บทที่ 2

โครงสร้างของอุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติและอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

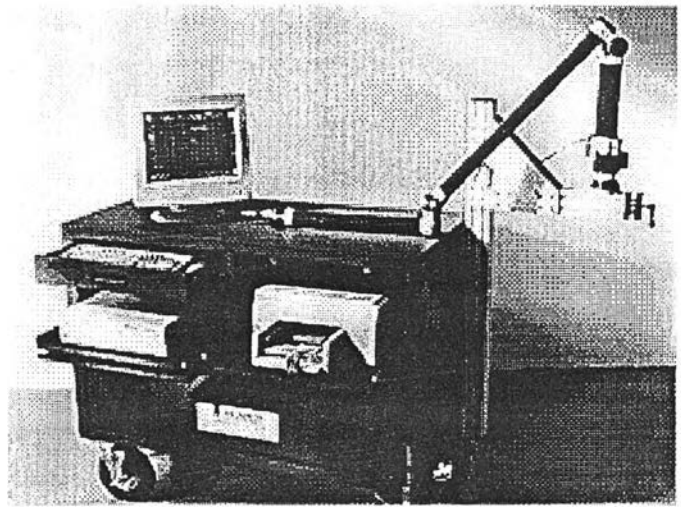
อุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติที่เรารู้จักกันโดยทั่วไปได้แก่ เครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM) หน้าที่หลักของ CMM คือการเปรียบเทียบผลการวัดกับค่าความเผื่อ (Tolerance) ของแต่ละชิ้นส่วน และในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแบบอัตโนมัติจะส่งข้อมูลที่ได้จาก CMM ไปยังคอมพิวเตอร์หลักเพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงการผลิตต่อไป

CMM ประกอบด้วยส่วนประกอบที่เป็นโปรแกรมทำงาน (Software) และส่วนที่เป็นโครงสร้าง (Hardware) ส่วนของโปรแกรมทำงานจะทำหน้าที่สื่อสารกับผู้ใช้, คำนวนค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ เช่น ทำการคำนวนหาค่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางจากชุดของจุดข้อมูลที่วัดเป็นต้น และอาจทำการชดเชยความผิดพลาดของโครงสร้างอันเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะแวดล้อม เช่น ชดเชยการยืดหดตัวของแกนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากการประกอบชิ้นส่วนของโครงสร้างของ CMM เป็นต้น CMM บางประเภทต้องการการควบคุมสภาวะแวดล้อมในขณะทำงานโดยอาจมีเครื่องปกปิดในขณะทำการวัดหรือมีห้องเฉพาะสำหรับ CMM ในส่วนของโครงสร้างเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เคลื่อนที่หัววัดไปเก็บข้อมูลพิกัดที่ตำแหน่งต่างๆ โครงสร้างของ CMM จึงมีผลต่อข้อมูลที่วัดได้โดยความไม่แน่นอนของข้อมูลในบางครั้งก็มีสาเหตุมาจากโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาลักษณะของโครงสร้างเพื่อเข้าใจและสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน

ตอนแรกของบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติเพื่อให้ทราบถึงโครงสร้างที่ใช้กันโดยทั่วๆไปและจะได้เปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ใช้ในโครงการวิทยานิพนธ์นี้ด้วย ในตอนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอีกอย่างคืออุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งจะกล่าวถึงประเภทของการวัดโดยกว้างๆ หลักการทำงานและข้อจำกัดของอุปกรณ์ชนิดนี้

2.1 Coordinate Measuring Machine (CMM)

Coordinate Measuring Machine (CMM) คือเครื่องจักรซึ่งให้พิกัดของตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก แต่ก็มีอุปกรณ์วัดพิกัดบางจำพวกซึ่งใช้ระบบพิกัดอื่นนอกเหนือไปจากระบบพิกัดฉากดังเช่นในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่ไม่ใช้ระบบพิกัดฉาก

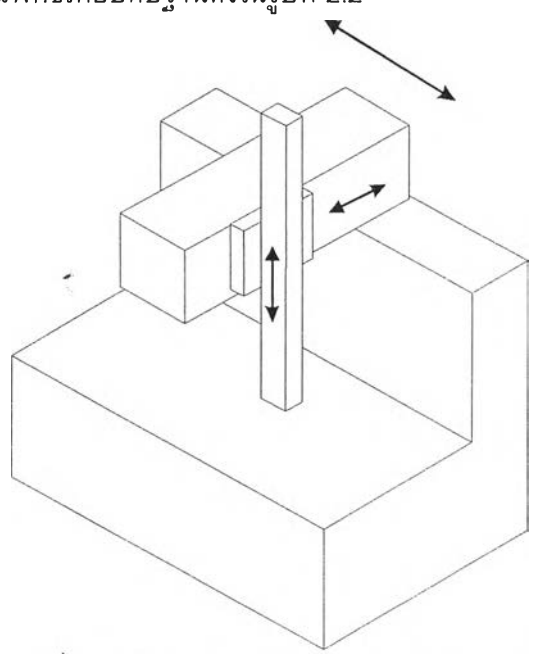
ต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างของอุปกรณ์วัดพิกัดที่ใช้ระบบพิกัดฉากในการวัดพิกัด ซึ่งการแบ่งแยกประเภทของโครงสร้างนั้นมีการใช้หลักในการแบ่งที่แตกต่างกัน ในหนังสือบางเล่มอาจจะแบ่งประเภทของโครงสร้างไม่เหมือนกัน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งตามมาตราฐาน ANSI/ASME B89.1.12M-1985 เป็นหลัก

2.2 การจำแนกประเภทโครงสร้างของเครื่อง CMM ตามมาตราฐาน ANSI/ASME B89.1.12M-1985

โครงสร้างของ CMM มีส่วนสำคัญต่อความเที่ยงตรง (accuracy) ,ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Flexibility), เวลาที่ใช้ในการวัดและราคาของเครื่อง ในส่วนของความยืดหยุ่นในการใช้งานยังขึ้นอยู่กับโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้และอุปกรณ์เสริมต่างๆ การแบ่งประเภทของเครื่องวัดพิกัดนี้จะจำแนกตามมาตราฐาน ANSI/ASME B89.1.12M-1985 โครงสร้างบางประเภทจะมีลักษณะที่เป็นคานวางอยู่บนเสาทั้ง 2 ข้าง หัวตรวจวัดจะเคลื่อนที่ไปมาบนคานดังกล่าว เพื่อทำการวัดชิ้นงาน โครงสร้างลักษณะนี้จะมีความผิดพลาดเนื่องจากการโก่งงอของคานน้อยกว่าโครงสร้างที่วางหัววัดอยู่บนคานในลักษณะแบบยึดปลาย (Cantiliver) เมื่อหัววัดมีการยืดตัวไปสุดปลายแขน แต่โครงสร้างแบบที่ 2 ก็มีข้อดีคือผู้ใช้สามารถเข้าไปวางและถอดชิ้นงานได้สะดวกกว่า (Accessibilty) แบบแรก ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้ง 2 แบบต่างก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้งานจึงต้องพิจารณาความต้องการของงานและผู้ใช้เป็นสำคัญ

2.2.1 โครงสร้างแบบ Fixed Table Cantilever

ประกอบด้วยส่วนที่เคลื่อนที่ 3 แกน ตั้งฉากซึ่งกันและกัน หัววัดติดกับแกนแรกที่เคลื่อนที่ขึ้นลง แกนที่ 2 จะเคลื่อนที่ในระนาบตั้งฉากกับแกนที่ 3 แกนที่ 3 จะถูกรองรับด้วยปลายข้างเดียวแบบ Cantilever และเคลื่อนที่สัมพัทธ์เทียบกับฐานดังในรูปที่ 2.2

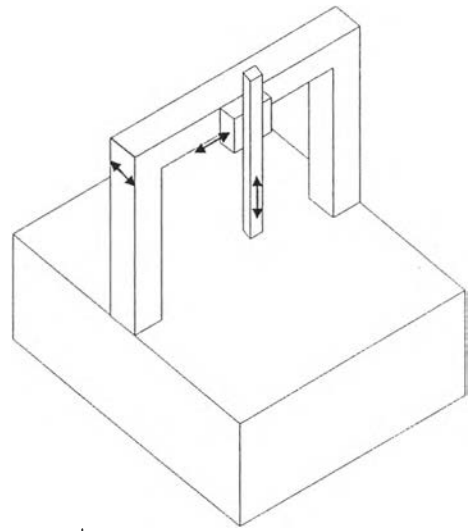


รูปที่ 2.2 CMM แบบ Fixed Table Cantilever

2.2.2 โครงสร้างแบบ Moving Bridge

เป็นโครงสร้างที่พบมากที่สุดแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยโต๊ะวางชิ้นงานและส่วนที่เป็นคานพาดอยู่เหนือโต๊ะวางชิ้นงานและสามารถเคลื่อนที่ได้ในแกนใดแกนหนึ่ง (อาจเป็นแกน x หรือแกน y) รองรับด้วยเสา 2 ข้างโดยที่เสา 2 ข้างจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วขาทั้ง

2 อาจเคลื่อนที่ไม่เท่ากันก็ได้ ทำให้เกิดการบิดตัวของคาน การบิดตัวของคานดังกล่าวนี้เรียกว่าเกิดการ walking หรือ yawing ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความแม่นยำ (accuracy) ของเครื่องที่ตำแหน่งต่างๆ บนโต๊ะ วิธีการป้องกันไม่เกิดการ walking อาจทำได้โดยการใช้ระบบที่มีระบบขับเคลื่อนติดที่ขาทั้ง 2 หรืออาจใช้ระบบขับเคลื่อนที่ใช้ตัวขับตัวเดียวขับขาทั้ง 2 ให้เคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กัน



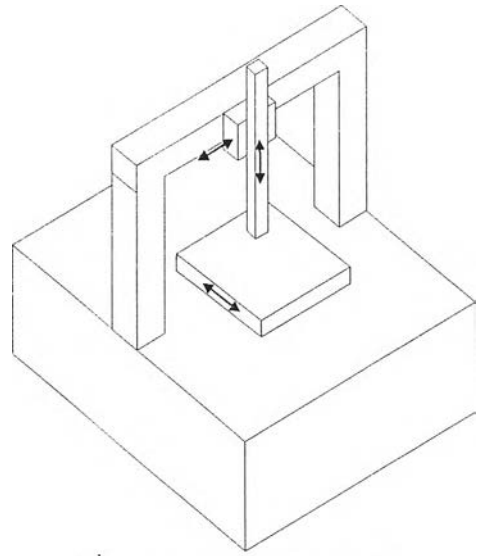
รูปที่ 2.3 CMM แบบ Moving Bridge

ในรูปที่ 2.3 เป็นลักษณะหนึ่งของโครงสร้างแบบ Moving Bridge ที่มีลักษณะพิเศษคือเป็นวงรอบ (Ring Bridge Configuration) ต่อเนื่องกันระหว่างเสาทั้ง 2 และคาน โครงสร้างลักษณะนี้มีผลดีคือทำให้มีอัตราส่วนของความแข็งแกร่ง (rigidity) ต่อน้ำหนักสูง เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างในลักษณะอื่น นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้ระบบขับเคลื่อนอยู่ในแนวกลางใต้ฐานใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างได้ซึ่งการวางให้ระบบขับเคลื่อนอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางมวลของเครื่องจะทำให้น้ำหนักส่วนใหญ่ตกที่จุดศูนย์กลางมวลทำให้การบิดงอเนื่องจากโมเมนต์ของน้ำหนักลดลง นอกจากนี้การวัดด้วยโครงสร้างแบบวงแหวนผลที่วัดได้จะไม่ขึ้นอยู่กับมวลของชิ้นงานซึ่งต่างจากโครงสร้างแบบ Fixed Bridge เนื่องจากส่วนที่เป็นฐานรองชิ้นงานมีการเคลื่อนที่บรรทุกชิ้นงานไปในขณะทำการวัดด้วย

งานที่ใช้โครงสร้างแบบ Moving Bridge จะมีตั้งแต่ขนาดกลางถึงใหญ่ โดยจะให้ความไม่แน่นอนในการวัดต่ำ ข้อเสียของโครงสร้างแบบนี้คือ มีข้อจำกัดในเรื่องของการเข้าถึงชิ้นงาน (Accessibility) เนื่องจากติดเสาทั้ง 2 ข้าง

2.2.3 โครงสร้างแบบ Fixed Bridge

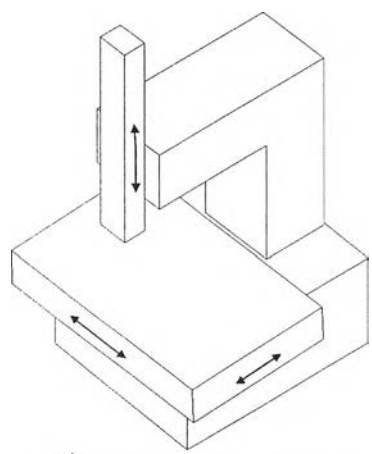
โครงสร้างลักษณะนี้ เสาทั้ง 2 ของคานจะยึดติดกับฐานของเครื่อง ส่วนโต๊ะวางชิ้นงานจะเคลื่อนที่แทน เนื่องจากเสาทั้ง 2 ถูกยึดติดกับฐานทำให้สามารถลดการ walking ได้และยังมีความแข็งแกร่งสูงซึ่งถือเป็นข้อดีที่สุดของโครงสร้างแบบนี้อีกด้วย ส่วนมากเครื่อง CMM ที่สามารถให้ความถูกต้องในการวัดสูงจะมีโครงสร้างแบบ Fixed Bridge ข้อจำกัดของโครงสร้างลักษณะนี้คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของโต๊ะวางชิ้นงานจะแปรผกผันส่วนทางกับน้ำหนักของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังต้องเผื่อเนื้อที่ไว้สำหรับเป็นทางเลื่อนของโต๊ะวางชิ้นงานด้วย รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของ CMM แบบ Fixed Bridge



รูปที่ 2.4 CMM แบบ Fixed Bridge

2.2.4 โครงสร้างแบบ Column

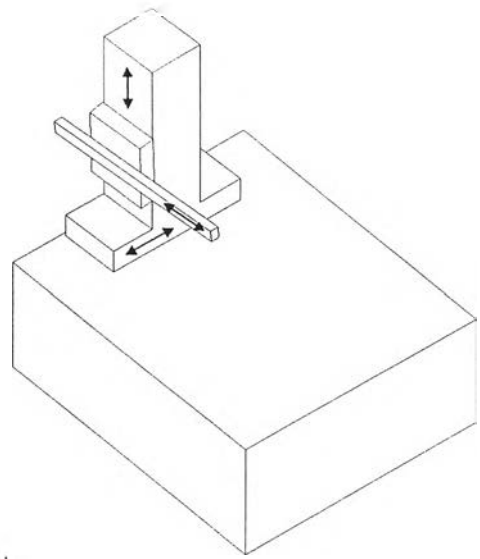
มีแกน 3 แกนเคลื่อนที่ตั้งฉากกัน แกนที่ 1 เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง แกนที่ 2 เคลื่อนที่ในแนวระนาบเทียบกับฐาน แกนที่ 3 เคลื่อนที่ในแนวระนาบตั้งฉากกับแกนที่ 2 ชิ้นงานจะวางอยู่บนแกนที่ 3 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 CMM แบบ Column

2.2.5 โครงสร้างแบบ Moving Ram Horizontal Arm

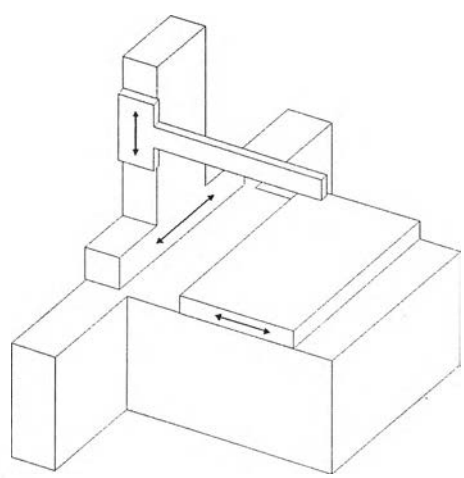
ประกอบด้วยแกน 3 แกนเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน หัววัดติดกับแกนแรกที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบตั้งฉากกับแกนที่ 2 แกนที่ 2 เคลื่อนที่ในแนวดิ่ง เทียบกับแกนที่ 3 ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวระนาบเทียบกับฐานของเครื่อง ชิ้นงานจะวางบนฐานของเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 CMM แบบ Moving Ram Horizontal Arm

2.2.6 โครงสร้างแบบ **Moving Table Horizontal** Arm

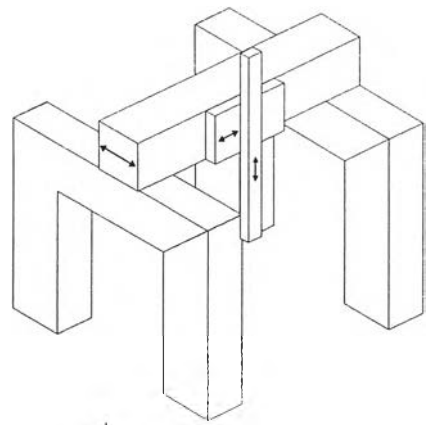
แกนการเคลื่อนที่ 3 จะยึดติดกับแกนที่ 2 แบบ Cantilever และคลื่อนที่ขึ้นลงเทียบกับแกนที่ 2 ดังรูปที่ 2.7 แกนที่ 2 และ 3 เคลื่อนที่ในแนวระนาบเทียบกับฐานของเครื่อง ชิ้นงานจะวางอยู่บนแกนที่ 3



รูปที่ 2.7 CMM แบบ Moving Table Horizontal Arm

2.2.7 โครงสร้างแบบ **Gantry**

ในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ต้องการปริมาตรการทำงานตั้งแต่ 10 ลูกบาศก์เมตรขึ้นไป ควรที่จะใช้ลักษณะโครงสร้างแบบนี้ การออกแบบจะออกแบบให้ฐานมีน้ำหนักมากเพื่อจำกัดการโก่งงอซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดการบิดตัว และยังป้องกันไม่ให้น้ำหนักของโครงสร้างทำให้ฐานวางชิ้นงานเกิดการเสียรูป ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้และเพื่อป้องกันการเกิด walking ของคาน จึงใช้ระบบขับเคลื่อนแบบคู่คือขับที่ปลาย 2 ข้างของคานพร้อมกัน การชดเชยผลของการเสียรูปและอุณหภูมิ จะใช้โปรแกรมประยุกต์ รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างแบบ Gantry

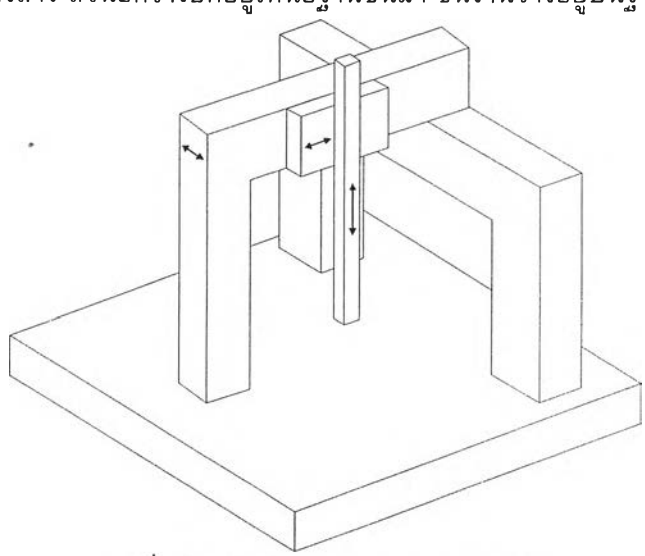


รูปที่ 2.8 CMM แบบ Gantry

นอกจากข้อดีเรื่องความสามารถในการวัดชิ้นงานขนาดใหญ่แล้ว โครงสร้างแบบ Gantry ยังมีข้อดีเรื่องของการเข้าถึงชิ้นงาน แต่ข้อดีในเรื่องนี้ก็จะไม่เด่นชัดนักในเครื่องที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก ราคาของเครื่อง CMM ที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมีราคาไม่สูงมากยกเว้นต้องการความถูกต้องสูงราคาก็จะสูงตามไปด้วย

2.2.8 โครงสร้างแบบ L-Shape Bridge

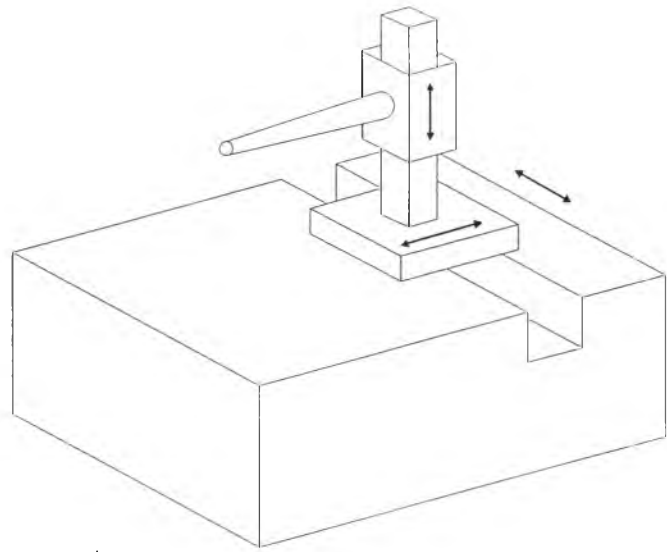
ดังในรูปที่ 2.9 แกนที่ 1 จะติดหัวตรวจวัดเคลื่อนที่ขึ้นลงเทียบกับแกนที่ 2 แกนที่ 2 เคลื่อนที่ในแนวระนาบเทียบกับแกนที่ 3 ส่วนแนที่ 3 เคลื่อนที่ในแนวระนาบโดยใช้ราง 2 ราง รางแรกวางอยู่ในระดับฐาน หรือ อยู่ข้างล่าง ส่วนอีกรางยกอยู่เหนือฐานขึ้นมา ชิ้นงานวางอยู่บนฐาน



รูปที่ 2.9 CMM แบบ L-Shaped Bridge

2.2.9 โครงสร้างแบบ Fixed Table Horizontal Arm

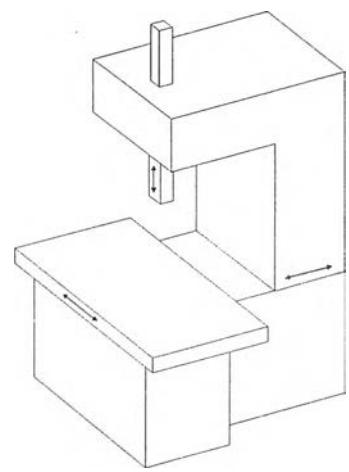
ประกอบด้วย แกนที่ 1 ที่ยึดกับแกนที่ 2 แบบ Cantilever เคลื่อนที่ในแนวดิ่งเทียบกับแกนที่ 2 แกนที่ 2 เคลื่อนที่ในแนวระนาบเทียบกับแกนที่3 ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวระนาบเทียบกับฐาน ชิ้นงานจะวางบนฐาน



รูปที่ 2.10 CMM แบบ Fixed Table Horizontal Arm

2.2.10 โครงสร้างแบบ Moving Table Cantilever

แกนที่ 1 เคลื่อนที่ในแนวดิ่งเทียบกับแกนที่ 2 ส่วนแกนที่ 2 ยึดแบบ Cantilever และเคลื่อนที่ในแนวระนาบสัมพัทธ์กับฐาน แกนที่ 3 ก็เคลื่อนที่ในแนวระนาบ เทียบกับฐานของเครื่อง ชิ้นงานยึดกับแกนที่ 3



รูปที่ 2.11 CMM แบบ Moving Table Cantilever Arm

จากที่กล่าวมาเป็นลักษณะของโครงสร้างที่ใช้ในการเคลื่อนที่หัววัดต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงการวัดพื้นผิวชิ้นงานด้วยอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

2.3 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

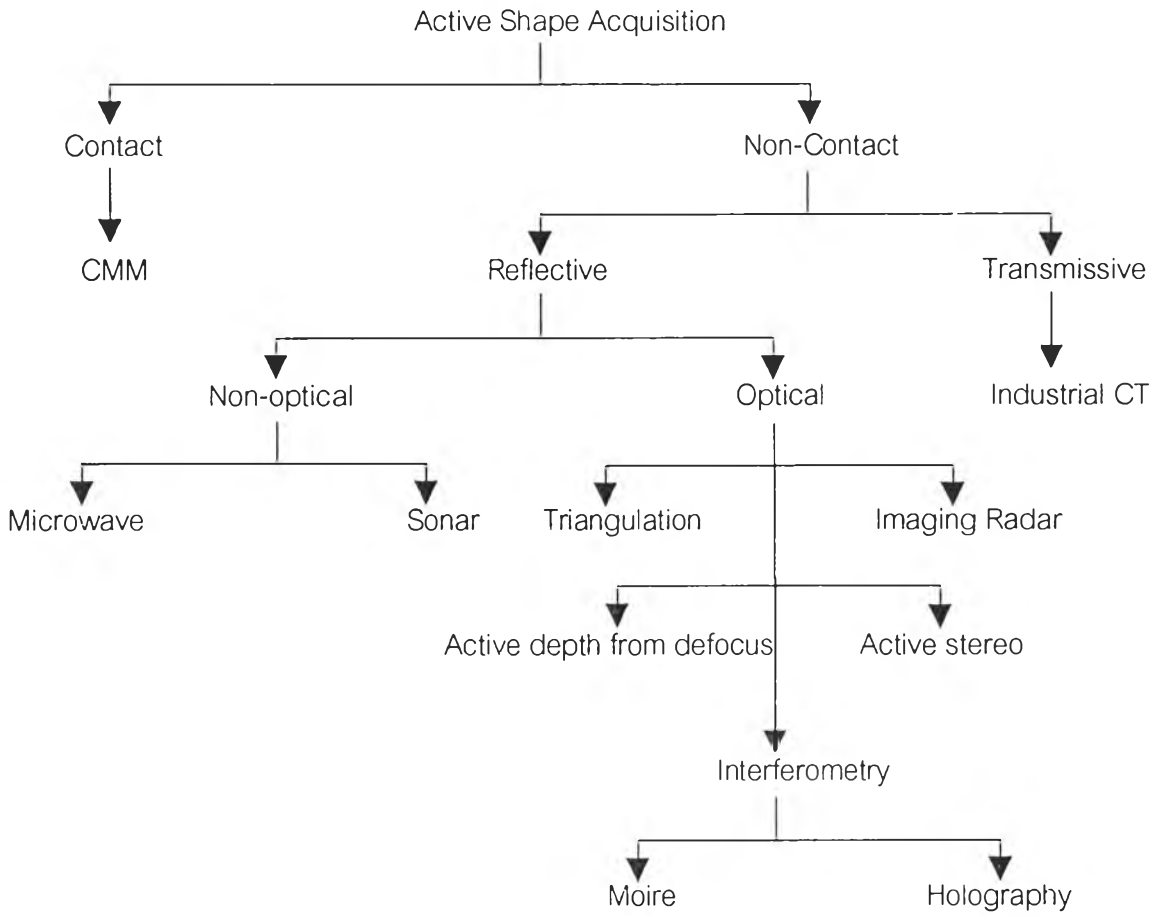
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะห่างจากหัววัดไปยังพื้นผิวชิ้นงานโดยไม่มีการสัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงาน (Non-contact) ค่าที่อ่านโดยใช้คอมพิวเตอร์มีค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งแทนระยะห่าง เราสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวมาแปลงเป็นระยะทางได้ จะขอกล่าวถึงการจำแนกประเภทของการวัดด้วยวิธีการแบบ ไม่สัมผัสก่อนหลังจากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้จริงในการทดสอบ

2.3.1 การจำแนกประเภทของวิธีการวัด

ในการวัดชิ้นงานเพื่อให้ได้ข้อมูลบนพื้นผิวมีวิธีที่ใช้ต่างๆ กันหลายวิธีในที่นี้จะแบ่งตาม [2] วิธีการวัดที่ใช้กันอยู่สามารถแบ่งเป็นวิธีแบบ Passive และ วิธีแบบ Active ซึ่งวิธีแบบ Passive จะไม่มีการถ่ายทอดพลังงานในรูปใดรูปหนึ่งให้กับวัตถุ ยกตัวอย่างเช่นการใช้กล้องโทรทัศน์รับภาพของวัตถุ ซึ่งพลังงานที่กล้องโทรทัศน์รับเข้ามานั้นเป็นพลังงานที่วัตถุสะท้อนมาจากแสงสว่างที่อยู่โดยรอบไม่ได้เป็นพลังงานที่อุปกรณ์หรือผู้วัดส่งออกไปยังวัตถุเพื่อให้สะท้อนกลับมา ส่วนแบบ Active จะตรงกันข้ามคือจะมีการสัมผัสหรือมีการฉายพลังงานในรูปใดรูปหนึ่งไปบนวัตถุเพื่อประโยชน์ในการวัดพื้นผิวชิ้นงานหรือเพื่อเพิ่มพลังงานที่สะท้อนกลับมาให้มีค่ามากขึ้น ในรูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเพื่อให้เข้าใจถึงการจัดประเภทของการวัดที่จะได้กล่าวถึงต่อไป

ในการวัดแบบ Active สามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือแบบสัมผัสและไม่สัมผัสกับผิวชิ้นงาน ตัววัดแบบสัมผัสส่วนมากจะเป็นหัว touch probe ซึ่งประกอบด้วย แขนที่ต่อกับตัวชี้ (pointer) ซึ่งจะใช้สัมผัสกับผิวชิ้นงาน เมื่อหัวตัวชี้สัมผัสกับผิวชิ้นงานจะส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะบันทึกตำแหน่งของหัวไว้ทันที ข้อเสียของหัววัดแบบสัมผัสคือ

- ช้า เนื่องจากต้องใช้มือในการควบคุมในการเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับจุดที่ต้องการบางครั้งอาจช้าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องแบบอัตโนมัติซึ่งการทำงานจะเป็นแบบการโปรแกรมไว้ล่วงหน้าเมื่อต้องการทำการวัดเครื่องก็จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการทันทีและหากต้องการวัดหลายจุดก็สามารถโปรแกรมให้วิ่งต่อเนื่องกันได้ซึ่งจะเร็วกว่าแบบใช้มือควบคุม
- ใช้งานลำบาก
- ต้องใช้คนคอยควบคุม
- เนื่องจากใช้การสัมผัสกับวัตถุดังนั้นอาจทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานที่เปราะบางได้



รูปที่ 2.12 วิธีในการเก็บข้อมูลของวัตถุ

วิธีการแบบ Active ที่ใช้หัววัดแบบไม่สัมผัสจะใช้การฉายพลังงานไปบนพื้นผิวแล้วรับพลังงานที่สะท้อนหรือถูกส่งกลับมาเพื่อคำนวนระยะห่างของวัตถุ วิธีการที่มีประสิทธิภาพในการหารูปร่างของชิ้นงานคือ Industrial computer tomography (Industrial CT) จะใช้การระดมยิงวัตถุด้วยรังสี X พลังงานสูงซึ่งรังสีดังกล่าวสามารถทะลุผ่านวัตถุแล้ววัดปริมาณการแผ่รังสีที่ผ่านวัตถุในแนวต่างๆ คล้ายกับการเอ็กซ์เรย์ของทางการแพทย์แต่จะใช้กับวัสดุและทำการเอ็กซ์เรย์ในแนวต่างๆเพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ในแนวต่างๆนั้นมาประกอบกันเป็นข้อมูล 3 มิติของชิ้นงาน ข้อดีของวิธีดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้แสงสะท้อนคือไม่ต้องกังวลกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของผิววัตถุ และสามารถใช้หารูปร่างของโพรงภายในวัตถุได้ด้วย ส่วนข้อเสียมีดังนี้คือ

- แพง
- วัตถุที่มีส่วนประกอบเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกันมาก (เช่นไม้ทากาวติดกับเหล็ก) จะทำให้ความถูกต้องของข้อมูลลดลง
- เป็นอันตรายเนื่องจากใช้กัมมันตรังสี

วิธีการแบบใช้การสะท้อนแสง เราสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ Non-optical และ Optical วิธีแบบ Non-optical จะประกอบด้วย การใช้คลื่นเสียงและคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งโดยทั่วไปใช้หลักการวัดระยะห่างจากวัตถุโดยคำนวนเวลาที่พัลส์ของเสียงหรือคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับจากวัตถุ ส่วนแบบ Optical แสงจะถูกฉายไปบนวัตถุและสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ อุปกรณ์ที่ใช้หลักการนี้สามารถให้ข้อมูลที่

มีความหนาแน่นมากได้อย่างรวดเร็ว ปลอดภัยและถูกต้องกว่าการใช้ Industrial CT แต่ก็มีข้อจำกัดคือการที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลของส่วนที่มองไม่เห็น วิธีการแบบนี้ยังแบ่งได้อีกดังนี้

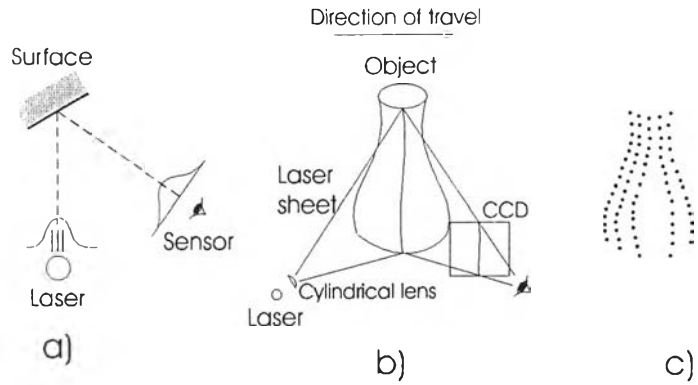
Imaging radar เป็นเรดาร์ซึ่งใช้แสงแทนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งโดยปรกติอุปกรณ์เรดาร์ใช้สำหรับตรวจจับวัตถุในอากาศหรือในน้ำแต่เราสามารถประยุกต์ใช้กับงาน Digitizing ชิ้นงานได้ สำหรับวัตถุที่มีขนาดใหญ่จะให้ผลการวัดที่ดีแต่ในกรณีที่เป็นวัตถุที่เล็กลงมาในระดับเมตรจะต้องใช้วงจรจับเวลาที่มีความเที่ยงตรงสูงเนื่องจากเวลาที่วัดจะมีส่วนต่างกับอยู่ในระดับ picosecond (10^{-12} second)

Interferometric ใช้การฉายแสงที่มีการรูปแบบแตกต่างกันเป็นคาบไปบนพื้นผิวของวัตถุ จากนั้นจะผสมแสงที่สะท้อนกลับมากับรูปแบบที่ใช้อ้างอิง รูปแบบที่ใช้อ้างอิงจะช่วยถอดข้อมูลที่ใช้บอกถึงความแตกต่างกันของรูปทรงของพื้นผิววิธีนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ Moire interferometry และ Holographic interferometry

Active depth from focus ใช้หลักการที่ว่าภาพของวัตถุจะเลือนไปเป็นส่วนแปรผันกับระยะทางระหว่างจุดบนวัตถุและระนาบวัตถุ วิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งแบบ Passive และ Active แบบ Passive จะอาศัยลักษณะพื้นผิว(texture) ของวัตถุเป็นตัวกำหนดความไม่ชัด ส่วนแบบ Active จะฉายแสงแบบต่างๆ ไปบนวัตถุ

Active stereo ใช้กล้อง 2 ตัวหรือมากกว่าในการดูวัตถุ ถ้าเห็นรูปแบบเดียวกันโดยใช้กล้อง 2 ตัว ดังนั้น เส้นทางการมองเห็น (line of sight) ของกล้องจะตัดกันที่จุดเดียวบนผิวของวัตถุซึ่งสามารถนำมาคำนวนเป็นโคออดิเนตของจุดบนผิววัตถุได้ และเช่นเดียวกับวิธี Active depth from focus วิธีนี้แบ่งเป็น Active และ Passive แบบ Active จะฉายแสงไปบนวัตถุแล้วคำนวนโคออร์ดิเนตของแสงบนวัตถุนั้น

Optical triangulation เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของวิธี Optical triangulation ใน 2 มิติ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแสงที่สะท้อนไปบนตัวรับจะสอดคล้องกับ ความยาวของลำแสงจากตัวส่งที่ตัดกับผิวของวัตถุ รูปร่างของวัตถุจะได้จากการเคลื่อนหรือหมุนวัตถุให้ตัดกับลำแสง หรือเคลื่อนที่หัวเลเซอร์ผ่านวัตถุ ความผิดพลาดที่เกิดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการสะท้อนแสงและรูปร่างของวัตถุเอง

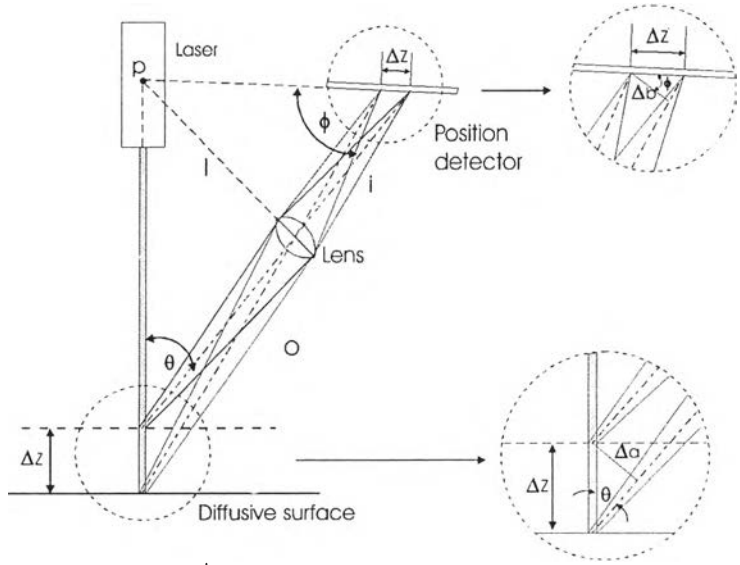


รูปที่ 2.13 Optical triangulation a) ในกรณี 2 มิติแสงจากเลเซอร์ส่องไปยังผิวของวัถตุแล้วจึงสะท้อนไปยังตัวรับซึ่งจุดศูนย์กลางของแสงที่ตกบนตัวรับจะเป็นตัวบอกข้อมูลระยะห่างของผิววัตถุ b) ในกรณี 3 มิติ บางครั้งจะใช้แสงเลเซอร์ที่เป็นแถบกวาดผ่านวัตถุ หรือหมุนวัตถุผ่านแถบของแสงเลเซอร์ CCD จะรับแถบแสงที่สะท้อนกลับจากวัตถุแล้วนำมาคำนวนระยะห่าง c) ข้อมูลที่ได้

2.3.2 หลักการของ Optical triangulation

Optical triangulation เป็นวิธีที่ใช้บอกการเคลื่อนที่หรือรูปร่างพื้นผิว (Profile) ของวัตถุที่สามารถสะท้อนแสงได้ โดยไม่ต้องอาศัยการสัมผัสกับวัตถุ โดยทั่วไปนิยมใช้ 2 แบบ คือใช้แสงที่มีลักษณะเป็นจุดฉายไปบนผิวของวัตถุที่สามารถสะท้อนแสงได้กับใช้แสงที่มีลักษณะเป็นเส้น

2.3.2.1 ระบบที่ใช้จุดของแสง(Spot of light system) เป็นระบบที่ใช้ในอุปกรณ์วัดเลเซอร์ซึ่งใช้เป็นตัววัดตำแหน่งของพื้นผิวในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รูปที่ 2.13 เป็นรูปแสดงการทำงานของระบบ Optical triangulation



รูปที่ 2.14 ระบบ Optical triangulation

องค์ประกอบของอุปกรณ์วัดที่ใช้แสงเลเซอร์ประกอบด้วยชุดสร้างแสงเลเซอร์ เลนซ์ ตัววัดตำแหน่ง แสงเลเซอร์ที่ใช้ได้จากไดโอดหรือเป็นฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ (He-Ne laser) ซึ่งแสงเลเซอร์ดังกล่าวจะถูกส่งไปยังพื้นผิวของวัตถุจากพื้นผิวของวัตถุแสงเลเซอร์จะกระจายและถูกรวมโดย Converging lens เพื่อให้ไปตกบน linear diode array หรือตัววัดตำแหน่งเชิงเส้น จากรูปที่ 2.14 เรา

สมมุติว่าแสงเลเซอร์ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวที่สามารถสะท้อนแสงได้ ถ้าพื้นผิวมีการเคลื่อนที่ขนานกับแสงเลเซอร์ จุดของแสงเลเซอร์บนพื้นผิวก็จะมีองค์ประกอบของการเคลื่อนที่ขนานกับแสงเลเซอร์ด้วย ซึ่งองค์ประกอบในการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของภาพบนตัวรับด้วย การเคลื่อนที่ของภาพบนตัวรับดังกล่าวสามารถใช้เป็นตัวบอกระยะที่พื้นผิวเคลื่อนที่ได้

ก่อนอื่นขอทำการคำนวนมุมที่เหมาะสมระหว่างแกนของแสงสะท้อนที่กระทำกับตัววัดระยะทางหรือตัวรับแสง (ϕ) โดยการใช้ข้อกำหนดในการออกแบบ Scheimpflug (Scheimpflug optical design condition) ที่กำหนดว่าระนาบของวัตถุ, ระนาบของเลนซ์, และระนาบของภาพควรที่จะตัดกันเป็นเส้นเดียวเพื่อจะรักษาระยะโฟกัสที่ดีที่สุดของจุดแสงบนตัวรับ ในตัวอย่างของเราสภาวะดังกล่าวได้กำหนดให้แสงเลเซอร์, ระนาบของเลนซ์, และระนาบของตัวรับตัดกันที่จุด p จุดเดียว และในกรณีที่นำมาแสดงนี้เราได้กำหนดให้ระนาบของเลนซ์ตั้งฉากกับแกนของแสงที่สะท้อนมาจากพื้นผิว ดังนั้นมุมระหว่างแกนของแสงที่สะท้อนกับแสงเลเซอร์ (θ) และมุมระหว่างแกนนของแสงสะท้อนกับตัวรับแสง (ϕ) จะสัมพันธ์กับระยะทาง O และ I ดังนี้

$$I=I\tan(\phi) = O\tan(\theta)$$

โดยที่ I คือระยะจากจุด p ไปยังจุดศูนย์กลางของเลนซ์ และมุม ϕ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan(\phi) = \frac{1}{|m|}\tan(\theta)$$

m คือการขยายเท่ากับ -I/O ในการพิจารณาของเราเราจะสมมุติว่าการเคลื่อนที่ Δz ที่ขนานกับแสงเลเซอร์มีขนานเล็กเทียบกับระยะทาง O ด้วยการสมมุติดังกล่าวเราจะได้ว่า

$$\Delta a = \Delta z \cdot \sin(\theta)$$

$$\Delta b = \Delta z' \cdot \sin(\phi)$$

ด้วยสมการดังกล่าวเราสามารถหาการเคลื่อนที่ของภาพหรือการเคลื่อนที่ของพื้นผิวได้

2.3.4 ข้อจำกัดบางประการของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

จากเอกสารอ้างอิง ได้กล่าวถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ที่ใช้หลักการ Optical triangulation ว่าความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ขึ้นอยู่กับการตีความหรือการถอดสัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมา โดยทั่วไปจะใช้จุดศูนย์กลางของลำแสงที่ตกบนตัวรับเป็นตัวบอกตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลำแสงกำหนดได้จากค่าทางสถิติบางตัวเช่น ค่ามัธยฐาน (Median) หรือเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณแสงมากที่สุด ซึ่งจุดกลางดังกล่าวจะให้ค่าถูกต้องก็ต่อเมื่อพื้นผิวที่วัดเป็นระนาบโดยสมบูรณ์

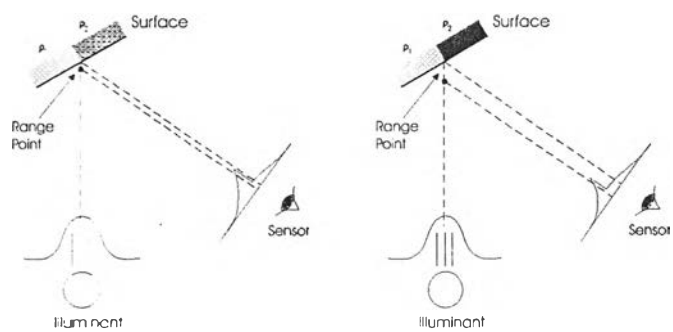
ค่าทางสถิติที่ใช้จะให้ความผิดพลาดเมื่อพื้นผิวมีการเบี่ยงเบนในเรื่องการสะท้อนแสง เช่น

- พื้นผิวมีการสะท้อน (Reflectance) ในส่วนต่าง ๆ ไม่เท่ากัน
- พื้นผิวมีรูปทรงที่ต่างไปจากระนาบมาก
- แสงที่สะท้อนกลับมาถูกบังไปบางส่วน
- พื้นผิวมีความขรุขระมากจนแสงเกิดการสะท้อนแบบไม่เป็นระเบียบ (Laser speckle)

ในรูปที่ 2.15-2.17 แสดงตัวอย่าง 3 ตัวอย่างที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดพลาด โดยคิดว่าระบบที่ใช้มีความละเอียดในการวัดเป็นอนันต์และได้รับการปรับเทียบแล้ว และพิจารณาตัววัดใน 1 มิติ

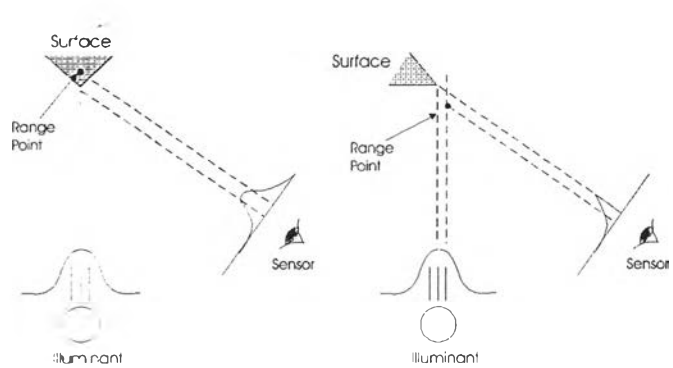
นอกจากนี้ยังสมมุติหน้าตัดการกระจายของแสงเป็นแบบ Gaussian และใช้ค่ามัธยฐานเป็นตัวบอกจุดศูนย์กลางของลำแสง รูปที่ 2.15 แสดงความไม่ต่อเนื่องของการสะท้อนแสงทำให้ข้อมูลไม่อยู่บนพื้นผิวของวัตถุ จากรูป 2.15a) และ 2.15b) แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบว่าค่าความผิดพลาดจะยิ่งมากขึ้นเมื่อค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) มีความแตกต่างกันมากขึ้น

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่าง 2 ตัวอย่างของผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ สังเกตุว่าในรูป 2.16b) จุดศูนย์กลางของลำแสงที่ตกบนตัวรับไม่ตัดกับผิวของวัตถุ ตัวอย่างในรูปที่ 2.17แสดงผลเนื่องจากแสงบางส่วนถูกบดบังไปโดยสิ่งกีดขวางระหว่างพื้นผิวกับตัวรับ ซึ่งจะให้ผลคล้ายกับรูปที่ 2.16b) ส่วนความผิดพลาดจากสาเหตุที่ 4 แสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งเกิดจากพื้นผิวของวัตถุมีความขรุขระเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น ผลก็คือรูปแบบของแสงสะท้อนที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาดังแสดงในรูปคือค่า σ_{ci} ซึ่งทำให้เกิดความไม่แน่นอนในแนวความลึก σ_z การที่แสงเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลานั้นเนื่องจากการรบกวนกันของแสงซึ่งสะท้อนจากพื้นผิวที่ขรุขระทำให้ได้รูปแบบผสมของแสงที่ไม่แน่นอน รายละเอียดเกี่ยวกับ Laser speckle จะไม่ขอกล่าวถึงเนื่องจากมีรายละเอียดที่ลึกและเกินขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้



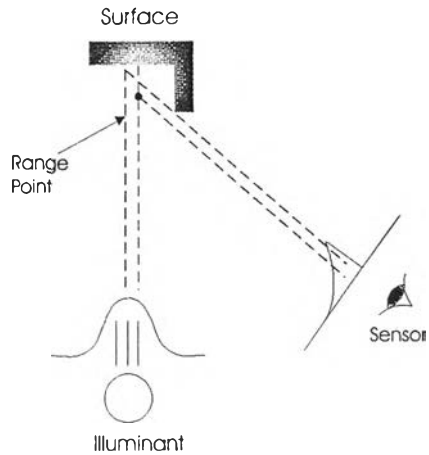
a) b)

รูปที่ 2.15 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของการสะท้อนแสง

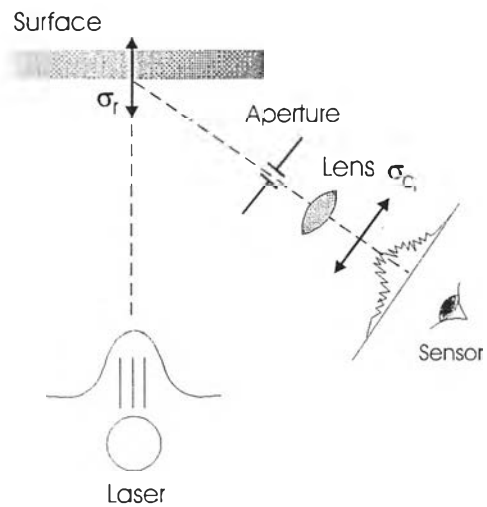


a) b)

รูปที่ 2.16 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากรูปร่างของวัตถุ



รูปที่ 2.17 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากแสงสะท้อนถูกบังไปบางส่วน



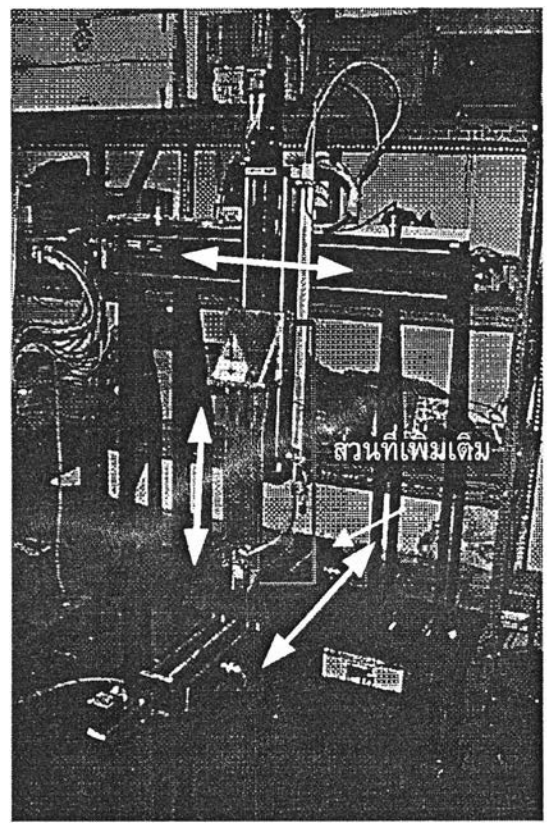
รูปที่ 2.18 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของแสงสะท้อน

จากที่ได้กล่าวไปแล้วเป็นส่วนของโครงสร้างและการวัดพื้นผิวชิ้นงานด้วยวิธีการต่าง ๆต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างที่ใช้จริงและอุปกรณ์ต่าง ๆที่ใช้ในการวัดชิ้นงานแบบ 3 แกนและ 4 แกน

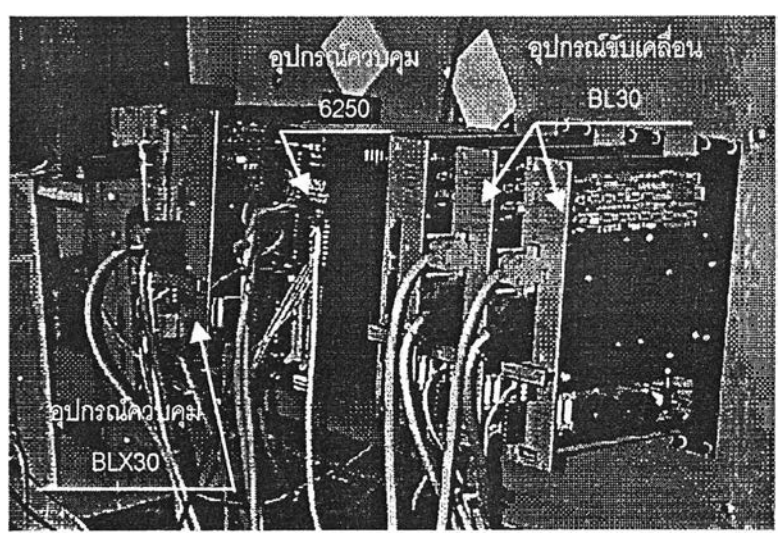
2.4 โครงสร้างของเครื่อง CMM ที่สร้างขึ้นและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดชิ้นงานแบบ 3 แกนและ 4 แกน

ในหัวข้อก่อนได้กล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างของอุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติโดยทั่วไปและได้กล่าวถึงแนวความคิดในการเก็บข้อมูลของวัตถุด้วยวิธีการต่าง ๆ ไปแล้ว จะเห็นว่ามีโครงสร้างต่าง ๆ มากมายแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกันออกไป แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โครงสร้างแบบ Fixed bridge ซึ่งเป็นโครงสร้างประเภทที่ 2 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้จะเห็นว่ามีวิธีการในการวัดชิ้นงานด้วยกันหลายวิธีซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการวัดด้วย Optical laser triangulation โดยใช้แสงที่เป็นจุดใน

การฉายไปยังชิ้นงาน จากโครงสร้างและวิธีในการวัดชิ้นงานต่อไปจะขอกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้จริงในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.19-2.22โดยจะแบ่งเป็นแบบ 3 แกนและ 4 แกน ในแบบ 3 แกนอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้คือ



ก)



ข)

รูปที่ 2.19 ก) โครงสร้างของเครื่อง CMM ข) ชุดควบคุม 3 แกน X-Y-Z

2.4.1 โครงสร้างของเครื่อง CMM แสดงในรูป 2.19 ก) เป็นโครงสร้างเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้วใช้โครงสร้างแบบ Fixed Bridge แต่ละแกนประกอบด้วยชุดบอลสกรูระยะพิตช์เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีรางรองรับโต๊ะซึ่งเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 2 ข้าง ผลิตโดย Positioning Systems Daedal Devision บริษัท Parker Hannifin จากประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวนที่ใช้เท่ากับ 3 ชุดส่วนที่เพิ่มเข้าไปในวิทยานิพนธ์นี้แสดงในรูปที่ 2.19ก) เป็นแขนจับยึดหัววัดเลเซอร์กับแกน Z

2.4.2 มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนแต่ละแกนเป็นมอเตอร์แบบ Brushless D.C. Servo motor รุ่น ML-2340 ผลิตโดยบริษัท Parker Digiplan จากประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 3 ชุดสำหรับแกน x, y, z ที่ส่วนท้ายของมอเตอร์ติดด้วย Encoder แบบสัมพัทธ์มีความละเอียดเท่ากับ 500 เส้นต่อรอบโดยสามารถเพิ่มความละเอียดได้เป็น 2000 เส้นต่อรอบ โดยใช้วงจรภายในตัวควบคุมในข้อ 2.4.3 ความละเอียดในการเคลื่อนที่สามารถคำนวนได้ดังนี้

<u>การคำนวน</u>

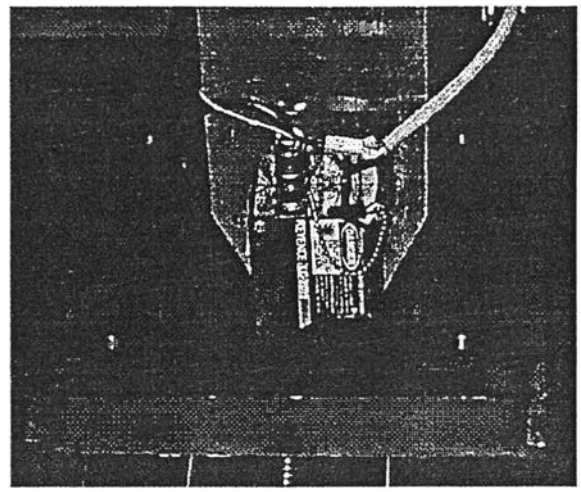
สกรูหมุน 1 รอบสามารถขับโหลดได้เป็นระยะทาง 5 มิลลิเมตร

สกรูหมุน 1 รอบหรือ 360 องศาเอนโคดเดอร์ที่ท้ายของมอเตอร์ผลิตพัลส์ได้ 2000 พัลส์ดังนั้น 1 พัลส์ของเอนโคดเดอร์ที่หมุนไปจะเทียบเป็นระยะที่โหลดเคลื่อนที่ไปเท่ากับ $\frac{5}{2000} = 0.0025$ มิลลิเมตร

2.4.3 ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนและตัวควบคุมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์สามารถทำการควบคุมแบบ interpolation ได้ เช่น สั่งการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง หรือวงกลม ผู้ใช้จะส่งคำสั่งผ่านพอร์ทอนุกรม RS232C มายังชุดอุปกรณ์ควบคุมเพื่อให้อุปกรณ์ควบคุมทำการควบคุมการทำงานของมอเตอร์อีกทีหนึ่ง อุปกรณ์ควบคุมและขับเคลื่อนนี้เมื่อดูจากรูป 2.19ข) คืออุปกรณ์ควบคุม 6250 ผลิตโดยบริษัท Parker Compumotor(ใช้ควบคุมมอเตอร์ทางแกน y และแกน z)และอุปกรณ์ควบคุม BLX30 ผลิตโดยบริษัท Parker Digiplan (ใช้ควบคุมมอเตอร์ทางแกน x) ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อน BL30 ผลิตโดยบริษัท Parker Digiplan เป็นอุปกรณ์ที่จะรับคำสั่งจากอุปกรณ์ควบคุม 6250 เพื่อส่งสัญญาณไปขับมอเตอร์อีกที ส่วนอุปกรณ์ควบคุม BLX30 มีอุปกรณ์ขับเคลื่อนประกอบอยู่ภายในอยู่แล้ว

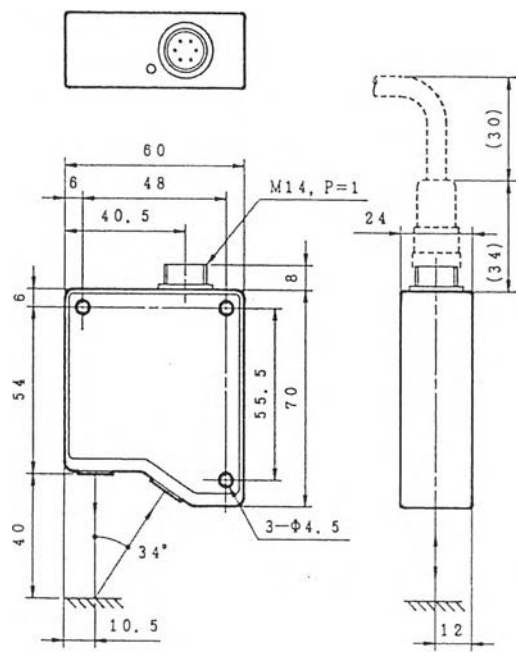
2.4.4 โต๊ะวางชิ้นงานขนาด 250×250 มิลลิเมตรเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ในทางแกน y ขนาดของโต๊ะวางชิ้นงานมีขนาดไม่ใหญ่เนื่องจากไม่ต้องการให้มีน้ำหนักกดลงบนแกน y มากเกินไปและป้องกันชิ้นงานไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินไปด้วย

2.4.5 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์เป็นตัววัดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์วัดกับพื้นผิวอาศัยหลักการ Optical triangulation อุปกรณ์วัดพิกัดเป็นแบบ Laser ชนิด Low power Semiconductor laser ให้กำลัง 3 มิลลิวัตต์ ติดไว้ที่ปลายแขนของแกน Z โดยชุด Laser นี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่ใช้ในการวัดดังนี้คือ ระยะอ้างอิง (Reference distance) มีค่าเท่ากับ 40 mm. ช่วงระยะวัด (Measurement range) มีค่า $\pm$3 mm. และ Spot diameter มีค่าสูงสุด 0.05 mm. ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

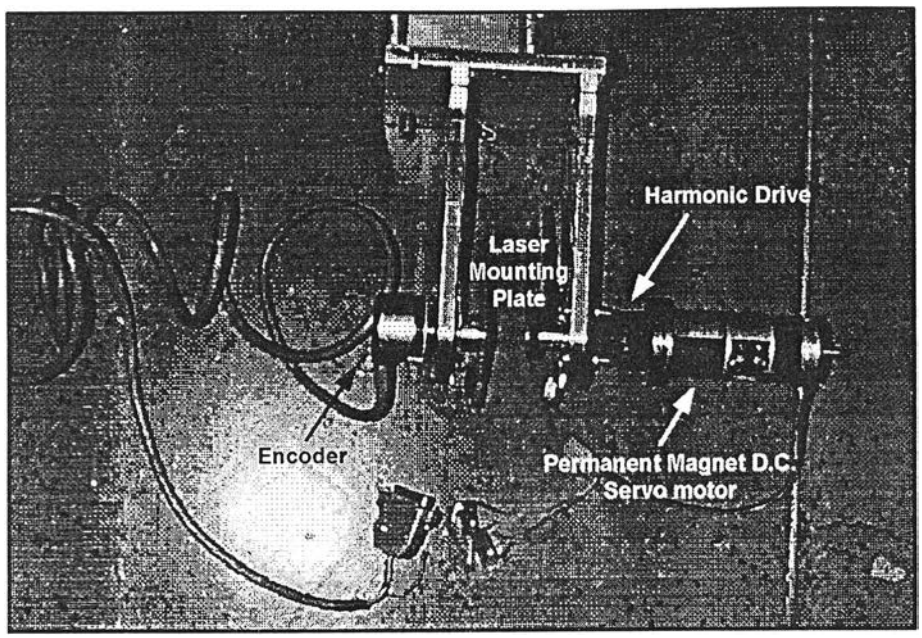
รูปที่ 2.20 แสดงอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ติดที่ปลายแขน



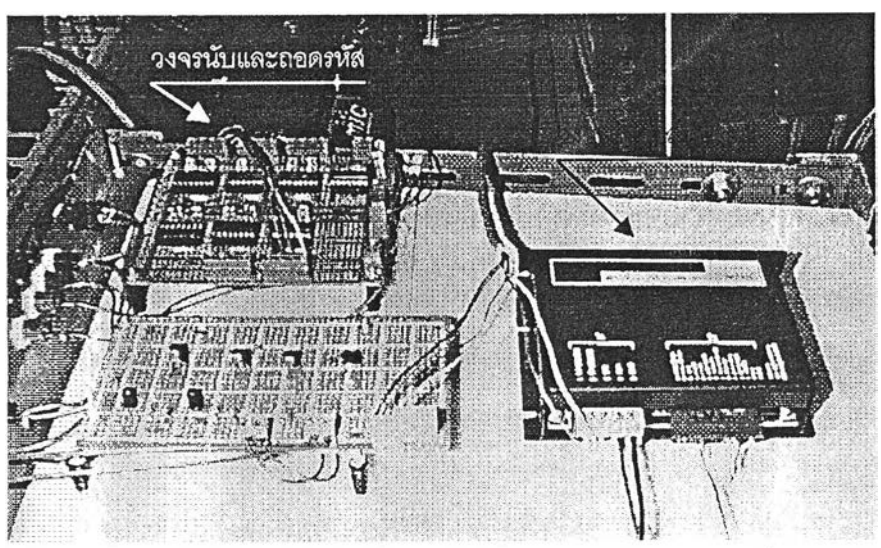
รูปที่ 2.21 แสดงขนาดของชุด Laser วัดพิกัด และมุมรับแสง Laser

2.4.6 การ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล(ADC) Model DT2801 ผลิตโดยบริษัท Data Translation จากประเทศสหรัฐอเมริกา มีความละเอียด 12 บิท

ในกรณีที่การวัดเป็นแบบ 4 แกน นั้นจะมีชุดติดตั้งแกนที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.22ก) ติดตั้งเข้ากับแกน Z แกนที่ 4 นี้มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบแกนหมุนใช้สำหรับวัดชิ้นงานที่ผิวที่จะวัดมีความชันสูง โดยเฉพาะเมื่อความชันอยู่ในช่วงเข้าใกล้มุมเอียงของแสง Laser หรือประมาณ 34 องศาดังแสดงในรูปที่ 2.21 จะทำให้ไม่สามารถวัดพิกัดของพื้นผิวได้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานแบบ 4 แกน แสดงในรูปที่ 2.22 อุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นมีดังนี้คือ



(ก) แสดงชุดต่อแกนที่ 4 และอุปกรณ์



(ข)

รูปที่ 2.22 ก) แสดงชุดต่อแกนที่ 4 และอุปกรณ์ ข) แสดงชุดควบคุมและชุด decoder

2.5.6 โครงสร้างที่ใช้จับยึดแกนที่ 4 สร้างให้มีขนาดพอที่จะสามารถจับยึดแกนที่ 4 ได้เนื่องจากต้องเพิ่มอุปกรณ์ที่มีความยาวคือมอเตอร์และ Harmonic drive แขนที่ใช้การทำงานแบบ 3 แกนมีพื้นที่ไม่เพียงพอในการที่จะจับยึดอุปกรณ์ดังกล่าวได้

2.5.7 มอเตอร์กระแสตรง(Permanent magnet D.C. servo motor) เป็นตัวควบคุมการหมุนของแกนที่ 4 ทดความเร็วผ่าน Harmonic drive

2.5.8 Harmonic drive เป็นชุดทดความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ มีอัตราทดเท่ากับ 1:100

2.5.9 เอนโคดเดอร์(Encoder) เป็นอุปกรณ์วัดระยะเชิงมุมใช้วัดมุมที่แกนที่ 4 เคลื่อนที่ไปจริง ความละเอียด 2500 เส้นต่อรอบ ผลิตโดยบริษัท British Encoder Products จะให้สัญญาณเป็นพัลส์ ของแรงดันความสูงของสัญญาณจะเท่ากับ 0 และ 3.5 volt สลับกันไป ความละเอียดของเอนโคดเดอร์ สามารถคำนวนได้ดังนี้

<u>การคำนวน</u>

แกนที่ 4 หมุนไป 360 องศา เอนโคดเดอร์จะผลิตพัลส์ได้ 2500 พัลส์ ดังนั้น 1 พัลส์ของเอนโคดเดอร์จะเท่ากับ $\frac{360^\circ}{2500} = 0.144^\circ$

2.5.10 Laser mounting plate เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ประกบยึดอุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์เข้ากับแกนที่ 4 เพื่อทำให้แกนที่ 4 หมุนตามการหมุนของมอเตอร์

2.5.11 วงจรนับและถอดรหัส(Counter and Decoder) ใช้นับพัลส์ที่มาจากเอนโคดเดอร์และแปลงค่าที่นับได้ให้เป็นสัญญาณดิจิตอลของเลขฐาน 2 เพื่อส่งไปยังคอมพิวเตอร์

2.5.12 วงจรขยายสัญญาณ(Amplifier) ใช้ขยายสัญญาณควบคุมที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์เพื่อขยายกำลังให้สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงในข้อ 2.5.7 ได้ อินพุทเป็นแรงดันไฟฟ้า เอาท์พุทเป็นกระแสไฟฟ้า อัตราการขยายเท่ากับ 3 Amp/1 Volt

2.5.13 การ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก Model DT2801 ความละเอียด 12 บิท ผลิตโดยบริษัท DATA TRANSLATION จากประเทศสหรัฐอเมริกา

ในบทนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างที่ใช้กันอย่างคร่าวๆ และวิธีในการวัดชิ้นงานเท่าที่พอจะหาได้จากเอกสารอ้างอิงและได้กล่าวถึงโครงสร้างจริงและอุปกรณ์จริงที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งเป็นแบบ Fixed bridge และใช้วิธีการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการ Optical triangulation โดยใช้แสงเลเซอร์ยิงไปสะท้อนกับพื้นผิวแล้วรับแสงที่สะท้อนกลับมาเพื่อคำนวนระยะห่าง และได้กล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆอื่นๆ ที่ใช้ทั้งแบบ 3 แกนและ 4 แกน ในบทต่อไปจะกล่าวถึงอุปกรณ์ขับเคลื่อนและตัวควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งก็คือมอเตอร์แบบ Brushless servo, ตัวควบคุม 6250 และ BLX30