

3D SCANNER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท เครื่องสร้างภาพสามมิติด้วยแสงเลเซอร์
3D SCANNER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายจตุพล เพื่อกกลางเมือง รหัสประจำตัว 44015421
นายศรศักดิ์ ศรีศิริ รหัสประจำตัว 44015446
นายอภิชน ต้นตนานนท์ รหัสประจำตัว 44015455
นายเอกรัช พุทธรักษา รหัสประจำตัว 44015459

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2546

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พุฒศักดิ์ ชิวสุวิทย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพุธที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2547
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว

(รศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

เครื่องสร้างภาพสามมิติด้วยแสงเลเซอร์

3D SCANNER

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายจตุพล เพื่อกกลางเมือง

นายศรศวีสน์ ศรีศิริ

นายอภิชน ดันตนาพันธ์

นายเอกรัช พุทธรักษา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ฟูศักดิ์ ชิวสุวิทย์

ปีการศึกษา

2546

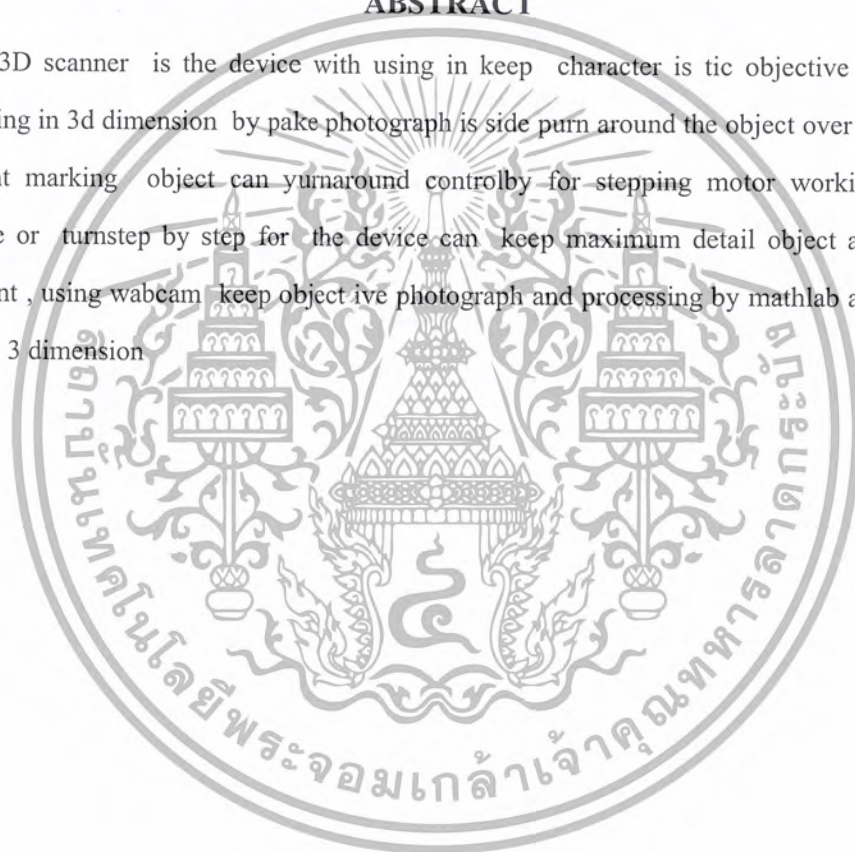
บทคัดย่อ

เครื่องสร้างภาพ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรูปลักษณะของวัตถุแล้วประมวลผลออกมาเป็นภาพ 3 มิติ โดยการถ่ายภาพของวัตถุในแต่ละมุมจนครบ 360 องศา โดยการหมุนของวัตถุที่ต้องการประมวลผลส่วนที่สำคัญประการที่ 1 คือการทำให้วัตถุสามารถหมุนได้โดยมีการสั่งการจากคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะควบคุมการทำงานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ โดยสามารถหมุนเป็นรอบหรือหมุนที่ละสเต็ปเพื่อที่จะให้เครื่องยิงแสงเลเซอร์สามารถเก็บรายละเอียดของวัตถุได้มากที่สุด

Thesis Title	3D SCANNER
Authors	Mr. Jatupol Puakklangmuang Mr. Sornsawat Sornsiri Mr. Apichon Tantananon Mr. Akarat Puttaruksa
Thesis Advisor	Asst. Prof. Doctor. Fusak Cheerwasuvit
Year	2003

ABSTRACT

3D scanner is the device with using in keep character is tic objective picture and processing in 3d dimension by pake photograph is side purn around the object over 360° thr first important marking object can yurnaround controlby for stepping motor working with can turncycle or turnstep by step for the device can keep maximum detail object and the other import ant , using wabcam keep object ive photograph and processing by matlab and 3d studio for make 3 dimension



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์ พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมาอีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปการณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

และที่ลืมไปเสียไม่ได้คือ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ที่ท่านเป็นที่รักยิ่ง และเพื่อนๆ ที่สนับสนุนช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญาานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 แนวคิดและหลักการของ 3D SCANNER.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 การเก็บข้อมูลของวัตถุเชิง 3 มิติ.....	5
2.3 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพ 3 มิติเบื้องต้น.....	6
2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพ 3 มิติ.....	7
บทที่ 3 หลักการของการวัดพิภัก 3 มิติ.....	9
3.1 คุณภาพของภาพสะท้อน.....	9
3.2 การทำงานของเครื่อง 3D SCANNER.....	14
บทที่ 4 โครงสร้างอุปกรณ์ควบคุมและระบบควบคุม.....	15
4.1 Brushless DC servomotor.....	15
4.2 อุปกรณ์ควบคุม 2 แกน 6250.....	22
4.3 อุปกรณ์ควบคุม BLX30.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ระบบควบคุมของแกนที่ 4.....	27
4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับ stepping motor.....	29
บทที่ 5 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม.....	31
5.1 PROGRAM STEP MOTOR.....	31
5.2 หน้าจอของโปรแกรม.....	34
บทที่ 6 สรุปผล.....	35

บรรณานุกรม

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

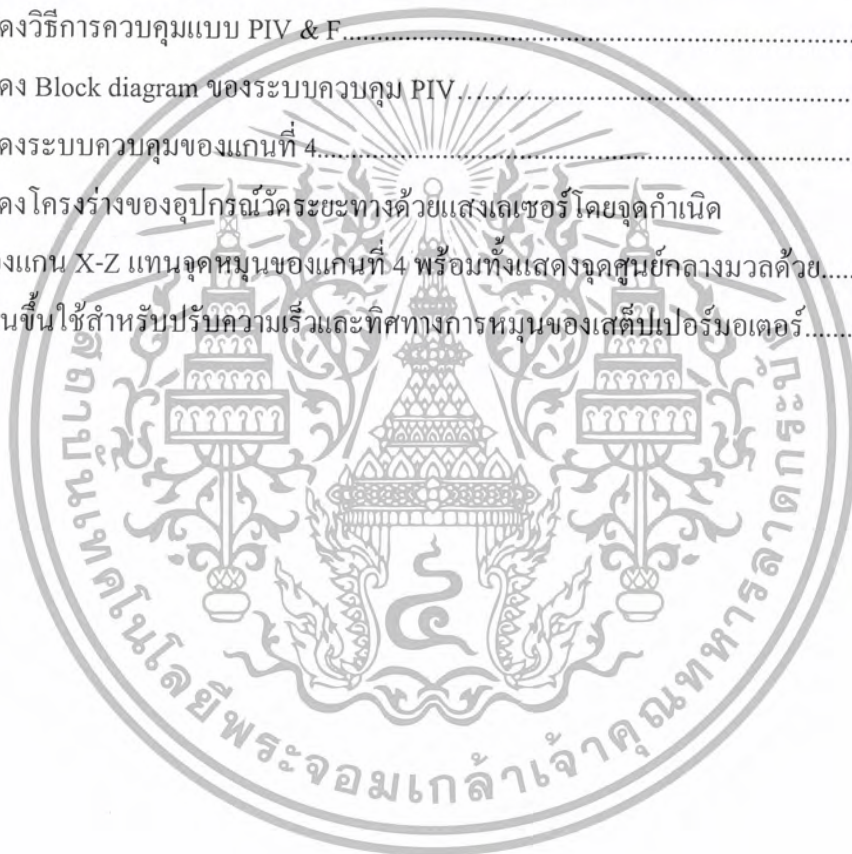
สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง wafer แต่ละชั้นของพีรามิด.....	3
2.2 แสดง wafer แต่ละชั้นของทรงกระบอก.....	3
2.3 แสดง top view ของทรงกระบอกและ wafer.....	4
2.4 แสดง top view ของพีรามิดและ wafer.....	5
2.5 การสร้าง wafer จากวัตถุ และนำ wafer กลับมาสร้างเป็นวัตถุ.....	6
2.6 แสดงจุดอ้างอิงของงานหมุนและจุดบนเส้นรอบรูปของวัตถุ.....	6
2.7 แสดงจุด 2 จุดบนเส้นรอบรูปของวัตถุทำมุมระหว่างกัน.....	7
2.8 แสดงความแตกต่างระหว่างเส้นรอบรูปที่ได้จากการใช้จุด 4 จุด และ 8 จุดต่อชั้น.....	7
2.9 แสดงการนำจุดที่ได้มาเรียงกัน โดยแต่ละจุดทำมุมกัน 360 / จำนวนจุดต่อชั้น.....	8
3.1 การสะท้อนที่สมบูรณ์.....	9
3.2 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวมีคุณสมบัติการสะท้อนต่างกัน.....	10
3.3 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวมีคุณสมบัติการสะท้อนต่างกัน.....	11
3.4 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวมีรูปร่างที่ต่างจากระนาบมา.....	12
3.5 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวถูกบัง.....	12
3.6 แสงที่สะท้อนกลับมาถูกบังไปบางส่วน.....	13
3.7 แสงที่สะท้อนกลับมา.....	14
3.8 การทำงานของเครื่อง 3D SCANNER.....	14
4.1 หลักการของ DC motor.....	16
4.2 หลักการของ AC motor-1.....	17
4.3 หลักการของ AC motor-2.....	17
4.4 แสดงกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสในมอเตอร์แบบ Brushless.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	แสดงภาพการทำงานของวงจรควบคุมแบบ Brushless.....20
4.6	ก) วัตถุประสงค์ของวงจร DC-SIN conversion circuit ข) วงจร DC-SIN conversion circuit.....21
4.7	รูปคลื่นสัญญาณจากวงจร Sine wave PWM.....21
4.8	a) แสดง Integral windup b) แสดงผลเมื่อใช้การจำกัดการอินทิเกรต.....24
4.9	แสดงวิธีการควบคุมแบบ PIV & F.....25
4.10	แสดง Block diagram ของระบบควบคุม PIV.....26
4.11	แสดงระบบควบคุมของแกนที่ 4.....28
4.12	แสดงโครงร่างของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์โดยจุดกำเนิด ของแกน X-Z แทนจุดหมุนของแกนที่ 4 พร้อมทั้งแสดงจุดศูนย์กลางมวลด้วย.....28
5.1	เขียนขึ้นใช้สำหรับปรับความเร็วและทิศทางการหมุนของเสต็ปเปอร์มอเตอร์.....36



บทที่ บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะพัฒนาในด้านเทคโนโลยีการผลิตเพื่อที่จะสามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพด้วยเวลาอันสั้น โดยใช้ต้นทุนต่ำเพื่อให้ออกไปแข่งขันกับสินค้าในตลาดโลกได้ในราคาที่ต่ำกว่า ดังนั้นเทคโนโลยีการผลิตจึงมีแนวโน้มว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมและออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทคโนโลยีอื่นหนึ่งที่ได้รับความสะดวกจากอุตสาหกรรมมาก

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและควบคุมจะเริ่มจากการใช้ฟังก์ชันต่างๆ ในการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานในส่วนต่างๆจนได้รูปทรงที่พอใจ จากรูปทรงที่สร้างขึ้นจะเป็นฐานข้อมูลที่ผู้ออกแบบสามารถแปลงเป็นรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตามที่ต้องการ ส่วนการใช้คอมพิวเตอร์ ช่วยในการผลิตจะอาศัยข้อมูลจากส่วนช่วยในการออกแบบมาทำการผลิต การใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมาช่วยในอุตสาหกรรม ทำให้การผลิตสะดวกและสามารถผลิตชิ้นงานที่ ยากๆ ได้ภายในเวลาอันสั้น

จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยคอมพิวเตอร์ต้องเริ่มจากการสร้างต้นแบบภายในคอมพิวเตอร์ให้เหมือน หรือใกล้เคียงกับแบบที่ต้องการมากที่สุดแต่ในบางครั้ง การสร้างต้นแบบภายในคอมพิวเตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนต้องใช้เวลาาน และใช้ทักษะ ความสามารถของผู้วาดในการที่จะสร้างต้นแบบให้ตรงตามแบบได้ และหากเป็นการสร้างแบบจากของจริง เช่น การสร้างต้นแบบของแม่พิมพ์หรือต้นแบบรถยนต์ที่ทำจากไม้ในขั้นตอนการออกแบบรถยนต์เป็นต้น ก็ยังต้องใช้ความสามารถมากขึ้นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยสร้างต้นแบบคือ การทำ 3D SCANNER เพื่อนำไปใช้สร้างต้นแบบภายในคอมพิวเตอร์ ซึ่งเหมือนเป็นวิธีการย้อนจากขนาด ชิ้นงานกลับสู่ต้นแบบ วิธีการดังกล่าวมีประโยชน์คือจากเป็นการลดเวลาในการสร้างต้นแบบแล้วยัง ช่วยสร้างข้อมูลของผลิตภัณฑ์บางชิ้นซึ่งข้อมูลด้านขนาดของชิ้นงานได้สูญหายไป ประโยชน์ เนื่องจากการเก็บข้อมูลจากชิ้นงานจริง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

1.2.1 เพื่อสามารถเก็บรายละเอียดของวัตถุที่ต้องการนำไปสร้างเป็นภาพ 3 มิติให้ได้ โครงสร้างและได้ละเอียดมากที่สุด

1.2.2 เพื่อพัฒนาความสามารถในการเก็บรายละเอียดของข้อมูล

1.2.3 เพื่อเป็นแนวทาง นำไปศึกษาและพัฒนาประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 สามารถทำเลเซอร์จากจุดให้เป็นเส้นตรงได้
- 1.3.2 สามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้หมุนตามที่เรากำหนดองศาได้
- 1.3.3 สามารถสร้างภาพเสมือน โครงสร้างของวัตถุได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิดและหลักการของ 3D SCANNER

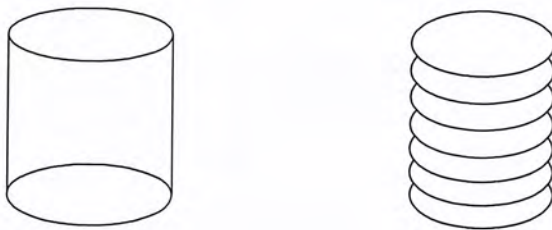
2.1 กล่าวนำ

เมื่อเราต้องการสร้างภาพของวัตถุที่นำมาสแกน ให้แสดงผลทางหน้าจอในเชิง 3 มิติ นั้น แนวคิดเบื้องต้นของการสร้างนี้คือ ถ้าเราสามารถนำวัตถุจริงมาหั่นทางด้านความสูงให้มีความหนา น้อยมาก จนสามารถมองได้ว่าเป็นแผ่นบางมากๆ จะขอเรียกแผ่นบางมากนี้ว่า wafer เพราะความ บางของ wafer นี้เราพูดได้ว่าเป็นรูปทรง 2 มิติ (ไม่มีมิติความสูง) และสามารถเก็บสัณระบรูปร่างของ wafer นี้ได้ ดังนั้นสามารถนำ wafer ที่ได้กลับมาสร้างภาพในเชิง 3 มิติ โดยการนำ wafer ที่ ถูกหั่นมาวางซ้อนทับกันตามลำดับชั้นที่ได้จากการสแกนเราก็จะได้รูปวัตถุเชิง 3 มิติ

เนื่องจาก wafer นั้นไม่มีมีความหนา ในความจริงเรานั้นไม่สามารถสร้าง wafer ที่ไม่มี ความหนาได้เลย เราสามารถสร้างได้เพียง wafer ที่มีความหนา น้อยมากๆ เท่านั้น ซึ่งอาจจะมีความ สูง 1 mm , 2mm หรือมากกว่านี้ก็ได้ แต่ถ้า wafer ยังมีมีความหนามาก ข้อมูลที่ได้ก็จะเป็นข้อมูล ที่ได้ไม่ต่อเนื่อง แต่จะสามารถสร้าง wafer ที่บางมากขึ้น ข้อมูลที่ได้ก็จะต่อเนื่องกันมากขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดง wafer แต่ละชั้นของพีระมิด

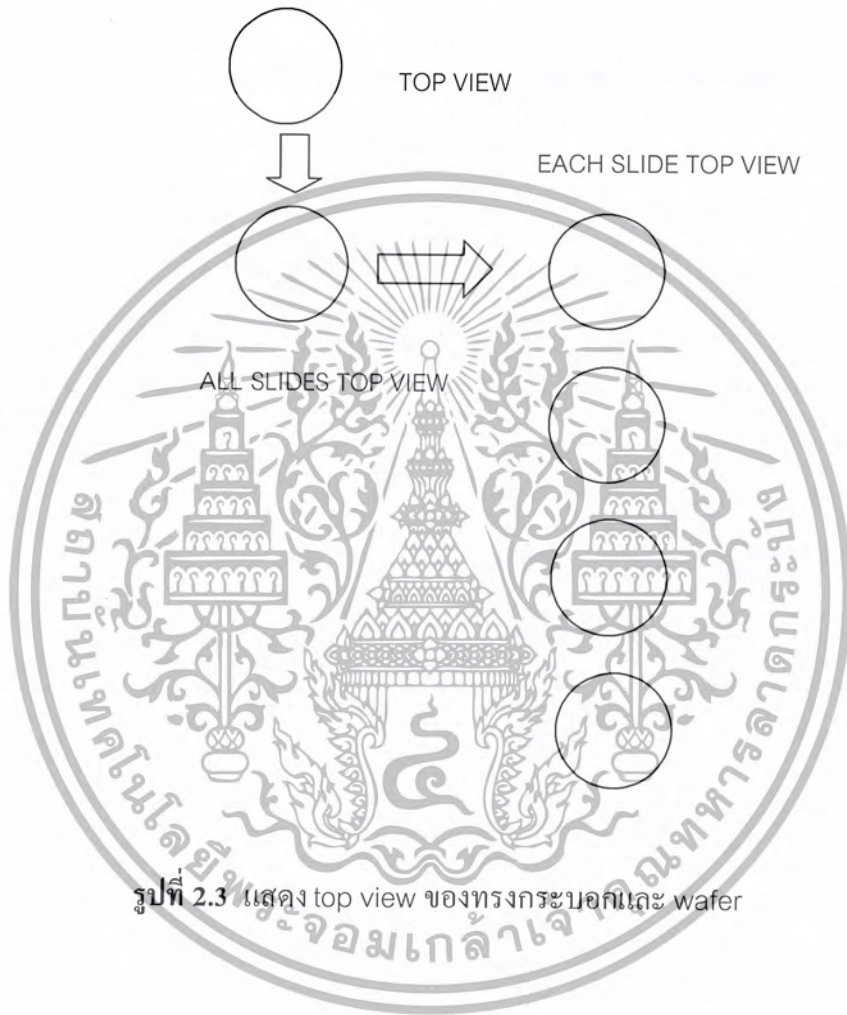


รูปที่ 2.2 แสดง wafer แต่ละชั้นของทรงกระบอก

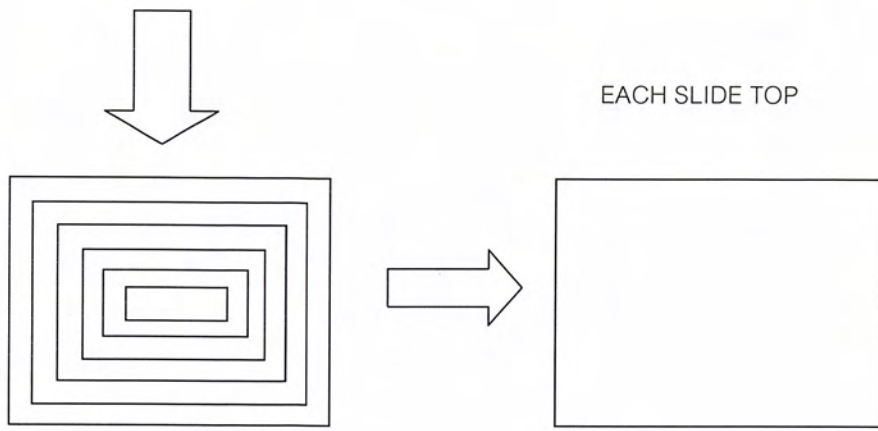
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.1 เป็นรูปทรงพีรามิด ถ้าเราสามารถหั่นพีรามิดออกมาเป็น wafer ได้ เราจะได้ wafer รูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆจากล่างขึ้นบน

รูป 2.2 เป็นรูปทรงกระบอก ถ้าเราสามารถหั่นทรงกระบอกออกมาเป็น wafer ได้เราจะพบว่าได้ wafer ลักษณะวงกลมทุกชิ้น



รูปที่ 2.3 แสดง top view ของทรงกระบอกและ wafer



ALL SLIDES TOP

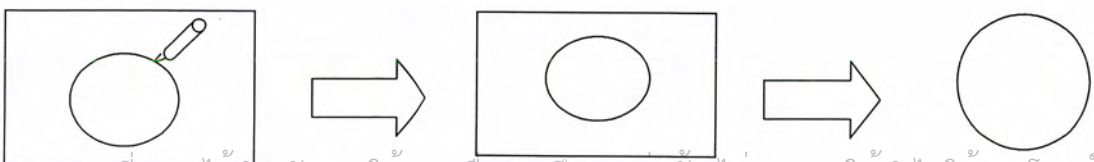


รูปที่ 2.4 แสดง top view ของปิรามิดและ wafer

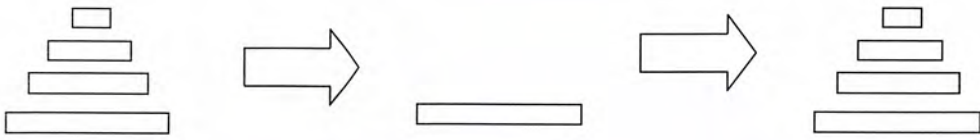
ในการสร้างวัตถุกลับมาเป็นรูปทรง 3 มิติ นั้น เราทำโดยการนำ wafer มาวางทับกันเรื่อยๆ ก็จะได้ภาพจริงขึ้นมา

2.2 การเก็บข้อมูลของวัตถุเชิง 3 มิติ

จากแนวคิดที่เราเห็นวัตถุออกมาเป็น wafer แล้วเก็บเส้นรอบวงของ wafer นั้นๆ ระบุด้วยว่าเป็น wafer ลำดับที่เท่าไรเราก็จะได้วัตถุเชิง 3 มิติ การเก็บ wafer ในความเป็นจริงก็คือการเก็บเส้นรอบวงของ wafer ทำได้โดยการวางวัตถุลงบนกระดาษแล้ววาดเส้นรอบวงของ wafer ลงบนกระดาษ แล้วตัดกระดาษ เป็นเสมือนการสร้าง wafer ขึ้นมาใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การสร้าง wafer จากวัตถุ และนำ wafer กลับมาสร้างเป็นวัตถุ

2.3 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพ 3 มิติเบื้องต้น

2.3.1 ลำดับของ wafer

ลำดับของ wafer เก็บได้ง่ายโดยนับว่า wafer แรกที่นำมาหาหาเส้นรอบรูปเรียกเป็น wafer ที่ 1 และ wafer ต่อไปเรียกเป็น wafer ที่ 2

2.3.2 เส้นขอบของ wafer

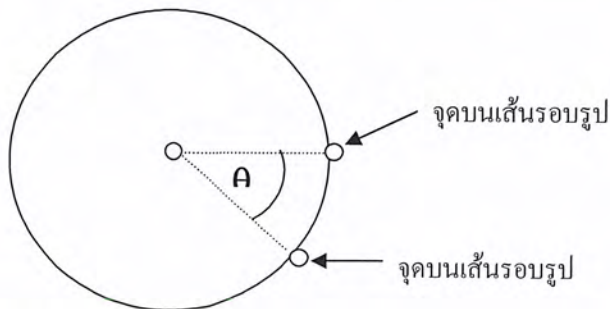
เส้นขอบของ wafer ทำได้โดยหาจุดรอบรูป แล้วทำการเชื่อมต่อจุด ดังนั้นจะสร้างจุดอ้างอิงมา 1 จุดบน wafer (จะอยู่ตรงไหนก็ได้) สมมติว่าอยู่ที่จุดศูนย์กลางของ wafer รูปวงกลม



รูปที่ 2.6 แสดงจุดอ้างอิงของจานหมุนและจุดบนเส้นรอบรูปของวัตถุ

จุดอีกจุดหนึ่งคือจุดบนเส้นรอบรูป ห่างระยะทางระหว่างจุด 2 จุดนี้

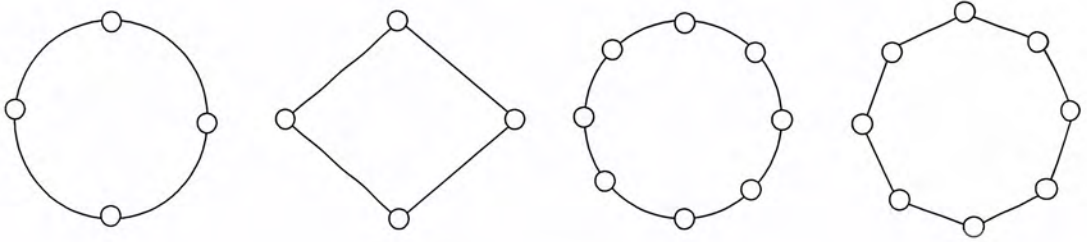
จุดต่อไปหาโดยเปลี่ยนจุดบนเส้นรอบรูปโดยต้องบอกว่ามุมเปลี่ยนไปจากจุดแรกเท่าไร



รูปที่ 2.7 แสดงจุด 2 จุดบนเส้นรอบรูปของวัตถุทำมุมระหว่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำไปจนตลอด จำนวนจุดในแต่ละ wafer ขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการการให้ละเอียดมากเท่าไร ถ้าเราต้องการให้ละเอียดมากก็สร้างจุดบนเส้นรอบรูปให้มากขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงความแตกต่างระหว่างเส้นรอบรูปที่ได้จากการใช้จุด 4 จุด และ 8 จุดต่อชั้น

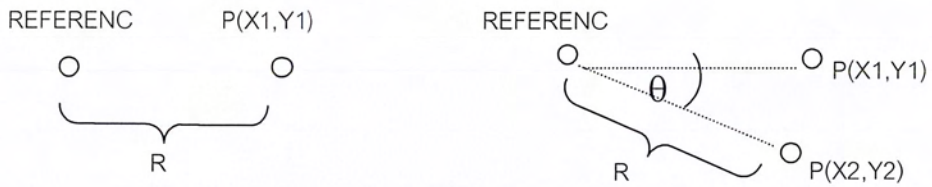
2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพ 3 มิติ

จากการเก็บวิธีนี้พบว่า ข้อมูลที่เราต้องการจะเก็บเพิ่มเป็น 3 พารามิเตอร์ คือ

- 1) ค่าคัมของ wafer
- 2) ระยะทางจากจุดอ้างอิง
- 3) มุมที่หมุนไปในการเก็บจุดบนเส้นรอบรูปเทียบกับจุดบนเส้นรอบรูปจุดแรก

2.4.1 การเรียงพารามิเตอร์ทั้ง 3 กลับไปเป็นรูปทรง 3 มิติ

- 1) ต้องวาดจุดบนเส้นรอบวงจุดแรกของ wafer (จุดแรกนี้ให้เป็นจุดที่มีมุมที่หมุนไป เท่ากับ 0 องศา)
- 2) เลื่อนมุมไป ให้ต่างจากจุดแรกเป็นมุมตามพารามิเตอร์ที่เราเก็บไว้ และสร้างจุดที่ 2 ให้ห่างจากจุดอ้างอิงเป็นระยะจากจุดที่ 2
- 3) วาดจุดต่อไป โดยใช้วิธีตามข้อ 2
- 4) ลากจุดที่มีมุมต่อกันไปเรื่อยๆ จนกลายเป็น wafer



รูปที่ 2.9 แสดงการนำจุดที่ได้มาเรียงกัน โดยแต่ละจุดทำมุมกัน 360 / จำนวนจุดต่อชั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการของการวัดพิกัด 3 มิติ

โดยอาศัยหลักการฉายแสงบนเส้น ลงบนพื้นผิววัตถุ เกิดการสะท้อนกลับ เกิดเป็นภาพบน กล้อง wepcap หลังจากนั้นก็นำภาพมาประมวลผล และคิดคำนวณพิกัดต่อไป ซึ่งในที่นี้จะ อธิบายถึงคุณภาพของแสงสะท้อน อันเป็นปัจจัยที่สำคัญ

3.1 คุณภาพของภาพสะท้อน

คุณภาพของภาพสะท้อนจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ลักษณะพื้นผิวของวัตถุที่ทำการวัด แสงอื่น ๆ ที่ไม่ได้สะท้อนมาจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลัก เป็นต้น เราสามารถจะลดแสง ที่มาจากแหล่งอื่นออก โดยทำการ ให้สภาวะนั้นอยู่ในความมืด หรือ ให้มีแสงน้อยที่สุด แต่ตัวแปรที่ สำคัญที่สุดก็คือ ลักษณะของพื้นผิวของวัตถุ เราจึงจำเป็นต้องศึกษาการสะท้อนของแสงจากพื้นผิว ของวัตถุในชนิดต่าง



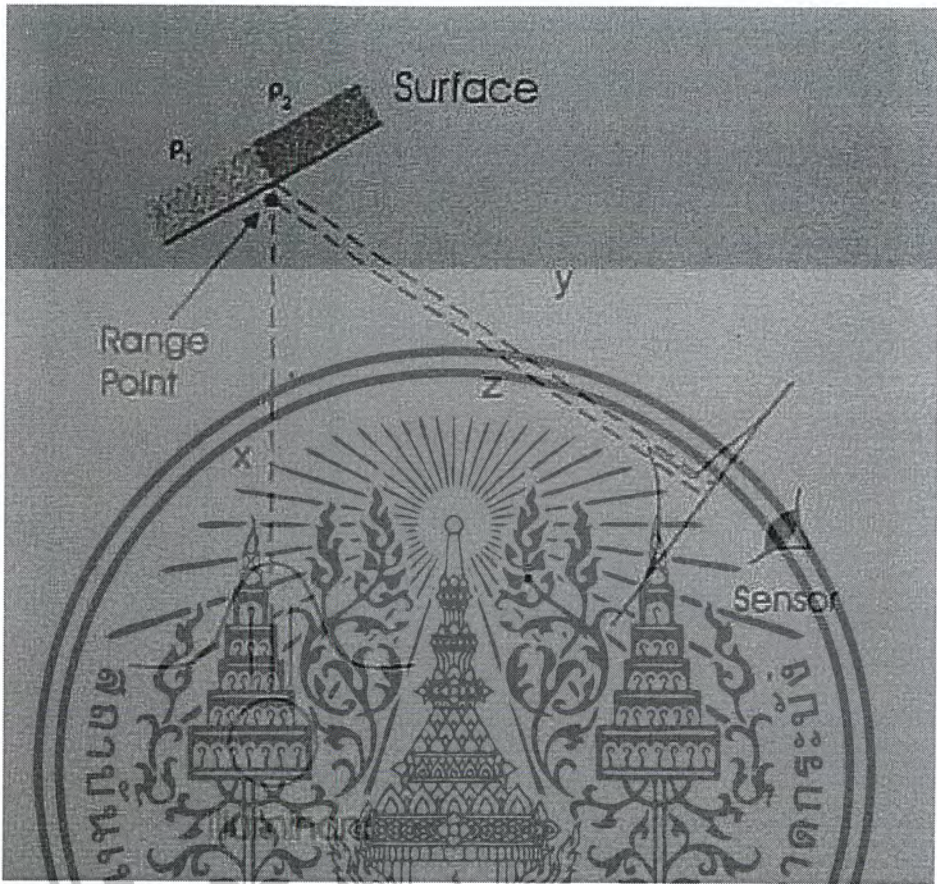
รูปที่ 3.1 การสะท้อนที่สมบูรณ์

แต่หากคุณภาพของการสะท้อนไม่เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากลักษณะของพื้นผิว

กล่าวคือพื้นผิวมีลักษณะดังนี้

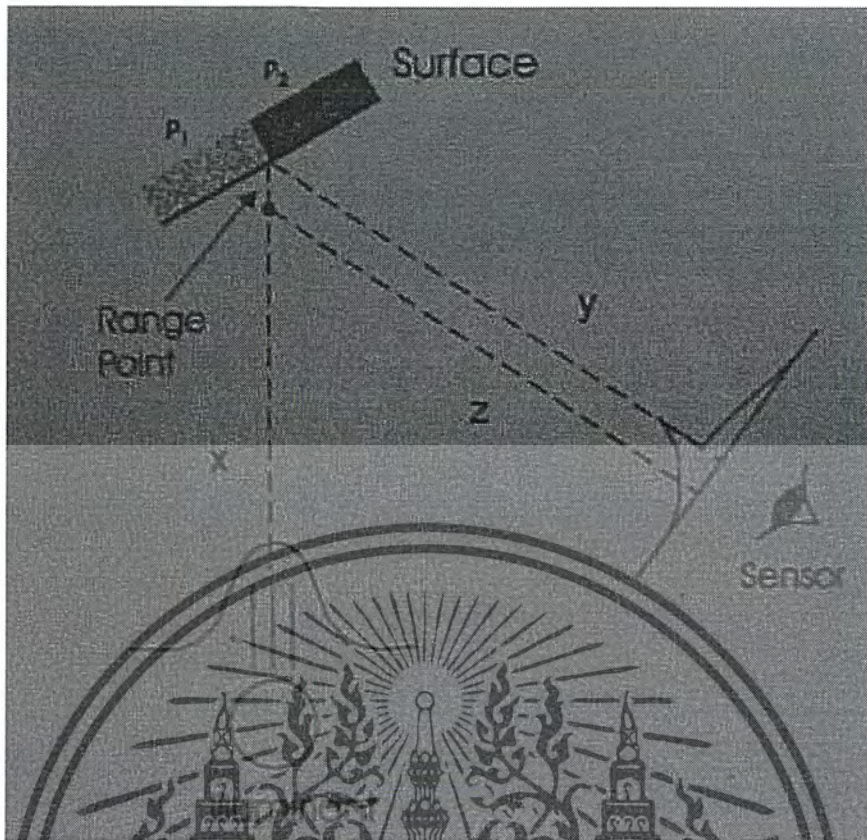
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 พื้นผิวมีการสะท้อน ในส่วนต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ดังรูป3.2 ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นค่าความผิดพลาดก็จะยิ่งมากขึ้นเมื่อค่าการตกสะท้อนของแสงมีค่าความแตกต่างกันมากขึ้น



รูปที่ 3.2 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวมีคุณสมบัติการสะท้อนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวมีคุณสมบัติการสะท้อนต่างกัน

โดยที่ เส้น x คือ เส้นที่ลากจากตำแหน่งที่ความเข้มแสงสูงสุดจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังพื้นผิว

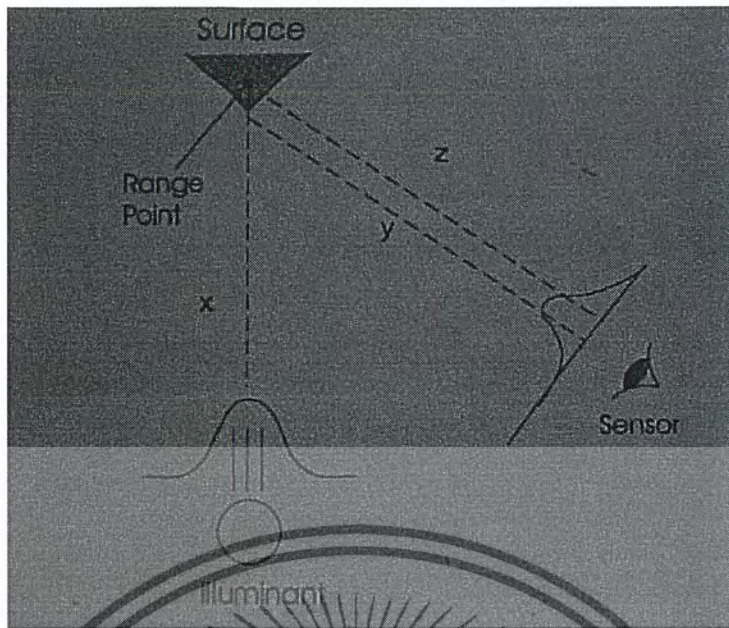
เส้น y คือ เส้นที่ลากจากตำแหน่งที่ความเข้มแสงสูงสุดบน เซ็นเซอร์ (laser) ไปยังจุดที่แสงตกกระทบกับพื้นผิววัตถุ

เส้น z คือ เส้นที่ลากจากค่ามัธยฐานของการกระจายของแสงบนเซ็นเซอร์ (laser) โดยลากขนานกับเส้น y จนไปตัดกับเส้น x

Range point คือจุดตัดของเส้น x กับเส้น z หมายถึงตำแหน่งที่ เลเซอร์ (laser) มองเห็นว่าเป็นตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุ

3.1.2 พื้นผิวมีรูปร่างที่ต่างไปจากระนาบมาก ดังรูป 3.4 แสดงตัวอย่างของผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



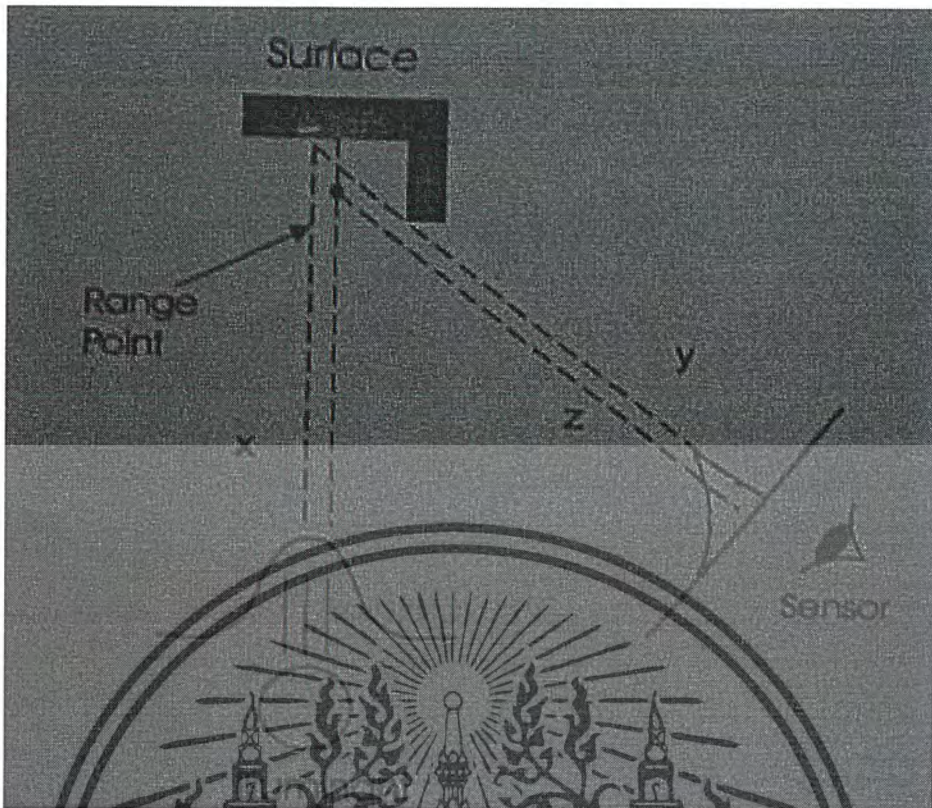
รูปที่ 3.4 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวมีรูปร่างที่ต่างจากระนาบมา



รูปที่ 3.5 การสะท้อนเมื่อพื้นผิวถูกบัง

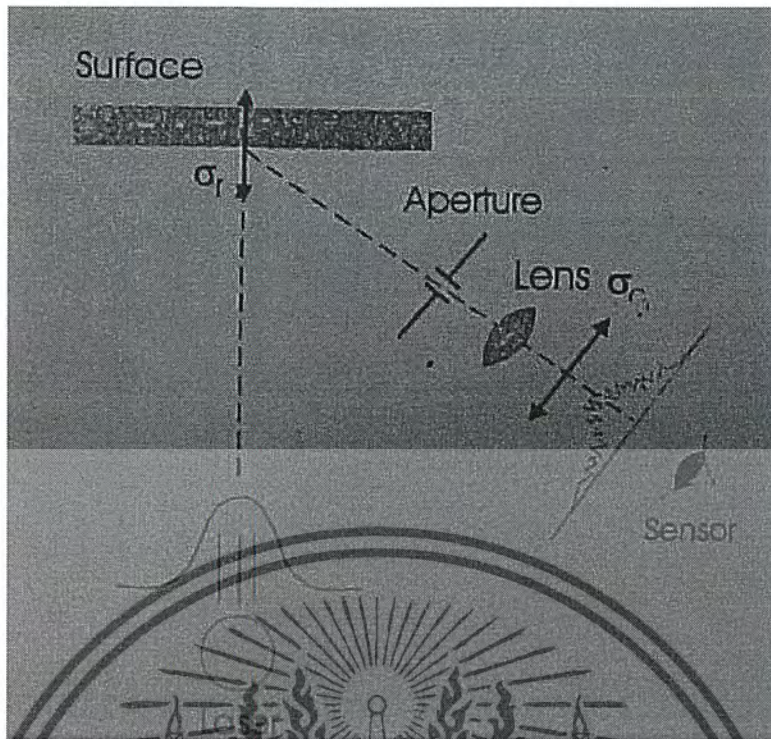
3.1.3 แสงที่สะท้อนกลับมา ถูกบังไปบางส่วน ดังรูป3.6 แสดงผลเนื่องจากแสงบางส่วนถูกบดบังไปโดยสิ่งกีดขวางระหว่างพื้นผิวกับตัวรับ เลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสงที่สะท้อนกลับมากลับค้ำงไปบางส่วน

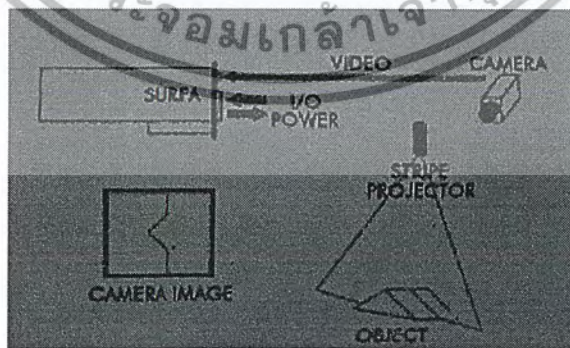
พื้นผิวที่มีความขรุขระมากจนเกิดการสะท้อนไม่เป็นระเบียบ ดังรูป แสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวของวัตถุที่มีความขรุขระมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นผลที่ได้ก็คือ รูปแบบการสะท้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งรูปคือเมื่อมีค้ำ ซึ่งทำให้เกิดความไม่แน่นอนในแนวความถี่การที่แสงเกิดความเปลี่ยนแปลงตลอดเวลานั้นก็เนื่องมาจาก การรบกวนกันเองของแสงสะท้อนจากพื้นผิวที่ขรุขระ



รูปที่ 3.7 แสงที่สะท้อนกลับมา

3.2 การทำงานของเครื่อง 3D SCANNER

อุปกรณ์กำเนิดแถบแสงเลเซอร์ฉายแถบแสงลงบนผิวของวัตถุ เมื่อแสงเลเซอร์ตัดกับผิวของวัตถุก็จะเกิดเป็นเส้นแล้วแสงนั้นก็ถูกบันทึกภาพโดยกล้อง webcam แล้วทำการฉายเลเซอร์ไปเรื่อยๆ จนครบ 360° (360 องศาทางคณิตศาสตร์) และพร้อมบันทึกภาพไปด้วย แล้วนำภาพที่ได้ไปประมวลผลตามโปรแกรมที่ใช้



รูปที่ 3.8 การทำงานของเครื่อง 3D SCANNER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างอุปกรณ์ควบคุมและระบบควบคุม

ในบทนี้เริ่มจากการกล่าวถึงมอเตอร์แบบ Brushless DC motor ซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนแกนหลักทั้ง 3 แกน จากนั้นจะกล่าวถึงอุปกรณ์ควบคุม 6250 และ BLX30 และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมของแกนที่ 4

4.1 Brushless DC servomotor

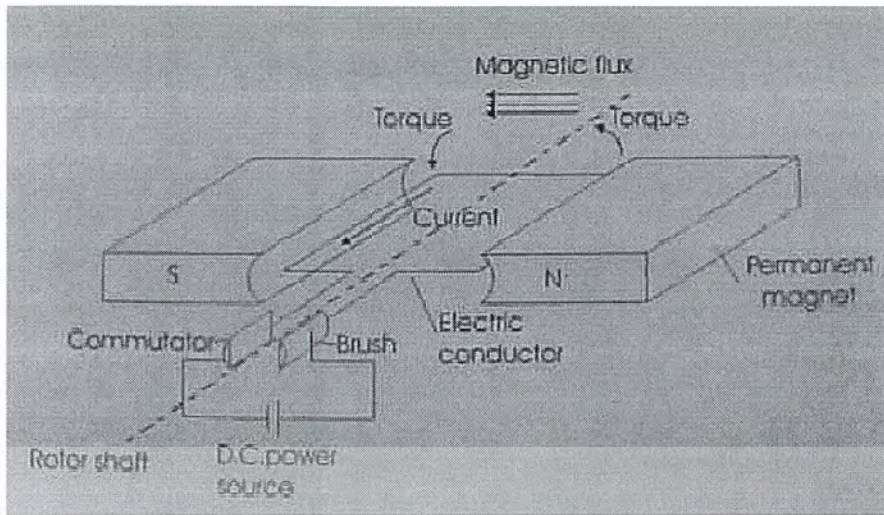
เซอร์โวมอเตอร์มีการใช้งานกันในระบบอัตโนมัติอย่างกว้างขวางเพราะสามารถให้ความถูกต้องของตำแหน่งสูง สามารถปรับความเร็วได้ถูกต้อง และควบคุมแรงได้ดี เซอร์โวมอเตอร์แบ่งออกเป็น DC servomotor และ AC servomotor เซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless จัดอยู่ในประเภท AC servomotor แต่ที่เรียกว่า DC เพราะคุณลักษณะ (characteristic) ของมันคล้ายกับของ DC motor และสามารถถูกมองเป็น DC motor ที่มีขดลวดสนาม (field winding) พันอยู่บนแกนหมุนมีขดลวด armature อยู่รอบๆ และถูกสวิตช์ให้เหนี่ยวนำแกนหมุนด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวก ทราานซิสเตอร์, ไทริสเตอร์ เป็นต้น

เพื่อให้เข้าใจการทำงานของมอเตอร์ซึ่งจะเกี่ยวพันกับการทำงานของตัวขับเคลื่อนนั้นจึงขอกล่าวถึงหลักการการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless โดยจะเปรียบเทียบกับหลักการของมอเตอร์กระแสตรงและกระแสสลับดังนี้

4.1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่าน (Brush) และตัวเหนี่ยวนำ (Commutator) ไปยังขดลวดซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กที่สร้างจากแม่เหล็กถาวร ขั้ว N และ S ก็จะก่อให้เกิดทอร์กในทิศทางของกฎมือซ้ายดังรูป ทอร์กที่เกิดจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนน้อยที่สุดเมื่อแกนหมุนหมุนไป 90° แต่เนื่องจากแรงเฉื่อยของแกนหมุนจะทำให้แกนหมุนยังหมุนต่อไปได้อีกเล็กน้อย แต่เมื่อหมุนผ่านตำแหน่ง 90° ไปแล้วก็จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดทอร์กเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อีกครั้ง

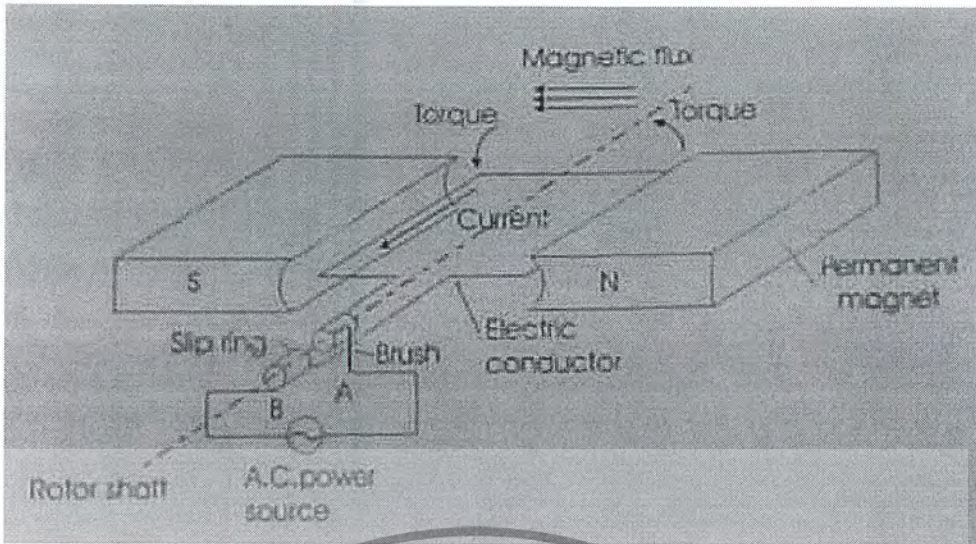
มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้งานจริงๆ จะมีตัวเหนี่ยวนำ (Commutator) หลายตัว ซึ่งทำให้ทอร์กที่ได้มีค่าคงที่กระแสคงที่ค่าหนึ่ง หรือทอร์กที่ได้มีค่าแปรผันกับกระแสนั้นเอง



รูปที่ 4.1 หลักการของ DC motor

4.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสสลับ

รูปที่ 4.2 แสดงรูปมอเตอร์กระแสสลับและหลักการทำงาน จากรูปตัวเหนี่ยวนำ (Commutator) ถูกแทนด้วย Slip ring เมื่อมอเตอร์เริ่มทำงาน ที่แปรงถ่าน A มีศักย์ไฟฟ้าเป็น + ที่แปรงถ่าน B มีศักย์ไฟฟ้าเป็น - ทำให้เกิดทอร์คกระทำกับขดลวดเช่นเดียวกับในกรณีมอเตอร์กระแสตรง แต่แกนหมุนจะหยุดหมุนในตำแหน่งต่อไป การจะทำให้แกนหมุนเคลื่อนที่ต่อทำได้ โดยการเปลี่ยนขั้วของแหล่งกำเนิด ซึ่งแหล่งกำเนิดแบบกระแสสลับจะทำให้แกนหมุนของมอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วที่แปรผันกับความถี่ที่แหล่งกำเนิดป้อนให้ ในกรณีของมอเตอร์แบบ Brushless จะกำหนดให้การกลับขั้วของแหล่งกำเนิดเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของแกนหมุน รูปที่ 4.3 และ 4.2 ใช้หลักการและโครงสร้างเดียวกันเพียงแต่รูปแรกประกอบด้วยอุปกรณ์แปรงถ่าน (Brush) และ Slip ring ส่วนในแบบที่ 2 ไม่มีอุปกรณ์ทั้ง 2 ในแบบแรกเราจะเรียกว่าแบบอาร์เมเจอร์หมุน (Revolving armature type) ส่วนแบบที่ 2 เรียกแบบขดลวดสนามหมุน (Revolving-field type) ส่วนใหญ่แล้ว มอเตอร์แบบ Brushless จะเป็นแบบขดลวดสนามหมุน



รูปที่ 4.2 หลักการของ AC motor-1



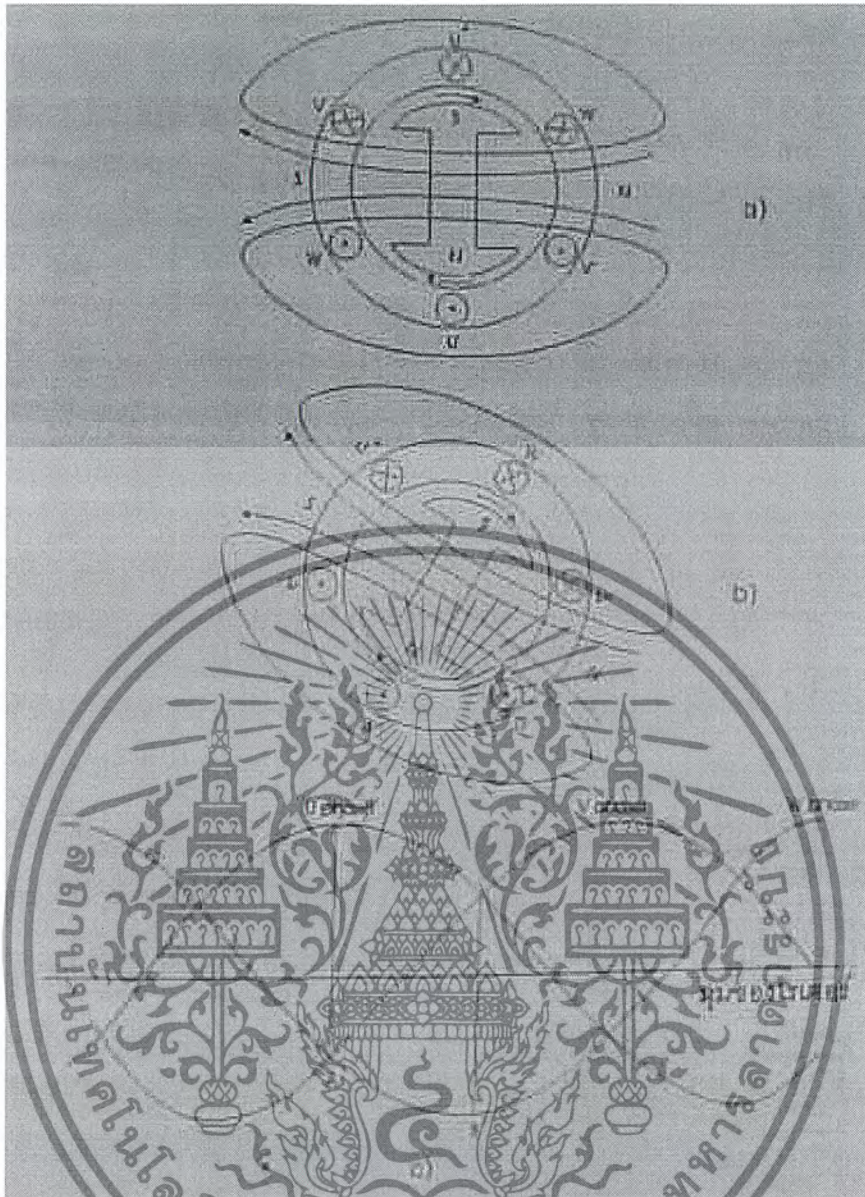
รูปที่ 4.3 หลักการของ AC motor-2

4.1.3 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless

จากที่ได้ทราบแล้วว่าเซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless เป็นมอเตอร์แบบ AC ต่อไปจะกล่าวถึงการทำงานของมอเตอร์ดังกล่าว เซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless จะไม่มีอุปกรณ์จำพวกแปรงถ่าน (Brush) แต่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ควบคุมการไหลของกระแสให้เฟสและขนาดตรงกับตำแหน่งของเพลอาหมุน คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความราบเรียบของทอร์คที่ถูกเหนี่ยวนำในกรณีของ D.C. motor หากเราเพิ่มจำนวนของตัวเหนี่ยวนำ (Commutator) จะทำให้ทอร์คที่ได้ราบเรียบขึ้น ส่วนกรณีของเซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless ทอร์คที่ได้จะราบเรียบขึ้นเมื่อแบ่ง

ขดลวดเหนี่ยวนำเป็น 3 เฟส และแปลงกระแสของแต่ละเฟสให้เป็นรูปคลื่นไซน์ ดังในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสในมอเตอร์แบบ Brushless

รูปที่ 4.4 a) และ 4.4 b) เป็นภาพหน้าตัวของมอเตอร์แบบ 3 เฟสซิงโครนัส มี U^+ , U^- , V^+ , V^- , W^+ และ W^- แสดงจุดเริ่ม (จุด) และปลาย (กากบาท) ของขดลวด ส่วนรูปที่ 4.4 c) เป็นรูปกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดทั้ง 3 เฟสภายในมอเตอร์ แกนนอนเป็นตำแหน่งของแกนหมุนของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ได้รับกระแสไฟ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.4 c) ที่จุด A มีเพียงเฟส U เท่านั้นที่เป็น + ในขณะที่เฟส V และ W เป็น - ทั้งคู่ เมื่อใช้กฎมือขวาในการหาทิศทางของกระแสในขดลวดจะเป็นดังรูป 4.4 a) และเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำมีทิศทางจาก N ไป S ตามหัวลูกศร เมื่อสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแกนหมุนตัดกับฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการเหนี่ยวนำเป็นมุมฉาก จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

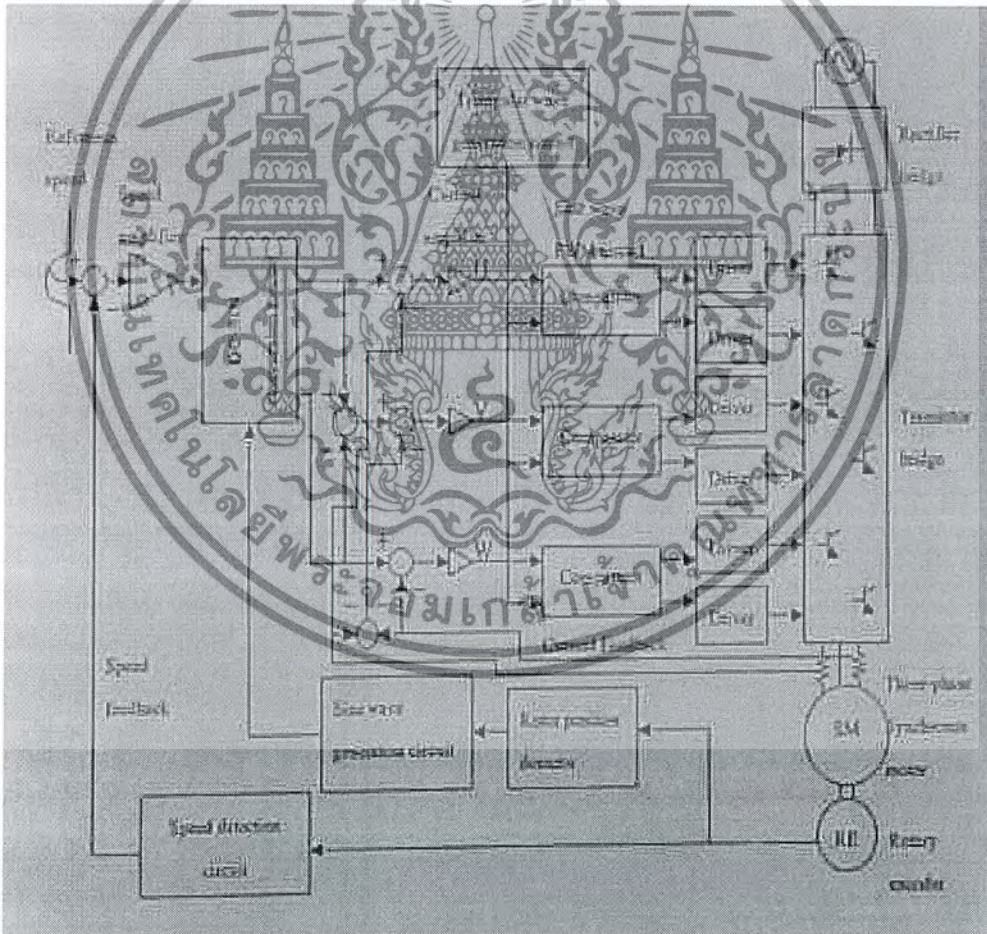
ก่อให้เกิดแรงในการหมุนแกนของมอเตอร์ขึ้น ที่ตำแหน่ง B ฟลักซ์แม่เหล็กจะทำมุม 60° กับตำแหน่ง A

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าถ้าเราป้อนกระแส 3 เฟสให้ไหลผ่านขดลวดทั้ง 3 จะทำให้ได้สนามแม่เหล็กที่หมุนอย่างต่อเนื่อง ถ้าเฟสของคลื่นไซน์และตำแหน่งของการหมุนทำมุมกันอย่างถูกต้องตลอด จะทำให้ได้ทอร์คที่ราบเรียบมากขึ้นและมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นหลักการทํางานและโครงสร้างของมอเตอร์แบบ Brushless ต่อไปจะกล่าวถึงวงจรที่ทำหน้าที่สร้างกระแสที่มีเฟสตรงกับตำแหน่งของแกนหมุนตามต้องการ

4.1.4 วงจรขับเซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless

ในรูปที่ 4.5 เป็นรูปของระบบสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบ Brushless โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสตลอดเวลาที่มอเตอร์หมุน

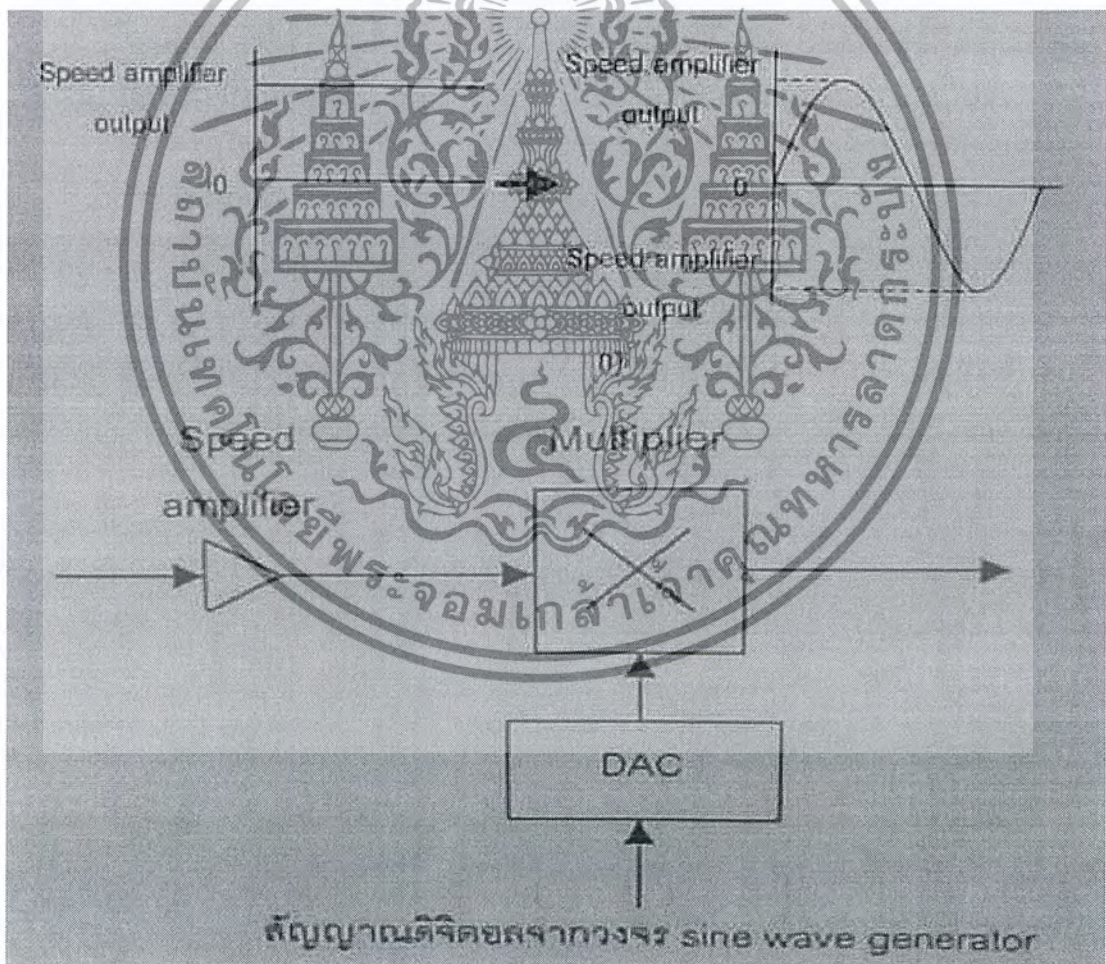


รูปที่ 4.5 แสดงภาพการทำงานของวงจรควบคุมแบบ Brushless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.1 Rotor position detector เป็นวงจรที่รับสัญญาณจากตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์มอเตอร์ ได้แก่ เอนโคเดอร์ (Rotary encoder) แล้วแปลงสัญญาณดังกล่าวให้อยู่ในรูปที่วงจรสร้างคลื่นไซน์ (Sine wave generation circuit) สามารถรับได้

4.1.4.2 Sine wave generation circuit เนื่องจากเป้าหมายของวงจรขับเคลื่อน Brushless servo motor ต้องการที่จะสร้างสัญญาณ sine ดังแสดงในรูป 4.4 c) เพื่อที่จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำตั้งฉากกับแกนแม่เหล็กซึ่งเป็นแกนหมุน ดังในรูปที่ 4.4 a) และ 4.4 b) ดังนั้น ณ ตำแหน่งของแกนหมุนใดๆ ที่เราทราบเราก็จะสามารถกำหนดสัญญาณที่ต้องป้อนให้กับขดลวด 3 เฟสภายในตัวมอเตอร์ได้ เพื่อที่จะได้เกิดสถานะที่เราต้องการโดยใช้กราฟของคลื่นรูป sine ในรูป 4.4 c) เป็นตัวกำหนด เอาท์พุทของวงจรส่วนนี้จะเป็นสัญญาณดิจิทัลลบออกขนาดของ sine wave ที่สอดคล้องกับตำแหน่งของแกนหมุน โดยมีอินพุทคือตำแหน่งของแกนหมุนจากวงจรก่อนหน้านี้



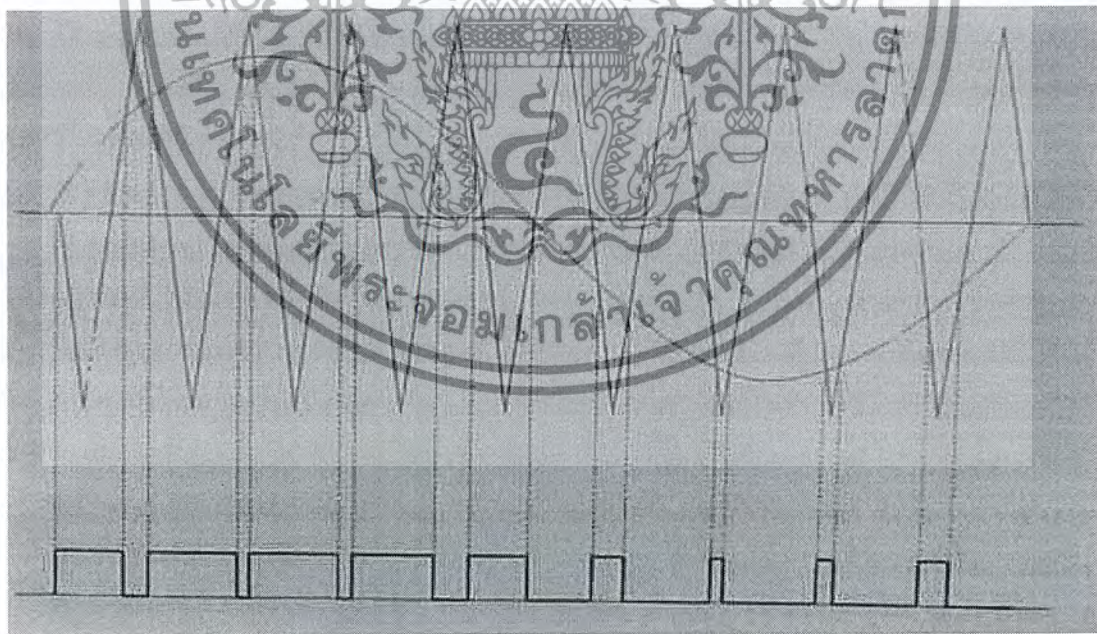
รูปที่ 4.6 ก) วัตถุประสงค์ของวงจร DC-SIN conversion circuit

ข) วงจร DC-SIN conversion circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.3 DC-SIN conversion circuit จากรูปที่ 4.5 ความแตกต่างระหว่างสัญญาณ Reference speed กับ Speed feedback จะถูกขยายด้วย Speed amplifier หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณที่ได้ไปยังวงจร DC-SIN conversion เพื่อที่จะทำการสร้างคลื่นรูป sine ดังแสดงในรูป 4.6 ก) โดยใช้ วงจรในรูป 4.6 ข) ซึ่งจะใช้ตัว Multiplier เป็นแปลงสัญญาณ ซึ่งตัว Multiplier นี้จะใช้หลักการคูณ สัญญาณซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

4.1.4.4 Sine wave PM circuit เมื่อเราได้กระแสคลื่นรูปไซน์ หากเราขยายขนาด ของกระแสแล้วป้อนเข้ามอเตอร์โดยตรงจะเกิดปัญหาเมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์สูงขึ้นเนื่องจากใน วงจรขยายสัญญาณอื่นๆ จะใช้ทรานซิสเตอร์ซึ่งทำงานในช่วง Linear เป็นตัวทำงานเมื่อมีกระแส ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์นานๆ เข้าความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำ ทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป จุดทำงานของทรานซิสเตอร์ก็จะเปลี่ยนไปทำให้การ ทำงานของวงจรผิดไปจากที่กำหนดไว้ วิธีแก้ไขวิธีการหนึ่งคือการแปลงสัญญาณรูปไซน์เป็นพัลส์ หลายๆ ลูกที่มีความกว้างแปรผันกับขนาดของคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 4.7 คลื่นรูปฟันเลื่อยเป็นคลื่นที่ สร้างขึ้น มีความถี่เดียว หรือใกล้เคียงกับความถี่ในการสวิทช์ของทรานซิสเตอร์ ผลของความถี่ ดังกล่าวที่มีต่อระบบคือหากความถี่ดังกล่าวมีค่าต่ำจะทำให้การตอบสนองของระบบช้า หากมีค่าสูง จะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟมาก วิธีการนี้จะใช้ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วง ON-OFF (เปิด-ปิด) ซึ่งจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของจุดทำงานของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณจากวงจร Sine wave PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์ควบคุม 2 แกน 6250

เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนระบบที่ให้สัญญาณเอาต์พุตแบบอนาลอกขนาด ± 10 V ตัวควบคุม 6250 ใช้ตัวประมวลผล 2 ตัว ตัวที่หนึ่งเป็นไมโครโปรเซสเซอร์ใช้ประมวลผลโปรแกรมเคลื่อนที่ระดับสูงซึ่งเป็นโปรแกรมการเคลื่อนที่ที่ติดต่อกันกับผู้ใช้และอีกตัวเป็นตัวประมวลผลดิจิทัล (Digital signal processing, DSP) ใช้สำหรับทำงานกับอุปกรณ์ซึ่งจะประมวลผลโปรแกรมที่เป็นภาษาเครื่องซึ่งมนุษย์ไม่เข้าใจ สำหรับการควบคุมที่ซับซ้อนและใช้ความเร็วสูง การใช้ตัวประมวลผล 2 ตัว ช่วยให้ปฏิบัติตามคำสั่งได้เร็วขึ้น โปรแกรม 6250 สามารถทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ทัลสื่อสาร RS232C หรือผ่านทางตัวเชื่อมต่อเฉพาะสำหรับ 6250 แต่ในปริญญานิพนธ์นี้ใช้การเชื่อมต่อโดย RS232C โดยเซตค่าพารามิเตอร์ของพอร์ทเป็นดังนี้คือ

Baud Rate	Data Bits	Parity	Stop Bits	Full Duplex	XON/XOFF
9600	8	None	1	/	Enabled

4.2.1 การควบคุมเซอร์โว

ตัวควบคุม 6250 ใช้วิธีการควบคุมแบบดิจิทัลในการควบคุมตำแหน่งและความเร็ว การควบคุมใช้สมการในการคำนวณสัญญาณควบคุม ในสมการจะประกอบด้วยตัวแปรของคำสั่ง, ตำแหน่งปัจจุบัน, ตำแหน่งในอดีต, และค่าเกนต่างๆ สำหรับวิธีการควบคุมที่ใช้คือวิธี PIV & F พิจารณารูปที่ 3.9 แสดงวิธีการควบคุมดังกล่าว ในรูปส่วนที่เป็นวงควบคุมจะมีบล็อกที่เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคือ Velocity Feedforward (SGVF), Acceleration Feedforward (SGAF), Integral Feedback (SGI), Proportional Feedback (SGP), Velocity Feedback (SGV) ในรูปบล็อก Drive คือตัวขับเคลื่อนที่ได้กล่าวถึงในตอนที่ผ่านมา

4.2.1.1 Proportional Feedback Control (SGP) ใช้ค่าความผิดของตำแหน่งกับคำสั่งในการคำนวณสัญญาณควบคุม ค่าเกนที่ใช้คือ SGP หน้าที่ของการควบคุมแบบนี้หนึ่งคือการกำจัดสัญญาณรบกวน เพราะเมื่อมีสิ่งรบกวนระบบทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งขึ้นระบบก็จะทำการปรับตัวเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิด แต่ค่าเกนที่ใช้หากปรับให้มีค่ามากเกินไป จะทำให้ระบบเกิดการสั่นและไม่เสถียรได้

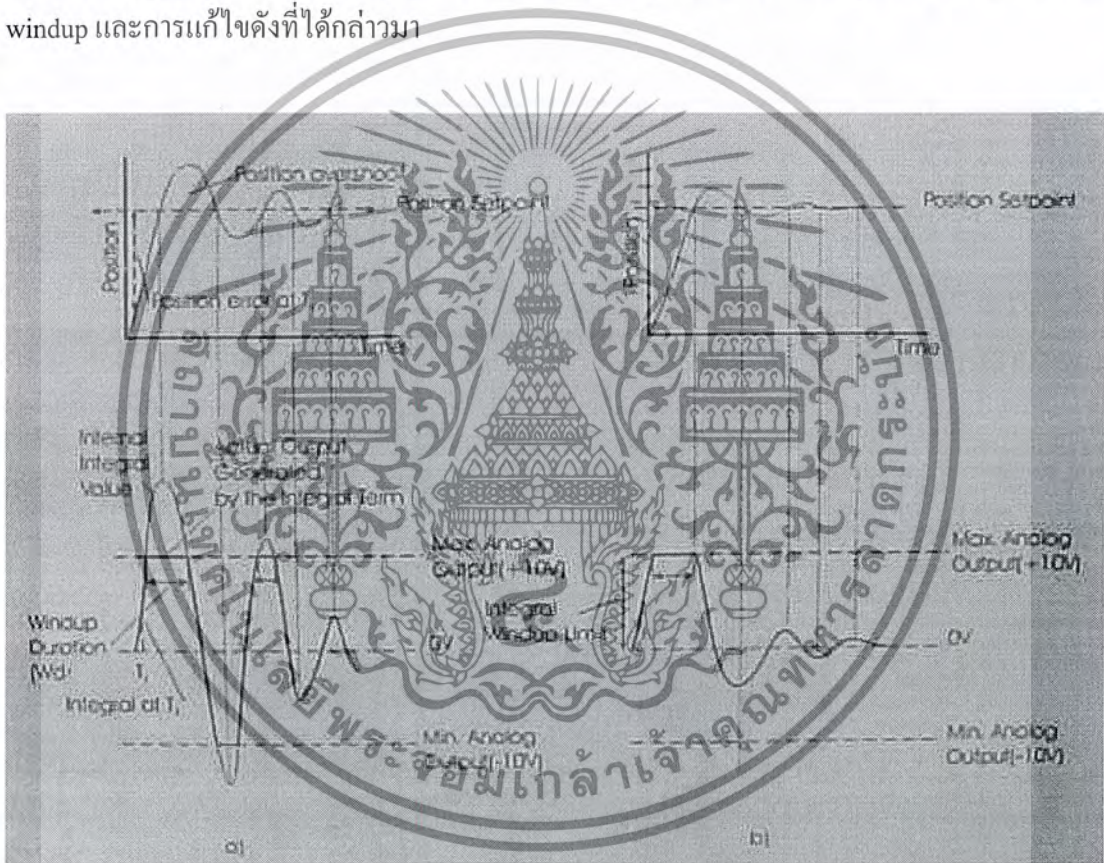
4.2.1.2 Integral Feedback Control (SGI) สัญญาณควบคุมได้จากการอินทิเกรตค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอัตราเร็วของการอินทิเกรตกำหนดได้จากค่า SGI หน้าที่หลักของการควบคุมแบบอินทิกรัลคือการเอาชนะความเสียดทานหรือแรงโน้มถ่วงเพื่อลดความผิดพลาดที่สถานะคงที่ (Steady State Error) ให้น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย การทำงานของการควบคุมแบบนี้จะ

ต่างจากแบบ proportional คือเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นระบบจะเพิ่มสัญญาณควบคุมตามการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะสมของความผิดพลาดเมื่อค่าสัญญาณควบคุมมีค่ามากพอที่จะขับเคลื่อนระบบให้ลดค่าความผิดพลาดดังกล่าว หลักการดังกล่าวสามารถใช้ได้กับการติดตามเส้นทาง (tracking) ด้วยอัตราเร็วคงที่ได้

แต่การควบคุมแบบอินทิกรัลนี้มีข้อควรระวังคือ เมื่อความผิดพลาดสะสมจนเกินความสามารถที่อุปกรณ์ควบคุมสามารถให้ได้ สัญญาณควบคุมก็จะมีค่าอิมตัวที่ระดับใดระดับหนึ่ง ซึ่งเราเรียกว่า Integrator windup เมื่อเกิด Integrator windup จะต้องใช้เวลาช่วงขณะกว่าที่ค่าสัญญาณควบคุมจะลดลงมาอยู่ในช่วงที่ตัวควบคุมสามารถทำได้ แต่ในขณะที่เกิดการอิมตัวนี้จะเกิด Overshoot และมีการสั่นสะเทือนมาก ดังนั้นเมื่อค่าสัญญาณควบคุมถึงขีดจำกัดแล้วจึงควรหยุดการอินทิเกรตพลาด จนกระทั่งค่าสัญญาณควบคุมจะกลับเข้าสู่ช่วงที่ทำงานได้ รูปที่ 3.8 แสดงการเกิด windup และการแก้ไขดังที่ได้กล่าวมา



รูปที่ 4.8 a) แสดง Integral windup b) แสดงผลเมื่อใช้การจำกัดการอินทิเกรต

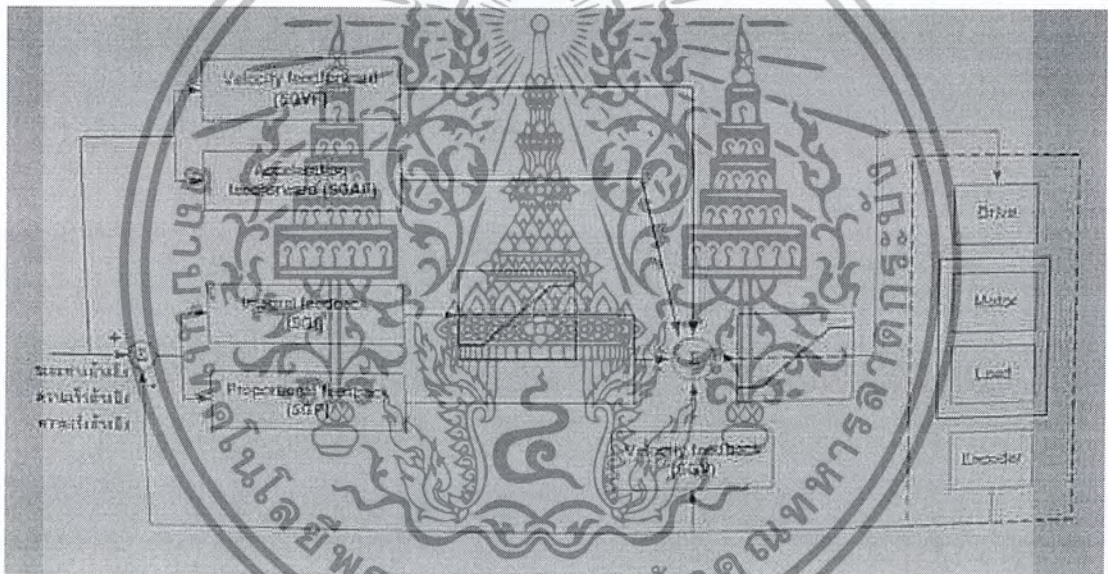
4.2.1.3 Velocity Feedback Control (SGV) สัญญาณควบคุมจะแปรตามอัตรา

การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง ค่าเกจที่ใช้คือ SGV การควบคุมแบบนี้ทำหน้าที่ปรับความผิดพลาดของตำแหน่งก่อนที่จะมีค่ามาก มันจะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (Damping) และเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วย ค่าเกน SGV เมื่อมีค่ามากจะทำให้ความผิดพลาดของการติดตามเส้นทาง (tracking) ด้วยความเร็วคงที่มากไปด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ระบบช้าลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.4 Velocity Feedforward Control (SGVF) วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบ Velocity Feedforward Control คือเพื่อลดความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อระบบเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจาก แรงเสียดทาน, ภาระแรงบิด, และการควบคุม Velocity feedback control สัญญาณควบคุมจะได้จากผลคูณของความเร็วของคำสั่งกับค่าเกน SGVF ในกรณีที่ใช้งานแบบติดตาม (tracking) การควบคุมแบบนี้มีประโยชน์มากแต่ถ้าเป็นการทำงานแบบ Point-to-point ก็ไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบนี้ การควบคุมแบบนี้จะไม่มีผลกระทบกับเสถียรภาพของระบบเลย

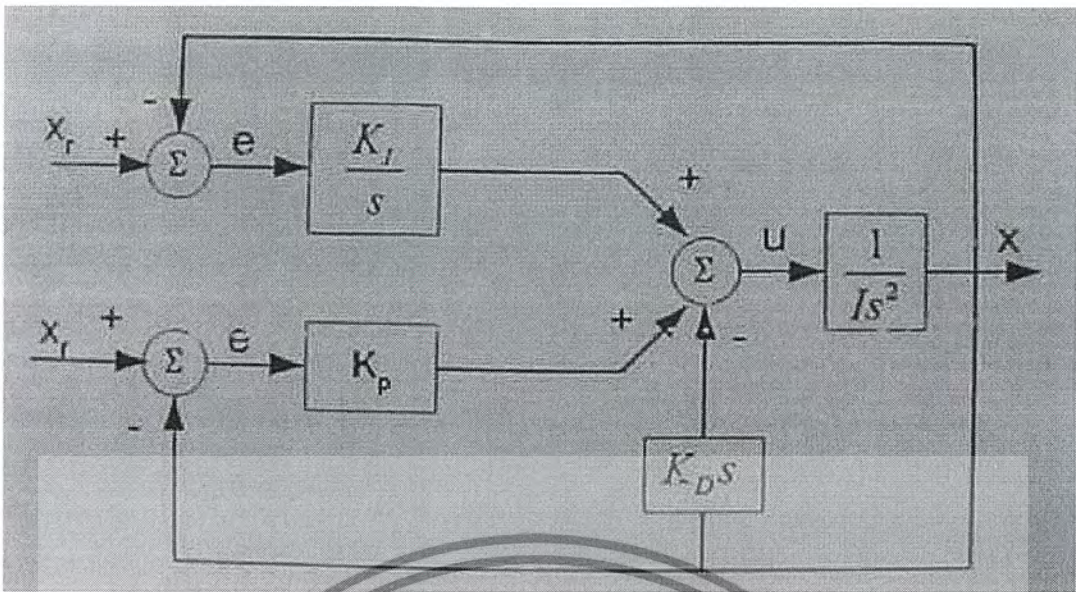
4.2.1.5 Acceleration Feedforward Control (SGAF) การควบคุมแบบนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่ง เมื่อมีการเพิ่มหรือลดความเร็ว แต่เช่นเดียวกับการควบคุมแบบ SGVF ในงานที่เป็นแบบ Point-to-point ไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้การควบคุมแบบนี้



รูปที่ 4.9 แสดงวิธีการควบคุมแบบ PIV & F

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ เราสามารถเขียนรูป Block diagram ในรูปที่ 4.9 ได้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยพิจารณาเฉพาะในส่วนของการควบคุม Feedback และละทิ้งในส่วนของการ Feedforward ซึ่งไม่ได้ใช้ในการเคลื่อนที่แบบ Point-to-Point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดง Block diagram ของระบบควบคุม PIV

จากรูปที่ 4.10 เราสามารถสรุปได้ว่า

$$\frac{X(s)}{X_r(s)} = \frac{K_p s + K_I}{Is^3 + K_D s^2 + K_p s + K_I}$$

จากสมการ Transfer function นี้ ตัวควบคุมจะเป็น PID โดยจัดอยู่ในรูปที่เรียกว่า Pseudo Derivative Feedback (PDF) ค่าเกณฑ์ต่างๆ ที่ปรากฏที่สมการ characteristic นั้นเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการปรับหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม จากการปรับหาค่าเกณฑ์เราพบว่าค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมที่ใช้คือ เกณฑ์ X ค่า $K_p = 300$, $K_D = 7$ ส่วน D_1 เราตั้งไว้ให้เป็นศูนย์เนื่องจากผลกระทบจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานมีค่าไม่มากในแนวทิศทางการเคลื่อนที่ดังกล่าว ส่วนเกณฑ์ Y และเกณฑ์ Z นั้นจะถูกควบคุมโดยตัวควบคุม 6250 โดยใช้เฉพาะค่า Proportion control เท่านั้น ตั้งค่าเกณฑ์ K_p ในตัวควบคุม 6250 ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 ค่าเกณฑ์นี้ยังไม่รวมค่าเกณฑ์เนื่องจากตัวขยายสัญญาณของตัวควบคุม 6250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 คำสั่งของตัวควบคุม 6250

คำสั่งที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ควบคุม 6250 เป็นคำสั่งภาษา 6000 Series ที่ทาง Compumotor ได้พัฒนาขึ้นเป็นภาษาระดับสูง (high-level) ประกอบด้วยรหัสที่เป็น ASCII ตัวอย่างคำสั่งภาษา 6000 Series ได้แก่

คำสั่ง	คำอธิบาย
Dx, x	ใช้กำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่
Vx, x	ใช้กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่
Ax, x	ใช้กำหนดความเร่งในการเคลื่อนที่
Goxx	คำสั่งให้เริ่มการเคลื่อนที่

4.3 อุปกรณ์ควบคุม BLX30

เช่นเดียวกับตัวควบคุม 6250 ตัวควบคุม BLX30 เป็นอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถโปรแกรมโดยคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรม RS232C แต่ต่างจากตัวควบคุม 6250 ตรงที่ใช้ภาษา X-code

4.3.1 การควบคุมเซอร์โว

ใช้วิธีการเดียวกับตัวควบคุม 6250 โดยตัวแปรที่ใช้กับค่าเกนแต่ละตัวคือ

CPG	Proportional Gain
CVG	Velocity Gain
CIG	Integral Gain
CFG	Feedforward Gain
CTG	Filter time constant

ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่เพิ่มเติม ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนก่อนที่จะป้อนให้แก่ตัวขยาย (Amplifier) ค่าของตัวแปรนี้ควรมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

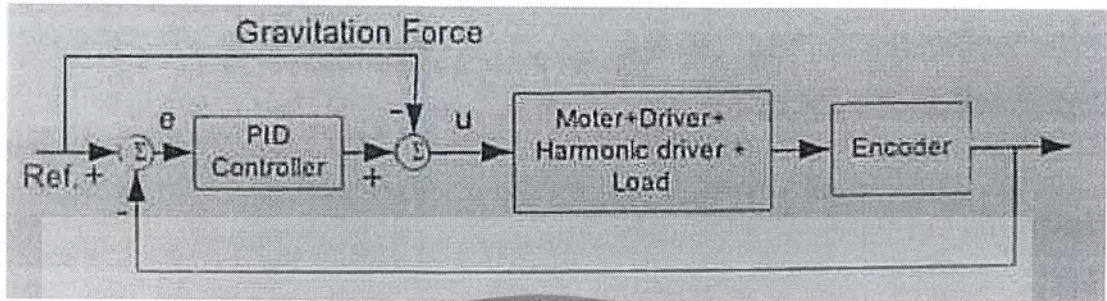
4.3.2 คำสั่งของ BLX30

คำสั่งที่ใช้เป็นคำสั่งภาษา X-code ตัวอย่างของคำสั่งเป็นดังนี้

คำสั่ง	คำอธิบาย
1Ax	ใช้กำหนดความเร่งในการเคลื่อนที่
1Vx	ใช้กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่
1Dx	ใช้กำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่
G	ใช้กำหนดการเริ่มเคลื่อนที่

4.4 ระบบควบคุมของแกนที่ 4

สำหรับแกนที่ 4 ใช้การควบคุมแบบ PID รูปที่ 4.11 ก) แสดงแผนภาพของระบบควบคุมที่ใช้



รูปที่ 4.11 แสดงระบบควบคุมของแกนที่ 4



รูปที่ 4.12 แสดงโครงร่างของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ โดยจุดกำเนิดของแกน X-Z แทนจุดหมุนของแกนที่ 4 พร้อมทั้งแสดงจุดศูนย์กลางมวลด้วย

พิจารณารูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นภาพวาดแสดงโครงร่างของจะเห็นว่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลไม่ได้อยู่ที่จุดหมุน ดังนั้นจึงมีผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำกับจุดศูนย์กลางมวล ทำให้เกิดโมเมนต์รอบจุด O มีขนาดเท่ากับ

$$T_1 = mgl \cdot \sin(\alpha)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- T_1 คือโมเมนต์รอบจุดหมุน O
- m คือมวลของอุปกรณ์วัฏระยะทางด้วยแสง
- g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/sec^2
- l คือแขนของโมเมนต์มีขนาดเท่ากับระยะจากจุดหมุน O ไปยัง จุดศูนย์กลางมวล
- α คือมุมที่แขนของโมเมนต์ที่ทำกับแกน z

โมเมนต์ดังกล่าวเป็นภาระของมอเตอร์ในการขับเคลื่อน มีค่าเพิ่มตามมุม α ที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นเนื่องจากเทอมของไซน์ที่ปรากฏเป็นเทอมของความไม่เชิงเส้น (Nonlinear term) แต่ขนาดของภาระดังกล่าวมีขนาดไม่มากเนื่องจาก

1. มวลของแกนที่ 4 มีค่าน้อย
2. แขนของโมเมนต์ (length) ที่ทำให้เกิด โมเมนต์มีค่าน้อย
3. เราจำกัดช่วงของการเคลื่อนที่ให้อยู่ในช่วง -20° ถึง 20° เนื่องจากป้องกันการชนของแกนที่ 4 กับชิ้นงานในบางกรณี ค่าของโมเมนต์ที่มากที่สุดที่จะเกิดจึงมีค่าไม่มาก

แต่ระบบควบคุมที่ใช้ก็ได้คำนึงถึงส่วนของภาระนี้ด้วย โดยได้เพิ่มส่วนที่เป็น feedforward เพื่อลดทอนผลของภาระอื่นนี้ให้น้อยลง ดังจะเห็นได้จากสมการของตัวควบคุมข้างล่าง ข้างล่างนี้เป็นการอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ของรูปที่ 4.9 ดังนี้

ก. ตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) ใช้สมการควบคุม

$$u = K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e dt = \text{sgn}(\dot{\theta}) mgl(\theta + 0.646)$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}) = \begin{cases} + & \text{for CCW} \\ - & \text{for CW} \end{cases} \quad 90^\circ \geq \theta \geq -90^\circ$$

โดย

u คือสัญญาณควบคุม

e คือความผิดพลาดระหว่าง θ_d กับ θ

$\frac{de}{dt}$ คืออัตราความผิดพลาดเทียบกับเวลา

$\int e dt$ คือความผิดพลาดสะสม (Cumulative error)

K_p, K_d, K_i คือค่าเกนของการควบคุม

$\theta, \dot{\theta}$ คือมุมและความเร็วเชิงมุมทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็น + ตามเข็มนาฬิกาเป็น -

$-\text{sgn}(\dot{\theta}) mgl(\theta + 0.646)$ คือส่วนของ feedforward ที่ทำหน้าที่ชดเชยผลของโมเมนต์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกโดยสมมุติว่า

ค่ามุมที่เคลื่อนที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าน้อยจึงประมาณ $\sin(\theta) = \theta$ และที่ตำแหน่ง $\theta = 0$ แขนของ
โมเมนต์จะหมุน 0.646 เรเดียน กับแกน z

4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับ stepping motor

4.5.1 ออปโตคัปเปิลอร์ เอาต์พุตแบบเป็นโพโต้ทรานซิสเตอร์

ในงานที่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมโหลดที่ต้องการแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงมากๆ หรือเป็นโหลดทางไฟฟ้าสลับ หากใช้พอร์ตขนานเข้าไปควบคุมโดยตรงอาจส่งผลเสียต่อระบบคอมพิวเตอร์ได้ เนื่องจากที่โหลดกำลังไฟฟ้าสูงนั้นเมื่อเริ่มต้นหรือสิ้นสุดการทำงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน และกระแสไฟฟ้าอย่างมากและรวดเร็วซึ่งอาจทำอันตรายต่อระบบคอมพิวเตอร์ได้ทำให้การขับโหลดเหล่านี้จึงต้องอาศัยอุปกรณ์ขับอีกแบบ หนึ่งในที่สามารถที่สามารถแยกระบบกราวด์ทางไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์ออกจากโหลดได้ ทำให้คอมพิวเตอร์ปลอดภัยจากไฟฟ้ากระชาก หรือทรานเซียนต์ (transien) และ โหลดที่ไวต่อสัญญาณรบกวนก็สามารถทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ได้ อุปกรณ์ขับตัวนี้คือ อุปกรณ์เชื่อมโยงทางแสง หรือ ออปโตคัปเปิลอร์

4.5.2 ออปโตคัปเปิลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่มีการแบ่งส่วนอินพุตและเอาต์พุตออกจากกันทางไฟฟ้าอย่างสิ้นเชิง การถ่ายทอดสัญญาณระหว่างส่วน อินพุต และ เอาต์พุต จะใช้การเชื่อมโยงทางแสงเท่านั้น ทำให้กราวด์ของ อินพุต และ เอาต์พุต ไม่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นจึงสามารถกำหนดให้ทาง อินพุต เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรทาง เอาต์พุต เป็น วงจร ไฟฟ้ากระแสสลับ

ภาคอินพุตของออปโตคัปเปิลอร์ โดยส่วนใหญ่จะเป็น LED อินฟราเรด ส่วนภาคเอาต์พุตจะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำงานเมื่อได้ เมื่อมีแสงมากระทบ โพโต้ทรานซิสเตอร์

4.5.3 หลักการทำงาน

การทำงานจะเริ่มต้นด้วยการจ่ายแรงดันไปแอคตรงให้แก่ LED อินฟราเรดภายในออปโตคัปเปิลอร์ เมื่อ LED นำกระแส ก็จะกำเนิดแสงอินฟราเรดส่องไปตกกระทบที่ขาเบสของออปโตทรานซิสเตอร์ ทำให้โพโต้ทรานซิสเตอร์นำกระแส เกิดกระแสไหลผ่านจากขา คอลเล็กเตอร์ มายัง อิมิตเตอร์ โดยแหล่งจ่ายแรงดันทาง เอาต์พุต สามารถที่จะใช้แยกกับทางอินพุตได้อย่างอิสระ ไม่ต้องต่อกราวด์ถึงกัน จึงสามารถต่อกับแหล่งกำเนิดแรงดันสูง หรือ แหล่งกำเนิดไฟสลับได้ โดยไม่มีการรบกวนย้อนกลับมาทาง อินพุตอย่างเด็ดขาด และยังสามารถป้องกันการรบกวนจาก อินพุต โดยผ่านทางสายกราวด์ได้ด้วย

4.5.4 การกระตุ้นเพื่อขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบฟลูสเท็ป 2 เฟส

จะกระตุ้นโดยจ่ายแรงดันไปที่ขดลวด 2 ขดที่อยู่ใกล้กันในเวลาเดียวกัน และ เรียงถัดกันไป ขดลวดชุดแรกที่ถูกกระตุ้นจะเป็นขดที่ 1 และ 2 ตามด้วยการกระตุ้นขดที่ 2 และ 3 ต่อไปเป็นขดที่ 3 และ 4 ถัดไปเป็นขดที่ 4 และ 1 แล้วกลับมาที่ขดที่ 1 และ 2 วนไปตามลำดับเช่นนี้ หรือเริ่มที่ขด 1 และ 4 ตามด้วย ขดที่ 4 และ 3 ถัดไปเป็นขดที่ 3 และ 2 ต่อไปเป็นขดที่ 2 และ 1 แล้ววนกลับมาที่ขดที่ 1 และ 4 ทิศทางการหมุนจะสวนกัน ดังแสดงขั้นตอนการกระตุ้นการกระตุ้นตามตาราง การกระตุ้นแบบนี้สามารถเพิ่มแรงบิดได้มากกว่าแบบ 1 เฟส แกนแม่เหล็กเคลื่อนที่ภายในมอเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจาก 2 ขดลวด ที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน และหมุนต่อไปด้วยแรงดึงจากอีก 2 ขดลวดถัดไป

สำหรับข้อเสียคือ ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น

สเต็ปที่	เฟสที่1	เฟสที่2	เฟสที่3	เฟสที่4
1	ทำงาน	ทำงาน		
2		ทำงาน	ทำงาน	
3			ทำงาน	ทำงาน
4	ทำงาน			ทำงาน

ตารางขั้นตอนการทำงาน

บทที่ 5

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม

5.1 PROGRAM STEP MOTOR

Dim i As Long

Dim n As Integer

Dim Turn As Integer

Dim Lefts, Rights As Boolean

Sub delay()

For i = 1 To 20000

Next i

End Sub

Private Sub ExitProgram_Click()

Unload Me

End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)

Out PrinterAddress, 0

Call delay

End Sub

Private Sub FreeLeft_Click()

Lefts = True

Rights = False

Turn = Val(TurnStep) * 50

For n = 1 To Turn

DoEvents

Out PrinterAddress, P41

Call delay



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Out PrinterAddress, P34
Call delay
Out PrinterAddress, P23
Call delay
Out PrinterAddress, P12
Call delay
If Not Lefts Then
    Exit For
End If
Next n
Out PrinterAddress, 0
Call delay
End Sub

Private Sub FreeRight_Click()
    Lefts = False
    Rights = True
    Turn = Val(TurnStep) * 50
    For n = 1 To Turn
        DoEvents
        Out PrinterAddress, P12
        Call delay
        Out PrinterAddress, P23
        Call delay
        Out PrinterAddress, P34
        Call delay
        Out PrinterAddress, P41
        Call delay
    If Not Rights Then
        Exit For
    End If
    Next n

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Out PrinterAddress, 0
    Call delay
End Sub
Private Sub StepLeft_Click( )
    Out PrinterAddress, P41
    Call delay
    Out PrinterAddress, P34
    Call delay
    Out PrinterAddress, P23
    Call delay
    Out PrinterAddress, P12
    Call delay
End Sub
Private Sub StepRight_Click( )
    Out PrinterAddress, P12
    Call delay
    Out PrinterAddress, P23
    Call delay
    Out PrinterAddress, P34
    Call delay
    Out PrinterAddress, P41
    Call delay
End Sub
Private Sub Stop_Click( )
    Rights = False
    Lefts = False
    Call delay
    Out PrinterAddress, 0
End Sub

```



End Sub

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DINAMIC LINKED LIBRARY

Option Explicit

'Declare Inp and Out for port I/O

#If Win32 Then

Public Declare Sub Out Lib "io.dll" Alias "PortOut" (ByVal Port As Integer, ByVal Data As Byte)

Public Declare Function Inp Lib "io.dll" Alias "PortIn" (ByVal Port As Integer) As Byte

#Else

Declare Function Inp Lib "InpOut.DLL" (ByVal Port As Integer) As Byte

Declare Sub Out Lib "InpOut.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Value As Byte)

#End If

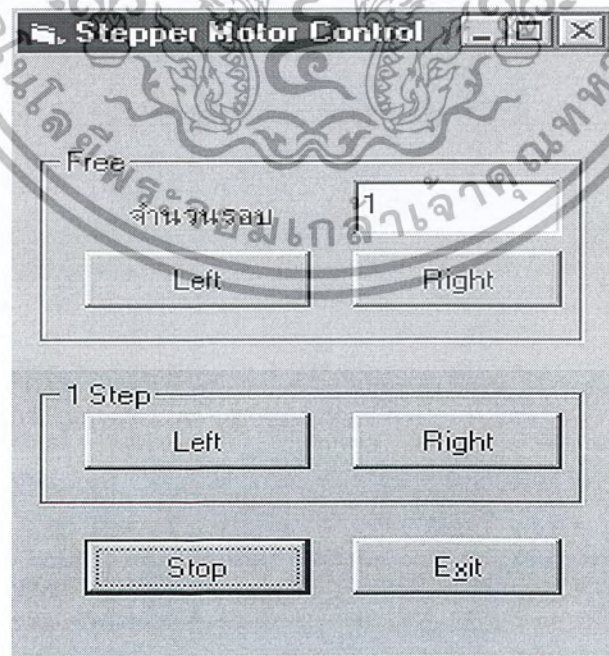
Public Const PrinterAddress = &H378

Public Const P12 = 10

Public Const P23 = 6

Public Const P34 = 5

5.2 หน้าจอของโปรแกรม



รูปที่ 5.1 เขียนขึ้นใช้สำหรับปรับความเร็วและทิศทางการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผล

จากผลการทดลองตามหลักการและแนวคิดที่ตั้งขึ้นจะ เริ่มจากการนำเอาแสงเลเซอร์ยิงที่วัตถุแล้วทำการปรับระยะความใกล้-ไกลของเลเซอร์ เพื่อหาระยะความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบที่ผิววัตถุ เมื่อได้รูปแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มของแสงที่เหมาะสมจากนั้นทำการปรับระยะความห่างของมุกกล้องเพื่อให้ได้ขนาดและแสงที่มาตกกระทบวัตถุให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสม เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการเก็บภาพโดยกล้องจะอยู่กับที่แล้ววัตถุที่วางอยู่บนแท่น จะหมุนไปที่สแต็ปจากนั้นกล้องจะเก็บภาพที่มีองศาที่ต่างกันของวัตถุ เมื่อได้ภาพในมุมต่างๆรอบวัตถุ หลังจากนั้นนำภาพที่ได้มาทำการแยกภาพแสงเลเซอร์กับวัตถุออกจากกัน เมื่อได้ภาพที่ต้องการดังกล่าวแล้ว นำภาพที่ได้มาประมวลผล โดยใช้โปรแกรม 3D MAX จากผลการทดลองของโปรแกรมทำให้ได้รูปร่างและโครงสร้างของแก้วน้ำ



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมระบบพลศาสตร์ (Control of Dynamic Systems). พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

Bosch, J. A. Coordinate Measuring Machine and Systems. U.S.A. : Marcel Dekker, 1995.

Curless, B. L. New Methods for Surface Reconstruction from Range Images. Doctor of Philosophy, Department of Electrical Engineering, Stanford University, 1997.

Dote, Y. and Kinoshita, S. Brushless Servomotors Fundamentals and Applications. New York : Oxford University Press, 1990.

James T. Luxon, David E. Parker. Industrial Laser and Their Applications. Eaglewood Cliff, NJ : Prentice Hall, 1992.

The American Society of Mechanical Engineers. Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machine. New York, 1985.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ต่างๆ

ก.1 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ที่ใช้ในปริญญาโท (ดังแสดงในรูปที่ ก.3) นี้เป็นของบริษัท KEYENCE รุ่น LC-2011 เป็นอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์ แบบฟิล์มกำลังต่ำ แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร มีกำลังน้อยกว่า 3 มิลลิวัตต์ ลำแสงที่ใช้ไม่มีอันตรายต่อผิวหนัง แต่มีอันตรายต่อดวงตา ข้อควรระวังในการใช้งานมีดังนี้

1. อย่ามองลำแสงเลเซอร์โดยตรง หรือมองลำแสงที่สะท้อนจากผิวที่สามารถสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี
2. ใช้อุปกรณ์กับตัวควบคุมที่ออกแบบมาเท่านั้น
3. เมื่อมีเหตุขัดข้องอย่าปรับปรุงหรือซ่อมแซมอุปกรณ์เอง

การทำงานของอุปกรณ์จะทำงานหลังจากเปิดเครื่องไปแล้ว 3 วินาที หลังจากอุปกรณ์เริ่มทำงาน อุปกรณ์วัดระยะจะมีระยะโฟกัสที่ 40 มิลลิเมตรจากเลนส์ที่ปล่อยแสง ช่วงในการวัดมีค่า ± 3 มิลลิเมตรจากระยะโฟกัส

คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

1. แสดงระยะห่างหรือปริมาณของแสงด้วยจอภาพแบบตัวเลข ซึ่งเป็นระยะห่างของชิ้นงานจากตำแหน่งโฟกัส ระยะจะมีค่าเป็น 0 เมื่อผิวชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัสพอดี มีค่าเป็นบวกเมื่อชิ้นงานอยู่ห่างจากหัววัดเลยตำแหน่งโฟกัสออกไป และมีค่าเป็นลบเมื่อชิ้นงานเข้าใกล้หัววัด ระยะห่างที่แสดงจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายออกมา ($1 \text{ mV} = 1 \text{ }\mu\text{m}$)
2. สามารถปรับค่าอัตราขยายได้โดยอัตโนมัติ เมื่อปริมาณแสงที่วัดได้ มีมากหรือน้อยเกินไป
3. สามารถเลือกอัตราความเร็วในการวัดได้ 3 ระดับคือ 0.001, 0.01, 0.1 วินาที ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูงควรเลือกที่ 0.1 วินาที
4. สามารถปรับค่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ได้ 2 ระดับ (50 และ 10 ไมครอน) ถ้าต้องการวัดค่าที่มีขนาดเล็กควรปรับไว้ที่ตำแหน่ง NARROW (10 ไมครอน)
5. แสดงสัญญาณ 'ใกล้ (NEAR)' เมื่อระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัววัดมีขนาดน้อยกว่าระยะโฟกัส 'ไกล (FAR)' เมื่อระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัววัดมีขนาดมากกว่าระยะโฟกัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์

รุ่น (Model)	Sensor head	LC-2011
	Controller	LC-2001
Light source	Semiconductor laser (780 nm, 3 nW max. pulse duration : 50 micro second)	
Reference distance	40 nm	
Measurement range*	± 3 nm	
Spot diameter	0.05 mm max.	
Analog output (MON.)	Output voltage**	± 3 V (1 mV/1 μ m)
	Output impedance	Approx. 33 Ω
	Resolution***	0.5 μ m
	Responsively	DC to 600 Hz(at 1 ms) – 3 dB/DC to 60 Hz(at 10 ms) – 3 dB/DC to 6 Hz(at 100 ms) – 3dB
	Temperature fluctuation	Sensor : 1.0 μ m/ $^{\circ}$ C Controller : 0.5 μ m/ $^{\circ}$ C
	Control Output	Solid-state
Contact		SPST-NO relay contact X2 250 VAC 2A (resistive load)
Ambient operating illumination	2500 lx max.	
Ambient operating temperature	0 to 50 $^{\circ}$ C	
Ambient operating humidity	35 to 85% RH (without condensation)	
Supply voltage	110/120 VAC or 220/240 VAC \pm 10% 50/60 Hz	
Power consumption	10 VA max.	

* เทียบกับ Reference distance

** 0 V ที่ Reference distance

*** วัตถุที่ใช้ : white mat paper ที่การตอบสนอง 10 ms

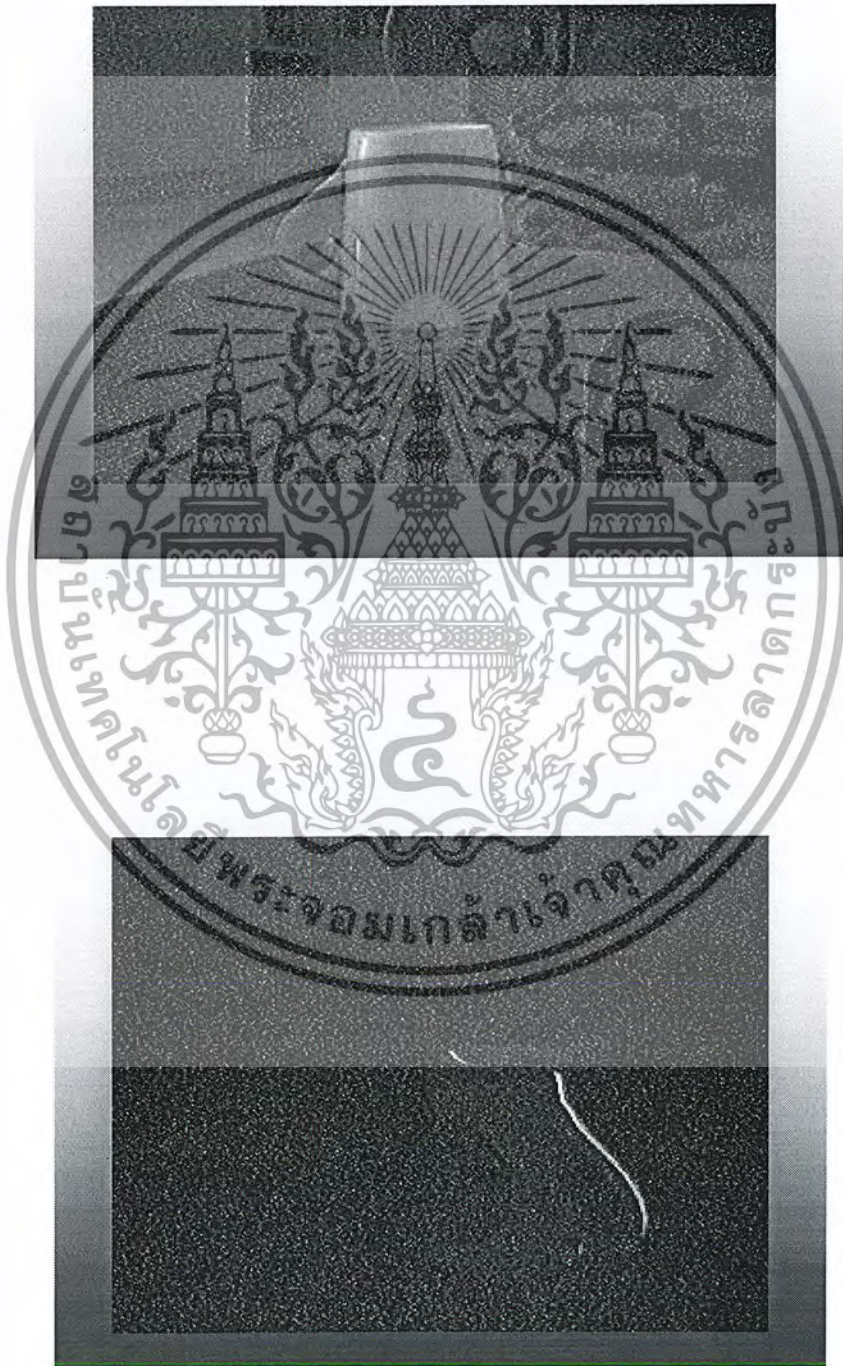
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ข้อมูลจำเพาะของตัวขับ BL

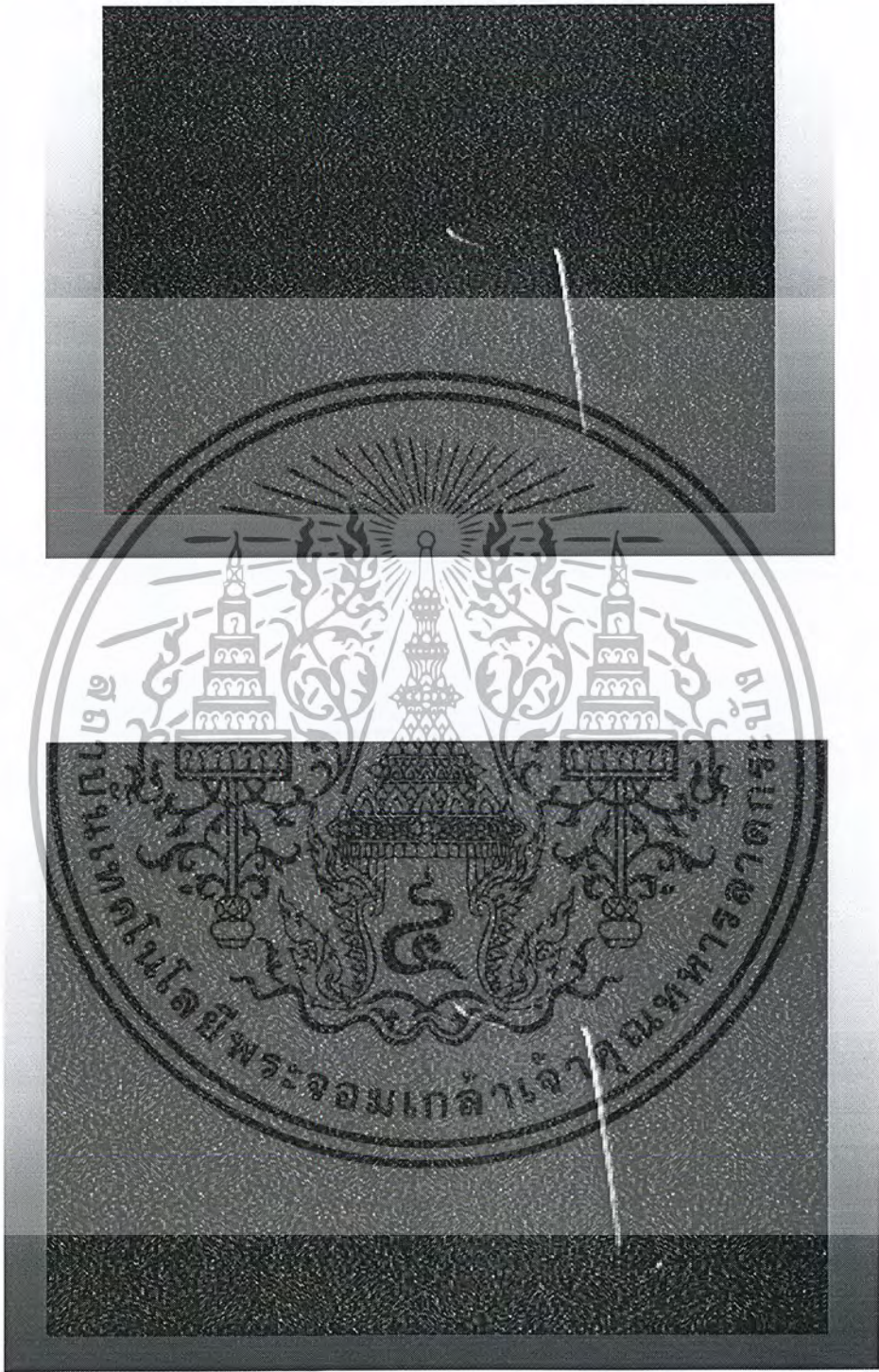
รุ่น	BL30
Continuous Current	3.75 A
Peak Current	7.5 A
DC bus Voltage	85 V
AC Input Voltage (RMS)	61 V
Weights	0.8 Kg
Motor Options	ML-1620 ML-2340
Power input	AC direct from mains transformer
Control input	± 10 V analogue (torque or velocity)
Reference outputs	± 15 V at 10 mA
Velocity feedback	Built-in incremental encoder
Commutation method	4 bit absolute encoder
Jumper link settings	Input range, current limit, torque/vel. Mode
Potentiometer settings	Time constant, damping, balance, tach gain
Diagnostic LED's (Front)	Power on, current limit, over temperature, drive/motor fault
Diagnostic LED's (Rear)	Power on, composite fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

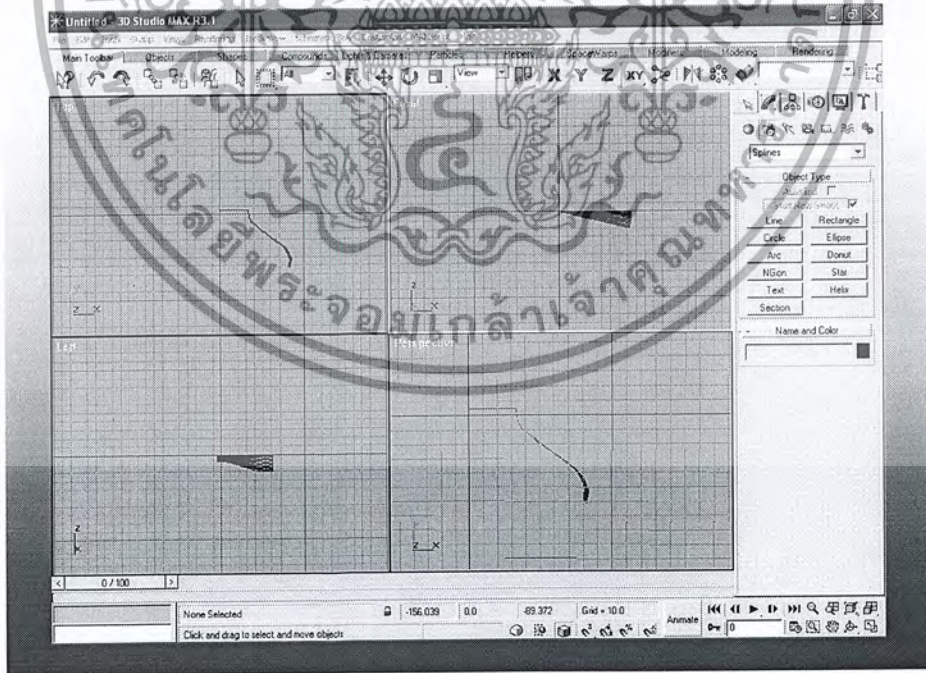
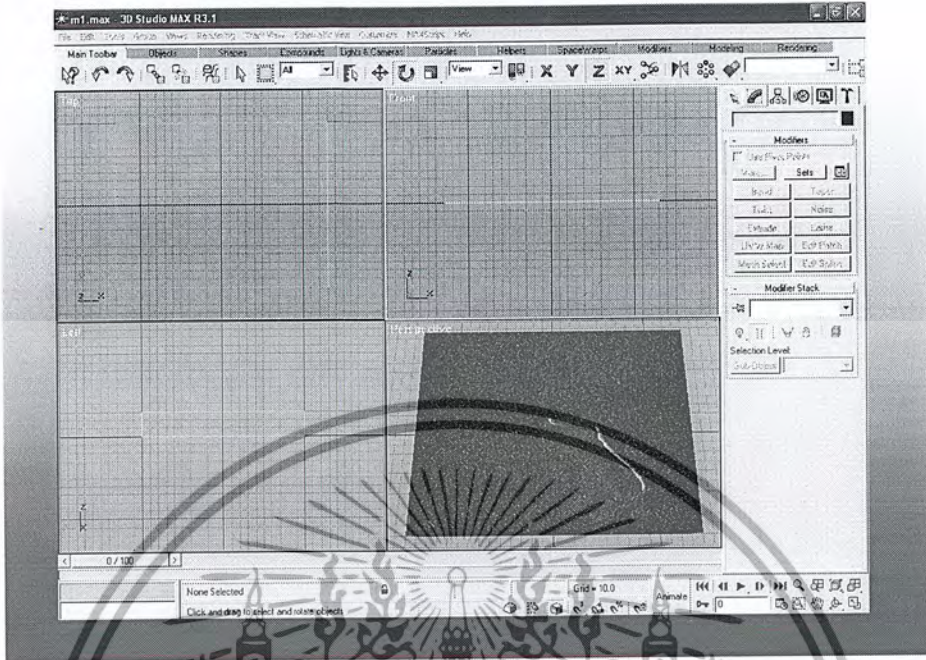
ภาคผนวก ข
ภาพการรันโปรแกรม



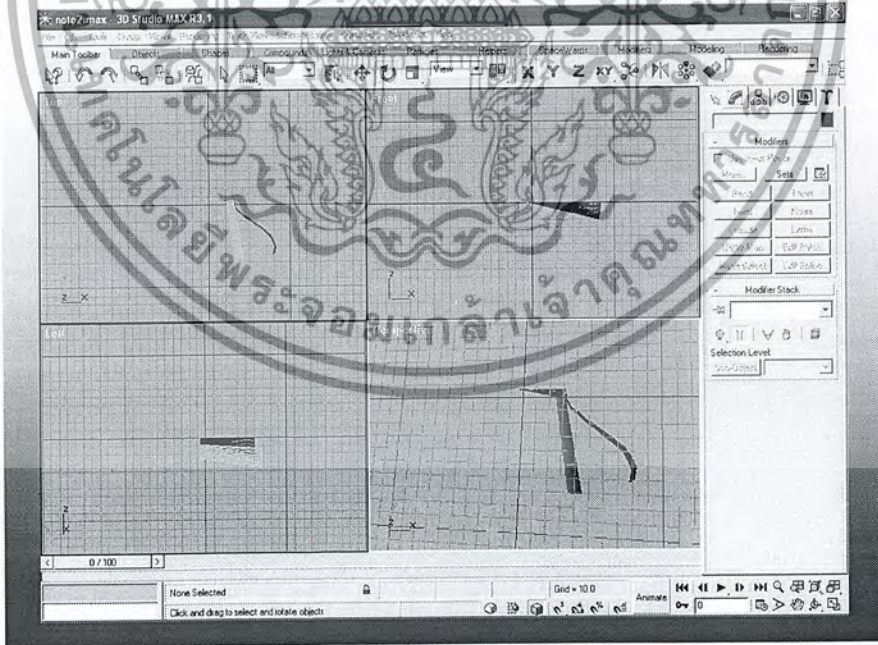
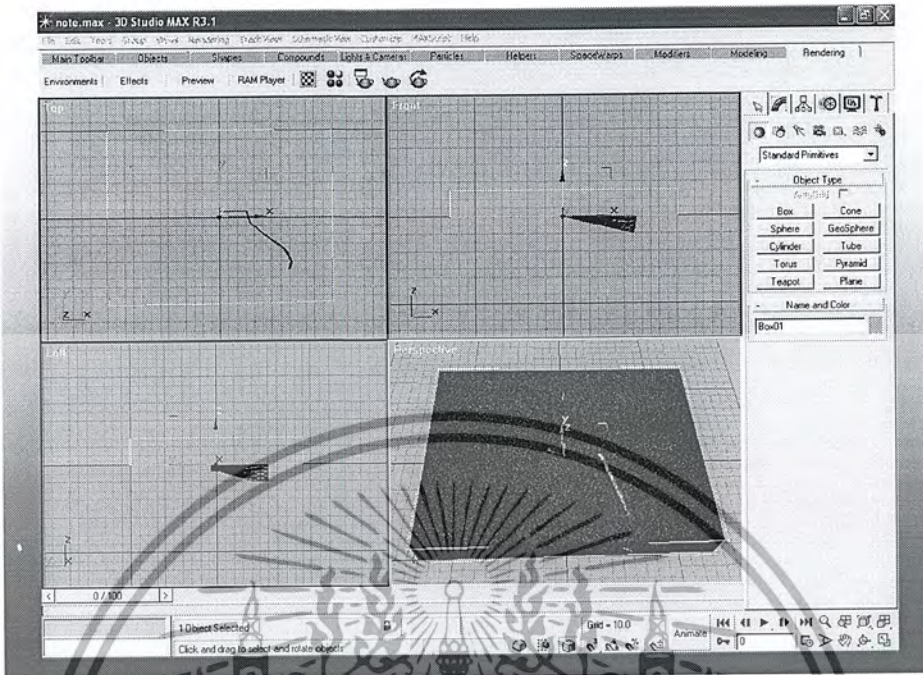
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



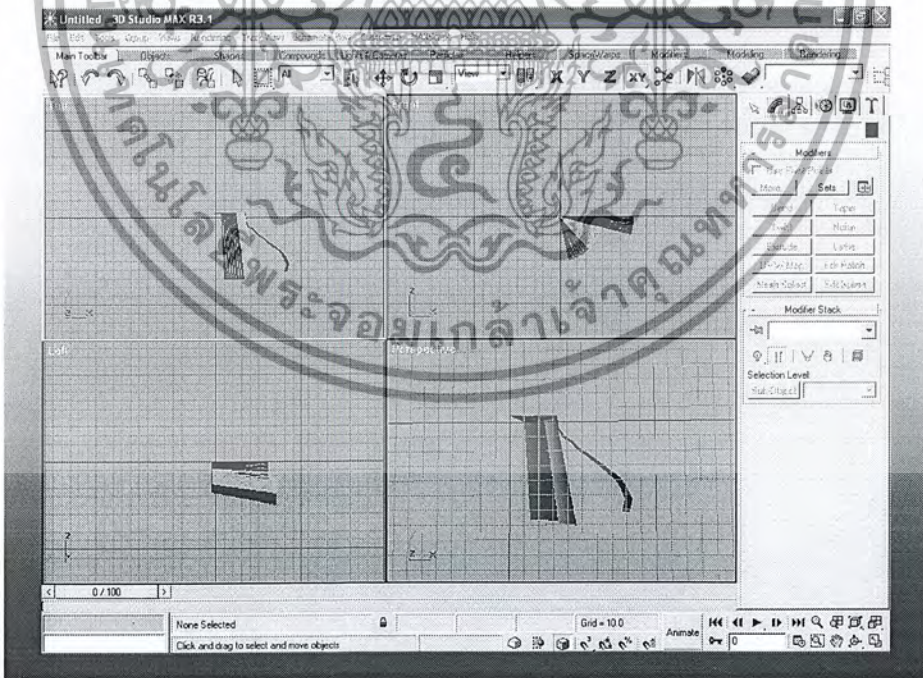
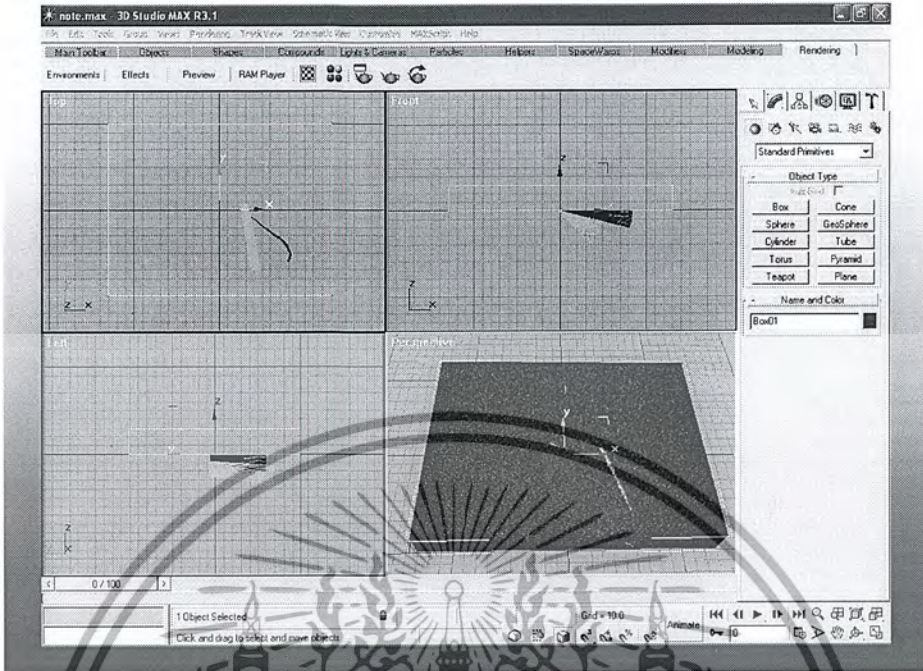
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



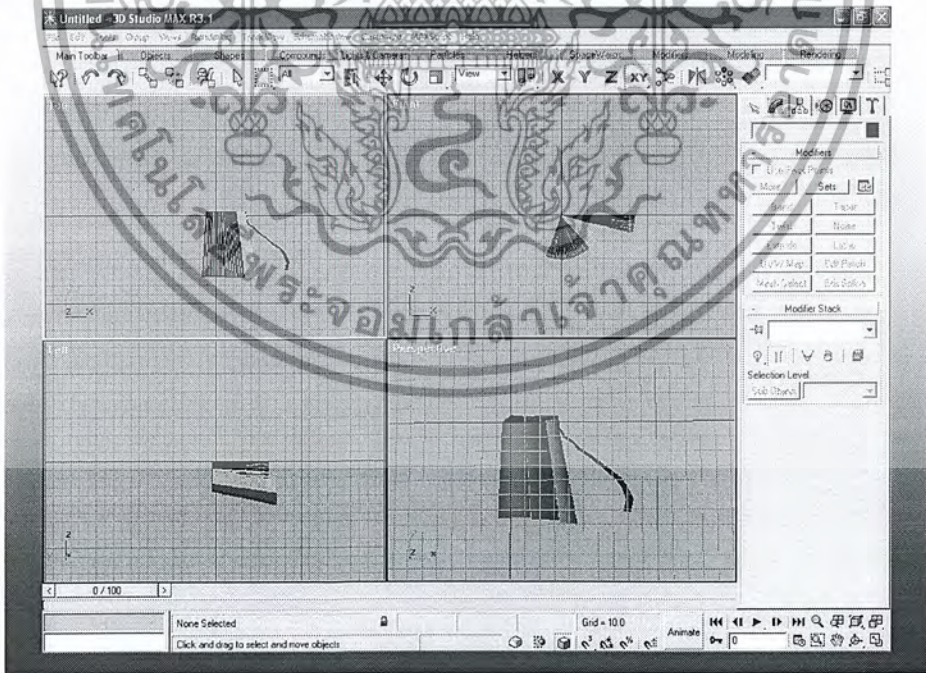
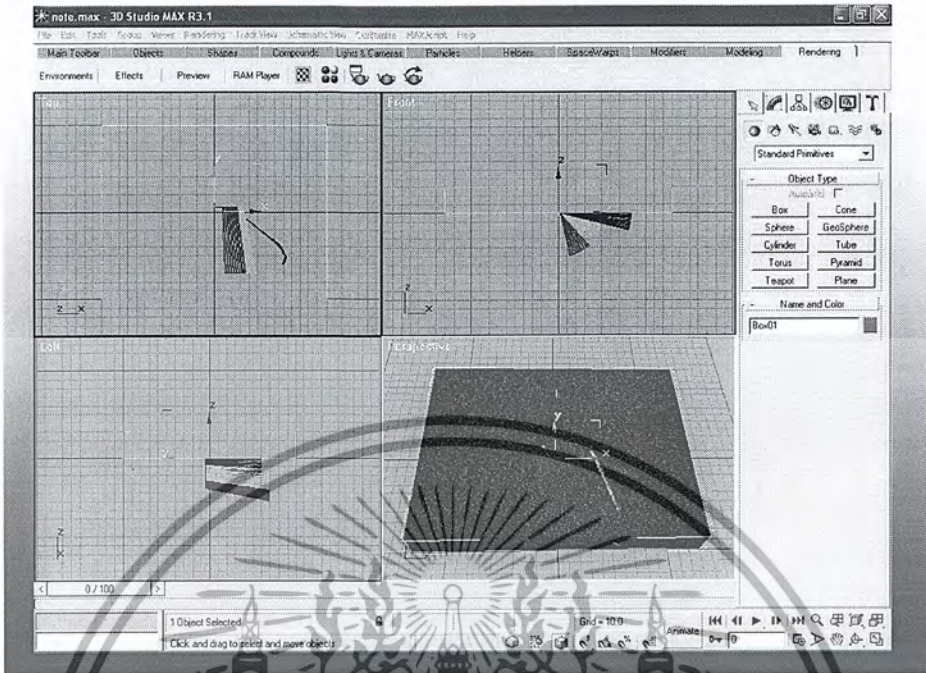
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



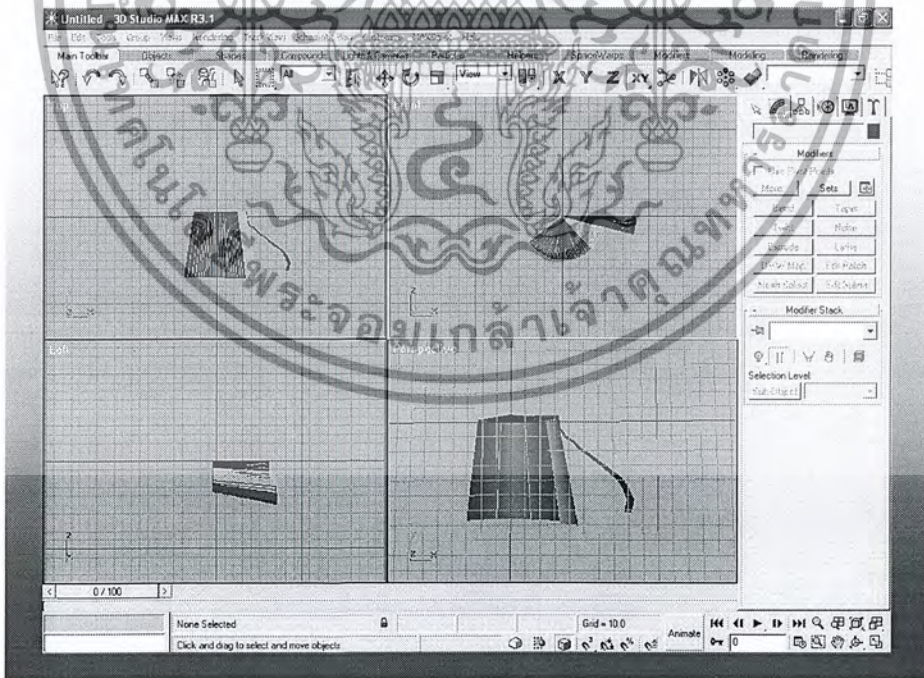
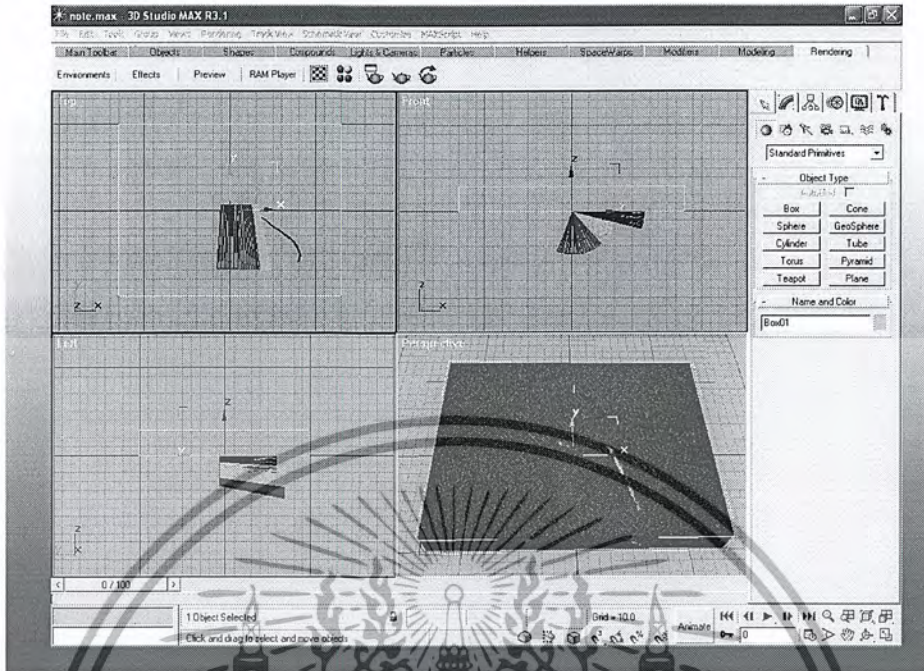
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



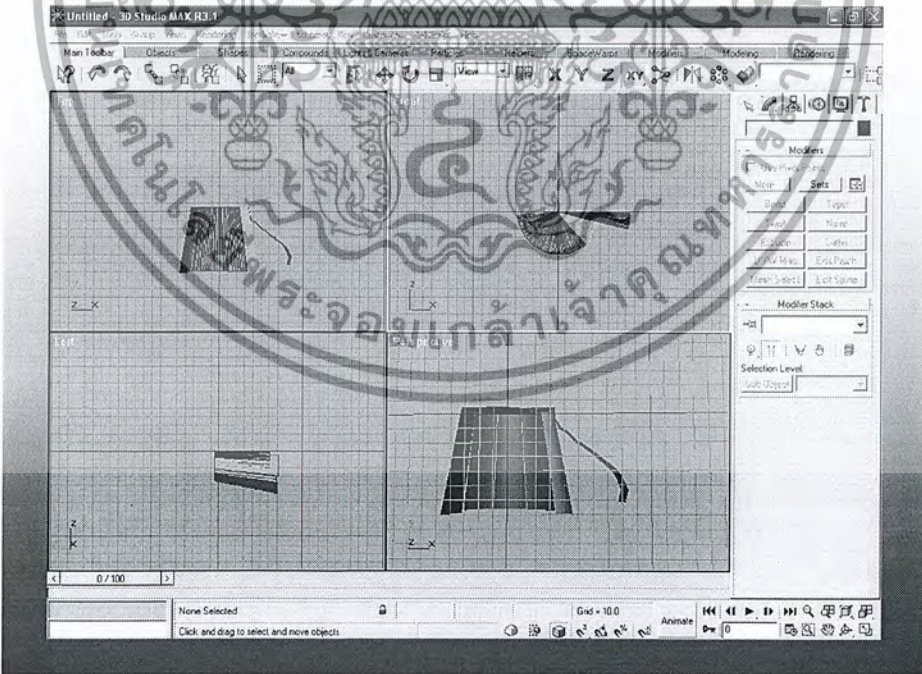
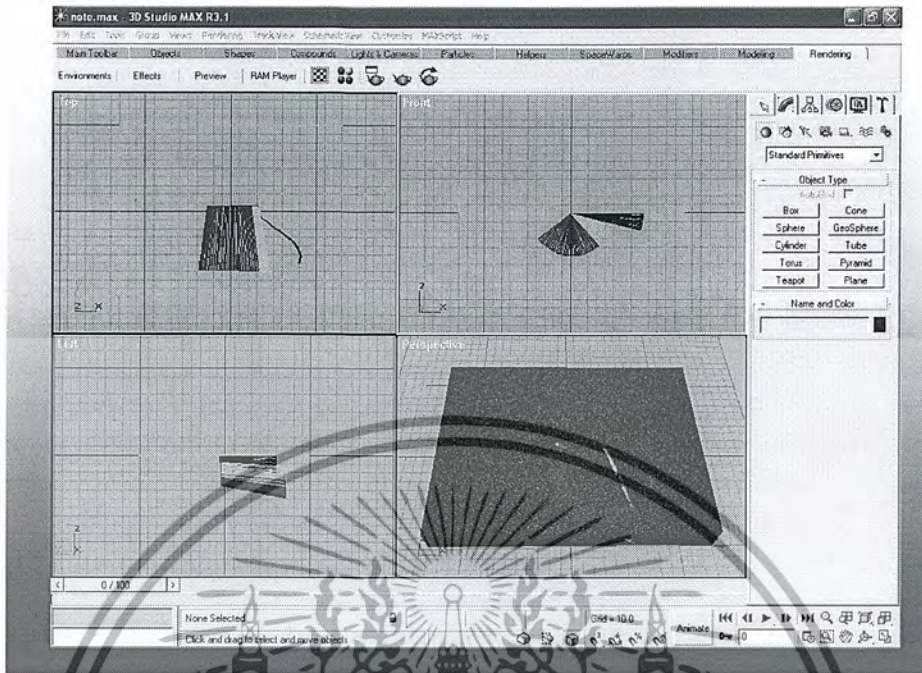
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



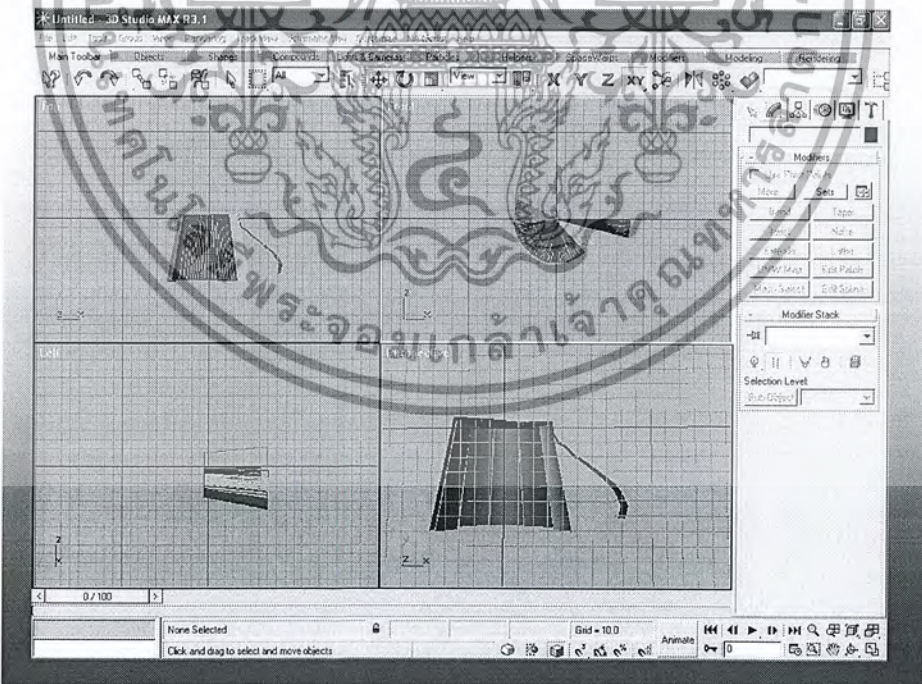
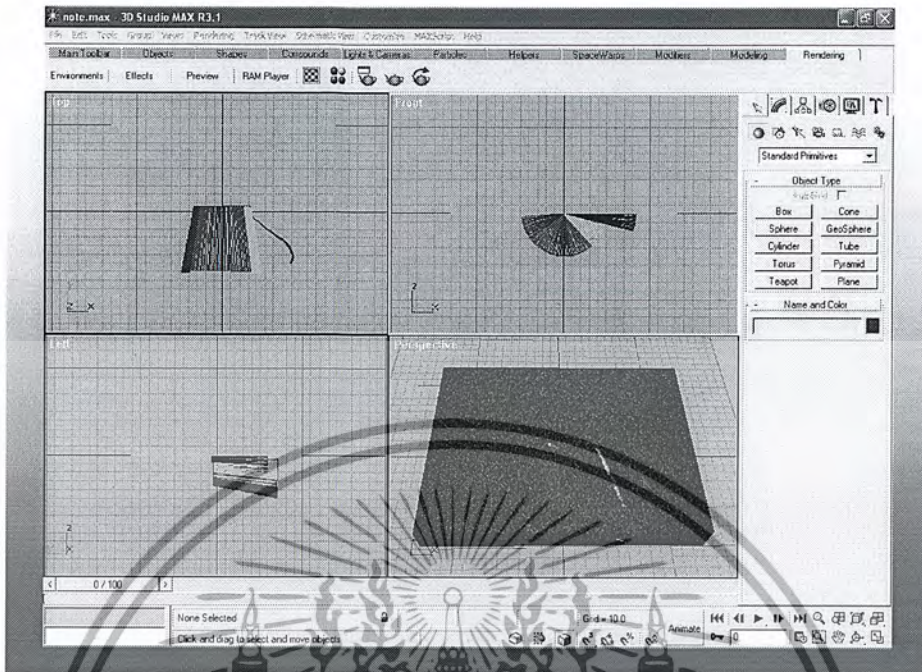
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



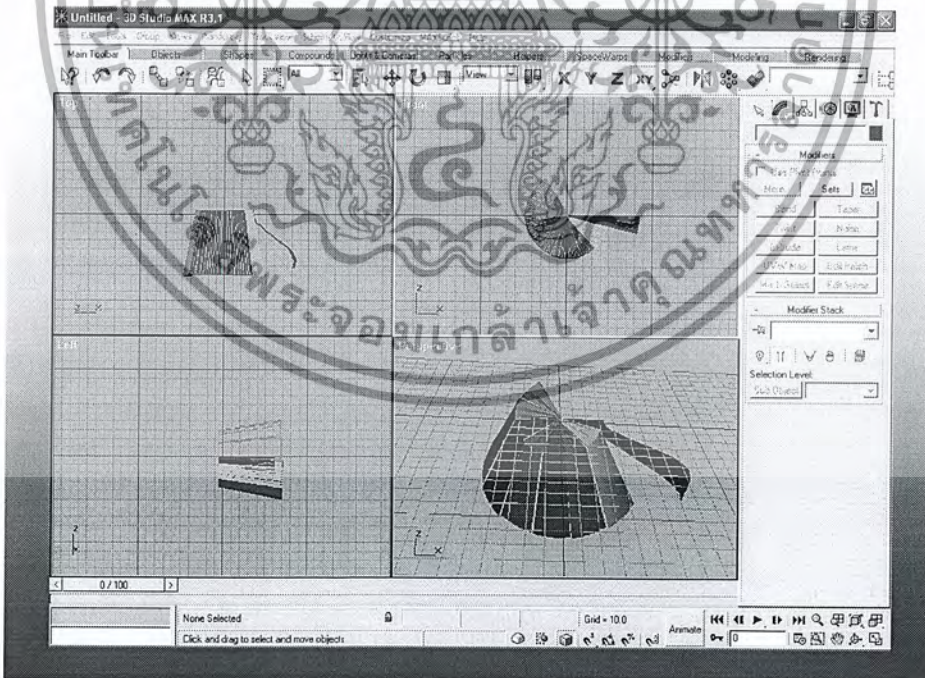
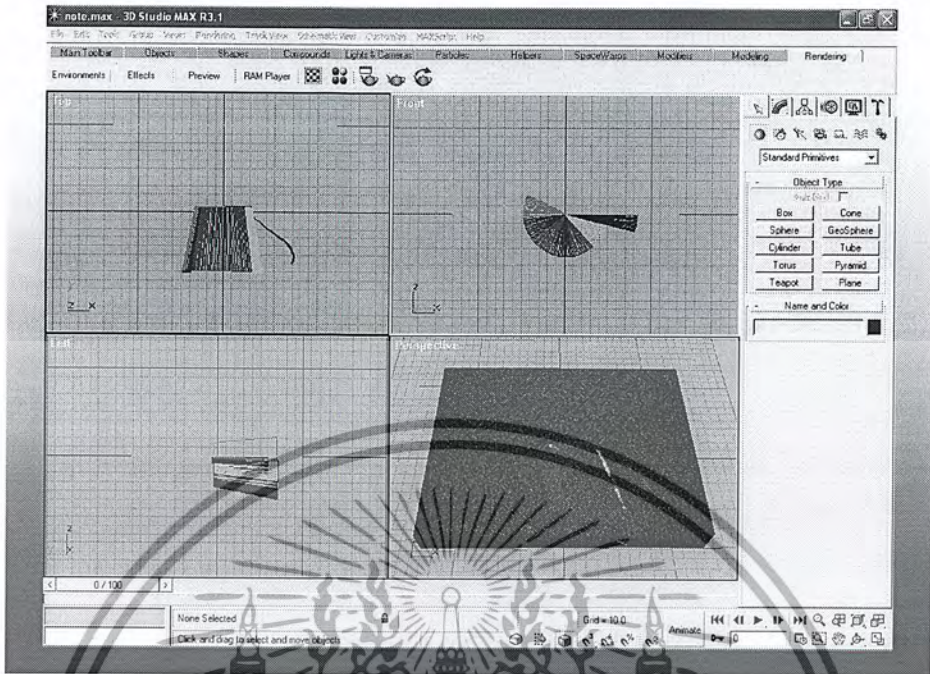
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



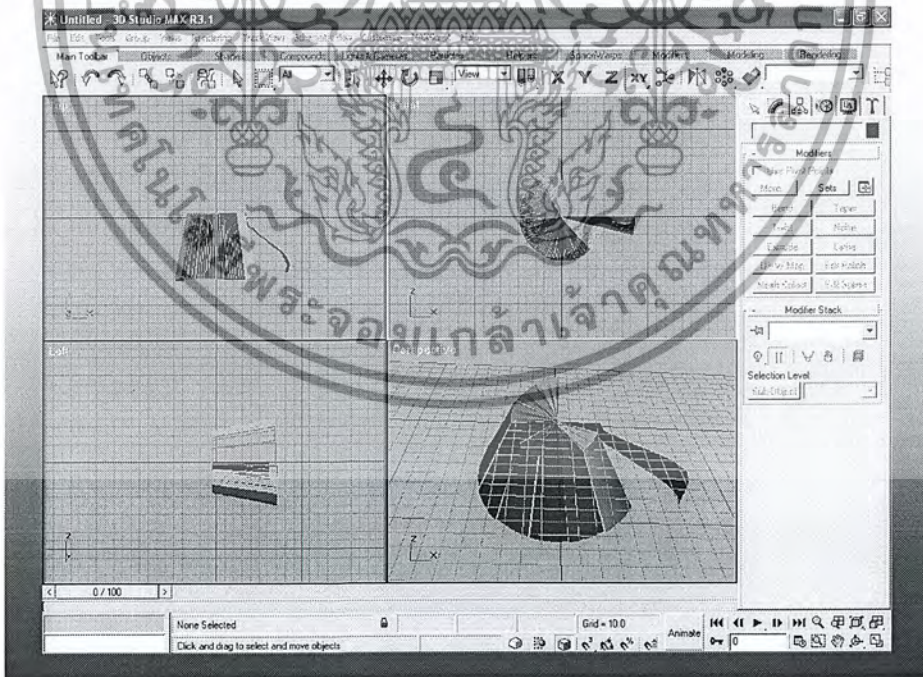
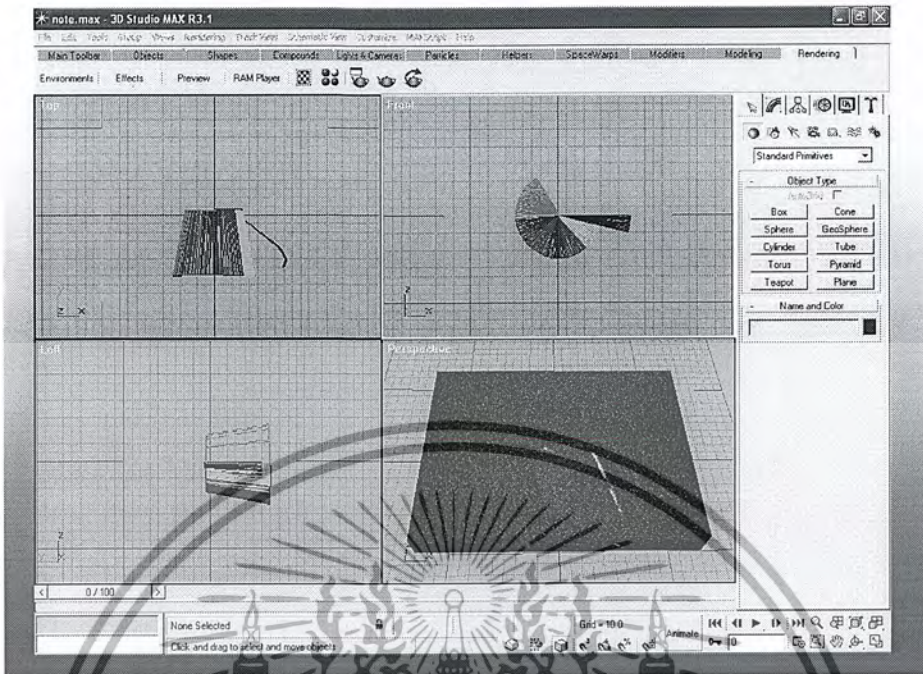
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



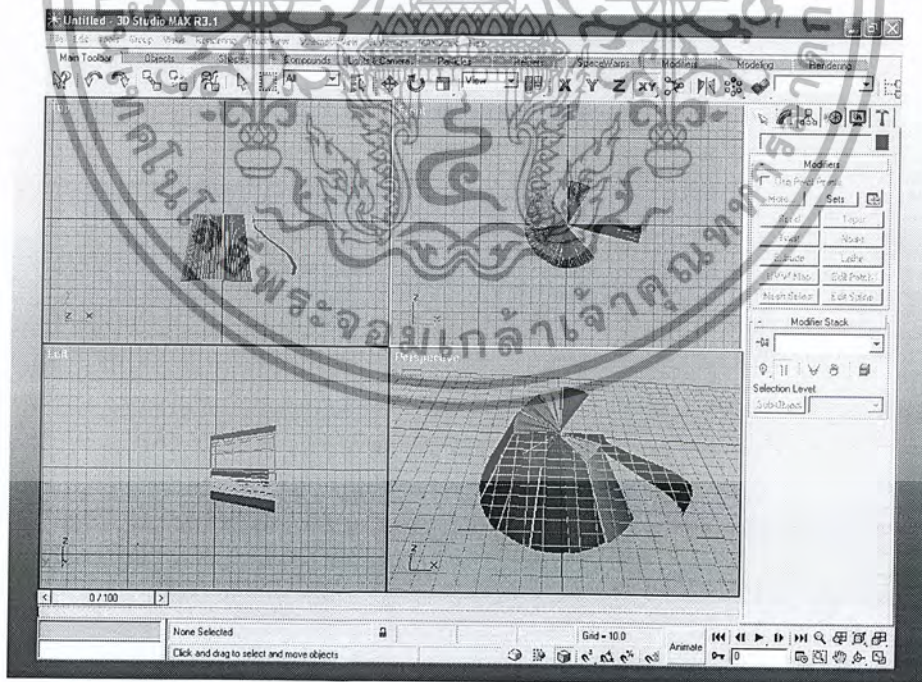
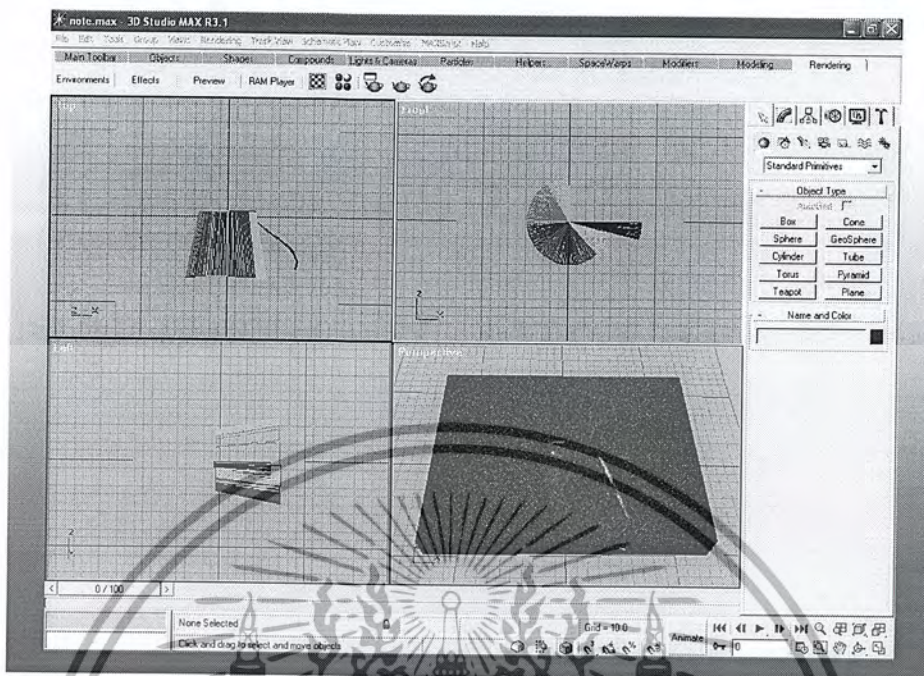
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



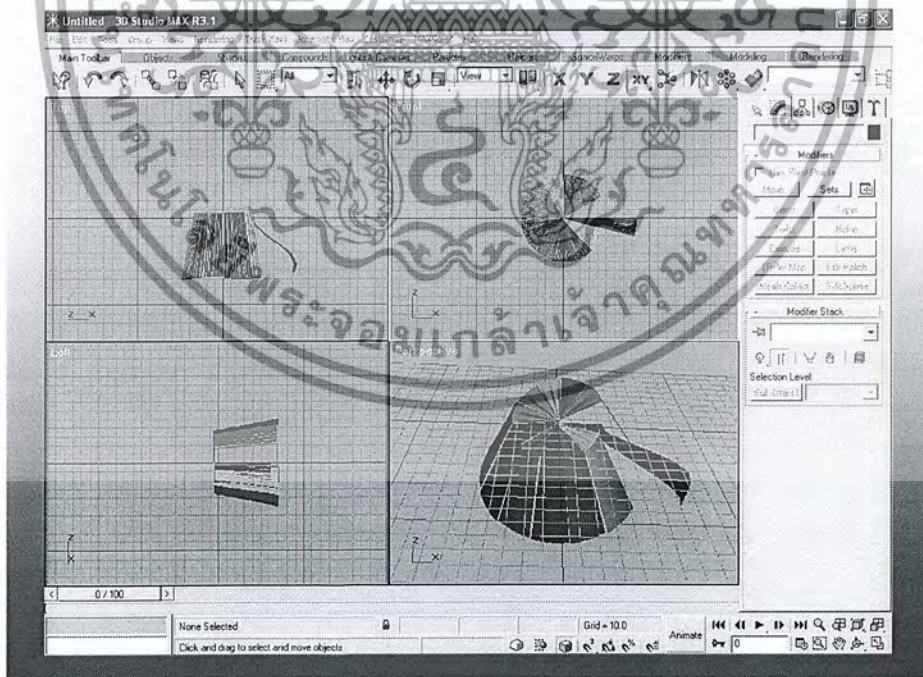
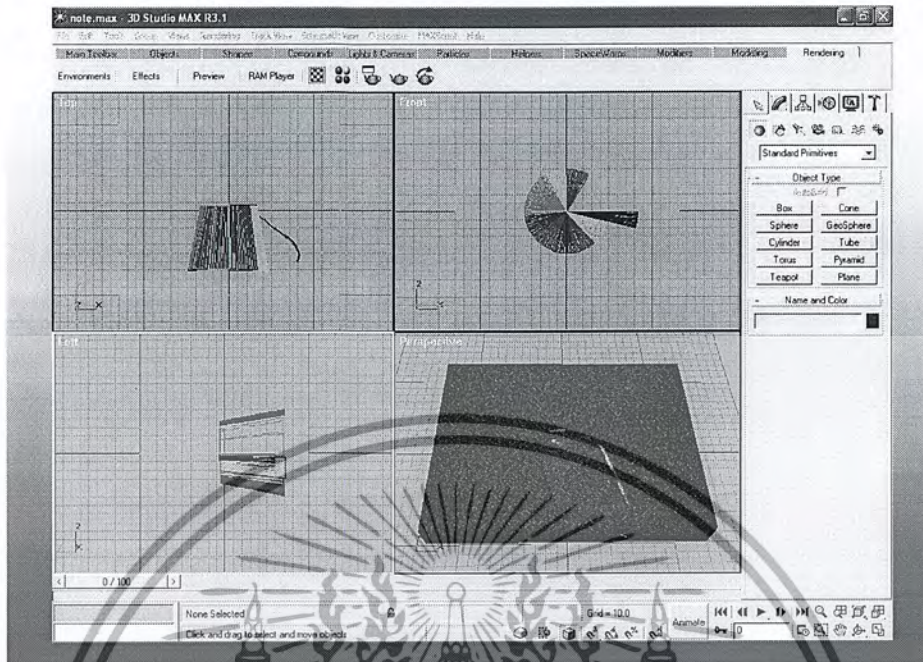
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



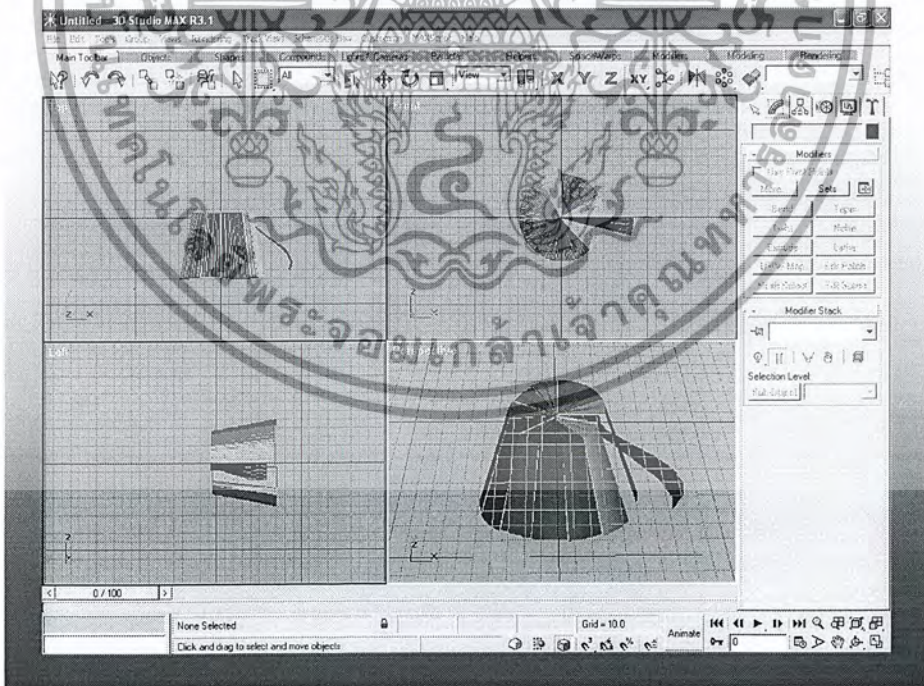
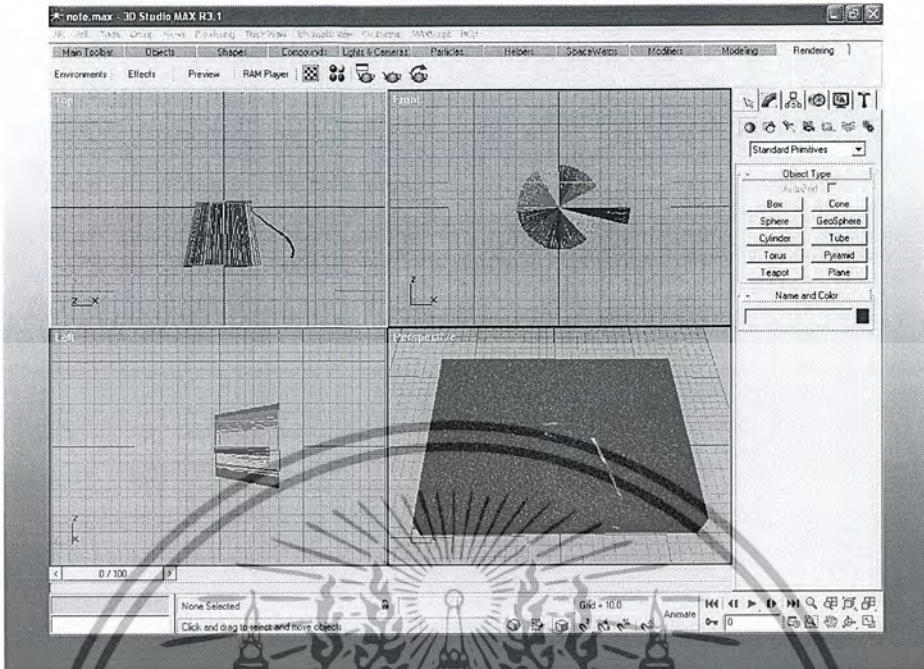
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



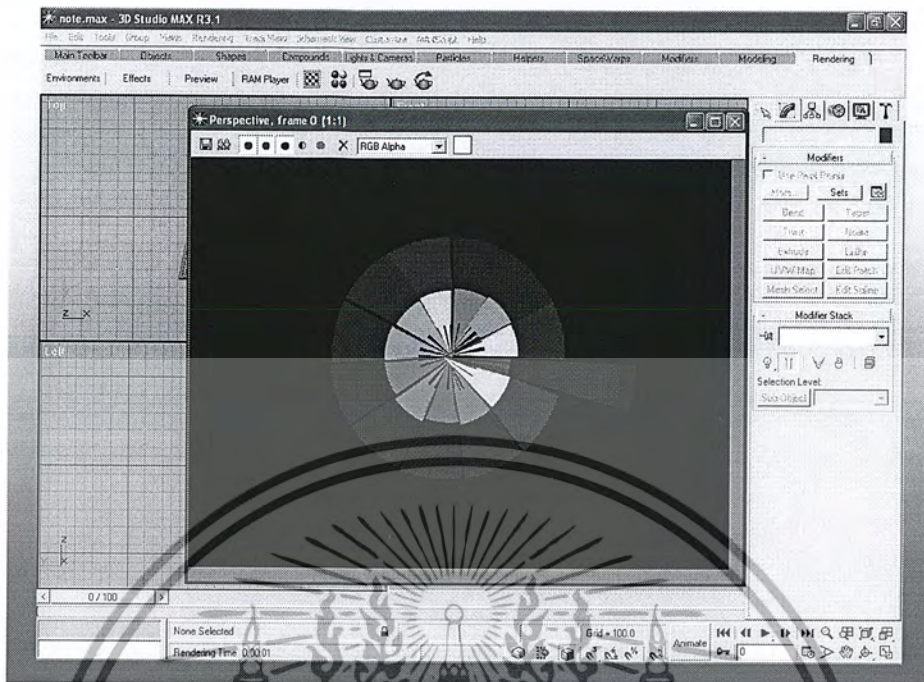
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



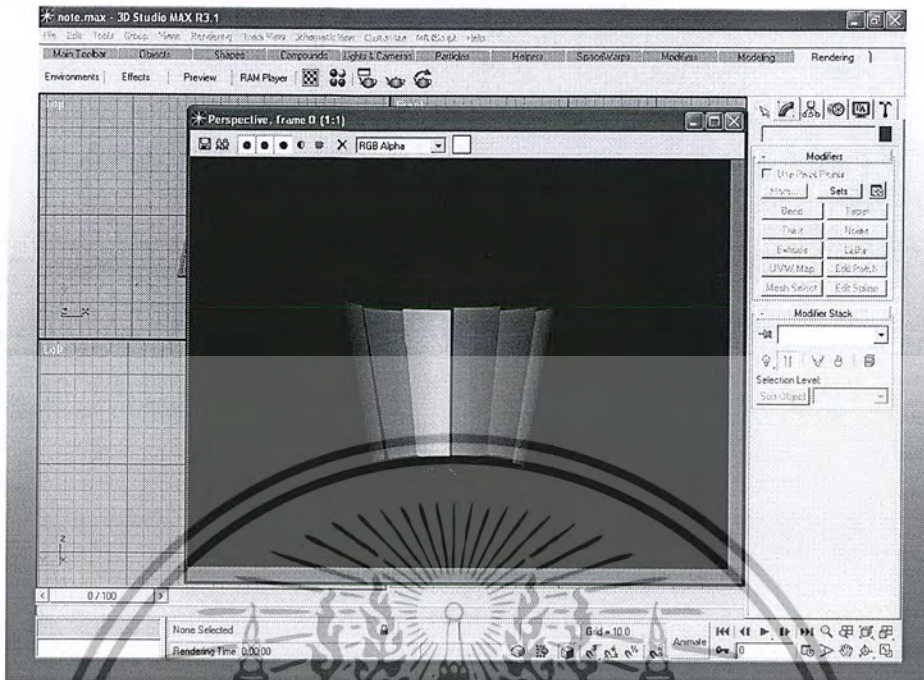
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



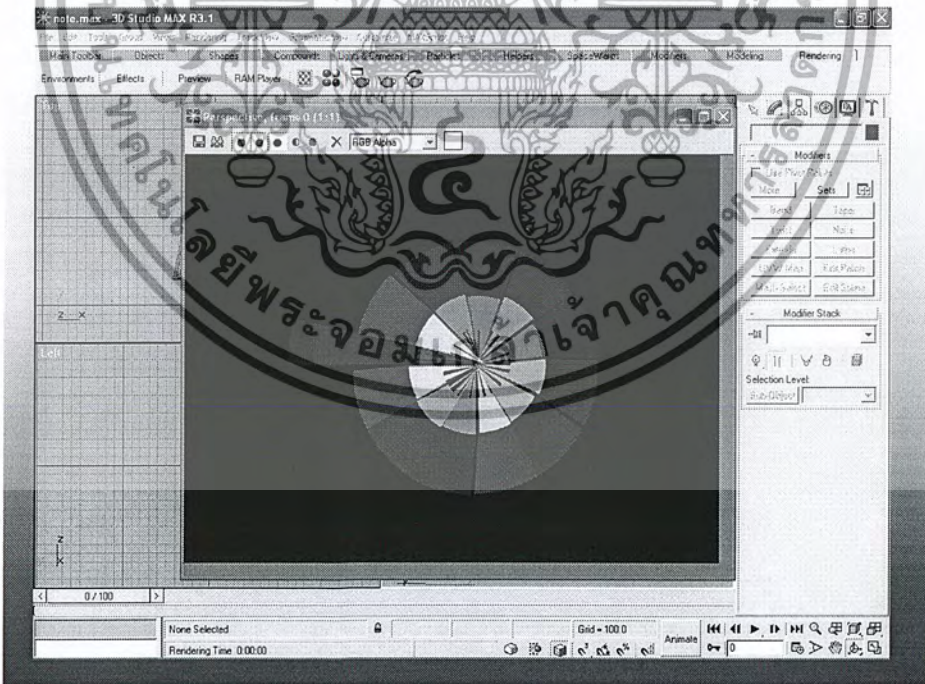
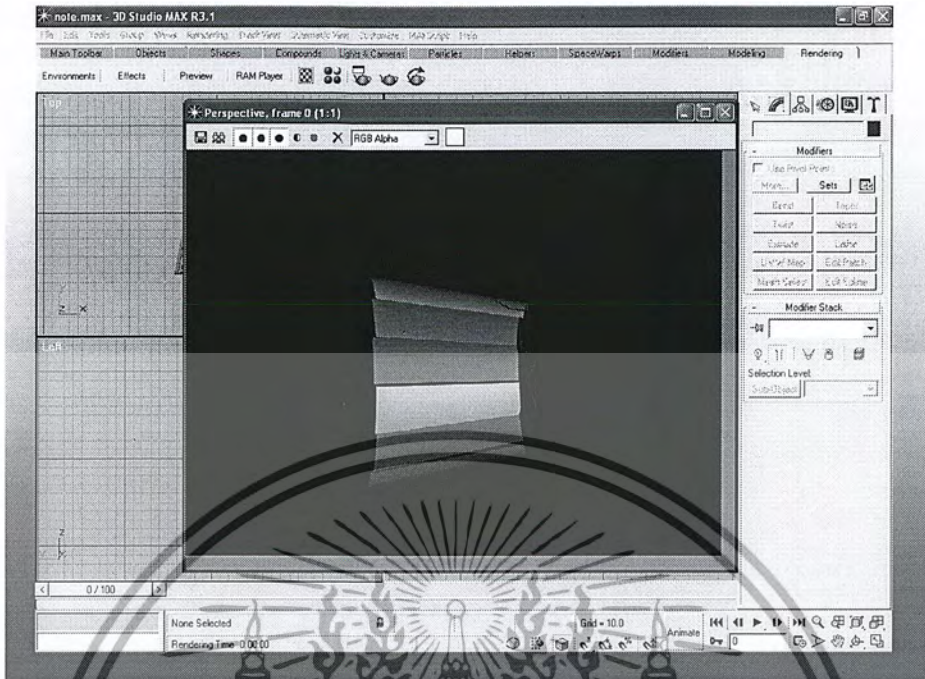
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



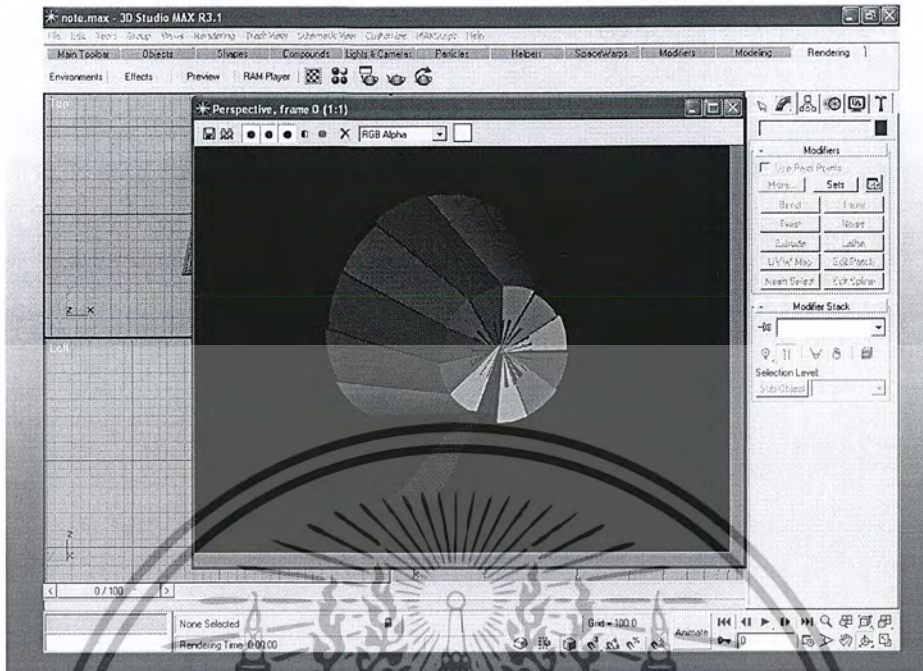
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

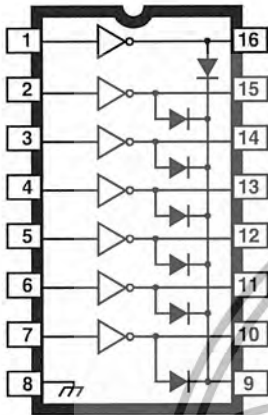


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2003 THRU 2024

Data Sheet
29304F

HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS



Note that the ULN20xxA series (dual in-line package) and ULN20xxL series (small-outline IC package) are electrically identical and share a common terminal number assignment.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Output Voltage, V_{CE}	
(ULN200xA and ULN200xL)	50 V
(ULN202xA and ULN202xL)	95 V
Input Voltage, V_{IN}	30 V
Continuous Output Current,	
I_C	500 mA
Continuous Input Current, I_{IN}	25 mA
Power Dissipation, P_D	
(one Darlington pair)	1.0 W
(total package)	See Graph
Operating Temperature Range,	
T_A	-20°C to +85°C
Storage Temperature Range,	
T_S	-55°C to +150°C

Ideally suited for interfacing between low-level logic circuitry and multiple peripheral power loads, the Series ULN20xxA/L high-voltage, high-current Darlington arrays feature continuous load current ratings to 500 mA for each of the seven drivers. At an appropriate duty cycle depending on ambient temperature and number of drivers turned ON simultaneously, typical power loads totaling over 230 W (350 mA x 7, 95 V) can be controlled. Typical loads include relays, solenoids, stepping motors, magnetic print hammers, multiplexed LED and incandescent displays, and heaters. All devices feature open-collector outputs with integral clamp diodes.

The ULN2003A/L and ULN2023A/L have series input resistors selected for operation directly with 5 V TTL or CMOS. These devices will handle numerous interface needs — particularly those beyond the capabilities of standard logic buffers.

The ULN2004A/L and ULN2024A/L have series input resistors for operation directly from 6 to 15 V CMOS or PMOS logic outputs.

The ULN2003A/L and ULN2004A/L are the standard Darlington arrays. The outputs are capable of sinking 500 mA and will withstand at least 50 V in the OFF state. Outputs may be paralleled for higher load current capability. The ULN2023A/L and ULN2024A/L will withstand 95 V in the OFF state.

These Darlington arrays are furnished in 16-pin dual in-line plastic packages (suffix "A") and 16-lead surface-mountable SOICs (suffix "L"). All devices are pinned with outputs opposite inputs to facilitate ease of circuit board layout. All devices are rated for operation over the temperature range of -20°C to +85°C. Most (see matrix, next page) are also available for operation to -40°C; to order, change the prefix from "ULN" to "ULQ".

FEATURES

- TTL, DTL, PMOS, or CMOS-Compatible Inputs
- Output Current to 500 mA
- Output Voltage to 95 V
- Transient-Protected Outputs
- Dual In-Line Plastic Package or Small-Outline IC Package

x = digit to identify specific device. Characteristic shown applies to family of devices with remaining digits as shown. See matrix on next page.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS**

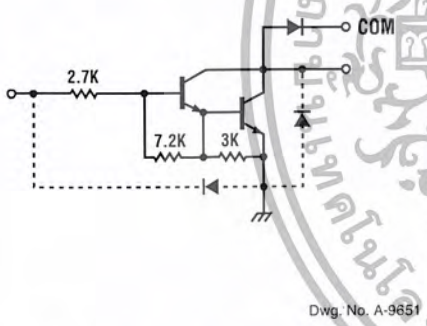
DEVICE PART NUMBER DESIGNATION

$V_{CE(MAX)}$	50 V	95 V
$I_{C(MAX)}$	500 mA	500 mA
Logic	Part Number	
5V TTL, CMOS	ULN2003A* ULN2003L*	ULN2023A* ULN2023L
6-15 V CMOS, PMOS	ULN2004A* ULN2004L*	ULN2024A ULN2024L

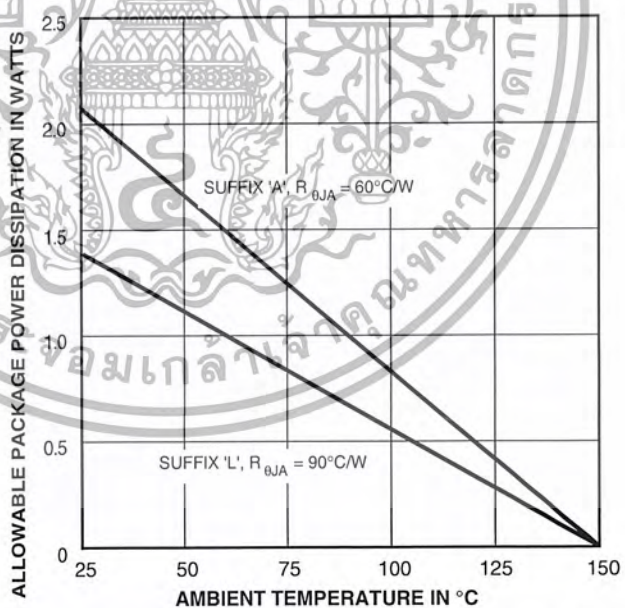
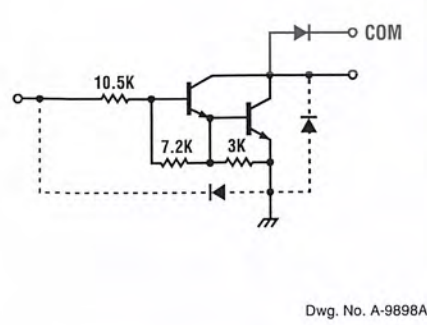
* Also available for operation between -40°C and +85°C. To order, change prefix from "ULN" to "ULO".

PARTIAL SCHEMATICS

ULN20x3A/L (Each Driver)



ULN20x4A/L (Each Driver)



X = Digit to identify specific device. Specification shown applies to family of devices with remaining digits as shown. See matrix above.



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
Copyright © 1974, 1998 Allegro MicroSystems, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัท Allegro MicroSystems, Inc. การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS

Types ULN2003A, ULN2003L, ULN2004A, and ULN2004L
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at +25°C (unless otherwise noted).

Characteristic	Symbol	Test Fig.	Applicable Devices	Test Conditions	Limits			
					Min.	Typ.	Max.	Units
Output Leakage Current	I _{CEX}	1A	All	V _{CE} = 50 V, T _A = 25°C	—	< 1	50	μA
				V _{CE} = 50 V, T _A = 70°C	—	< 1	100	μA
		1B	ULN2004A/L	V _{CE} = 50 V, T _A = 70°C, V _{IN} = 1.0 V	—	< 5	500	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage	V _{CE(SAT)}	2	All	I _C = 100 mA, I _B = 250 μA	—	0.9	1.1	V
				I _C = 200 mA, I _B = 350 μA	—	1.1	1.3	V
				I _C = 350 mA, I _B = 500 μA	—	1.3	1.6	V
Input Current	I _{IN(ON)}	3	ULN2003A/L	V _{IN} = 3.85 V	—	0.93	1.35	mA
			ULN2004A/L	V _{IN} = 5.0 V	—	0.35	0.5	mA
			ULN2004A/L	V _{IN} = 12 V	—	1.0	1.45	mA
	I _{IN(OFF)}	4	All	I _C = 500 μA, T _A = 70°C	50	65	—	μA
Input Voltage	V _{IN(ON)}	5	ULN2003A/L	V _{CE} = 2.0 V, I _C = 200 mA	—	—	2.4	V
				V _{CE} = 2.0 V, I _C = 250 mA	—	—	2.7	V
				V _{CE} = 2.0 V, I _C = 300 mA	—	—	3.0	V
		ULN2004A/L	V _{CE} = 2.0 V, I _C = 125 mA	—	—	5.0	V	
			V _{CE} = 2.0 V, I _C = 200 mA	—	—	6.0	V	
			V _{CE} = 2.0 V, I _C = 275 mA	—	—	7.0	V	
			V _{CE} = 2.0 V, I _C = 350 mA	—	—	8.0	V	
Input Capacitance	C _{IN}	—	All		—	15	25	pF
Turn-On Delay	t _{PLH}	8	All	0.5 E _{IN} to 0.5 E _{OUT}	—	0.25	1.0	μs
Turn-Off Delay	t _{PHL}	8	All	0.5 E _{IN} to 0.5 E _{OUT}	—	0.25	1.0	μs
Clamp Diode Leakage Current	I _R	6	All	V _R = 50 V, T _A = 25°C	—	—	50	μA
				V _R = 50 V, T _A = 70°C	—	—	100	μA
Clamp Diode Forward Voltage	V _F	7	All	I _F = 350 mA	—	1.7	2.0	V

Complete part number includes suffix to identify package style: A = DIP, L = SOIC.

**2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS**

Types ULN2023A, ULN2023L, ULN2024A, and ULN2024L
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at +25°C (unless otherwise noted).

Characteristic	Symbol	Test Fig.	Applicable Devices	Test Conditions	Limits			
					Min.	Typ.	Max.	Units
Output Leakage Current	I_{CEX}	1A	All	$V_{CE} = 95\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	< 1	50	μA
				$V_{CE} = 95\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	< 1	100	μA
		1B	ULN2024A/L	$V_{CE} = 95\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}, V_{IN} = 1.0\text{ V}$	—	< 5	500	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	2	All	$I_C = 100\text{ mA}, I_B = 250\text{ }\mu\text{A}$	—	0.9	1.1	V
				$I_C = 200\text{ mA}, I_B = 350\text{ }\mu\text{A}$	—	1.1	1.3	V
				$I_C = 350\text{ mA}, I_B = 500\text{ }\mu\text{A}$	—	1.3	1.6	V
Input Current	$I_{IN(ON)}$	3	ULN2023A/L	$V_{IN} = 3.85\text{ V}$	—	0.93	1.35	mA
			ULN2024A/L	$V_{IN} = 5.0\text{ V}$	—	0.35	0.5	mA
				$V_{IN} = 12\text{ V}$	—	1.0	1.45	mA
	$I_{IN(OFF)}$	4	All	$I_C = 500\text{ }\mu\text{A}, T_A = 70^\circ\text{C}$	50	65	—	μA
Input Voltage	$V_{IN(ON)}$	5	ULN2023A/L	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	2.4	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 250\text{ mA}$	—	—	2.7	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 300\text{ mA}$	—	—	3.0	V
			ULN2024A/L	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 125\text{ mA}$	—	—	5.0	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	6.0	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 275\text{ mA}$	—	—	7.0	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 350\text{ mA}$	—	—	8.0	V
Input Capacitance	C_{IN}	—	All	—	—	15	25	pF
Turn-On Delay	t_{PLH}	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	μs
Turn-Off Delay	t_{PHL}	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	μs
Clamp Diode Leakage Current	I_R	6	All	$V_R = 95\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	—	50	μA
				$V_R = 95\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	—	100	μA
Clamp Diode Forward Voltage	V_F	7	All	$I_F = 350\text{ mA}$	—	1.7	2.0	V

Complete part number includes suffix to identify package style: A = DIP, L = SOIC.



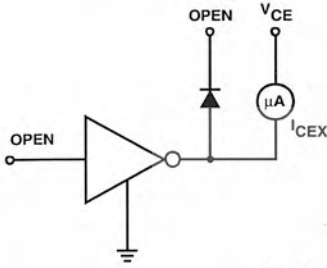
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2003 THRU 2024 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

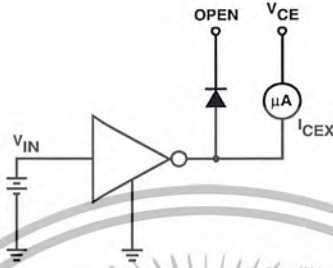
TEST FIGURES

FIGURE 1A



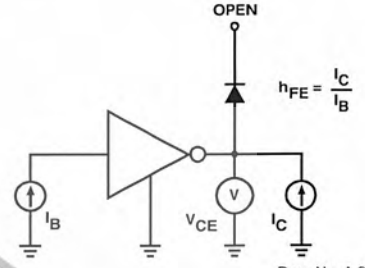
Dwg. No. A-9729A

FIGURE 1B



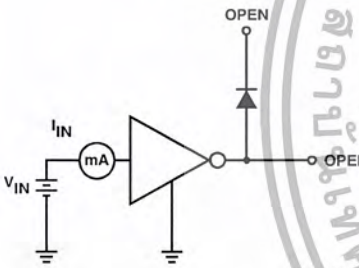
Dwg. No. A-9730A

FIGURE 2



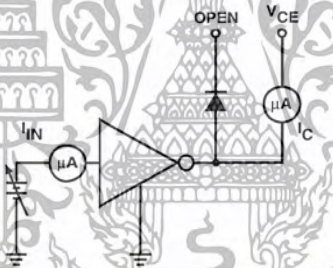
Dwg. No. A-9731A

FIGURE 3



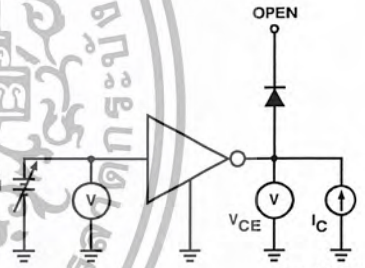
Dwg. No. A-9732A

FIGURE 4



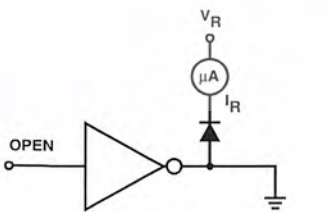
Dwg. No. A-9733A

FIGURE 5



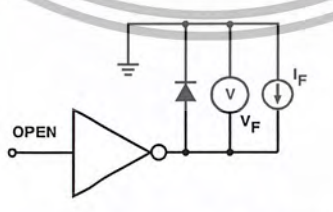
Dwg. No. A-9734A

FIGURE 6



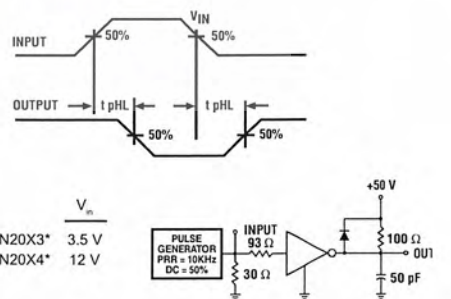
Dwg. No. A-9735A

FIGURE 7



Dwg. No. A-9736A

FIGURE 8



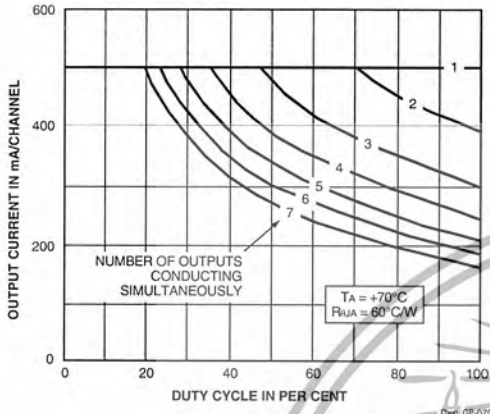
	V_m
ULN20X3*	3.5 V
ULN20X4*	12 V

* Complete part number includes a final letter to indicate package.

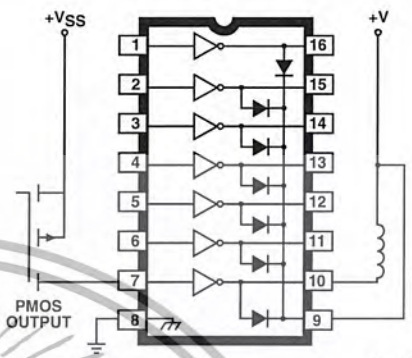
X = Digit to identify specific device. Specification shown applies to family of devices with remaining digits as shown.

2003 THRU 2024 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

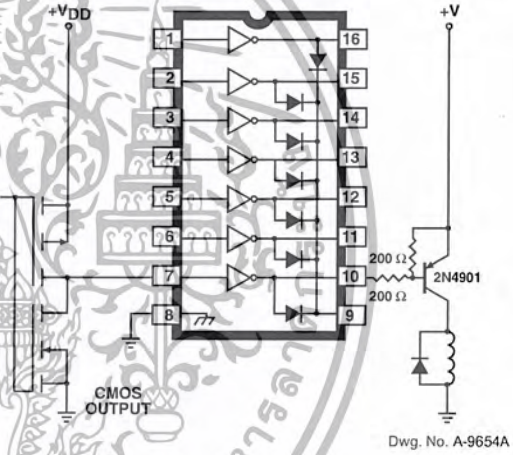
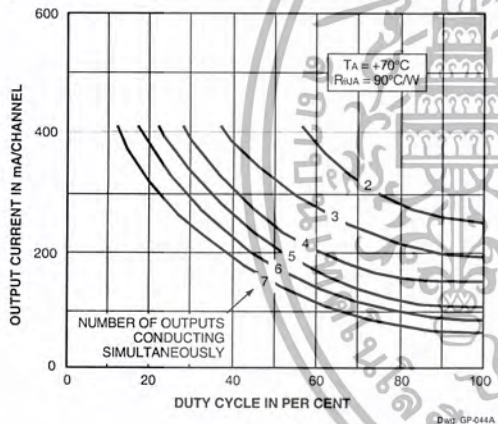
ALLOWABLE COLLECTOR CURRENT AS A FUNCTION OF DUTY CYCLE (Dual In-line-Packaged Devices, Suffix 'A')



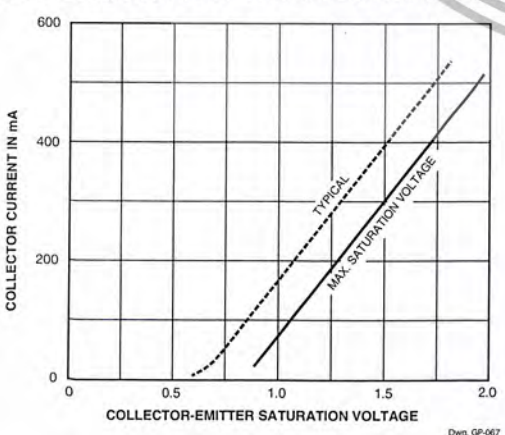
TYPICAL APPLICATIONS



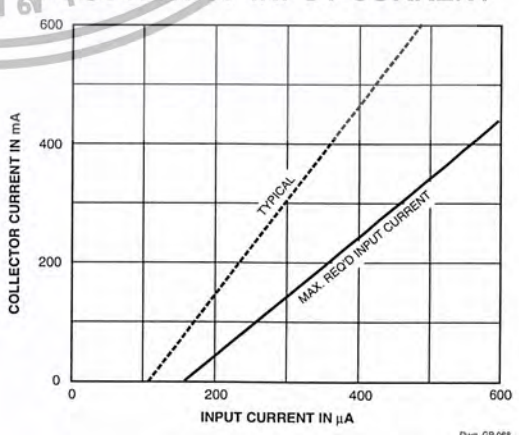
(Small-Outline-Packaged Devices, Suffix 'L')



SATURATION VOLTAGE AS A FUNCTION OF COLLECTOR CURRENT



COLLECTOR CURRENT AS A FUNCTION OF INPUT CURRENT

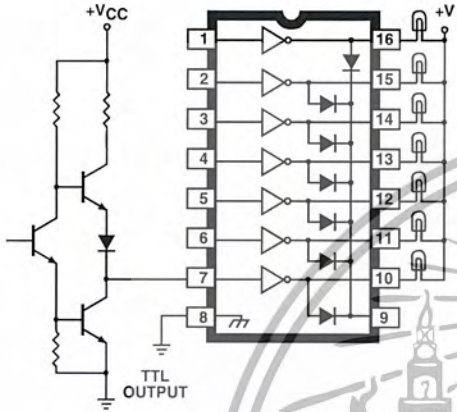


115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

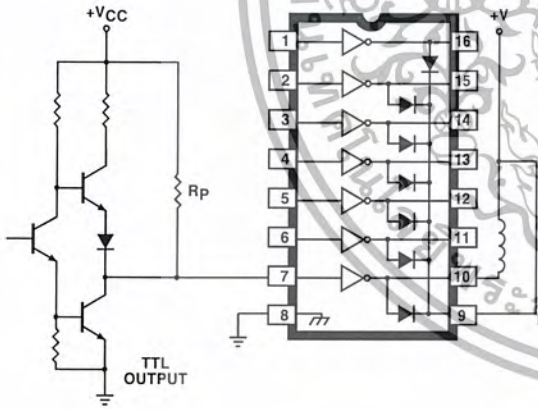
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS**

TYPICAL APPLICATIONS



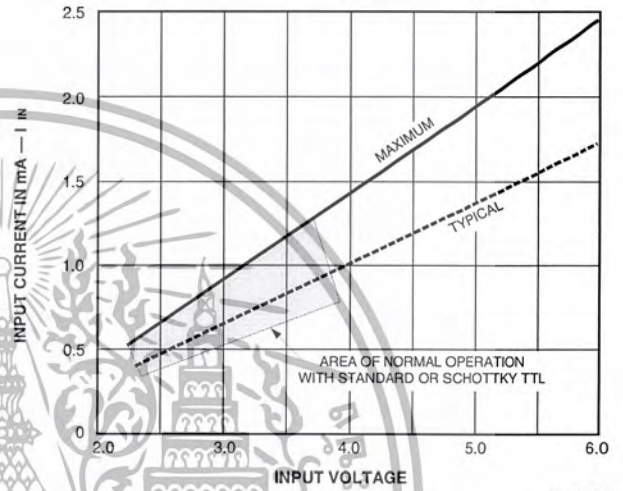
Dwg. No. A-9653A



Dwg. No. A-10,175

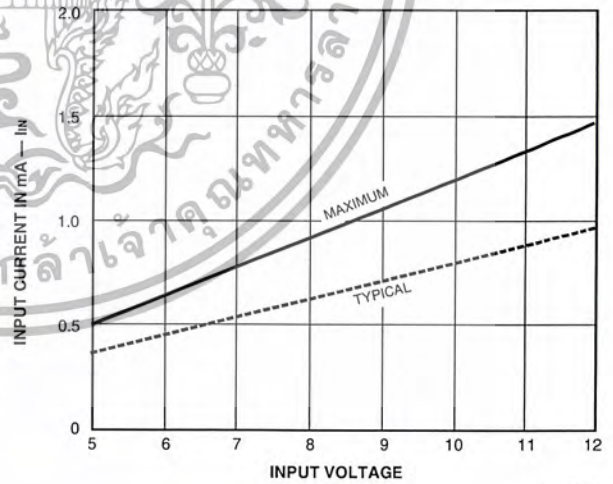
**INPUT CURRENT
AS A FUNCTION OF INPUT VOLTAGE**

Types ULN2003A, ULN2003L, ULN2023A, and ULN2023L



Dwg. GP-069

Types ULN2004A, ULN2004L, ULN2024A, and ULN2024L

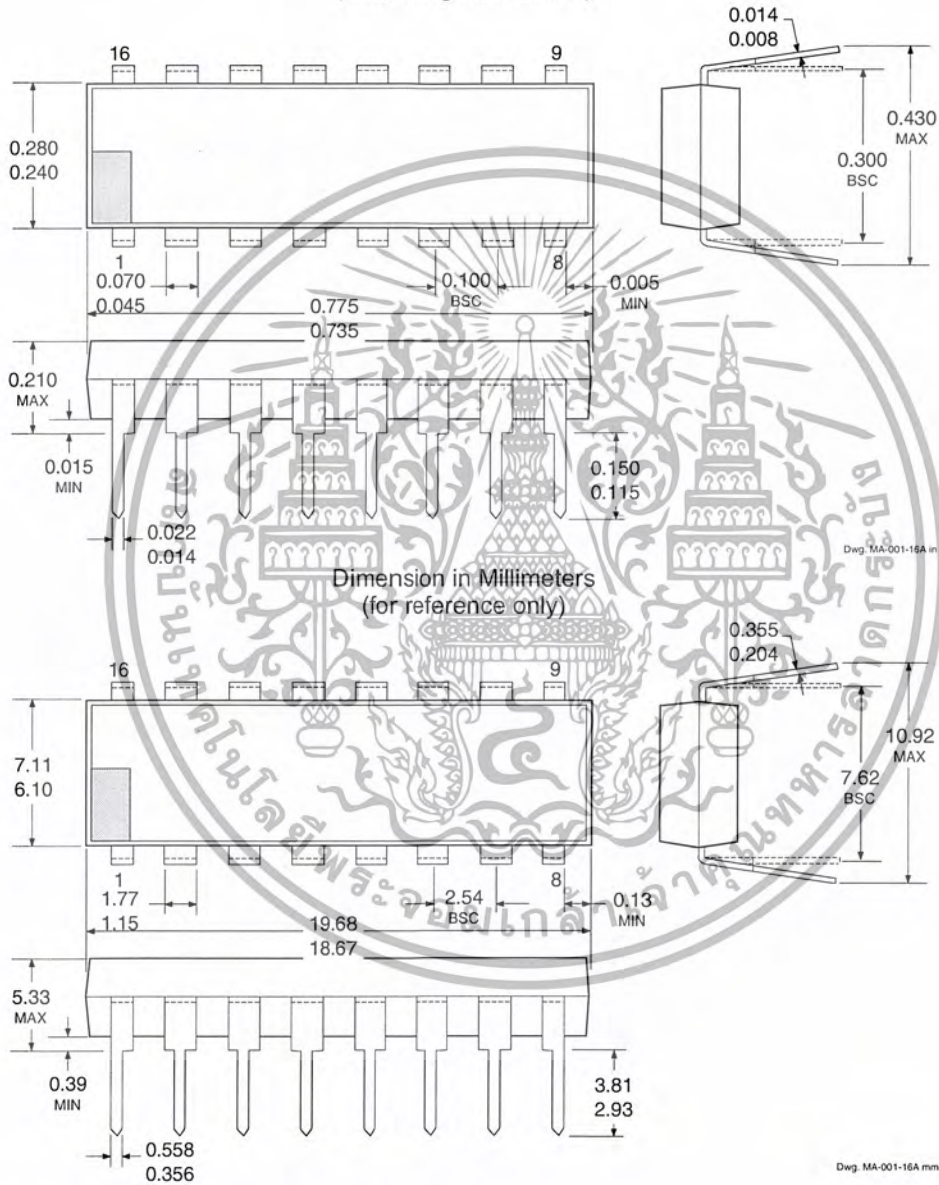


Dwg. GP-069-1

**2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS**

PACKAGE DESIGNATOR "A"

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)



- NOTES: 1. Leads 1, 8, 9, and 16 may be half leads at vendor's option.
2. Lead thickness is measured at seating plane or below.
3. Lead spacing tolerance is non-cumulative.
4. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.



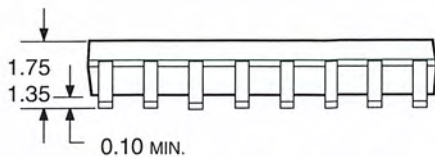
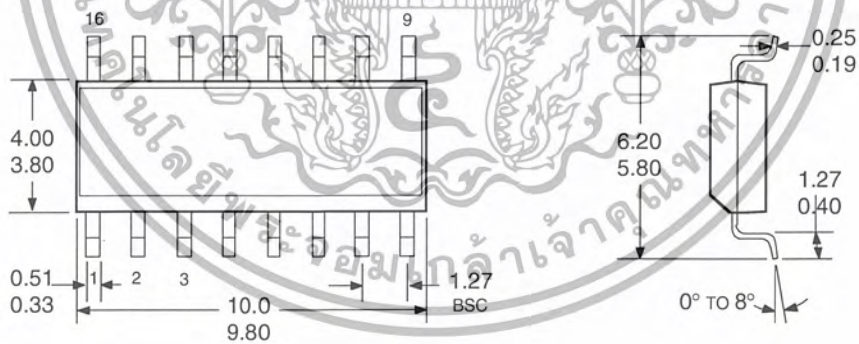
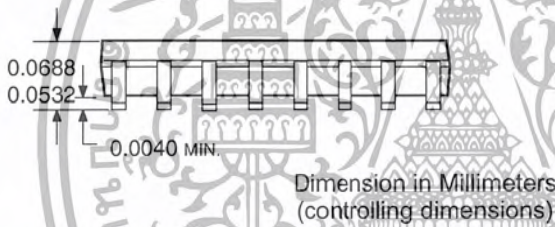
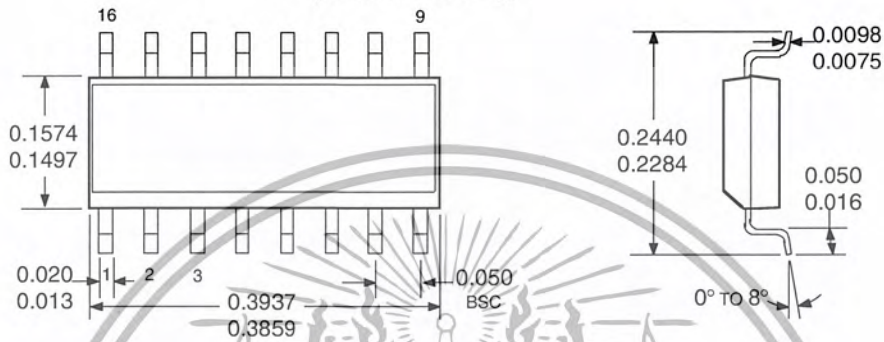
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS**

PACKAGE DESIGNATOR "L"

Dimensions in Inches
(for reference only)



Dwg. MA-007-16A mm

- NOTES: 1. Lead spacing tolerance is non-cumulative.
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.

2003 THRU 2024
HIGH-VOLTAGE,
HIGH-CURRENT
DARLINGTON ARRAYS



The products described here are manufactured under one or more U.S. patents or U.S. patents pending.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro products are not authorized for use as critical components in life-support devices or systems without express written approval.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้