



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบควบคุมคีมจับเชิงแสงแบบอัตโนมัติ

The Development Of Automatic Control System For Optical

Tweezers

อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบควบคุมคีมจับเชิงแสงแบบอัตโนมัติ

The Development Of Automatic Control System For Optical
Tweezers

อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 143539
วันเดือนปี 17 ต.ค. 2559

12791805
.b.....
i.....

ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาระบบควบคุมคิมจับเชิงแสงแบบอัตโนมัติ

แหล่งเงิน เงินรายได้ประเภทส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

ชื่อ - สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างฐานวางตัวอย่างที่สามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y โดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส ควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรควบคุม ติดตั้งกับฐานวางตัวอย่างจากนั้นทำการทดสอบการเคลื่อนของฐานตัวอย่างซึ่งมีความละเอียดและความแม่นยำ พร้อมทั้งติดตั้งระบบจำกัดการเคลื่อน ซึ่งสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้งานนี้หมุนด้วยความละเอียด 0.072 องศา/สเต็ป เคลื่อนด้วยระยะ 0.2 ไมโครเมตร ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติพร้อมโปรแกรมและระบบควบคุมจะถูกนำไปติดตั้งในระบบคิมจับเชิงแสงที่ได้สร้างขึ้นโดยระบบการมองเห็นภาพจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมการเก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว จากนั้นทำการทดสอบการจับอนุภาคตัวอย่างเพื่อสร้างเป็นระบบคิมจับแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาอนุภาคตัวอย่างที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอนและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางชีววิทยาเชิงฟิสิกส์ ของตัวอย่างที่นำมาศึกษาต่อไป

คำสำคัญ : สเต็ปปีงมอเตอร์, ฐานตัวอย่าง, คิมจับเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: The Development Of Automatic Control System For
Optical

Researcher: Thammarat Taengtang

Faculty: Science Department: Physics

ABSTRACT

This special project aim is to design and implement a semi-automation system for controlling optical tweezers' sample stage moving in X-Y axis using a 5-phase stepping motors which have been controlled by microcontroller. These stepping motors have been operated with a resolution of 0.072 degree per step in the range of 0.2 micrometer. After that this semi-automation X-Y sample stage controlling system has been installed with conventional optical tweezers based on microscope to complete the overall system. Furthermore the vision system for optical tweezers system has been operated with specific software to capture still, and dynamical images and store them into computer data storage. In operation testing, the sample particles that is polystyrene have been used to test the overall system operation. After system testing we found that this optical tweezers with semi-automation sample stage controlling system can be applied to study a small particles in micron scale, and biological cells and analyze some biophysics properties and so on.

Keywords : Stepping motor, X-Y stage, Optical tweezers

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ขอขอบคุณ นายธนศ ญ วิเชียร และ นางสาวสุทธิพิญา จรรย์ชล จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาการติดตั้งอุปกรณ์ การทดลอง และความช่วยเหลือในการทำทดลองตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ ลี้มพรจิตร์วิไล ที่เป็นเจ้าของบริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด และบุคลากร คุณวรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, คุณกฤษดา ใจเย็น, คุณสมเกียรติ กิจวงศ์วัฒน์ ที่ให้การสนับสนุน และให้คำปรึกษา ในเรื่องของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบแมคคาณิก ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบฐานวางตัวอย่าง และวงจรชุดควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ

อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สเต็ปป์มอเตอร์	5
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของสเต็ปป์มอเตอร์	5
2.1.2 หลักการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์	6
2.1.3 การแบ่งชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์	7
2.1.3.1 สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	7
(Permanent Magnet : PM)	
2.1.3.2 สเต็ปป์มอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก	7
(Variable Reluctance : VR)	
2.1.3.3 สเต็ปป์มอเตอร์แบบผสม (Hybrid : HB)	8
2.1.4 การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์	9
2.1.4.1 การพันขดลวดแบบไบโพลาร์ (Bipolar)	9
2.1.4.2 การพันขดลวดแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.5 โครงสร้างขดลวดและรูปแบบการต่อสายของสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส	10
2.1.6 รูปแบบการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส	11
2.1.7 คุณสมบัติของสเต็ปป์มอเตอร์	13
2.1.7.1 คุณสมบัติเด่นของสเต็ปป์มอเตอร์	13
2.1.7.2 ข้อด้อยของสเต็ปป์มอเตอร์	13
2.1.8 การตรวจสอบตำแหน่งการหมุนไปของสเต็ปป์มอเตอร์	14
2.1.8.1 การนับจำนวนสเต็ปที่หมุนไปของสเต็ปป์มอเตอร์	14
2.1.8.2 การตรวจสอบกระแสของแต่ละเฟสเมื่อทำการหมุนไปของสเต็ปป์มอเตอร์	14
2.1.8.3 การใช้เอ็นโคดเดอร์(Encoder) ตรวจสอบการหมุนไปของสเต็ปป์มอเตอร์	15
2.2 แนะนำโปรแกรม LabVIEW และการใช้งานเบื้องต้น	16
2.3 คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)	20
2.3.1 หลักการทำงานของ Optical tweezers	20
2.4 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	23
3.1 ออกแบบสร้างวงจรควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟสและวงจรแหล่งจ่ายไฟ	23
3.1.1 วงจรควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส	23
3.1.2 แหล่งจ่ายไฟ	31
3.1.3 สร้างกล่องชุดควบคุมฐานวางสารตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ	32
3.2 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างกับสเต็ปป์มอเตอร์ชุดวงจรควบคุม และทดสอบการทำงาน	33
3.2.1 การทดสอบความแม่นยำในการหมุนของสเต็ปป์มอเตอร์	35
3.2.1.1 การทดสอบใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปป์มอเตอร์	35
3.2.1.2 การทดสอบใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สเต็ปป์มอเตอร์หมุน	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1.3 การทดสอบใช้เอ็นโคเดออร์วัดตำแหน่งที่สเต็ปิ่งมอเตอร์หมุน	37
3.3 ออกแบบและสร้างระบบการมองเห็นภาพ	37
3.4 ออกแบบและจัดระบบทัศนศาสตร์เพื่อสร้างเป็นระบบคิมจับเชิงแสง	39
3.5 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติในระบบคิมจับเชิงแสง	43
3.6 ทดสอบระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติและเก็บบันทึกผลการทดลอง	44
3.6.1 คุณสมบัติของสารตัวอย่างและการเตรียมสารตัวอย่าง	44
3.6.1.1 คุณสมบัติสารตัวอย่าง	44
3.6.1.2 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง	44
3.6.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการเลื่อนแท่นวางสารตัวอย่างและการมองเห็น	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	49
4.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ	49
4.1.1 ผลทดสอบการใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์	49
4.1.2 ผลทดสอบการใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สเต็ปิ่งมอเตอร์หมุน	50
4.1.3 ผลทดสอบใช้เอ็นโคเดออร์วัดตำแหน่งที่สเต็ปิ่งมอเตอร์หมุน	52
4.2 ผลการทดสอบระบบการมองเห็นภาพ	53
4.2.1 ระบบการมองเห็นภาพ	53
4.2.1.1 ระบบการมองเห็น	53
4.2.1.2 การปรับระยะโฟกัสของภาพเมื่อใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเลเซอร์	55
4.2.2 ผลการใช้งานโปรแกรมเชื่อมต่อควบคุมการมองเห็นและเก็บภาพ	59
4.3 ผลการทดสอบการจัดวางอุปกรณ์ทัศนศาสตร์	60
4.3.1 การจัดวางระบบทัศนศาสตร์ทั้งหมด	60
4.3.2 ผลการเพิ่มส่วนการขยายลำแสง	61
4.3.3 การจัดวางลำแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ 100x และการปรับจุดโฟกัสที่แผ่นสไลด์	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดสอบการจับอนุภาค และการเก็บบันทึกผล	63
4.4.1 สภาวะที่ยังไม่สามารถจับอนุภาคได้	63
4.4.2 สภาวะที่เริ่มจับอนุภาคได้	64
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการดำเนินงานวิจัยทำโครงการพิเศษ	4
2.1 การควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแบบเต็มขั้นของสตีปิ้งมอเตอร์แบบ 5 เฟสแบบไปโพล่า	12
2.2 ลำดับการควบคุมการขับเคลื่อนสตีปิ้งแบบเต็มขั้นแบบ 2 ขดของสตีปิ้งแบบ 5 เฟส	13
3.1 แสดงลำดับการขับสตีปิ้งมอเตอร์ 5 เฟส แบบเต็มขั้น	27
4.1 แสดงตำแหน่งการหมุน	50
4.2 แสดงการทดสอบสตีปิ้งมอเตอร์ด้วยไมโครมิเตอร์	51
4.3 แสดงผลการวัดสัญญาณที่ได้จากเอ็นโคดเดอร์เมื่อสตีปิ้งมอเตอร์หมุนไป	53
4.4 แสดงผลคุณสมบัติของแท่นเลื่อน X-Y	53
4.5 แสดงภาพของเม็ดปิดขนาด 8 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน	54
4.6 แสดงภาพของเม็ดปิดขนาด 100 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน	55
4.7 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น	56
4.8 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น	57
4.9 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น	58
4.10 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น	59
4.11 แสดงการวัดขนาดลำแสงเลเซอร์	62
4.12 แสดงระยะห่างเลนส์ที่ใช้ขยายลำแสงเลเซอร์	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างภายในของสเต็ปปีงมอเตอร์	5
2.2 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชุดขดลวดอยู่กับที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์6	
2.3 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชุดขดลวดอยู่กับที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์	6
2.4 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	7
2.5 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก	8
2.6 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบผสม	8
2.7 สเต็ปปีงมอเตอร์แบบโพลาร์ 4 สาย	9
2.8 สเต็ปปีงมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 6 สาย	9
2.9 แสดงการพันขดลวดแบบโพลาร์และแบบยูนิโพลาร์ของสเต็ปปีงมอเตอร์	9
2.10 โครงสร้างขดลวดสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar	10
(a) แบบขดไม่อิสระ (5เส้น)	
(b) แบบขดอิสระ (10เส้น)	
2.11 สเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟสที่มีโครงสร้างขดลวดชนิด New pentagon bipolar	10
(a) แบบขดไม่อิสระ	
(b) แบบขดอิสระ	
2.12 วงจรการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส	11
2.13 โครงสร้างภายในขดลวดของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ5เฟสเมื่อทำการขับเคลื่อนแบบเต็มสเต็ป	12
2.14 การแสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการตรวจสอบการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่านพอร์ต RS232	14
2.15 วงจรสมบูรณของการใช้Cสำเร็จที่ออกแบบมาพร้อมกับการวัดกระแสของแต่ละเฟส	15
2.16 Incremental encoder ความละเอียด 4096 พัลส์/รอบ	16
2.17 รูปแบบเฟสของสัญญาณที่ออกมาจากEncoder แสดงผลการหมุนไปแบบCW/CCW	16
2.18 สเต็ปปีงมอเตอร์ที่มีการติดตั้งEncoder มาเรียบร้อยแล้ว	17
2.19 ลักษณะของ Control Palette	18
2.20 ลักษณะของ Function Palette	19
2.21 แสดง Front Panel และ Block diagram	19
2.22 GUI Front Panel ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-232	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23แสดง Block Diagram ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-23220	
2.24จากการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆ เพื่อดักจับวัตถุขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในระบบ Optical tweezers	21
2.25 อธิบายแรงในการจับอนุภาค	22
(a) ในแนวตั้งฉากกับลำเลเซอร์	
(b) ในแนวขนานกับลำเลเซอร์	
2.26 แสดงการจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers อย่างง่าย	23
2.27 แสดงแรงที่เกิดขึ้นเมื่อ เมื่อลำเลเซอร์ เคลื่อนที่ผ่านอนุภาค	23
2.28 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอเล็กทรอนิกส์	23
3.1 แผนผังการทำงานโดยรวมของชุดควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์พร้อมคั่นโยกและสวิตช์24	
3.2 ลิมิตสวิตช์	25
3.3 โมดูล คั่นโยกควบคุม	25
3.4 สวิตช์ควบคุมการทำงาน	25
3.5 กล่องควบคุม Joybox ที่ใช้ในการควบคุมการเลื่อนของแท่นเลื่อน X-Y	26
3.6 บอร์ดวงจรควบคุมและประมวลผลหลัก	26
3.7 แสดงวงจรภาคขับสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส	27
3.8 บอร์ดวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่สร้างขึ้น	28
3.9 วงจรสมบูรณ์ของภาคการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่เชื่อมต่อสั่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์	29
3.10แผนผังการทำงานโปรแกรมโดยรวมของชุดควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง	30
3.11ลักษณะภายนอกและภายในของ สเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส	31
VEXTA MODEL PK543AN-TG20	
3.12 ไดอะแกรมการจัดเฟสภายในและชุดเกียร์ทดของ สเต็ปปีงมอเตอร์ชนิด 5 เฟส	31
VEXTA MODEL PK543AN-TG20	
3.13 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟที่ใช้ในวงจรชุดขับเคลื่อนทั้งหมด	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 การเชื่อมต่อวงจรแหล่งจ่ายไฟกับหม้อแปลงและวงจรของโหลดที่ไฟ	33
3.15 กล่องควบคุมระบบกึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง	33
(a) แผงควบคุมหลักที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ	
(b) ระบบระบายความร้อนของกล่องควบคุมด้วยพัดลมและฮีทซิงค์	
3.16 รูปแบบกล่องควบคุมมอเตอร์ทั้งหมด	34
3.17 แทนเลื่อน X-Y Yaskawa	34
3.18 กลไกการจำกัดระยะทางการเคลื่อนที่มากที่สุดในแนวแกน X-Y	35
3.19 การจำกัดการเคลื่อนที่ใช้ลิมิตสวิตช์	35
(a) การติดตั้งที่ฐานในแนวแกน X-Y	
(b) การติดตั้งลิมิตสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัวเพื่อใช้จำกัดระยะการเคลื่อนที่	
3.20 การติดตั้งสแต็ปมอเตอร์กับฐานวางตัวอย่าง	36
(a) ฐานอลูมิเนียมโปรไฟล์ และราง linear slide	
(b) ติดตั้งสแต็ปมอเตอร์ทั้งสองตัวกับฐานเลื่อนแกน X-Y	
3.21 การใช้กล่องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสแต็ปมอเตอร์	37
3.22 แสดงการเชื่อมต่อสแต็ปมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์	37
3.23 แสดงการเชื่อมต่อสแต็ปมอเตอร์กับเอ็นโคคเดอร์ที่ใช้งานในการวัดตำแหน่งการหมุน	38
3.24 กล่องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล	39
(a) กล่องจุลทรรศน์ที่เลือกใช้งานกำลังขยาย 50-500 เท่า	
(b) การติดตั้งกล่องจุลทรรศน์ที่สามารถปรับระยะการโฟกัสภาพได้	
3.25 แกนปรับระยะการโฟกัสภาพของกล่องจุลทรรศน์	39
3.26 โปรแกรมการควบคุมการเก็บภาพ	40
3.27 แสดงการจัดวางระบบทัศนศาสตร์	40
3.28 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์	41
3.29 แสดงกระจกที่ใช้ในการทดลอง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 แสดงไดอะแกรมการขยายลำแสง	42
3.31 แสดงส่วนของการขยายแสง	42
3.32 แสดงกระจกที่ใช้สะท้อนเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ	43
3.33 แสดงการวางเลนส์ใกล้วัตถุอยู่เหนือกระจกสะท้อน	44
3.34 แผนผังการทำงานโดยรวมของระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ	44
3.35 ระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น	45
(a) ในส่วนของระบบควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนแบบกึ่งอัตโนมัติ	
(b) ส่วนทัศนศาสตร์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบคีมจับเชิงแสง	
3.36 แสดงการเตรียมที่วางสารตัวอย่าง	46
(a) การเตรียมแผ่นสไลด์สำหรับใส่ตัวอย่าง	
(b) การเตรียมที่วางแผ่นสไลด์	
3.37 แผ่นสไลด์ที่ใส่สารตัวอย่างพร้อมทำการทดลอง	46
3.38 แสดงการใช้งานโปรแกรมในส่วน Initial	47
3.39 แสดงการใช้งานโปรแกรมในส่วนของการควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนในแกน X-Y	48
3.40 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพนิ่ง	48
3.41 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพเคลื่อนไหว	49
4.1 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพนิ่ง	59
4.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพเคลื่อนไหว	59
4.3 แสดงการจัดระบบทัศนศาสตร์ของระบบทั้งหมด	60
4.4 ลำแสงเลเซอร์ยังไม่เข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100x พอดี	62
4.5 ลำแสงเลเซอร์ยังเข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100x พอดี	62
4.6 ระยะเวลาที่ลำแสงโฟกัสพอดีที่การ์ดสไลด์เมื่อดูจากกล้อง	63
4.7 (a) แสดงภาพเมื่อดปิดที่ติดบนสไลด์	64
(b) แสงเลเซอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเมื่อดปิด	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงเม็ดปิดเริ่มทำปฏิกิริยากับแสงเลเซอร์	65
(a) เม็ดปิดตัวใหญ่สองตัวอยู่กับที่	
(b) เมื่อเปิดแสงมีเม็ดปิดไหลเข้ามาใกล้ลำแสง	
(c) เม็ดปิดไหลมารวมตัวกัน	
(d) ปิดแสงและสังเกตเม็ดปิดเปลี่ยนตำแหน่งจากการดักจับ	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้มีบทบาทสำคัญอย่างมากองค์ความรู้และเทคโนโลยีใหม่ๆ ยังคงต้องอาศัยหลักการพื้นฐานมาประยุกต์ใช้และปรับปรุงให้ได้เครื่องมือที่สร้างขึ้นมานั้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการ ความทันสมัย และความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ถ้าหากจะกล่าวถึงการศึกษาอนุภาคในระดับไมครอนนั้นมีขนาดที่เล็กจำเป็นจะต้องมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการพิจารณาถึงคุณลักษณะของอนุภาคตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งก็ได้มีการคิดค้นหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการคิดค้นนำแสงและระบบทัศนศาสตร์เข้ามาช่วยในการศึกษาอนุภาค ถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Arthur Ashkin กับ Steven Chu และทีมงาน ในปัจจุบันได้มีนักวิจัยและอาจารย์ที่มีความสนใจและทำงานวิจัยเกี่ยวข้องกับคีมจับเชิงแสงเพื่อนำไปศึกษาวัตถุขนาดเล็กกันอย่างแพร่หลาย โดยได้มีการประยุกต์องค์ความรู้ในหลายแขนงนำมาพัฒนาให้ระบบคีมจับเชิงแสงมีประสิทธิภาพในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

หลักการของคีมจับเชิงแสงจากกล่าวได้ว่า เลเซอร์และระบบทัศนศาสตร์เป็นองค์ประกอบหลัก การโฟกัสแสงเลเซอร์เข้าสู่ระบบทัศนศาสตร์ ผ่านไปยังอนุภาคขนาดเล็กที่ต้องการจะศึกษา โดยอนุภาคจะถูกกักไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์เปรียบเสมือนแสงเลเซอร์เป็นกับกับดักโปร่งแสง ถ้าหากเลื่อนตำแหน่งตัวอย่างก็จะพบว่าอนุภาคที่อยู่กับดักนั้นยังอยู่กับที่ โดยอนุภาคที่ไม่ถูกดักจับจะเคลื่อนที่ตามแท่นที่เลื่อนไป ซึ่งอนุภาคที่ไม่มีการเคลื่อนที่นั้นเกิดจากหลักการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคที่เราต้องการจับนั่นเอง ในกรณีนี้โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาค สิ่งแวดล้อมของอนุภาคและกำลังของแสงเลเซอร์ที่ใช้ ในการจับด้วย ถ้าหากใช้แสงที่มีกำลังประมาณ 10 มิลลิวัตต์แรงที่ได้จะอยู่ในระดับพิโคนิวตัน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วมีกำลังมากพอที่จะสามารถจับอนุภาค ในระดับไมโครเมตรถึงระดับนาโนเมตรได้

แรงที่เกิดจากแสงเลเซอร์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อเราโฟกัสลำแสงลงไปใกล้ๆ กับอนุภาคที่เราต้องการจะจับเพื่อให้แสงสามารถหักเหเข้าไปภายในและสะท้อนที่พื้นผิวของอนุภาคได้ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแสงหักเหจากซ้ายไปขวาผ่านเข้าไปภายในอนุภาคเล็กๆ จะเกิดแรงปฏิกิริยาย้อนกลับจากขวาไปซ้ายด้วย ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน ซึ่งเมื่อคำนวณทางคณิตศาสตร์แล้วแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะมีทิศเข้าหาจุดโฟกัสหรือจุดที่มีความเข้มสูงสุดของเลเซอร์นั่นเอง ซึ่งอนุภาคก็จะอยู่ในสภาพที่คล้ายกับว่าถูกจับเอาไว้ภายในลำเลเซอร์นั่นเอง

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยที่ได้มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องยังคงมีการใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นส่วนประกอบหลักในระบบคีมจับเชิงแสงอยู่ ซึ่งถ้าจะกล่าวถึงตำแหน่งตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์ จะมีการป้อนหมุนปรับเลื่อนซ้าย-ขวา ที่มีการปรับโดยใช้มือหมุน แต่ถ้าหากต้องการหมุนให้แท่นเลื่อนไปด้วยความละเอียดก็อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนของระยะที่เลื่อนไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาว่า จะมีวิธีการไหนบ้างที่จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนตรงนี้ไปได้ โดยพบว่ามีการนำมอเตอร์มาติดกับแกนเลื่อนกลายเป็นแท่นเลื่อน X-Y และออกวางจำหน่ายขายกันอย่างแพร่หลายมีหลายความละเอียดและหลายขนาดให้เลือกสรรใช้งานได้ตามต้องการ แต่ยังคงมีราคาแพงอยู่มาก ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นว่าสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และแมคคาณิก นำมาประกอบรวมกันกลายเป็นแท่นเลื่อน X-Y ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมีความยืดหยุ่นในการออกแบบระบบ และใช้งานอีกทั้งยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบการเคลื่อนที่และสวิตซ์จำกัดการเคลื่อนที่ ระบบโดยรวมจะควบคุมการเคลื่อนผ่านคันโยกควบคุมและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW

ในส่วนของการมองเห็นของระบบคิมจับเชิงแสงนั้นจากเดิมจะใช้กล้องจุลทรรศน์ดูแต่ได้ทำการปรับเปลี่ยนมาใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถปรับระยะโฟกัสของภาพให้ได้มีกำลังขยายของภาพได้อย่างอิสระ เชื่อมต่อและจัดการผ่านพอร์ต USB ทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Vision ในการเก็บข้อมูลภาพนิ่งและเคลื่อนไหว

ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้เกิดเป็นระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สามารถปรับตำแหน่งของแท่นวาง บันทึกลงและประมวลผลภาพของการจับสารตัวอย่างได้โดยใช้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาที่สามารถตอบสนองและรองรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกัน มีความสะดวก แม่นยำ มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการพัฒนาการศึกษาอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา ฟิสิกส์ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติมีความความละเอียดในการเคลื่อนที่ระดับไมโครเมตร

1.2.2 เพื่อสร้างโปรแกรมและวงจรควบคุมสแต็ปมอเตอร์ 5 เฟส อย่างง่าย

1.2.3 เพื่อสร้างระบบการมองเห็นภาพโดยใช้โปรแกรมควบคุมการจัดเก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว

1.2.4 เพื่อนำฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นนี้ ไปติดตั้งทำงานร่วมกับระบบคิมจับเชิงแสงเพื่อศึกษาอนุภาคขนาดเล็ก

1.2.5 เพื่อประยุกต์ใช้วัสดุที่มีอยู่นำมาสร้างเป็นระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติแบบราคาถูก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ติดตั้งบนแท่นเลื่อน x-y ที่มีความละเอียดสูง ควบคุมสั่งงานผ่านคีย์บอร์ดควบคุมและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.2 สร้างวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส แบบจ่ายจำนวนสองชุดพร้อมวงจรแหล่งจ่ายไฟ

1.3.3 สร้างระบบการมองเห็นภาพและโปรแกรมควบคุมการเก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวที่ใช้ในระบบคิมจับเชิงแสง

1.3.4 ออกแบบและสร้างระบบทัศนศาสตร์ที่ใช้ในระบบคิมจับเชิงแสง

1.3.5 พัฒนาและปรับปรุงระบบคิมจับเชิงแสง โดยนำฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติมาติดตั้งในระบบทำให้กลายเป็นระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์เบื้องต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์วงจรแหล่งจ่ายไฟ ระบบการมองเห็น การทำงานของคิมจับเชิงแสง อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ และโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการควบคุมการเลื่อนของฐานวางตัวอย่างและการเก็บข้อมูลภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว

1.4.1.2 ออกแบบและสร้างวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส แบบจ่ายจำนวนสองชุด พร้อมระบบการระบายความร้อน การวัดแรงดันและกระแส และวงจรแหล่งจ่ายไฟที่เหมาะสม กลายเป็นกล่องควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเองจากไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.4.1.3 ติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์ พร้อมทั้งกล่องควบคุมที่สร้างขึ้น กับฐานวางสารตัวอย่างที่เลื่อนด้วยความละเอียดในแนวแกน X-Y พร้อมสร้างระบบจำกัดการเลื่อน

1.4.1.4 ทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของฐานวางสารตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นและหาความละเอียดและแม่นยำสูงสุดที่สามารถเลื่อนได้

1.4.1.5 ออกแบบและสร้างระบบทัศนศาสตร์และระบบการมองเห็นที่เป็นองค์ประกอบของคิมจับเชิงแสงแล้วนำฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นมาติดตั้งภายในระบบ

1.4.1.6 ทดลองการจับอนุภาคตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

1.4.1.7 แก้ไขปรับปรุงระบบทัศนศาสตร์และระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.4.1.8 สรุปผลการทำงานของระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ การทดลองดักจับอนุภาคตัวอย่าง(เม็ดบีด)และแนวทางการพัฒนาให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงการดำเนินงานวิจัยทำโครงการพิเศษ

แผนการดำเนินงาน	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาหาข้อมูล	■	■										
2.ออกแบบสร้างวงจรขับสเต็ปมอเตอร์		■	■	■	■							
3.ติดตั้งฐานเลื่อนแกนX-Y					■	■						
4.ทดสอบการทำงานของฐานเลื่อน						■	■					
5.สร้างระบบทัศนศาสตร์และการมองเห็น							■	■	■			
6.ทดสอบการจับอนุภาคตัวอย่างขนาดเล็ก								■	■	■		
7.ปรับปรุงระบบ									■	■	■	
8.สรุปผลการทำงานระบบ											■	■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่ได้สร้างขึ้นมานั้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์แมคคานิค เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการจัดซื้อฐานวางตัวอย่างที่มีขายกันในต่างประเทศที่มีราคาสูงและต้องเสียค่าจัดส่งสินค้า อีกทั้งได้ความละเอียดที่ใกล้เคียงหรือละเอียดกว่าในบางรุ่น และสามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มเติมให้มีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานได้ แล้วยังประยุกต์ใช้ไปติดตั้งในระบบคีมจับเชิงแสงทำให้มีความสามารถในการเลื่อนฐานวางตัวอย่างได้ในระดับไมโครเมตร แทนที่จะใช้มือปรับหมุนในแบบเดิมที่อาจจะไม่ได้ความละเอียดและแม่นยำมากนัก กลายเป็นการเสริมศักยภาพให้ระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น อีกทั้งยังมีระบบการมองเห็นภาพ โปรแกรมควบคุมการเก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว ที่ช่วยในการดูภาพที่เกิดขึ้นแทนระบบกล้องจุลทรรศน์แบบเดิม ทำให้กลายเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ผู้ที่ต้องการศึกษาอนุภาคตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก มีความสะดวกง่ายต่อการใช้งาน และสามารถนำไปพัฒนางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

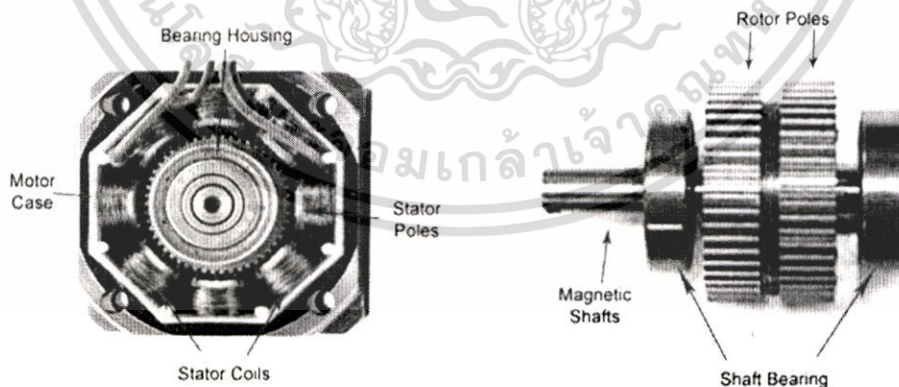
2.1 สเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์(Stepping Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่แกนหมุนจะเคลื่อนที่ไปเป็นขั้นๆหรือเป็นสเต็ป โดยสเต็ปละกี่องศา อาทิเช่น $0.36^{\circ}/\text{Step}$, $0.72^{\circ}/\text{Step}$, $1.8^{\circ}/\text{Step}$, $3.6^{\circ}/\text{Step}$, $7.2^{\circ}/\text{Step}$ เป็นต้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์ ตามจำนวน ความถี่ สัญญาณพัลส์ (Pulse Signal) ที่ป้อนให้โดยใช้วงจรควบคุม(Driver) โดยสามารถออกแบบให้มอเตอร์นั้นหมุนอย่างต่อเนื่องหรือหมุนเป็นสเต็ปได้โดยการควบคุมทิศทางได้จากการเลื่อนลำดับสเต็ปการทำงาน (Sequence)

สเต็ปป์มอเตอร์นั้นได้ถูกนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในชิ้นส่วนของเครื่องมือเครื่องจักรที่จะเคลื่อนที่ไปเป็นสเต็ปในงานควบคุมตำแหน่งที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องพิมพ์ เครื่องกัดเซาะผิววัสดุ เครื่องควบคุมแขนกล เครื่อง X-Y plotter หุ่นยนต์ และเครื่อง CNC เพราะเนื่องจากคุณสมบัติตัวหมุน(Rotor) ของสเต็ปป์มอเตอร์ที่สามารถหมุนเป็นสเต็ปด้วยมุมที่มีความแน่นอนและสามารถรักษาตำแหน่งของตัวหมุนให้อยู่นิ่งกับที่ได้

2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของสเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์จะมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ชุดแกนหมุน (Rotor) ที่เป็นชุดของแม่เหล็กถาวรสามารถเคลื่อนที่ได้ และ สเตเตอร์(Stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งจะเป็นส่วนที่มีขดลวดพันล้อมรอบแกนเหล็ก ดังรูปที่2.1 ซึ่งจะทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์ เข้ามาแล้วเปลี่ยนเป็นสนามแม่เหล็ก ผลักให้ชุดแกนหมุนเกิดแรงผลักและดันให้เคลื่อนที่ไปได้ตามต้องการ

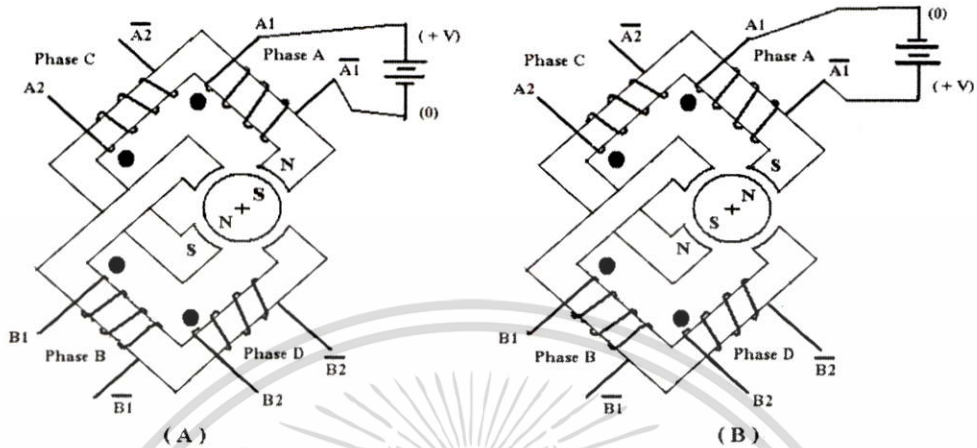


รูปที่ 2.1แสดงโครงสร้างภายในของสเต็ปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หลักการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์

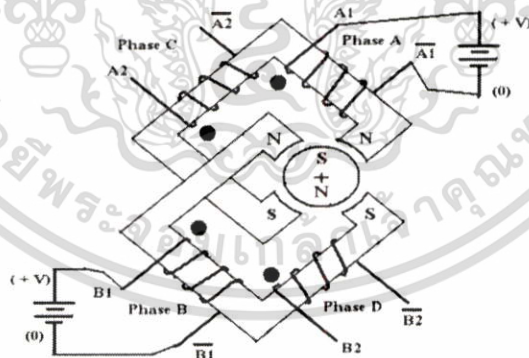
เพื่อที่จะอธิบายการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์ จะยกตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กที่ชุดขดลวดอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชุดขดลวดอยู่กับที่ของสแต็ปปีงมอเตอร์

จากรูปที่ (A) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดขดลวดชุด Phase A โดยต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ขั้ว A1 และขั้วลบเข้าที่ขั้ว A1 ของสแต็ปปีงมอเตอร์ ก็จะมีผลทำให้เกิดขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่แกนเหล็กของชุดขดลวดอยู่กับที่เพียง 2 ขั้วตามรูปที่ 2.2(A)

ต่อมาเมื่อสลับขั้วการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.2(B) ก็จะมีผลทำให้เกิดขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่แกนเหล็กของชุดขดลวดอยู่กับที่ เปลี่ยนไปเป็นตามรูปที่ 2.2 (B)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชุดขดลวดอยู่กับที่ของสแต็ปปีงมอเตอร์

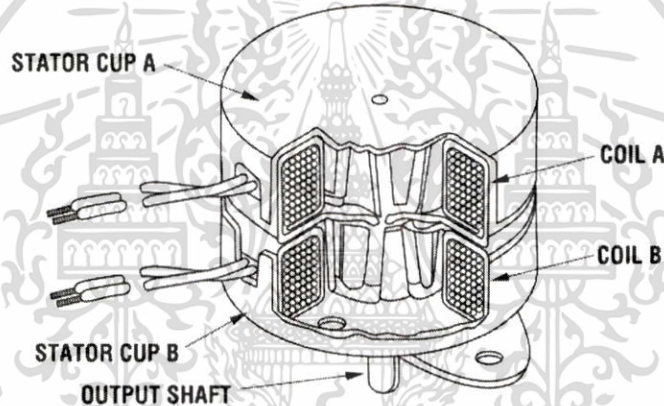
จากรูปที่ 2.3 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดขดลวดชุด Phase A และ Phase B พร้อมกันโดยที่ Phase A ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ขั้ว A1 และขั้วลบเข้าที่ขั้ว A1 ของสแต็ปปีงมอเตอร์ และที่ Phase B ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ขั้ว B1 และขั้วลบเข้าที่ขั้ว B1 ก็จะมีผลทำให้เกิดขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่แกนเหล็กของชุดขดลวดอยู่กับที่ทั้ง 4 ขั้วตามรูปที่ 2.3

2.1.3 การแบ่งชนิดของสตีปิ้งมอเตอร์

มีการแบ่งชนิดของสตีปิ้งมอเตอร์ตามลักษณะโครงสร้างซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ แบบแม่เหล็กถาวรหรือ PM (Permanent Magnet), แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็กได้หรือ VR (Variable Reluctance) และแบบผสมหรือไฮบริด (Hybrid)

2.1.3.1 สตีปิ้งมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet : PM)

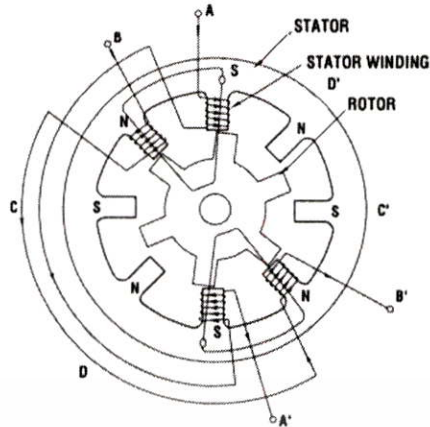
ส่วนหมุน (Rotor) ที่เป็นทรงกระบอกไม่มีขั้วยื่น (Non-Silent Pole) และฝังแม่เหล็กถาวรลงในส่วนหมุนโดยวางสลับขั้วเหนือและขั้วใต้ เป็นลักษณะเฉพาะของสตีปิ้งมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PM) จากคุณสมบัติที่ส่วนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร เมื่อขดลวดในส่วนอยู่กับที่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กบนส่วนอยู่กับที่กับขั้วแม่เหล็กบนส่วนหมุนที่เป็นขั้วตรงข้ามกันจะดึงดูดเข้าหากัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของส่วนหมุนเข้าหาส่วนอยู่กับที่เป็นลำดับ การฝังแม่เหล็กถาวรลงในส่วนหมุน ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้น สตีปิ้งมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรนี้จึงให้แรงบิดที่สูงกว่าสตีปิ้งมอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

2.1.3.2 สตีปิ้งมอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Variable reluctance : VR)

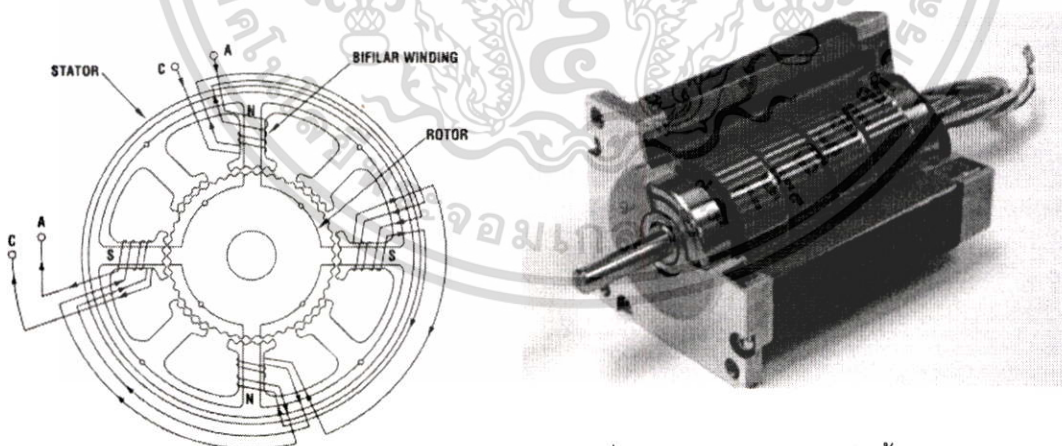
สตีปิ้งมอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก (VR) มีส่วนหมุน เป็นแผ่นโลหะบางที่มีขั้วยื่น (Silent Pole) ออกมา ซึ่งถูกนำมาเรียงซ้อนกันให้เป็นแท่งตัน ดังรูปที่ 2.5 เมื่อขดลวดของส่วนอยู่กับที่ ได้รับการกระตุ้น กระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น และใช้ขั้วที่ยื่นออกมาของส่วนหมุน เป็นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นขั้วของส่วนหมุนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วของส่วนอยู่กับที่ ในทิศทางที่ทำให้ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) มีค่าน้อยที่สุด เมื่อทำการกระตุ้นขดลวดของส่วนอยู่กับที่อย่างเป็นลำดับถูกต้องและต่อเนื่องจะทำให้เกิดการหมุนของส่วนหมุนขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก

2.1.3.3. สเต็ปิ่งมอเตอร์แบบผสม (Hybrid : HB)

เมื่อนำเอาลักษณะของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก และแบบแม่เหล็กถาวร มารวมกัน ทำให้เกิดสเต็ปิ่งมอเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบใหม่ขึ้น โดยส่วนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร ที่มีลักษณะเป็นซี่ฟันยื่นออกมา (Rotor Teeth) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะมีมากกว่าหนึ่งวง โดยมีขั้วแม่เหล็กที่สลับกัน และซี่ฟันของแต่ละวงของส่วนหมุนจะไม่ตรงกัน ทำให้มุมการเคลื่อนที่มีความละเอียดสูงขึ้น เมื่อขดลวดทางส่วนอยู่กับที่ ได้รับการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กของส่วนอยู่กับที่ จะดึงดูดแม่เหล็กถาวรที่ถูกฝังอยู่ในส่วนหมุน ที่มีขั้วตรงข้ามกัน และใช้ซี่ฟันที่ยื่นออกมาของส่วนหมุนเป็นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็ก และเมื่อกระตุ้นเป็นลำดับที่ถูกต้องจะทำให้ส่วนหมุน เคลื่อนที่ได้ตามต้องการ รูปโครงสร้างของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบผสมเป็นไปดังรูปที่ 2. 6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสแต็ปปีงมอเตอร์

เป็นโครงสร้างรูปแบบการพันขดลวดของสแต็ปปีงมอเตอร์ แบ่งได้ดังนี้

2.1.4.1. การพันขดลวดแบบไบโพลาร์ (Bipolar)

จะมีการพันขดลวดหนึ่งขดโดยจำนวนรอบนั้นจะขึ้นอยู่กับสเป็คของสแต็ปปีงมอเตอร์ ในแต่ขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์โดยขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์จะถูกกำหนดโดยทิศทางของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามได้เพียง การกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า จะมาจากการควบคุมของวงจรวัดซึ่งให้กลับขั้วไฟฟ้า

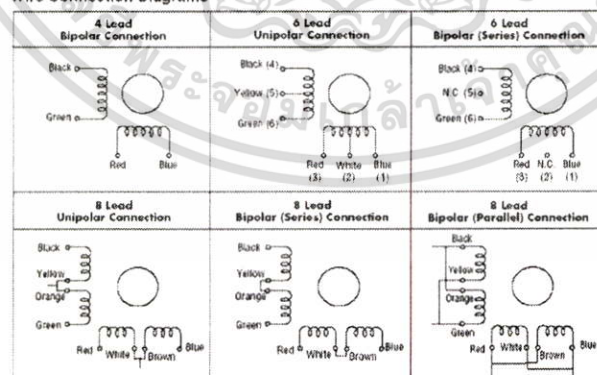
2.1.4.2 การพันขดลวดแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)

จะมีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ทำให้แต่ละขดลวดเกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม เช่นกันการกลับทิศทางขั้วแม่เหล็กทำได้โดยใช้วงจรวัดซึ่งให้สลับหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งแทนกันซึ่งการพันขดลวดทั้ง 2 แบบที่กล่าวมา มันต่างกันอย่างไร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า แบบยูนิโพลาร์จะทำให้เกิดแรงบิดน้อยกว่าแบบไบโพลาร์ โดยวิธีการเลือกซื้อจะดูจากสายไฟที่ต่อมาจากตัวสแต็ปปีงมอเตอร์ซึ่งแบบไบโพลาร์จะมี 4 สาย ดังรูปที่ 2.7 ส่วนเป็นแบบยูนิโพลาร์จะมี 5 สายหรือ 6 สาย ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 สแต็ปปีงมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 4 สายรูปที่ 2.8 สแต็ปปีงมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 6 สาย

Wire Connection Diagrams



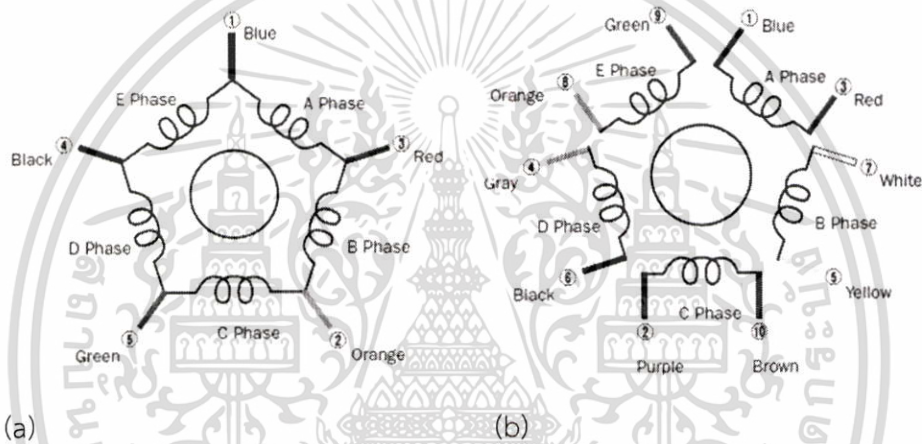
รูปที่ 2.9 แสดงไบโพลาร์และปีงมอเตอร์

การพันขดลวดแบบยูนิโพลาร์ของสแต็ป

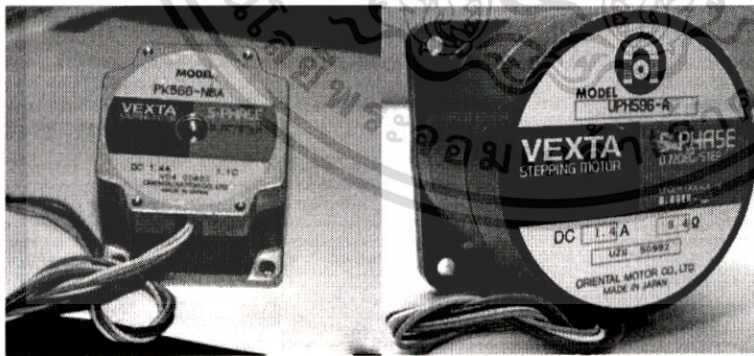
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 โครงสร้างขดลวดและรูปแบบการต่อสายของสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการสร้างสเต็ปป์มอเตอร์ได้ถูกพัฒนาไปมากกว่าเก่าโดยทางผู้ผลิตได้พัฒนาให้สเต็ปป์มอเตอร์นั้นมีความละเอียดในการหมุนแต่ละสเต็ปมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับ สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 2 เฟส โดยเรียกว่าสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส โดยจำนวนของขดลวดสเต็ปเตอร์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 10 ขดจากเดิมที่สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 2 เฟสนั้นมีขดลวดสเต็ปเตอร์เพียง 8 ขดเท่านั้นส่งผลให้ สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส นั้นมีความละเอียดในการหมุนไปด้วยความละเอียด 0.72 องศาต่อสเต็ป หรือ 0.36 องศาต่อสเต็ป โดยทางผู้ผลิตนั้นได้ออกแบบออกมาสองรุ่นคือ 1.สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar แบบขดไม่อิสระ 2.สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar แบบขดอิสระ ซึ่งจะมีวิธีการขับและรายละเอียดที่แตกต่างกัน การใช้ชุดวงจรขับก็ต้องใช้เฉพาะไม่สามารถใช้ร่วมกันได้ เนื่องจากรูปแบบการขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นต่างกัน โดยการแบ่งแยกนั้นอาจทำได้โดยสังเกตสายสัญญาณเป็น 5 เส้นและ 10 เส้น ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างขดลวดสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar (a) แบบขดไม่อิสระ (5 เส้น) และ (b) แบบขดอิสระ (10 เส้น)

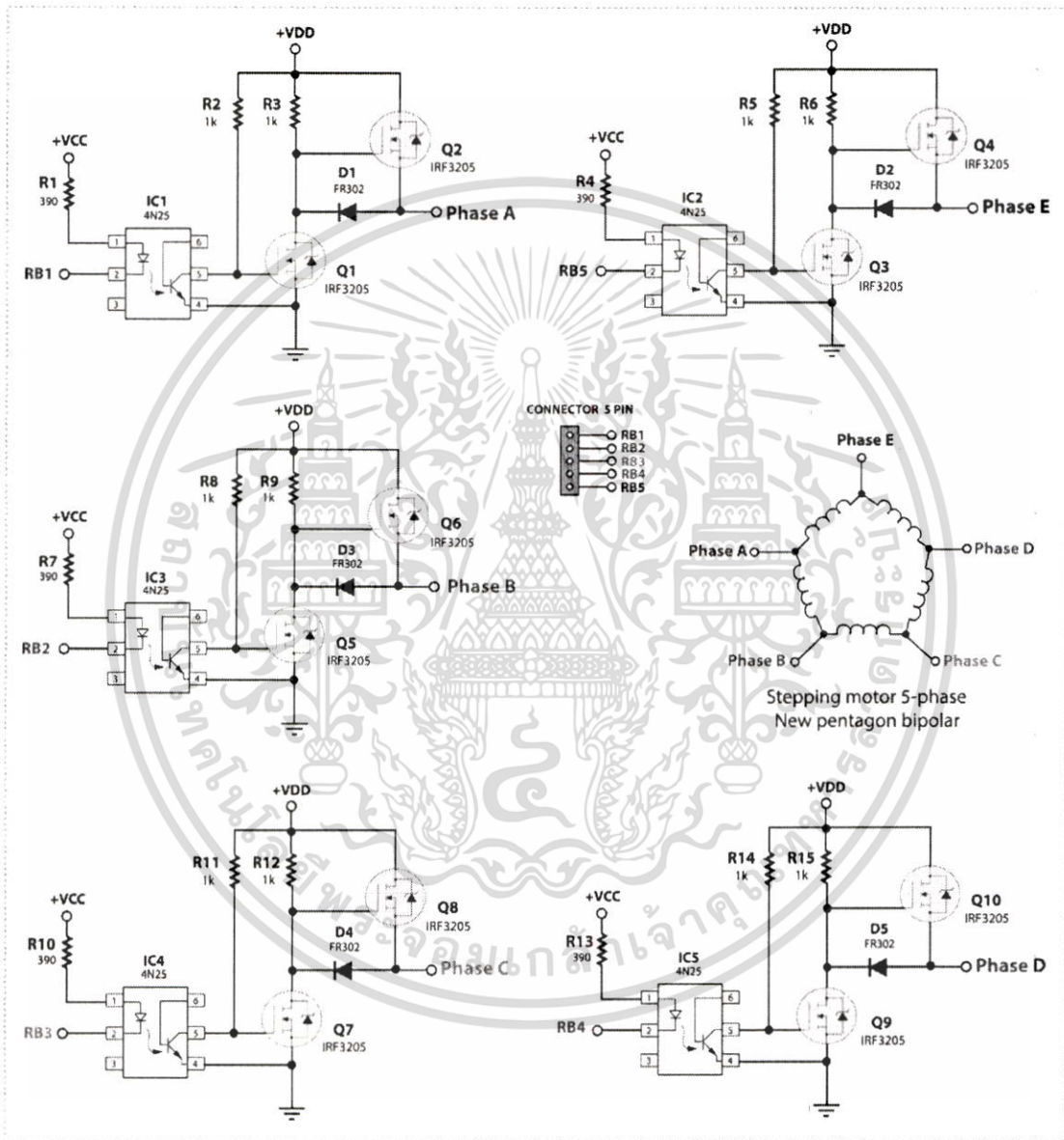


รูปที่ 2.11 สเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟสที่มีโครงสร้างขดลวดชนิด New pentagon bipolar (a) แบบขดไม่อิสระและ (b) แบบขดอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 รูปแบบการกระตุ้นการขับเคลื่อนสแต็ปมอเตอร์แบบ 5 เฟส

สแต็ปมอเตอร์มีวิธีการขับเคลื่อนที่แตกต่างกันไปในหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดหรือจำนวนเฟส วงจรขับ และวิธีการขับเคลื่อน ในที่นี้จะกล่าวอ้างอิงถึงวิธีการขับเคลื่อนสแต็ปมอเตอร์แบบ 5 เฟส แบบไบโพลาร์ที่ใช้อุปกรณ์สวิตช์เป็นวงจรขับเคลื่อน ดังรูปที่ 2.12 และเงื่อนไขการขับเคลื่อนดังตารางที่ 2.1



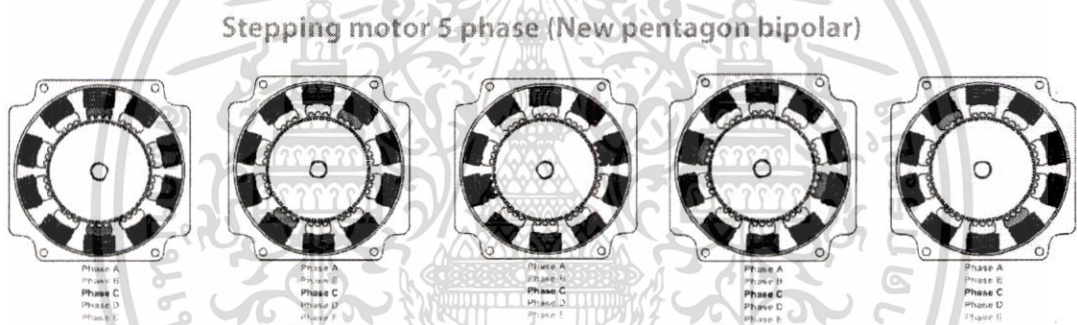
รูปที่ 2.12 วงจรการขับเคลื่อนสแต็ปมอเตอร์แบบ 5 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแบบเต็มขั้นของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟสแบบ ไบโพลาร์

เฟส สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ
B	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ
C	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ
D	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ
E	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ
ทิศทางเดินทวนเข็มนาฬิกา(CCW)	▶									
ทิศทางเดินตามเข็มนาฬิกา(CCW)	◀									

โดยทั่วไปแล้วการใช้งานจะใช้ชุดขับเคลื่อน(Driver)ที่ทำงานมาให้เข้ากันได้กับสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟสในแต่ละรุ่น ถ้าหากจะต้องการทำชุดขับเคลื่อนเองก็จำเป็นต้องรู้ว่าจะใช้สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ที่ใช้นั้นเป็นรุ่นไหน ภายในมีวิธีพันขดลวดแบบใด และเปรียบเทียบลำดับการขับเคลื่อน จากคู่มือของชุดขับเคลื่อนที่ได้ทำออกมาวางขาย โดยในงานงานวิจัยนี้ได้ใช้ สเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟสที่มีโครงสร้างขดลวดชนิด New pentagon bipolar แบบขดไม่อิสระ ใช้วิธีการขับเคลื่อนแบบขดคู่ แบบเต็มขั้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในขดลวดของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส เมื่อทำการขับเคลื่อนแบบเต็ม สเต็ป

จากรูปที่ 2.13 ได้แสดงให้เห็นถึงการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ด้วยวิธีเต็มขั้นซึ่งเป็นพื้นฐานของการกระตุ้นแบบเต็มสเต็ป ซึ่งได้พัฒนาไปเป็นลำดับกาขับเคลื่อน สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส เรียกว่าการกระตุ้นขดลวดแบบเต็มสเต็ป 2 ขดลวด และลำดับการทำงานเป็นไปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลำดับการควบคุมการขับเคลื่อนสแต็ปปีงแบบเต็มขั้น แบบ 2 ขด ของสแต็ปปีงแบบ 5 เฟส

เฟส สแต็ปที่	1	2	3	4	5
A	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	บวก
B	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ
C	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ
D	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ
E	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก
ทิศตามเข็มนาฬิกา(CW)	→				
ทิศทวนเข็มนาฬิกา(CCW)	←				

2.1.7 คุณสมบัติของสแต็ปปีงมอเตอร์

2.1.7.1 คุณสมบัติเด่นของสแต็ปปีงมอเตอร์

- มุมในการหมุน (rotation angle) มีค่าตามสัดส่วนของจำนวนของพัลส์อินพุตที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
- ความเร็วในการหมุน (rotation speed) มีค่าตามสัดส่วนและสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณพัลส์อินพุตที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
- ใช้ในการควบคุมตำแหน่งแบบระบบเปิดที่มีความแม่นยำสูง โดยไม่ต้องใช้สัญญาณป้อนกลับของการกำหนดตำแหน่ง
- ไม่มีความผิดพลาดสะสมของการกำหนดตำแหน่ง
- เหมาะกับงานที่ต้องการกลไกเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ แรงบิดสูง โดยไม่ต้องใช้ระบบเฟืองทดรอบเพิ่มเติม
- สามารถกำเนิดและรักษาแรงบิดได้ในทันทีที่มอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน
- สามารถรักษาสภาวะการหมุนของแกนได้โดยไม่ทำให้มอเตอร์เสียหาย
- มีลูกปืนความเที่ยงตรงสูง เพื่อช่วยการหมุนของแกนมีความแม่นยำ

2.1.7.2 ข้อด้อยของสแต็ปปีงมอเตอร์

- การกำหนดหรือการเกิดเรโซแนนซ์ทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์ได้
- การทำให้อัตราการหมุนแกนด้วยความเร็วสูงทำได้ยาก
- หากเกิดแรงบิดสูงเกินกว่าที่รับได้หรือเกิดโอเวอร์ทอร์คมอเตอร์จะสูญเสียการรับรู้ตำแหน่งของแกนหมุน จะต้องกลับไปเริ่มต้นการอินิเชียลใหม่
- ให้แรงบิดที่น้อยกว่ามอเตอร์ไฟตรงและมอเตอร์ไฟสลัที่ขนาดของตัวมอเตอร์เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม RS232 สามารถตรวจสอบการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ได้ แต่สแต็ปเปอร์มอเตอร์บางตัวอาจมีปัญหาในการเชื่อมต่อได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สแต็ปเปอร์มอเตอร์มีการเชื่อมต่อที่ไม่ถูกต้อง การแก้ไขปัญหาการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์สามารถทำได้โดยการตรวจสอบการเชื่อมต่อของสายไฟและสายดินของมอเตอร์ให้ถูกต้อง และตรวจสอบการตั้งค่าของโปรแกรม RS232 ให้ถูกต้อง

2.1.8.2 การตรวจสอบการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์

รูปที่ 2.14 การแสดงค่าการตรวจสอบการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ RS232

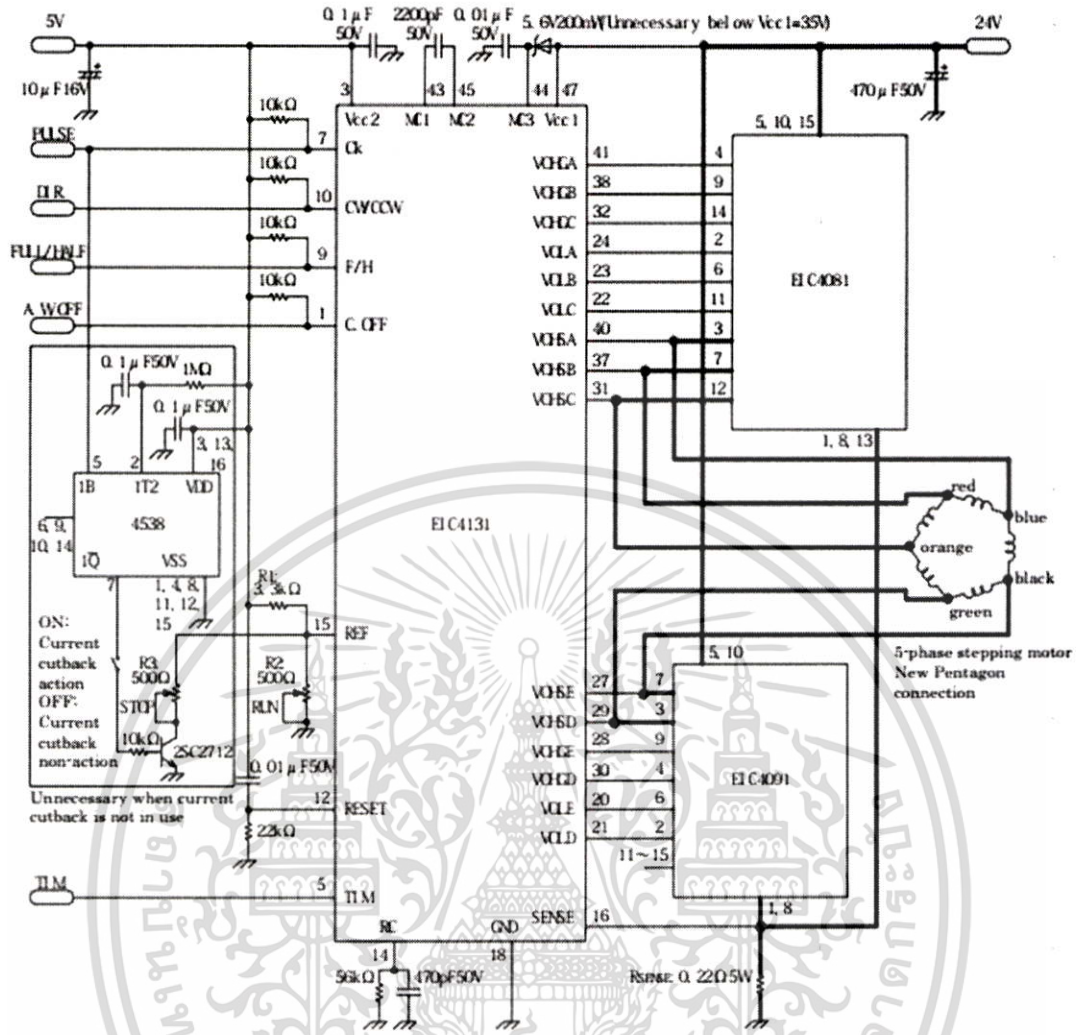


2.1.8.1 การนับจำนวนสแต็ปของสแต็ปเปอร์มอเตอร์
 การนับจำนวนสแต็ปของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ทำได้โดยการสังเกตการเคลื่อนที่ของมอเตอร์และนับจำนวนการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ให้ครบถ้วน การนับจำนวนสแต็ปของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ทำได้โดยการสังเกตการเคลื่อนที่ของมอเตอร์และนับจำนวนการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ให้ครบถ้วน

การแก้ไขปัญหาการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ทำได้โดยการตรวจสอบการเชื่อมต่อของสายไฟและสายดินของมอเตอร์ให้ถูกต้อง และตรวจสอบการตั้งค่าของโปรแกรม RS232 ให้ถูกต้อง

2.1.8 การตรวจสอบค่าการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์

การแก้ไขปัญหาการเชื่อมต่อของสแต็ปเปอร์มอเตอร์ทำได้โดยการสังเกตการเคลื่อนที่ของมอเตอร์และนับจำนวนการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ให้ครบถ้วน



รูปที่ 2.15 วงจรสมบูรณของการใช้ IC สำเร็จที่ออกแบบมาพร้อมกับการวัดกระแสของแต่ละเฟส

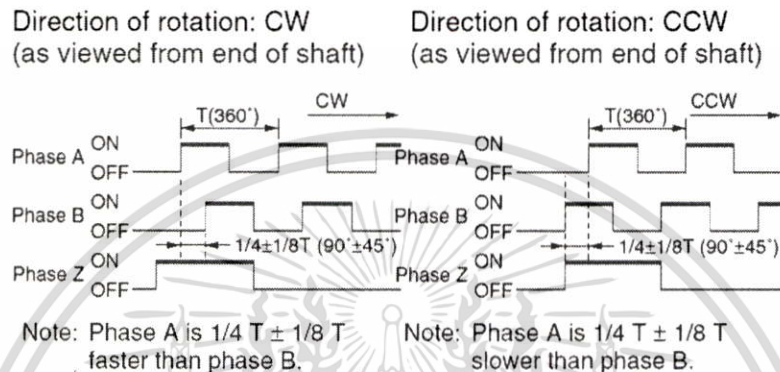
2.1.8.3 การใช้เอ็นโคตเตอร์(Encoder) ตรวจสอบการหมุนไปของสเต็ปมอเตอร์

ได้มีการพัฒนาใช้เทคนิคทางแสงเข้ามาช่วยในการตรวจสอบการหมุนไปของมอเตอร์ชนิดต่างๆได้โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆคือ Incremental encoder และ Absolute encoder ทั้งสองแบบนี้ใช้หลักการส่งแสงผ่านวงล้อที่มีแถบมืด-แถบสว่างแล้วมีตัวตรวจวัดได้สัญญาณออกมาเป็นรูปแบบพัลส์โดยในโครงการพิเศษนี้เลือกใช้แบบ Incremental encoder จึงได้สัญญาณออกมาดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ได้ว่าสเต็ปมอเตอร์หมุนไปในทิศทางไหน ด้วยความเร็วเท่าไร และหมุนไปกี่สเต็ป

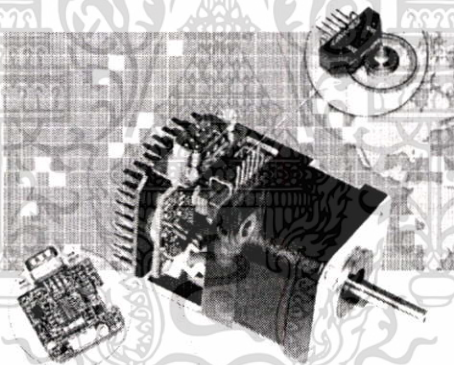
โดยในปัจจุบันทางบริษัทผู้ผลิตสเต็ปมอเตอร์ก็ได้ทำการผลิตสเต็ปมอเตอร์ที่มีการติดตั้งเอ็นโคตเตอร์ มาเรียบร้อยแล้วทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบตำแหน่งที่หมุนไปได้



รูปที่ 2.16 Incremental encoder ความละเอียด 4096 พัลส์/รอบ



รูปที่ 2.17 รูปแบบเฟสของสัญญาณที่ออกมาจากEncoder แสดงผลการหมุนไปแบบCW/CCW



รูปที่ 2.18 สเต็ปมอเตอร์ที่มีการติดตั้งEncoder มาเรียบร้อยแล้ว

2.2 แนะนำโปรแกรม LabVIEW และการใช้งานเบื้องต้น

LabVIEW จัดเป็นซอฟต์แวร์ประเภท Programming Language คล้ายกับ Visual Basic หรือ Visual C++ แต่แตกต่างกันตรงที่ LabVIEW เป็นการสร้างโปรแกรมโดยใช้รูปภาพ (Graphical Programming Language) คือจะใช้บล็อกฟังก์ชันซึ่งแทนด้วยรูปไอคอน (Icon) แทนการเขียนโปรแกรมย่อย (Subroutine) และใช้เส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อกฟังก์ชันแทนการไหลของข้อมูลระหว่างโปรแกรมย่อยนั้นๆ คล้ายกับการเขียนโฟลว์ชาร์ต (Flow Chart) หรือ บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของโปรแกรม สิ่งที่ทำให้ LabVIEW ต่างจากซอฟต์แวร์ สำหรับการพัฒนาโปรแกรมอื่นทั่วไปอีกอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการพัฒนาโปรแกรมใช้งานทางด้านงานวัดและงานควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งถือเป็นเป้าหมายสำคัญของ LabVIEW โดยจะมีเครื่องมือ (Tool) และไลบรารี (Library) ที่สนับสนุนการใช้งานทางด้านนี้ไว้อย่างมากมาย ให้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของเครื่องมือเสมือนจริง (Virtual Instrument:VI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW

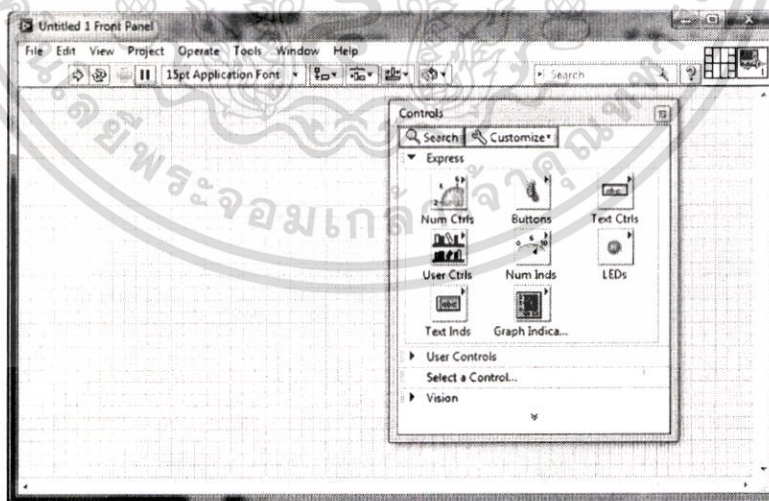
LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ภาษาอย่างหนึ่งที่ใช้พัฒนาโปรแกรมใช้งานอื่นๆ โดยเน้นไปทางด้านการใช้งานในงานวัดและควบคุมอัตโนมัติ โปรแกรมที่ได้จากการพัฒนาโดยใช้ LabVIEW นี้เรียกว่า VI (Virtual Instrument) คือ การจำลองรูปแบบของส่วนต่างๆในเครื่องมือที่ใช้งานวัดคุม เช่น มิเตอร์, บาร์สเกล, กราฟ, สวิตช์และปุ่ม มาไว้บนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการควบคุมและแสดงผล

LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุม ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ใช้ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจาก การ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า), การ์ด IMAQ, (สำหรับข้อมูลประเภทรูป) หรือ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือ)
2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการทำ Analysis หรือ วิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งาน สามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดได้และใช้งานได้
3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะสัญญาณที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลาหรือ Oscilloscope แสดงผลของข้อมูลที่รายงานหรือเก็บข้อมูลใน Hard disk

1. เครื่องมือที่ใช้ออกแบบ Front Panel

โปรแกรม Virtual Instrument ที่สร้างโดย LabVIEW จะเรียกส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ว่า Front Panel ซึ่งประกอบด้วยส่วนรับคำสั่งควบคุม เช่น การป้อนข้อมูล, ปุ่ม, สวิตช์และส่วนแสดงผลข้อมูล เช่น มิเตอร์, บาร์สเกลและกราฟ เป็นต้น ส่วนต่างๆเหล่านี้สามารถเลือกได้จากกรุปไอคอนใน Controls Palette แล้วนำมาวางประกอบกันเป็น Front Panel ผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานของโปรแกรมที่สร้างขึ้นผ่าน Front Panel นี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.19

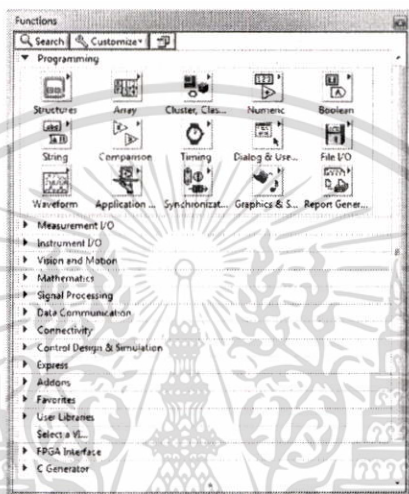


รูปที่ 2.19 ลักษณะของ Control Palette

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Graphic Block Diagram

การสร้างโปรแกรม VI บน LabVIEW ทำได้โดยการสร้างบล็อกโดยแอมแกรมซึ่งประกอบด้วยรูปไอคอนของบล็อกฟังก์ชันต่างๆที่ใช้แทนโปรแกรมย่อย โดยไม่ต้องกังวลเรื่องการใช้ภาษามากมาย เหมือนกับการเขียนโปรแกรมด้วยข้อความแบบเดิมๆ สามารถเลือกบล็อกฟังก์ชันต่างๆได้จาก Function Palette มาวางและเชื่อมบล็อกต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อระบุว่ามีการส่งข้อมูลจากบล็อกหนึ่งไปยังอีกบล็อกหนึ่ง ฟังก์ชันการทำงานของบล็อกต่างๆ ที่มีให้เลือกใช้มีตั้งแต่ฟังก์ชันการคำนวณธรรมดาไปจนถึงฟังก์ชันการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง รวมถึงฟังก์ชันการควบคุมอุปกรณ์ที่ทางเข้าและทางออกการปฏิบัติการเกี่ยวกับไฟล์ข้อมูลและอื่นๆอีกมากมาย ดังรูปที่ 2.20



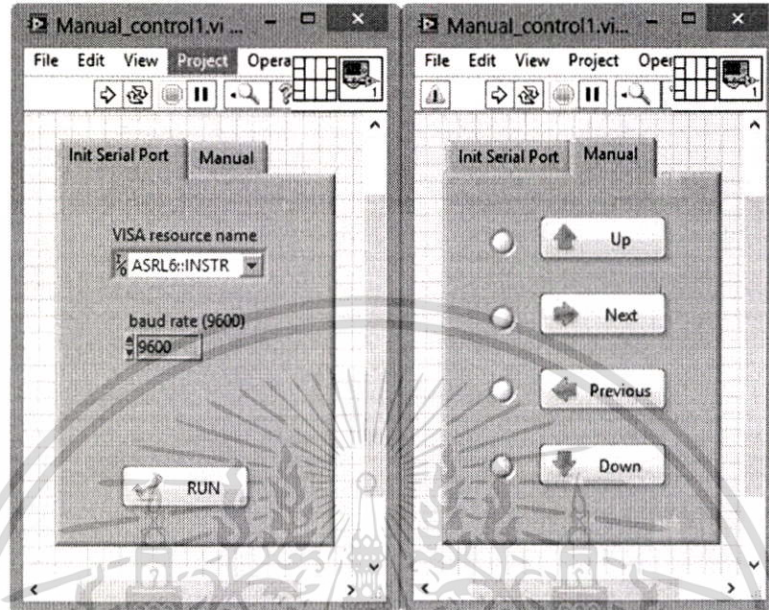
รูปที่ 2.20 ลักษณะของ Function Palette



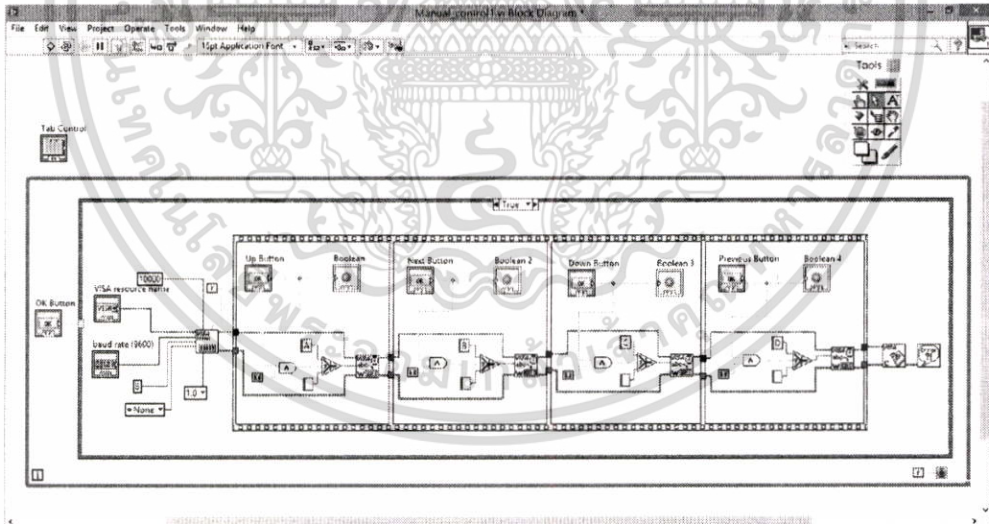
รูปที่ 2.21 แสดง Front Panel และ Block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน LabVIEW นั้นได้มีปลั๊กอินในส่วนของการเชื่อมต่อแบบอนุกรม (RS-232) ที่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เครื่องมือที่มีพอร์ตอนุกรม หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้สามารถใช้ GUI ของ LabVIEW ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เชื่อมต่อกับบอร์ดวงจรควบคุมเพื่อขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ได้



รูปที่ 2.22 GUI Front Panel ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-232

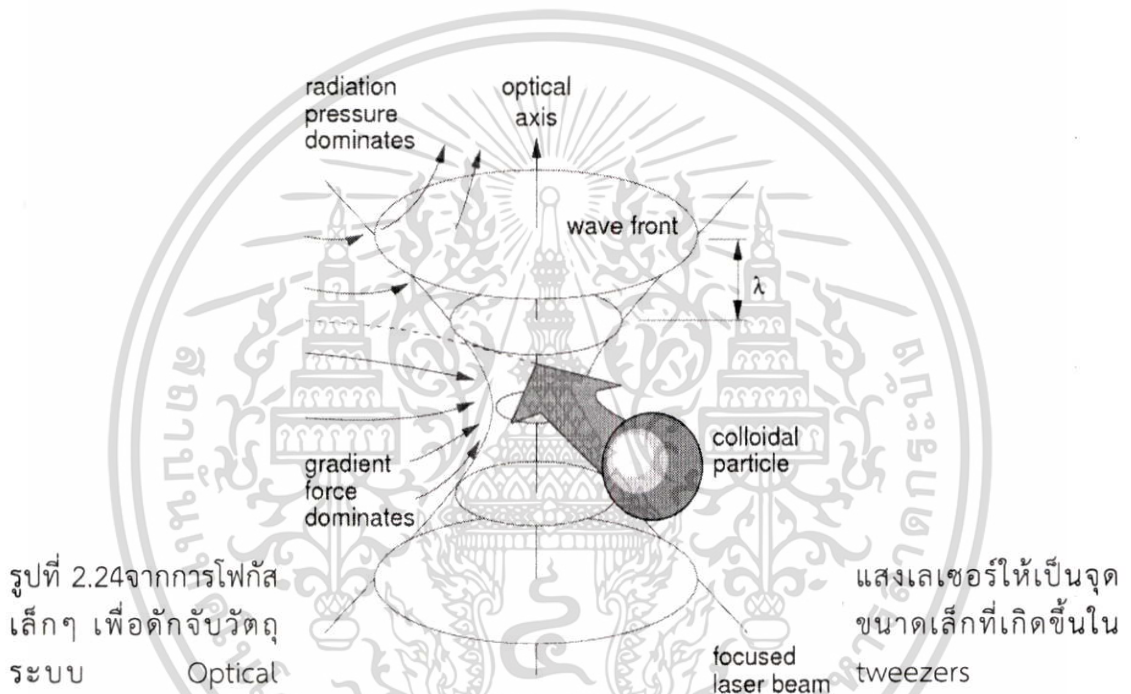


รูปที่ 2.23 แสดง Block Diagram ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)

Optical tweezers เป็นเทคนิคที่ใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวดักจับ (Trap)อนุภาคขนาดเล็ก ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Arthur Ashkin กับ Steven Chu และทีมงาน หัวใจสำคัญของ Optical tweezers ก็คือการโฟกัสแสงเลเซอร์โดยเลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์ (Microscope objective) ลงมาที่อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคจะถูกกักไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์ เงื่อนไขโดยทั่วไปของการดักจับอนุภาคด้วยเลเซอร์ คือ อนุภาคต้องโปร่งใสและมีดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางรอบๆ อนุภาคหัวใจสำคัญของการจับอนุภาคด้วยแสงก็คือการใช้เลนส์รวมแสงที่มีค่า Numerical aperture สูงเพื่อให้เกิดความแตกต่างของความเข้มแสงที่มาก ส่งผลให้แรงเกรเดียน (Gradient force)มากกว่าแรงการกระเจิง (Scattering force) จึงสามารถจับอนุภาคในสามมิติได้

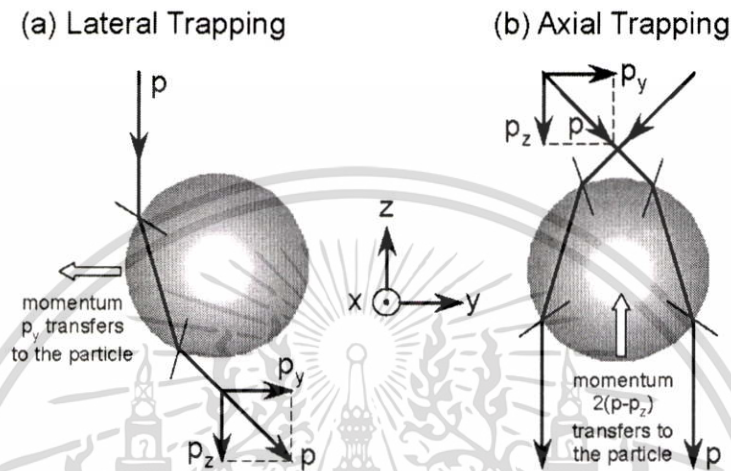


2.3.1. หลักการทำงานของ Optical tweezers

Optical tweezers สามารถอธิบายได้ด้วยหลักทัศนศาสตร์เรขาคณิต โดยใช้หลักของการอนุรักษ์โมเมนตัม แสงเป็นอนุภาคโฟตอนซึ่งมีโมเมนตัมเป็น $P = \frac{h}{\lambda}$ เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอนุภาคที่มีค่าดัชนีหักเหต่างจากดัชนีหักเหของตัวกลางรอบๆอนุภาคนั้น ทำให้โมเมนตัมของแสงเลเซอร์เกิดการหักเหไปจากแนวเดิมหลังจากผ่านอนุภาคที่ต้องการดักจับ โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางของลำเลเซอร์เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมของระบบ พิจารณาลำแนวแสงเลเซอร์แนวหนึ่งผ่านอนุภาคทรงกลมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำดังรูปที่ 2.25(a) อนุภาคนี้อาจมีดัชนีหักเหมากกว่าดัชนีหักเหของน้ำ จะทำให้อนุภาคนี้นี้ประพฤติตัวเป็นเลนส์นูนและทำให้ลำแสงเลเซอร์หักเหไปในทิศทางเข้าหาจุดศูนย์กลางของอนุภาคนั้นและแสงเป็นอนุภาคโฟตอนจะพบว่าโฟตอนที่วิ่งผ่านอนุภาคจะมีโมเมนตัมในแนวแกน y ที่เปลี่ยนไปมีค่าเท่ากับ P_y ซึ่งจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทาง $-y$ ด้วยแรงโมเมนตัม $-P_y$ เพื่อให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกน y ของระบบและอนุภาคจะหยุดเคลื่อนที่เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มาอยู่บริเวณกลางลำเลเซอร์พอดี เนื่องจากที่บริเวณกลางลำเลเซอร์

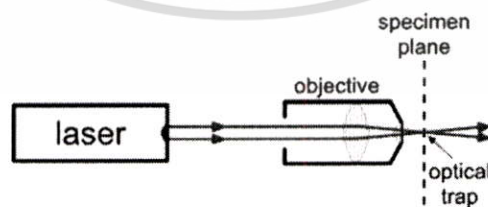
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นจุดที่แสงจะไม่มีการหักเหเมื่อวิ่งผ่านอนุภาค ในความเป็นจริงแสงเลเซอร์ที่ผ่านอนุภาคที่จุดโฟกัสของ microscope objective นั้นมีมากกว่าหนึ่งแนวตั้งที่เห็นในรูปที่ 2.25(a) จึงต้องมีการรวมผลจากโฟตอนทุกแนวผลที่ได้จะเหมือนเดิมคืออนุภาคจะถูกแรงของแสงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับลำเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของลำเลเซอร์ ทำนองเดียวกันจะมีแรงในทิศทางที่ขนานกับลำเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นลงเข้าหาจุดโฟกัสของเลเซอร์เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25(b) ซึ่งจะทำให้อนุภาคถูกดักจับได้ในสามมิติ



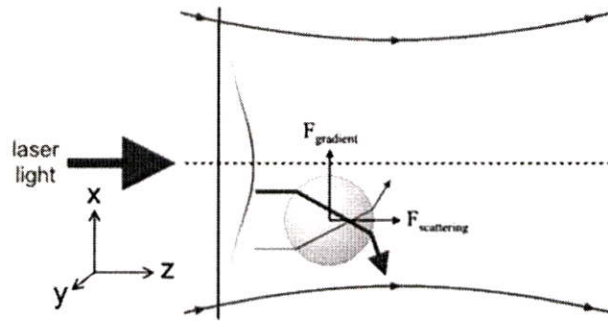
รูปที่ 2.25 อธิบายแรงในการจับอนุภาค (a) ในแนวตั้งฉากกับลำเลเซอร์ และ (b) ในแนวขนานกับลำเลเซอร์

การจัดอุปกรณ์ optical tweezers อย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.26 โดยแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ถูกยิงผ่าน microscope objective ลำแสงเลเซอร์เมื่อผ่าน microscope objective จะไปรวมกันเป็นจุดที่ระยะโฟกัสของ microscope objective ซึ่งจะถูปรับระยะโฟกัสให้ไปตกบนอนุภาคที่ต้องการจะดักจับพอดีซึ่งสามารถอธิบายแรงที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.25 (b) ลำเลเซอร์จะมีความเข้มสูงสุดที่บริเวณตรงกลางลำเลเซอร์และจะมีความเข้มลดลงตามแนวรัศมี ดังรูปที่ 2.27 แรงที่เกิดขึ้นจะมี 2 แบบ ดังที่กล่าวไปแล้วในรูปที่ 2.25 เรียกแรงที่เกิดขึ้นที่มีทิศตั้งฉากกับลำเลเซอร์ว่าแรงเกรเดียนท์ (Gradient Force) ส่วนแรงที่มีทิศขนานกับลำเลเซอร์เรียกว่าแรงกระเจิง (Scattering Force)



รูปที่ 2.26 แสดงการจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แสดงแรงที่เกิดขึ้นเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านอนุภาค

2.4 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)



รูปที่ 2.28 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์

ในโครงการพิเศษนี้เลือกใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ภายในเป็นเซนเซอร์แบบซีมอส(CMOS) ขนาด 640x480 ความละเอียด 2 ล้านพิกเซล มีระบบทัศนศาสตร์ช่วยในการขยายภาพโดยปรับระยะโฟกัสทำให้ได้กำลังขยาย 50x-500x พร้อมหลอดไฟ LED ให้แสงสว่างจากทางด้านบนจึงสามารถนำมาใช้เป็นกล้องส่องดูอนุภาคตัวอย่างและบันทึกภาพเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ได้ทันทีผ่านพอร์ต USB มีความยืดหยุ่นในการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อและควบคุมได้อย่างหลากหลาย

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยของโครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างฐานวางสารตัวอย่างที่เคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y โดยใช้สเต็ปมอเตอร์ในการควบคุมการหมุนพร้อมระบบจำกัดการหมุน จากนั้นจะทำการติดตั้งในระบบคีมจับเชิงแสงต่อไป โดยจะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบ สร้างวงจรชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟสและวงจรแหล่งจ่ายไฟ

ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างกับสเต็ปมอเตอร์ชุดวงจรควบคุมและทดสอบการทำงาน

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบและสร้างระบบการมองเห็นภาพ

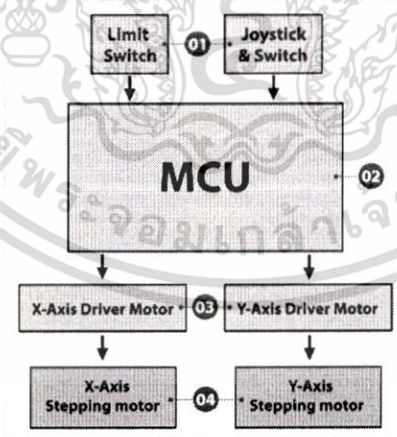
ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบและจัดระบบทัศนศาสตร์เพื่อสร้างเป็นระบบคีมจับเชิงแสง

ขั้นตอนที่ 5 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติในระบบคีมจับเชิงแสง

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ และเก็บบันทึกผลการทดลอง

โดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.1 ออกแบบสร้างวงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟสและวงจรแหล่งจ่ายไฟ



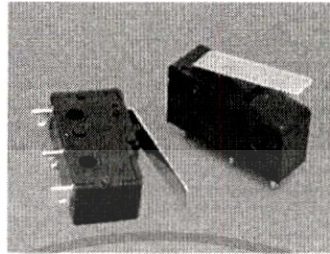
3.1.1 วงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟส

รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานโดยรวมของชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์พร้อมคีมจับและสวิทช์

ส่วนที่ 1 สวิตช์ (Switches)

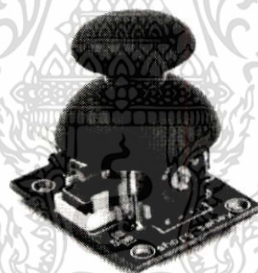
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ลิ้มิตสวิตช์ (Limit switch)ใช้ในการตรวจสอบและกำหนดระยะทางที่แท่นเลื่อนเคลื่อนที่ไปได้ในแนวระนาบแกนX-Y โดยติดตั้งที่แท่นเลื่อนทั้งในสแต็ปป์แนวแกนX-Y ขณะทำงานเมื่อแท่นเลื่อนไปสุด ลิ้มิตสวิตช์จะถูกกดและส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการแจ้งเตือนว่าแท่นเลื่อนได้เลื่อนไปสุดแล้ว



รูปที่ 3.2 ลิ้มิตสวิตช์

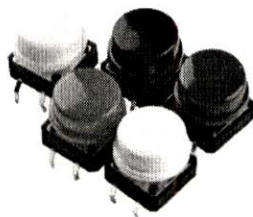
1.2 คั่นโยกควบคุม (Joystick)ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนของแท่นวางสารตัวอย่างที่ติดกับสแต็ปป์มอเตอร์โดยให้สัญญาณออกมาเป็น สัญญาณอนาล็อกสองสัญญาณ คือ แกน X และแกน Y ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนของแท่นวางสารตัวอย่างให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบแกน X-Y



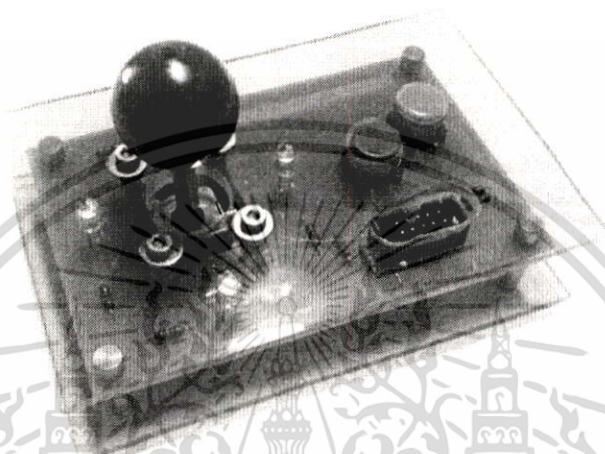
รูปที่ 3.3 โมดูล คั่นโยกควบคุม

1.3 สวิตช์(Switch) ใช้ในการเลือกปุ่มHome เพื่อใช้การตั้งค่าใหม่ให้กับการหมุนของสแต็ปป์มอเตอร์ และส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ ปุ่ม Capture ที่ใช้ในการเก็บภาพนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



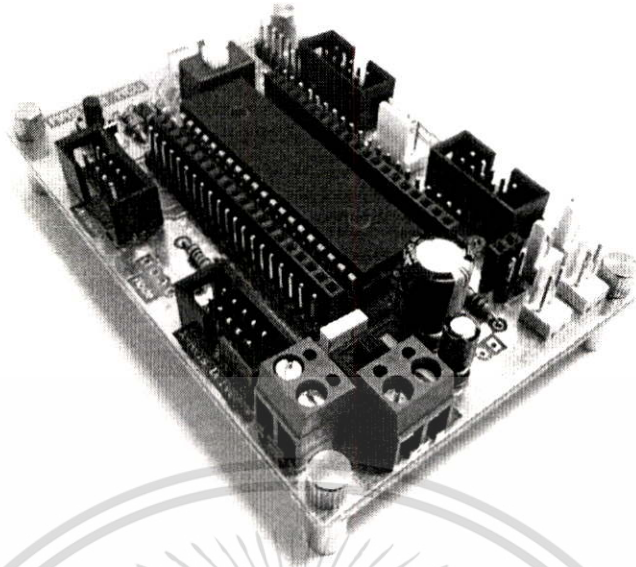
รูปที่ 3.4 สวิตช์ควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.5 กล่องควบคุม Joybox ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนของแท่นเลื่อน X-Y

ส่วนที่ 2MCU

ในระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัตินี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมโดยทำงานรับสัญญาณจากลิมิตสวิตช์ คั่นโยกควบคุม และสวิตช์ ทำการประมวลผลและส่งสัญญาณออกไปยังบอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ ทำงานร่วมโปรแกรม LabVIEW ผ่านพอร์ต RS-232 โดยในระบบนี้เลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC 18F458 เป็นหัวใจหลักในการควบคุมประมวลผลระบบทั้งหมด



รูปที่ 3.6บอร์ดวงจรควบคุมและประมวลผลหลัก

ส่วนที่ 3 X-Y Driver Motor

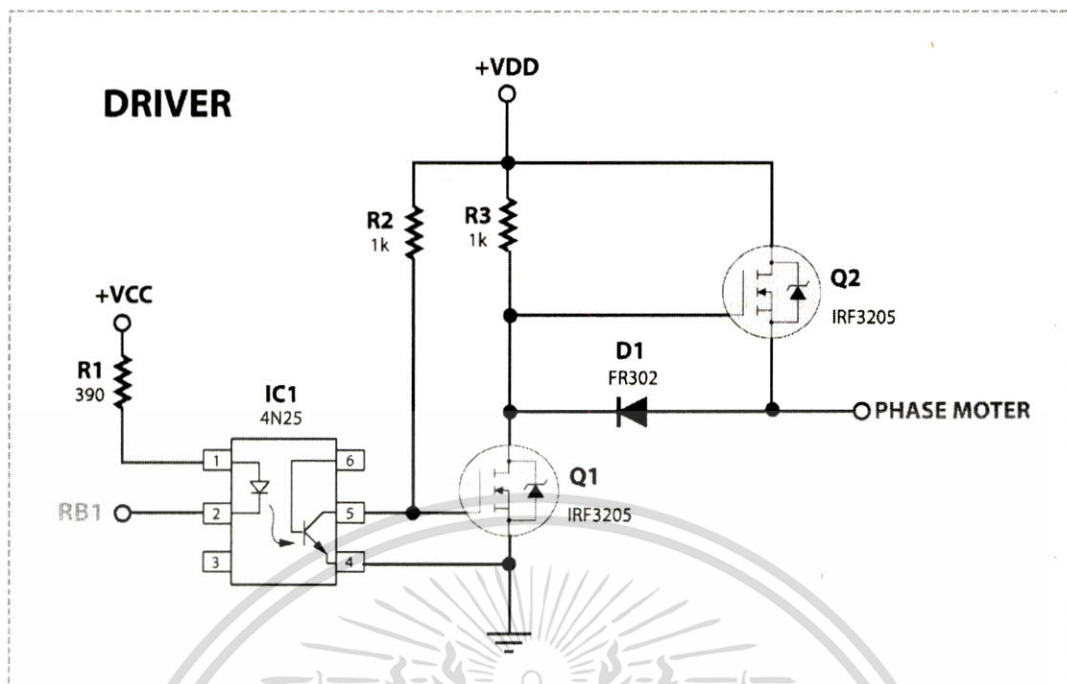
วงจรการควบคุมและขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์ ชนิด 5 เฟสควบคุมสเต็ปสองตัวในแนวแกน X-Y

การศึกษาลำดับการทำงาน(Step sequence) ของสเต็ปมอเตอร์ ชนิด 5 เฟส พบว่าลำดับการทำงานนั้นสามารถกระตุ้นได้หลายแบบแต่ในที่นี้ทางคณะผู้จัดทำเลือกใช้ลำดับการทำงานแบบเต็มขั้น โดยมีลำดับการทำงานเป็นไปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1แสดงลำดับการขับสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟส แบบเต็มขั้น

เฟส สเต็ปที่	1	2	3	4	5
1	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	บวก
2	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ
3	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ
4	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ
5	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก
ทิศตามเข็มนาฬิกา(CW)	→				
ทิศทวนเข็มนาฬิกา(CCW)	←				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



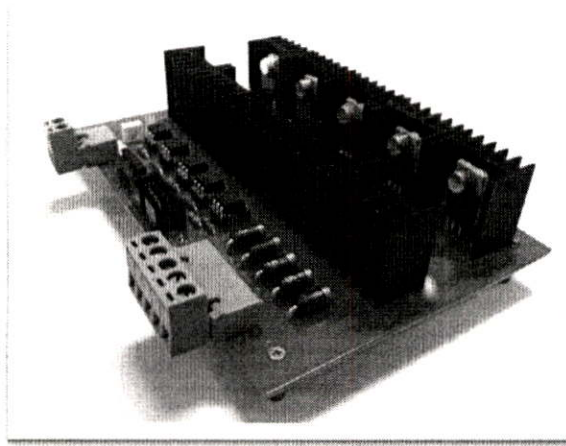
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรภาคขับสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟส

ในส่วนของวงจรควบคุมและขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์ แบบ 5 เฟสเป็นไปดังรูปที่ 3.7 โดยการทำงานของวงจรคือ รับสัญญาณดิจิทัลที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งไปยัง ออปโตคัปเปอร์ (Opto-Coupler) แล้วส่งต่อไปยังมอสเฟสและไปยังสเต็ปมอเตอร์ทั้ง 5 เฟส โดยถ้าหากสัญญาณที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะมี 2 สัญญาณคือ

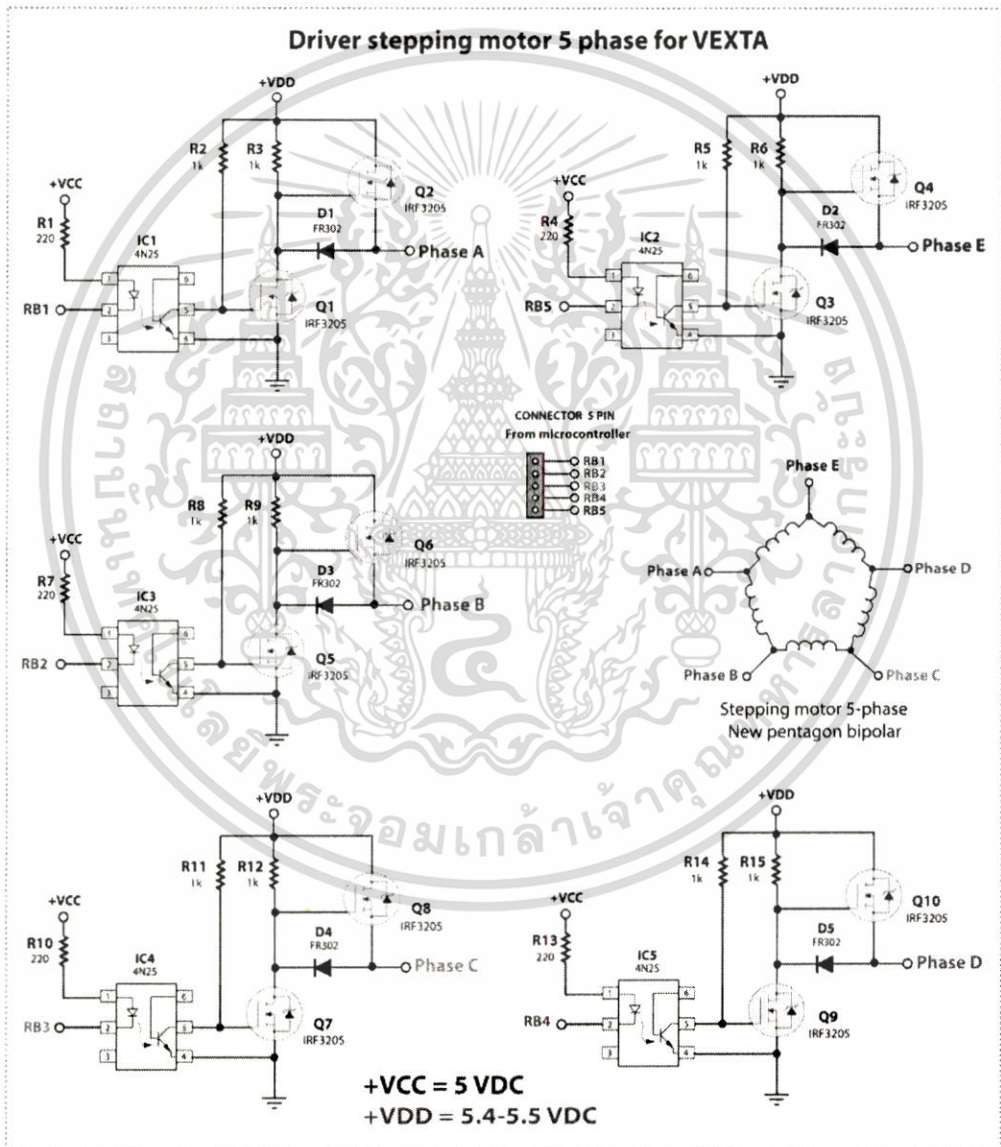
โลจิก “0” (Low) จะทำให้เกิดการส่งสัญญาณแสงภายในออปโตคัปเปอร์ส่งผลให้โฟโตทรานซิสเตอร์ภายในมีสถานะเปิด (On) ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ Q1 มีสถานะปิดแล้วทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ Q2 มีสถานะเปิดจากไฟ +VDD ที่ไหลเข้าขา Gate จึงทำให้จุดเชื่อมต่อไปยังเฟสของสเต็ปมอเตอร์มีสัญญาณเป็นโลจิก “1” (High) จากไฟ +VDD

โลจิก “1” (High) จะทำให้ไม่เกิดการส่งสัญญาณแสงภายในออปโตคัปเปอร์ส่งผลให้โฟโตทรานซิสเตอร์ภายในมีสถานะปิด (Off) ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ Q1 มีสถานะเปิดจากไฟ +VDD ที่ไหลเข้าขา Gate แล้วทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ Q2 มีสถานะปิด จึงทำให้จุดเชื่อมต่อไปยังเฟสของสเต็ปมอเตอร์มีสัญญาณเป็นโลจิก “0” (Low)

จากรูปด้านบนจะเห็นว่ามิโดโอดช่วยในการป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสไฟ โดยการขับเคลื่อนประกอบด้วย 5 สเต็ปไล่ตามตารางที่ 3.1 จึงจะครบลำดับการทำงาน ซึ่งวิธีการขับเคลื่อนแบบนี้เป็นวิธีที่สะดวก ง่ายต่อการเชื่อมต่อสั่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้พอร์ตในการเชื่อมต่อน้อย

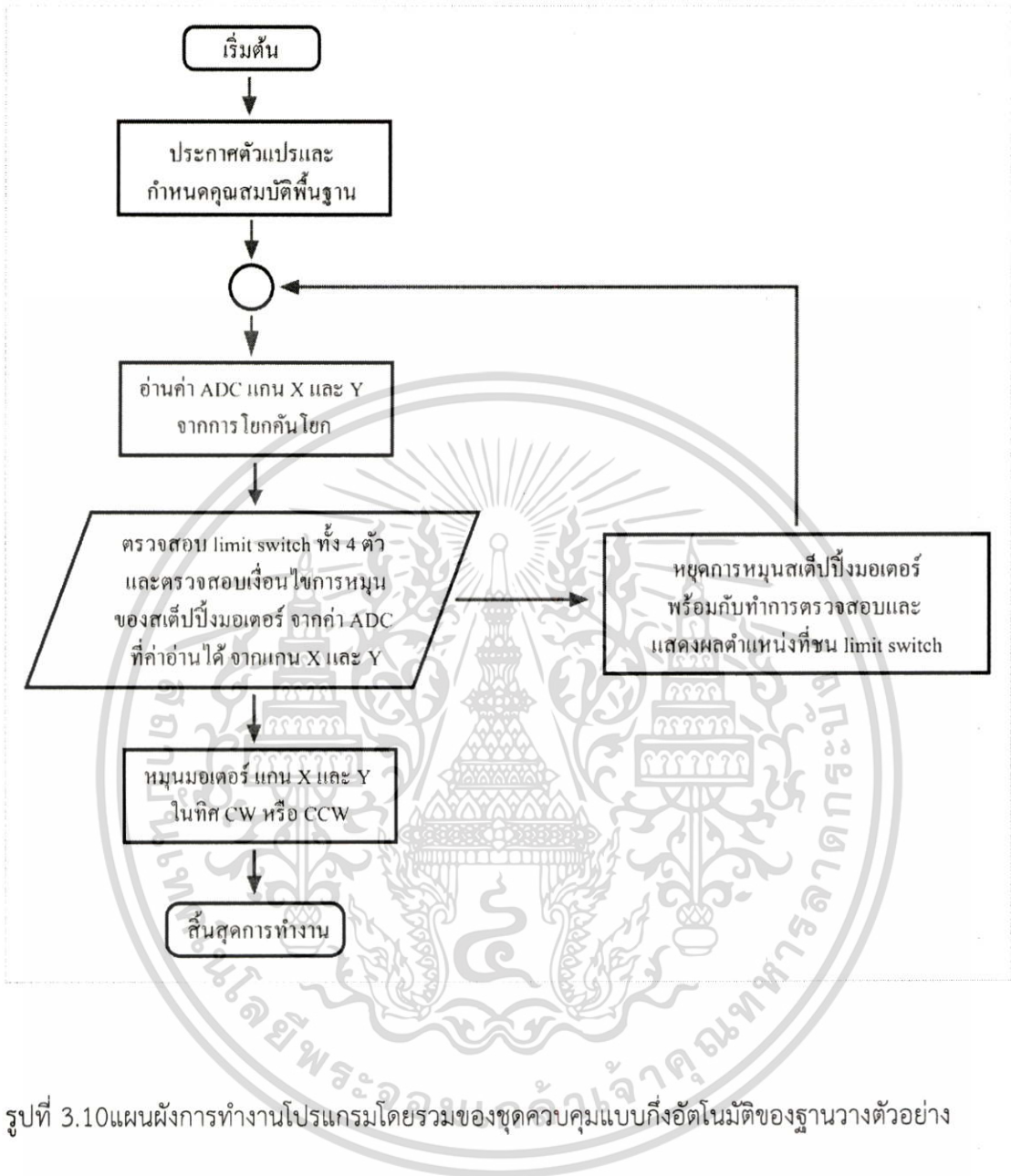


รูปที่ 3.8 บอร์ดวงจรขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟส ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.9 วงจรสมบูรณ์ของภาคการขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟส ที่เชื่อมต่อสั่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

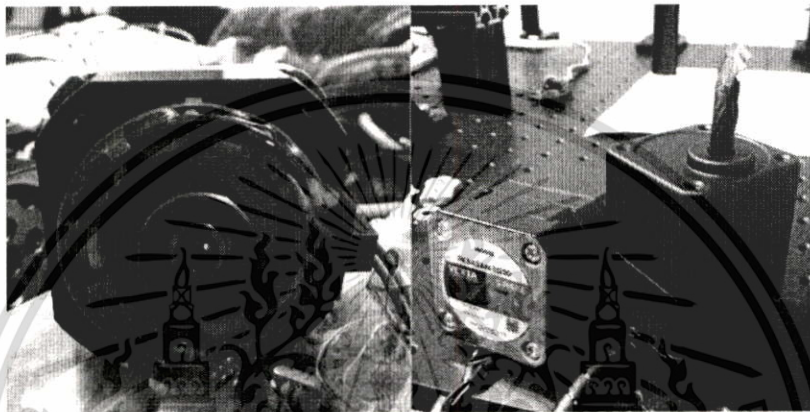


รูปที่ 3.10แผนผังการทำงานโปรแกรมโดยรวมของชุดควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่4สตีปปีงมอเตอร์ แบบ 5 เฟส

ในงานโครงการพิเศษนี้เลือกใช้สตีปปีงมอเตอร์แบบ5 ที่มีโครงสร้างขดลวดชนิด New pentagon bipolar แบบขดไม่อิสระของ VEXTA MODEL PK543AN-TG20 ที่มีความละเอียดจากเดิมคือ 0.72 องศาต่อสตีป มีการเพิ่มชุดเกียร์แบบ TH ที่มีอัตราทด1:20 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 0.036 องศาต่อสตีป



รูปที่3.11ลักษณะภายนอกและภายในของ สตีปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส VEXTA MODEL PK543AN-TG20

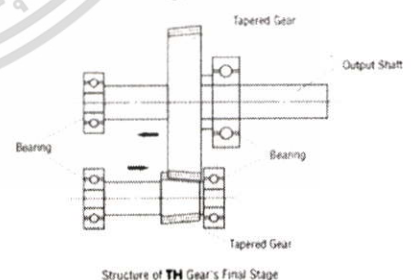
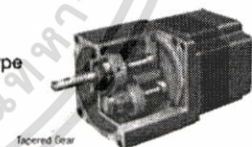
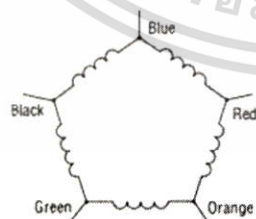
■ Wirings and Connections

● Step Angle 0.36°/0.72° Standard Type, Step Angle 0.72° High-Torque Type, Geared Type

◇ Inner Wiring Diagram for Motor

Connection Type: New Pentagon (Bipolar)

For more details on the New Pentagon (Bipolar), please visit www.orientalmotor.com



รูปที่ 3.12ไดอะแกรมการจัดเฟสภายในและชุดเกียร์ทดของ สตีปปีงมอเตอร์ชนิด5 เฟส

VEXTA MODEL PK543AN-TG20

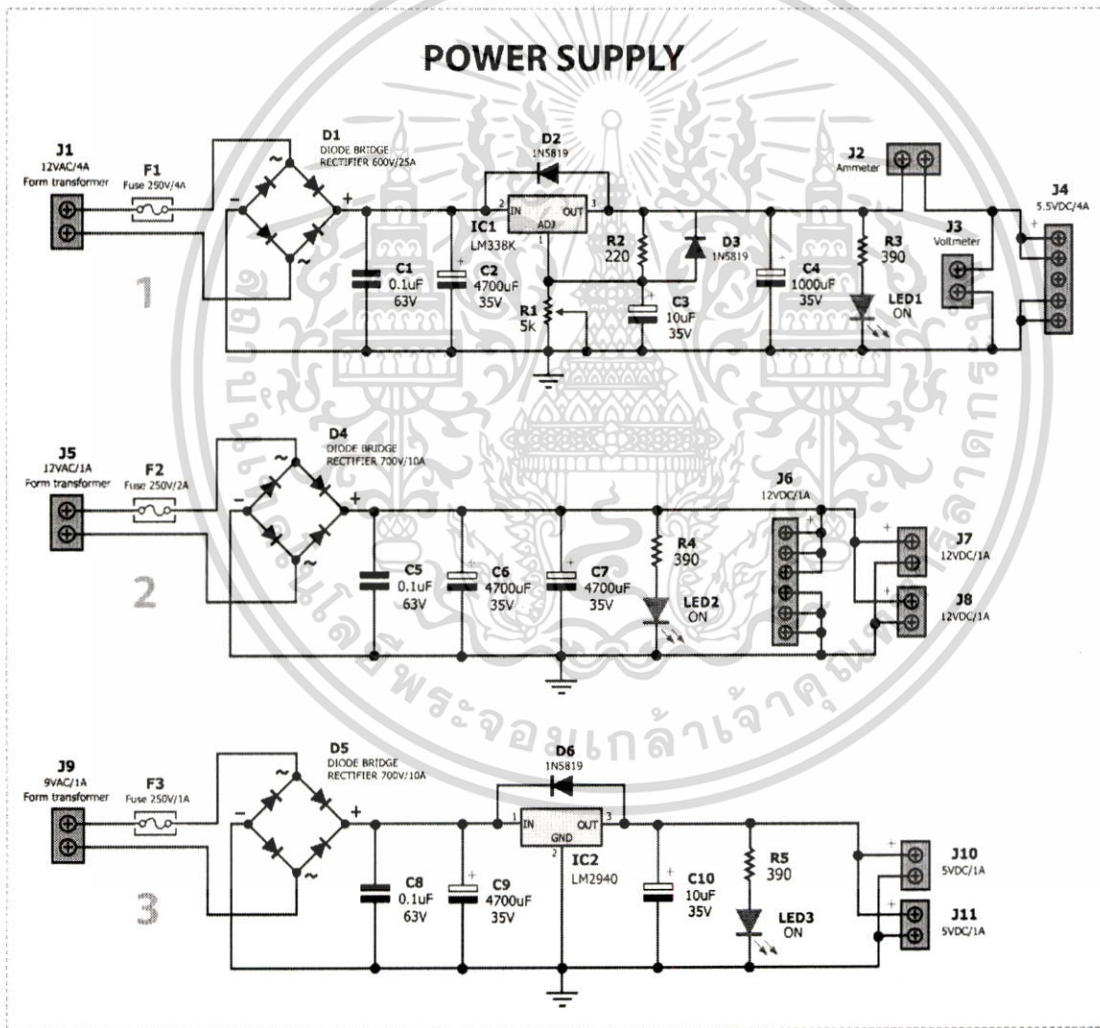
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แหล่งจ่ายไฟ

โดยในชุดควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์ได้มีการใช้ไฟฟ้าตรง 3 ระดับด้วยกัน คือ

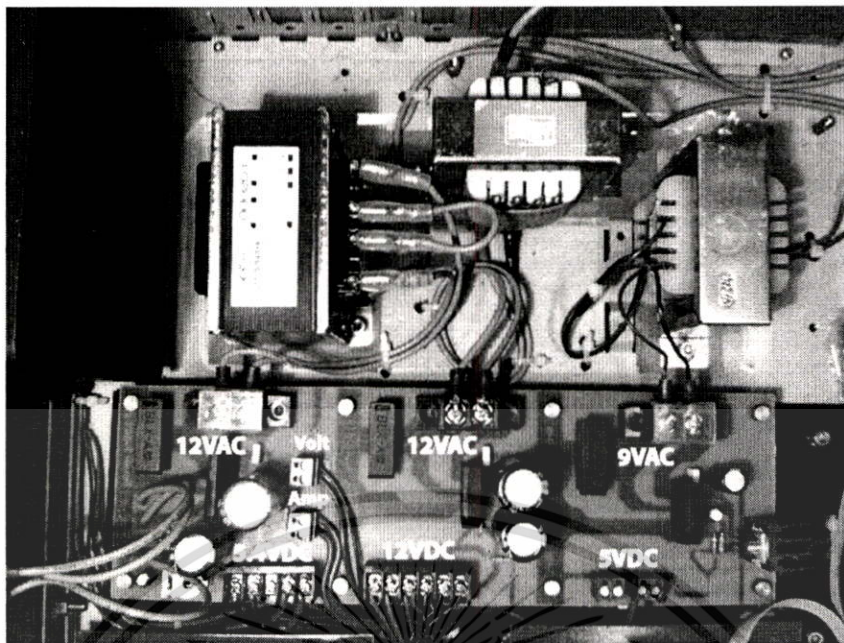
1. ภาคไฟกำลังของสแต็ปปีงมอเตอร์ใช้แรงดันไฟกระแสตรง 5.4 โวลต์
2. ภาคไฟเลี้ยงพัดลมระบายความร้อนในระบบใช้แรงดันไฟกระแสตรง 12 โวลต์
3. ภาคไฟเลี้ยงวงจรควบคุมประมวลผลหลักใช้แรงดันไฟกระแสตรง 5 โวลต์

โดยมีการป้องกันการตึงกระแสเกิน ใช้ฟิวส์มาจำกัดในแต่ละภาควงจรและเชื่อมต่อไปยังบอร์ดอื่นๆได้ มีการวัดและแสดงผลกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดตังไป



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟที่ใช้ในวงจรชุดขับเคลื่อนทั้งหมด

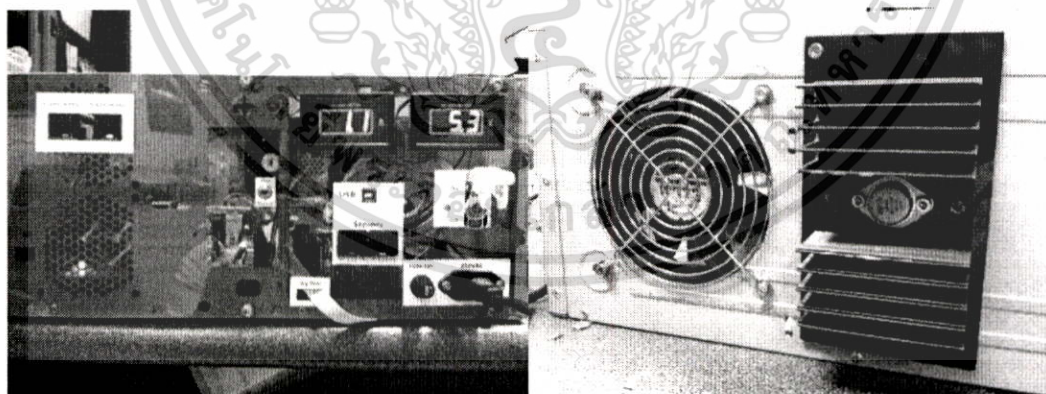
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การเชื่อมต่อวงจรแหล่งจ่ายไฟกับหม้อแปลงและวงจรของโพลดที่ไฟ

3.1.3 สร้างกล่องชุดควบคุมฐานวางสารตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ

นำวงจรทั้งหมดมาประกอบลงกล่องควบคุมและเชื่อมต่อกับบอร์ดวงจรภาคหน้ากับสแต็ปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัว ลิ้มิตสวิตช์ พอร์ตการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ กล่องควบคุม Joybox มีการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดดึงไปมีระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมและฮีทซิงค์(Heat sink) กลายเป็นกล่องควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนอย่างกึ่งอัตโนมัติ

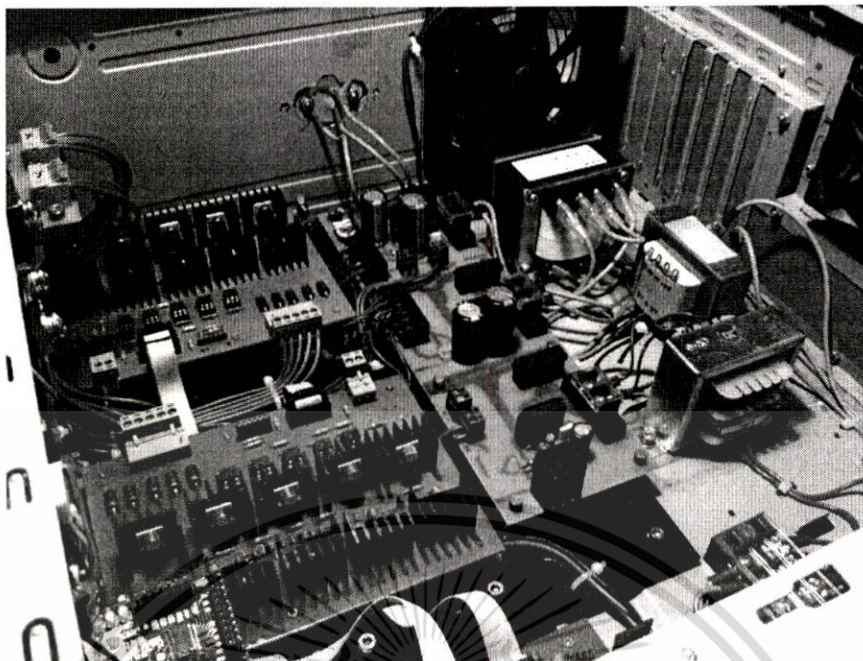


(a)

(b) รูปที่ 3.15 กล่องควบคุมระบบ

กึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง (a) แผงควบคุมหลักที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ และ (b) ระบบระบายความร้อนของกล่องควบคุมด้วยพัดลม และฮีทซิงค์

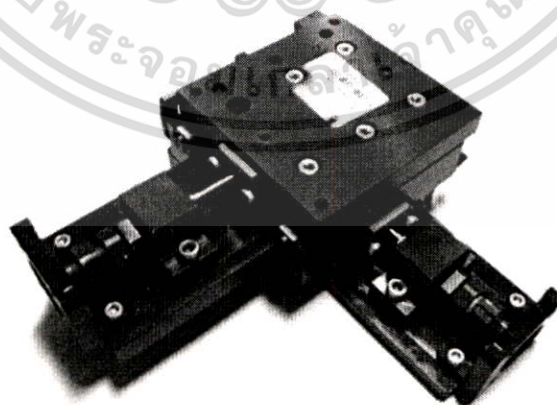
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รูปแบบกล่องควบคุมมอเตอร์ทั้งหมด

3.2 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างกับสเต็ปปีงมอเตอร์ ชุดวงจรควบคุมและทดสอบการทำงาน

สเต็ปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัวนี้ได้ติดตั้งอยู่กับแท่นเลื่อนที่เคลื่อนที่ไปในแนวแกน X-Y และได้มีการติดตั้งชิ้นส่วนสำหรับวางแผ่นสไลด์ โดยแท่นเลื่อนนี้มีระยะทางสูงสุดในการเคลื่อนที่คือในแนวแกน $X = 2$ เซนติเมตร $Y = 2$ เซนติเมตรโดยทางคณะผู้จัดทำได้จัดหาแท่นเลื่อนในแนวแกน X-Y ที่สามารถจะติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์ได้ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แท่นเลื่อน X-Y Yaskawa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้แท่นเลื่อน X-Y Yaskawa ระยะทางการเลื่อนในแนวแกน X ทำได้มากที่สุด คือ 20 มิลลิเมตร ระยะทางการเลื่อนในแนวแกน Y มากที่สุด 30 มิลลิเมตร และระยะแกนพิช 0.1 เซนติเมตร ซึ่งได้มีการจำกัดระยะการเลื่อนมากที่สุด โดยใช้กลไกทางแมคคาณิก ดังรูปที่ 3.18 เป็นตัวจำกัดการเลื่อนในแนวแกน X-Y และได้เพิ่มลิมิตสวิตช์เป็นตัวตรวจวัดระยะทางที่เลื่อนไปได้มากที่สุดไม่เกินในแนวแกน X คือ 20 มิลลิเมตร ระยะทางการเลื่อนในแนวแกน Y ได้มากที่สุด 20 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีการเลื่อนไปสุดแล้วลิมิตสวิตช์ก็จะทำการส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลสั่งงานให้หยุดการปรับเลื่อนและแจ้งเตือนต่อผู้ใช้งานดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 กลไกการจำกัดระยะทางการเคลื่อนที่มากที่สุดแนวแกน X-Y

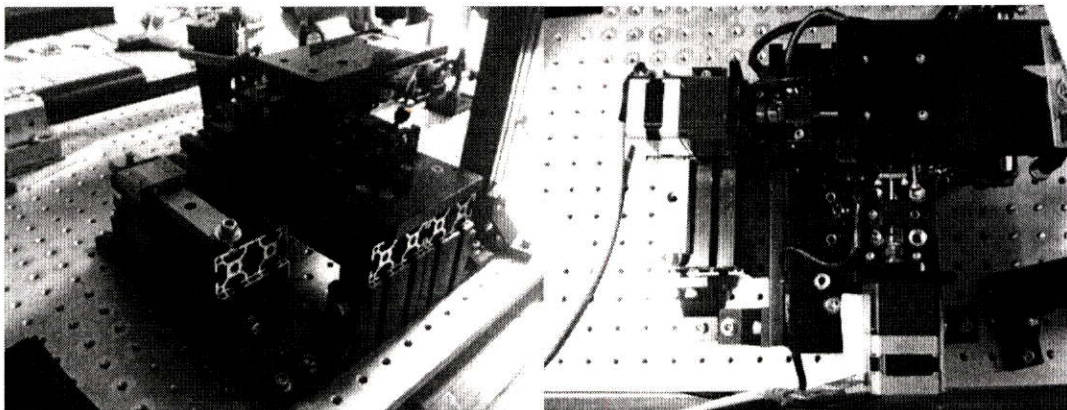


(a)

(b)

รูปที่ 3.19 การจำกัดการเลื่อนโดยใช้ลิมิตสวิตช์ (a) การติดตั้งที่ฐานในแนวแกน X-Y และ (b) การติดตั้งลิมิตสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัวเพื่อใช้จำกัดระยะการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 3.20 การติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์กับฐานวางตัวอย่าง (a) ฐานอลูมิเนียมโปรไฟล์ และราง linear slide และ (b) ติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัวกับฐานเลื่อนแกน X-Y

3.2.1 การทดสอบความแม่นยำในการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

การทดสอบการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์เนื่องจากสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่เลือกใช้นั้นมีความละเอียด 0.036 องศาต่อสเต็ป แต่ให้ทำงานแบบเต็มขั้นสองเฟส ได้ความละเอียด 0.072 องศาต่อสเต็ป ดังนั้นถ้าหากต้องการที่จะหมุน 1 รอบ แสดงว่าต้องหมุน 360 องศา (รอบ)

ดังนั้นจาก 1 สเต็ป หมุนไป 0.072 องศา

ถ้า 360 องศา ต้องหมุน $\frac{360}{0.072} = 5,000$ สเต็ป

3.2.1.1 การทดสอบใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

เมื่อทำการคำนวณสเต็ปการหมุนแล้วก็ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์โดยให้ทำงานหมุน 5,000 สเต็ปแล้วหยุด 5 วินาที จากนั้นหมุนต่ออีก 5,000 สเต็ปในทิศทางเดียวกัน โดยทำซ้ำไปเรื่อยๆ เป็นจำนวน 200 ครั้งปรับความเร็วในแต่ละสเต็ปเพิ่มขึ้นจาก 1 วินาที ไปจนถึง 10 มิลลิวินาที โดยที่รอยบากของแกนสเต็ปปีงมอเตอร์ใช้ปากกาเมจิกขีดเป็นสีดำไว้แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูว่า ณ ตอนที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนมาครบ 1 รอบนั้นรอยบากกลับมาที่ตำแหน่งเดิมหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสแต็ปปีงมอเตอร์

3.2.1.2 การทดสอบใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สแต็ปปีงมอเตอร์หมุน

จากนั้นทำการทดสอบตำแหน่งการหมุนของสแต็ปปีงมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์ เพื่อความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยทำต่อสแต็ปปีงมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์แล้วเขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของสแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานหมุน 5,000 สแต็ปแล้วหยุด

ซึ่งไมโครมิเตอร์เมื่อทำการหมุนครบรอบจะมีระยะเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อสแต็ปปีงมอเตอร์หมุนครบ 1 แล้วก็ดูที่สเกลของไมโครมิเตอร์ควรตรงกับที่ตำแหน่ง 0.5 มิลลิเมตร

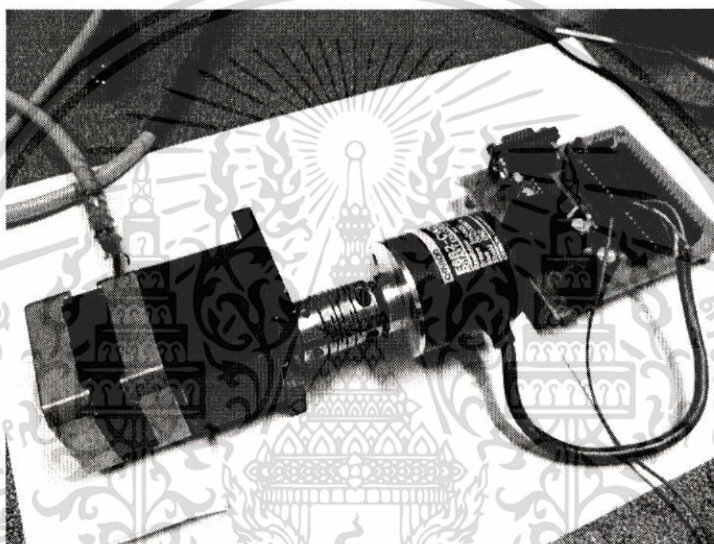


รูปที่ 3.22 แสดงการเชื่อมต่อสแต็ปปีงมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 การทดสอบใช้เอ็นโคดเดอร์วัดตำแหน่งที่สตีปป์มอเตอร์หมุน

เพื่อการแม่นยำในการหมุนไปของสตีปป์มอเตอร์จึงนำเอ็นโคดเดอร์มาวัดตำแหน่งในการหมุน โดยความมีความละเอียดในการวัด 360 พัลส์ต่อรอบแต่สามารถเขียนให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น 2 หรือ 4 เท่าก็ได้ โดยในที่นี้ได้เขียนโปรแกรมวัดความละเอียดเป็น 2 เท่า ได้ความละเอียดในการวัดเป็น 720 พัลส์ต่อรอบ แสดงว่าจะมีสัญญาณเปลี่ยนแปลงทุกๆ 0.5 องศา ซึ่งสตีปป์มอเตอร์หมุนด้วยความละเอียด 0.072 องศาต่อสตีปป์ ดังนั้นเมื่อสตีปป์มอเตอร์หมุน 7 สตีปป์ก็จะตรวจวัดได้มา 1 สัญญาณ



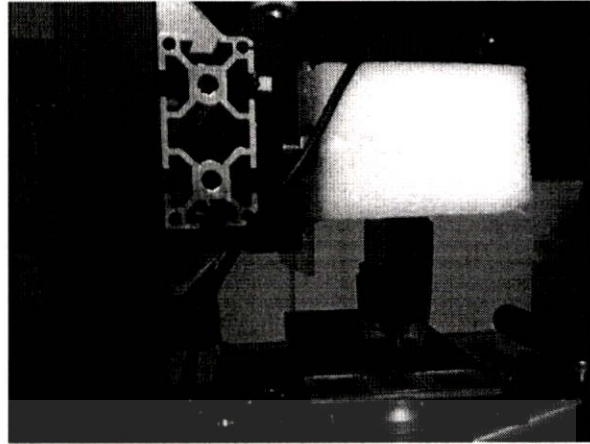
รูปที่ 3.23 แสดงการเชื่อมต่อสตีปป์มอเตอร์กับเอ็นโคดเดอร์ที่ใช้งานในการวัดตำแหน่งการหมุน

3.3 ออกแบบและสร้างระบบการมองเห็นภาพ

ในส่วนนี้จะเป็นระบบการมองเห็นภาพซึ่งจำเป็นต้องใช้กล้องที่มีกำลังขยายมากกว่าปกติในการมองภาพวัตถุตัวอย่างที่อยู่บนแท่นวางสารตัวอย่างโดยในระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล ที่มีกำลังขยาย 50-500 เท่า ความละเอียด 2M Pixel และการเชื่อมต่อข้อมูลผ่านทางพอร์ต USB โดยที่นี้ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Vision ในการรับสัญญาณภาพและควบคุมการเก็บภาพ รวมไปถึงการประมวลผลภาพ



(a)



(b)

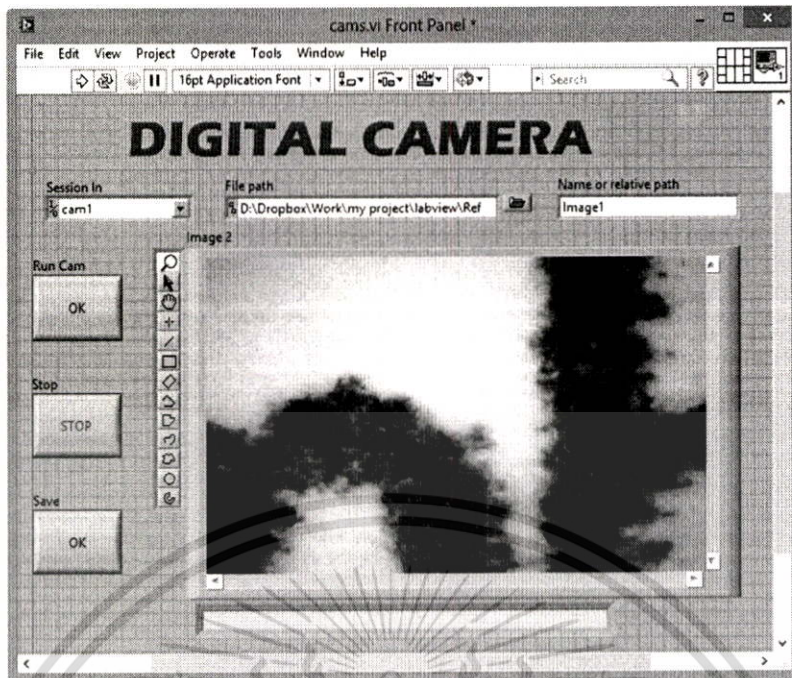
รูปที่ 3.24 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (a) กล้องจุลทรรศน์ที่เลือกใช้งานกำลังขยาย 50-500 เท่า และ (b) การติดตั้งกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถปรับระยะการโฟกัสภาพได้

โดยออกแบบให้สามารถทำการปรับระยะการโฟกัสของภาพได้จากการหมุน linear slide เลื่อนขึ้น-ลง



รูปที่ 3.25 แกนปรับระยะการโฟกัสภาพของกล้องจุลทรรศน์

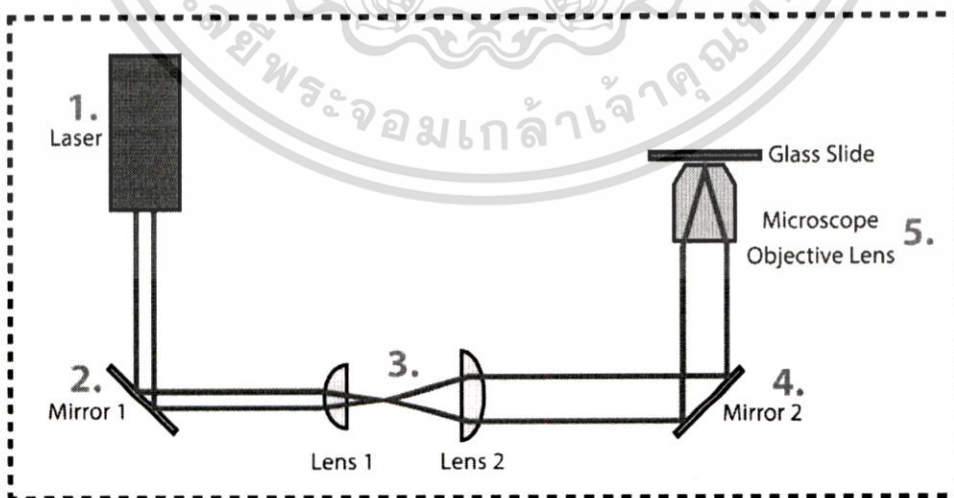
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 โปรแกรมการควบคุมการเก็บภาพ

โดยการเก็บภาพจากระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติจำเป็นต้องมีระบบการตัดแสงเลเซอร์ ในย่านสีแดงออกไปเพื่อไม่ให้เซนเซอร์ CCD นั้นบอดหรือเสียหายจากความเข้มของแสงเลเซอร์ซึ่งก็มีหลายวิธีมากแต่ในที่นี้เลือกใช้การใส่ฟิลเตอร์ โดยใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน ทำให้เกิดการกรองแสงในย่านที่เป็นสีแดงออกไป

3.4 ออกแบบและจัดระบบทัศนศาสตร์เพื่อสร้างเป็นระบบคีมจับเชิงแสง



รูปที่ 3.27 แสดงการจัดวางระบบทัศนศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในส่วนแรกนั้นจะเป็นการออกแบบและจัดวางระบบทัศนศาสตร์ที่ใช้งานในระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งในขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบระบบทัศนศาสตร์เป็นไปตามแผนภาพโดยรวม ดังรูปที่ 3.27

ส่วนที่ 1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ในการสร้างระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัตินี้ได้ใช้ เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne Laser) ที่มีคุณสมบัติ เป็นแสงสีแดง อยู่ในช่วงความยาวคลื่นความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร โดยมีกำลังสูงสุดของเลเซอร์ 20 มิลลิวัตต์ ที่ได้ติดตั้งอยู่บนฐานแท่นรอง โดยลำแสงจะมีความสูง 50 มม. และมีขนาดลำแสงความกว้าง 1.8 มม.



รูปที่ 3.28 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ส่วนที่ 2 กระจก 1 (Mirror Mount)

ลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์จะถูกกระจกสะท้อนทำให้เปลี่ยนทิศทางและยังสามารถปรับให้ลำแสงเลื่อนไปได้ตามต้องการจากการปรับกระจก สะท้อนลำแสงไปยังส่วนของการขยายลำแสงต่อไป โดยในระบบนี้ได้ใช้กระจกแบบสะท้อนแสง ขนาด 1 นิ้ว พร้อมกับแท่นจับและปรับระนาบของกระจก

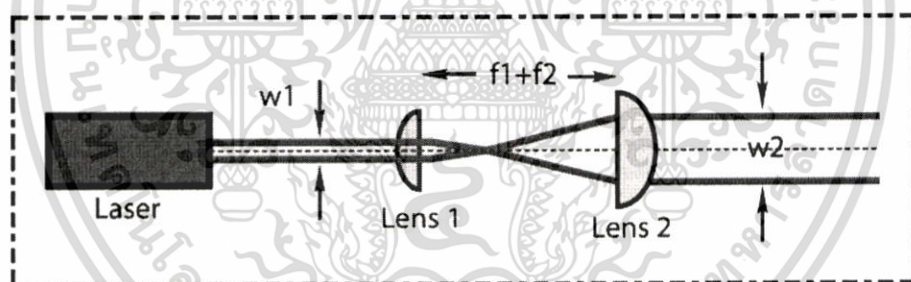
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



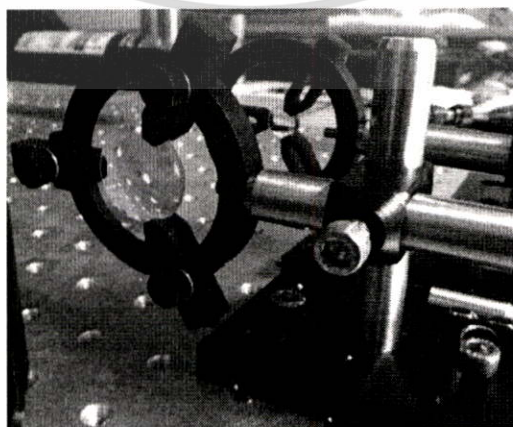
รูปที่ 3.29 แสดงกระจกที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนที่ 3 ส่วนของการขยายลำแสง (Beam Expander)

เมื่อแสงเดินทางเป็นระนาบมายังสู่ส่วนการขยายลำแสงจะทำให้ลำแสงมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งระบบการขยายแสงนี้ ประกอบด้วยเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano Convex lens) 2 ตัว มีความยาวโฟกัส 20 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.30 แสดงไดอะแกรมการขยายลำแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.31 แสดงส่วนของการขยายแสง

ในการออกแบบ Beam expander จากรูปเลนส์ตัวที่ 1 มีระยะโฟกัสอยู่ที่ 20 mm. และเลนส์ตัวที่ 2 มีระยะโฟกัสอยู่ที่ 60mm. ดังนั้นการคำนวณระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้งสอง คือ ระยะห่างของเลนส์ เท่ากับ จุดโฟกัสของเลนส์ตัวที่ 1 บวกกับ ระยะของจุดโฟกัสของเลนส์ตัวที่ 2

$$\begin{aligned} \text{ระยะห่างของเลนส์} &= f_1(\text{mm}) + f_2(\text{mm}) \\ &= 20 + 60 \\ &= 80 \text{ mm.} \end{aligned}$$

จากการคำนวณจะเห็นว่าเราต้องวางเลนส์ห่างกันเป็นระยะ 80 มิลลิเมตร ซึ่งเราสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่ถูกขยายโดยเลนส์ทั้งสอง จากรูป 3.4 ได้จากสูตร

$$w_2 = \left(\frac{f_2}{f_1} \right) w_1 \quad (3.1)$$

คำนวณตามสมการที่ (3.1).

เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่ถูกขยายแล้วจะมีขนาดเท่ากับ 5.4 มิลลิเมตร

ส่วนที่ 4 กระจก (Mirror Mount)

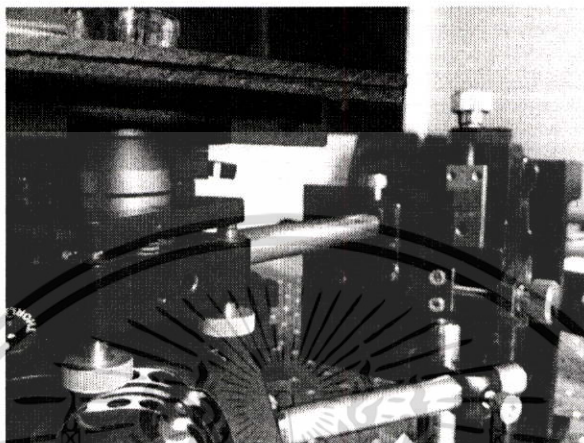
กระจกเป็นแบบสะท้อนแสง ขนาด 2 นิ้ว ใช้เพื่อสะท้อนลำแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 5 เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)

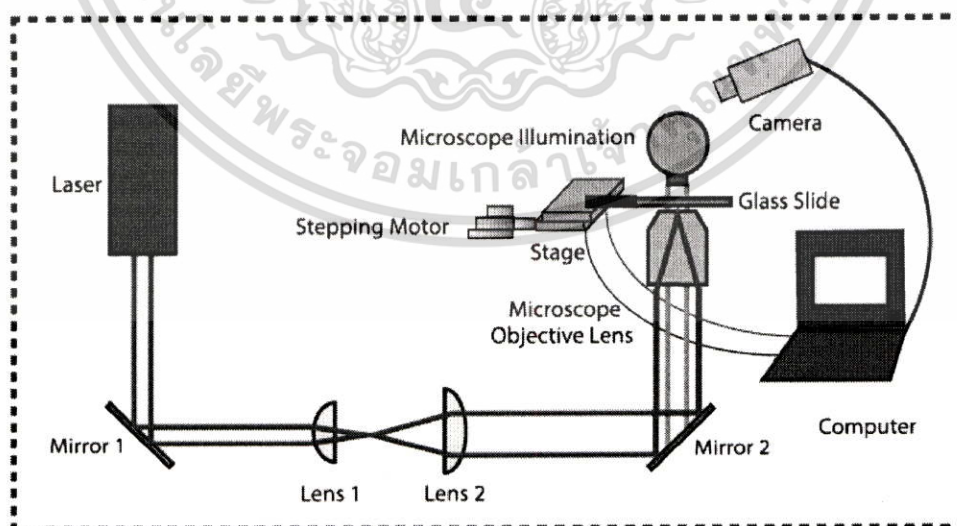
ใช้ในการดักจับอนุภาค มีขนาด $100\times$ หัวเป็นแบบจุ่มน้ำมัน NA.1.25 โดยติดตั้งบนแท่นเลื่อน X-Y-Z ซึ่งสามารถทำการปรับให้ลำแสงเลเซอร์เข้าสู่กลางเลนส์ได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 3.33 แสดงการวางเลนส์ใกล้วัตถุอยู่เหนือกระจกสะท้อน

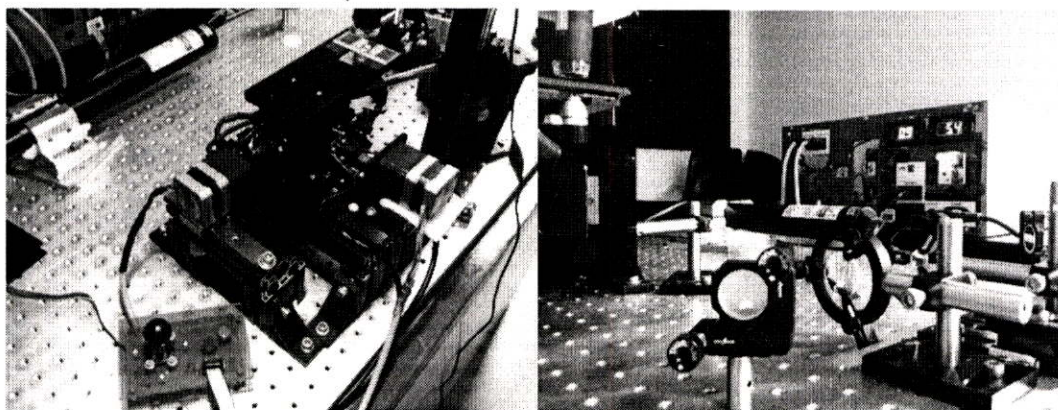
3.5 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติในระบบคีมจับเชิงแสง

หลังจากที่ทำการสร้างฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนอย่างกึ่งอัตโนมัติในแนวแกน X-Y พร้อมชุดควบคุมการทำงานแล้ว ก็ทำมาติดตั้งในระบบคีมจับเชิงแสงในส่วนของฐานวางตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยให้กลายเป็นระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ แผนผังโดยรวมของระบบการทำงานเป็นไปดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 แผนผังการทำงานโดยรวมของระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 3.35 ระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น (a) ในส่วนของระบบควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนแบบกึ่งอัตโนมัติ และ (b) ส่วนทัศนศาสตร์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบคิมจับเชิงแสง

3.6 ทดสอบระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ และเก็บบันทึกผลทดลองการจับอนุภาคตัวอย่าง

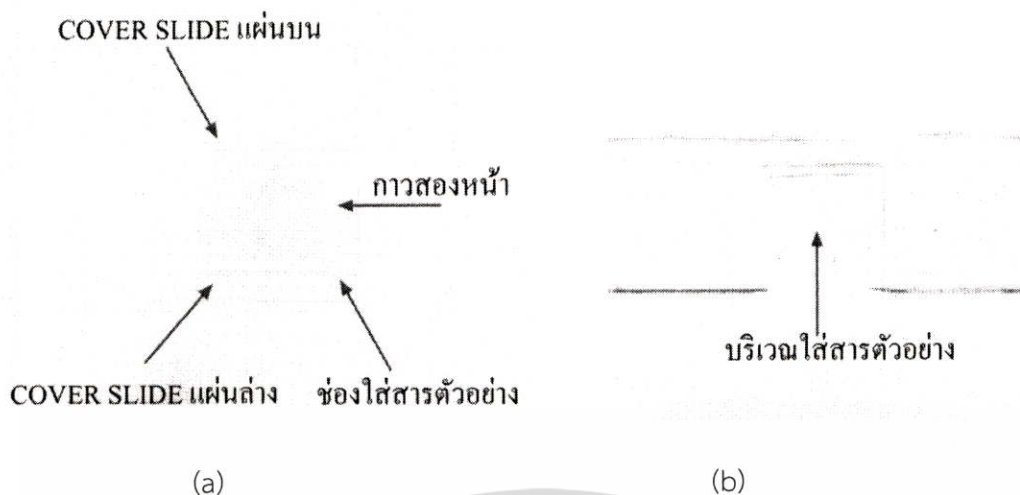
3.6.1 คุณสมบัติของสารตัวอย่างและการเตรียมสารตัวอย่าง

3.6.1.1 คุณสมบัติสารตัวอย่าง

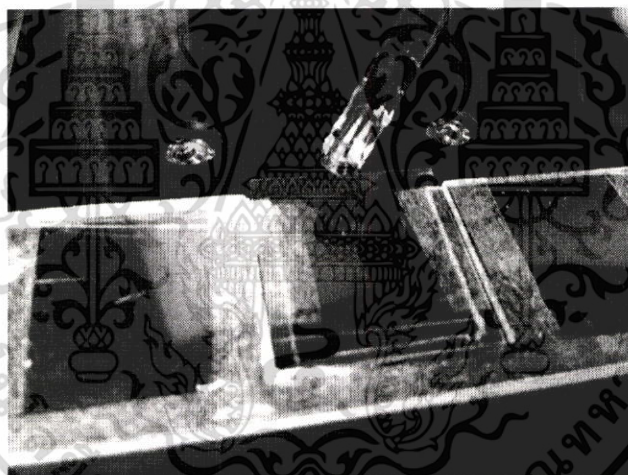
- มีลักษณะโปร่งใส
- ดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางรอบๆอนุภาค

3.6.1.2 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง

ตัดกาบสองหน้าชนิดเยื่อที่ความหนา 0.01 มิลลิเมตร ให้เป็นเส้น โดยมีขนาดความกว้างเส้นละประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาติดบนกระจกปิดแผ่นสไลด์ 2 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.36 จากนั้นนำกระจกปิดแผ่นสไลด์อีกแผ่นมาปิดทับ เจือจางความเข้มข้นเม็ดโพลิสไตลินด้วยการเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ แล้วนำเม็ดโพลิสไตลินที่เจือจางแล้วใส่ในเซลล์ที่เตรียมไว้ จากนั้นนำเซลล์ที่ใส่สารแขวนลอยเม็ดโพลิสไตลินไปใส่ในเซลล์ สำหรับติดตั้งบนกล้องจุลทรรศน์ซึ่งจะได้เซลล์ดังรูปที่ 3.37 ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.36 แสดงการเตรียมที่วางสารตัวอย่าง (a)การเตรียมแผ่นสไลด์สำหรับใส่ตัวอย่าง และ (b) การเตรียมที่วางแผ่นสไลด์

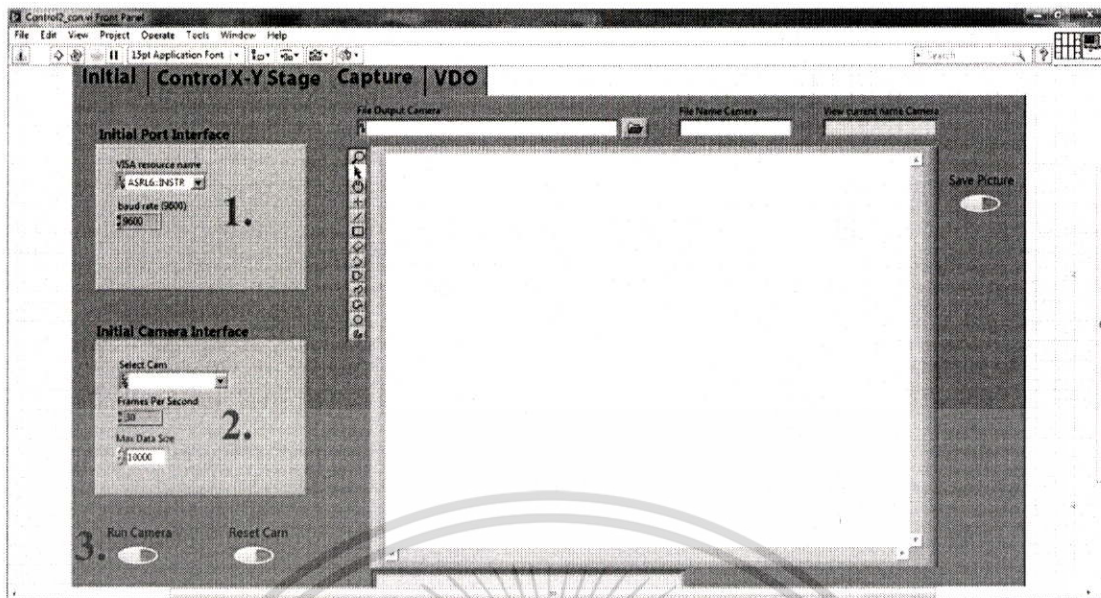


รูปที่ 3.37 แผ่นสไลด์ที่ใส่สารตัวอย่างพร้อมทำการทดลอง

3.6.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการเลื่อนแทนวางสารตัวอย่างและการมองเห็น

ในส่วนของการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเชื่อมต่อและควบคุมการเลือกของแทนวางสารตัวอย่างซึ่งสามารถควบคุมได้จากกล่องควบคุม (Joyboy) หรือ ใช้งานGUI ในการควบคุม และในส่วนของการเก็บบันทึกผลนั้นได้เก็บข้อมูลเป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวจากกล้อง กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับ LabVIEW Vision ซึ่งจะขออธิบายการใช้งานโปรแกรม ดังนี้

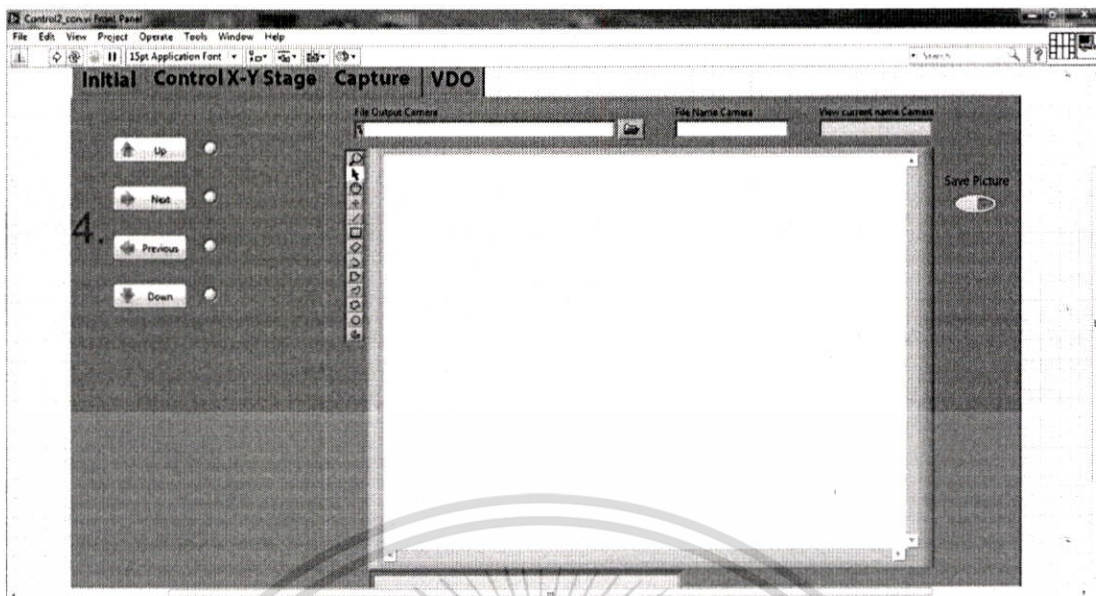
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 แสดงการใช้งานโปรแกรมในส่วน Initial

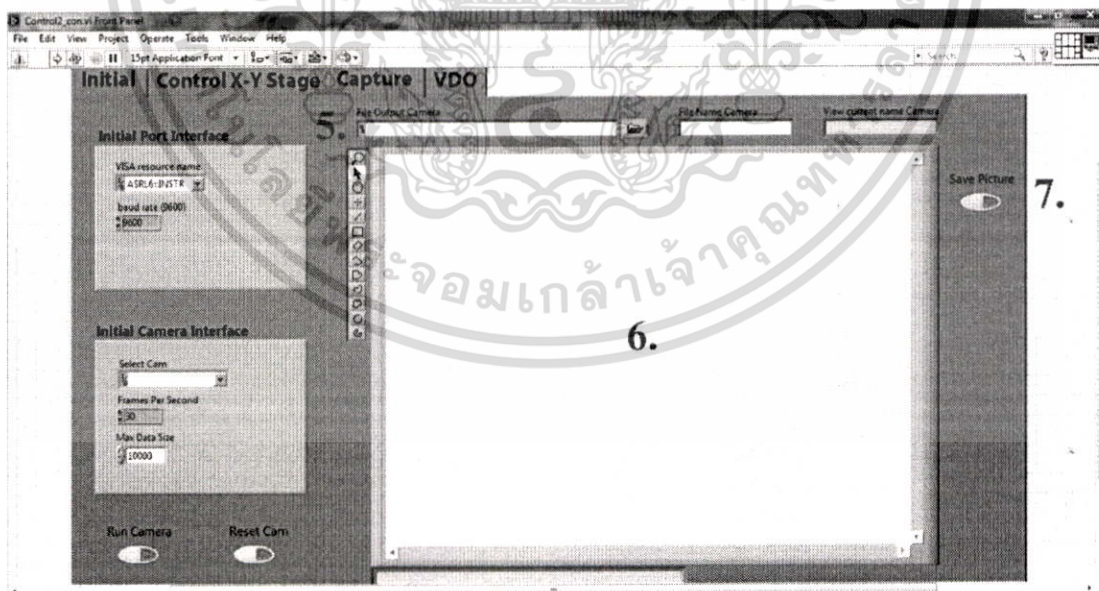
1. ตั้งค่าการเชื่อมต่อ Com port และ baud rate โดยในที่นี้ เลือกใช้เป็น COM3 (เป็นค่าเฉพาะแต่ละเครื่อง) , Baud rate 9600
2. ตั้งค่าการเชื่อมต่อกล้องโดยเลือกช่องเชื่อมต่อกล้อง , เฟรมต่อวินาที และขนาดข้อมูลมากที่สุด ในที่นี้ใช้ Cam4 , 30 และ 10000 ตามลำดับ
3. กด Run Camera เพื่อเริ่มการใช้งาน

หมายเหตุการตั้งค่าในส่วน Initial จะตั้งค่าเพียงครั้งเดียว ตลอดการใช้โปรแกรม และค่าต่างๆจะเป็นแต่ละเครื่องไม่เหมือนกัน



รูปที่ 3.39 แสดงการใช้งานโปรแกรมในส่วนของการควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนในแกน X-Y

4. การใช้งานในส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของ Stage ขึ้น ลง ซ้าย และขวา เมื่อทำการกดแต่ละปุ่มก็จะมีหลอดไฟ LED แสดงสถานะการทำงานด้วย



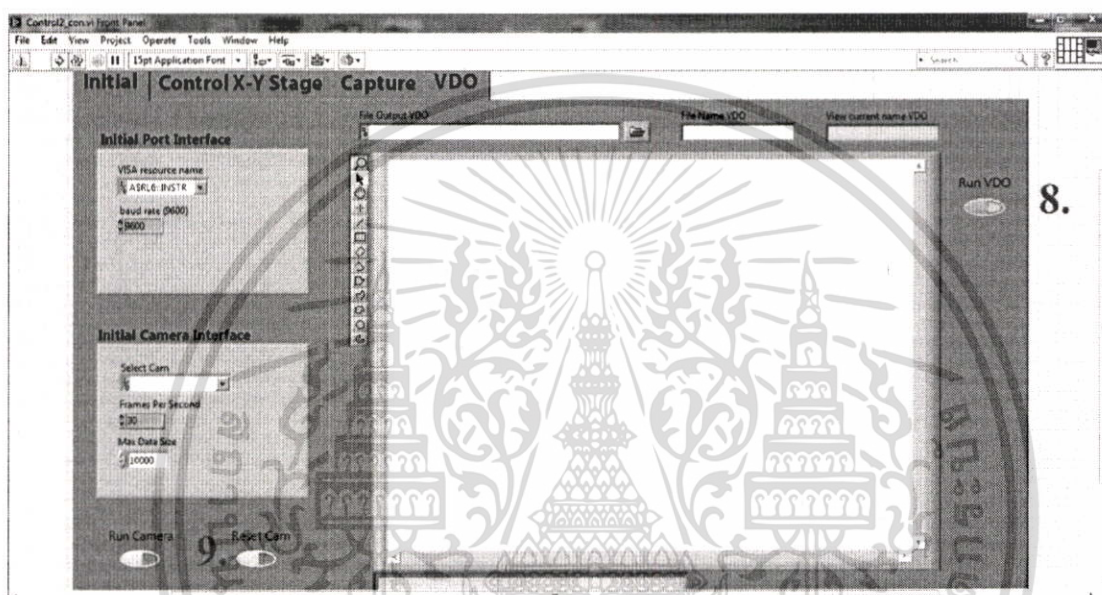
รูปที่ 3.40 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในโหมดการเก็บภาพนิ่ง ตั้งค่าเลือกที่อยู่ของไฟล์ที่จะจัดเก็บไฟล์รูปภาพ (File Output Camera) โดยกดปุ่มรูปแฟ้มจากนั้นทำการกำหนดชื่อไฟล์ (Name File Camera) และช่องแสดงชื่อไฟล์รูปภาพที่ได้จับเก็บไปแล้ว

6. จอแสดงผลภาพ Output

7. ปุ่มสำหรับการจัดเก็บรูปภาพที่ต้องการเมื่อทำการกดแล้วก็จะเห็นได้ว่าตัวเลขไฟล์จะเพิ่มขึ้นตามและไฟล์รูปภาพก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.41 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพเคลื่อนไหว

8. ในโหมดการเก็บภาพเคลื่อนไหว ก็ยังคงเก็บที่อยู่ไฟล์ที่ได้อธิบายไว้เหมือนดังข้อ 5. และปุ่มกดสำหรับ RUN VDO และกดอีกครั้งเพื่อหยุดการเก็บภาพเคลื่อนไหว

9. เมื่อทำการหยุดการเก็บภาพเคลื่อนไหวแล้วทำการเปลี่ยนชื่อ File Name VDO จากนั้น กดปุ่ม Reset Cam เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูลอีกครั้ง

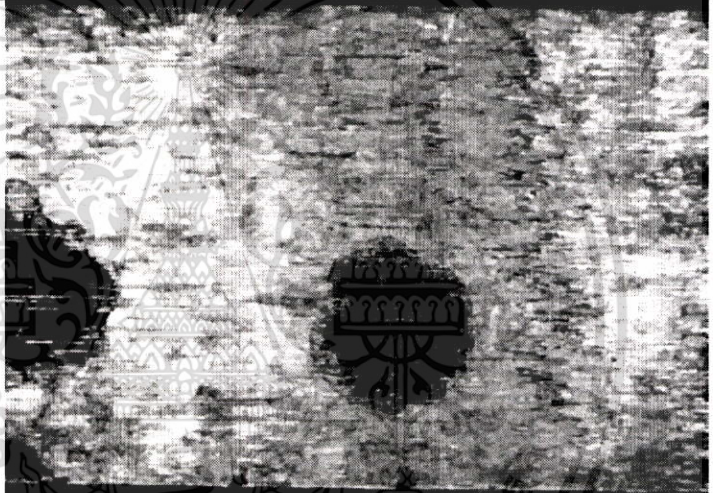

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ

4.1.1 ผลทดสอบการใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

จากการทดลองให้สเต็ปมอเตอร์หมุน 5,000 สเต็ป (1 รอบ) แล้วหยุด 5 วินาทีในทิศทางเดียวกัน จนครบ 1,000 รอบ จากนั้นหมุนกลับอีกทิศทางหนึ่งไปจนครบ 1,000 รอบ โดยทำซ้ำไปเรื่อยๆ และใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูตำแหน่งที่หมุนไปพบว่าเป็นไปตามตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการหมุน

ตำแหน่งการหมุน	รูปตำแหน่งการหมุน
เริ่มการหมุน	
หมุนครบ 1,000 รอบ	

จากการทดลองที่หมุนไปเป็นจำนวนรอบที่ 1,10,50,100,200 ,500 ,1000 ครั้งและหมุนกลับเป็นจำนวนรอบที่ 1,10,50,100,200 ,500 ,1000 ครั้งพบว่าตำแหน่งที่ทำการทำเครื่องหมายไว้



เมื่อหมุนไปแล้วยังคงกลับมาที่เดิมไม่เปลี่ยนตำแหน่งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

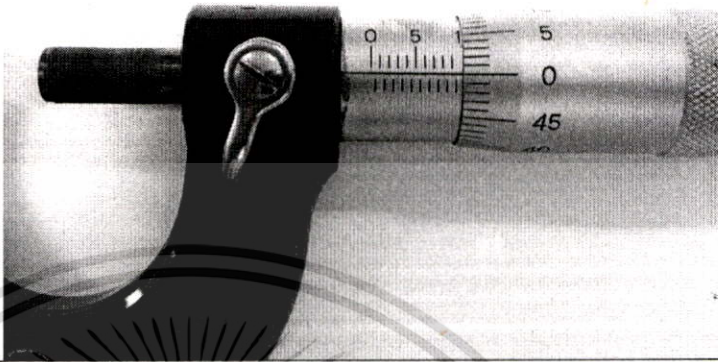

4.1.2 ผลทดสอบการใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สตีปิ้งมอเตอร์หมุน

จากการทดสอบการหมุนของสตีปิ้งมอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับไมโครมิเตอร์เพื่อวัดระยะที่การหมุนไปนั้นพบว่าเป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการทดสอบสตีปิ้งมอเตอร์ด้วยไมโครมิเตอร์

ตำแหน่งการหมุน	รูประยะการหมุน
เริ่มการหมุน	
หมุนครบ 1 รอบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งการหมุน	รูประยะการหมุน
หมุนครบ 20 รอบ	
หมุนครบ 40 รอบ	

จากการทดลองได้ทำการสั่งงานให้สแต็ปปีงมอเตอร์หมุนไปครบ 1,20,40รอบทั้งสองตัวแล้ว อ่านสเกลได้เป็นระยะ 0.5 , 10 , 20 มิลลิเมตร ตามลำดับซึ่งเป็นการยืนยันว่าสแต็ปปีงมอเตอร์มีความแม่นยำในการหมุน ที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลทดสอบใช้เอ็นโคดเดอร์วัดตำแหน่งที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุน

จากการทดสอบการวัดตำแหน่งของสเต็ปปีงมอเตอร์จากเอ็นโคดเดอร์พบว่าเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3แสดงผลการวัดสัญญาณที่ได้จากเอ็นโคดเดอร์เมื่อสเต็ปปีงมอเตอร์หมุนไป

ทิศทางการหมุน/สเต็ป	0	1250	2500	3750	5000	6250	7500	8750	10000
พัลส์ในทิศ ตามเข็มนาฬิกา (CW)	0	179	357	538	716	896	1075	1256	1439
พัลส์ในทิศ ทวนเข็มนาฬิกา (CCW)	1440	1257	1078	899	719	540	359	179	0

จากการทดลองพบว่าเมื่อสเต็ปปีงมอเตอร์หมุนไปเอ็นโคดเดอร์จะให้สัญญาณออกมาแล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลและนับจำนวนสเต็ปที่หมุนไปด้วยความละเอียด 2 เท่า ได้โดยมีความละเอียด 1พัลส์ต่อ7สเต็ป

คุณสมบัติของแท่นเลื่อน X-Y

จากการทดสอบการทำงานของฐานเลื่อน X-Y ที่ได้สร้างขึ้นมานั้นสามารถสรุปเป็นคุณสมบัติการทำงานของแท่นเลื่อนได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4แสดงผลคุณสมบัติของแท่นเลื่อน X-Y

ความละเอียดในการเลื่อน	0.2 ไมครอน
ความแม่นยำในการเลื่อน	1 ไมครอน
ความเร็วในการหมุน	50 มม./วินาที
ระยะทางในการเลื่อนสูงสุด	แกน X=20 มม. แกน Y=20 มม.
รองรับน้ำหนักได้สูงสุด	10 กิโลกรัม

4.2 ผลการทดสอบระบบการมองเห็นภาพ

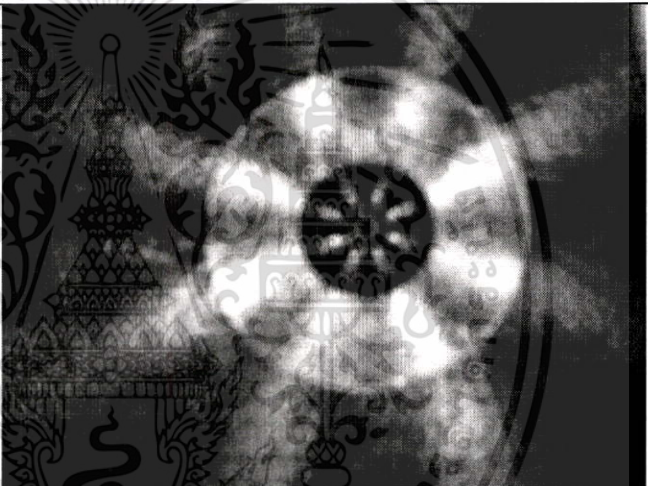

4.2.1 ระบบการมองเห็นภาพ

จากระบบการมองเห็นภาพที่ได้สร้างขึ้นโดยใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล กำลังขยาย 50-500 เท่า ได้ทำการทดลอง เป็นสองส่วนคือ ระบบการมองเห็นโดยปรับระยะภาพ และการใส่ฟิลเตอร์กรองแสง

4.2.1.1 ระบบการมองเห็น

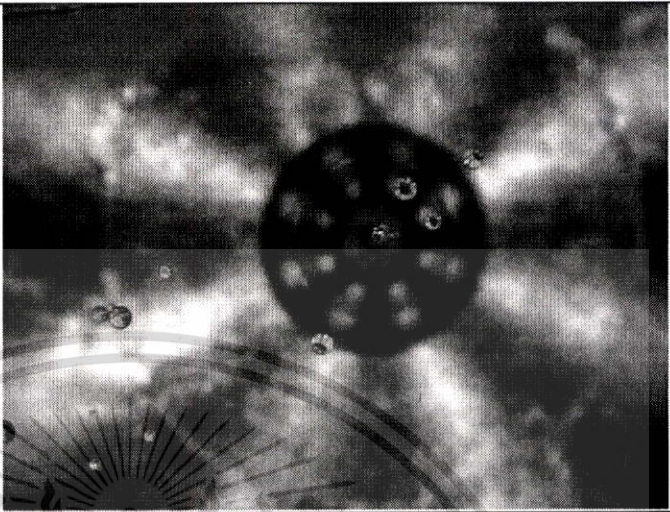

จากการทดลองหาค่ากำลังขยายและระยะการโฟกัสภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลมีผลเป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงภาพของเม็ดบีดขนาด 8 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	ภาพเม็ดบีดขนาด 8 ไมโครเมตร
50	43.41	
250	19.24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงภาพของเม็ดบีดขนาด 100 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน



กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	ภาพเม็ดบีดขนาด 100 ไมโครเมตร
50	36.22	
250	15.11	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 การปรับระยะโฟกัสของภาพเมื่อใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเลเซอร์



เนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้ฟิลเตอร์ที่ทำจากแผ่นอะคริลิกใสสีน้ำเงินซึ่งจะสะท้อนแสงเลเซอร์และจะผ่านไปได้น้อยโดยได้ทำการซ้อนแผ่นอะคริลิกเป็นจำนวนสองชั้นจึงทำให้ความเข้มของแสงเลเซอร์เข้าสู่กล้องน้อยลงแต่ก็ทำให้ระยะการโฟกัสของภาพนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยได้ผลเป็นดังตารางที่ 4.7 – 4.10

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เม็ดปิดขนาด 8 ไมโครเมตร
50	46.05	
250	22.60	

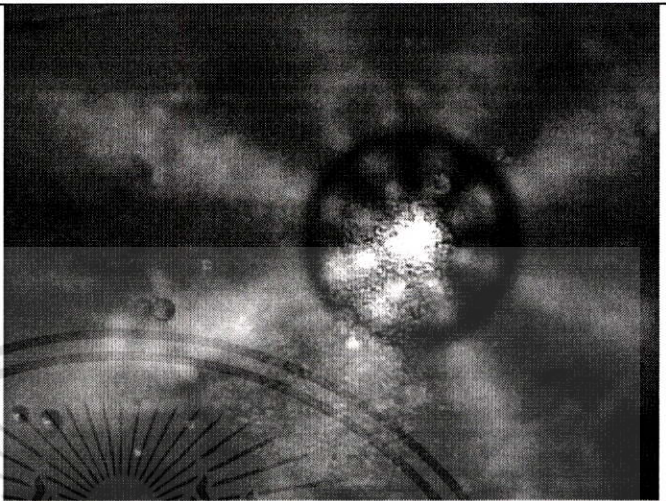

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เม็ดปิดขนาด 8 ไมโครเมตร
50	48.35	
250	23.45	

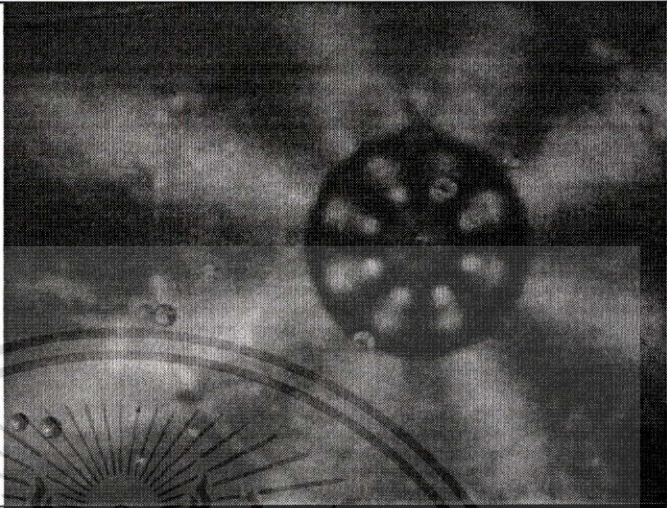

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เม็ดปิดขนาด 100 ไมโครเมตร
50	42.55	
250	18.89	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เม็ดปิดขนาด 100 ไมครอน
50	44.26	
250	20.69	

ซึ่งจากตารางที่ 4.8 จะพบว่า เมื่อทำการใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเข้าไปแล้วนั้นจะไม่เห็นสารตัวอย่างเม็ดปิดขนาด 8 ไมโครเมตรเลยเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก

4.2.2 ผลการใช้งานโปรแกรมเชื่อมต่อควบคุมการมองเห็นและเก็บภาพ

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อการมองเห็นภาพนั้นจะเก็บข้อมูลเป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวซึ่งการใช้วิธีการใช้งานได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อการออกแบบและสร้างระบบการมองเห็น แล้ว ซึ่งภาพเคลื่อนไหวที่ทำการอัดนั้นมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องจัดสรรแหล่งเก็บข้อมูลที่มีขนาดที่เหมาะสม และทำการแปลงไฟล์ภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกไว้นั้นให้มีขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.1 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพนิ่ง

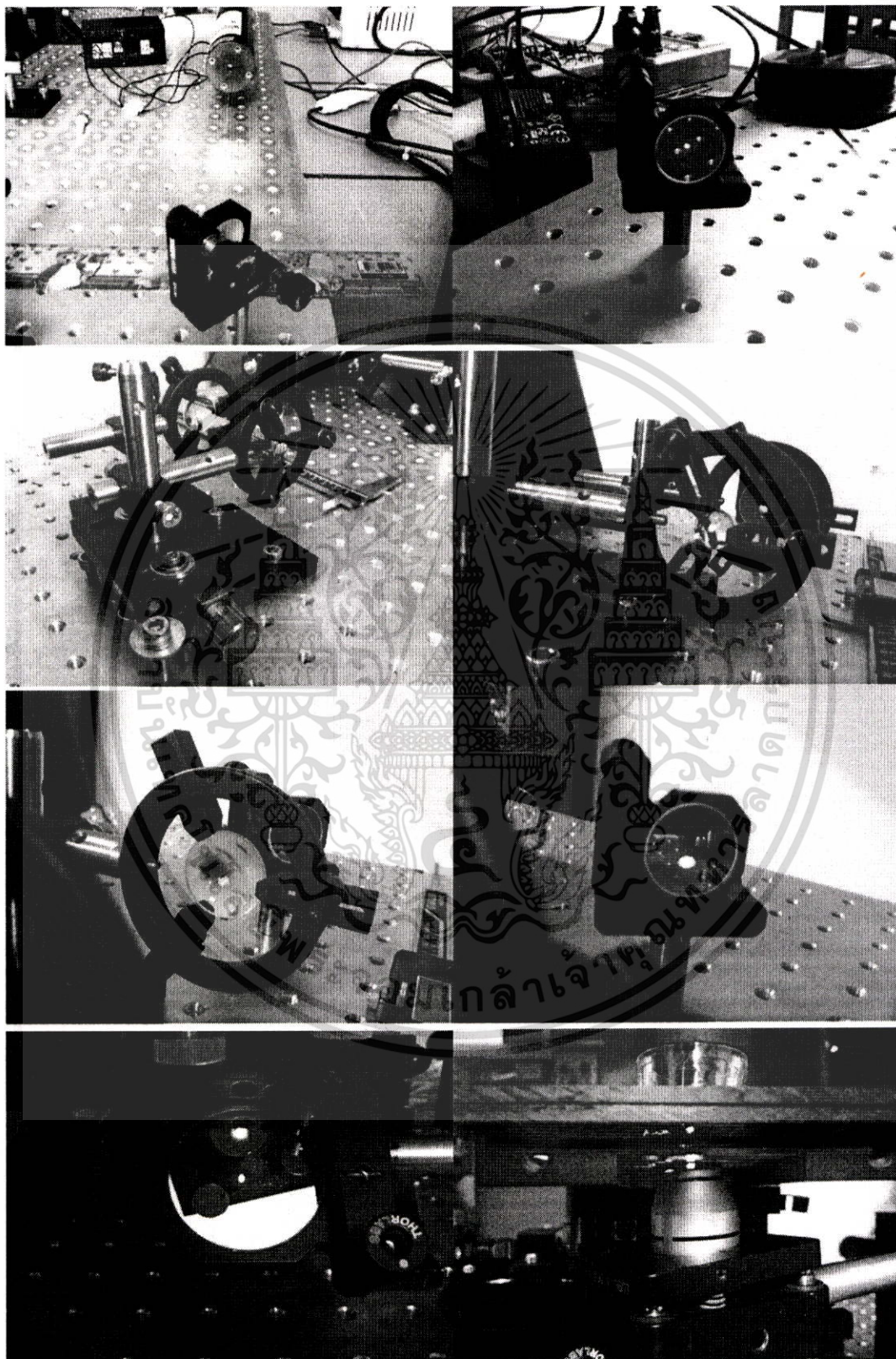


รูปที่ 4.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพเคลื่อนไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบการจัดวางอุปกรณ์ทัศนศาสตร์

4.3.1 การจัดวางระบบทัศนศาสตร์ทั้งหมด



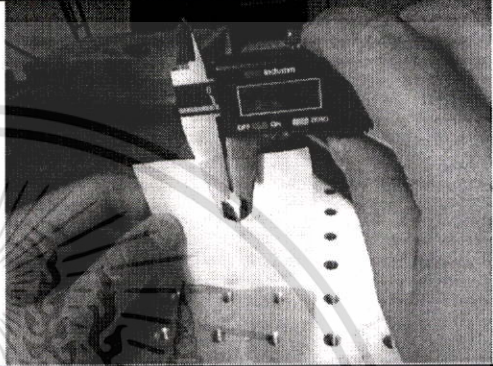

รูปที่ 4.3 แสดงการจัดระบบทัศนศาสตร์ของระบบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการเพิ่มส่วนการขยายลำแสง

จากเดิมที่ลำแสงเลเซอร์ออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กตั้งนั้นจึงจำเป็นต้องทำการผ่านระบบการขยายลำแสงโดยใช้เลนส์นูนแบบ Plano-Convex lens ทำการวัดขนาดของลำแสงเลเซอร์ก่อนเข้าและออกจากเลนส์

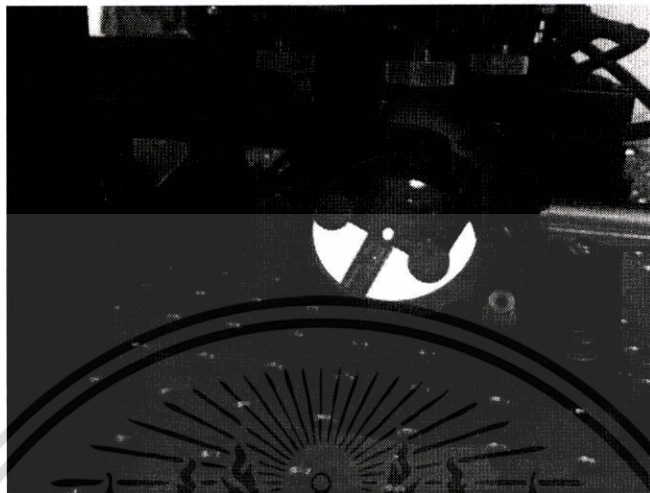
ตารางที่ 4.11 แสดงการวัดขนาดลำแสงเลเซอร์

ตำแหน่งการวัดขนาดลำแสงเลเซอร์	ขนาดของลำแสงเลเซอร์	รูปภาพขนาดของลำแสงเลเซอร์
ก่อนเข้าระบบขยายลำแสง	1.80	
ออกจากระบบขยายลำแสง	5.40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การจัดวางลำแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ 100x และการปรับจุกส์ที่แผ่นสไลด์

ทำการปรับ liner slide X-Y-Z เพื่อหาตำแหน่งที่ลำแสงเลเซอร์จะเข้าตรงกลางพอดีกับขอบเลนส์ใกล้วัตถุ 100x ทางด้านล่าง ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ลำแสงเลเซอร์ยังไม่เข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100xพอดี



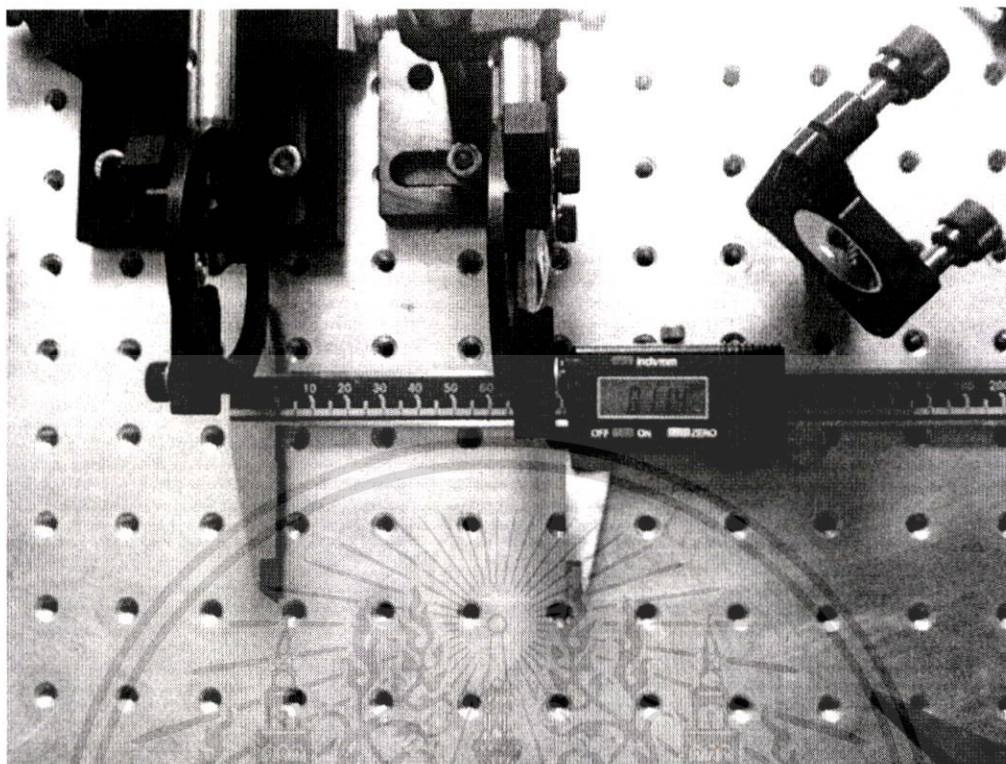
รูปที่ 4.5 ลำแสงเลเซอร์ยังเข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100xพอดี

แต่เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณระยะการวางเลนส์ 1 และเลนส์ 2 ที่ได้จากการคำนวณเป็นระยะ 8 ซม. เมื่อทำการวางระบบจะทดลองปรับตำแหน่งระยะการวาง ที่ทำให้ขนาดของลำแสงขยายเพิ่มขึ้น และขนาดของลำแสงที่ได้รับการขยายแล้วเท่ากันทั้งระบบ ตามจริงเป็นไปดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.12 แสดงระยะห่างเลนส์ที่ใช้ขยายลำแสงเลเซอร์

ระยะห่างของเลนส์ (ซม.)	ขนาดของลำแสงเลเซอร์จุดที่ 1	ขนาดของลำแสงเลเซอร์จุดที่ 2
8.114	5.41	5.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ระยะที่ลำแสงโฟกัสพอดีที่การ์ดสไลด์เมื่อดูจากกล้อง

4.4 ผลการทดสอบการจับอนุภาค และการเก็บบันทึกผล

4.4.1 สภาวะที่ยังไม่สามารถจับอนุภาคได้

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการใส่สารตัวอย่าง(เม็ดบีด)เข้าไปแล้ว เม็ดบีดที่ใส่เข้าไปนั้นมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำสังเกตได้จากการผสมเม็ดบีดกับสารละลายจะพบว่าเม็ดบีดลอยตัวอยู่ด้านบน ซึ่งการทดลองจริงๆแล้วเม็ดบีดจะต้องอยู่ในรูปของสารแขวนลอยทำให้เม็ดบีดลอยติดอยู่ที่การ์ดสไลด์ดังรูป 4.7 (a) และเมื่อส่องแสงเลเซอร์เข้าไปจะพบว่าเม็ดบีดนั้นอยู่นิ่งกับที่ไม่เคลื่อนย้ายดังรูป 4.7 (b) ก็แสดงว่ายังไม่สามารถที่จะทำการจับเม็ดบีดได้ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากเลเซอร์ไม่มีแรงกระตุ้นที่จะเอาชนะแรงกระเจิงของเม็ดบีดที่ติดกับสไลด์ได้



(a)



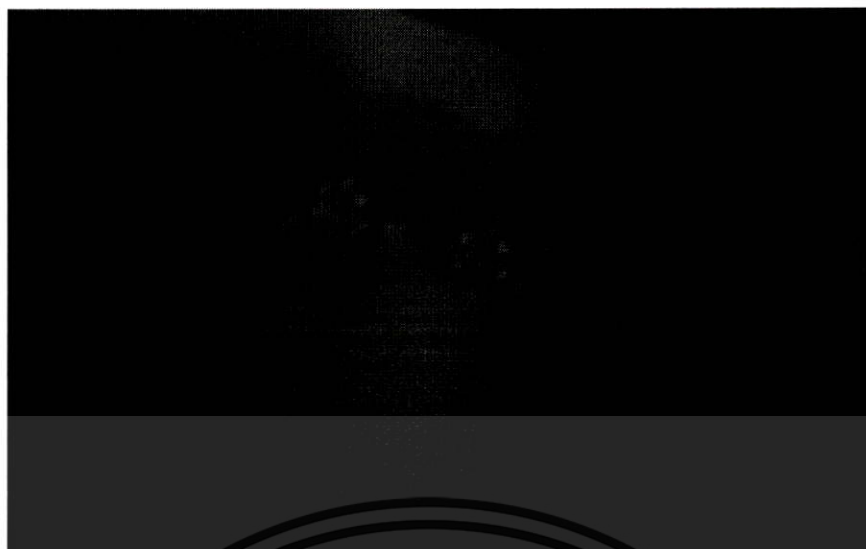
(b)

รูปที่ 4.7 (a) แสดงภาพเม็ดปิดที่ติดบนสไลด์ และ (b) แสงเลเซอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเม็ดปิด

4.4.2 สภาวะที่เริ่มจับอนุภาคได้

จากการทดลองพบว่าจะมีเม็ดปิดที่มีหลายขนาดโดยจากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเม็ดปิดที่ใหญ่ก็จะติดอยู่ที่แผ่นสไลด์แต่สังเกตได้ว่าจะมีเม็ดปิดที่เล็กกว่าลอยอยู่ในระหว่างการ์ดสไลด์ทั้งสองแผ่นที่ประกบติดกัน แล้วเมื่อทำการเปิดแสงเลเซอร์ก็จะเห็นได้ว่าจะมีเม็ดปิดลอยเข้ามาใกล้กับแสงเลเซอร์เห็นได้ดังกรอบวงกลมที่อยู่ในรูปที่ 4.8 จากนั้นเม็ดปิดก็จะเข้ามาติดกับตรงกลางลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มมากที่สุดดังกรอบวงกลมที่อยู่ในรูป และเมื่อเปิดแสงเลเซอร์ก็จะเห็นตำแหน่งของเม็ดปิดที่ตั้งเข้ามาเนื่องจากลำแสงเลเซอร์ ดังรูปที่ 4.8

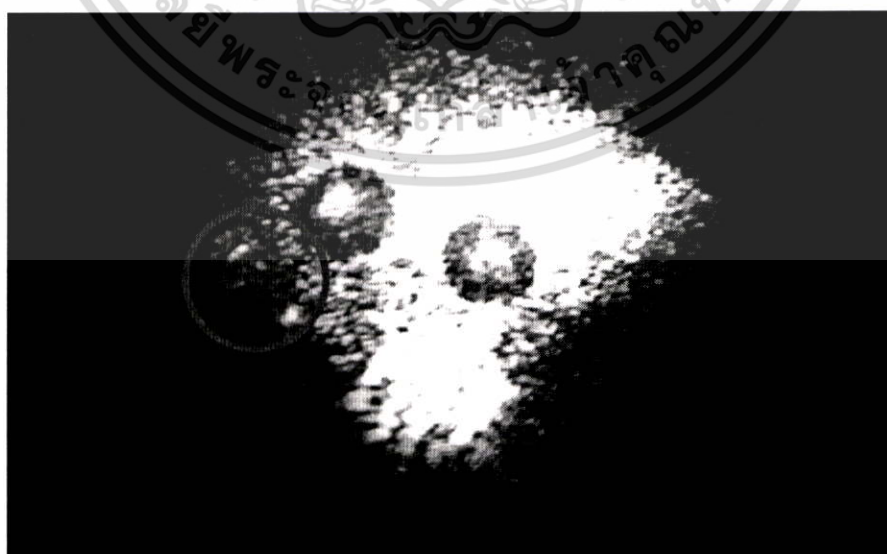
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

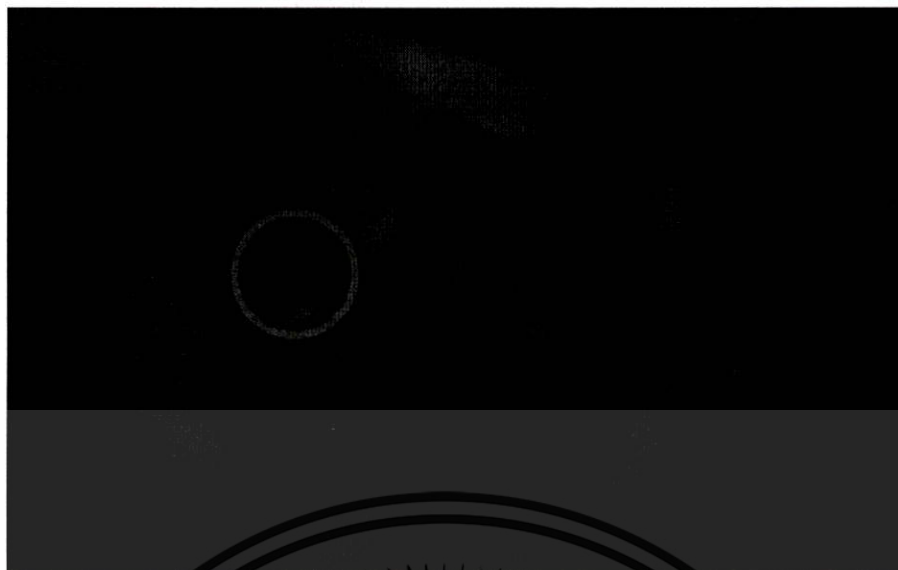


(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)

รูปที่ 4.8 แสดงเม็ดปิดเริ่มทำปฏิกิริยากับแสงเลเซอร์ (a) เม็ดปิดตัวใหญ่สองตัวอยู่กับที่ (b) เมื่อเปิดแสงมีเม็ดปิดไหลเข้ามาใกล้ลำแสง (c) เม็ดปิดไหลมารวมตัวกัน และ (d) ปิดแสงและสังเกตเม็ดปิดเปลี่ยนตำแหน่งจากการตักจับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการดำเนินงานวิจัยโครงการพิเศษที่ได้ทำการสร้างฐานเลื่อน X-Y ที่ใช้ในระบบคิมจับเชิงแสง โดยได้ทำการพัฒนาสร้างวงจรถบคุมสเต็ปมอเตอร์แบบ 5 เฟส ซึ่งได้ทำการพัฒนาเงื่อนไขการขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์เป็นแบบเต็มขั้นกระตุ้นสองขดลวด โดยทำงานร่วมกับวงจรถบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แล้วนำไปติดตั้งบนฐานเลื่อน X-Y โดยใช้กล่องควบคุมการเลื่อน Joybox ก็จะกลายเป็นฐานเลื่อน X-Y ใช้วางตัวอย่างมีความละเอียดสูงสุดที่สามารถทำได้ในการเลื่อน 0.2 ไมครอน ระยะการเลื่อนสูงสุด 2 ซม. ซึ่งมีระบบจำกัดระยะการเลื่อนสูงสุดโดยใช้ลิมิตสวิตช์ ถ้าหากฐานเลื่อน X-Y เลื่อนไปสู่ระยะการเลื่อนแล้วจะมีการแสดง ไฟสถานะที่ตำแหน่งที่ชนกับลิมิตสวิตช์แล้วเลื่อนกลับมาในตำแหน่งสุดท้ายก่อนการชนลิมิตสวิตช์ ก็ถือได้ว่าเป็นฐานเลื่อน X-Y ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์แทนเลื่อน X-Y ที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีขายกันในตลาด

ในส่วนของระบบการดูภาพเก็บบันทึกภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว ซึ่งนำข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัลไมโครสโคป มาเก็บบันทึกภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว ผ่าน GUI ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น มีความสามารถในการปรับแทนเลื่อน X-Y ให้เคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระ และในส่วนของระบบการรองแสงได้นำแผ่นฟิลเตอร์ที่ได้สร้างขึ้นมาใช้ในการกรองและตัดแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง ทำให้เซนเซอร์รับภาพของกล้องดิจิทัลไมโครสโคปไม่เกิดความเสียหาย โดยยังคงมองเห็นเม็ดบีดที่นำมาศึกษาอยู่

ในส่วนของระบบทัศนศาสตร์ เลนส์ใกล้วัตถุ 100x ที่ใช้ในการรวมแสงเลเซอร์ให้เกิดการโฟกัสที่แผ่นสไลด์ ผลปรากฏว่าขนาดของจุดโฟกัสมีขนาดที่ใหญ่มากกว่าอนุภาคตัวอย่างที่นำมาทดลองทำให้ไม่สามารถแยกแยะระหว่างอนุภาคตัวอย่างกับแสงเลเซอร์ได้อย่างชัดเจน แต่จากการทดลองระบบของเราถือว่าระบบมีประสิทธิภาพในการดักจับ จะเห็นได้จากเม็ดบีดขนาดเล็กมีการวิ่งเข้าหาแสงเลเซอร์ ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าเลเซอร์มีกำลังมากพอที่จะจับอนุภาค แต่เลเซอร์ควรมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอนเมตร

โดยเมื่อนำแทนเลื่อน X-Y ที่สร้างขึ้นพร้อมชุดควบคุม มาติดตั้งกับระบบคิมจับเชิงแสงและระบบการมองเห็นแล้วบันทึกภาพนิ่ง ก็จะกลายเป็นระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สามารถใช้งานฐานเลื่อนวางตัวอย่างอนุภาคที่นำมาศึกษา ดักจับอนุภาค เป็นการเสริมสร้างให้ระบบคิมจับเชิงแสงมีประสิทธิภาพและสะดวกง่ายต่อการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่นำไปติดตั้งในระบบสcimจับเชิงแสง นั้นยังคงต้องอาศัยการควบคุมจากคณโยกในการปรับให้ฐานวางตัวอย่างที่จะศึกษานั้นเลื่อนไปซึ่ง อาจจะมีการพัฒนาให้กลายเป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยเมื่อทำการโฟกัสภาพได้นั้นจะใช้การสแกนเพื่อตรวจสอบและแยกแยะตัวอย่างที่ศึกษาออกจากพื้นหลัง จะทราบว่าในขนาดของภาพที่แสดงผลอยู่นั้นมีจำนวนตัวอย่างอยู่เท่าใด และสามารถทราบถึงตำแหน่งของอนุภาคตัวอย่างแต่ละตัวได้ จากกระบวนการอิมเมจโปรเซสซิง(Image processing)ที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ จากนั้นจะสามารถนำข้อมูลนี้มาใช้ในการเลื่อนฐานวางตัวอย่างให้อนุภาคตัวอย่างขยับเข้าใกล้กับลำแสงเลเซอร์ที่อยู่ตรงกลางของภาพ ก็จะทำการดักจับอนุภาคตัวอย่างได้เองแบบอัตโนมัติ ดังนั้นเป็นการพัฒนาให้กลายเป็นระบบสcimจับเชิงแสงที่ควบคุมการเลื่อนของฐานวางตัวอย่างแบบอัตโนมัติ ให้สามารถนำไปพัฒนาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปใช้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีววิทยา-ฟิสิกส์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

เอกสารผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low cost optical tweezers systems using double coil driving stepping motor to controlling sample stage

N. Laowattanatham, N. Cheamanunkul, S. Plaipichit, P. Buranasiri, and R. Nuansri
Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang

Bangkok, Thailand, 10520

ABSTRACT

In this research, the low cost optical tweezers systems using X-Y stage has been developed by using 5-phase stepping motor. By using sequential double coil driving, we can obtain the driving torque larger than using the single coil driving. The moving scale is fine resolution at 0.2 micrometer. The overall systems based on microcontroller PIC18F458 and joystick controller with LabView® graphical user interface (GUI). The mechanical damping has been included in the system for decreasing the vibrational noise. By using this method, our optical tweezers system is cheaper than the other commercial system that has been used the piezoelectric driving, and still has the same efficiency.

Keywords: Optical tweezers, stepping motor, double-coil driving, low vibrational noise, GUI monitoring

1. INTRODUCTION

An optical tweezers system has been first found by Ashkin for trapping and cooling atom in gases [1, 2]. Nowadays, this system has been applied to investigate in many topics i.e. elasticity of biological cells [3], molecular motors [4, 5], measurement of small forces [6, 7], and tracking of bacteria movements [8, 9]. Previously, the performances of optical tweezers systems have been always perturbed by vibrational noise. Since, the most of conventional optical tweezers systems for university laboratory have been designed base on optical microscope, which is usually manual controlled the position of sample state by operators [10]. Thus, there are many researches, which have been used to improve this problem by modifying the sample stage moving systems using stepping motors [11], or piezoelectric driving modules [12] etc.

Stepping motors have been widely used to control mechanical arms, automatic systems and moving stages. Generally, the commercial stepping motors are 2-phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

stepping motors and have been controlled by using control box, which controlled the direction and speed of the motor rotation. The stepping rotation of 2-phase stepping motors is different and depends on the specifications of each stepping motor. Due to the limitation of 2-phase stepping motors in practice; a hybrid 5-phase stepping motor has been introduced and developed [13]. This type of stepping motor has stepped resolution better than generic 2-phase motors. Moreover, the hybrid stepping motors can fix the mechanical problem, which always occurred in conventional types by reducing the vibrational noise. The hybrid 5-phase motors have been usually installed with gearbox for increasing stepped resolution and empowering torque to drive heavy load. However, the commercial stepping motors controllers still are so expensive. Therefore, in our work, we have developed the X-Y sample stage controller for an optical tweezers system by using the hybrid 5-phase motors set. These motors can be controlled via our developed control box, which is based on microcontroller and switching devices, and joystick. Then, overall stage controller is installed with conventional microscope and some optical components to complete the low cost optical tweezers system. The LabView® GUI has been proposed to operate with optical tweezers system for real-time monitoring and capturing the motion of sample on the sample stage [14].

*pegeza_gove@hotmail.com

ICPS 2013: International Conference on Photonics Solutions, edited by Prathan Buranasiri, Sarun Sumriddetchkajorn,

Proc. of SPIE Vol. 8883, 88830U · © 2013 SPIE · CCC code: 0277-786X/13/\$18 · doi: 10.1117/12.2022116

2. THEORIES

2.1 Coil structure and wiring pattern of stepping motor 5-phase

Nowadays, technology of stepping motor has been developed more than ever. Many manufacturers have produced high resolution and accuracy stepping motors as a compare bipolar stepping motor, which is called “5-phase stepping motor” and it has a number of coils up to 10 coils while the bipolar stepping motor which has only 8 coils. Because of the number of coils, 5-phase stepping motor has a high step resolution about 0.72 degree/step or 0.36 degree/step. However, there are two types of 5-phase stepping motor, the first one is dependent coils as shown in figure 1(a); and the other one is independent coils as shown in figure 1(b). From this feature, driving circuit for each type of motor cannot be used with each other. In the other words, its driving is so difference. The 5 phase stepping motor can be specified by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

observing the number of signal line (dependent coil type has 5 lines and independent coil type has 10 lines) [15].

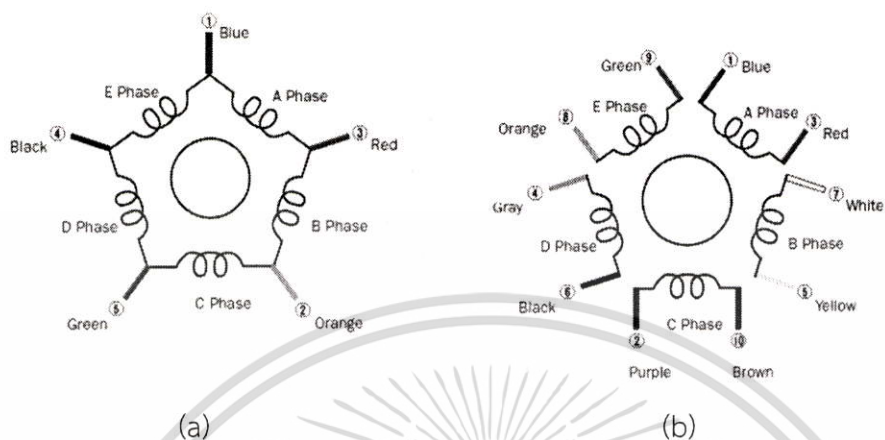


Figure 1. Coil structure of 5-phase stepping motor (new pentagon bipolar type) (a) The dependent coil (5 lines) and (b) The independent coil (10 lines).

2.2 The driving method 5-phase stepping motor

There are many difference way or method to drive the 5-phase stepping motor. Each method depends on the number of coil, the number of phase, and the type of driving circuit [16]. In this paper, we have referred to a driving method of this type of stepping motor with 2-phase activation by using switching devices, which is controlled based on microcontroller as shown in figure 2. The diagrams of 5-phase stepping motor and sequential driving table of this stepping motor are shown in table 1.

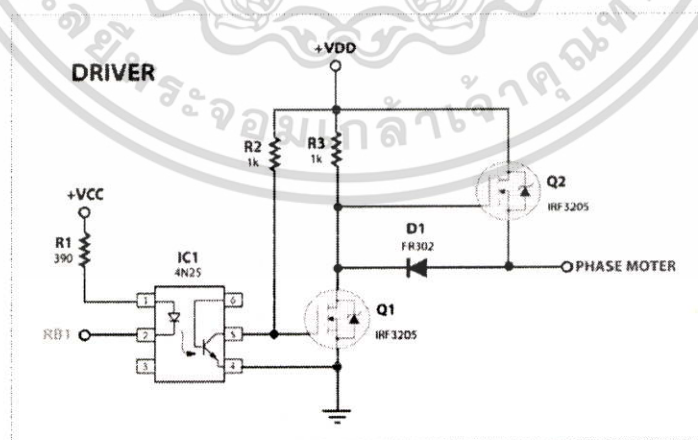
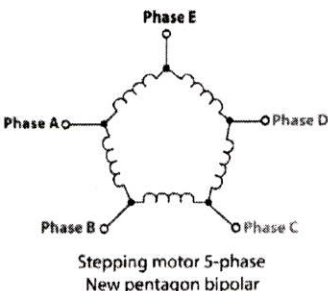


Figure 2. Basic circuit to drive the stepping motor 5-phase.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Diagram and table sequence to drive stepping motors.

Phase \ Step	1	2	3	4	5
A					
B					
C					
D					
E					
CW Rotage	→				
CCW Rotage	←				



3. EXPERIMENTAL SETUP

In this research, we have begun from stepping motor control box development that is mounted on the X-Y stage. Meanwhile, two 5-phase stepping motors of Vertex (New pentagon bipolar type) with step resolution 0.072 degree/step was chosen. We have used joystick to control the position and moving direction of the X-Y stage. Moreover, limit switches are installed into our systems to prevent the out of determined moving range of stage and two stepping motor driving circuit boards are developed and included with this system to drive both motors. The operation diagram of 5phase stepping motor driver is shown in figure 3 and the schematic of the overall system (Part of the X-Y stage and optical tweezers system) is shown in figure 4.

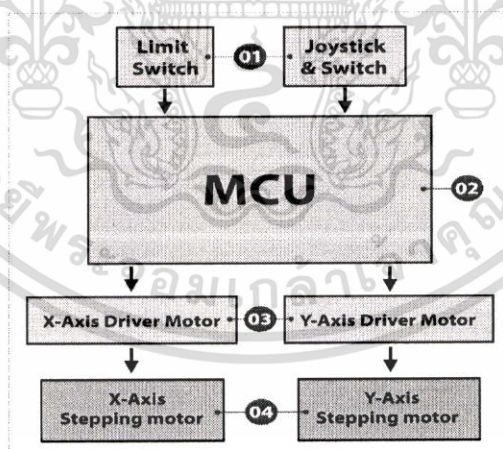


Figure 3. Operation diagram of 5-phase stepping motor driver.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

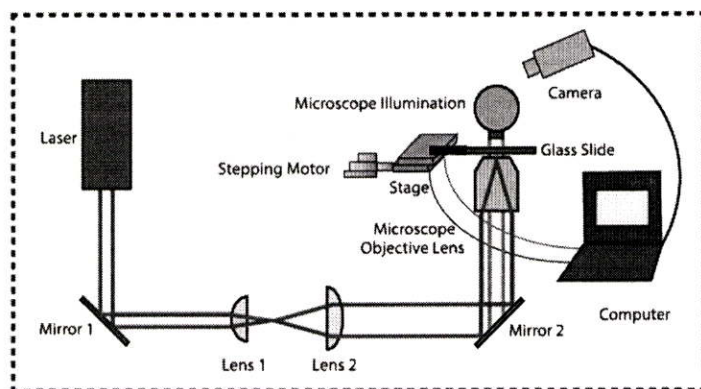


Figure 4. Schematic of the overall optical tweezers system.

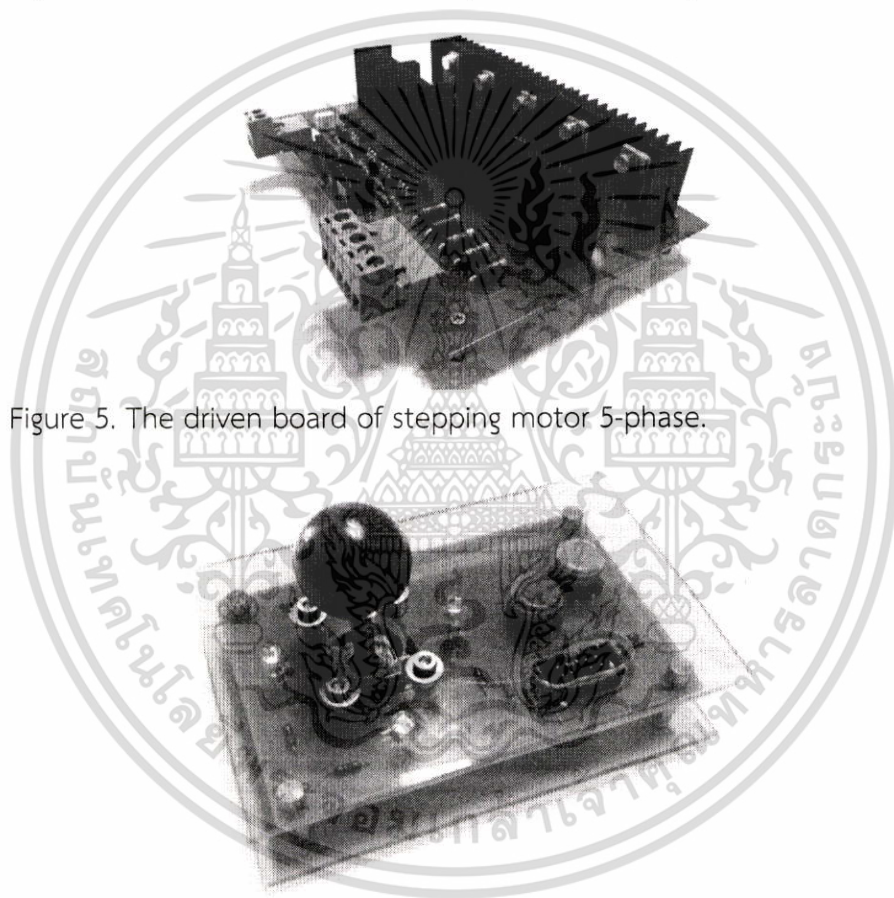


Figure 5. The driven board of stepping motor 5-phase.

Figure 6. Joybox control used control the sliding platform X-Y.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

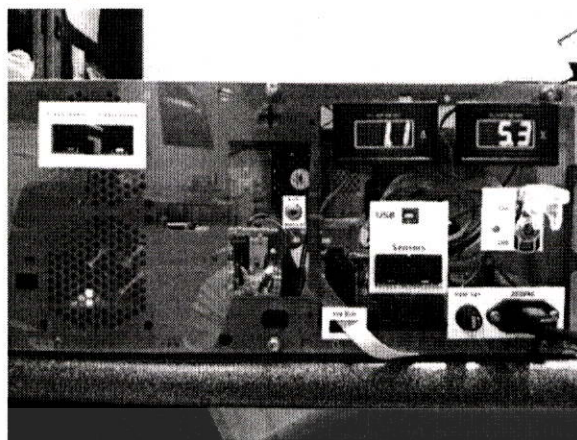


Figure 7. Semi-automatic control box of sample base (The main control panel connects to equipment).

Next, the semi-automatic controlled X-Y stage system has installed with sample stage of microscope as shown in figure 8(a) and then connected with power supply as shown in figure 8(b). After that the 100x-objective lens is mouthed on the linear slide X-Y-Z stage as shown in figure 8(c) and adjusted to find the focusing point. Finally, we have connected the control box with the completed sample stage of conventional optical tweezers system¹⁰, which as shown in figure 8(d).

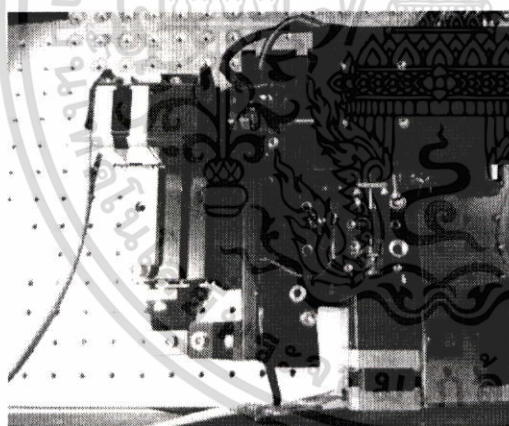


Figure 8(a)

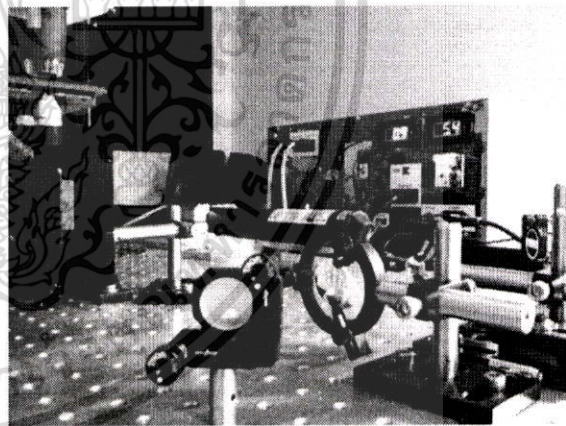


Figure 8(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

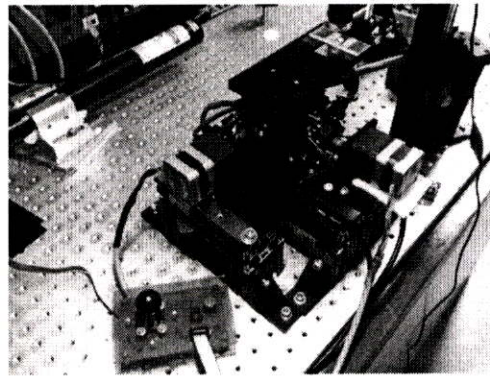
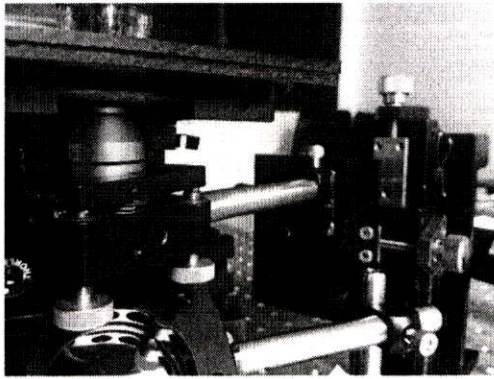


Figure 8(c)

Figure 8(d)

Figure 8. Parts of optical tweezers system.

3.1 Accuracy testing of rotation of stepping motor

To obtain the good accuracy of the stepping motor rotation, as shown in figure 9 the encoder is applied for the position measurement with the resolution of 2500 pulse/cycle and it can be programmed for increasing resolution up to 2 - 4 times. If the software is programmed to measure the rotating accuracy being 2 times, then measuring resolution must be 5000 pulses/cycle. This can indicate that the signal would change in every step rotating. With the step resolution of motors is 0.072 degree/step, when stepping motors rotate for 5,000 steps, the signal with 5,000 pulses will be detected.

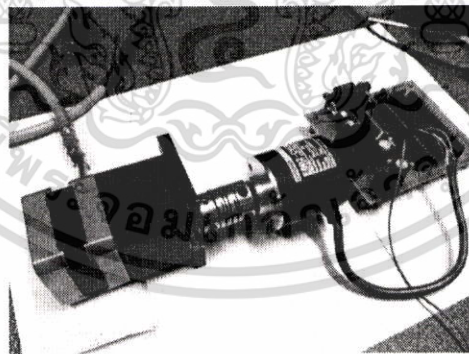


Figure 9. Show a stepping motor connected with encoder used to measuring the rotation position.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 The properties of the platform X-Y stage

According to the operation testing of slider X-Y stage, we can summarize the properties of this stage as shown in table 2.

Table 2. Shows the properties of the platform X-Y stage

Resolution of slider	0.2 micrometer
Precision of slider	1.0 micrometer
Velocity of rotation	50.0 mm./sec.
Maximum sliding distance	Axis : X = 20 mm., Y = 20 mm.

The graphical user interface (GUI) has been used to observe sample particles, i.e. beads, which are dropped on glass slide on X-Y stage. The GUI panel for observing the particles is shown as in figure 10. Figure 11 shows the observed particles in initial condition before turn on trapping laser. Figure 12 shows the observed particles, which are trapped in laser beam.

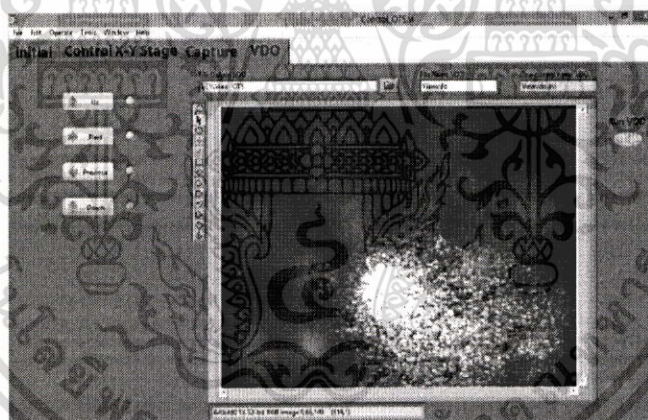


Figure 10. GUI to view beads particle and control X-Y stage movement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

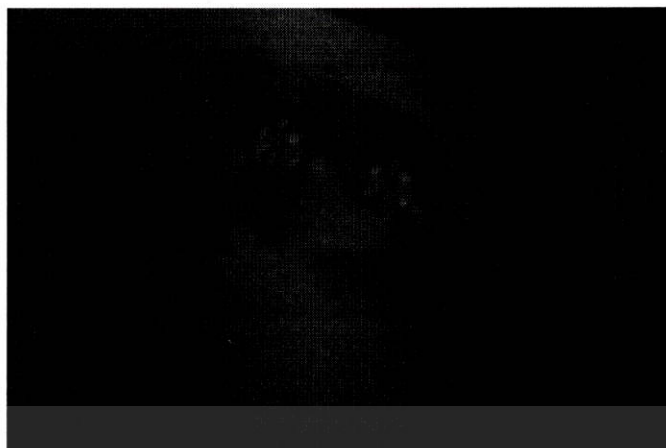


Figure 11. The particle are move d when adjust position X-Y stage.

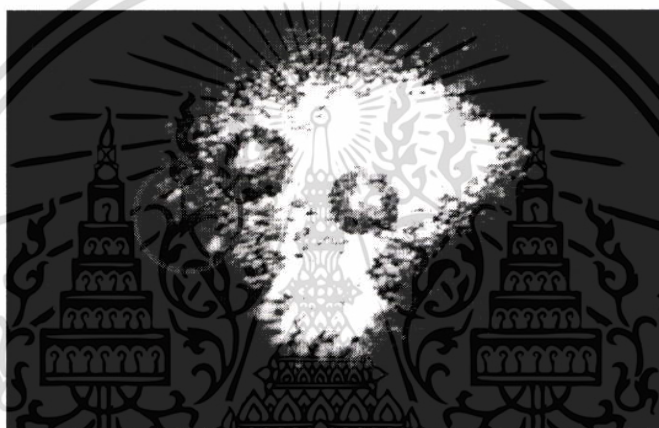


Figure 12. The tapped particles with laser beam.

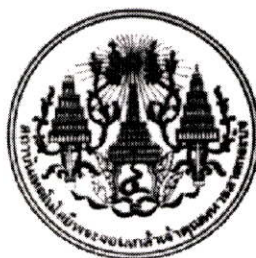
4. CONCLUSION

In this research, the 5-phase stepping motors control circuit is developed to control the X-Y stage and then adapt with optical tweezers system. This driving system has been designed to drive stepping motor with full step driving condition of 2 coils and operated with other control circuit. Meanwhile, all operations are controlled by using microcontroller. Moreover, for controlling the X-Y stage position, we have designed the joybox and GUI panel to do this work. Then, the limit switch is chosen to limit the maximum moving range and prevent the adverse moving range of X-Y stage. For our work, we can implement this stage moving with resolution about 0.2 micrometer in each time and the maximum range and speed of stage moving are 2.0 centimeter and 1.0 mm./s, respectively. The X-Y stage modules can obviously improve the performance of optical tweezers system. The GUI panel has been used to observe particles and capture image or VDO files to PC storage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 3 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2556

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติเชิงแสงแบบอัตโนมัติ

(ภาษาอังกฤษ) The Development Of Automatic Control System For Optical Tweezers

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย อ.ธรรมรัตน์.....แต่งตั้ง

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ กันยายน 2556

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ กันยายน 2556

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)
2. วงที่ 1 50,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)
2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร:ค่าจ้างชั่วคราว	10,000	10,000	
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้สอย			0
ค่าวัสดุ	40,000	40,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000	50,000	50,000

.....
 (.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

...../...../.....

.....
 (.....)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

...../...../.....

หมายเหตุ : นักวิจัยหรือเจ้าหน้าที่การเงินสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมข้อความได้ตามความเหมาะสมและสอดคล้องกับการ

ดำเนินงาน อาทิเช่น นักวิจัยอยู่ระหว่างการดำเนินการเคลียร์ด้านเอกสารทางการเงิน หรือข้อความอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REFERENCES

- [1] Ashkin, A., "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.* 24(4), 156-159 (1970).
- [2] Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E. and Chu, S., "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Opt. Lett.* 11(5), 288-290 (1986).
- [3] Wu, J., Li, Y., Lu, D., Liu, Z., Cheng, Z. and He, L., "Measurement of the membrane elasticity of red blood cell with osmotic pressure by optical tweezers," *Cryo. Lett.* 30(2), 89-95 (2009).
- [4] Mehta, A.D., Finer, J. T. and Spudich, J.A., "Use of optical traps in single-molecule study of nonprocessive biological motors," *Methods Enzymol.* 298, 436-459 (1998).
- [5] Rice, S. E., Purcell, T.J. and Spudich, J. A., "Building and using optical traps to study properties of molecular motors," *Methods Enzymol.* 361, 112-133 (2003).
- [6] Simmons, R. M., Finer, J. T., Chu, S. and Spudich, J. A., "Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap," *Biophys J.* 70(4), 1813-1822 (1996).
- [7] Kuo, S. C., "Using optics to measure biological forces and mechanics," *Traffic* 2(11), 757-763 (2001).
- [8] Peters, I. M., de Groot, B. G., Schins, J. M., Figdor, C. G. and Greve, J., "Three dimensional single-particle tracking with nanometer resolution." *Rev. Sci. Ins.* 69(7), 2762-2766 (1998).
- [9] Pralle, A., Prummer, M., Florin, E. L., Stelzer, E. H. and Horber, J. K., "Three-dimensional high-resolution particle tracking for optical tweezers by forward scattered light," *Microsc. Res. Tech.* 44(5), 378-86 (1996).
- [10] Bechhoefer, J. and Wilson, S., "Faster, cheaper, safer optical tweezers for the undergraduate laboratory," *Am. J. Phys.* 70(4), 393-400 (2002).
- [11] Smith, S. P., Bhalotra, S. R., Brody, A. L., Brown, B. L., Boyda, E. K. and Prentiss, M., "Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories," *Am. J. Phys.* 67(1), 26-35 (1999).
- [12] Koch, S. J. and Wang, M. D., "Dynamic force spectroscopy of protein-DNA interactions by unzipping DNA," *Phys. Rev. Lett.* 91(2), 028103 (2003).
- [13] Lim, K. C., Hong, Jung-Pyo and Kim, Gyu-Tak, "Characteristic analysis of 5-phase hybrid stepping motor considering the saturation of both teeth and poles," *IEEE industry applications conference*, 1, 132-138 (2000).

- [14]Chiang, C. S., Chen, Y. J., Young, M. S., Hsieh, M. H., Hsieh, Y. Z. and Huang, K. N., "The study of autoFocus system for biomedical digital microscope," International conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering,1-4, (2009).
- [15]Oriental Motor Co. Ltd., [Application Guides of Step Motor], Japan, (2005).
- [16]Wale, J. D. and Pollock, C., "Hybrid stepping motors and drives," J. Pow. Eng. 15(1), 5 - 12 (2001).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Profile

Name : Mr Thammarat Taengtang

Date of Birth : 8th April 1968

Height : 1.67 m / Weight : 70 kg

Status : Married

Study degree :

1992 : BSc., GPA = 2.57 in Physics from ramkhamheang university, Bangkok

2001 : ME., GPA = 3.70 in Electrical Engineering from KMITL, Bangkok



Conference

1. "The mean-shift imaging using 2D-histogram segmentation," International Conference on Mathematical Modeling and Computation on Universiti Brunei Darussalam, June 2006
2. "Molecular Transporters Generations Based on Ant Colony Algorithm for Molecular and Storage Applications," Piers Conference, 2010.
3. "A Stirling Engine Manipulation using Laser Combustion Technique," Joint international Conference on JICTEE 2010,
4. "The Pulse Jet Engine Array Manipulation," Joint international Conference on JICTEE 2010.
5. "The Pulse Jet Engine Array Manipulation," International Conference on Modeling and Simulation Technology, Tokai University Takanawa Campus, Tokyo, Japan 2011

Journal

1. "Molecular network based on ant colony system via wavelength routers," Microwave And Optical Technology Letters, 2010.
2. "Error corrections of quantum key distribution of quantum codes via optical wireless link," Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้