สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาระบบ MACHINE VISION เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี

A STUDY OF MACHINE VISION SYSTEM TO INVESTIGATE 3 BAND COLOR RESISTOR DEVICES

T123383

นายเกรียงไกร แดงโสภี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 123383
วัน,เดือน,ปี - 8 พ.ย. 2555

b 12422383
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา พ.ศ. 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาระบบ MACHINE VISION เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี

นายเกรียงไกร แดงโสภี

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา พ.ศ. 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF MACHINE VISION SYSTEM TO INVESTIGATE 3 BAND COLOR RESISTOR DEVICES

MR. KRAINGKRAI DANGSOPHI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การศึกษาระบบ Machine Vision เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี
นักศึกษา	นายเกรียงไกร แดงโสภี
หลักสูตร	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.กาจปัญญา สุวรรณสุโข

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
อ.กีรยุทธ์ ศรีนวลจันทร์	
อ. ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
อ.สุรชาติ กมลดิลก	
ผศ.ดร.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ	
อ.กาจปัญญา สุวรรณสุโข	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การศึกษาระบบ Machine Vision เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี
นักศึกษา	นายเกรียงไกร แดงโสภี
หลักสูตร	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.ภาจปัญญา สุวรรณสุโข

บทคัดย่อ

การศึกษาระบบ Machine Vision เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี โดยใช้หลักการ Color Pattern Matching ของโปรแกรม LabVIEW เพื่อจำแนก คัดกรอง หรือตรวจสอบชนิดของตัวต้านทาน ซึ่งแบ่งการทำงานเป็น 4 ส่วนได้แก่ 1. ส่วนการจัดชุดอุปกรณ์และจัดความสม่ำเสมอของแสง 2. ส่วนการการเก็บภาพ Template 3. ส่วนเก็บภาพตัวอย่าง และ 4. ส่วน Color Matching ทำการเปรียบเทียบและ ระบุชนิดของภาพตัวอย่างกับภาพ Template และส่งผลที่ได้มาเก็บไว้ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง และคำนวนค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดขึ้นจากการใช้กล้องความละเอียดต่ำ และความไม่สม่ำเสมอของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	A Study of Machine Vision system to Investigate 3 Band Color Resistor devices
Name	Mr.Kraingkrai Dangsophi
Curriculum	Bachelor of Science
Program	Applied Physics
Academic	2010
Advisor	Assistant Professor Dr. Pattareeya Kittidachacharn
Co-Advisor	Mr.Kajpanya Suwansuko

ABSTRACT

A Machine vision was study. The studied is investigated 3 band color resistor by color pattern matching concept. Additional, the algorithm was developed by LabVIEW programming. This study consists of four parts : setting up the machine vision system, creating of template image, restoring sample image and color matching of the template and sample image. The results show that the system contains significant error. This is become of the low resolution of the camera and non-uniformity of light source.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเรื่อง “การศึกษาระบบ Machine Vision เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี” ประกอบการศึกษาวิชาโครงงานพิเศษนี้ สำเร็จลุล่วงได้โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ อ.กาจปัญญา สุวรรณสุโข และคณะอาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและ ให้คำแนะนำในการศึกษาโครงงานพิเศษตลอดจนแนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ที่ได้ให้การสนับสนุนตลอดจนคอยให้ความช่วยเหลือทุกสิ่งทุกอย่างทางด้านการศึกษามาโดยตลอด จนโครงงานพิเศษฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

เกรียงไกร แดงโสภี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	4
2.1 อิมเมจเซ็นเซอร์	4
2.2 อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งมิติ	5
2.3 อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดสองมิติ	5
2.4 อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD	6
2.4.1 ส่วนที่ไวต่อแสง	6
2.4.2 ส่วนที่ทำหน้าที่โอนสัญญาณ	6
2.4.3 วงจรสัญญาณเอาต์พุต	7
2.5 CCD ชนิด 2 มิติ	9
2.6 การทำงานพื้นฐานของ CCD และวงจรใช้งาน CCD	11
2.7 เทคนิคการวัดความเข้มแสง	13
2.7.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การวัดค่าความเข้มแสง	15
2.9 ทฤษฎีสีของมันเซลล์หรือระบบสีของมันเซลล์	16
2.9.1 มิติของสีตามทฤษฎีมันเซลล์	15
2.9.2 สัญลักษณ์สีของมันเซลล์ (Munsell Notation)	20
2.10 หลักการ Matching	21
2.10.1 Color Matching and Color location	21
2.10.2 Grayscale Pattern Matching	22
2.10.3 RGB to Grayscale	22
2.11 อัลกอริธึม	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	25
3.1 การออกแบบการทดลอง	25
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	25
3.3 ชุดอุปกรณ์	26
3.4 วงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและ อภิปรายผล	29
4.1 การจัดชุดอุปกรณ์และ การจัดความสม่ำเสมอของแสง	29
4.1.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วนวัดความเข้มแสง	29
4.1.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วนวัดความเข้มแสง	30
4.1.4 Flowchart ส่วนโปรแกรมวัดความเข้มแสง	31
4.2 ส่วนการการเก็บภาพ Template	33
4.2.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template	33
4.2.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template	33
4.2.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมเก็บภาพ Template	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ส่วนเก็บภาพตัวอย่าง	35
4.3.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง	35
4.3.2 Block Diagram ของส่วนโปรแกรมเก็บภาพตัวอย่าง	36
4.3.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมเก็บภาพตัวอย่าง	37
4.3.4 ภาพตัวอย่าง	38
4.4 ส่วน Color Matching	40
4.4.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วน Matching	41
4.4.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วน Matching	41
4.4.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมส่วน Matching	42
4.4.4 Report of Matching	43
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ปัญหาที่พบและ ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2. 1 ชิฟ CCD แต่ละประเภท 4

รูปที่ 2. 2 เปรียบความแตกต่างกับของอิมเมจเซ็นเซอร์ในด้านวิธีการทำสแกนนิ่งโดย 6
(ก) วิธีแอดเดรส (address) (ข) วิธีซิกแนลทรานส์เฟอร์ (signal transfer)

รูปที่ 2. 3 หลักการถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนใน CCD 8

รูปที่ 2. 4 โครงสร้างภายในของ BCCD (Buried Channel CCD) 9

รูปที่ 2. 5 หลักการทำงานของ FDA แสดงในรูปเอาต์พุตของ CCD 9

รูปที่ 2. 6 โครงสร้างของ TF-CCD (Frame-Transfer CCD) 10

รูปที่ 2. 7 โครงสร้างของ IL-CCD (Interline CCD) 10

รูปที่ 2. 8 โครงสร้างภายในของ CCD ชนิดโอเวอร์โฟลว์ตามแนวตั้ง 11

รูปที่ 2. 9 หลักการทำงานพื้นฐานของอิมเมจเซนต์เซอร์ชนิดแอดเดรส 12

รูปที่ 2.10 การส่องสว่างของการเก็บข้อมูลภาพ 14

รูปที่ 2.11 วงจรการปรับความเข้มแสง 15

รูปที่ 2.12 แกนสีในระบบมันเซลล์ 16

รูปที่ 2.13 วงของ Hue ในระบบมันเซลล์ 17

รูปที่ 2.14 ส่วนแบ่งวงสี 100 ตำแหน่งในระบบมันเซลล์ 18

รูปที่ 2.15 แสดงระดับค่าของ Value และ Chroma 19

รูปที่ 2.16 แสดงระดับค่าและตำแหน่งของ Value 19

รูปที่ 2.17 แสดงระดับค่าของ Chroma 20

รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของ Hue/Value/Chroma กับการระบุค่า 21

รูปที่ 3.1 ภาพแสดงการจัดชุดการทดลองระบบ Machine Vision 26

รูปที่ 3.2 กล้อง Web Cam 26

รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดแสง 26

รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลอง 27

รูปที่ 3.5 ภาพแสดงชุด Machine Vision ที่ใช้ในการศึกษา 27

รูปที่ 3.6 วงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 ภาพการต่อวงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC 28

รูปที่ 4.1 (ก) Front Panel ของส่วนโปรแกรมส่วนวัดความสม่ำเสมอของแสง 29

(ข) Front Panel ของส่วนโปรแกรมส่วนวัดความเข้มแสงแสดงกราฟระดับ Gray scale และ ค่า Standard deviation

รูปที่ 4.2 Block diagram ของส่วนโปรแกรมส่วนวัดความสม่ำเสมอของแสง 30

รูปที่ 4.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมส่วนวัดความสม่ำเสมอของแสง 31

รูปที่ 4.4 Front Panel ของส่วนโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template 33

รูปที่ 4.5 Block diagram ของส่วนโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template 33

รูปที่ 4.6 Flowchart ส่วนโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template 34

รูปที่ 4.7 Front Panel ของส่วนโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง 35

รูปที่ 4.8 Block diagram ของส่วนโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง 36

รูปที่ 4.9 Flowchart ส่วนโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง 37

รูปที่ 4.10 จำลองการวางตัวต้านทาน S01 10 Ohm จำนวน 5 ตัว 38

รูปที่ 4.11 จำลองการวางตัวต้านทาน S02 60 Ohm จำนวน 5 ตัว 38

รูปที่ 4.12 จำลองการวางตัวต้านทาน S03 300 Ohm จำนวน 5 ตัว 38

รูปที่ 4.13 จำลองการวางตัวต้านทาน S04 1k Ohm จำนวน 5 ตัว 38

รูปที่ 4.14 จำลองการวางตัวต้านทาน S05 2k Ohm จำนวน 5 ตัว 38

รูปที่ 4.15 จำลองการวางตัวต้านทาน S06 2k Ohm จำนวน 5 ตัว และ 10 k Ohm จำนวน 1 ตัว 38

รูปที่ 4.16 จำลองการวางตัวต้านทาน S07 2k Ohm จำนวน 5 ตัว 39

รูปที่ 4.17 จำลองการวางตัวต้านทาน S08 2k Ohm จำนวน 5 ตัว 39

รูปที่ 4.18 จำลองการวางตัวต้านทาน S09 2k Ohm จำนวน 5 ตัว 39

รูปที่ 4.19 จำลองการวางตัวต้านทาน S10 3k Ohm จำนวน 5 ตัว 39

รูปที่ 4.20 จำลองการวางตัวต้านทาน S11 3k Ohm จำนวน 5 ตัว 39

รูปที่ 4.21 จำลองการวางตัวต้านทาน S12 10k Ohm จำนวน 5 ตัว 39

รูปที่ 4.22 จำลองการวางตัวต้านทาน S13 10k Ohm จำนวน 5 ตัว 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.23 จำลองการวางตัวต้านทาน S14 20k Ohm จำนวน 5 ตัว 40

รูปที่ 4.24 จำลองการวางตัวต้านทาน S15 1M Ohm จำนวน 5 ตัว 40

รูปที่ 4.25 Front Panel ของส่วนโปรแกรมส่วน Matching 41

รูปที่ 4.26 Block diagram ของส่วนโปรแกรมส่วน Matching 41

รูปที่ 4.27 Flowchart ส่วนโปรแกรมส่วน Matching 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 การจัดระยะห่างที่ดีที่สุดของชุดทดลอง 30

ตารางที่ 4.2 ค่า Standard deviation background 32

ตารางที่ 4.3 Template ที่ใช้ในการทดลอง 35

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบความเหมือนของภาพตัวอย่างกับภาพ Template 43

ตารางที่ 4.4 ต่อ แสดงผลการตรวจสอบความเหมือนของ 44
ภาพตัวอย่างกับภาพ Template

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของการ Matching 44

ตารางที่ 4.5 ต่อ เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของการ Matching 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องด้วยอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เข้ามามีบทบาทอย่างมากในประเทศไทย มีฐานการผลิตและการลงทุนอย่างกว้างขวาง ทำให้มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย ซึ่งมีผลกับการใช้ชีวิตของคนในสังคมไทยอย่างมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์มือ คอมพิวเตอร์ ตู้เย็น แอร์ พัดลม และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อื่นๆ อีกมากมาย ในระบบอุตสาหกรรมดังกล่าว กระบวนการตรวจสอบคุณภาพแยกแยะชนิดของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ที่ผลิตพร้อมกันในปริมาณมากๆ มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อลดปัญหาการปลอมปนของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือการคัดแยกชิ้นส่วนที่ไม่ได้คุณภาพออกไป ซึ่งกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีระบบวิเคราะห์และจำแนกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่โดยส่วนใหญ่ระบบทั้งหมดจะมาจากต่างประเทศซึ่งเป็นระบบขนาดใหญ่และติดตั้งมากับเครื่องจักรเท่านั้น อีกทั้งยังมีราคาแพง ตลอดจนการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงยังต้องจ้างชาวต่างชาติอีกด้วย จากปัญหาข้างต้น จึงเป็นที่มาของโครงงานวิจัยนี้ ในการที่จะพัฒนาระบบจำแนกตัวต้านทานขึ้นมา โดยอาศัยหลักการทางแสง การมองเห็น และคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมโยงทั้งสามส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งมีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า การมองเห็นเชิงกล หรือ Machine Vision โดยมีหลักการทำงานทั่วไปดังนี้ เมื่อแสงตกกระทบวัตถุ แสงสะท้อนหรือทะลุผ่านจะมีสัญญาณที่แตกต่างกันที่แต่ละจุดบนพื้นผิว สัญญาณดังกล่าวจะตกกระทบลงบน กล้องที่มีพื้นที่รับแสง สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้านี้ จะถูกนำเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ภาพ (image -processing) เพื่อจำแนก คัดกรอง หรือ ตรวจสอบคุณภาพ ของตัวต้านทานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย

ศึกษาและพัฒนาระบบ Machine Vision ในการจำแนกตัวต้านทานแบบ 3 แถบสี 1 แถบความคลาดเคลื่อน ขนาด ¼ w

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาระบบ Machine Vision ที่ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงขาวที่สามารถปรับความเข้มแสงได้ กล้อง Web Cam และ คอมพิวเตอร์ โดยทำการจัดแสงให้ตกกระทบลงบนพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ ใช้กล้องเป็นตัวบันทึกภาพ และภาพที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อทำการจำแนกชนิดของตัวต้านทานแบบสามแถบสี หนึ่งแถบความคลาดเคลื่อน

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการทำงาน						
	ก.ค. 53	ส.ค. 53	ก.ย. 53	ต.ค. 53	พ.ย. 53	ธ.ค. 53	ม.ค. 54
1. ศึกษาระบบการทำงานของกล้อง CCD	→						
2. ศึกษาการทำงานและการพัฒนาโปรแกรม โดยใช้โปรแกรม LabVIEW	→	→	→				
3. จัดซื้อและประกอบชุดทดสอบระบบ Machine Vision		→	→				
4. ทำการปรับและทดสอบชุดอุปกรณ์		→	→				
5. ทำการเก็บร่วมรวมข้อมูลและทำ Template ตัวต้านทาน		→	→				
6. พัฒนาระบบวิเคราะห์ข้อมูลและทดสอบโปรแกรม				→	→	→	
7. ตรวจสอบระบบชุดอุปกรณ์และโปรแกรม						→	→
8. วิเคราะห์และสรุปผล							→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 มีระบบ Machine Vision ที่มีคุณภาพดี

1.5.2 สามารถใช้เป็นชุดสาธิตในการเรียนการสอนได้

1.5.3 มีองค์ความรู้เกิดขึ้น สามารถนำไปต่อยอดได้ ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

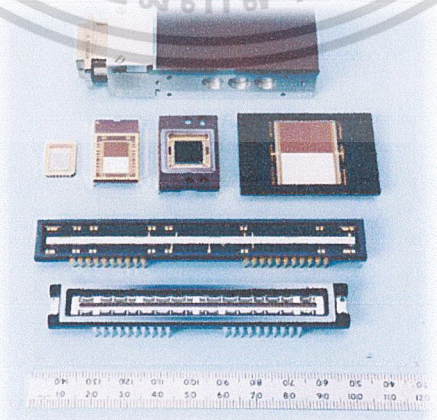
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 อิมเมจเซ็นเซอร์

อิมเมจเซ็นเซอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตโดยอาศัยเทคโนโลยีของการผลิตวงจรรวมขนาดใหญ่ (VLSI) มีความสามารถในการถ่ายภาพสัญญาณโทรทัศน์ได้ โดยในอิมเมจเซ็นเซอร์หนึ่งตัวนั้นมีความสามารถในการเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า มีความสามารถใน**การเก็บสัญญาณ (storage)** มีความสามารถในการทำสแกนนิ่งและมีความสามารถในการส่งสัญญาณไฟฟ้าออกสู่ภายนอกได้ในตัว จุดภาพ (picture element) แต่ละจุดในอิมเมจเซ็นเซอร์นั้นถูกกำหนดตำแหน่งตายตัว ดังนั้นอิมเมจเซ็นเซอร์จึงให้ภาพที่เหมือนของจริง มีความบิดเบี้ยวของภาพน้อยมาก

อิมเมจเซ็นเซอร์ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกที่สถาบันวิจัยของบริษัทฟิลิปส์ และสถาบันวิจัยของเบลล์ สิ่งประดิษฐ์อิมเมจเซ็นเซอร์มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ทนทานต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมยาก ๆ ได้ดี เช่น ขณะมีการสั่นหรือทนต่อแรงกระแทก ใช้แรงศักย์ไฟฟ้าต่ำ และกินกำลังไฟฟ้าต่ำ การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของอิมเมจเซ็นเซอร์ดีขึ้นตามลำดับ และปัจจุบันสามารถถ่ายภาพได้ละเอียดและชัดเจนพอ ๆ กับหลอดถ่ายภาพอิมเมจชนิดสุญญากาศ

ถ้าแบ่งอิมเมจเซ็นเซอร์ออกตามชนิดของการจัดเรียงจุดภาพจะมี 2 ชนิดใหญ่ คือชนิดหนึ่งมิติและชนิดสองมิติ และถ้าจะแบ่งตามวิธีการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าหรอกวิธีแกน



รูปที่ 2.1 ชิฟ CCD แต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งมิติ

มีการใช้เป็นหัวถ่ายภาพอิมเมจของต้นฉบับภายในเครื่องส่งโทรสาร ใช้ในเครื่องอ่านกราฟฟิกและอ่านตัวอักษร และยังสามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ในงานวัดคุมอุตสาหกรรม เช่น วัดขนาด รูปร่าง ความหนา และตำแหน่งของวัสดุโดยมีการสัมผัสแตะต้องโดยตรง

2.3. อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดสองมิติ

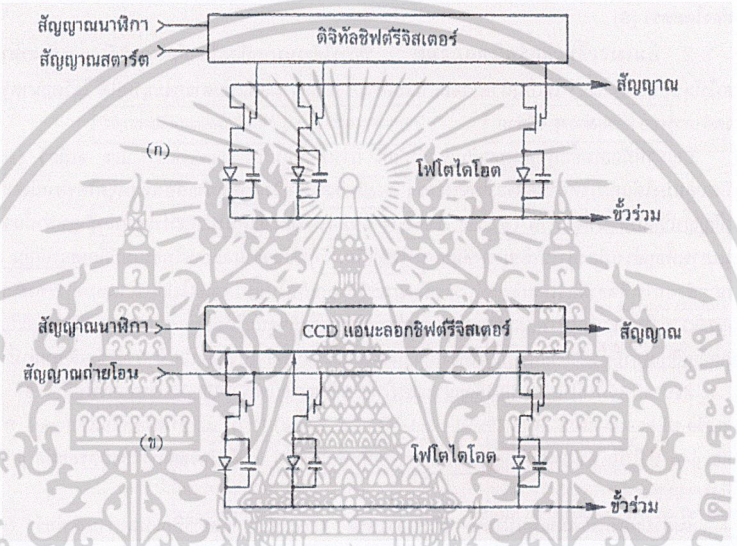
มีการใช้งานมากที่สุดในกล้องถ่ายวิดีโอและสามารถใช้เป็นตาในหุ่นยนต์ (robot) ใช้เป็นตัวตรวจสอบสินค้าในระบบการผลิตแทนตามนุษย์ได้ ใช้วัดขนาดรูปร่างและจดจำภาพของวัสดุต่างๆได้ด้วย ปัญหาที่มักเกิดกับอิมเมจเซ็นเซอร์ได้แก่ การเกิดบลูมมิง (bloomming) และ สเมียร์ (smear) การเกิดบลูมมิงได้แก่ การที่มีแสงสว่างจ้ามาก ๆ เกินขีดกำกัดวิ่งเข้าสู่หน้ากล้องเพียงจุดใดจุดหนึ่งจะทำให้เกิดประจุสัญญาณที่เกิดขึ้นที่จุดภาพ (picture element) นั้นมีจำนวนมากเกินไปและประจุส่วนเกินเหล่านั้นจะไหลไปสู่จุดภาพที่อยู่ข้างเคียงทำให้เกิดภาพที่มีขนาดใหญ่เกินความเป็นจริงและภาพโดยรวมมีลักษณะเลือนไม่ชัดเจน ส่วนการเกิดสเมียร์ ได้แก่ การที่ประจุสัญญาณที่มากเกินไปนั้นไหลเข้าสู่บริเวณของการทำสแกนนิง (scanning) ทำให้เกิดเป็นภาพแถบสีขาว ๆ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีความพยายามหาวิธีลดและป้องกันการเกิดข้อเสีย เหล่านี้ด้วยวิธีปรับปรุงโครงสร้างภายในและการออกแบบวงจรไฟฟ้ากำจัดข้อเสียเหล่านี้

สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในอิมเมจเซ็นเซอร์นั้นมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดรอยต่อแบบ MOS (metel-oxide-semiconductor) และชนิดรอยต่อแบบ p-n การใช้รอยต่อแบบ p-n ทำให้ได้ค่าดิเทกทิวิตีสูงและไวต่อแสงคลื่นสั้นได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้รอยต่อชนิด p-n มากที่สุดในส่วนของการทำสแกนนิงนั้น มีวิธีแอดเดรส (address) และวิธีซิกแนลทรานส์ฟอร์ (signal transfer) ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งด้านลักษณะโครงสร้างและวิธีการทำแซมปริง (sampling) รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างข้อแตกต่างของการทำสแกนในกรณีอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งมิติ ในการทำสแกนนิงแบบแอดเดรสมีการใช้อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด MOS มากที่สุด สัญญาณพัลส์ที่ถูกส่งออกมาอย่างต่อเนื่องจากชีฟต์รีจิสเตอร์ (shift register ทำจาก MOS-FET) จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำหน้าที่เป็นแอดเดรสสวิตซ์ (address Switch) โดยถูกป้อนเข้าสู่โฟโตไดโอดซึ่งจะเป็นเหตุให้ประจุที่เก็บอยู่ในโฟโตไดโอดต้องไหลออกไปสู่เส้นสัญญาณร่วม (common signal line)

ส่วนวิธีการทำสแกนนิงแบบซิกแนลทรานส์เฟอร์นั้น มีการใช้อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD (charge cupped device) มากที่สุด คลื่นทรานส์เฟอร์พลส์ (Tranter pulse) จะถูกส่งไปสู่โฟโตไดโอดทุกตัวพร้อม ๆ กันซึ่งทำให้ประจุสัญญาณในโฟโตไดโอดเคลื่อนย้ายเข้าไปสู่อนาลอกชิฟต์รีจิสเตอร์ (analog shift register) หมดทุกตัวพร้อม ๆ กัน จากนั้นคลื่นพัลส์นาฬิกา (clock Pulse) จะเป็นตัวส่งให้ประจุแต่ละตัวไหลออกสู่เส้นสัญญาณ(signal line) ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 เปรียบความแตกต่างกับของอิมเมจเซ็นเซอร์ในด้านวิธีการทำสแกนนิงโดย

(ก) วิธีแดดเดรส (address) (ข) วิธีซิกแนลทรานส์เฟอร์ (signal transfer)

2.4 อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD

อิมมเจเซ็นเซอร์ชนิด CCD (charge-coupled device) เป็นอุปกรณ์ถ่ายสัญญาณโทรทัศน์และวิดีโอที่กระทัดรัดและนิยมใช้กันมากที่สุดชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนสำคัญใหญ่ ๆ 3 ส่วนคือ

2.4.1 ส่วนที่ไวต่อแสง (storage) ซึ่งอาจเป็นรอยต่อ P-N ของโฟโตไดโอดหรือรอยต่อของ MOS

2.4.2 ส่วนที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนสัญญาณ (transfer) ซึ่งผลิตจากอนาลอกชิฟต์รีจิสเตอร์ (analog shift register)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 วงจรสัญญาณเอาต์พุต

ถ้าแบ่งอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD ออกตามชนิดของการจัดเรียง (arrays) ของจุดภาพ จะแบ่งได้ เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งมิติ และชนิดสองมิติ ในชนิดสองมิติยังแบ่งออกตามวิธีการถ่ายโอน (transfer) ข้อมูลได้อีก 2 ชนิดคือ ชนิด Frame transfer CCD (FT-CCD) และชนิด Inter Line Transfer CCD (IL-CCD)

CCD เป็นสิ่งประดิษฐ์แบบแอดทีฟ ที่ทำงานโดยอาศัยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดชั้นปลอดพาหะซึ่งจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนหลุมบ่อของศักย์ไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เพื่อเก็บพาหะและอาศัยสัญญาณนาฬิกาพัลส์เพื่อช่วยให้บ่อศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการเคลื่อนย้ายตำแหน่งไปตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุไฟฟ้า รูปที่ 2.2 แสดงหลักการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าใน CCD บนแผ่นฐานสารกึ่งตัวนำมีชั้นฉนวนของ SiO_2 เคลือบอยู่ และมีขั้วถ่ายโอนจำนวนมากเคลือบอยู่ห่างกับเป็นระยะ ๆ ขั้นตอนการไหลถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนและการทำงานของ CCD อธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอน T1 เมื่อป้อนแรงดันบวก (เช่น 10 V) เข้าสู่ขั้วถ่ายโอนจะทำให้เกิดบ่อศักย์ไฟฟ้าลึกลงไปที่ใต้ขั้วนั้น และเมื่อมีแสงอินพุตเข้ามากระทบ CCD จะทำให้เกิดพาหะโฟโตและพาหะโฟโตเหล่านี้ก็จะถูกเก็บอยู่ในบ่อศักย์ไฟฟ้าลึก ๆ นั้น

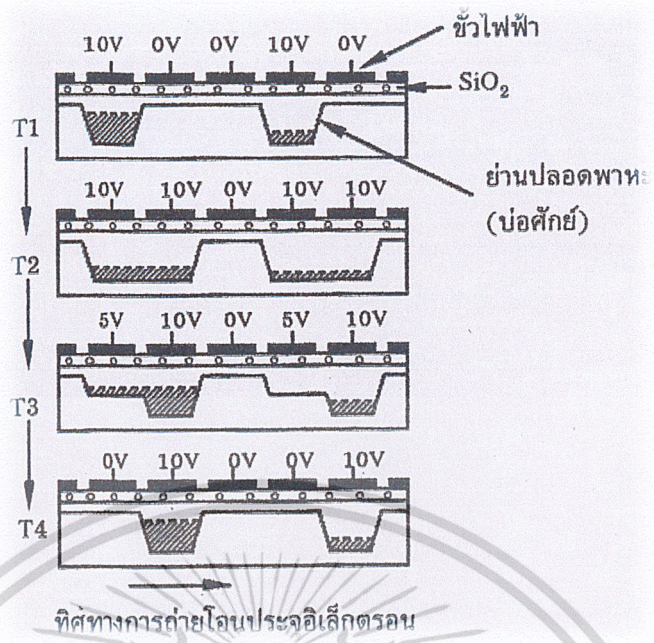
ขั้นตอน T2 ใช้สัญญาณพัลส์ (เช่น 10 V) ป้อนไปที่ขั้วถ่ายโอนที่อยู่ข้าง ๆ จะทำให้บ่อกว้างขึ้นและอิเล็กตรอนก็จะไหลแผ่วงกว้างขึ้น

ขั้นตอน T3 ขนาดแรงดันที่ขั้วเดิมให้เหลือประมาณ 5 V จะทำให้อิเล็กตรอนไหลลงไปสู่บ่อข้างเคียงที่มีแรงดัน 10V

ขั้นตอน T4 เมื่อตัดแรงดันที่ขั้วเดิมออกหมด จะทำให้อิเล็กตรอนทั้งหมดขยับไปอยู่ในบ่อข้างเคียง

ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นและการใช้ทรานส์เฟอร์พัลส์ป้อนเข้าสู่ขั้วถ่ายโอนตามลำดับที่ละขั้ว เช่นจากขั้วด้านซ้ายไปสู่ขั้วด้านขวา จะทำให้อิเล็กตรอนถูกเคลื่อนย้ายไปตามบ่อศักย์ไฟฟ้าใน CCD จากซ้ายไปขวาและในที่สุดอิเล็กตรอน (สัญญาณอิมเมจ) ก็จะไหลออกไปสู่วงจรภายนอกเป็นสัญญาณเอาต์พุตของอิมเมจได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

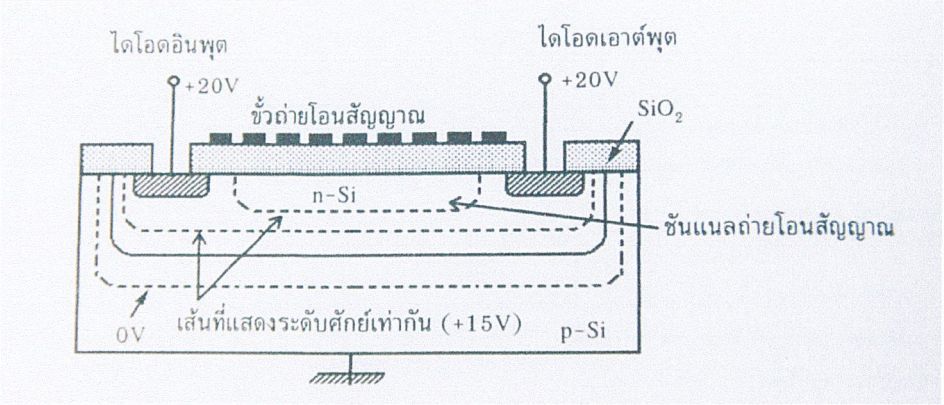


รูปที่ 2.3 หลักการถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนใน CCD

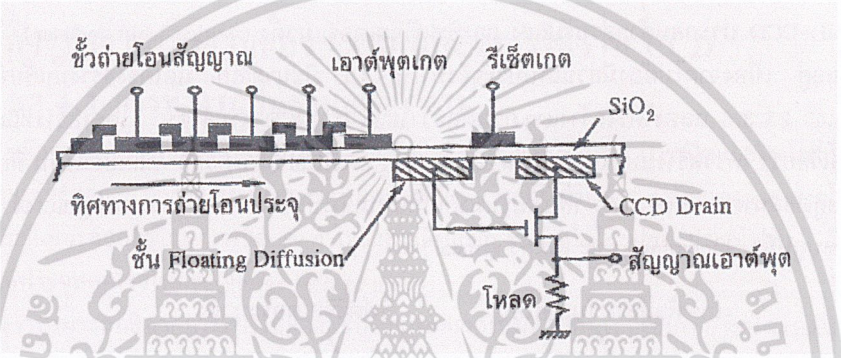
CCD มีโครงสร้างที่ง่าย แต่เนื่องจากการทำงานนั้นจำเป็นจะต้องมีการถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นปริมาณอนkลอกให้ไหลไปตามแผ่นฐานสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความยากลำบากจึงอยู่ที่ว่าทำอย่างไรจึงจะสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้สมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนประจุที่ดีที่สุดจึงได้มีการออกแบบให้ได้ความยาวของการถ่ายโอนมีขนาดสั้นที่สุดเพื่อให้พาหะข้างน้อยเสียเวลาวิ่งน้อยที่สุด และจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างของขั้วถ่ายโอนให้สนามไฟฟ้าจากขั้วข้างเคียงช่วยกันถ่ายโอนพาหะให้ได้ดีที่สุด

CCD ที่เป็นชนิดที่มีชันแนลที่ผิว (surface channel CCD) นิยมใช้อักษรย่อว่า SCCD เพราะประจุสัญญาณนั้นถูกถ่ายโอนไปตามผิวที่รอยต่อ ส่วนชนิดที่มีชันแนลฝัง (buried channel CCD) นิยมใช้อักษรย่อว่า BCCD เป็นชนิดที่ใช้การถ่ายโอนประจุสัญญาณไปตามชันแนลที่อยู่ลึกลงปะจากผิวซึ่งมีสภาพของการนำไฟฟ้าที่แตกต่างไปจากแผ่นฐาน เช่น แผ่นฐานเป็นชนิด p แต่ชันแนลเป็นชนิด n ในส่วนที่ใช้รับแสง CCD นั้น ในอดีตเคยใช้โครงสร้าง MOS แต่ปัจจุบันนิยมใช้เป็นรอยต่อ p-n ของโฟโตไดโอด เพราะไวต่อแสงมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งไวต่อแสงความยาวคลื่นสั้นๆได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายในของ BCCD (Buried Channel CCD)

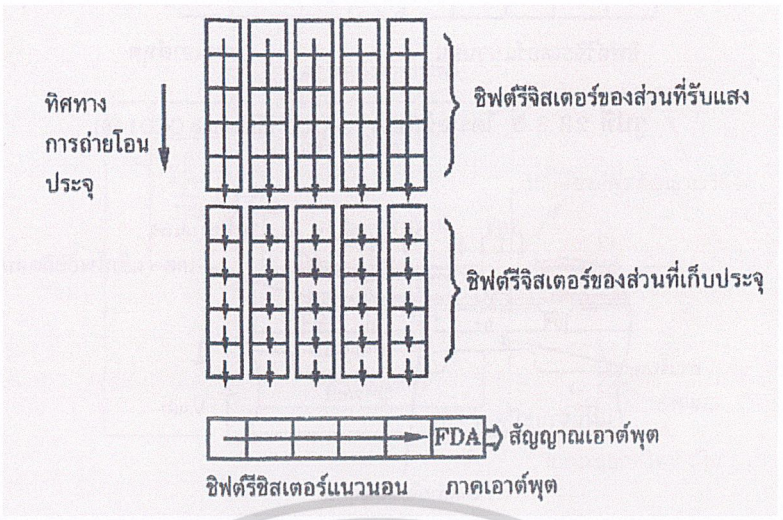


รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ FDA แสดงในรูปเอาต์พุตของ CCD

2.5 CCD ชนิด 2 มิติ

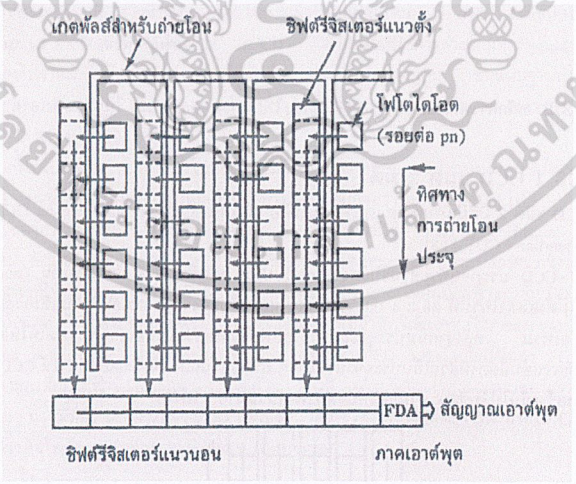
CCD ชนิด 2 มิติมีหลายชนิด และที่นิยมใช้คือ ชนิด FT-CCD (Frame-Transfer CCD) และชนิด IL-CCD (Interline CCD) FT-CCD ประกอบส่วนรับแสง ส่วนเก็บประจุ และชิฟต์รีจิสเตอร์แนวนอน ประจุที่เก็บอยู่ในส่วนับแสงจะถูกถ่ายโอนในแนวดิ่งลงสู่ส่วนเก็บประจุแบบเฟรมต่อเฟรม หลังจากนั้นประจุจะถูกส่งด้วยชิฟต์รีจิสเตอร์แนวนอนทีละบรรทัดให้ไหลออกไปสู่ส่วนเอาต์พุต วิธีการเช่นนี้ต้องมีส่วนเก็บประจุจำนวนเท่า ๆ กับจำนวนรับแสง จึงมีข้อเสียที่ทำให้ CCD มีขนาดใหญ่แต่ด้านโครงสร้างนั้นไม่ซับซ้อน จึงผลิตให้มีจุดภาพจำนวนมาก ๆ ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



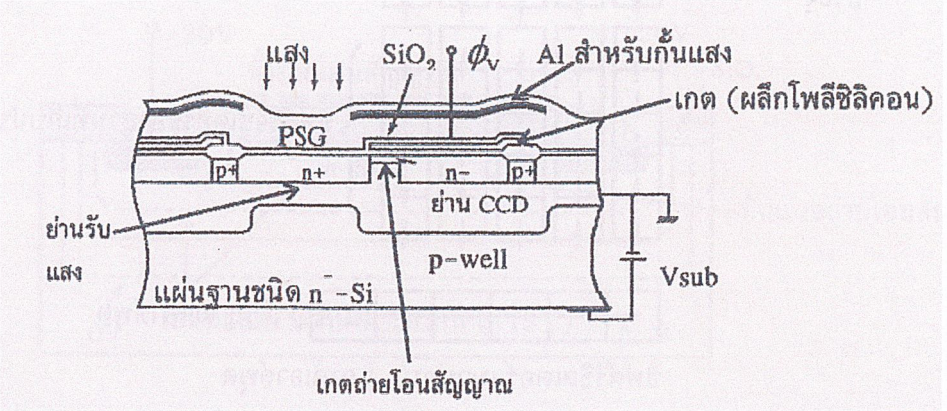
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ TF-CCD (Frame-Transfer CCD)

IL-CCD ประกอบด้วยส่วนรับแสง และชิฟต์รีจิสเตอร์แนวตั้ง (vertical shift register) โดยมีสวิตช์ FET คั่นอยู่ เนื่องจากไม่ต้องมีส่วนเก็บประจุจึงทำให้ CCD มีขนาดเล็ก แต่โครงสร้างนั้นซับซ้อน รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างและภาพตัดขวางของ IL-CCD ตามลำดับ โครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.7 นี้เรียกว่าโครงสร้างแบบโอเวอร์โฟลล์ตามแนวตั้ง มีลักษณะเด่น คือมีการสร้างบ่อสำหรับดูดกลืนพาหะ (p-well) ที่มีจำนวนมากเกินความจำเป็นให้หมดไป เช่นตอนถูกแสงจ้ามากทำให้ลดการเกิดบลูมมิง (blooming) และสเมียร์ได้ (smear)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ IL-CCD (Interline CCD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในของ CCD ชนิดโอเวอร์โฟลว์ตามแนวตั้ง

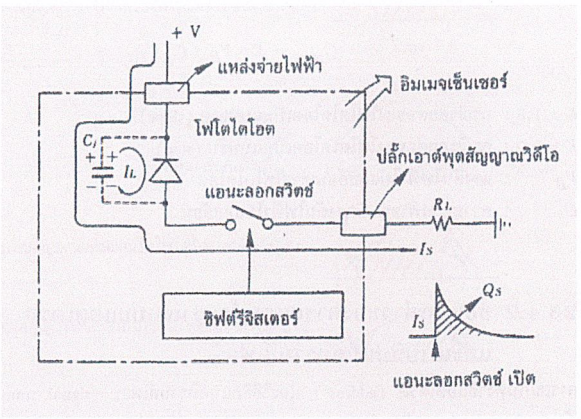
2.6 การทำงานพื้นฐานของ CCD และวงจรใช้งาน CCD

หลักการทำงานพื้นฐานของส่วนผลิตพาหะโฟโตใน CCD ได้แก่ การเปิดและปิดโฟโตไดโอดด้วยสวิตซ์แบบอนาลอก ถ้าสวิตซ์อนาลอกอยู่ในสภาพเปิด จะทำให้มีการอ่านสัญญาณจากโฟโตไดโอดและถ้าสวิตซ์อนาลอกอยู่ในสภาพปิด จะทำให้ไม่มีการเก็บสัญญาณแสงไว้ในรูปของไฟฟ้า วิธีนี้เรียกว่า วิธีประจุสตอเรจโหมด (Charge storage mod)

สามารถอธิบายการทำงานของวิธีการประจุสตอเรจโหมดในอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดแอดเดรสได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.8 ในรูปนี้แสดงการทำงานวัดสัญญาณ 1 บิต โดยเริ่มแรกโฟโตไดโอดกำลังถูกไบแอสแบบย้อนด้วยแรงดันไฟฟ้า +V ตัวเก็บประจุ Cj ที่ต่อขนานอยู่กับโฟโตไดโอดนั้นเกิดจากความจุไฟฟ้าที่รอยต่อในตัวของโฟโตไดโอดเองและ ทำหน้าที่สำคัญมากในการประจุสตอเจรโหมดที่กำลังกล่าวดังนี้ R_L ซึ่งต่ออยู่กับปลั๊กวิดีโอเอาต?พุตคือความต้านทานของโหลดและใช้เป็นตัวอ่านสัญญาณเอาต์พุต

ถ้าสวิตซ์อนาลอกอยู่ในสภาพเปิดจะทำให้ Cj เก็บประจุเต็มที่ (Qm) (หมายเหตุ : สวิตซ์อนาลอกต้องอยู่ในสภาพเปิดอยู่นานจนทำให้ Cj เก็บประจุเต็มและกระแสไฟฟ้า Is ไหลจนหยุดไหล) โดยปกติ Cj มีหน่ายเป็นน้อยกว่า 1 pF เมื่อ Cj เก็บประจุเต็นแล้ว ต่อจากนั้นสวิตซ์อนาลอกจะเปลี่ยนสภาพเป็นปิดในสภาพเช่นนี้ถ้าแสงตกกระทบโฟโตไดโอดจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าโฟโต I_L ไหลออกจากโฟโตไดโอดกระแสไฟฟ้า I_L นี้มิได้ถูกจ่ายมากจากแหล่งกำเกิดแรงดันไฟฟ้า (V+) แต่ถูกจ่ายมาจากการคายประจุที่เก็บอยู่ใน Cj

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานพื้นฐานของอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดแอดเดรส

ปริมาณประจุ Qs ท้ายประจุมีค่าดังนี้

$$Qs = I_L \times t$$

โดยที่ I_L กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากโฟโตไดโอด

t ช่วงเวลาเก็บประจุ (storage time) (เวลาที่นับจากการเปิดของสวิตซ์อนาลอกครั้งหนึ่งไปสู่การเปิดอีกครั้งหนึ่ง)

ต่อจากนั้นถ้าสวิตซ์อนาลอกเปลี่ยนสภาพเป็นเปิดอีก จะทำให้ Cj เริ่มเก็บประจุใหม่จนถึงค่า Q_M เช่นเดิม ปริมาณการเก็บประจุที่ถูกคายออกจากโฟโตไดโอดด้วยแสงก่อนหน้านี้ และกระแสไฟฟ้าจากการเก็บประจุครานี้เองที่ไหลจ่ายมาจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า (+V) และไหลต่อไปออกไปเป็นสัญญาณเอาต์พุต

รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีรูปเหมือน I_S ในรูป 2.12 ดังนั้นค่าปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้า I_S จึงผลแปรผันตรงกับปริมาณของแสงอินพุตและช่วงระยะเวลาของการเก็บประจุ

เราได้ทราบแล้วว่า กระแสไฟฟ้าโฟโต I_L เกิดจากการคายประจุที่อยู่ใน Cj ในขณะที่มีแสง ดั้งนั้นจึงต้องระวังว่าถ้าแสงอินพุตมีความเข้มมากหรือเวลาการคายประจุนานเกินไปจะทำให้ Cj คายประจุออกจนหมด ถ้าเป็นเช่นนี้ แม้จะมีแสงอินพุตเข้ามาใหม่ก็จะไม่เกิดสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นในการทำงานแบบประจุสตอเรจโหมดนี้ ปริมาณสัญญาณสูงสุดที่จะส่งเอาต์พุตออกมาได้จึงมีขีดจำกัด เราเรียกปริมาณประจุสูงสุดที่จะส่งป็นเอาต์พุตออกมาได้ว่า **ประจุอิ่มตัว** (saturated charge :Q_{max}) และมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{max} = K \times V_B \times Cj$$

โดยที่ K = 1.5 : กรณีรอยต่อของโฟโตไดโอดเป็นแบบลาด (slope)

K = 2.0 : กรณีรอยต่อของโฟโตไดโอดเป็นแบบขั้น (step)

V_B = : แรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนเข้าสู่โฟโตไดโอด

Cj = : ความจุไฟฟ้าขณะมีแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อน

2.7 เทคนิคการวัดความเข้มแสง

การปรับความเข้มแสงของภาพ คือการปรับความสว่างที่สะท้อนมาออกจากวัตถุ (Luminance) พบว่าความสว่างที่สะท้อนออกมาจากวัตถุมีความสัมพันธ์กับความสว่างที่กระทบต่อวัตถุ (Illumination) ดังสมการที่ (1)

$$L = \frac{\rho . E}{\pi} \qquad (1)$$

โดยที่ Luminance = L (Candela/m^2)

Illumination = E (Lux)

สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุ = ρ

2.7.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุ

วัตถุใด ๆ ที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่แตงต่างกันทำให้การมองเห็นวัตถุนั้นต่างกันด้วยเมื่อส่องแสงด้วยปริมาณเดียวกัน การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุสามารถหาได้ดังนี้ เช่นนำลักซ์มิเตอร์มาวัดความสว่างที่ผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ ได้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 300 lux จากนั้นหันลักซ์มิเตอร์เข้าหาวัตถุที่แสงตกกระทบห่างประมาณ 6 นิ้ว (ระวังไม่ให้ลักซ์มิเตอร์บังแสง) ได้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 500 lux และหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงได้ดังสมการ

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง} = \frac{\text{แสงตกกระทบ}}{\text{แสงสะท้อน}} \times 100 = \frac{300}{500} \times 100 = 60\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความสัมพันธ์ความสว่างที่กระทบต่อวัตถุ ดังสมการที่ (2)

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (2)$$

โดยที่ ความเข้มแสง = I (Candela)

ระยะทางระหว่างพื้นที่ของผิววัตถุกับตัวกำเนิดแสง = D (Meter)

พิจารณาความสัมพันธ์ของ I ดังสมการที่ (3)

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (3)$$

โดยที่ กำลังของตัวกำเนิดแสง = P (Watt)

พื้นที่ผิวของตัวกำเนิดแสง = $4\pi R^2$ (m^2)

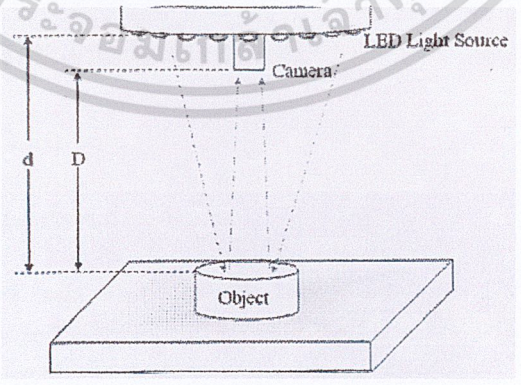
พิจารณาความสัมพันธ์ของ P ดังสมการที่ (4)

$$P = VI = i^2R \quad (4)$$

โดยที่ แรงดันที่จ่ายให้ตัวกำเนิดแสง = V (Volt)

กระแสที่จ่ายให้ตัวกำเนิดแสง = i (Ampere)

ความต้านทานของตัวกำเนิดแสง = R (Ohm)

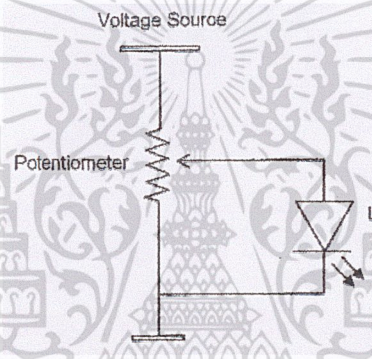


รูปที่ 2.10 การส่องสว่างของการเก็บข้อมูลภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 2.10 ระยะ D เป็นระยะโฟกัสของกล้องมีค่าคงที่, ระยะ d เป็นระยะห่างของตัวกำเนิดแสงกับวัตถุให้มีค่าคงที่เช่นกัน ทำให้การปรับความเข้มแสงทำโดยการปรับค่า d ตามสมการที่ (2) ไม่ได้ พิจารณาการปรับความเข้มแสงโดยปรับค่า I ในสมการที่ (3) พบว่า $4\pi R^2$ เป็นพื้นที่ผิวของตัวกำเนิดแสง ซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ พิจารณาปรับความเข้มแสงได้โดยปรับค่า P ในสมการที่ (4) พบว่าสามารถปรับความเข้มแสงได้โดยการปรับค่า v และค่า i ที่จ่ายให้กับตัวกำเนิดแสง

รูปที่ 2.11 เป็นรูปของวงจรการปรับความเข้มแสงโดยใช้เทคนิคของการปรับค่า i ของตัวกำเนิดแสงใช้อุปกรณ์ Potentiometer เป็นตัวปรับค่ากระแสที่จ่ายให้ตัวกำเนิดแสงและ ใช้ในการปรับความเข้มแสงสำหรับการทดลอง



รูปที่ 2.11 วงจรการปรับความเข้มแสง

2.8 การวัดค่าความเข้มแสงเชิงสัมพัทธ์

การวัดค่าความเข้มแสงเชิงสัมพัทธ์ใช้หลักการประมวลผลข้อมูลภาพ (Digital image processing) ทำการวัดโดยนำภาพที่ได้จากกล้องมาคำนวณหาค่า Gray scale value ของแต่ละ Pixels ในพื้นที่ที่สนใจของภาพ (ROI) จากนั้นจะคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของ Gray scale value ทุก Pixels ในพื้นที่ที่สนใจของภาพเพื่อใช้ประเมินความสม่ำเสมอของแสงที่ตกลงบนพื้นที่ทดลอง ซึ่งระดับความเข้มแสงจะแบ่งเป็น 0 ถึง 255 ระดับ โดยให้

ระดับ 0 แทนระดับความเข้มแสงต่ำ (ดำ)

ระดับ 255 แทนระดับความเข้มแสงสูง (ขาว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลภาพ Gray scale value ดังสมการที่ (5)

$$F(x,y) = I \qquad (5)$$

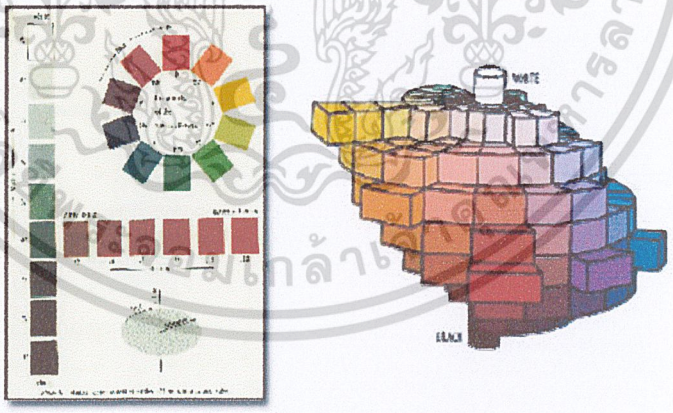
โดยที่ f = ฟังก์ชันของข้อมูลภาพ

x,y = เป็นตำแหน่งของ Pixel ในภาพ

I = ค่าระดับความเข้มแสงของ Pixel ที่ตำแหน่ง x,y ใด ๆ

2.9 ทฤษฎีสีของมันเซลล์หรือระบบสีของมันเซลล์

ทฤษฎีสีของมันเซลล์ มีลักษณะกระจาย ออกจากแกนกลาง (Axis) แกนกลางนี้ เป็นรูปทรง กระบอกตามแนวตั้ง กำหนดเป็นแกนของค่าน้ำหนักของสีกลาง (Neutral Grey Value) ส่วนบนของแกน กำหนดเป็นค่าน้ำหนักของสีขาว และส่วนล่าง ของแกน กำหนด เป็นค่าน้ำหนักของสีดำ ระหว่างสีขาวและสีดำ คือน้ำหนักของ สีเทา จากเทาแก่ไปเทาอ่อน (รายละเอียดในหัวข้อ Value) จากแกนกลาง กระจายออกโดยรอบ เป็นรัศมี วงกลม จะเป็นตำแหน่งของ Hue คือสีต่าง ๆ ประเภท Chromatic color โดย Hue จะมีจุดเริ่ม จากสีเทา ในแกนกลาง ซึ่งสีเหล่านั้นจะมีความไม่สดใส (Low Chroma) พุ่งออกมาถึงเส้นรอบวง และสีนั้นจะมีความจัด หรือความสดใสเพิ่มขึ้นจนถึงสูงสุด (High Chroma) แสดงค่าของ Hue อย่างชัดเจน (รายละเอียดในหัวข้อ Hue และ Chroma)



รูปที่ 2.12 แกนของสีในระบบ มันเซลล์

2.9.1 มิติของสีตามทฤษฎีมันเซลล์ (Munsell's Dimension of Color)

จากรูปแบบทฤษฎีสีของมันเซลล์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ใน 3 มิติ (Three Dimension) คือ Hue / Value / Chroma ซึ่งความสัมพันธ์นี้ ทำให้ได้ สีที่แตกต่าง กันออกมามากมายนับไม่ถ้วน มีรายละเอียด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

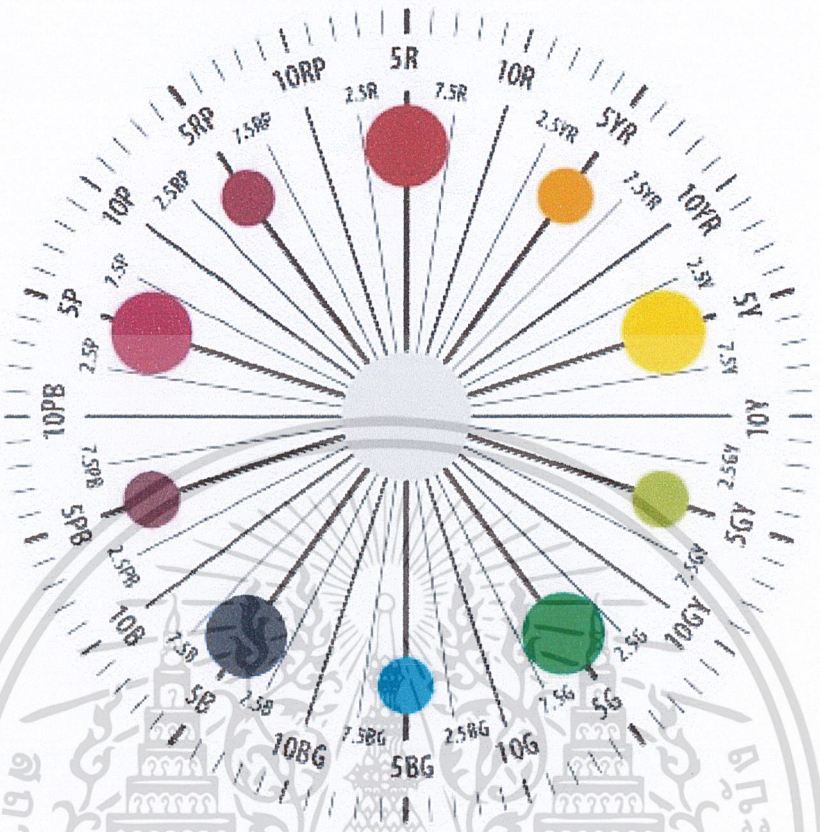
Hue คือคุณสมบัติที่ระบุว่าเป็นสีใดสีหนึ่ง และมีความแตกต่างจากสีอื่นและสีนั้นเป็นสีประเภท Chromatic Color เช่น สีแดง สีเขียว สีเหลือง เป็นต้น มันเซลล์ได้กำหนด Hue หรือ สีหลักในวงจรสี ของเขา ไว้จำนวน 5 สี คือ แดง (Red) ,เหลือง (Yellow) ,เขียว (Green) ,น้ำเงิน (Blue) และม่วง (Purple) และได้วางตำแหน่งสีทั้ง 5 สีนั้น เรียงลำดับเป็นรูปวงกลม ตามเข็มนาฬิกา เว้นระยะห่างแต่ละสี เท่ากัน เริ่มจาก แดง, เหลือง, เขียว, น้ำเงิน และ ม่วง มันเซลล์ได้กำหนดว่า สีหลักเหล่านี้ แต่ละสี จะผสมกัน เรียงลำดับไปยังอีกสีหนึ่ง ก็จะได้สีใหม่ เพิ่มขึ้นมาอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

รูปที่ 2.13 วงของ Hueในระบบ มันเซลล์

จะมีสีหลัก และสีรองรวมกันเป็น 10 Hue เรียงอยู่ในวงสีซึ่งมันเซลล์ได้กำหนด อักษรย่อ ของ แต่ละสี โดย เริ่มจาก สีแดง ดังนี้ **R , YR , Y , GY , G , BG , B , PB, P ,** และ **RP** มันเซลล์ ได้แบ่งส่วนของวงสี ออกเป็น 100 ส่วน และใช้ตัวเลขกับชื่อย่อสี กำกับแต่ละสี ของสีหลัก และสีรอง ดังนี้

123383

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

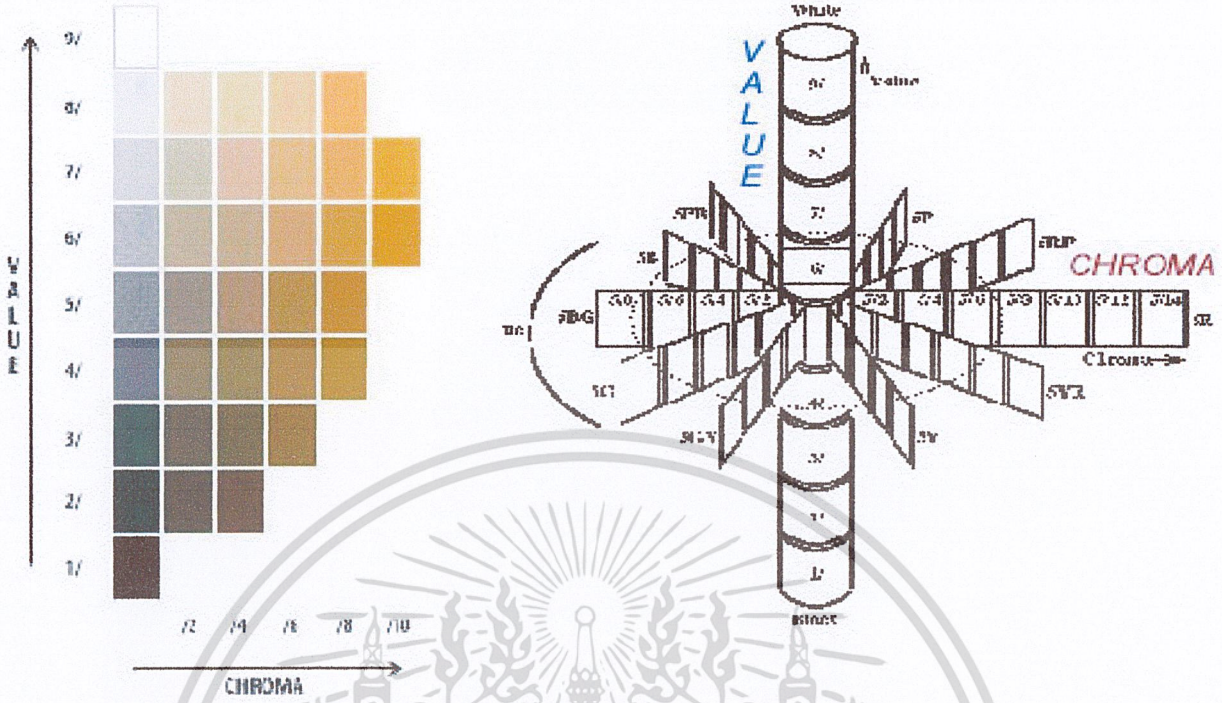


รูปที่ 2.14 ส่วนแบ่งวงสี 100 ตำแหน่ง ในระบบ มันเซลล์

5R , 5YR , 5Y , 5GY , 5G , 5BG , 5B , 5PB, 5P , และ **5RP** สำหรับการแบ่งส่วน และกำหนดตัวเลขที่ละเอียด ระหว่างสีเหล่านั้น ให้ศึกษาจากวงสีตัวอย่างซึ่งตัวเลขและตัวอักษร ที่กำกับสีนี้ เป็นค่ามาตรฐาน สำหรับนำไปใช้ อ้างอิง ในงานที่ เกี่ยวข้องต่อไป ตัวอย่างเช่น **5R** หมายถึงสีแดงจัด **2.5R** คือสีแดงออกไปทางม่วง **2.5YR** คือสีส้มออกไปทางเหลือง เป็นต้น

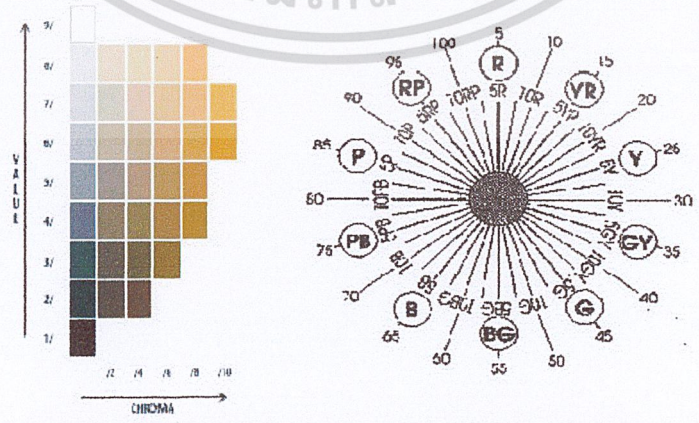
Value คือสมบัติของค่าน้ำหนัก อ่อน แก่ ของสี ประเภท Acromatic Color คือ สีดำ สีเทา สีขาว โดยมี ค่าน้ำหนักเริ่มจาก 1 คือน้ำหนักของสีดำ จนถึงค่า 9 เป็นค่าน้ำหนักของสีขาว และระหว่างสีดำ กับสีขาว แบ่งเป็นน้ำหนัก ของสีเทา สีดำ สีขาว และสีเทานี้ เรียกว่า สีกลาง (Neutral) คือเป็นสีที่ไม่มีคุณสมบัติของ Hue อยู่เลย แต่ค่าน้ำหนัก (Value) ของสีกลางนี้ มันเซลล์นำไปผสม กับสี (Hue) หรือสี Acromatic Color ทำให้ ได้ค่าน้ำหนักอ่อน แก ของสี ดังตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 *แสดงระดับค่าของ Value และ Chroma*

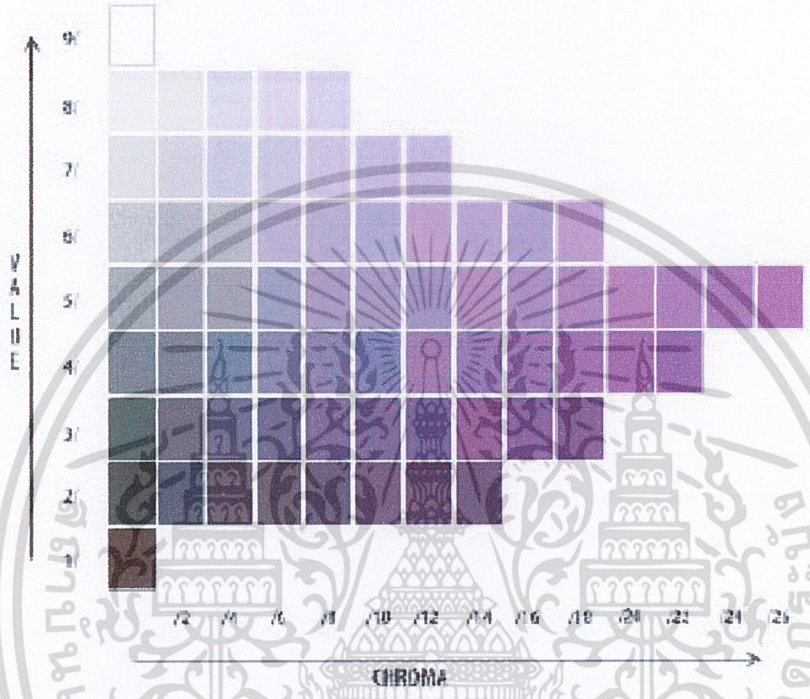
Chroma คือสมบัติของสี (Hue) ที่ถูกผสมกับ สีกลาง (Neutral) ในระดับใดระดับหนึ่ง (0 - 9) ทำให้ค่า Chroma ของสีนั้น อ่อนลง (Weak) และไล่น้ำหนักจนกระทั่ง สีนั้นมีค่าความจัดของสีสูง (High Chroma) หรือมีความอิ่มตัวของสีสดใส (Saturation) ค่าจากความอ่อน จนถึงสดใสที่สุด ของสีดังกล่าวนี้



รูปที่ 2.16 *แสดงระดับค่าและตำแหน่งของ Value*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มจากค่า 1 (เทา) ออกไปไม่มีข้อกำหนด ตายตัว ขึ้นอยู่กับค่า Chroma ของแต่ละสี เช่น Hue ของสีเหลืองส้ม 5YR (Yellow-Red) มีตำแหน่ง Chroma สูงสุดที่ 7/10 และ 6/10 แต่ Hue ของสีม่วงแดง 5RP(Red-Purple) มีตำแหน่ง Chroma สูงสุดที่ 6/26



รูปที่ 2.17 *แสดงระดับค่าของ Chroma*

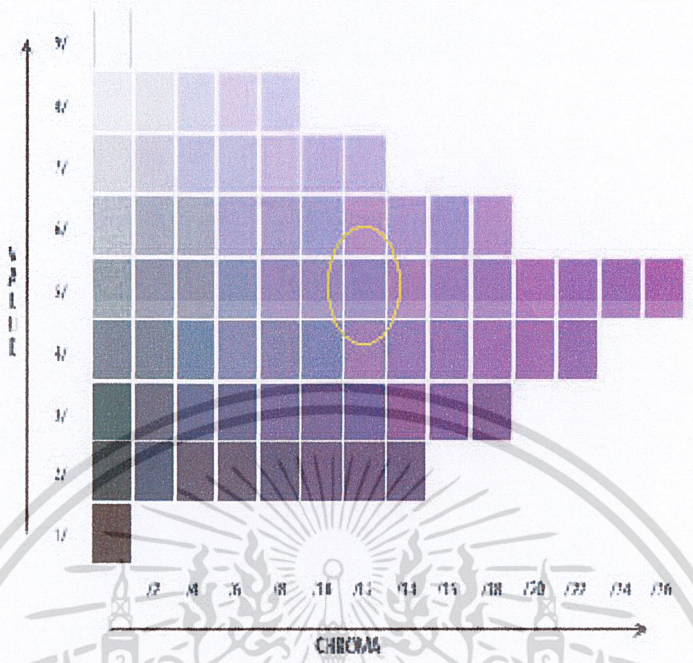
ตัวอย่าง สีเหลือง ผสมกับ สีเทา ทีละน้อย จน เป็นสีเทา จะเห็นค่า Chroma ของสีเหลืองที่สดใสนั้น ลดลงเรื่อย ๆ

2.9.2 สัญลักษณ์สี ของมันเซลล์ (Munsell Notation)

มันเซลล์ ได้กำหนด สัญลักษณ์ หรืออักษรและตัวเลข กำกับสีแต่ละสี ที่ถูกผสม ตามทฤษฎีสี ของมันเซล ไว้ดังนี้ **H V/C หรือ H V:C (H = Hue V = Value C = Chroma)**

ตัวอย่างถ้าระบุสีดังนี้ **5RP 5/12** แปลค่าตามสัญลักษณ์ก็คือ **H = 5RP , V = 5 , C = 12** หมายความว่าสีนั้นก็คือ **สีม่วงแดง (Red-Purple)** ในตำแหน่งที่ **5RP** (ดูวงสีมันเซลประกอบ) ค่าน้ำหนัก Value สีเทา ในตำแหน่งที่ 5 และค่า Chroma ในตำแหน่งที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 *ความสัมพันธ์ของ Hue/Value/Chroma กับการระบุค่า*

2.10 หลักการ Matching

Color pattern matching เป็นวิธีแยกสีที่ไม่ซ้ำกันและรวมข้อมูลความสัมพันธ์กันแต่ละมิติได้อย่างรวดเร็ว ค้นหารูปแบบของสีในภาพ โดยจะใช้เทคโนโลยีที่อยู่เบื้องหลังการจับคู่สีและรูปแบบการจับคู่สีเทาในทางเสริมกันเพื่อหารูปแบบสีในภาพ

2.10.1 Color Matching and Color Location

Color pattern matching เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลสีของภาพหรือ พื้นที่ในภาพ ข้อมูลสีในภาพอาจประกอบด้วยหนึ่งสีหรือหลายสี ในการ Matching ให้กำหนดพื้นที่ในภาพที่ประกอบด้วยข้อมูลสีที่ต้องการใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในฟังก์ชัน ของระบบ Machine vision เรียนรู้ข้อมูลสีแบบ 3 มิติเป็นตัวอ้างอิง สเปกตรัมของสี 1D Machine vision Application ทำการเปรียบเทียบข้อมูลสีในรูปทั้งหมดหรือพื้นที่ในภาพกับสเปกตรัมสีที่เรียนรู้แล้วคำนวณระดับ score relates แต่ละพื้นที่ เพื่อเปรียบเทียบ score relates ที่ใกล้เคียงข้อมูลสีในภาพ template ตรงกับข้อมูลสีในภาพตัวอย่าง โดยสเปกตรัมสีที่แสดงเมื่อต้องการใช้โทนสีที่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของวัตถุในภาพที่ตรงกันก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันของตำแหน่งสีที่ขยายขีดความสามารถของการ matching กับการใช้งานที่ไม่ทราบตำแหน่งของวัตถุในภาพ ตำแหน่งของสีจะใช้ข้อมูลสีจากภาพ template ที่จะค้นหาส่วนที่เหมือนกัน การทำงานเบื้องต้นจะย้าย template ให้พิกเซลในภาพตรงกับภาพตัวอย่างและเปรียบเทียบข้อมูลที่ตำแหน่งปัจจุบันของสีในภาพตัวอย่างกับข้อมูลสีใน template ที่ใช้สีที่ตรงกัน เนื่องจากการค้นหาภาพทั้งหมดเพื่อการ matching จะเสียเวลาทำงานของ software ระบุตำแหน่งสี ต้องใช้เทคนิคบางอย่างเพื่อเพิ่มความเร็วในการหาตำแหน่ง เป็นวิธีการค้นหายาบเพื่อปรับหาตำแหน่งคร่าว ๆ ที่ตรงกันในภาพ ค้นหาละเอียดยิ่งขึ้นโดยใช้อัลกอริทึม hill climbing จากนั้นจะดำเนินการแต่ละรอบจับคู่เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องของการจับคู่ตำแหน่งสีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งในภาพที่มีสีลักษณะเฉพาะ

2.10.2 Grayscale Pattern Matching

NI Vision grayscale pattern matching เป็นวิธีการรวม image understanding ในการแปลข้อมูล template และใช้ข้อมูลที่ได้มาหา template ใน image understanding กับเทคนิคการประมวลผลภาพที่สร้างข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของรูปแบบ วิธีการเหล่านี้มีดังต่อไปนี้

- Geometric modeling of images
- Efficient non-uniform sampling of images
- Extraction of rotation-independent template information

NI Vision ใช้การรวมกันของข้อมูลในภาพและเทคนิคการสุ่มภาพอัจฉริยะของ match pattern ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของภาพในรูปแบบกะทัดรัด เทคนิคการสุ่มตัวอย่างอัจฉริยะแยกจุดจาก template ที่แสดงข้อมูลโดยรวมของภาพขอบเขตข้อมูลและเทคนิคการสุ่มตัวอย่างอัจฉริยะลดข้อมูลซ้ำซ้อนในภาพและ เพิ่มความเร็ว ความถูกต้องของรูปแบบการ matching ในกรณีที่มีรูปแบบที่สามารถหมุนได้ในภาพ เทคนิคที่คล้ายกันคือใช้ แต่กับเลือกพิกเซลพิเศษ template ที่มีค่าหรือเปลี่ยนความสัมพันธ์ในค่าแสดงการหมุนของรูปแบบ ผลที่ได้คือรูปแบบระดับสีเทาได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องตรงกัน

2.10.3 RGB to Grayscale

สมการดังต่อไปนี้แสดงการแปลงภาพ RGB เป็นภาพ grayscale บนพื้นฐาน Pixel -by – Pixel

$$\text{grayscale value} = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 อัลกอริธึม

อัลกอริธึม Color Pattern Matching เป็นอัลกอริธึมที่ใช้สำหรับการหา Pattern ตรวจสอบภาพสีที่ใช้ในการทดลอง โดยประยุกต์มาจากอัลกอริธึมมาตรฐานในโปรแกรม LabVIEW สามารถอธิบายขั้นตอนหลักการทำงานของอัลกอริธึมได้ดังนี้

2.11.1 การเลือกภาพต้นแบบที่มีรายละเอียดชัดเจนครบถ้วน มีความซับซ้อนน้อย และแยกออกจากภาพพื้นหลังอย่างชัดเจน

2.11.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับขั้นตอนการศึกษาของภาพต้นแบบ และขั้นตอนการตรวจสอบหาภาพต้นแบบในภาพที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- Shift-Invariant Matching คือการเตรียมภาพต้นแบบสำหรับการตรวจหาภาพในตำแหน่งต่าง ๆ โดยการเลื่อนภาพ

- Rotation-Invariant Matching ให้เลือกว่าจะให้ทำการเตรียมภาพต้นแบบสำหรับการตรวจหาภาพในตำแหน่งต่าง ๆ โดยการหมุนภาพต้นแบบ และจำเป็นต้องกำหนดมุมในการหมุนด้วย

- Search Strategies เป็นการกำหนดค่าการ Sampling สำหรับการ Search หาภาพต้นแบบในภาพที่ต้องการตรวจสอบ หรือ เป็นการกำหนดความละเอียดของข้อมูลภาพที่ต้องการตรวจสอบ

- Color Score Weight เป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกข้อมูลของ Shape หรือ Color เพื่อใช้ในการคิดค่า Score โดยค่าจะอยู่ในช่วง 0-1000 ค่ายิ่งเข้าใกล้ค่า 1000 หมายความว่าใช้ข้อมูลค่า Color ในการตัดสินใจเพียงอย่างเดียว ในทางกลับกันค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่าจะใช้ข้อมูลค่า Shape ในการตัดสินใจเพียงอย่างเดียว

- Score เป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจของอัลกอริธึม ซึ่งค่า Score จะอยู่ในช่วง 0-1000 ค่า Score ยิ่งเข้าใกล้ 1000 มากเท่าไร หมายความว่าภาพที่ตรวจสอบมีโอกาสที่จะเหมือนภาพต้นแบบมากขึ้นเท่านั้น

- No. of Matching เป็นจำนวนของที่ตรงกับภาพต้นแบบที่มาก

- Ignore Black and White เป็นค่ากำหนดให้อัลกอริธึมทำการละเว้นการตรวจสอบในพื้นที่สีขาวหรือ พื้นที่สีดำ

- Color Sensitivities เป็นค่าที่ใช้ในการแยกความแตกต่างของข้อมูลภาพสีใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณของ Hue มีด้วยกัน 3 ระดับคือ Low, Medium และ High

- Saturation Threshold เป็นค่าที่ใช้ในการแยกความแตกต่างของข้อมูลภาพสีในช่องสัญญาณของ Saturation

2.11.3 การศึกษาภาพต้นแบบ เป็นกระบวนการดึงเอาลักษณะเด่นของภาพต้นแบบออกมาโดยวิธีการระบุตำแหน่งของสี ซึ่งเป็นส่วนของ Color โดยการกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์อ้างอิง

- Color พิจารณาค่า RGB/HSL จะทำการพิจารณาลักษณะของโครงสร้างสีที่แตกต่างกันและตำแหน่งของสีจากภาพต้นแบบ และการเตรียมภาพต้นแบบสำหรับในกรณีที่ต้องการหาภาพหมุน (Rotation-Invariant)

2.11.4 การแสดงผลการตรวจสอบ

- Match Score แสดงค่า Score ผลของภาพที่ทำการตรวจสอบ
- No. of Matches แสดงจำนวนของภาพที่ตรงกับการตรวจสอบ
- Match Position X-Y แสดงตำแหน่งของภาพที่ทำการตรวจสอบ
- Processing Rate แสดงอัตราการตรวจสอบของภาพกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาระบบ Machine Vision เพื่อใช้ในการตรวจสอบตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี โดยใช้การเปรียบเทียบแถบสีของตัวต้านทานกับภาพต้นแบบที่กำหนดค่าไว้ จากนั้นนำภาพที่ได้มาทำการประมวลผลด้วยอัลกอริธึม Color Pattern Matching ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในโครงงานพิเศษนี้จะใช้ตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี

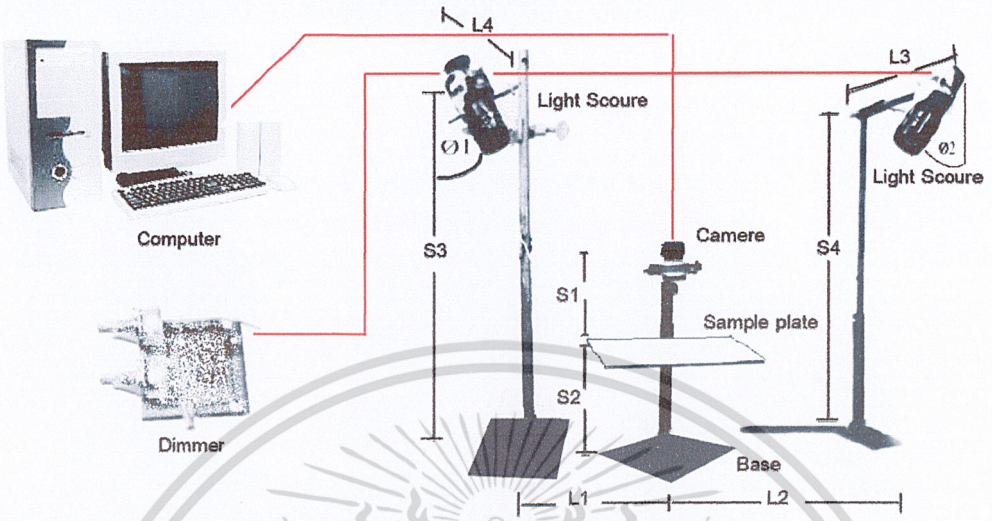
ในการทดลองใช้ตัวประมวลผล Pentium 4 ความเร็ว 3.06 GHz ,RAM 2 GB ,กล้อง Web Cam ความละเอียด 1.3 M. Pixels มีเทคโนโลยี RightLight ปรับระดับความเข้มแสง และความเพี้ยนของสี เชื่อมต่อด้วย USB 2.0 ถ่ายภาพตัวอย่างขนาด 640 x 480 Pixels และภาพต้นแบบขนาด 640 x 480 Pixels เช่นกันดังภาพที่ 3.2 และใช้แหล่งกำเนิดแสง เป็นไฟฉาย LED พร้อมชุดเลนส์ปรับโฟกัส เป็นหลอดแบบเซอร์เฟสเมาส์ขนาด 3 mm จำนวน 2 หลอด 5 VDC กินกระแสสูงสุด 1 A ดังภาพที่ 3.2 ระดับความเข้มแสงของแต่ละภาพแทนค่าด้วย 0-255 ระดับ

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับระยะ S1และ S2 ให้เหมาะสมและได้ภาพชัดเจน
2. วางอุปกรณ์ตัวอย่างบนถาดวางอุปกรณ์
3. ทำการปรับความสม่ำเสมอของแสงโดยการปรับระยะ L1, L2, L3, L4, S3, S4, Ø1 และ Ø2 ดังภาพที่ 3.1 ปรับความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงจากวงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC และบันทึกค่ากระแสที่ได้จากแอมมิเตอร์ และวัดความเข้ม และความสม่ำเสมอของแสงในพื้นที่ใช้งานด้วย Light meter ในโปรแกรม LabVIEW
4. ทำการถ่ายภาพต้นแบบของตัวต้านทานแต่ละค่า และกำหนดค่าตำแหน่งและแถบสีของภาพต้นแบบ
5. ทำการเปรียบเทียบค่าโดยการถ่ายภาพตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบค่ากับค่าต้นแบบของตัวต้านทานแต่ละตัว (ครั้งละ 1 ตัว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

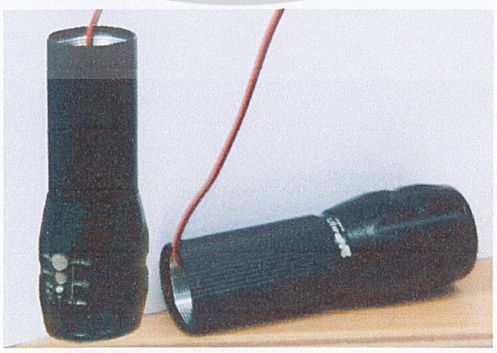
6. ทำการเปรียบเทียบหาค่าแบบสุ่มจากการใส่ตัวต้านทานหลาย ๆ ค่าลงบนถาดวางอุปกรณ์ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ฯ



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงการจัดชุดการทดลองระบบ Machine Vision

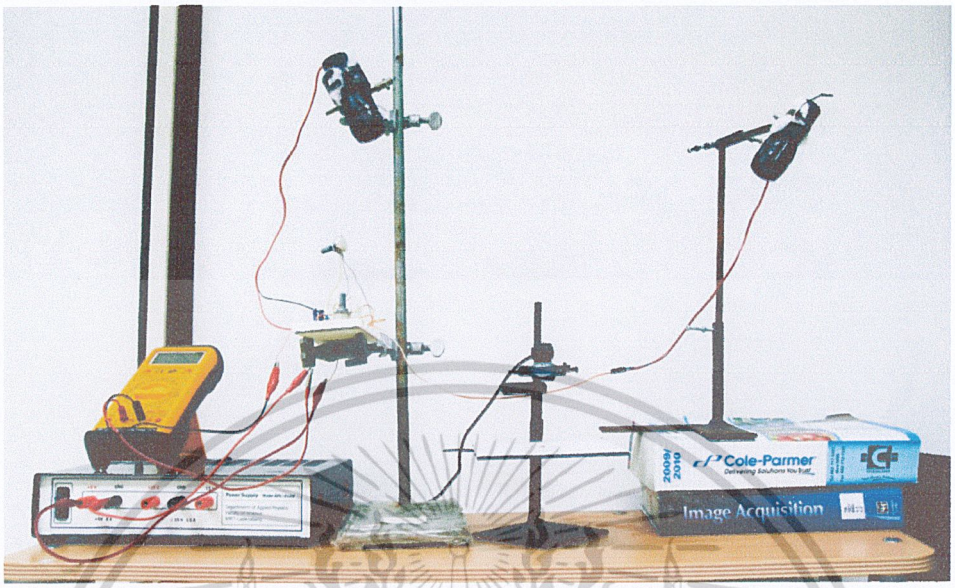
3.3 ชุดอุปกรณ์

รูปที่ 3.2 กล้อง Web Cam 1.3 M Pixels USB (2.0)



รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดแสง LED Surface mount 3 mm 0-5 Vdc 0-1 Amp พร้อมชุดเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

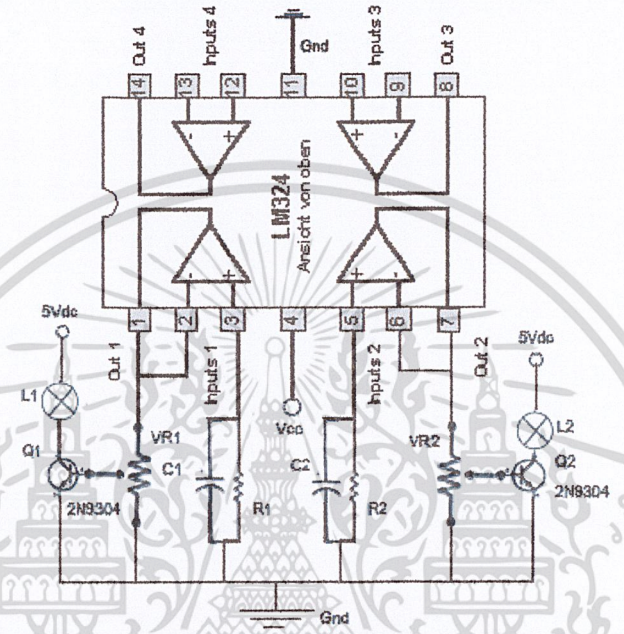
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงชุด Machine Vision ที่ใช้ในการศึกษา

3.4 วงจร ลดแรงดันไฟฟ้า DC

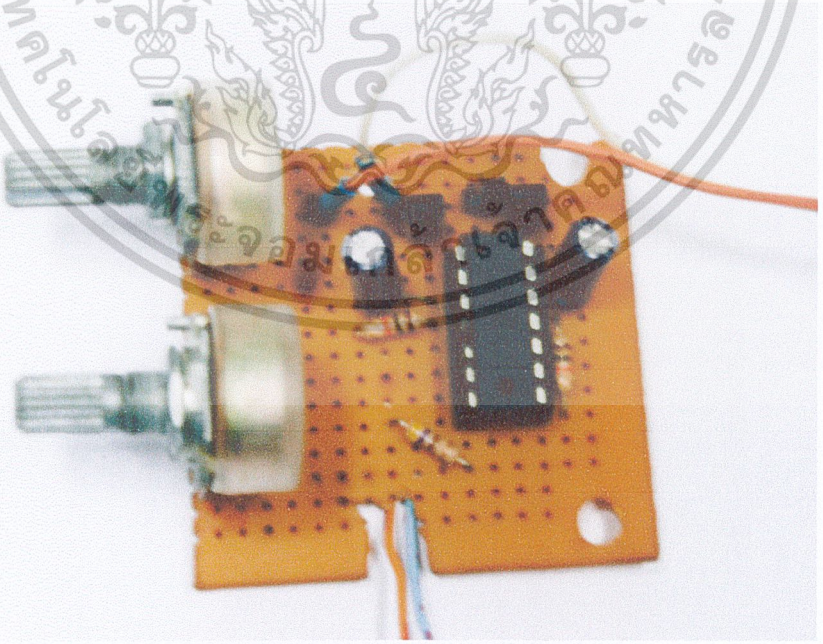
ในโครงงานพิเศษนี้แหล่งกำเนิดแสงมีความสำคัญ เนื่องจากแสงที่มากเกินไป จะทำให้ได้ภาพที่สว่างจ้า ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างได้ จึงจำเป็นต้องมีวงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC เพื่อใช้ในการปรับแสงให้อยู่ในช่วงที่เหมะสม ในโครงงานพิเศษนี้ ใช้วงจรลดแรงดันดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งมีหลักการทำงานของวงจรดังนี้ เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร C1 และ C2 จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชาร์ตประจุให้กับตัวเก็บประจุทำให้มีแรงดันตกคร่อม C1 และ C2 ประมาณ 5 VDC และเป็นแรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขา 3 และขา 5 ของ IC LM324 ซึ่งต่อเป็นวงจรตามแรงดันและ ถูกส่งออกมาที่ขา 1 และขา 7 โดย VR1 และ VR2 ซึ่งจะทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลเข้ามาขา B ของ Q1 และ Q2 ทำให้ Q1 และ Q2 นำกระแส ทำให้ไฟ L1 และ L2 ติดสว่าง โดยมีเมื่อสวิตซ์หลอดไฟยังคงติดสว่างอยู่ซักระยะหนึ่งจนกระทั่ง C1 และ C2 คายประจุหมดหลอดไฟจึงดับลง



รูปที่ 3.6 วงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC



รูปที่ 3.7 ภาพการต่อวงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

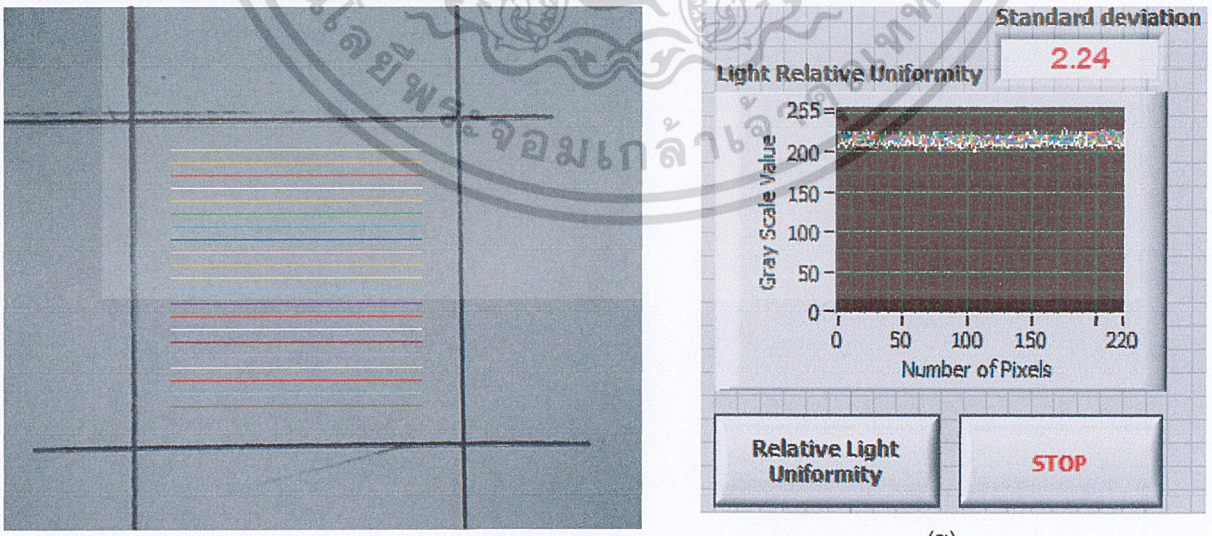
ผลการทดลองและ อภิปรายผล

ระบบ Machine Vision จะมีส่วนประกอบทั้งหมดด้วยกันอยู่ 4 ส่วนได้แก่ ส่วนการจัดชุดอุปกรณ์และจัดความสม่ำเสมอของแสง ส่วนการการเก็บภาพ Template ส่วนเก็บภาพตัวอย่าง และส่วน Color Matching มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การจัดชุดอุปกรณ์และ การปรับความสม่ำเสมอของแสง

ในส่วนนี้เป็นการปรับความสม่ำเสมอของแสงโดยการปรับระยะที่ดีที่สุดของชุดอุปกรณ์ ซึ่งทำการปรับระยะ L1, L2, L3, L4, S1, S2, S3, S4, Ø1 และ Ø2 ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 4.1 และปรับความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงจากวงจรลดแรงดันไฟฟ้า DC และบันทึกค่ากระแสจากแอมมิเตอร์ได้เท่ากับ 600 mA และวัดความสม่ำเสมอของแสงในพื้นที่ใช้งานด้วย Light meter ในโปรแกรม LabVIEW ซึ่งแบ่งเป็นการทำงานของโปรแกรมเป็น Front Panel และ Block Diagram ดังรูปที่ 4.1 (ก) 4.1 (ข) และ 4.2 และโปรแกรมมีขั้นตอนการทำงานตาม Flowchart ดังรูปที่ 4.3 จะได้ค่า Gray scale ที่ระดับ 230 และ Standard deviation background เท่ากับ 2.24 ซึ่งหมายความว่าพื้นที่ทดลองมีแสงตกกระทบค่อนข้างสม่ำเสมอ

4.1.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วนวัดความสม่ำเสมอของแสง



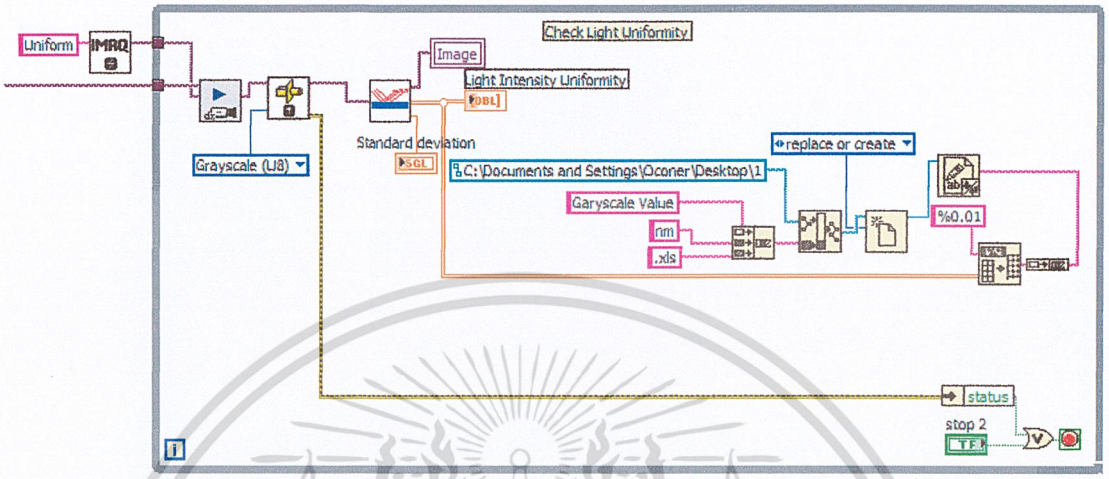
(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 (ก) หน้า Front Panel ของโปรแกรมวัดความสม่ำเสมอของแสงแสดงเส้นที่ลากในพื้นที่ขนาด 160x 400 pixel จำนวน 21 เพื่อวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของแสง

(ข) หน้า Front Panel ของโปรแกรมแสดงกราฟความสม่ำเสมอของแสง แสดงกราฟระดับ Gray scale และ ค่า Standard deviation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วนวัดความสม่ำเสมอของแสง



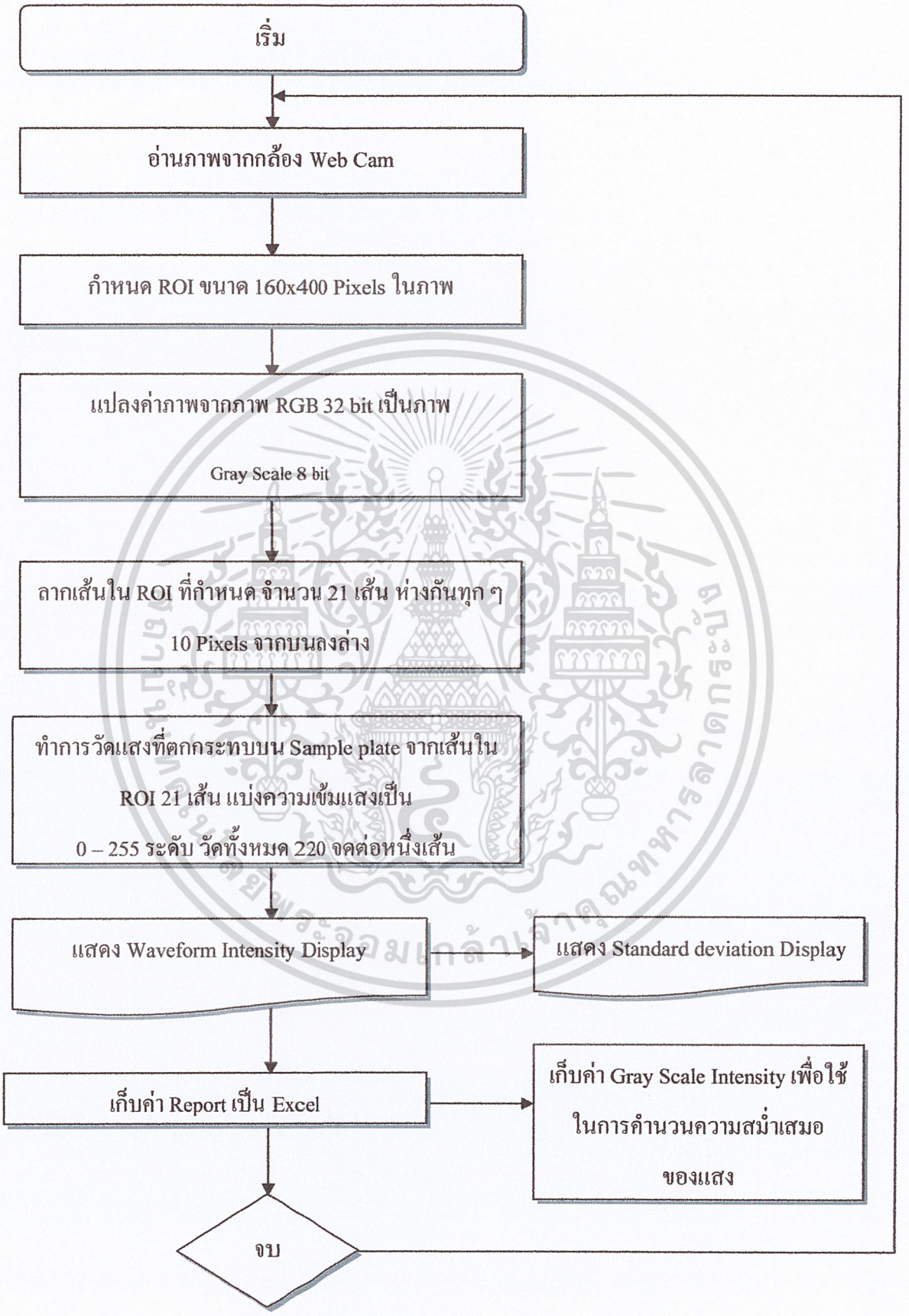
รูปที่ 4.2 หน้า Block Diagram ของโปรแกรมส่วนวัดความสม่ำเสมอของแสง

4.1.3 ตารางที่ 4.1 การจัดระยะห่างที่ดีที่สุดของชุดทดลอง

ตำแหน่งและมุม	ระยะ (m)
S1	0.094
S2	0.110
S3	0.493
S4	0.423
L1	0.150
L2	0.165
L3	0.165
L4	0.175
Ø1	75 องศา
Ø2	70 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 Flowchart ส่วนโปรแกรมวัดความสม่ำเสมอของแสง



รูปที่ 4.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมวัดความสม่ำเสมอของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ตารางที่ 4.2 ค่า Standard deviation background

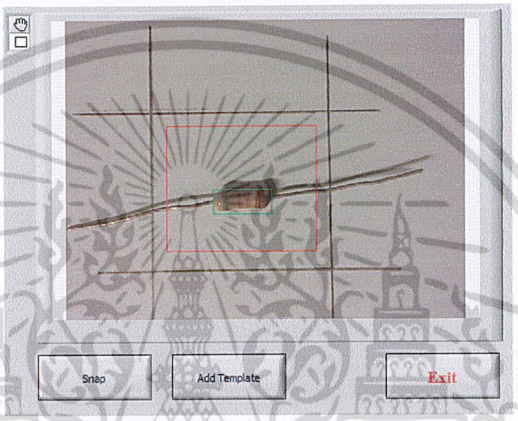
Line	Standard deviation background
1	2.120136
2	2.051731
3	1.964739
4	1.967472
5	2.192706
6	1.997548
7	2.264731
8	1.904564
9	2.120136
10	2.051731
11	1.997474
12	2.164722
13	2.497979
14	2.265752
15	2.725145
16	2.734995
17	2.143659
18	2.311662
19	2.055257
20	2.455646
21	2.870887
เฉลี่ย	2.246674

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ส่วนการการเก็บภาพ Template

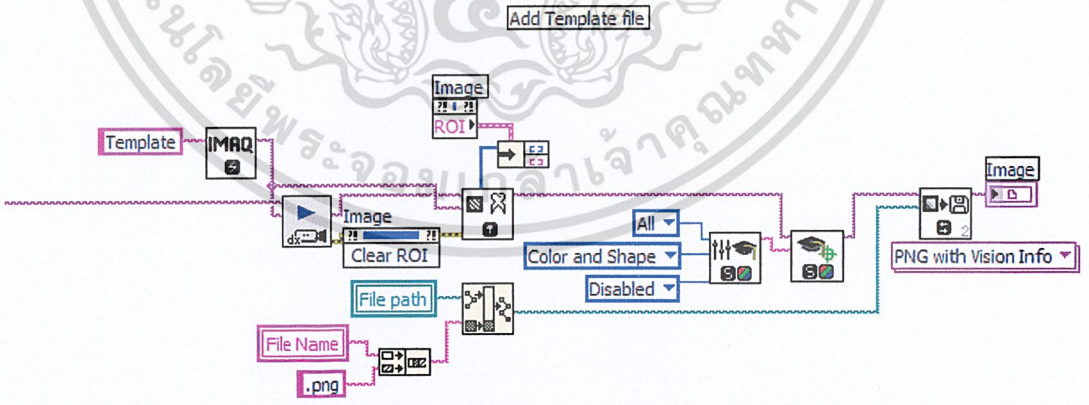
ในส่วนเก็บภาพ Template จะทำการเก็บภาพแบบ Snap Short ภาพภายใน ROI (Region of Intereste) ที่กำหนดให้จากภาพที่ได้จากกล้องในหน้า Front Panel ดังรูปที่ 4.4 และขั้นมีการทำงานของโปรแกรมในหน้า Block Diagram และ Flow chart ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับแล้วบันทึกเป็น File.png ซึ่งจะได้ภาพ Template ดังแสดงในตารางที่ 4.3

4.2.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template



รูปที่ 4.4 หน้า Front Panel ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template

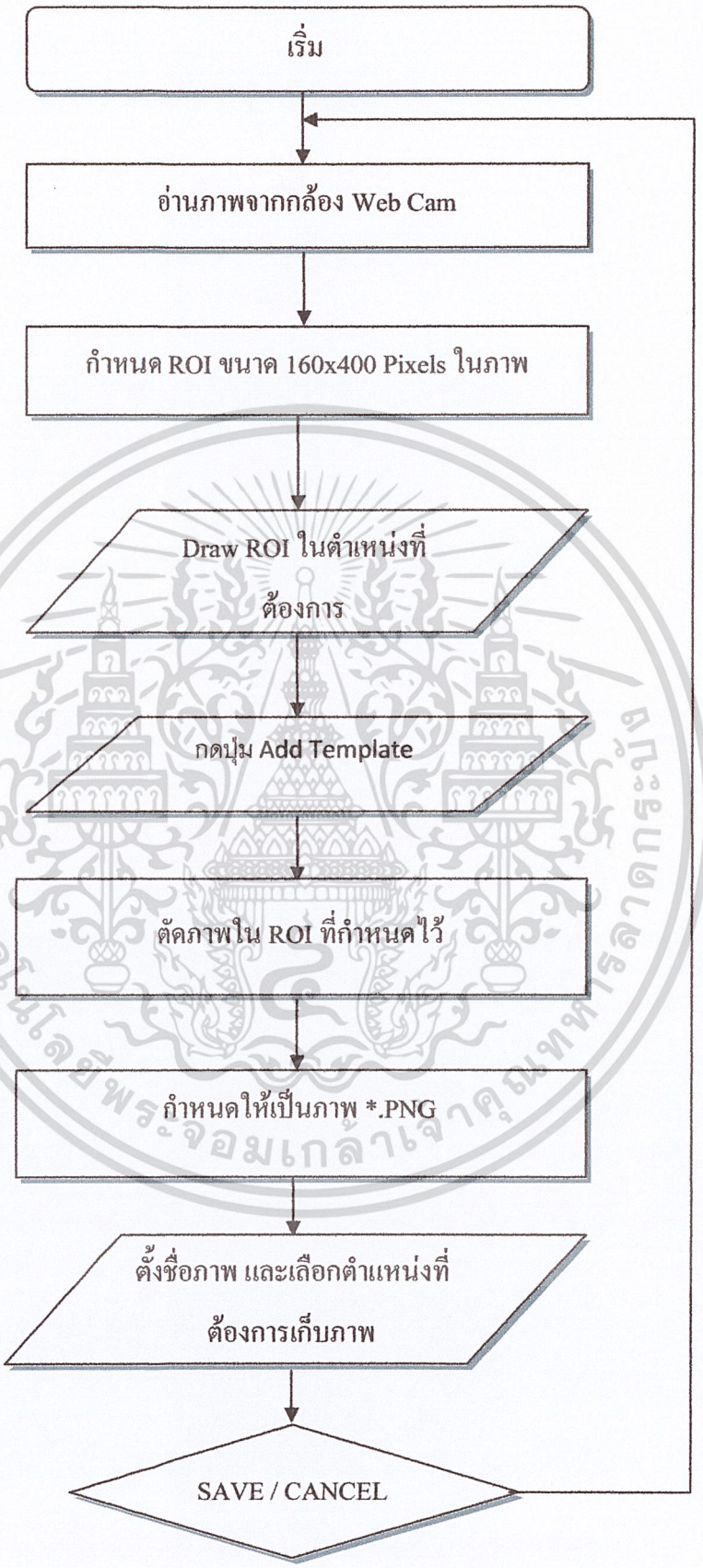
4.2.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template



รูปที่ 4.5 หน้า Block Diagram ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมเก็บภาพ Template



รูปที่ 4.6 Flowchart ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพ Template

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

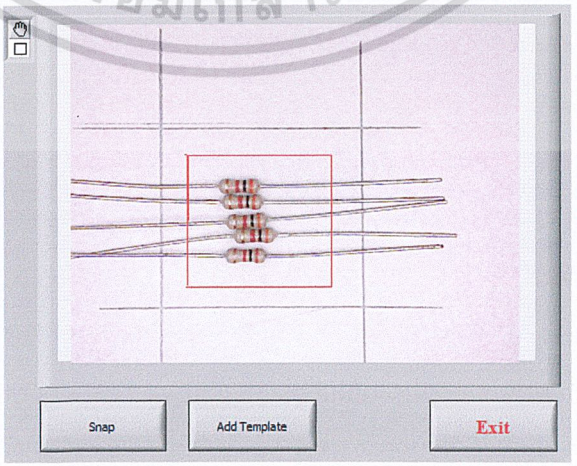
4.2.4 ตารางที่ 4.3 Template ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อ Template	ภาพ Template
T01 10 Ohm.png	
T02 60 Ohm.png	
T03 300 Ohm.png	
T04 1k Ohm.png	
T05 2k Ohm.png	
T06 3k Ohm.png	
T07 10k Ohm.png	
T08 20k Ohm.png	
T09 1M Ohm.png	

4.3 ส่วนเก็บภาพตัวอย่าง

ในส่วนเก็บภาพตัวอย่างจะทำงานคล้ายกับส่วนเก็บภาพ Template โดยจะทำการเก็บภาพแบบ Snap Short ที่ได้จากกล้องโดยทำการเลือก ROI ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 4.7 ในส่วนหน้า Front Panel ดังรูปที่ 4.7 และมีขั้นมีการทำงานของโปรแกรมในหน้า Block Diagram และ Flow chart ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับแล้วบันทึกเป็น File.bmp 24 Bit

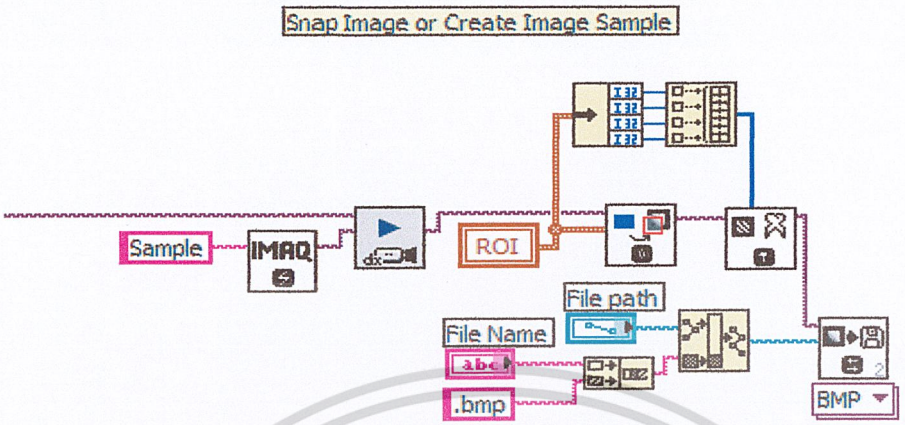
4.3.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง



รูปที่ 4.7 หน้า Front Panel ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

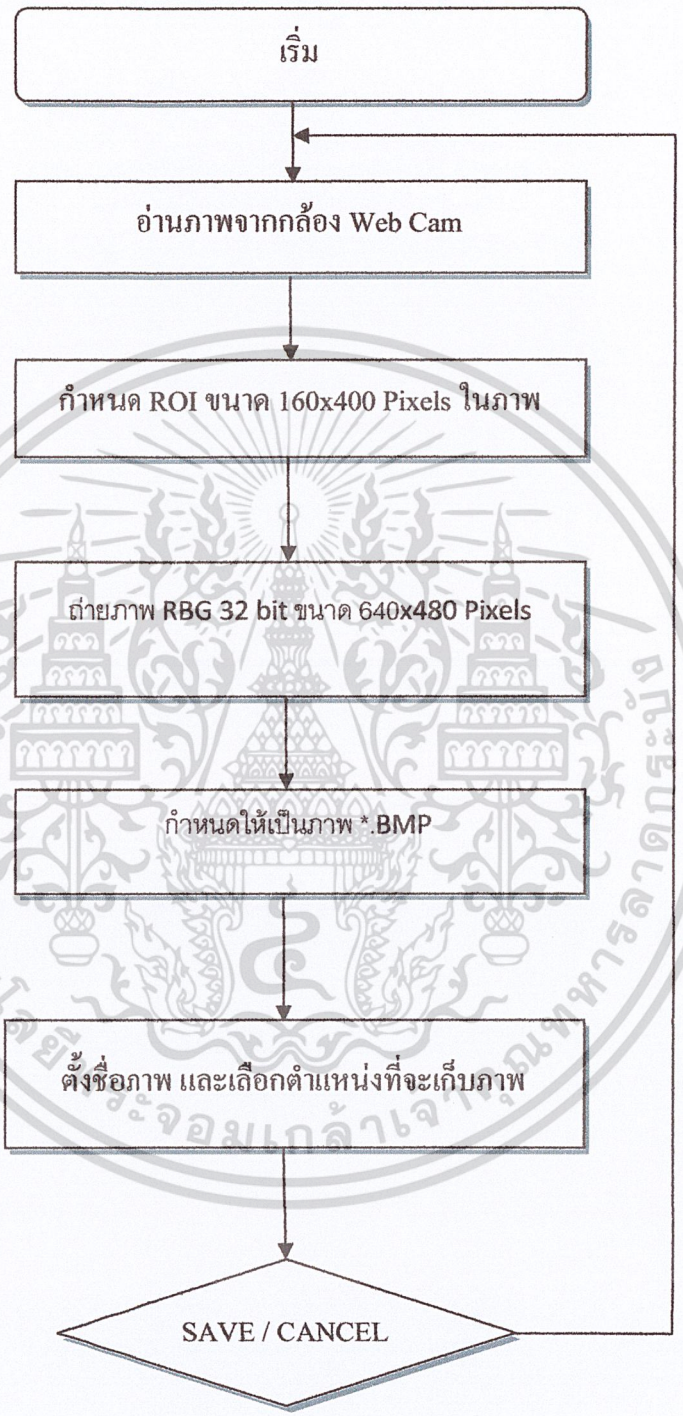
4.3.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง



รูปที่ 4.8 หน้า Block Diagram ของโปรแกรมส่วนเก็บภาพตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมเก็บภาพตัวอย่าง

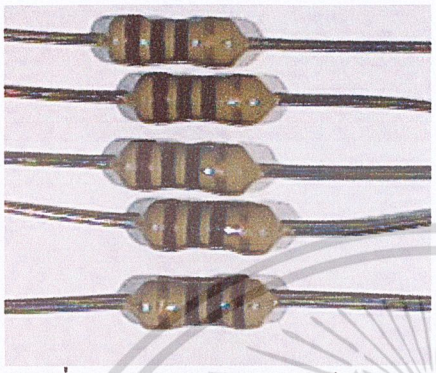


รูปที่ 4.9 Flowchart ส่วนโปรแกรมเก็บภาพตัวอย่าง

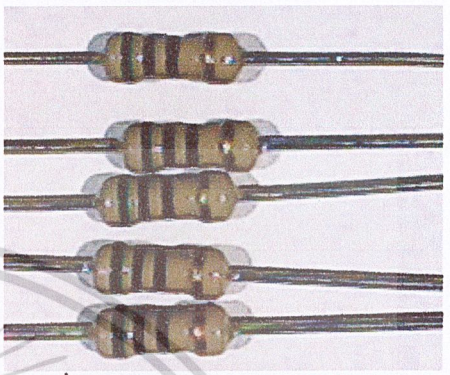
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ภาพตัวอย่าง

รูปที่ 4.10 – 4.24 แสดงภาพที่ใช้ในการทดลองการทำ Color matching ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานชนิด 3 แถบสีดังนี้

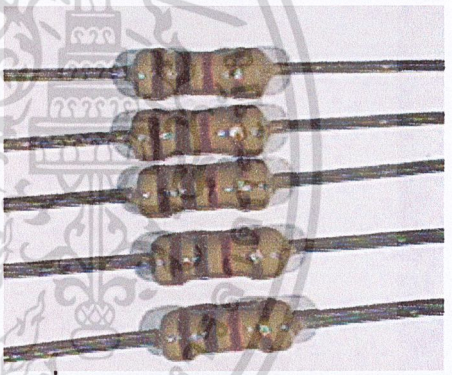


รูปที่ 4.10 จำลองการวางตัวต้านทาน S01 10 Ohm จำนวน 5 ตัว

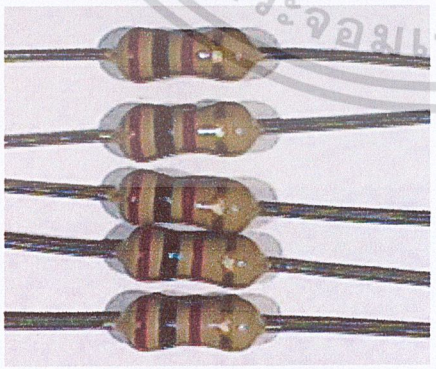


รูปที่ 4.11 จำลองการวางตัวต้านทาน S02 60 Ohm จำนวน 5 ตัว

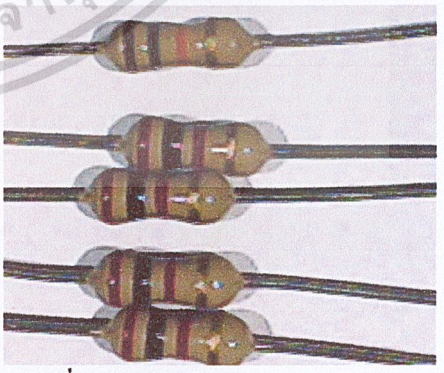
รูปที่ 4.12 จำลองการวางตัวต้านทาน S03 300 Ohm จำนวน 5 ตัว



รูปที่ 4.13 จำลองการวางตัวต้านทาน S04 1k Ohm จำนวน 5 ตัว

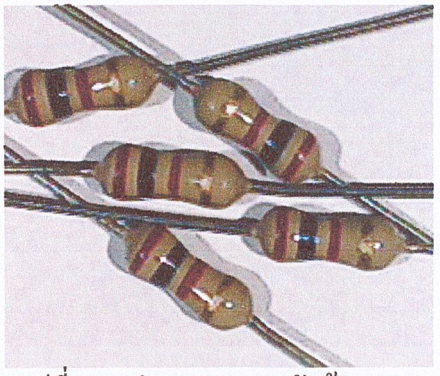


รูปที่ 4.14 จำลองการวางตัวต้านทาน S05 2 k Ohm จำนวน 5 ตัว



รูปที่ 4.15 จำลองการวางตัวต้านทาน S06 2k Ohm จำนวน5 ตัวและ 10 k Ohm จำนวน 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

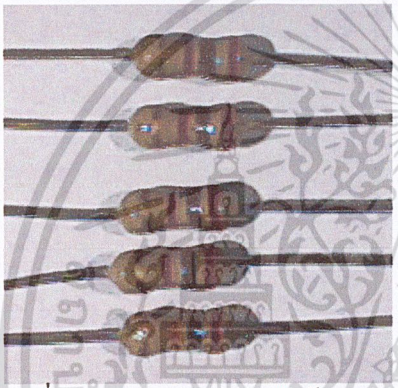


รูปที่ 4.16 จำลองการวางตัวต้านทาน

S07 2 k Ohm จำนวน 5 ตัว

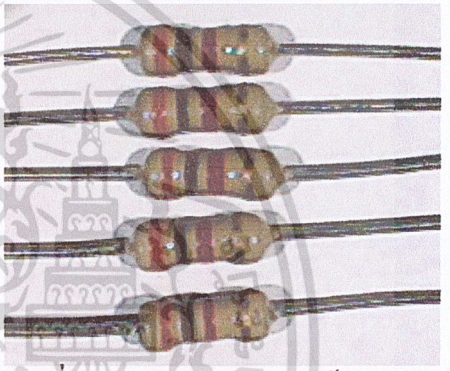
รูปที่ 4.17 จำลองการวางตัวต้านทาน

S08 2k Ohm จำนวน 5 ตัว



รูปที่ 4.18 จำลองการวางตัวต้านทาน

S09 2k Ohm จำนวน 5 ตัว

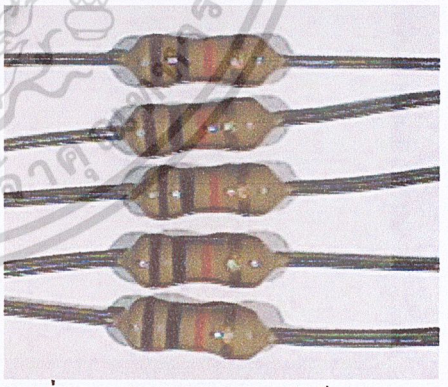


รูปที่ 4.19 จำลองการวางตัวต้านทาน

S10 3k Ohm จำนวน 5 ตัว

รูปที่ 4.20 จำลองการวางตัวต้านทาน

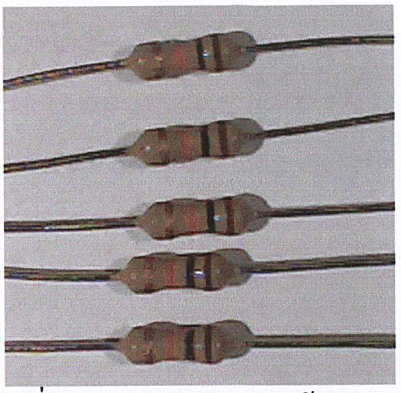
S11 3k Ohm จำนวน 5 ตัว



รูปที่ 4.21 จำลองการวางตัวต้านทาน

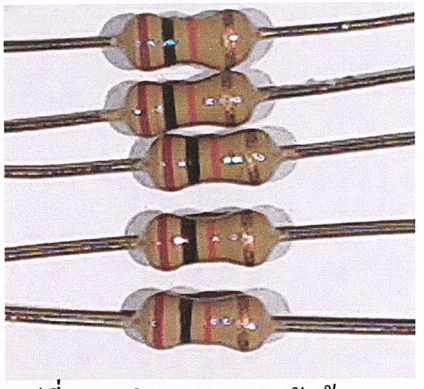
S12 10k Ohm จำนวน 5 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



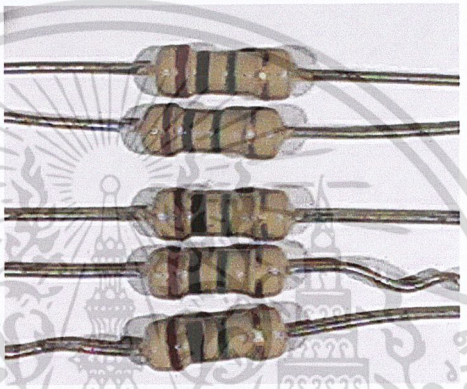
รูปที่ 4.22 จำลองการวางตัวต้านทาน

S13 10k Ohm จำนวน 5 ตัว



รูปที่ 4.23 จำลองการวางตัวต้านทาน

S14 20k Ohm จำนวน5 ตัว



รูปที่ 4.24 จำลองการวางตัวต้านทาน

S15 1M Ohm จำนวน 5 ตัว

4.4 ส่วน Color Matching

ในส่วนของ Color Matching จะทำการเปรียบเทียบระหว่างภาพตัวอย่างกับภาพ Template ซึ่งจะทำงานด้วย Match Color Pattern ของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะแสดงผลและควบคุมการทำงานในหน้า Front Panel ดังรูปที่ 4.25 และมีขั้นมีการทำงานของโปรแกรมในหน้า Block Diagram และ Flow chart ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับจะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

Shift-Invariant Matching, Rotation-Invariant Matching, Color Sensitivity, Search Strategies, Color Score Weight, , No. of Matching, ซึ่งในการทดลองนี้จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

ภาพแบบ Shift-Invariant Matching คือ ภาพในแนวระนาบเท่านั้นไม่มีการหมุน

Search Strategies เป็น Balanced

Color Sensitivity เป็น Medium Sensitivity

Color Score Weight เท่ากับ 300

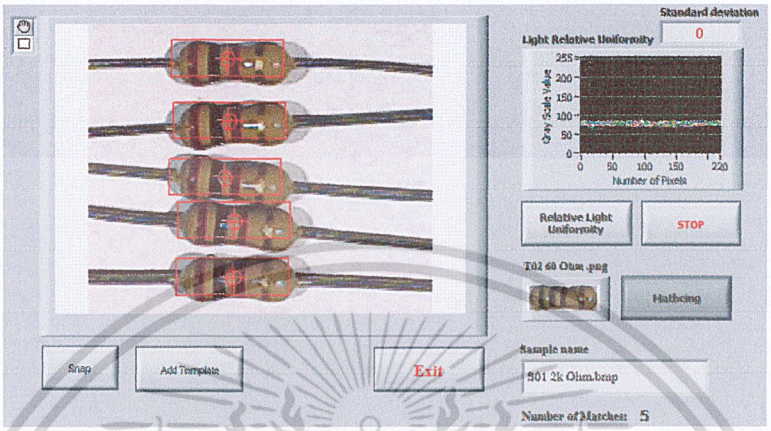
Score เท่ากับ 780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rotation Angle Ranges (degrees) เท่ากับ -180 องศา ถึง 180 องศา

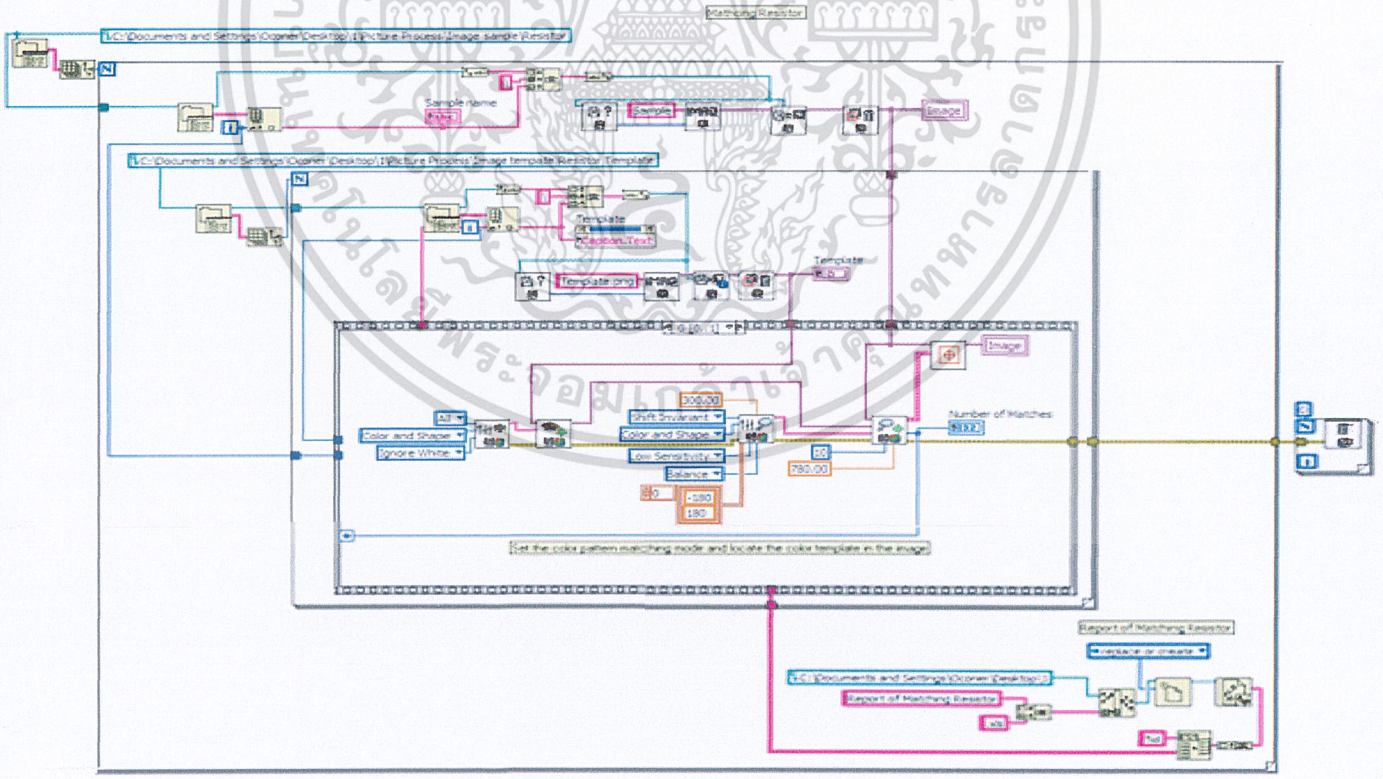
No. of Matching เท่ากับ 10

4.4.1 Front Panel ของโปรแกรมส่วน Color Matching



รูปที่ 4.25 หน้า Front Panel ของโรแกรมส่วน Color Matching

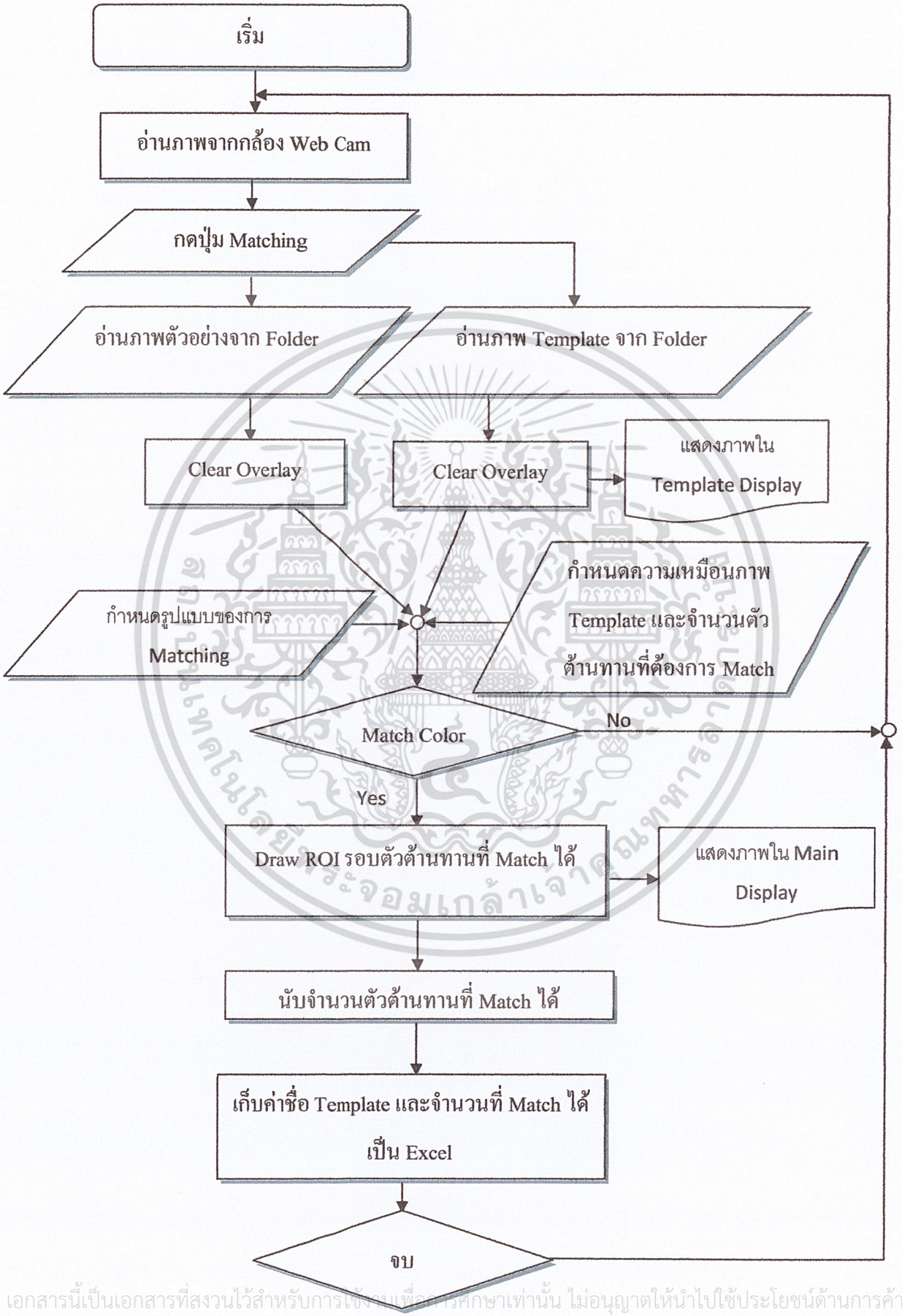
4.4.2 Block Diagram ของโปรแกรมส่วน Color Matching



รูปที่ 4.26 หน้า Block diagram ของโปรแกรมส่วน Color Matching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 Flowchart ส่วนโปรแกรมส่วน Color Matching



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.27 Flowchart ส่วนโปรแกรม Color Matching

4.4.4 Report of Color Matching

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบความเหมือนของภาพตัวอย่างกับภาพ Template

Template name	S01 2k Ohm	S02 2k Ohm	S03 2k Ohm	S04 10 Ohm	S05 60 Ohm	S06 300 Ohm	S07 20k Ohm	S08 1k Ohm	S09 3k Ohm
T01 10 Ohm	5	4	2	4	2	5	2	5	5
T02 60 Ohm	0	0	0	0	3	1	0	0	0
T03 300 Ohm	2	0	0	1	0	4	0	2	0
T04 1k Ohm	0	1	0	4	4	5	0	5	1
T05 2k Ohm	3	1	0	0	0	0	2	0	0
T06 3k Ohm	2	0	1	1	1	2	0	1	5
T07 10k Ohm	1	1	0	0	0	1	1	2	0
T08 20k Ohm	0	0	0	0	0	0	2	0	0
T09 1M Ohm	0	0	0	0	4	0	0	0	0

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) แสดงผลการตรวจสอบความเหมือนของภาพตัวอย่างกับภาพ Template

Template name	S10 10k Ohm	S11 1M Ohm	S12 2k Ohm	S13 10k Ohm	S14 2k Ohm	S15 3k Ohm
T01 10 Ohm	5	3	0	0	0	0
T02 60 Ohm	0	4	0	0	0	0
T03 300 Ohm	0	0	0	0	0	0
T04 1k Ohm	5	4	0	0	0	0
T05 2k Ohm	2	0	0	0	0	0
T06 3k Ohm	0	0	0	0	0	0
T07 10k Ohm	4	0	0	0	0	0
T08 20k Ohm	0	0	0	0	0	0
T09 1M Ohm	0	5	0	0	0	0

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของการ Matching

Template name	S01 2k Ohm	S02 2k Ohm	S03 2k Ohm	S04 10 Ohm	S05 60 Ohm	S06 300 Ohm	S07 20k Ohm	S08 1k Ohm	S09 3k Ohm
T01 10 Ohm	100%	100%	100%	20%	100%	100%	100%	100%	100%
T02 60 Ohm	0%	0%	0%	0%	40%	100%	0%	0%	0%
T03 300 Ohm	100%	0%	0%	100%	0%	20%	0%	100%	0%
T04 1k Ohm	0%	100%	0%	100%	100%	100%	0%	0%	100%
T05 2k Ohm	40%	80%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
T06 3k Ohm	100%	0%	100%	100%	100%	100%	0%	100%	0%
T07 10k Ohm	100%	100%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	0%
T08 20k Ohm	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	0%	0%
T09 1M Ohm	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของการ Matching

Template name	S10 10k Ohm	S11 1M Ohm	S12 2k Ohm	S13 10k Ohm	S14 2k Ohm	S15 3k Ohm
T01 10 Ohm	100%	100%	0%	0%	0%	0%
T02 60 Ohm	0%	100%	0%	0%	0%	0%
T03 300 Ohm	0%	0%	0%	0%	0%	0%
T04 1k Ohm	100%	100%	0%	0%	0%	0%
T05 2k Ohm	100%	0%	0%	0%	0%	0%
T06 3k Ohm	0%	0%	0%	0%	0%	0%
T07 10k Ohm	20%	0%	0%	0%	0%	0%
T08 20k Ohm	0%	0%	0%	0%	0%	0%
T09 1M Ohm	0%	0%	0%	0%	0%	0%

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ส่วนจัดชุดอุปกรณ์และวัดความเข้มแสงในส่วนนี้ได้ทำการออกแบบชุดอุปกรณ์ที่เป็นชุดขาตั้งและแขนจับอุปกรณ์ให้สามารถปรับระยะและมุม L1, L2, L3, L4, S1, S2, S3, S4, Ø1 และ Ø2 ได้ ดังภาพ ที่ 4.1 ได้ผลดังตารางที่ 2 และสร้างวงจรลดแรงดันกระแสไฟ DC ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ทำการจ่ายไฟเลี้ยงที่ 5 Vdc กระแส 600 mA จากนั้นวัดความสม่ำเสมอของแสงบนพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน ด้วย Light Meter ของโปรแกรม LabVIEW โดยการเลื่อนกรอบ ROI ขนาด 160x400 Pixels และลากเส้นในแนวระนาบ 21 จากบนลงล่างห่างกันทุก 10 Pixels ในกรอบ ROI ที่กำหนดไว้และ ทำการวัดความเข้มแสงเชิงสัมพัทธ์ทั้งหมด 220 จุด ต่อ 1 เส้น โดยแบ่งระดับความเข้มแสงเป็น 0-255 ระดับแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่า Standard deviation ของความเข้มแสงได้ค่า Standard deviation เฉลี่ยเท่ากับ 2.24

2. ส่วนเก็บ Template ทำการเก็บภาพแบบ Snap Short จากกรอบ ROI ที่กำหนดให้และค่าพารามิเตอร์ของ Template โดย Learn Color Pattern ของโปรแกรม Labview กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ Learn mode : All, Feature Mode : Color and Shape (0), Ignore Black and White : Disabled แล้วบันทึกเป็นภาพ *.png เพื่อใช้การการเป็น Template สำหรับการ Matching ในส่วนของ Matching ต่อไป

3. ส่วนเก็บภาพตัวอย่างทำการเก็บภาพ Snap Short จาพภาพที่ได้จากกล้องเป็นภาพ ขนาด 640x480 Pixels และทำการตัดให้เป็นภาพขนาด 160x400 Pixels จากการกำหนดขนาด ROI ในส่วนวัดความเข้มแสง แล้วบันทึกเป็นภาพ *.bmp เพื่อใช้การการเป็นภาพตัวอย่าง สำหรับการ Matching ต่อไปในส่วนของ Color Matching ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่วน Color Matching จะทำการเปรียบเทียบระหว่างภาพตัวอย่างกับภาพ Template ซึ่งจะทำงานด้วย Learn Color Pattern และ Match Color Pattern ของโปรแกรม LabVIEW จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ Shift-Invariant Matching, Rotation-Invariant Matching, Color Sensitivity, Search Strategies, Color Score Weight, , No. of Matching, ซึ่งในการทดลองนี้จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

ภาพแบบ Shift-Invariant Matching คือภาพในแนวระนาบเท่านั้นไม่มีการหมุน

Search Strategies : Balanced

Color Sensitivity : Medium Sensitivity

Color Score Weight : 300

Score : 780

Rotation Angle Ranges (degrees) : -180 องศา ถึง 180 องศา

No. of Matching : 10

ซึ่งในส่วน Matching สามารถทำงานได้ดูผลการ Matching ได้จากตารางที่ 4 และเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนจากตารางที่ 5 และได้เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงมาก

5.2 ปัญหาที่พบและ ข้อเสนอแนะ

จากการทำลองศึกษาระบบ Machine Vision เพื่อใช้ในการจำแนกตัวต้านทานนั้นพบว่ามีปัญหาบางประการที่ทำให้โปรแกรม Matching ทำงานมีประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องมีการปรับปรุงแก้ไขและ พัฒนาต่อไป ได้แก่

1. ระบบการจัดแสงยังไม่ดีพอที่จึงทำให้ได้แสงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่บน Sample plate ซึ่งมีผลต่อความคมชัดและ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการเก็บภาพตัวอย่าง และภาพ Template ส่งผลให้โปรแกรมตรวจสอบได้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงมาก

2. การจัดวางตัวต้านทานบน Sample plate มีการจัดวางไม่สม่ำเสมอ มีบางส่วนติดกันและมีมุมการจัดวางที่ไม่เท่ากัน ทำให้โปรแกรมไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จึงต้องพัฒนาโปรแกรมในส่วนการแยกระยะห่างของตัวต้านทาน และการหมุน

3. แสงสะท้อนจากขาและตัวของตัวต้านทานมีผลกับค่าความสม่ำเสมอของแสง ทำให้โปรแกรมไม่สามารถแยกตัวต้านทานออกจากกันได้ ต้องพัฒนาโปรแกรมส่วนของการตัดแสงสะท้อนจากขาและตัวของตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เงาของตัวต้านทานที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบ ทำให้โปรแกรมไม่สามารถแยกแยะสีและรูปร่างของตัวต้านทานได้ ต้องปรับปรุงการจัดแสง และส่วนการแยกค่า Threshold ของโปรแกรม นอกจากนี้ในการเลือกพื้นที่ของ Template ควรจะเลือกพื้นที่บนตัวต้านทาน เพื่อลดปัญหาเรื่องเงา และขอบของตัวต้านทาน ซึ่งมีผลต่อการ Matching

5. กล้องที่ใช้ในการศึกษาเป็นกล้อง Web cam ความละเอียด 1.3 M. Pixels มีเทคโนโลยี RightLight ปรับระดับความเข้มแสง และความเพี้ยนของสี เชื่อมต่อด้วย USB 2.0 ถ่ายภาพตัวอย่างขนาด 640 x 480 Pixels ซึ่งอาจจะให้ความชัดเจนของภาพไม่เพียงพอต่อการทำงานของโปรแกรม จึงควรจะเปลี่ยนมาใช้กล้องที่มีความละเอียด และประสิทธิภาพที่ดีกว่านี้

6. เนื่องจากกล้องที่ใช้ให้ความละเอียดของภาพไม่ชัดเจน เช่น สีดำ สีน้ำตาล สีแดง และเขียว เมื่อถ่ายภาพมาแล้วจะให้สีที่ใกล้เคียงกับมาก จึงควรจะมีการกำหนดค่า Gray scale ของแต่ละสีก่อน และควรเลือกตัวต้านทานที่มีสีตรงกับค่า Gray scale ที่กำหนดไว้

7. ในการศึกษาระบบ Machine Vision ใช้ตัวต้านทานชนิด 3 แถบสี ขนาด ¼ w ซึ่งมีขนาดเล็กจึงทำให้ยากต่อการตรวจสอบ ตลอดจนการผลิตตัวต้านทานของแต่ละบริษัทมีสีของแถบสีที่ไม่เหมือนกัน จึงควรมีการ calibrate ขนาดและสีของตัวต้านทานก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ดุสิต เครืองาม 2542 สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิสส์ ฟิสิกส์ เทคโนลยี และการใช้งาน พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] วัฒนา ถาวร การส่องสว่าง Illumination วิศวกรรมไฟฟ้า พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537

[3] http://www.en.rmutt.ac.th/ee2/ e-learning/ทฤษฎีสีแสง ฟิสิกส์ราชมงคล.html

[4] www.ni.com/LabVIEW

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_power,20/06/2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้