

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

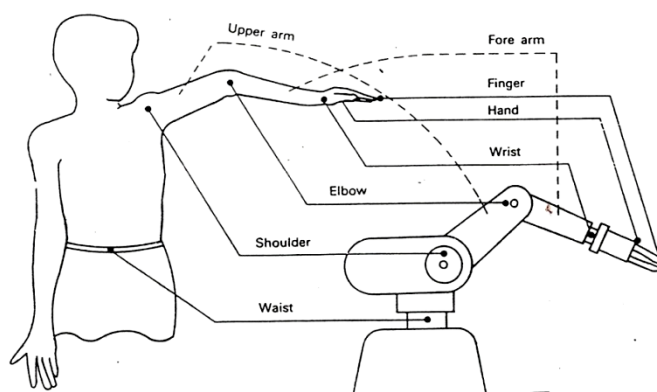
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับโครงงานนี้สามารถสรุปเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

- 2.1 ความเป็นมาและคำจำกัดความของหุ่นยนต์
- 2.2 ความรู้เกี่ยวกับลักษณะของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (Cartesian Robot)
- 2.3 การแบ่งประเภทของการควบคุม (Classification by Control Method)
- 2.4 ทฤษฎีของเอซีเซอร์โวมอเตอร์ (AC Servo Motor)
- 2.5 ความรู้เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ (Image Processing)
- 2.6 สเตรนเกจ (Strain Gauge)
- 2.7 การควบคุมด้วยฟัซซี่ (Fuzzy Logic Controller)
- 2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

2.1 ความเป็นมาและคำจำกัดความของหุ่นยนต์

ปีค.ศ.1921 มีนักเขียนบทละคร ชาวเช็กโกสโลวาเกียชื่อ Karel Kapek เป็นคนแรกที่น่าคำว่า Robot มาใช้ โดยใช้แทนตัวละครซึ่งเป็นคนงานที่สามารถทำงานได้อย่างไม่มีที่ติ และไม่มีความรู้สึกเหน็ดเหนื่อย สามารถทำงานหนักได้มากกว่ามนุษย์ ต่อมาจึงได้มีการนำแนวความคิดนี้ไปใช้สร้างหุ่นยนต์เพื่อทำงานแทนมนุษย์

จากความเป็นมาดังกล่าวจึง ได้มีการพัฒนาหุ่นยนต์ขึ้นอย่างต่อเนื่องตามยุคสมัยของแต่ละประเทศ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ได้มีการพัฒนามากขึ้น ทำให้หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงการทำงานให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น และใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในงานขนถ่ายวัสดุโดยจะทำงานภายใต้การควบคุมของคอมพิวเตอร์ (Computer) โครงสร้างคือแขนกลซึ่งประกอบด้วยแขน 1 แขนที่มีลักษณะคล้ายกับแขนของมนุษย์ และในทำนองเดียวกันก็จะมีข้อต่อของแขนกล ซึ่งอาจจะเรียกว่า ไหล่ ข้อศอก และข้อมือ ในส่วนของข้อมือก็จะสามารถเคลื่อนขึ้นลง และหมุนได้ ข้อต่อสามารถที่จะขับเคลื่อนได้ด้วยระบบไฟฟ้า ระบบนิวเมติกส์ (Pneumatics) หรือระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulics) ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์มีกำลังมากกว่ามนุษย์



ภาพที่ 2-1 ลักษณะแขนกลของหุ่นยนต์เทียบกับแขนของคน

2.2 ความรู้เกี่ยวกับลักษณะของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (Cartesian Robot)

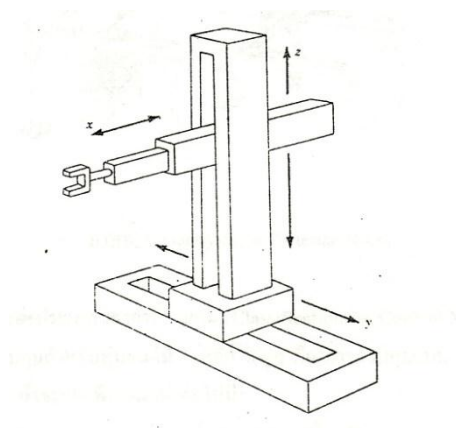
การกำหนดชนิดของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบ่งตามลักษณะพื้นฐานได้ 2 ชนิดคือ การใช้ระบบพิกัด (Coordinate System) ในการออกแบบโครงสร้างของเครื่องกล (Mechanical Structure) และการใช้รูปแบบของการควบคุม (Control Method) โครงงานนี้จะคำนึงถึงการใช้ระบบพิกัดเป็นจุดแรกของการแบ่งชนิดของหุ่นยนต์

2.2.1 การแบ่งประเภทของการใช้ระบบพิกัด (Classification by Coordinate System) เป็นระบบของหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบพิกัดกำหนดตำแหน่งการทำงาน ลักษณะของหุ่นยนต์ประเภทนี้ได้แก่

Cylindrical	: เคลื่อนที่แนวตรง 2 แกน และ เคลื่อนที่แนวหมุน 1 แกน
Spherical	: เคลื่อนที่แนวตรง 1 แกน และ เคลื่อนที่แนวหมุน 2 แกน
Articulated หรือ Jointed	: เคลื่อนที่แนวตรง 3 แกน
Cartesian	: เคลื่อนที่แนวตรง 3 แกน

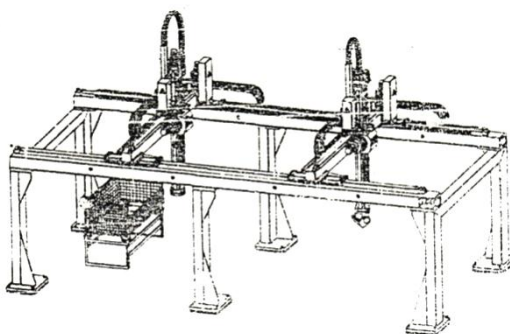
โครงงานนี้มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแนวตรงทั้ง 3 แกน ดังนั้น จะกล่าวเฉพาะหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนเท่านั้น เพราะลักษณะโครงสร้างและแนวการเคลื่อนที่ของโครงงานนี้คล้ายกับหุ่นยนต์ประเภทนี้ หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนนี้เป็นระบบที่มีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด โดยส่วนปฏิบัติการจะเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Linear) พื้นที่ปฏิบัติการจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Prismatic) หุ่นยนต์แบบนี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบแกนขนานเคลื่อนที่ และแบบติดเพดาน

2.2.1.1 แบบแกนเคลื่อนที่ (Cantilevered Cartesian) ตัวแขนของหุ่นยนต์จะยึดติดกับแกนตั้งซึ่งแกนตั้งจะยึดติดกับฐาน ส่วนประกอบของหุ่นยนต์จะมีแนวทางเคลื่อนที่ขนานกับแนวแกน X Y Z ทุกแกน หุ่นยนต์ชนิดนี้มีข้อจำกัดการทำงานค่อนข้างมาก คือ ถ้าเคลื่อนที่ออกนอกแนวโครงสร้างของมันแล้ว การทำงานของมันจะไม่มั่นคงแข็งแรงเท่าที่ควรแต่มีข้อดีคือ สามารถเข้าได้ถึงทุกจุดภายในกรอบพื้นที่การปฏิบัติงานเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ประเภทอื่น หุ่นยนต์ประเภทนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า เรกแทนกูลาร์ โรบอท (Rectangular Robot)



ภาพที่ 2-2 หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน แบบแกนเคลื่อนที่

2.2.1.2 แบบติดเพดาน (Gantry Style Cartesian Robot) โดยปกติหากต้องการยกวัสดุชิ้นใหญ่และหนัก การเคลื่อนที่ที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงจึงมักใช้หุ่นยนต์ชนิดนี้ เพราะมันติดอยู่บนเพดานและมีความแข็งแรงมาก แต่อาจเข้าถึงวัสดุชิ้นงานได้ไม่ลึกนัก ต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของหุ่นยนต์ให้เป็นอิสระในตัวของมันเอง โดยไม่ต้องยึดติดกับเพดาน หุ่นยนต์ชนิดนี้จัดอยู่ในระบบคาร์ทีเซียน ก็เนื่องจากแนวแกนหลักของการเคลื่อนที่ตรงกับระบบนี้นั่นเอง อย่างไรก็ตามตัวหุ่นยนต์เองมิได้ถูกจำกัดการเคลื่อนที่อยู่แค่ 3 แกนเท่านั้น ในส่วนข้อมือ ซึ่งถูกยึดติดกับปลายแขนช่วงสุดท้ายนั้น สามารถหมุนได้รอบทิศทาง ซึ่งได้แก่การหมุนตั้งฉาก รอบแนวแกน (α) การหมุนตั้งฉากขึ้นลงตามแนวแกน (β) และการหมุนตั้งฉากซ้ายขวาตามแนวแกน (δ) นอกจากนี้ตัวฐานของหุ่นยนต์ชนิดนี้ยังสามารถเคลื่อนย้าย และ ประกอบติดตั้งที่อื่นได้อีก เช่น โต๊ะระนาบ X-Y, ใต้เพดานหรือวางกับพื้น



ภาพที่ 2-3 หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนแบบติดเพดาน

2.3 การแบ่งประเภทของการควบคุม

วิธีการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์มี 2 หลักใหญ่ๆ คือการควบคุมแบบนอนเซอร์โว (Non Servo) และการควบคุมแบบเซอร์โว (Servo) ซึ่งจะแยกพิจารณาดังต่อไปนี้

2.3.1 การควบคุมหุ่นยนต์แบบนอนเซอร์โว (Non Servo Controlled Robots) หุ่นยนต์ที่มีวิธีการควบคุมแบบนอนเซอร์โวเป็นวิธีการควบคุมที่ง่ายที่สุด เป็นหุ่นยนต์ที่มีลำดับขั้นการทำงานแบบจำกัด (Limited Sequence Robot) หุ่นยนต์แบบนี้มีชื่ออีกหลายชื่อ เช่น End Robot, Pick And Place Robot หรือ Bang Bang Robot หุ่นยนต์ระบบนี้จะไม่มีทางรู้ได้ว่าอยู่ตำแหน่งที่กำหนดหรือยัง เนื่องจากไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณ ดังนั้นอาจจะเรียกหุ่นยนต์ประเภทนี้ได้ดีกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิดลูปเปิด (Open Loop) โดยทั่วไปจะใช้เป็นหุ่นยนต์ขนาดเล็กเพราะราคาถูกและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน การเคลื่อนที่ระหว่างจุดต่อจุดจะมีการหยุดก็ครั้งก็ได้ตามแนวการเคลื่อนที่ แต่หมายความว่าโปรแกรมการทำงาน สำหรับเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นจะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น

2.3.2 การควบคุมหุ่นยนต์แบบเซอร์โว (Servo Controlled Robot) หุ่นยนต์ที่ควบคุมแบบเซอร์โว คือ หุ่นยนต์ที่มีการตรวจจับตำแหน่งของตัวมันและมีป้อนการกลับตำแหน่ง ที่ตรวจจับเพื่อนำไปใช้ควบคุม จึงกล่าวได้ว่าระบบนี้เป็นระบบปิด (Closed Loop) ทำให้สามารถสั่งการทำงาน ให้ตัวปฏิบัติการเคลื่อนที่หรือหยุดได้ทุกตำแหน่งตลอดย่านระยะของแกนแนวปฏิบัติการ หุ่นยนต์แบบนี้สามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ แบบเคลื่อนที่จุดต่อจุด (Point to Point) และแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่อง (Continuous Path)

2.4 ทฤษฎีของเอซีเซอร์โวมอเตอร์ (AC Servo Motor)

2.4.1 ความหมายของระบบเซอร์โว ตามนิยามของวิศวกรรมการคอนโทรลแบบอัตโนมัติ หรือระบบการควบคุมแบบป้อนกลับสามารถจำแนกระบบควบคุมแบบลูปปิด ได้เป็นสาขาต่างๆ ดังตารางข้างล่างนี้

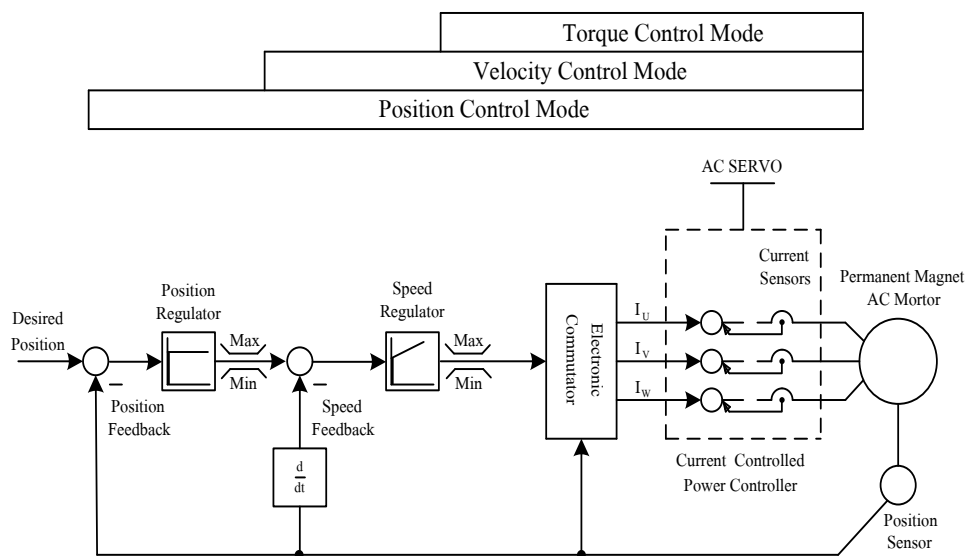
ตารางที่ 2-1 แสดงจำแนกระบบควบคุมแบบลูปปิด (Closed Loop Control)

ระบบควบคุมแบบลูปปิด		
ระบบไฟฟ้า	ระบบไดนามิกส์ (ระบบเซอร์โว)	ระบบกระบวนการ (Process)
การขยาย แรงดันและ กระแสไฟฟ้า ของสัญญาณ ป้อนกลับ	ควบคุมความเร็ว (Speed Control)	ควบคุมอุณหภูมิ (Temp Control)
	ควบคุมแรงบิด (Torque Control)	ควบคุมแรงดัน (Pressure Control)
	ควบคุมตำแหน่ง (Position control)	ควบคุมการไหล (Flow Control)
	ควบคุมอัตราเร็ว (Velocity Control)	ควบคุมความหนาแน่น (Density Control)

จากตารางสามารถสรุปได้ว่า ระบบเซอร์โว คือการควบคุมเครื่องจักรกลให้ทำงานตอบสนองด้านไดนามิกส์ (Dynamic Response) เช่น ความเร็ว อัตราเร็วแรงบิดและตำแหน่งให้ได้ดีที่สุด (Optimum Solution) และใช้เวลาน้อยที่สุด (Time Optimum)

2.4.2 โครงสร้างระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์จะเป็นระบบควบคุมแบบลูปปิด ประกอบด้วย 3 โหมดการควบคุม คือ โหมดการควบคุมแรงบิด (Torque Control Mode) ซึ่งอยู่วงรอบหรือลูปในสุด โหมดการควบคุมอัตราเร็ว (Velocity Control Mode) และโหมดการควบคุมตำแหน่ง (Position Control Mode) ซึ่งอยู่ลูปด้านนอกสุด โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญๆ ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

2.4.3 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ในงานทั่วไป จะมีทั้งดีซีเซอร์โว (DC Servo) และเอซีเซอร์โว (AC Servo) ในเครื่องจักรรุ่นเก่าๆเราจะพบว่าดีซีเซอร์โวมอเตอร์ มีการใช้ในเครื่องจักรอุตสาหกรรมมากกว่าเอซีเซอร์โวมอเตอร์ เนื่องจากในช่วงที่ผ่านมา การควบคุมกระแสสูงๆนั้น จะต้องใช้ไธริสทอร์ (SCR) แต่ปัจจุบันอุปกรณ์กำลังได้พัฒนาขึ้นมาให้มีขีดความสามารถในการควบคุมกระแสสูงเพิ่มขึ้น และใช้งานได้ที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นจึงทำให้ เอซีเซอร์โวได้ถูกนำมาใช้งานมากขึ้นโดยเฉพาะเครื่องจักรรุ่นใหม่ล้วนแล้วแต่ใช้เอซีเซอร์โว

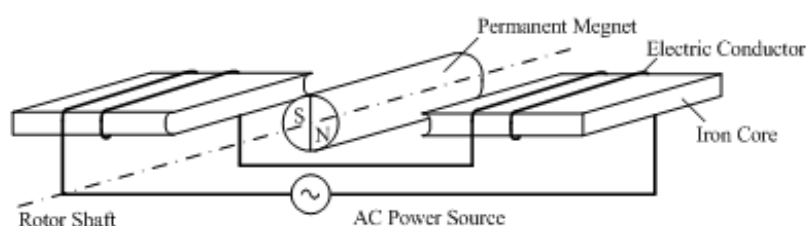
2.4.3.1 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่มีแปรงถ่าน (Brush Type) เซอร์โวมอเตอร์ชนิดนี้ที่ สเตเตอร์ (Stator) จะเป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนโรเตอร์ (Rotor) ยังใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เรียงกระแสไฟฟ้า เข้าสู่คลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) เหมือนกับดีซีมอเตอร์ทั่วไป

2.4.3.2 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Type) เซอร์โวมอเตอร์ในกลุ่มนี้ประกอบด้วยดีซีเซอร์โว โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร เอซีเซอร์โวซึ่งมีทั้งแบบ ซิงโครนัส เซอร์โว (Synchronous Servo) และอะซิงโครนัสเซอร์โว (Asynchronous Servo) เป็นการนำอินดักชันมอเตอร์ (Induction Motor) มาใช้ทำเป็นระบบขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ และ สเต็ปปีงเซอร์โวมอเตอร์ (Stepping Servo Motor)

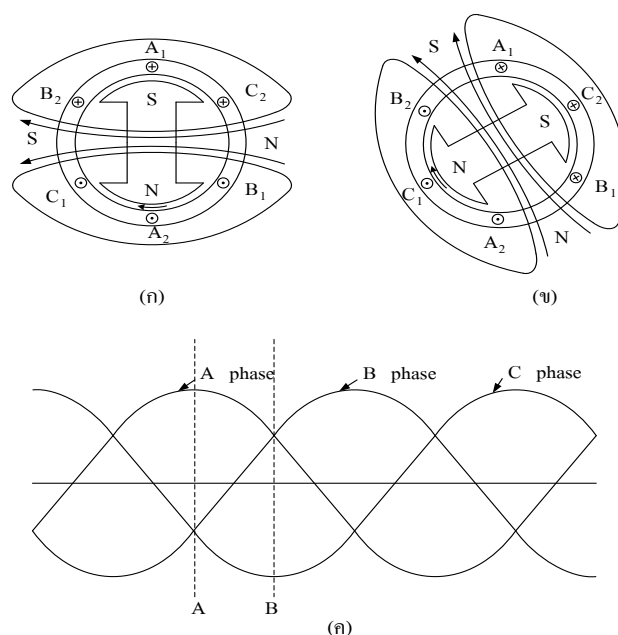
2.4.4 โครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์

ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยทั่วไปจะต้องใช้งานในระบบรอบปิดเท่านั้น ไม่สามารถเลือกให้เป็น รอบเปิด หรือ รอบปิด เช่น เดียวกันกับระบบเอซีเซอร์โวมอเตอร์ไม่สามารถควบคุมการทำงานได้ดี หากไม่มีสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ป้อนกลับไปยังชุดขับเคลื่อนเซอร์โว (Servo Drive) ระบบจำเป็นต้องใช้เอ็นโค้ดเดอร์เข้ามีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบควบคุมเสมอ เสมือนกับเป็นของคู่กันระหว่างเซอร์โวมอเตอร์และเอ็นโค้ดเดอร์ขาดซึ่งกันและกันไม่ได้ จึงทำให้บริษัทผู้ผลิตออกแบบโครงสร้างเซอร์โวมอเตอร์และเอ็นโค้ดเดอร์รวมไว้เป็นตัวเดียวกัน จึงทำให้ลักษณะโครงสร้างโดยรวมของเซอร์โวมอเตอร์ที่พบเห็นในเชิงพาณิชย์ทั่วไป จึงมีลักษณะเป็น แพคเกจ (Package) ซึ่งประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์และเอ็นโค้ดเดอร์ ติดอยู่ที่ส่วนท้ายของมอเตอร์

โครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์กระแสสลับ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือสเตเตอร์ (Stator) และ โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งคล้ายกับมอเตอร์ 3 เฟสทั่วไป โดยสเตเตอร์จะประกอบด้วย ขดลวด 3 ชุดที่สมมูลกับขดลวดภายใน จะต่อเป็นแบบสตาร์ (Star) หรือ วาย (Wye) และมีสายต่อมาที่ขั้วต่อสายด้านนอก 3 เส้น ซึ่งจุดนิวตรอน (Neutrons) จะอยู่ด้านใน ส่วนโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ไม่มีขดลวดพัน, ไม่มีคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) และไม่มีแปรงถ่าน



ภาพที่ 2-5 ส่วนประกอบของเอซีเซอร์โวมอเตอร์

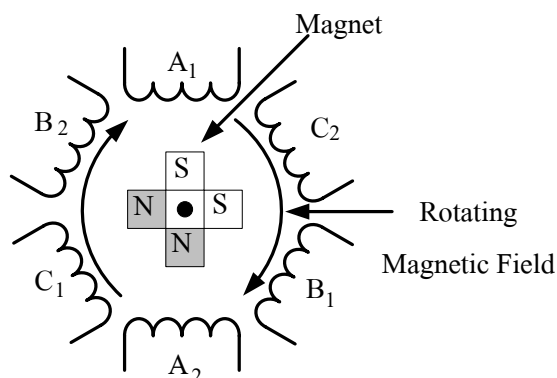


ภาพที่ 2-6 การจ่ายไฟและทิศทางการเกิดสนามแม่เหล็ก

จากภาพที่ 2-6 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2-6 (ค) โดยพิจารณาการจ่ายไฟ 3 เฟส ที่จุด A แสดงให้เห็นถึงการเกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นต้องตั้งฉากกับทิศทางขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ จึงจะทำให้มอเตอร์หมุนได้ ภาพที่ 2-6 (ข) พิจารณาการจ่ายไฟ 3 เฟสที่จุด B ได้มีการเลื่อนเฟสไปทำให้สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์เปลี่ยนแปลงตาม การกระทำเช่นนี้ทำให้โรเตอร์สามารถหมุนไปตามทิศทางการเปลี่ยนแปลง การจ่ายไฟเข้าที่สเตเตอร์ได้จากสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ดังที่กล่าวมาจึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกขานแตกต่างกันไป เช่น เรียกทับศัพท์ว่า “Permanent Magnet Synchronous Motor” (PMSM) ซึ่งหมายถึงซิงโครนัสมอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่าน บ้างก็เรียกว่าเอชไอเอสอาร์มอเตอร์ บ้างก็เรียกสั้นๆ ง่ายๆ ว่า เอชบรัสเลส (AC Brushless) หรือบรัสเลสมอเตอร์ (Brushless Motor) เป็นต้น

2.4.5 นิยามของความเร็วและตำแหน่ง

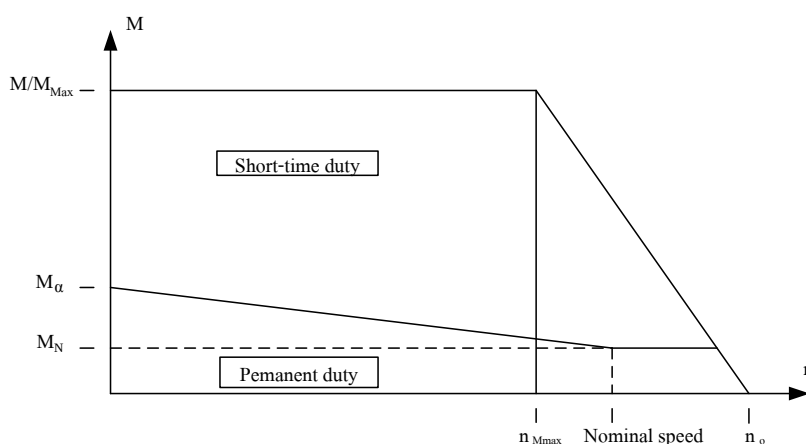
การวัดตำแหน่ง และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยทั่วไปถูกกำหนดในรูปแบบของทางกลและทางไฟฟ้า ตำแหน่งในทางกลมีความสัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งมีค่า 360 องศา ทางกลตำแหน่งทางไฟฟ้าของโรเตอร์ มีความสัมพันธ์กับการหมุนของสนามแม่เหล็ก จากในภาพที่ 2-7 โรเตอร์ต้องเคลื่อนที่ไป 180 องศา ทางกลจึงจะได้รูปร่างแม่เหล็กที่เหมือนกันกับเมื่อครั้งที่โรเตอร์เริ่มหมุนและตำแหน่งทางไฟฟ้าของโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับจำนวนคู่ของโพลแม่เหล็กบนโรเตอร์



ภาพที่ 2-7 โครงสร้างเอซิงโครมอเตอร์ ที่มี 4 โพล หรือ โพลมี 2 คู่

2.4.6 ข้อแตกต่างระหว่างเซอร์โวมอเตอร์กับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ

เซอร์โวมอเตอร์นั้นได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้กับงานที่มีการควบคุมตำแหน่ง (Position Control) เป็นหลัก ซึ่งต้องการคุณสมบัติการตอบสนองด้านไดนามิกส์สูง (High Dynamics Response) ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูงในการควบคุมสูงในทางปฏิบัติ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว จึงได้พยายามออกแบบให้โรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางและรัศมีเล็กๆ รวมถึงการทำให้โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร เพื่อเป็นการลดแรงเฉื่อยของโรเตอร์ (Rotor Moment of Inertia) และลดแรงบิด (Torque) ที่หายไป เนื่องจากโรเตอร์มีขนาดเล็กลง ด้วยการเพิ่มความยาวโรเตอร์ ดังนั้นรูปร่างโครงสร้างทางกายภาพของเซอร์โวมอเตอร์ ที่พบเห็นทั่วไป จึงมีลักษณะผอมบางและมีความยาวมากกว่ามอเตอร์ที่ใช้กันทั่วไป นอกจากนั้นยังมีแรงบิดสูงกว่ามอเตอร์ทั่วไปอีกด้วย (หากพิจารณาที่พิสัยกำลังเท่าๆ กัน)



ภาพที่ 2-8 กราฟคุณสมบัติด้านความเร็วและแรงบิดของเซอร์โวมอเตอร์

ในการเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรนั้น มีความแตกต่างกับมอเตอร์โดยทั่วไป นั่นคือ มอเตอร์ไม่สามารถทำการหมุนได้ถ้าไม่รู้ตำแหน่งโรเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนอยู่ที่ตำแหน่งใด

2.5 ความรู้เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ (Image Processing)

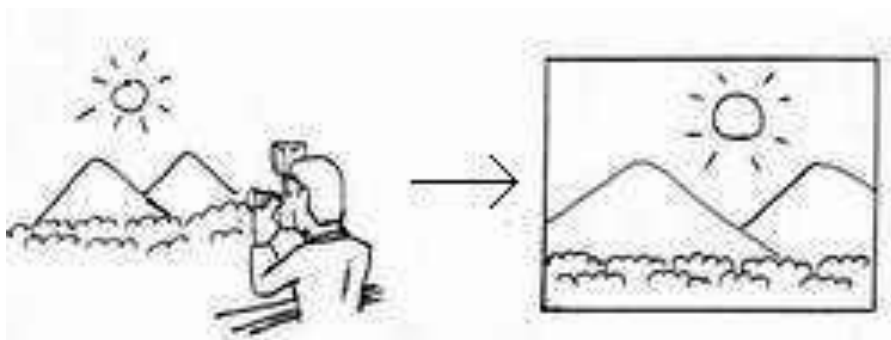
2.5.1 การมองรูปภาพของคนและคอมพิวเตอร์ (Computer) รูปภาพที่เราดูหรือเห็นกันไม่ว่าจะเป็นภาพที่ถ่ายโดยใช้กล้องธรรมดาหรือแบบดิจิทัล (Digital) เราสามารถเข้าใจถึงเนื้อหาของภาพได้ว่าภาพที่ปรากฏนั้นบอกอะไร สามารถสื่อถึงความรู้สึกอะไรบางอย่างได้หรือไม่ และอีกหลาย ๆ ความรู้สึกที่เราได้จากการมองภาพ แต่เมื่อรูปภาพถูกส่งเข้าไปเป็นภาพในคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์มันจะรู้และเข้าใจภาพนั้นเป็นเพียงแค่เป็นจุดสีหลายๆจุดที่เรียงต่อกัน ไม่สามารถเข้าใจถึงเนื้อหาของภาพที่ปรากฏนั้นได้ ดังนั้น การมองรูปภาพของคนกับการมองรูปภาพของคอมพิวเตอร์ เป็นคนละมุมมองกัน และแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง



ภาพที่ 2-9 การมองรูปภาพของคนและคอมพิวเตอร์

2.5.2 การบันทึกภาพ

โดยปกติแล้วภาพที่สายตาเรามองเห็นนั้นเป็นภาพแบบ 3 มิติ มีทั้งความกว้าง ความสูง และความลึก เมื่อเราต้องการภาพใดๆที่เรามองเห็นเราจะต้องทำการถ่ายภาพเสียก่อนโดยใช้กล้องถ่ายรูป การถ่ายภาพด้วยกล้องจะทำให้เราได้ภาพมา แต่จะเป็นภาพแบบ 2 มิติ ที่มีแต่ความกว้าง และความสูงเท่านั้น เนื่องจากภาพที่เราถ่ายได้นั้นไม่สามารถแสดงความลึกได้



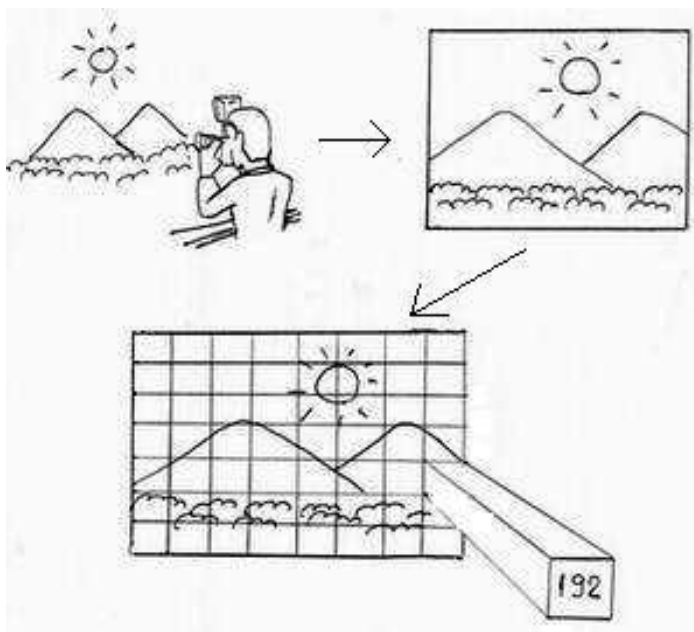
ภาพที่ 2-10 การบันทึกภาพ

ดังนั้นนิยามของภาพดิจิทัลคือ ฟังก์ชัน 2 มิติ $f(x, y)$ ของค่าความเข้มของแสงโดยมี x กับ y เป็นตัวบอกตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก การถ่ายภาพก็คือ การแปลงภาพที่เป็นแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นภาพที่เรามองเห็นได้ด้วยตาของเรา ให้มาเป็นภาพในแบบ 2 มิติอยู่บนแผ่นฟิล์ม หรือกลายเป็นภาพดิจิทัลในระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งมันจะเหลือแค่แนวระนาบ x, y เท่านั้น ไม่มีภาพลึกปรากฏให้เห็นหรือ ไม่สามารถหยั่งความลึกเป็นขนาดได้ การนำเสนอภาพในแบบดิจิทัลจะมีมากแค่ไหนซึ่งขึ้นอยู่กับสองปัจจัย คือ

- การสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่ง (Image Sampling)
- ค่าความเข้มของแสงในแต่ละจุด (Quantization)

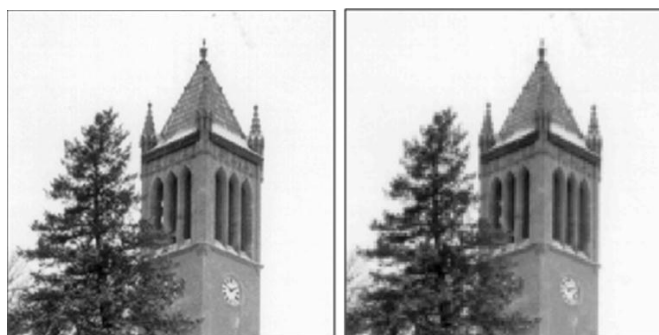
2.5.3 การสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่ง

เวลาที่เราย้ายรูปมาแล้วอัดจากฟิล์ม (Film) มันจะอัดลงกระดาษโฟโต้ได้ชัดเจนเลย แต่พอเราเอามาสแกน (Scan) ลงคอมพิวเตอร์ ภาพที่ได้จะไม่เหมือนต้นฉบับแล้ว เพราะว่าการแสดงภาพของคอมพิวเตอร์นั้น จะใช้จุดในการนำเสนอ ภาพจริงๆเมื่อนำมาสแกนเราจะต้องกำหนดความละเอียดของจุดภาพด้วยยิ่งถ้าเราต้องการภาพที่ละเอียดมากๆ มันก็จะหายาบบากจนอาจจะเห็นเป็นจุดๆ เลยเวลาเราเอาภาพมาขยายเรามักจะเรียกว่า ภาพแตก ขยายแล้วแตกคือ ต้องไปยืนมองจากที่ไกลๆ หรือไม่ก็ต้องทำตาปริ้อๆ จึงจะบอกได้ว่าภาพนั้น เป็นภาพอะไร ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าการสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่งนั้นน้อยเกินไป



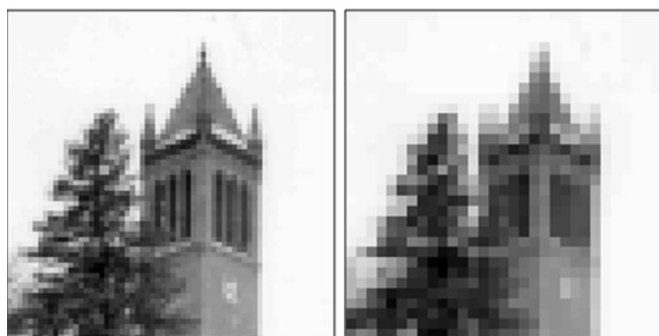
ภาพที่ 2-11 การสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่ง

ไม่ว่าจะเป็นการสแกน หรือการถ่ายภาพด้วยกล้องมันจะเป็นการสุ่มเลือกทางจุดในแนวแกน x และ y ถ้าเราต้องการความละเอียดของภาพมากๆ เราจะต้องหยิบทุกๆ จุดที่พอจะหยิบได้ คือ ต้องเข้าใจว่าในคอมพิวเตอร์มันเก็บภาพและนำเสนอภาพด้วยจุด (Pixel) มันจะนำเสนอภาพแบบที่คมชัดจริงๆ ไม่ได้เหมือนภาพถ่ายที่อัดลงบนกระดาษ ดังนั้น ความละเอียดนี้จึงจะต้องขึ้นอยู่กับจุดที่เก็บเข้ามาด้วย และถ้าเราเก็บภาพโดยกำหนดให้การสุ่มเลือกทางแกน x และ y ที่ถี่มากๆ มันก็จะกินพื้นที่ดิสก์ในการเก็บรูปภาพไปด้วยนั่นเองลองดูตัวอย่างรูปเดียวกันต่อไปนี้สุ่มเลือกมาด้วยความละเอียดที่ต่างกัน พอขยายออกมาให้เท่ากันและเปรียบเทียบกันก็จะเห็นได้ชัดเจนถึงจำนวนจุดสุ่มมว่ามันต่างกัน และเห็นชัดว่าภาพจะแตกมากขึ้น



256x256Pixel

128x128Pixel



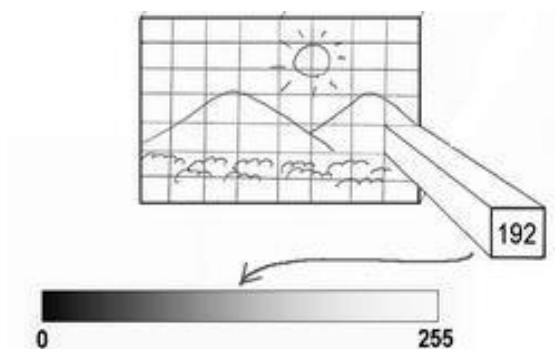
64x64 Pixels

32x32 Pixels

ภาพที่ 2-12 การเปรียบเทียบจำนวนจุดที่สุ่ม

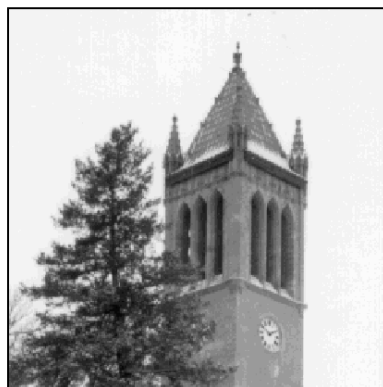
2.5.4 การประมาณค่าความเข้มของแสงในแต่ละจุด

การสุ่มเลือกทางจุดตำแหน่ง คือปัจจัยแรกที่จะทำให้ภาพมีคุณภาพที่ดีหรือไม่ อีกปัจจัยหนึ่งก็คือ ความเข้มแสงในแต่ละภาพ คือเวลาที่เราสแกนภาพเข้าไปโปรแกรมคอมพิวเตอร์มันก็ดูภาพๆนั้นแล้วก็หาสีที่ใกล้เคียงกับจุดที่มันกำลังดูอยู่ ถ้าเราบันทึกภาพในโทนสีเทา (Grey Scale) สีขาวจะถูกแทนที่ด้วยค่าสี 255 (11111111) และสีดำจะถูกแทนที่ด้วยค่าสี 0 (00000000) ดังนั้นในแต่ละจุด จึงจะมีค่าความเข้มของแสงอยู่ระหว่าง 0-255 ซึ่งก็แค่ 256 สีหรือ 2 ยกกำลัง 8 โดย 8 ในที่นี้คือจำนวนบิต ดังนั้นถ้าบอกว่าภาพแบบ 8 บิตก็คือภาพที่แต่ละจุดมีค่าอยู่ระหว่าง 0-255 นั่นเอง



ภาพที่ 2-13 การประมาณค่าความเข้มของแสงในแต่ละจุด

แต่ถ้าเป็นภาพแบบขาวดำ (ไม่ใช่ ภาพในโทนสีเทา) ค่าความเข้มแสงของแต่ละจุดก็จะมีแค่ 0 กับ 255 หรือก็คือ 1 บิตนั่นเอง คือถ้าไม่มีสีขาวก็ดำปึ่ไปเลย ถ้าเราสแกนภาพเข้ามาแบบนี้ต่อให้ซูมเล็กลงทางจุดตำแหน่งมาละเอียดๆ ภาพก็ดูไม่รู้เรื่อง เพราะว่าความเข้มของแต่ละจุดนั้นน้อยเกินไป



Grey Scale



Black & White

ภาพที่ 2-14 การเปรียบเทียบระหว่าง Grey Scale กับ Black & White

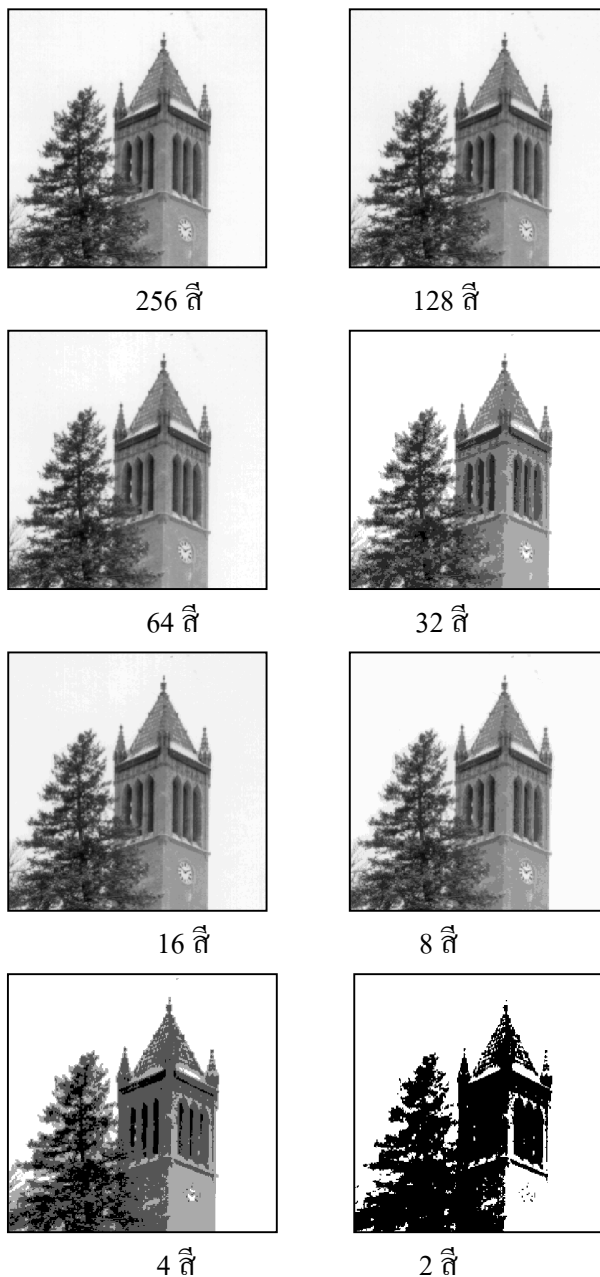
ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมา ถ้าต้องการแค่นื้อหาของภาพ เรามันก็ภาพแบบในโทนสีเทา ก็ถือว่าสามารถมองออกแล้วละว่าภาพนั้นคือภาพอะไร ไม่จำเป็นต้องใช้ความละเอียดของสี มากๆ ก็คือ แค่อุ้ดละ 8 บิต ก็ถือว่าใช้ได้แล้ว ถ้าเราอยากรู้ว่าภาพๆหนึ่งนั้นใช้พื้นที่ในการเก็บ ข้อมูลเท่าไร เราก็เอา ความกว้างคูณความยาวและคูณด้วยจำนวนบิตเข้า เช่น ภาพขนาด 128*128 ก็จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$128 * 128 = 16384 \text{ จุด}$$

ภาพขนาด 128*128 จะมีจุดทั้งหมด 16384 จุด พิจารณา ถ้าภาพนี้เป็นภาพแบบ 8 บิต นั้นหมายความว่าแต่ละจุดๆ ในภาพจะมีค่าระหว่าง 0-255 หรือ 00000000 - 11111111 นั่นก็คือ 1 จุด มี 8 บิต เราก็เอา 8 บิต คูณกับ 16384 เข้าไปก็จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนบิตที่ใช้ในภาพนี้} &= 16384 * 8 \\ &= 131072 \text{ บิต} \end{aligned}$$

ถ้าเราเก็บภาพโดยให้แต่ละจุดมีความเข้มของแสงเป็น 8 บิตอย่างนี้ แค่อุ้ด 8 บิต ภาพที่ได้ ก็พอมองออกได้ ถ้าเราลดบิตลง จากเดิมเรากำหนดให้หนึ่งจุดมี 8 บิต ก็จะมีได้ 256 สี อย่างนี้พอดู ภาพแล้วใช้ได้ ภาพลื่น สวย แต่ถ้านลดบิตลงนั้นหมายความว่า จำนวนสีที่มีได้ในแต่ละจุดนั้น จะต้องเปลี่ยนไป โดยเปลี่ยนไปในทางที่ดูแล้วต้อง ขมวดคิ้ว ถ้าเราลดจำนวนสีลงจากเดิม 256 สี ให้เหลือ 128 สี 64 สี 32 สี, 8 สี, และ 2 สี (หรือ 1 บิต) จะได้ผลดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 การเปรียบเทียบจำนวนบิต

2.5.5 ภาพสีแบบ RGB

ที่กล่าวไปนี้เป็นภาพแบบโทนสีเทา ซึ่งมีแค่ 1 ระนาบ คือ ระนาบของสีเทา 0-255 นั้นเอง แต่ถ้าพิจารณาต่อว่าเราอยากจะได้เป็นภาพสี ซึ่งเกิดจากการการผสมสี 3 สีเข้าด้วยกัน นั่นคือ แม่สี สีแดง (Red), สีเขียว (Green), สีน้ำเงิน (Blue) หรือ RGB นั้นเองดังนั้น 1 จุดภาพ มันจะประกอบไปด้วยค่าสี 3 สี ที่มีค่าความเข้มไม่เท่ากัน เมื่อมันผสมกันออกมามันก็จะได้เป็นจุดสีหนึ่งจุดที่มี

ความใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับมากขึ้น แต่จะเหมือนจริงมากแค่ไหนก็ต้องดูที่บิตของจุดๆ นั้น ถ้ามีแค่ 8 บิต ความชัดเจนก็ระดับหนึ่ง

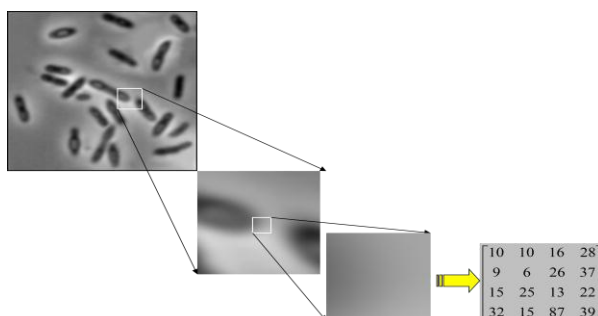


ภาพที่ 2-16 ภาพสีแบบ RGB

จากรูปในข้างต้น ใน 1 จุด จะประกอบไปด้วย 3 สี คือ แดง เขียวและน้ำเงิน แต่ละสีนั้น ถ้าจะให้ละเอียดมากขึ้น ก็ควรจะมีความเข้มที่อยู่ในช่วงที่กว้างขึ้น คือ ถ้า 8 บิต ยังนำเสนอรายละเอียดของภาพไม่ได้มากนัก เราก็ควรจะบันทึกใหม่โดยกำหนดให้เป็น 16 บิต หรือ 24 บิต นั้นหมายความว่า ในแต่ละ 1 จุดที่มี 3 สีนั้น สีแดง เขียวและน้ำเงิน จะมีความเข้มของแสงสีละ 8 บิต ผลที่ตามมาก็คือ พื้นที่ในหน่วยความจำที่ใช้ในการเก็บข้อมูลก็จะมากขึ้นเป็นเงาตามตัว ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ภาพสี RGB จุดละ 8 บิต ก็ถือว่าให้รายละเอียดของภาพได้ชัดเจนระดับหนึ่งแล้ว ต้องเข้าใจว่าถ้าเราไม่ต้องการความละเอียดมากขนาดนั้นเราจะใช้แค่นี้ก็ได้

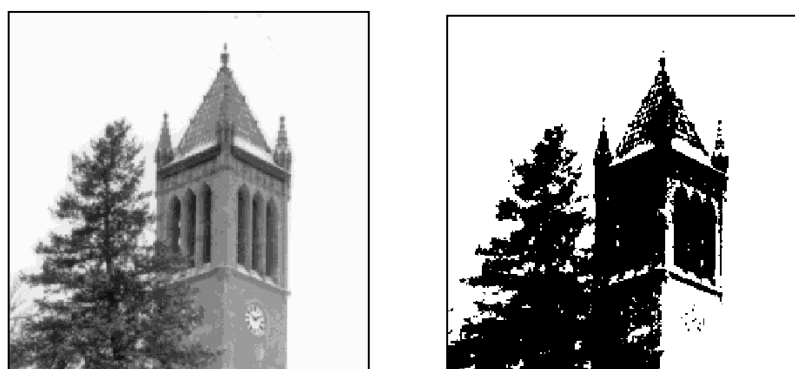
2.5.6 การประมวลผลภาพโดยใช้ภาษาคอมพิวเตอร์

การประมวลผลภาพโดยใช้ภาษาคอมพิวเตอร์นั้นเราจะต้องอ่านค่าสีเข้ามาโดยให้อยู่ในลักษณะของ อาร์เรย์ (Array) ดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 การประมวลผลภาพ

ภาพดิจิทัลไม่ว่าจะเป็นภาพขาวดำแบบโทนสีเทา หรือภาพสี RGB ก็ไม่ต่างกันในเวลาประมวลผล จะมีที่ต่างกันก็คือ ถ้าทำบนภาพแบบโทนสีเทาเราทำแค่ 1 ช่องเท่านั้น หรือแค่ 1 ระนาบเท่านั้น เพราะ ภาพแบบโทนสีเทา นั้นมีเมทริกซ์ (Mat Rice) ของสีแค่ 1 ชุด แต่ถ้าทำกับภาพสี มันจะมี 3 ระนาบ หรือ 3 ช่องนั่นก็คือ เราจะต้องทำบนระนาบ สีแดง, เขียวและ น้ำเงิน ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีภาพสีอยู่ภาพหนึ่งและเราต้องการทำการอินเวิร์ท (Inverse) คือกลับภาพให้เป็นแบบเนกาทีฟ (Negative) ถ้าเราทำบนภาพแบบโทนสีเทานั้นก็คือ การนำเอา 255 ไปหักลบออกจาก แต่ละจุด ผลที่ได้ก็คือภาพแบบเนกาทีฟแล้ว ดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ภาพแบบอินเวิร์ทกับเนกาทีฟ

แต่ถ้าเป็นภาพสีเวลาทำการประมวลผลให้เป็น เนกาทีฟ ในแต่ละ ช่อง ที่เป็นสีแดง, เขียว และ น้ำเงิน เราก็จะต้องทำทุกระนาบ หรือการประมวลผลแบบเดียวกันนี้ 3 ครั้ง เพราะภาพสีมี 3 ช่อง นั่นเอง ดังภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 ภาพ RGB แบบ 3 Channel

2.5.7 การประยุกต์กระบวนการประมวลผลภาพ

การประยุกต์กระบวนการประมวลผลภาพนั้น สามารถแตกแขนงออกไปได้หลายแนวทาง เริ่มจากการวิเคราะห์รูปภาพแล้วบอกว่าถึงนั้นคืออะไร สิ่งนี้คืออะไรก็สามารถนำไปสร้างงานได้เยอะมาก ยกตัวอย่างเช่น การตรวจจับรอยยี่มของกล้องดิจิตอลรุ่นหนึ่งของโซนี่ (Sony) ซึ่งลองคิดว่ากล้องดิจิตอลรับรู้ได้อย่างไรว่ามีการยี่มเกิดขึ้น ตรงนี้เอง มันเหมือนกับว่ากล้องตัวนี้มีสมองคิดเองได้ ซึ่งนี้เรียกว่าคอมพิวเตอร์วิชัน (Computer Vision) คือ ความสามารถในการมองเห็นหรือรับรู้ ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเรื่องนี้มีการวิจัยกันมากมายเพื่อสร้างกระบวนการหรืออัลกอริทึม (Algorithm) ที่มีความสามารถมากขึ้นเรื่อยๆ โปรแกรมที่มีความสามารถในการตรวจจับคนร้าย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีการสแกนม่านตาเพื่อใช้เป็นรหัสผ่านในการเข้าออก ซึ่งในการวิจัยพัฒนาในด้านต่างๆ เหล่านี้มีหลายหัวข้อเยอะแยะมากมายหรือในด้านเกษตรกรรม เช่นการวิเคราะห์หาพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศโดยวิเคราะห์จากภาพถ่ายดาวเทียม อันนี้ก็เป็นงานที่สามารถใช้ความรู้ด้านนี้เข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกได้ ดังภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 ภาพถ่ายดาวเทียม

2.5.8 การประมวลผลภาพ

วิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพที่เราเรียกว่า การปรับปรุงภาพให้เหมาะสมกับงานเฉพาะทาง (Image Enhancement) ก็เพื่อที่เราจะได้ปรับปรุงภาพให้เด่นชัดมากขึ้นเพียงพอที่จะวิเคราะห์สิ่งที่ต้องการได้ เช่น ปรับปรุงความคมชัด ปรับความสว่าง หาขอบของวัตถุให้ชัดเจนขึ้น กำจัดสิ่งรบกวนหรือพวกรอยยี่ม (Noise) ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของภาพสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

2.5.8.1 ปรับปรุงคุณภาพโดยกระทำในพิกเซล (Pixel)

เป็นการปรับปรุงคุณภาพโดยทำบนจุดแต่ละจุด เช่น เอาค่าความเข้มของจุดนั้น มาบวก, ลบ, คูณ,หาร หรือทำการ AND, OR หรือ XOR กับภาพอื่นๆ ทำให้คุณลักษณะของภาพที่ต้องการปรากฏเด่นชัดขึ้น

2.5.8.2 ปรับปรุงคุณภาพโดยการกระทำบนฮิสโตแกรม (Histogram)

ฮิสโตแกรม ก็คือ กราฟที่แสดงถึงค่าระดับความเข้มของกราฟ เราสามารถรู้ได้ว่าภาพๆ นี้มีความเข้มอยู่ที่ระดับใด เข้มไป หรือจางไป

2.5.8.3 ปรับปรุงคุณภาพด้วยคอนโวลูชัน (Convolution)

การปรับปรุงด้วยวิธีนี้ เราจะใช้เมตริกซ์ขนาด 3*3, 5*5 หรือขนาดใดๆ ที่เรา ออกแบบขึ้นมาเข้าไปวนในภาพของเรา

2.5.8.4 ปรับปรุงคุณภาพในเชิงความถี่ (Frequency Domain)

โดยเราจะทำการแปลงภาพด้วยฟูริเยร์ (Fourier) และทำการใส่ฟิลเตอร์ (Filter) จากนั้นแปลงกลับมาเป็นภาพเดิม ซึ่งจะประหยัดเวลาสำหรับการประมวลผลภาพขนาดใหญ่

2.6 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียดที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการ และใช้เป็นเครื่องมือวัดหลายๆแบบ ค่าความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain: ε) สำหรับวัสดุที่อยู่ภายใต้ภาระแบบธรรมดานิยามว่า คือ อัตราความเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุต่อหน่วยความยาวเดิม ดังนั้นในบางกรณีเราอาจได้ยินว่ามีผู้เรียกว่าความเครียดต่อหน่วย (Unit Strain) สำหรับความเครียดตามแนวแกน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon_\alpha = \frac{dL}{L} \approx \frac{L_2 - L_1}{L_1} = \frac{\Delta L}{L_1} \quad (2-1)$$

โดย

ε_α คือ ความเครียดตามแนวแกน ไม่มีหน่วย

L คือ ความยาวมีหน่วยเป็นเมตร (m)

L_1 คือ ความยาวตามแนวแกน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

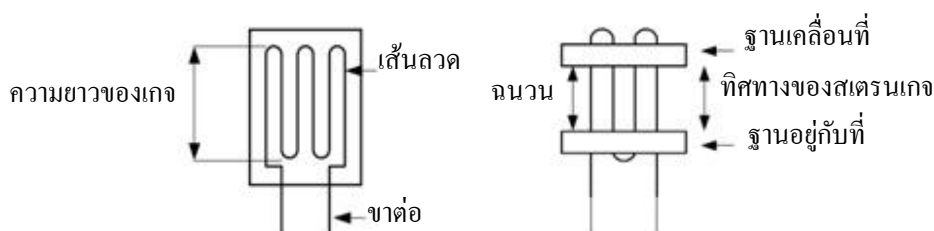
L_2 คือ ความยาวตามแนวแกนที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น เมตร (m)

จากนิยามตามสมการที่ (2-1) จะเห็นว่าความเครียดนั้นจะเป็นปริมาณที่ไม่มีมิติ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับวิศวกรรม ส่วนใหญ่จะให้ความสนใจกับวัสดุที่มีการยืดตัวไม่มากหรืออยู่ในช่วงขีดจำกัดของความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจะทำให้ค่าความเครียดที่เป็นตัวเลขมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในบางกรณีจึงนิยมที่จะคูณค่าตัวเลขที่ได้นั้นด้วย 10^6 แล้วเลขค่าที่ได้ว่า ไมโครสเตรน (Micro-Strain)

2.6.1 การวัดความเครียด

การวัดความเครียดนั้นวัดได้แบบทางตรงและทางอ้อม การวัดทางตรง คือค่าที่อ่านได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน สำหรับสเตรนเกจที่วัดความเครียดโดยตรง คือ ค่าที่อ่านได้ ค่าที่อ่านได้จากสเตรนเกจจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงก่อน ค.ศ. 1930 ยังไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเครียดได้โดยตรง แต่จะเป็นการอ่านค่าระยะการยืดตัวที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน อุปกรณ์นี้เรียกว่าเอ็กเทนโซมิเตอร์ (Extensometer) ซึ่งในปัจจุบันนี้ก็ยังพบเห็นกันอยู่โดยระยะยืดที่วัดได้จะนำไปหาค่าความเครียด โดยใช้สมการที่ (2-1)

อุปกรณ์วัดความเครียดโดยตรงนั้นมีหลายแบบ เช่น แบบที่ใช้หลักการทางไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติจะใช้หลักการของความต้านทาน (Resistive), การประจุ (Capacitive), การเหนี่ยวนำ (Inductive) หรือ โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) สำหรับสเตรนเกจที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดจะเป็นแบบความต้านทาน คือ วัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-21 ส่วนประกอบของสเตรนเกจ

2.6.2 หลักการวัดค่าความต้านทานของสเตรนเกจที่เป็นโลหะ

ทฤษฎีและหลักการของการวัดค่าความต้านทานของสเตรนเกจ จากหลักการ คือ เมื่อลวดถูกแรงมากระทำหรือถูกดึง จะทำให้ความยาวเพิ่มขึ้นหน้าตัดเล็กลง ยังผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป และลวดนั้นติดอยู่กับชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานเปลี่ยนขนาดไปลวดก็จะ

เปลี่ยนแปลงขนาด ตามไปด้วย ดังนั้นการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของเส้นลวดก็จะเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2-2) โดยกำหนดให้ลวดตัวนำมีความยาวเริ่มต้น L พื้นที่หน้าตัด CD^2 เส้นลวดไม่จำเป็นต้องมีหน้าตัดวงกลม โดยค่า D จะเป็นมิติความยาวของหน้าตัด และค่า C จะเป็นค่าคงที่ในกรณีวงกลม D จะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางและ $C = \pi/4$ ส่วนในกรณีที่พื้นที่สัเหลี่ยมจัตุรัสค่า D จะเป็นด้านใดด้านหนึ่งและ $C = 1$ เมื่อลวดอยู่ใต้แรงดึง ความยาวจะเพิ่มขึ้น ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะเล็ก

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{CD^2} \quad (2-2)$$

โดย

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะใดๆ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร (Ωm)

L คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

C คือ ค่าคงที่

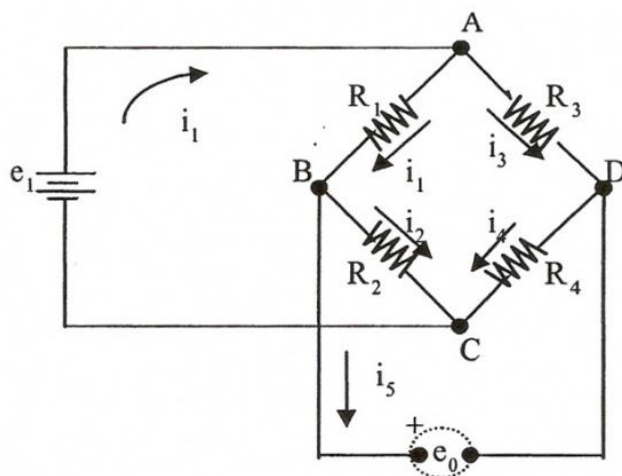
D คือ มิติความยาวของหน้าตัด

2.6.3 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ปรับสภาพสัญญาณสเตรนเกจ

วงจรไฟฟ้าที่ใช้กับสเตรนเกจ ต้องเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีความไวสูง เนื่องจากสเตรนเกจมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ใช้กับสเตรนเกจจะมีด้วยกันหลายวงจร

2.6.3.1 วงจรวิสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit)

จากภาพที่ 2-22 หากวงจรไฟฟ้างกล่าวมีค่าสมดุล คือ ในวงจรไฟฟ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมิเตอร์ หรือ $i_5 = 0$ สำหรับในกรณีนี้จะได้ $i_1 = i_2$ และ $i_3 = i_4$ แต่ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมิเตอร์ก็ต้องเป็นศูนย์เช่นกัน ดังนั้น $i_1 R_1 = i_3 R_3$ และ $i_2 R_2 = i_4 R_4$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้

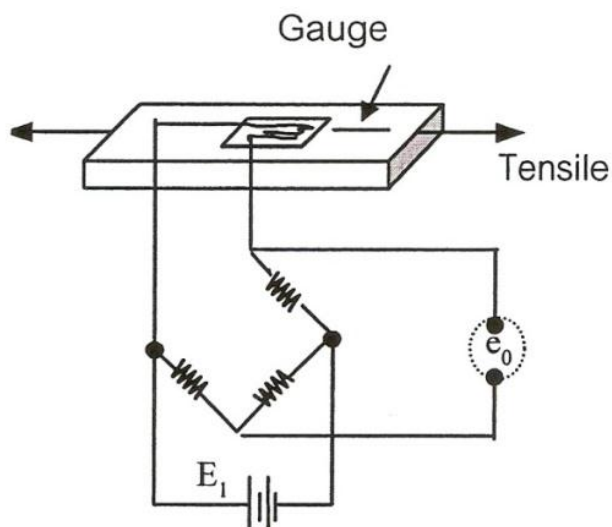


ภาพที่ 2-22 วงจรไฟฟ้าสำหรับสเตรนเกจแบบวิสโตนบริดจ์

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{หรือ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (2-3)$$

จากหลักการจะสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแต่ละตัวได้ แต่จะเป็นการใช้การตรวจจับสนามไฟฟ้าแทนที่จะตรวจจับสนามต้านทานวงจรสำหรับสเตรนเกจดังกล่าวเรียกว่า โวลต์เตจเซินซิทีฟวิสโตนบริดจ์ (Voltage Sensitive Wheatstone Bridge)

ในทางปฏิบัติ จะใช้ค่าความต้านทานตัวใดตัวหนึ่งในวงจรวิสโตนบริดจ์เป็นตัววัดค่าความเครียด ดังแสดงได้ดังภาพที่ 2-23 โดยขั้นแรกจะต้องทำให้วงจรวิสโตนบริดจ์สมดุล เพื่อให้การระกับการตรวจวัด การตรวจวัดจะเกิดค่าความเครียดขึ้นและสเตรนเกจที่ติดอยู่ก็จะเกิดค่าความเครียดในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อความต้านทานของสเตรนเกจเปลี่ยนไปก็จะสามารถจับค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้

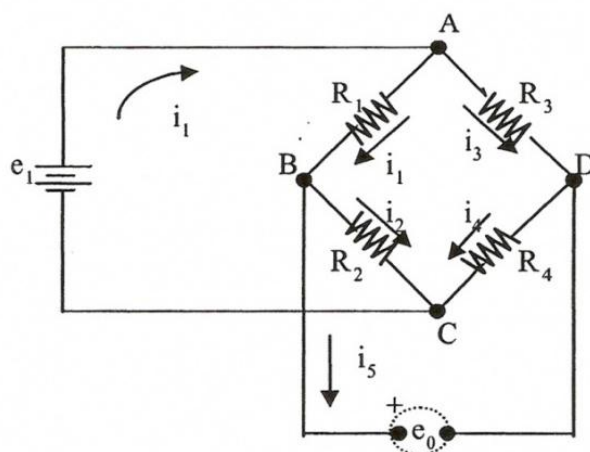


ภาพที่ 2-23 การใช้ความต้านทานตัวหนึ่งในวงจรบริดจ์ เป็นตัวตรวจวัดค่าความเครียด

2.6.3.2 วงจรบริดจ์สมดุล (Balanced Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลป์วานอมิเตอร์ ทำให้เข็มเครื่องวัดชี้ที่เลขศูนย์

ถ้าต้องการรับค่าความต้านทาน R_4 จะต้องสลับสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 แล้วปรับอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 / R_2 (Ratio Adjust) และความต้านทาน R_3 จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรกัลป์วานอมิเตอร์มีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าอยู่ในสภาพสมดุล



ภาพที่ 2-24 วงจรบริดจ์สมดุล

จากสภาพสมดุลของบริดจ์ดังภาพที่ 2-24 ทำให้ทราบว่าแรงดันตกคร่อม R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันตามสมการต่อไปนี้

$$I_3 R_3 = I_4 R_4 \quad (2-4)$$

นอกจากนี้แรงดันตกคร่อม R_1 และ R_2 ยังมีค่าเท่ากันด้วย

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (2-5)$$

ขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลป์วานอมิเตอร์ (G) แสดงว่า

$$I_1 = I_3 \quad \text{และ} \quad I_2 = I_4$$

แทนค่า I_3 ด้วย I_1 และ I_4 ด้วย I_2 ในสมการที่ (2-4) จะได้

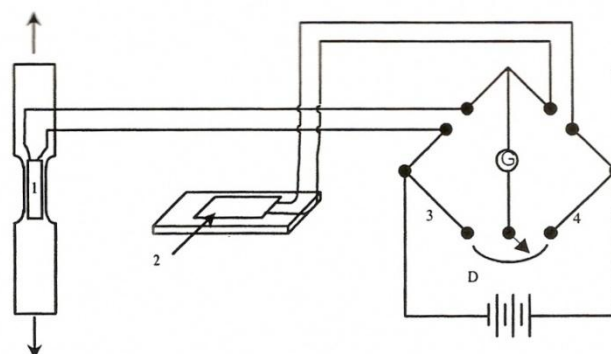
$$I_1 R_3 = I_2 R_4 \quad (2-6)$$

หารสมการ (2-16) ด้วยสมการ (2-17) จะได้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-7)$$

2.6.4 การป้องกันผลกระทบของอุณหภูมิ

หากพิจารณาถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความต้านทานก็จะเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งอาจทำให้สภาพทางไฟฟ้าของขดลวดเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสเตรนเกจระยะหนึ่งอาจทำให้ความต้านทานของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป ถึงแม้ว่าค่าความเครียดของขดลวดจะไม่เปลี่ยนแปลง จะเรียกผลกระทบนี้ว่าผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ การป้องกันผลกระทบนี้สามารถทำได้โดยใช้สเตรนเกจประเภทเดียวกันติดบนชิ้นวัสดุแบบเดียวกับชิ้นงาน แต่จะต้องไม่มีการให้ภาระใดๆ กับชิ้นงาน ดังแสดงได้ดังภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-25 การต่อวงจรเพื่อป้องกันผลกระทบจากอุณหภูมิจากการใช้งานสเตรนเกจ

ดังนั้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้ทั้งตัวตรวจวัดและตัวติดบนชิ้นงานของวงจรวิสโตนบริดจ์ และตัวตรวจวัดที่ติดไว้ภายนอก โดยไม่มีภาวะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเท่ากัน หากพิจารณาจากวงจรวิสโตนบริดจ์พื้นฐานที่อยู่ในสภาพสมดุลจะได้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-8)$$

หากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้ความต้านทานของตัวตรวจวัดที่ 1 และ 2 เปลี่ยนแปลงไป ΔR ซึ่งจะได้

$$\frac{R_1 + \Delta R}{R_2 + \Delta R} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2-9)$$

ถ้าหากว่าก่อนอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไปนั้น เราให้วงจรบริดจ์ อยู่ในสภาพสมดุล จากนั้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุณหภูมิของตัววัดทั้งสองตัวก็จะเปลี่ยนไปแต่วงจรบริดจ์ก็ยังคงสมดุลอยู่ จนกว่าจะมีความเครียดเกิดขึ้นบนตัวตรวจวัดที่ 1 ดังนั้นการติดแบบนี้ก็จะสามารถป้องกันผลกระทบจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ส่วนตัวตรวจวัดที่ติดโดยไม่มีภาระใดๆ เรามักเรียกมันว่า ดัมมี่เกจ (Dummy Gage)

2.7 การควบคุมด้วยฟัซซี่ (Fuzzy Logic Controller)

เซตแบบฉบับ (Classical Set) คือเซตที่มีขอบเขต ตัวอย่างเช่น เซต A มีขอบเขตมีค่ามากกว่า 6 แสดงดังสมการที่ 2-10

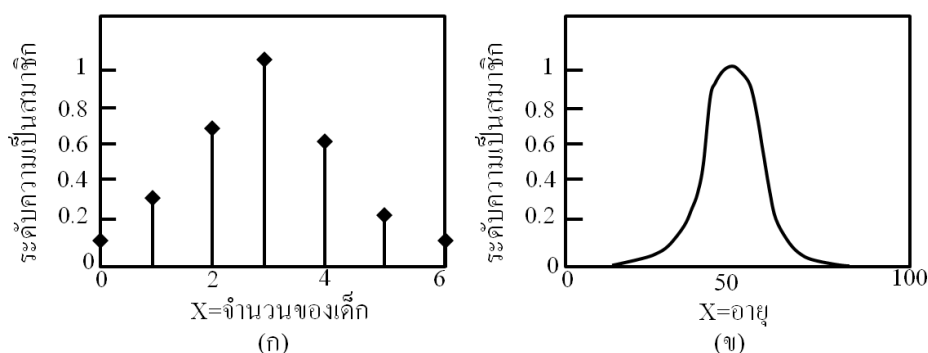
$$A = \{ (x) > 6 \} \quad (2-10)$$

2.7.1 นิยามพื้นฐานและคำศัพท์

นิยามฟัซซี่เซตและฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้ X เป็นเซตที่ไม่ว่างฟัซซี่เซต A สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X \} \quad (2-11)$$

เมื่อ $A\mu X$ สามารถตีความเป็นค่าของความเป็นสมาชิกภาพของตัวประกอบ x ใน ฟัซซี่เซต A สำหรับแต่ละ (อ่านว่า “x เป็นสมาชิกของ A”) ฟัซซี่เซต สามารถเขียนเป็นเซตของคู่ลำดับ (Tuples) เมื่อ A หมายถึงฟัซซี่เซต A และ x หมายถึงสมาชิกของเซต (Set Membership) $\mu_A(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) $\mu_A(x)$ บางครั้งแทนด้วย $A(x)$ X หมายถึงเอกภพสัมพัทธ์ (Universe) หรือประชากร



ภาพที่ 2-26 (ก) จำนวนของเด็กในครอบครัว (ข) จุดกึ่งกลางของอายุเป็น 50

นิยาม ซัพพอร์ตของฟัซซี่เซต (Support of Fuzzy Set) ซัพพอร์ตของฟัซซี่เซต คือ คลิปเซตของสมาชิก x ในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีอัตราเป็น สมาชิกของฟัซซี่เซต มากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\text{Support } (A) = \{x \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (2-12)$$

นิยามความสูงของฟัซซีเซต (Core) คือ ศูนย์กลางของฟัซซีเซต A คือเซตของ X ทั้งหมดใน X ดังเช่น (...) $A \mu x = \text{Core } (A)$

$$\text{Core}(A) = \{x \mid \mu_A(x) > 1\} \quad (2-13)$$

นิยามนอร์มอล (Normal) คือ ฟัซซีเซต A จะถูกเรียกว่านอร์มอล ก็ต่อเมื่อความสูงเท่ากับหนึ่งสามารถหาจุด $x \in X$ ดังเช่น $\mu_A(x) = 1$

นิยามจุดแบ่งของฟัซซี (Crossover Point of Fuzzy Set)
จุดแบ่งของฟัซซีคือจุดใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ที่มีอัตราความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5

$$\text{Crossover } (A) = \{x \mid \mu_A(x) = 0.5\} \quad (2-14)$$

นิยามฟัซซีเซตซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton) คือเซตของฟัซซีที่มีสมาชิกเพียงตัวเดียวใน X ด้วย $\mu_A(x) = 1$ รูปที่ 2-27(ก) และ 2-27 (ข) แสดงศูนย์กลาง, เซตพอร์ต์และจุดแบ่งของฟัซซีแบบฟังก์ชันระฆังคว่ำโดยมีอายุหนุ่มและมีฟัซซีเซตซิงเกิลตันที่ อายุ 45 ปี

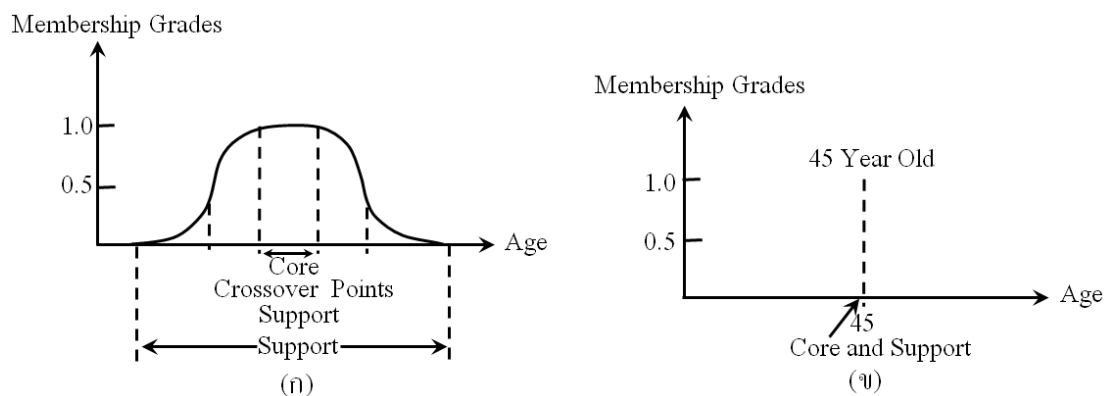
นิยาม α -cut เซตของฟัซซีเซต (α -cut Set of Fuzzy Set) คือคิลิปเซตของสมาชิก x ทั้งหมดที่มีอัตราความเป็นสมาชิกมากกว่าหรือเท่ากับ α

เขียนแทนด้วย

$$A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (2-15)$$

$$A'_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) < \alpha\} \quad (2-16)$$

$$\text{Support } (A) = A'_0 \text{ และ } \text{core } (A) = A_1$$

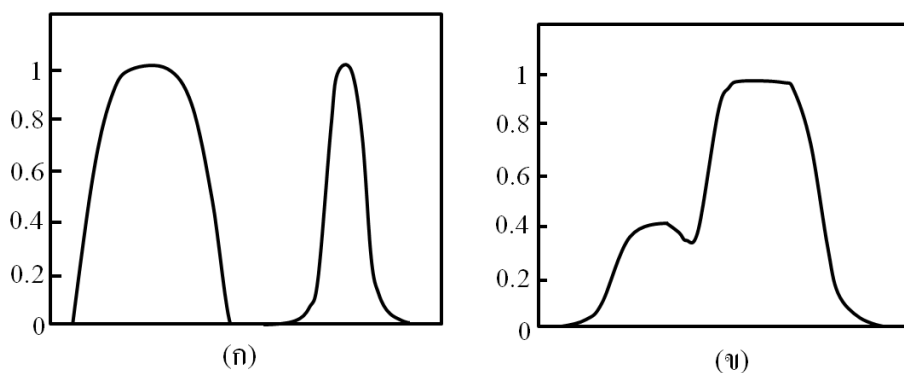


ภาพที่ 2-27 (ก) ความสูงของฟัซซี่เซต ซัพพอร์ต (ข) จุดแบ่งของฟัซซี่

นิยามคอนเวกซ์ฟัซซี่ คือฟัซซี่เซต A จะเป็นคอนเวกซ์ได้ถ้า $x_1, x_2 \in X$ และ $\lambda \in [0, 1]$

$$u_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min\{u_A(x_1), u_A(x_2)\} \quad (2-17)$$

$$f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \lambda f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2) \quad (2-18)$$



ภาพที่ 2-28 (ก) สองคอนเวกซ์ของความเป็นสมาชิก (ข) ไม่เป็นคอนเวกซ์ของสมาชิก

2.7.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต

เป็นฟังก์ชันที่ใช้แปลงตัวแปรอินพุต e และ Δe ให้อยู่ในฟัซซี่เซตมีข้อกำหนดดังนี้

2.7.2.1 กำหนดย่านของเอกภพสัมพัทธ์ของค่าผิดพลาด e เท่ากับ $[-1, 1]$ เอกภพสัมพัทธ์ของอัตราการผลิต Δe เท่ากับ $[-1, 1]$

2.7.2.2 มีการกระจายแบบเชิงเส้นมีการทับกันแต่ละฟังก์ชัน 50 %

2.7.2.3 จำนวนเทอมของฟัซซี่เซต 3, 5, 7 ของเทอมและกำหนดค่าฟังก์ชัน 3, 5, 7

ระดับ (แสดงดังในภาพที่ 2-29, 2-30, 2-31, 2-32, 2-33)

3 ระดับ

NB คือ Negative Big

ZE คือ Zero

PB คือ Positive Big

5 ระดับ

NB คือ Negative Big

NS คือ Negative Small

ZE คือ Zero

PS คือ Positive Small

PB คือ Positive Big

7 ระดับ

NB คือ Negative Big

NM คือ Negative Medium

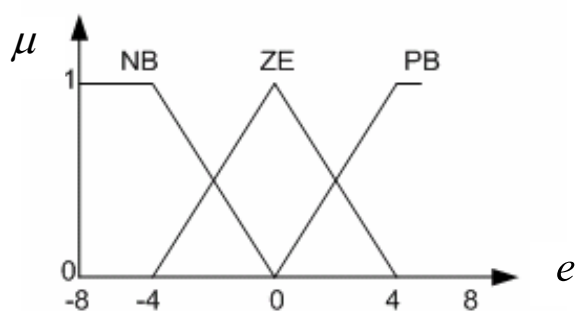
NS คือ Negative Small

ZE คือ Zero

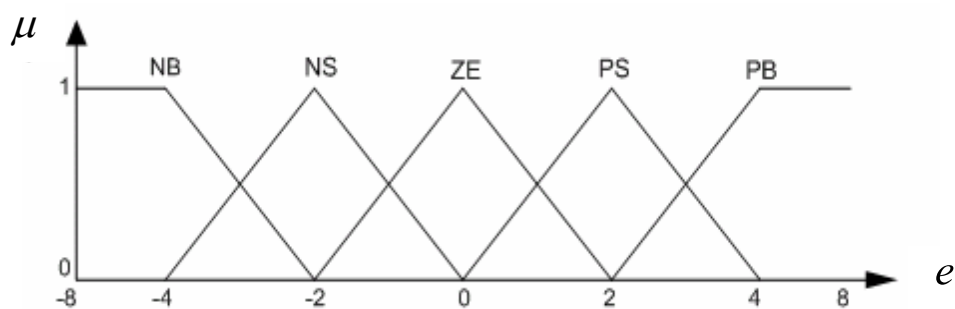
PS คือ Positive Small

PM คือ Positive Medium

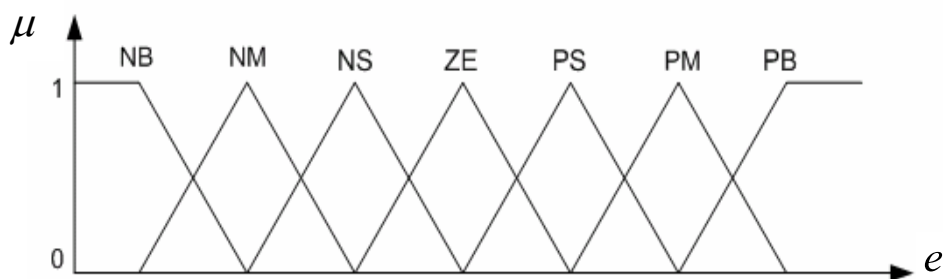
PB คือ Positive Big



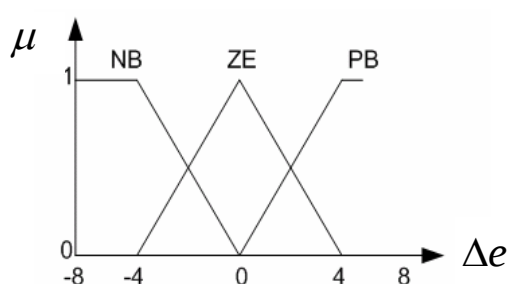
ภาพที่ 2-29 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาด (e) แบบ 3 สมาชิก



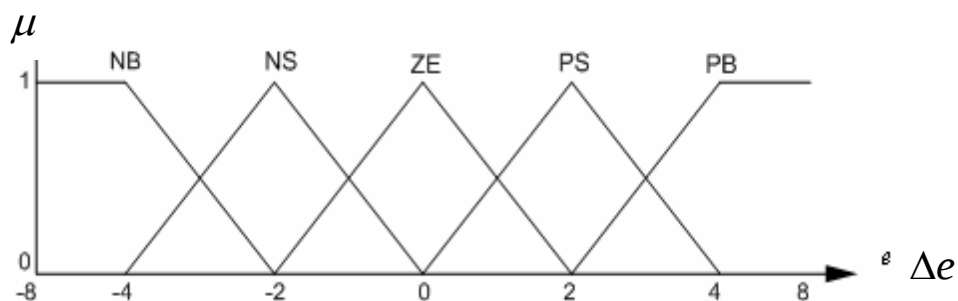
ภาพที่ 2-30 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาด (e) แบบ 5 สมาชิก



ภาพที่ 2-31 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาด (e) แบบ 7 สมาชิก



ภาพที่ 2-32 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราการผลิต (Δe) แบบ 3 สมาชิก



ภาพที่ 2-33 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราการผลิต (Δe) แบบ 5 สมาชิก

ความหมายของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแต่ละเทอม

Negative Big (NB) คือ ค่าแรงดันไฟลบมาก

Negative Medium (NM) คือ ค่าแรงดันไฟลบปานกลาง

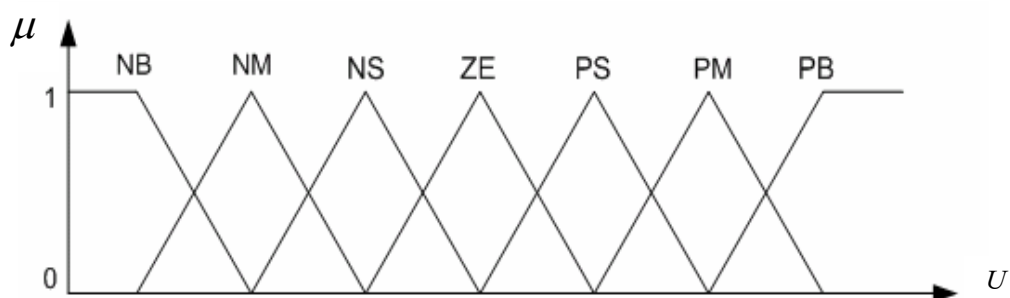
Negative Small (NS) คือ ค่าแรงดันไฟลบน้อย

Zero (ZE) คือ ค่าแรงดันไฟเป็นศูนย์

Positive Small (PS) คือ ค่าแรงดันไฟบวกน้อย

Positive Medium (PM) คือ ค่าแรงดันไฟบวกปานกลาง

Positive Big (PB) คือ ค่าแรงดันไฟบวกมาก



ภาพที่ 2-34 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุตแบบ 7 สมาชิก

2.7.3 ออกแบบการสร้างกฎ (Rule)

เนื่องจากมีสมาชิกอินพุต 2 อินพุตแต่ละอินพุตมี 5 สมาชิกดังนั้นจำนวนกฎจึงเท่ากับ $5 \times 2 = 25$ กฎและแต่ละกฎที่ตั้งขึ้นมานี้จะไม่ซ้ำกันแสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ออกแบบการสร้างกฎ

Δe e	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NM	NM	NS	ZE
NS	NM	NM	NS	ZE	PS
ZE	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NS	ZE	PS	PM	PM
PB	ZE	PS	PM	PM	PB

2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งที่บรรจุความสามารถมาก มีหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์ และลอจิก (Logic) วงจรรับสัญญาณอินพุต (Input) วงจรขับสัญญาณออกทางเอาต์พุต (Output) หน่วยความจำ (Memory) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบลงในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้นภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม

ไมโครคอนโทรลเลอร์ มาจากคำ 2 คำ คำหนึ่งคือ ไมโคร (Micro) หมายถึงขนาดเล็ก และคำว่า คอนโทรลเลอร์ (Controller) หมายถึงตัวควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุม ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงหมายถึงอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กแต่ในตัวอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กนี้ ได้บรรจุความสามารถที่ คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ ที่คนโดยส่วนใหญ่คุ้นเคยกล่าวคือ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้รวมเอาซีพียู(Central Processing Unit : CPU), หน่วยความจำ และพอร์ต (Port) ซึ่งเป็น ส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถัง เดียวกัน

2.8.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างโดยทั่วไป ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วน ใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

2.8.2 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู

หน่วยความจำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) นั้น เปรียบเสมือน ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญ หายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง

- หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดานทดในการคำนวณของ ซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วย ความแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป

แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็น หน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (Erasable Electrically Read Only Memory : EEPROM) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

2.8.3 ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต มี 2 ลักษณะคือ

- พอร์ตอินพุต (Input Port)
- พอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port)

ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกัน ระหว่าง พอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะใช้การกดสวิตช์ (Switch) เพื่อนำไปประมวลผล และส่งไปพอร์ตเอาต์พุต เพื่อแสดงผลเช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

2.8.4 ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (Bus)

คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต เป็น ลักษณะ ของสายสัญญาณ จำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็น

2.8.5 บัสข้อมูล (Data Bus)

บัสข้อมูลเป็นสายสัญญาณที่บรรจุข้อมูล เพื่อการประมวลผลทั้งหมด ขนาดของบัสจะขึ้นอยู่กับความสามารถการประมวลผลของซีพียู สำหรับในงานทั่วไป ขนาดของบัสข้อมูลจะเป็น 8 บิต และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมาจนถึง 16, 32 และ 64 บิต

2.8.6 บัสแอดเดรส (Address Bus)

บัสแอดเดรสเป็นสายสัญญาณที่บรรจุค่าตำแหน่งของหน่วยความจำ โดยการติดต่อกับหน่วยความจำนั้น ซีพียู ต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน ดังนั้นจำนวนสายสัญญาณของแอดเดรสจึงต้องมีจำนวนมาก ยิ่งมากเท่าไร ก็จะเป็นการแสดง ขนาดของหน่วยความจำที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อได้ โดยสามารถคำนวณได้จาก

จำนวนแอดเดรสของหน่วยความจำ = 2^n (n คือจำนวนของเส้นทาง)

ยกตัวอย่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งมีสายแอดเดรส 10 เส้น ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวนี้ สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้ $2^{10} = 1,024$ ตำแหน่ง

หากต้องการทราบความจุของหน่วยความจำจริงๆ จะต้องทราบถึงขนาดของบัสข้อมูลก่อนว่าเป็นเท่าใด หากเป็น 8 บิต ความจุของหน่วยความจำที่มีสายแอดเดรส 10 เส้น จะเท่ากับ $8 \times 1,024 = 8,192$ บิต และ 1 กิโลไบต์ เท่ากับ 1,024 ไบต์ ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว จึงมีความจุของหน่วยความจำเท่ากับ 8,192 บิต หรือ 1,024 ไบต์ หรือ 1 กิโลไบต์

2.8.7 บัสควบคุม (Control Bus)

บัสควบคุมเป็นกลุ่มของสายสัญญาณควบคุม การติดต่อทั้งหมดของซีพียูกับหน่วยความจำและพอร์ต สำหรับสายสัญญาณเลือกควบคุมหลักได้แก่ สายสัญญาณเลือก อ่าน เขียน หน่วยความจำและสายสัญญาณเลือกเลือก อ่าน เขียน ข้อมูล กับพอร์ต

2.8.8 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกานับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง คือเนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูงจังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ดีขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

2.8.9 ภาษาของไมโครคอนโทรลเลอร์

ภาษาที่ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะแตกต่างกันตามไมโครคอนโทรลเลอร์ของแต่ละตระกูลแต่ประเภทของภาษาที่ใช้สามารถแบ่งออกเป็น

2.8.9.1 ภาษาเครื่อง/ภาษาแอสเซมบลี (Assembly)

ภาษาเครื่อง(Machine Language) คือโปรแกรมที่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถเข้าใจมัน แต่มันไม่ง่ายสำหรับมนุษย์ที่จะอ่านได้ ภาษาแอสเซมบลี คือ รูปแบบของ ภาษาเครื่องที่มนุษย์สามารถอ่านออกได้ ภาษาแอสเซมบลีเป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในการแปลง จากคำสั่งที่มนุษย์อ่านออกได้ไปเป็นภาษาเครื่อง ซึ่งแปลงคำสั่งจากโปรแกรมที่เขียนโดย ภาษาแอสเซมบลีจะทำงานเร็วและมีขนาดเล็ก เพราะว่ามันสามารถเข้าถึง อุปกรณ์ได้โดยตรง แต่ หนึ่งขั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเขียนของผู้เขียนด้วย

2.8.9.2 อินเทอร์พรีเตอร์ (Interpreters)

อินเทอร์พรีเตอร์ คือ ภาษาระดับสูงซึ่งใกล้เคียงกับภาษาของมนุษย์ โดยจะฝังตัว อยู่ในหน่วยความจำ และทำหน้าที่อ่านคำสั่งจากโปรแกรมขึ้นมาทีละคำสั่งแล้วปฏิบัติตามคำสั่ง นั้นๆ ตัวอย่าง ของอินเทอร์พรีเตอร์ที่รู้จักกันดีคือ ภาษาพื้นฐาน ข้อเสียของอินเทอร์พรีเตอร์ คือ ทำงานได้ช้า เนื่องจากต้องแปลคำสั่งทีละคำสั่ง

2.8.9.3 คอมไพเลอร์ (Compilers)

คอมไพเลอร์ คือ ภาษาระดับสูงซึ่งทำหน้าที่แปลโปรแกรมที่เขียนขึ้นให้เป็น ภาษาเครื่อง จากนั้นจึงนำเอาโปรแกรมที่แปลเสร็จแล้วเข้าไปเก็บในหน่วยความจำ ทำให้การทำงาน เร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น ภาษาซี เป็นต้น