

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด

COLOR MONITORING AID BLINDS

โดย

นาย วิทยา ล้วนอธิคมกุล รหัส 48015270

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. กิติพล ชิตสกุล



2/5/50  
2550

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **83002**  
วัน,เดือน,ปี... **30.0.0. 2551**

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

b. 119 57888  
i. ....

เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด  
COLOR MONITORING FOR BLINDS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด

COLOR MONITORING FOR BLINDS

ผู้จัดทำ

นาย วิทชา ล้วนอริคมกุล



## เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด

นายวิทยา ล้วนอริคมกุล รหัส 48015270

ดร.กิตติพล ชิตสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอดโดยมี TCS230 เป็นโมดูลตรวจวัดค่าสี ซึ่งโครงสร้างจะประกอบด้วย โฟโตไดโอดขนาด 8x8 ตัว เรียงแบบ แอเรีย โดยที่โฟโตไดโอดจะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือโฟโตไดโอดที่มีฟิลเตอร์สีแดง, สีเขียว, สีน้ำเงิน และแบบไม่มีฟิลเตอร์ จำนวนชุดละ 16 ตัว แต่ละกลุ่มจะตอบสนองความถี่แตกต่างกันตามชนิดของฟิลเตอร์ การทำงานของโมดูลตรวจวัดค่าสีนี้จะทำการตรวจจับแสงจาก LED ที่เข้ามาตกกระทบที่โฟโตไดโอด โดยอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า และจะแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณความถี่ออกมาแสดงผลในรูปสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) โดยมีค่า duty cycle เป็น 50% โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รับค่าความถี่จากโมดูลตรวจวัดค่าสีมาทำการประมวลผล แล้วแสดงผลในรูปของสัญญาณโดยการสั่น

## COLOR MONITORING FOR BLINDS

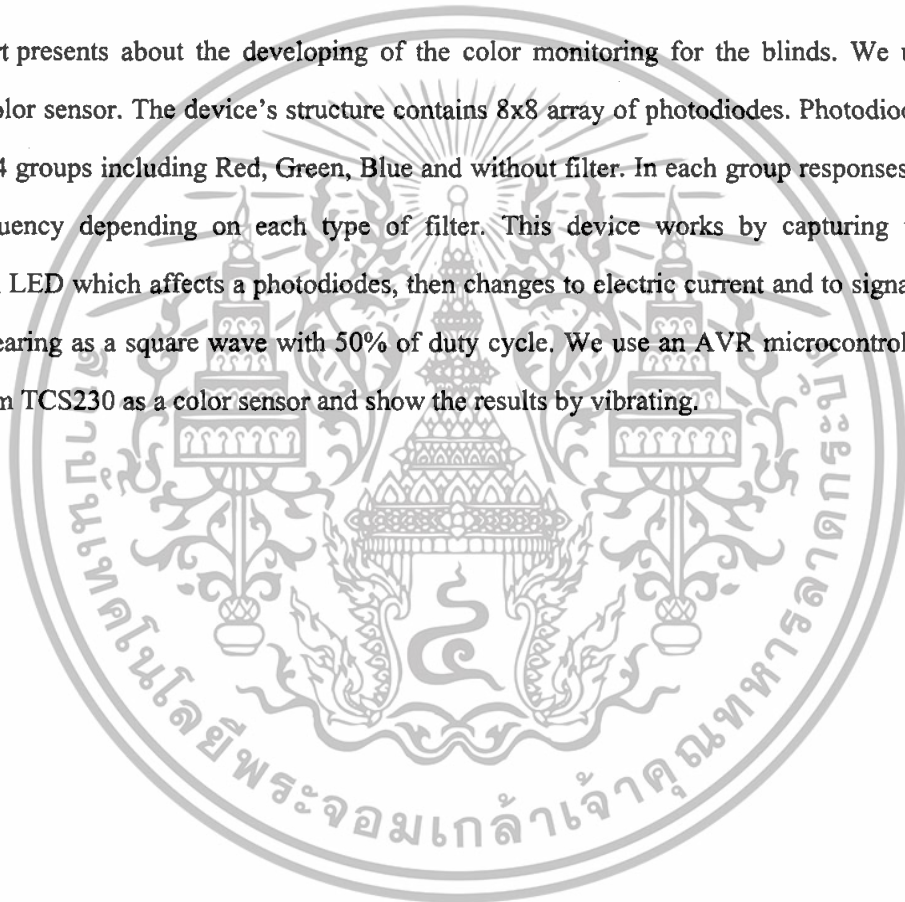
Mr. Wittaya Louneatikomkul ID. 48015270

Dr. Kitiphol Chitsakul Advisor

Educational Year 2007

### Abstract

This report presents about the developing of the color monitoring for the blinds. We use TCS230 as a color sensor. The device's structure contains 8x8 array of photodiodes. Photodiodes is separated in 4 groups including Red, Green, Blue and without filter. In each group responses in difference frequency depending on each type of filter. This device works by capturing the brightness from LED which affects a photodiodes, then changes to electric current and to signal's frequency, appearing as a square wave with 50% of duty cycle. We use an AVR microcontroller to take data form TCS230 as a color sensor and show the results by vibrating.



## กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกต้องขอขอบพระคุณ ดร. กิตติพล ชิตสกุล ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของ  
โครงการนี้ ท่านได้ให้คำแนะนำและคอยชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ - คุณแม่ ซึ่งท่านทั้งสองนั้นได้คอยอบรมสั่งสอนดูแล และเป็น  
กำลังใจให้ตลอดมาจนข้าพเจ้ามีวันนี้

สุดท้ายขอขอบใจเพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือทุกๆด้าน

(.....)

นาย วิทยา ล้วนอริคมกุล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 โครงสร้างของเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 โครงสร้างของรายงาน	3
<b>บทที่ 2 โครงสร้างและหลักการทำงานของโมดูล ET-TCS230</b>	<b>4</b>
2.1 คุณสมบัติโมดูล ET-TCS230	5
2.2 รายละเอียดของโมดูล ET-TCS230	6
2.3 ขาสัญญาณต่างๆ	6
2.4 การนำไปใช้งาน	8
2.5 ตัวอย่างขั้นตอนการอ่านค่าสี RGB	8
2.6 การตรวจวัดค่าสีด้วยเครื่อง ET-TCS230	8
2.6.1 คำนำเกี่ยวกับการมองเห็นสี	12
2.6.2 ภาพรวมของ CIE Colometry	13
2.6.3 การเกิดการเรืองแสง	15
2.6.4 แผนผังที่ใช้ในการตรวจเช็คค่าสี	15
2.6.5 The TCS230	17
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATMEGA 16 และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>26</b>
3.1 คุณสมบัติและขาต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์	26
3.2 รายละเอียด	27
3.2.1 โครงสร้างภายนอกและตำแหน่งขา	27
3.2.2 รายละเอียดของขาสัญญาณและการใช้งาน	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ฟังก์ชัน ADC	28
3.4 ฟังก์ชัน PWM	30
3.5 การใช้งาน Timer/Counter1 ในโหมด PWM	32
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>34</b>
<b>บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์การทดลอง</b>	<b>36</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>37</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>38</b>
รูปที่ 1 วงจรการทำงานของโมดูล ET-TCS230	40
รูปที่ 2 รูปโมดูล ET-TCS230	40
รูปที่ 3 วงจรในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์	41
รูปที่ 4 รูปถ่ายของชิ้นงานในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์	42
รูปที่ 5 รูปถ่ายแสดงชิ้นงานที่สมบูรณ์ด้านบน	42
รูปที่ 6 รูปถ่ายแสดงชิ้นงานที่สมบูรณ์ด้านหน้า	43
รูปที่ 7 รูปถ่ายแสดงชิ้นงานที่สมบูรณ์ด้านหลัง	43
รูปที่ 8 Flow Chart การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	44

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
<b>บทที่ 1</b>	
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของโครงสร้างของเครื่องช่วยบอดี้สำหรับคนตาบอด	2
<b>บทที่ 2</b>	
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมดูลตรวจวัดความสว่างสี	4
รูปที่ 2.2 การทำงานของ Block Diagram	4
รูปที่ 2.3 รายละเอียดของบอร์ด	5
รูปที่ 2.4 จัมเปอร์สำหรับเลือกการทำงานของหลอดไฟ LED	6
รูปที่ 2.5 ขาสัญญาณต่างๆของคอนเนคเตอร์ขนาด 8 PIN	6
รูปที่ 2.6 The ColorChecker has 24 colored patches on a 13 by 19 inch card	9
รูปที่ 2.7 ColorChecker spectra, top row	10
รูปที่ 2.8 ColorChecker spectra, second row	10
รูปที่ 2.9 ColorChecker spectra, third row	11
รูปที่ 2.10 ColorChecker spectra, bottom row (neutral series)	11
รูปที่ 2.11 Cone sensitivities	12
รูปที่ 2.12 CIE 1931 color-matching function	13
รูปที่ 2.13 SPDs แสดงค่าสิ่งเรืองแสงหลายๆ ชนิด	16
รูปที่ 2.14 Coordinates of ColorChecker patches	17
รูปที่ 2.15 แสดงการตอบรับ โดย 4 ช่องทางของเครื่อง TCS230	17
รูปที่ 2.16 แสดงถึงการตอบสนองของตัวกรองแสงที่สามารถตัดแสงอินฟราเรดได้	19
รูปที่ 2.17 Uncorrected TCS230 values	21
รูปที่ 2.18 Corrected TCS230 values	23
<b>บทที่ 3</b>	
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างภายนอกและขาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	27
<b>บทที่ 4</b>	
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับเซนเซอร์	35
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับเซนเซอร์	35

## สารบัญตาราง

	หน้า
<b>บทที่ 2</b>	
ตารางที่ 2.1 การกำหนดระดับสัญญาณความถี่เอาต์พุต (fo)	7
ตารางที่ 2.2 การกำหนดชนิดของฟิลเตอร์ของโฟโตรีโอดที่ต้องการวัดสัญญาณ	7
ตารางที่ 2.3 สรุปรูปหน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆของ IC TCS230	7
<b>บทที่ 4</b>	
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ	34



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เนื่องจากเทคโนโลยีในปัจจุบันได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และโมดูล ET-TCS230 เป็นอีกชิ้นงานหนึ่งที่ได้ถูกสร้างขึ้นมา เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการเพิ่มความสามารถให้แก่ผู้พิการทางด้านสายตา ให้สามารถรับรู้ถึงสีต่างๆ ที่เราใช้ในชีวิตประจำวันได้ ซึ่งเครื่องนี้ มีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและใช้งาน โมดูล ET-TCS230

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด AVR เบอร์ AT MEGA 16

1.2.3 เพื่อศึกษาการเชื่อมโยงติดต่อกันระหว่างโมดูล ET-TCS230 และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด AVR เบอร์ AT MEGA 16

1.2.4 ศึกษาหลักการเขียนโปรแกรมในตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด AVR เบอร์ AT MEGA 16 เพื่อดึงข้อมูลจากโมดูล ET-TCS230

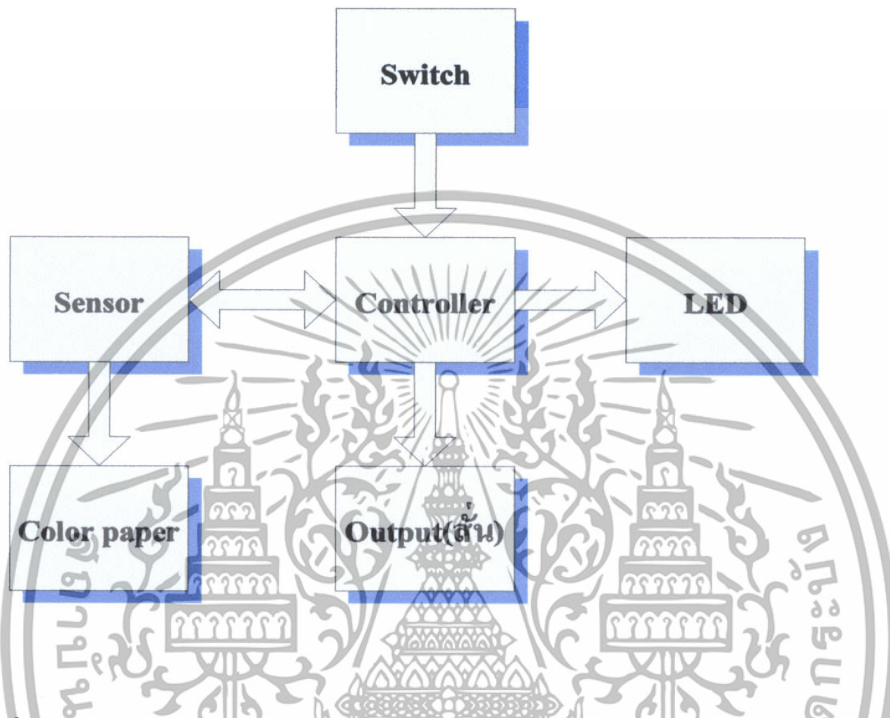
#### 1.3 ขอบเขตโครงการ

1.3.1 สร้างเครื่องตรวจจับสีสำหรับผู้พิการทางด้านสายตาได้

1.3.2 สามารถตรวจจับสีได้ 5 สี สีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน สีเหลือง และสีขาว โดยการสั่นเตือน

#### 1.4 โครงสร้างของเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด

เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอดนี้เป็นการนำโมดูลตรวจจับความสว่างของสีมาตรวจจับค่าสีจากกระดาษสีหรือผ้าสี แล้วนำไปทำการแยกสีด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ AT-MEGA16 และสามารถแจ้งเตือนโดยการสั่น



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของโครงสร้างของเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด

ส่วนที่ 1 สวิตช์ ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด

ส่วนที่ 2 เซนเซอร์ ประกอบด้วยโฟโตไดโอดแอมป์ ทำหน้าที่ตรวจจับค่าความสว่างของสีที่มาตกกระทบบ แล้วส่งค่าความถี่ไปยังส่วนของคอนโทรลเลอร์

ส่วนที่ 3 คอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ควบคุมและประมวลผลทั้งหมดของระบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด AVR เบอร์ ATMEGA 16 โดยเปลี่ยนค่าความถี่ออกไปแสดงผลทาง LED และการสั่นเตือน

ส่วนที่ 4 ส่วนแสดงผล ประกอบด้วย LED และมอเตอร์ของโทรศัพท์มือถือ โนเกีย รุ่น 3310

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้สามารถใช้โปรแกรม AVR Studio 4

1.5.2 เข้าใจหลักการการทำงานของโมดูล ET-TCS230

## 1.6 โครงสร้างของรายงาน

รายงานนี้ได้รวบรวมรายละเอียดและความเป็นมาของรายงานและการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรให้มีขนาดเล็ก พกพาง่ายและใช้งานสะดวกมากยิ่งขึ้น ในการทำโครงงานนี้จะทำการแบ่งรายละเอียดออกเป็นบทต่างๆ ตามลำดับเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาคำความเข้าใจ ดังนี้

**บทที่ 1** บทนำเกี่ยวกับความเป็นมาและลักษณะของ โครงงานนี้

**บทที่ 2** เป็นหลักการทำงานและ โครงสร้างของ โมดูล ET-TCS230

**บทที่ 3** เป็นหลักการทำงานและ โครงสร้างของไมโครคอนโทรเลอร์

**บทที่ 4** การออกแบบวงจรและผลการทดลอง

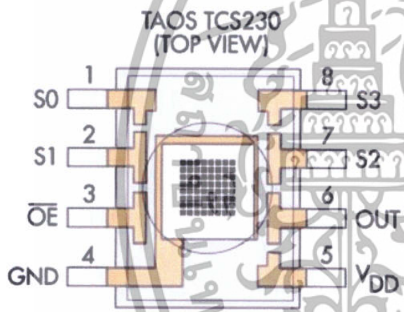
**บทที่ 5** บทสรุปและวิจารณ์การทดลอง



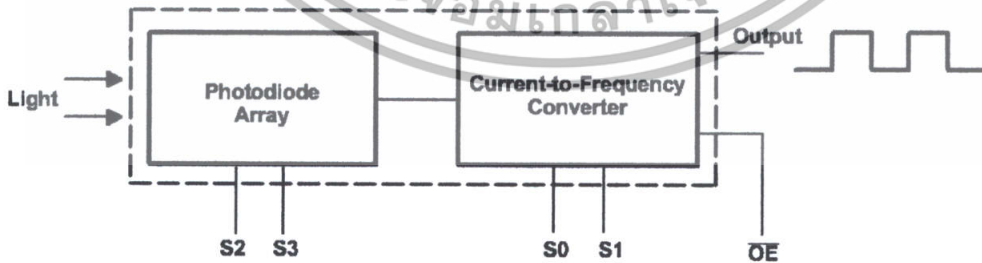
บทที่ 2

โครงสร้างและหลักการทำงานของโมดูล ET-TCS230

ET-TCS230 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้นำเอาอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับระดับความสว่างของสีซึ่งโมดูลตัวดังกล่าวนี้สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของสีที่มากกระทบตัวมันให้ออกมาเป็นสัญญาณความถี่เอาต์พุต สี่เหลี่ยม (Square wave) โดยมีค่า duty cycle เป็น 50% ซึ่งความถี่เอาต์พุตดังกล่าวจะมีผลความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความสว่างของสีที่มากกระทบตัวเซนเซอร์ โดยโครงสร้างของโมดูล TCS230 นั้นจะประกอบไปด้วย โฟโต้ไดโอดขนาด 8x8 ตัว ซึ่งมีการจัดเรียงกันแบบ อาร์เรย์ โดยโฟโต้ไดโอดเหล่านี้จะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ โฟโต้ไดโอดที่มีฟิลเตอร์ สีแดง (Red) , เขียว (Green) , น้ำเงิน (Blue) และ แบบไม่มีฟิลเตอร์ (Clear) จำนวนชุดละ 16 ตัว ซึ่งแต่ละกลุ่มก็จะตอบสนองต่อแสงของสีแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของฟิลเตอร์นั้นๆ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับความสว่างสี



รูปที่ 2.2 การทำงานของ Block Diagram

จากรูปบล็อกไดอะแกรม แสง(Light) จะเข้ามาตกกระทบบที่โฟโตไดโอด (Photodiode Array) ซึ่งเราสามารถเลือกชนิดฟิลเตอร์ของโฟโตไดโอด ได้จากขาสัญญาณ S2 และ S3 โดยผลที่ได้จะอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า และ จะถูกส่งไปยังภาค Current-to-Frequency Converter เพื่อทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณความถี่ออกไปที่ขาสัญญาณ Output โดยมี S0 และ S1 เป็นตัวกำหนดช่วงของสัญญาณความถี่ที่เราต้องการ ส่วนขาสัญญาณ OE ทำหน้าที่ควบคุมการ Enable และ Disable ของสัญญาณ Output ซึ่งจะแอกทีฟที่สัญญาณลอจิก “0”

## 2.1 คุณสมบัติโมดูล ET-TCS230

2.1.1 ให้ค่าความละเอียดของผลลัพธ์สูง (ค่าจากการแปลงความเข้มของแสงไปเป็นความถี่ fo)

2.1.2 สามารถโปรแกรมเลือกตรวจวัดค่าสีจากฟิลเตอร์ (RED, Green ,Blue และ Clear) ตามต้องการ และ กำหนดระดับสัญญาณของเอาต์พุต fo (Frequency Output) ได้

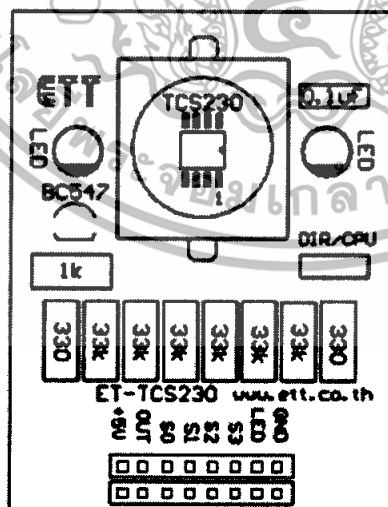
2.1.3 สามารถทำการเชื่อมต่อสัญญาณต่างๆ เขากับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง

2.1.4 ทำงานที่แรงดัน 2.7 V ถึง 5.5V

2.1.5 TCS230 เป็นชิพที่มีคุณสมบัติกินกำลังงานต่ำ

2.1.6 ค่าความคลาดเคลื่อน 0.2% ที่ความถี่ 50kHz

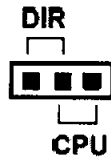
2.1.7 มีหลอดไฟ LED สำหรับการสะท้อนสีของวัตถุ



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของบอร์ด

## 2.2 รายละเอียดของบอร์ด

DIR/CPU เป็นจัมเปอร์สำหรับเลือกการทำงานของหลอดไฟ LED ซึ่งมีหน้าที่ในการสะท้อนแสงสีของวัตถุไปยังเลนส์ของตัวเซนเซอร์ TCS230 โดยสามารถเลือกได้สองลักษณะคือ



### รูปที่ 2.4 จัมเปอร์สำหรับเลือกการทำงานของหลอดไฟ LED

**DIR** = การเชื่อมต่อวงจร LED ให้ทำงาน (ติดสว่าง) ตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีการควบคุมใดจาก CPU

**CPU** = คือ การควบคุมการทำงานของ LED ด้วย CPU หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ภายนอก ซึ่งจะควบคุมที่ขาสัญญาณ LED ของคอนเนคเตอร์ 8 PIN

## 2.3 ขาสัญญาณต่างๆ

จะถูกจัดเรียงเป็นคอนเนคเตอร์ขนาด 8 PIN โดยมีทั้งตัวผู้และตัวเมีย เพื่อความสะดวกในการต่อใช้งานซึ่งขาสัญญาณต่างๆ มีหน้าที่ดังนี้



### รูปที่ 2.5 ขาสัญญาณต่างๆของคอนเนคเตอร์ขนาด 8 PIN

2.3.1 +5V คือ ขาสัญญาณไฟเลี้ยงแรงดันไฟบวก 5 โวลท์

2.3.2 OUT คือ ขาสัญญาณเอาต์พุต โดยให้ค่าออกมาเป็นความถี่ ( $f_o$ ) เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม Duty cycle 50% ซึ่งค่าความถี่จะแปรผันตามค่าของแสงที่ตกกระทบ ชนิดของฟิลเตอร์

2.3.3 S0 และ S1 เป็นขาสัญญาณเลือกระดับของสัญญาณความถี่เอาต์พุต ( $f_o$ ) โดยสามารถเลือกได้ 4 ระดับดังตารางต่อไปนี้

S0	S1	OUTPUT FREQUENCY SCALING (fo)
0	0	Power down (ไม่ผลิตสัญญาณความถี่)
0	1	2% (ความถี่ต่ำ)
1	0	20% (ความถี่ที่ 20%)
1	1	100% (ความถี่สูงสุด)

ตารางที่ 2.1 การกำหนดระดับสัญญาณความถี่เอาต์พุต (fo)

S2	S3	PHOTODIODE TYPE
0	0	แดง (Red)
0	1	น้ำเงิน (Blue)
1	0	ไม่มีฟิลเตอร์ (Clear : no filter)
1	1	เขียว (Green)

ตารางที่ 2.2 การกำหนดชนิดของฟิลเตอร์ของโฟโตไดโอดที่ต้องการวัดสัญญาณ

LED เป็นขาสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมหลอดไฟ LED ให้ติดสว่าง หรือ ดับ ทั้งนี้หากต้องการที่จะควบคุมการทำงานของ LED จากขาสัญญาณนี้จะต้องทำการเลือกจัมเปอร์ DIR/CPU มาอยู่ที่ตำแหน่ง CPU ด้วย จึงจะสามารถทำการควบคุมการทำงานของหลอด LED ได้

ขาสัญญาณ	I/O	คำอธิบาย
GND		Power supply ground
OE	Input	ขาสัญญาณ Enable สัญญาณความถี่เอาต์พุต (fo) ที่ทำงานที่ลอจิก "0" โดยในบอร์ด ET-TCS230 ได้ทำการต่อ Enable ไว้ให้แล้ว
OUT	Output	ขาสัญญาณความถี่เอาต์พุต(fo) ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความสว่างของสี
S0,S1	Input	ขาสัญญาณอินพุต กำหนดระดับสัญญาณความถี่เอาต์พุต(สามารถดูรายละเอียดได้ในตารางที่ 1)
S2,S3	Input	ขาสัญญาณเลือกประเภทของ Photodiode หรือ สีของฟิลเตอร์ที่ต้องการ (สามารถดูรายละเอียดได้ในตารางที่ 2)
VDD		Supply Voltage

ตารางที่ 2.3 สรุปหน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆของโมดูล ET-TCS230

## 2.4 การนำไปใช้งาน

ขาสัญญาณ S0 และ S1 ได้มีการต่อตัวต้านทาน Pull-Up ไว้ ( $S0=1, S1=1$ ) ซึ่งจะทำให้ระดับสัญญาณความถี่เอาต์พุตอยู่ในระดับ 100% อยู่แล้ว ซึ่งหากต้องการระดับสัญญาณที่ 100% ก็ไม่จำเป็นต้องต่อสัญญาณมาควบคุม (แต่หากต้องการที่ระดับต่างๆจะต้องต่อสัญญาณมาควบคุมรายละเอียดในตารางที่ 1) ซึ่งขาสัญญาณที่จำเป็นต้องควบคุมก็คือขาสัญญาณ S2 และ S3 โดยวิธีการในการอ่านค่าสีจากตัวเซนเซอร์ดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการเลือกฟิลเตอร์ของสีที่เราต้องการอ่านจากนั้นทำการนับสัญญาณความถี่ (fo) ที่ขาสัญญาณ OUT แล้วทำการเก็บค่าไว้ซึ่งควร จะทำการแยกเก็บตัวแปรออกเป็น 3 ตัวแปร คือ ตัวแปรเก็บค่าสี แดง (Red) , เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue)ซึ่งสามารถสรุปตามตัวอย่างขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

## 2.5 ตัวอย่างขั้นตอนการอ่านค่าสี RGB

2.5.1 กำหนดลอจิกให้กับ S0 และ S1 เพื่อกำหนดระดับสัญญาณความถี่เอาต์พุตในช่วงที่ต้องการ (ดูรายละเอียดจากตารางที่ 1)

2.5.2 กำหนดลอจิกให้  $S2=0, S3=0$  เพื่อเลือกฟิลเตอร์สีแดง

2.5.3 นับสัญญาณความถี่ที่ขาสัญญาณ OUT เก็บผลลัพธ์ลงตัวแปร Red\_result

2.5.4 กำหนดลอจิกให้  $S2=0, S3=1$  เพื่อเลือกฟิลเตอร์สีน้ำเงิน

2.5.5 นับสัญญาณความถี่ที่ขาสัญญาณ OUT เก็บผลลัพธ์ลงตัวแปร Blue\_result

2.5.6 กำหนดลอจิกให้  $S2=1, S3=1$  เพื่อเลือกฟิลเตอร์สีเขียว

2.5.7 นับสัญญาณความถี่ที่ขาสัญญาณ OUT เก็บผลลัพธ์ลงตัวแปร Green\_result

หมายเหตุ : จะต้องทำการ On หรือ ส่งลอจิกให้ LED ติดสว่างทุกครั้งที่ทำกรอ่านค่าสัญญาณสี เพื่อให้แสงของ LED สะท้อนแสงของสีวัตถุเข้ามาหาตัวเซนเซอร์ หรือ หากต้องการให้หลอดไฟ LED ติดสว่างตลอดเวลา ก็ให้เลือกจัมเปอร์ DIR/CPU มาที่ตำแหน่ง DIR

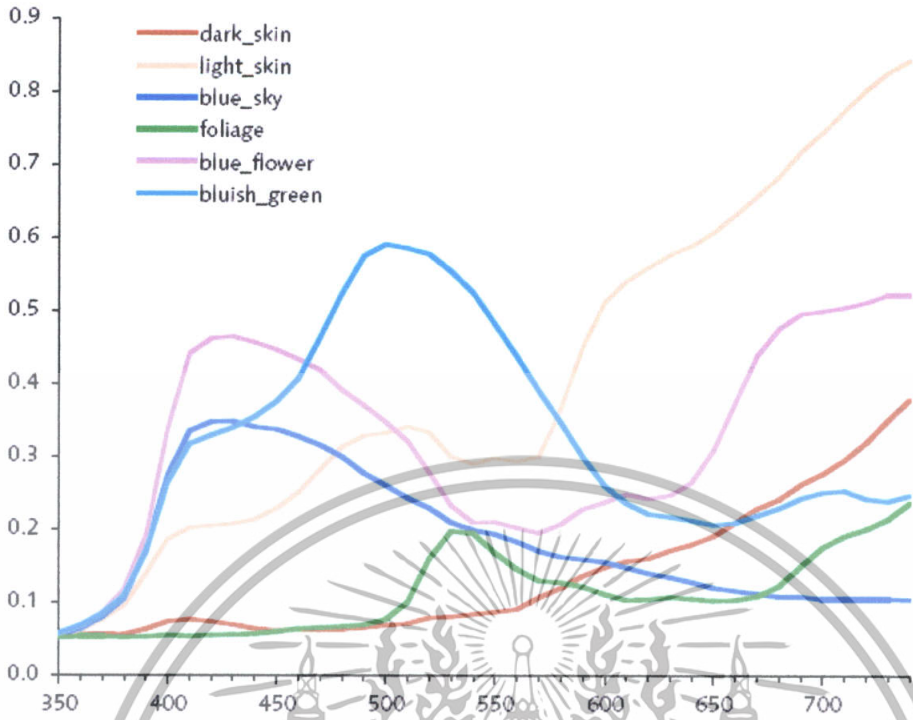
## 2.6 การตรวจวัดค่าสีด้วยโมดูล ET-TCS230

ET-TCS230 คืออุปกรณ์ตรวจจับวัดค่าสีที่มีความละเอียดสูง ซึ่งเป็นพลาสติกใสขนาด 8-pin SOIC อุปกรณ์นี้รายงานผลเป็นความถี่นอกโดยแสดงเป็นจำนวนของคลื่นความถี่สั้น (สีฟ้าหรือน้ำเงิน), กลาง (สีเขียว), ยาว (สีแดง) และแถบกว้าง (สีขาว) ปรากฏค่าที่วัดได้จากพลังของการมองเห็นบนอุปกรณ์ดังกล่าว และสามารถใช้กับวิธีการตรวจวัดค่าของสีในหลายรูปแบบ รายละเอียดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือนี้แสดงอยู่ในใบแสดงข้อมูลจำเพาะ ซึ่งให้รายละเอียดสำคัญเกี่ยวกับวิธีการทำงาน (concept) ทั้งหมด รวมทั้งการคิดคำนวณผลของเครื่องมือ TCS230 เราอาจจะใช้แผ่นผัง “ColorChecker chart” วัดค่าสีเป็นเครื่องกระตุ้นการมองเห็นในการทำงานของเครื่องมือ โดยบอกเป็นค่าตัวเลขในการตรวจจับค่าสี แผ่นผังแสดงดังรูปที่ 1 ผลิตและจำหน่ายโดย

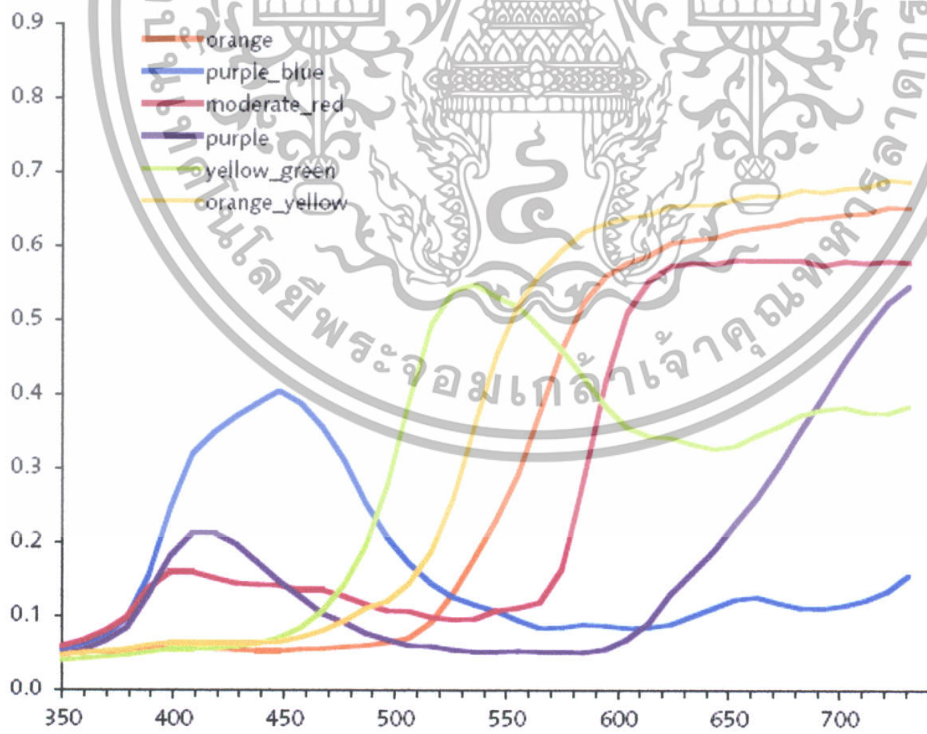
GretagMacbeth แผ่นผังนี้วัดค่าโดยประมาณ 13x9 นิ้ว มีทั้งหมด 24 กลุ่มสี โดยเรียงเป็น array ในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 แสดงค่าการตกกระทบ และสะท้อนกลับและการกระจายแสงและสีตามแต่ละกลุ่มสีที่เรียงเป็น 4 แถวในแผ่นผัง ซึ่งก็คือส่วนประกอบต่างๆ ของแสงที่ปรากฏขึ้น และสะท้อนกลับมาในกระบวนการความยาวคลื่นจาก 350 nm ถึง 740 nm



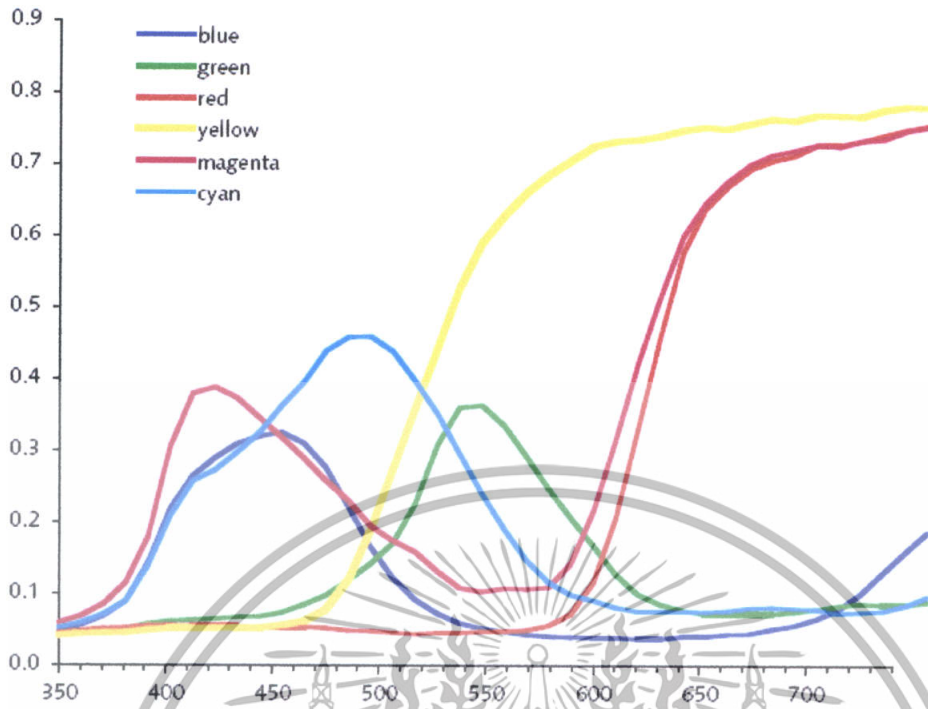
รูปที่ 2.6 The ColorChecker has 24 colored patches on a 13 by 19 inch card



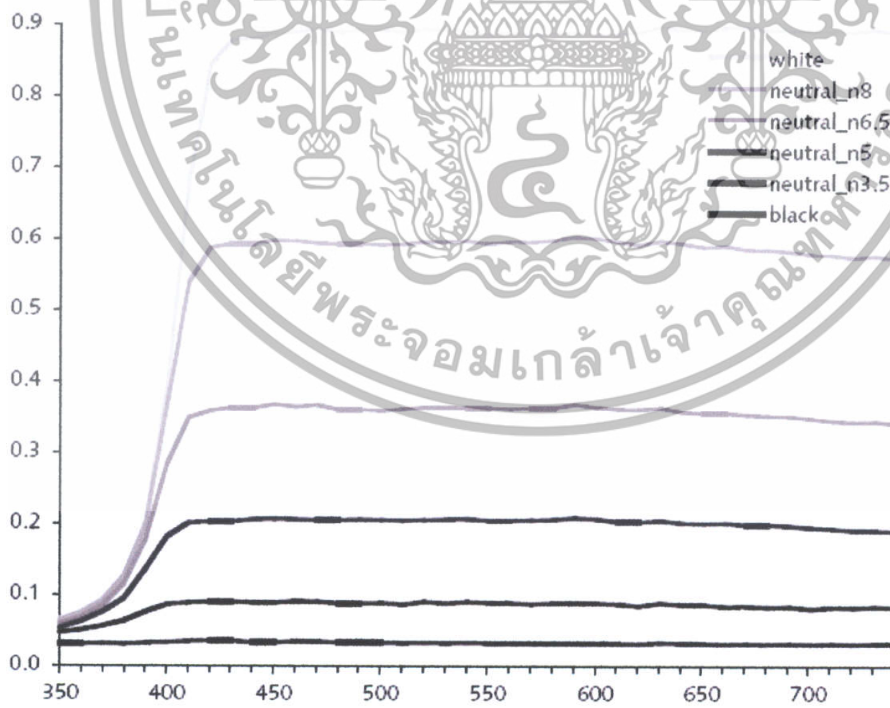
รูปที่ 2.7 ColorChecker spectra, top row



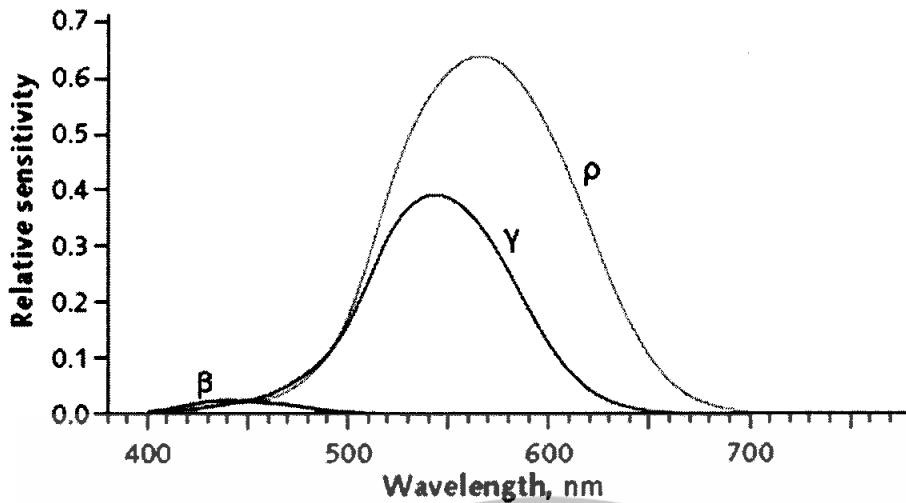
รูปที่ 2.8 ColorChecker spectra, second row



รูปที่ 2.9 ColorChecker spectra, third row



รูปที่ 2.10 ColorChecker spectra, bottom row (neutral series)



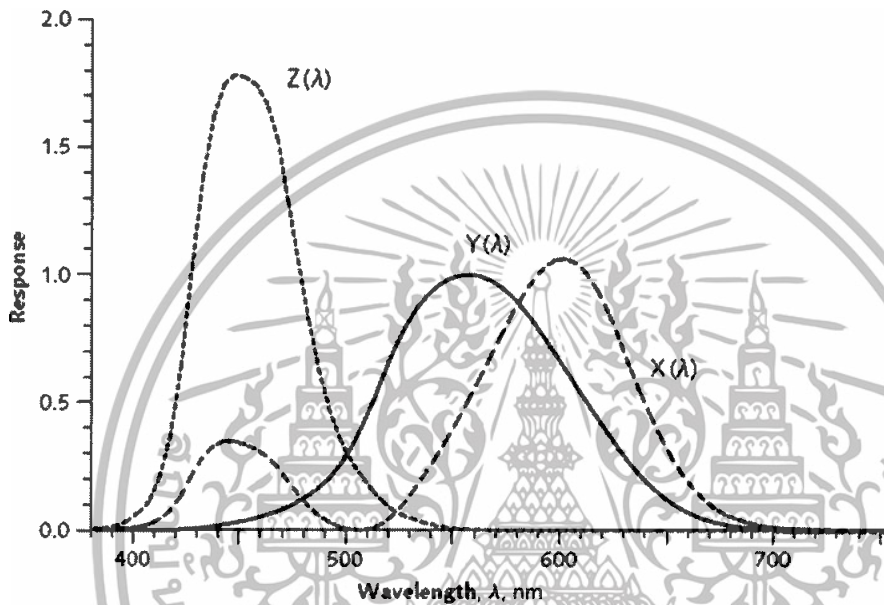
รูปที่ 2.11 Cone sensitivities

### 2.6.1 คำนำเกี่ยวกับการมองเห็นสี

เซลล์รับภาพซึ่งเรียกว่า โคนส์ (cones) ในเรตินาของดวงตาเป็นอวัยวะในการมองเห็นและอ่านค่าสีของมนุษย์เรา โคนส์เซลล์มี 3 ประเภท คือ แบบที่ไวต่อคลื่นยาว กลาง และสั้น ซึ่งมีรัศมีอยู่ใน electromagnetic spectrum ระหว่าง 400-700 nm เพราะว่าความไวนั้นของโคนั้นโดยคร่าวๆ แล้วจะอยู่ในส่วนต่างๆ ของการตกกระทบและกระจายแสงและสี ซึ่งปรากฏเป็นสีแดง เขียว และฟ้า (หรือน้ำเงิน) นักวิทยาศาสตร์ทางด้านสีจึงบันทึกประเภทเซลล์เป็น  $\rho$ ,  $\gamma$ , และ  $\beta$  ในตัวอักษรกรีก แทนอักษร r, g, และ b (การบันทึกการตรวจจับเป็น R, G และ B นั้นจะผิดจากการตอบสนองที่ใกล้เคียงที่สุด) การประมาณค่าการตอบสนองการตกกระทบและการกระจายของแสงและสีตามประเภทของโคนตามที่แสดงในภาพที่ 6 ด้านบน (ในบางครั้งการใช้ตัวอักษร S, M, และ L ใช้แสดงแทนคำว่าคลื่นสั้น กลาง และยาว) แสงในโลกทางกายภาพนั้น กำหนดโดยพลังการตกกระทบและการกระจายของแสงและสี (SPDs) วัตถุที่มีสีกำหนดรู้ได้โดยการวัดค่าโดยแสดงผลของการสะท้อนกลับ ตกกระทบและกระจายของแสงในรูปกราฟที่เป็นเส้นโค้ง (spectral reflectance curves) เช่นที่แสดงในผัง ColorChecker เป็นต้น อย่างไรก็ตามการมองเห็นก็ไม่ได้ไวพอกับความยาวคลื่นจริงที่เกิดขึ้นต่อการกระตุ้นนั้น สิ่งสำคัญคือ ความละเอียดที่เกิดเป็น curve ในการรับรู้ต่างๆซึ่งก็คือ โคนเซลล์ 3 รูปแบบที่นำไปสู่คุณสมบัติของ trichromaticity นั้นเอง องค์ประกอบทั้งสามเป็นสิ่งจำเป็นและพอเพียงที่จะกำหนดรู้สีที่ดวงตามนุษย์สัมผัสได้หรือตีความอีกนัยหนึ่งก็คือคำที่กล่าวไว้ว่า “สีที่ดวงตาสัมผัสได้” มันมีทั้งข้อดีที่สุดเท่าที่จะมีได้ และอาจนำไปสู่ความผิดพลาดที่แย่ที่สุดได้เช่นกัน สีกำหนดรู้โดยการมองเห็น ดังนั้นคงไม่ต้องใช้คำกล่าวต่อไปนี้มารับรอง “ตามที่สัมผัสรับรู้ได้ด้วยตา” หรือใช้คำกล่าวที่ว่าสามารถมองเห็นได้มาใช้กล่าวถึงสี

### 2.6.2 ภาพรวมของ CIE Colorimetry

การรับรู้ของโคเนเซลล์ที่มีต่อการกระจายแสงตกกระทบที่ได้แสดงไว้ในกราฟตามรูปที่ 6 นั้นไม่สามารถหาได้จากการค้นคว้าวิจัยในทศวรรษที่ 1920 นักค้นคว้าวิจัยในยุคนั้นใช้การทดลองทางด้านจิตวิทยาภาพ ตัวอย่างเช่น การทดลองจับคู่สีที่เรารู้จักกันดีและเพื่อให้ได้ข้อมูลมา CIE คือ คณะกรรมการนานาชาติที่รับผิดชอบต่อมาตรฐานของสีในปี 1931 องค์กรนี้ได้ปรับเปลี่ยนกระบวนการจับคู่สีดังที่แสดงเป็นกราฟในรูปที่ 7



รูปที่ 2.12 CIE 1931 color-matching function

จากรูปกล้องถ่ายรูปที่มีการตรวจจับ 3 แบบจะให้กราฟที่มี curves กราฟโค้งเหล่านี้หรือให้ส่วนผสมของกราฟโค้งดังกล่าวเพื่อการรายงานถึงสีทั้งหมดให้ครบถ้วน อย่างไรก็ตาม อย่งไรก็ดีการพิจารณาถึงสิ่งที่เกิดขึ้นทำให้มันยากขึ้นไปอีก การวิเคราะห์กระบวนการเหล่านี้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้กับค่าของพลังการกระจายแสงและการตกกระทบได้เลย (SPD)

เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบค่า SPD ภายใต้กราฟโค้งทั้งสามนี้ (ซึ่งก็คือแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่เกิดขึ้น) และการรวบรวมค่าที่เกิดขึ้นได้ตัวเลขของค่าบันทึก X, Y, และ Z ต่อเนื่องไปกับการคำนวณค่าทางคณิตศาสตร์ ค่าเฉลี่ย 3 ค่า จำต้องตีค่าทางคณิตศาสตร์ และทำเป็นตาราง matrix ออกมาได้ก็เพียงพอแล้ว ค่า X, Y, และ Z tristimulus values สามารถกำหนดลักษณะสี มันคือปริมาณของแสงที่ปรากฏในสัดส่วนพอเหมาะต่อพลังการมองเห็น ซึ่งรวบรวมเอาความไวต่อการรับรู้ในรูปของความยาวคลื่นที่มีอยู่ในการมองเห็นของมนุษย์ ค่า Y คือความเรืองแสง ซึ่งแต่เดิมแสดงเป็นหน่วยที่เรียกว่า candelas แรงเทียบต่อตารางเมตร (cd.m) หากจะวัดค่าตกกระทบ ค่า

ตัวกระตุ้นทั้ง 3 จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะการเรืองแสง การขยายของมาตราส่วนด้วยพลังของการเรืองแสง การเรืองแสงที่สัมพันธ์คือ อัตราส่วนของการเรืองแสงที่สะท้อนกลับ ซึ่งรู้จักกันว่าเป็น luminance factor ตัวประกอบของการเรืองแสง ค่า  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ , และ  $Z(\lambda)$  ของกระบวนการจับคู่สี ในรูปที่ 7 เห็นได้ชัดว่าแตกต่างจาก  $\rho$ ,  $\gamma$ , และ  $\beta$  ที่เกิดจากความไวต่อการกระจายแสงที่มากกระทบบดงในรูปที่ 6 และไม่ว่าแต่การนำค่า  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ , และ  $Z(\lambda)$  ที่ปรากฏในรูปกราฟโค้ง 3x3 ที่แปลงมาเป็น linear ที่จะสามารถนำมาเป็นข้อตกลงที่ดีได้กับภาพในรูปที่ 6 เหตุผลและสภาพการณ์ของความแตกต่างนั้นซับซ้อน ข้อถกเถียงนี้ยังคงเป็นหัวข้อของการค้นคว้าวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ทางด้านสีต่อไป สำหรับจุดประสงค์แล้วคำอธิบายที่ดีที่สุดคือ แม้ข้อเท็จจริงที่ว่าเซลล์รับภาพจะตอบรับตามที่แสดงในรูปที่ 6 ก็ตาม ค่าของคุณลักษณะในการมองเห็นระดับสูง ซึ่งเป็นการมองเห็นได้ดีที่สัมพันธ์กับ SPDs ต่อสี นั่นก็คือคำอธิบายที่ดีที่สุดของ CIE curves กราฟเส้นโค้งตามบรรทัดฐานของ CIE ยากที่จะทำให้ได้ความโค้งที่สมบูรณ์แบบหรือใกล้เคียงมากที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นในการใช้ (application) ส่วนใหญ่ช่วงของสีต่างๆที่จำเป็นต้องจำเพาะเจาะจงนั้นมีข้อจำกัด และไม่สำคัญที่จะต้องให้ได้ค่า CIE curves ที่ใกล้เคียงที่สุด สิ่งที่เกิดจากการเรืองแสงคือ สัดส่วนที่พอเหมาะพอดีต่อความเข้ม แต่ส่วนหนึ่งก็วัดจากการตอบรับจากการมองเห็นและไวต่อความรู้สึกในความเบาบางของการกระจายของแสงด้วย การรับรู้การตอบสนองต่อสิ่งเรืองแสงนั้นซับซ้อน แต่สามารถบอกคร่าวๆได้โดยกระบวนการของพลัง มาตรฐาน CIE ได้คิดคำนวณความเบาบางของแสงโดยบันทึกเป็น  $L^*$  โดยประมาณค่า 0.4-power ต่อตัวเรืองแสงนั้น เพราะความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนในจำนวนความเข้ม ตัวเรืองแสงและความเบาบางของแสง จึงควรระวังในการใช้ข้ออธิบายเหตุผลเหล่านี้อย่างถูกต้องที่สุด ในการใช้ applications ต่างๆ การกล่าวถึงสัญญาณ tristimulus ตัวกระตุ้นทั้งสาม (รวมทั้งการเรืองแสง) มาตรฐานดังกล่าวคือการเกิดเรืองแสงนั้นๆ มิฉะนั้นบางทีมันก็ไม่สำคัญและไม่น่าสนใจ สิ่งที่น่าสนใจมากกว่าคือ อัตราส่วนของมันนั่นเองที่กำหนดคุณลักษณะของสีในส่วนที่กล่าวถึงการเรืองแสง CIE ได้กำหนดมาตรฐานของการแปลงค่าออกไปของสมการที่ 1 ในค่า margin เมื่อแปลง  $[X, Y, Z]$  ค่าของมันเป็นคู่ของแกน  $[x, y]$  ค่าองค์ประกอบรวมของ chromaticity ซึ่งบ่งบอกค่าของสีในส่วนที่ไม่พูดถึงการเรืองแสง องค์ประกอบและความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องดังกล่าวมานี้แล้วไม่กระจ่ายชัดพอที่จะกำหนดจุด (plotting) ลงบนไดอะแกรม 2 มิติ ของ chromaticity diagram

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$
(1)

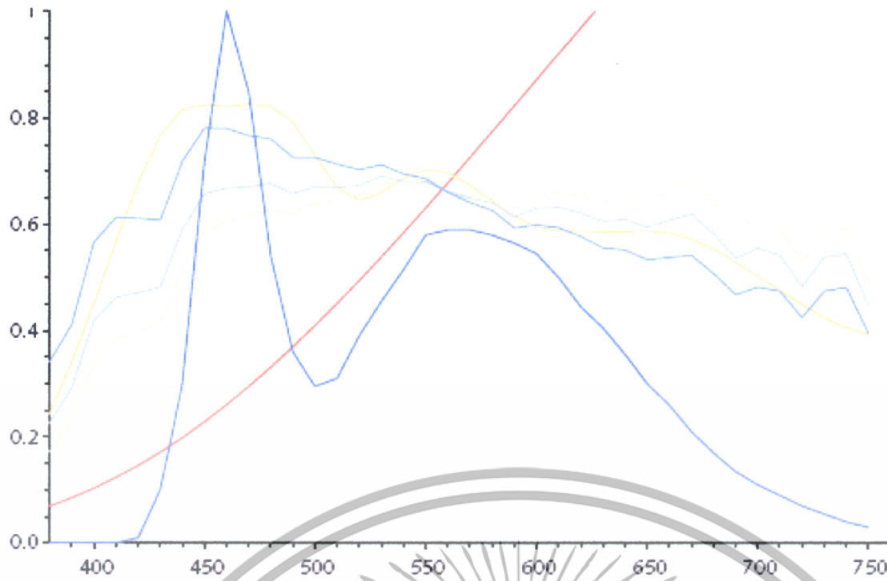
### 2.6.3 การเกิดการเรืองแสง

วัตถุที่มวลต่ำจำเป็นต้องเรืองแสงเพื่อให้สามารถมองเห็นได้ ค่า SPD เป็นผลที่แสดงให้เห็นว่า วัตถุเรืองแสงได้นั้นคือผลผลิตของความยาวคลื่นต่อความยาวคลื่นของการเรืองแสงได้ตามค่า SPD และการกระจายแสงที่ตกกระทบของวัตถุก่อนที่แสงจะมาถึงดวงตา ปฏิบัติการได้กลับต่อบรรดาที่มาของแสงและวัตถุที่เกิดขึ้นตามหลักของการกระจายแสงตกกระทบไม่ได้อยู่ในหลักของ trichromaticity การจำลองเอาปฏิกริยาได้กลับเหล่านี้มาแสดงให้เห็นจึงต้องการการคิดคำนวณค่าของการกระจายและการตกกระทบของแสงเมื่อนำ TCS230 มาใช้นั้นจำเป็นต้องใส่ใจต่อองค์ประกอบของการกระจายและตกกระทบของแสงที่มีในการเกิดเรืองแสงและความโน้มเอียงต่อปฏิกริยาได้กลับระหว่างการเกิดเรืองแสงและตัวอย่างที่นำมาตรวจจับค่าสี โดยปกติแล้วตัวอย่างที่มีความแหลมคมน้อยที่สุดน่าจะดีที่สุด

การใช้งานอาจเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดค่าสี ซึ่งในกรณีที่ได้ให้รายละเอียดไปก่อนหน้านี้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม TCS230 เกี่ยวข้องไม่มากนักกับการประมาณค่าของสีตามที่เห็นโดยสายตา แต่ส่วนใหญ่จะค่อนข้างไปทางการตรวจจับความไวโดยการวัดทางกายภาพที่เกี่ยวกับพลังในการมองเห็น ในการใช้งานดังกล่าว การจะประมาณการตอบสนองในการมองเห็นอาจไม่ใช่วิถีทางที่ดีที่สุด มันอาจไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรที่จะใช้การตรวจวัดทางกระบวนการทางกายภาพโดยตรง

### 2.6.4 แผนผังที่ใช้ในการตรวจเช็คค่าสี

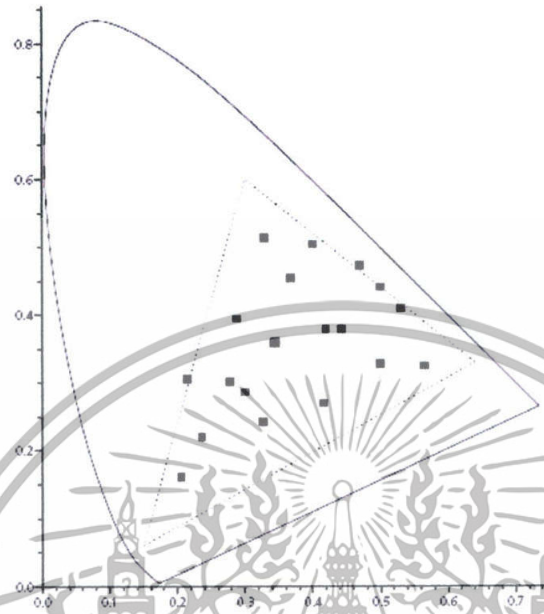
จากความรู้ที่ได้รับมาว่าการกระจายของแสงเกี่ยวข้องกับสี การกำหนดจุดบน chromaticity coordinates และการเรืองแสงที่มีผลต่อสีเราสามารถกลับไปพิจารณาถึง ColorChecker อีกครั้ง GretagMacbeth ไม่ได้รับประองค์ประกอบของการกระจายแสงตกกระทบของกลุ่มสีต่างๆ ของ Colorchecker อย่างไรก็ตามค่า CIE [X, Y, Z] นั้นได้รับการประกันว่าสามารถอ่านได้อย่างถูกต้อง กลุ่มสีต่างๆ ตรงท้ายแถวของ Colorchecker ประกอบด้วยสี neutral ต่างๆ ด้วย (สี neutral หมายถึง สีกลาง) การแสดงผลเป็นตัวเลขจำนวนน้อยของรูปที่ 5 แสดงผลหนึ่งในสิบของค่าความเบาบางของแสง ( $L^*$ ) ของกลุ่มสีต่างๆ



รูปที่ 2.13 SPDs แสดงค่าสิ่งเรืองแสงหลายๆ ชนิด

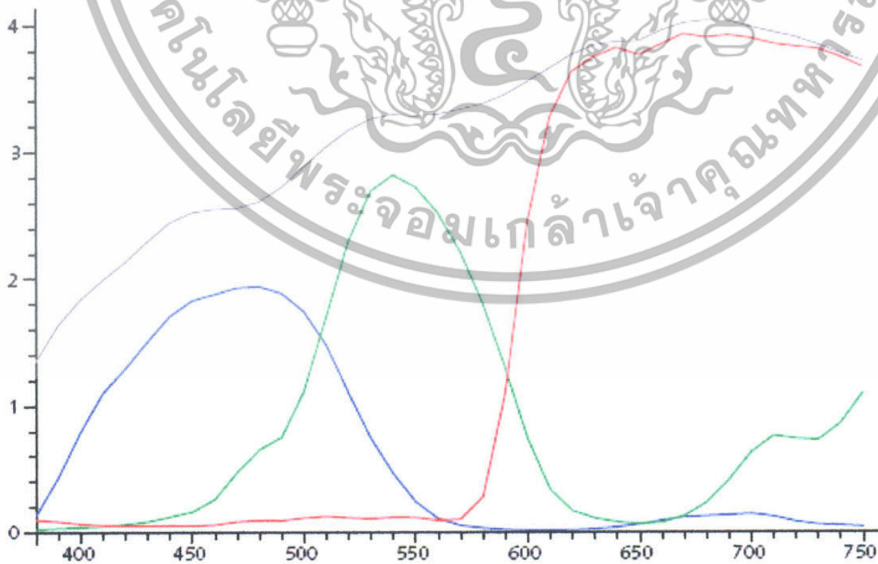
ภาพแสดงที่เป็นกราฟในรูปที่ 2, 3, 4 และ 5 แสดงถึงความยาวคลื่นแต่ละคลื่นที่ตกกระทบต่อกลุ่มสีต่างๆ โดยทางกายภาพ การตกกระทบและกระจายแสงเหล่านี้ได้ผ่านการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า spectrophotometer หากอยู่ใกล้กับพลังที่ได้จากแหล่งที่มาของแสง โดยสมบูรณ์มาใช้ในการตกกระทบและกระจายแสงที่มองเห็นได้ และแล้วก็ได้กราฟเส้นโค้งออกมา ก็ถือว่าสามารถแสดงค่าในการใช้งานได้ เพราะถึงอย่างไรที่มาของแสงโดยสมบูรณ์ก็ไม่ว่าจะมีผลต่อค่าการกระจายแสงและการตกกระทบของแสง ให้ถือว่าต้องให้มีการคิดค่าชดเชยไว้ด้วย และจะต้องคำนวณค่าความยาวคลื่นแต่ละคลื่นของการเรืองแสง SPD ด้วยการใส่แผนผังแสดงการตกกระทบและการกระจายของแสง เราจะเริ่มด้วยการคำนวณค่า CIE [X, Y, Z] จากแผนผัง (ค่าเหล่านี้สอดคล้องกับค่าตัวเลขที่ได้จาก Greag) จากนั้นเราจะคิดคำนวณค่า [R, G, B] ซึ่งผ่านการตรวจจากเครื่อง TCS230 การคำนวณค่า CIE [X, Y, Z] เราใช้ตารางแบบ matrix ขนาด 3x3 เพื่อแสดงกระบวนการจับคู่สี (CMFs) ตามข้อสังเกตของมาตรฐาน CIE และแสดงผลเป็นตาราง matrix ด้วยการตอบสนองต่อการกระจายแสงตกกระทบ 31 ค่า โดยมีการทำให้ถูกต้องด้วยการเรืองแสงซึ่งการนี้ได้ค่า tristimulus [X, Y, Z] เมื่อได้คำนวณค่าตาม chromaticity coordinates แล้วได้ค่า [X, Y, Z] โดยการแปลงค่าตามสมการที่ 1 จากนั้นก็กำหนดจุดลงบน chromaticity diagram ตามผลที่ได้ดังรูปที่ 9 เราได้ภาพเกือบมาก่อนข้างปิดตรงท้ายประกอบด้วยสีทั้งหมดทุกๆ ค่าที่ไม่เป็นลบออกมาเป็นคู่ของจุด กำหนด  $[x, y]$  ในขอบเขตดังกล่าว ในส่วนของสามเหลี่ยมบางๆ แสดงขอบเขตที่ประกอบด้วยทุกๆ สี ซึ่งสามารถแสดงคือ ส่วนของ RGB ที่เพิ่มขึ้นมาโดยใช้ sRGB (Rec. 709) ของแม่สี ขอบเขตนี้สร้างโดยรูปแบบวีดีโอและคอมพิวเตอร์เดสก์ทอปแบบตั้งโต๊ะ จุดที่พล็อตลงในรูป

ที่ 9 เป็นสีต่างๆ ของแผ่น ColorChecker ส่วนที่เป็นสีขาวและสีเทาเกาะกลุ่มกันใกล้จุดศูนย์กลางของแผ่นผัง



รูปที่ 2.14 Coordinates of ColorChecker patches

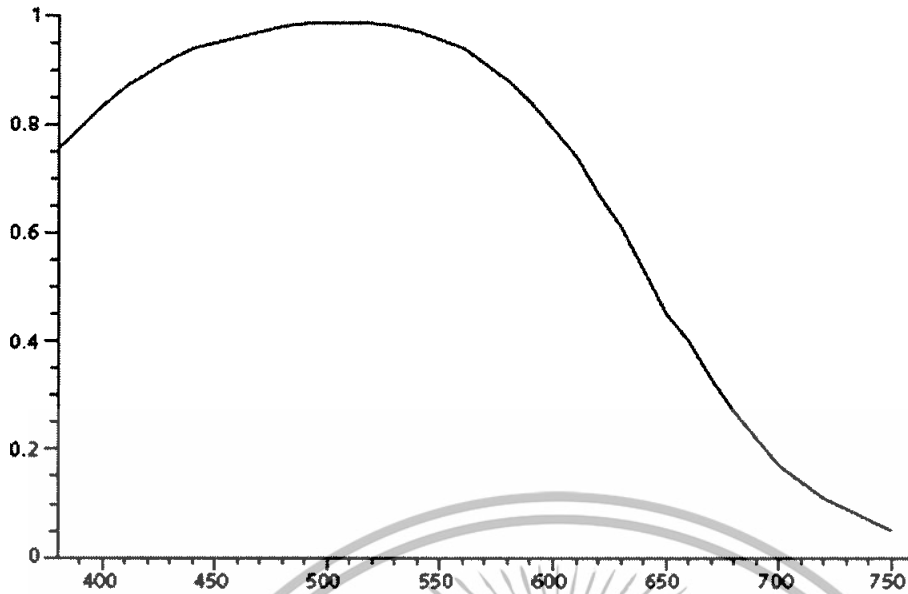
2.6.5 The TCS230



รูปที่ 2.15 แสดงการตอบรับโดย 4 ช่องทางของเครื่อง TCS230

คำอธิบายรูปที่ 10 TCS230 spectral sensitivities ความไวต่อการกระจายแสงและการตกกระทบได้สร้างออกมาเป็นเส้นกราฟที่เห็นนี้ โดยสีแดง เขียว น้ำเงิน แสดงเป็นกราฟสีต่างๆ เส้นสีเทาแสดงการสะท้อนกลับของช่องทางที่ไวและชัดเจนต่อสีที่ไม่ได้ผ่านตัวกรองฟิลเตอร์ และการที่ผลตอบสนองเหล่านี้แตกต่างจากข้อสังเกตตามมาตรฐาน CIE ค่าที่ได้รับรายงานโดยเครื่อง TCS230 จึงออกมาในรูปแบบ colorimetric อย่างไรก็ตามค่าของกระบวนการที่ได้นี้เป็นข้อมูลของสีที่คือพอและเที่ยงตรงพอต่อวิธีการตรวจจับที่ใช้ในอุตสาหกรรมจำนวนมาก

จากรูปที่ 10 เป็นการแสดงการตอบรับโดย 4 ช่องทางของเครื่อง TCS230 เส้นโค้งสีดำ แสดงผลตอบรับขององค์ประกอบในการตรวจจับซึ่งไม่ได้ใช้ตัวกรองฟิลเตอร์ เส้นโค้งสีแดง เขียว ฟ้ำหรือน้ำเงิน แสดงผลตอบรับของความไวต่อคลื่นยาว คลื่นกลาง และคลื่นสั้น ตามลำดับ ตามที่ได้กล่าวมา การจำลองสีที่มองเห็นได้ตามค่า CIE เกี่ยวข้องกับการวัดค่าละเอียด SPD โดยค่า  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ , และ  $Z(\lambda)$  จากกระบวนการจับคู่สี color matching function (ตามภาพกราฟในรูปที่ 7) ซึ่งให้ค่าเป็น X, Y, และ Z การใช้เครื่อง TCS230 เพื่อประมาณค่าสีนั้นเราใช้การคำนวณค่าตามระบบอนาล็อก แต่ก็ใช้ระบบตรวจจับของ TCS แทนระบบของ CIE CMFs (color matching function system) เราได้แยกส่วนการตรวจจับโดยละเอียดตามระบบ SPD ภายใต้งีกราฟที่ได้จากการตรวจจับของเครื่อง TCS230 และสามารถแสดงผลเป็นค่า R, G, B อุปกรณ์ที่ให้ค่า RGB ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง ส่วนประกอบของตัวเรืองแสงและการกระจายแสงตกกระทบ ตัวอย่างที่ใช้ในการแสดงค่าการกระจายแสงตกกระทบ ส่วนประกอบของการมองเห็นที่เข้ามาแทรกแซงต่อการตกกระทบและการกระจายของแสง (เช่น เลนส์ เป็นต้น) และท้ายที่สุดกระบวนการตอบสนองและการกระจายแสงตกกระทบของเครื่อง TCS230 ปรากฏการณ์ต่างๆที่กล่าวถึงได้จำลองมาโดยการคิดคำนวณจากผลผลิตของความยาวคลื่นสู่ความยาวคลื่น จากข้อเท็จจริงที่ได้จาก TCS230 ที่ว่ามันมีความไวในการตรวจจับแสงอินฟราเรด (ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นประมาณ 700 nm) และจากความจริงที่ว่าที่มาของแสงส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดพลังในขอบเขตของแสงอินฟราเรด การใช้งานอย่างธรรมดาๆนั้นรวมถึงตัวกรองแสงที่ตัดแสงอินฟราเรดได้ซึ่งประกอบอยู่ที่เครื่อง TCS230



รูปที่ 2.16 แสดงถึงการตอบสนองของตัวกรองแสงที่สามารถตัดแสงอินฟราเรดได้

มากกล่าวต่อคือการจำลองวิธีการใช้งานแผ่นผัง ColorChecker เราทำให้แผ่นผัง ColorChecker เรืองแสงด้วยตัวเรืองแสงที่มีค่า CIE D<sub>65</sub> และแสดงการแยกส่วนการแสดงผลการกระจายแสงและการตกกระทบของแสงภายใต้เส้นโค้งที่ได้จากการใช้งานของเครื่อง TCS230 และในที่สุดได้แปลงค่าเป็นค่า CIE [x, y] coordinates ค่าที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงที่ได้จากกระบวนการนี้ค่อนข้างถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตามค่า chromaticity coordinates นั้นไม่ค่อยถูกต้องนัก รูปที่ 12 กราฟที่ได้ตามค่าของ CIE chromaticities นี้เป็นค่า R, G, B นั้นไม่ถูกต้อง ผลที่ได้ต่างไปจากค่า coordinates ของ Colorchecker ที่ได้ออกมาเป็นกราฟในรูปที่ 9 เหตุผลสำหรับข้อขัดแย้งคือ วิธีการทำงานของเครื่องตรวจจับ TCS230 นั้นแตกต่างกันโดยพื้นฐานจากวิธีการทำงานของ CIE color matching แม้ว่า TCS230 จะมีวิธีตรวจจับที่มีการทำงานใกล้เคียงกันมากกับวิธีการทำงานของ CIE ก็ตาม ผลกระทบของ SPD ต่อสิ่งเรืองแสง และผลกระทบต่อการกระจายแสงและแสงตกกระทบที่เป็นตัวประกอบของการมองเห็นที่เข้ามาแทรกแซงก็ยังคงทำให้เกิดความแตกต่างที่หลากหลาย การที่จะประมาณการให้ถูกต้องเกี่ยวกับค่าของสีจำเป็นต้องมีกระบวนการของเครื่อง TCS230 อย่างคร่าวๆก่อนคือ ให้ค่า R, G, B โดยผ่าน linear 3x3 matrix ซึ่งได้ผลของการมองเห็นโดยรวมถึงปัจจัยในการเรืองแสง การตกกระทบและการกระจายแสงของส่วนประกอบในการมองเห็นที่เข้ามาแทรกแซง และผลที่ได้ออกมาเป็นกราฟเส้นโค้งจากเครื่อง TCS230 ข้อมูลปฏิบัติการสามารถแสดงเป็นตาราง matrix ดังนี้

$$x = M.t$$

(2)

สัญลักษณ์  $t$  แทนที่องค์ประกอบทั้ง 3 ซึ่งมาจากค่าที่ตรวจจับได้จากกลุ่มสีของเครื่องมือที่ใช้  
 สัญลักษณ์  $M$  หมายถึง  $3 \times 3$  การแสดงสีที่ถูกต้องในรูปตาราง matrix ซึ่งเราจะนำมาใช้กับค่าที่แสดง  
 แบบ matrix ซึ่งบันทึกโดยสัญลักษณ์ . คือการคูณ สัญลักษณ์  $x$  แทนที่ ผลของค่า XYZ  
 โดยประมาณการ(ผู้เขียนชินกับการใช้คณิตศาสตร์ปกติ เพื่อแสดงผลต่างๆเช่น ตัวห้อยหนา หรือตัว  
 เอน และค่าในตาราง matrix ที่ใช้ตัวยกกำลังหนา เป็นต้น)

เราสามารถบันทึกตามรูปแบบ matrix เพื่อแสดงสัญลักษณ์ของกระบวนการโดยใช้ชุดสี สามกลุ่ม  
 แต่ละครั้ง โดยจัดเป็น 3 ชุด เพื่อให้เครื่องตรวจวัดค่าเป็นลักษณะคอลัมน์  $3 \times 3$  matrix  $T$ . และ  
 ต่อเนื่องของ  $T$  ประกอบด้วยข้อมูลของ สีแดง เขียว น้ำเงิน ตามลำดับจากการคูณโดย  $M$  คอลัมน์ที่  
 แสดงผลเป็นค่า  $X$  ประกอบด้วยค่า XYZ จากตัวอย่างทั้งหมด และแถวของ  $X$  ประกอบด้วยค่าของ  
 XYZ ตามลำดับ Equation หนึ่งแสดงผลของสี 3 กลุ่มใน 1 ครั้ง

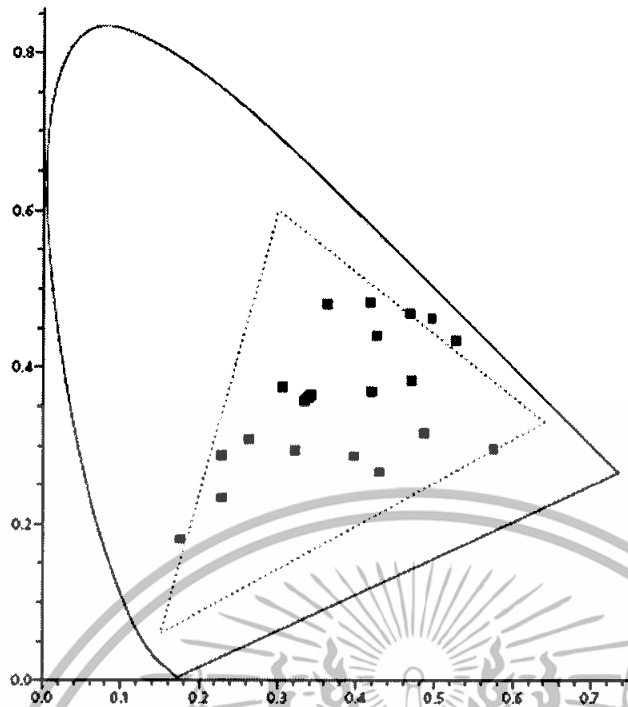
$$X=M.T \quad (3)$$

ให้ตาราง matrix  $T$  ซึ่งในคอลัมน์ประกอบด้วยตัวอย่าง 3 ชุด และ matrix  $x$  ประกอบด้วยชุดที่เข้ากัน  
 ได้ 3 ชุด คือคู่ XYZ และตาราง matrix  $M$  ซึ่งแสดงจาก  $T$  ถึง  $X$  เราพอจะคิดคำนวณได้ว่า ตาราง  
 matrix ของ  $T$  และคำนวณผลที่ได้ของ matrix (โดยการคำนวณได้)ด้วย  $X$

$$M=X.T \quad (4)$$

ผลของ  $3 \times 3$  ของสีที่ทำให้ถูกต้องใน matrix  $M$  แสดงแต่ละชุดของค่าที่ได้จากเครื่องมือที่เข้ากันได้  
 ของชุดที่มีค่าของ tristimulus โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าตามตาราง matrix ในขณะที่ใช้  
 เครื่องทำการตรวจจับ

ตาราง matrix  $M$  สามารถนำมาคิดคำนวณล่วงหน้าก่อนได้โดยคำนึงถึงตัวอย่างที่คาดว่าจะนำมาใช้  
 ในการตรวจจับค่าที่ต้องการ การจัดการให้ค่าที่ 3 ค่าที่ได้จากเครื่องมือ สิ่งที่ทำเป็นก็คือ การคิด  
 คำนวณ ผลที่ได้จาก Equation 3



รูปที่ 2.17 Uncorrected TCS230 values

นี่คือที่สุดของการเปลี่ยนแปลงค่าเป็น CIE (x, y, z) สำหรับแผนผัง ColorChecker ของกลุ่มสี แดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งตัวอย่างของการตรวจจับสีได้ทำให้มีการเรียงแสงที่ค่า CIE  $D_{65}$  และใช้เครื่อง TCS 230 ตรวจวัด

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3240 & 0.2072 & 0.0350 \\ 0.0243 & 0.5491 & -0.0555 \\ 0.0813 & -0.2364 & 0.5838 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{TCS230} \\ G_{TCS230} \\ B_{TCS230} \end{pmatrix} \quad (5)$$

สัญลักษณ์ของหมวก(^)ที่อยู่บน x, y, z แสดงถึงปริมาณที่ประมาณการไว้ matrix ใน Equation 5 ถูกกำหนดค่าสูงสุดสำหรับการจัดตัวอย่างของ 3 กลุ่มสี วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเหล่านี้คือ การใช้เครื่อง TCS 230 เพื่อหาข้อบกพร่องในระหว่างชุดกลุ่มสี 3 สีนี้ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่าง 3 ตัวอย่างนี้ก็ได้รับประกันการตรวจจับที่ถูกต้อง การวัดค่าจากเครื่องมือจากตัวอย่างค่าที่ นอกเหนือไปจากชุดที่กำหนดอาจห่างไกลจากค่าสูงสุดที่จะกำหนดได้ หากใช้ตัวอย่างมากเกินไป 3 อาจทำให้ผลที่ได้ไม่สอดคล้องกัน Tristimulus อาจนำมาซึ่งการตัดสินใจที่เกินขอบเขตไป ถ้าใช้ มากกว่า 3 จึงจำเป็นที่การทำงานต้องเพิ่มต่อไปอีกมาก

การปรับแก้ไขสีของตาราง matrix ซึ่งให้ผลดีเทียบเท่ากับการใช้มากกว่า 3 ตัวอย่าง สามารถนำมาคิดคำนวณอย่างระบบค่าสูงสุดของระบบตัวเลขนับจำนวน เมื่อทำเสร็จแล้ว ก็ไม่มี

ตัวอย่างเฉพาะที่สามารถให้ผลที่ถูกต้องไปกว่า Tristimulus set แต่ Linearยังสามารถสร้างขึ้นได้ โดยการขจัดข้อผิดพลาดให้ได้น้อยที่สุด (โดยใช้ตัวอย่างซึ่งมีการวัดข้อผิดพลาดอย่างน้อยจาก 4 ทิศทาง) การปรับปรุงแก้ไขก็ยังทำได้โดยใช้วิธีการใน Equation 2

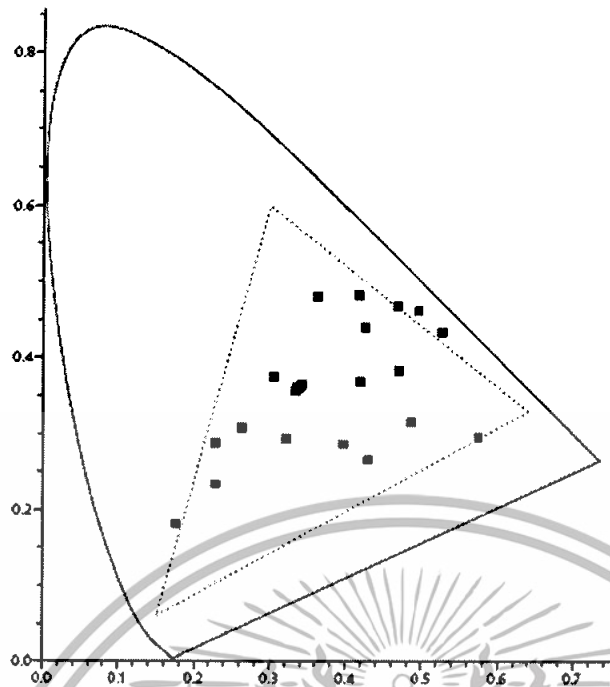
การจะอธิบายการใช้ตัวอย่างสีมากกว่า 3 กลุ่มโดยใช้แค่ 1 Equation Matrix T ต้องขยายออกเพื่อให้มีมากกว่า 3 คอลัมน์ในกรณีนี้ เราจะใช้ 24 กลุ่มสี บนแผ่นผั่ง ColorChecker ดังนี้ T คือ 3x24 matrix และ x คือ 3x24 matrix กระบวนการของเลขนับจำนวนที่ให้ค่าสูงสุดเอามาจาก Equation 4 อย่างไรก็ตาม ระบบของการตัดสินใจที่เกินขอบเขต และการกลับกันของ matrix T ไม่สามารถนำมาคิดคำนวณได้

การคิดคำนวณ 4 ทิศทางที่ดีที่สุด จะนำมาซึ่งการคิดคำนวณแบบ Pseudoinverse ของ T แทนที่จะกลับกันแบบธรรมดา Pseudoinverse เกี่ยวกับการsingular value decomposition (SVD) ระบบของการคิดคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น Mathematica และ Matlab ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการคิดคำนวณ Pseudoinverse ของตารางแบบ matrix เมื่อคิดคำนวณแบบ Pseudoinverseและทำการคูณแบบใช้ค่าของ Tristimulus นั่นก็คือ การคูณไปทางซ้าย ของวิธีการแบบ Pseudoinverse การเปลี่ยนแปลงค่าที่สูงสุดของค่าจากผั่ง ColorChecker ซึ่งทำให้เรืองแสงตามค่า CIE D<sub>65</sub>โดยตรวจวัดค่าโดยเครื่อง TCS 230 ก็จะออกมาเป็นดังนี้

$$\begin{pmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3131 & 0.8022 & -0.0767 \\ -0.0836 & 1.2567 & -0.1450 \\ 0.0514 & -0.3283 & -1.0710 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{TCS230} \\ G_{TCS230} \\ B_{TCS230} \end{pmatrix} \quad (6)$$

กระบวนการของ ColorChecker นี้เมื่อมีผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุด ซึ่งมีการพล็อตค่าออกมาในแบบ Chromaticity co-ordinates ซึ่งได้แสดงการพล็อตลงในรูปที่ 13

วิธีตามปกติทั่วไปที่อธิบายมุมมองหลากหลายของค่าแตกต่างของสีก็คือการใช้ตารางที่เรียกว่า Delta - E Scale ซึ่งอธิบายได้โดยหลักการของ CIE scale ที่กล่าวถึงนี้อธิบายได้โดยระยะห่าง Euclidean ระหว่าง CIE L\*a\*b\*Triples โดยที่ค่า L\*a\*b\*บางครั้งบันทึกว่า CIE LAB หรือแค่ LAB ซึ่งได้มาโดย nonlinear transformation การแปลงค่าแบบ nonlinear ของ CIE XYZ การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าXYZ, Yxy, L\*a\*b\*, RGB, และอีกมากในระบบสีมีรายละเอียดอยู่ในPoynton's Book ซึ่งแสดงไว้ในตอนท้ายของหน้า 5



รูปที่ 2.18 Corrected TCS230 values

เมื่อค่าของสีที่ได้จากการวัดโดยเครื่อง TCS 230 มีการเปลี่ยนแปลงค่าไปเป็น  $L^*a^*b^*$  coordinates โดยการทำให้มีค่าสูงสุดในตาราง matrix ตาม Equation 6 จากนั้น เปรียบเทียบกับค่า  $L^*a^*b^*$  ที่รับรองค่าตามแผ่นผัง ColorChecker (ตามที่วัดจากเครื่องมือแล้ว) ค่าเฉลี่ยที่มากที่สุดของข้อผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ 8 delta - E units ในภาพลักษณ์ที่มีคุณภาพสูง ค่าของ delta - E อาจเป็นค่าที่ไม่เป็นจริง ขึ้นอยู่กับขอบข่ายแห่งการรับรู้ และค่าที่ 2 อาจเป็นค่าที่ยอมรับได้

อุปกรณ์การตรวจวัดค่าของสี เป็นสิ่งที่ถูกคาดหวังว่า จะมีข้อผิดพลาดเพียงเศษส่วนที่น้อยของค่า delta - E ในการใช้เครื่อง TCS 230 นั้น เราไม่ได้ตรวจจับภาพลักษณ์ ข้อผิดพลาดของ 8 delta - E ค่อนข้างจะเกิดขึ้นกับการใช้เครื่องตรวจวัดราคาถูกซึ่งพอจะยอมรับได้ และเปรียบเทียบได้กับความผิดพลาดของสีในข้อมูลภาพในกล้องดิจิทัลธรรมดาทั่วไป

การวัดค่าสูงสุด (Optimum)  $3 \times 3$  matrix ขึ้นอยู่กับการตอบรับของเครื่อง TCS230 ซึ่งมีการรับรองจาก TAOS และขึ้นอยู่กับการซึมซับของแสงตกกระทบและแสงที่กระจายของเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับสายตา เช่น เลนส์ และตัวกรองแสง ที่ตัดแสงอินฟราเรด ในการใช้งานมากที่สุดคือ การตรวจจับการสะท้อนของสี การวัดค่าที่ดีที่สุดของตาราง matrix ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบการกระจายแสงและแสงตกกระทบของสิ่งเรืองแสง และขึ้นอยู่กับการสะท้อนกลับของการกระจายแสงและแสงตกกระทบของตัวอย่างที่ใช้ตรวจวัดด้วย เพราะว่าองค์ประกอบต่างๆที่กล่าวมานี้ก็ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการตรวจวัด ระบบที่ถูกออกแบบมาอาจต้องการการคิดคำนวณค่าที่ได้ผลดีที่สุดของ

ตาราง matrix จากตัวอย่างที่แสดงมาข้างต้น เราต้องใช้ เป็นตัวแทนของสีต่างๆ ซึ่งต้องเผชิญกับการใช้งานวิธีต่างๆที่เกี่ยวกับแควงการกระตุ้นของสีที่กว้างออกไปอีก

ถ้าต้องการจะใช้ TCS 230 เพื่อบ่งชี้ตรวจวัดสีจากเครื่องมือชนิดอื่นที่มีอยู่มากมาย linear matrix ควรเป็นการตรวจวัดที่ดีที่สุดต่อการสะท้อนกลับของการกระจายแสงและตกกระทบของแสง หากต้องการจะใช้ตัวเรืองแสงซึ่งมีคุณสมบัติในการกระจายแสงที่ต่างไปจาก CIE D<sub>65</sub> ก็ควรใช้ ตัวเรืองแสงที่ดีที่สุด

การประเมินแบบเครื่องมือ TCS230 ซึ่งประกอบด้วย Nichia White LEDs 1 คู่ เพื่อให้ตัวอย่างเรืองแสง การประเมินเริ่มจากอุปกรณ์ TCS 230 แล้วเลนส์ซึ่งสามารถกรองแสงและด้านแสงอินฟราเรด ซึ่งผลการตรวจวัดแสดงอยู่ในรูปที่ 11 นี้คือค่าตาราง matrix ที่ดีที่สุด สำหรับ ColorChecker 24 กลุ่มสีตามที่ได้รายงานไว้ในหมวดการประเมินค่า

$$\begin{pmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.2471 & 0.4099 & 0.0014 \\ 0.3658 & 0.8087 & -0.0592 \\ 0.1629 & -0.2418 & 0.8712 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{TCS230} \\ G_{TCS230} \\ B_{TCS230} \end{pmatrix} \quad (7)$$

ค่าเฉลี่ยสูงสุดของข้อผิดพลาดของการแปลงค่าของ ColorChecker 24 กลุ่มสี คือ 6 delta- E units ควรหรือไม่ที่จะเปลี่ยนแปลงค่าของ TCS 230 ประมาณค่าของสีเป็นค่า RGB ซึ่งเหมาะสำหรับ เครื่องคอมพิวเตอร์เดสก์ทอปและคอมพิวเตอร์กราฟฟิก การใช้เทคนิคมาตรฐานจากเอกสารทางตำราเริ่มจากแปลงค่าประมาณการของค่า XYZ เป็นแสง linear -RG และ B Tristimulus ซึ่งประมาณค่าเริ่มแรกของ Chromaticities และ white reference chromaticity โดยใช้ linear matrix

$$\begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.240454 & -1.537139 & -0.498531 \\ -0.826029 & 1.759877 & 0.023179 \\ 0.043396 & -0.198899 & 1.063208 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (8)$$

ค่าชุด 3 ตัวอย่าง XYZ อาจเป็นตัวแทนของสีที่นอกเหนือไปจาก gamut สำหรับ Rec.709 ของแม่สีสีนั้นอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนใน RGB โดยค่าของได้คั้งกล่าว ระหว่าง 0 และ unity : สีที่นอกเหนือจาก gamut จะเปลี่ยนแปลงค่าเป็นค่า 3 ชุดตัวอย่าง RGB ซึ่งส่วนประกอบอยู่นอกจากช่วง 0 ไปถึง 1 - นั่นคือ ส่วนประกอบที่อาจมีค่าน้อยกว่า 0 หรืออาจมีค่าเกินกว่า unity ซึ่งอาจจะต้องตัดวงจรของช่วง 0 ถึง 1 ออกไป

การรวมตาราง matrix Equation 8 กับการปรับแก้ที่ดีที่สุด คือตาราง matrix Equation 6 (สำหรับ ตัวเรืองแสงที่ ค่า D<sub>65</sub> และไม่มีตัวกรองแสงและตัดแสงอินฟราเรด) ค่าดังกล่าวถูกแปลงเป็นค่า linear - light

$$\begin{pmatrix} \hat{R}_{sRGB} \\ \hat{G}_{sRGB} \\ \hat{B}_{sRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1174 & 0.8316 & -0.5594 \\ -0.4045 & 1.5413 & -0.1671 \\ 0.0849 & -0.5641 & 1.1642 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{TCS230} \\ G_{TCS230} \\ B_{TCS230} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ตามที่พูดถึงการแปลงค่านัน sR G B การปรับค่าแสง gamma – ประมาณค่า 0.45 ของพลังงาน  
คล้ายกับค่า square root – ซึ่งปรับใช้กับค่า linear RGB เพื่อให้ได้ R'G'B'หาดูในหนังสือ Poynton's  
Book มีรายละเอียดแสดงอยู่ในตอนท้ายของหน้า 5



## บทที่ 3

## ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ AT MEGA 16 และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

AVR เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ที่ได้รวบรวมอุปกรณ์สนับสนุนการทำงานของ CPU ไว้มากมาย อาทิเช่น Analog to Digital , SPI , UART , Timer , Counter , Counter , PWM ซึ่งอุปกรณ์สนับสนุนการทำงานเหล่านี้ทำให้ MCU สามารถทำงานได้กว้างและใช้อุปกรณ์ต่อร่วมจากภายนอกน้อยมาก และสามารถประมวลคำสั่งได้ภายใน 1 clock ในบทนี้จะนำเสนอเอาข้อมูลบางส่วนที่เป็นการทำงานภายในของ AVR – MCU แนะนำคุณสมบัติและข้อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ สถาปัตยกรรมภายในและรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป ตำแหน่ง I/O รีจิสเตอร์สถานะและการใช้งาน EEPROM การรีเซ็ตและการอินเตอร์รัพท์ การสื่อสารอนุกรม การเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกและการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล การทำงานของพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตการทำงานของ Timer/Counter & Watch dog และการใช้กลุ่มคำสั่งต่าง ๆ

## 3.1 คุณสมบัติและข้อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1.1 สถาปัตยกรรมภายในถูกออกแบบให้ใช้สถาปัตยกรรมแบบ RISC (Reduce Instruction Set Computer) RISC คือ ทำให้การประมวลผลมีความเร็ว 1 คำสั่ง / 1 Clock หรือ CPU สามารถประมวลคำสั่งได้ 1 MIPS / MHz

3.1.2 มีคำสั่งในการควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 118 คำสั่ง

3.1.3 หน่วยความจำ 3 หน่วยความจำบันทึก PROGRAM MEMORY ขนาด 32 Kbyte

3.1.4 หน่วยความจำแบบ EEPROM สำหรับบันทึก DATA MEMORY ขนาด 1024 Byte

3.1.5 หน่วยความจำแบบ RAM ขนาด 2K Byte

3.1.6 ระบบการเปลี่ยนสัญญาณ ANALOG TO DIGITAL ขนาด 10 บิต จำนวน 8

## CHANNEL

3.1.7 กลุ่มรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว

3.1.8 พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตขนาด 8 บิต จำนวน 4 พอร์ต

3.1.9 ระบบการสื่อสารข้อมูลดิจิตอลแบบอะซิงโครนัส (UART) 1 CHANNEL

3.1.10 ระบบการสื่อสารข้อมูลดิจิตอลแบบซิงโครนัส (SPI) 1 CHANNEL

3.1.11 ความถี่สัญญาณนาฬิกา 0-16 MHz (ATMEGA16)

3.1.12 ระบบการรีเซ็ตแบบฮาร์ด โนมัลเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

(Power on reset)

3.1.13 ระบบการกำเนิดความถี่สัญญาณแบบ PWM จำนวน 4 CHANNEL (ATMEGA16)

3.1.14 ระบบการตรวจจับระดับสัญญาณอนาล็อก (Analog Comparator)

3.1.15 6 SLEEP MOD: IDEL, POWER SAVE, POWER DOWN, ADC Noise, Reduction Standby and Extended standby

3.1.16 ระบบการป้องกันการ COPY ข้อมูลภายในหน่วยความจำ (LOCKFORSOFTWARESECURITY)

3.1.17 ระบบตรวจจับการทำงานผิดพลาดของ CPU (WATCHDOG TIMER WITH ONCHIP OSCILATOR)

3.1.18 ระบบการอินเตอร์รัพท์จากภายนอก (EXTERNAL INTERRUPT)

3.1.19 TIMER/COUNTER ขนาด 16 บิต 1 CHANNEL

3.1.20. TIMER/COUNTER ขนาด 8 บิต 2 CHANNEL

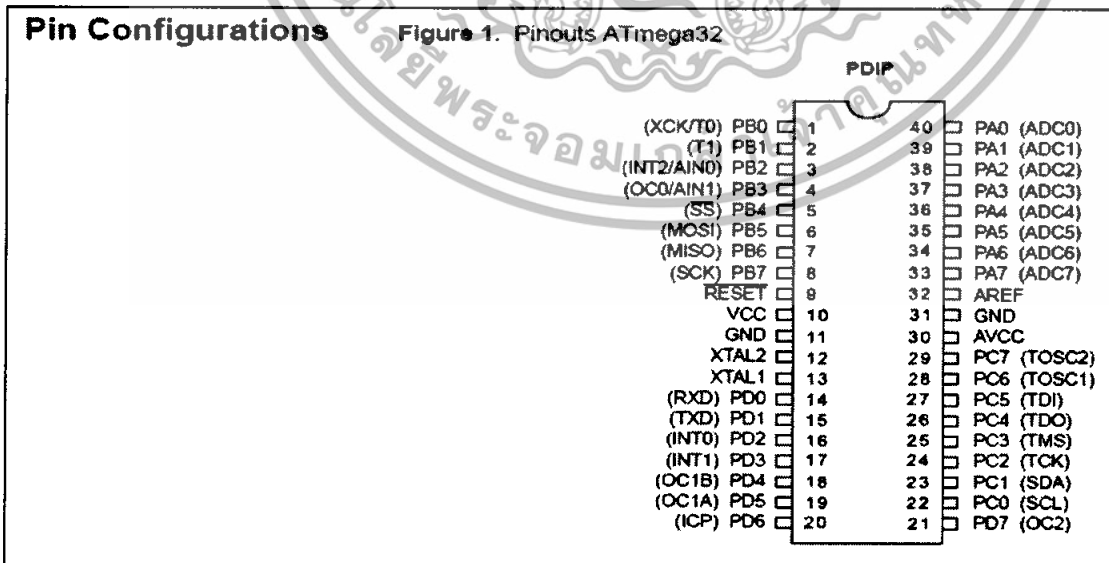
3.1.21 Vcc: 4.5-5.5 For ATMEGA16

### 3.2 รายละเอียด

AT MEGA16 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 10 บิตที่มีสถาปัตยกรรมแบบ RISC (reduce instruction set computer) ซึ่งทำให้การประมวลผลมีความเร็ว 1 คำสั่ง/1 clock หรือ CPU สามารถประมวลคำสั่งได้ 1 MIPS/MHz

#### 3.2.1 โครงสร้างภายนอกและตำแหน่งขา

ภายในประกอบด้วยรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัวซึ่งแต่ละตัวจะต่อเข้ากับ ALU โดยตรง ทำให้การประมวลผล ต่อ 1 คำสั่งมีความเร็วกว่า CPU ที่มีสถาปัตยกรรมแบบ CISC



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างภายนอกและขาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.2.2 รายละเอียดของขาสัญญาณและการใช้งาน

VCC คือ ขาจ่ายไฟให้กับ CPU และ GND คือ กราวด์

Port A (PA7...PA0)

เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ต สามารถ PULL UP ภายในแยกจากกันซึ่งสามารถรับกระแส SINK 20mA โดยพอร์ต A ยังใช้เป็นขา อินพุตเพื่อรับสัญญาณอนาลอกในส่วนของการทำงาน ANALOG TO DIGITAL

Port B (PB7...PB0)

เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ต สามารถ PULL UP ภายในอิสระแยกจากกันซึ่งแต่ละขาสามารถรับกระแส SINK20mA และยังสามารถนำไปใช้ งานอื่นๆ อีก

Port C (PC7...PC0)

เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ต สามารถ PULL UP ภายในอิสระแยกจากกันซึ่งแต่ละขาสามารถรับกระแส SINK20mA และยังสามารถนำไปใช้ งานอื่นๆ อีก

Port D (PD7...PD0)

เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ต สามารถ PULL UP ภายในอิสระแยกจากกันซึ่งแต่ละขาสามารถรับกระแส SINK20mA และยังสามารถนำไปใช้ งานอื่นๆ อีก

Reset คือ ขารีเซ็ต

XTAL 1 เป็นขาอินพุตของ OSE

XTAL 2 เป็นขาเอาต์พุตของ OSE

AVcc ใช้จ่ายไฟให้กับวงจร Analog to Digital

AREF เป็นขาแรงดันอ้างอิงที่ใช้ในงานในส่วนของวงจร Analog to Digital

AGND เป็นขากราวด์ของวงจร Analog to Digital

### 3.3 ฟังก์ชัน ADC

การแปลงสัญญาณอนาลอก ให้เป็นสัญญาณดิจิตอลนั้นมีความจำเป็นมากเพราะว่าในตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถประมวลผลแบบอนาล็อกได้มันจะประมวลผลแบบดิจิตอล เท่านั้นดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล

ปกติใน CPU ของ AVR – ATMEGA 16 นั้นจะมีฟังก์ชัน ADC อยู่ภายในตัวไอซี ดังนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ไอซี ADC ต่อภายนอก สำหรับฟังก์ชัน ADC นี้สามารถรับสัญญาณอนาล็อกได้ สูงสุด 8 Channel โดยรับสัญญาณเข้ามาทาง พอร์ต A เราสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ทำการแปลง

สัญญาณอนาล็อกที่ละ Channel อย่างต่อเนื่อง หรือจะให้ทำการแปลงสัญญาณเฉพาะ Channel ที่เราต้องการก็ได้เช่นกัน โดยสัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จะมีความละเอียด 10 บิต โดยการรับสัญญาณแต่ละขาของพอร์ต A โดยจะมีวงจร SAMPLE AND HOLD เพื่อช่วยให้สัญญาณอนาล็อกที่รับเข้ามาเพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีระดับสัญญาณคงที่โดยปกติการใช้งานฟังก์ชันนี้เราจำเป็นต้องจัดแรงดัน AVCC AREF และ AGND ให้กับฟังก์ชันด้วย

### คุณสมบัติ

1. 10 Bit resolution
2. 0.5LSB integral non-linearity
3.  $\pm 2$  LSB Absolute Accuracy
4. 65-260  $\mu\text{s}$  Conversion Time
5. Up to 15KSPS at Maximum Resolution
6. 8 Multiplexed Single Ended Input Channels
7. 7 Differential Input Channels
8. 2 Differential Input Channels with Gain of 10x and 200x (1)
9. Optional left adjustment for ADC result readout
10. 0-VCCADC Input Voltage Range
11. Selectable 2.56V ADC Reference Voltage
12. Free Running or Single conversion Complete
13. Sleep mode noise Canceller

### การทำงาน

ในส่วนของการทำงานแปลงสัญญาณ อนาล็อก เป็น ดิจิตอล สามารถทำได้ 2 Mode คือ

1. Single Conversion Mode
2. Free Running Mode

การทำงาน Single Conversion Mode ผู้ใช้ต้องเป็นผู้กำหนดการใช้งานขึ้นเอง แต่ในส่วนของ Free Running Mode วงจร Analog to digital จะเป็นตัวจัดการอ่านข้อมูลและเก็บใน ADC Data Register ซึ่งบิต ADFR ใน Register ADCSR จะเป็น บิตที่ใช้เลือก Mode การใช้งานของวงจร Analog to digital สำหรับการกำหนดให้วงจร Analog to digital ทำงานนั้นสามารถทำได้โดยการเซตบิต ADEN ในรีจิสเตอร์ ADCHRA ให้เป็น 1 โดยบิตนี้จะเป็น 1 ไปตลอดจนกระทั่ง Conversion ของสัญญาณจะเรียบร้อยแล้วจึงทำให้บิตนี้เป็น 0 โดยอัตโนมัติ แต่ถ้าเป็นการเปลี่ยน Channel ของการแปลงสัญญาณขณะที่ Channel เดิมยัง Conversion อยู่วงจร

Analog to digital จะ Conversion สัญญาณ Channel เดิมให้เสร็จก่อนแล้วจึง Conversion สัญญาณ Channel ถัดไป โดยข้อมูลที่ได้จากการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจะเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ ADCH และ ADCL

### 3.4 ฟังก์ชัน PWM

การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (PWM) เป็นเทคนิคสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับ PWM จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอินเวอร์เตอร์เพื่อที่อินเวอร์เตอร์จะได้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น เนื่องจากว่า PWM เป็นฟังก์ชันการทำงานหนึ่งในโหมด PWM ของ Timer/Counter ที่อยู่ภายใน AVR – ATMEGA16 ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะแนะนำเกี่ยวกับการทำงานของ Timer/Counter ของ AVR – ATMEGA16

#### Timer/Counter

ภายใน AVR – ATMEGA16 จัดให้มี Timer/Counter 3 ชุด โดยจัดเป็น Timer/Counter ขนาด 8 บิต 2 ชุดและ Timer/Counter ขนาด 16 บิต 1 ชุดดังนี้คือ Timer/Counter2 และ Timer/Counter0 และ Timer/Counter1 ซึ่ง Timer/Counter2 สามารถรับสัญญาณ Clock จากภายนอกซึ่งเป็น Option ที่จะนำ Timer/Counter2 มาทำเป็น RTC โดยใช้ XTAL ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 32.768 KHz มาเป็นฐานเวลาและ Timer/Counter0 และ Timer/Counter1 ใช้วงจร Rescaling ขนาด 10 บิตร่วมกัน ส่วน Timer/Counter2 ใช้วงจร Rescaling แยกออกต่างหาก

#### แนะนำการใช้งาน Timer/Counter แต่ละประเภท

##### Timer/Counter 0

โครงสร้างของ Timer/Counter 0 ขนาด 8 บิต ซึ่งสามารถเลือกสัญญาณ Clock ได้จาก CLK (Clock ของระบบ) หรือสัญญาณ Clock ของระบบที่ถูกหาร (Rescaling) หรือสัญญาณจากภายนอกโดยการใช้งานจะอธิบายในรีจิสเตอร์ TCCR0 และ TIFR ส่วนสัญญาณควบคุมสามารถทราบรายละเอียดได้จากรีจิสเตอร์ TCCR0 ซึ่งการควบคุมการอินเตอร์รับจะควบคุมได้จาก รีจิสเตอร์ TIMSK เมื่อ Timer/Counter0 ได้รับสัญญาณจากภายนอก ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะซิงโครไน (Synchronized) กับสัญญาณนาฬิกาภายใน CPU โดย Timer/Counter 0 จะเป็นวงจรนับขึ้นที่สามารถเขียนและอ่านข้อมูลได้ตลอดเวลาโดยเมื่อทำการเขียนข้อมูลลง TIMER/COUNTER 0 ในขณะที่มีสัญญาณ Clock จะทำให้ TIMER/COUNTER 0 นับค่าต่อเนื่องจากค่าที่ถูกเขียนลงไป

### Timer/Counter 1

จะมีขนาด 16 บิต โดยสามารถเลือกสัญญาณนาฬิกาได้จาก CLK หรือสัญญาณที่ได้รับ การหารจาก CLK (Rescaling) ซึ่งการหยุด Timer/Counter 1 จะอธิบายไว้ในรีจิสเตอร์ TCCRIA (Timer/Counter 1 Control Register) และ TCCR1B โดยแฟร็กที่แสดงสถานะต่าง (Overflow, Comparemath, Captureeven) ส่วนสัญญาณควบคุมจะอธิบายไว้ในรีจิสเตอร์ TCCRIA และ TCCR1B การควบคุมสัญญาณอินเตอร์รัพต์จะควบคุมได้จากรีจิสเตอร์ TIMSK (TIMER/COUNTER INTERRUPT MASK REGISTER)

เมื่อ TIMER1/COUNTER1 จะประกอบด้วยส่วนของการเปรียบเทียบเอาต์พุต (Output CompareFunction) 2 ฟังก์ชันโดยจะใช้รีจิสเตอร์ OCRIA (Output Compare Register 1 A) และ OCRIB (Output Compare Register 1B) เป็นส่วนของการเก็บค่าข้อมูลของการเปรียบเทียบ TIMER1/COUNTER1 จะสามารถเลือกใช้ฟังก์ชัน PWM ได้ทั้ง 8,9 และ 10 บิต

#### The Timer/Counter Control Register

Bits 7,6-COM1A1, COM1A0 : Compare Output Mode 1 A, bit 1 and 0 บิต COM1A1 และ COM1A0 เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ขา OC1A เมื่อ Timer/Counter1 เกิด Compare Match ซึ่งเมื่อใช้ฟังก์ชัน Output Compare Match ของ Timer/Counter1 จะต้องควบคุมให้ขา OC1A มีสถานะเป็นเอาต์พุต

Bit 5,4-COM1B1,COM1B0: Compare Output Mode 1 B, bit 1 and 0 บิต Com1A1 และ COM1A0 เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ขา OC1A เมื่อ Timer/Counter1 เกิด Compare Match ซึ่งเมื่อใช้ฟังก์ชัน Output Compare Match ของ Timer/Counter1 จะต้องควบคุมให้ขา OC1A มีสถานะเป็นเอาต์พุต

Bit 3...2-Res: Reserved bits ในส่วนของ AT MEGA16 จะสงวนบิตในกลุ่มนี้ไว้

Bit 1...0 – PWM11, PWM10: Pulse Width Modulator Select Bit เป็นบิตที่ใช้ในการ กำหนดการทำงานของ PWM

#### The Timer/Counter1 Control Register B-TCCR1B

Bit 7-iCn1: Input Capture 1 Noise Canceller (4 CKs) บิตนี้เป็นบิตที่กำหนดให้ Input Capture 1 Noise Canceller ทำงานหรือไม่ทำงาน โดยเมื่อบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการ กำหนดให้ Input Capture 1 Noise Canceller ทำงาน แต่เมื่อบิตนี้เป็น 0 จะเป็นการกำหนด ไม่ให้ Input Capture 1 Noise Canceller ทำงาน ชุด Noise Canceller จะถูกกำหนดให้ ทำงาน โดยการ Sampling สัญญาณที่เข้ามาที่ ชุด Input Capture 1 โดยสัญญาณ Sampling แรกจะเริ่ม ที่ขอบแรกของสัญญาณขาขึ้นหรือขาลงขึ้นอยู่กับที่กำหนดในบิต ICES1 โดยชุด Noise Canceller จะ Sampling ด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของ XTAL ซึ่งจะ Sampling ทั้งหมด 4 ครั้ง โดยลอจิกที่ได้จากการ Sampling จะต้องมิลลิวินาทีเดียวกันกับลอจิกที่กำหนดในบิต ICES1

Bit 6-ICES1: Input Capture 1 Edge Select เป็นบิตที่ใช้กำหนดให้ชุด Input Capture 1 จะต้อง Detect ถ้าบิต ICES1 เซ็ต เป็น 1 จะเป็นการกำหนดให้ชุด Input Capture 1 ทำหน้าที่ Detect สัญญาณที่ขอบขาขึ้น แต่ถ้าบิต ICES 1 ถูกเคลียร์เป็น 0 จะเป็นการกำหนดให้ชุด Input Capture 1 ทำหน้าที่ Detect สัญญาณที่ขอบขาลง

Bit 5, 4-RES: Reserved bits บิตนี้ถูกสงวนไว้

Bit 3: CTC1: Clear Timer1/Counter1 on Compare Match บิตนี้เป็นที่ใช้ในการกำหนดว่าเมื่อเกิด Output Compare แล้วจะให้เกิดการนับต่อไปหรือจะให้มีการรีเซ็ตค่าให้เป็น 00000 แล้วจึงทำการนับต่อไป โดยหากเป็นบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการกำหนดให้มีการรีเซ็ตค่าให้เป็น 0 เมื่อเกิดการ Output Compare แต่หากบิตนี้เคลียร์เป็น 0 จะเป็นการกำหนดให้มีการนับค่าต่อเมื่อเกิด Output Compare

Bit 2, 1, 0-CS12, CS11, CS10: Clock Select bit 2, 1 and 0 เป็นบิตที่ใช้ในการเลือกสัญญาณ clock

#### The Timer/Counter in Capture Register – ICR1H AND ICR1L

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 ที่ใช้เก็บค่า Timer/Counter1 ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ TCNT1 เมื่อ Input Capture สามารถ Detect ได้ เมื่อ Input Capture สามารถ Detect สัญญาณได้ตามกำหนดในบิต ICES1 จะทำให้ CPU โหลดค่าในรีจิสเตอร์ TCNT1 ลงในรีจิสเตอร์ และในเวลาเดียวกัน บิต ICF1 จะเซ็ตเป็น 1 โดยการอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ ICRI ของ CPU จะใช้รีจิสเตอร์ TEMP เป็นรีจิสเตอร์พักข้อมูล ซึ่งการใช้รีจิสเตอร์ TEMP ช่วยในการอ่านข้อมูลเพื่อให้คงที่อยู่ในรีจิสเตอร์ ICR1H และ ICR1L เสมือนถูกอ่านออกมาพร้อมกัน การอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ ICRI จะต้องอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ ICR1L ก่อนโดยเมื่อ CPU อ่านค่าจาก ICR1L จะทำให้ค่าในรีจิสเตอร์ ICR1H ถูกโหลดลงในรีจิสเตอร์ TEMP เมื่อ CPU อ่านค่าจาก ICR1H จะทำให้ค่าในรีจิสเตอร์ TEMP ถูกส่งให้ CPU

### 3.5 การใช้งาน Timer/Counter1 ในโหมด PWM

การทำงานในโหมด PWM ของ Timer/Counter1 จะสามารถเลือกใช้งานได้ 8,9, หรือ 10 บิตโดยเอาต์พุตที่ได้จะออกที่ขา PD5 (OC1A) และขา PD (OC1B) ในการทำงาน Timer/Counter1 จะนับขึ้นและนับลงซึ่งจะนับขึ้นจาก 0000 ถึงค่าสูงสุดและจะนับจากค่าสูงสุดลงมาที่ 0000 แล้วจึงนับขึ้นอีกครั้งเมื่อค่าใน Timer/Counter1 เท่ากับค่าในรีจิสเตอร์ OCR1A หรือ OCR1B จะทำให้ขา PD5 (OC1A)/PD1 (OC1B) เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนดในบิต COM1A/CoM1A0 หรือ CoM1B/Com1B0 เมื่อ OCR1 มีค่าเท่ากับ 0000 หรือค่าสูงสุดจะทำให้เอาต์พุตขา OC1A/OCA1B มีลอจิกเป็น LOW หรือ HIGH ตามที่กำหนดในบิต

CONIAI/COMIAO หรือ COMIBI/COMIBO และเมื่อ Timer/Counter เกิด Overflow และค่าการนับเป็น 0000 จะทำให้บิต TOVI เซ็ตเป็น 1

### Timer2&Counter

เป็น Timer/Counter ขนาด 8 บิตต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของรีจิสเตอร์ใช้งานใน Timer/Counter 2

#### The Timer/Counter 2 Control Register - TCCR2

Bit 7 - Res:Reserved Bit ใน AT90S4434/8535 บิตนี้สงวนไว้

Bit 6 - PWM2: Pulse Width Modulator Enable เป็นบิตที่ใช้ Enable ให้โหมด PWM ใน Timer/Counter 2 ให้ทำงาน โดยหากบิตนี้เซ็ตเป็น 1 จะเป็นการกำหนดให้โหมด PWM ถูก

Enable ให้ทำงานแต่หากบิตนี้ถูกเคลียร์เป็น 0 จะเป็นการ Disable ไม่ให้โหมด PWM ใน Timer/Counter 2 ทำงาน

Bit 5,4 - Com21, Com20: Compare Output Mode, bit 1 และ 0 เป็นบิตที่ใช้กำหนดลักษณะสัญญาณที่ขา PD7 (OC2) เมื่อ Timer/Counter 2 ทำงานในโหมด Compare โดยเมื่อ Compare Output Match จะทำให้ขา PD7 (OC2) เป็นไปตามที่กำหนดในบิต Com21 และ Com20

Bit 3-CTC2: Clear Timer/Counter on Compare Match เป็นบิตที่ใช้กำหนดให้ Timer2/Counter 2 ทำการ RESET ค่าเป็น 00 หลังจากทีค่าในรีจิสเตอร์ TCNT2 มีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ในรีจิสเตอร์ OCR หรือ Compare Output Match หากบิตนี้เซ็ตเป็น 1 จะทำให้ Timer/Counter 2 รีเซ็ต

Bit 2, 1, 0-CS22, CS21, CS20: Clock Select bit2, 1 และ 0 เป็นบิตใช้ในการกำหนด ค่า Rescaling

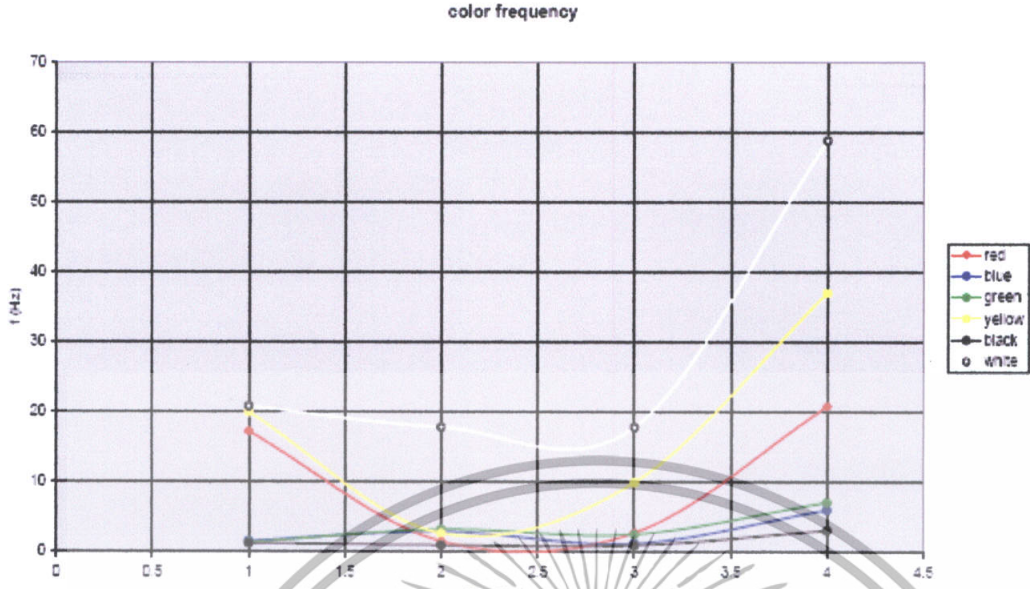
#### บทที่ 4

##### การทดลองและผลการทดลอง

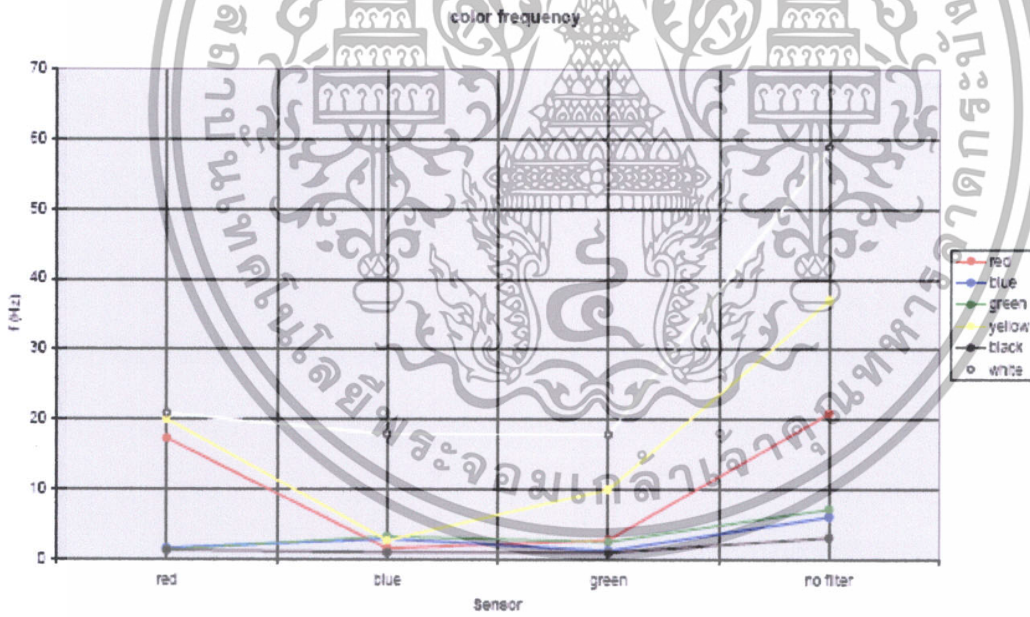
จากการทดลองได้ทำการทดสอบตรวจวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ โดยวัดค่าความถี่จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความสว่างของสี ได้ทำการยิงฟิลเตอร์สีต่างๆ ลงไปในกระดาษสี สีต่างๆที่ได้ทำการทดสอบได้แก่ สีแดง สีนํ้าเงิน สีเขียว สีเหลือง และสีขาว ความถี่ที่ได้มีหน่วยการวัดเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 หลังจากนั้นได้นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างฟิลเตอร์สีกับกระดาษสี

filter		Red	blue	green	no filter
กระดาษสี	red	17.241k	1.5625k	2.778k	20.83k
กระดาษสี	blue	1.5625k	2.941k	1.25k	6.061k
กระดาษสี	green	1.351k	3.226k	2.56k	7.143k
กระดาษสี	yellow	20k	2.702k	10k	37.037k
กระดาษสี	white	20.83k	17.857k	17.857k	58.824k

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับเซนเซอร์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับเซนเซอร์

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### เซนเซอร์

TCS230 เป็นโมดูลตรวจวัดค่าสี ซึ่งโครงสร้างจะประกอบด้วย โฟโตไดโอดขนาด 8x8 ตัว เรียงแบบแอเรีย โดยที่โฟโตไดโอดจะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือโฟโตไดโอดที่มีฟิลเตอร์สีแดง, สีเขียว, สีน้ำเงิน และแบบไม่มีฟิลเตอร์ จำนวนชุดละ 16 ตัว แต่ละกลุ่มจะตอบสนองความถี่แตกต่างกันตามชนิดของฟิลเตอร์ การทำงานของโมดูลตรวจวัดค่าสีนี้จะทำการตรวจจับแสงจาก LED ที่เข้ามาตกกระทบที่โฟโตไดโอด โดยอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า และจะแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณความถี่ออกมาแสดงผลในรูปสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) โดยมีค่า duty cycle เป็น 50%

#### ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ทำหน้าที่ควบคุมและประมวลผลทั้งหมดของระบบ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด AVR เบอร์ ATMEGA 16 โดยเปลี่ยนค่าจากความถี่ไปแสดงผลเป็นสีทาง LED และการสั่นเตือน

#### การแสดงผล

ประกอบด้วย LED และมอเตอร์ของโทรศัพท์มือถือ โนเกีย รุ่น 3310

จากการทดลองเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด โดยการนำเซนเซอร์สีมาใช้ในการแยกค่าความถี่ของสี โดยสามารถแยกสีต่างๆออกมา 5 สี และสีที่ทำการแยกคือ สีแดง, สีน้ำเงิน, สีเขียว, สีเหลือง และสีขาว จากนั้นได้ทำการศึกษาการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR มาใช้อ่านค่าความถี่จากโมดูล ET-TCS230 เพื่อนำค่าความถี่ที่ได้มาแสดงผลโดยการสั่นเป็นจังหวะ สีแดงสั่นหนึ่งจังหวะ สีเขียวสั่นสองจังหวะ สีน้ำเงินสั่นสามจังหวะ สีเหลืองสั่นสี่จังหวะ สีขาวสั่นห้าจังหวะ และแสดง รูปวงจร รูปเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมารวมทั้งโปรแกรมและ flow chart การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่วางไว้ในส่วนผนวภาคของ ปรินตูปัญญาฉบับนี้

ตามที่ได้ออกแบบไว้เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอดมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้

1. สามารถตรวจจับสีได้โดยการกด switch ตั้งการทำงานของเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอดให้ทำการแยกสีจากกระดาษสีหรือผ้าสี ไปแสดงผลทาง LED และการสั่น

2. หากกด switch สั่งการทำงานค้างไว้ 3 วินาทีจะเข้าสู่การตั้งค่า สามารถตั้งค่าการแสกนสีแต่ละสีที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้นโดยการกด switch ซ้าย-ขวา จากนั้นกดแสกนเพื่อให้เรียนค่าสีของสีนั้นๆ จากนั้นกด switch สั่งการทำงานค้างไว้อีก 3 วินาทีเพื่อเข้าสู่การแสกนตรวจจับค่าสีอีกครั้งรอทำการตรวจจับสี

### ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

จากการทดลองใช้เครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอดนี้ คือ ไม่สามารถตรวจจับวัตถุต่างๆ ในระยะทางไกลได้ และเมื่อมีแสงจากภายนอกมากระทบที่ตัวเซนเซอร์จะทำให้ค่าความถี่สีที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมทำให้ไม่สามารถแสดงผลออกมาได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ การพัฒนาควรรหาเซนเซอร์ที่เพื่อให้ระยะทางมีความแม่นยำในการตรวจจับมากกว่านี้และสามารถตรวจจับได้ระยะไกลมากกว่านี้ และเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอดนี้ตรวจจับค่าสีที่ไกลและใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น



### บรรณานุกรม

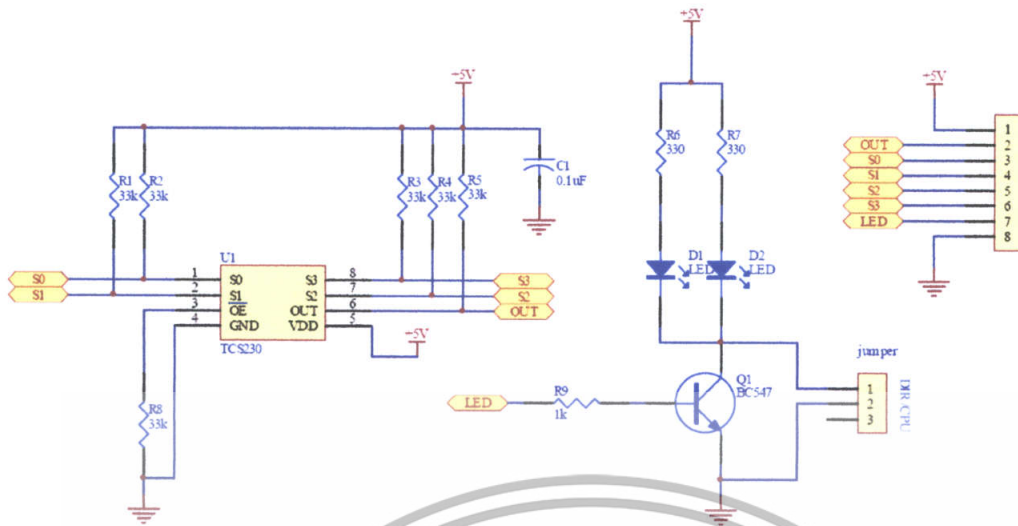
1. <http://www.taos.com/> , “ Module ET-TCS230 ”
2. <http://www.atmel.com/> , “ AVR Microcontroller ”
3. หนังสือ Microcontroller Programming Series การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ด้วยภาษาซี



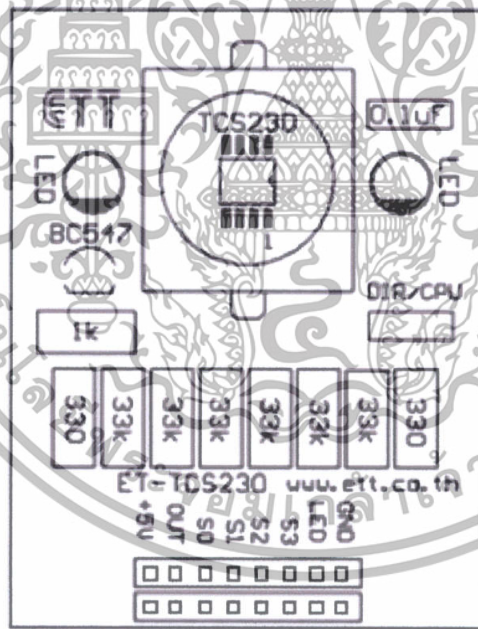




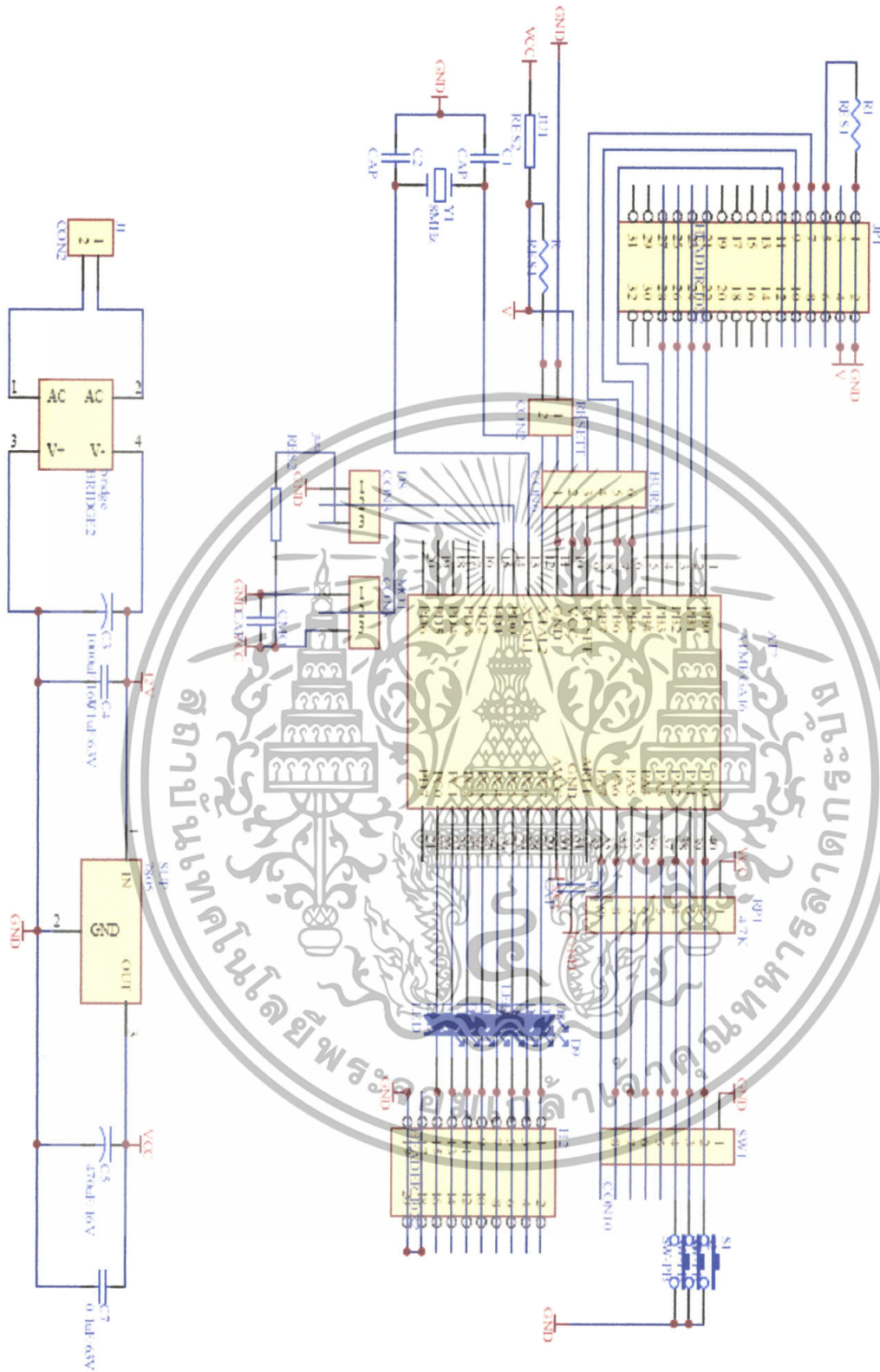
ส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องช่วยบอกสีสำหรับคนตาบอด



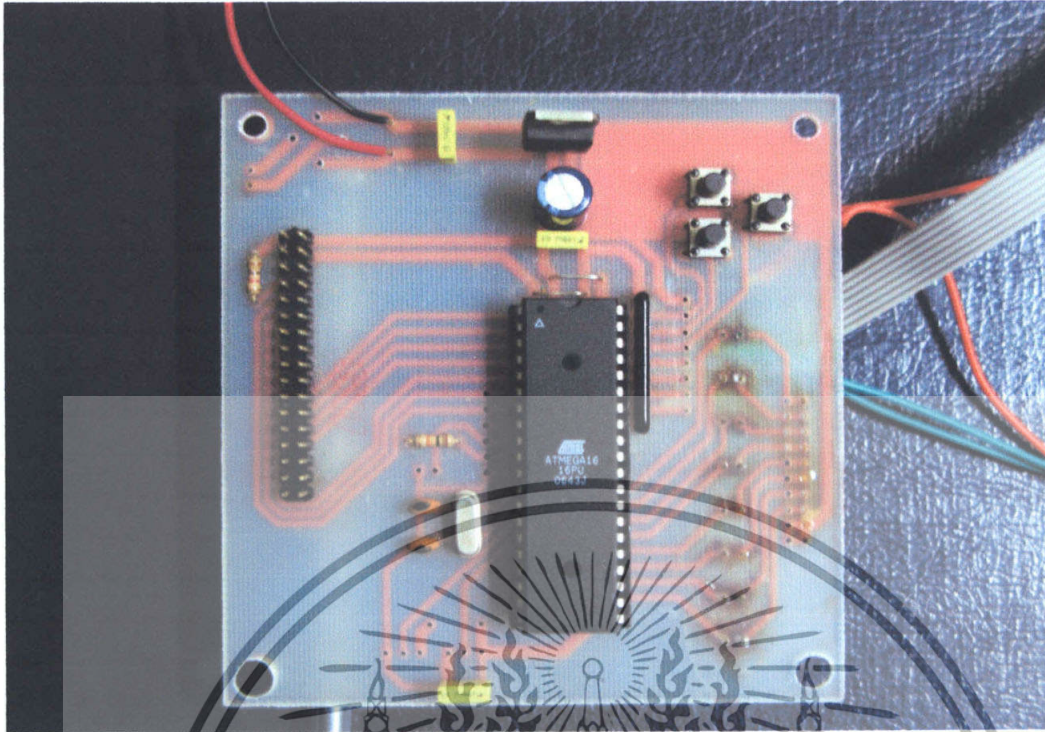
รูปที่ 1 วงจรการทำงานของโมดูล ET-TCS230



รูปที่ 2 รูปโมดูล ET-TCS230



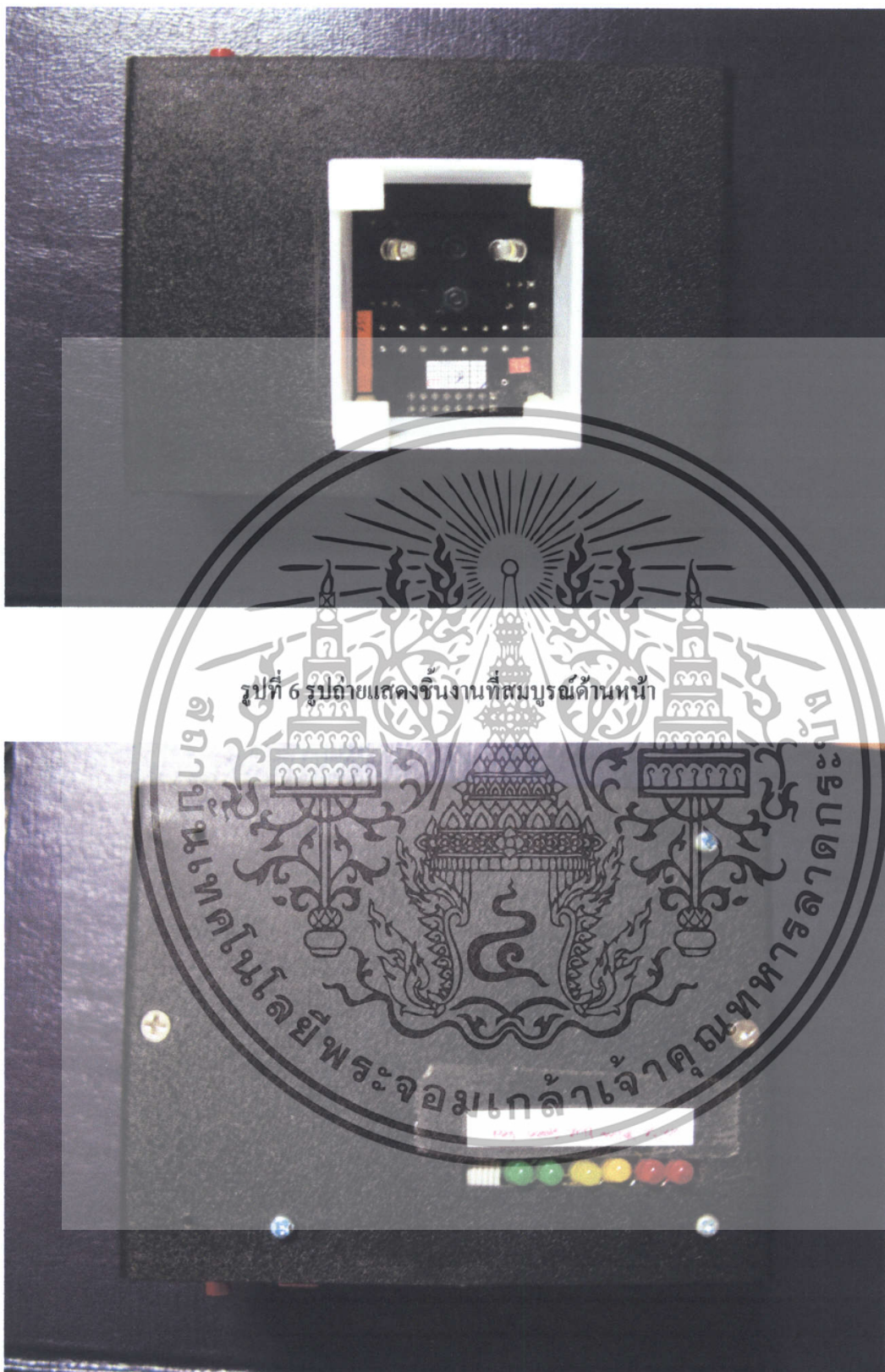
รูปที่ 3 วงจรในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4 รูปถ่ายของชิ้นงานในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์

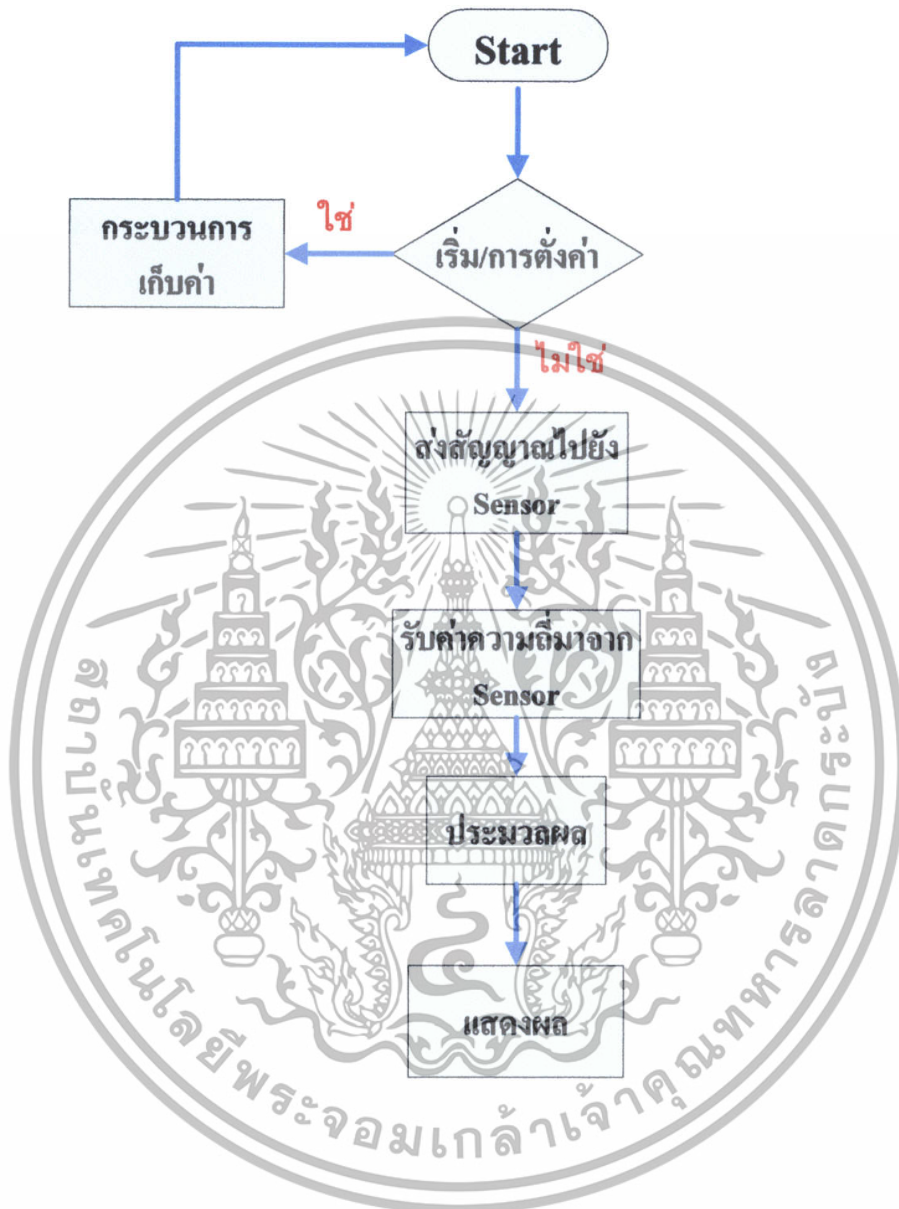


รูปที่ 5 รูปถ่ายแสดงชิ้นงานที่สมบูรณ์ด้านบน



รูปที่ 6 รูปถ่ายแสดงชิ้นงานที่สมบูรณ์ด้านหน้า

รูปที่ 7 รูปถ่ายแสดงชิ้นงานที่สมบูรณ์ด้านหลัง



รูปที่ 8 Flow Chart การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

## Features

- High-performance, Low-power AVR<sup>®</sup> 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- Nonvolatile Program and Data Memories
  - 32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash  
Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits  
In-System Programming by On-chip Boot Program  
True Read-While-Write Operation
  - 1024 Bytes EEPROM  
Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
  - 2K Byte Internal SRAM
  - Programming Lock for Software Security
- JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface
  - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
  - Extensive On-chip Debug Support
  - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four PWM Channels
  - 8-channel, 10-bit ADC
    - 8 Single-ended Channels
    - 7 Differential Channels in TQFP Package Only
    - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x
  - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated RC Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 32 Programmable I/O Lines
  - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad MLF
- Operating Voltages
  - 2.7 - 5.5V for ATmega32L
  - 4.5 - 5.5V for ATmega32
- Speed Grades
  - 0 - 8 MHz for ATmega32L
  - 0 - 16 MHz for ATmega32



**8-bit AVR<sup>®</sup>**  
**Microcontroller**  
**with 32K Bytes**  
**In-System**  
**Programmable**  
**Flash**

**ATmega32**  
**ATmega32L**  
**Preliminary**  
**Summary**

Rev. 2503BS-AVR-10/02

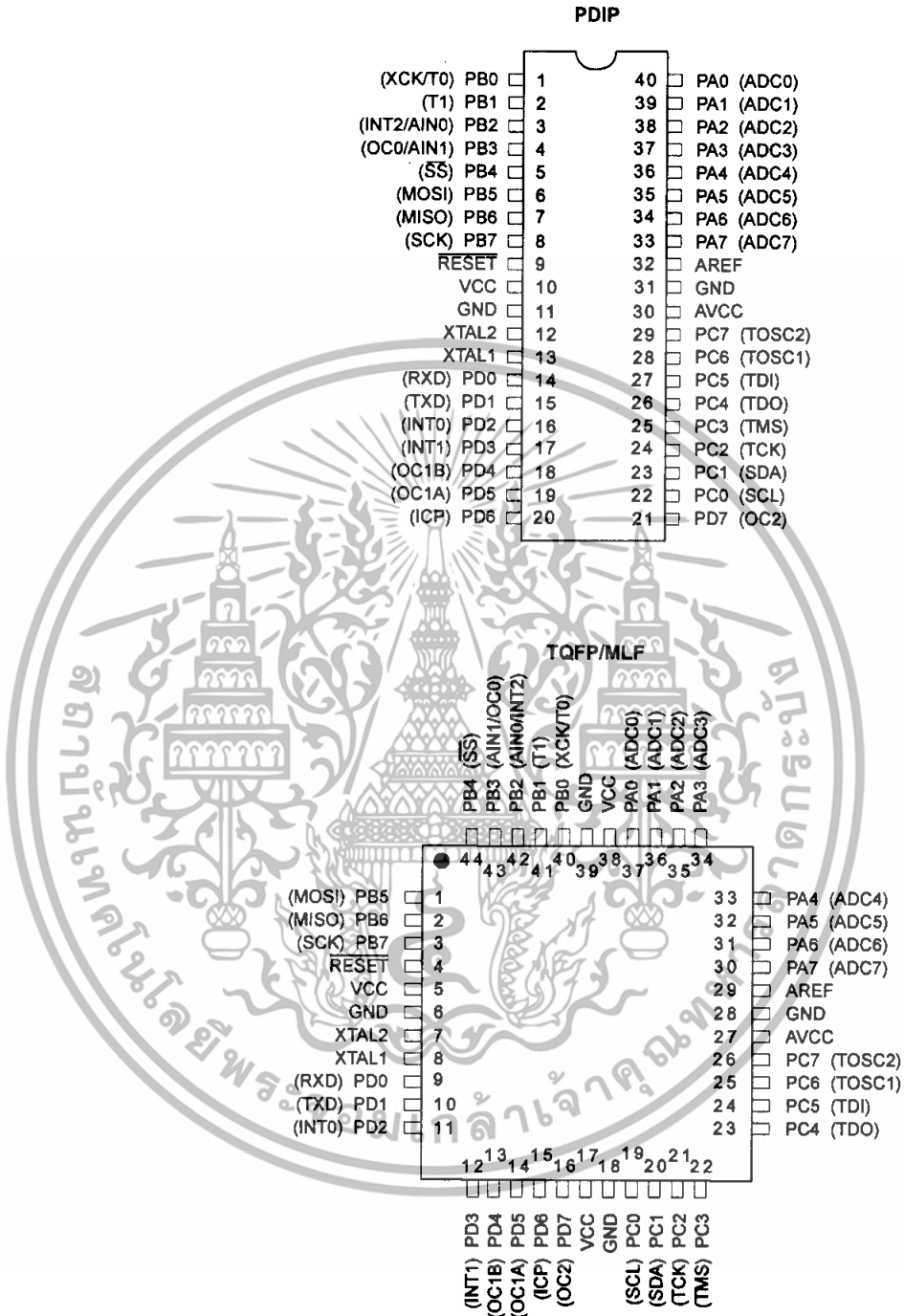


Note: This is a summary document. A complete document is available on our web site at [www.atmel.com](http://www.atmel.com).



## Pin Configurations

Figure 1. Pinouts ATmega32



## Disclaimer

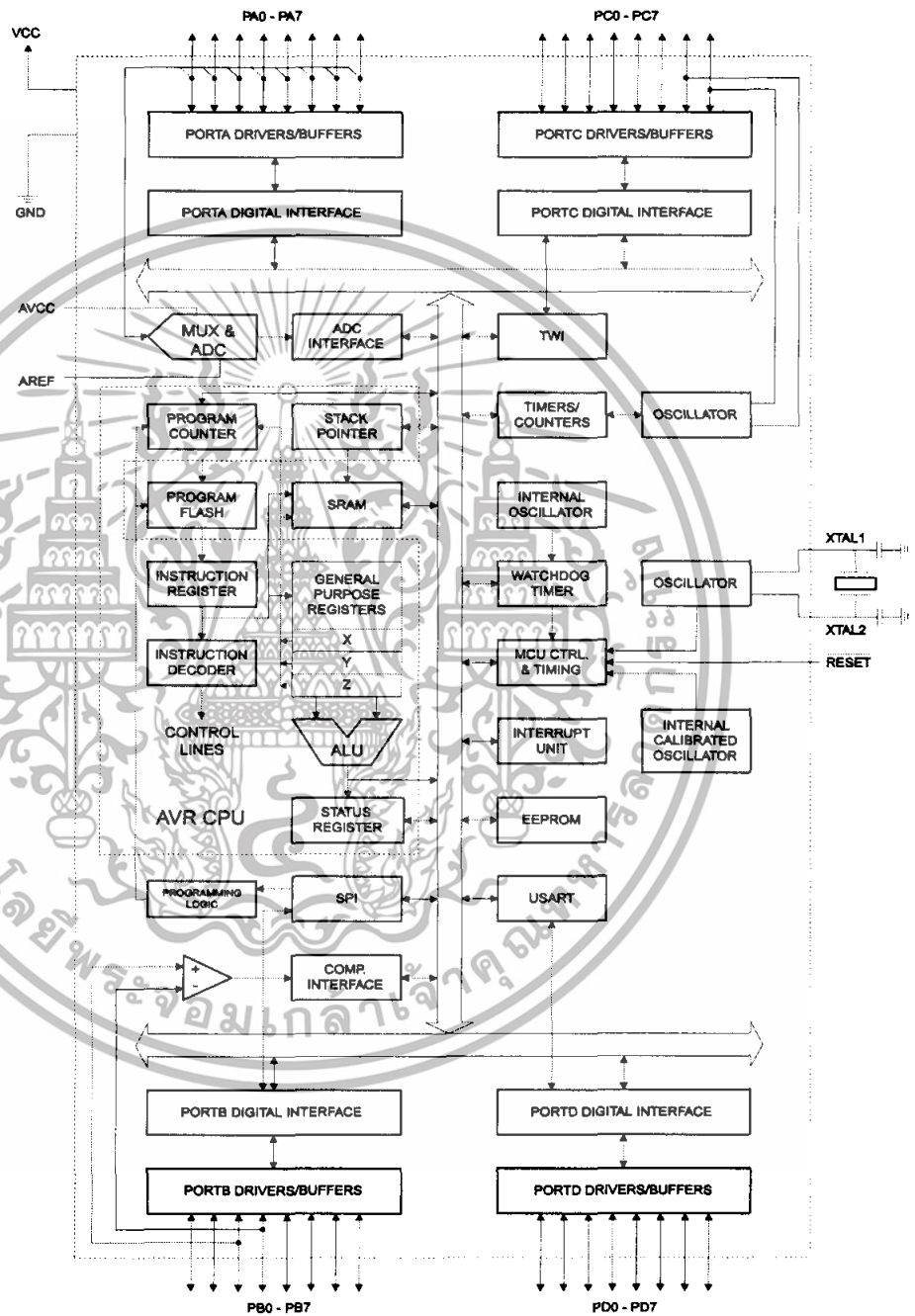
Typical values contained in this data sheet are based on simulations and characterization of other AVR microcontrollers manufactured on the same process technology. Min and Max values will be available after the device is characterized.

## Overview

The ATmega32 is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega32 achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

## Block Diagram

Figure 2. Block Diagram





The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega32 provides the following features: 32K bytes of In-System Programmable Flash Program memory with Read-While-Write capabilities, 1024 bytes EEPROM, 2K byte SRAM, 32 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, a JTAG interface for Boundary-scan, On-chip Debugging support and programming, three flexible Timer/Counters with compare modes, Internal and External Interrupts, a serial programmable USART, a byte oriented Two-wire Serial Interface, an 8-channel, 10-bit ADC with optional differential input stage with programmable gain (TQFP package only), a programmable Watchdog Timer with Internal Oscillator, an SPI serial port, and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the USART, Two-wire interface, A/D Converter, SRAM, Timer/Counters, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next External Interrupt or Hardware Reset. In Power-save mode, the Asynchronous Timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except Asynchronous Timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low-power consumption. In Extended Standby mode, both the main Oscillator and the Asynchronous Timer continue to run.

The device is manufactured using Atmel's high density nonvolatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system through an SPI serial interface, by a conventional nonvolatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega32 is a powerful microcontroller that provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The ATmega32 AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C compilers, macro assemblers, program debugger/simulators, in-circuit emulators, and evaluation kits.

## Pin Descriptions

VCC

Digital supply voltage.

GND

Ground.

Port A (PA7..PA0)

Port A serves as the analog inputs to the A/D Converter.

Port A also serves as an 8-bit bi-directional I/O port, if the A/D Converter is not used. Port pins can provide internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port A output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. When pins PA0 to PA7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current if the internal pull-up resistors are activated. The Port A pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

## Port B (PB7..PB0)

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port B also serves the functions of various special features of the ATmega32 as listed on page 55.

## Port C (PC7..PC0)

Port C is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port C output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. If the JTAG interface is enabled, the pull-up resistors on pins PC5(TDI), PC3(TMS) and PC2(TCK) will be activated even if a reset occurs.

The TD0 pin is tri-stated unless TAP states that shift out data are entered.

Port C also serves the functions of the JTAG interface and other special features of the ATmega32 as listed on page 58.

## Port D (PD7..PD0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port D also serves the functions of various special features of the ATmega32 as listed on page 60.

## RESET

Reset Input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in Table 15 on page 35. Shorter pulses are not guaranteed to generate a reset.

## XTAL1

Input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

## XTAL2

Output from the inverting Oscillator amplifier.

## AVCC

AVCC is the supply voltage pin for Port A and the A/D Converter. It should be externally connected to  $V_{CC}$ , even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to  $V_{CC}$  through a low-pass filter.

## AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

## About Code Examples

This documentation contains simple code examples that briefly show how to use various parts of the device. These code examples assume that the part specific header file is included before compilation. Be aware that not all C Compiler vendors include bit definitions in the header files and interrupt handling in C is compiler dependent. Please confirm with the C Compiler documentation for more details.





## Register Summary

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Page
\$3F (\$5F)	SREG	I	T	H	S	V	N	Z	C	8
\$3E (\$5E)	SPH	-	-	-	-	SP11	SP10	SP9	SP8	10
\$3D (\$5D)	SPL	SP7	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0	10
\$3C (\$5C)	OCR0	Timer/Counter0 Output Compare Register								80
\$3B (\$5B)	GICR	INT1	INT0	INT2	-	-	-	IVSEL	IVCE	45, 65
\$3A (\$5A)	GIFR	INTF1	INTF0	INTF2	-	-	-	-	-	66
\$39 (\$59)	TIMSK	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0	80, 110, 127
\$38 (\$58)	TIFR	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0	81, 111, 128
\$37 (\$57)	SPMCR	SPMIE	RWWSB	-	RWWSRE	BLBSET	PGWRT	PGERS	SPMEN	246
\$36 (\$56)	TWCR	TWINT	TWEA	TWSTA	TWSTO	TWWC	TWEN	-	TWIE	175
\$35 (\$55)	MCUCR	SE	SM2	SM1	SM0	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00	30, 64
\$34 (\$54)	MCUCSR	JTD	ISC2	-	JTRF	WDRF	BORF	EXTRF	PORF	38, 65, 226
\$33 (\$53)	TCCR0	FOC0	WGM00	COM00	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00	78
\$32 (\$52)	TCNT0	Timer/Counter0 (8 Bits)								80
\$31 <sup>(1)</sup> (\$51 <sup>(1)</sup> )	OSCCAL	Oscillator Calibration Register								28
	OCDR	On-Chip Debug Register								222
\$30 (\$50)	SFIOR	ADTS2	ADTS1	ADTS0	-	ACME	PUD	PSR2	PSR10	54, 83, 129, 196, 216
\$2F (\$4F)	TCCR1A	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10	105
\$2E (\$4E)	TCCR1B	ICNC1	ICES1	-	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	108
\$2D (\$4D)	TCNT1H	Timer/Counter1 – Counter Register High Byte								109
\$2C (\$4C)	TCNT1L	Timer/Counter1 – Counter Register Low Byte								109
\$2B (\$4B)	OCR1AH	Timer/Counter1 – Output Compare Register A High Byte								109
\$2A (\$4A)	OCR1AL	Timer/Counter1 – Output Compare Register A Low Byte								109
\$29 (\$49)	OCR1BH	Timer/Counter1 – Output Compare Register B High Byte								109
\$28 (\$48)	OCR1BL	Timer/Counter1 – Output Compare Register B Low Byte								109
\$27 (\$47)	ICR1H	Timer/Counter1 – Input Capture Register High Byte								110
\$26 (\$46)	ICR1L	Timer/Counter1 – Input Capture Register Low Byte								110
\$25 (\$45)	TCCR2	FOC2	WGM20	COM21	COM20	WGM21	CS22	CS21	CS20	122
\$24 (\$44)	TCNT2	Timer/Counter2 (8 Bits)								124
\$23 (\$43)	OCR2	Timer/Counter2 Output Compare Register								125
\$22 (\$42)	ASSR	-	-	-	-	AS2	TCN2UB	OCR2UB	TCR2UB	125
\$21 (\$41)	WDTCR	-	-	-	WDTOE	WDE	WDP2	WDP1	WDP0	40
\$20 <sup>(2)</sup> (\$40 <sup>(2)</sup> )	UBRRH	URSEL	-	-	-	-	UBRR[11:8]			162
	UCSRC	URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL	160
\$1F (\$3F)	EEARH	-	-	-	-	-	-	-	EEAR0	17
\$1E (\$3E)	EEARL	EEPROM Address Register Low Byte								17
\$1D (\$3D)	EEDR	EEPROM Data Register								17
\$1C (\$3C)	EEDR	-	-	-	-	EERIE	EEMWE	EWE	EERE	17
\$1B (\$3B)	PORTA	PORTA7	PORTA6	PORTA5	PORTA4	PORTA3	PORTA2	PORTA1	PORTA0	62
\$1A (\$3A)	DDRA	DDA7	DDA6	DDA5	DDA4	DDA3	DDA2	DDA1	DDA0	62
\$19 (\$39)	PINA	PINA7	PINA6	PINA5	PINA4	PINA3	PINA2	PINA1	PINA0	62
\$18 (\$38)	PORTB	PORTB7	PORTB6	PORTB5	PORTB4	PORTB3	PORTB2	PORTB1	PORTB0	62
\$17 (\$37)	DDRB	ddb7	ddb6	ddb5	ddb4	ddb3	ddb2	ddb1	ddb0	62
\$16 (\$36)	PINB	PINB7	PINB6	PINB5	PINB4	PINB3	PINB2	PINB1	PINB0	63
\$15 (\$35)	PORTC	PORTC7	PORTC6	PORTC5	PORTC4	PORTC3	PORTC2	PORTC1	PORTC0	63
\$14 (\$34)	DDRC	DDC7	DDC6	DDC5	DDC4	DDC3	DDC2	DDC1	DDC0	63
\$13 (\$33)	PINC	PINC7	PINC6	PINC5	PINC4	PINC3	PINC2	PINC1	PINC0	63
\$12 (\$32)	PORTD	PORTD7	PORTD6	PORTD5	PORTD4	PORTD3	PORTD2	PORTD1	PORTD0	63
\$11 (\$31)	DDRD	DDD7	DDD6	DDD5	DDD4	DDD3	DDD2	DDD1	DDD0	63
\$10 (\$30)	PIND	PIND7	PIND6	PIND5	PIND4	PIND3	PIND2	PIND1	PIND0	63
\$0F (\$2F)	SPDR	SPI Data Register								136
\$0E (\$2E)	SPSR	SPIF	WCOL	-	-	-	-	-	SPI2X	136
\$0D (\$2D)	SPCR	SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0	134
\$0C (\$2C)	UDR	USART I/O Data Register								157
\$0B (\$2B)	UCSRA	RXC	TXC	UDRE	FE	DOR	PE	U2X	MPCM	158
\$0A (\$2A)	UCSRB	RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8	159
\$09 (\$29)	UBRRL	USART Baud Rate Register Low Byte								162
\$08 (\$28)	ACSR	ACD	ACBG	ACO	ACI	ACIE	ACIC	ACIS1	ACIS0	197
\$07 (\$27)	ADMUX	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	212
\$06 (\$26)	ADCSRA	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	214
\$05 (\$25)	ADCH	ADC Data Register High Byte								215
\$04 (\$24)	ADCL	ADC Data Register Low Byte								215
\$03 (\$23)	TWDR	Two-wire Serial Interface Data Register								177
\$02 (\$22)	TWAR	TWA6	TWA5	TWA4	TWA3	TWA2	TWA1	TWA0	TWGCE	177

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Page
\$01 (\$21)	TWSR	TWS7	TWS6	TWS5	TWS4	TWS3		TWPS1	TWPS0	178
\$00 (\$20)	TWBR	Two-wire Serial Interface Bit Rate Register								175

- Notes:
1. When the OCDEN Fuse is unprogrammed, the OSCCAL Register is always accessed on this address. Refer to the debug-ger specific documentation for details on how to use the OCSR Register.
  2. Refer to the USART description for details on how to access UBRRH and UCSRC.
  3. For compatibility with future devices, reserved bits should be written to zero if accessed. Reserved I/O memory addresses should never be written.
  4. Some of the status flags are cleared by writing a logical one to them. Note that the CBI and SBI instructions will operate on all bits in the I/O register, writing a one back into any flag read as set, thus clearing the flag. The CBI and SBI instructions work with registers \$00 to \$1F only.





## Instruction Set Summary

Mnemonics	Operands	Description	Operation	Flags	#Clocks
<b>ARITHMETIC AND LOGIC INSTRUCTIONS</b>					
ADD	Rd, Rr	Add two Registers	$Rd \leftarrow Rd + Rr$	Z,C,N,V,H	1
ADC	Rd, Rr	Add with Carry two Registers	$Rd \leftarrow Rd + Rr + C$	Z,C,N,V,H	1
ADIW	RdI,K	Add Immediate to Word	$Rdh:Rdl \leftarrow Rdh:Rdl + K$	Z,C,N,V,S	2
SUB	Rd, Rr	Subtract two Registers	$Rd \leftarrow Rd - Rr$	Z,C,N,V,H	1
SUBI	Rd, K	Subtract Constant from Register	$Rd \leftarrow Rd - K$	Z,C,N,V,H	1
SBC	Rd, Rr	Subtract with Carry two Registers	$Rd \leftarrow Rd - Rr - C$	Z,C,N,V,H	1
SBCI	Rd, K	Subtract with Carry Constant from Reg.	$Rd \leftarrow Rd - K - C$	Z,C,N,V,H	1
SBIW	RdI,K	Subtract Immediate from Word	$Rdh:Rdl \leftarrow Rdh:Rdl - K$	Z,C,N,V,S	2
AND	Rd, Rr	Logical AND Registers	$Rd \leftarrow Rd \& Rr$	Z,N,V	1
ANDI	Rd, K	Logical AND Register and Constant	$Rd \leftarrow Rd \& K$	Z,N,V	1
OR	Rd, Rr	Logical OR Registers	$Rd \leftarrow Rd \vee Rr$	Z,N,V	1
ORI	Rd, K	Logical OR Register and Constant	$Rd \leftarrow Rd \vee K$	Z,N,V	1
EOR	Rd, Rr	Exclusive OR Registers	$Rd \leftarrow Rd \oplus Rr$	Z,N,V	1
COM	Rd	One's Complement	$Rd \leftarrow \$FF - Rd$	Z,C,N,V	1
NEG	Rd	Two's Complement	$Rd \leftarrow \$00 - Rd$	Z,C,N,V,H	1
SBR	Rd,K	Set Bit(s) in Register	$Rd \leftarrow Rd \vee K$	Z,N,V	1
CBR	Rd,K	Clear Bit(s) in Register	$Rd \leftarrow Rd \& (\$FF - K)$	Z,N,V	1
INC	Rd	Increment	$Rd \leftarrow Rd + 1$	Z,N,V	1
DEC	Rd	Decrement	$Rd \leftarrow Rd - 1$	Z,N,V	1
TST	Rd	Test for Zero or Minus	$Rd \leftarrow Rd \& Rd$	Z,N,V	1
CLR	Rd	Clear Register	$Rd \leftarrow Rd \& Rd$	Z,N,V	1
SER	Rd	Set Register	$Rd \leftarrow \$FF$	None	1
MUL	Rd, Rr	Multiply Unsigned	$R1:R0 \leftarrow Rd \times Rr$	Z,C	2
MULS	Rd, Rr	Multiply Signed	$R1:R0 \leftarrow Rd \times Rr$	Z,C	2
MULSU	Rd, Rr	Multiply Signed with Unsigned	$R1:R0 \leftarrow Rd \times Rr$	Z,C	2
FMUL	Rd, Rr	Fractional Multiply Unsigned	$R1:R0 \leftarrow (Rd \times Rr) \lll 1$	Z,C	2
FMULS	Rd, Rr	Fractional Multiply Signed	$R1:R0 \leftarrow (Rd \times Rr) \lll 1$	Z,C	2
FMULSU	Rd, Rr	Fractional Multiply Signed with Unsigned	$R1:R0 \leftarrow (Rd \times Rr) \lll 1$	Z,C	2
<b>BRANCH INSTRUCTIONS</b>					
RJMP	k	Relative Jump	$PC \leftarrow PC + k + 1$	None	2
IJMP		Indirect Jump to (Z)	$PC \leftarrow Z$	None	2
JMP	k	Direct Jump	$PC \leftarrow k$	None	3
RCALL	k	Relative Subroutine Call	$PC \leftarrow PC + k + 1$	None	3
ICALL		Indirect Call to (Z)	$PC \leftarrow Z$	None	3
CALL	k	Direct Subroutine Call	$PC \leftarrow k$	None	4
RET		Subroutine Return	$PC \leftarrow STACK$	None	4
RETI		Interrupt Return	$PC \leftarrow STACK$	I	4
CPSE	Rd,Rr	Compare, Skip if Equal	if (Rd = Rr) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1/2/3
CP	Rd,Rr	Compare	$Rd - Rr$	Z,N,V,C,H	1
CPC	Rd,Rr	Compare with Carry	$Rd - Rr - C$	Z,N,V,C,H	1
CPI	Rd,K	Compare Register with Immediate	$Rd - K$	Z,N,V,C,H	1
SBRC	Rr, b	Skip if Bit in Register Cleared	if (Rr(b)=0) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1/2/3
SBRs	Rr, b	Skip if Bit in Register is Set	if (Rr(b)=1) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1/2/3
SBIC	P, b	Skip if Bit in I/O Register Cleared	if (P(b)=0) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1/2/3
SBIS	P, b	Skip if Bit in I/O Register is Set	if (P(b)=1) $PC \leftarrow PC + 2$ or 3	None	1/2/3
BRBS	s, k	Branch if Status Flag Set	if (SREG(s) = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRBC	s, k	Branch if Status Flag Cleared	if (SREG(s) = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BREQ	k	Branch if Equal	if (Z = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRNE	k	Branch if Not Equal	if (Z = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRCS	k	Branch if Carry Set	if (C = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRCC	k	Branch if Carry Cleared	if (C = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRSH	k	Branch if Same or Higher	if (C = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRLO	k	Branch if Lower	if (C = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRMI	k	Branch if Minus	if (N = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRPL	k	Branch if Plus	if (N = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRGE	k	Branch if Greater or Equal, Signed	if (N $\oplus$ V = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRLT	k	Branch if Less Than Zero, Signed	if (N $\oplus$ V = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRHS	k	Branch if Half Carry Flag Set	if (H = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRHC	k	Branch if Half Carry Flag Cleared	if (H = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRTS	k	Branch if T Flag Set	if (T = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRTC	k	Branch if T Flag Cleared	if (T = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRVS	k	Branch if Overflow Flag is Set	if (V = 1) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2
BRVC	k	Branch if Overflow Flag is Cleared	if (V = 0) then $PC \leftarrow PC + k + 1$	None	1/2

Mnemonics	Operands	Description	Operation	Flags	#Clocks
BRIE	k	Branch if Interrupt Enabled	if (I = 1) then PC ← PC + k + 1	None	1/2
BRID	k	Branch if Interrupt Disabled	if (I = 0) then PC ← PC + k + 1	None	1/2
<b>DATA TRANSFER INSTRUCTIONS</b>					
MOV	Rd, Rr	Move Between Registers	Rd ← Rr	None	1
MOVW	Rd, Rr	Copy Register Word	Rd+1:Rd ← Rr+1:Rr	None	1
LDI	Rd, K	Load Immediate	Rd ← K	None	1
LD	Rd, X	Load Indirect	Rd ← (X)	None	2
LD	Rd, X+	Load Indirect and Post-Inc.	Rd ← (X), X ← X + 1	None	2
LD	Rd, -X	Load Indirect and Pre-Dec.	X ← X - 1, Rd ← (X)	None	2
LD	Rd, Y	Load Indirect	Rd ← (Y)	None	2
LD	Rd, Y+	Load Indirect and Post-Inc.	Rd ← (Y), Y ← Y + 1	None	2
LD	Rd, -Y	Load Indirect and Pre-Dec.	Y ← Y - 1, Rd ← (Y)	None	2
LDD	Rd, Y+q	Load Indirect with Displacement	Rd ← (Y + q)	None	2
LD	Rd, Z	Load Indirect	Rd ← (Z)	None	2
LD	Rd, Z+	Load Indirect and Post-Inc.	Rd ← (Z), Z ← Z + 1	None	2
LD	Rd, -Z	Load Indirect and Pre-Dec.	Z ← Z - 1, Rd ← (Z)	None	2
LDD	Rd, Z+q	Load Indirect with Displacement	Rd ← (Z + q)	None	2
LDS	Rd, k	Load Direct from SRAM	Rd ← (k)	None	2
ST	X, Rr	Store Indirect	(X) ← Rr	None	2
ST	X+, Rr	Store Indirect and Post-Inc.	(X) ← Rr, X ← X + 1	None	2
ST	-X, Rr	Store Indirect and Pre-Dec.	X ← X - 1, (X) ← Rr	None	2
ST	Y, Rr	Store Indirect	(Y) ← Rr	None	2
ST	Y+, Rr	Store Indirect and Post-Inc.	(Y) ← Rr, Y ← Y + 1	None	2
ST	-Y, Rr	Store Indirect and Pre-Dec.	Y ← Y - 1, (Y) ← Rr	None	2
STD	Y+q, Rr	Store Indirect with Displacement	(Y + q) ← Rr	None	2
ST	Z, Rr	Store Indirect	(Z) ← Rr	None	2
ST	Z+, Rr	Store Indirect and Post-Inc.	(Z) ← Rr, Z ← Z + 1	None	2
ST	-Z, Rr	Store Indirect and Pre-Dec.	Z ← Z - 1, (Z) ← Rr	None	2
STD	Z+q, Rr	Store Indirect with Displacement	(Z + q) ← Rr	None	2
STS	k, Rr	Store Direct to SRAM	(k) ← Rr	None	2
LPM		Load Program Memory	RD ← (Z)	None	3
LPM	Rd, Z	Load Program Memory	Rd ← (Z)	None	3
LPM	Rd, Z+	Load Program Memory and Post-Inc	Rd ← (Z), Z ← Z + 1	None	3
SPM		Store Program Memory	(Z) ← R1:R0	None	-
IN	Rd, P	In Port	Rd ← P	None	1
OUT	P, Rr	Out Port	P ← Rr	None	1
PUSH	Rr	Push Register on Stack	STACK ← Rr	None	2
POP	Rd	Pop Register from Stack	Rd ← STACK	None	2
<b>BIT AND BIT-TEST INSTRUCTIONS</b>					
SBI	P, b	Set Bit in I/O Register	I/O(P, b) ← 1	None	2
CBI	P, b	Clear Bit in I/O Register	I/O(P, b) ← 0	None	2
LSL	Rd	Logical Shift Left	Rd(n+1) ← Rd(n), Rd(0) ← 0	Z, C, N, V	1
LSR	Rd	Logical Shift Right	Rd(n) ← Rd(n+1), Rd(7) ← 0	Z, C, N, V	1
ROL	Rd	Rotate Left Through Carry	Rd(0) ← C, Rd(n+1) ← Rd(n), C ← Rd(7)	Z, C, N, V	1
ROR	Rd	Rotate Right Through Carry	Rd(7) ← C, Rd(n) ← Rd(n+1), C ← Rd(0)	Z, C, N, V	1
ASR	Rd	Arithmetic Shift Right	Rd(n) ← Rd(n+1), n=0..6	Z, C, N, V	1
SWAP	Rd	Swap Nibbles	Rd(3..0) ← Rd(7..4), Rd(7..4) ← Rd(3..0)	None	1
BSET	s	Flag Set	SREG(s) ← 1	SREG(s)	1
BCLR	s	Flag Clear	SREG(s) ← 0	SREG(s)	1
BST	Rr, b	Bit Store from Register to T	T ← Rr(b)	T	1
BLD	Rd, b	Bit load from T to Register	Rd(b) ← T	None	1
SEC		Set Carry	C ← 1	C	1
CLC		Clear Carry	C ← 0	C	1
SEN		Set Negative Flag	N ← 1	N	1
CLN		Clear Negative Flag	N ← 0	N	1
SEZ		Set Zero Flag	Z ← 1	Z	1
CLZ		Clear Zero Flag	Z ← 0	Z	1
SEI		Global Interrupt Enable	I ← 1	I	1
CLI		Global Interrupt Disable	I ← 0	I	1
SES		Set Signed Test Flag	S ← 1	S	1
CLS		Clear Signed Test Flag	S ← 0	S	1
SEV		Set Twos Complement Overflow	V ← 1	V	1
CLV		Clear Twos Complement Overflow	V ← 0	V	1
SET		Set T in SREG	T ← 1	T	1
CLT		Clear T in SREG	T ← 0	T	1
SEH		Set Half Carry Flag in SREG	H ← 1	H	1

Mnemonics	Operands	Description	Operation	Flags	#Clocks
CLH		Clear Half Carry Flag in SREG	H ← 0	H	1
MCU CONTROL INSTRUCTIONS					
NOP		No Operation		None	1
SLEEP		Sleep	(see specific descr. for Sleep function)	None	1
WDR		Watchdog Reset	(see specific descr. for WDR/timer)	None	1
BREAK		Break	For On-Chip Debug Only	None	N/A



## Ordering Information

Speed (MHz)	Power Supply	Ordering Code	Package	Operation Range
8	2.7 - 5.5V	ATmega32L-8AC ATmega32L-8PC ATmega32L-8MC	44A 40P6 44M1	Commercial (0°C to 70°C)
		ATmega32L-8AI ATmega32L-8PI ATmega32L-8MI	44A 40P6 44M1	Industrial (-40°C to 85°C)
16	4.5 - 5.5V	ATmega32-16AC ATmega32-16PC ATmega32-16MI	44A 40P6 44M1	Commercial (0°C to 70°C)
		ATmega32-16AI ATmega32-16PI ATmega32-16MC	44A 40P6 44M1	Industrial (-40°C to 85°C)

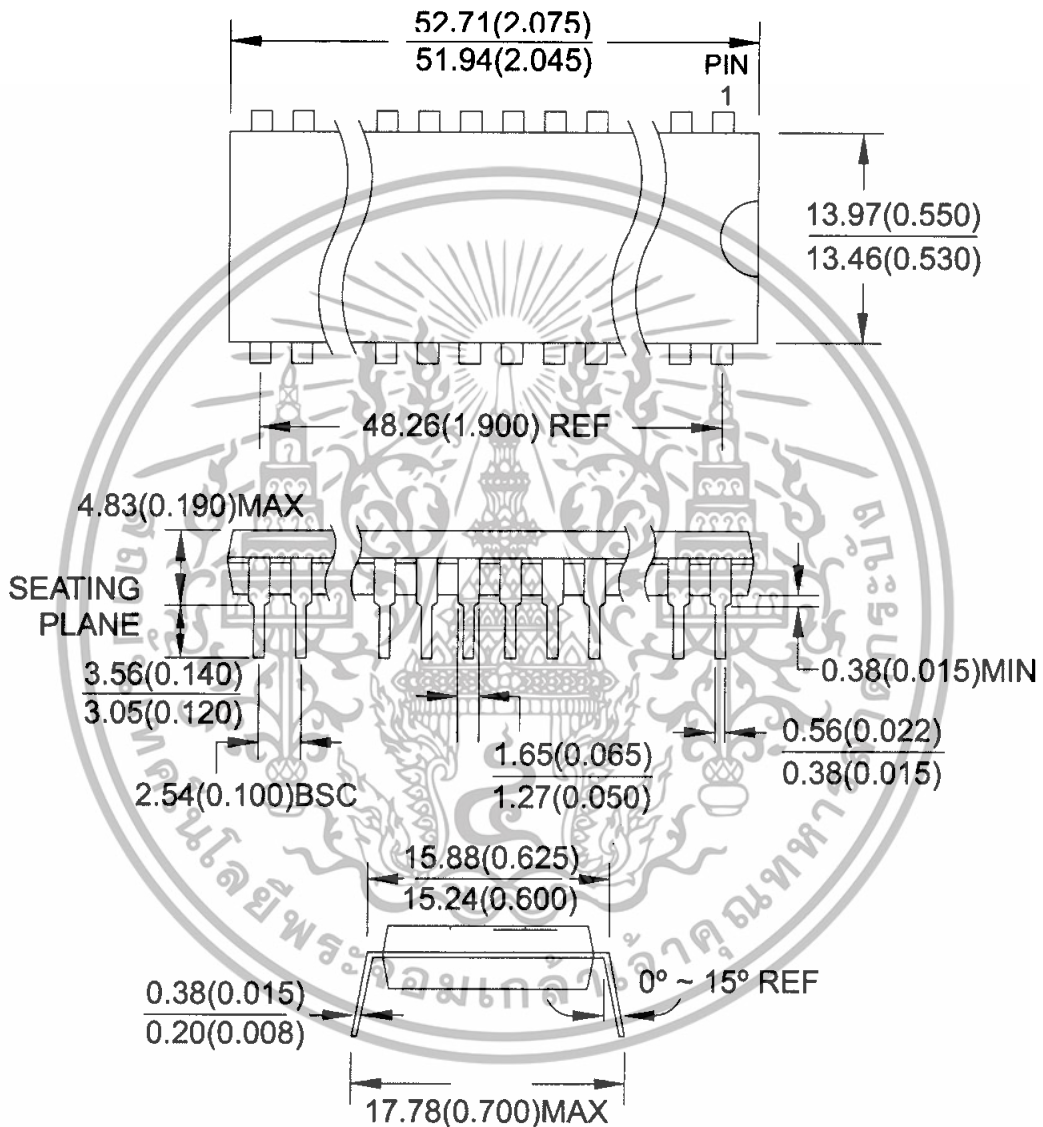


Package Type	
<b>44A</b>	44-lead, Thin (1.0 mm) Plastic Gull Wing Quad Flat Package (TQFP)
<b>40P6</b>	40-pin, 0.600" Wide, Plastic Dual Inline Package (PDIP)
<b>44M1</b>	44-pad, 7 x 7 x 1.0 mm body, lead pitch 0.50 mm, Micro Lead Frame Package (MLF)



40P6

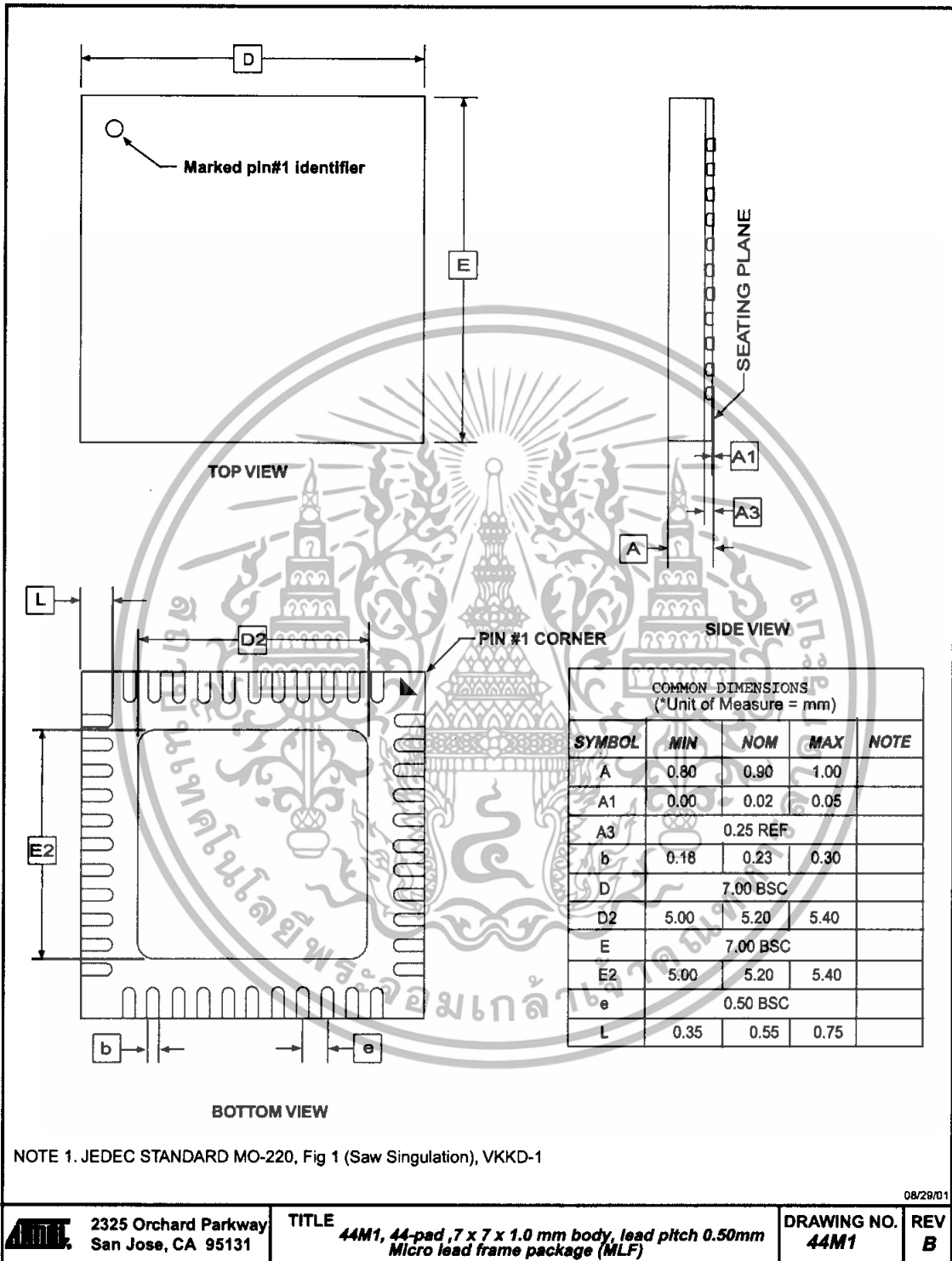
40-lead, Plastic Dual Inline  
 Package (PDIP), 0.600" wide  
 Dimension in Millimeters and (Inches)\*  
 JEDEC STANDARD MS-011 AC



\*Controlling dimension: Inches

REV. A 04/11/2001





Errata

ATmega32 Rev. A

There are no errata for this revision of ATmega32.





## Data Sheet Change Log for ATmega32

Please note that the referring page numbers in this section are referred to this document. The referring revision in this section are referring to the document revision.

Changes from Rev.  
2503A-03/02 to Rev.  
2503B-10/02

1. Changed the endurance on the Flash to 10,000 Write/Erase Cycles.
2. Bit nr.4 – ADHSM – in SFIOR Register removed.
3. Added the section “Default Clock Source” on page 23.
4. When using External Clock there are some limitations regards to change of frequency. This is described in “External Clock” on page 29 and Table 118 on page 286.
5. Added a sub section regarding OCD-system and power consumption in the section “Minimizing Power Consumption” on page 32.
6. Corrected typo (WGM-bit setting) for:
  - “Fast PWM Mode” on page 73 (Timer/Counter0)
  - “Phase Correct PWM Mode” on page 74 (Timer/Counter0)
  - “Fast PWM Mode” on page 118 (Timer/Counter2)
  - “Phase Correct PWM Mode” on page 119 (Timer/Counter2)
7. Corrected Table 67 on page 162 (USART).
8. Updated  $V_{IL}$ ,  $I_{IL}$ , and  $I_{IH}$  parameter in “DC Characteristics” on page 284.
9. Updated Description of OSCCAL Calibration Byte.  
In the data sheet, it was not explained how to take advantage of the calibration bytes for 2, 4, and 8 MHz Oscillator selections. This is now added in the following sections:  
Improved description of “Oscillator Calibration Register – OSCCAL” on page 28 and “Calibration Byte” on page 256.
10. Corrected typo in Table 42.
11. Corrected description in Table 45 and Table 46.
12. Updated Table 119, Table 121, and Table 122.
13. Added “Errata” on page 15.



## Atmel Headquarters

### Corporate Headquarters

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 487-2600

### Europe

Atmel Sarl  
Route des Arsenaux 41  
Case Postale 80  
CH-1705 Fribourg  
Switzerland  
TEL (41) 26-426-5555  
FAX (41) 26-426-5500

### Asia

Room 1219  
Chinachem Golden Plaza  
77 Mody Road Tsimhatsui  
East Kowloon  
Hong Kong  
TEL (852) 2721-9778  
FAX (852) 2722-1369

### Japan

9F, Tonetsu Shinkawa Bldg.  
1-24-8 Shinkawa  
Chuo-ku, Tokyo 104-0033  
Japan  
TEL (81) 3-3523-3551  
FAX (81) 3-3523-7581

## Atmel Operations

### Memory

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 436-4314

### Microcontrollers

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 436-4314

La Chantrerie  
BP 70602  
44306 Nantes Cedex 3, France  
TEL (33) 2-40-18-18-18  
FAX (33) 2-40-18-19-60

### ASIC/ASSP/Smart Cards

Zone Industrielle  
13106 Rousset Cedex, France  
TEL (33) 4-42-53-60-00  
FAX (33) 4-42-53-60-01

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.  
Colorado Springs, CO 80906  
TEL 1(719) 576-3300  
FAX 1(719) 540-1759

Scottish Enterprise Technology Park  
Maxwell Building  
East Kilbride G75 0QR, Scotland  
TEL (44) 1355-803-000  
FAX (44) 1355-242-743

### RF/Automotive

Theresienstrasse 2  
Postfach 3535  
74025 Heilbronn, Germany  
TEL (49) 71-31-67-0  
FAX (49) 71-31-67-2340

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.  
Colorado Springs, CO 80906  
TEL 1(719) 576-3300  
FAX 1(719) 540-1759

### Biometrics/Imaging/Hi-Rel MPU/ High Speed Converters/RF Datacom

Avenue de Rochepleine  
BP 123  
38521 Saint-Egreve Cedex, France  
TEL (33) 4-76-58-30-00  
FAX (33) 4-76-58-34-80

*e-mail*  
[literature@atmel.com](mailto:literature@atmel.com)

*Web Site*  
<http://www.atmel.com>

### © Atmel Corporation 2002.

Atmel Corporation makes no warranty for the use of its products, other than those expressly contained in the Company's standard warranty which is detailed in Atmel's Terms and Conditions located on the Company's web site. The Company assumes no responsibility for any errors which may appear in this document, reserves the right to change devices or specifications detailed herein at any time without notice, and does not make any commitment to update the information contained herein. No licenses to patents or other intellectual property of Atmel are granted by the Company in connection with the sale of Atmel products, expressly or by implication. Atmel's products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems.

ATMEL®, AVR®, and AVR Studio® are the registered trademarks of Atmel.

Other terms and product names may be the trademarks of others.



Printed on recycled paper.

2503BS-AVR-10/02

0M