บทที่ 2
ทฤษฎีสัมพันธ์

งานวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์การวัดข้อมูลตำแหน่งสามมิติแบบพกพา สำหรับการจำลองตัวละครหรือวัตถุในงานแอนิเมชันบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงงานนั้น จำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องมีการศึกษาเนื้อหา หลักการขั้นพื้นฐาน แนวคิดหรือทฤษฎีที่นำมาอ้างอิง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับโครงงาน โดยคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงงาน ตั้งแต่ภาพรวมและทฤษฎีที่เกี่ยวกับภาพ 3 มิติ กลศาสตร์แขนกล และเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ จากนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาถึงหลักการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองวัตถุ 3 มิติ โดยนำมาสนับสนุนองค์ความรู้ ในการพัฒนาโครงงานในครั้งนี้ได้มีรายละเอียดดังนี้

2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ [1]

2.2 แขนกล [2], [3]

2.3 โรตารี่เอนโค้ดเดอร์ [4], [5], [6]

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [8], [9]

2.5 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน [10]

2.6 การแปลงทางเรขาคณิตศาสตร์สำหรับสร้างแบบจำลองวัตถุ 3 มิติ [11]

2.7 ภาพ 3 มิติ [12]

2.8 หลักการมองภาพ 3 มิติ [11]

2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ [1]

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ หรือ ซีเอ็มเอ็ม (Coordinate Measuring Machines : CMMs) เป็นเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ สามารถวัดชิ้นงานได้ทุกรูปแบบ ทั้งการวัดและการชั่งน้ำหนัก ซึ่งการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถทำการปรับปรุงความยืดหยุ่นในการใช้งานและความแม่นยำของการวัดชิ้นงาน โดยควบคู่ไปกับการใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่น้อยลงจากการวัดอย่างรวดเร็วซึ่งเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ มีลักษณะต่างๆ กันมากมาย แต่ที่รู้จักกันโดยทั่วไปได้แก่เครื่องวัดพิกัดที่เป็นระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (CMMs with Cartesian Coordinate Systems) กล่าวคือ ในการวัดพิกัดของเครื่องวัดพิกัดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนจะอาศัยการอ่านตำแหน่งของตัวเครื่องเอง ซึ่งอาจจะมีหลายแกน แต่ละแกนก็จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เช่น เครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน ก็จะมีแกน X, Y, Z ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.1 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน ของบริษัท Brown & Sharpe [1]

ซีเอ็มเอ็ม ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงสร้างฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงาน (Software) ส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงานจะทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้งาน เช่น รับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การตรวจสอบสถานะของโครงสร้าง การคำนวณหาพิกัดเป็นต้น โดยมีการการจำแนกประเภทของซีเอ็มเอ็มตามระบบพิกัดของตัวเครื่องออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.1.1 ซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian CMMs)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีแกนของเครื่องเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3 แกน ทำให้สามารถวัดพิกัดฉาก 3 มิติ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้โดยตรง ซึ่งก็ยังมีรูปแบบต่างๆ กันอีกตามลักษณะโครงสร้าง และคุณลักษณะของเครื่อง เช่น ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Flexibility) เวลาที่ใช้ในการวัด และราคา โดยแบ่งได้ดังนี้

2.1.1.1 มูฟวิ่งบริดจ์ (Moving Bridge)

เป็นรูปแบบโครงสร้างของซีเอ็มเอ็มที่แพร่หลายที่สุดโดยตัวเครื่องจะมีแท่น รองรับชิ้นงานที่จะทำการวัดพิกัดยึดแน่นอยู่กับที่แล้วตัวแกนของเครื่องจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงาน โดยตัวแกนเครื่องจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 2.2

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.2 ซีเอ็มเอ็มแบบมูฟวิ่งริงบริดจ์ (Moving Ring Bridge CMM) ของบริษัท Mitutoyo [1]

จะเห็นว่าลักษณะแกนของเครื่องคล้ายกับสะพาน ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดตัวของแกนได้หากเสา ทั้ง 2 เคลื่อนที่ไม่เท่ากันจะส่งผลให้ค่าความถูกต้องของเครื่องที่ตำแหน่งต่างๆ ของแท่นรองชิ้นงานไม่เท่ากัน แต่ลักษณะโครงสร้างแบบนี้มีประโยชน์ คือ ตัวโครงสร้างจะมีลักษณะแข็งแรง และทำให้มีค่าความถี่ธรรมชาติของเครื่องสูงกว่าโครงสร้างแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever)

2.1.1.2 ฟิกซ์บริดจ์ (Fixed Bridge)

สำหรับโครงสร้างแบบนี้จะมีความแตกต่างกับแบบแรก คือ ตัวแกนของเครื่อง ที่มีลักษณะคล้ายสะพานจะยึดแน่นอยู่กับที่ส่วนตัวแท่นรองรับชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนที่ได้แทนดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบนี้มีข้อดี คือ โครงสร้างของเครื่องมีความแข็งเกร็ง (Rigid) สูงและเนื่องจากตัวแกนถูกยึดอยู่กับที่ทำให้ไม่เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างแบบนี้จะมีค่าความถูกต้องในการวัดสูง แต่ก็มีข้อเสีย คือ ความเร็วในการทำงานต่ำเนื่องจากจะต้องเคลื่อนตำแหน่งของแท่นรองรับชิ้นงานซึ่งมีน้ำหนักมาก และยังมีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนักของชิ้นงานที่จะนำมาทำการวัด

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.3 ซีเอ็มเอ็มแบบฟิกซ์บริดจ์ (Fixed Bridge CMM) [1]

2.1.1.3 แคนทิลีเวอร์ (Cantilever)

โครงสร้างแบบนี้จะมีคานเคลื่อนที่เพียงหนึ่งแนวแกน และจะทำหน้าที่รองรับอีกสองแกนที่เหลือดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปแล้วด้วยโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้โครงสร้างที่ต้องมีการเคลื่อนที่มีน้ำหนักน้อยจึงทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดโดยผู้ปฏิบัติงานหรือโดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โดยตรง (Direct Computer Control) อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงชิ้นงานได้ดี เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบเปิดสามด้าน (มีคานเป็นโครงสร้างเพียงด้านเดียว) แต่ก็มีข้อเสีย คือ การแอ่นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นแบบคาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตำแหน่งที่แกนยืดออกสุด ซึ่งทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวเครื่องมีค่าต่ำเป็นข้อจำกัดทำให้เครื่องต้องมีขนาดเล็ก ดังนั้น โดยทั่วไปโครงสร้างแบบนี้จะมีแท่นรองรับชิ้นงานที่ยาว แต่จะมีช่วงการใช้งานในอีกสองแกนที่เหลือต่ำกว่ามาก โครงสร้างแบบนี้จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะบางแต่ยาว

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.4 ซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever CMM) ของบริษัท TARUS [1]

2.1.1.4 ฮอริซอนทอลอาร์ม (Horizontal Arm)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะโครงสร้างของเครื่อง เหมาะสำหรับใช้ในงานวัดพิกัดชิ้นส่วนรถยนต์มากที่สุด โดยลักษณะโครงสร้างของเครื่องจะมีลักษณะคล้ายกับ ซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์แต่แกนของหัววัดจะสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวระดับแทน ดังในรูปที่ 2.5 จึงทำให้ซีเอ็มเอ็มแบบนี้สามารถเกิดการแอ่นของโครงสร้างได้เช่นเดียวกับโครงสร้างแบบแคนทิลีเวอร์

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.5 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบฮอริซอนทอลอาร์มขณะวัดพิกัดชิ้นส่วนรถยนต์ [1]

ข้อดีของซีเอ็มเอ็มชนิดนี้ก็ คือ ความสามารถในการเข้าถึงชิ้นงานมาก และโดยเฉพาะความรวดเร็วในการทำงานอันเป็นจุดเด่นของโครงสร้างแบบนี้แต่มีข้อเสียอันเนื่องมาจากการแอ่นของตัวโครงสร้างจึงทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความถูกต้อง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องเหล่านี้ให้หมดไป ดังเช่นการถ่วงสมดุลให้กับตัวโครงสร้างเพื่อลดการแอ่นของคาน และการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้แก้ไขค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยการชดเชย (Compensate) ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแอ่นของคาน

2.1.1.5 ซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรี่ (Gantry CMM)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ที่สุด เหมาะสำหรับงานวัดชิ้นงานที่มีขนาดตั้งแต่ 10 ลูกบาศก์เมตร ขึ้นไป ตัวโครงสร้างฐานของเครื่องจะได้รับการออกแบบให้มีขนาดใหญ่และมีความแข็งแรงมากเพื่อลดการเกิดการบิดตัวของโครงสร้างในส่วนที่ใช้สำหรับการวัดตำแหน่ง นอกจากลดการบิดตัวแล้วโครงสร้างฐานของเครื่องยังจำเป็นที่จะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถรองรับน้ำหนักของชิ้นงานขนาดใหญ่ได้โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดขึ้นดังรูปที่ 2.6 ในการหลีกเลี่ยงการเกิดการบิดในแกนยอว์ (Yawing) ของคานเคลื่อนที่ระบบขับเคลื่อนร่วม (Dual Drive Systems-Master and Slave Configuration) มักจะเป็นระบบที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด อีกทั้งยังมีการนำโปรแกรมสำหรับแก้ไขความผิดพลาดของรูปทรงลักษณะโครงสร้างอันเนื่องมาจากการติดตั้งโครงสร้างฐานของเครื่องและผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.6 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรี่ [1]

2.1.1.6 ซีเอ็มเอ็มระบบพิกัดฉากแบบอื่นๆ

โครงสร้างแบบคอลัมน์ (Column Configuration CMMs) การเคลื่อนที่ในแนวระดับจะเคลื่อนโดยตัวแท่นรองรับชิ้นงาน ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งจะได้จากการเคลื่อนที่โดยใช้เสาซึ่ง

ยึดแน่นอยู่กับที่จึงมีความแข็งเกร็งในแนวดิ่งสูงทำให้โครงสร้างแบบนี้มีความแม่นยำในการวัดสูง แต่ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นตัวซี (Open C Section) จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดจากผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก ดังนั้น ซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จึงมักจะใช้งานอยู่ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิมากกว่าที่จะนำไปใช้อยู่ร่วมกับสายการผลิตโครงสร้างแบบตัวแอล (L-Shaped Bridge Configuration) เป็นโครงสร้างที่ดัดแปลงมาจากโครงสร้างแบบคาน โดยมีการเพิ่มขาสำหรับรองรับปลายแกนของเครื่องในฝั่งตรงข้าม แต่ถึงแม้จะมีการเพิ่มการรองรับมากขึ้น ซีเอ็มเอ็มแบบนี้ก็ยังมีความเร็วในการทำงาน และความถี่ธรรมชาติต่ำ ยังมีซีเอ็มเอ็มอีกชนิดซึ่งมักถูกเรียกว่า หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัด (Measuring Robot) คุณลักษณะของเครื่องวัดแบบนี้คือ มีความเร็วในการวัดสูง และ มักจะใช้ร่วมอยู่ในสายการผลิต ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.7 หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัดในระบบควบคุมการผลิต [1]

2.1.2 ซีเอ็มเอ็มที่ไม่ใช้ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Non-Cartesian CMMs)

เครื่องวัดพิกัดประเภทนี้ให้ค่าพิกัดเป็นระบบพิกัดฉาก โดยไม่มีแกนเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในที่นี้จะแบ่งซีเอ็มเอ็มประเภทนี้ออกเป็นแบบต่างๆ ดังนี้ ไทรเลทเทอเรชั่น (Trilateration), ไทรแองกูเลชั่น (Triangulation), โมโนไซต์ติ้ง (Mono-sighting), สตรัคเจอร์ไลท์ (Structured Light) และอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์มแมชชีน (Articulating Arm Machines) หากเปรียบกับซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดฉากแล้วซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จะมีค่าความถูกต้องต่ำกว่า ในที่นี้จะขอกล่าวถึงแต่เพียงระบบ สตรัคเจอร์ไลท์ (Structured Light) และอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์มแมชชีน (Articulating Arm Machines) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ชุดของแขนกลในการวัดค่า โดยจะยกตัวอย่างของซีเอ็มเอ็มที่ไม่ใช้ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียนดังนี้

2.1.2.1 ระบบสตรัคเจอร์ไลท์ (Structured-Light Systems)

ระบบที่จัดอยู่ในซีเอ็มเอ็มประเภทนี้ได้แก่ระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง (Optical-Robotic Gauging Systems) ระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง (Optical Robotic Gauging System) ระบบนี้จะประกอบด้วยตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และตัวฟิกเจอร์ (Fixture) ที่ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานที่จะทำการตรวจวัด ดังรูปที่ 2.8 ซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะเหมาะสำหรับงานตรวจวัดที่เป็นชิ้นส่วนโลหะแผ่น หลักการ ทำงานของเครื่องคือจะหาค่าพิกัดต่างๆ ของชิ้นส่วนด้วยทรีดีสตรัคเจอร์ไลท์วิชั่นเซนเซอร์ (3D Structured Light Vision Sensor) ที่ติดตั้งอยู่ปลายแขนของ ตัวหุ่นยนต์การทำงานจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ ดังนั้นค่าความถูกต้องของเครื่อง จึงขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องของตัวทรีดีสตรัคเจอร์ไลท์วิชั่นเซนเซอร์และตัว หุ่นยนต์ประกอบเข้าด้วยกัน

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.8 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัดระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง [1]

2.1.2.2 ระบบแบบอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์ม (Articulating Arm Systems)

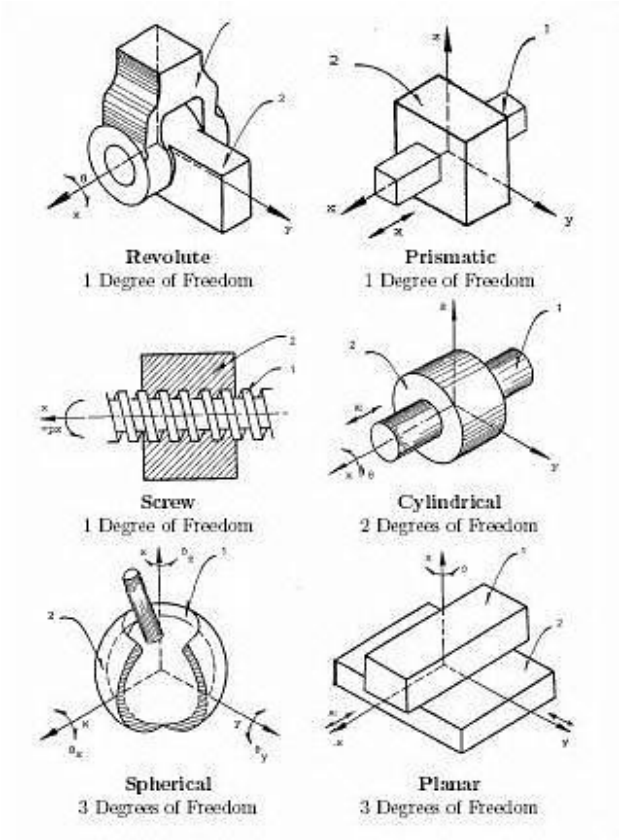
ระบบนี้จะใช้ชุดของแขนกลซึ่งมีค่าองศาความอิสระเท่ากับ 6 (Six-Degrees-of-Freedom Linkage Arm) ดังรูปที่ 2.9 วัดค่าพิกัดต่างๆ ได้จากพรีซิชั่นโรตารี่ทรานส์ดิวเซอร์ (Precision Rotary Transducers) ที่ติดอยู่ภายใน ทุกข้อต่อเพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของตัวแขนกล แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาตำแหน่งของหัววัด (Probe) โดยใช้หลักการทางจลนศาสตร์ (Kinematics) ของแขนกล โดยผู้ปฏิบัติงานจะเป็นผู้เคลื่อนย้ายหัววัดไปยังตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานด้วยตนเอง ปริมาตรการวัดของตัวเครื่องแบบนี้จะเป็นทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวของตัวแขนกลแต่ก็อาจจะมีบางข้อจำกัดในปริมาตรการวัดอันเนื่องมาจากทั้งคอนฟิกกูเลชั่น (Configuration) ของตัวแขนกล และลักษณะการติดตั้งขณะใช้งานของตัวแขน ค่าความถูกต้องของซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จะไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับซีเอ็มเอ็มแบบพิกัดฉากได้เลย เนื่องจากค่าความถูกต้องของซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะค่อนข้างต่ำกว่ามาก แต่มีข้อดีที่เด่นชัดที่แตกต่างจากซีเอ็มเอ็มแบบพิกัดฉากอย่างมาก คือ สามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวกจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ปฏิบัติงานนอกสถานที่หรือนำไปใช้ร่วมอยู่ในระบบการผลิต อีกทั้งชิ้นงานที่จะทำการวัดก็ไม่จำเป็นต้องนำมาติดตั้งบนแท่นรองรับชิ้นงานของเครื่องจึงมีประโยชน์มากสำหรับการวัดชิ้นงานที่มีความยากลำบากในการเคลื่อนย้าย หรือไม่สามารถนำมาติดตั้งบนแท่นรองรับชิ้นงานได้โดยสะดวก

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.9 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์ม [1]

2.2 แขนกล [2],[3]

หุ่นยนต์ที่ใช้พิจารณาในเรื่องการวางแผนการเคลื่อนที่นั้น ถูกจำกัดว่าเป็นวัตถุชิ้นเดียวเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ แต่ในความเป็นจริงโดยทั่วไปหุ่นยนต์ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนต่างๆ หลายชิ้นที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กันนอกเหนือจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ ยังมีหุ่นยนต์อีกประเภทที่พบเห็นได้ในโรงงานประกอบชิ้นส่วน นั่นคือ แขนกล ปัจจุบันแขนกลได้มีบทบาทข้ามขอบเขตของโรงงานเข้ามาในชีวิตของเราในแง่อื่นๆ เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

แขนกล คือ หุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยลิงค์ (Link) ที่นำมาประกอบกันด้วยข้อต่อ (Joint) ซึ่งข้อต่อจะหลายลักษณะที่ทำให้เกิดกาเคลื่อนที่ของลิงค์ที่แตกต่างกันไป

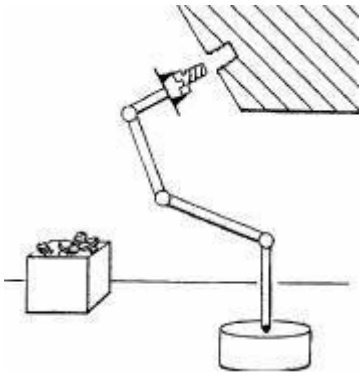


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.10 ข้อต่อแบบต่างๆ [2]

ในการสร้างแขนกลโดยทั่วไป ข้อต่อที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) และข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) สำหรับข้อต่อแบบหมุน ลิงค์สองท่อนถูกยึดติดกันที่จุดหมุนซึ่งอยู่บนลิงค์ โดยแต่ละท่อนสามารถหมุนได้รอบ จุดหมุนนี้สามารถบอกตำแหน่งของลิงค์ที่สัมพันธ์กันด้วยมุมที่ลิงค์หมุนไป ส่วนข้อต่อแบบเลื่อนนั้น ลิงค์สองท่อนติดอยู่ด้วยกันในลักษณะ

เดียวกันกับเสาอากาศวิทยุรถยนต์ที่ยืดหดได้ โดยลิงค์แต่ละท่อนสามารถเลื่อนเข้าออกได้ในหนึ่งทิศทาง ที่สามารถระบุตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของสองลิงค์ได้จากระยะเลื่อนเข้าออกดังกล่าว จะเห็นได้ว่าข้อต่อแบบหมุนและข้อต่อแบบเลื่อนมีระดับเสรีของการเคลื่อนที่เป็นหนึ่ง ตัวแปรที่กำหนดการเคลื่อนที่นี้ซึ่งได้แก่มุมหมุนของข้อต่อแบบหมุน และระยะเลื่อนของข้อต่อแบบเลื่อนว่าเป็นพารามิเตอร์ของข้อต่อ การมีระดับเสรีของการเคลื่อนที่เป็นหนึ่งทำให้ง่ายในการออกแบบและวิเคราะห์ ข้อต่อทั้งสองแบบจึงถูกใช้มากที่สุดในการสร้างแขนกล โดยแขนกลที่มีระดับเสรีสูงๆ ก็สามารถสร้างขึ้นได้ โดยการประกอบลิงค์หลายท่อนด้วยข้อต่อสองแบบนี้

แขนกลทำงานด้วยการเคลื่อนที่ของท่อนแขนที่สัมพันธ์กันเพื่อให้ปลายแขน (End Effector) ไปอยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสม เพื่อเครื่องมือที่ติดอยู่ที่ปลายแขนจะทำงานที่ต้องการได้โดยสะดวกและมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่ต้องจัดการให้ปลายแขนอยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสม



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.11 แขนกลกำลังไขสกรูลงในเกลียวที่ต้องการ [2]

การคำนวณว่าปลายแขนจะอยู่ที่ตำแหน่งและทิศทางใดจึงเป็นเรื่องสำคัญ การคำนวณดังกล่าวอาศัยการกำหนดให้ลิงค์แต่ละท่อนมีพิกัดส่วนตัว ที่เราจะเรียกว่า กรอบ กรอบประกอบไปด้วยจุดกำเนิดและเวกเตอร์แกน โดยกรอบที่กล่าวถึงจะอยู่ติดแน่นกับลิงค์ที่เป็นเจ้าของเสมอ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือแต่ละลิงค์จะอยู่นิ่งไม่ขยับเขยื้อนเมื่อเทียบกับกรอบของมัน สำหรับลิงค์ที่เกิดจากการเรียงต่อกันไป เรานิยมเรียกลิงค์ที่อยู่นิ่งยึดติดกับพื้นว่าฐาน (Base) และเรียกท่อนถัดมาตามชื่อส่วนของแขนได้แก่ ไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) แขนท่อนบน (Forearm) และข้อมือ (Wrist) เป็นต้น ตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของลิงค์หนึ่งๆ เมื่อเทียบกับกรอบของฐานจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางของลิงค์ก่อนหน้าด้วย โดยสามารถคำนวณตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนได้ด้วยการใช้การคูณเมตริกซ์การแปลงแบบซ้ายไปขวา โดยพิจารณาจากฐานไปจนถึงปลายแขน

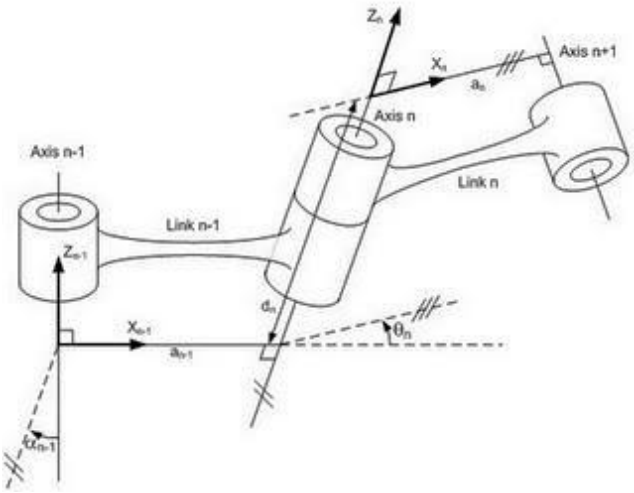
2.2.1 หลักการของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก

นายเดนาวิท (Denavit) และนายฮาร์เทนเบอร์ก (Hartenberg) ได้เสนอหลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไกในรูปแบบของเมตริกซ์ในปี ค.ศ.1955 ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์และจำลองแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อย่างแพร่หลาย การนำเสนอในรูปแบบของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg Representation) หรือที่เรียกโดยย่อว่า D-H Representation ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการอธิบายแบบจำลองของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาวิชาทางด้านหุ่นยนต์ การนำเสนอในรูปแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายต่อการอธิบายลักษณะข้อต่อและลิงค์ ซึ่งสามารถใช้ได้กับหุ่นยนต์ทุกชนิดแม้ว่าจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนก็ตาม ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์อาทิคิวเลท และ หุ่นยนต์ SCARA

หลักการของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์กถูกนำมาใช้กับหุ่นยนต์ โดยพิจารณาหุ่นยนต์เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยข้อต่อและลิงค์ ที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ข้อต่อเป็นได้ทั้งแบบหมุน (Revolute Joint) และแบบเลื่อน (Prismatic Joint) ที่ประกอบเข้าด้วยกันในลำดับหรือระนาบใดก็ได้ โครงสร้างของลิงค์สามารถพิจารณาตามความยาวและการบิดตัวได้ทุกรูปแบบการนำเสนอตามแบบของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก มีขั้นตอนเริ่มจาก การกำหนดกรอบอ้างอิงประจำแต่ละข้อต่อและลิงค์ และกำหนดขั้นตอนการแปลงจากกรอบหนึ่งไปยังกรอบที่อยู่ถัดไป จากนั้น จึงทำการพิจารณาผลของการแปลงจากฐานหุ่นยนต์ไปยังกรอบที่หนึ่ง และจากกรอบที่หนึ่งไปยังกรอบที่สอง และต่อไปเรื่อยๆ จนถึงข้อต่อสุดท้าย เมื่อรวมผลของเมตริกซ์การแปลงทั้งหมดก็จะได้ผลลัพธ์เป็นเมตริกซ์การแปลงของกรอบประจำตัวทำงานส่วนปลายเทียบกับฐานหุ่นยนต์ ต่อไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการกำหนดกรอบตามหลักการของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg Principle) และ เมตริกซ์การแปลงของกรอบที่อยู่ถัดกัน

2.2.1.1 กรอบประจำข้อต่อและลิงค์

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างที่มีสามข้อต่อโดยประกอบขึ้นจากลิงค์สองอัน ลักษณะของลิงค์และข้อต่อเป็นตัวแทนที่บอกถึงลักษณะการวางตัวและการเคลื่อนที่ของข้อต่อ ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเหมือนโครงสร้างหุ่นยนต์จริงทุกประการ



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.12 การกำหนดกรอบประจำข้อต่อและลิงค์ [3]

การกำหนดหมายเลขกรอบประจำข้อต่อให้กำหนดตามหมายเลขประจำแกนหมุน สมมุติให้ข้อต่อแรกเป็นข้อต่อ n-1 ส่วนข้อต่อถัดไปเป็นข้อต่อ n และ n+1 ตามลำดับ โดยอาจมีข้อต่อเพิ่มอยู่ก่อนหน้าหรือหลังจากนี้ก็ได้ ในการกำหนดหมายเลขประจำลิงค์นั้น ให้กำหนด ลิงค์ n-1 อยู่ระหว่างข้อต่อ n-1 กับข้อต่อ n และ ลิงค์ n อยู่ระหว่างข้อต่อ n กับข้อต่อ n+1ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดกรอบอ้างอิงประจำข้อต่อ ด้วยการกำหนดทิศของแกน z และทิศของแกน x ส่วนทิศของแกน y ที่เหลืออยู่สามารถหาได้จากกฎมือขวา ในการกำหนดทิศและตำแหน่งของกรอบประจำข้อต่อ มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

1) กำหนดแกน z เป็นแกนเดียวกับแกนของข้อต่อ หากข้อต่อเป็นแบบหมุน ทิศของแกน z ได้จากการใช้กฎมือขวาตามทิศทางการหมุน หากข้อต่อเป็นแบบเลื่อน ทิศของแกน z จะมีทิศเดียวกับแนวการเลื่อนสำหรับข้อต่อ n ให้ใช้เลขประจำกรอบเป็น n ยกตัวอย่างเช่น ข้อต่อ n-1 กำหนดเลขประจำแกน z เป็น โดยสำหรับข้อต่อแบบหมุน ให้กำหนดองศาการหมุนตามแกน z เป็นตัวแปร θ สำหรับข้อต่อแบบเลื่อน ให้กำหนดระยะเลื่อนตามแนวแกน z เป็นตัวแปร *d*

2) กำหนดระยะ a ซึ่งเป็นระยะที่สั้นที่สุดที่เชื่อมระหว่างแกน z ทั้งสองเข้าด้วยกัน ระยะ a คือ เส้นตั้งฉากร่วม (Common Normal) ระหว่างแกน z ทั้งสอง โดยทั่วไปแล้วแนวแกนข้อต่อไม่จำเป็นต้องขนานหรือตัดกัน ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 2.12 เส้นตรง a_{n-1} เป็นเส้นฉากร่วมระหว่างแกน z_{n-1} กับแกน z_n จากนั้น กำหนดแกน x โดยให้ทิศทางของแกน x_{n-1} อยู่บนเส้นตรง a_{n-1} มีทิศพุ่งจากแกน z_{n-1} ไปยังแกน z_n จะสังเกตได้ว่าเส้นตรง a_{n-1} กับเส้นตรง a_n ไม่จำเป็นต้องตัดกันหรืออยู่ในแนวเดียวกัน และ จุดกำเนิดของกรอบไม่จำเป็นต้องทับกัน อย่างไรก็ตาม ในการกำหนดแกนของกรอบประจำข้อต่อ มีข้อยกเว้นสำหรับกรณีพิเศษ ดังนี้ หาก

แกน z ทั้งสองขนานกัน จะมีจำนวนเส้นตั้งฉากร่วมที่ตำแหน่งใดก็ได้ ดังนั้น จึงกำหนดให้เส้นตั้งฉากร่วมอยู่ในแนวเดียวกับเส้นตั้งฉากร่วมของแกนที่มีอยู่ก่อนหน้า หากแกน z ทั้งสองตัดกัน จะไม่มีเส้นตั้งฉากร่วม (หรือมีความยาวเป็นศูนย์) ดังนั้น จึงกำหนดให้แกน x ตั้งฉากกับระนาบที่เกิดจากการตัดกันของแกน z ทั้งสอง และมีทิศตามกฎมือขวา ซึ่งเป็นผลคูณไขว้ (Cross Product) ระหว่าง z_{n-1} กับ z_n

จากรูปที่ 2.12 มุม θ บอกการหมุนรอบแกน z ระยะ d บอกระยะห่างระหว่างเส้นตั้งฉากร่วมตามแนวแกน z ระยะ a บอกความยาวของเส้นตั้งฉากร่วม หรือเรียกว่า ระยะเยื้องระหว่างข้อต่อ (Joint Offset) และ มุม α บอกค่ามุมบิดระหว่างแกน z ทั้งสอง หรือเรียกว่า มุมบิดระหว่างข้อต่อ (Joint Twist) โดยทั่วไปแล้วในโครงสร้างของหุ่นยนต์จะมีตัวแปรข้อต่อเป็น ค่ามุมหมุน θ หรือ ระยะเลื่อน *d* โดยสรุป ค่าพารามิเตอร์ในการนำเสนอแบบเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก หรือที่เรียกว่าดีเอช พารามิเตอร์ (D-H parameters) สำหรับการกำหนดกรอบประจำข้อต่อและลิงค์ มีดังนี้

a_n คือ ระยะ จากแกน z_n ไปยัง z_{n-1} ตามแกน x_n

α_n คือ มุม จากแกน z_n ไปยัง z_{n-1} รอบแกน x_n

d_n คือ ระยะ จากแกน x_{n-1} ไปยัง x_n ตามแกน z_n

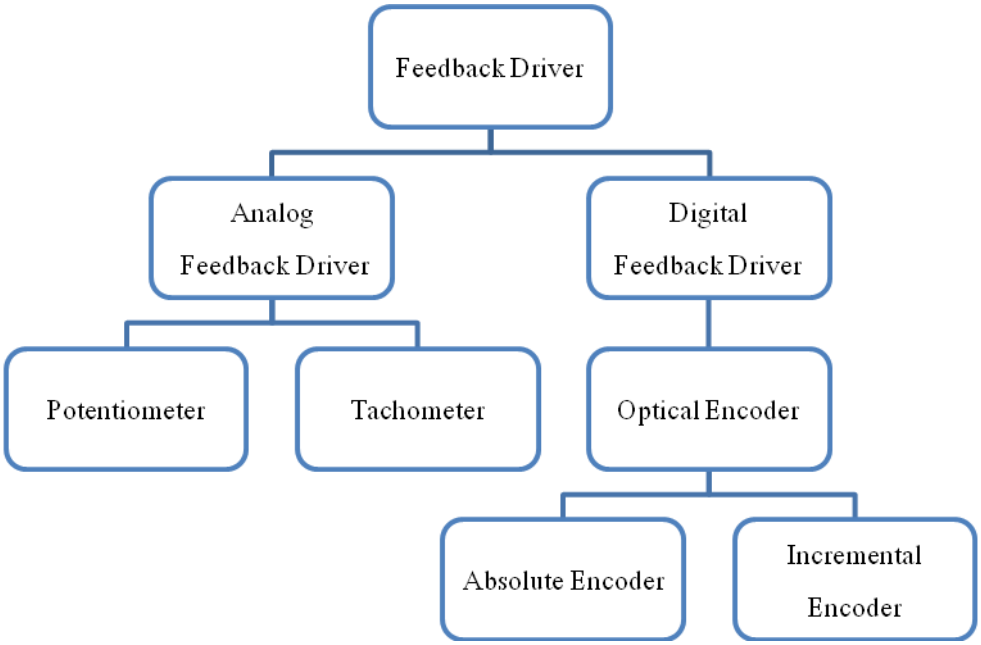
θ_n คือ มุม จากแกน x_{n-1} ไปยัง x_n รอบแกน z_n

2.3 โรตารี่เอนโค้ดเดอร์ [4],[5],[6]

เอนโค้ดเดอร์จะทำหน้าที่ตรวจจับความเร็ว (Speed) ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (Direction of Rotation) และตำแหน่งพัลส์ของโรตารี่ (Shaft Position) แล้วรายงานผลกลับไปยังคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมให้ทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรกำลังของชุดขับเคลื่อนเซอร์โวเกิดการตัด-ต่อกระแสไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรตารี่ ซึ่งจัดอยู่ในอุปกรณ์ที่ชื่อว่า ตัวป้อนกลับ (Feedback Device)

2.3.1 ตัวป้อนกลับ (Feedback Driver)

เป็นส่วนประกอบสำคัญของควบคุม แบบป้อนกลับ เนื่องจากเป็นตัวที่บอกสถานะของระบบซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมใน ระบบควบคุม แบ่งตามลักษณะสัญญาณที่ได้จากตัวป้อนกลับเราสามารถแบ่งตัวป้อนกลับเป็นสองแบบ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.13 แผงผัง Feedback Driver [4]

2.3.1.1 Analog Feedback Device

ใช้กับระบบควบคุมแบบอนาล็อก แต่หากต้องการใช้กับระบบควบคุมแบบดิจิตอล ก็จะต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อให้สามาถนำไปประมวลผลได้ อุปกรณ์แบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากต้องการแปลงสัญญาณ (ระบบควบคุมส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นแบบดิจิตอล) รวมทั้งสัญญาณรบกวนต่างๆ อย่างไรก็ตาม งานบางแบบยังมีการใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ อุปกรณ์แบบนี้ได้แก่ Potentiometer Tachometer

2.3.1.2 Digital Feedback Device

อุปกรณ์แบบนี้จะป้อนสัญญาณป้อนกลับที่มีค่าแบบดิจิตอล (แบ่งระดับสัญญาณด้วยเลขจำนวนเต็ม) โดยอยู่ในรูปแบบของสัญญาณต่างๆ เช่น Square Wave, Sine Wave หรือแสดงออกมาเป็นค่าตำแหน่ง แต่หากผ่านการถอดรหัสแล้วค่าป้อนกลับจะเป็นเลขจำนวนเต็มที่แน่นอนเราจึงเรียกว่าเป็นอุปกรณ์ป้อนกลับแบบดิจิตอล

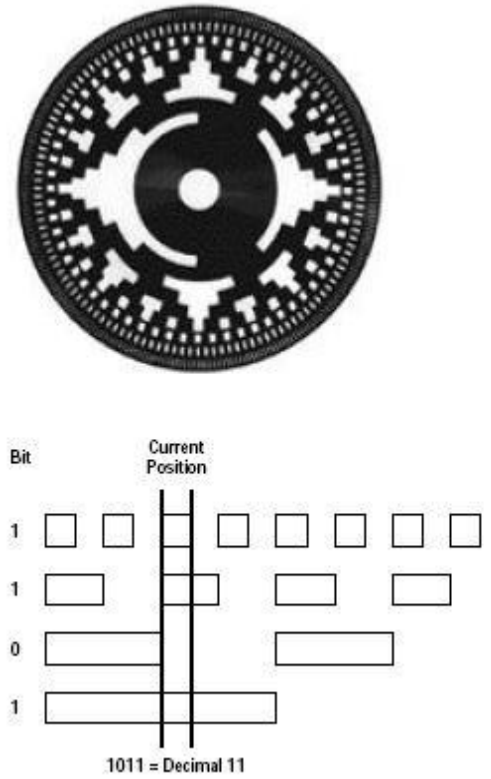
2.3.2 Optical Encode

ในระบบควบคุมตำแหน่งที่ซึ่งต้องการการป้อนกลับตำแหน่งที่แม่นยำ มีการใช้อุปกรณ์ป้อนกลับที่ใช้หลักการต่างๆ เช่น Magnetic, Contact, Resistive และ Optical อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่นิยมใช้ โดยทั่วไป คือ อุปกรณ์ที่ใช้หลักการแสง (Optical) โดยมีแผ่น Grating จะหมุนระหว่างตัวกำเนิดแสงและตัวรับแสง เมื่อแสงกระทบส่วนของ Grating ที่โปร่งแสง ตัวรับแสงก็จะได้รับแสงนั้น เพื่อให้ได้ความละเอียดมากขึ้น ตัวกำเนิดแสงจะเป็นแบบแสงขนาน (Collimate) และ มีการ Mask ระหว่าง Grating และตัวรับแสงซึ่งจะทำงานคล้ายกับชัตเตอร์ของ กล้องถ่ายรูป

การออกแบบแหล่งแสงและการ Mask จะขึ้นกับรูปแบบของเอนโค้ดเดอร์ โดยทั่วไปแล้ว Optical Encoder มี 2 ประเภทดังนี้

2.3.2.1 Absolute Encoder

เป็นอุปกรณ์ป้อนกลับตำแหน่งที่ให้สัญญาณออกมาที่แต่ละตำแหน่งของแกน เป็นค่าเฉพาะเจาะจงของตำแหน่ง (แกน) นั้นๆ โดยค่าสัญญาณจะแบ่งเป็นตรรกะ 1 และ 0 เมื่อแสงสามารถผ่าน Grating ได้และไม่ได้ ค่าตรรกะที่ได้จะแทนลำดับการนับของแต่ละหลักในเลขฐานสอง เพื่อให้เข้าใจยิ่งขึ้นขอให้พิจารณารูปที่ 2.14



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.14 Absolute Encoder [5]

ความละเอียดของเอนโคเดอร์ชนิดนี้ขึ้นกับจำนวน Track เช่น หากเอนโค้ดเดอร์มี 10 Track นั่นคือ จะมีความละเอียด 2 ยกกำลัง 10 หรือ 1024 ตำแหน่งต่อหนึ่งรอบการหมุน ค่าตำแหน่งที่ได้สามารถ อ่านเป็นค่าตำแหน่งได้เลย รูปแบบของโค้ดส่วนมากจะเป็น Binary Code บางครั้งอาจเป็น Grey Code

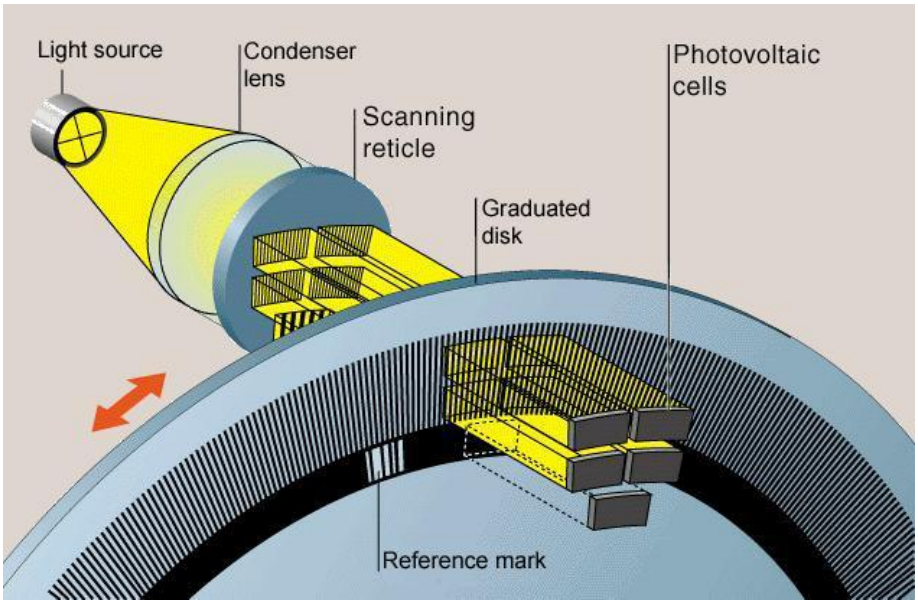
ข้อดีของเอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้ได้แก่ ไม่ต้องมีการหาตำแหน่งเริ่มต้น (Home) เนื่องจากเปิดเครื่องแล้ว ตำแหน่งจะยังคงเป็นตำแหน่งเดิม สัญญาณรบกวนจะไม่มีผลเนื่องจากตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจะขึ้น กับการหมุนเท่านั้น แต่เอนโค้ดเดอร์ประเภทนี้มักมีราคาแพง

2.3.2.2 Incremental Encoder

ในระบบการบังคับตำแหน่งหรือความเร็วของมอเตอร์ใช้อินคริเม้นท์เอนโค้ดเดอร์หรือเอนโค้ดเดอร์สำหรับรักษาตำแหน่งและสำหรับสร้างสัญญาณป้อนกลับ โดยที่ตัวเอนโค้ดเดอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่แปรผันตรงกับการหมุนของเพลาซึ่ง สามารถนำไปใช้ในการรับรู้ความเร็วของเพลามอเตอร์ในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ได้

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.15 Incremental Encoder [5]

อินคริเม้นท์เอนโค้ดเดอร์ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ ตัวกำเนิดแสง จากหมุน (Rotary Disk) จานอยู่กับที่และตัวเซ็นเซอร์บนแผนจานหมุนทำเป็นช่อง โดยรอบดังแสดงในรูป 2.16 และบนแผ่นอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสดงผ่านตรงข้ามไปยังตัวเซ็นเซอร์ถ้าเป็นเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้วัดความเร็วต่ำไม่ต้องมีแผ่นอยู่กับที่ก็ได้ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟ หรือ LED ก็ได้

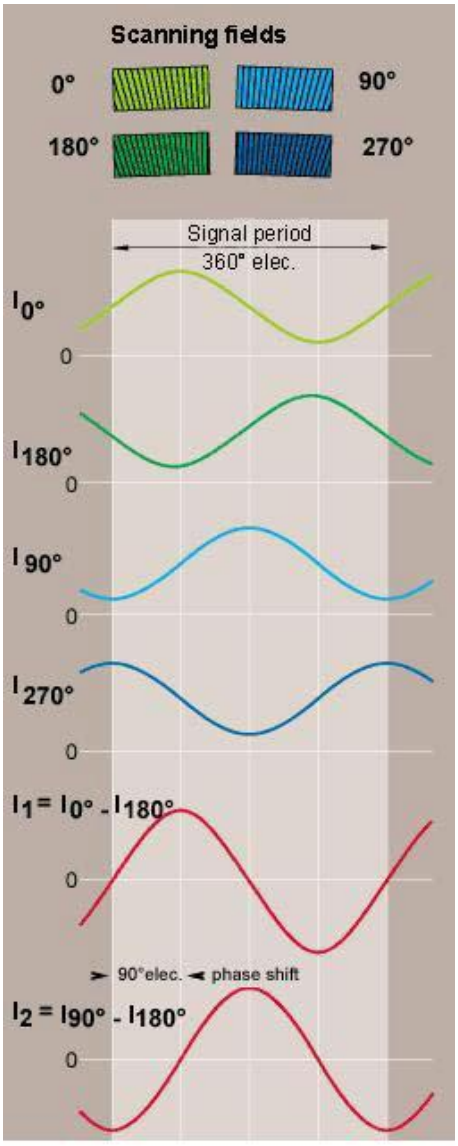


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.16 โครงสร้างภายในของ Incremental Encoder [6]

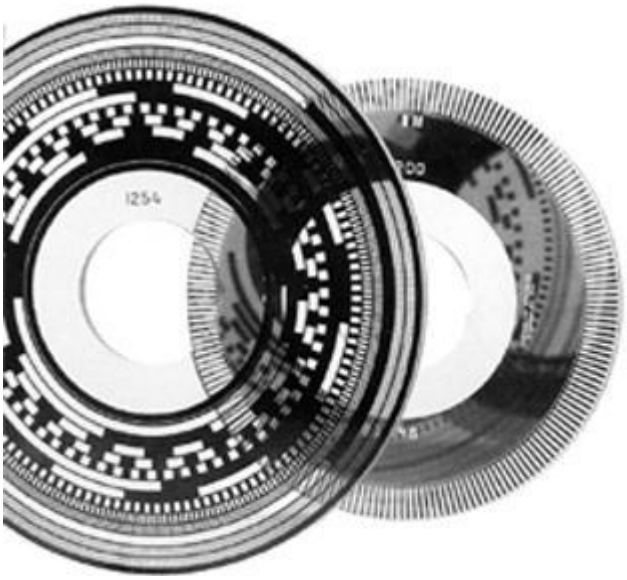
2.3.2.2.1 ความละเอียดของอินคริเม้นท์เอนโค้ดเดอร์

ความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ คือ จำนวนคาบเวลาของสัญญาณเอาท์พุตต่อการหมุนของเพลา 1 รอบ ซึ่งบวกเป็นจำนวนพัลส์ต่อรอบหรือจำนวนไซเกิลต่อ 360 องศา มุมทางเชิงกบหรือไซเกิลต่อองศา เอนโค้ดเดอร์ที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปมีค่าความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10,000 พัลส์ต่อรอบ

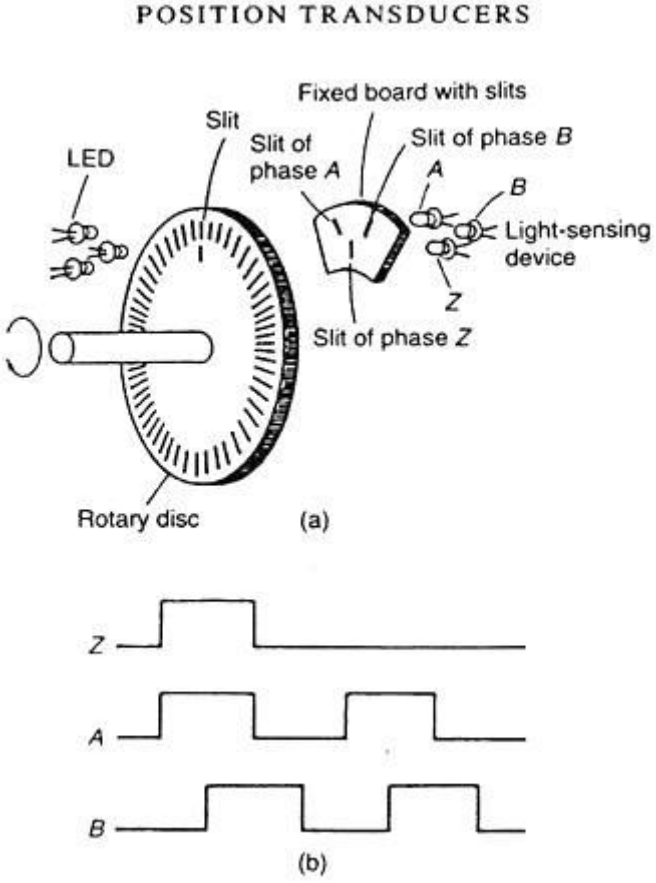
ในทางปฏิบัติเนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดียว ถ้าต้องการให้แสงที่ผ่านช่องไปยังเซ็นเซอร์เป็นเส้นตรงพร้อมๆ กัน (Collimation) ก็ทำได้โดยใช้เลนซ์หรือ พาราโบลิครีแฟลคเตอร์ โดยทั่ว ๆไปแล้วสัญญาณเอาท์พุตที่ออกจากเอนโค้ดเดอร์โดยตรงจะมีระดับไม่เพียงพอในการควบคุมหรือสำหรับการประมวลสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยายและแปลงรูปร่างลูกคลื่นสัญญาณต่อไว้ในตัวเอนโค้ดเดอร์ด้วยเสมอ สัญญาณลูกคลื่นที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ปกติแล้วจะเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมหรือรูปสัญญาณไซน์ ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการ รูปสัญญาณเหล่านี้สามารถทำให้ เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้โดยการต่อตัวคอมพาราเตอร์เข้ากับลิเนียร์แอมปลิไฟของ เอนโค้ดเดอร์ก็จะได้เอาท์พุตเป็นลูกคลื่นสี่เหลี่ยมตามต้องการ



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.17 แสดงรูปคลื่นเอาท์พุต (คลื่นไซน์) [6]

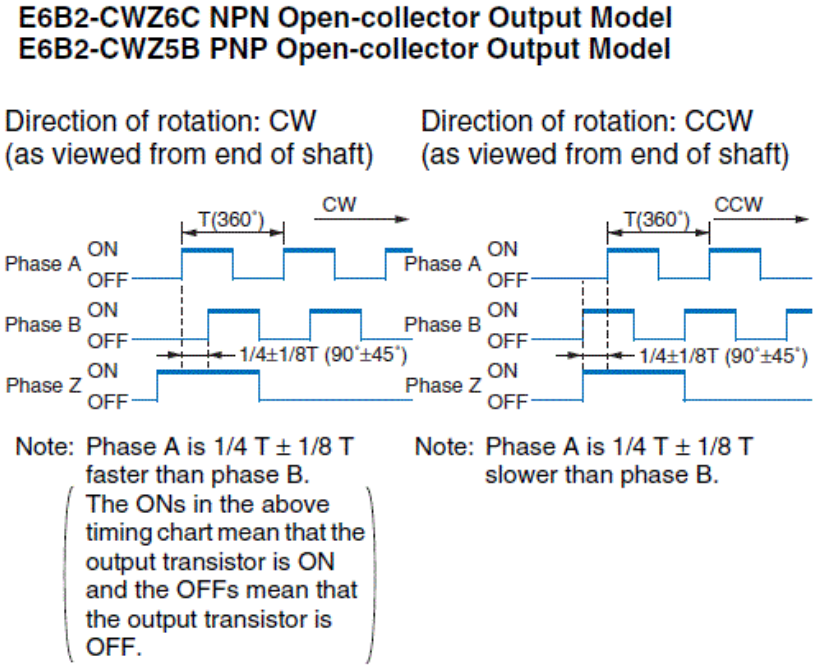


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.18 แผ่นจานโรตารี่ภายในเอนโค้ดเดอร์ [6]



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.19 แสดงรูปคลื่นเอาท์พุต (คลื่นสี่เหลี่ยม) [6]

จากรูปที่ 2.19 โครงสร้างของเอ้นโค้ดเดอร์จะประกอบด้วยตัวกำเนิดแสงและตัวจับแสงซึ่งถูกคั่นกลางด้วยแผ่นจานกลมๆ ที่มีการทำรูเจาะไว้รอบๆ แผ่น (จำนวนรูจะขึ้นอยู่กับ ความละเอียดของ Incremental Encoder) และหน้ากากแยกช่องของ สัญญาณพัลส์ A, B และ Z สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้จะ ประกอบด้วย 3 แทรค (Tracks) คือ A , B และ Z ดังพัลส์ที่เกิดจาก แทรค A และ B จะเกิดการเหลื่อมกันมีความต่างเฟสกัน 90 องศา เพื่อทำหน้าที่รายงานผลของความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้คอนโทรลเลอร์ดังนี้กรณีพัลส์ A เกิดขึ้นก่อน B คอนโทรลเลอร์จะรับรู้ว่ามอเตอร์กำลังหมุนด้วยทิศทางตามเข็มนาฬิกา แต่ถ้าหากพัลส์ B เกิดขึ้นก่อน A คอนโทรลเลอร์จะรับรู้ว่ามอเตอร์กำลังหมุนด้วยทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 2.20 ส่วนแทรค Z หรือพัลส์อ้างอิง จะเกิดขึ้น 1 พัลส์ในการหมุน 1 รอบ ทำหน้าใช้อ้างอิงตำแหน่งของโรตารี่ Incremental Encoder โดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้กับระบบเซอร์โวที่มีการควบคุมตำแหน่ง (Position Control) เนื่องจากไม่สามารถจำตำแหน่งเดิมได้กรณีที่มีการปิดเครื่องหรือไฟดับ



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.20 แสดงทิศทางการหมุนของ Incremental Rotary Encoder [7]

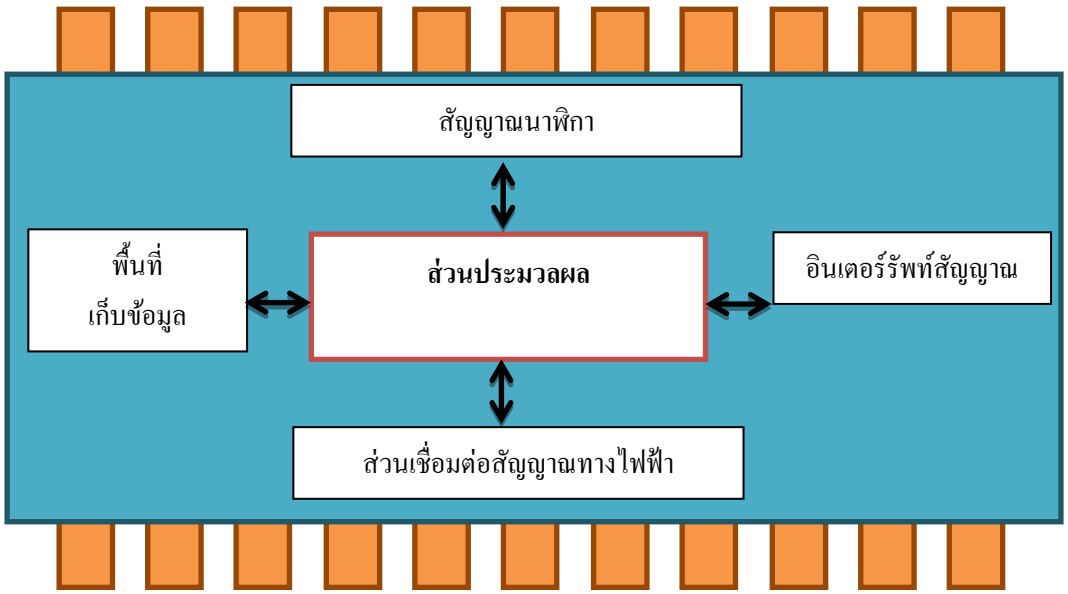
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [8],[9]

2.4.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เสมือนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้มีความสามารถในการทำงานมากขึ้น โดยสามารถเปลี่ยนแปลงลำดับการทำงานได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโปรแกรมภายในหน่วยความจำ ทำให้สามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้ารอบตัว เช่น ระบบอัตโนมัติของเครื่องซักผ้า หรือระบบสมองกลของรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีโครงสร้างหลักอยู่ 5 ส่วนใหญ่ ดังนี้

1) ส่วนประมวลผล
2) ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล
3) ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณทางไฟฟ้า
4) ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
5) ส่วนอินเตอร์รัพท์สัญญาณ

โครงสร้างหลักภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้ง 5 ส่วนจะทำงานสัมพันธ์กัน ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกันไปดังนี้



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.21 โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรเลอร์ [8]

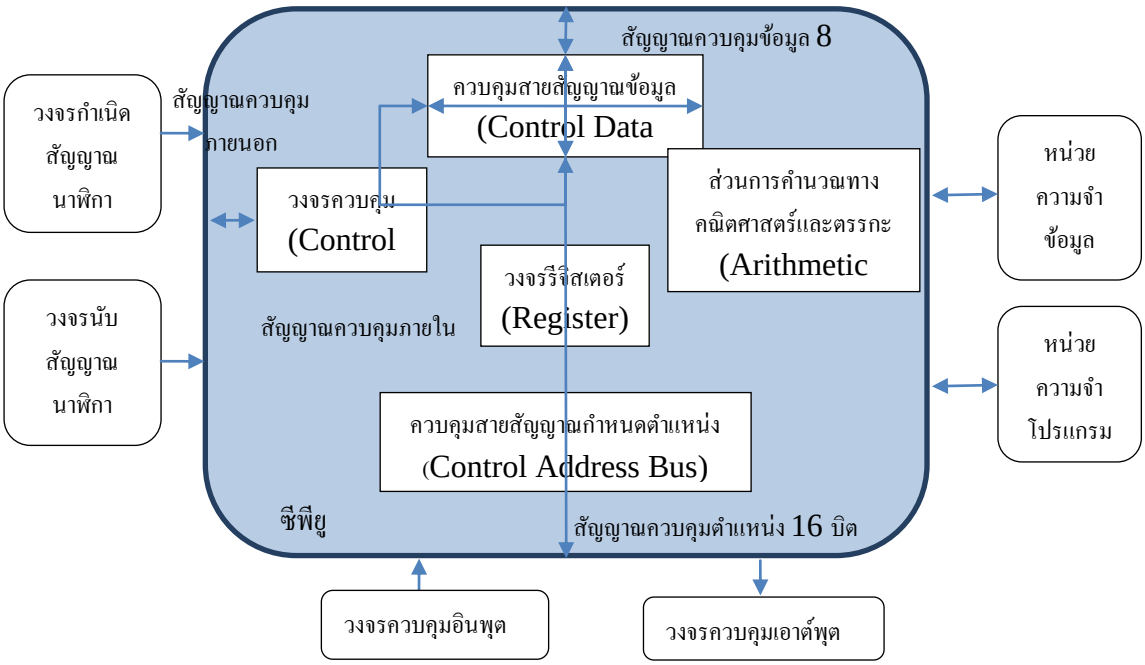
2.4.1.1 ส่วนประมวลผล

ส่วนประมวลผล (Processing Unit) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณทางคณิตศาสตร์ หรือการตัดสินใจแบบมีตรรกะ (Logic) ซึ่งจะมีการทำงานที่ซับซ้อน โดยลำดับในการทำงานของส่วนประมวลผลจะขึ้นอยู่กับการจัดลำดับคำสั่งในการทำงาน (Programming Code) ซึ่งจะบรรจุอยู่ภายในส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล

ไมโครโพรเซสเซอร์ (ซีพียู) ต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกเท่านั้น เช่น ไอซีหน่วยความจำ ไอซีอินเตอร์เฟสที่ทำหน้าที่ติดต่อและควบคุมอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา ทำให้ระบบคอมพิวเตอร์มีขนาดใหญ่ แต่จะสามารถต่อขยายระบบให้มีการทำงานเพิ่มขึ้นได้ ส่วนมากซีพียูประเภทนี้จะประยุกต์ใช้เป็นระบบของคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ เช่น เครื่องควบคุมขนาดเล็ก (Single Board) ไมโครคอมพิวเตอร์ (PC) เครื่องเวิร์กสเตชั่น มินิคอมพิวเตอร์ เป็นต้น โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยส่วนประมวลผลต่างๆ เช่น ส่วนควบคุม (Control Unit) ส่วนการคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (Arithmetic Logic Unit) ส่วนการถอดรหัส (Decode Unit) ส่วนการอ่านและตรวจสอบข้อมูล (Pre-Fetch Unit) ส่วนรีจิสเตอร์ และส่วนประกอบอื่นๆ

2.4.1.1.1 ซีพียูและไมโครคอนโทรเลอร์

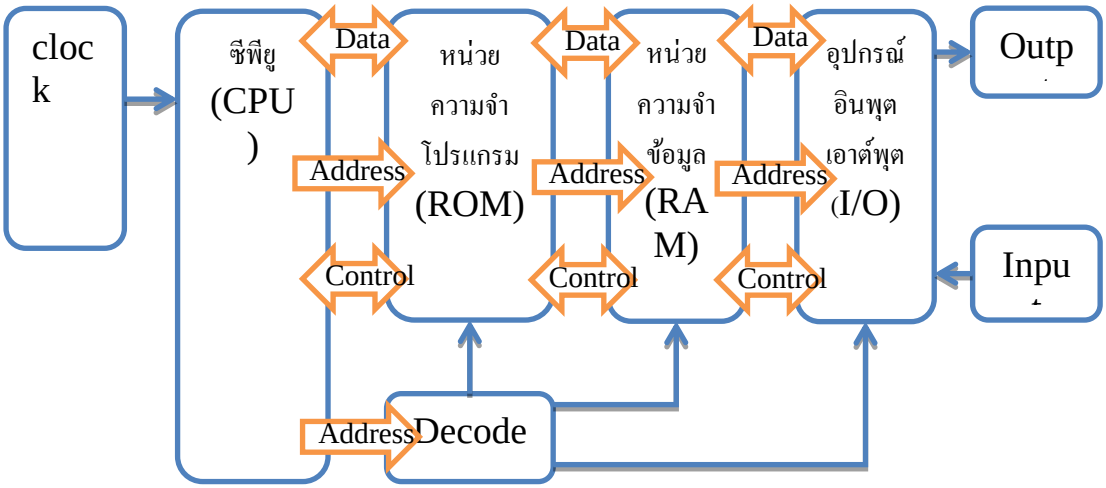
ข้อแตกต่างระหว่างซีพียูและไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ โครงสร้างภายใน อุปกรณ์และวงจรที่ต่อใช้งาน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.22 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ [9]

2.4.1.1.2 วงจรซีพียู

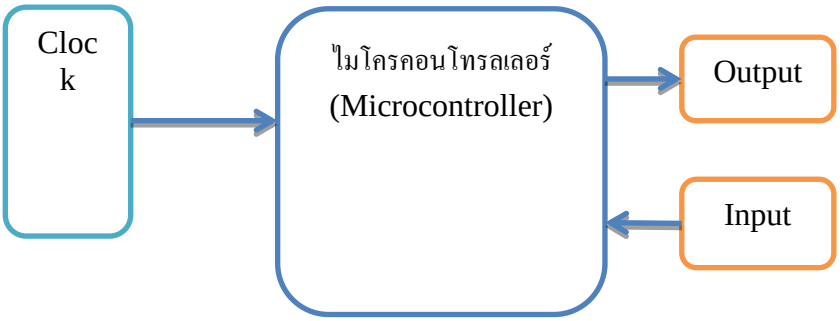
การต่อวงจรในการใช้งานของซีพียูประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ คือ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ไอซีหน่วยความจำโปรแกรมและข้อมูล วงจรเชื่อมต่อกับอินพุตและเอาต์พุต และวงจรเข้ารหัส (Decoder) ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.23 ไดอะแกรมของซีพียู [9]

2.4.1.1.3 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการต่อใช้งานไมโครคอนโทลเลอร์ การจัดเตรียมอุปกรณ์น้อยเพราะวงจรและอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานพื้นฐานได้รวมอยู่ภายในตัวเดียวแล้ว เช่น วงจรนาฬิกา หน่วยความจำโปรแกรมและข้อมูลเท่าที่จำเป็น ชุดวงจรเชื่อมต่ออินพุตและเอาต์พุต ยกเว้นต้องการต่อขยายระบบการทำงานให้มากขึ้น เช่น หน่วยความจำที่ต้องการเพิ่มวงจรและอุปกรณ์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.24 ไดอะแกรมของไมโครคอนโทรเลอร์ [9]

2.4.1.2 ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล

ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล (Memory Unit) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูล โดยแบ่งชนิดของพื้นที่เก็บข้อมูลเป็น 2 แบบ คือ แบบชั่วคราว (Random Access Memory : RAM) และแบบกึ่งถาวร (Erasable Programmable Read Only Memory : EPROM) ซึ่งพื้นที่เก็บข้อมูลแบบชั่วคราวนี้จะเป็นข้อมูลที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อยู่ตลอดและถูกใช้เป็นข้อมูลในการเก็บค่าตัวแปรในการคำนวณ (Variable) โดยข้อมูลประเภทนี้จะสูญหายเมื่อหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูลแบบกึ่งถาวรจะเป็นข้อมูลที่ใช้เก็บโปรแกรมคำสั่งการทำงาน (Code) ซึ่งข้อมูลประเภทนี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้แต่ต้องใช้กรรมวิธีพิเศษแต่ข้อมูลจะไม่สูญหายแม้ว่าจะหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วก็ตาม

2.4.1.3 ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณทางไฟฟ้า

ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณทางไฟฟ้า (Interface Unit) จะทำหน้าที่ติดต่อสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีอยู่ 2 แบบ คือ อินพุตและเอาต์พุตแบบดิจิตอล (Digital I/O) โดยจะรับข้อมูลและส่งข้อมูลด้วยสัญญาณทางดิจิตอล (Digital Signal) และแบบอินพุตและเอาต์พุตแบบอนาล็อก (Analog I/O) รับและส่งสัญญาณแบบสัญญาณทางอนาล็อก (Analog Signal) ซึ่งในการรับส่งสัญญาณของอนาล็อกจะมีอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์บางรุ่นเท่านั้น

2.4.1.4 ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

ส่วนเขื่อมสัญญาณนาฬิกาจะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณนาฬิกาโดยใช้วงจรที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เรียกว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit) ซึ่งมีอุปกรณ์หลัก คือ คริสตอล (X-TAL) มากำหนดช่วงเวลาในการประมวลผล (Execute Time) ของส่วนประมวลผล โดยจะมีผลต่อความเร็วในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้สัญญาณนาฬิกายังใช้กำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูลดิจิตอลแบบอนุกรม (Digital Series Communication Signal) และกำหนดความถี่ในส่วนของตัวตั้งเวลา (Timer) ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย

2.4.1.5 ส่วนอินเตอร์รัพท์สัญญาณ

ส่วนอินเตอร์รัพท์สัญญาณจะทำหน้าที่จัดลำดับความสำคัญในการทำงาน ในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานในลักษณะหลายงานพร้อมกัน (Multitasking) ซึ่งจะอำนวยความสะดวกอย่างมากในการเขียนโปรแกรมเพื่อรองรับการทำงานลักษณะนี้

2.4.2 ประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์

เราสามารถแบ่งประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามลักษณะการทำงานด้านการประมวลผลได้ 2 ประเภท คือ ประเภท RISC และ ประเภท CISC ซึ่งแต่ละประเภทจะมีการทำงานและโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันดังนี้

2.4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ แบบ RISC

ไมโครคอนโทรลเลอร์ แบบ RISC (Reduced Instruction Set Computer) มีโครงสร้างการทำงานที่มีจำนวนชุดคำสั่งน้อยและแต่ละคำสั่งจะทำงานแบบง่ายๆ แต่ความเร็วในการทำงานแต่ละคำสั่งจะสูงมาก ซึ่งถือเป็นข้อดี แต่มีข้อด้อย คือ ชุดคำสั่งจะทำงานอย่างง่ายๆ เช่น คำสั่งในการคำนวณจะมีแค่เพียงคำสั่งบวกและลบ

2.4.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC

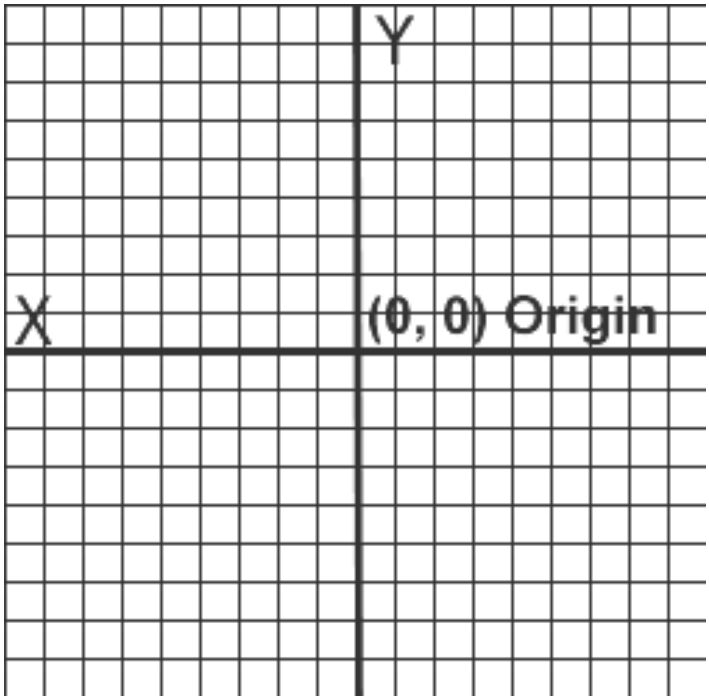
ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC (Complex Instruction Set Computer) มีโครงสร้างการทำงานมีชุดคำสั่งที่มากกว่าแบบ RISC ซึ่งแต่ละคำสั่งจะสามารถทำงานที่ซับซ้อนได้โดยใช้เพียงแค่ 1 คำสั่ง เท่านั้น เช่น ในการเขียนโปรแกรมคำสั่งคูณค่า 10 กับค่าตัวแปร ถ้าเราใช้ชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC เราจำใช้การวนคำสั่งบวกถึง 10 รอบ แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC จำสามารถทำสำเร็จภายในคำสั่งเดียว ซึ่งจะสะดวกมากในการทำงานที่มีการคำนวณที่ซับซ้อน หากจะเปรียบเทียบกันพบว่า ข้อดีของไมโครคอนโทรเลอร์แบบ CISC จะมีคำสั่งที่ทำงานได้ซับซ้อนมากกว่า แต่ข้อด้อย คือ ความเร็วในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC ต่อ 1 คำสั่งจะช้ากว่า เมื่อเทียบกับความเร็วในการทำงาน 1 คำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC

2.5 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน [10]

ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนเป็นระบบพิกัดที่ใช้การตั้งฉากระหว่างกันของแกน สามารถแบ่งออกเป็น 2 มิติ และ 3 มิติ ดังนี้

2.5.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 2 มิติ

ในระบบ 2 มิติจะมีสองแกน คือ แกน x และแกน y ดังรูปที่ 2.25

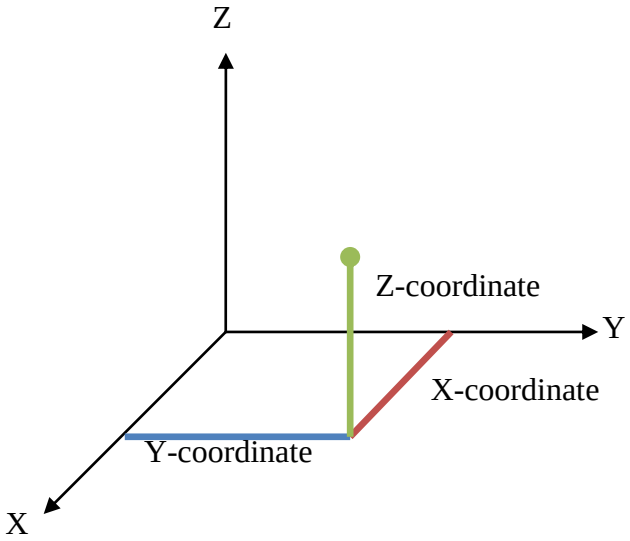


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.25 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 2 มิติ [10]

จุดตัดของแกนทั้งสองคือจุด (0,0) เรียกว่าจุดกำเนิด (Origin)

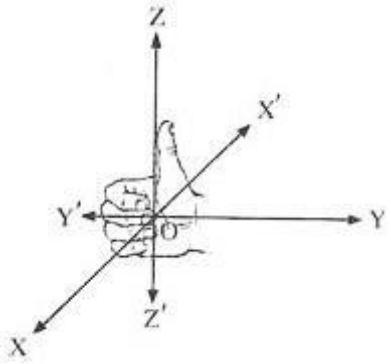
2.5.2 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 3 มิติ

ในระบบพิกัด 3 มิติจะมีสาม แกน คือ แกน x แกน y และแกน z ดังรูปที่ 2.26



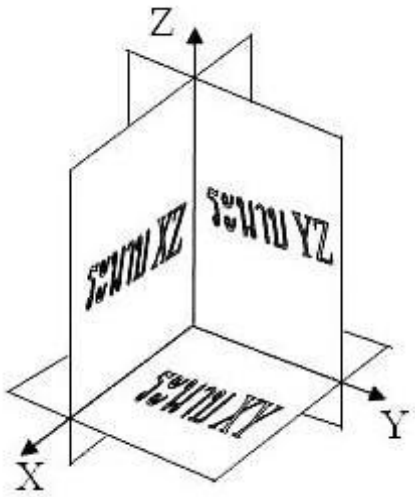
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.26 ระบบพิกัดคาร์เซียน 3 มิติ [10]

จุดตัดของแกนทั้งสาม คือ จุด (0,0,0) เรียกว่าจุดกำเนิด (Origin) การกำหนดทิศของแกนทั้ง สาม มี 2 ระบบ คือ ระบบมือขวา และระบบมือซ้าย ในหนังสือนี้และหนังสือส่วนใหญ่จะใช้ระบบ มือขวา ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.27 ระบบมือขวา [10]

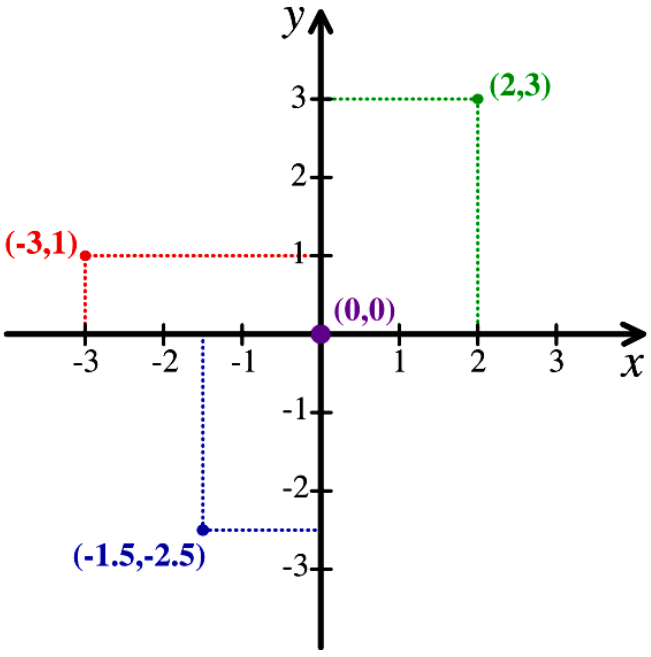
การกำหนดทิศของแกนต่างๆในระบบระบบมือขวา การกำหนดแกน x , y และ z ในระบบมือ ขวา ทำได้โดยแบมือออกให้นิ้วทั้งสี่ของมือขวาชี้ไปทางแกน x แล้วกำมือโดยให้นิ้วทั้งสี่วนไปทาง แกน y นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศของแกน z ดังนั้นแกน x , y และ z ในระบบมือขวา สำหรับระนาบในระบบพิกัดฉาก 3 มิติมี 3 ระนาบ คือ ระนาบ xy ระนาบ yz ระนาบ xz ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.28 ระนาบในระบบพิกัดฉาก [10]

2.5.3 การบอกตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 2 มิติ

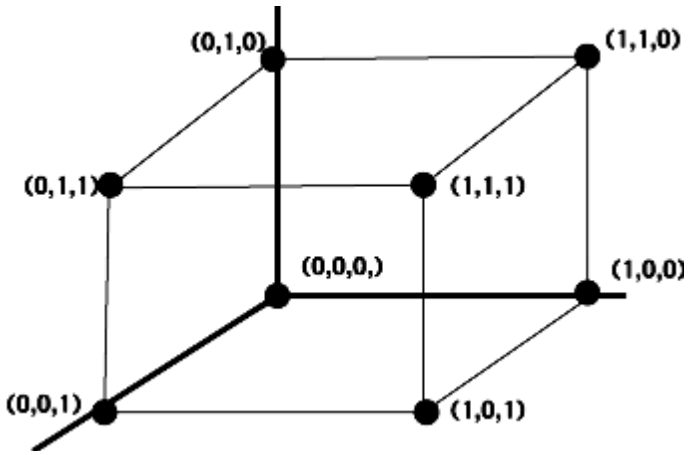
จะบอกด้วยคู่ลำดับ (x, y) เช่น จุด (2,3) ,(-3,1) และ (-1.5,-2.5) ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.29 พิกัดของจุดต่างๆ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 2 มิติ [10]

2.5.4 การบอกตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ

การบอกพิกัดด้วยพิกัด (x, y, z)



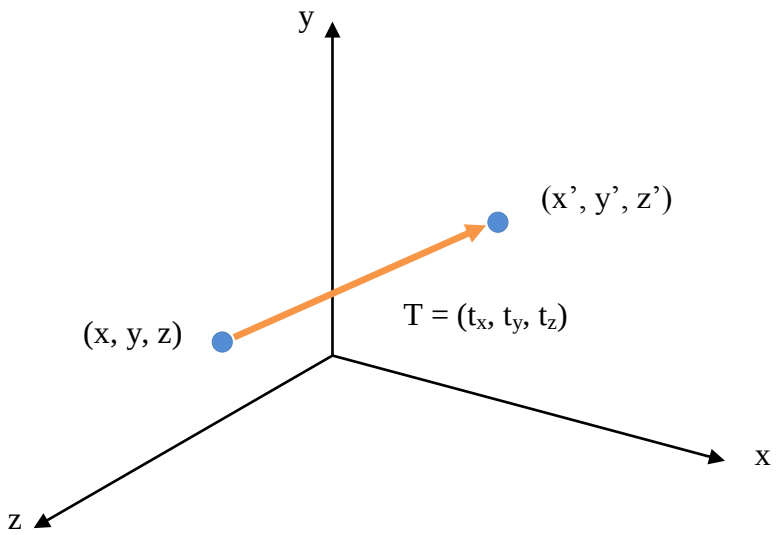
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.30 พิกัดของจุดต่างๆ ที่อยู่ตามมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีความยาวด้านละหนึ่งหน่วย [10]

2.6 การแปลงทางเรขาคณิตศาสตร์สำหรับสร้างแบบจำลองวัตถุ 3 มิติ [11]

2.6.1 การเลื่อนตำแหน่ง 3 มิติ (3D Translation)

การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุไปในแนวเส้นตรงจากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งหนึ่ง ที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง จุดของวัตถุจึงเลื่อนไปด้วยขนาดที่เท่ากัน โดยการบวกด้วยระยะการเลื่อน ที่เรียกว่า ทรานสเลชันเวกเตอร์แบบ 3 มิติ (Translation Vector) ทำให้ได้วัตถุใหม่ที่มีรูปร่างเหมือนเดิม แต่เปลี่ยนตำแหน่งไป

ตำแหน่งใน 3 มิติ แสดงได้ด้วยพิกัดโฮโมจีเนียสเป็น 4 คอลัมน์เวกเตอร์ ดังนั้น การแปลงทางเรขาคณิตจะเป็นเมตริกซ์แบบ 4x4 ตำแหน่ง P (x, y, z) ใน 3 มิติ จะแปลงไปสู่ตำแหน่ง P' (x', y', z') โดยการบวกระยะการเลื่อน t_x, t_y, t_z เข้ากับพิกัดเดิม ดังรูปที่ 2.31



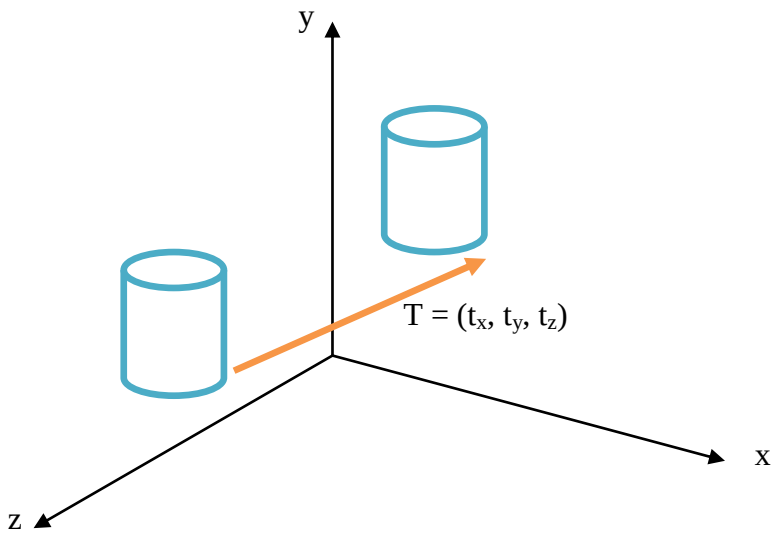
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.31 การเลื่อนจุดแบบ 3 มิติ ด้วยทรานสเลชันเวกเตอร์ T = (t_x,t_y,t_z) [11]

สามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ตำแหน่ง P และ P' เป็นพิกัดโฮโมจีเนียสเป็น 4 คอลัมน์เวกเตอร์ และทรานสเลชันโอเปอเรเตอร์ T ก็เป็นเมตริกซ์ 4x4

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

$$P' = T \cdot P \tag{2.2}$$

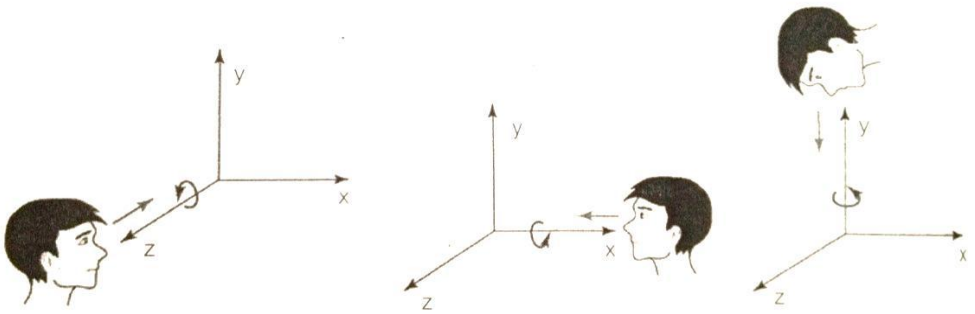
สำหรับการเลื่อนตำแหน่งใน 3 มิติ จะทำการเลื่อนตำแหน่งในแต่ละแกนแล้วสร้างวัตถุขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งใหม่ เช่น การเลื่อนวัตถุ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.32 จะเลื่อนแต่ละจุดในแต่ละด้านแล้วแสดงวัตถุนั้นที่ตำแหน่งใหม่



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.32 การเลื่อนตำแหน่งของวัตถุ 3 มิติ ด้วยทรานสเลชันเวกเตอร์ T [11]

2.6.2 การหมุน 3 มิติ (3D Rotation)

การหมุนวัตถุ 3 มิติ ใดๆ จะต้องกำหนดแกนอ้างอิงสำหรับการหมุนด้านที่เป็นบวกของแกนนั้นไปยังจุดกำเนิด สำหรับการหมุนที่มีมุมเป็นบวกจะหมายถึงการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise: CWW) รอบแกนนั้น ส่วนการหมุนที่มีมุมเป็นลบจะเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW)



ก) หมุนรอบแกน z - ข) หมุนรอบแกน x ค) หมุนรอบแกน y

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.33 การหมุนที่มุมเป็นบวกเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองจากด้านบวกของแกนไปหาจุดกำเนิด [11]

2.6.2.1 การหมุนรอบแกน z

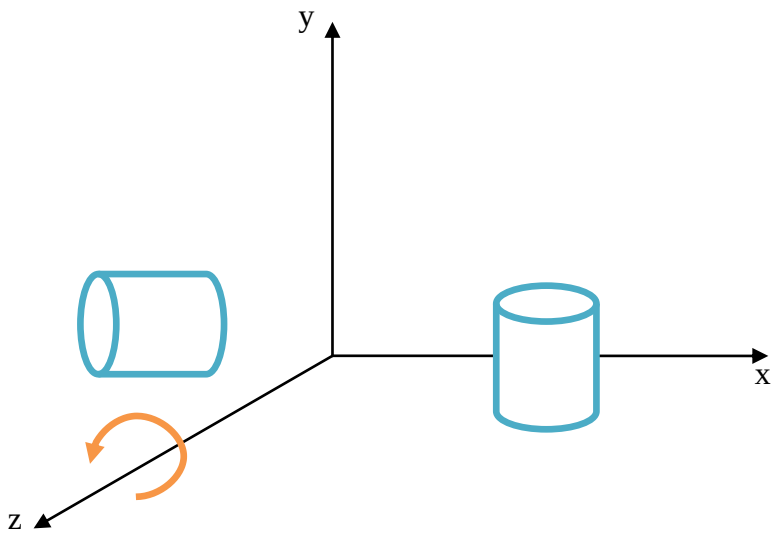
สมการการหมุน 2 มิติ รอบแกน z สามารถขยายเป็นการหมุน 3 มิติ คือ

$$x' = x\cos\theta - y\sin\theta$$
$$y' = x\sin\theta + y\cos\theta$$
$$z' = z$$

ค่าพารามิเตอร์ θ กำหนดมุมของการหมุนรอบแกน z และค่าของพิกัด z จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการแปลงนี้ เมตริกซ์การหมุนรอบแกน z จะเป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$P' = R_z(\theta)P \quad (2.4)$$



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.34 แสดงการหมุนวัตถุรอบแกน z [11]

2.6.2.2 การหมุนรอบแกน x

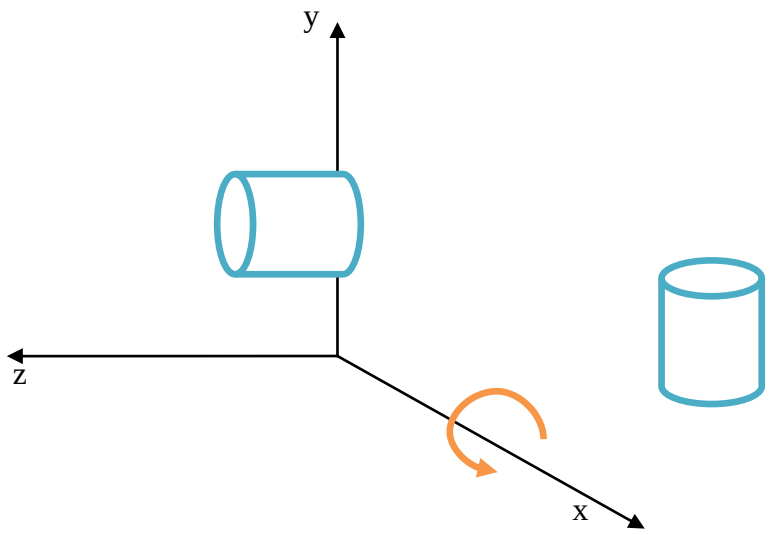
สำหรับการหมุนรอบแกน x ได้จากการหมุนเลื่อนพิกัดจากการหมุนรอบแกน z โดยที่เปลี่ยน x เป็น y , y เป็น z และ z เป็น x ซึ่งได้สมการเป็น

$$y' = y\cos\theta - z\sin\theta$$
$$z' = y\sin\theta + z\cos\theta$$
$$x' = x$$

ค่าพารามิเตอร์ θ กำหนดมุมของการหมุนรอบแกน x และค่าของพิกัด x จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการแปลงนี้ เมตริกซ์การหมุนรอบแกน x จะเป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$P' = R_x(\theta)P \quad (2.6)$$



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.35 แสดงการหมุนวัตถุรอบแกน x [11]

2.6.2.3 การหมุนรอบแกน y

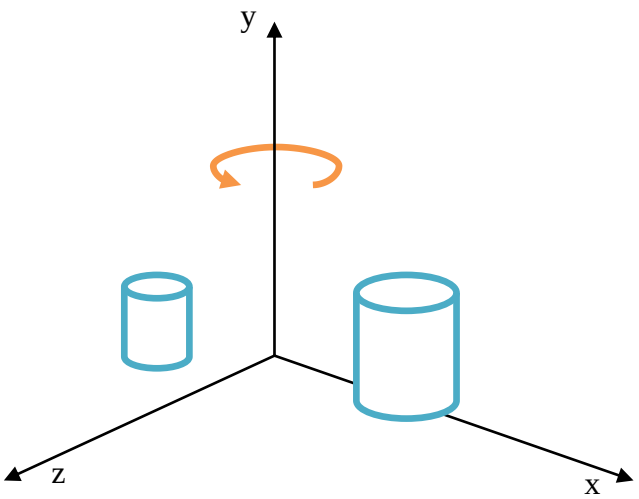
สำหรับการหมุนรอบแกน y ได้จากการหมุนเลื่อนพิกัดจากการหมุนรอบแกน x โดยที่เปลี่ยน y เป็น z z เป็น x และ x เป็น y ซึ่งได้สมการเป็น

$$z' = z\cos\theta - x\sin\theta$$
$$x' = z\sin\theta + x\cos\theta$$
$$y' = y$$

ค่าพารามิเตอร์ θ กำหนดมุมของการหมุนรอบแกน y และค่าของพิกัด y จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการแปลงนี้ เมตริกซ์การหมุนรอบแกน y จะเป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$P' = R_y(\theta)P \quad (2.8)$$



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.36 แสดงการหมุนวัตถุรอบแกน y [11]

2.7 ภาพ 3 มิติ [12]

2.7.1 ความหมายของภาพ 3 มิติ

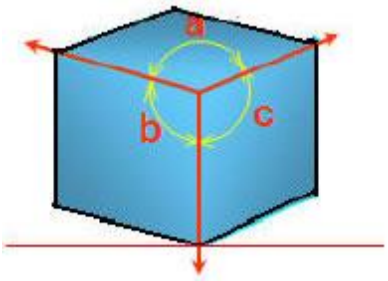
ภาพ 3 มิติ หมายถึง การเขียนภาพโดยการนำพื้นผิวแต่ละด้านของชิ้นงานมาเขียนประกอบกันเป็นรูปเดียว ทำให้สามารถมองเห็นลักษณะรูปร่าง พื้นผิว ได้ทั้งความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นงาน ทำให้ภาพ 3 มิติ มีลักษณะคล้ายกับการมองชิ้นงานจริง ภาพ 3 มิติ ที่เขียนในงานเขียนแบบมีหลายประเภท แต่ละประเภทก็มีความแตกต่างกันในการวางมุมการเขียนและขนาดของชิ้นงานจริง กับขนาดชิ้นงานในการเขียนแบบซึ่งผู้เขียนแบบต้องศึกษาลักษณะของภาพ 3 มิติ แต่ละประเภทต่างๆ ให้เข้าใจ เพื่อสามารถปฏิบัติการเขียนแบบได้อย่างถูกต้อง

2.7.2 ประเภทของภาพ 3 มิติ

ภาพ 3 มิติ สามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนี้

2.7.2.1 ภาพ 3 มิติ แบบ Trimetric

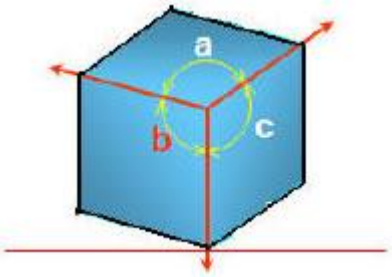
เป็นภาพ 3 มิติ ที่มีความสวยงาม และลักษณะคล้ายของจริงมากที่สุดและเป็นภาพ
ที่ง่ายต่อการอ่านแบบเพราะเป็นภาพที่เขียนได้ยาก เนื่องจากมุมที่ใช้เขียนเอียง 12 องศา และ 23 องศา และอัตราความยาวของแต่ละด้านไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.37 ลักษณะของภาพ Trimetric [12]

2.7.2.2 ภาพ 3 มิติ แบบ Diametric

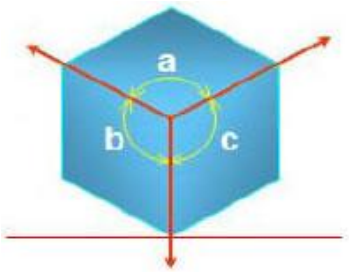
เป็นภาพ 3 มิติ ที่มีลักษณะคล้ายกับภาพถ่ายและง่ายต่อการอ่านแบบ แต่ไม่ค่อยนิยมในการเขียนแบบเพราะเป็นภาพที่เขียนได้ยาก เนื่องจากมุมที่ใช้เขียน เอียง 7 องศา และ 42 องศา และขนาดความหนาของภาพที่เขียนจะลดขนาดลงครึ่งหนึ่งของความหนาจริง ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.38 ลักษณะของภาพ Diametric [12]

2.7.2.3 ภาพ 3 มิติ แบบ Isometric

เป็นภาพ 3 มิติ ที่นิยมเขียนมาก เพราะภาพที่เขียนง่าย เนื่องจากภาพมีมุมเอียง 30 องศา ทั้งสองข้างเท่ากัน และขนาดความยาวของภาพทุกด้านจะมีขนาดเท่าขนาดงานจริง ภาพที่เขียนจะมีขนาดใหญ่มากทำให้เปลืองเนื้อที่กระดาษ ดังรูปที่ 2.39

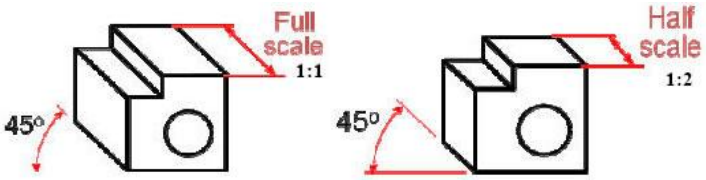


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.39 ลักษณะของภาพ Isometric [12]

2.7.2.4 ภาพ 3 มิติ แบบ Oblique

เป็นภาพ 3 มิติ ที่นิยมเขียนมาก สำหรับงานที่มีรูปร่างเป็นส่วนโค้ง หรือรูกลม เพราะ

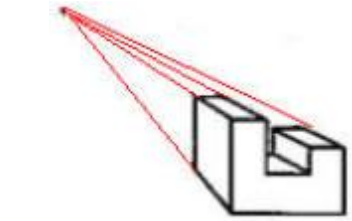
สามารถเขียนได้ง่ายและรวดเร็วเนื่องจากภาพ Oblique จะวางภาพด้านหนึ่งอยู่ในแนวระดับเอียงทำมุมเพียงด้านเดียว โดยเขียนเป็นมุม 45 องศา สามารถเขียนเอียงได้ทั้งด้านซ้ายและขวาความหนาของงานด้านเอียงขนาดลดลงครึ่งหนึ่ง ภาพ Oblique มี 2 แบบ คือ แบบคาวาเลียร์ (Cavalier) และแบบคาบิเนต (Cabinet) ดังรูปที่ 2.40



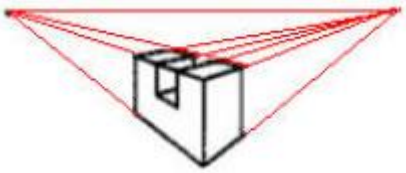
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.40 ลักษณะของภาพ 3 มิติ แบบ Cavalier และแบบ Cabinet [12]

2.7.2.5 ภาพ 3 มิติ แบบทัศนมิติ (Perspective)

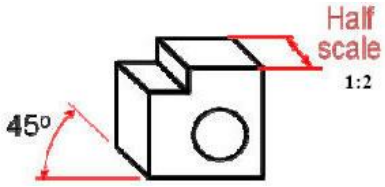
เป็นภาพ 3 มิติ ที่มีมุมในลักษณะการมองไกล โดยจะเขียนภาพเข้าสู่จุดรวมของสายตา การเขียนภาพ 3 มิติ ชนิดนี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ดังรูปที่ 2.41



แบบ 1 จุด



แบบ 2 จุด



แบบ 3 จุด

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.41 ภาพ 3 มิติ แบบทัศนมิติชนิดต่างๆ [12]

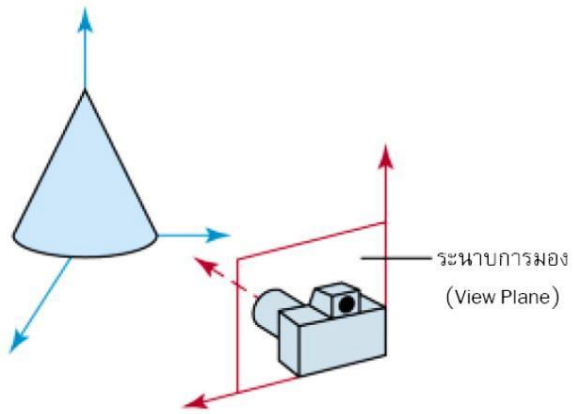
2.8 หลักการมองภาพ 3 มิติ [11]

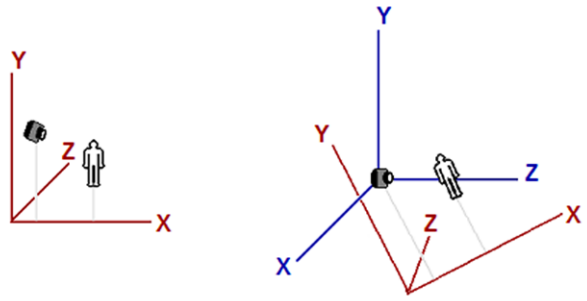
2.8.1 ภาพรวมแนวคิดการมอง 3มิติ

ภาพรวมแนวคิดการมอง 3 มิติ บนจอภาพ แต่ละวัตถุบนจอภาพถูกกำหนดเป็นชุดของพื้นผิวปิดที่ประกอบรวมกันเป็นวัตถุ ในบางแอปพลิเคชั่นเราอาจจะต้องกำหนดข้อมูลโครงสร้างภายในของวัตถุเพิ่มเติมจากโปรแกรมย่อยสำหรับการสร้างมุมมองของพื้นผิวของวัตถุแล้ว ในบางครั้งกราฟิกแพ็คเกจจะต้องมีชุดคำสั่งในการแสดงโครงสร้างภายในหรือมุมมองของภาคตัดขวางของวัตถุทึบ ฟังก์ชันการมองจะแสดงรายละเอียดของวัตถุเป็นชุดของขั้นตอนที่การฉายภาพมุมมองของวัตถุเพื่อกำหนดลงบนอุปกรณ์แสดงผล มีหลายขั้นตอนในการมองภาพ 3 มิติ เช่น คำสั่งการขริบภาพ (Clipping) ที่เหมือนกับการมองภาพ 2 มิติ แต่ในการมองภาพ 3 มิติ มีงานบางอย่างที่ไม่ได้แสดงในการมองภาพ 2 มิติ ยกตัวอย่างเช่น ต้องใช้คำสั่งของการฉายภาพเพื่อแปลงจอภาพไปบนผิวระนาบ ต้องมีการกำหนดภาพการมองเห็น และสำหรับการแสดงผลให้สมจริงจะต้องมีการใช้การตกกระทบของแสง และใช้คุณสมบัติของพื้นผิวประกอบด้วย

2.8.1.1 การมองภาพ 3 มิติ

การแสดงจอภาพ 3 มิติ ในขั้นแรกเราต้องกำหนดการอ้างอิงพิกัดสำหรับพารามิเตอร์การมองหรือที่เรียกว่ากล้องการอ้างอิงพิกัดนี้จะกำหนดตำแหน่งและแนวสำหรับระนาบการมอง (View Plane หรือ Projection Plane) ที่สัมพันธ์กับกล้องถ่ายภาพ หลังจากนั้นรายละเอียดของวัตถุจะถูกแปลงไปยังพิกัดที่อ้างอิงการมอง แล้วจึงฉายภาพนั้นไปบนระนาบเราสามารถสร้างมุมมองของวัตถุบนอุปกรณ์แสดงผลในแบบของโครงเส้น (Outline) ได้หรือจะประยุกต์ใช้เทคนิคแสงและเงารวมทั้งการเรนเดอร์พื้นผิวเพื่อให้ภาพเกิดเป็นภาพสมจริงมากยิ่งขึ้นก็ได้

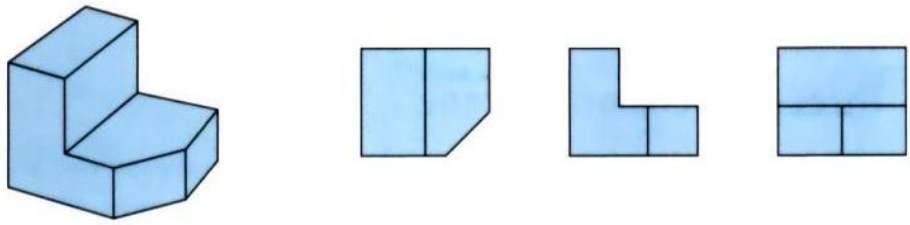




รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.42 การมองภาพ 3 มิติ [11]

2.8.1.2 การฉายภาพ (Projection)

สิ่งที่แตกต่างจากกล้องถ่ายภาพ คือ สามารถเลือกวิธีการฉายภาพภาพลงบนระนาบการมองวิธีการหนึ่งที่สามารถให้รายละเอียดของวัตถุทึบบนระนาบแสดงผล คือ การฉายภาพพื้นผิวของวัตถุแบบขนานซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า การฉายภาพแบบขนาน (Parallel Projection) ที่ใช้กันบ่อยในการวาดทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมเพื่อแสดงวัตถุด้วยชุดของมุมมองเพื่อแสดงวัตถุได้อย่างเที่ยงตรง



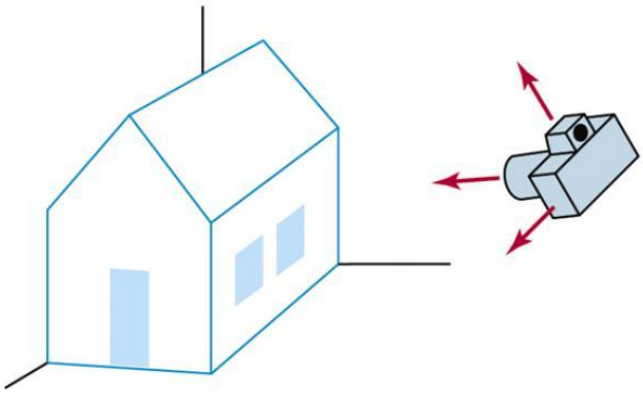
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.43 การฉายภาพ [11]

วิธีการอื่นในการสร้างภาพ 3 มิติ คือการฉายภาพไปยังระนาบการมองตามเส้นทางที่เบนเข้าหากัน การฉายภาพนี้เรียกว่า การฉายภาพแบบทัศนมิติ (Perspective Projection) การฉายภาพแบบนี้ทำให้วัตถุที่มีขนาดเท่ากันแต่อยู่ตำแหน่งที่ไกลจากตำแหน่ง การมองจะแสดงขนาดที่เล็กกว่าวัตถุที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งการมองภาพที่สร้างจากการฉายภาพแบบนี้จะให้ความสมจริงมากกว่า เนื่องจากเป็นวิธีเดียวกับการการสร้างภาพของกล้องและตาของเรา ดังรูปที่ 2.44 จะแสดงเส้นขนานตามทิศทางการมองที่ปรากฏเป็นเส้นทางที่เบนเข้าหากันในเบื้องหลัง และเครื่องบินในเบื้องหลังเล็กกว่าที่ขึ้นในเบื้องหน้า

รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.44 ภาพ 3 มิติ [11]

2.8.2 หลักการมองภาพ 3 มิติ

ขั้นตอนการสร้างภาพคอมพิวเตอร์กราฟิกในมุมมองของภาพ 3 มิติ คล้ายกับขั้นตอนของการถ่ายภาพ ขั้นแรกต้องเลือกตำแหน่งการมองให้สัมพันธ์กับตำแหน่งกล้อง เลือกตำแหน่งการมองตามสิ่งที่ต้องการแสดงหน้าต่างมุมมองหน้า มุมมองหลัง มุมมองข้าง มุมมองบน และมุมมองล่างของภาพ และยังสามารถเลือกตำแหน่งกึ่งกลางของกลุ่มวัตถุหรือภายในวัตถุชิ้นเดียว เช่น ตึก หรือโมเลกุล ก็ได้หลังจากนั้นตัดสินใจเลือกแบบการวางกล้อง ดังรูปที่ 2.45 ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการกำหนดจุดของกล้องจากตำแหน่งการมองที่ต้องการ ขั้นสุดท้ายเมื่อกดชัตเตอร์ จะมีการตัดส่วนภาพให้มีขนาดตามวินโดว์ขริบภาพที่เลือกซึ่งสัมพันธ์กับช่องรับแสง หรือประเภทของเลนส์กล้อง และมีการป้องกันฟิล์มไม่ให้
โดนแสง



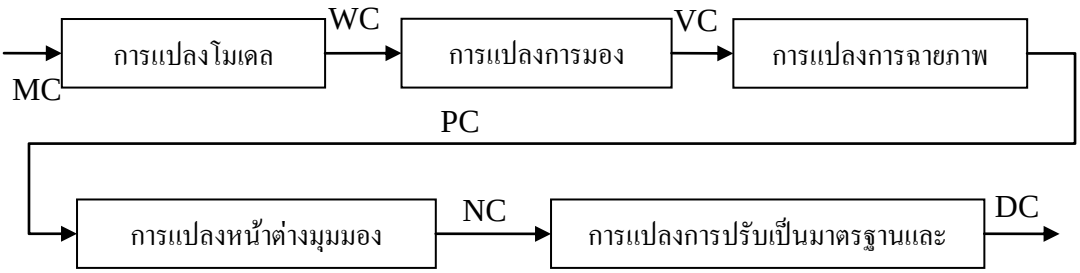
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.45 การมองภาพ 3 มิติ [11]

อย่างไรก็ตามให้คิดไว้เสมอว่าสามารถนำกล้องถ่ายรูปติดตัวไปที่ไหนไกล ๆ ได้เท่านั้น แต่สำหรับโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กราฟิกแล้ว จะมีความยืดหยุ่น และมีทางเลือกมากมายในการสร้างหน้าต่างมุมมองของภาพที่มากกว่าที่ได้จากกล้อง จะสามารถเลือกการฉายภาพแบบขนานหรือแบบทัศนมิติก็ได้ หรือจะกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการทิ้งออกไป หรือจะย้ายระนาบการฉายภาพออกจากตำแหน่งของกล้องก็ได้

ในการดำเนินการกับการมองภาพ 3 มิติ ใช้หลักการเหมือนกับการมองภาพ 2 มิติ มุมมองของภาพ 2 มิติ ถูกนำมาใช้กำหนดตำแหน่งมุมมองการฉายภาพ 3 มิติ บนอุปกรณ์แสดงผล วินโดว์ขริบภาพ 2 มิติ ถูกนำมาใช้เลือกมุมมองที่จะถูกทาบไปยังมุมมอง เมื่อกำหนดวินโดว์แสดงผลในพิกัดของจอภาพ จะทำแค่เพียงในแอพพลิเคชัน 2 มิติ เท่านั้น ทั้งวินโดว์ขริบภาพหน้าต่างมุมมอง และวินโดว์แสดงผลโดยปกติจะกำหนดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขอบขนานกับแกนของพิกัดหลักการมองภาพ 3 มิติ อย่างไรก็ตาม ในการมองภาพ 3 มิติ นั้น วินโดว์ขริบภาพถูก

กำหนดตำแหน่งอยู่บนระนาบการมอง และภาพถูกขริบออกและล้อมรอบด้วยสิ่งว่างเปล่า ซึ่งกำหนดโดยชุดของระนาบการขริบ (Clipping Planes) ตำแหน่งการมอง ระนาบการมอง วินโดว์ขริบภาพ และระนาบการขริบทั้งหมดนี้ถูกกำหนดอยู่ภายในกรอบอ้างอิงของ

รูปต่อไปแสดงขั้นตอนทั่วไปในการสร้างและแปลงภาพ 3 มิติ ไปยังพิกัดของอุปกรณ์ เริ่มต้นที่การแปลงแบบจำลองของพิกัดแบบจำลอง (MC) ไปเป็นพิกัดทางกายภาพ (WC) หลังจากนั้นทำการแปลงทางมุมมองให้เป็นพิกัดของมุมมอง (VC) พิกัดของมุมมองนี้จะกำหนดพารามิเตอร์ของการมองรวมทั้งตำแหน่งและแนวของระนาบการฉายภาพ (ระนาบการมอง) ซึ่งเหมือนกับระนาบของฟิล์มในกล้องถ่ายรูปวินโดว์ตัดภาพ 2 มิติ ที่สัมพันธ์กับเลนส์ถูกกำหนดบนระนาบการฉายภาพ และมีการสร้างพื้นที่ขริบภาพ 3 มิติ หลักการมองภาพ 3 มิติ พื้นที่ตัดภาพนี้เรียกว่า ปริมาตรการมอง (Viewing Volume) โดยมีรูปร่างและขนาดขึ้นกับมิติของวินโดว์ตัดภาพ ประเภทการฉายภาพที่เราเลือก และขีดจำกัดตำแหน่งตามทิศทางการมอง การฉายภาพจะดำเนินการเพื่อแปลงพิกัดการมองของจอภาพเป็นตำแหน่งพิกัดบนระนาบการฉายภาพ (PC) วัตถุจะถูกทาบ ไปยังพิกัดที่ปรับเป็นมาตรฐาน (NC) และทุกส่วนของจอภาพที่อยู่ภายนอกของปริมาตรการมองจะถูกขริบออกไป การดำเนินการขริบสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการแปลงพิกัดของอุปกรณ์ (จากพิกัดทางกายภาพไปเป็นพิกัดที่ปรับ
เป็นมาตรฐาน)



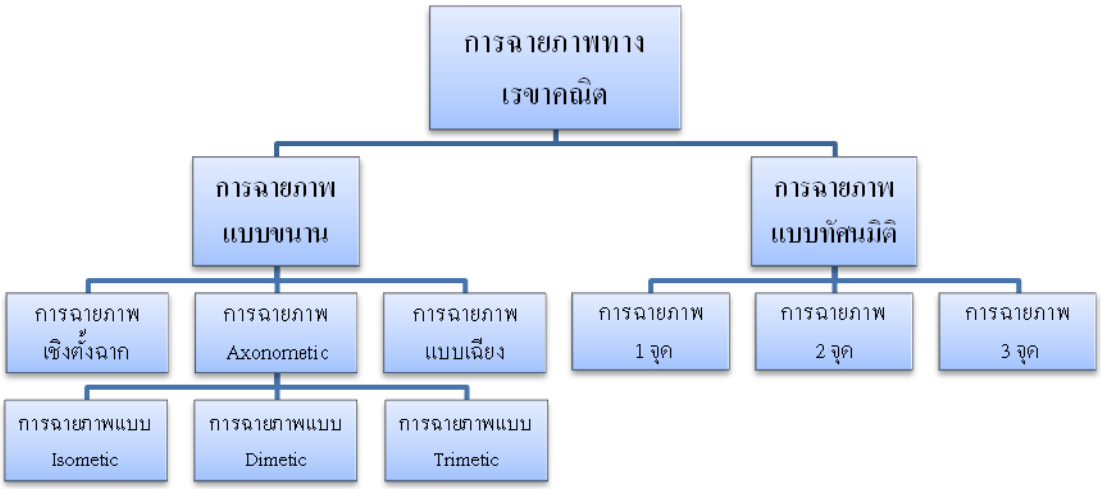
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.46 ขั้นตอนการสร้างและแปลงภาพ 3 มิติ ไปยังพิกัด [11]

เช่นเดียวกับการมองภาพ 2 มิติ ขีดจำกัดของหน้าต่างมุมมอง (Viewport) มีผลต่อพิกัดที่ปรับเป็นมาตรฐาน หรือพิกัดของอุปกรณ์ ในการพัฒนากระบวนการของหน้าต่างมุมมอง สมมุติว่าหน้าต่างมุมมองที่กำหนดในพิกัดของอุปกรณ์ และในพิกัดที่ปรับเป็นมาตรฐาน จะถูกโอนไปเป็นพิกัดของหน้าต่างมุมมองตามขั้นตอนการตัดภาพ ยังมีงานอีกเล็กน้อยต้องการ เช่น การกำหนดพื้นผิวการ

มองเห็น และการการเรนเดอร์พื้นผิว ขั้นตอนสุดท้าย คือ การทาบพิกัดของหน้าต่างมุมมองไปยังพิกัดของอุปกรณ์ภายในวินโดว์แสดงผล

2.8.3 การฉายภาพ (Projection)

ในการมองภาพ 3 มิติ หลังจากการแปลงพิกัดการมองวัตถุจะถูกฉายลงบนระนาบการมอง การฉายภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญในการแสดงภาพ 3 มิติ ให้เราเห็น ปกติแล้วในกราฟิกแพ็คเกจจะสนับสนุนการฉายภาพ ทั้ง 2 แบบคือ แบบขนาน (Parallel) แบบทัศนมิติ (Perspective) ประเภทการฉายภาพจะเป็นดังรูปที่ 2.27

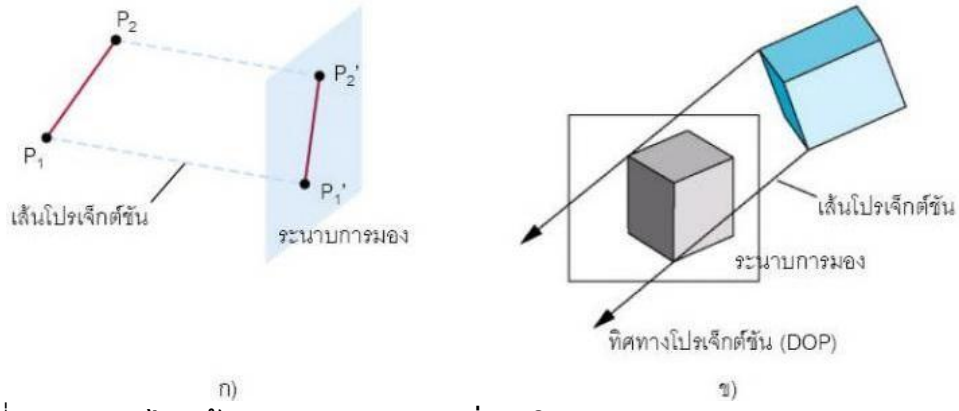


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.47 ประเภทการฉายภาพ [11]

2.8.3.1 การฉายภาพแบบขนาน (Parallel Projection)

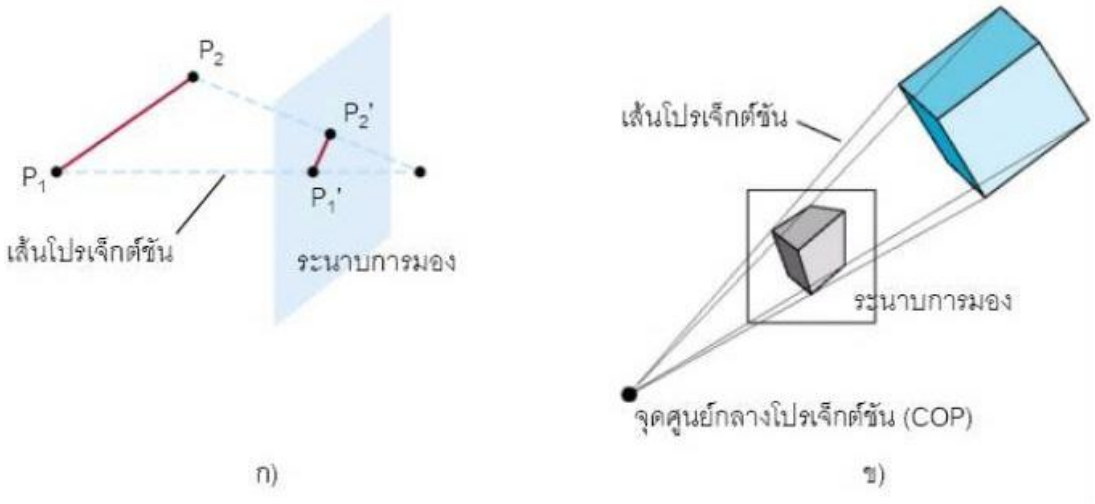
ในการฉายภาพแบบขนานนั้น ตำแหน่งพิกัดจะถูกโอนไปยังระนาบการมองตามเส้น

ขนาน รูป ก) แสดงถึงการฉายภาพแบบขนานของเส้นตรงที่กำหนดด้วยพิกัดของจุดปลาย P_1 และ P_2 รูป ข) เป็นการฉายภาพแบบขนานของรูปลูกบาศก์ ลงบนระนาบการมอง การฉายภาพแบบนี้จะรักษาอัตราส่วนของวัตถุให้คงเดิมไว



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.48 การการฉายภาพแบบขนาน [11]

สำหรับการฉายภาพแบบทัศนมิตินั้น ตำแหน่งวัตถุจะถูกโอนไปยังพิกัดของการฉายภาพตามเส้นที่ลู่เข้าสู่จุดด้านหลังระนาบการมอง ตัวอย่างของการฉายภาพแบบทัศนมิติสำหรับเส้นตรงที่กำหนดด้วยพิกัดของจุดปลาย P_1 และ P_2 แสดงดังรูป ก) รูป ข) เป็นการฉายภาพแบบทัศนมิติของรูปลูกบาศก์ลงบนระนาบการมอง ข้อที่แตกต่างจากแบบขนานก็คือ การฉายภาพแบบทัศนมิตินี้จะไม่รักษาอัตราส่วนของวัตถุแต่ภาพจะมีความเหมือนจริงมากกว่า เนื่องจากระยะวัตถุที่แสดงออกมานั้นมีขนาดเล็กลง การฉายภาพแบบทัศนมิตินี้มี 3 แบบ คือ 1 จุด 2จุด และ 3 จุด

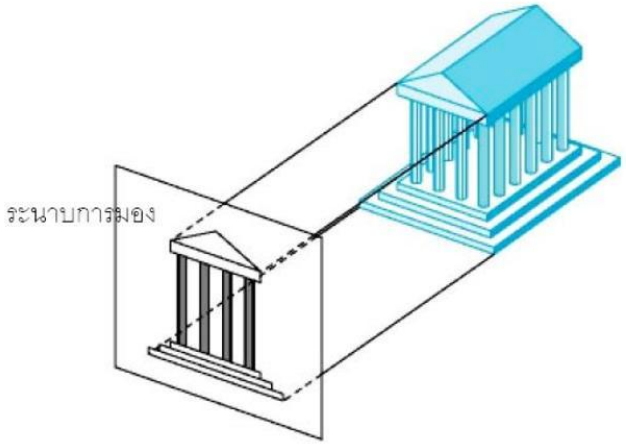


รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.49 การฉายภาพแบบขนาน [11]

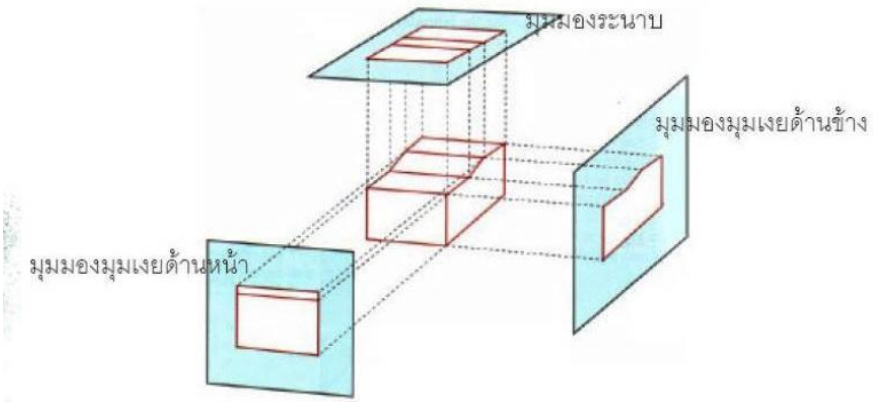
2.8.3.2 การฉายภาพเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Projection)

การแปลงวัตถุให้อยู่บนระนาบการมองตามเส้นที่ทุกเส้นขนานกับระนาบการมอง Normal Vector N เรียกว่า การฉายภาพเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Projection หรือ Orthographic Projection) ขั้นตอนการแปลงการฉายภาพแบบขนานนี้จะตั้งฉากกับระนาบการมอง ดังรูปที่ 2.50

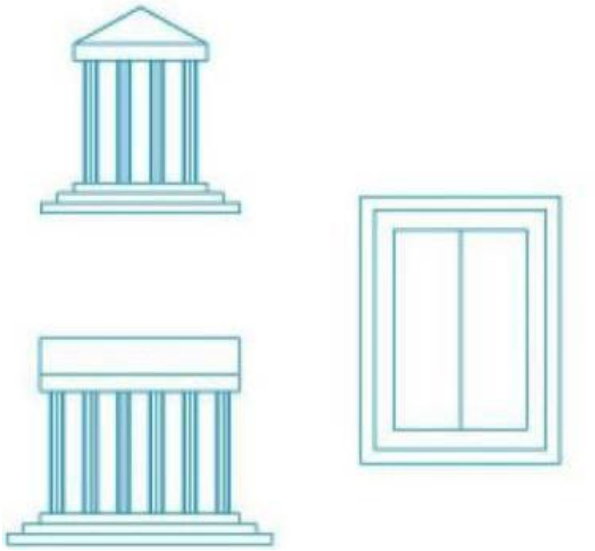
การฉายภาพแบบนี้มาใช้บ่อยในการสร้างมุมมองด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของวัตถุ แสดงดังรูปที่ 2.51 การฉายภาพเชิงตั้งฉากด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของวัตถุ เรียกว่า มุมเงย (Elevation) และการฉายภาพเชิงตั้งฉากด้านบน เรียกว่า ระนาบ (Plan)



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.50 การฉายภาพเชิงตั้งฉากของวัตถุที่กระทำตั้งฉากกับระนาบการมอง [11]



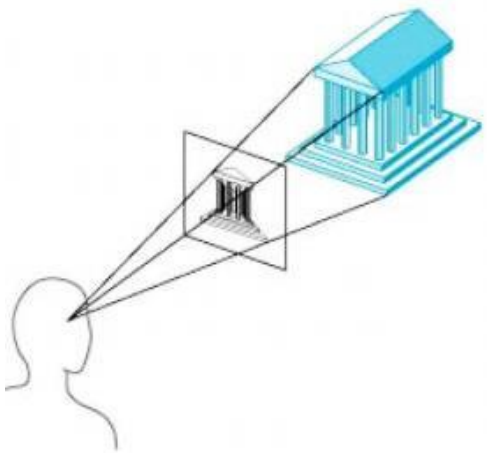
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.51 การฉายภาพเชิงตั้งฉากของวัตถุที่แสดงระนาบและมุมเงย [11]



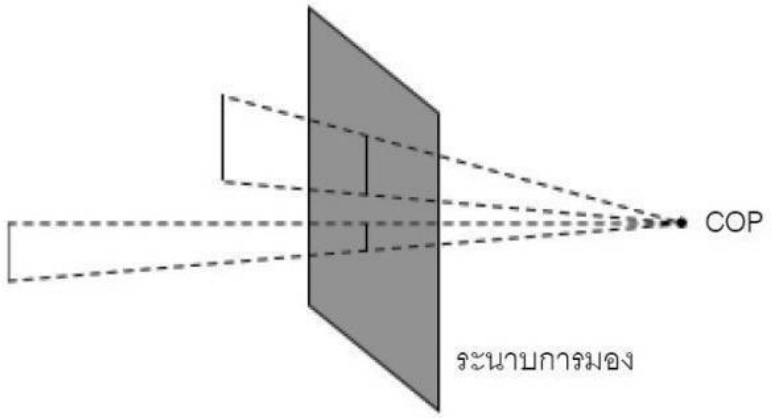
รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.52 วัตถุที่แยกการแสดงผลจากโปรเจคชัน [11]

2.8.3.3 การฉายภาพแบบทัศนมิติ (Perspective Projection)

ถึงแม้ว่าภาพจากมุมมองที่ได้จากการฉายภาพแบบขนานจะสร้างได้ง่าย และคงสภาพความสัมพันธ์ทางอัตราส่วนของวัตถุไว้ แต่การแสดงภาพยังไม่สมจริง ในการลองภาพจากกล้องเราต้องพิจารณาลำแสงที่สะท้อนจาก วัตถุในจอภาพตามระยะทางที่แปลงจากระนาบกล้อง เราสามารถประมาณผลของแสงทางเรขาคณิตโดยการฉายภาพวัตถุไปตามระนาบการมองตามระยะทางไปยังตำแหน่งที่เรียกว่า จุดอ้างอิงการฉายภาพ (Projection Reference Point) หรือ จุดศูนย์กลางการฉายภาพ (Center of Projection : COP) ลักษณะการมองภาพจะเป็น ดังรูปที่ 2.53 คุณสมบัติของการแสดงผลวัตถุจากการฉายภาพแบบทัศนมิติจะเป็นลักษณะที่วัตถุที่อยู่ไกลออกไปจากระนาบการมองจะมีขนาดเล็กกว่าวัตถุที่มีขนาดเท่ากันแต่อยู่ใกล้กว่า



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.53 การมองภาพจากการฉายภาพแบบทัศนมิติ [11]



รูปที่ **ผิดพลาด! ไม่มีข้อความของลักษณะที่ระบุในเอกสาร**.54 การมองภาพจากการฉายภาพ
แบบทัศนมิติของเส้นตรงขนาดเท่ากัน 2 เส้น
แต่อยู่ระยะไกลจากระนาบการมองที่ต่างกัน [11]