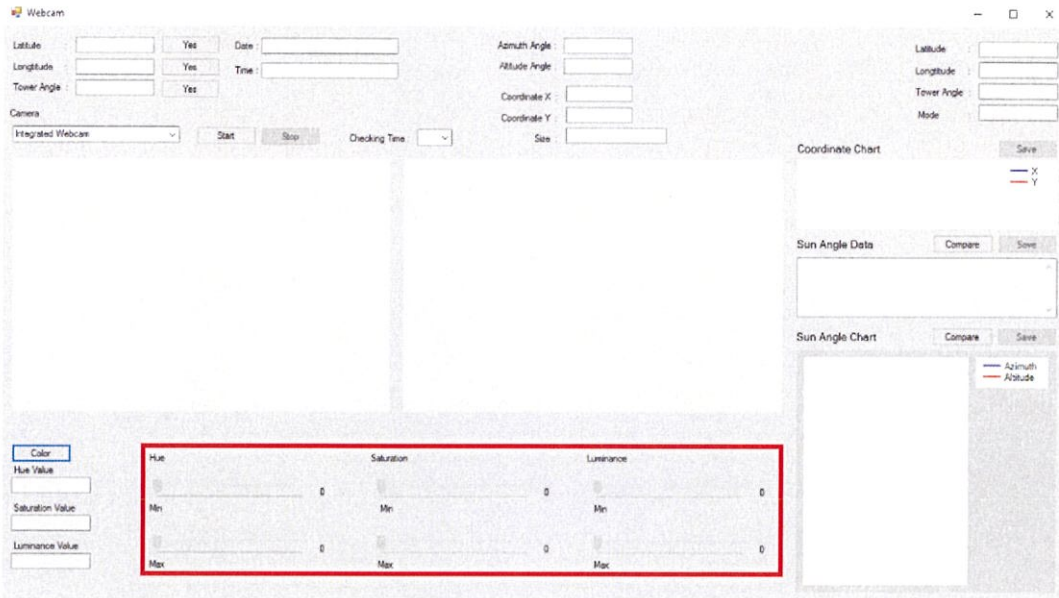
เป็นส่วนที่แปลงภาพที่ได้รับจากกล้องมาเป็นภาพระดับเทา (Gray Scale)



รูปที่ 3.41 ภาพระดับเทา

3.3.8 ส่วนปรับค่า HSL Filter

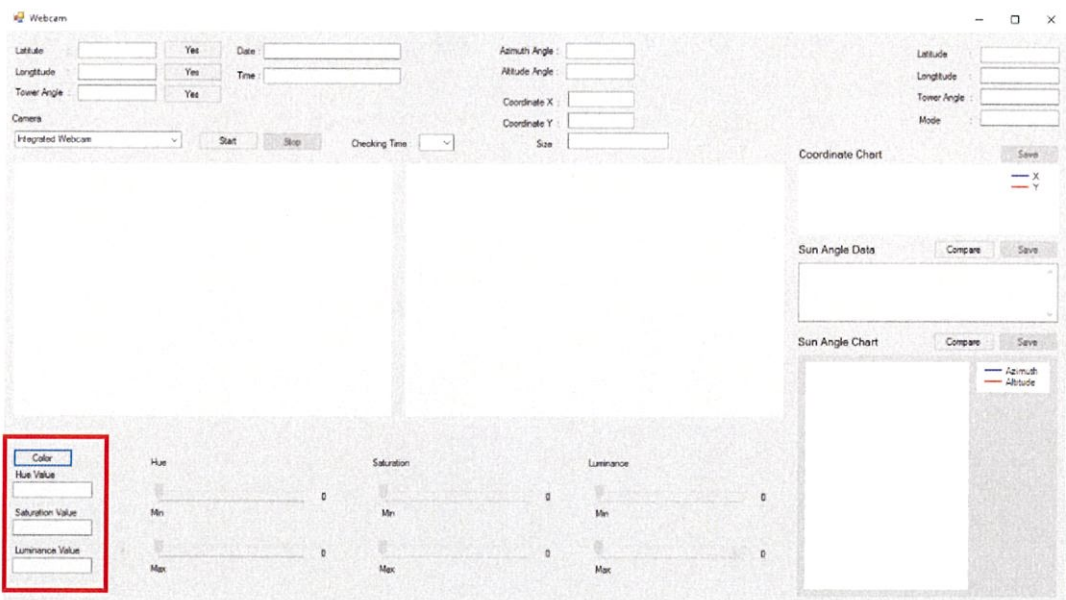
เป็นส่วนที่ปรับค่าสีที่เราต้องการจะตรวจจับ



รูปที่ 3.42 ส่วนปรับค่า HSL Filter

3.3.9 ส่วนแสดงค่าของสีที่เราต้องการตรวจจับ

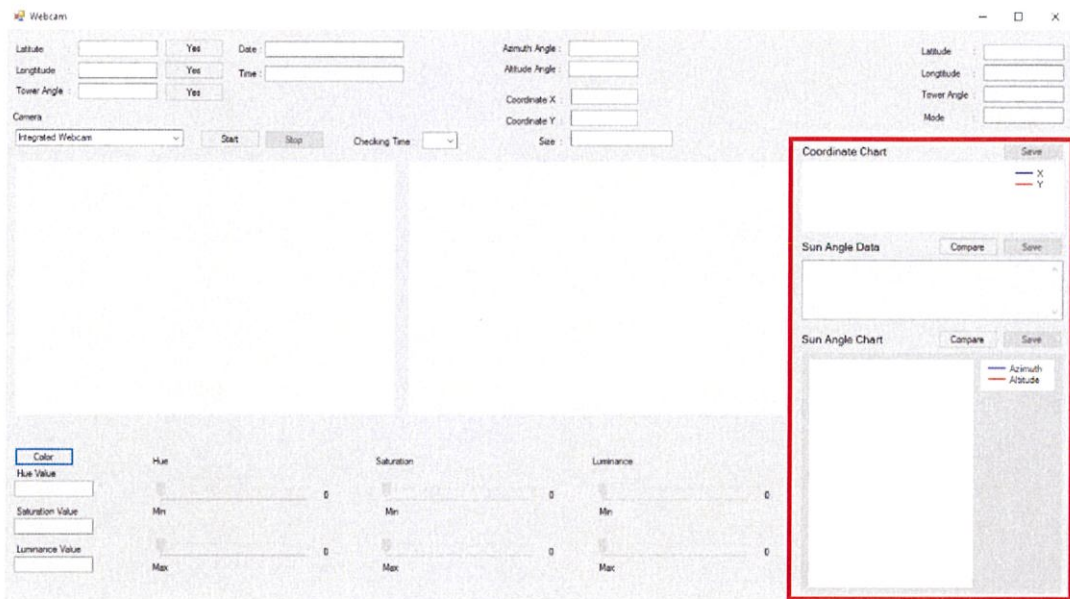
เป็นส่วนที่ช่วยในการปรับค่า HSL Filter สามารถที่จะเลือกสีที่เราต้องการตรวจจับ เมื่อเลือกสีที่ต้องการตรวจจับแล้ว ส่วนนี้จะแสดงค่าสีที่เราต้องการตรวจจับนั้นว่าต้องปรับ HSL Filter เท่าไหร่



รูปที่ 3.43 ค่าสีที่เราต้องการ

3.3.10 ส่วนแสดงผลข้อมูลย้อนหลังและ Save ข้อมูล

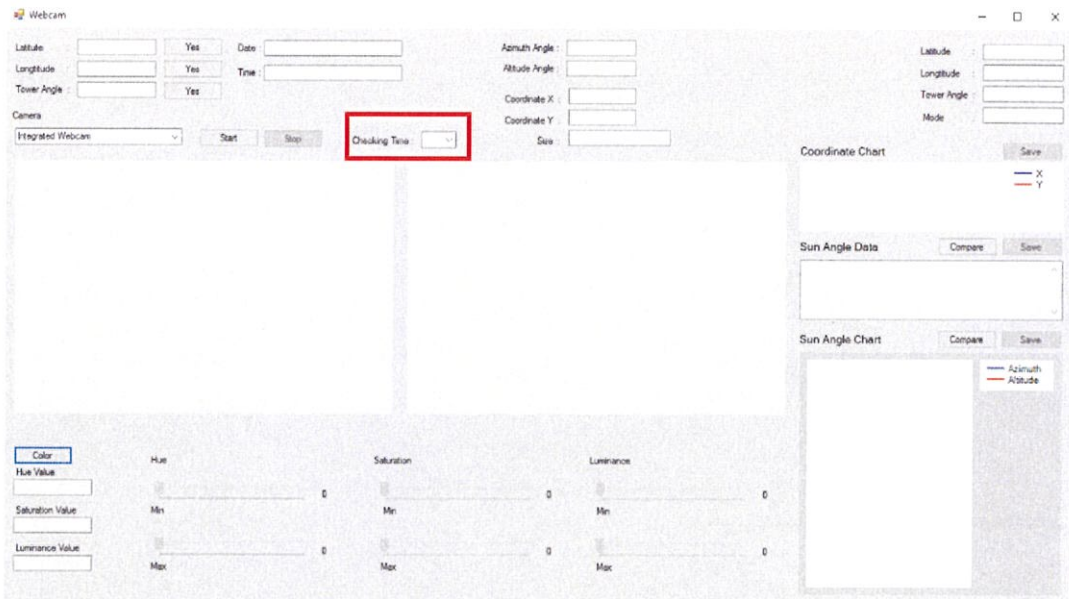
โดยได้ออกแบบให้มี 3 ส่วน ส่วนแรก คือ Coordinate Data ส่วนนี้จะแสดงตำแหน่ง X และ Y ของแสงจากจุดศูนย์กลางในรูปกราฟ ส่วนที่สอง คือ Sun Angle Data ส่วนนี้จะแสดงค่ามุม Azimuth และ มุม Altitude ของสเต็ปปีงมอเตอร์เมื่อหมุนก็ให้บวกค่าทปไปและนำค่านี้ไปเทียบกับค่าจริงจากการคำนวณซึ่งจะมีปุ่ม Compare อยู่ ส่วนที่สาม จะเอาค่ามุมทั้งสองมาพล็อตกราฟ



รูปที่ 3.44 ผลข้อมูลย้อนหลัง

3.3.11 ส่วนการปรับเวลาเพื่อให้โปรแกรมตรวจหาตำแหน่งแสงอาทิตย์

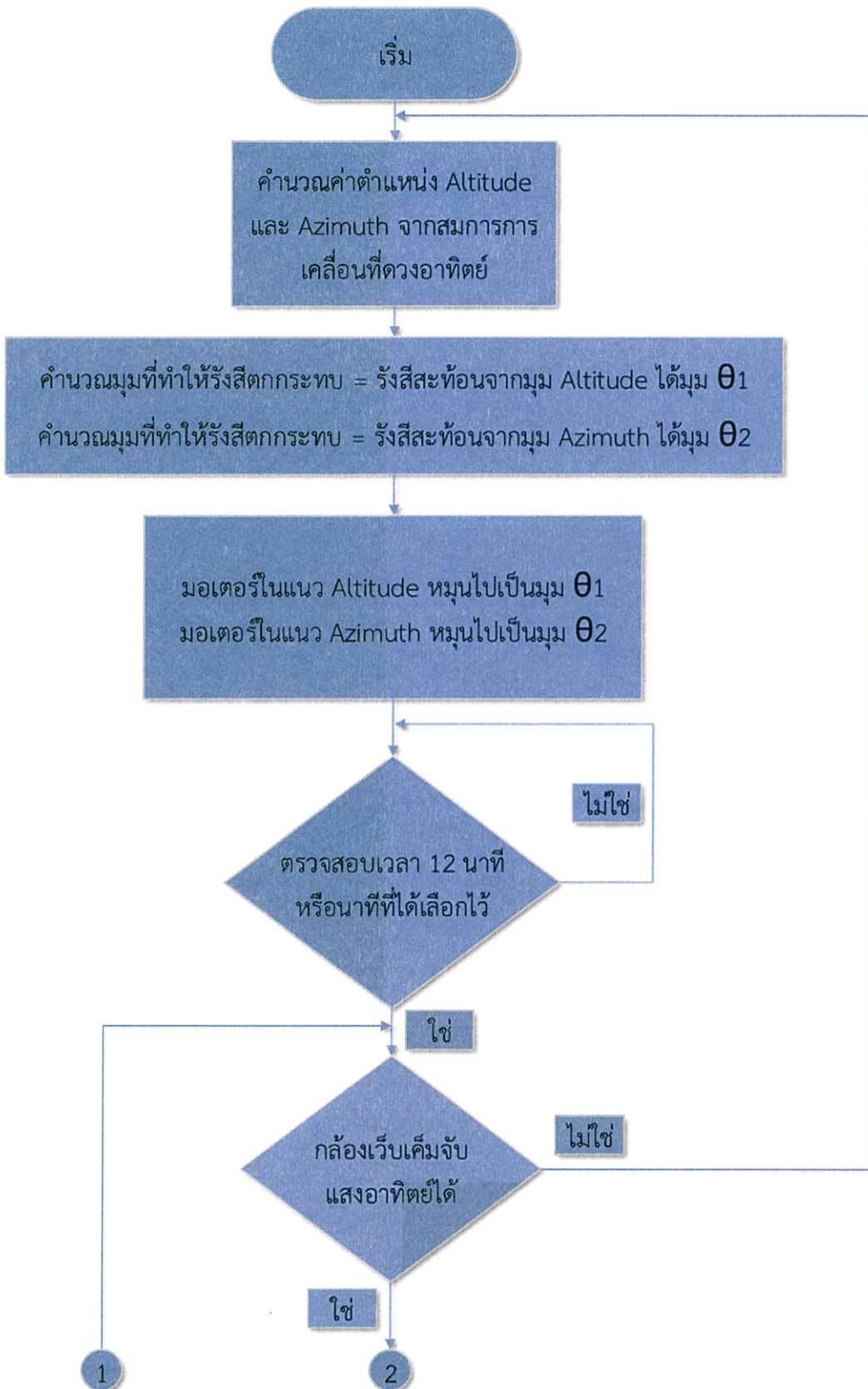
เวลาที่จะให้โปรแกรมทำการตรวจหาตำแหน่งและส่งค่าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยมีเวลาที่ 4, 6, 10, 12 นาที



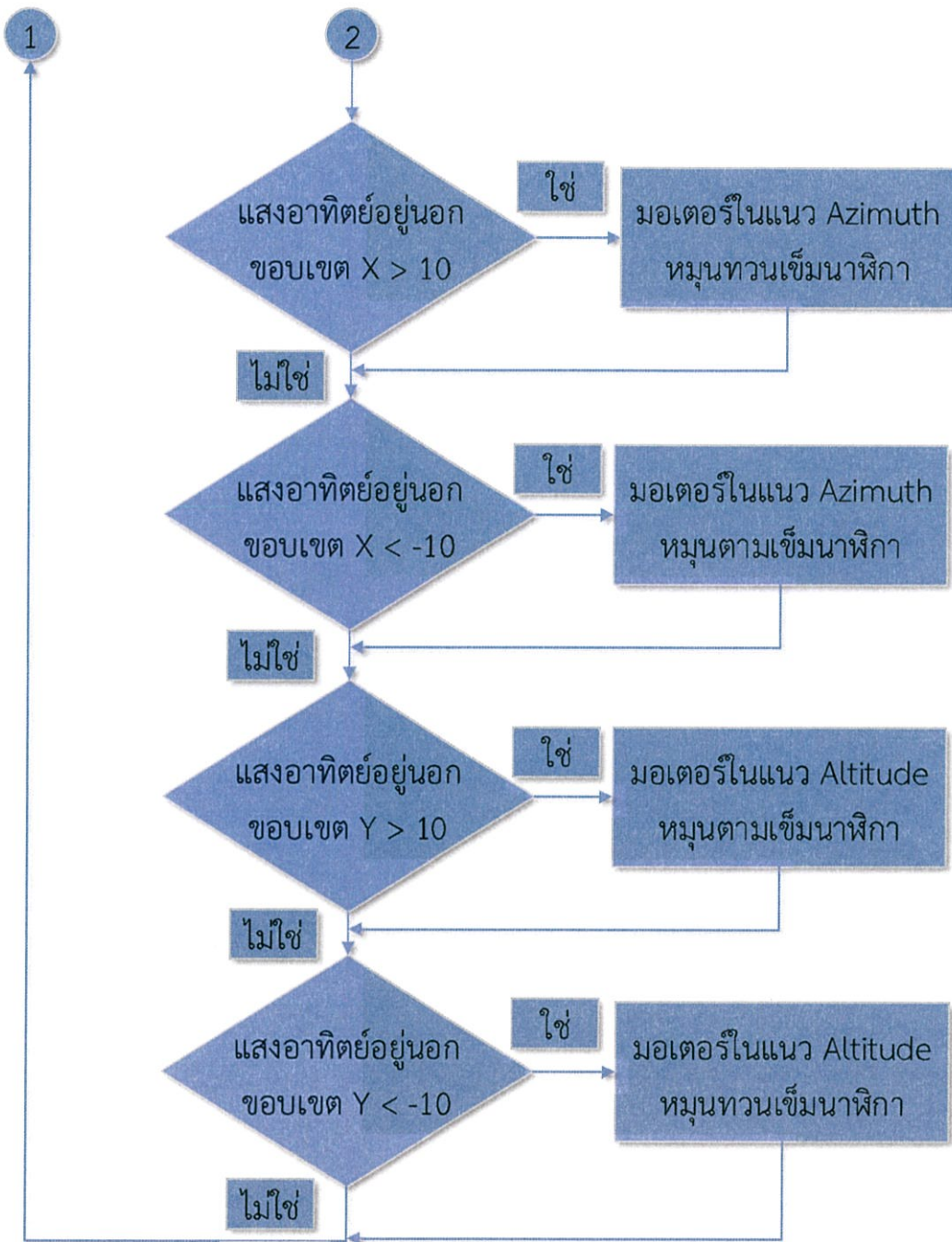
รูปที่ 3.45 เวลาในการตรวจจับ

3.4 Flow Chart การทำงานของโปรแกรมควบคุมแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์

หลังจากการทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพ ผลลัพธ์ที่ได้จาโปรแกรมประมวลผลภาพ คือ การส่งค่าสัญลักษณ์ของตำแหน่งที่วัดได้อยู่ มายังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำค่าสัญลักษณ์ของตำแหน่งที่ได้รับ มาเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมสเต็ปมอเตอร์เพื่อสะท้อนแสงอาทิตย์สู่หอคอยรับแสง



รูปที่ 3.46 ผังการทำงานของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.47 ผังการทำงานของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ (ต่อ)

3.5 การส่งค่าออกจากโปรแกรมประมวลผลภาพ

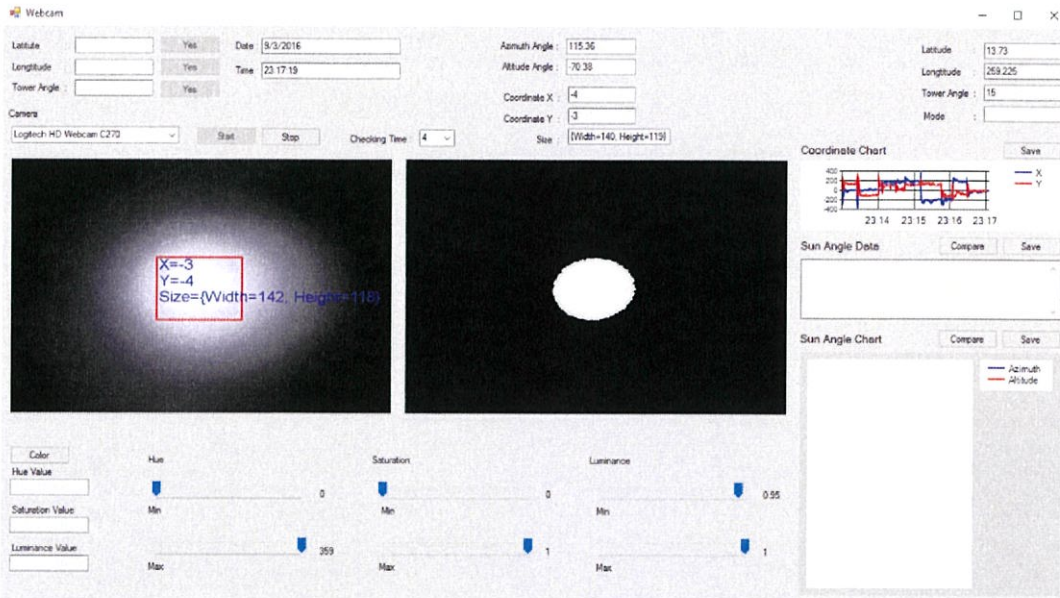
ในการส่งข้อมูลให้ตัวขับสแต็ปปีงมอเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้และกรณีที่ไม่สามารถรับแสงจากดวงอาทิตย์ได้

เมื่อวัตถุอยู่นอกเหนือจากขอบเขตที่ได้ตั้งค่าไว้ โปรแกรมจะทำการส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เพื่อบ่งบอกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ควรสั่งสแต็ปปีงมอเตอร์ตัวไหนให้หมุนและหมุนในทางทิศใด

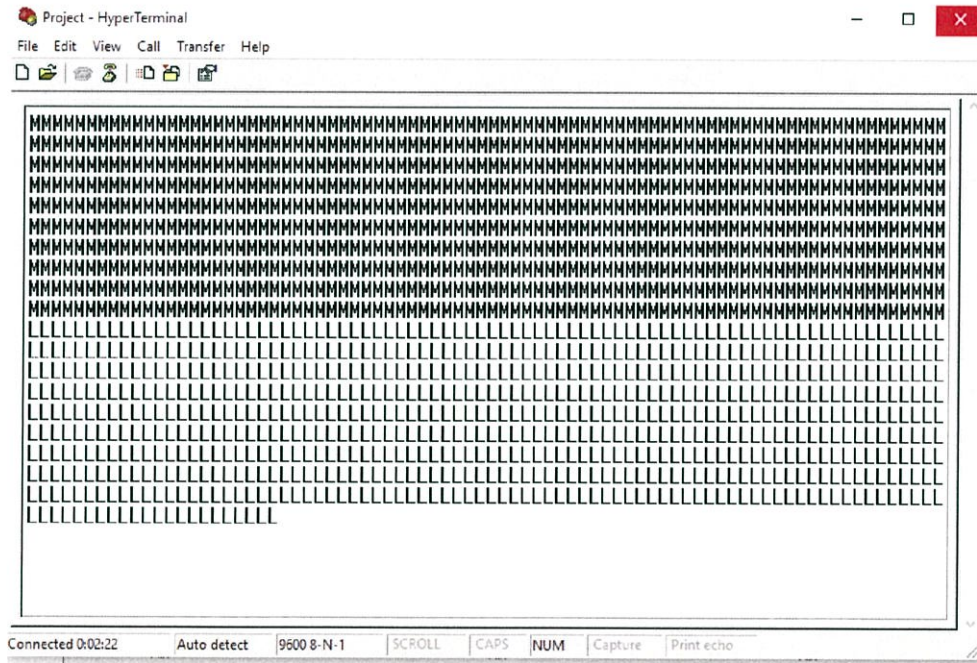
จากการจำลองจะทำการใช้ไฟฉายแทนแสงอาทิตย์และส่งไปยังแผ่นกระดาษซึ่งแทนหอคอยรับแสง โดยจะทำการดูการส่งค่าจากโปรแกรมประมวลผลภาพเมื่อวัตถุอยู่นอกเหนือขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยจะใช้โปรแกรม HyperTerminal เพื่อดูค่าที่ส่งออกมาจากโปรแกรมประมวลผลภาพ

3.5.1 เริ่มกด Start โปรแกรม

โปรแกรมประมวลผลภาพจะส่งค่า M และ L ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นค่ามุมเริ่มต้นให้กับสแต็ปปีงมอเตอร์เพื่อหมุน Reflector ให้สะท้อนแสงอาทิตย์สู่หอคอยรับแสง โดยที่ M จะสั่งสแต็ปปีงมอเตอร์ตัวที่ 1 และ L จะสั่งสแต็ปปีงมอเตอร์ตัวที่ 2

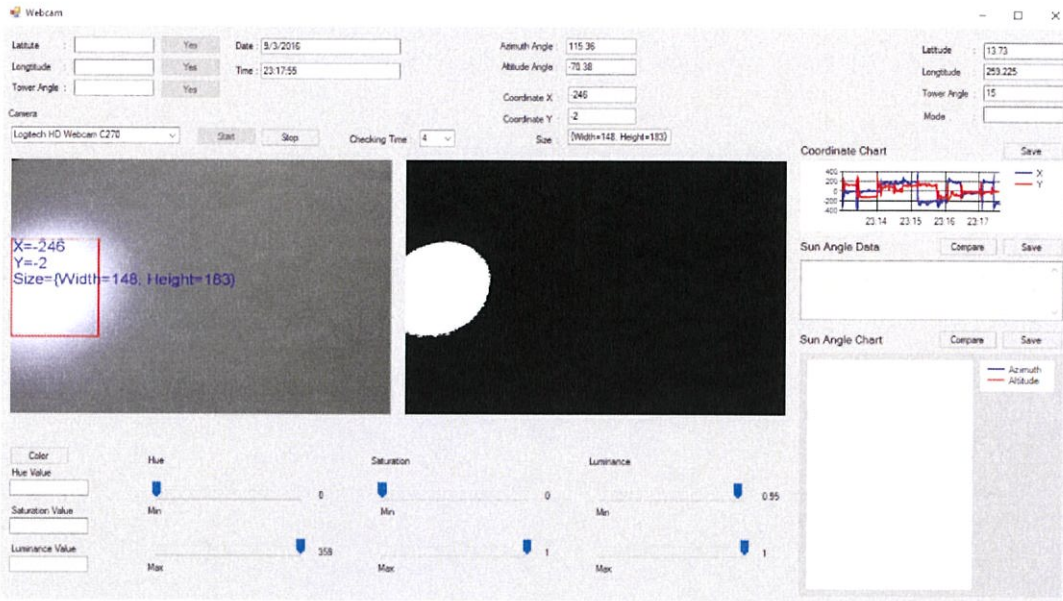


รูปที่ 3.48 เมื่อกดปุ่ม Start เริ่มต้น

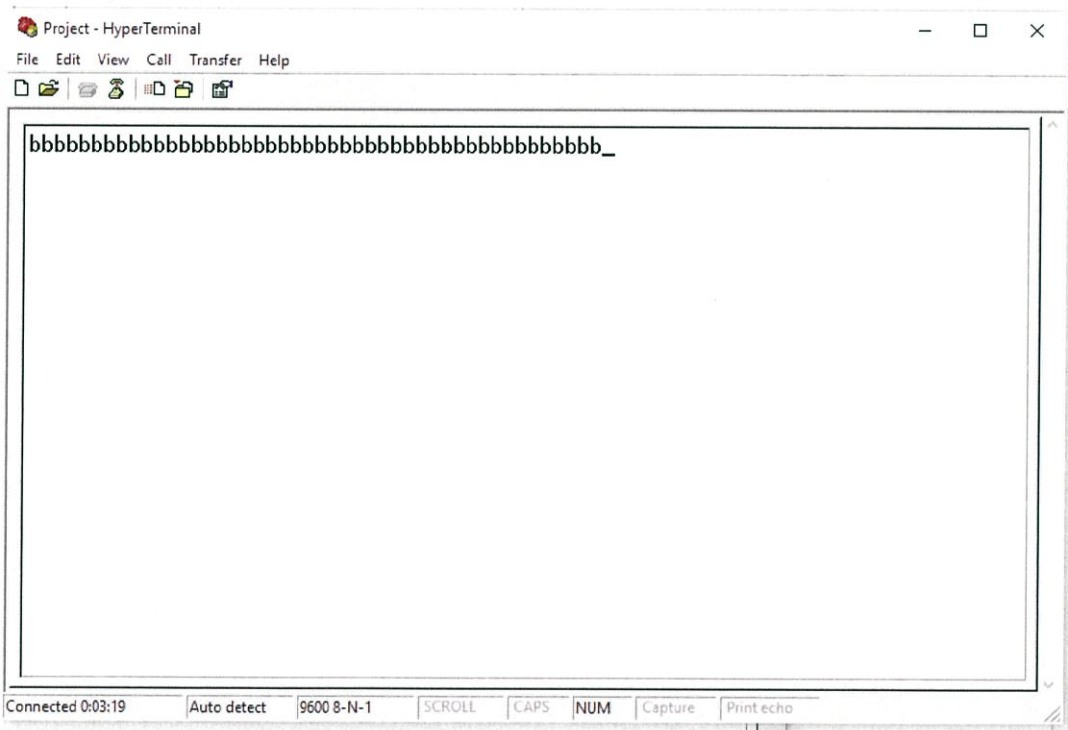


รูปที่ 3.49 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว M และ ตัว L

3.5.3 วัดฤกษ์อยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $-10 < Y < 10$

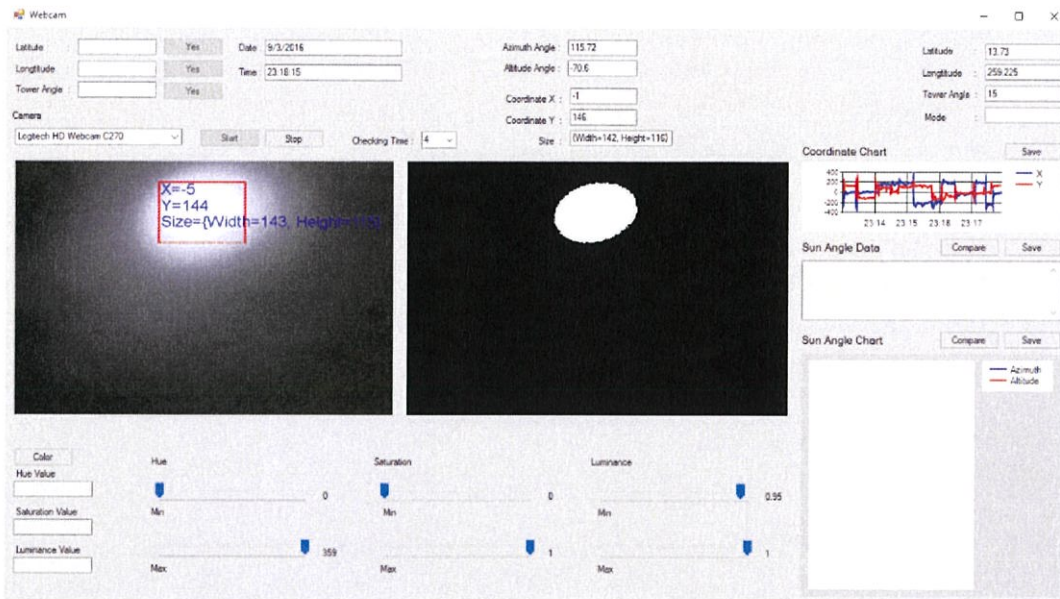


รูปที่ 3.52 วัดฤกษ์อยู่ในแนวแกน $X < -10$ และ $-10 < Y < 10$

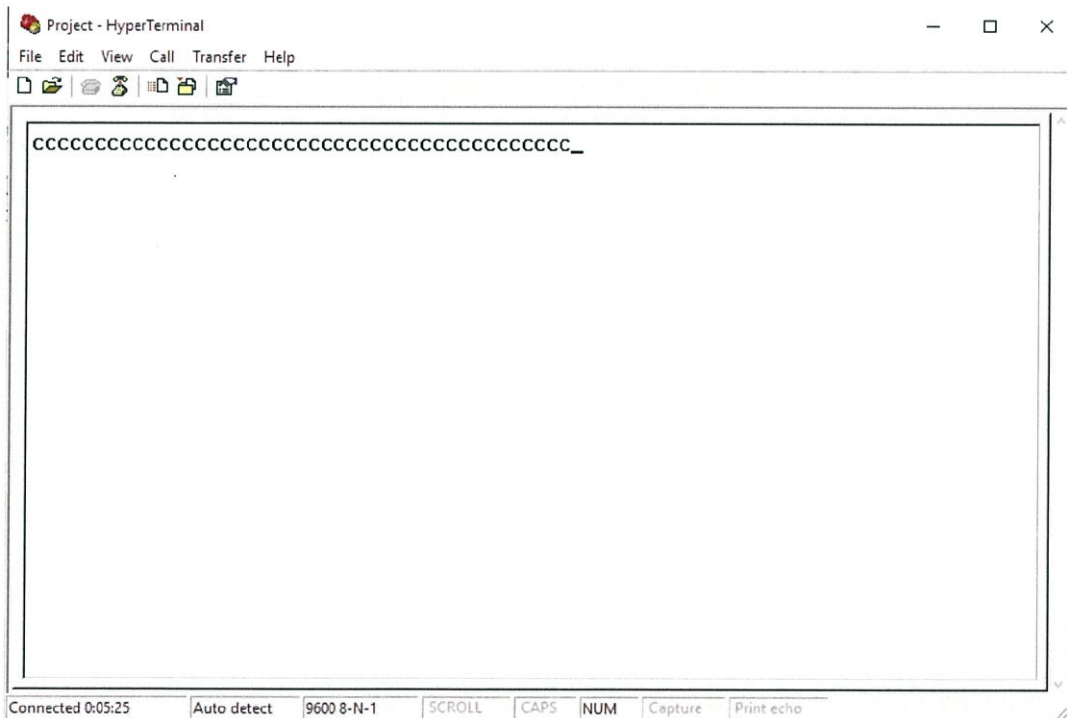


รูปที่ 3.53 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว b

3.5.4 วัตถุอยู่ในแนวแกน $Y > 10$ และ $-10 < X < 10$

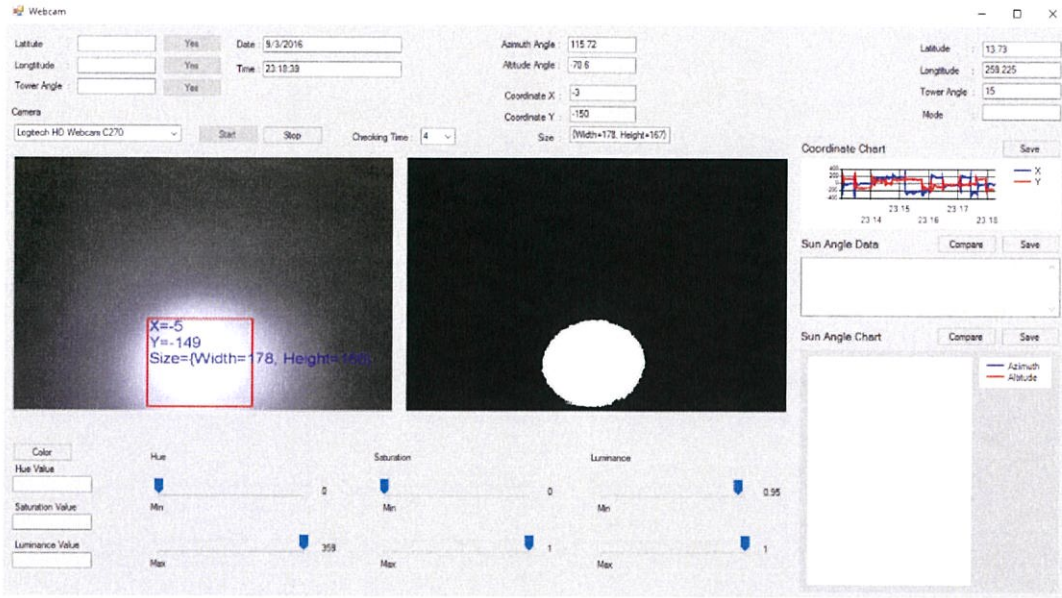


รูปที่ 3.54 วัตถุอยู่ในแนวแกน $Y > 10$ และ $-10 < X < 10$

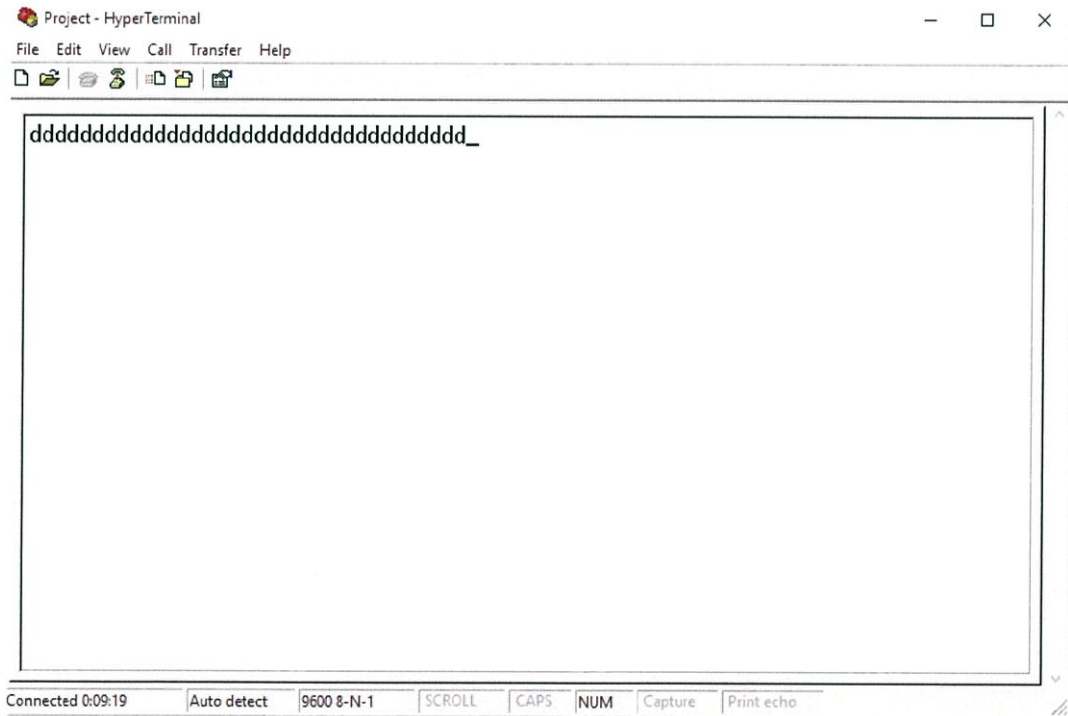


รูปที่ 3.55 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว c

3.5.5 วัตถุอยู่ในแนวแกน Y < -10 และ -10 < X < 10

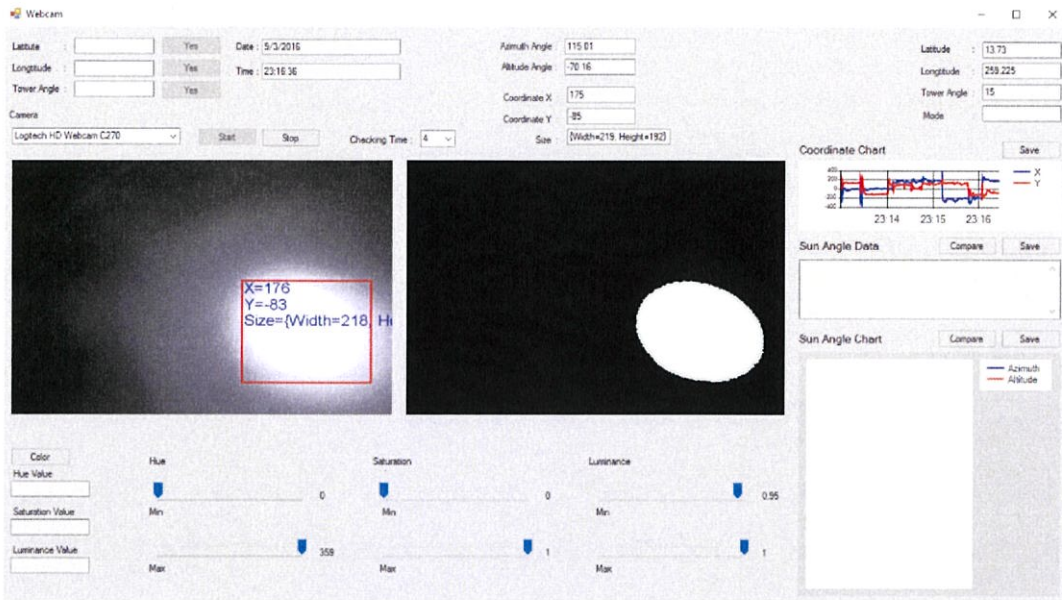


รูปที่ 3.56 วัตถุอยู่ในแนวแกน Y < -10 และ -10 < X < 10

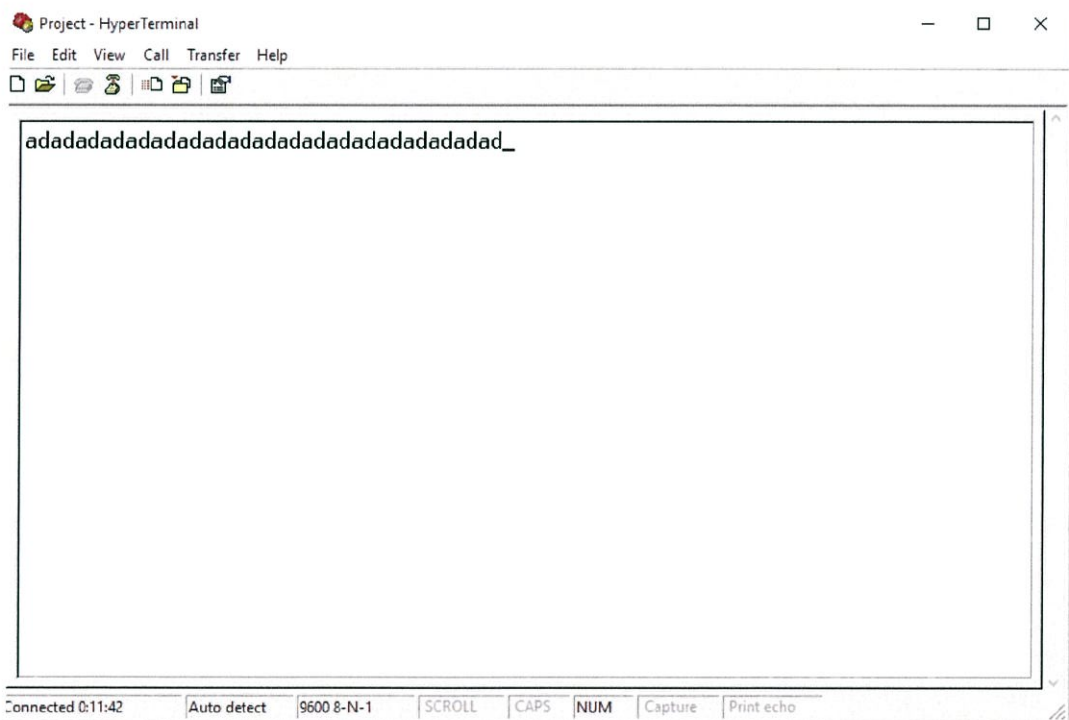


รูปที่ 3.57 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว d

3.5.9 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y < -10$



รูปที่ 3.64 วัตถุอยู่ในแนวแกน $X > 10$ และ $Y < -10$



รูปที่ 3.65 โปรแกรมประมวลผลภาพส่งข้อมูลเป็นสัญลักษณ์ตัว a และ ตัว d

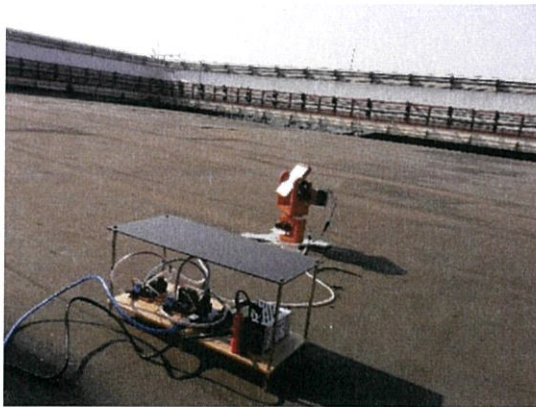
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองการสะท้อนแสงดวงอาทิตย์ ณ ชั้นดาดฟ้าตึก ECC ได้ทำการจำลองตัว Receiver และกล้อง Webcam ให้มีขนาดเป็น 3 เท่าของกระจกสะท้อนแสง โดยที่กระจกสะท้อนมีขนาด 10×10 cm ส่วน Receiver มีขนาด 30×30 cm จากการทดลองจึงรู้ว่าแสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อนสู่ Receiver จะออกขอบเขตจากจุดศูนย์กลางในเวลา 12 นาที จึงเขียนโปรแกรมให้ทำการค้นหาตำแหน่งแสงอาทิตย์และสั่งให้สเต็ปมอเตอร์หมุนทุกๆ 12 นาที ดังนั้นใน 1 ชั่วโมง สเต็ปมอเตอร์จะหมุนเพียง 5 ครั้ง แต่การทดลองแต่ละครั้งจะทดลองได้ไม่เกิน 1.30 ชั่วโมง เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ กล้อง Webcam และ Stepping Motor Driver ร้อนเกินไป

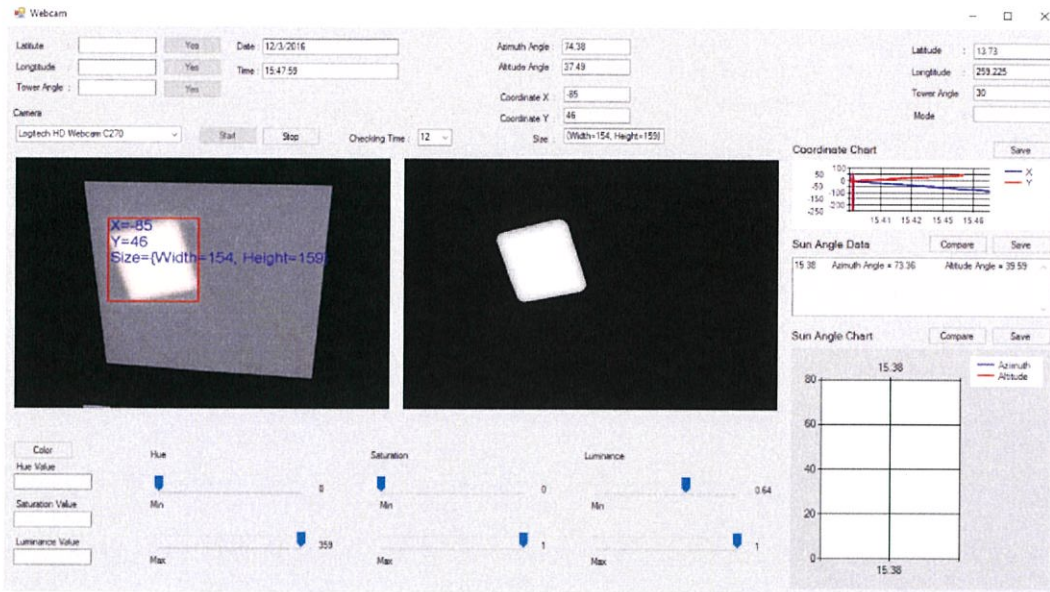


รูปที่ 4.1 ตัวจำลอง Receiver และ กล้อง Webcam

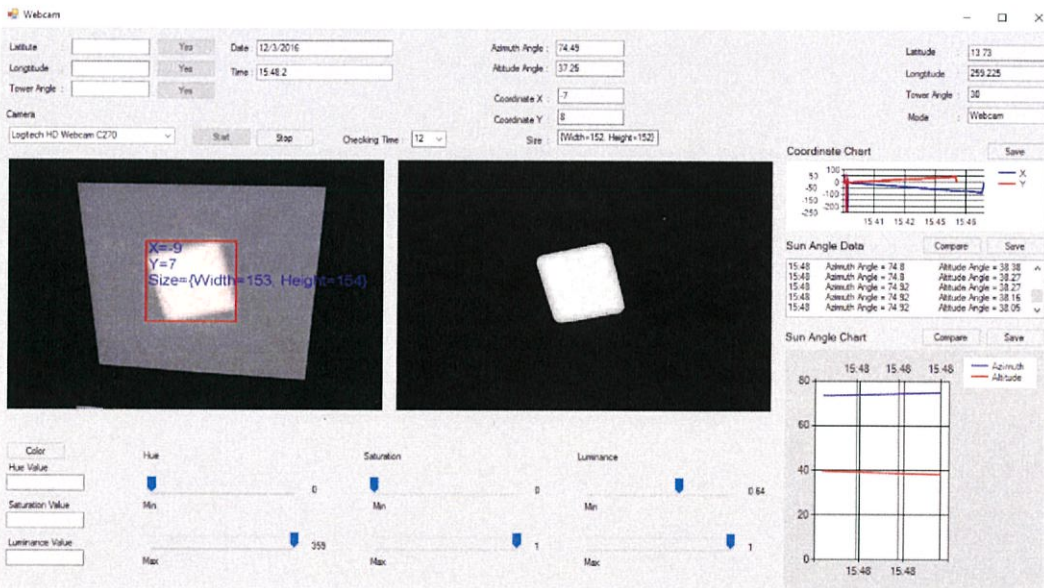


รูปที่ 4.2 ส่วนอุปกรณ์ Stepping motor driver, arduino, dc supply

4.1 การทดลองครั้งที่ 1 ณ วันที่ 12/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.38 – 16.36 น.



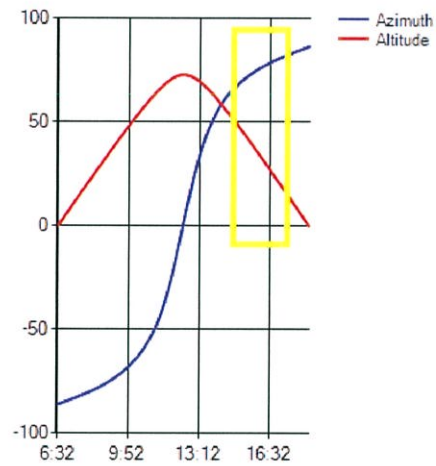
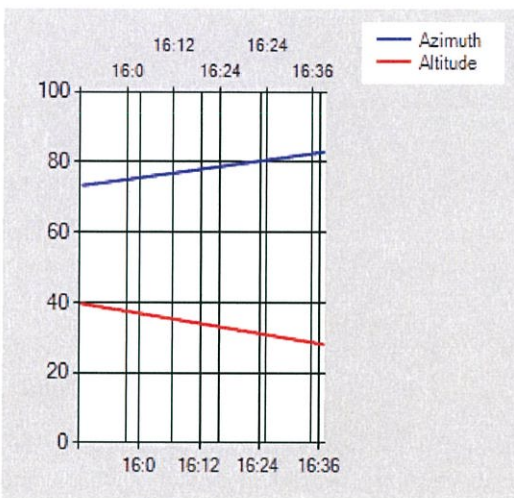
รูปที่ 4.3 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 15.47 น.



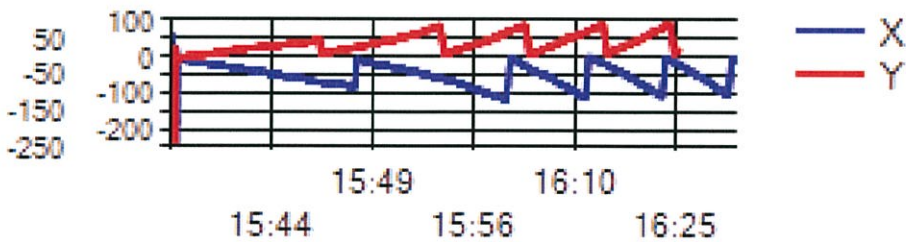
รูปที่ 4.4 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 15.48 น.

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง ณ วันที่ 12/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.38 – 16.36 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
15.38	72.4	36.18	73.36	39.59
15.48	74.92	38.16	74.49	37.25
16.00	76.84	35.63	75.74	34.44
16.12	78.76	33.32	76.9	31.6
16.24	80.92	30.79	77.98	28.76
16.36	82.96	28.15	79	25.9

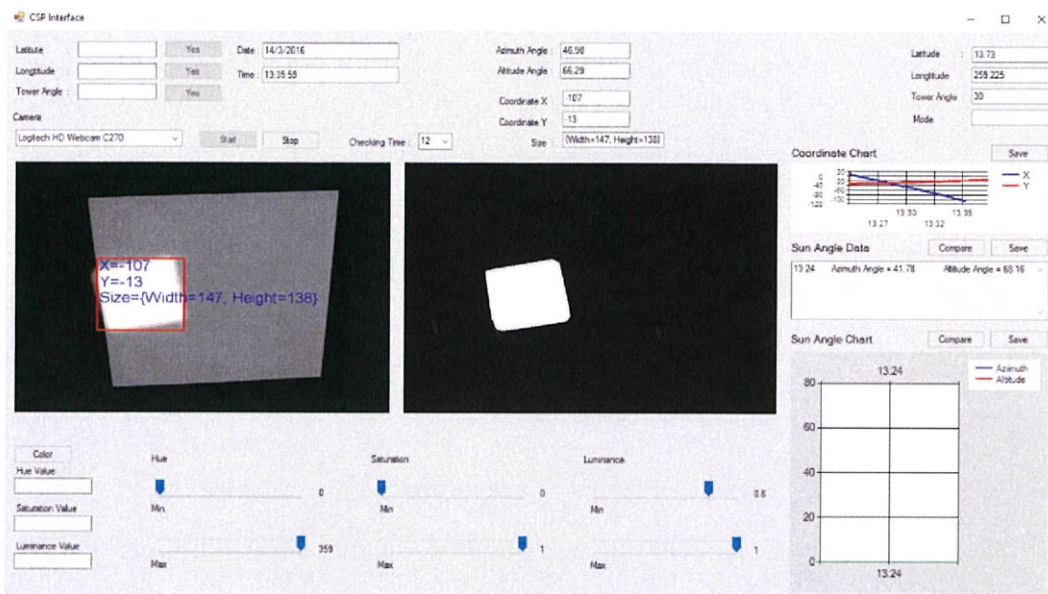


รูปที่ 4.5 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 15.38 – 16.36 น.

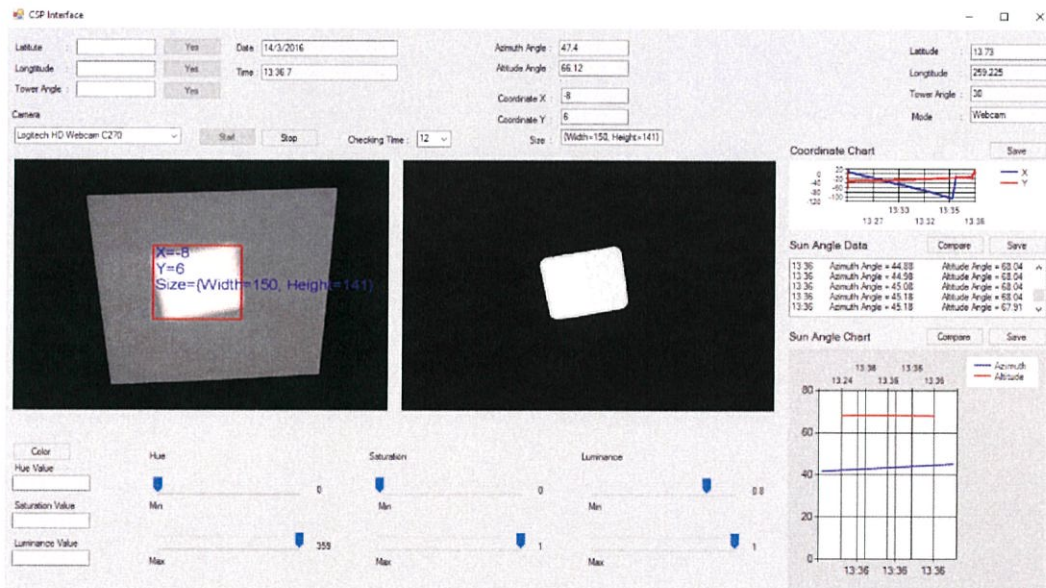


รูปที่ 4.6 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 15.38 – 16.36 น.

4.2 การทดลองครั้งที่ 2 ณ วันที่ 14/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.24 – 14.24 น.



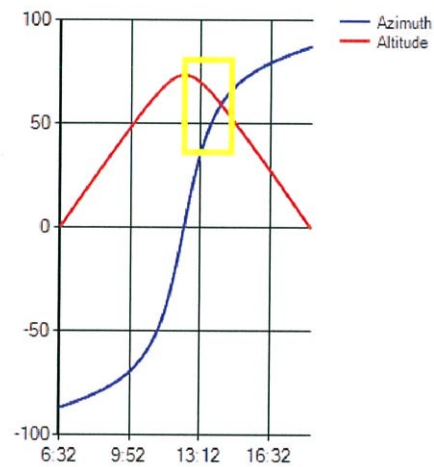
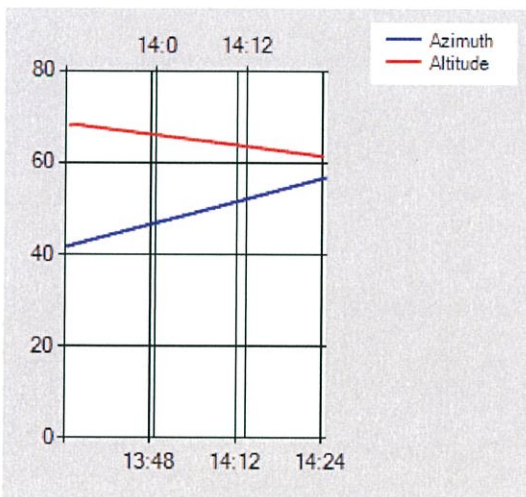
รูปที่ 4.7 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.35 น.



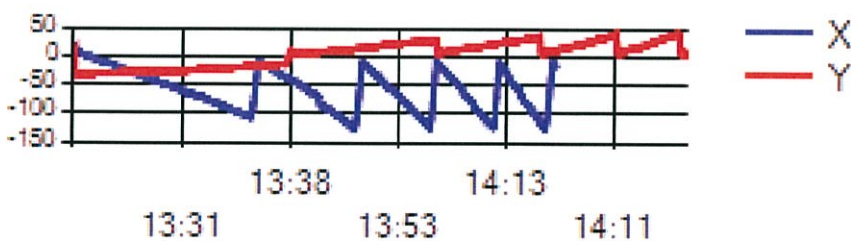
รูปที่ 4.8 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.36 น.

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลอง ณ วันที่ 14/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.24 - 14.24 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
13.24	42.54	65.93	41.78	68.16
13.36	45.18	67.91	47.4	68.16
13.48	48.38	66.54	52.15	63.89
14.00	51.18	64.91	56.17	61.53
14.12	53.68	63.28	59.6	59.06
14.24	56.18	61.78	62.55	56.51

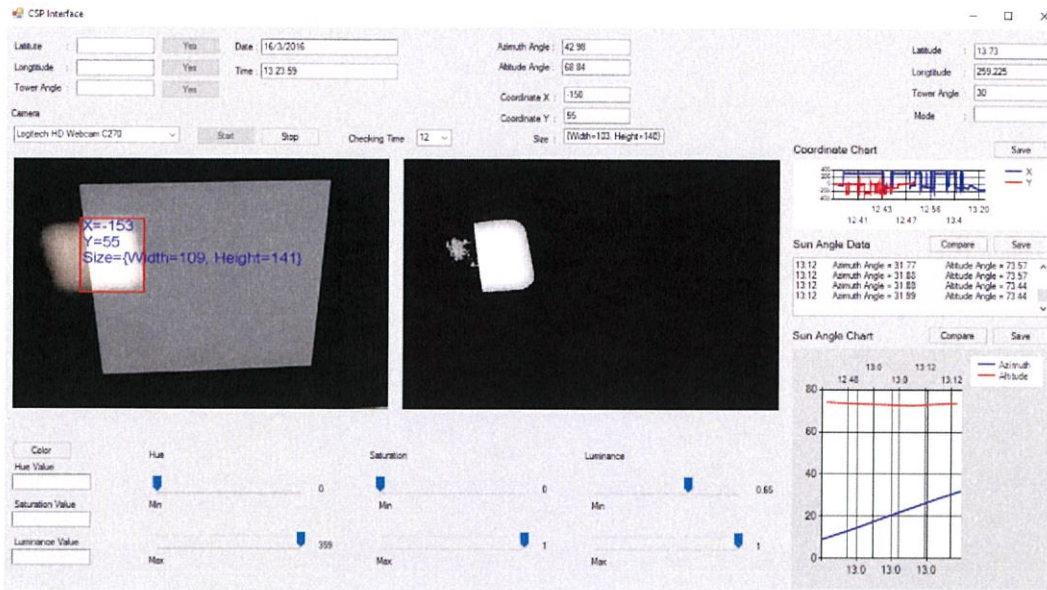


รูปที่ 4.9 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 13.24 - 14.24 น.

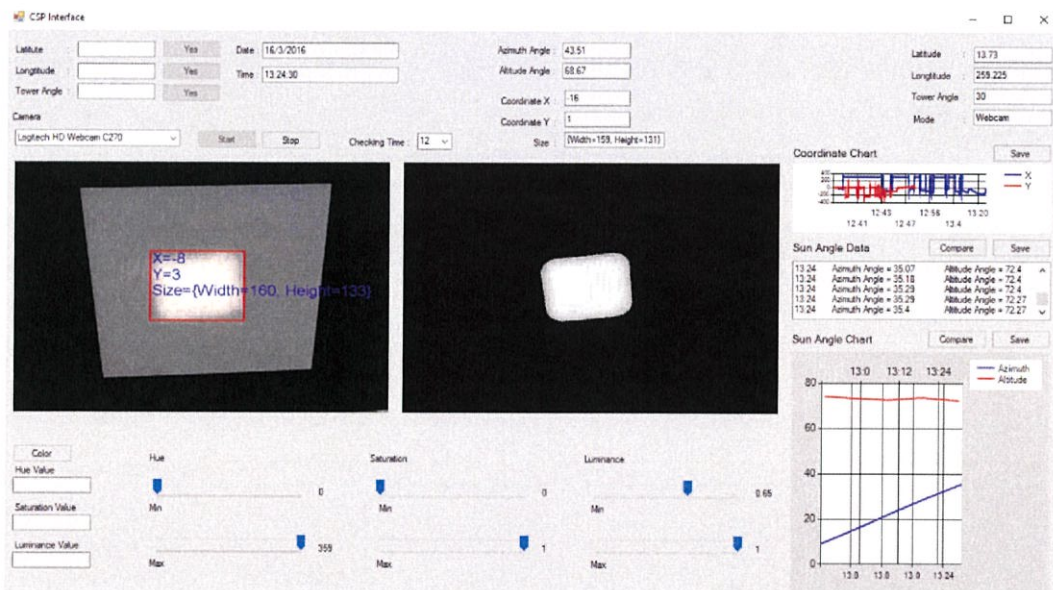


รูปที่ 4.10 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 13.24 - 14.24 น.

4.3 การทดลองครั้งที่ 3 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 12.36 – 13.36 น.



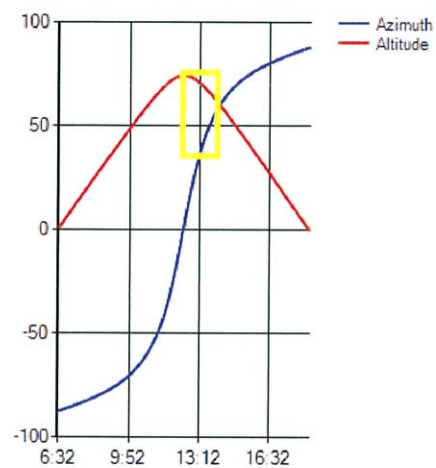
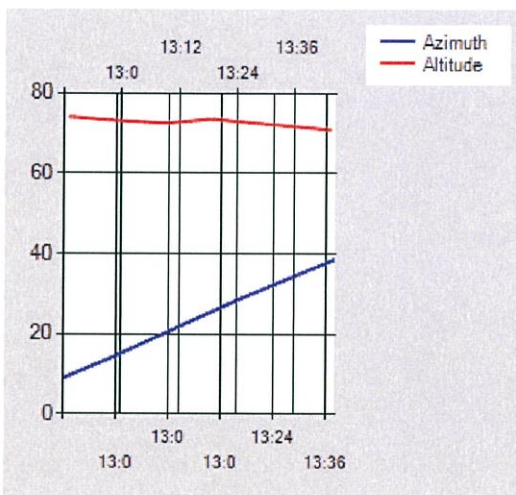
รูปที่ 4.11 แสดงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.23 น.



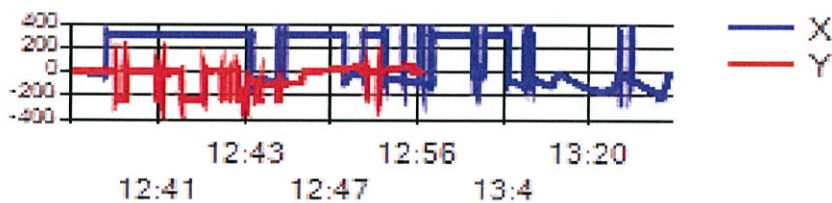
รูปที่ 4.12 แสดงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 13.24 น.

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลอง ณ วันที่ 14/3/59 ตั้งแต่เวลา 12.36 – 13.36 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
12.36	8.07	75.06	9.14	74.06
12.48	12.99	73.41	19.58	73.33
13.00	28.47	72.53	28.8	72.14
13.12	31.99	73.44	36.81	70.55
13.24	35.4	72.27	43.51	68.67
13.36	38.7	70.84	49.11	66.56



รูปที่ 4.13 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 12.36 – 13.36 น.

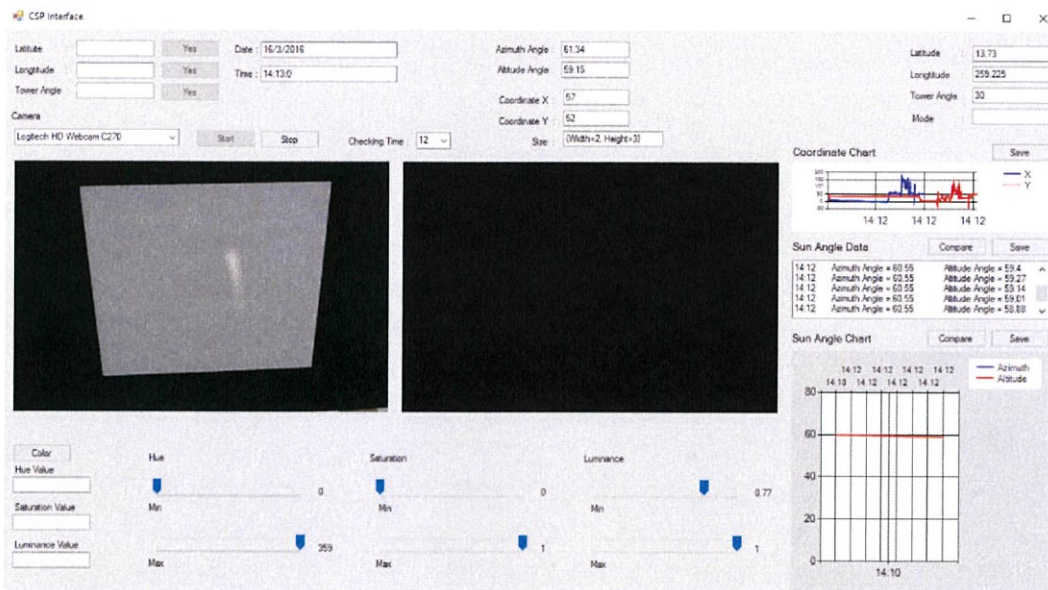


รูปที่ 4.14 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 12.36 – 13.36 น. *

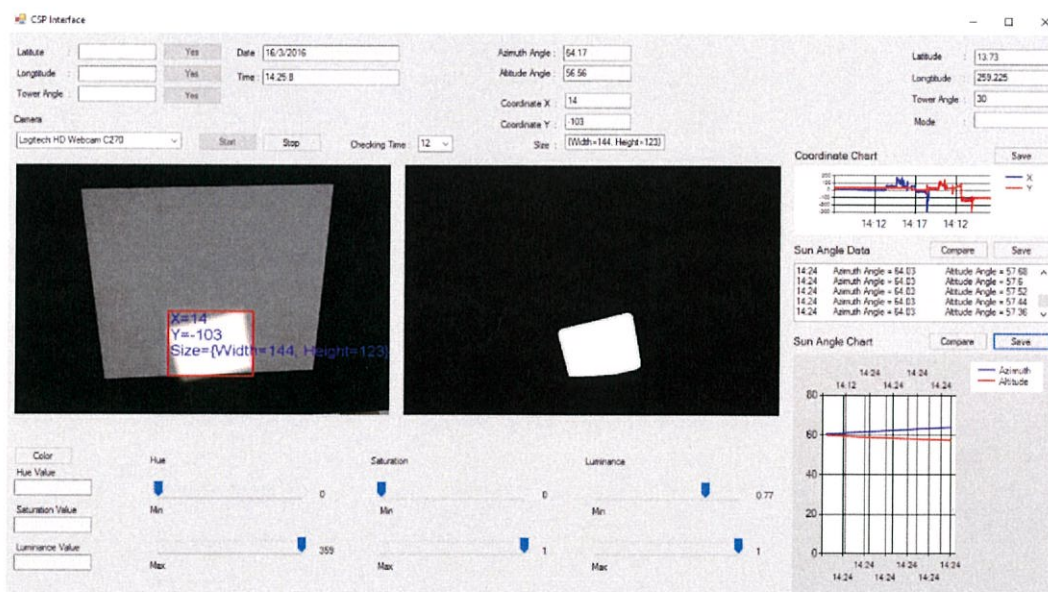
* กราฟตำแหน่งดวงอาทิตย์เป็นดังรูปที่ 4.14 เนื่องมาจากระหว่างการทดลองมีเมฆมาบดบังเป็นระยะๆ และที่ X ยาวมากกว่า Y เนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ในแนวระนาบเร็วกว่าแนวความสูง

4.4 การทดลองครั้งที่ 4 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.12 – 14.24 น.

การทดลองครั้งนี้เป็นการจำลองเมฆบดบังโดยใช้กระดาษมาปิดที่กระจกสะท้อนและทิ้งไว้ 12 นาที



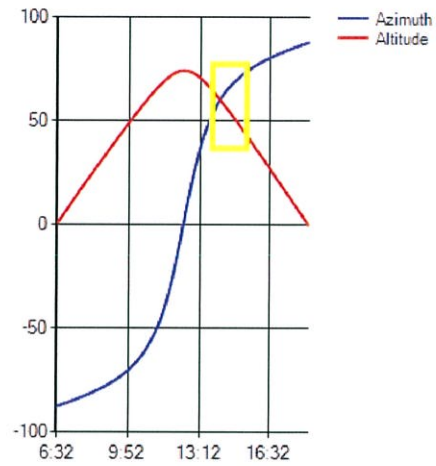
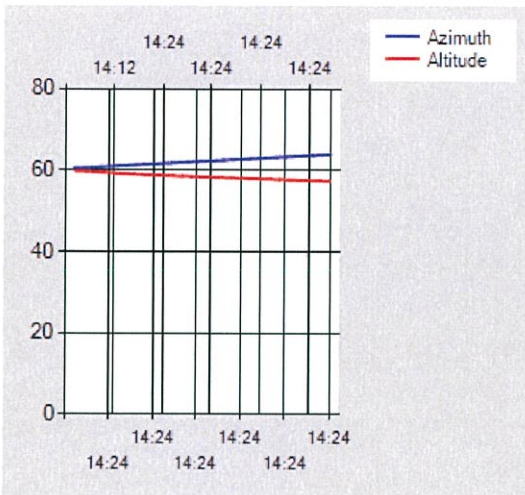
รูปที่ 4.15 เอกากระดาษปิดกระจกสะท้อน ณ เวลา 14.13 น.



รูปที่ 4.16 เอกากระดาษออก ณ เวลา 14.25 น.

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลอง ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.12 - 14.24 น.

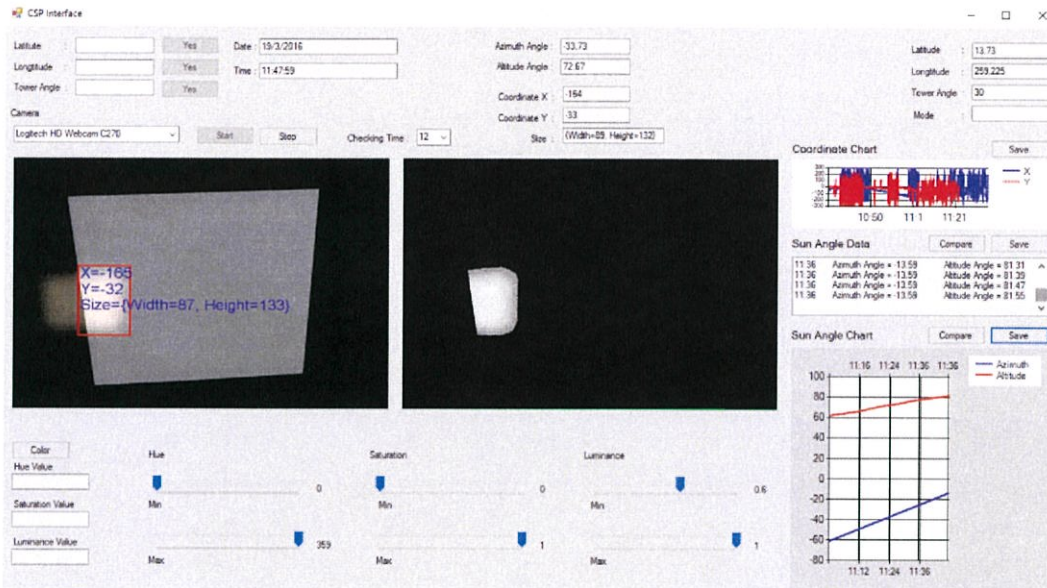
Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
14.12	58.03	58.57	61.08	59.36
14.24	64.03	57.36	63.95	56.78



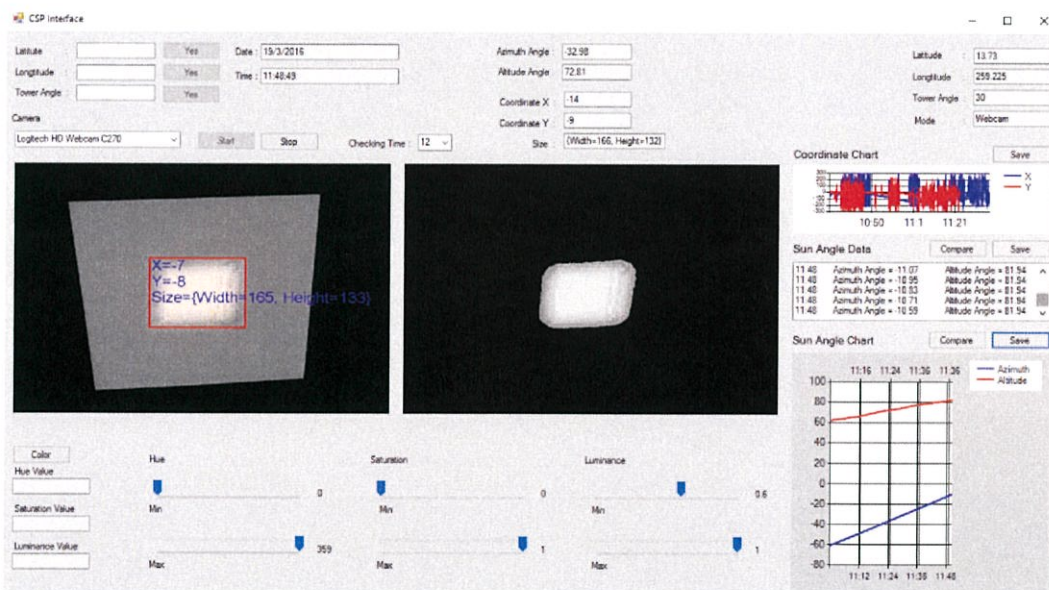
รูปที่ 4.17 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 14.12 - 14.24 น.

4.5 การทดลองครั้งที่ 5 ณ วันที่ 19/3/59 ตั้งแต่เวลา 10.48 – 11.48 น.

เนื่องจากวันที่ทำการทดลองมีเมฆมากทำให้ได้ทดลองสมการดวงอาทิตย์ในระบบสะท้อนแสง

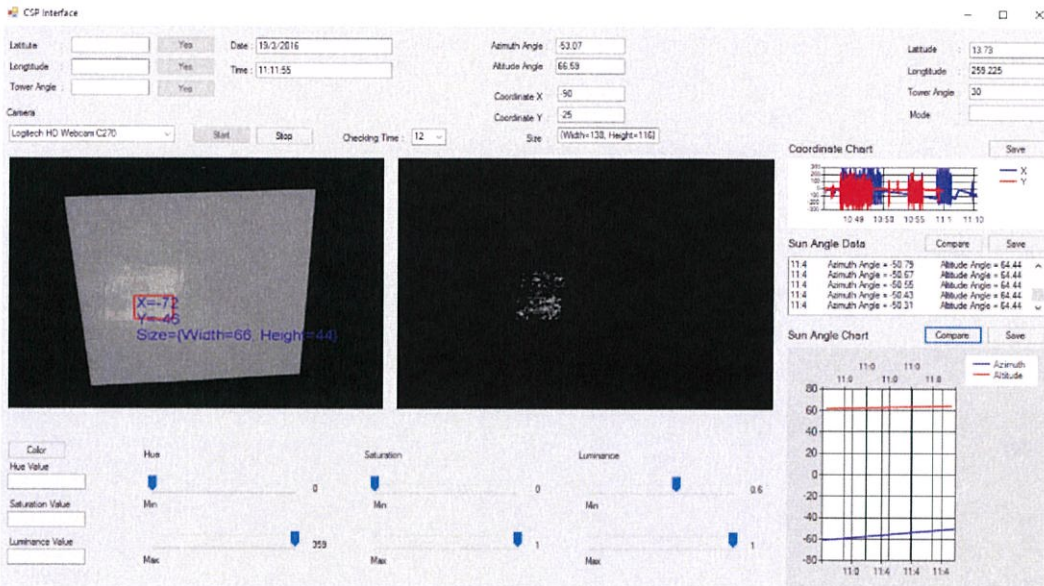


รูปที่ 4.18 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.47 น.



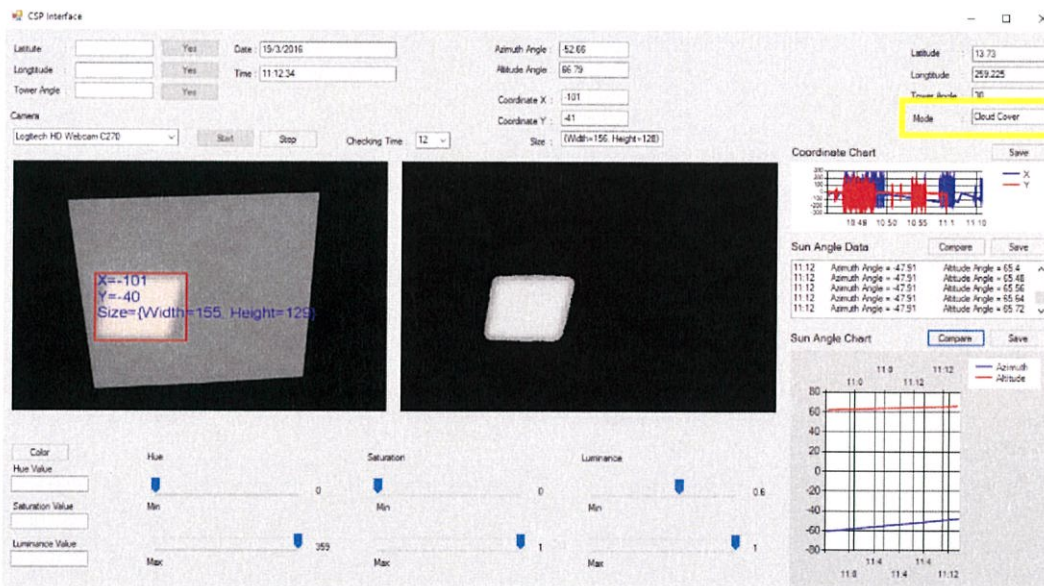
รูปที่ 4.19 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.48 น.

ระหว่างที่ทำการทดลอง ณ เวลา 11.11 น. ซึ่งทำให้กล้องเว็บแคมไม่สามารถจับภาพแสงอาทิตย์ได้ จึงทำการเปลี่ยนรูปแบบการทำงานไปใช้สมการดวงอาทิตย์เพื่อทำการสะท้อนแสงจะเห็นได้จากรูปที่ 4.20 แสงเริ่มจางหายไป



รูปที่ 4.20 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.11 น.

เมื่อเวลาผ่านไปอีก 1.34 นาทีเมฆเคลื่อนตัวออกจากตัวสะท้อนและแสงก็ปรากฏขึ้น ดังรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าแม้แสงจะไม่สะท้อนสู่ตรงกลาง แต่แสงที่มาจากสะท้อนยังคงอยู่ในตัว Receiver และที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากสมการดวงอาทิตย์ที่อาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง

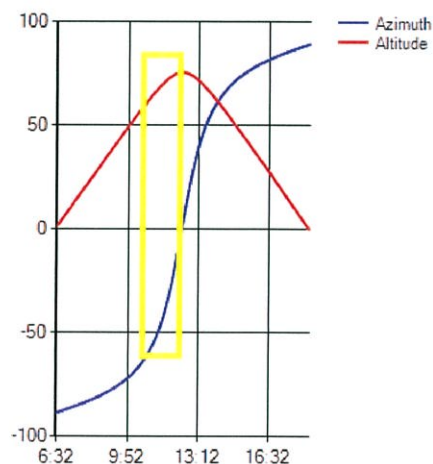
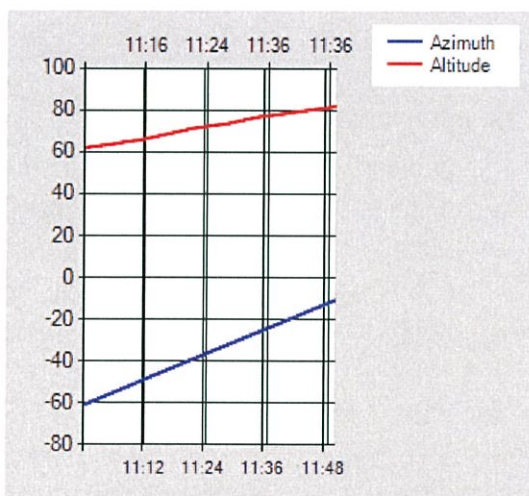


รูปที่ 4.21 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 11.12 น.

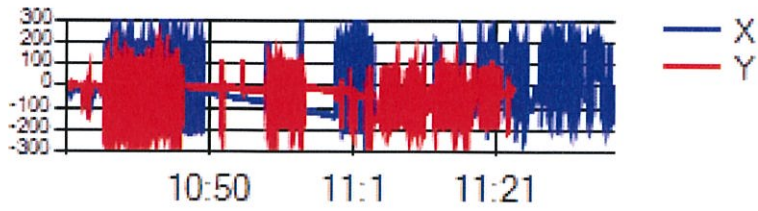
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลอง ณ วันที่ 19/3/59 ตั้งแต่เวลา 10.48 – 11.48 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
10.48	-61.11	62.71	-60.75	61.91
11.00	-57.03	63.92	-57.08	64.4
11.04 *	-50.31	-64.44	-55.69	65.21
11.12	-47.91	65.72	52.66	66.79
11.16 *	-43.35	66.58	-51	67.55
11.24	-30.15	73.47	-47.34	69.02
11.28 *	-27.39	76.54	-45.3	69.73
11.36	-13.59	81.55	-40.86	71.05
11.48	-10.59	81.94	-32.98	72.81

* จะมีการสั่งให้ระบบสะท้อนทุก 4 นาที 3 ครั้ง และ 12 นาที เนื่องจากมีเมฆบังเกิดขึ้นทำแสงที่ตกกระทบจากการใช้สมการดวงอาทิตย์ไม่ตรงอยู่ตรงกลาง Receiver ทำให้ถ้ารอ 12 นาที ต่อไปจะทำให้แสงหลุดกรอบได้ จึงปรับให้โปรแกรมทำงานก่อนหน้านั้น สามารถปรับได้ที่หน้า Interface ของโปรแกรม



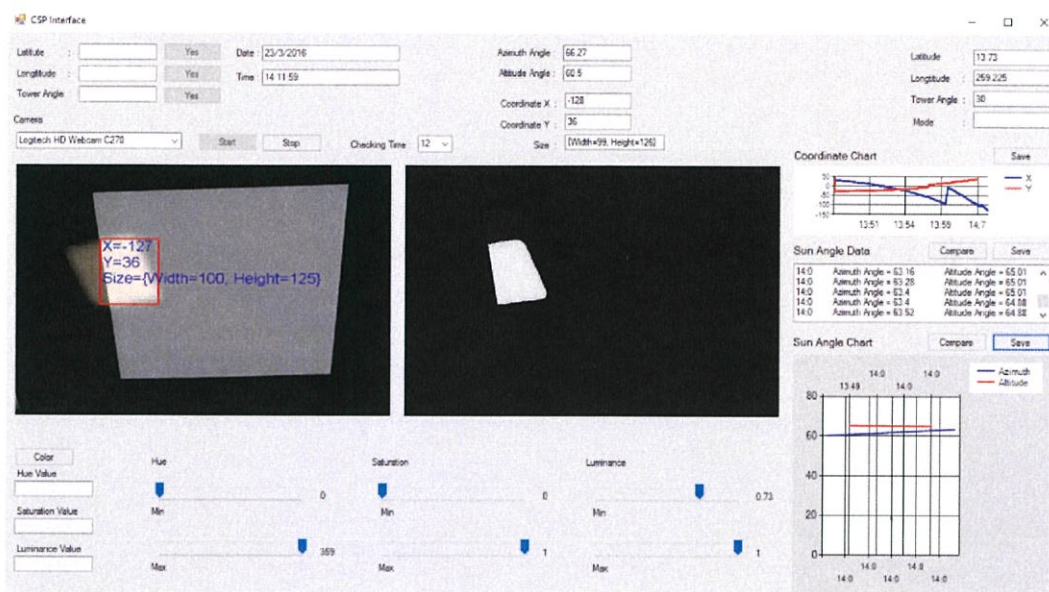
รูปที่ 4.22 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 10.48 – 11.48 น.



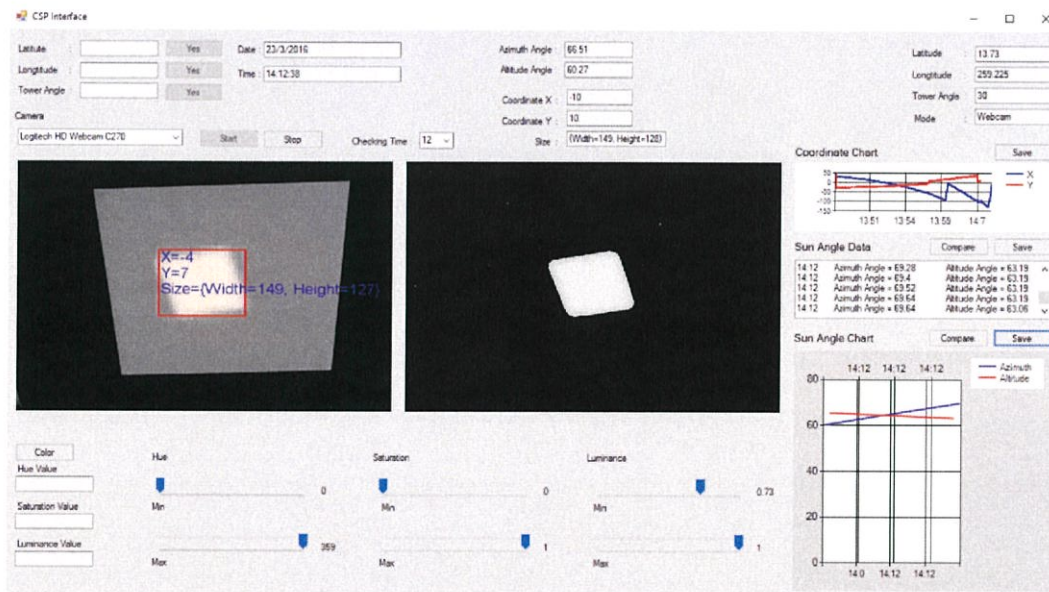
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 12.36 – 13.36 น. **

** ที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เป็นอย่างนี้เนื่องจากเมฆมาบังดวงอาทิตย์ทำให้กล้องเว็บแคมไม่สามารถจับภาพแสงอาทิตย์แบบเต็มได้ แต่กล้องเว็บแคมจะเห็นแสงสีขาวเล็กๆอื่นกระจายทั่วตัว Receiver ตำแหน่งแสงอาทิตย์ที่กล้องเว็บแคมจับได้จึงเป็นไปดังรูปที่ 4.23

4.6 การทดลองครั้งที่ 6 ณ วันที่ 23/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.48 – 15.00 น.



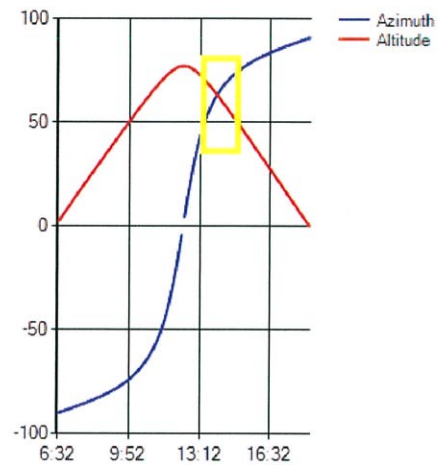
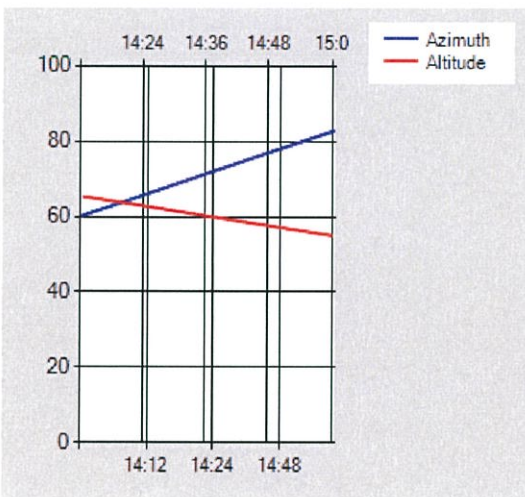
รูปที่ 4.24 แสดงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.11 น



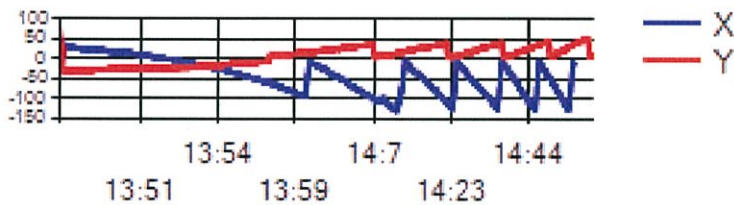
รูปที่ 4.25 แสดงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.12 น.

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลอง ณ วันที่ 23/3/59 ตั้งแต่เวลา 13.48 – 15.00 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
13.49	58.6	63.67	59.95	65.48
14.00	63.52	64.88	63.51	62.92
14.12	69.64	63.06	66.51	60.27
14.24	73.36	61.24	69.04	57.58
14.36	76.6	59.29	71.23	54.84
14.48	79.48	57.21	73.15	52.06
15.00	82.84	55	74.84	49.26

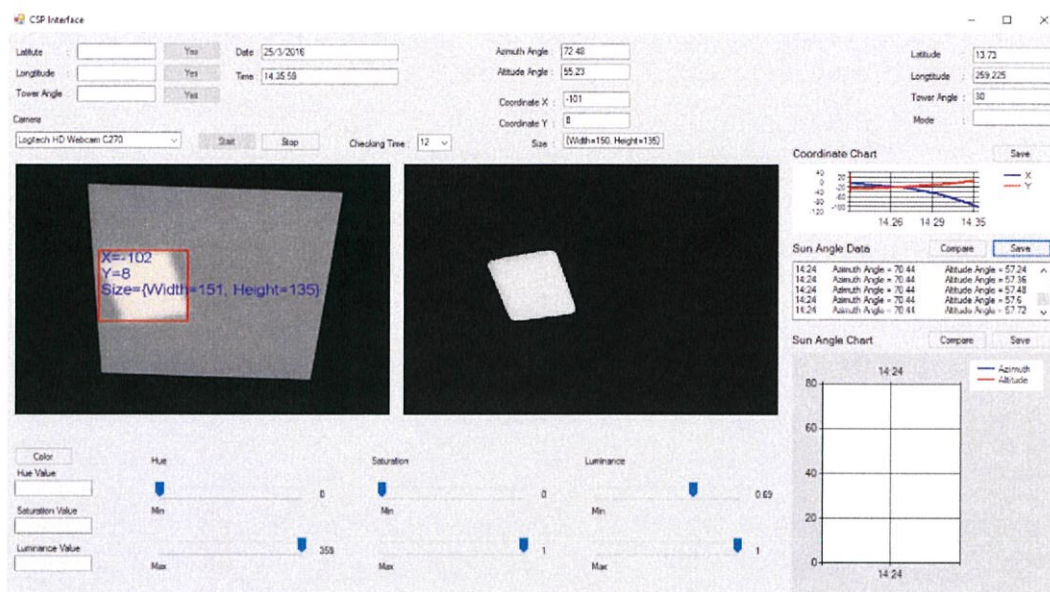


รูปที่ 4.26 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 13.48 – 15.00 น.

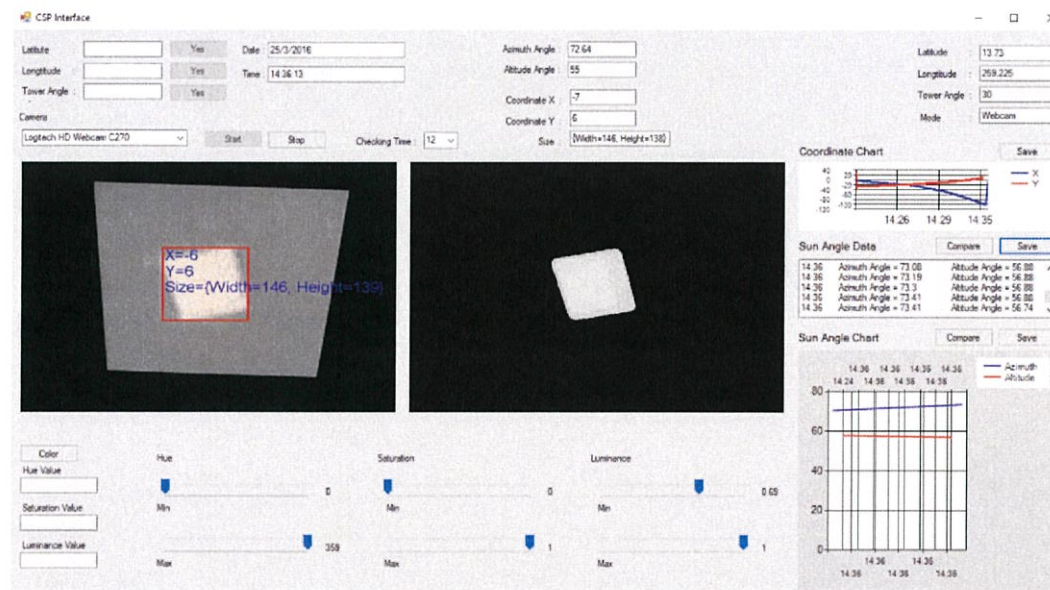


รูปที่ 4.27 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 13.48 – 15.00 น.

4.7 การทดลองครั้งที่ 7 ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.24 – 15.24 น.



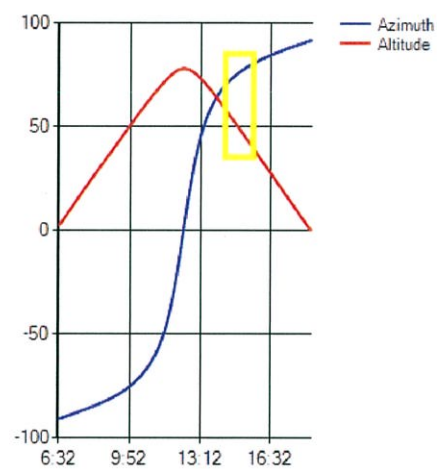
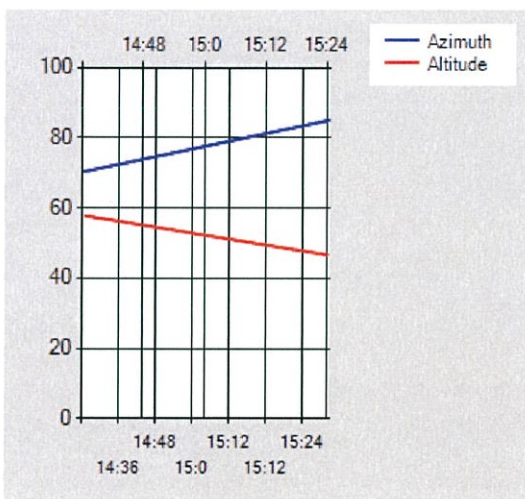
รูปที่ 4.28 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.35 น.



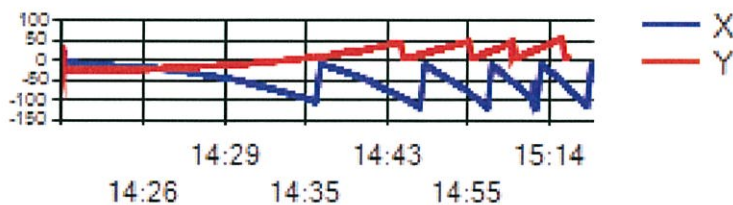
รูปที่ 4.29 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.36 น.

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลอง ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.24 – 15.24 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
14.24	70.44	57.72	70.55	57.76
14.36	73.41	56.74	72.64	55
14.48	76.27	54.36	74.47	52.2
15.00	78.8	51.98	76.06	49.38
15.12	81.88	49.46	77.54	46.55
15.24	85.07	46.66	78.85	43.69



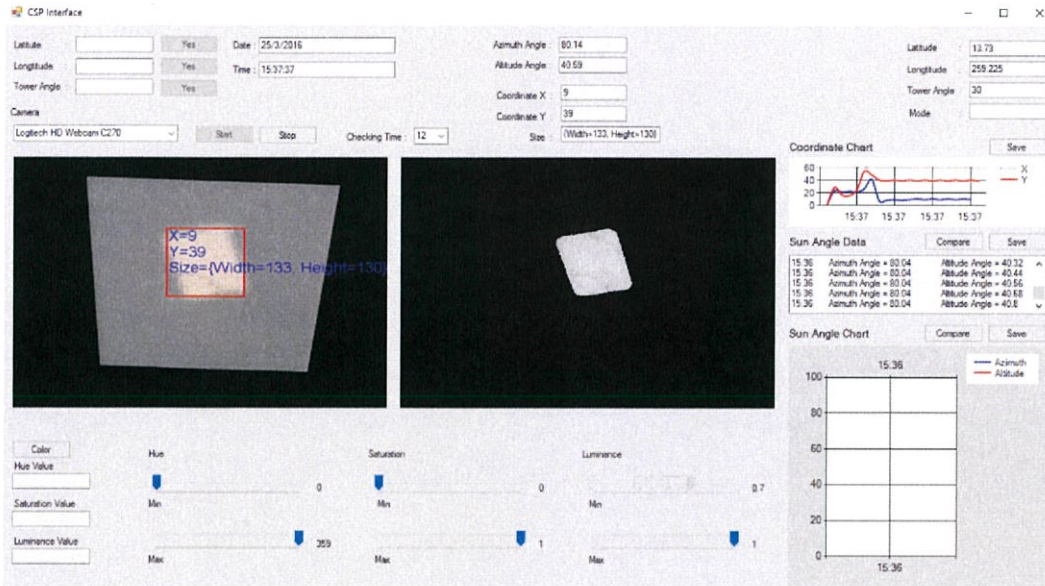
รูปที่ 4.30 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 14.24 – 15.24 น.



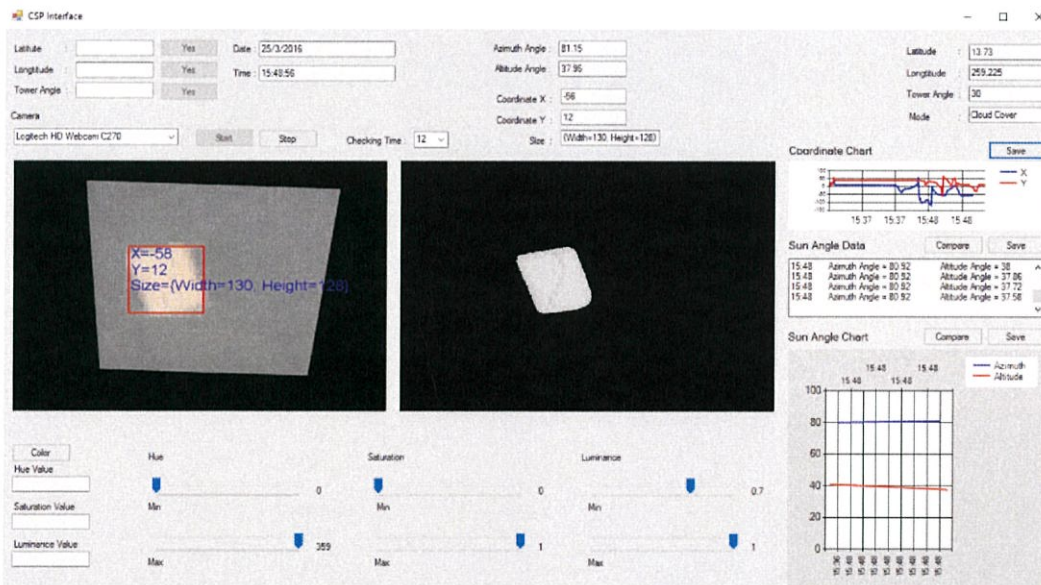
รูปที่ 4.31 ตำแหน่งแสงอาทิตย์ ณ เวลา 14.24 – 15.24 น.

4.8 การทดลองครั้งที่ 8 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.36 – 16.00 น.

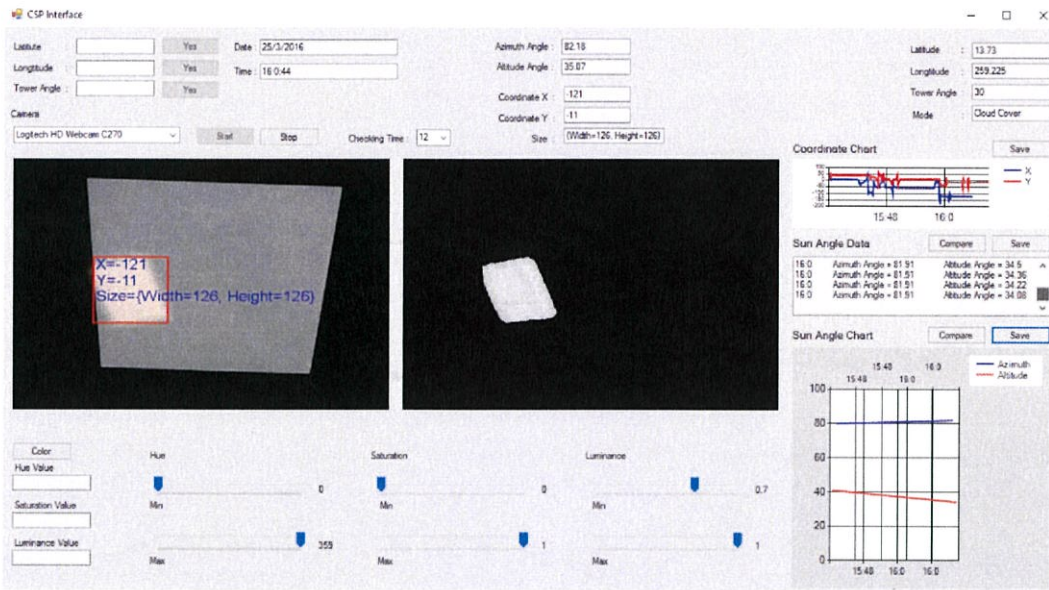
การทดลองครั้งนี้เป็นการจำลองเมฆบดบังโดยใช้กระดาษมาปิดที่กระจกสะท้อนและทิ้งไว้ 24 นาที



รูปที่ 4.32 เอกกระดาษปิดกระจกสะท้อน ณ เวลา 15.37 น.



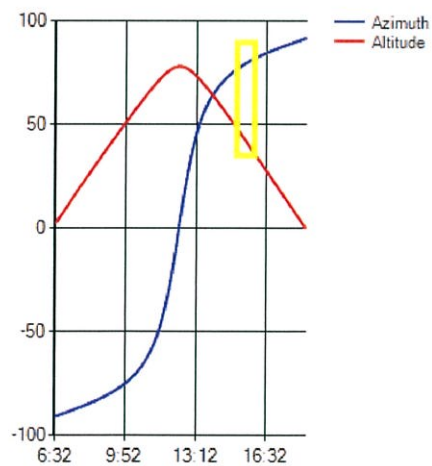
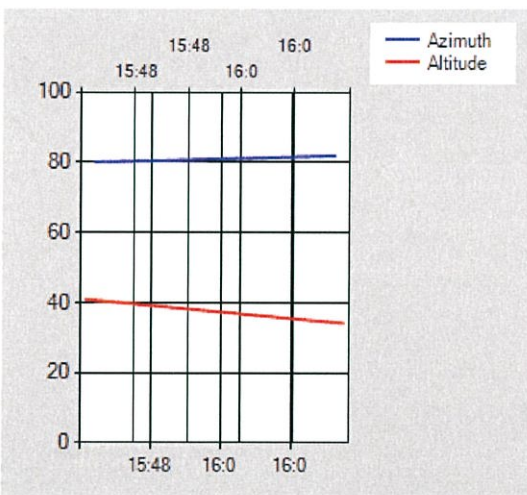
รูปที่ 4.33 เอกกระดาษออกเมื่อเวลาผ่านไปอีก 12 นาที ณ เวลา 15.48 น.



รูปที่ 4.34 เอกระดาออกเมื่อเวลาผ่านไปอีก 12 นาที ณ เวลา 16.00 น.

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลอง ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.36 – 16.00 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
15.36	80.04	40.8	80.05	40.83
15.48	80.92	37.58	81.15	37.95
16.00	81.91	34.08	82.18	35.07



รูปที่ 4.35 กราฟที่ได้จากโปรแกรมโดย ภาพซ้าย จากการทดลองและ ภาพขวา จากการคำนวณ ณ เวลา 15.36 – 16.00 น.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง โดยระบบสะท้อนแสงดวงอาทิตย์มี 2 รูปแบบการทำงาน คือ รูปแบบการทำงานที่หนึ่ง คือ รูปแบบการทำงานระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ด้วยใช้กล้องเว็บแคมจับภาพแสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อนสู่หอคอยรับแสงจำลอง แล้วจากนั้นก็นำภาพที่กล้องเว็บแคมรับได้ไปประมวลผลโดยการแปลงเป็นภาพขาวดำด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio เพื่อประมวลหาตำแหน่งแสงอาทิตย์ที่ปรากฏบนจอแสดงผลแล้วส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ เพื่อสั่งให้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนปรับแสงอาทิตย์ให้สะท้อนสู่จุดศูนย์กลางของหอคอยรับแสง รูปแบบการทำงานที่สองคือ รูปแบบการทำงานระบบสะท้อนแสงอาทิตย์จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยในรูปแบบการทำงานนี้ทำงานก็ต่อเมื่อ กล้องเว็บแคมไม่สามารถรับภาพแสงอาทิตย์ได้ เช่น เมฆบดบัง เป็นต้น รูปแบบการทำงานนี้เขียนมาเพื่อช่วยการทำงานของรูปแบบการทำงานที่หนึ่ง กรณีที่เมฆบดบังเป็นเวลานานอาจทำให้แสงอาทิตย์หลุดออกนอกกรอบของกล้องเว็บแคมที่จะมองเห็นจึงต้องใช้รูปแบบการทำงานการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์ กระบวนการทำงานของรูปแบบการทำงานนี้ คือ เมื่อโปรแกรม Microsoft Visual Studio ไม่สามารถรับภาพแสงอาทิตย์จากกล้องเว็บแคมได้ก็จะทำการเปลี่ยนรูปแบบการทำงานการทำงานสู่รูปแบบการทำงานการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยอัตโนมัติ จะได้ Azimuth angle และ Altitude angle ณ เวลานั้น แล้วนำค่ามุมสองมุมนี้ไปหามุมตกสะท้อนและทำการส่งค่าให้ตัวไมโครคอนโทรเลอร์ เพื่อสั่งให้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนตัวสะท้อนให้แสงอาทิตย์ตกสะท้อนสู่หอคอยรับแสงที่ได้จำลองขึ้น โดยทั้ง 2 รูปแบบการทำงานนี้มีวัตถุประสงค์คือ ต้องการระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับ Heliostat ใน Concentrating solar thermal power plant ให้สามารถสะท้อนแสงอาทิตย์สู่หอคอยรับแสงได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งวันเพื่อให้การผลิตพลังงานไฟฟ้ามีความมั่นคง

ก่อนจะทำการทดลองจริงได้มีการทดสอบการทำงานของโปรแกรม โดยใช้โปรแกรม Virtual Serial Port Driver และ Hyperterminals เพื่อทดสอบค่าที่ส่งออกไปให้ไมโครคอนโทรเลอร์ว่าเป็นไปตามที่ได้เขียนโปรแกรมไว้โดยได้แบ่งโซนตำแหน่งแสงที่ปรากฏดังนี้

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $X > 10$ และ $-10 < Y < 10$ จะส่งค่า a ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $X < -10$ และ $-10 < Y < 10$ จะส่งค่า b ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $-10 < X < 10$ และ $Y > 10$ จะส่งค่า c ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $-10 < X < 10$ และ $Y < -10$ จะส่งค่า d ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $X > 10$ และ $Y > 10$ จะส่งค่า a และ c ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $X < -10$ และ $Y > 10$ จะส่งค่า b และ c ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $X > 10$ และ $Y < -10$ จะส่งค่า a และ d ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ถ้าแสงที่พบอยู่ในตำแหน่ง $X < -10$ และ $Y < -10$ จะส่งค่า b และ d ให้ไมโครคอนโทรเลอร์

ค่า a, b, c, d แสดงถึงการหมุนของสเต็ปป์มอเตอร์ 1 สเต็ป โปรแกรม Visual Studio จะส่งค่าไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เรื่อยๆจนกว่าแสงที่มาจากกระทบบจะเข้ากรอบที่ยอมรับ

การทดลองในสถานการณ์จริงได้ทำการทดลอง ณ ตึก ECC ชั้นดาดฟ้า โดยการทดลองแต่ละครั้งจะทำการได้ลองไม่เกินครั้งละ 1.30 ชั่วโมง เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนอาจจะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องเว็บแคม และ Stepping motor driver ร้อนเกินไป การทดลองจะให้โปรแกรม Visual Studio คำนวณหาตำแหน่งและส่งค่าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกๆ 12 นาที เนื่องจากทุกๆ 12 นาที แสงอาทิตย์ที่มาจากกระทบบ Receiver จะออกนอกกรอบ

จากการทดลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง โดยการทดลองเราได้ทำการทดลองการทำงานระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบการทำงานด้วยกัน คือ เมื่อเริ่มโปรแกรม Visual Studio จะให้โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์และความสูงของของตัว Receiver เพื่อสั่งให้สเต็ปป์มอเตอร์หมุนเพื่อสะท้อนแสงให้ตกกระทบบสู่ Receiver ณ เวลานั้น หลังจากที่แสงตกกระทบบ Receiver โปรแกรมจะเข้าสู่รูปแบบการทำงานการทำงานโดยใช้กล้องเว็บแคมตรวจหาตำแหน่งแสงอาทิตย์ที่มาจากกระทบบทุกๆ 12 นาที แล้วส่งค่า a, b, c, d ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้สเต็ปป์มอเตอร์ให้หมุนไปเรื่อยๆจนแสงที่มาจากกระทบบเข้าสู่ขอบเขตที่ยอมรับได้คือ $-10 < X < 10$ และ $-10 < Y < 10$ ในกรณีที่กล้องไม่สามารถตรวจจับแสงอาทิตย์ได้ โปรแกรมจะเข้าสู่รูปแบบการทำงานการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบสะท้อนแสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลการทดลอง ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ ระบบสะท้อนที่ใช้กล้องเว็บแคมในการสะท้อนสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ส่วนระบบสะท้อนที่ใช้สมการดวงอาทิตย์ในการคำนวณไม่สามารถสะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่ตรงกลาง Receiver ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่แสงอาทิตย์ที่สะท้อนก็ยังอยู่ในบริเวณของตัว Receiver ซึ่งสรุปได้ว่าระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

1. สเต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้มีการหมุนเป็นสเต็ป ครั้งละ 1.8 องศา องศา ซึ่งเป็นค่าที่หยวบจึงอาจใช้ stepper motor ที่มีค่าองศาต่อสเต็ปที่ละเอียดมากขึ้น
2. สมการดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้คำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์มีความไม่แม่นยำ คลาดเคลื่อนจากค่าจริงเล็กน้อยทำให้การสะท้อนแสงอาทิตย์มีความไม่แม่นยำ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสมการดวงอาทิตย์ที่ใช้จริงในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเป็นความลับทางการค้า ต้องหาสมการที่มีความถูกต้องมากกว่าที่นำมาใช้ในโครงการนี้
3. สถานที่ที่ทำการทดลองเป็นชั้นดาดฟ้าซึ่งมีระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางอาจจะมีผลต่อสมการดวงอาทิตย์ที่ใช้เนื่องจากในสมการดวงอาทิตย์ไม่มีตัวแปรของความสูง

4. พิกัด Latitude และ Longitude ของตัวสะท้อนแสงที่ใช้ทดลองเป็นเพียงค่าคร่าวๆจึงทำให้การคำนวณมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ส่วนตัว Heliostat แต่ละตัวในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงจะมี GPS หาค่าตำแหน่งพิกัดที่แม่นยำ

5. เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนมากทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องเว็บแคม และ Stepping motor driver มีความร้อนเกินไป ทำให้การทำงานอาจความคลาดเคลื่อนและไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงติดพัดลมเป่า Stepping motor driver และทำโครงสร้างบังแสงอาทิตย์ให้ทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ และ DC Supply ปรับปรุงหรือเพิ่มวิธีการระบายความร้อนในคอมพิวเตอร์ควมคุมและกล้องเว็บแคม

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

1. เปลี่ยนไปใช้การขับแบบ half-step หรือ micro-step ในกรณีใช้ stepping motor ตัวเดิม หรือใช้ระบบ DC servo หรือ AC servo เป็นระบบที่ใช้จริง เนื่องจากมี Encoder ที่สามารถทราบตำแหน่งของการหมุนทำให้มีความแม่นยำที่มากขึ้น แต่มีราคาแพง
2. ใช้สมการดวงอาทิตย์มีความแม่นยำที่มากกว่าสมการที่ใช้ในโครงการนี้
3. เขียนโปรแกรมหาพิกัดตำแหน่งตัวสะท้อนแบบอัตโนมัติเพิ่มเติมเข้าไปในโปรแกรมควบคุมหลัก เพื่อความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น
4. ทำโครงสร้างเก็บอุปกรณ์ต่างๆให้ระบายความร้อนได้มากขึ้นเพื่อที่จะสามารถเก็บข้อมูลได้ยาวนานมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภชัย สมพานิช, **คู่มือการเขียนโปรแกรมและใช้งาน Visual C# .NET**, ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, บริษัท ด้านสุทธาการพิมพ์, 2546. (12 กันยายน 2558)
- [2] ธนาธิป เพียรประสิทธิ์และคณะ, “การจำลองระบบติดตามดวงอาทิตย์ Machine Vision System,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556. (12 กันยายน 2558)
- [3] ธเนศ ต้นรุ่งโรจน์และคณะ, “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบผสมผสานการใช้ระบบวิทัศน์อัตโนมัติและแบบไร้อุปกรณ์ตรวจจับ,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555. (22 กันยายน 2558)
- [4] มนุศักดิ์ งานทองและคณะ, **ตัวต้นแบบระบบสะท้อนแสงอาทิตย์สำหรับระบบตัวรับรังสีรวมกลาง**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://www.repository.rmutt.ac.th/bitstream/handle/123456789/663/Sun%20Reflecting%20System%20Prototype...pdf?sequence=3> (22 กันยายน 2558)
- [5] Reston Condit, **Stepping Motors Fundamentals**, Available at:
www.t-es-t.hu/download/microchip/an907a.pdf. (22 September 2558)
- [6] K. E. Holbert, **Solar Calculations**, Available at:
<http://holbert.faculty.asu.edu/eee463/SolarCalcs.pdf> (2 October 2558).
- [7] R.S. Baheti and P.F. Scott, “Design of Self-calibrating Controllers for Heliostats in a Solar Power Plant,” **IEEE Transaction on Automatic Control**, Vol. ac-25, No. 6, 1980, pp.1091-1097. (10 October 2015)
- [8] Daniel James Murray, “SMALL-SCALE SOLAR CENTRAL RECEIVER SYSTEM DESIGN AND ANALYSIS,” **Master Thesis**, Mechanical Engineering, California Polytechnic State University, 2012. (10 November 2015)
- [9] ศักดิ์สิทธิ์ บัวเงินและคณะ, **ระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://thestar.spu.ac.th/content/627/12724.php> (1 ธันวาคม 2558)
- [10] Google.org, **Heliostat Control and Targeting**, Available at:
https://www.google.org/pdfs/google_heliostat_control_and_targeting.pdf. (12 January 2016).
- [11] IREA, “RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES,” **Concentrating Solar Power**, Vo. 1, No.2, 2012, pp. 15-43. (12 January 2016)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

การจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง Simulation of Solar Tracking and Focusing with Planar Reflector

จารุเดช วรสิทธิ์, เจษฎา กรรณิกา, ชวนกร เชาวนันทกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ตลอดกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

Email: jurudate@gmail.com

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการจำลองของระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง จุดประสงค์ของการออกแบบระบบเพื่อที่จะนำไปใช้กับตัวฮีลิโอสแตตซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการผลิตไฟฟ้าโดยการรวมแสงอาทิตย์ ระบบประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นตัวยึดสองแกนลูกออกแบบให้ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยประมวลผลภาพแสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งและปรับตัวยึด ส่วนที่สองเป็นโปรแกรมปรับแก้สองแกนลูกออกแบบให้ประมวลผลและปรับตำแหน่งตัวยึดให้ตรงตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อกล้องไม่สามารถจับภาพแสงอาทิตย์ได้ ตัวยึดเคลื่อนที่สองแนว คือ มุมอัลติจูด และ มุมอะซิมูท ซึ่งทั้งสองตำแหน่งจะถูกวิเคราะห์และควบคุม โดยการประมวลผลภาพและไม่โครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของระบบจึงจัดการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยใช้ไฟฉาย ส่วนที่สองเป็นการทดลองกับสถานการณ์จริง จากการทดลองทั้งสองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ออกแบบสามารถติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

คำสำคัญ: การติดตามดวงอาทิตย์, มุมอัลติจูดและมุมอะซิมูท, การผลิตไฟฟ้าโดยการรวมแสงอาทิตย์, ฮีลิโอสแตต, การประมวลผลภาพ

ABSTRACT

This thesis proposes design and simulation of Solar Tracking and Focusing system with Planar Reflector. Purpose of the system design is to apply for lab-scale heliostat which is a part of concentrating solar power generation (CSP). The system comprises of two parts. The first part is dual-axis reflecting platform which has been designed to follow the sun movement

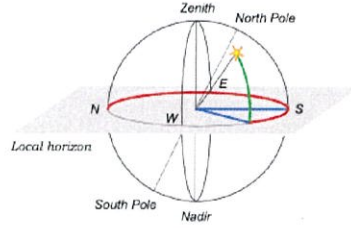
by processing the reflected image of the sun, analysis, and then positioning the platform. The second part is dual-axis correction program which has been designed to estimate and adjust the platform to the right position of the sun whenever the web-camera cannot capture image of the sun. The reflecting platform operates online with dual-axis movement, altitude and azimuth angles, which both positions will be analyzed and controlled by image processing and microcontroller. To illustrate an effectiveness of the system, two experiments had been defined. Firstly, lab test on simulation of an arbitrary movement of the sun by using LED light torch, and secondly, field test of real situation. The test results of both experiments illustrated that the designed system can perform reflective solar tracking precisely and effectively.

Keywords: Solar tracking, Altitude and Azimuth, Concentrating solar power, Heliostat, Image processing

1. บทนำ

จากการที่ในปัจจุบัน โลกของเรามีความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก และด้วยเหตุนี้เองทำให้เรามีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในอนาคตคาดว่าจะยังต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นต่อไปอีกเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องผลิตหรือหาพลังงานให้ได้เพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของตลาด แต่เนื่องจากเทคโนโลยีของเราปัจจุบันนี้ยังไม่เพียงพอเพื่อที่จะผลิตพลังงานออกมาให้เพียงพอต่อความต้องการ จึงทำให้เกิดการขาดแคลนพลังงานด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดการแสวงหาพลังงานทางเลือกต่างๆ โดยที่พลังงานทางเลือกแสงเป็นที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดและเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีวันหมด โดยที่ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ระบบแรกคือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ และ ระบบที่สองคือ ระบบไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนแสงอาทิตย์โดยระบบทั้ง

สองนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้จำเป็นต้องมีการพัฒนาติดตั้งระบบการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาในส่วนของการจำลองระบบรวมแสงอาทิตย์ และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง



รูปที่ 1 มุมอะซิมุมและมุมอัลติจูด

2. วิธีคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏอยู่บนโลก

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญต่อการคำนวณมีดังนี้

2.1 Apparent Solar Time (AST) คือ เป็นเวลาที่สังเกตจากดวงอาทิตย์ ซึ่งในแต่ละตำแหน่งของผู้สังเกตจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งลองจิจูด

$$AST = LST + \left(\frac{4min}{deg}\right) (LSTM - Long) + ET \quad (1)$$

2.2 Local longitude of standard time meridian (LSTM) คือ เวลามาตรฐาน ณ จุดที่เราสนใจ

$$LSTM = 15^\circ \left(\frac{Long}{15^\circ}\right) \text{round to integer} \quad (2)$$

2.3 Equation of Time (ET) คือ สมการของเวลาที่ถูกต้องแล้วเนื่องจากผลของวงโคจรของโลกและแกนของโลกที่เอียงไปจากเดิม มีหน่วยเป็น นาที

$$ET = 9.87 \sin 2D - 7.53 \cos D - 1.5 \sin D \quad (3)$$

ซึ่ง $D = \frac{360^\circ}{365^\circ} (N - 81)$ มีหน่วยเป็น องศา (degrees)

2.4 Hour Angle (H) คือ มุมที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่เป็นมุมองศาต่อชั่วโมง หน่วยเป็น องศา

$$H = \frac{(\text{No.of minutes past midnight,AST}) - 720\text{mins}}{4 \text{ min/deg}} \quad (4)$$

2.5 Declination (δ) คือ มุมเอียงบน

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{N+284}{365} \times 360^\circ \right] \quad (5)$$

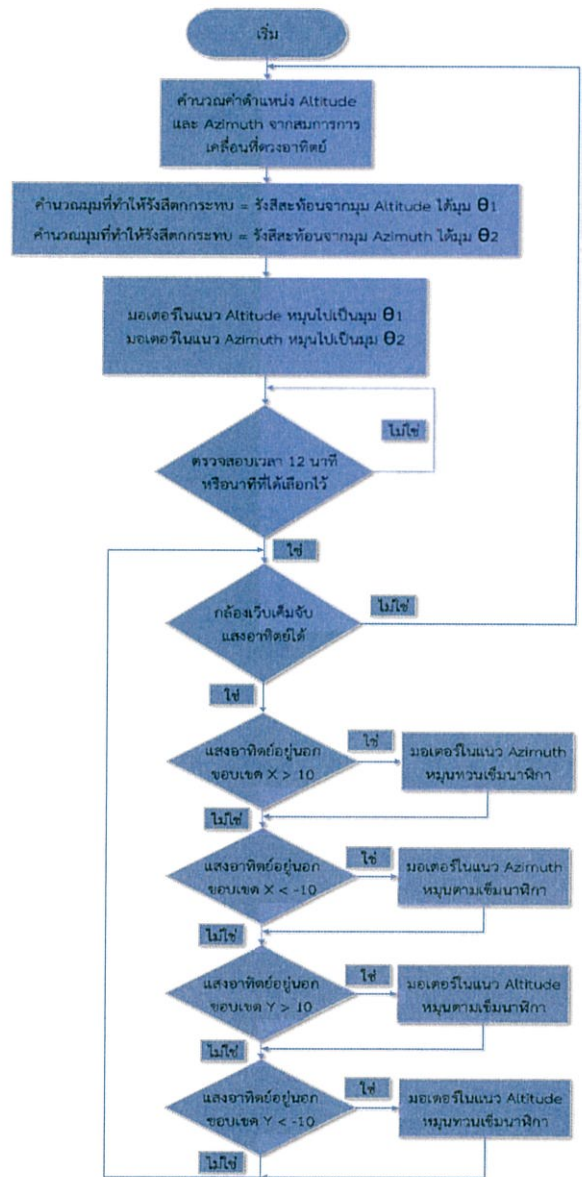
2.6 Altitude angle (β_1) คือ มุมเงยที่วัดจากระนาบไปจนถึงดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นองศา

$$\beta_1 = \arcsin[\cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta] \quad (6)$$

2.7 Azimuth angle (α_1) ระยะเชิงมุมที่เป็นไปจากเส้นแนวเหนือ-ใต้ เริ่มต้นทิศใต้ มุมอะซิมุมมีค่าเป็น 0 องศา

$$\alpha_1 = \arccos \left[\frac{\sin \beta_1 \sin L - \sin \delta}{\sin \beta_1 \cos L} \right] [\text{sgn}H] \quad (7)$$

3. ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง



รูปที่ 2 ขั้นตอนการประมวลผลของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง

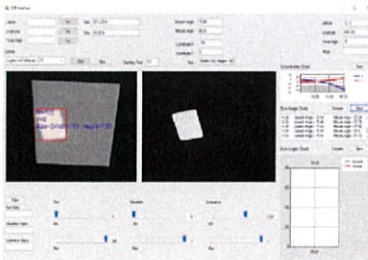
จากรูปที่ 2 จะสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกดรับภาพมาแล้วจะมีการประมวลผลว่าภาพนั้นมีจุดศูนย์กลางอยู่ตำแหน่งใดของภาพที่กล้องเว็บแคมรับได้ จากนั้นจึงส่งข้อมูลของจุดศูนย์กลางของภาพไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อสั่งให้สเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนที่ แต่ในกรณีนี้ที่กล้องไม่สามารถจับแสงของดวงอาทิตย์ได้ ก็จะเปลี่ยนไปใช้โหมคปฏิบัติเพื่อคำนวณแล้วส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ต่อไป

4. การทดสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง

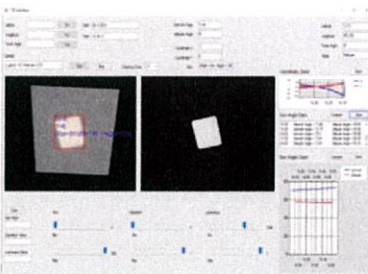
เป็นการทดสอบการทำงานของโปรแกรมติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง โดยจำลองตัว Receiver และกระจกสะท้อนแสง โดยให้โปรแกรมทำการค้นหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ทุกๆ 12 นาทีเพื่อสะท้อนแสงไปยังตรงกลางของ Receiver พอดี โดยจะมีการทดสอบ 2 แบบคือ การทดลองติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงในวันที่ไม่มีเมฆบังโดยใช้เว็บแคมและการทดลองติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงในวันที่มีเมฆบังโดยใช้ปฏิบัติ (ทำการจำลองเมฆบังโดยการนำกระดาษมาปิดที่กระจกสะท้อนแสง)

4.1 การทดลองติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงในวันที่ไม่มีเมฆบัง โดยใช้เว็บแคม

การทดลองครั้งที่ 7 ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.24 – 15.24 น.



รูปที่ 3 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.35 น.



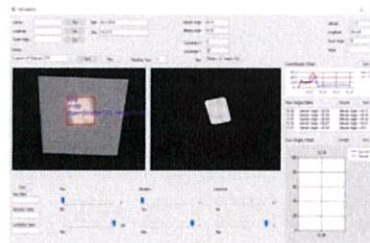
รูปที่ 4 แสงอาทิตย์ที่ตกสะท้อน ณ เวลา 14.36 น.

ตารางที่ 1 ผลการทดลอง ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 14.24 – 15.24 น.

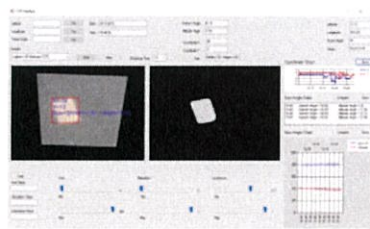
Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
14.24	70.44	57.72	70.55	57.76
14.36	73.41	56.74	72.64	55
14.48	76.27	54.36	74.47	52.2
15.00	78.8	51.98	76.06	49.38
15.12	81.88	49.46	77.54	46.55
15.24	85.07	46.66	78.85	43.69

4.2 การทดลองติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงในวันที่มีเมฆบัง โดยใช้ปฏิบัติ (ทำการจำลองเมฆบังโดยการนำกระดาษมาปิดที่กระจกสะท้อนแสงและทิ้งไว้ 24 นาที)

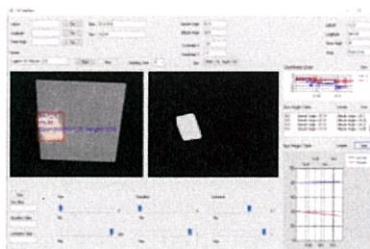
การทดลองครั้งที่ 8 ณ วันที่ 16/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.36 – 16.00 น.



รูปที่ 5 เอกกระดาษปิดกระจกสะท้อน ณ เวลา 15.37 น.



รูปที่ 6 เอกกระดาษออก ณ เวลา 15.48 น.



รูปที่ 7 เอกกระดาษออก ณ เวลา 16.00 น.

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง ณ วันที่ 25/3/59 ตั้งแต่เวลา 15.36 – 16.00 น.

Time	Experiment		Calculation	
	Azimuth	Altitude	Azimuth	Altitude
15.36	80.04	40.8	80.05	40.83
15.48	80.92	37.58	81.15	37.95
16.00	81.91	34.08	82.18	35.07

5.สรุปผลการทดลองและปัญหาในการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองในสถานการณ์จริงได้ทำการทดลอง ณ ดึก ECC ชั้นคาดฟ้า โดยการทดลองแต่ละครั้งจะทำการได้ลองไม่เกิน ครึ่งละ 1.30 ชั่วโมง เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนอาจจะทำให้ เครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องเว็บแคม และ Stepping motor driver ร้อนเกินไป การทดลองจะให้โปรแกรม Visual Studio คำนวณหา ตำแหน่งและส่งค่าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกๆ 12 นาที เนื่องจากทุกๆ 12 นาที แสงอาทิตย์ที่มากกระทบ Receiver จะ ออกนอกรอบ

จากการทดลองระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสง โดยการทดลองเราได้ทำการทดลองการทำงานระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ทั้ง 2 รูปแบบการทำงานด้วยกัน คือ เมื่อเริ่มโปรแกรม Visual Studio จะให้โปรแกรมคำนวณหา ตำแหน่งดวงอาทิตย์และความสูงของของตัว Receiver เพื่อส่ง ให้สเต็ปป์มอเตอร์หมุนเพื่อสะท้อนแสงให้ตกกระทบบน Receiver ณ เวลานั้น หลังจากที่แสงตกกระทบบน Receiver โปรแกรมจะเข้าสู่รูปแบบการทำงานการทำงานโดยใช้กล้องเว็บแคมตรวจหาตำแหน่งแสงอาทิตย์ที่มากกระทบบนทุกๆ 12 นาที แล้วส่งค่า a, b, c, d ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อส่งสเต็ปป์มอเตอร์ให้หมุนไปเรื่อยจนแสงที่มากกระทบบนเข้าสู่ขอบเขตที่ ขอมรับได้คือ $-10 < X < 10$ และ $-10 < Y < 10$ ในกรณีที่กล้องไม่สามารถตรวจจับแสงอาทิตย์ได้ โปรแกรมจะเข้าสู่รูปแบบการทำงานการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบสะท้อนแสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลการทดลอง ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ ระบบสะท้อนที่ใช้กล้องเว็บแคมในการสะท้อนสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ส่วนระบบสะท้อนที่ใช้สมการดวงอาทิตย์ในการคำนวณไม่สามารถสะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่ตรงกลาง Receiver ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่แสงอาทิตย์ที่สะท้อนก็อยู่ในบริเวณของ ตัว Receiver ซึ่งสรุปได้ว่าระบบรวมแสงอาทิตย์และติดตามดวงอาทิตย์แบบสะท้อนแสงสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

1. สเต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้มีการหมุนเป็นสเต็ป ครึ่งละ 1.8 องศา ซึ่งเป็นค่าที่หยาบจึงอาจใช้ stepper motor ที่มีค่าองศาต่อสเต็ปที่ละเอียดมากขึ้น
2. สมการดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้คำนวณหาตำแหน่งดวงอาทิตย์มีความไม่แม่นยำคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเล็กน้อยทำให้การสะท้อนแสงอาทิตย์มีความไม่แม่นยำ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสมการดวงอาทิตย์ที่ใช้จริงในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเป็นความลับทางการค้า ต้องหาสมการที่มีความถูกต้องมากกว่าที่นำมาใช้ในโครงการนี้
4. เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนมากทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องเว็บแคม และ Stepping motor driver มีความร้อนเกินไป ทำให้การทำงานอาจความคลาดเคลื่อนและไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงคิดพัฒนา Stepping motor driver และ ทำ โครงสร้างบังแสงอาทิตย์ให้ทั้ง ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ DC Supply ปรับปรุงหรือเพิ่มวิธีการระบายความร้อนในคอมพิวเตอร์ควมคุมและกล้องเว็บแคม

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภชัย สมพานิช, คู่มือการเขียนโปรแกรมและใช้งาน Visual C# .NET, ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, บริษัท ด่านสุทธาการพิมพ์, 2546. (12 กันยายน 2558)
- [2] ธนาธิป เพ็ชรประสิทธิ์และคณะ, “การจำลองระบบติดตามดวงอาทิตย์ Machine Vision System,” **ปฏิญญาพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556. (12 กันยายน 2558)
- [3] ธนศ ตันรุ่งโรจน์และคณะ, “ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบผสมผสานการใช้ระบบวิทัศน์อัตโนมัติและแบบไร้รูปทรงตรวจจับ,” **ปฏิญญาพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555. (22 กันยายน 2558)
- [4] มนุศักดิ์ งานทองและคณะ, **ตัวต้นแบบระบบสะท้อนแสงอาทิตย์สำหรับระบบตัวรับรังสีรวมกลาง**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://www.repository.rmutt.ac.th/bitstream/handle/123456789/663/Sun%20Reflecting%20System%20Prototype...pdf?sequence=3> (22 กันยายน 2558)

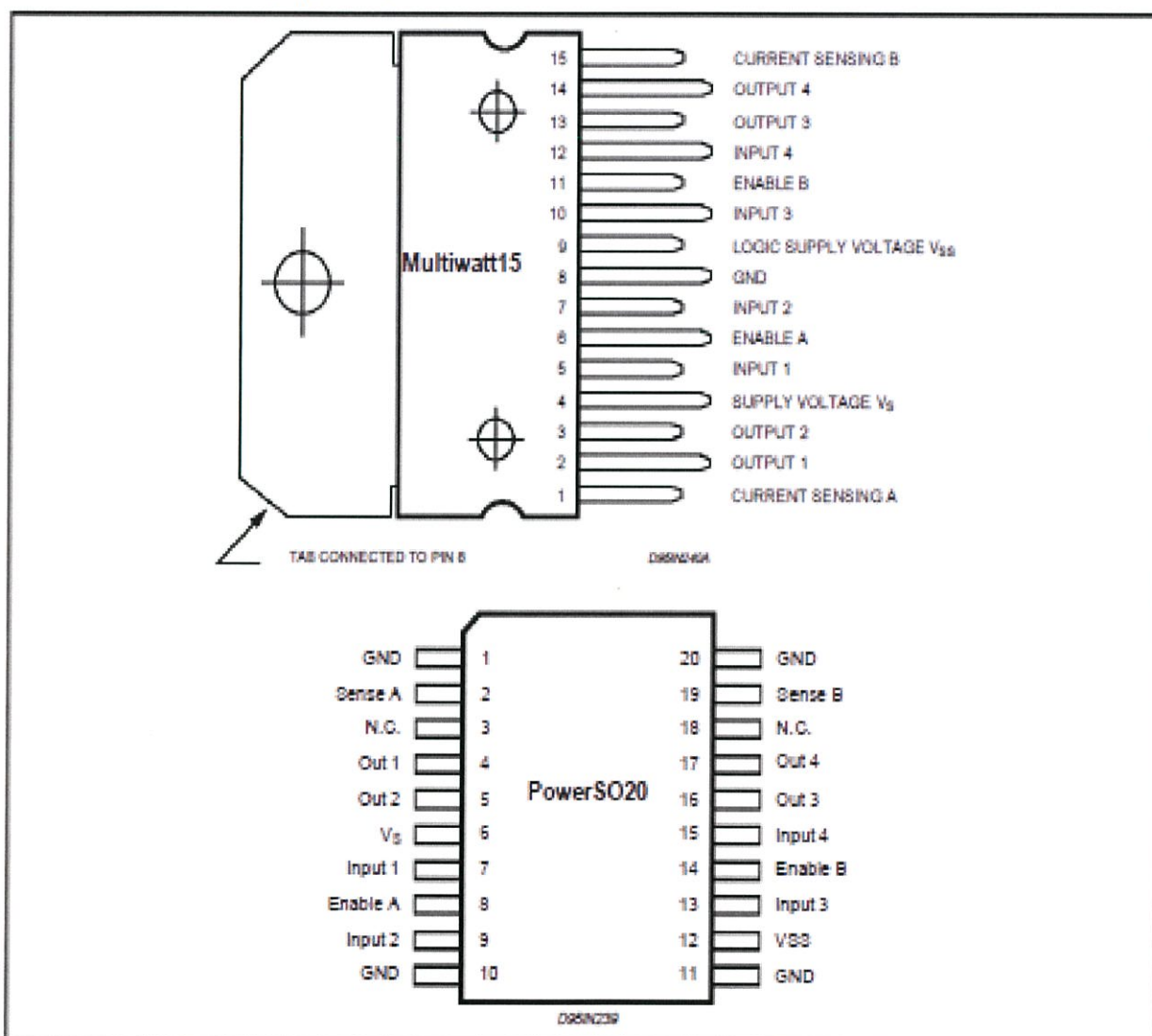
ภาคผนวก ข

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_i, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off, $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	-DC Operation	2	A
V_{sense}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	$^\circ C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^\circ C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate

PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V_S	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V_{SS}	Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_S = 42V$; $V_{SS} = 5V$, $T_J = 25^\circ C$; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_S	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	$V_{IH} + 2.5$		48	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I_S	Quiescent Supply Current (pin 4)	$V_{en} = H$; $I_L = 0$	$V_I = L$	13	22	mA
			$V_I = H$	50	70	mA
		$V_{en} = L$	$V_I = X$		4	mA
I_{SS}	Quiescent Current from V_{SS} (pin 9)	$V_{en} = H$; $I_L = 0$	$V_I = L$	24	38	mA
			$V_I = H$	7	12	mA
		$V_{en} = L$	$V_I = X$		6	mA
V_{IL}	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V_{IH}	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V_{SS}	V
I_L	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_I = L$			-10	μA
I_H	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_I = H \leq V_{SS} - 0.6V$		30	100	μA
$V_{en} = L$	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
$V_{en} = H$	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V_{SS}	V
$I_{en} = L$	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	$V_{en} = L$			-10	μA
$I_{en} = H$	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	$V_{en} = H \leq V_{SS} - 0.6V$		30	100	μA
$V_{CEsat(H)}$	Source Saturation Voltage	$I_L = 1A$	0.95	1.35	1.7	V
		$I_L = 2A$		2	2.7	V
$V_{CEsat(L)}$	Sink Saturation Voltage	$I_L = 1A$ (5)	0.85	1.2	1.6	V
		$I_L = 2A$ (5)		1.7	2.3	V
V_{CEsat}	Total Drop	$I_L = 1A$ (5)	1.80		3.2	V
		$I_L = 2A$ (5)			4.9	V
V_{sensa}	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
T_1 (V)	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		1.5		μs
T_2 (V)	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.2		μs
T_3 (V)	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		2		μs
T_4 (V)	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.7		μs
T_5 (V)	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.7		μs
T_6 (V)	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.25		μs
T_7 (V)	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		1.6		μs
T_8 (V)	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.2		μs
f_c (V)	Commutation Frequency	$I_L = 2A$		25	40	KHz
T_1 (V_{en})	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		3		μs
T_2 (V_{en})	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		1		μs
T_3 (V_{en})	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.3		μs
T_4 (V_{en})	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.4		μs
T_5 (V_{en})	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		2.2		μs
T_6 (V_{en})	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.35		μs
T_7 (V_{en})	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.25		μs
T_8 (V_{en})	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.1		μs

1) Sensing voltage can be $-1V$ for $t \leq 50 \mu s$; In steady state $V_{sense} \text{ min} \geq -0.5V$.

2) See fig. 2.

3) See fig. 4.

4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

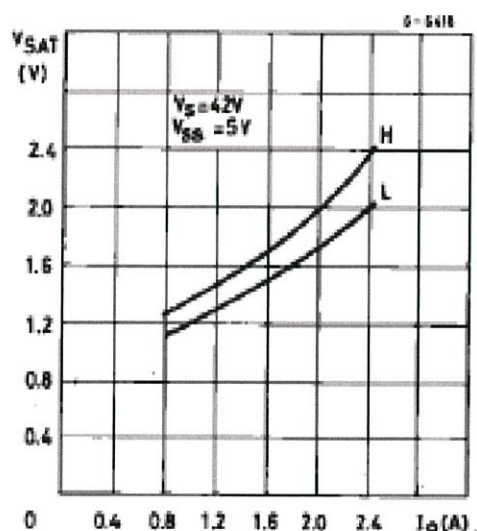
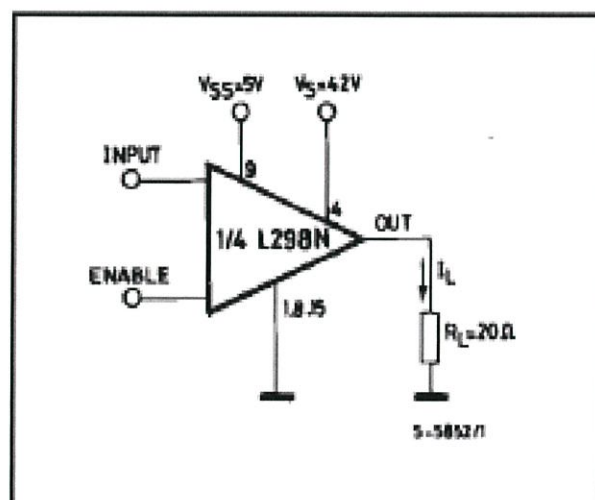


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note: For INPUT Switching set EN = H
For ENABLE Switching set IN = H

Figure 3 : Source Current Delay Times vs. Input or Enable Switching.

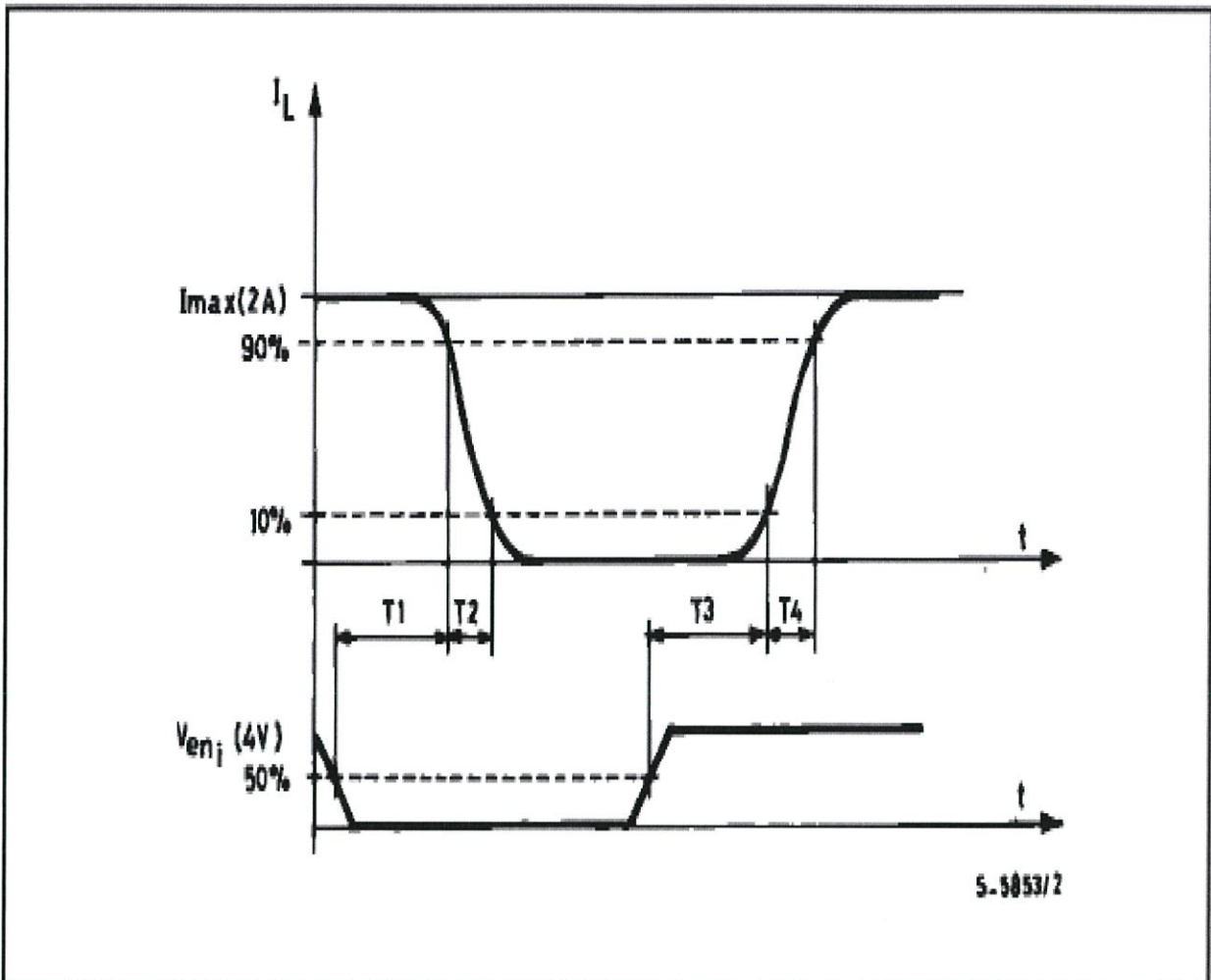
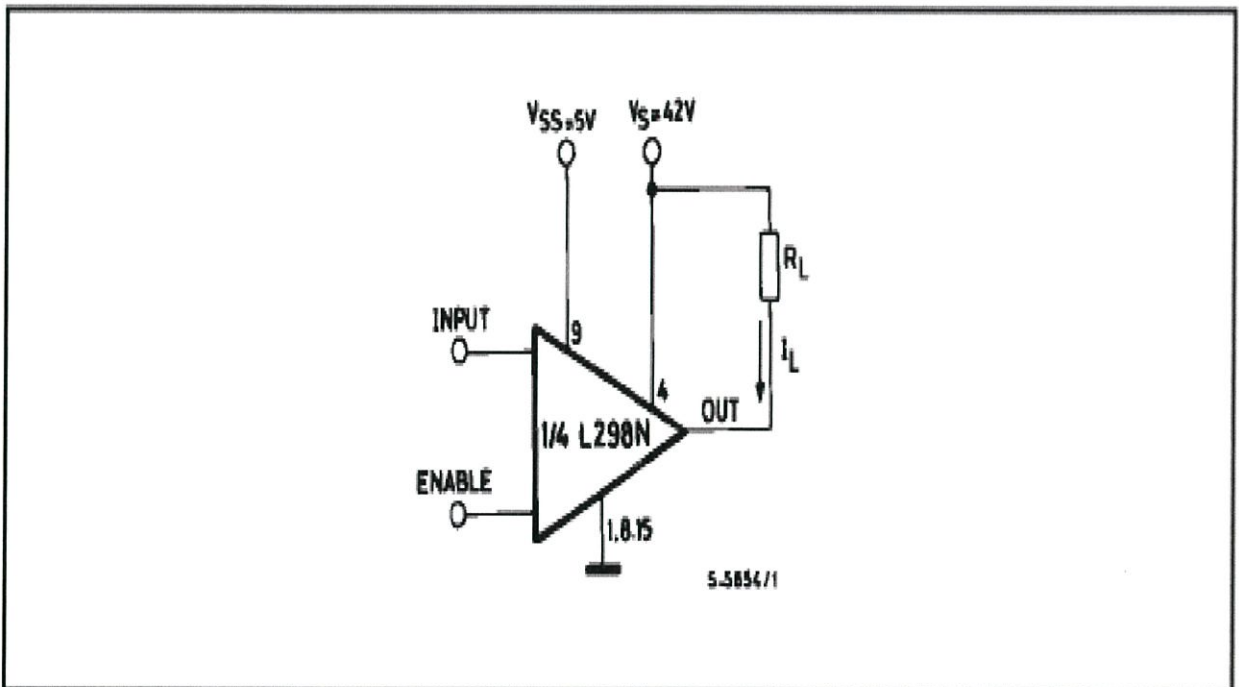


Figure 4 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = L

Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.

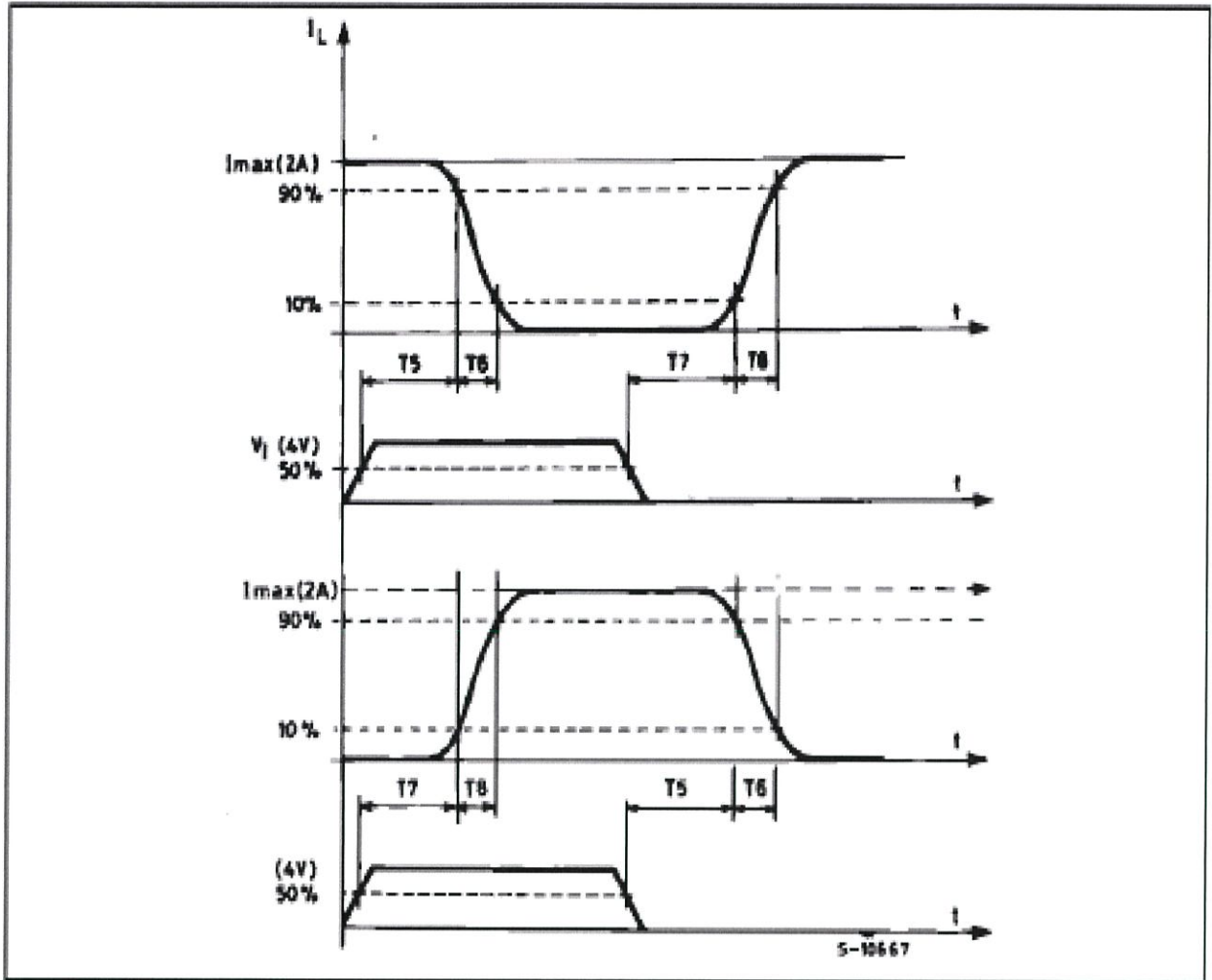


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.

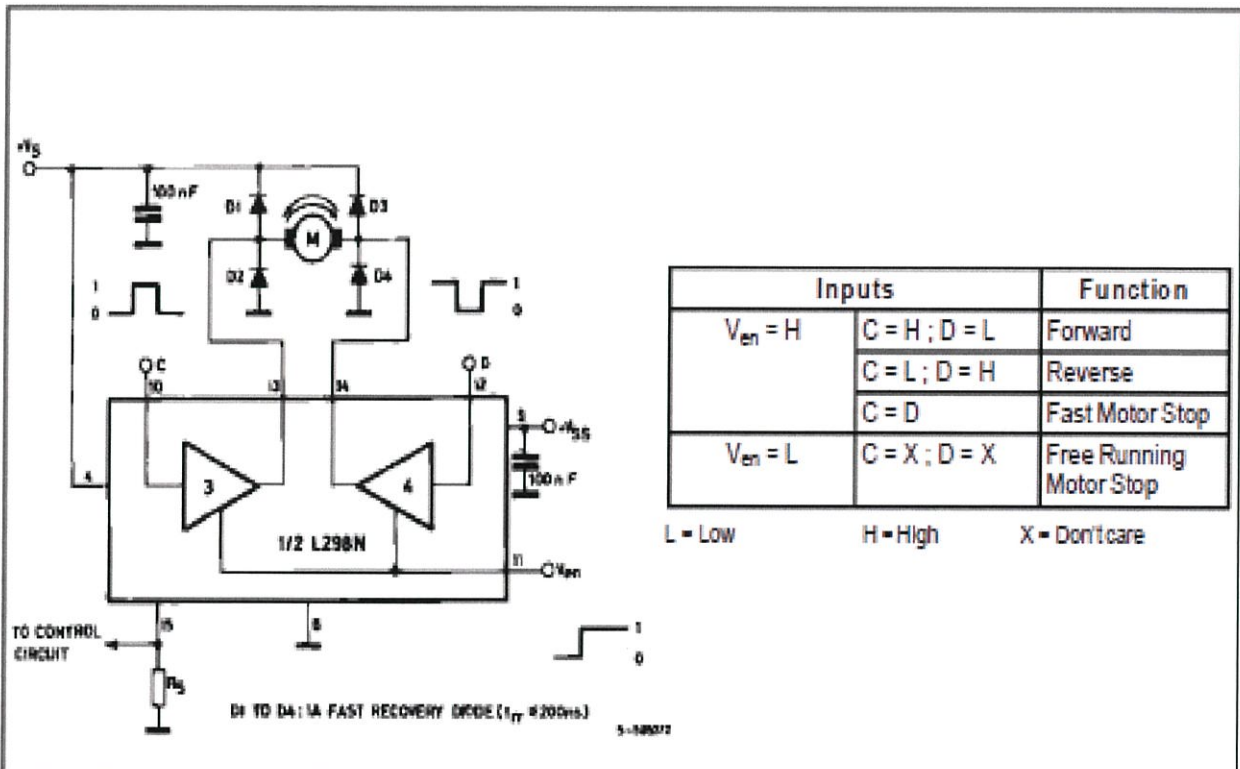
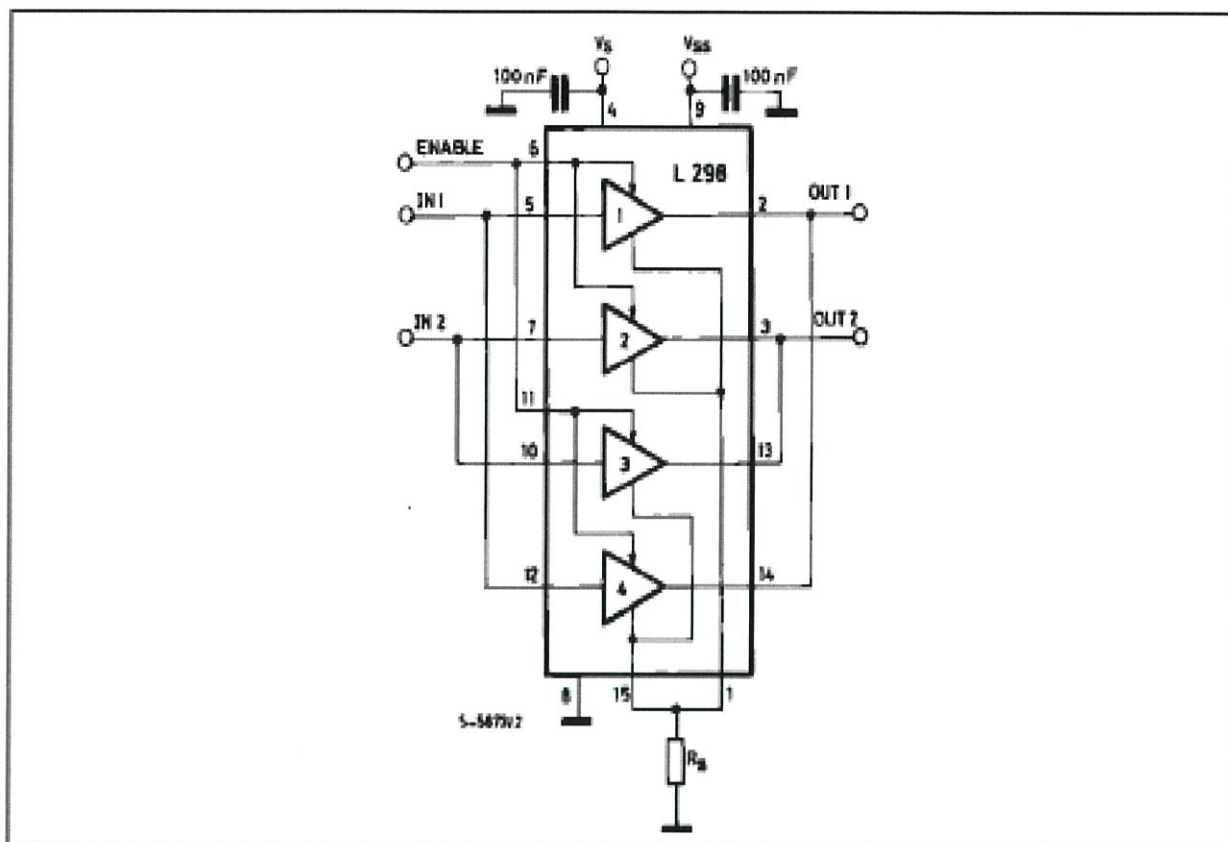


Figure 7 : For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output: an external resistor (R_{SA} ; R_{SB}) allows to detect the intensity of this current.

1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are $In1$; $In2$; EnA and $In3$; $In4$; EnB . The In inputs set the bridge state when The En input is high; a low state of the En input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both V_S and V_{SS} , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of V_S that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off: Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ($t_r \leq 200$ nsec) that must be chosen of a V_F as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped; Schottky diodes would be preferred.

This solution can drive until 3 Amps In DC operation and until 3.5 Amps of a repetitive peak current.

On Fig 8 it is shown the driving of a two phase bipolar stepper motor ; the needed signals to drive the inputs of the L298 are generated, in this example, from the IC L297.

Fig 9 shows an example of P.C.B. designed for the application of Fig 8.

Fig 10 shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the I.C. L6506.

Figure 8 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Circuit.

This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.

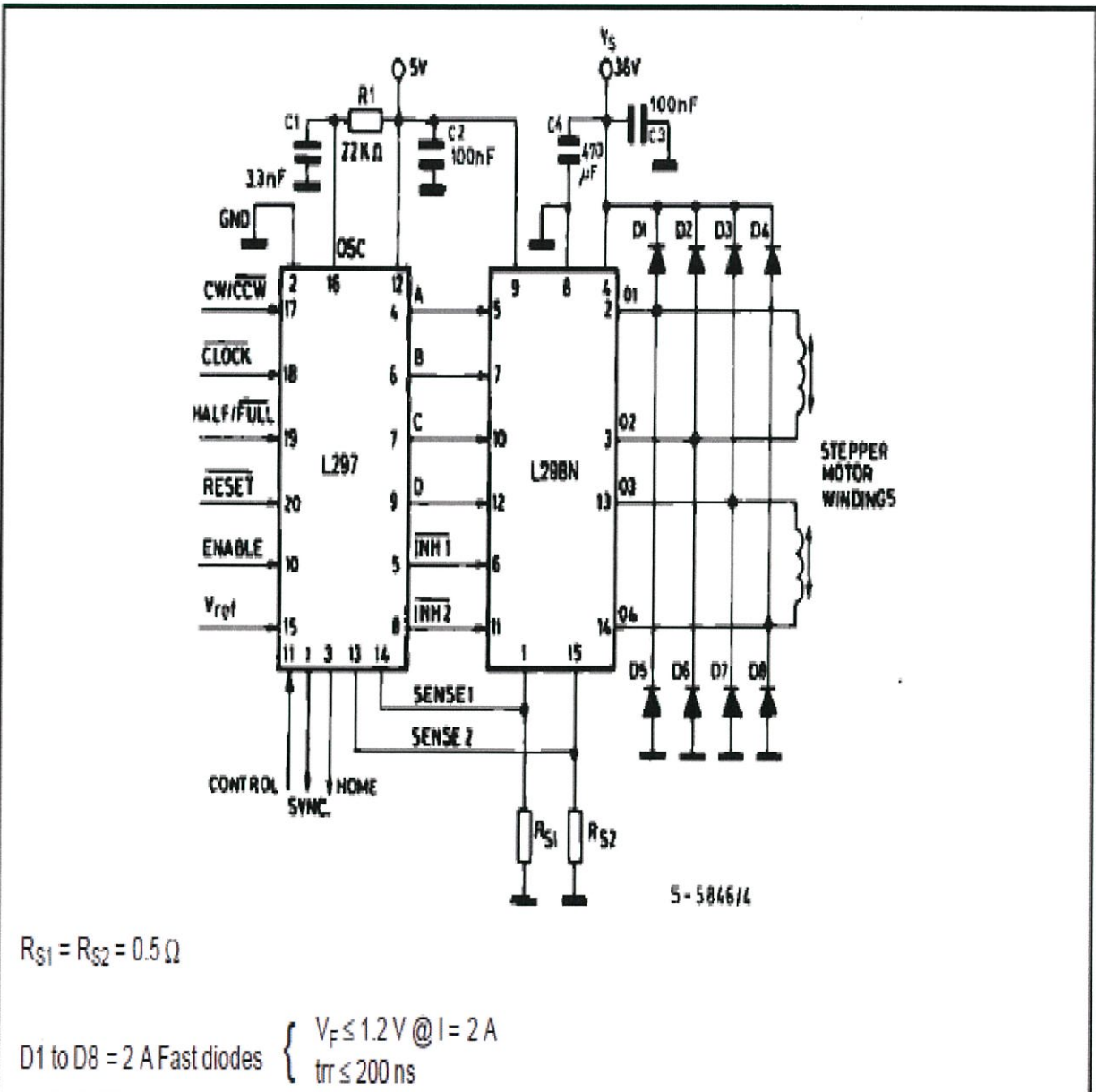


Figure 9 : Suggested Printed Circuit Board Layout for the Circuit of fig. 8 (1:1 scale).

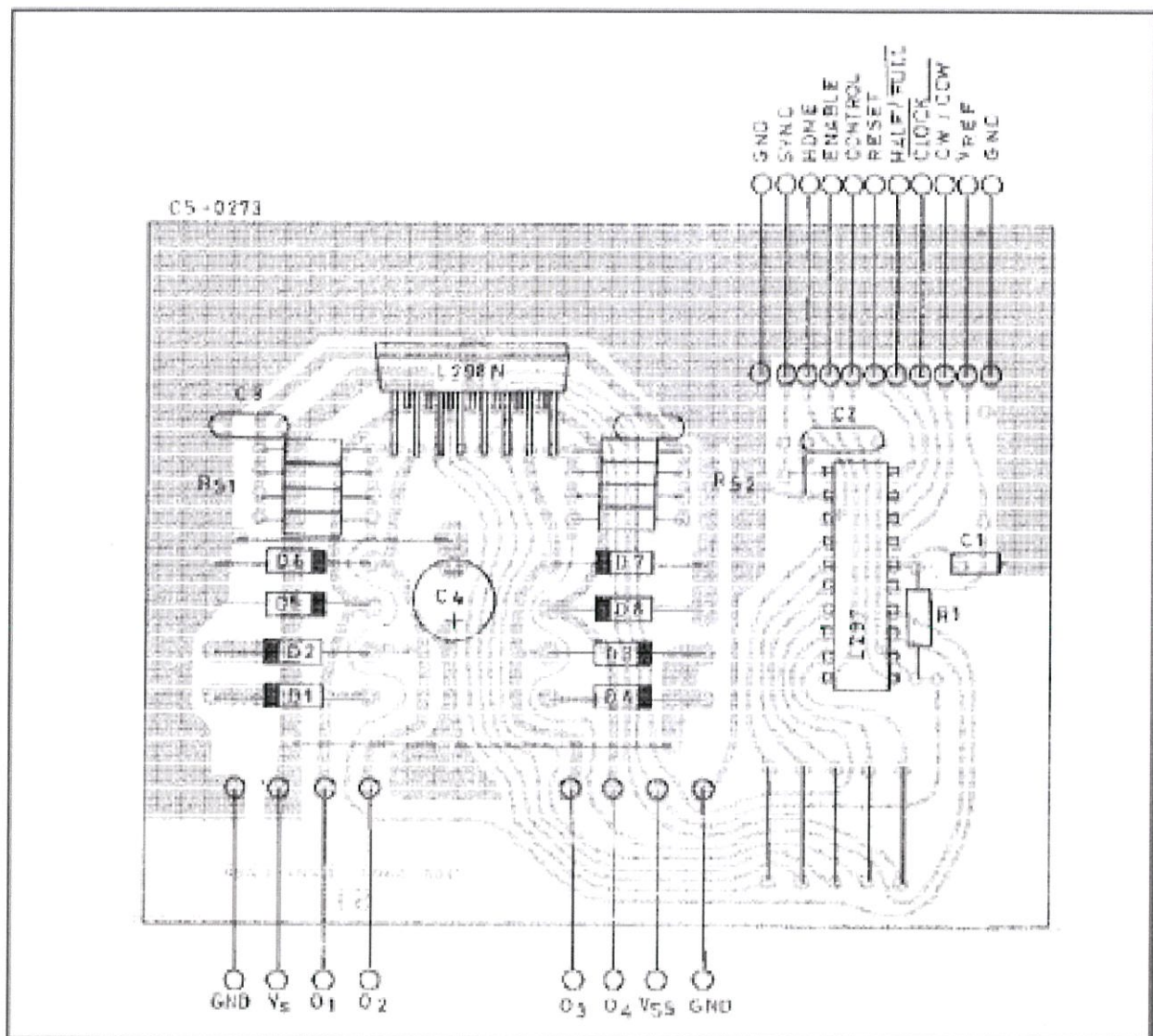
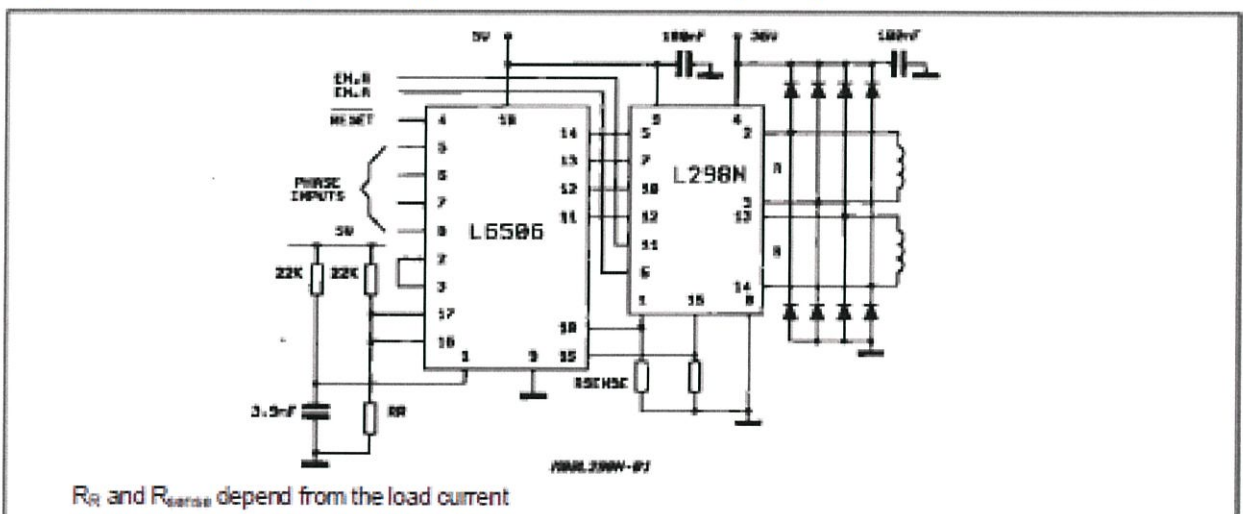
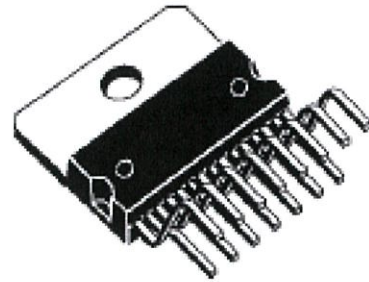


Figure 10 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Control Circuit by Using the Current Controller L6506.

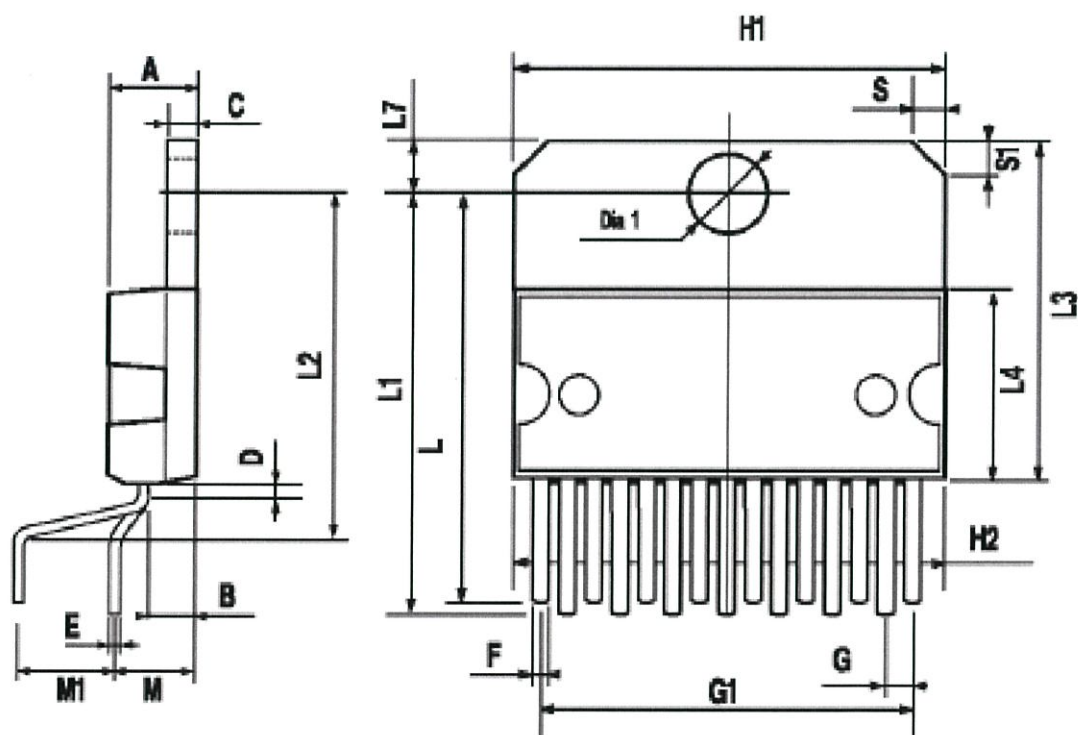


DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
D		1			0.039	
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.02	1.27	1.52	0.040	0.050	0.060
G1	17.53	17.78	18.03	0.690	0.700	0.710
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L	21.9	22.2	22.5	0.862	0.874	0.886
L1	21.7	22.1	22.5	0.854	0.870	0.886
L2	17.65		18.1	0.695		0.713
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
M	4.25	4.55	4.85	0.167	0.179	0.191
M1	4.63	5.08	5.53	0.182	0.200	0.218
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

OUTLINE AND MECHANICAL DATA

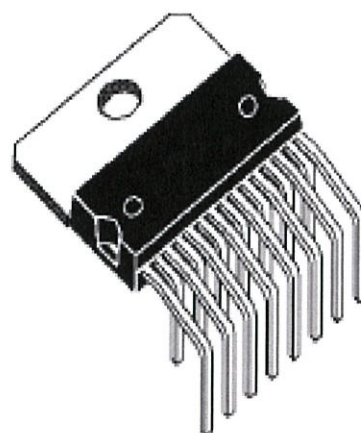


Multiwatt15 V

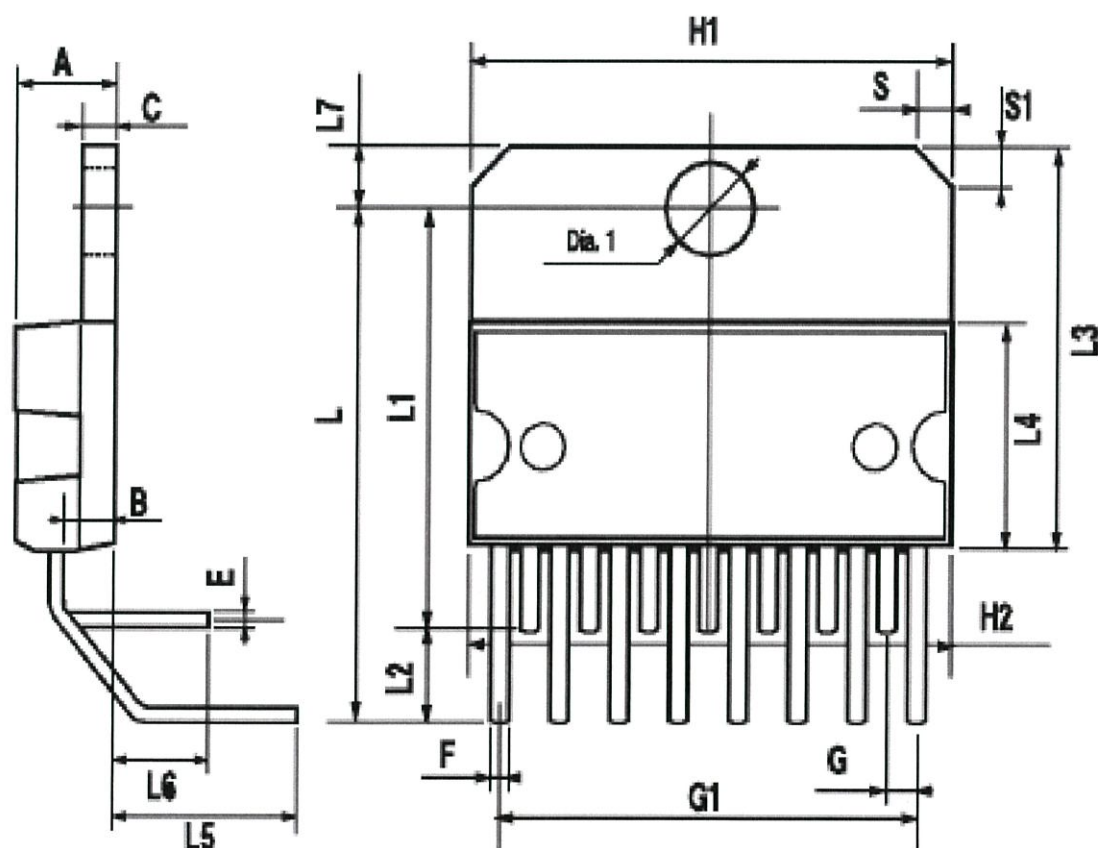


DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.14	1.27	1.4	0.045	0.050	0.055
G1	17.57	17.78	17.91	0.692	0.700	0.705
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L		20.57			0.810	
L1		18.03			0.710	
L2		2.54			0.100	
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L5		5.28			0.208	
L6		2.38			0.094	
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

OUTLINE AND MECHANICAL DATA



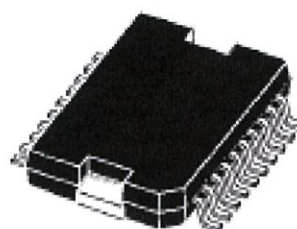
Multiwatt15 H



DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			3.6			0.142
a1	0.1		0.3	0.004		0.012
a2			3.3			0.130
a3	0		0.1	0.000		0.004
b	0.4		0.53	0.016		0.021
c	0.23		0.32	0.009		0.013
D (1)	15.8		16	0.622		0.630
D1	9.4		9.8	0.370		0.386
E	13.9		14.5	0.547		0.570
e		1.27			0.050	
e3		11.43			0.450	
E1 (1)	10.9		11.1	0.429		0.437
E2			2.9			0.114
E3	5.8		6.2	0.228		0.244
G	0		0.1	0.000		0.004
H	15.5		15.9	0.610		0.626
h			1.1			0.043
L	0.8		1.1	0.031		0.043
N	10° (max.)					
S	8° (max.)					
T		10			0.394	

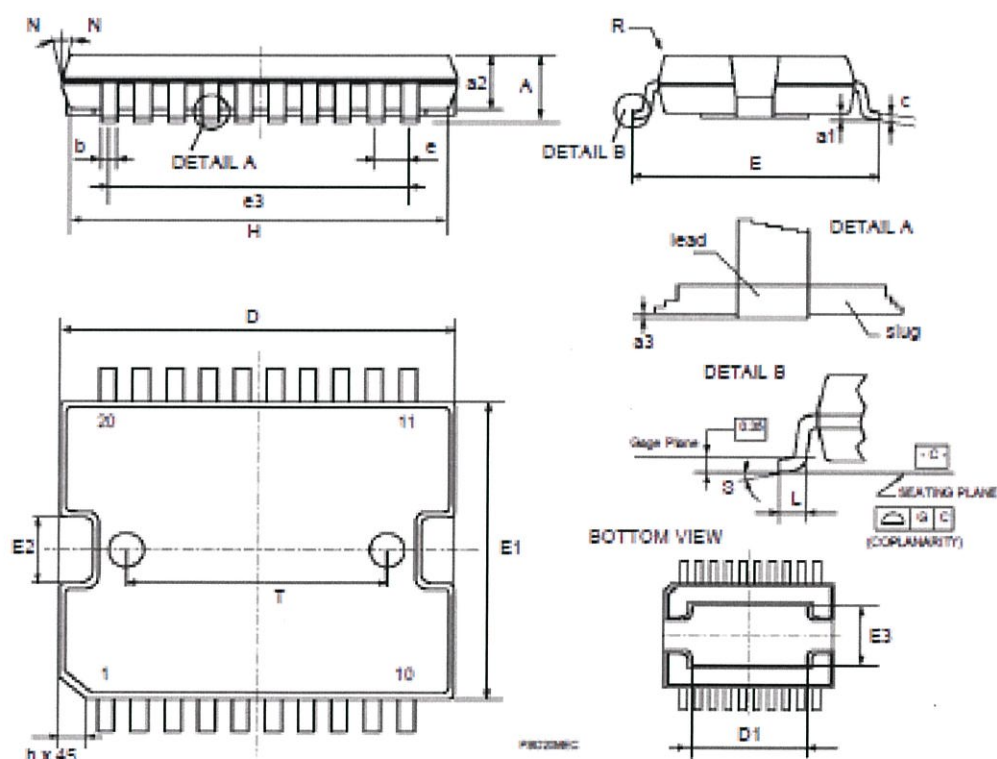
(1) "D" and "F" do not include mold flash or protrusions.
 - Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15 mm (0.006").
 - Critical dimensions "E", "G" and "a3"

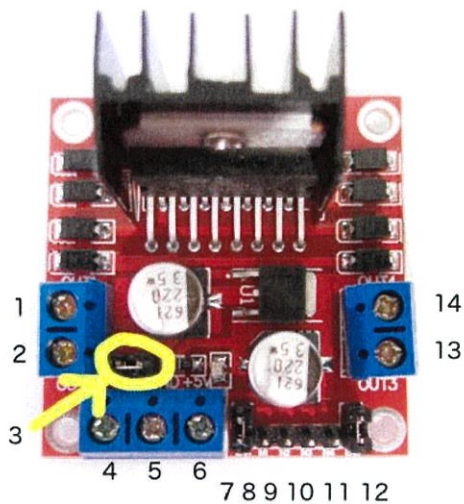
OUTLINE AND MECHANICAL DATA



JEDEC MO-166

PowerSO20





รูปที่ ข-1 แสดงเลขของแต่ละส่วนประกอบและการต่อใช้งานของ L298N motor drive

การต่อใช้งาน L298N motor drive

1. ต่อกับ Stepping motor “A+” หรือต่อกับ DC motor 1 “+”
2. ต่อกับ Stepping motor “A-” หรือต่อกับ DC motor 1 “-”
3. 12V jumper - ถอดส่วนนี้ออกถ้าจ่ายแรงดันเข้าเกิน 12 Vdc
4. ต่อกับ voltage power supply เพื่อจ่ายให้มอเตอร์โดยจ่ายได้มากที่สุด 35 Vdc
5. GND
6. หาก 12V jumper ถูกถอดออก สามารถใช้รับแรงดัน 5 V จาก Arduino ได้
7. DC motor 1 enable jumper ไม่ต้องถอดส่วนนี้ออกหากใช้ควบ Stepping motor แต่ถ้าหากใช้กับ DC motor ต้องถอดออกเพื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็ว DC motor
8. IN 1
9. IN 2
10. IN 3
11. IN 4
12. DC motor 2 enable jumper ไม่ต้องถอดส่วนนี้ออกหากใช้ควบ Stepping motor แต่ถ้าหากใช้กับ DC motor ต้องถอดออกเพื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็ว DC motor
13. ต่อกับ Stepping motor “B+” หรือต่อกับ DC motor 2 “+”
14. ต่อกับ Stepping motor “B-” หรือต่อกับ DC motor 2 “-”

1.2 Stepping motor NEMA 17

Quick Reference NEMA size 17 1.8°
2-phase stepper motor



Notes and Warnings

Installation, configuration and maintenance must be carried out by qualified technicians only. You must have detailed information to be able to carry out this work.

- + Unexpected dangers may be encountered when working with this product!
- + Incorrect use may destroy this product and connected components!

For more information, go to www.inshome.com

Specifications

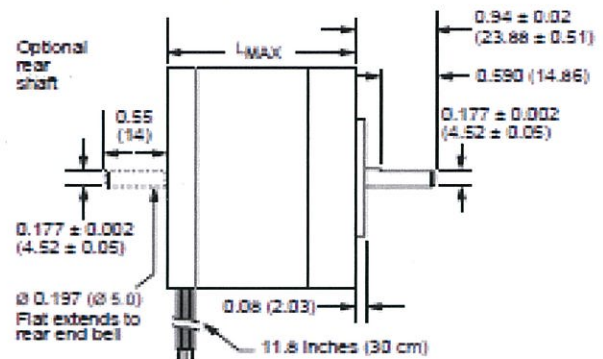
1.5 Amp motors		Single length	Double length	Triple length
Part number		M-1713-1.5 * (1)	M-1715-1.5 * (1)	M-1719-1.5 * (1)
Holding torque	oz-in	32	50	75
	N-cm	23	42	53
Detent torque	oz-in	1.7	2.1	3.5
	N-cm	1.2	1.5	2.5
Rotor inertia	oz-in-sec ²	0.000538	0.0006037	0.0011562
	kg-cm ²	0.038	0.057	0.082
Weight	oz	7.4	8.1	12.7
	grams	210	230	360
Phase current	amps	1.5	1.5	1.5
Phase resistance	ohms	1.3	2.1	2.0
Phase inductance	mH	2.1	5.0	3.85

(1) Indicate S for single-shaft or D for double-shaft. Example M-1713-1.5S

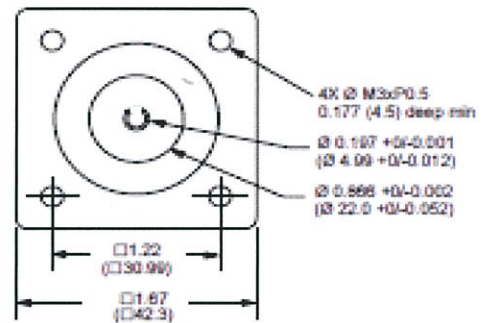
Wiring and Connections

Signals and wire colors	
Phase A	Red
Phase A	Blue
Phase B	Green
Phase B	Black

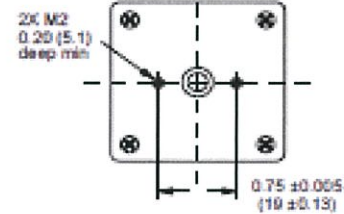
Mechanical Specifications
Dimensions in inches (mm)



FRONT VIEW



REAR VIEW (Reduced)



Motor stack length (inches (mm))	Single	Double	Triple
LMAX	1.34 (34.0)	1.57 (40)	1.89 (48)

Part Numbers

Example:	M - 1 7 1 3 - 1.5 S
Stepper motor frame size	M - 1 7 1 3 - 1.5 S
M-17 = NEMA 17 (1.7"/42 mm)	
Motor length	M - 1 7 1 3 - 1.5 S
13 - = single stack	
15 - = double stack	
19 - = triple stack	
Phase current	M - 1 7 1 3 - 1.5 S
1.5 = 1.5Amps	
Shaft	M - 1 7 1 3 - 1.5 S
S = single, front shaft only	
D = double, front and rear shafts	
Optional optical encoder (1)	M - 1 7 1 3 - 1.5 E S 1 0 0
ES = Single-end	
ED = Differential	
Line count	
100, 200, 250, 400, 500 or 1000 (2)	

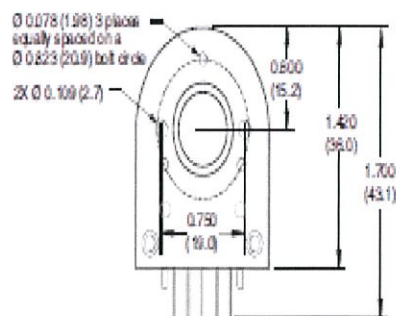
(1) An encoder replaces the shaft designator in the part number.
(2) All encoders have an index mark, except the 1000 line count version.

Torque-speed performance

Measured at 1.5 Amps RMS

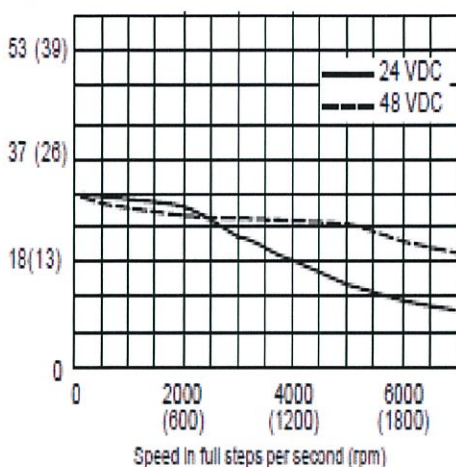
Optical Encoder Option

Dimensions in inches (mm)



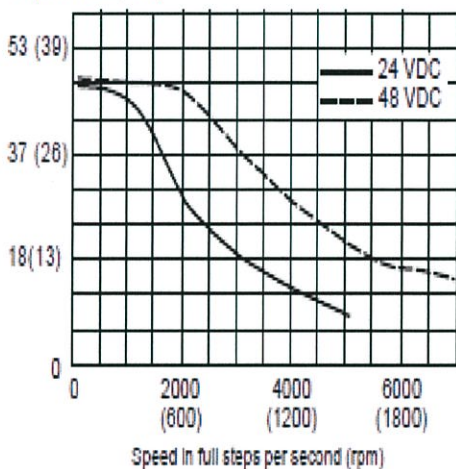
M-1713-1.5

Torque in oz-in (N-cm)



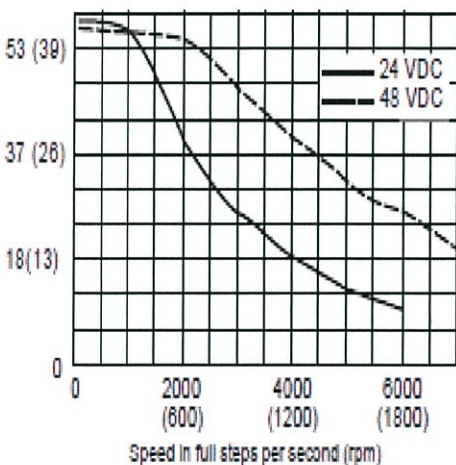
M-1715-1.5

Torque in oz-in (N-cm)



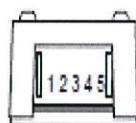
M-1719-1.5

Torque in oz-in (N-cm)



Connectivity

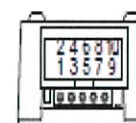
single-end encoder



wire	function
1 Brown	Ground
2 Violet	Index
3 Blue	Channel A
4 Orange	+5 VDC Input
5 Yellow	Channel B

optional interface cable available: ES-CABLE-2

differential encoder

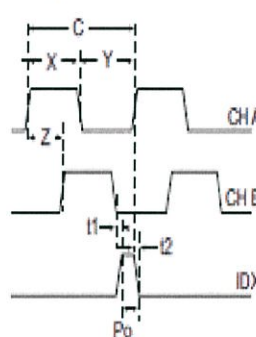


pin	function	pin	function
1	no connect	6	Channel A+
2	+5 VDC Input	7	Channel B-
3	Ground	8	Channel B+
4	no connect	9	Index -
5	Channel A -	10	Index +

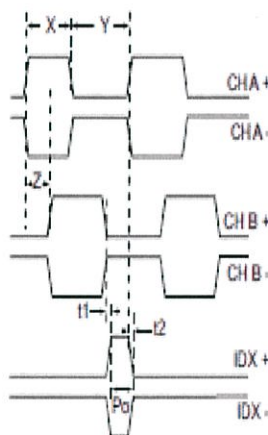
Interface cable included

Timing

single-end encoder



differential encoder



Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Cycle error			3	5.5	°e
Symmetry		130	180	230	°e
Quadrature		40	90	140	°e
Index pulse width	Po	60	90	120	°e
Index rise (after Ch A or B rise)	t1	-300	100	250	ns
Index fall (after Ch A or B fall)	t2	70	150	1000	ns

C One cycle: 360 electrical degrees (°e).

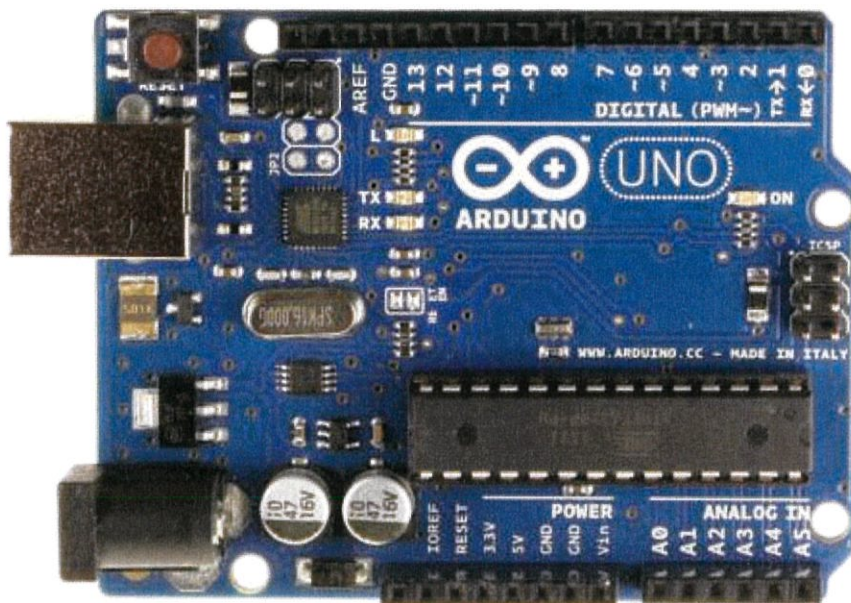
X/Y Symmetry: the measure of the relationship between X and Y, nominally 180°e.

Z Quadrature: the phase lead or lag between channels A and B, nominally 90°e.

Po Index pulse width, nominally 90°e.

NOTE: Rotation is as viewed from the cover side of the encoder.

ข.3 Arduino Uno R3



รูปที่ ข-2 Arduino Uno R3

Arduino Uno R3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ดถูกออกแบบมาให้ใช้กับชิพ ATmega328 โดยสามารถเลือกใช้กับระบบไฟเลี้ยงที่เป็น 7V ถึง 12V ให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการใช้งานได้อีกด้วย

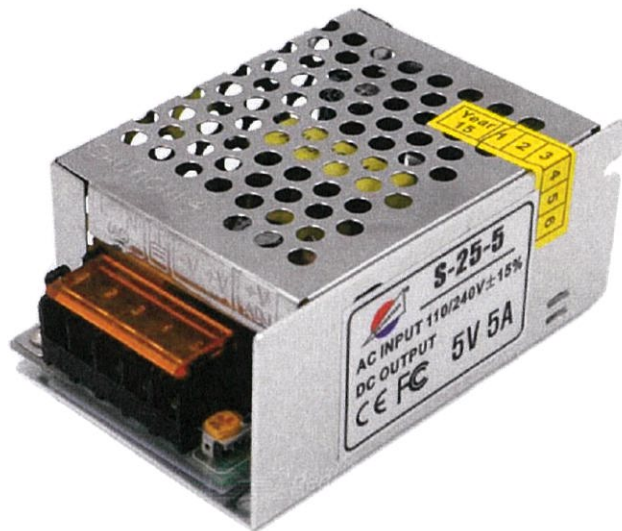
โดยโครงสร้างของบอร์ด Arduino Uno R3 ได้รับการออกแบบให้บอร์ดมีขนาดเล็กเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานและยังสามารถใช้เป็นชุดทดลองเรียนรู้เบื้องต้นได้อีกด้วย โดยภายในบอร์ดได้บรรจุเอาวงจรถูกสำเร็จรูปที่จำเป็นต่อการใช้งาน และสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรม มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนสัญญาณ I/O เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆให้สอดคล้องและเหมาะสมกับความต้องการใช้งานได้ในหลายๆลักษณะตามความต้องการ

นอกจากนี้แล้วบอร์ด Arduino Uno R3 ยังสามารถต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆได้ คือ ผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรถอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

คุณสมบัติของบอร์ด

1. ใช้ MCU เป็น ATmega382 เป็น MCU ประจำบอร์ด รันที่ clock ความถี่ 16 MHz
32 KB (ATmega328) Flash Memory / 2 KB (ATmega328) SRAM / 1 KB
(ATmega328) EEPROM
2. ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทำงาน 5V แต่สามารถรับแรงดันขาเข้าได้ในช่วง 7 – 12 V
3. มีพอร์ต Digital I/O Pins 14 พอร์ต (มี 6 พอร์ตสามารถใช้เป็น PWM output)
4. มีพอร์ต Analog I/O Pins 6 พอร์ต
5. กระแสไฟ DC ต่อขา I/O 40 mA
6. กระแสไฟ DC สำหรับขา 3.3V 50 mA
7. มี USB Connector และ Power Jack DC
8. ขนาด 68.6x53.4 mm
9. น้ำหนัก 25 กรัม

ข.4 DC Supply 5V 5A



รูปที่ ข-3 Supply 5V 5A

ข.5 Logitech C270h



รูปที่ ข-4 Supply 5V 5A

ภาคผนวก ค
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ค

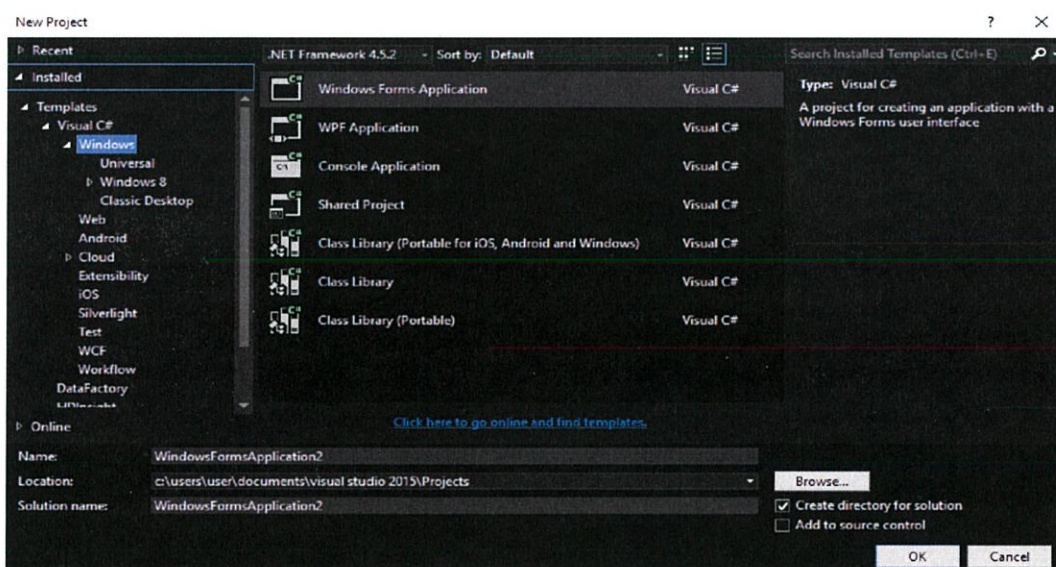
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

ค.1 Microsoft Visual Studio

Microsoft Visual Studio ทางผู้ทดลองได้นำมาใช้เพื่อทำการสร้างโปรแกรมสำหรับประมวลผลภาพของดวงอาทิตย์โดยใช้ภาษา C#

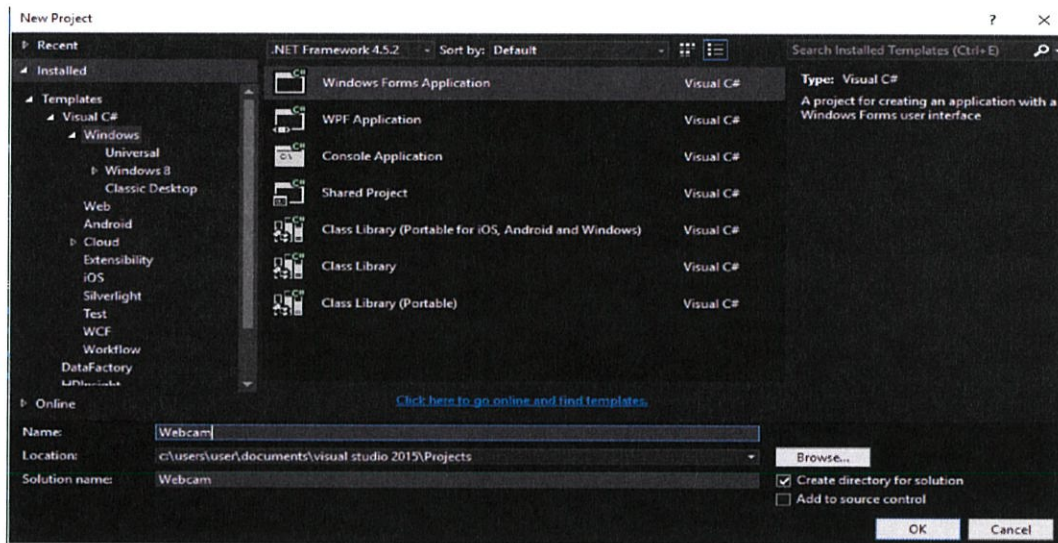
การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น

1. เปิดโปรแกรม คลิก File > new project แล้วจะเห็นหน้าต่างนี้



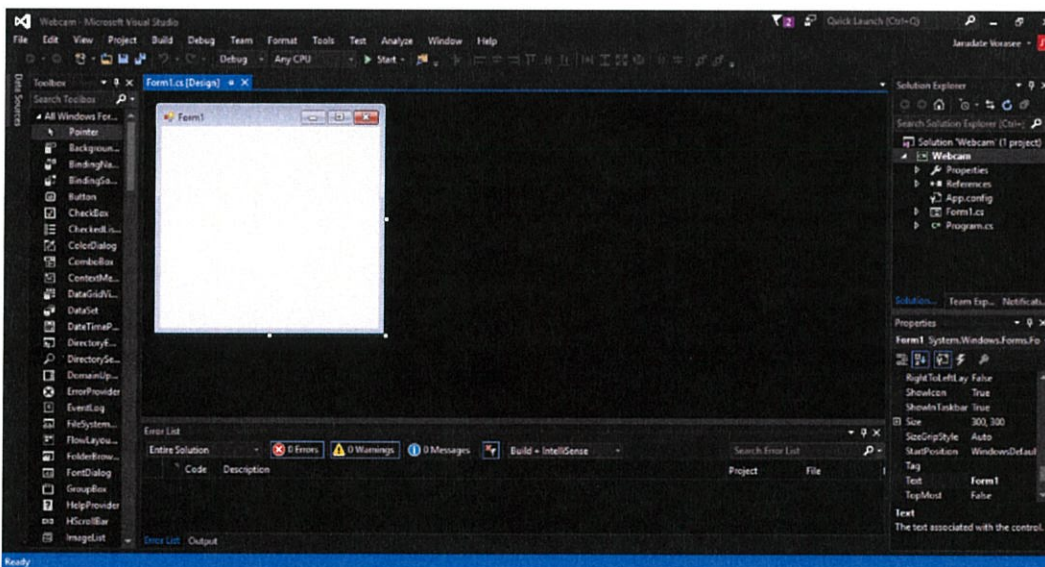
รูป ค-1 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น

- เลือก Windows Forms Application แล้วข้างล่างของหน้าต่างจะมีคำว่า Name: ให้เปลี่ยนข้อความในช่องนี้ให้เป็นชื่อโปรเจกต์ที่เราต้องการสร้าง เช่น webcam



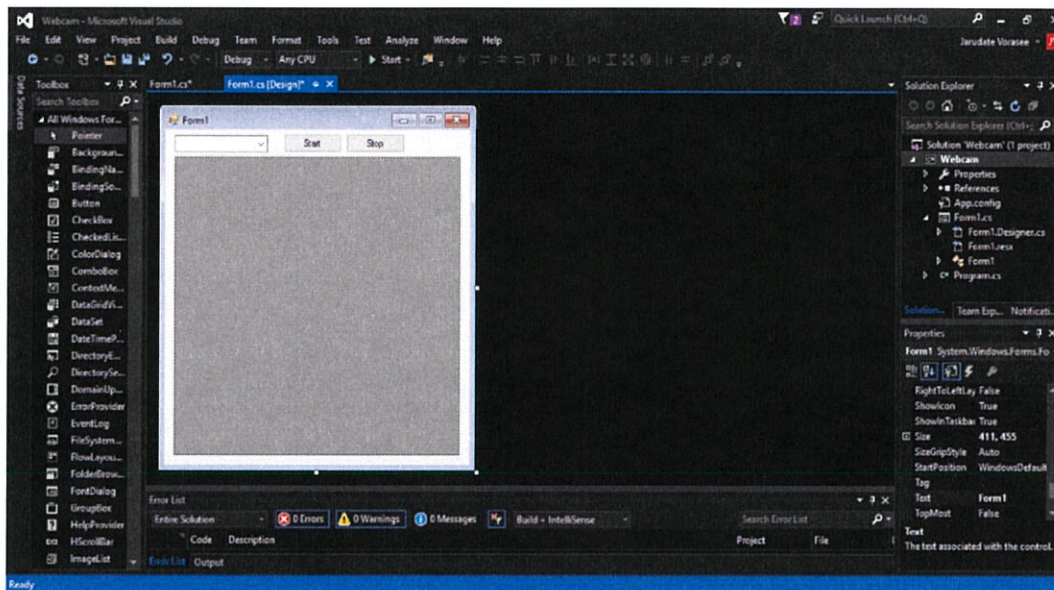
รูป ค-2 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น (ต่อ)

- คลิก OK แล้วจะเห็นหน้าต่าง IDE ซึ่งหน้าหลักก็จะประกอบด้วย From, Common controls, Toolbox, Solutions Explorer และ Properties



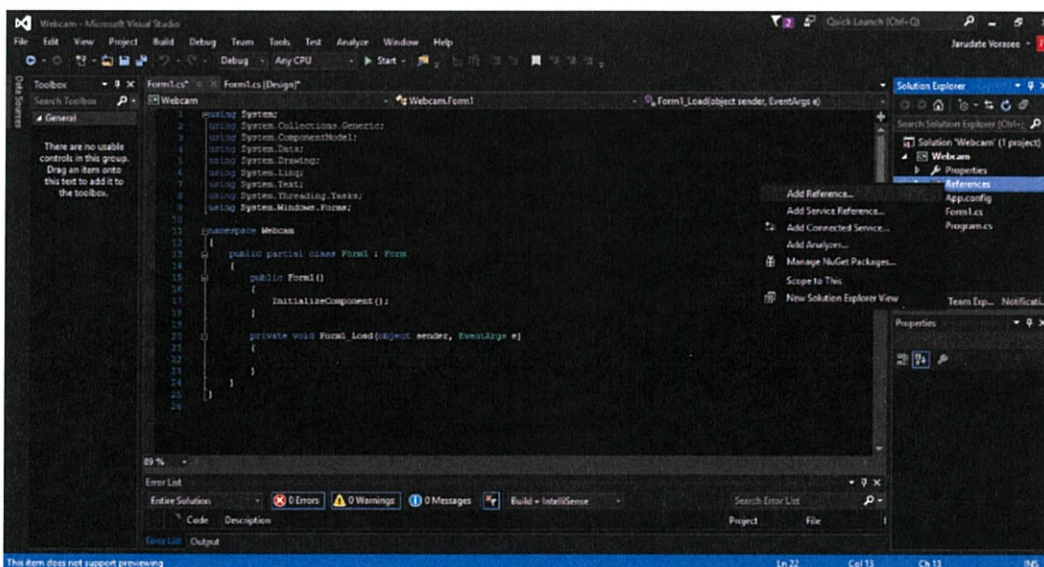
รูป ค-3 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น (ต่อ)

- ลาก combobox และ picturebox จาก toolbox มาลง Form จากนั้นลากปุ่ม button มาแล้วเปลี่ยนชื่อปุ่มนั้นเป็น ปุ่ม start และ ปุ่ม save



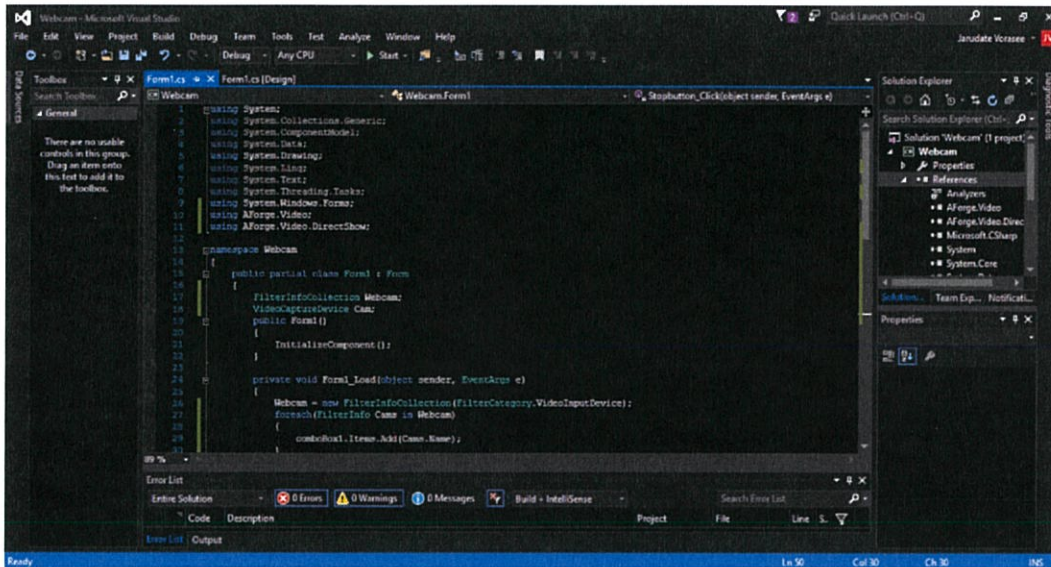
รูป ค-4 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น(ต่อ)

- Add reference เพื่อที่จะเชื่อมต่อกับ webcam



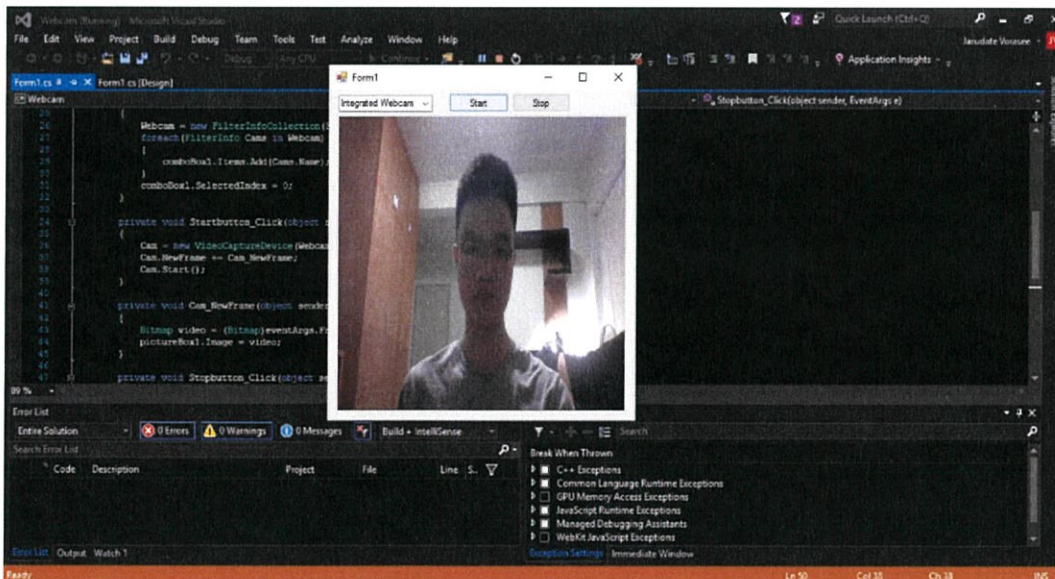
รูป ค-5 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น (ต่อ)

6. เขียนคำสั่งให้แต่ละ tool box แต่ละตัวที่สร้างขึ้นในข้อ 4 ให้ทำงานตามที่ต้องการ



รูป ค-6 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น (ต่อ)

7. รันโปรแกรมหลังจากนั้นเมื่อกดปุ่ม start โปรแกรมจะเชื่อมต่อเข้ากับกล้อง web cam ที่เลือก และจะแสดงภาพขึ้นที่ picturebox



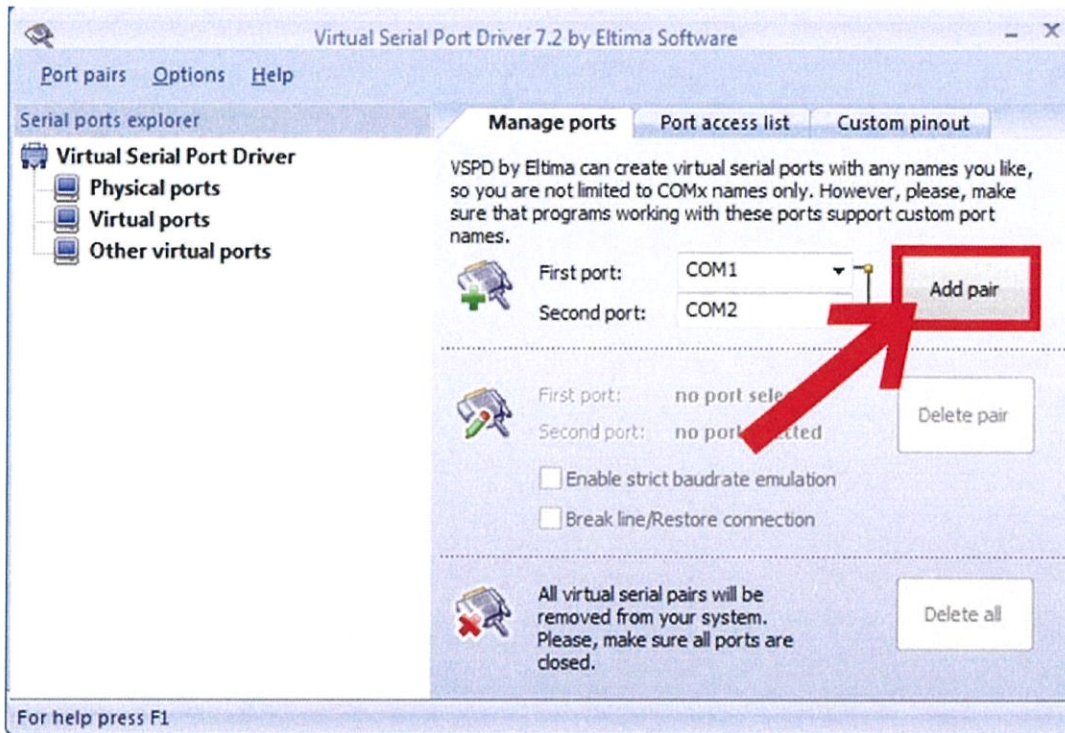
รูป ค-7 การใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio เบื้องต้น (ต่อ)

ค.2 Virtual Serial Port Driver

เป็นซอฟต์แวร์ (Software) ที่ช่วยสร้าง Serial Port เสมือน ขึ้นมาบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถทดลองรับส่งข้อมูล (Data) ผ่านทาง Serial Port ได้สะดวกมากขึ้น

การใช้โปรแกรม Virtual Serial Port Driver

1. เปิดโปรแกรม Virtual Serial Port Driver

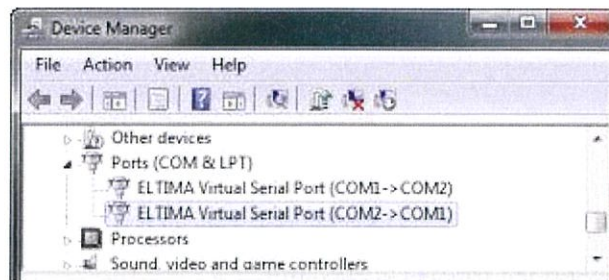


รูป ค-8 การใช้โปรแกรม Virtual Serial Port Driver

ขั้นตอนที่ 1 ตั้ง Serial Port เสมือนขึ้นมา 2 ช่อง ดังรูป กำหนดให้สร้าง COM1 และ COM2

ขั้นตอนที่ 2 คลิกที่ Add pair เป็นการเชื่อมต่อ COM1 เข้ากับ COM2 เหมือนกับการที่เราเอาสาย Serial port มาต่อ COM1 เข้ากับ COM2

2. ตรวจสอบว่า COM1 และ COM2 เชื่อมต่อกันแล้ว



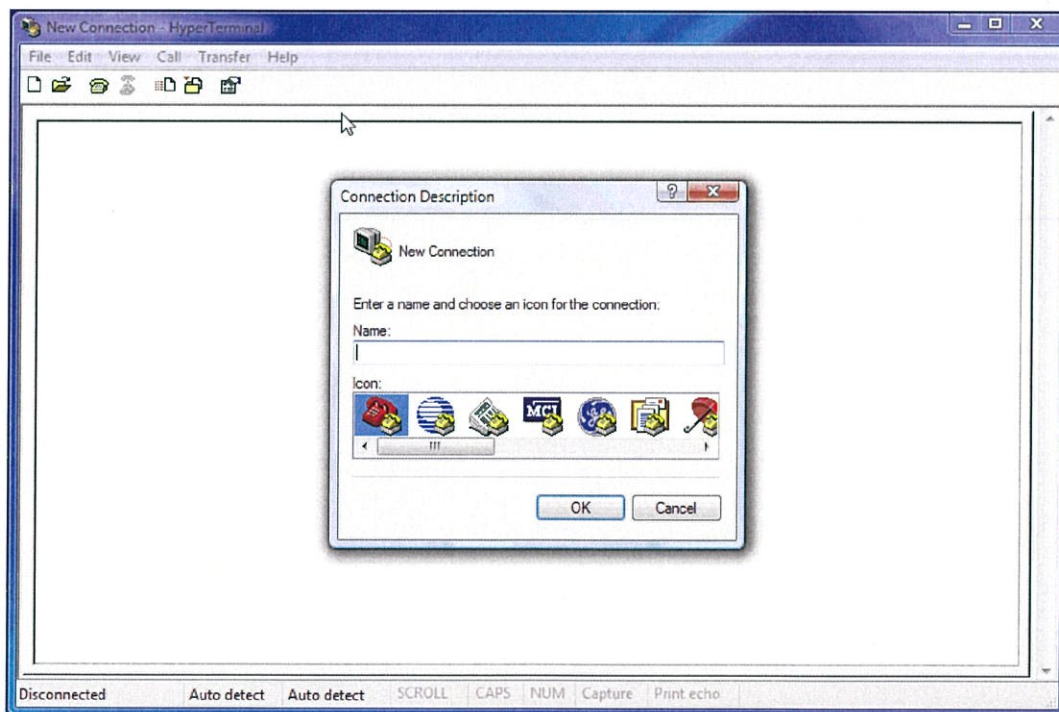
รูป ค-9 การใช้โปรแกรม Virtual Serial Port Driver(ต่อ)

ค.3 Hyperterminal

เป็นโปรแกรมเพื่อนำมาตรวจสอบโปรแกรมประมวลผลภาพของดวงอาทิตย์ว่าสามารถส่งค่าออกมาได้จริงหรือไม่ และส่งค่าออกมาได้ถูกต้องหรือไม่ ก่อนที่จะทำการส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

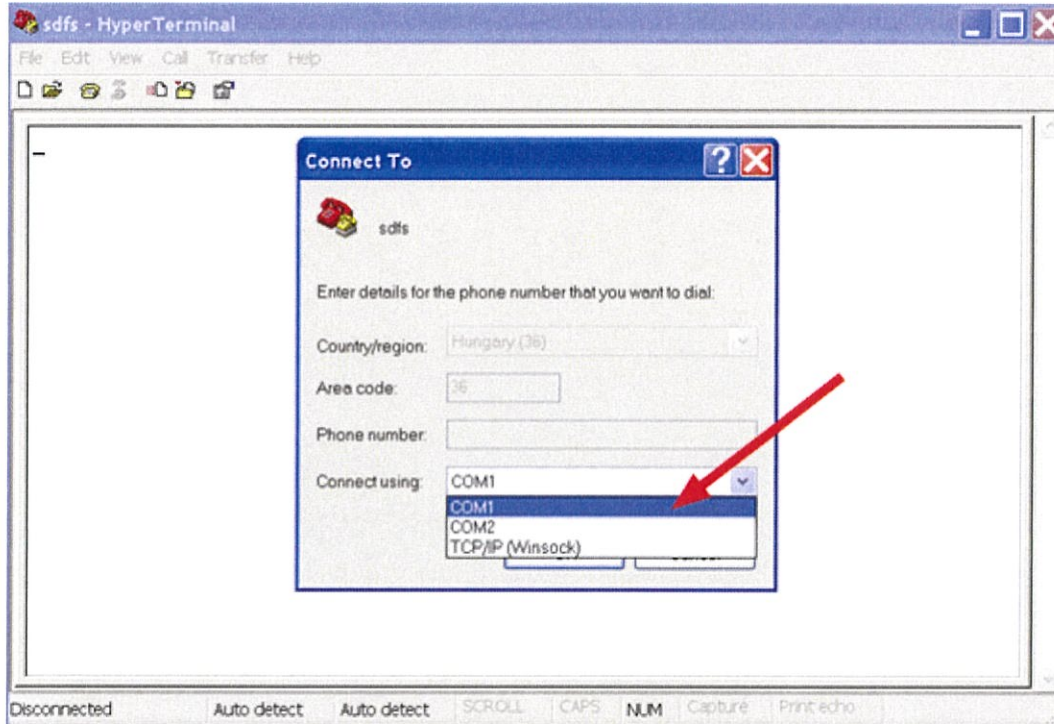
การใช้โปรแกรม Hyperterminal

1. เปิดโปรแกรม Hyperterminal และทำการตั้งชื่อ



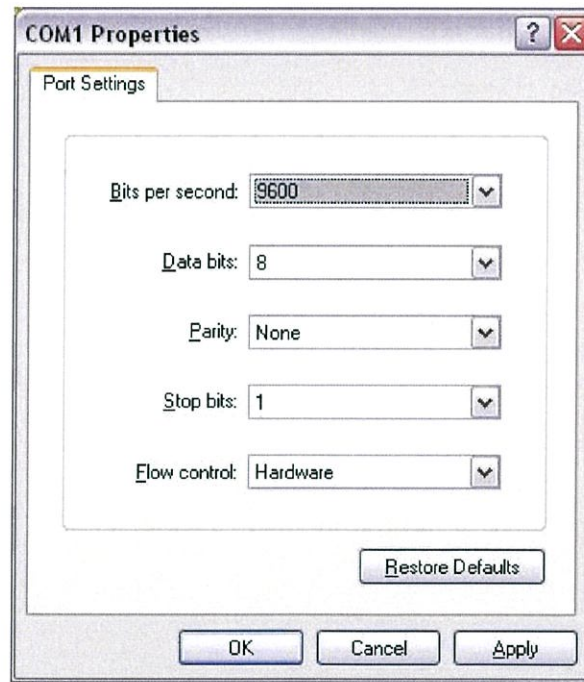
รูป ค-10 การใช้โปรแกรม Hyperterminal

1. เลือก COM PORT ที่ต้องการ



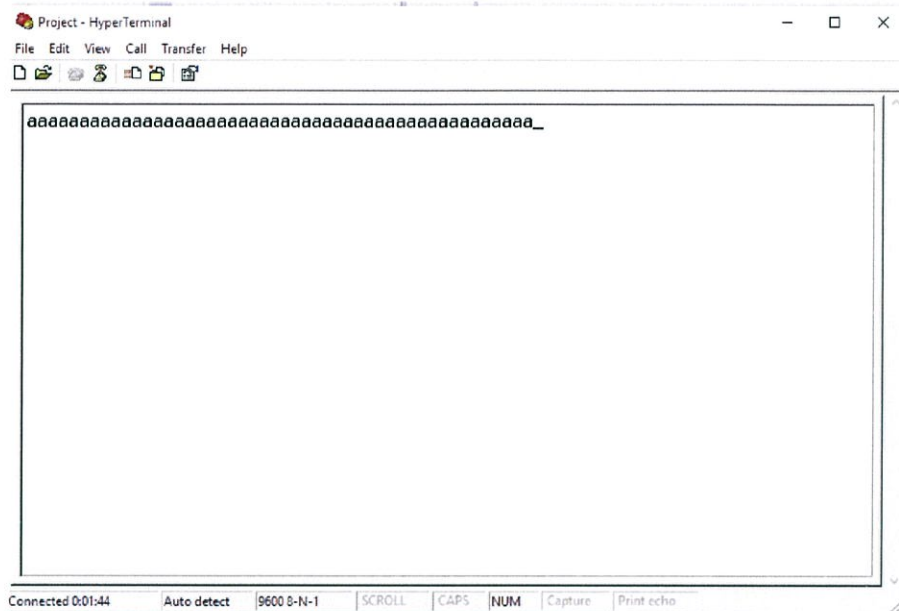
รูป ค-11 การใช้โปรแกรม Hyperterminal (ต่อ)

2. ตั้งค่าต่างๆตามต้องการ โดยความเร็วของการส่งข้อมูลปกติจะอยู่ที่ 9600 bits per second



รูป ค-12 การใช้โปรแกรม Hyperterminal (ต่อ)

- เมื่อทำการตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่หน้าต่างโปรแกรม Hyperterminal ดังรูป ซึ่งเมื่อมีการส่งคำสั่งไปยังโปรแกรม Hyperterminal คำที่ส่งมาจะปรากฏบนหน้าต่างโปรแกรม



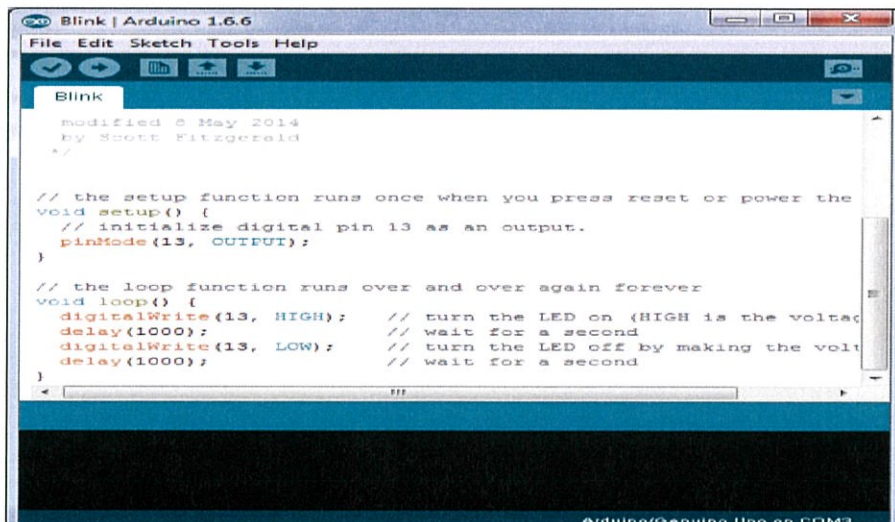
รูป ค-13 การใช้โปรแกรม Hyperterminal(ต่อ)

ค.4 Arduino IDE

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนโค้ดโปรแกรมที่เราต้องการเพื่อ upload ไปยังบอร์ด Arduino

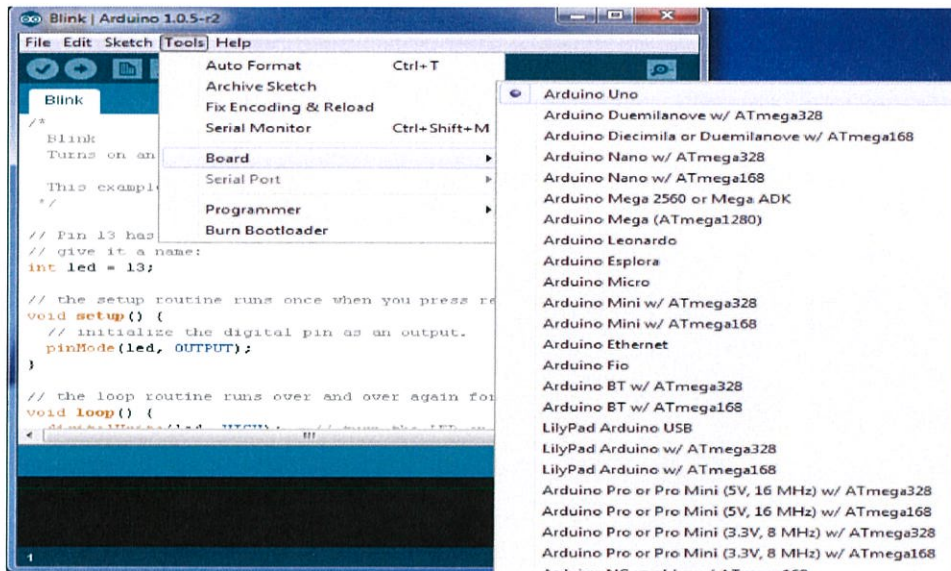
การใช้โปรแกรม Arduino IDE

- เปิดโปรแกรม จากนั้นเขียนโค้ดโปรแกรมที่ต้องการลงไป



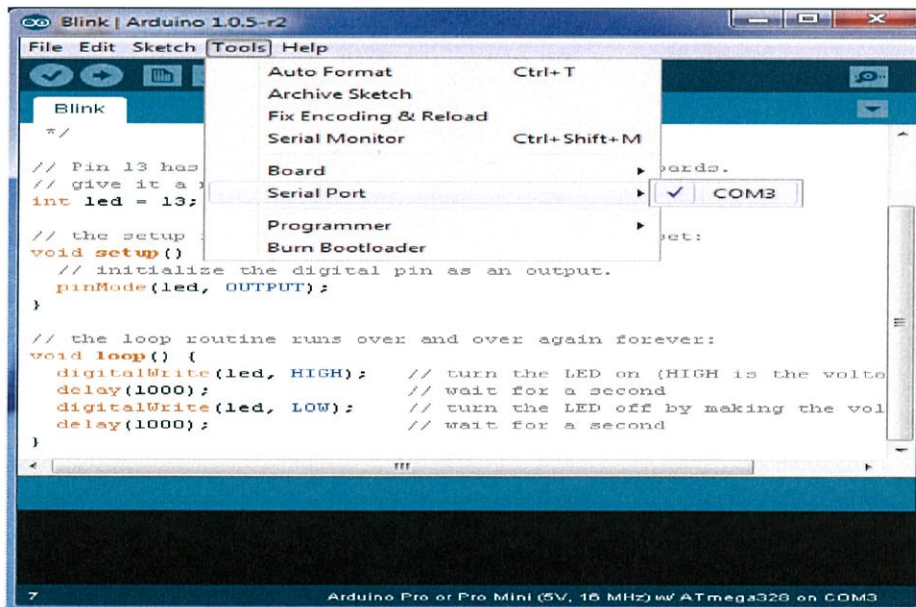
รูป ค-14 การใช้โปรแกรม Arduino

2. หลังจากที่ได้เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้ โดยคลิกที่ Tools > Board > เลือกรุ่นของบอร์ดที่ใช้งาน



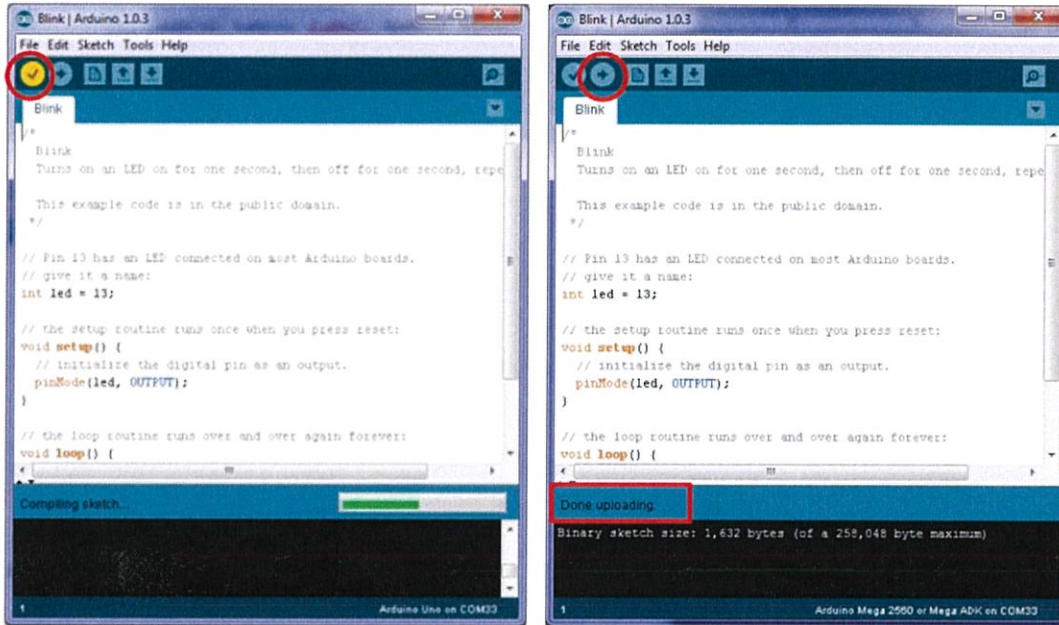
รูป ค-15 การใช้โปรแกรม Arduino (ต่อ)

3. จากนั้นเลือกหมายเลข Com port ที่ต้องการต่อบอร์ด Arduino โดยคลิกที่ Tools > Serial port > เลือกหมายเลข Com port



รูป ค-16 การใช้โปรแกรม Arduino (ต่อ)

- กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที



กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง
และ Compile โค้ดโปรแกรม

Upload โค้ดโปรแกรม

รูป ค-17 การใช้โปรแกรม Arduino (ต่อ)

ประวัติผู้เขียน



นาย จารุเดช วรสิทธิ์

วัน เดือน ปีเกิด 12 เมษายน พ.ศ. 2537

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน
ภูเก็ตวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558 จะสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย เจษฎา กรรณิกา

วัน เดือน ปีเกิด 3 ธันวาคม พ.ศ. 2536

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน
พิริยาลัยจังหวัดแพร่

ปีการศึกษา 2558 จะสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย ชวนากร เขาวนันทกุล

วัน เดือน ปีเกิด 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2537

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน
จุฬารัตนราชวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558 จะสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง