

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การออกแบบและผลิตเฟืองเฉียงแบบอิงพารามิเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์
COMPUTER AIDED PARAMETRIC DESIGN AND MANUFACTURING OF
HELICAL GEAR**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**72912**
วัน,เดือน,ปี.....**25 ส.ย. 2550**

b. **1177458x**
i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและผลิตเฟืองเฉียงแบบอิงพารามิเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์
COMPUTER AIDED PARAMETRIC DESIGN AND MANUFACTURING OF
HELICAL GEAR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การออกแบบและผลิตเฟืองเฉียงแบบอิงพารามิเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์

COMPUTER AIDED PARAMETRIC DESIGN AND MANUFACTURING OF HELICAL GEAR

ผู้จัดทำ

- | | | |
|---------------|----------|-----------------------|
| 1. นายครรชิต | ภักดี | รหัสประจำตัว 47015351 |
| 2. นายธีรภัทร | ศรีรัตนะ | รหัสประจำตัว 47015362 |




(ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและผลิตเฟืองเฉียงแบบอิงพารามิเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์

นาย วรรณชิต	ภักดี	47015351
นาย ชีรภัทร	ศรีรัตนะ	47015362
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549		

บทคัดย่อ

เฟืองเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักร หรือเป็นตัวส่งถ่ายกำลังในเครื่องจักรกล เนื่องจากเฟืองนั้นมีลักษณะที่อยู่ยากซับซ้อนและมีลักษณะพิเศษเฉพาะตัว ซึ่งมีการออกแบบและมีการผลิตโดยเครื่องจักรชนิดพิเศษ ตัวอย่างเช่นเครื่องตัดด้วยฮ้อบ (Hobbing machine) และเครื่องไส (Shaping machine) ในบทความนี้ มีจุดประสงค์ที่จะนำเสนอการผลิตเฟืองเฉียง โดยเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอน (ก) การแสดงแบบทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง (ข) การวางแผนกระบวนการสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี (ค) การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ของมีดกัดมิลลิ่ง (Tool path planning) และวิธีการสำหรับควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน (NC code generation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Computer Aided Parametric Design and Manufacturing of Helical Gear

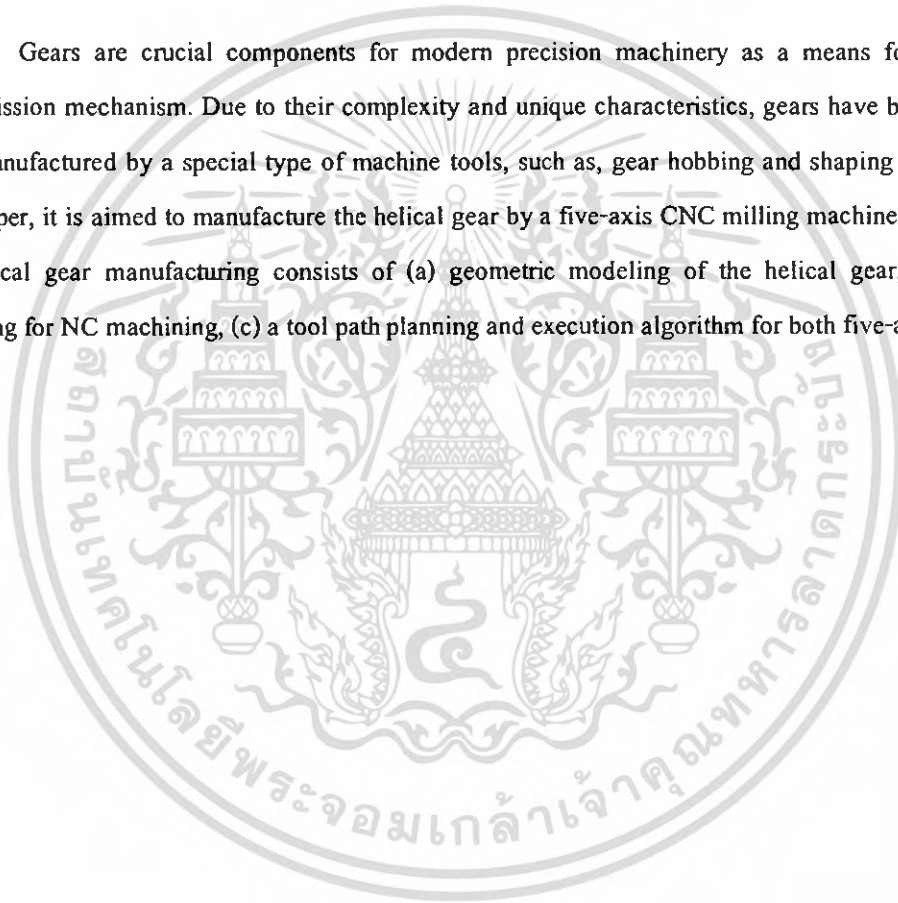
Mr. Kanchit Bhakdee 47015351

Mr. Teerapat Sriratana 47015362

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn Advisor

Abstract

Gears are crucial components for modern precision machinery as a means for the power transmission mechanism. Due to their complexity and unique characteristics, gears have been designed and manufactured by a special type of machine tools, such as, gear hobbing and shaping machines. In this paper, it is aimed to manufacture the helical gear by a five-axis CNC milling machine. The process of helical gear manufacturing consists of (a) geometric modeling of the helical gear, (b) process planning for NC machining, (c) a tool path planning and execution algorithm for both five-axis controls.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นบุคคลสำคัญ ที่ทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จลงได้ก็คือ อาจารย์ มนต์ศักดิ์ พิศาสาร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ทั้งนี้ยังต้องขอขอบคุณ พี่สมชาติ นราบัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ในการใช้โปรแกรม Unigraphics NX4 และความรู้เกี่ยวกับเครื่องกัดซีเอ็นซีที่จะใช้ในการผลิตเฟืองเฉียง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุด ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ ที่เป็นผลอันเนื่องมาจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายครรชิต

ภักดี

นายธีรภัทร

ศรีรัตนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีของเฟืองเฉียง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 คำจำกัดความ.....	4
2.3 มาตรฐานการบอกขนาดของฟันเฟือง.....	5
2.4 ระบบมาตรฐานของเฟือง.....	5
2.5 กรรมวิธีการผลิตเฟือง.....	6
2.5.1 วิธีผลิตเฟืองแบบ Fellow Shaping.....	6
2.5.2 วิธีผลิตเฟืองแบบ Hobbing.....	7
บทที่ 3 เฟืองที่มีรูปร่างแบบอิน โวลูต.....	8
3.1 บทนำ.....	8
3.2 เรขาคณิตของเส้นโค้งอิน โวลูต.....	9
3.2.1 อิน โวลูตและอี โวลูต.....	9
3.2.2 การประยุกต์ใช้เส้นโค้งอิน โวลูตกับเฟือง.....	9
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟันบนวงกลม.....	11
3.4 การขบกันของฟันเฟืองที่มีรูปร่างแบบอิน โวลูต.....	14
3.4.1 ค่าคงที่ของอัตราส่วนฟันเฟือง.....	14
3.4.2 เส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่.....	14
3.4.3 เส้นเชื่อมจุดศูนย์กลาง.....	14
3.4.4 มุมกด.....	14

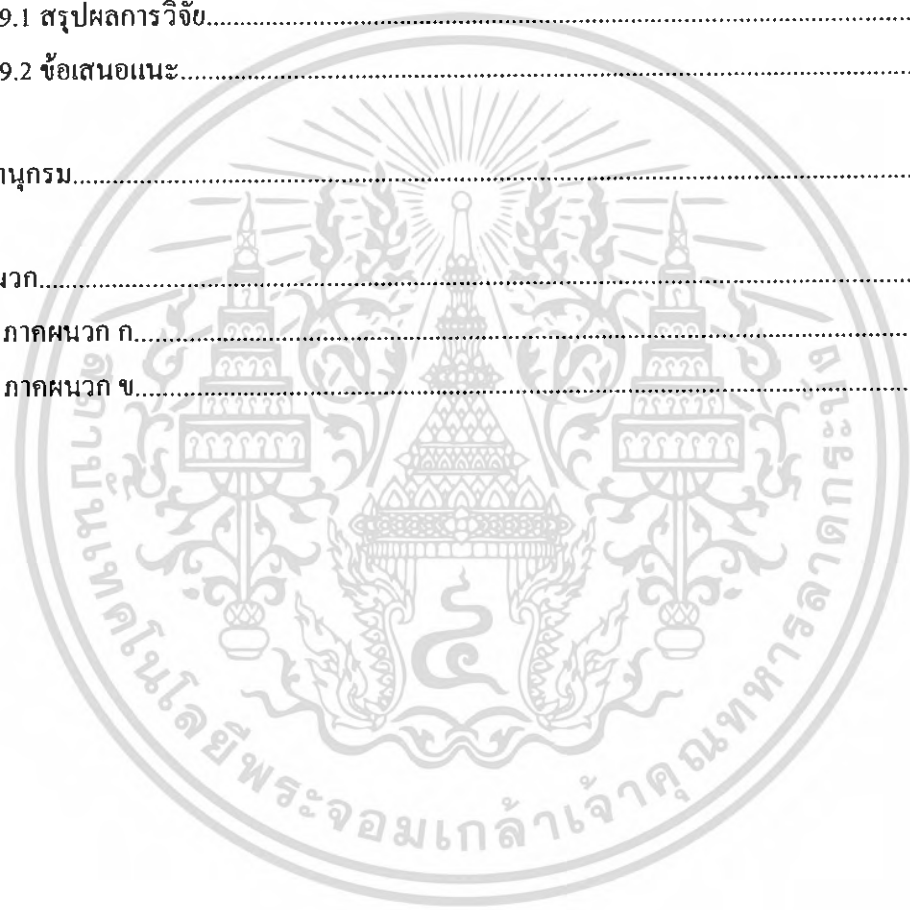
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การย้ายระบบพิกัด.....	15
4.1 บทนำ.....	15
4.2 ตัวดำเนินการในการย้ายระบบพิกัด.....	15
4.3 หลักการเลือกใช้ Transformation Matrix.....	17
4.3.1 หมุนรอบแกน X_2	17
4.3.2 หมุนรอบแกน Y_2	18
4.3.3 หมุนรอบแกน Z_2	18
บทที่ 5 การออกแบบตัวแปรและสมการทางคณิตศาสตร์ของเฟืองเฉียง.....	19
5.1 พารามิเตอร์ของแร็ก.....	19
5.2 การย้ายระบบพิกัด.....	20
5.2.1 การย้ายระบบพิกัด a ไปยังระบบพิกัด c	20
5.2.2 การย้ายระบบพิกัด c ไปยังระบบพิกัด 1.....	22
5.3 เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวขนาดหนึ่งหน่วย.....	24
5.4 สมการเงื่อนไขการขบกันของฟันเฟือง.....	25
5.5 สมการพื้นผิวของฟันเฟืองเฉียง.....	26
5.5.1 สมการพื้นผิวของฟันเฟืองด้านซ้าย.....	26
5.5.2 สมการพื้นผิวของฟันเฟืองด้านขวา.....	27
บทที่ 6 การเขียนโปรแกรมสร้างพื้นผิวของเฟืองเฉียง.....	28
6.1 บทนำ.....	28
6.2 หลักการทำงาน.....	28
6.3 ขั้นตอนการเขียนโค้ดและการประมวลผล.....	31
บทที่ 7 ความรู้พื้นฐานทางด้าน CAD/CAM.....	32
7.1 บทนำ.....	32
7.2 เทคโนโลยีทางด้าน CAD/CAM.....	32
7.2.1 กระบวนการทาง CAD.....	32
7.2.2 กระบวนการทาง CAM.....	32
7.2.3 กระบวนการทาง Post Processor.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 8 การสร้างแบบและจำลองการกัดเฟืองเฉียง.....	37
8.1 บทนำ.....	37
8.2 การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง.....	37
8.3 ลำดับขั้นตอนการจำลองการกัดเฟืองเฉียง.....	39
บทที่ 9 สรุปผลการวิจัย.....	52
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบบพื้นเพื่องมาตรฐานของเพื่องเคียง.....	5
2.2 ขนาดมาตรฐานของเพื่องที่ใช้ทั่วไป.....	6
3.1 ค่าของอินโวลูตฟังก์ชัน.....	12
7.1 การกำหนดลักษณะการใช้งาน Character มาตรฐาน EIA RS-274 B.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะรูปร่างของเฟืองเฉียง.....	3
2.2 การเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของเฟืองเฉียง.....	4
2.3 การผลิตเฟืองด้วย Shaper Cutter.....	6
2.4 การผลิตเฟืองด้วย Hob Cutter.....	7
3.1 พื้นฐานการสร้างเส้นโค้งอินโวลูต.....	8
3.2 อินโวลูตและอีโวลูต.....	9
3.3 การสร้างสมการเส้นโค้งอินโวลูต.....	10
3.4 แสดงเส้นโค้งอินโวลูต ที่ถูกสร้างขึ้นจากวงกลมฐาน.....	11
3.5 ลักษณะการขบกันของฟันเฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต.....	14
4.1 การบอกตำแหน่งพิกัดของระบบพิกัดต่างๆ.....	15
4.2 แสดงการหมุนระบบพิกัดรอบแกน X_2	17
4.3 แสดงการหมุนระบบพิกัดรอบแกน Y_2	18
4.4 แสดงการหมุนระบบพิกัดรอบแกน Z_2	18
5.1 พารามิเตอร์มาตรฐานของแร็กคัตเตอร์.....	19
5.2 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัด a และระบบพิกัด c	20
5.3 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัด c , f และระบบพิกัด l	22
6.1 หน้าต่างของ Command Window.....	28
6.2 แสดงการเปิดหน้าต่าง M-file.....	29
6.3 หน้าต่าง M-file ที่ใช้เขียนโค้ด.....	29
6.4 แสดงวิธีการประมวลผล.....	30
6.5 แสดงผลลัพธ์ของพื้นที่ผิวในหน้าต่างของ Figure.....	30
7.1 แสดงขั้นตอนการทำ CAD/CAM.....	33
8.1 การป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเฟืองเฉียงบนโปรแกรม Camnetics GearTrax 2003.....	37
8.2 การขึ้นรูปร่างทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียงบนโปรแกรม SolidWorks 2003.....	38
8.3 เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Unigraphics NX4.....	39
8.4 การเปิดชิ้นงานที่มีอยู่ใน Directory.....	40
8.5 การเข้า Modeling Application และการสร้าง Blank.....	41
8.6 การเข้า Manufacturing Application และการเลือกสถานะของเครื่องจักร.....	42
8.7 การ Create Tool.....	43
8.8 การ Create Geometry.....	44
8.9 การ Create Operation.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.10 การเลือกพื้นผิวและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการเดินของ Tool.....	45
8.11 การวางแผนลักษณะการเดินหรือการสร้าง Tool Path.....	46
8.12 การ Generate การเคลื่อนที่ของ Tool.....	46
8.13 การ Verify การเคลื่อนที่ของ Tool.....	47
8.14 แสดงการกัดชิ้นงาน โดยการเคลื่อนที่ตามเส้นทางของ Tool Path.....	47
8.15 ลักษณะพื้นผิวของพื้นผิวที่ได้จากการกัดชิ้นงาน.....	48
8.16 เครื่องกัด CNC ยี่ห้อ Mazak รุ่น Integrex e-650H.....	48
8.17 การ Simulation การกัดเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC.....	49
8.18 การแปลง Code ให้ครบทุกพื้นผิว โดยการ Transformation.....	50
8.19 แสดงการกัดเฟืองเฉียงครบทุกพื้นผิว.....	50
8.20 แสดง NC Code ที่จะนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัด CNC 5 แกน.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 เป็นต้นมา ได้มีการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณเป็นส่วนใหญ่ จากนั้นมาด้วยความก้าวหน้าทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงแต่ขีดความสามารถสูงขึ้น และที่สำคัญคือ ราคาถูกลง จึงมีการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในงานด้านต่างๆ กว้างขวางขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการพัฒนาทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อประยุกต์ใช้งานต่างๆ จนเกิดเทคโนโลยีใหม่ขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกส์เพื่อช่วยในการสร้างแบบ ซึ่งเรียกกันว่า การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ หรือ CAD (Computer Aided Design) และต่อมา ก็ได้มีการพัฒนาใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตด้วย โดยอาจนำไปใช้ควบคุมเครื่องจักรที่ทำหน้าที่ผลิตสินค้าหรือชิ้นงานในอุตสาหกรรม ซึ่งเรียกกันว่า การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต หรือ CAM (Computer Aided Manufacturing) และเนื่องจาก CAM นั้นต้องอาศัยข้อมูลจาก CAD ดังนั้น CAD และ CAM นี้จึงมักจะใช้งานร่วมกัน จนทำให้เทคโนโลยีนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า CAD/CAM ซึ่ง CAD/CAM นี้เอง ที่ถือว่าเป็นพื้นฐานของการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในงานอุตสาหกรรม

ในปัจจุบัน เพื่อเป็นกลไกพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกใช้ในการส่งผ่านการเคลื่อนที่ หรือ แรงในเครื่องจักรกลประเภทต่างๆ ดังนั้นจึงมีความต้องการใช้เฟืองที่มีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป การที่จะได้มาซึ่งเฟืองเหล่านี้ทำให้เกิดกรรมวิธีการผลิตต่างๆ ขึ้นมามากมายหลายวิธี ที่พบโดยทั่วไป ได้แก่ การหล่อ (Casting) การปั๊ม (Stamping) และการใช้มีดตัดเฟือง (Machining) ซึ่งกรรมวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเฟืองนั้น ก็จะได้เฟืองที่มีลักษณะและคุณสมบัติที่จะนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน

การผลิตเฟืองในปัจจุบันตามกรรมวิธีต่างๆ ดังกล่าว จะเห็นว่าเป็นกรรมวิธีการผลิตที่ค่อนข้างจะตายตัว ไม่ยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดและลักษณะรูปร่างของเฟือง เนื่องจากการผลิตเฟืองที่มีขนาดและรูปร่างลักษณะที่แตกต่างกันออกไปนั้น จะต้องมีการเปลี่ยนเครื่องจักรหรือเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต เช่น การผลิตเฟืองที่มีขนาดแตกต่างกัน ก็จะต้องใช้คัตเตอร์หรือแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับขนาดหรือรูปร่างของเฟืองนั้นๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้จัดทำจึงเห็นความสำคัญที่จะนำระบบ CAD/CAM มาใช้ในการออกแบบและผลิตเฟืองเฉียง (Helical Gear) โดยซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้ออกแบบและช่วยในการผลิต ได้แก่ โปรแกรม Matlab และ Unigraphics ซึ่งงานวิจัยนี้จะเน้นถึงการออกแบบตามลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต รูปแบบของพื้นผิวของเฟืองเฉียงที่ถูกสร้างโดยอาศัยหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยอ้างอิงอยู่บนพื้นฐานการทำงานของเฟือง การนำความรู้ด้านเรขาคณิตมาเกี่ยวข้อง และการผลิตเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC อีกทั้งการออกแบบและการผลิตที่มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงแก้ไขขนาดของเฟืองเฉียงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการสร้างรูปร่างของพื้นผิวแบบ เส้นโค้งอินโวลูต
- 1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา สมการทางคณิตศาสตร์ของเฟืองเฉียงและนำไปเขียนโปรแกรมสร้างพื้นผิวของเฟืองเฉียง สร้างแบบจำลอง (Solid Model) และทำการจำลองการกัดเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC ในคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการแปลงเป็น NC Code เพื่อนำไปควบคุมเครื่องกัด CNC ในการผลิตเฟืองเฉียงต่อไป ซึ่งมีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยไว้ดังนี้

- 1.3.1 สร้างรูปร่างของเฟืองเฉียงด้วยหลักการของการประยุกต์ทางเรขาคณิต (Applied Geometry)
- 1.3.2 นำเอากรรมวิธีการผลิตโดยใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี มาช่วยในการขึ้นรูปร่างพื้นผิว

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีของเฟืองเฉียง
- 1.4.2 ออกแบบตัวแปรและสมการทางคณิตศาสตร์ของเฟืองเฉียง
- 1.4.3 เขียน โปรแกรมสร้างพื้นผิวของเฟืองเฉียง โดยใช้โปรแกรม Matlab
- 1.4.4 สร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง
- 1.4.5 สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของใบมีดและ NC Code โดย Unigraphics
- 1.4.6 ทำการจำลองการผลิตเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC 5 แกน

บทที่ 2

ทฤษฎีของเฟืองเฉียง

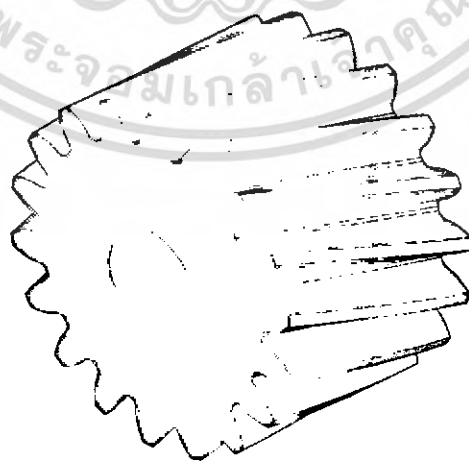
2.1 บทนำ

เฟืองเฉียง (Helical Gear) เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่พบอยู่ในเครื่องจักรกลทั่วไป โดยใช้ทำหน้าที่ส่งกำลังและอาการหมุนระหว่างเพลาที่ขนานกัน ลักษณะของฟันเฟืองนั้นจะไม่ขนานกับแกนการหมุนของเฟืองคังเช่นเฟืองตรง เนื่องจากฟันของเฟืองเฉียงจะทำมุมเอียงกับแกนการหมุน

ในการส่งถ่ายกำลังระหว่างคู่ฟันเฟืองของเฟืองเฉียง การสัมผัสเริ่มต้นจะเป็นลักษณะจุด (point contact) และเมื่อเฟืองหมุนไปก็จะเปลี่ยนเป็นการสัมผัสแบบเส้น (line contact) ตามแนวทแยงของหน้าฟันเฟือง การที่ฟันค้อยๆ ขบกัน จึงทำให้การส่งถ่ายกำลังจากฟันซี่หนึ่งไปยังฟันอีกซี่หนึ่งเกิดขึ้นอย่างราบเรียบและนุ่มนวลกว่าแบบเฟืองตรง จึงทำให้มีเสียงเงียบกว่าและทำให้เฟืองเฉียงสามารถส่งถ่ายกำลังได้มากกว่าความเร็วรอบสูง

เฟืองเฉียงที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ ยังไม่มีสัดส่วนมาตรฐานที่ยอมรับกันทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแบบเฟืองเพียงเล็กน้อย จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการที่จะซื้ออุปกรณ์ตัดฟันพิเศษที่จะใช้ตัดฟันเฟืองตามสัดส่วนที่ต้องการพอดี ทั้งนี้เพราะเฟืองเฉียงจำนวนมากที่มีแบบผัดเพียงเล็กน้อย ก็ยังคงสามารถทำงานได้ด้วยดี

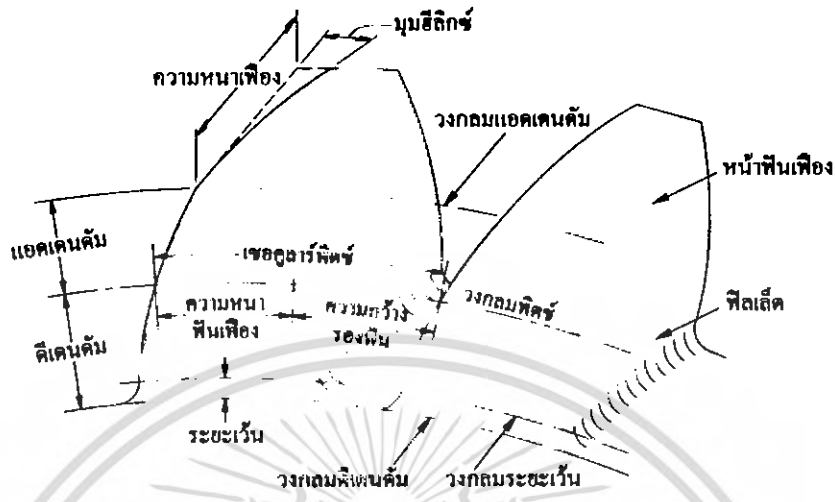
คำแนะนำทั่วไปก็คือ ให้ใช้สัดส่วนของฟันเฟืองโดยถือมุมมก 20 องศา เป็นหลัก สำหรับสัดส่วนอื่นๆ สามารถใช้ตามตารางที่ 2.1 ได้ ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้เหมาะสำหรับมุมเอียง จาก 0 ถึง 30 องศา แต่ค่าที่ใช้กันมากจะอยู่ระหว่าง 15 ถึง 25 องศา โดยที่ยังมิได้มีการยึดถือมุมใดเป็นมาตรฐานที่แน่นอน สำหรับความหนาของเฟืองเฉียงก็จะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไปตามกำลังงานที่ต้องการส่งผ่าน



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของเฟืองเฉียง

2.2 คำจำกัดความ

ในการให้คำจำกัดความเรียกชื่อ และระยะต่างๆ ของเฟืองเฉียง พิจารณาจากรูปที่ 2.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของเฟืองเฉียง

วงกลมพิตช์ (Pitch circle) เป็นแนววงกลมทางทฤษฎีที่ฟันเฟืองทั้งคู่สัมผัสซึ่งกันและกัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ (Pitch diameter - d) สำหรับใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดของเฟือง

ระยะพิตช์ในแนวเส้นรอบวง (Circular pitch - p_c) เป็นระยะที่วัดบนวงกลมพิตช์จากจุดหนึ่งบนฟันเฟืองไปยังจุดเดียวกันบนฟันถัดไป ดังนั้น ระยะพิตช์ในแนวเส้นรอบวงจึงมีค่าเท่ากับความหนาของฟัน (tooth thickness) บวกด้วยความกว้างของร่องฟัน (width of space)

ไดเมทริลพิตช์ (Diametral pitch - P) เป็นอัตราส่วนของจำนวนฟันเฟืองต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ ไดเมทริลพิตช์เป็นค่าดัชนีสำหรับบอกขนาดของฟันเฟืองในระบบหน่วยอังกฤษ หน่วยที่ใช้วัดคือนิ้ว ดังนั้นความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์จึงใช้บอกเป็นนิ้ว

โมดูล (Module - m) เป็นอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ต่อจำนวนของฟันเฟือง โมดูลเป็นค่าดัชนีที่บอกขนาดของฟันเฟืองในระบบหน่วยเอสไอ หน่วยที่ใช้วัดคือมิลลิเมตร

แอดเดนดัม (Addendum - a) เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีจากยอดฟัน (top land) ถึงเส้นวงกลมพิตช์

ดิเดนดัม (Dedendum - b) เป็นระยะที่วัดในแนวรัศมีจากโคนฟัน (bottom land) ถึงวงกลมพิตช์ ดังนั้นความสูงของฟันเฟืองคือผลรวมระหว่างค่าดิเดนดัมและแอดเดนดัม

วงกลมระยะเว้น (Clearance circle) เป็นวงกลมที่สัมผัสกับวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองที่มาขบกัน ดังนั้นระยะเว้น (clearance - c) คือผลต่างระหว่างค่าดิเดนดัมและแอดเดนดัม

ความหนาฟันเฟือง (Tooth thickness - t) คือความหนาของฟันเฟือง ซึ่งเป็นระยะที่วัดบนวงกลมพิตช์ในหนึ่งฟันเฟือง

ความหนาเฟือง (Gear thickness - w) คือความหนาของเฟือง โดยวัดในทิศทางเดียวกับแนวแกนของการหมุนของเฟือง

มุมฮิลิกซ์ (Helix angle - β) คือมุมเอียงของฟันเฟืองเฉียง โดยวัดทำมุมกับแนวแกนการหมุนของเฟือง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มาตรฐานการบอกขนาดของฟันเฟือง

ดัชนีสำหรับบอกขนาดของฟันเฟือง อาจจะถูกเป็นพิตช์ในระบบหน่วยอังกฤษ หรือบอกเป็น โมดูลในระบบหน่วยเอสไอ จากคำจำกัดความที่ผ่านมาจะได้ว่า

$$\text{โคมิทรัลพิตช์} \quad P = \frac{N}{d} \quad (2.3.1)$$

โดยที่ d มีหน่วยเป็นนิ้ว

$$\text{โมดูล} \quad m = \frac{d}{N} \quad (2.3.2)$$

โดยที่ d มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

$$\text{เชอคูลาร์พิตช์} \quad p_c = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad (2.3.3)$$

ดังนั้น

$$p_c P = \pi \quad (2.3.4)$$

2.4 ระบบมาตรฐานของเฟือง

มาตรฐานเฟืองที่ใช้ส่วนมากมาจาก American Gear Manufacturers Association (AGMA) และ American National Standards Institute (ANSI) โดยจะบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอดเดนดัม ดีเดนดัม ความลึกของฟันเฟือง ความหนาของฟันเฟือง และมุมกดของฟันเฟือง การกำหนดมาตรฐานของฟันเฟือง มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถเลือกใช้เฟืองที่มีจำนวนฟันต่าง ๆ แทนกันได้

ตารางที่ 2.1 ระบบฟันเฟืองมาตรฐานของเฟืองเฉียง

Quantity	Coarse pitch (up to 20P)	Fine pitch (20P and up)
Pressure angle	20°	20°
Addendum	$\frac{1.000}{P}$	$\frac{1.000}{P}$
Dedendum	$\frac{1.250}{P}$	$\frac{1.200}{P} + 0.002 \text{ in.}$
Working depth	$\frac{2.000}{P}$	$\frac{2.000}{P}$
Whole depth (min.)	$\frac{2.250}{P}$	$\frac{2.200}{P} + 0.002 \text{ in.}$
Circular tooth thickness	$\frac{\pi}{2P}$	$\frac{\pi}{2P}$
Basic clearance (min.)	$\frac{0.250}{P}$	$\frac{0.200}{P} + 0.002 \text{ in.}$
Clearance (shaved or ground teeth)	$\frac{0.350}{P}$	$\frac{0.350}{P} + 0.002 \text{ in.}$
Minimum number of pinion teeth	18	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ขนาดมาตรฐานของเฟืองที่ใช้ทั่วไป

Diametral Pitch	
Coarse	2, 2.25, 2.5, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16
Fine	20, 24, 32, 40, 48, 64, 80, 96, 120, 150, 200
Modules	
Preferred	1, 1.25, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50
Next choice	1.125, 1.375, 1.75, 2.25, 2.75, 3.5, 4.5, 5.5, 7, 9, 11, 14, 18, 22, 28, 36, 45

ไดมิทรัลพิทช์ขนาดตั้งแต่ 20 ขึ้นไป หรือ โมดูลขนาดตั้งแต่ 1.25 ลงมา ถือว่าเป็นพิทช์ละเอียด (fine pitch) ส่วนขนาดที่นอกเหนือจากนี้จะเป็นพิทช์หยาบ (coarse pitch)

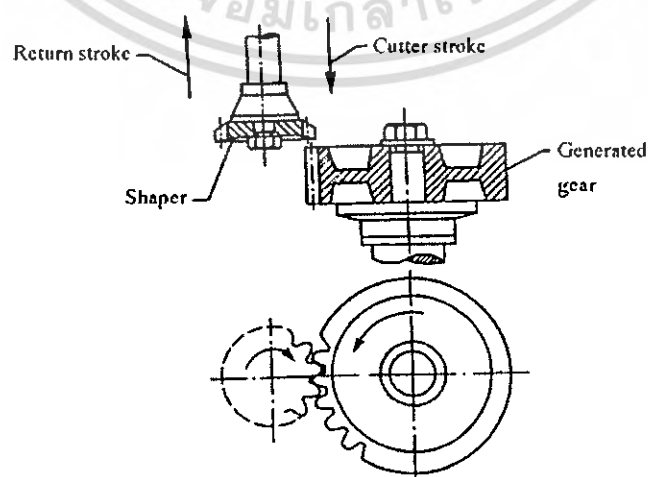
2.5 กรรมวิธีการผลิตเฟือง

เฟืองเป็นกลไกพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ถูกใช้ในการส่งผ่านการเคลื่อนที่ หรือแรงในเครื่องจักรกลประเภทต่างๆ ดังนั้นจึงมีความต้องการใช้เฟืองที่มีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป การที่จะได้มาซึ่งเฟืองเหล่านี้ทำให้เกิดกรรมวิธีการผลิตต่างๆ ขึ้นมามากมายหลายวิธี ที่พบโดยทั่วไป ได้แก่ การหล่อ (casting) การปั๊ม (stamping) และการใช้มีดตัดเฟือง (machining)

นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆ อีกหลายวิธี แต่เป็นวิธีที่ไม่ได้ใช้กันแพร่หลายมากนัก จึงไม่นำมากล่าวถึงในที่นี้และจะเน้นเฉพาะวิธีที่ใช้มีดกัดเฟืองเท่านั้น

2.5.1 วิธีผลิตเฟืองแบบ Fellow Shaping

วิธีนี้ใช้มีดตัดที่เป็นพีเนียนหรือเร็ก (ดังรูปที่ 2.3) มีดตัดพีเนียนและเฟืองเปล่าจะหมุนไปเช่นเดียวกับเฟืองขบกัน มีดตัดจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนวแกนการหมุน โดยตัดไสร่องฟันตามความลึกที่ปรับแต่ละครั้งเมื่อเฟืองหมุนครบหนึ่งรอบ



รูปที่ 2.3 การผลิตเฟืองด้วย Shaper Cutter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 วิธีผลิตเฟืองแบบ Hobbing

วิธีนี้ใช้มีดตัดรูปทรงกระบอกคล้ายเฟืองหนอน (ดังรูปที่ 2.4) มีดตัดฮ็อบบิงและเฟืองเปล่า (gear blank) จะหมุนพร้อมกันและต่อเนื่องด้วยอัตราเร็วเชิงมุมที่เหมาะสม เพื่อให้ตรงกับร่องฟันที่ต้องการตัดพอดี การตัดเฟืองจะใช้มีดตัดอันเดียวสำหรับแต่ละขนาดของพิตซ์และมุมกดคั่นของเฟืองนั้นๆ



รูปที่ 2.4 การผลิตเฟืองด้วย Hob Cutter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต

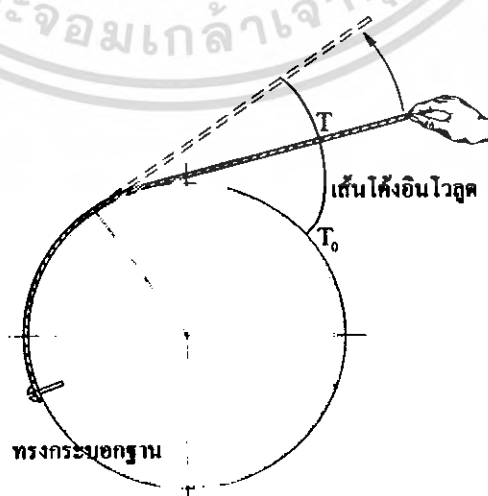
3.1 บทนำ

ลักษณะของฟันเฟืองนั้นมีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ แบบ Cycloidal และ Involute ในช่วงแรกๆ นิยมใช้ฟันเฟืองที่เป็นแบบ Cycloidal แต่ต่อมาได้เปลี่ยนเป็นแบบ Involute เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีผลดีกว่าหลายประการ แต่ที่สำคัญที่สุดคือ การผลิตทำได้ง่ายกว่าและระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองทั้งสอง อาจจะเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ทำให้สัดส่วนความเร็วเชิงมุมเปลี่ยนไป

เฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย ออยเลอร์ พบว่ามีการนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

- 1) เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต สามารถผลิตฟันเฟืองได้มีความเที่ยงตรงสูง
- 2) แปรผันความหนาของฟันเฟืองได้ง่าย และไม่บังคับระยะห่างระหว่างฟันเฟือง โดยสามารถเปลี่ยนการกำหนดเครื่องมือในการสร้างฟันเฟืองได้
- 3) เฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต โดยที่ไม่มีข้อบังคับมาตรฐานในการสร้าง สามารถสร้างได้ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือมาตรฐานให้เข้ากับเฟืองมาตรฐาน
- 4) การติดตั้งที่ผิดพลาดโดยที่ระยะห่างระหว่างเฟืองไม่ตรงตามทฤษฎี จะไม่ก่อให้เกิดค่าการส่งผ่านที่ผิดพลาด

เฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูตนั้น เส้นโค้งได้ถูกสร้างบนพื้นฐานความคิดที่ว่า เส้นโค้งอินโวลูต เกิดจาก การนำเส้นเชือกมาวางรอบทรงกระบอกฐาน เมื่อคลายเชือกออกทีละน้อย ณ จุดใดๆ ที่ทำให้เกิดมุมฉากระหว่างเส้นเชือกกับรัศมีวงกลม จะให้จุด T ใดๆ และเมื่อทำการลากเส้นเชื่อมจุด T จะก่อให้เกิดเส้นโค้งอินโวลูต (Involute Curve) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พื้นฐานการสร้างเส้นโค้งอินโวลูต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

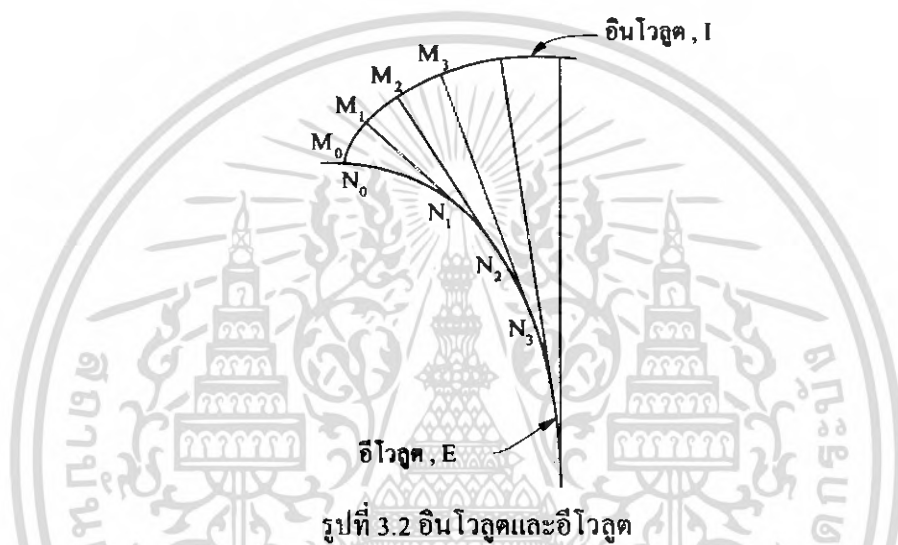
3.2 เรขาคณิตของเส้นโค้งอินโวลูต

เริ่มด้วยคำจำกัดความของคำว่า อินโวลูต (Involute) และอีโวลูต (Evolute) ของเส้นโค้ง

3.2.1 อินโวลูตและอีโวลูต

พิจารณาจากเส้นโค้งอินโวลูต (I) ดังรูปที่ 3.2 ให้ $\overline{M_i N_i}$, ($i = 1, 2, \dots, n$) แทนรัศมีส่วนโค้งของเส้นโค้ง I ที่จุด M_i โดยที่ N_i เป็นจุดศูนย์กลางกลางของส่วนโค้ง ซึ่งตำแหน่งจุดศูนย์กลางกลางของส่วนโค้งนี้ จะเรียกว่า อีโวลูต (E) ของเส้นโค้ง I ลักษณะหลักของอีโวลูตของเส้นโค้ง I มีดังนี้

- 1) ส่วนของเส้นตรง $\overline{M_i N_i}$ ที่จุด M_i ของเส้นโค้ง I สัมผัสกับ E ที่จุด N_i ,
- 2) อีโวลูตของเส้นโค้ง I เป็น เอนVELOPE (Envelope) กับตำแหน่งของ $\overline{M_i N_i}$ ไปยัง I



3.2.2 การประยุกต์ใช้เส้นโค้งอินโวลูตกับเฟือง

พิจารณากรณีเฉพาะ เมื่อให้อีโวลูตเป็นวงกลม ซึ่งให้เป็นวงกลมฐานรัศมี r ดังนั้นอินโวลูตก็จะ เป็นรูปร่างของฟันเฟือง การแยกออกจากกันทั้งสองด้านของเส้นโค้งอินโวลูต (ดังรูปที่ 3.3) ถูกสร้างจากจุด M_0 ของเส้นตรง มีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา โดยเส้นโค้งอินโวลูตทั้งสองนั้นเปรียบเสมือนรูปร่างแต่ละด้านของฟันเฟือง

การวิเคราะห์รูปร่างของเส้นโค้งอินโวลูต ในส่วนที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ พิกัดที่จุด M ของเส้นโค้งอินโวลูต หาได้โดยสมการเวกเตอร์คือ

$$\overline{OM} = \overline{OP} + \overline{PM} \quad (3.1)$$

โดยที่

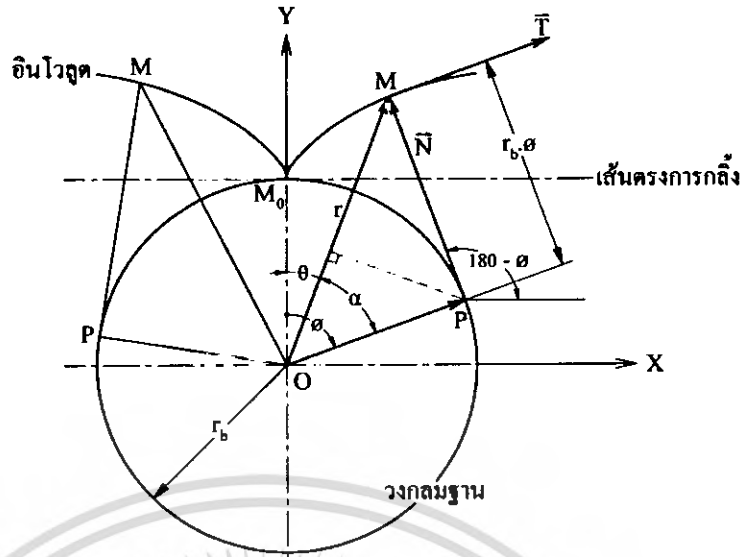
$$\overline{OP} = \overline{OP}[\sin \phi \quad \cos \phi]^T \quad (3.2)$$

$$\overline{PM} = \overline{PM}[-\cos \phi \quad \sin \phi]^T \quad (3.3)$$

เนื่องจากการหมุนโดยปราศจากการเลื่อนไกล และ ϕ เป็นมุมที่สัมพันธ์กับการหมุน

$$\overline{PM} = \widehat{M_0 P} = r_s \phi \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การสร้างสมการเส้นโค้งอินโวลูต

จากสมการ (3.1) ถึง (3.4) จะได้ว่า

$$x = r_b (\sin \phi - \phi \cos \phi) \quad y = r_b (\cos \phi + \phi \sin \phi) \quad (3.5)$$

รูปร่างในแบบอื่นๆ ของเส้นโค้งอินโวลูต ขึ้นอยู่กับการประยุกต์โดยการแปรเปลี่ยนตัวแปร α สมการของเส้นโค้งอินโวลูต ที่อาจนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างสมบูรณ์คือ

$$x = r \sin \theta \quad y = r \cos \theta \quad (3.6)$$

โดยที่

$$r = \frac{r_b}{\cos \alpha}$$

พิจารณาจาก $\triangle OPM$

$$\frac{PM}{OP} = \frac{M_0P}{OP} = \frac{OP \phi}{OP} = \tan \alpha$$

$$\phi = \theta + \alpha$$

$$\theta + \alpha = \tan \alpha$$

$$\theta = \tan \alpha - \alpha$$

$(\tan \alpha - \alpha)$ ถูกเรียกว่า อินโวลูตฟังก์ชัน และเขียนแทนด้วย $inv \alpha$ โดยที่มุม α มีหน่วยเป็นเรเดียน ดังนั้นจะได้

$$inv \alpha = \tan \alpha - \alpha \quad (3.7)$$

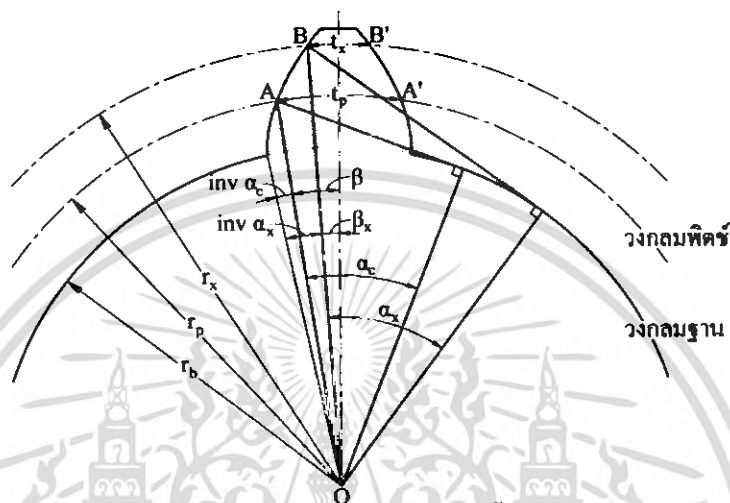
จากสมการ (3.6) และ (3.7) จะได้ว่า

$$x = \frac{r_b}{\cos \alpha} \sin(inv \alpha) \quad y = \frac{r_b}{\cos \alpha} \cos(inv \alpha) \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟันบนวงกลม

พิจารณาว่าความหนาของฟันเฟือง (t_p) เท่ากับ $\widehat{AA'}$ บนวงกลมพิตช์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จุดประสงค์เพื่อหาความหนาของฟันเฟืองที่ระยะใดๆ ในที่นี้จะแสดงการหาความหนาของฟันเฟือง (t_x) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\widehat{BB'}$ บนวงกลมรัศมีเท่ากับ r_x โดยที่ t_x จะอยู่ในเทอมของไดมิทรัลพิตช์ (P), มุมกด (α_c) จำนวนฟันเฟือง (N) และรัศมี r_x



รูปที่ 3.4 แสดงเส้นโค้งอินโวลูต ที่ถูกสร้างขึ้นจากวงกลมฐาน

ครึ่งหนึ่งของความหนาฟันเฟือง และมุม β (หรือ β_x) ที่สอดคล้องกัน เป็นความสัมพันธ์ที่อธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$\beta = \frac{\widehat{AA'}}{2r_p} = \frac{t_p}{2r_p} \qquad \beta_x = \frac{\widehat{BB'}}{2r_x} = \frac{t_x}{2r_x} \tag{3.9}$$

จากรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\beta_x = \beta + \text{inv } \alpha_c - \text{inv } \alpha_x \tag{3.10}$$

โดยที่

$$\text{inv } \alpha_c = \tan \alpha_c - \alpha_c \qquad \text{inv } \alpha_x = \tan \alpha_x - \alpha_x$$

$$\cos \alpha_x = \frac{r_b}{r_x} = \frac{N \cos \alpha_c}{2Pr_x}$$

ค่าโดยทั่วไปของ t_p สำหรับมาตรฐานของฟันเฟืองคือ

$$t_p = \frac{P_c}{2} = \frac{\pi}{2P}$$

สมการ (3.9) และ (3.10) จะได้ว่า

$$t_x = r_x \left[\frac{t_p}{r_p} + 2(\text{inv } \alpha_c - \text{inv } \alpha_x) \right] \tag{3.11}$$

จากสมการ (3.11) จะเห็นว่าสามารถหาค่าความหนาของฟันที่จุดใดๆ บนเส้นโค้งอินโวลูตก็ได้

ถ้าทราบความหนาของฟันที่จุดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าของอินทิกรัลฟังก์ชัน

องศา	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001
1	0.000002	0.000002	0.000003	0.000004	0.000005	0.000006	0.000007	0.000009	0.000010	0.000012
2	0.000014	0.000016	0.000019	0.000022	0.000025	0.000028	0.000031	0.000035	0.000039	0.000043
3	0.000048	0.000053	0.000058	0.000064	0.000070	0.000076	0.000083	0.000090	0.000097	0.000105
4	0.000114	0.000122	0.000132	0.000141	0.000151	0.000162	0.000173	0.000184	0.000197	0.000209
5	0.000222	0.000236	0.000250	0.000265	0.000280	0.000296	0.000312	0.000329	0.000347	0.000366
6	0.000384	0.000404	0.000424	0.000445	0.000467	0.000489	0.000512	0.000536	0.000560	0.000586
7	0.000612	0.000638	0.000666	0.000694	0.000723	0.000753	0.000783	0.000815	0.000847	0.000880
8	0.000914	0.000949	0.000985	0.001022	0.001059	0.001098	0.001137	0.001178	0.001219	0.001262
9	0.001305	0.001349	0.001394	0.001440	0.001488	0.001536	0.001586	0.001636	0.001688	0.001740
10	0.001794	0.001849	0.001905	0.001962	0.002020	0.002079	0.002140	0.002202	0.002265	0.002329
11	0.002394	0.002461	0.002528	0.002598	0.002668	0.002739	0.002812	0.002884	0.002962	0.003039
12	0.003117	0.003197	0.003277	0.003360	0.003443	0.003529	0.003615	0.003712	0.003792	0.003883
13	0.003975	0.004069	0.004164	0.004261	0.004359	0.004459	0.004561	0.004664	0.004768	0.004874
14	0.004982	0.005091	0.005202	0.005315	0.005429	0.005545	0.005662	0.005782	0.005903	0.006025
15	0.006150	0.006276	0.006404	0.006534	0.006665	0.006799	0.006934	0.007071	0.007209	0.007350
16	0.007493	0.007637	0.007784	0.007932	0.008082	0.008234	0.008388	0.008544	0.008702	0.008863
17	0.009025	0.009189	0.009355	0.009523	0.009694	0.009866	0.010041	0.010217	0.010396	0.010577
18	0.010760	0.010946	0.011133	0.011323	0.011515	0.011709	0.011906	0.012105	0.012306	0.012509
19	0.012715	0.012923	0.013134	0.013346	0.013562	0.013779	0.013999	0.014222	0.014447	0.014674
20	0.014904	0.015137	0.015372	0.015609	0.015850	0.016092	0.016337	0.016585	0.016836	0.017089
21	0.017345	0.017603	0.017865	0.018129	0.018395	0.018665	0.018937	0.019212	0.019490	0.019770
22	0.020054	0.020340	0.020630	0.020921	0.021216	0.021514	0.021815	0.022119	0.022426	0.022736
23	0.023049	0.023365	0.023684	0.024006	0.024332	0.024660	0.024992	0.025326	0.025664	0.026005
24	0.026350	0.026697	0.027048	0.027402	0.027760	0.028121	0.028485	0.028852	0.029223	0.029598
25	0.029975	0.030357	0.030741	0.031130	0.031521	0.031917	0.032315	0.032718	0.033124	0.033534
26	0.033947	0.034364	0.034785	0.035209	0.035637	0.036069	0.036505	0.036945	0.037388	0.037835
27	0.038287	0.038696	0.039201	0.039664	0.040131	0.040602	0.041076	0.041556	0.042039	0.042526
28	0.043017	0.043513	0.044012	0.044516	0.045024	0.045537	0.046054	0.046575	0.047100	0.047630
29	0.048164	0.048702	0.049245	0.049792	0.050344	0.050901	0.051462	0.052027	0.052597	0.053172
30	0.053751	0.054336	0.054924	0.055519	0.056116	0.056720	0.057267	0.057940	0.058558	0.059181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

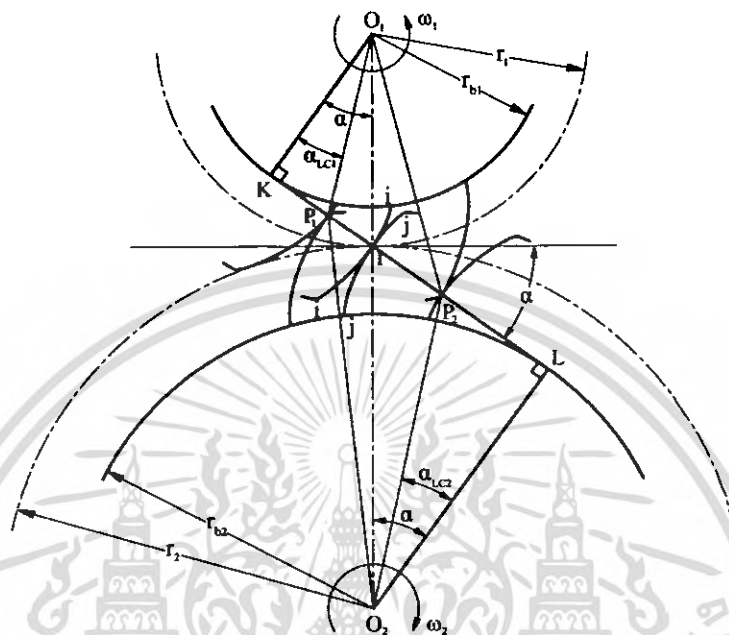
ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

องศา	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
31	0.059809	0.060441	0.061079	0.061721	0.062369	0.063022	0.063680	0.064343	0.065012	0.065685
32	0.066364	0.067048	0.067738	0.068432	0.069133	0.069838	0.070549	0.071266	0.071988	0.072716
33	0.073449	0.074188	0.074932	0.075683	0.076439	0.077200	0.077968	0.078741	0.079520	0.080305
34	0.081097	0.081974	0.082867	0.083506	0.084321	0.085142	0.085970	0.086804	0.087644	0.088490
35	0.089342	0.090201	0.091066	0.091938	0.092816	0.093701	0.094592	0.095490	0.096395	0.097306
36	0.098224	0.099149	0.100080	0.101019	0.101964	0.102916	0.103875	0.104841	0.105814	0.106795
37	0.107782	0.108777	0.109779	0.110788	0.111805	0.112828	0.113860	0.114899	0.115945	0.116999
38	0.118060	0.119130	0.120207	0.121291	0.122384	0.123484	0.124592	0.125709	0.126833	0.127965
39	0.129106	0.130254	0.131411	0.132576	0.133749	0.134931	0.136122	0.137320	0.138528	0.139743
40	0.140968	0.142201	0.143443	0.144694	0.145954	0.147222	0.148500	0.149787	0.151082	0.152387
41	0.153702	0.155025	0.156358	0.157700	0.159052	0.160414	0.161785	0.263165	0.164556	0.165956
42	0.167366	0.168786	0.170216	0.171656	0.173106	0.174566	0.176037	0.177518	0.179009	0.180511
43	0.182023	0.183546	0.185080	0.186625	0.188180	0.189746	0.191324	0.192912	0.194511	0.196122
44	0.197744	0.199377	0.201022	0.202678	0.204346	0.206026	0.207717	0.209420	0.211135	0.212863
45	0.214602	0.216353	0.218117	0.219893	0.221682	0.223483	0.225296	0.227123	0.228962	0.230814
46	0.232678	0.234557	0.236448	0.238352	0.240270	0.242202	0.244147	0.246105	0.248077	0.250064
47	0.252064	0.254078	0.256106	0.258149	0.260206	0.262277	0.264363	0.266463	0.268578	0.270709
48	0.272855	0.275015	0.277191	0.279381	0.281588	0.283810	0.286047	0.288300	0.280570	0.292855
49	0.295157	0.297474	0.299809	0.302160	0.304527	0.306912	0.309313	0.311731	0.314166	0.316619
50	0.319088	0.321577	0.324082	0.326605	0.329146	0.331706	0.334284	0.336879	0.339493	0.342127
51	0.344779	0.347451	0.350141	0.352850	0.355579	0.358328	0.361096	0.363885	0.366693	0.369522
52	0.372371	0.375241	0.378130	0.381041	0.383974	0.386927	0.389903	0.392899	0.395917	0.398958
53	0.402021	0.405105	0.408213	0.411343	0.414495	0.417671	0.420870	0.424094	0.427340	0.430610
54	0.433905	0.437222	0.440566	0.443933	0.447326	0.450744	0.454187	0.457655	0.461150	0.464670
55	0.468217	0.471790	0.475390	0.479017	0.482670	0.486351	0.490060	0.493797	0.497562	0.501355
56	0.505177	0.509027	0.512908	0.516817	0.520755	0.524724	0.528724	0.532753	0.536814	0.540905
57	0.545027	0.549182	0.553368	0.557586	0.561836	0.566120	0.570436	0.574789	0.579173	0.583591
58	0.588043	0.592530	0.597053	0.601609	0.606203	0.610832	0.615498	0.620200	0.624940	0.629717
59	0.634535	0.639387	0.644279	0.649210	0.654181	0.659190	0.664240	0.669331	0.674462	0.679635
60	0.684853	0.690109	0.695409	0.700751	0.706137	0.711567	0.717041	0.722561	0.728126	0.733736

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การขบกันของฟันเฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต

รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างของเส้นโค้งอินโวลูตด้วย ii และ jj ของฟันเฟืองทั้งสองที่จับคู่สัมผัสกัน เส้นโค้งเหล่านี้อธิบายได้โดยรัศมีของวงกลมฐาน r_{b1} และ r_{b2} ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ลักษณะการขบกันของฟันเฟืองที่มีรูปร่างแบบอินโวลูต

3.4.1 ค่าคงที่ของอัตราส่วนฟันเฟือง

สามารถอธิบายการหมุนได้โดย อัตราส่วนคงที่ของความเร็วเชิงมุม เพราะโดยปกติแล้ว \overline{KL} จะตัดกับเส้นโค้งอินโวลูต ณ ตำแหน่งเดิมเสมอ ที่จุด I ดังรูปที่ 3.5 จุดนี้คือจุดที่เกิดการสัมผัสกันของฟันเฟืองทั้งสอง เมื่อมีการหมุนไปนั่นเอง

3.4.2 เส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่

เส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่หรือแนวของการกระทำ (Line of Action) คือ \overline{KL} ที่สัมผัสกับวงกลมฐานของทั้งสองในทิศทางตรงกันข้ามกัน ซึ่ง \overline{KL} เป็นมาตรฐานโดยทั่วไป ในการสร้างฟันเฟืองที่ดี

3.4.3 เส้นเชื่อมจุดศูนย์กลาง

จากรูปที่ 3.5 เส้นเชื่อมจุดศูนย์กลาง $\overline{O_1O_2}$ จะถูกเรียกว่า Gear Centroides ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว Gear Centroides จะมีค่าไม่เท่ากับผลรวมของรัศมีวงกลมพิตช์ของเฟืองทั้งสอง

3.4.4 มุมกด

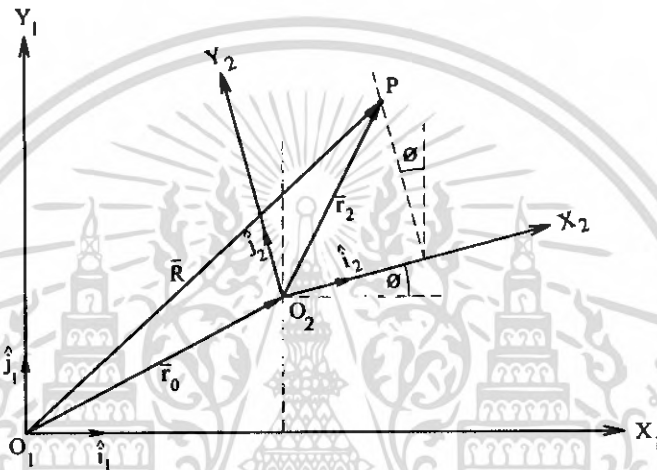
จากรูปที่ 3.5 มุมกด (Pressure Angle $-\alpha$) คือมุมระหว่างเส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่ \overline{KL} กับเส้นแนวระดับ โดยทั่วไป มุมกดจะมีค่าไม่เท่ากับมุมกดของเร็กคิตเตอร์ α_c เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การย้ายระบบพิกัด

4.1 บทนำ

การย้ายระบบพิกัด เป็นการบอกตำแหน่งของเวกเตอร์ในระบบพิกัดใหม่ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของเวกเตอร์ในระบบพิกัดเดิม



รูปที่ 4.1 การบอกตำแหน่งพิกัดของระบบพิกัดต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 ได้แสดงให้เห็นว่า r_0 เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุด O_2 เมื่อเทียบกับระบบพิกัด $X_1 - Y_1$ จากรูปสามารถบอกตำแหน่งของจุด P ได้ 2 แบบคือ r_2 เมื่อเทียบกับระบบพิกัด $X_2 - Y_2$ และ R เมื่อเทียบกับระบบพิกัด $X_1 - Y_1$ ซึ่งในกรณีนี้จะแสดงการหา R โดยอาศัยหลักการย้ายระบบพิกัด

4.2 ตัวดำเนินการในการย้ายระบบพิกัด

ในการย้ายระบบพิกัดนั้น ทำได้โดยใช้ตัวดำเนินการที่เรียกว่า “ Transformation matrix ” ซึ่งมีหลักการในการหาดังนี้

กำหนดให้
$$\vec{R} = x_1 \vec{i}_1 + y_1 \vec{j}_1 \tag{4.1}$$

$$\vec{r}_0 = x_0 \vec{i}_1 + y_0 \vec{j}_1 \tag{4.2}$$

$$\vec{r}_2 = x_2 \vec{i}_2 + y_2 \vec{j}_2 \tag{4.3}$$

เมื่อ (\vec{i}_1, \vec{j}_1) และ (\vec{i}_2, \vec{j}_2) เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดฉาก (Cartesian Unit Vectors) ที่ใช้ระบุทิศทางในแนวแกน X และ Y ของระบบพิกัด $X_1 - Y_1$ และระบบพิกัด $X_2 - Y_2$ ตามลำดับ

จากทฤษฎีของการบวกเวกเตอร์ สามารถเขียน R ได้ดังนี้

$$\vec{R} = \vec{r}_0 + \vec{r}_2 \tag{4.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (4.1) , (4.2) และ (4.3) แทนลงในสมการ (4.4) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$x_1\bar{i}_1 + y_1\bar{j}_1 = x_0\bar{i}_1 + y_0\bar{j}_1 + x_2\bar{i}_2 + y_2\bar{j}_2 \quad (4.5)$$

จากทฤษฎีของผลคูณเชิงสเกลาร์ (Dot product) เมื่อกำหนด \bar{A} และ \bar{B} ดังนั้นผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองคือ

$$\bar{A} \cdot \bar{B} = \|\bar{A}\| \|\bar{B}\| \cos \theta \quad (4.6)$$

เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง

ทำการ Dot vector สมการ (4.5) ด้วย \bar{i}_1 จะได้สมการดังนี้

$$x_1 = x_0 + x_2 \cos \phi + y_2 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \phi \right)$$

หรือ

$$x_1 = x_0 + x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi \quad (4.7)$$

ทำการ Dot vector สมการ (4.5) ด้วย \bar{j}_1 จะได้สมการดังนี้

$$y_1 = y_0 + x_2 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) + y_2 \cos \phi$$

หรือ

$$y_1 = y_0 + x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi \quad (4.8)$$

สมการ (4.7) และ (4.8) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & x_0 \\ \sin \phi & \cos \phi & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

ดังนั้น Transformation matrix ในการย้ายระบบพิกัดจาก $X_2 - Y_2$ ไปยัง $X_1 - Y_1$ ของจุด P ดังรูปที่ 4.1 คือ

$$[M_{12}] = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & x_0 \\ \sin \phi & \cos \phi & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

จากหลักการข้างต้นนี้ ถ้าเป็นระบบพิกัด 3 มิติ ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน แต่เพื่อความสะดวกและเป็นมาตรฐานที่สามารถนำไปใช้ได้โดยทั่วไป ดังนั้น Transformation matrix จึงเขียนได้ดังนี้

$$[M_{12}] = \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2 & \bar{i}_1 \cdot \bar{j}_2 & \bar{i}_1 \cdot \bar{k}_2 & x_0 \\ \bar{j}_1 \cdot \bar{i}_2 & \bar{j}_1 \cdot \bar{j}_2 & \bar{j}_1 \cdot \bar{k}_2 & y_0 \\ \bar{k}_1 \cdot \bar{i}_2 & \bar{k}_1 \cdot \bar{j}_2 & \bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

โดยที่เลข 1 และ 2 ที่อยู่ข้างท้ายของ M แสดงถึงระบบพิกัดใหม่และระบบพิกัดเก่า ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

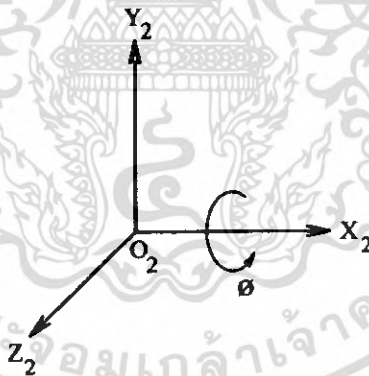
4.3 หลักการเลือกใช้ Transformation matrix

จากหัวข้อที่ผ่านมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการย้ายระบบพิกัด 3 มิติด้วยการหมุนได้ โดยพิจารณาว่าต้องการหมุนระบบพิกัดรอบแกนใด และการเลือกใช้ Transformation matrix พื้นฐาน จะมีหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- 1) มุม ϕ ใน Transformation matrix พื้นฐาน คือมุมที่ระบบพิกัดหมุนไปจากระบบพิกัดเดิม
- 2) ถ้าต้องการย้ายระบบพิกัดโดยการหมุนในทิศทางเดียวกับรูปที่แสดงไว้ สามารถใช้ Transformation matrix พื้นฐานที่ให้ไว้ได้เลย แต่ถ้าเป็นการหมุนระบบพิกัดในทิศทางตรงกันข้าม สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนเครื่องหมายหน้า $\sin \phi$ เป็นเครื่องหมายตรงกันข้าม
- 3) พจน์ของ x_0, y_0, z_0 ที่ปรากฏอยู่ใน Transformation matrix พื้นฐาน แสดงถึงระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดของระบบพิกัดเก่าและระบบพิกัดใหม่ กรณีถ้าเป็นจุดเดียวกัน ค่าของ x_0, y_0, z_0 จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าไม่ใช่จุดเดียวกันแล้ว จะต้องหารระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดโดยอ้างอิงจากระบบพิกัดใหม่นั้น

จากสมการ (4.11) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป Transformation matrix พื้นฐาน ที่ใช้สำหรับการหมุนระบบพิกัดรอบแกนต่างๆ ได้ดังนี้

4.3.1 หมุนรอบแกน X_2

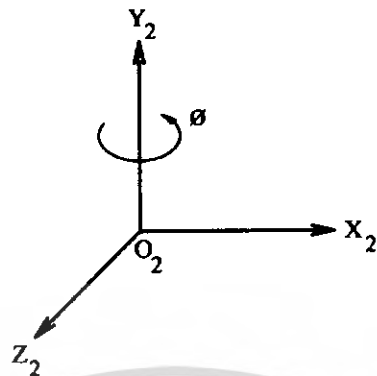


รูปที่ 4.2 แสดงการหมุนระบบพิกัดรอบแกน X_2

จากรูปที่ 4.2 ถ้าต้องการย้ายระบบพิกัด 3 มิติ ด้วยการหมุนระบบพิกัดรอบแกน X_2 สามารถใช้ Transformation matrix ได้ดังนี้

$$[M_{12}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi & y_0 \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

4.3.2 หมุนรอบแกน Y_2

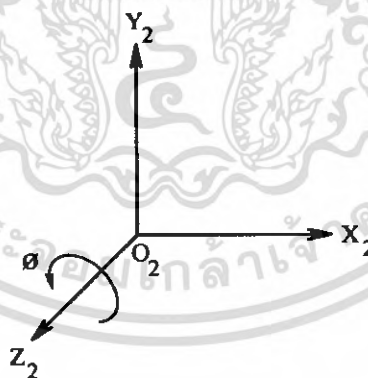


รูปที่ 4.3 แสดงการหมุนระบบพิกัดรอบแกน Y_2

จากรูปที่ 4.3 ถ้าต้องการย้ายระบบพิกัด 3 มิติ ด้วยการหมุนระบบพิกัดรอบแกน Y_2 สามารถใช้ Transformation matrix ได้ดังนี้

$$[M_{12}] = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

4.3.3 หมุนรอบแกน Z_2



รูปที่ 4.4 แสดงการหมุนระบบพิกัดรอบแกน Z_2

จากรูปที่ 4.4 ถ้าต้องการย้ายระบบพิกัด 3 มิติ ด้วยการหมุนระบบพิกัดรอบแกน Z_2 สามารถใช้ Transformation matrix ได้ดังนี้

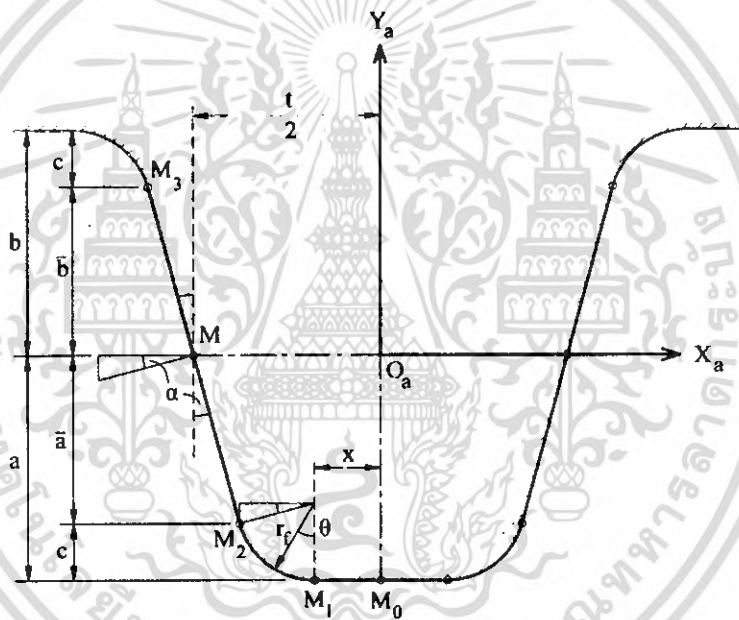
$$[M_{12}] = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & x_0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวแปรและสมการทางคณิตศาสตร์ของเฟืองเฉียง

5.1 พารามิเตอร์ของแร็ก

จากการผลิตเฟืองที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยการผลิตด้วยการไส (Shaping) โดยใช้แร็กคัตเตอร์ เป็นตัวเคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนวแกนการหมุนของเฟืองเปล่า ในขณะที่เดียวกันแร็กก็เคลื่อนเชิงเส้นสัมผัสกับการหมุนไปของเฟืองเปล่า ความสัมพันธ์นี้เองซึ่งจะนำมาเป็นทฤษฎีในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของพื้นผิวของเฟืองเฉียง ดังนั้นพารามิเตอร์ของแร็กที่จะใช้สร้างสมการพื้นผิวของเฟืองเฉียงจะถูกกำหนดขึ้นดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 พารามิเตอร์มาตรฐานของแร็กคัตเตอร์

จากรูปที่ 5.1 เส้นผิวทางด้านซ้ายของแร็ก (เส้นสีแดง) จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่บริเวณ $\overline{M_0M_1}$, $\overline{M_1M_2}$ และบริเวณ $\overline{M_2M_3}$ ซึ่งพิกัด ณ จุดใดๆ ในแต่ละช่วง สามารถเขียนเป็นสมการเวกเตอร์ได้ดังนี้

บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \\ -a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

กำหนดให้ l เป็นพิกัด ณ จุดใดๆ เมื่อ $0 \leq l \leq \bar{x}$ และ $a = \frac{1.25}{P}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{x} - r_f \sin \theta \\ -a + r_f (1 - \cos \theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

กำหนดให้ θ เป็นพิกัด ณ จุดใดๆ เมื่อ $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha$ และ $\bar{x} = \frac{t}{2} - \bar{a} \tan \alpha - r_f \cos \alpha$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \alpha - \bar{x} - r_f \cos \alpha \\ g \cos \alpha - \bar{a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

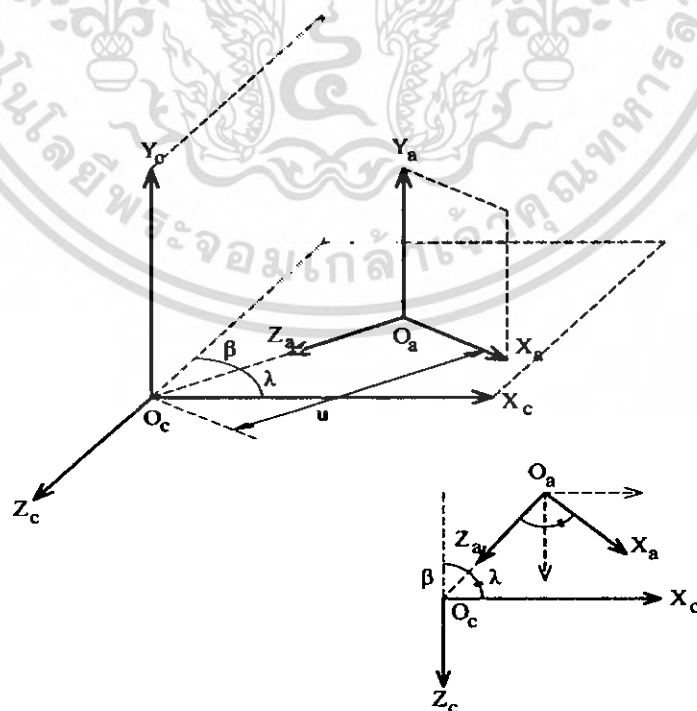
กำหนดให้ g เป็นพิกัด ณ จุดใดๆ เมื่อ $0 \leq g \leq \frac{\bar{a} + \bar{b}}{\cos \alpha}$ และ $\bar{a} = \bar{b} = \frac{1.00}{P}$

5.2 การย้ายระบบพิกัด

จากบทที่ผ่านมาการย้ายระบบพิกัด เป็นการบอกตำแหน่งของเวกเตอร์ในระบบพิกัดใหม่ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของเวกเตอร์ในระบบพิกัดเดิม

5.2.1 การย้ายระบบพิกัด a ไปยังระบบพิกัด c

จากรูปที่ 5.2 จะทำการย้ายระบบพิกัดจากระบบพิกัด a ไปยังระบบพิกัด c เพื่อให้เกิดเส้นทางตามแนวเส้นอีลิปส์



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัด a และระบบพิกัด c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 การย้ายระบบพิกัดจากระบบพิกัด a ไปยังระบบพิกัด c สามารถเขียนเป็น Transformation matrix ได้ดังนี้

$$[M_{ca}] = \begin{bmatrix} \bar{i}_c \cdot \bar{i}_a & \bar{i}_c \cdot \bar{j}_a & \bar{i}_c \cdot \bar{k}_a & x_0 \\ \bar{j}_c \cdot \bar{i}_a & \bar{j}_c \cdot \bar{j}_a & \bar{j}_c \cdot \bar{k}_a & y_0 \\ \bar{k}_c \cdot \bar{i}_a & \bar{k}_c \cdot \bar{j}_a & \bar{k}_c \cdot \bar{k}_a & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \lambda & 0 & -\cos \lambda & u \cos \lambda \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos \lambda & 0 & \sin \lambda & -u \sin \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ทำการย้ายระบบพิกัดดังนี้

$$[R_c] = [M_{ca}][R_a]$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \lambda & 0 & -\cos \lambda & u \cos \lambda \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos \lambda & 0 & \sin \lambda & -u \sin \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

จากการย้ายระบบพิกัด จากระบบพิกัด a ไปยังระบบพิกัด c จะได้สมการเวกเตอร์ในแต่ละช่วงดังนี้

บริเวณ $\overline{M_0 M_1}$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \sin \lambda + u \cos \lambda \\ -a \\ -l \cos \lambda - u \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

บริเวณ $\overline{M_1 M_2}$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\bar{x} - r_f \sin \theta) \sin \lambda + u \cos \lambda \\ -a + r_f (1 - \cos \theta) \\ (-\bar{x} - r_f \sin \theta) \cos \lambda - u \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

บริเวณ $\overline{M_2 M_3}$

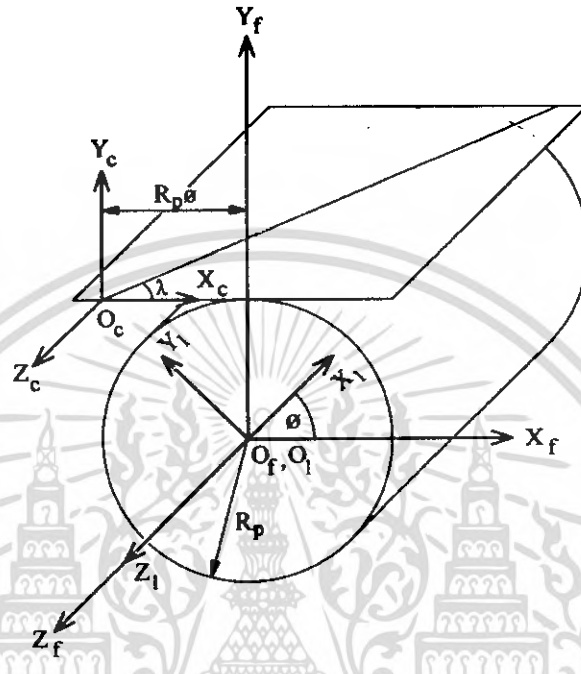
$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-g \sin \alpha - \bar{x} - r_f \cos \alpha) \sin \lambda + u \cos \lambda \\ g \cos \alpha - \bar{a} \\ (-g \sin \alpha - \bar{x} - r_f \cos \alpha) \cos \lambda - u \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

กำหนดให้ u เป็นพิกัด ณ จุดใดๆ เมื่อ $0 \leq u \leq \frac{w}{\sin \lambda}$ และ w คือความหนาของเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การย้ายระบบพิกัด c ไปยังระบบพิกัด 1

จากรูปที่ 5.3 จะทำการย้ายระบบพิกัดจากระบบพิกัด c ไปยังระบบพิกัด 1 หรือการย้ายระบบพิกัดที่ตัวเร็กไปยังระบบพิกัดที่ตัวเฟืองนั่นเอง



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัด c , f และระบบพิกัด 1

จากรูปที่ 5.3 การย้ายระบบพิกัดจากระบบพิกัด c ไปยังระบบพิกัด f สามารถเขียนเป็น Transformation matrix ได้ดังนี้

$$[M_{fc}] = \begin{bmatrix} \bar{i}_f \cdot \bar{i}_c & \bar{i}_f \cdot \bar{j}_c & \bar{i}_f \cdot \bar{k}_c & x_0 \\ \bar{j}_f \cdot \bar{i}_c & \bar{j}_f \cdot \bar{j}_c & \bar{j}_f \cdot \bar{k}_c & y_0 \\ \bar{k}_f \cdot \bar{i}_c & \bar{k}_f \cdot \bar{j}_c & \bar{k}_f \cdot \bar{k}_c & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_p \phi \\ 0 & 1 & 0 & R_p \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จากรูปที่ 5.3 การย้ายระบบพิกัดจากระบบพิกัด f ไปยังระบบพิกัด 1 สามารถเขียนเป็น Transformation matrix ได้ดังนี้

$$[M_{1f}] = \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \cdot \bar{i}_f & \bar{i}_1 \cdot \bar{j}_f & \bar{i}_1 \cdot \bar{k}_f & x_0 \\ \bar{j}_1 \cdot \bar{i}_f & \bar{j}_1 \cdot \bar{j}_f & \bar{j}_1 \cdot \bar{k}_f & y_0 \\ \bar{k}_1 \cdot \bar{i}_f & \bar{k}_1 \cdot \bar{j}_f & \bar{k}_1 \cdot \bar{k}_f & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น สามารถเขียน Transformation matrix ของการย้ายระบบพิกัดจากระบบพิกัด c ไปยังระบบพิกัด 1 ได้ดังนี้

$$[M_{1c}] = [M_{1f}][M_{fc}] = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & R_p (\sin \phi - \phi \cos \phi) \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & R_p (\cos \phi + \phi \sin \phi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ทำการย้ายระบบพิกัดดังนี้

$$[R_1] = [M_{1c}][R_c]$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & R_p (\sin \phi - \phi \cos \phi) \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & R_p (\cos \phi + \phi \sin \phi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

จากการย้ายระบบพิกัด จากระบบพิกัด c ไปยังระบบพิกัด 1 จะได้สมการเวกเตอร์ในแต่ละช่วงดังนี้
บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-l \sin \lambda + u \cos \lambda - R_p \phi) \cos \phi + (R_p - a) \sin \phi \\ -(-l \sin \lambda + u \cos \lambda - R_p \phi) \sin \phi + (R_p - a) \cos \phi \\ -l \cos \lambda - u \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\bar{x} \sin \lambda - r_f \sin \theta \sin \lambda + u \cos \lambda - R_p \phi) \cos \phi + (R_p - a + r_f (1 - \cos \theta)) \sin \phi \\ -(-\bar{x} \sin \lambda - r_f \sin \theta \sin \lambda + u \cos \lambda - R_p \phi) \sin \phi + (R_p - a + r_f (1 - \cos \theta)) \cos \phi \\ -\bar{x} \cos \lambda - r_f \sin \theta \cos \lambda - u \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\bar{x} \sin \lambda - r_f \cos \alpha \sin \lambda - g \sin \alpha \sin \lambda + u \cos \lambda - R_p \phi) \cos \phi + (R_p + g \cos \alpha - \bar{a}) \sin \phi \\ -(-\bar{x} \sin \lambda - r_f \cos \alpha \sin \lambda - g \cos \alpha \sin \lambda + u \cos \lambda - R_p \phi) \sin \phi + (R_p + g \cos \alpha - \bar{a}) \cos \phi \\ -\bar{x} \cos \lambda - r_f \cos \alpha \cos \lambda - g \sin \alpha \cos \lambda - u \sin \lambda \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวขนาดหนึ่งหน่วย

ต่อไปเป็นการหาเวกเตอร์ตั้งฉากขนาดหนึ่งหน่วยของพื้นผิวของเรกคัตเตอร์ (Unit Normal Vector) เพื่อจะนำไปใช้ในสมการเงื่อนไขการขบกันของพื้นผิว ในหัวข้อถัดไป

เวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นผิวของเรกคัตเตอร์ สามารถหาได้โดยการหาผลคูณเชิงเวกเตอร์ ระหว่างอนุพันธ์ย่อยของเวกเตอร์ของพื้นผิวในระบบ c เทียบกับตัวแปรต้นในแต่ละช่วง และสามารถหาเวกเตอร์ขนาดหนึ่งหน่วยได้ดังต่อไปนี้

บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$\begin{aligned}\bar{N}_c &= \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial t} \times \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial u} \\ &= (-\sin \lambda, 0, -\cos \lambda) \times (\cos \lambda, 0, -\sin \lambda) \\ \bar{n}_c &= \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{5.12}$$

บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$\begin{aligned}\bar{N}_c &= \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial \theta} \times \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial u} \\ &= (-r_f \cos \theta \sin \lambda, r_f \sin \theta, -r_f \cos \theta \cos \lambda) \times (\cos \lambda, 0, -\sin \lambda) \\ \bar{n}_c &= \begin{bmatrix} -\sin \theta \sin \lambda \\ -\cos \theta \\ -\sin \theta \cos \lambda \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{5.13}$$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$\begin{aligned}\bar{N}_c &= \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial g} \times \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial u} \\ &= (-\sin \alpha \sin \lambda, \cos \alpha, -\sin \alpha \cos \lambda) \times (\cos \lambda, 0, -\sin \lambda) \\ \bar{n}_c &= \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \lambda \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \cos \lambda \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{5.14}$$

เมื่อเวกเตอร์ตั้งฉากขนาดหนึ่งหน่วย (Unit Normal Vector) หาได้จาก $\bar{n}_c = \frac{\bar{N}_c}{\|\bar{N}_c\|}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สมการเงื่อนไขการขบกันของฟันเฟือง

เมื่อผิวโค้งสองผิวสัมผัสกันโดยตรง ความเร็วเชิงมุมจะเป็นสัดส่วนกลับ กับส่วนของเส้นเชื่อมจุดศูนย์กลางที่ถูกตัดโดยเส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่ และถ้าเส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่ตัดเส้นเชื่อมจุดศูนย์กลางที่จุดคงที่ จะได้อัตราส่วนความเร็วเชิงมุมคงที่ หลักการนี้เป็นสิ่งที่นำมาใช้ในกรณีของเฟืองที่ขบกัน

สมการเงื่อนไขการขบกันของฟันเฟือง (Meshing Equation) เป็นสมการที่ได้จากความสัมพันธ์ของการขบกันระหว่างคู่ฟันเฟือง ซึ่งสมการนี้จะนำมาหาสมการของ u และ ϕ ของแต่ละช่วง

สมการเงื่อนไขการขบกันของฟันเฟืองคือ $\frac{X_c - x_c}{n_{xc}} = \frac{Y_c - y_c}{n_{yc}}$ หรือ $[X_c - x_c]n_{yc} = [Y_c - y_c]n_{xc}$

เมื่อ X_c, Y_c คือระยะพิกัดที่จุด O_c ที่เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับมุม ϕ (พิจารณาจากรูปที่ 5.3)

x_c, y_c คือสมการย่อยในระบบพิกัด c ของแต่ละช่วง (พิจารณาจากสมการ 5.5, 5.6 และ 5.7)

n_{xc}, n_{yc} คือเวกเตอร์ตั้งฉากขนาดหนึ่งหน่วยในระบบพิกัด c ในทิศทางแกน x และ y ตามลำดับ ดังนั้นจะหา u และ ϕ ของแต่ละช่วงได้ดังนี้

บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$\begin{aligned} [R_p\phi - (-l\sin\lambda + u\cos\lambda)](-1) &= [0 - (-a)](0) \\ u = \frac{R_p\phi}{\cos\lambda} + l\tan\lambda, \quad \phi &= \frac{u\cos\lambda - l\sin\lambda}{R_p} \end{aligned} \quad (5.15)$$

บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$\begin{aligned} \frac{R_p\phi - [(-\bar{x} - r_f \sin\theta)\sin\lambda + u\cos\lambda]}{-\sin\theta\sin\lambda} &= \frac{0 - [-a + r_f(1 - \cos\theta)]}{-\cos\theta} \\ u = \frac{R_p\phi}{\cos\lambda} + (\bar{x} - a\tan\theta + r_f\tan\theta)\tan\lambda & \\ \phi = \frac{u\cos\lambda - (\bar{x} - a\tan\theta + r_f\tan\theta)\sin\lambda}{R_p} & \end{aligned} \quad (5.16)$$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$\begin{aligned} \frac{R_p\phi - [(-g\sin\alpha - \bar{x} - r_f\cos\alpha)\sin\lambda + u\cos\lambda]}{-\cos\alpha\sin\lambda} &= \frac{0 - [g\cos\alpha - \bar{a}]}{-\sin\alpha} \\ u = \frac{R_p\phi}{\cos\lambda} + \left(\bar{x} - \frac{\bar{a}}{\tan\alpha} + \frac{g}{\sin\alpha} + r_f\cos\alpha\right)\tan\lambda & \\ \phi = \frac{u\cos\lambda - \left(\bar{x} - \frac{\bar{a}}{\tan\alpha} + \frac{g}{\sin\alpha} + r_f\cos\alpha\right)\sin\lambda}{R_p} & \end{aligned} \quad (5.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 สมการพื้นผิวของพื้นเพื่องเฉียง

5.5.1 สมการพื้นผิวของพื้นเพื่องด้านซ้าย

นำสมการ u ที่ได้ในแต่ละช่วง แทนลงในสมการเวกเตอร์ในแต่ละช่วงของระบบพิกัด 1 จากนั้นทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการพื้นผิวของพื้นเพื่องด้านซ้ายของแต่ละช่วงดังนี้

บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$X_1 = (R_p - a) \sin \phi$$

$$Y_1 = (R_p - a) \cos \phi$$

$$Z_1 = -(l + R_p \phi \sin \lambda) \sec \lambda \quad (5.18)$$

เมื่อ $\phi = \frac{u \cos \lambda - l \sin \lambda}{R_p}$

บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$X_1 = [r_f (1 - \cos \theta) - a + R_p] \sin \phi + [r_f (1 - \cos \theta) - a] \tan \theta \sin \lambda \cos \phi$$

$$Y_1 = [r_f (1 - \cos \theta) - a + R_p] \cos \phi - [r_f (1 - \cos \theta) - a] \tan \theta \sin \lambda \sin \phi$$

$$Z_1 = -(\bar{x} + r_f \sin \theta) \cos \lambda - (\bar{x} + r_f \tan \theta - a \tan \theta) \tan \lambda \sin \lambda - R_p \phi \tan \lambda \quad (5.19)$$

เมื่อ $\phi = \frac{u \cos \lambda - (\bar{x} - a \tan \theta + r_f \tan \theta) \sin \lambda}{R_p}$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$X_1 = (g \cos \alpha - \bar{a} + R_p) \sin \phi + (g \cos \alpha - \bar{a}) \cot \alpha \sin \lambda \cos \phi$$

$$Y_1 = (g \cos \alpha - \bar{a} + R_p) \cos \phi - (g \cos \alpha - \bar{a}) \cot \alpha \sin \lambda \sin \phi$$

$$Z_1 = -(\bar{x} + r_f \cos \alpha + g \sin \alpha) \cos \lambda$$

$$- \left(\bar{x} + r_f \cos \alpha - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{g}{\sin \alpha} \right) \tan \lambda \sin \lambda - R_p \phi \tan \lambda \quad (5.20)$$

เมื่อ $\phi = \frac{u \cos \lambda - \left(\bar{x} - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{g}{\sin \alpha} + r_f \cos \alpha \right) \sin \lambda}{R_p}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ R_p เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 สมการพื้นผิวของพื้นพืด้านขวา

จากขั้นตอนการหาสมการพื้นผิวของพื้นพืดังด้านซ้ายที่ผ่านมา ในทำนองเดียวกันจะสามารถหาสมการพื้นผิวของพื้นพืดังด้านขวาได้ โดยพิจารณารูปที่ 5.1 เส้นพืดังด้านขวาของเร็ก (เส้นสีเขียว) จากนั้นทำการหาตามขั้นตอนเดิม ซึ่งจะได้สมการพื้นผิวของพื้นพืดังด้านขวาดังนี้

บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$X_1 = (R_p - a) \sin \phi$$

$$Y_1 = (R_p - a) \cos \phi$$

$$Z_1 = (l - R_p \phi \sin \lambda) \sec \lambda \quad (5.21)$$

เมื่อ $\phi = \frac{u \cos \lambda + l \sin \lambda}{R_p}$

บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$X_1 = [r_f (1 - \cos \theta) - a + R_p] \sin \phi - [r_f (1 - \cos \theta) - a] \tan \theta \sin \lambda \cos \phi$$

$$Y_1 = [r_f (1 - \cos \theta) - a + R_p] \cos \phi + [r_f (1 - \cos \theta) - a] \tan \theta \sin \lambda \sin \phi$$

$$Z_1 = (\bar{x} + r_f \sin \theta) \cos \lambda + (\bar{x} + r_f \tan \theta - a \tan \theta) \tan \lambda \sin \lambda - R_p \phi \tan \lambda \quad (5.22)$$

เมื่อ $\phi = \frac{u \cos \lambda + (\bar{x} - a \tan \theta + r_f \tan \theta) \sin \lambda}{R_p}$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$X_1 = (g \cos \alpha - \bar{a} + R_p) \sin \phi - (g \cos \alpha - \bar{a}) \cot \alpha \sin \lambda \cos \phi$$

$$Y_1 = (g \cos \alpha - \bar{a} + R_p) \cos \phi + (g \cos \alpha - \bar{a}) \cot \alpha \sin \lambda \sin \phi$$

$$Z_1 = (\bar{x} + r_f \cos \alpha + g \sin \alpha) \cos \lambda$$

$$+ \left(\bar{x} + r_f \cos \alpha - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{g}{\sin \alpha} \right) \tan \lambda \sin \lambda - R_p \phi \tan \lambda \quad (5.23)$$

เมื่อ $\phi = \frac{u \cos \lambda + \left(\bar{x} - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{g}{\sin \alpha} + r_f \cos \alpha \right) \sin \lambda}{R_p}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้คนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การเขียนโปรแกรมสร้างพื้นผิวของเฟืองเฉียง

6.1 บทนำ

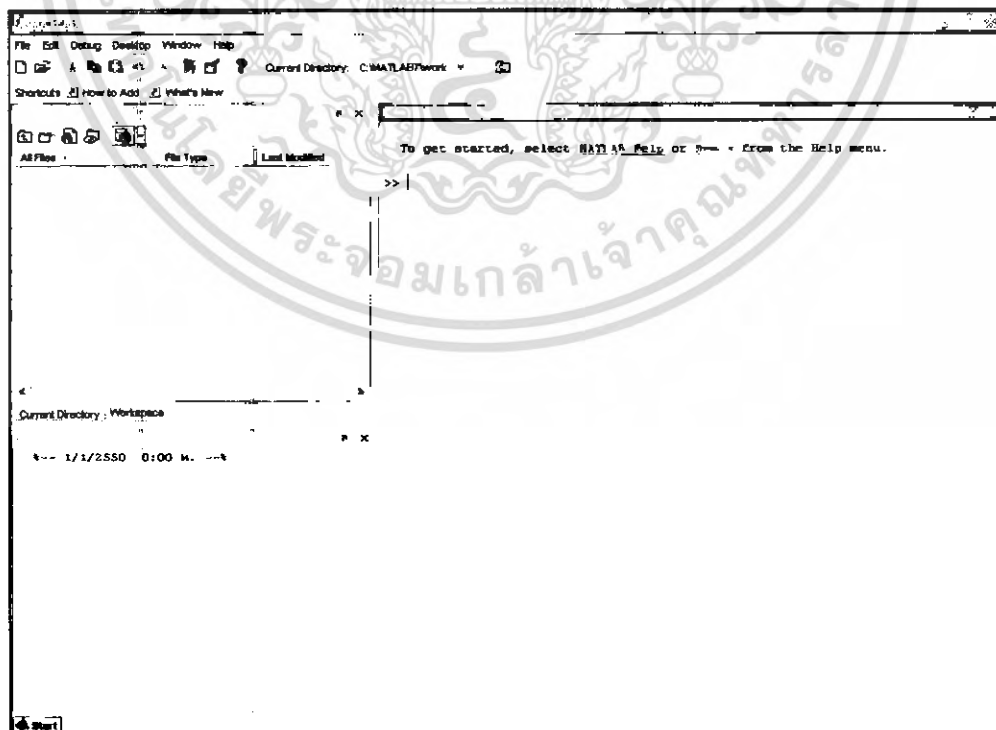
ในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนจะเป็นการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์และนำไปเขียนโค้ดในการสร้างพื้นผิวของเฟืองเฉียง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนส่วนใหญ่เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์หลากหลายวิธี ดังนั้นจึงเลือกทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Matlab ด้วยเหตุผลที่ว่า โปรแกรมนี้มีคำสั่งเกี่ยวกับกระบวนการทางคณิตศาสตร์และสามารถแสดงกราฟออกมา ในลักษณะของพื้นผิวได้อีกด้วย ดังนั้นโปรแกรมนี้จึงทำให้สามารถประมวลผล และสะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งตรงกับความต้องการสำหรับงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานของ โปรแกรม Matlab เป็นลำดับขั้นตอนอย่างละเอียดรวมไปถึงแนวความคิดและลำดับขั้นตอนต่างๆ ในการประมวลผล

6.2 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของ โปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการประมวลผลมีดังต่อไปนี้

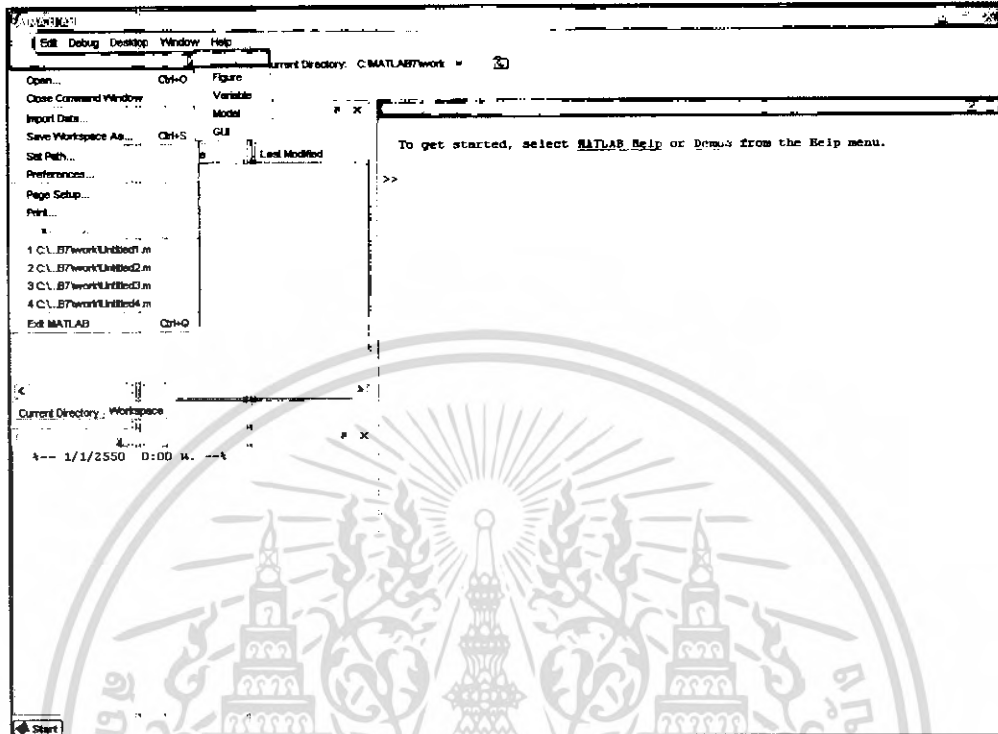
- 1) ดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอนเพื่อเข้าโปรแกรม
- 2) เมื่อเข้าสู่โปรแกรม จะเห็นหน้าต่างของ command window ดังแสดงในรูปที่ 6.1



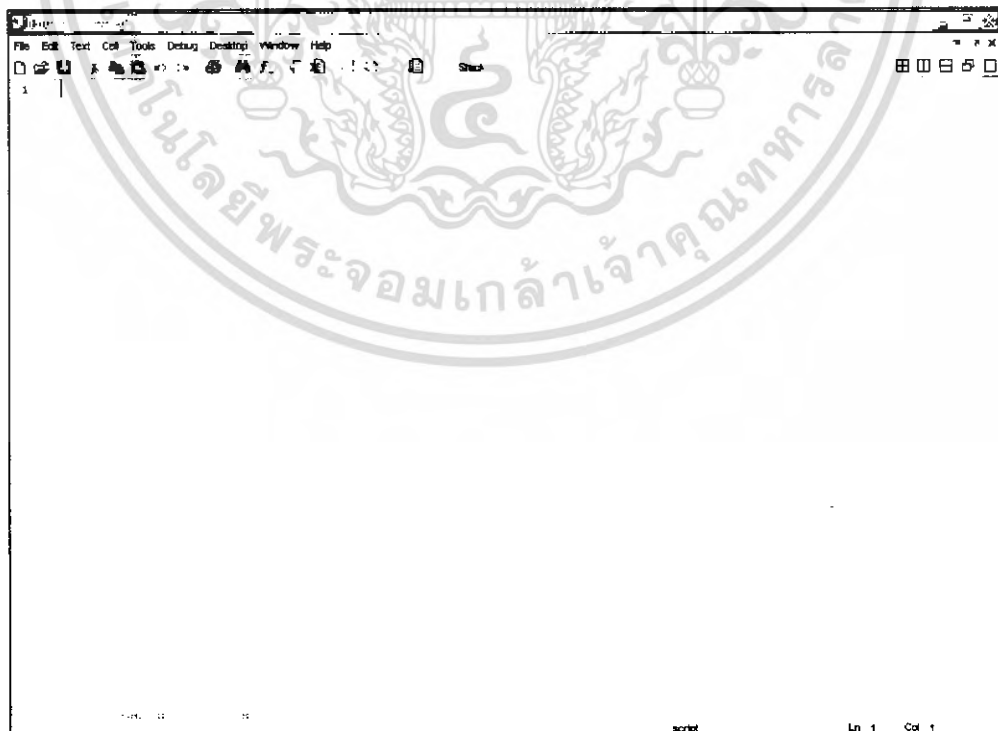
รูปที่ 6.1 หน้าต่างของ Command Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สามารถเขียนโค้ดที่ต้องการประมวลผลได้โดยไปที่ File → New → M-file ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เมื่อคลิกที่ M-file แล้ว จะแสดงหน้าต่างเพื่อสำหรับเขียนโค้ดขึ้นมา ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 แสดงการเปิดหน้าต่าง M-file



รูปที่ 6.3 หน้าต่าง M-file ที่ใช้เขียนโค้ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

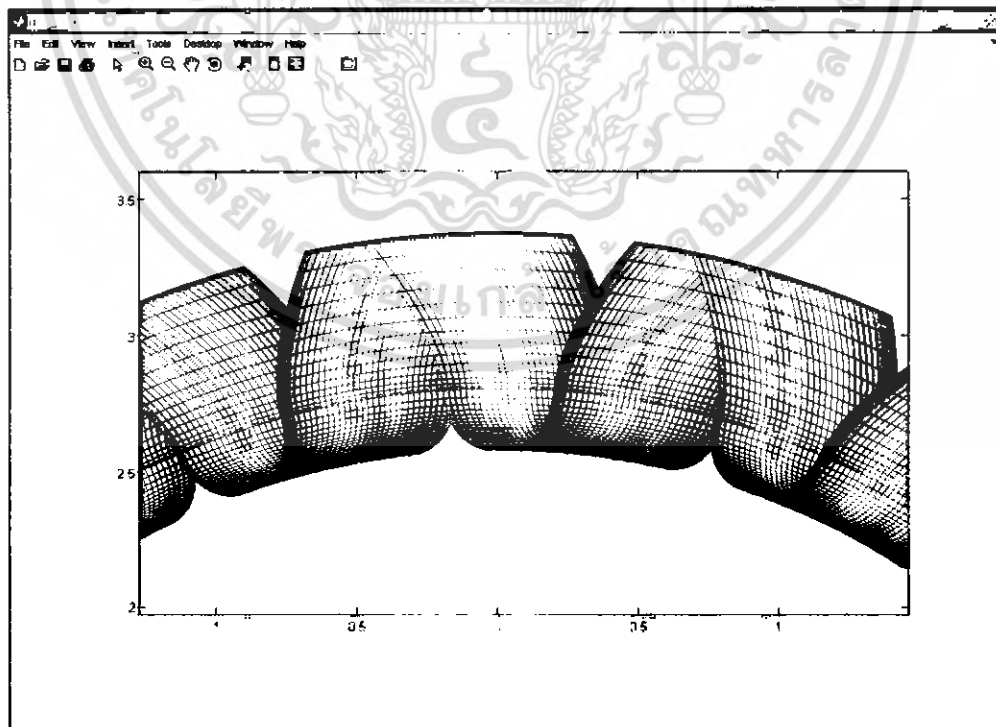
4) เมื่อเขียนโค้ดตามที่ต้องการแล้ว ให้ บันทึกไว้ใน directory ที่ต้องการ และสามารถประมวลผลได้จากหน้าต่าง M-file โดยคลิก Debug → Run ดังรูปที่ 6.4

```

1 - clear all
2
3
4
5 - P = 3;           %pitch radius (Module = 4)
6 - W = 10;         %circular pitch (more than 10 only)
7 - W = 2.5;       %tooth thickness (on pitch circle)
8 - lambda = 75*p; %tooth thickness (on pitch circle)
9 - alpha = 20*p;  %tooth thickness (on pitch circle)
10
11
12 -----
13
14 - Rp = W/(2*P);   %pitch radius
15 - pc = pi/P;     %circular pitch
16 - c = pc/2;     %tooth thickness (on pitch circle)
17
18
19 -----STANDARD PARAMETERS OF THE RACK-CUTTER GEAR IN INDUSTRY-----
20
21 - aBr = 1.00/P;   %a_bar : distance from middle line to first contact point
22 - bBr = 1.00/P;   %b_bar : distance from middle line to first contact point
23
24 - a = 1.25/P;    %addendum of rack cutter
25 - b = 1.25/P;    %dedendum of rack cutter
26 - c = 0.25/P;   %clearance
27 - rf = c/(1-sin(alpha)); %fillet radius
28
29 - xBr = L/2-aBr*tan(alpha)-rf*cos(alpha); %x_bar : final magnitude of x
30 - tBr = (pi/2-alpha); %theta_bar : final magnitude of theta
31 - qBr = (aBr+bBr)/cos(alpha); %q_bar : final magnitude of q
32 - uBr = W/sin(lambda); %u_bar : final magnitude of u
33
34
35 -----
36
37 - n = 30;        du = uBr/a; %50 section

```

รูปที่ 6.4 แสดงวิธีการประมวลผล



รูปที่ 6.5 แสดงผลลัพธ์ของพื้นผิวในหน้าต่างของ Figure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ขั้นตอนการเขียนโค้ดและการประมวลผล

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงแนวความคิดและขั้นตอนการเขียนโค้ด ที่ใช้ประมวลผลในงานวิจัยนี้ โดยจะอธิบายเป็นลำดับขั้นตอนจากการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่ได้ผลลัพธ์ มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ทำการเขียนโค้ดในหน้าต่าง M-file เริ่มในส่วนของ Input ที่เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ โดยจะคำนึงถึงมาตรฐานของ AGMA ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าไดมิตริลพิชซ์ จำนวนฟันเฟือง ความหนาของเฟือง มุมลิด และมุมกดของเฟือง
- 2) เขียนสมการพารามิเตอร์มาตรฐานต่างๆ ของเฟืองเฉียง และพารามิเตอร์มาตรฐานของตัวเรีกักคเตอร์ที่มีใช้ในปัจจุบัน พร้อมคำอธิบายตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ
- 3) ทำการเขียนโค้ดของพื้นผิวของเฟืองเฉียง จากสมการทางคณิตศาสตร์ของฟันเฟืองเฉียงที่ได้จากบทที่ผ่านมา โดยแยกเป็นพื้นผิวด้านซ้าย และด้านขวาของฟันเฟืองเฉียง
- 4) เมื่อเขียน โค้ดของพื้นผิวของหนึ่งฟันเฟืองจากนั้น ทำการเขียน โค้ดเพิ่มจนครบทุกฟันเฟืองของเฟืองเฉียง
- 5) สุดท้ายจะทำการเขียน โค้ดเพื่อแสดงผลลัพธ์ของพื้นผิวของเฟืองเฉียงให้ออกมาในลักษณะของพิกัด X,Y,Z จากพื้นผิวของเฟืองเฉียงที่ได้

บทที่ 7

ความรู้พื้นฐานทางด้าน CAD/CAM

7.1 บทนำ

กระบวนการผลิตในปัจจุบันนี้ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ ที่ประกอบด้วยระบบการทำงานด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ ที่เรียกว่าเครื่องซีเอ็นซี

CNC ย่อมาจากคำว่า Computer Numerical Control เป็นเครื่องจักรกลที่มีการควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ในระบบ ทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลที่ป้อนเข้าในระบบ และประมวลผลข้อมูลเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของเครื่องจักร เช่น การนำเทคโนโลยี CAD/CAM เข้ามาควบคุมการทำงานของเครื่องจักร เป็นต้น

7.2 เทคโนโลยีทางด้าน CAD/CAM

เป็นการนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ เนื่องจาก CAM ต้องอาศัยข้อมูลจาก CAD จึงจะสามารถทำงานได้ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกัน จึงถูกเรียกว่าเทคโนโลยีทางด้าน CAD/CAM โดย CAD/CAM มีกระบวนการดังนี้

7.2.1 กระบวนการทาง CAD

CAD ย่อมาจากคำว่า Computer Aided Design เป็นขั้นตอนแรกของ CAD/CAM เป็นการนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ โดยทั่วไปเป็นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานดังนี้

- 1) งานเขียนแบบ
- 2) งานเขียนวัตถุ 3 มิติ
- 3) งานทางด้านการสร้างภาพเหมือนจริงทั้งแบบภาพอยู่นิ่งและภาพเคลื่อนไหว

7.2.2 กระบวนการทาง CAM

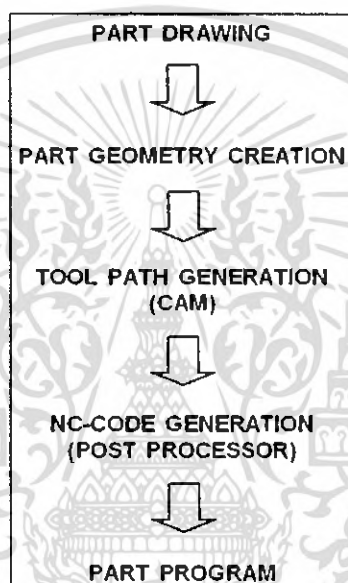
CAM ย่อมาจากคำว่า Computer Aided Manufacturing เป็นการนำเอาข้อมูลจาก CAD File มาทำงาน เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลให้เป็น NC Code ซึ่งเป็นภาษาที่เครื่องจักรสามารถอ่านได้ เพื่อให้เครื่องจักรทำงานโดยใช้ชุดคำสั่ง NC Code การทำงาน CAM Program จะใช้การป้อนข้อมูล 2 แบบคือ

- 1) รูปร่างของชิ้นงาน (Part Geometry)
- 2) ข้อมูลการแปรรูป (Machining Data)

โดยจะทำการโปรแกรม ที่เรียกว่า NCI File ที่บอกข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่ง (Coordinate) ของทางเดินของใบมีด (Tool Path), ความเร็วรอบ (Spindle Speed), อัตราการป้อน (Feed Rate), การป้อนขนาดของใบมีด เป็นต้น

7.2.3 กระบวนการทาง Post Processor

Post Processor จะเปลี่ยน NCI File ซึ่งเป็นภาษากลางของเครื่องจักร โดย Post Processor จะทำหน้าที่คล้ายล่าม เพื่อแปลภาษาให้เป็นภาษาที่เครื่องจักรสามารถอ่านได้ ซึ่งเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมี NC Codes ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 7.1 แสดงขั้นตอนการทำ CAD/CAM

การใช้งานเครื่อง CNC จะผ่านรหัสหรือภาษา รหัส-จี หรือ G-Code ซึ่งเป็นมาตรฐานในการควบคุมการทำงานซึ่งประกอบด้วย

1) ตัวอักษร (Character) เพื่อกำหนดลักษณะการทำงานหรือกำหนดเงื่อนไข (ตารางที่ 7.1) ซึ่งจะอยู่ด้านหน้าของคำสั่งย่อยที่เรียกว่า word

2) คำ (Word) เป็นกลุ่มของตัวอักษร ที่ประกอบขึ้นเพื่อกำหนดเงื่อนไขการทำงาน

3) บล็อก (Block) เป็นคำสั่งควบคุมการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี เป็นการนำ word หลาย ๆ คำ มาประกอบกัน เช่น

N10 G90 G80 G17 (บล็อกนี้มี 4 คำ)

N15 G01 X1.0 Y1.5 G18 (บล็อกนี้มี 5 คำ)

4) โปรแกรม (Program) เป็นการรวมหลาย ๆ บล็อก ที่เขียนตามลำดับการทำงานเพื่อให้เครื่องซีเอ็นซี ทำงานตามขั้นตอนให้ได้ชิ้นงานตามที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 การกำหนดลักษณะการใช้งาน Character มาตรฐาน EIA RS-274 B

ตัวอักษร (Character)	การใช้งานและความหมาย
A	การหมุนรอบแนวแกน X
B	การหมุนรอบแนวแกน Y
C	การหมุนรอบแนวแกน Z
D	(1) การหมุนรอบแนวแกนพิเศษ (2) อัตราป้อนที่สาม
E	(1) หมุนรอบแกนพิเศษ (2) อัตราป้อนที่สอง
F	อัตราป้อน
G	การจัดเตรียมการทำงาน
H	ไม่ระบุ
I	(1) ขนาดรอบแนวแกน X ของจุดศูนย์กลางวงกลม (2) ระยะพิทของเกลียวที่ขนานแนวแกน X
J	(1) ขนาดรอบแนวแกน Y ของจุดศูนย์กลางวงกลม (2) ระยะพิทของเกลียวที่ขนานแนวแกน Y
K	(1) ขนาดรอบแนวแกน Z ของจุดศูนย์กลางวงกลม (2) ระยะพิทของเกลียวที่ขนานแนวแกน Z
L	ไม่กำหนด
M	คำสั่งช่วยการทำงาน
N	หมายเลขบรรทัดในโปรแกรม
O	ไม่กำหนด
P	การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 3 ที่ขนานกับแนวแกน X
Q	การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 3 ที่ขนานกับแนวแกน Y
R	การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 3 ที่ขนานกับแนวแกน Z
S	ความเร็วรอบของเพลาจับเครื่องมือตัด
T	เรียกเครื่องมือตัด
U	การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 2 ที่ขนานกับแนวแกน X
V	การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 2 ที่ขนานกับแนวแกน Y
W	การเคลื่อนที่ของแนวแกนที่ 2 ที่ขนานกับแนวแกน Z
X	การเคลื่อนที่ในแนวแกน X
Y	การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
Z	การเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

(Character อาจแตกต่างกันบ้าง ในรายละเอียดของเครื่องซีเอ็นซีแต่ละยี่ห้อ แต่ละรุ่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างรายงานแสดงรหัส G-Code เพื่อการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ
รหัส ฟังก์ชันเตรียมการทำงานสำหรับงานกัด

- G00 การเคลื่อนที่เร็ว
- G01 การเคลื่อนที่เชิงเส้นและมีการป้อน
- G02 การเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งตามเข็มนาฬิกา และมีการป้องกัน
- G03 การเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งทวนเข็มนาฬิกา และมีการป้องกัน
- G17 การเลือกระนาบ XY
- G18 การเลือกระนาบ XZ
- G19 การเลือกระนาบ YZ
- G28 การเคลื่อนกลับไปยังจุดอ้างอิง
- G40 ยกเลิกการชดเชยขนาดรัศมีของเครื่องมือตัด
- G41 การชดเชยขนาดรัศมีของเครื่องมือตัดทางด้านซ้าย
- G42 การชดเชยขนาดรัศมีของเครื่องมือตัดทางด้านขวา
- G43 การชดเชยขนาดความยาวของเครื่องมือตัด ค่าบวก
- G44 การชดเชยขนาดความยาวของเครื่องมือตัด ค่าลบ
- G49 ยกเลิกการชดเชยขนาดความยาวของเครื่องมือตัด
- G50 ปรับตั้ง โคออร์ดิเนตของชิ้นงาน
- G54 ปรับตั้ง โคออร์ดิเนตของชิ้นงาน
- G70 ป้อนข้อมูลที่มีหน่วยเป็นนิ้ว
- G71 ป้อนข้อมูลที่มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- G80 ยกเลิกการทำไซเกิล
- G81 เจาะไซเกิล
- G83 เจาะไซเกิลรูลึก
- G85 การคว้านรู
- G90 การให้ตำแหน่งในแบบสัมบูรณ์
- G91 การให้ตำแหน่งแบบอินครีเมนทอล
- G92 การตั้งค่ารีจิสเตอร์หรือตั้งค่าซีโรชิฟต์
- G96 ปรับความเร็วคงที่
- G98 ปรับอัตราป้อนต่อหน้าที่
- G99 การเคลื่อนกลับไปยังจุดอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างรายงานแสดงรหัส M-Code บางส่วนที่มีการใช้กันมาก รหัสฟังก์ชันเหล่านี้ใช้เพื่อ
โปรแกรมให้เครื่องจักรกระทำการบางอย่างที่พิเศษ
รหัส ฟังก์ชันเบ็ดเตล็ด

- M00 หยุดโปรแกรม
- M01 หยุดโปรแกรมแบบมีเงื่อนไข
- M02 จบโปรแกรม
- M03 หัวจับหมุนตามเข็มนาฬิกา
- M04 หัวจับหมุนทวนเข็มนาฬิกา
- M05 หัวจับหยุด
- M06 เปลี่ยนเครื่องมือ
- M07 เปิดล่อน้ำเย็น (เปิดมาก)
- M08 เปิดล่อน้ำเย็น (เปิดน้อย)
- M09 ปิดล่อน้ำเย็น
- M10 การล๊อคโดยอัตโนมัติ
- M11 การคลายล๊อคโดยอัตโนมัติ
- M30 สิ้นสุดโปรแกรม
- M98 เรียกโปรแกรมย่อย
- M99 จบโปรแกรมย่อยและกลับไปยังโปรแกรมหลัก

บทที่ 8

การสร้างแบบและจำลองการกัดเฟืองเฉียง

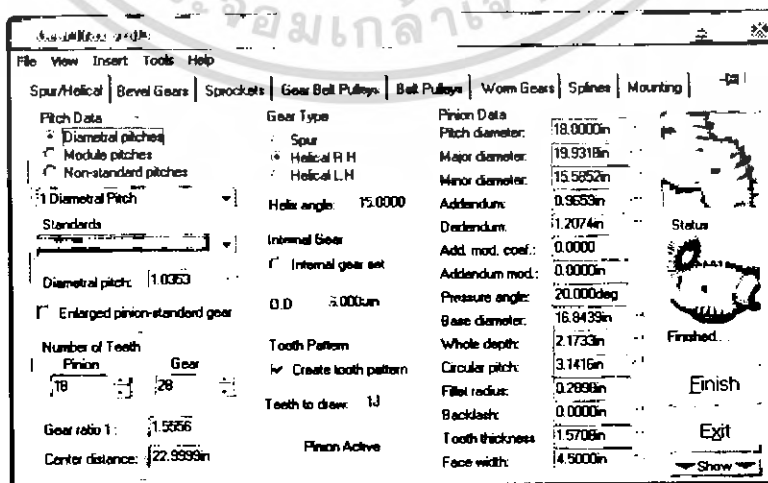
8.1 บทนำ

สำหรับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ หรือที่เรียกว่า CAD แล้ว โปรแกรม Unigraphics NX นี้มีความสามารถที่สนับสนุนการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ ซึ่งถ้ามองถึงซอฟต์แวร์ CAD อื่นๆ ก็เป็นเรื่องธรรมดาที่ต้องสร้างชิ้นงาน 3 มิติ แต่ถ้ามองให้ลึกไปอีกจะพบว่าโปรแกรม Unigraphics NX จะมีคำสั่งสนับสนุนสำหรับการสร้างชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ดีกว่า ทำให้ประหยัดเวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานมากกว่า สำหรับในส่วนของการคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตหรือ CAM โปรแกรม Unigraphics NX ยังมีความสามารถในการทำ NC Manufacturing ซึ่งสนับสนุนการกัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ถึง 5 แกน และเป็นที่ยอมรับในการใช้ทำแม่พิมพ์อีกด้วย

การผลิตเฟืองเฉียงที่มีความซับซ้อนที่เกิดจากมุมอิลิกซ์นั้นไม่สามารถทำได้ด้วยเครื่องกัด CNC 3 แกน ที่มีใช้ทั่วไป แต่จะต้องใช้เครื่องกัด CNC 5 แกน ซึ่งการกัดแบบ 5 แกนจะเป็นการกัดแบบพิเศษ การเคลื่อนที่ของใบมีดจะมีความเป็นอิสระมาก ดังนั้นโปรแกรมที่นำมาใช้ในการการสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตและการจำลองการกัดเฟืองเฉียงนี้ ได้แก่โปรแกรม Unigraphics NX4 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความอิสระและความสามารถในการใช้งานสูง

8.2 การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง

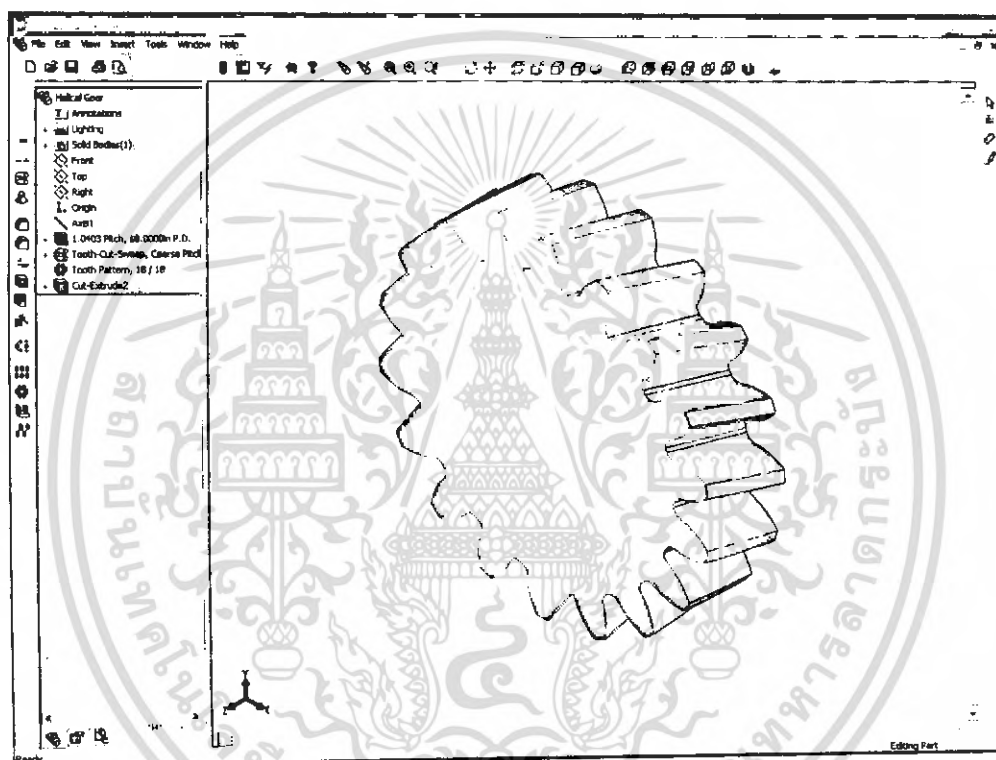
ทำการสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง โดยใช้โปรแกรมเฉพาะสำหรับการสร้างเฟืองชนิดต่างๆ ในที่นี้ได้แก่โปรแกรม Camnetics GearTrax 2003 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม SolidWorks 2003 โดยสามารถทำได้ดังนี้



รูปที่ 8.1 การป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเฟืองเฉียงบน โปรแกรม Camnetics GearTrax 2003
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เปิดโปรแกรม Camnetics GearTrax 2003 เลือก Unit เป็น Inches จากนั้นทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเฟืองเฉียง แล้วให้กด Finish ดังรูปที่ 8.1 จากนั้นตัวโปรแกรม GearTrax 2003 เอง จะทำการเรียกโปรแกรม SolidWorks 2003 ขึ้นมาและจะทำการสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง โดยอัตโนมัติ

2) จากนั้นให้ทำการ Save As ขึ้นงานที่ได้ ให้ชื่อว่า Helical Gear และ Save as type เป็น Parasolid Text Files [*.*_t]



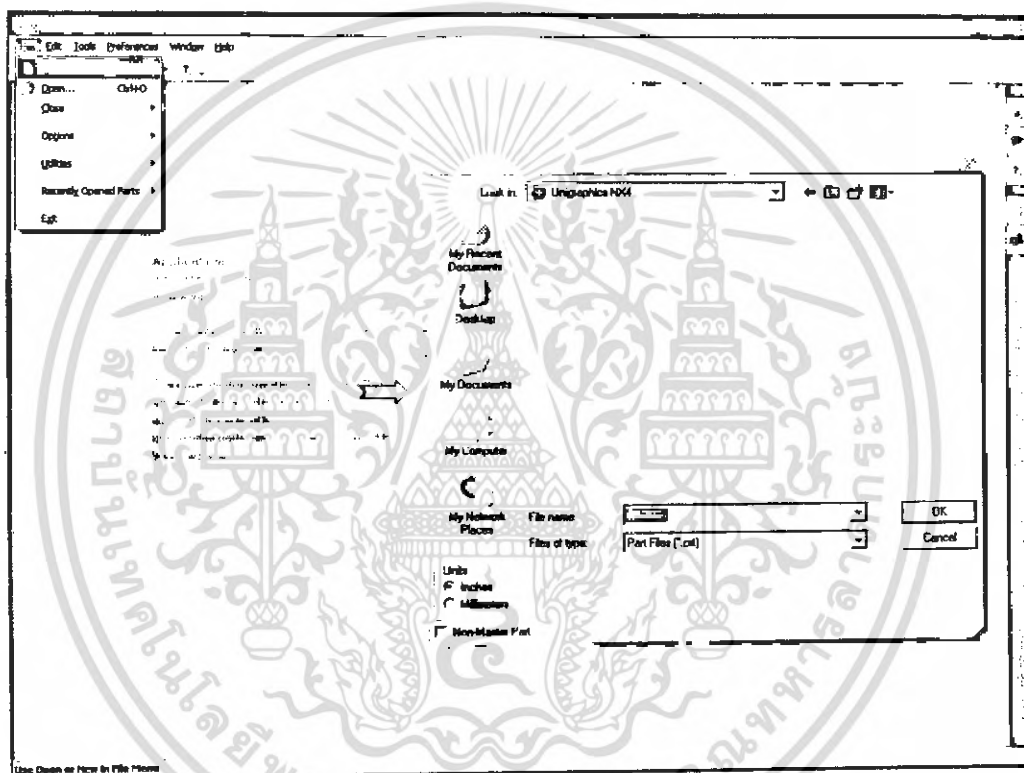
รูปที่ 8.2 การขึ้นรูปร่างทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียงบนโปรแกรม SolidWorks 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 ลำดับขั้นตอนการจำลองการกัดเฟืองเฉียง

การจำลอง (Simulation) การกัดชิ้นงาน โดยเป็นการกัดชิ้นงานในลักษณะ 5 แกน เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของใบมีด ลักษณะการกัดชิ้นงาน และเพื่อทำการสร้าง NC Code สำหรับใช้ควบคุมเครื่องกัด CNC 5 แกน ซึ่งจะมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

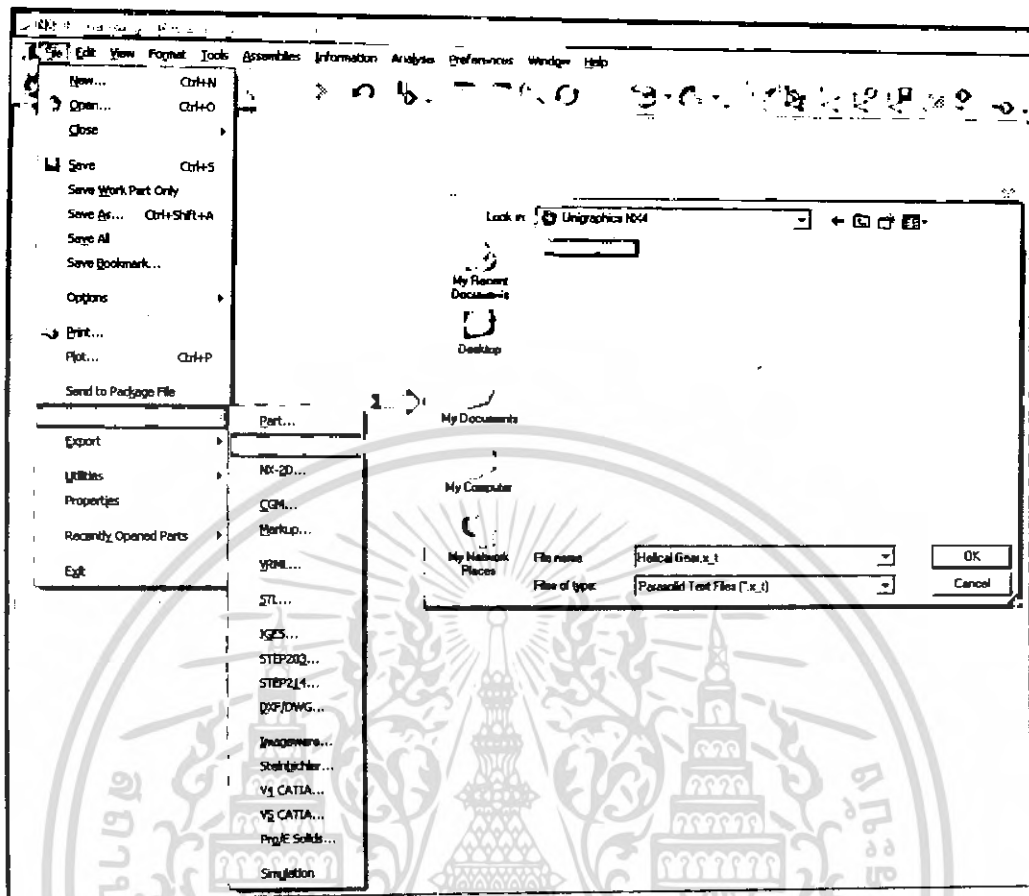
1) เปิดโปรแกรม Unigraphics NX4 จากนั้นเลือก New Part File ในช่อง File name ให้ตั้งชื่อว่า Simulate เลือก Unit เป็น Inches แล้วกด OK ดังรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 เริ่มต้นใช้งาน โปรแกรม Unigraphics NX4

2) เมื่อได้สร้าง New Part File แล้ว ต่อไปจะทำการ Import Part File ที่เป็น Solid Model ของเฟืองเฉียง ที่ได้จากโปรแกรม SolidWorks 2003 ซึ่ง Solid Model นี้จะใช้ในการจำลองการกัดเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC 5 แกน และ Post Process เป็น NC Code เพื่อใช้ควบคุมเครื่องกัด CNC 5 แกน ดังนั้นให้เราทำการ Import Part File ที่มีชื่อว่า Helical Gear.x_t จากนั้นกด OK ดังรูปที่ 8.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

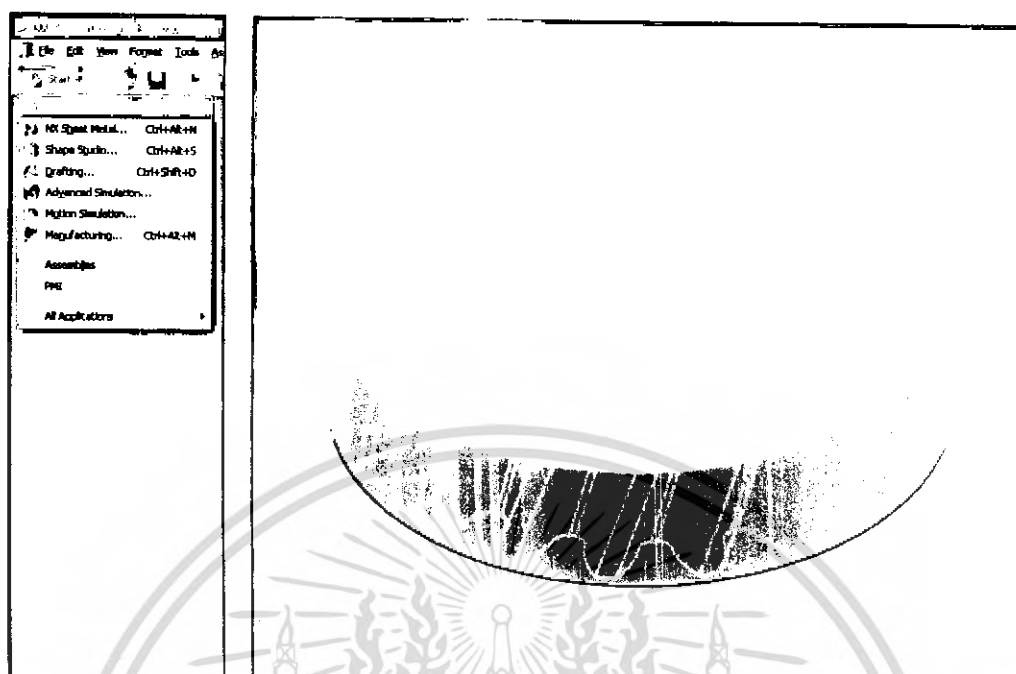


รูปที่ 8.4 การเปิดชิ้นงานที่มีอยู่ใน Directory

3) เมื่อ Import Part File มาแล้วขั้นตอนต่อไปจะต้องทำการสร้าง Blank ให้กับ Part เพื่อใช้จำลองเส้นทางการเดิน Tool Path ของการกัดเฟืองเฉียง ซึ่ง Blank เป็นส่วนของชิ้นงานที่จะต้องถูกนำออกไป หรือถูกกัดด้วยใบมีดซึ่งในทางปฏิบัติ Blank เป็นชิ้นงานดิบที่จะถูกกัด การสร้าง Blank นั้นจะใช้วัสดุ (Material) ที่เตรียมไว้สำหรับการผลิตซึ่งจะถูกยึดกับปากกาชิ้นงาน ส่วน Part นั้นเป็นชิ้นงานที่เราจะผลิตออกมาซึ่งก็คือเฟืองเฉียง

การสร้าง Blank ใน Program Unigraphics NX4 นั้นจะให้เลือกสร้างใน Modeling Application ใช้คำสั่ง Cylinder เลือกเป็นแบบ Diameter, Height แล้วกำหนดค่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงให้มากกว่าของชิ้นงานเล็กน้อยซึ่งในการนำชิ้นงานไปกัดในงานจริงควรใช้วัสดุที่มีขนาดและความสูงเท่ากันเพื่อป้องกันการเกิดค่า Error

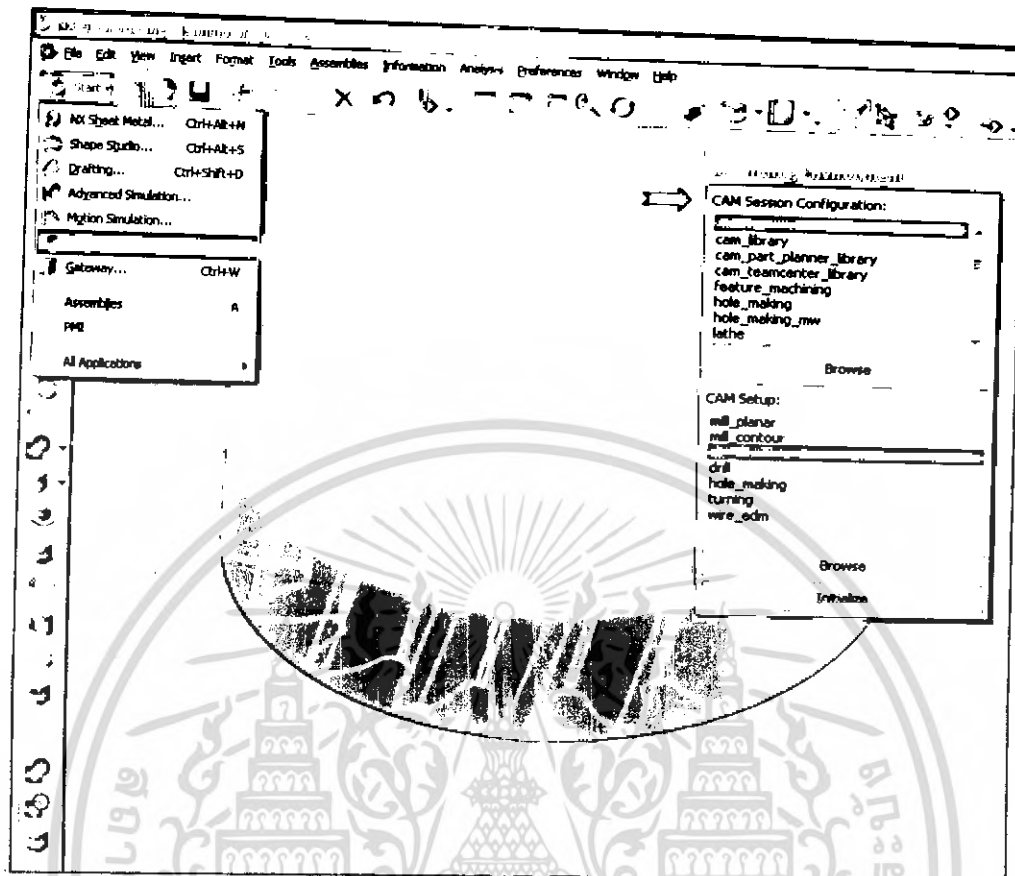
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.5 การเข้า Modeling Application และการสร้าง Blank

4) เมื่อสร้าง Blank ใน Modeling Application แล้วจะเริ่มทำการจำลองการกัดโดยเลือก Manufacturing Application และเลือกสถานะแวดล้อมของการกัดงาน (Machining) ในโหมด (Manufacturing) ใน Program Unigraphics NX4 จะเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาทุกครั้งในการเริ่มต้นการทำงานกับชิ้นงานใหม่ แต่เมื่อเรากลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง Program จะจดจำข้อมูลเหล่านี้เอาไว้โดยไม่ต้องกำหนดใหม่อีกครั้งขั้นตอนนี้เรียกว่าการ CAM Configuration

สิ่งแรกที่เราต้องพิจารณาก็คือ เราจะต้องการใช้กลุ่มของสถานะแวดล้อมการทำงานกลุ่มใด (สามารถกำหนดกลุ่ม CAM Session ขึ้นได้เอง) สำหรับงานทั่ว ๆ ไปแล้วเรามักจะเลือกกลุ่มของ cam_general แล้วต่อไปก็กำหนดเลือก CAM Setup ตามที่ต้องการ (ตามชนิดรูปทรงของ Geometry) ในที่นี้เราจะกำหนดสถานะแวดล้อมการทำงานโดยเลือกที่ CAM Session เป็นแบบ cam_general และเลือก CAM Setup เป็นแบบ mill_multi-axis แล้วกด Initialize

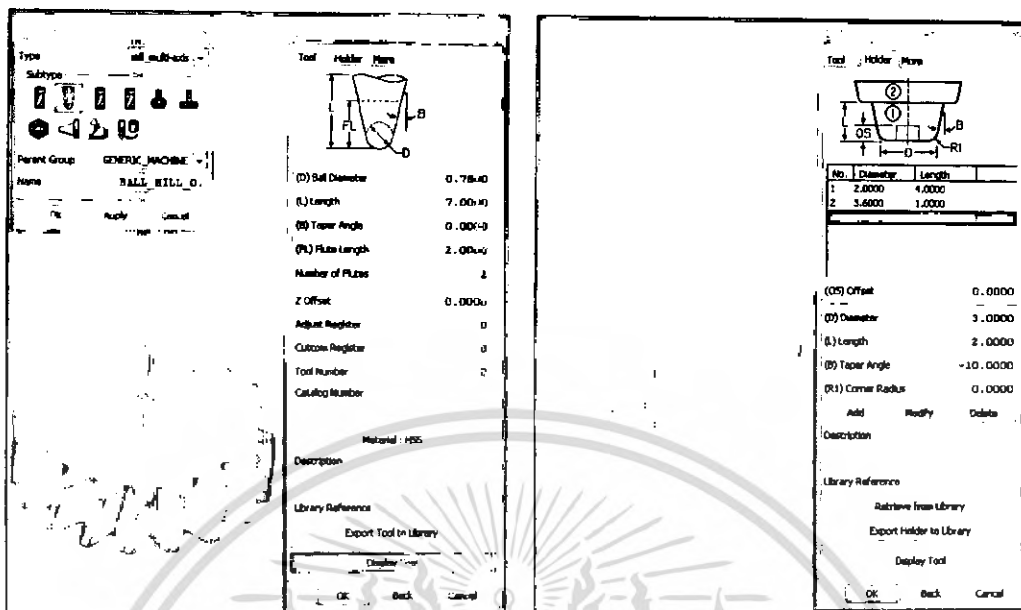


รูปที่ 8.6 การเข้า Manufacturing Application และการเลือกสภาวะของเครื่องจักร

5) ขั้นตอนการกำหนด Tool สำหรับการกัดชิ้นงาน ซึ่ง Tool ก็คือ ไขวี่มิดสำหรับการกัดงานที่ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับรูปแบบการกัดชิ้นงาน ชนิดของวัสดุของชิ้นงานรวมถึงความเร็วรอบของการกัดชิ้นงานอีกด้วย โดยในการกำหนด Tool นี้เราจะกำหนดประเภทของ Tool เป็นแบบ Ball Nose End Mill ซึ่งใช้ในการกัดงานที่มีขนาดเล็ก บริเวณปลายจะมีลักษณะโค้งมน เหมาะกับการกัดละเอียดในบริเวณที่แคบ ที่ Tool ขนาดใหญ่เข้าไม่ถึง

ใน Program Unigraphics NX4 จะ Create Tool โดยเลือก mill_multi-axis แบบ BALL-MILL แล้วกด OK ที่ Tab Tool ทำการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 inches ความยาว 7 inches และ วัสดุเลือกเป็น High Speed Steel แล้ว Display Tool ใน Program Unigraphics NX4 จะแสดงลักษณะของ Tool ให้เห็น เมื่อ Create Tool แล้วที่ Tab Holder เราก็กำหนดขนาดของ Holder ที่ใช้จับ Tool โดยในเครื่องกัด CNC นั้นชุดของไขวี่มิดกัดจะเป็นชุดเดียวกัน แล้ว Display Tool ใน Program Unigraphics NX4 จะแสดงลักษณะของ Tool และ Holder ให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



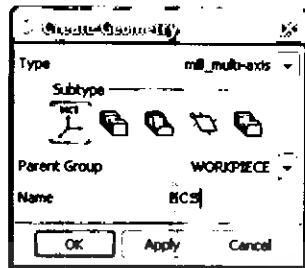
รูปที่ 8.7 การ Create Tool

6) เมื่อเราสร้าง Tool หรือใบมีดใน Program Unigraphics NX4 จากนั้นเราจะต้องกำหนดขอบเขตของ Geometry จะเป็นเส้นที่ใช้ควบคุมให้ Tool Path วิ่งออกไปนอกบริเวณที่กำหนดในการสร้าง Geometry เราจะเลือกเป็น mill_multi-axis แบบ MCS (Machine Coordinate System) เป็นแกน 3 มิติ (XM, YM, ZM) ที่ใช้ทำงานซึ่งมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของ Tool โดยจะอ้างอิงกับระบบแกน WCS (Work Coordinate System) ซึ่งเราจะใช้ MCS ในการควบคุมการเดินของใบมีด ซึ่ง Geometry จะแบ่งออกเป็น

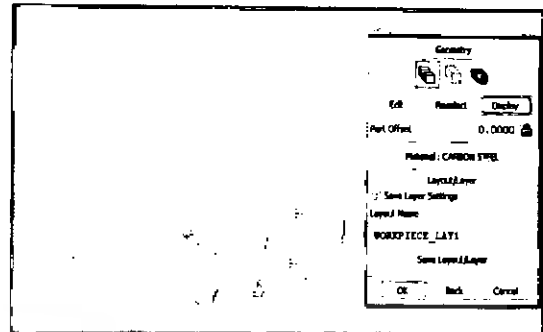
Part Geometry เป็นส่วนของชิ้นงานที่เหลืออยู่หลังการกัดแล้ว

Blank Geometry เป็นส่วนของชิ้นงานที่จะต้องถูกนำออกไป หรือถูกกัดด้วยใบมีดซึ่งในทางปฏิบัติเราจะเลือก Blank Geometry จากชิ้นงานดิบที่จะถูกกัด

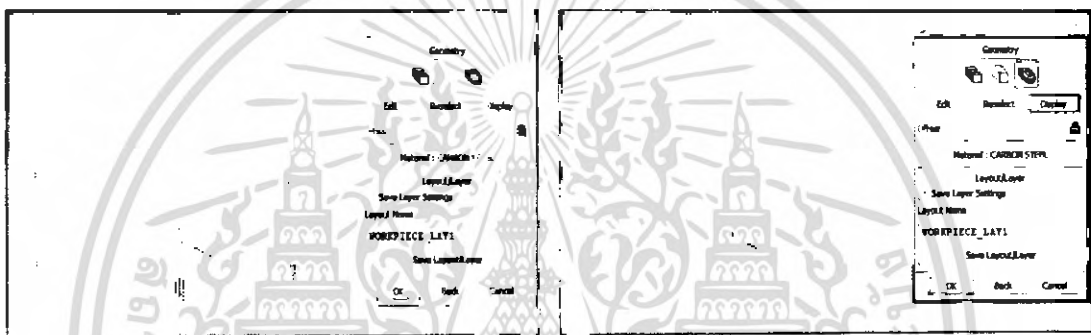
Check Geometry เป็นส่วนของ Geometry ที่ใช้สำหรับจับชิ้นงานเพื่อให้เกิดความมั่นคงในขณะที่มีการกัดของใบมีดอย่างรุนแรง Program จะรับรู้ว่าเป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้ Tool Path วิ่งเข้าไปสร้างความเสียหายโดย Tool Path จะเว้นอย่างอัตโนมัติ ถึงแม้ว่าจะมีการเลือกขอบเขตไปแล้ว



การสร้าง Geometry



การเลือก Part Geometry



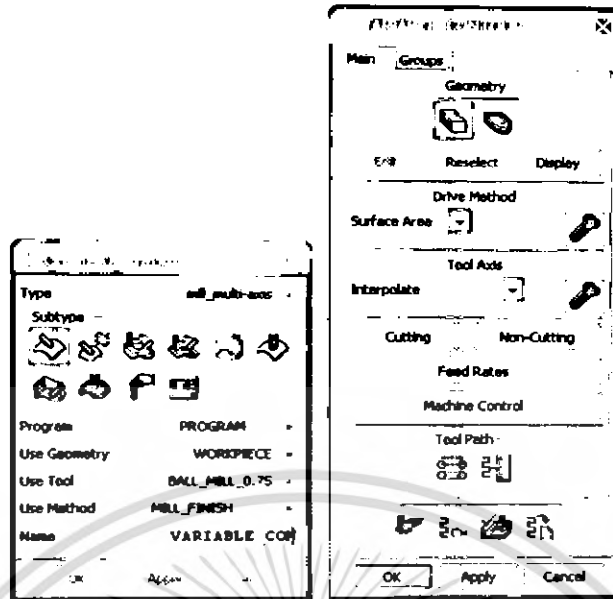
การเลือก Blank Geometry

การเลือก Check Geometry

รูปที่ 8.8 การ Create Geometry

7) การสร้าง Operation ของการกัดเลือก Type เป็นแบบ mill_multi-axis เลือก Subtype เป็นแบบ VARIABLE_CONTOUR เลือก Geometry เป็นแบบ WORKPIECE เลือก Tool เป็นแบบ BALL_MILL_0.75 และเลือก Method เป็นแบบ MILL_FINISH จากนั้นกด OK จะปรากฏ VARIABLE_CONTOUR Dialog Box ให้เลือก Drive Method เป็นแบบ Surface Area และเลือก Tool Axis เป็นแบบ Interpolate

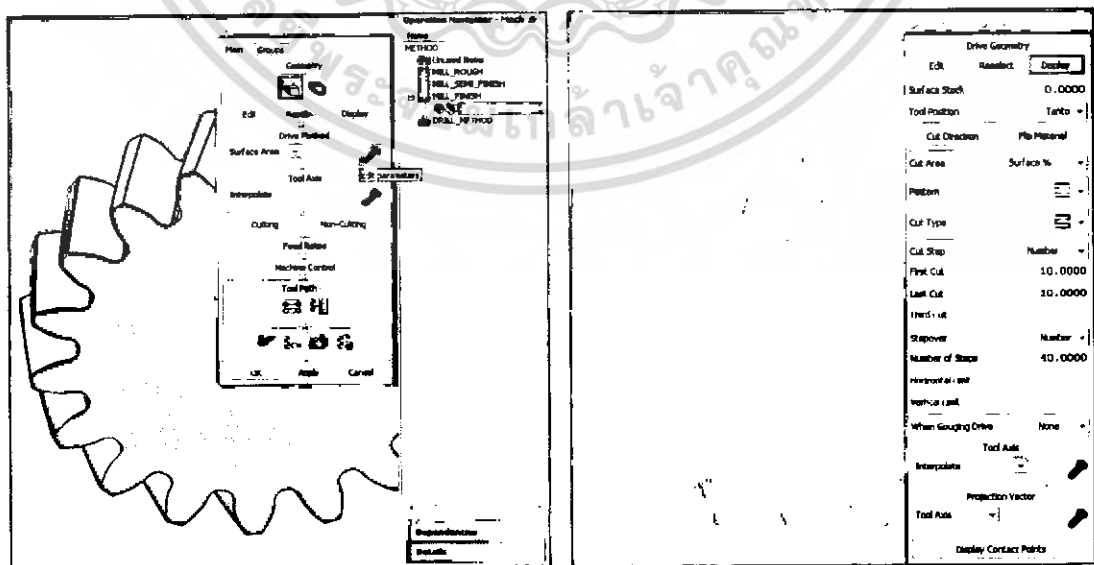
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.9 การ Create Operation

เราจะทำการเลือก Surface เพื่อทำการวิเคราะห์ โดยจะทำการจำลองการกัดเพียงหนึ่งฟัน ซึ่ง ฟันเพียงเดียวมีลักษณะสมมาตรรอบแกนการหมุนของเฟือง ดังนั้นจึงสามารถ Transformation การกัด ฟันเพียงแล้วทำการ Copy เส้นทางการเดินของ Tool Path ได้

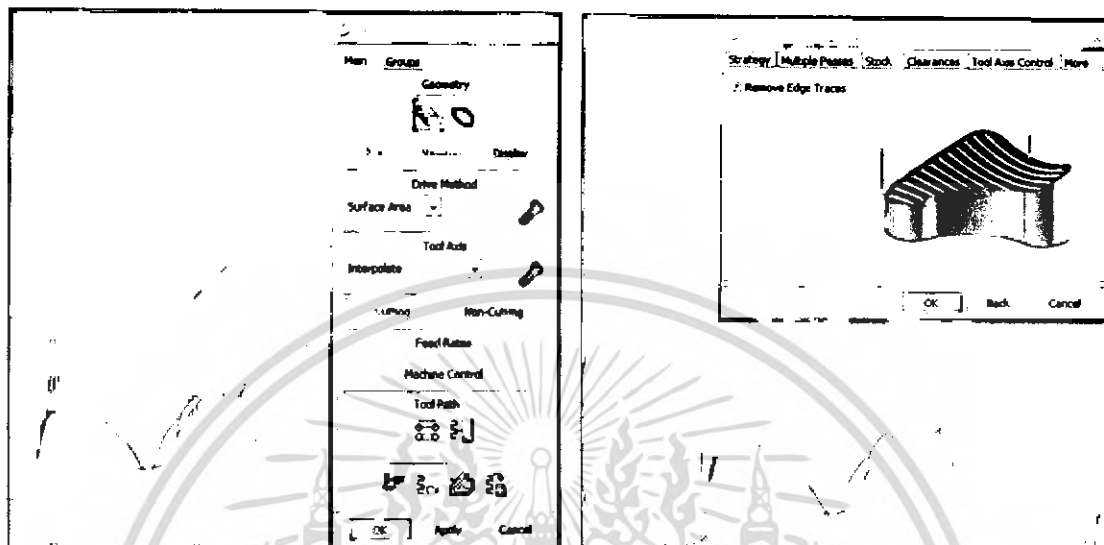
ที่ VARIABLE_CONTOUR Dialog Box ในช่องของ Drive Method ให้เลือก Edit parameters จะปรากฏ Surface Drive Method Dialog Box ขึ้นมาให้เลือก Surface ของฟันเพียงหนึ่งฟัน เลือก Cut Type เป็นแบบ Zig-Zag เลือก Number of Steps เท่ากับ 40 (จำนวน Steps ยิ่งสูงความละเอียดของ การเดิน Tool หรือ Tool Path จะยิ่งละเอียดมาก) และเลือก Tool Axis เป็นแบบ Interpolate



รูปที่ 8.10 การเลือกพื้นผิวและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการเดินของ Tool

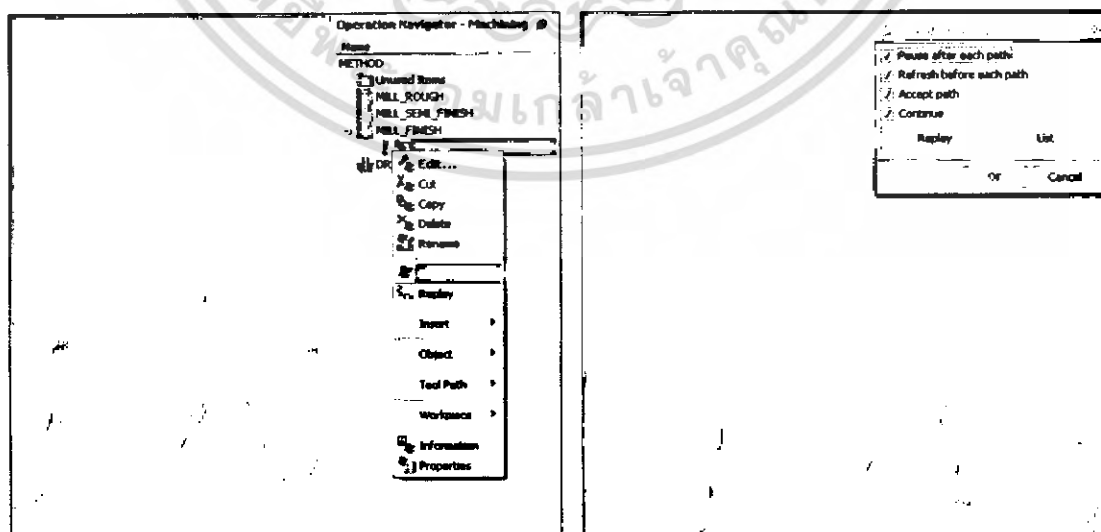
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเรากำหนดค่า Parameter ใน Surface Drive Method Dialog Box แล้วให้กด Display Drive Path เพื่อดูเส้นทางการเดินของ Tool Path จากนั้นจะทำการกำหนดค่าของ Cutting Parameter ให้เลือกเป็นแบบ Remove Edge Traces



รูปที่ 8.11 การวางแผนลักษณะการเดินหรือการสร้าง Tool Path

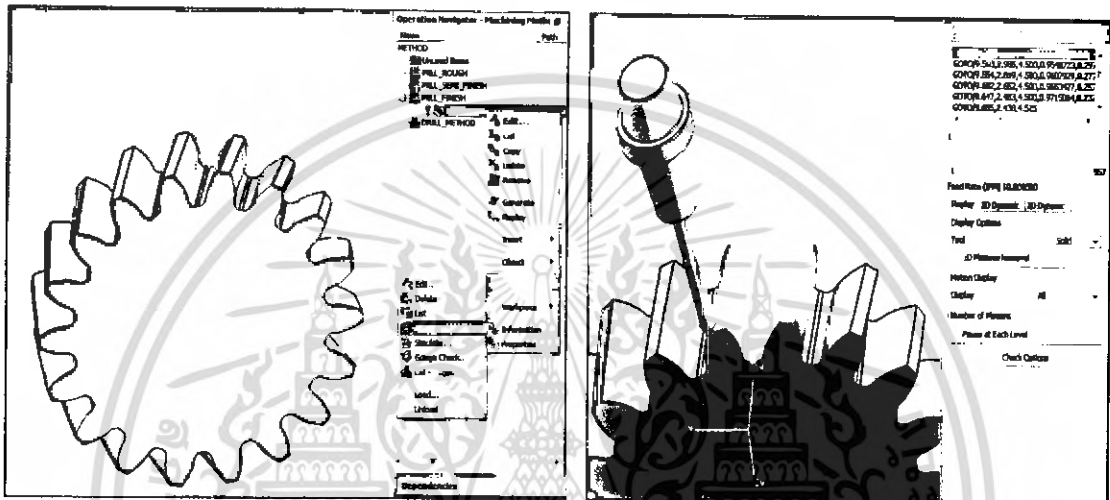
8) หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่า Parameter ต่าง ๆ อย่างเหมาะสมแล้วขั้นตอนต่อไปทำการ Generate Tool Path โดยที่ Program จะทำการคำนวณเส้นทางการเดิน Tool Path โดยอาศัยข้อมูลทั้งหมด เพื่อการกัดชิ้นงานสิ่งที่คำนวณได้เราเรียกว่า “โปรแกรมการกัด” ซึ่งโปรแกรมที่ได้เหล่านี้สามารถเข้าไปแก้ไขได้อีก หรือเข้าไปตรวจสอบเพราะเป็นภาษาที่ใช้ควบคุมเครื่องจักรที่เราสามารถอ่านออกและสามารถเข้าใจได้ ซึ่งในชิ้นงานหนึ่งอาจจะประกอบไปด้วยหลายๆ โปรแกรมการกัดก็ได้



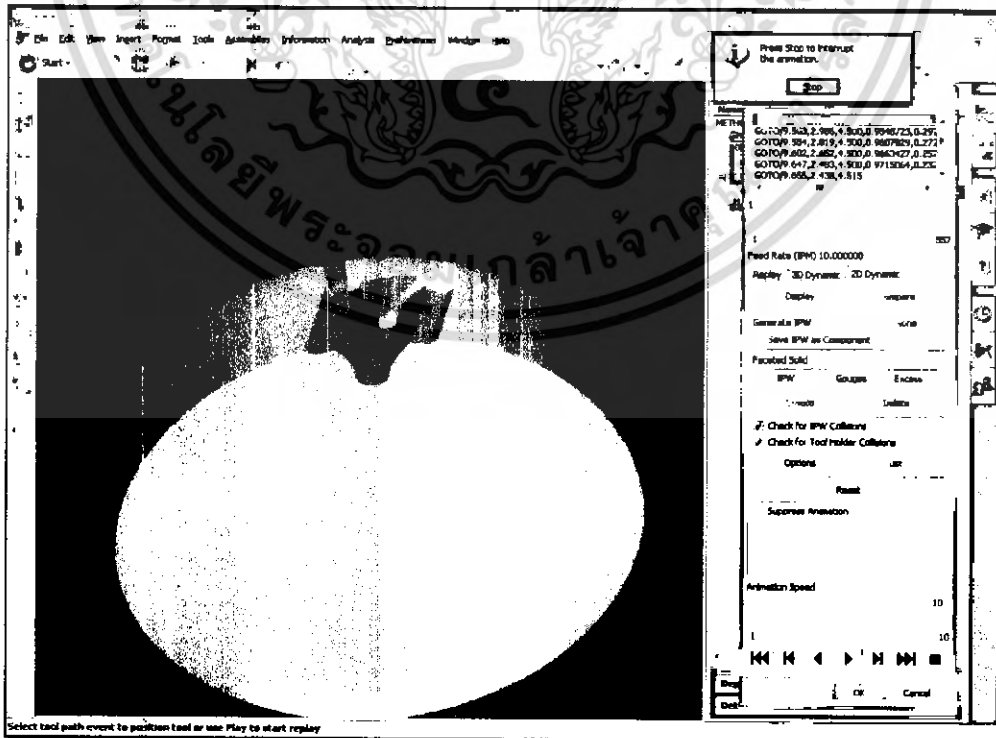
รูปที่ 8.12 การ Generate การเคลื่อนที่ของ Tool

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) เมื่อได้ทำการคำนวณโดยการ Generate Tool Path เรียบร้อยแล้วขั้นตอนนี้จะเป็นการนำโปรแกรมการกัดที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบ (Verification) โดยจะแสดงออกมาด้วยการเคลื่อนที่ของ Tool ไปตามเส้นทาง Tool Path ที่คำนวณได้ เพื่อดูความถูกต้องหรือแบบ Dynamic ที่มีการจำลองชิ้นงานและ Tool แบบเสมือนจริงที่กดให้เห็นทุกขั้นตอน โดยจะมีคำสั่งเปรียบเทียบ (Compare) โดยเปรียบเทียบกับ Part Geometry เดิม ซึ่งเราจะสามารถตรวจสอบได้เลยว่าถูกต้องจริงหรือไม่ มีการกินเข้าไปในเนื้องานด้วยหรือไม่

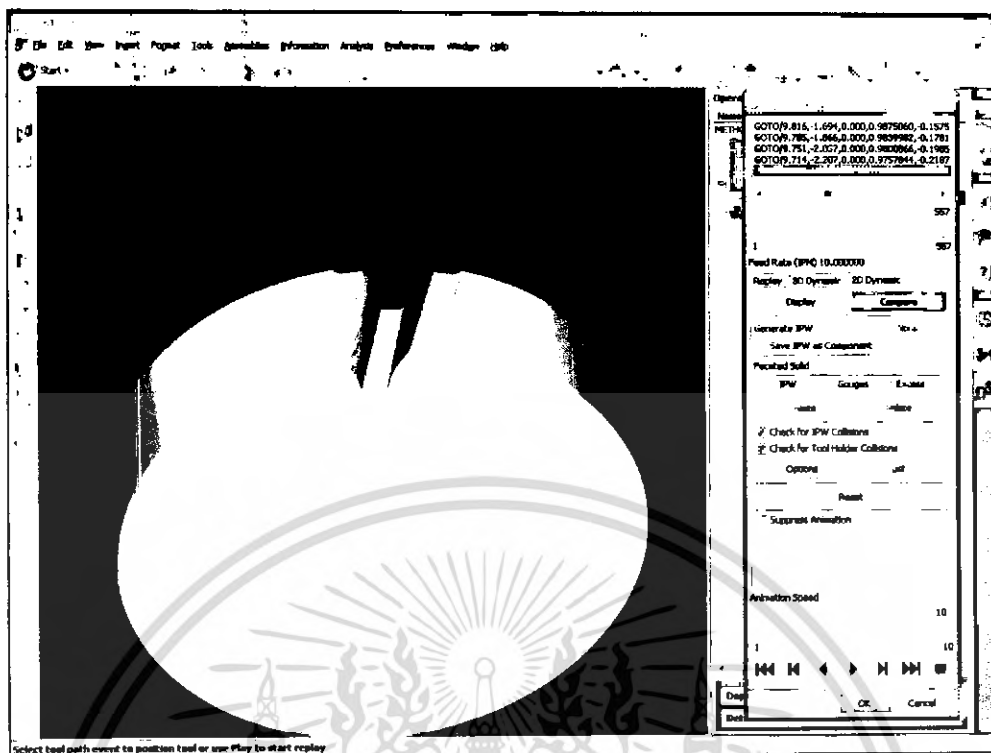


รูปที่ 8.13 การ Verify การเคลื่อนที่ของ Tool



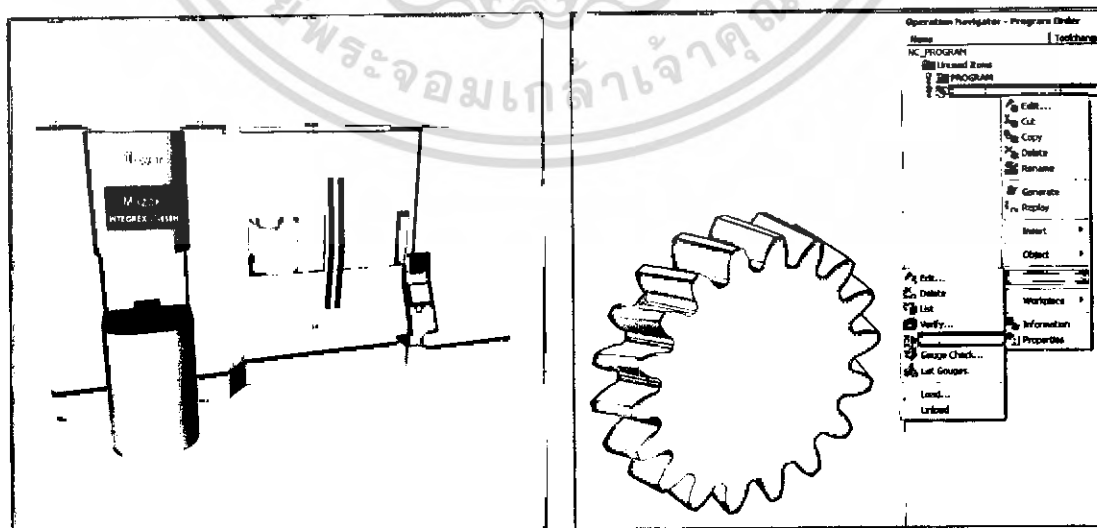
รูปที่ 8.14 แสดงการกัดชิ้นงาน โดยการเคลื่อนที่ตามเส้นทาง Tool Path

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



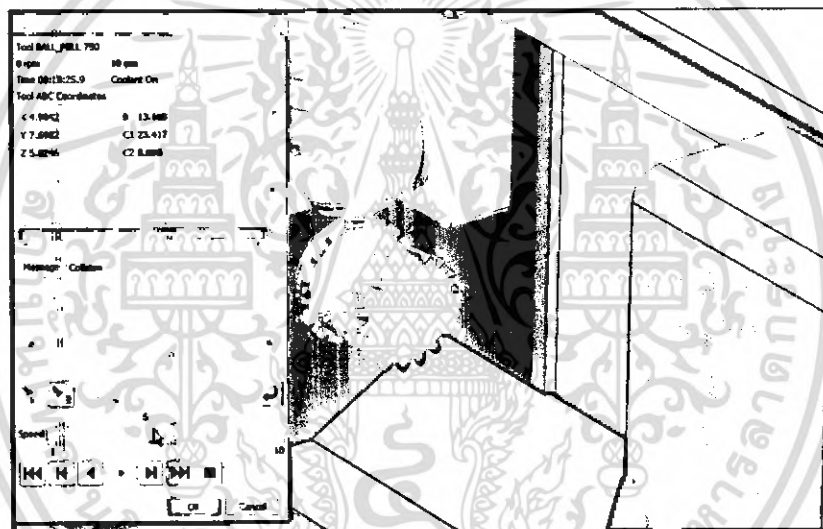
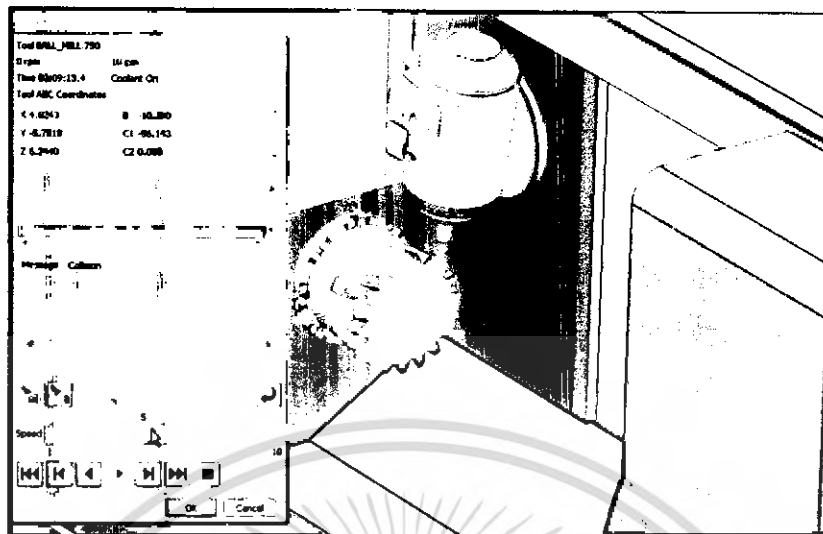
รูปที่ 8.15 ลักษณะพื้นผิวของฟันเฟืองที่ได้จากการกัดชิ้นงาน

10) เมื่อเราได้ทำการ Verify Tool Path เปรียบเทียบการกัดชิ้นงานแล้ว ต่อไปจะเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองการกัดจริง (Simulation) โดยใช้เครื่องจักร การกัดจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับแต่ละรุ่นแต่ละยี่ห้อของเครื่องจักร โดยเครื่องกัด CNC ที่เรานำมาใช้ในการจำลองการกัดจริงนี้เป็นเครื่องจักรยี่ห้อ Mazak รุ่น Integrex e-650H โดยขั้นตอนการ Simulation จะให้เราเลือกเครื่องจักรที่จะใช้แล้วเลือกโหมด Simulate Machine จากนั้น โปรแกรมจะทำการแสดงการกัด โดยเครื่องกัด CNC ให้เห็น



รูปที่ 8.16 เครื่องกัด CNC ยี่ห้อ Mazak รุ่น Integrex e-650H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

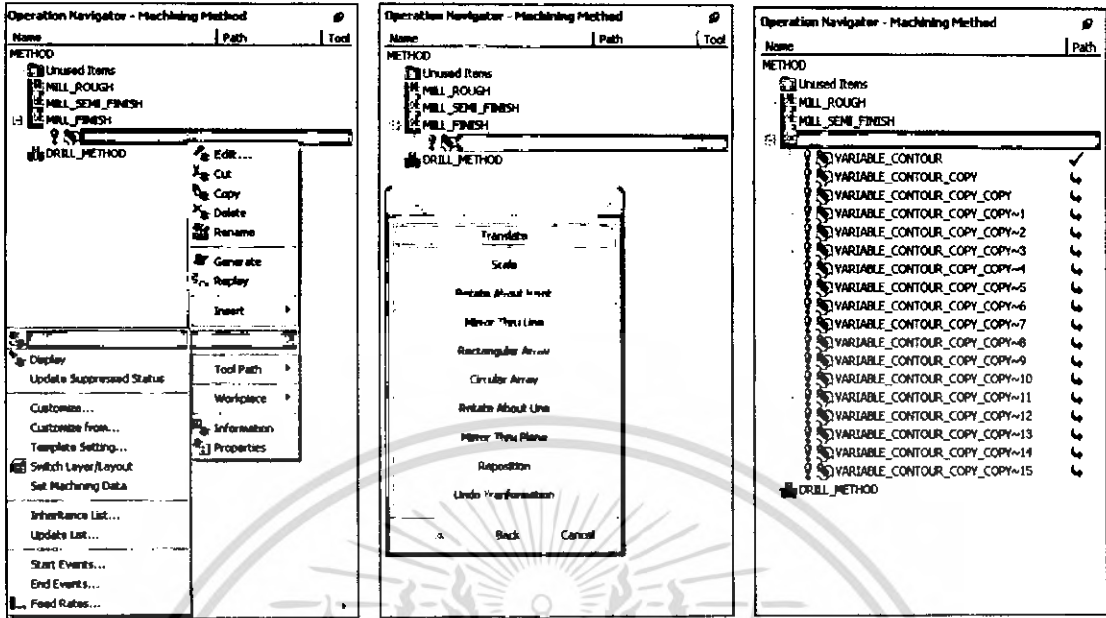


รูปที่ 8.17 การ Simulation การกัดเฟืองเฉียงด้วยเครื่องกัด CNC

11) ในการกัดเฟืองเฉียงเราได้จำลองการกัดเฟืองหนึ่งฟันเฟืองแต่เวลาเราแปลง Code ของเครื่องจักรเราสามารถแปลงออกมาได้ครบทุกฟันโดยการ Copy การกัดฟันเฟืองโดยเปลี่ยนแปลงองศาของการกัดโดยเทียบกับจำนวนของฟันเฟืองโดยมีวิธีการทำดังนี้

เลือก Object → Transformation → ที่ Transformation Dialog Box เลือก Rotate About Point (0, 0, 0) → กำหนดองศาเท่ากับ 20 เนื่องจากเฟืองที่ต้องการมี 18 ฟันเฟือง → กด OK แล้วเลือกคำสั่ง Copy จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณฟันถัดไปให้ → กด Accept

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.18 การแปลง Code ให้ครบทุกพื้นเฟืองโดยการ Transformation

ทำการ Verify Tool Path แล้วเปรียบเทียบการกัดชิ้นงาน โดยการ Verify Tool Path ครั้งนี้เป็น การแสดงการกัดพื้นเฟืองทุกพื้นว่ามีความถูกต้องใกล้เคียงกับ Part Geometry หรือไม่ เพื่อจะได้ทำการ Post Processing ต่อไป

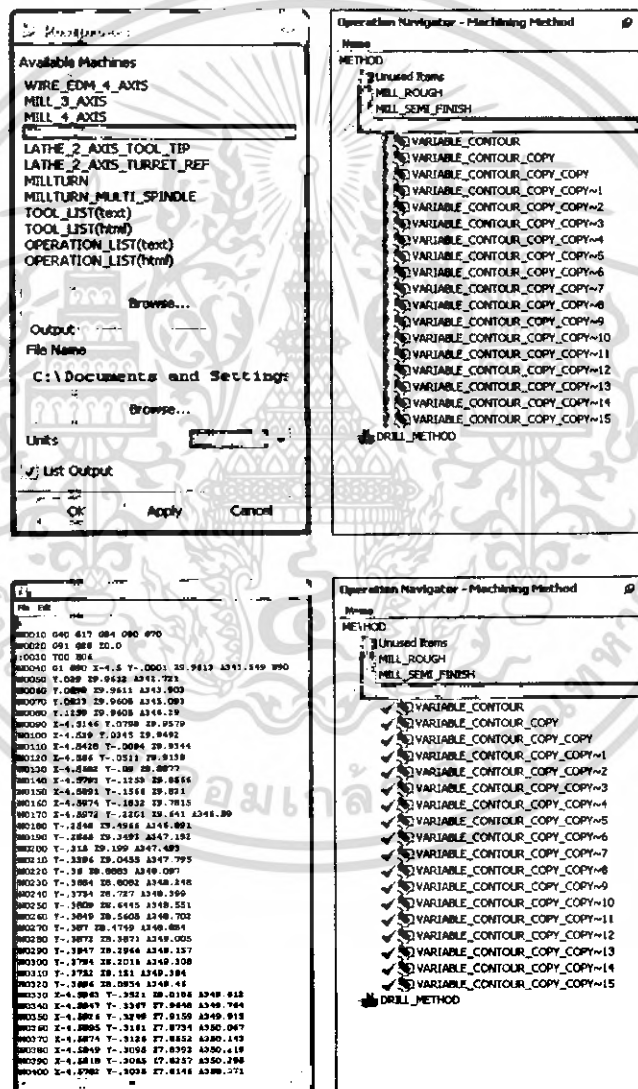


รูปที่ 8.19 แสดงการกัดเฟืองเฉียงครบทุกพื้นเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12) ขั้นตอนการสร้าง NC Code (Post Processing) เป็นขั้นตอนสุดท้ายหลังจากเราได้ทำการเปรียบเทียบ (Verification) โดยการเปรียบเทียบกับ Part Geometry หากไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ต่อไปเราจะนำโปรแกรมการกัดที่ได้ทั้งหมดผ่านกระบวนการที่ปรับให้โปรแกรมการกัดสามารถใช้ได้กับเครื่องจักรที่เรานำมาใช้ในการกัดจริง (ขึ้นอยู่กับยี่ห้อของเครื่องกัด CNC)

วิธีนี้จะเรียกว่า Post Processing ในรูปของ NC Code ซึ่งมีทั้ง M-Code และ G-Code ต่าง ๆ เพื่อนำไปควบคุมเครื่องกัด CNC กัดงานตามที่ต้องการซึ่งตัว Processor จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางทำหน้าที่แปลงไฟล์ .CLS ให้เป็นไฟล์ .PTP (จะไม่สามารถใช้กับต่างรุ่นหรือต่างยี่ห้อได้เลย)



รูปที่ 8.20 แสดง NC Code ที่จะนำไปใช้ควบคุมเครื่องกัด CNC 5 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

สรุปผลการวิจัย

9.1 สรุปผลการวิจัย

ศึกษากรรมวิธีการผลิตเฟืองแบบต่าง ๆ เช่น การขึ้นรูป การใช้เครื่องจักรกลในการผลิต โดยจะเน้นการศึกษาการผลิตแบบใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling machine)

ศึกษารูปร่างของเฟืองและทฤษฎีการสร้างเฟืองโดยใช้หลักวิธีพื้นฐานแบบอินโวลูตในการสร้างฟันเฟือง

ออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างพิกัดบนเส้นพื้นผิวของฟันเฟืองเฉียง โดยใช้สมการรูปร่างทางเรขาคณิตของตัวเร็กคัตเตอร์, สมการเงื่อนไขการขบกันของฟันเฟือง, และรูปแบบการย้ายระบบพิกัด สำหรับสร้างความสัมพันธ์เพื่อใช้เขียนโปรแกรมในการออกแบบ

เขียนโปรแกรมสร้างพื้นผิวของฟันเฟืองเฉียง สร้างแบบจำลองการกัดขึ้นรูปเฟืองเฉียง แล้วทำการสร้างรหัสในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีเพื่อใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของมิดกัทมิลลิ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถผลิตเฟืองเฉียงได้จริง แต่เครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน ในอุตสาหกรรมบ้านเรามีน้อยค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง ซึ่งไม่เหมาะที่จะผลิตเพื่อนำมาใช้งานเอง แต่ถ้ารับเหมาทำในลักษณะเชิงพาณิชย์ ทำการผลิตเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

9.2 ข้อเสนอแนะ

ในการผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบ 5 แกนนั้น ในการจำลองการกัดชิ้นงานด้วยโปรแกรมจะต้องทราบถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ของเครื่องกัดซีเอ็นซีเป็นอย่างดี เนื่องจากเครื่องกัดที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นมีความหลากหลาย การเคลื่อนที่ของแกนก็จะมีแตกต่างกันออกไป รหัสที่ใช้ในการควบคุมเครื่องก็จะมีแตกต่างกันออกไปอีก ดังนั้น NC Code ที่ใช้ควบคุมเครื่องในแต่ละเครื่องก็จะมีแตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยนี้จะอ้างอิงเครื่องกัดซีเอ็นซียี่ห้อ Mazak รุ่น Integrex e-650H ที่ใช้ในการผลิต ซึ่งที่ผ่านมาได้ทำการจำลองการกัดเฟืองเฉียงและทำการแปลง NC Code สำหรับเครื่องรุ่นนี้เท่านั้น

บรรณานุกรม

- จำรูญ ดันติพิศาลกุล. 2545. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล1. ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : เอสอาร์พรีนติ้งแมส โปรคักส์.
- นวินดา ขจรเดชะศักดิ์. 2546. “การศึกษาค่าส่งผ่านที่ผิดพลาดของเฟืองตรง.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิทยา สวงนวรรณ. 2545. เทคโนโลยีการออกแบบชิ้นส่วนและการสร้างแม่พิมพ์ขั้นสูง. กรุงเทพฯ : เอส.พี.ซี.บีคส์.
- Bui Tri Si. 1997. “Computer Aided Parametric Design and Manufacturing of Bevel Gear.” Asian Institute of Technology School of Advance Technologies Bangkok, Thailand.
- Chung Biau Tsay. 1988 “Helical Gear with Shaped Teeth.” ASME Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design. 110(1) : 482-491.
- Ewert, R.H. 1997. **Gear and Gear Manufacture**. New York : Chapman & Hall.
- Mott, R.L. 1999. **Machine Element in Mechanical Design**. 3rd ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- Norton, R.L. 2006. **Machine Design an Integrated Approach**. 3rd ed. New Jersey : Pearson Education, Inc.
- Shigley, J.E. Mischke, C.R. and Budynas, R.G. 2004. **Mechanical Engineering Design**. 7th ed. New York : McGraw-Hill.
- Suh, S.H. Jib, W. S. and Hong, H.D. 1988. “Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling.” International Journal of Machine Tool & manufacture. 41(1) : 833-850.
- Watson, H. J. 1970. **Modern Gear Production**. New York : Pergamon Press Inc.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear all
-----INPUT-----
P = 3;          *diametral pitch
N = 18;        #number of teeth (more than 18 only)
W = 2.5;       #gear thickness
beta = 15;     #helix angle

-----STANDARD PARAMETERS OF THE HELICAL GEAR-----
lamda = (90-beta)*pi/180;  #lead angle
alpha = 20*pi/180;        #pressure angle (20 only)
Rp = N/(2*P);            #pitch radius
pc = pi/P;               #circular pitch
t = pc/2;                #tooth thickness (on pitch circle)

-----STANDARD PARAMETERS OF THE RACK-CUTTER USED IN INDUSTRY-----
aBr = 1.00/P;           #addendum of rack cutter
bBr = 1.00/P;           #dedendum of rack cutter
a = 1.25/P;            #clearance
b = 1.25/P;            #fillet radius
c = 0.25/P;
rf = c/(1-sin(alpha));

xBr = t/2-aBr*tan(alpha)-rf*cos(alpha);  #x_bar :final magnitude of l
tBr = (pi/2-alpha);                      #theta_bar :final magnitude of theta
gBr = (aBr+bBr)/cos(alpha);              #g_bar :final magnitude of g
uBr = W/sin(lamda);                       #u_bar :final magnitude of u

-----
n = 30;          #n section
m = 3;          #m section
k = 30;         #k section
q = 15;         #q section
du = uBr/n;
dl = xBr/m;
dt = tBr/k;
dg = gBr/q;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-----LEFT SIDE-----

```

for i=1:n+1,
    u(i)=du*(i-1);
*Part [MOM1]
for j=1:m+1,
    l(j)=dl*(j-1);
    phi = (u(i)*cos(lamda)-l(j)*sin(lamda))/Rp;
    X1L(i,j) = (Rp-a)*sin(phi);
    Y1L(i,j) = (Rp-a)*cos(phi);
    Z1L(i,j) = -(l(j)+Rp)*phi*sin(lamda)*sec(lamda);
end
*Part [M2M]
for j=1:k,
    t(j) = dt*(j-1);
    phi = u(i)*cos(lamda)-xBr-a*tan(t(j))+rf*tan(t(j))*sin(lamda)/Rp;
    X1L(i,j+m+1) = (rf*(1-cos(t(j)))-a*Rp)*sin(phi)+rf*(1-cos(t(j)))-a)*tan(t(j))*sin(lamda)*cos(phi);
    Y1L(i,j+m+1) = (rf*(1-cos(t(j)))-a*Rp)*cos(phi)-(rf*(1-cos(t(j)))-a)*tan(t(j))*sin(lamda)*sin(phi);
    Z1L(i,j+m+1) = -(xBr+rf*sin(t(j))*cos(lamda)-(xBr+rf*tan(t(j))-a*tan(t(j))*tan(lamda)*...
        sin(lamda)-Rp)*phi*tan(lamda);
end
*Part [M2M3]
for j=1:q,
    g(j) = dg*(j-1);
    phi = (u(i)*cos(lamda)-(xBr-aBr/tan(alpha)+g(j)/sin(alpha)+rf*cos(alpha))*sin(lamda))/Rp;
    X1L(i,j+k+m+1) = (g(j)*cos(alpha)-aBr+Rp)*sin(phi)+(g(j)*cos(alpha)-aBr)*cot(alpha)*sin(lamda)*cos(phi);
    Y1L(i,j+k+m+1) = (g(j)*cos(alpha)-aBr+Rp)*cos(phi)-(g(j)*cos(alpha)-aBr)*cot(alpha)*sin(lamda)*sin(phi);
    Z1L(i,j+k+m+1) = -(xBr+rf*cos(alpha)+g(j)*sin(alpha))*cos(lamda)-(xBr+rf*cos(alpha)-aBr/tan(alpha)+...
        g(j)/sin(alpha))*tan(lamda)*sin(lamda)-Rp*phi*tan(lamda);
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4-----RIGHT SIDE-----

```

for i=1:n+1,
  u(i)=du*(i-1);
  %Part [MOM1]
  for j=1:m+1,
    l(j)=dl*(j-1);
    phi = (u(i)*cos(lamda)+l(j)*sin(lamda))/Rp;
    X1R(i,j) = (Rp-a)*sin(phi);
    Y1R(i,j) = (Rp-a)*cos(phi);
    Z1R(i,j) = (l(j)-Rp)*phi*sin(lamda)*sec(lamda);
  end
  %Part 'M2M2'
  for j=1:k,
    t(j)=dt*(j-1);
    phi = (u(i)*cos(lamda)+xBr-a*tan(t(j))+rf*tan(t(j))*sin(lamda))/Rp;
    X1R(i,j+m+1) = (rf*(1-cos(t(j)))-a+Rp)*sin(phi)-(rf*(1-cos(t(j)))-a)*tan(t(j))*sin(lamda)*cos(phi);
    Y1R(i,j+m+1) = (rf*(1-cos(t(j)))-a+Rp)*cos(phi)+(rf*(1-cos(t(j)))-a)*tan(t(j))*sin(lamda)*sin(phi);
    Z1R(i,j+m+1) = (xBr+rf*sin(t(j))*cos(lamda)+(xBr+rf*tan(t(j))-a*tan(t(j))*tan(lamda))*...
      sin(lamda)-Rp*phi*tan(lamda);
  end
  %Part [M2M3]
  for j=1:q,
    g(j)=dg*(j-1);
    phi = (u(i)*cos(lamda)+(xBr-abr/tan(alpha)+g(j))/sin(alpha)+rf*cos(alpha)*sin(lamda))/Rp;
    X1R(i,j+k+m+1) = (g(j)*cos(alpha)-aBr+Rp)*sin(phi)-(g(j)*cos(alpha)-aBr)*cot(alpha)*sin(lamda)*cos(phi);
    Y1R(i,j+k+m+1) = (g(j)*cos(alpha)-aBr+Rp)*cos(phi)+(g(j)*cos(alpha)-aBr)*cot(alpha)*sin(lamda)*sin(phi);
    Z1R(i,j+k+m+1) = (xBr+rf*cos(alpha)+g(j)*sin(alpha))*cos(lamda)+(xBr+rf*cos(alpha)-aBr/tan(alpha)+...
      g(j)/sin(alpha))*tan(lamda)*sin(lamda)-Rp*phi*tan(lamda);
  end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

plot(X1L(1,:),Y1L(1,:)) hold on
plot(X1R(1,:),Y1R(1,:))

add = b-c;
ded = a;

angle=0:2*pi/100:2*pi;
n=length(angle);

for i=1:n,
    xp(i) = Rp*cos(angle(i));
    yp(i) = Rp*sin(angle(i));
    xd(i) = (Rp-ded)*cos(angle(i));
    yd(i) = (Rp-ded)*sin(angle(i));
    xa(i) = (Rp+add)*cos(angle(i));
    ya(i) = (Rp+add)*sin(angle(i));
    xb(i) = Rp*cos(angle(i))*cos(alpha);
    yb(i) = Rp*sin(angle(i))*cos(alpha);
end

hold .

plot(xp,yp,'r--');
plot(xd,yd,'b--');
plot(xa,ya,'g--');
plot(xb,yb,'c--');

*-----CIRCULAR PATTERN of 1st TEETH-----
surf(X1L,Y1L,Z1L);
surf(X1R,Y1R,Z1R);

dphi = 2*pi/N;

for i=1:N-1,
    rot_ang = dphi*i;
    XL = X1L*cos(rot_ang) - Y1L*sin(rot_ang);
    YL = X1L*sin(rot_ang) + Y1L*cos(rot_ang);
    ZL = Z1L;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

XR = X1R*cos(rot_ang) - Y1R*sin(rot_ang);
YR = X1R*sin(rot_ang) + Y1R*cos(rot_ang);
ZR = Z1R;

surf(XL,YL,ZL);
surf(XR,YR,ZR);

end

axis equal
hold off

%-----COORDINATE DATA-----
fp = fopen('C:\matlab\DATA\id1.mat','w');
Final_XL = length(X1L);
Final_XR = length(X1R);

for i=1:Final_XL,
    fprintf(fp,'%f\n',X1L(i),Y1L(i),Z1L(i));
end

for i=1:Final_XR,
    fprintf(fp,'%f\n',X1R(i),Y1R(i),Z1R(i));
end

fclose(fp);
figure(2)
plot3(X1L,Y1L,Z1L); hold on
plot3(X1R,Y1R,Z1R);
grid
axis equal

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบและผลิตเฟืองเฉียงแบบอิงพารามิเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์¹

कररररर रररर, ररररर ररररर, मनररररर ररररर

บทคัดย่อ

เฟืองเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักร หรือเป็นตัวส่งถ่ายกำลังในเครื่องจักรกล เนื่องจากเฟืองนั้นมีลักษณะที่ยู่ยากซับซ้อนและมีลักษณะพิเศษเฉพาะตัว ซึ่งมีการออกแบบและมีการผลิตโดยเครื่องจักรชนิดพิเศษ ตัวอย่างเช่น เครื่องตัดด้วยฮ็อบ (Hobbing machine) และเครื่องไส (Shaping machine) ในบทความนี้ เรามุ่งมั่นที่จะผลิตเฟืองเฉียง โดยเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอน (ก) การแสดงแบบทางเรขาคณิตของเฟืองเฉียง, (ข) การวางแผนกระบวนการสำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซี, (ค) การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ของมิตตัดมิลลิ่ง (Tool path planning) และวิธีการสำหรับควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน (NC code generation)

Abstract

Gears are crucial components for modern precision machinery as a means for the power transmission mechanism. Due to their complexity and unique characteristics, gears have been designed and manufactured by a special type of machine tools, such as gear hobbing and shaping machines. In this paper, we attempt to manufacture the helical gear by a five-axis CNC milling machine. The process of helical gear manufacturing consists of (a) geometric modeling of the helical gears, (b) process planning for NC machining, (c) a tool path planning and execution algorithm for both five-axis controls.

© 2006 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: Machine tools; Hobbing and shaping machines; Helical gear; Milling machine; Geometric modeling; Tool path; Sculptured surface machining

1. บทนำ

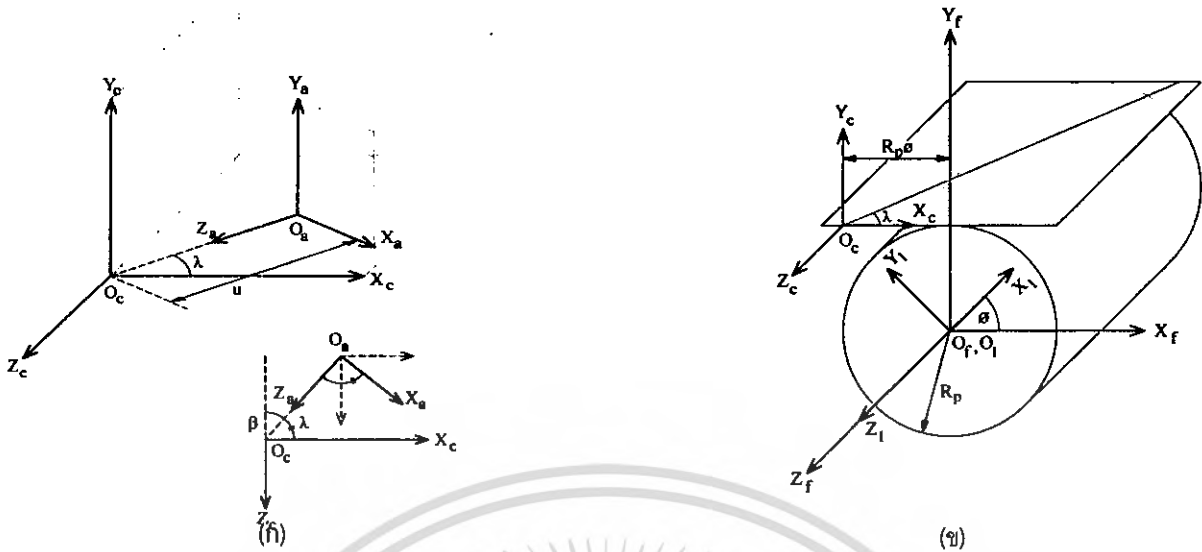
เฟืองเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักรกลที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำเที่ยงตรงสำหรับในงานอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล ดังเช่น สำหรับงานระบบส่งถ่ายกำลังเฟืองเฉียง (Helical gear) เป็นเฟืองที่มีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเฟืองตรง (Spur gear) เนื่องจากเป็นเฟืองที่มีฟันเอียงทำมุมกับแกนของการหมุน เราสามารถนำเฟืองเฉียงมาประยุกต์ใช้ในลักษณะเดียวกับเฟืองตรง แต่เฟืองเฉียงมีข้อดีที่ตรงที่มีเสียงรบกวนในระหว่างการส่งถ่ายกำลังน้อยกว่า และในบางครั้งยังสามารถใช้เฟืองเฉียงในการส่งถ่ายกำลังไปยังเพลานี่ไม่ขนานกันได้ [3,6] จากการศึกษาจะเน้นในการออกแบบตามลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต รูปแบบของพื้นผิวของเฟืองเฉียงที่ถูกสร้างโดยอาศัยหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยอ้างอิงอยู่บนพื้นฐานการทำงานของเฟือง และนำความรู้ด้านเรขาคณิตมาเกี่ยวข้อง

ในส่วนกระบวนการผลิตเป็นที่ทราบกันดีว่า เฟืองได้ถูกผลิตด้วยเครื่องจักรกลชนิดพิเศษ อาทิเช่น เครื่องตัดด้วยฮ็อบ และเครื่องไส [3,4] โดยนัยนี้ทำให้ดูเหมือนว่า หากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเฟืองนั้นมีผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยในลักษณะเปิด มีไม่บ่อยมาก ในอันที่จริงแล้วยังไม่มีการค้นพบผลงานวิจัยใด ๆ บนแผนงานกระบวนการขึ้นรูปพื้นผิว (Sculptured surface machining , SSM) ของเฟืองเฉียง ถึงแม้ว่านักค้นคว้าบางคนจะสังเกตเห็นความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตเฟืองด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีก็ตาม

¹ ชื่ออังกฤษ "Computer Aided Parametric Design and Manufacturing of Helical Gear"

² นักศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1 รหัส 47015351 และ 47015362 ตามลำดับ

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล kpmonsak@kmitl.ac.th



รูป 6 แสดงที่มาของการย้ายพิกัด [1,10]

ทำนองเดียวกันก็จะได้รูปแบบของการย้ายพิกัด ในการย้ายพิกัดจากระบบ S_c ไปยังระบบ S_f ตามรูป 6 (ข) ดังนี้

$$[R_f] = [M_{fc}] [R_c] \quad \text{เมื่อ } [M_{fc}] = [M_{fj}] [M_{jc}]$$

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & R_p (\sin \phi - \phi \cos \phi) \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & R_p (\cos \phi + \phi \sin \phi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ซึ่งจะได้ $[R_f]$ ในแต่ละช่วง

7. การหาเวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวของแร็กคัตเตอร์

เวกเตอร์ตั้งฉากขนาดหนึ่งหน่วย, $\bar{n}_c = \frac{\bar{N}_c}{\|\bar{N}_c\|}$

บริเวณ $\overline{M_0 M_1}$

$$\bar{N}_c = \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial l} \times \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial u} \quad \text{จะได้ } \bar{n}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

บริเวณ $\overline{M_1 M_2}$

$$\bar{N}_c = \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial \theta} \times \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial u} \quad \text{จะได้ } \bar{n}_c = \begin{bmatrix} -\sin \theta \sin \lambda \\ -\cos \theta \\ -\sin \theta \cos \lambda \end{bmatrix} \quad (16)$$

บริเวณ $\overline{M_2 M_3}$

$$\bar{N}_c = \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial g} \times \frac{\partial \bar{R}_c}{\partial u} \quad \text{จะได้ } \bar{n}_c = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \lambda \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \cos \lambda \end{bmatrix} \quad (17)$$

8. สมการเงื่อนไขการขบกันของฟันเฟือง (Meshing equation)

$$\frac{X_c - x_c}{n_{xc}} = \frac{Y_c - y_c}{n_{yc}} = \frac{Z_c - z_c}{n_{zc}} \quad (18)$$

บริเวณ $\overline{M_0 M_1}$

$$u = \frac{R_p \phi}{\cos \lambda} + l \tan \lambda \quad (19)$$

$$\phi = \frac{u \cos \lambda - l \sin \lambda}{R_p} \quad (20)$$

บริเวณ $\overline{M_1 M_2}$

$$u = \frac{R_p \phi}{\cos \lambda} + (\bar{x} - a \tan \theta + r_f \tan \theta) \tan \lambda \quad (21)$$

$$\phi = \frac{u \cos \lambda - (\bar{x} - a \tan \theta + r_f \tan \theta) \sin \lambda}{R_p} \quad (22)$$

บริเวณ $\overline{M_2 M_3}$

$$u = \frac{R_p \phi}{\cos \lambda} + \left(\bar{x} - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{g}{\sin \alpha} + r_f \cos \alpha \right) \tan \lambda \quad (23)$$

$$\phi = \frac{u \cos \lambda - \left(\bar{x} - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{g}{\sin \alpha} + r_f \cos \alpha \right) \sin \lambda}{R_p} \quad (24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการเงื่อนไขการขบกันของพื้นเฟืองทำให้ได้สมการของ u จากนั้นจึงนำสมการ u ที่ได้ในแต่ละช่วงไปแทนลงในสมการของ $[R_1]$ ที่ได้จากสมการที่ (14) จัดรูปสมการใหม่ได้ $[R_1]$ ดังนี้

บริเวณ $\overline{M_0M_1}$

$$\begin{aligned} x_1 &= (R_p - a) \sin \phi \\ y_1 &= (R_p - a) \cos \phi \\ z_1 &= -(l + R_p \phi \sin \lambda) \sec \lambda \end{aligned} \quad (25)$$

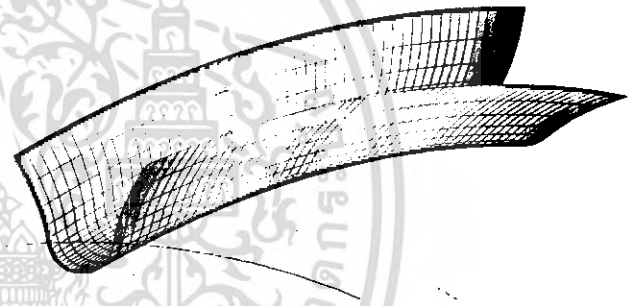
บริเวณ $\overline{M_1M_2}$

$$\begin{aligned} x_1 &= (r_f(1 - \cos \theta) - a + R_p) \sin \phi \\ &\quad + (r_f(1 - \cos \theta) - a) \tan \theta \sin \lambda \cos \phi \\ y_1 &= (r_f(1 - \cos \theta) - a + R_p) \cos \phi \\ &\quad - (r_f(1 - \cos \theta) - a) \tan \theta \sin \lambda \sin \phi \\ z_1 &= -(\bar{x} + r_f \sin \theta) \cos \lambda \\ &\quad - (\bar{x} + r_f \tan \theta - a \tan \theta) \tan \lambda \sin \lambda - R_p \phi \tan \lambda \end{aligned} \quad (26)$$

บริเวณ $\overline{M_2M_3}$

$$\begin{aligned} x_1 &= (l \cos \alpha - \bar{a} + R_p) \sin \phi \\ &\quad + (l \cos \alpha - \bar{a}) \cot \alpha \sin \lambda \cos \phi \\ y_1 &= (l \cos \alpha - \bar{a} + R_p) \cos \phi \\ &\quad - (l \cos \alpha - \bar{a}) \cot \alpha \sin \lambda \sin \phi \\ z_1 &= -(\bar{x} + r_f \cos \alpha + l \sin \alpha) \cos \lambda \\ &\quad - \left(\bar{x} + r_f \cos \alpha - \frac{\bar{a}}{\tan \alpha} + \frac{l}{\sin \alpha} \right) \tan \lambda \sin \lambda \\ &\quad - R_p \phi \tan \lambda \end{aligned} \quad (27)$$

จากสมการ $[R_1]$ จะได้พื้นผิวของพื้นเฟืองเฉียงดังรูป 7



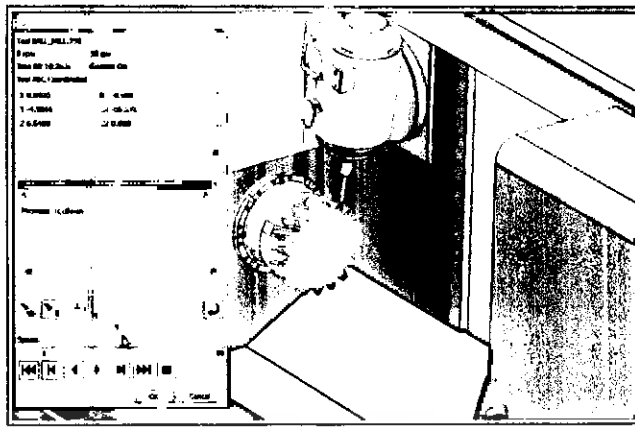
รูป 7 พื้นผิวของพื้นเฟืองเฉียง

สัญลักษณ์

a	แอดเดนดัม	R_p	รัศมีของวงกลมพิทช์
b	ดีเดนดัม	\bar{R}_1	เวกเตอร์บอกตำแหน่งพิกัดบนพื้นผิวของพื้นเฟือง
c	ระยะเว้น	S_i	ระบบพิกัด $i = a, c, f, l$
g	พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนค่าได้ ; $g = \overline{M_2M_3}$	l	ความหนาของพื้นเฟือง
l	พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนค่าได้ ; $l = \overline{M_0M_1}$	u	พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนค่าได้ ; $u = \overline{O_cO_o}$
$[M_{ij}]$	เมตริกซ์การย้ายพิกัดจากระบบ S_i ไปยังระบบ S_j	w	ความหนาของเฟือง
\bar{n}_c	เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวของเร็กคัตเตอร์ขนาดหนึ่งหน่วย	สัญลักษณ์กรีก	
\bar{N}_c	เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวของเร็กคัตเตอร์	λ	มุมลิต
N	จำนวนของพื้นเฟือง	β	มุมฮิลิกซ์
P	ไดมิตรัลพิทช์	α	มุมกด
P_c	เชอคูลาร์พิทช์	ϕ	การเคลื่อนที่เชิงมุมของเฟือง
r_f	รัศมีฟิลเล็ตที่โคนของพื้นเฟือง	θ	พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนค่าได้ ; $\theta = \overline{M_1M_2} / r_f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกห้าทศวรรษให้หลังเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารชุดนี้ที่มิควรนำไปใช้



รูป 8 การจำลองการกัดขึ้นรูปเฟืองเฉียง

9. การจำลองการกัดขึ้นรูปของเฟืองเฉียง

จากพื้นผิวของเฟืองเฉียงที่ได้จากการเขียนโปรแกรมจะถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิต และทำการจำลองการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยโปรแกรมยูนิกราฟิกส์ ดังรูป 8

10. รหัสในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี

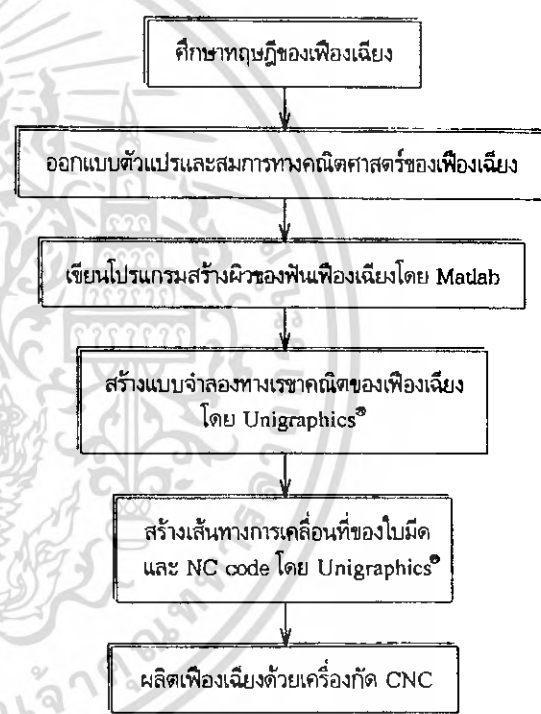
เมื่อทำการจำลองการกัดขึ้นรูปเฟืองเฉียง โปรแกรมยูนิกราฟิกส์สามารถแปลงรหัสในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี (NC code) ขึ้นมาเพื่อนำไปควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีในการผลิตจริง ดังนี้

%
 N10 T0000.8 B00
 N20 G97 S0 M203
 N30 G28 U0.0 Y0.0
 N40 G98 G1 G90 X5.1238 Y-8.5496 Z6.5937
 B-15.19 C72.132 F10. M203 M08
 N50 X5.0408 Y-8.4937 Z6.5934 B-15.176 C72.705
 N60 X4.931 Y-8.45 Z6.5936 B-15.169 C73.455
 N70 X4.7986 Y-8.4191 B-15.165 C74.357
 N80 X4.6455 Y-8.3981 B-15.162 C75.399
 N90 X4.4738 Y-8.3845 B-15.155 C76.567
 N100 X4.2873 Y-8.3753 Z6.5937 B-15.143 C77.836

N5120 X4.8628 Y8.4539 Z2.3015 B15.068 C-36.649
 N5130 X4.8083 Y8.4542 Z2.3181 B15.07 C-36.599
 N5140 X3.1303 Y8.4543 Z2.7699
 N5150 X3.4118 Y8.4585 Z2.7702 B15.119 C-34.683
 N5160 X3.7049 Y8.4469 Z2.7704 B15.147 C-32.689
 N5170 X3.9765 Y8.4267 Z2.7705 B15.157 C-30.841
 N5180 X4.2371 Y8.403 Z2.7704 B15.153 C-29.067
 N5190 X4.4778 Y8.3822 B15.141 C-27.427
 N5200 X4.6919 Y8.3702 Z2.7703 B15.126 C-25.969
 N5210 X4.8742 Y8.3723 Z2.7702 B15.114 C-24.728
 N5220 X5.0224 Y8.392 B15.109 C-23.72
 N5230 X5.1357 Y8.4325 Z2.7703 B15.114 C-22.949
 N5240 X5.2151 Y8.4903 Z2.77 B15.13 C-22.405
 N5250 M2

%
 หมายเหตุ: รหัสนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

11. ขั้นตอนการดำเนินงาน



12. สรุป

ศึกษากรรมวิธีการผลิตเฟืองแบบต่าง ๆ เช่น การขึ้นรูป การใช้เครื่องจักรกลในการผลิต โดยจะเน้นการศึกษาการผลิตแบบใช้เครื่องกัดมิลลิ่ง (Milling machine)

ศึกษารูปร่างของเฟืองและทฤษฎีการสร้างเฟืองโดยใช้หลักวิธีพื้นฐานแบบอินโวลูตในการสร้างพื้นเฟือง

ออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างพิกัดบนเส้นพื้นผิวของพื้นเฟืองเฉียง โดยใช้สมการรูปร่างทางเรขาคณิตของตัวเร็กคัตเตอร์, สมการเงื่อนไขการขบกันของพื้นเฟือง, และรูปแบบการย้ายระบบพิกัด สำหรับสร้างความสัมพันธ์เพื่อใช้เขียนโปรแกรมในการออกแบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนโปรแกรมสร้างพื้นผิวของฟันเฟืองเฉียง สร้างแบบจำลองการกัดขึ้นรูปเฟืองเฉียง แล้วทำการสร้างรหัสในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีเพื่อให้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของมิดกัตมีลลิ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถผลิตเฟืองเฉียงได้จริง แต่ในการผลิตด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบ 5 แกนนั้น ในการจำลองการกัดขึ้นงานด้วยโปรแกรมจะต้องทราบถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ของเครื่องกัดซีเอ็นซีเป็นอย่างดี เนื่องจากเครื่องกัดที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นมีความหลากหลาย การเคลื่อนที่ของแกนก็มีความแตกต่างกันออกไป รหัสที่ใช้ในการควบคุมเครื่องก็มีความแตกต่างกันออกไปอีก ซึ่งงานวิจัยนี้จะอ้างอิงเครื่องกัดซีเอ็นซียี่ห้อ Mazak รุ่น Integrex e-650H ที่ใช้ในการผลิต

- [8] S. H. Suh, W. S. Jih, and H. D. Hong, "Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling," International Journal of Machine Tool & manufacture., Vol. 41, 1988, pp.833-850.
- [9] Bui Tri Si, "Computer Aided Parametric Design And Manufacturing Of Bevel Gear," Asian Institute of Technology School of Advance Technologies Bangkok, Thailand, 1997, pp.4-111.
- [10] Chung - Biau Tsay, "Helical Gear With Shaped Teeth," ASME Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design., Vol. 110, Dec 1988, pp.482-491.

13. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำแนะนำในการทำงานครั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็น แนวทางในการศึกษาข้อมูล หรือการเขียนบทความก็ตาม และขอขอบคุณ อาจารย์สยาม สงวนรัมย์ ที่ให้คำแนะนำสำหรับแก้ไขข้อผิดพลาดในการนำเสนอโครงงานที่ผ่านมาก อีกทั้งต้องขอขอบคุณ พี่สมชาติ นราบัว ที่ได้ให้คำปรึกษาในเรื่องของโปรแกรมยูนิกราฟฟิกส์ และความรู้เกี่ยวกับเครื่องกัดซีเอ็นซี

เอกสารอ้างอิง

- [1] นวนิดา ขจรเดชะศักดิ์, "การศึกษาค่าส่งผ่านที่ผิดพลาดของเฟืองตรง," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปรินูญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546, หน้า 4-20.
- [2] จำรูญ ตันดิพิศาลกุล, "การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล1," ครั้งที่ 3, บริษัท เอสอาร์ พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด, 2545, หน้า 128-211.
- [3] H. J. Watson, "Modern Gear Production," Pergamon Press Inc., New York, 1970.
- [4] R. L. Norton, "Machine Design An Integrated Approach," 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2006.
- [5] J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas, "Mechanical Engineering Design," 7th ed., McGraw - Hill, New York, 2004.
- [6] R. L. Mott , "Machine Element in Mechanical Design," 3rd ed., Prentice - Hall, Inc., New Jersey, 1999.
- [7] R. H. Ewert, "Gear and Gear Manufacture," Chapman & Hall, New York, 1997. ไม่มีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้