สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำโปรแกรมชิ้นงาน CNC แบบเชิงโต้ตอบ

INTERACTIVE CNC PART PROGRAMMING

T060252

รัฐพล นวมพิพัฒน์

RATTAPOL NOUMPIPAT

วพ.
ร356ก
2548

เลขหมู่..............................
เลขทะเบียน 60252
วัน,เดือน,ปี 27 มี.ย. 2549

b 11525616
i

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1986-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERACTIVE CNC PART PROGRAMMING

RATTAPOL NOUMPIPAT

A THESIS SUMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974-15-1986-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำโปรแกรมชิ้นงาน CNC แบบเชิงโต้ตอบ
นักศึกษา	นายรัฐพล นวมพิพัฒน์
รหัสนักศึกษา	44611533
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ทวี เทศเจริญ

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้จะเป็นการประยุกต์ใช้การทำข้อมูลแบบล่วงหน้าอย่างง่ายโดยอาศัยการโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์มาช่วยในการจัดทำโปรแกรมชิ้นงาน CNC แบบเชิงโต้ตอบสำหรับรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานแบบ 2 มิติและเฟืองตรงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางยอดฟันน้อยกว่า 400มิลลิเมตรซึ่งช่วยให้สามารถทำโปรแกรมได้ง่าย และยังช่วยให้สามารถจัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ เพื่อให้มีศักยภาพในการรองรับการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ของอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

การโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์ (Parametrical part programming) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเตรียมข้อมูลเชิงตัวเลขได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะสามารถเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ได้มาก ซึ่งเป็นผลดีต่อระดับการสื่อสารข้อมูลเชิงตัวเลขระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องจักร CNC นอกจากนี้การโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์สามารถพัฒนารูปแบบการทำงานโดยผู้ปฏิบัติการเองและยังสามารถปรับแต่งให้เข้ากับรูปแบบปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Interactive CNC Part Programming
Student	Mr. Rattapol noumpipat
Student ID.	44611533
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Thavee Teschareon

ABSTRACT

The main objective of this study is to explain how interactive CNC part programming can be generated from parametrical part programming method on PC level (or off line programming) for 2 dimension of basic geometry and spur gear(outside diameter less than 400 mm.)

By this technique, we are able to get less time for program preparation, less human interventions, thus, resulting in less mistakes, and smoother throughput of programs, data, and worksheets. The system is constructive and based on skilled experiences that results in a high flexibility for the user, and can be implemented in any manufacturing process, for small batch or large scale production.

Parametrical part programming can be developed to prepare numerical data effective, and offers a wide rage of potential industrial applications, provides a lot of faculties at both PC and controller level. Parametrical part programs can be developed by the user himself and tailored to his manufacturing problems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เนื่องมาจากคำแนะนำ การสนับสนุน รวมถึงการให้กำลังใจในการค้นคว้าวิจัยจากคณาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ รศ.ทวี เทศเจริญ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและเป็นเกียรติอย่างสูงในความอนุเคราะห์ของท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ. ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณบุญชู ลีลาขจรจิต นักวิชาการ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่เป็นทั้งรุ่นพี่และเป็นที่ปรึกษาในเรื่องต่างๆ รวมถึงเป็นครูที่แนะนำเทคนิคการเขียนโปรแกรมภาษาเบสิกให้แก่ผู้วิจัยในการนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมวิชวลเบสิกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผอ.ยุทธนา ตันติวิวัฒน์ ผอ.ฝ่ายวิศวกรรม และนายบุญสืบ ราชรัตนารักษ์ นักวิชาการประจำฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ เครื่องจักรและเครื่องมือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจโดยทั่วไป ซึ่งคุณค่าที่พึงจะมีได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขออุทิศส่วนที่ดีงามนี้ให้แก่บิดา มารดา ที่ล่วงลับไปแล้ว ซึ่งเป็นผู้ที่สนับสนุนการเรียนรู้ในทุกๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัย และหากมีสิ่งใดบกพร่องผู้วิจัยขอน้อมรับความผิดพลาดแต่เพียงผู้เดียว

รัฐพล นวมพิพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VII

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 3

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดในการวิจัย 3

1.6 ขอบเขตการวิจัย 4

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา 5

บทที่ 2 ทฤษฎีแนวความคิดพื้นฐาน 6

2.1 บทนำ 6

2.2 ระบบของเครื่องจักร CNC 7

2.3 ระบบแกนเครื่องจักร(Machine axis) 13

2.4 ระบบพิกัดบอกตำแหน่ง (Coordinate systems) 15

2.5 ระบบการเคลื่อนที่มีดตัดของเครื่องจักรCNC 20

2.6 ระบบพิกัดอ้างอิง 20

2.7 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องกัด CNC 20

2.8 การโปรแกรม CNC 27

2.9 คอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบ(Computer Aided Design: CAD) 28

2.10 คอมพิวเตอร์ช่วยงานการผลิต(Computer Aided Manufacturing : CAM) 29

บทที่ 3 สมการพาราเมตริก 31

3.1 การแสดงถึงพื้นฐานของสมการพาราเมตริก (Parametric Equations) 31

3.2 สมการสำหรับเส้นโค้ง (Curve Equations) 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทำโปรแกรมแบบพารามิเตอร์ 53

4.1 การทำโปรแกรมแบบพารามิเตอร์บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....53

4.2 การออกแบบคำสั่งโปรแกรมเฟืองตรง.....61

4.3 การทำโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์ในระดับตัวควบคุมของเครื่องจักร.....72

4.4 ระบบการทำงานแบบโต้ตอบ (Interactive System).....72

บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....75

5.1 วิธีการทดลอง.....75

5.2 ผลการทดสอบจากการสร้างคำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า และ ไฮเพอร์โบล่า.....75

5.3 ผลการทดสอบจากการสร้างคำสั่งสไปลน์.....78

5.4 ผลการทดสอบจากการสร้างคำสั่งเฟืองตรง 81

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....84

6.1 สรุปผลการวิจัย.....84

6.2 ข้อเสนอแนะ.....85

เอกสารอ้างอิง.....86

ภาคผนวก 89

ภาคผนวก ก. โครงสร้างโปรแกรมการคำนวณ.....90

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างโปรแกรมคำสั่งและโปรแกรมไฟล์ที่ได้จากการทดสอบ โปรแกรม.....97

ภาคผนวก ค. ตารางค่ามาตรฐานต่างๆ ของเฟือง ... .116

ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 122

ประวัติผู้เขียน 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 เปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องจักรกลทั่วไปกับเครื่องจักรกล NC 11

2.2 แสดงความสัมพันธ์ของเลขฐานต่างๆ...23

2.3 การให้โค้ดตัวอักษรของชุดรหัส EIA……………………………………………………..25

5.1 แสดงค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรมสร้างคำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่าและไฮเพอร์โบล่า...76

5.2 แสดงค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรมสร้างคำสั่งสไปลน์..79

5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่และพิกัดที่วัดได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป..............81

5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าพิกัดที่วัดได้ของเฟืองตรง 16 ฟัน โมดุล=5 , มุมกดดัน=20 องศา และ ค่าที่คำนวณได้จากสูตร...82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงกระบวนการควบคุมเชิงตัวเลข	8
2.2	แสดงการกำหนดแกนเชิงเส้นปฐมภูมิ :X,Y,และ Z ตามกฎมือขวา	14
2.3	แสดงการกำหนดแกนหมุนปฐมภูมิ : A,B,และ C ตามกฎมือขวา	14
2.4	แสดงแกนหลักทั้งสามของระบบพิกัดคาร์ตีเซียน	15
2.5	แสดงระบบพิกัดคาร์ตีเซียนแบบสองมิติ	16
2.6	แสดงกฎมือขวาการหมุนรอบแนวแกนและระนาบต่างๆ	17
2.7	แสดงระบบพิกัดเชิงขั้ว	18
2.8	แสดงระบบพิกัดทรงกระบอก	18
2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ตีเซียนและระบบพิกัดเชิงขั้ว	19
2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ตีเซียนและระบบพิกัดเชิงขั้ว กรณีจุดกำเนิดไม่อยู่ที่เดียวกัน	19
2.11	แสดงระบบพิกัดอ้างอิง	21
2.12	แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ CNC	22
2.13	แสดงแถบเทปกระดาษมาตรฐาน EIA สำหรับโปรแกรม NC	24
2.14	แสดงการเปรียบเทียบแถบเทปกระดาษมาตรฐาน EIA กับมาตรฐานASCII	26
2.15	แสดงการใช้ฐานข้อมูลร่วมกันของระบบCAD-CAM	30
3.1	แสดงค่าความชันของรูปปริภูมิทั้ง 3 แกน	33
3.2	แสดงเส้นตรงที่เกิดจากจุดสองจุดP_1และP_2	34
3.3	แสดงเส้นตรงที่เกิดจากการกำหนด โดยจุดศูนย์กลางและรัศมี	35
3.4	แสดงรูปวงรีที่ได้จากการกำหนดจุดศูนย์กลางแกนหลักและแกนรอง	37
3.5	แสดงรูปทรงเรขาคณิตของพาราโบลา	39
3.6	แสดงรูปทั่วไปของไฮเพอร์โบลา	40
3.7	แสดงรูปเส้นโค้งของสมการพาราเมตริกคิวบิกสไปลน์	42
3.8	แสดงการแบ่งช่วงของเส้นโค้งของสมการพาราเมตริกคิวบิกสไปลน์	43
4.1	แสดงส่วนประกอบหลักของโปรแกรม	54
4.2	แสดงกรอบกำหนดขอบเขตพื้นที่วาดรูป	55
4.3	แสดงโฟลชาร์ตของการตรวจแก้ข้อมูล	56
4.4	แสดงกล่องรับข้อมูลของเส้นตรง	57
4.5	แสดงกล่องรับข้อมูลของวงกลม	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.6 แสดงกล่องรับข้อมูลของวงรี.....58
4.7 แสดงกล่องรับข้อมูลของพาราโบล่า 59
4.8 แสดงกล่องรับข้อมูลของไฮเพอร์โบล่า.....59
4.9 แสดงกล่องรับข้อมูลของสไปลน์.....60
4.10 แสดงกล่องรับข้อมูลของเฟืองตรง.....60
4.11 แสดงส่วนประกอบของเฟืองตรง.....62
4.12 แสดงการเกิดเส้นโค้งอินเวอลูท.....64
4.13 แสดงความสัมพันธ์ของมุมกดดันบนจุดต่างๆ ของเส้นโค้งอินโวลูท.....64
4.14 แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของฟันแบบอินเวอลูท (Involute).....65
4.15 แสดงหลักการสร้างรูปโค้งอินเวอลูทของฟันเฟือง.....66
4.16 แสดงการแบ่งมุมสำหรับเขียนรูปฟันเฟืองตรง.....67
4.17 แสดงการแบ่งมุมสำหรับเขียนเส้นโค้งอินเวอลูท.....68
4.18 แสดงการหมุนภาพรอบจุดกำเนิด.....71
4.19 แสดงโฟลชาร์ตการใช้หน่วยความจำน้อยสุด.....74
5.1 แสดงภาพกราฟิกส์และG-code ที่ได้จากการป้อนข้อมูลคำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า และไฮเพอร์โบล่า.....76
5.2 แสดงภาพกราฟิกส์ที่ได้จากการแปลงข้อมูลเทียบกับโปรแกรมMaster CAM.....77
5.3 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักรCNC.....77
5.4 แสดงแบบงานที่กำหนดขนาดของลูกเบี้ยว.....78
5.5 แสดงภาพกราฟฟิกส์และG-code ที่ได้จากการป้อนข้อมูลคำสั่งสไปลน์.....79
5.6 แสดงภาพกราฟิกส์ของคำสั่งสไปลน์ในโปรแกรมMaster CAM.....80
5.7 แสดงผลจากคำสั่งสไปลน์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักรCNC.....80
5.8 แสดงภาพกราฟิกส์และG-code ที่ได้จากการป้อนข้อมูลคำสั่งเฟืองตรง.....81
5.9 แสดงภาพกราฟฟิกส์ของคำสั่งเฟืองในโปรแกรมMaster CAM.....82
5.10 แสดงผลจากคำสั่งเฟืองที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักรCNC.....83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

x	โคออร์ดิเนต x
y	โคออร์ดิเนต y
z	โคออร์ดิเนต z
X_c	จุดกำเนิดในแนวแกน x
Y_c	จุดกำเนิดในแนวแกน y
R_1	รัศมีของวงรีในพิกัดแกน x
R_2	รัศมีของวงรีในพิกัดแกน y
h	จุดกำเนิดของการเขียนภาพในแกน x
k	จุดกำเนิดของการเขียนภาพในแกน y
t	ตัวแปรเสริม
$\vec{P}$	เวกเตอร์ของเส้นตรง
L	ความยาวของเส้นตรง
R	รัศมีของวงกลม
A	ค่าคงที่ของสมการวงรี
B	ค่าคงที่ของสมการวงรี
F	จุดโฟกัส
h_i	ช่วงของตัวแปรเสริม
t_i	ตัวแปรเสริมที่จุดใดๆ
c	ค่าคงที่ที่ได้จากอินทิกรัล
d	ค่าคงที่ที่ได้จากอินทิกรัล
m	ค่าโมดุลของเฟือง
T	มุมกดดันของฟันเฟือง(Pressure angle)
NT	จำนวนฟันของเฟือง
Z	ค่าความลึกของชิ้นงาน
A_2	มุมเริ่มต้นในการเขียนเส้นโค้งอินเวอลูท
A_3	มุมสิ้นสุดในการเขียนเส้นโค้งอินเวอลูท
P	พิตซ์ในแนวเส้นรอบวง (circular pitch)
a	ช่วงสูงบนของฟันเฟือง (addendum)
b	ช่วงสูงล่างของฟันเฟือง (dedendum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

d	วงกลมพิตซ์ (pitch circle)
d_o	เส้นผ่าศูนย์กลางของยอดฟันเฟือง (outside diameter)
d_r	เส้นผ่าศูนย์กลางโคนฟัน (root diameter)
d_b	วงกลมฐาน (base circle)
inv ϕ	อินเวอลูทฟังก์ชั่น (involute function)

Greek symbols

β_i	ค่าของเมตริกที่ไม่เป็นเอกพันธ์ (Inhomogeneous element)
α	มุมสุดท้ายของเส้นโค้งอินเวอลูท
θ	มุมย่อยในการหมุนภาพ
θ_i	มุมย่อยที่ใช้ในการเขียนฟันเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ความเป็นมาของระบบ CAD/CAM กับคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ [1]

การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ (CAD : Computer- Aided Design) และการผลิตด้วยคอมพิวเตอร์ (CAM: Computer – Aided Manufacturing) ได้รับการยอย่องมาเป็นเวลานานแล้วว่าได้ช่วยให้งานทางด้านการออกแบบและการผลิต ขยายตัวออกไปอย่างมากมายมหาศาลคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (Computer graphics) ได้ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถมองเห็นผลงานสร้างสรรค์ของเขาได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องทำต้นแบบขึ้นมาก่อน เนื่องจากแบบพิมพ์เขียวทางด้านวิศวกรรมส่วนใหญ่จะมีการนำฟังก์ชั่นต่างๆ มาใช้ประโยชน์เช่น ฟังก์ชั่นของเส้นตรง, วงกลม วงรีเป็นต้น

ความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์ทำให้วิธีการคำนวณแบบต่างๆ ได้ถูกต้องประดิษฐ์ขึ้น เฟอร์กูสัน (Ferguson, 1963) ได้อธิบายเส้นทางเดินของระบบหรือชิ้นงานพาราเมตริกแทนที่จะใช้ระบบพิกัดคาร์ตีเซียน นิยามของระบบพิกัดใหม่นั้นขณะนี้ได้กลายเป็นมาตรฐานสำหรับการใช้งานโดยมีเหตุผลดังนี้ คือ

1.1.1.1 ทำให้สามารถบิดเส้นโค้งในระบบสามมิติได้โดยแทนด้วยคณิตศาสตร์อย่างง่าย

1.1.1.2 ช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อแทนที่เส้นโค้งต่างๆ ด้วยเส้นสัมผัสในแนวดิ่ง (Vertical tangents) ซึ่งมักพบเสมอในระบบพิกัดที่ถูกอยู่กับที่

1.1.1.3 ทำให้สามารถทำการเปลี่ยนแปลงระบบพิกัด (Coordinate transformation) ได้ เช่น การเคลื่อนย้ายแกน (translation) การหมุนแกน (rotation) เป็นต้น

1.1.1.4 รูปแบบพาราเมตริก (Parametric Forms) ของเส้นโค้ง (Curves) หรือผิวหน้า (Surfaces) ต่างๆ สามารถแสดงผลออกมาได้โดยง่ายในรูปแบบดิจิตอล

โดยสรุปแล้วอาจกล่าวได้ว่าความเป็นอิสระของการใช้รูปแบบพาราเมตริกนี้ได้มาจากการไม่ขึ้นอยู่กับระบบพิกัดเฉพาะอันใดอันหนึ่ง

ทฤษฎีทั่วไปของเส้นทางเดินสำหรับผิวหน้า (Surface patches) ต่าง ๆ ได้ถูกบรรยายโดย Coons (ค.ศ. 1964) คุณสมบัติของสไปลน์ (Spline Curves) ได้ถูกคิดค้นขึ้นและพบว่ามีประโยชน์อย่างมากที่จะนำมาใช้แทนเส้นโค้งและผิวหน้าที่กลมกลืน (Smooth Curves and Surfaces) ค.ศ. 1946 Schoenberg ได้แนะนำ B - Splines ให้เป็นที่รู้จักกันต่อมาใน ค.ศ.1974 Reiseufeld ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการนิยามเส้นโค้งและผิวหน้าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1971 Bezier ได้นำการควบคุมรูปหลายเหลี่ยม (polygon) มาช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถควบคุมรูปทรงของผิวหน้าต่างๆ (surface geometry) ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค.ศ. 1974 Gordon และ Reisenfield ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมรูปหลายเหลี่ยมเข้ากับ B – splines ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นผิวหน้าแบบ B – splines(B – Spline surfaces) ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้เป็นเครื่องมือในเชิงโต้ตอบสำหรับการนิยามผิวหน้า

1.1.2 ความสำคัญของปัญหา

คอมพิวเตอร์มีราคาของชิ้นส่วนต่างๆ ลดลง แต่ความเร็วในการคำนวณและความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก ระบบการผลิตด้วยคอมพิวเตอร์หรือ CAM (computer – aided manufacturing) จึงสามารถนำไปใช้ได้กับบริษัทในทุกระดับขนาดแต่การนำเทคโนโลยีเหล่านี้ ไปใช้งานยังคงมีปัญหาหลักที่แท้จริงอยู่อีกอันหนึ่งคือ ซอฟท์แวร์ ที่จะนำมาใช้กับระบบ CAM นั้น มักจำมีราคาสูง ไม่สามารถรองรับการทำงานของเครื่องจักรรุ่นต่างๆ ที่หลากหลายได้ ทั้งยังยุ่งยากในการศึกษาทำความเข้าใจและเรียนรู้เพื่อนำไปใช้งานอีกด้วย การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาระบบ CAD/CAM อย่างง่าย มีความเป็นมิตรกับผู้ใช้ (friendliness) สามารถเรียนรู้ได้เร็วและราคาไม่สูงมากนัก เพื่อให้ผู้เริ่มต้นใช้งาน ผู้ประกอบการขนาดเล็กหรือรายย่อย และผู้ประกอบการขนาดกลาง ที่ยังไม่มีผู้เชี่ยวชาญระบบ CAD/CAM ที่แท้จริงสามารถนำไปใช้งานได้ ตลอดจนใช้เป็น เครื่องมือพื้นฐานในการเตรียมการสำหรับศึกษาการใช้งาน ซอฟท์แวร์ ระบบ CAD/CAM ในระดับสูงต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะพัฒนาระบบ CAD/ CAM ที่สามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) โดยผู้ใช้ซอฟท์แวร์ที่สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด เพื่อให้ผู้สนใจทุกระดับสามารถจัดหามาใช้งานได้ เป็นระบบที่สามารถเรียนรู้ใช้งานได้เร็ว โดยไม่ต้องมีความรู้ทางด้านการโปรแกรมสูงมากนักและเป็นทางเลือกในการใช้งานแทนภาษา (APT Automatically Programmed Tool) ซึ่งไม่สามารถหาซื้อหาได้ในท้องตลาดโดยทั่วไป โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาระบบ ราคาถูกสามารถซื้อหาได้ง่ายและมีความเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน(friendliness) สามารถเรียนรู้การใช้งานได้ง่าย

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการนำโปรแกรมภาษาเบสิกรุ่นต่างๆมาช่วยในการจัดทำโปรแกรมชิ้นงาน CNC แบบเชิงโต้ตอบ สำหรับเครื่องจักร CNC ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องกัด (CNC Milling Machine)

1.2.3 เพื่อเพิ่มศักยภาพและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร CNC ในงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 เพื่อศึกษาการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้บนคอมพิวเตอร์และเครื่องจักร CNC

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ สามารถคำนวณและแสดงผลของฟังก์ชั่น เส้นตรง , วงกลม , วงรี ฯลฯ ที่มาใช้ในแบบพิมพ์เขียวทางวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังแก้ไขข้อมูลที่แสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถมองเห็น ภาพโดยง่าย และมักจะสามารถรับการเปลี่ยนแปลงแก้ไข ผ่านแผงแป้นอักขระ (Key board) และเมาส์ (mouse) ได้เป็นอย่างดี ทำให้ผู้ใช้งานสะดวกและคุ้นเคยกับการใช้งานได้โดยง่าย โปรแกรมภาษาเบสิกรุ่นต่างๆ เป็นโปรแกรมที่เหมาะสำหรับผู้ที่เริ่มหัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใหม่ๆ มีรูปแบบคำสั่งคล้ายคำพูด จึงสามารถเรียนรู้ได้ง่าย นอกจากนี้ โปรแกรมภาษาเบสิกเป็นโปรแกรมที่มีศักยภาพค่อนข้างจะรอบด้านกล่าวคือ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ได้ ตลอดจนสามารถส่งข้อมูลออกมาในรูปของรหัสแอสกี ซึ่งเป็นที่รับรู้ได้สำหรับเครื่องจักร CNC ดังนั้น การศึกษาวิจัยนี้จึงได้ตั้งสมมุติฐานว่าสามารถนำโปรแกรมภาษาเบสิกมาช่วยในการจัดสร้างโปรแกรมชิ้นงาน CNC บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแบบเชิงโต้ตอบได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลของเครื่องจักรกลCNCโดยทั่วไปสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลในลักษณะของข้อมูลตัวอักษรหรืออักขระตามรหัสมาตรฐานของ American Standard Code for Information Interchange หรือที่เรียกว่า ASCII Code ซึ่งโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกเป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบให้โปรแกรมสามารถรับตัวแปรที่เป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการกำหนดต่อการวาดแบบภาพ 2 มิติ ของแบบงานพื้นฐานคือเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า ไฮเพอร์โบล่า สไปลน์ และเฟืองตรง เพื่อแสดงถึงการโต้ตอบของข้อมูลที่ป้อนเข้ากับภาพวาดที่ได้จากการป้อนข้อมูล อีกทั้งโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกสามารถคำนวณงานทางคณิตศาสตร์และส่งข้อมูลออกมาในลักษณะของแฟ้มข้อมูลรหัสแอสกีได้ (ASCII text file)

ดังนั้นเราจึงสามารถใช้โอกาสนี้มาใช้ประโยชน์ในการเขียนโปรแกรมทำการคำนวณข้อมูลเส้นทางเดินของมีดตัด(CL – data: Cutter Location data) สำหรับชิ้นงาน แล้วส่งถ่ายข้อมูลในรูปแบบของแฟ้มข้อมูลรหัสแอสกี ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรสามารถทำชิ้นงานออกมาตามที่เราต้องการได้

ในขั้นตอนการผลิตงานด้วยเครื่องจักรCNCนั้น ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของขบวนการนั้นคือ การเขียนโปรแกรม ควบคุมเชิงตัวเลข ผู้เขียนโปรแกรมจะต้องนำข้อมูลจากแบบผลิตชิ้นงานจริงที่มีองค์ประกอบของขนาดและสัดส่วนป้อนให้แก่ระบบคอมพิวเตอร์โดยที่แบบงานวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำการแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นจะถูกนิยามในรูปอนุกรมของจุดเส้นตรงและเส้นโค้งหรือนิยามอยู่ในรูปเรขาคณิตตามลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานซึ่งรูปทรงเรขาคณิตเหล่านี้สามารถใช้รูปทรงเรขาคณิตวิเคราะห์ในการคำนวณหา ข้อมูลเส้นทางเดินของมีดติดได้

ปัญหาในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยสมการที่ไม่เป็นแบบพาราเมตริก(Non–Parametric Equation) ส่งผลให้ภาพของวัตถุที่เขียนมีระยะห่างระหว่างจุดที่คำนวณไว้ไม่คงที่ ทำให้ภาพที่เขียนออกมาแสดงสัดส่วนของภาพที่ไม่สมบูรณ์ เพื่อให้เกิดความแน่นอนในการสร้างภาพเหล่านี้จึงได้ ใช้สมการแบบพาราเมตริก (Parametric Equation) ซึ่งส่งผลให้ปัญหานี้หมดไป

ในการประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับการเขียนแบบเครื่องจักรกลนั้น งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการเขียนภาพของเฟืองตรง (Spur Gear) พร้อมทั้งแสดงเส้นทางเดินของมีดตัดโดยผู้ใช้โปรแกรมป้อนพารามิเตอร์สำคัญให้แก่โปรแกรมคือ โมดุล (Module) จำนวนฟันเฟือง (Number of Teeth) และมุมกดดัน (Pressure Angle) ซึ่งเนื้อหาของโปรแกรมจะนำข้อมูลป้อนเข้าที่ได้ ทำการคำนวณหาเส้นรอบรูปจากการประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการทางโปรแกรม เช่น หลักการสร้างรูปโค้งอินเวอลูทของฟันเฟือง การเขียนภาพสะท้อนของเส้นโค้งอินเวอลูท การหมุนภาพ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการที่จะนำโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกมาประยุกต์ใช้ในการทำโปรแกรมชิ้นงานCNCแบบเชิงโต้ตอบ โดยโปรแกรมจะนำข้อมูลตัวเลขที่ได้จากการรับค่าข้อมูลในคำสั่งพื้นฐานของโปรแกรมคือเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบลา ไฮเพอร์โบลา สไปลน์ และเฟืองตรง ซึ่งโปรแกรมสามารถเขียนภาพแสดงออกทางภาพแบบ 2 มิติ และแสดงที่ค่า G – Code ในลักษณะของแฟ้มข้อมูลสำหรับตำแหน่งเส้นทางเดินของมีดตัด (Cutter Location Data File หรือ CL – Data File)

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้ได้นำโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกเข้ามาใช้คำนวณรูปทรงเรขาคณิตของข้อมูลป้อนเข้า โดยใช้สมการพาราเมตริกในการคำนวณค่าการแสดงภาพกราฟิกส์ และ ค่าG – Code โดยใช้ศาสตร์ทางด้านเรขภาพคอมพิวเตอร์ (Computer graphic) มาใช้เป็นเครื่องมือในการทำงานมีการพัฒนาชุดคำสั่งกราฟิกส์ (graphic commands) ที่ใช้คีย์บอร์ดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับป้อนอินพุท มีการออกแบบหน้าจอในรูปของคำสั่งที่ทำงานตามรายการเลือก (Menu – driven commands) ข้อความพร้อมรับ (Prompt) และข้อความบอกสถานะ (Status massages) ที่แสดงผลออกมาตามข้อมูลกราฟิกส์ประกอบอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้สามารถทำบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ในขณะที่ไม่ได้ต่อเชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ของเครื่องจักรCNCซึ่งเป็นการทำงานแบบล่วงหน้า (Off-line programming) ทำให้สามารถทำโปรแกรมได้สะดวกไม่รบกวนเวลาการทำงานบนเครื่องจักรCNC และสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางที่ยังไม่มีระบบเครือข่ายเครื่องจักร CNC เป็นของตนเองแฟ้มข้อมูลที่ได้จากกรรมวิธีนี้จะถูกส่งออกมาจัดเก็บในลักษณะของแฟ้มข้อมูลรหัสแอสกี (ASCII text tile) ที่สามารถส่งถ่ายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ของเครื่องจักรCNC โดยผ่านสายนำสัญญาณผ่านพอร์ทอนุกรม (Series port) หรือพอร์ทแบบ RS – 232 C

เนื่องจากแฟ้มข้อมูลเส้นทางเดินมีดตัดเหล่านี้ได้จากคำนวณผลจากสมการพาราเมตริก ซึ่งจะได้เฉพาะข้อมูลพิกัดตำแหน่งในระนาบ XY เท่านั้น การใช้งานจะต้องนำมาปรับปรุงส่วนหัวและส่วนท้ายของโปรแกรมเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องจักร CNC แต่ละเครื่องในการปรับปรุงข้อมูลนี้กระทำการปรับปรุงโปรแกรมชิ้นงานเหล่านี้บนเวิร์ด Notepad ของระบบปฏิบัติการวินโดว์ 95 ขึ้นไป

การโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นระดับการผลิตจำนวนน้อยๆหรือการผลิตขนาดใหญ่โดยที่ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องทำการเขียน G–code เองและยังสามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้จากรูปที่แสดงในโปรแกรม อีกทั้งยังทำชิ้นงานที่มีรูปร่างเดียวกันหรืออยู่ในตระกูลเดียวกัน โดยไม่ต้องเขียนชิ้นงานใหม่ทั้งหมด รวมถึงการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่ายขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดผลประโยชน์ตอบแทนสูงมากแม้ว่าจะเป็นหารทำงานในช่วงสั้นๆ และมีการขีดจำกัดจากปัญหาทางด้านพนักงานน้อยกว่าทำให้เกิดผลผลิตที่ราบรื่นกว่าทั้งในด้านโปรแกรมข้อมูลและการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีแนวความคิดพื้นฐาน

2.1 ความนำ

ในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็วผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมามีทั้งจำหน่ายภายในประเทศและส่งออกไปต่างประเทศทำให้ผลิตภัณฑ์ต้องได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้เช่น มาตรฐานสากล ISO (International Standardization Organization) หรือ ตามมาตรฐานของเยอรมัน DIN (Deutsche Industrie Norm) เนื่องจากภาวะในปัจจุบันมีอัตราแข่งขันในตลาดเป็นอย่างมาก การนำเข้าเครื่องจักรกลที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพสูงทำให้มีความนิยมใช้งานเครื่องจักรที่ใช้ระบบการควบคุมแบบเชิงตัวเลขหรือเครื่องจักรCNC (CNC Machine) ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ทำงานแบบอัตโนมัติ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือรูปทรงบ่อยๆ ได้ดี เพราะสามารถแก้ไขข้อมูลต่างๆ โดยตรงที่โปรแกรม ขณะเดียวกันการพัฒนาระบบโปรแกรมช่วยในการผลิตชิ้นงาน โดยระบบควบคุมแบบเชิงตัวเลขยังต้องมีการพัฒนาควบคู่ไปตามกัน

เครื่องจักรCNCในการเคลื่อนที่ต่างๆ ในการผลิตชิ้นงานจะทำงาน โดยอัตโนมัติด้วยตัวเลขของเครื่องจักรเอง โดยอาศัยข้อมูลจากชุดควบคุมสั่งให้เครื่องจักรทำงานตามข้อมูลเครื่องจักรตัวเลข (Numerical Information) ที่ป้อนให้กับชุดควบคุมของเครื่องจักร CNC ในรูปแบบของรหัส (Code) ที่ชุดควบคุมสามารถเข้าใจได้

การฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงาน ให้มีทักษะความชำนาญในด้านการ โปรแกรมชิ้นงาน CNC เป็นการลงทุนที่ค่อนข้างสูงเพราะจะต้องใช้เงินและเวลาสำหรับการฝึกอบรม การใช้โปรแกรมชิ้นงาน CNC เชิงโต้ตอบนี้จะช่วยให้สามารถทำโปรแกรมชิ้นงาน CNC แบบดั้งเดิมอีกทั้งระบบยังมีความยืดหยุ่นอย่างมากทำให้สามารถประยุกต์ไปใช้งานในด้านต่างๆได้ในจำนวนมาก

การใช้งานเครื่องจักรกลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์CNC ได้ขยายตัวเข้าไปในงานอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างรวดเร็วได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการผลิตและมีการปรับตัวให้สามารถใช้งานกับเครื่องจักรCNCได้ การบูรณาการ สิ่งต่างๆเหล่านี้เข้าด้วยกันได้ก่อให้เกิดปัญหาแก่ส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างมากปัญหาหลักที่สำคัญยิ่งอันหนึ่งก็ยังคงเป็นการตระเตรียมข้อมูลเชิงตัวเลขสำหรับเครื่องจักรCNC เพราะส่วนมากแล้วผู้ใช้งานยังคงใช้กรรมวิธีการโปรแกรมแบบหนึ่งโปรแกรมต่อหนึ่งชิ้นงานอยู่

การนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล(PC) มาใช้ในงานเครื่องจักร CNC ได้ช่วยให้การจัดเตรียมข้อมูลเชิงตัวเลขของเครื่องจักรดีขึ้นมาก และทำให้สามารถตระเตรียมข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ต้องเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องจักร CNC ก็ได้แต่กระนั้นก็ตามการทำงานก็ยังคงเป็นแบบกรรมวิธีการ โปรแกรมหนึ่งชิ้นงานใช้หนึ่งโปรแกรมอยู่ในการศึกษานี้จึงได้ศึกษาการทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมชิ้นงาน CNC เชิงโต้ตอบขึ้นมาโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการโปรแกรมชิ้นงานแบบใช้พารามิเตอร์ (Parametric Part Programming) ซึ่งช่วยให้สามารถทำโปรแกรมได้ง่ายและ จัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ให้มีศักยภาพในการรองรับการประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้ทำงานทั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและบนตัวควบคุมของเครื่องจักร โดยเฉพาะการโปรแกรมชิ้นงานแบบใช้พารามิเตอร์นี้จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถพัฒนารูปแบบการทำงานชองตัวเองขึ้นมาได้และสามารถปรับแต่งให้เข้ากับปัญหาในด้านการผลิตที่เขาประสพอยู่ได้

2.2 ระบบของเครื่องจักร CNC

2.2.1 การควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical control)

ในระบบการผลิตสมัยใหม่ และโรบอทเชิงอุตสาหกรรม (Industrial robots) เป็นระบบอัตโนมัติที่ก้าวหน้ามาก เพราะใช้คอมพิวเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของการควบคุม เครื่องมือกล (Machine Tool) เครื่องเชื่อมและ เครื่องตัดโดยลำแสงเลเซอร์ เป็นต้น ต่างก็ประยุกต์คอมพิวเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันมีราคาถูกลงเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มความสะดวก ความรวดเร็ว และความถูกต้องในการผลิตที่เป็นจำนวนมาก

การควบคุมเครื่องมือกลโดยใช้ตัวกลางซึ่งเป็น โปรแกรมที่ได้เตรียมล่วงหน้าไว้แล้ว เรียกว่า การควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Industrial Association : EIA) ได้นิยามอุปกรณ์ NC ไว้ดังนี้

ระบบหนึ่งซึ่งกิริยาของระบบถูกควบคุมโดยข้อมูลเชิงตัวเลขที่ป้อนเข้าไป โดยตรง ณ. จุดใดจุดหนึ่ง ระบบนี้จะต้องทำงานแบบอัตโนมัติอย่างน้อย ช่วงใดช่วงหนึ่งของข้อมูลนี้

การนำ NC มาประยุกต์ใช้โดยส่วนมากจะเป็นการนำเข้ามาช่วยในการผลิตสินค้า (Manufacturing) อย่างไรก็ตาม ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการผลิตทั้งหมด (Total production) และด้านการจัดการ NC ซึ่งช่วยในการผลิตสินค้านี้ เป็นวิวัฒนาการมาจากกระบวนการผลิตสินค้าด้วยมืออย่างไรก็ตาม NC นี้สามารถใช้งานในหลายด้านได้ ตั้งแต่การออกแบบวิศวกรรม (Design engineering) การวางแผน การทำเครื่องมือ ตลอดจนการควบคุมคุณภาพ สิ่งที่เด่นที่สุดของ NC คือ การจัดเตรียมกระบวนการผลิตสินค้าทั้งหมดด้วยการควบคุมอย่างใกล้ชิด

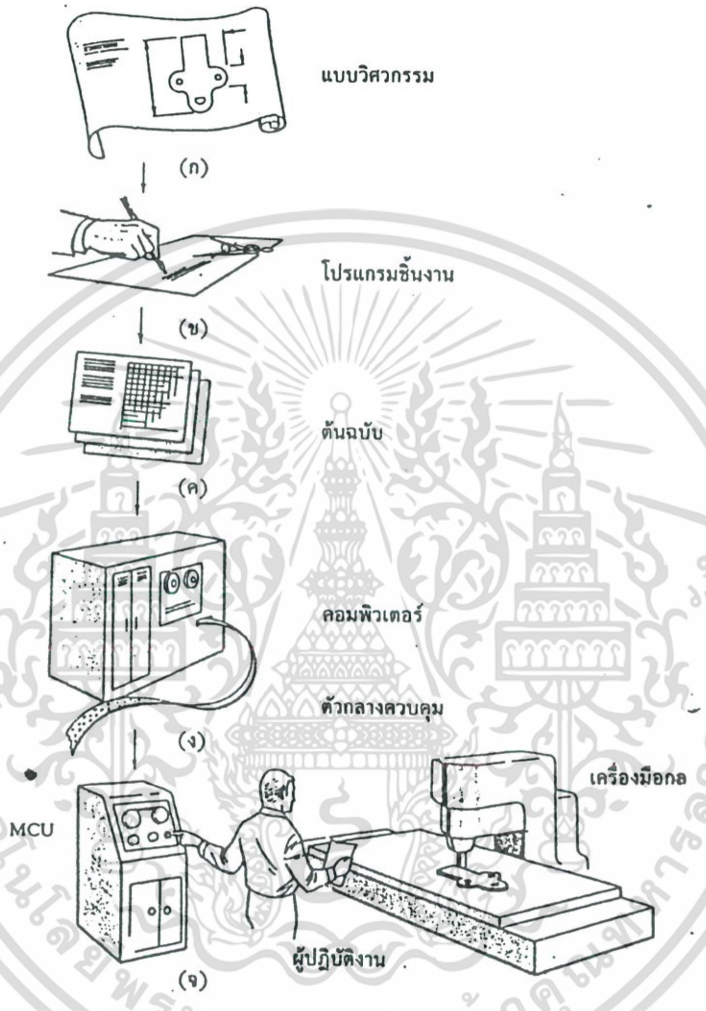
2.2.2 การอธิบายกระบวนการควบคุมเชิงตัวเลขอย่างง่าย [17]

ผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตนั้น จะต้องวาดและกำหนดสัดส่วนลงในแบบวิศวกรรม (Engineering Drawing) นั้นคือ จะต้องมีการกำหนดชนิดวัสดุและเงื่อนไข กำหนดการทำขั้นสุดท้ายของผิวชิ้นงานและค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ และกำหนดสัดส่วนของชิ้นงาน เช่น ความยาว ความกว้าง ความสูง รัศมี และเส้นโค้ง ดังรูป 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์ให้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นผู้เขียนโปรแกรมชิ้นงาน (Part Programmer) จะทำหน้าที่ขั้นต่อไปคือ พยายามดึงข้อมูลทั้งหมดและสัดส่วนที่ต้องการผลิตจากแบบวิศวกรรม ดังรูป 2.1 ดังนั้น ผู้เขียนโปรแกรมจึงเป็นบุคคลเดียวกันที่ทำหน้าที่เป็น

2.2.2.1 ผู้วางแผนงาน (Planner) ซึ่งจะกำหนดลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงาน



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการควบคุมเชิงตัวเลข

2.2.2.2 ผู้จัดเครื่องมือ (Tooling man) ซึ่งจะกำหนดฟิกเจอร์เครื่องมือกล (Machine Tool fixtures) และเครื่องมือตัด (Cutting tools) ที่จะใช้

2.2.2.3 ผู้ชำนาญทางเครื่องกล (Machinist) ซึ่งทำหน้าที่พิจารณาการป้อนส่ง (Feed) และความเร็ว (Speed) เมื่อผู้เขียนโปรแกรมชิ้นงานได้วิเคราะห์แล้ว จึงบันทึกผลการตัดสินใจทั้งหมดลงในต้นฉบับในรูปแบบของรหัสหรือสัญลักษณ์ ซึ่งจะได้ออกมาเป็นโปรแกรมที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องมือกล ดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นต่อไป คอมพิวเตอร์จะถูกนำมาใช้ช่วยผู้เขียนโปรแกรมในการคำนวณชิ้นงานคอมพิวเตอร์จะคำนวณการตัดกัน (Intersection) การสัมผัส (Tangencies) เป็นต้น จากจุด เส้นตรง และเส้นโค้งที่ได้ถูกกำหนดไว้ในแบบวิศวกรรมโดยอัตโนมัติ แล้วยังคงข้อมูลเหล่านี้เพื่อใช้กับคำสั่งในการตัด (Cutting instruction) คำสั่งในการตัดนี้ คือ การเคลื่อนที่เป็นลำดับที่กำหนดไว้แล้วโดยผู้เขียนโปรแกรมชิ้นงาน และคำสั่งนี้ยังจำเป็นต้องใช้เพื่อสั่งเลื่อนโลหะ ซึ่งจะได้รูปลักษณ์ของชิ้นงานตามที่ต้องการ คอมพิวเตอร์ยังคำนวณทางเดินออฟเซ็ท (Offset part) ซึ่งเป็นทางเดินไปตามออฟเซ็ทพื้นผิวของชิ้นงานอันเกิดจากการเลือกใช้มีดตัด (Cutter) และคอมพิวเตอร์ยังผลิตตัวกลางควบคุมโดยใช้อัตราการป้อนส่ง (feed rates) ระบบควบคุมและลักษณะพลวัตรของเครื่องมือกล ตัวกลางควบคุมนี้คือเทปที่ใช้สำหรับปฏิบัติงานของเครื่องมือกล และสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.1

หน้าที่ของผู้ปฏิบัติงานคือ ประกอบฟิกเจอร์บนเครื่องมือกล วางชิ้นงานลงในฟิกซ์เจอร์นี้ ใส่ใบมีดในสปิดเดิ้น (Spindle) และตัวกลางควบคุมที่ระบบควบคุมเครื่องมือกลพร้อมกับเริ่มสตาร์ทการปฏิบัติงาน ระบบควบคุมจะให้คำสั่งของเครื่องมือกล และนำมีดตัดไปตามทางที่ได้กำหนดไว้ก่อนแล้ว ระบบจะทำงานจนถึงขั้นตอนสุดท้ายโดยอ่านตัวกลางควบคุมนี้ แล้วกระตุ้นให้ระบบเซอร์โว สกรูนำ (lead screw) และระบบป้อนกลับให้ทำงาน ดังรูปที่ 2.1

การลองการผลิตและตัวกลางควบคุมในครั้งแรกนี้ โดยปรกติจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในการผลิตและในการเขียนโปรแกรม เมื่อได้แก้ไขความผิดพลาดเหล่านี้ และทางควบคุมคุณภาพได้ยอมรับชิ้นงานแล้ว จะสามารถผลิตได้โดยไม่ต้องวิเคราะห์หรือตัดสินใจใหม่ ตัวเลขโปรแกรมที่ได้พิจาณาล่วงหน้าเรียบร้อยแล้วนี้จะควบคุมกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ ดังนั้น จึงเรียกว่า การควบคุมเชิงตัวเลข

2.2.3 ความหมายของ NC และCNC

เอ็นซี (NC) ย่อมาจากคำว่า Numerical Control หมายถึง การควบคุมเครื่องจักรกลด้วยระบบตัวเลขและตัวอักษร เนื่องจากมีการนำข้อมูลทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการควบคุม จึงเรียกว่าการควบคุมเชิงตัวเลข กล่าวคือ การเคลื่อนที่ต่างๆ ตลอดจนการทำงานอื่นๆ ของเครื่องจักรกล จะถูกควบคุมโดยรหัสคำสั่งที่ประกอบด้วยตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์อื่นๆ ซึ่งจะถูกแปลงเป็นสัญญาณ(Pulse) ของกระแสไฟฟ้า หรือสัญญานออกอื่นๆ ที่จะไปกระตุ้นมอเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆ เพื่อทำให้เครื่องจักรกลทำงานตามขั้นตอนที่ต้องการ NC เป็นการทำงานของอุปกรณ์จักรกลโดยชุดของรหัสคำสั่ง ซึ่งชุดของรหัสคำสั่งที่สำคัญที่สุดอาจเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเครื่องมือและชิ้นงาน การจัดเรียงคำสั่งเป็นชุดอย่างถูกแบบแผน จะเรียกว่าชุดคำสั่งของการควบคุมเชิงตัวเลข มันอาจนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานที่เหมือนกันได้ โดยการใช้ชุดคำสั่งซ้ำๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเอ็นซี (CNC) ย่อมาจากคำว่า Computerized Numerical Control ระบบควบคุม NC แบบนี้เป็นผลจากการพัฒนาจากเครื่องจักรกลNC โดยมีการนำเอาคอมพิวเตอร์ที่มีความสามรถสูงเพิ่มเข้าไปภายในระบบ ทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในระบบNC และประมวลผลข้อมูลเพื่อนำผลข้อมูลเพื่อผลลัพธ์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล เช่น ทำให้สามารถกลึงหรือกัดชิ้นงานที่มีรูปทรงยากๆได้ง่ายขึ้น สามารถใช้โปรแกรมสำเร็จจำลองเส้นทางเดินของมีดตัดและการคำนวณค่าต่างๆ เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน เป็นต้น

ในปัจจุบันเครื่องจักรกลNCส่วนมากจะหมายถึง เครื่องจักรกลCNC ทั้งนี้เพราะว่าระบบNCที่ไม่มีคอมพิวเตอร์เป็นส่วนประกอบ มักไม่นิยมสร้างใช้แล้ว เนื่องจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีราคาค่อนข้างถูก ดังนั้น ราคาของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ที่เพิ่มขึ้นมา เกือบจะไม่ต้องนำมาพิจารณาเมื่อเทียบกับราคาของเครื่องจักรทั้งเครื่อง

2.2.4 ความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกล NC กับเครื่องจักรกลทั่วไป

เครื่องจักรกลทั่วไปแท่นเลื่อน (Slides) ทำหน้าที่นำชิ้นงานหรือเครื่องมือตัดให้เคลื่อนที่ไปตามรางเลื่อน(Sideways) โดยการหมุนมือหมุน หรือโดยการต่อกลไกป้อนอัตโนมัติ เช่น ลูกเบี้ยวในเครื่องกลึงอัตโนมัติ ซึ่งในขณะเดียวกันช่างควบคุมเครื่องจะต้องปฏิบัติงานในหน้าที่อื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานนั้นๆ ด้วย เช่น เปิดและปิดสวิตซ์ควบคุมการหมุนของเพลาหัวเครื่อง เปลี่ยนอัตราราป้อนและความเร็วรอบ เปิดและปิดสวิตซ์ สารหล่อลื่น เป็นต้น ในการปฏิบัติหน้าที่ต่างๆ เหล่านี้ ช่างควบคุมเครื่องจะต้องใช้ทั้งวิจารณญาณและการตัดสินใจร่วมกัน การตัดสินใจเหล่านี้จะต้องทำซ้ำๆ กันตลอดเวลาที่ทำการผลิตชิ้นงาน ถึงแม้ว่าจะเป็นการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงเดียวกันก็ตาม

ส่วนเครื่องจักรกล NC การเคลื่อนที่ต่างๆ ที่จะเป็นในการผลิตชิ้นงานจะทำงานโดยอัตโนมัติด้วยตัวเครื่องจักรเอง ตามข้อมูลตัวเลข (Numerical Information) ที่ป้อนให้กับระบบควบคุมของเครื่องจักรกลNC ในรูปแบบของรหัส (Code) ที่ระบบควบคุมของเครื่องสามารถเข้าใจได้

ความแตกต่างในการใช้เครื่องจักรกลNC เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลทั่วไปก็คือ การตัดสินใจในการกำหนดขั้นตอนการทำงานต่างๆ จะกระทำเพียงครั้งเดียว กล่าวคือ จะกระทำในขั้นตอนการวางแผนและสร้างโปรแกรม สำหรับควบคุมเครื่องจักรกลเท่านั้น ต่อจากนั้น โปรแกรมก็จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล สำหรับการผลิตชิ้นงานที่ต้องการ โดยสามารถทำการผลิตซ้ำๆ กันกี่ครั้งก็ได้ตามความต้องการ

นอกจากโปรแกรมการทำงาน ซึ่งเปรียบเสมือนการวางแผนการทำงานที่ได้จัดเตรียมขั้นตอนการทำงานทุกขั้นตอน การป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ ตลอดจนการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้นั้น การผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องจักรกลNC ยังช่วยลดเวลาการทำงานอื่นๆ ที่จำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย เช่น ลดเวลาการตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน ลดเวลาการปรับตำแหน่งของชิ้นงาน ลดเวลาในการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการทำงาน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องจักรกลทั่วไปกับเครื่องจักรกล NC

			เครื่องจักรกลทั่วไป	เครื่องจักรกล NC
1	การป้อนโปรแกรม	ขั้นเตรียมงาน	ไม่มี	มี
2	การจับยึดชิ้นงาน		มือ	มือ
3	การจับยึดเครื่องมือตัด		มือ	มือหรือชุดควบคุม
4	การตั้งจุดอ้างอิง		มือ	มือ
5	การตั้งความเร็วรอบ		มือ	ระบบควบคุม
6	การเลื่อนแท่นเลื่อน	ขั้นตัดเฉือน	มือหมุน	ระบบควบคุม
7	การเปรียบเทียบระยะ		สายตา	ระบบควบคุม
8	การตรวจสอบขนาด		เครื่องมือวัด	ใช้เวลาน้อยกว่า

2.2.5 ความแตกต่างระหว่างระบบNC กับระบบCNC

ระบบ CNC เป็นระบบที่พัฒนาต่อเนื่องมาจากระบบNC ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างระบบNC กับระบบ CNC ก็จะอยู่ที่ความสามารถของระบบควบคุมนั่นคือ คอมพิวเตอร์ เมื่อนำระบบCNC ไปควบคุมเครื่องจักรกล ความสามารถในการทำงานต่างๆ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกล NC ดังนี้

2.2.5.1 การแสดงภาพจำลอง (Simulation) การทำงานตามโปรแกรมที่ป้อนเข้าในระบบทางจอภาพ

2.2.5.2 ความจุของหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้น สามารถเก็บข้อมูลโปรแกรมได้มาก

2.2.5.3 การแก้ไขและลบโปรแกรมสามารถกระทำได้ที่เครื่องจักรโดยตรง

2.2.5.4 สามารถส่งข้อมูลไปเก็บไว้ในหน่วยความจำภายนอกได้

2.2.5.5 ระบบความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น

2.2.5.6 มีการชดเชยความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดและการส่งกำลัง

2.2.5.7 มีโปรแกรมสำเร็จสำหรับการคำนวณค่าต่างๆ เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน เป็นต้น

2.2.6 ข้อดีข้อเสียของเครื่องจักรกล NC และ CNC

เครื่องจักรกลNCและCNCเป็นเครื่องจักรกลสมัยใหม่ ที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง แต่ในขณะเดียวกันราคาก็สูงตามด้วย ดังนั้น ก่อนที่จะพิจารณาจัดซื้อเครื่องจักรกลประเภทนี้ มาใช้ในกระบวนการผลิต จำเป็นที่จะต้องศึกษารายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับขีดความสามารถของเครื่องตลอดจนข้อดีและข้อเสียของเครื่องจักรกลประเภทนี้ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของเครื่องจักรกล NC และ CNC

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลอัตโนมัติประเภทอื่นๆ พอจะสรุปได้ดังนี้

1. มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง ; การเปลี่ยนงานใหม่จะแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเฉพาะโปรแกรมเท่านั้น

2. ความเที่ยงตรง (Accuracy) จะอยู่ในระดับเดียวกันตลอดช่วงความเร็วรอบและอัตราป้อนที่ ใช้ทำการผลิต

3. การใช้เวลาในการผลิต (Production Time) สั้นกว่า

4. สามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย หรือมีขนาดเหมือนกันจำนวนมากๆ

5. การปรับตั้งเครื่องจักรกลกระทำได้ง่าย ใช้เวลาน้อยกว่าการผลิตด้วยวิธีอื่นๆ

6. หลีกเลี่ยงความจำเป็นที่ต้องใช้ช่างควบคุมที่มีทักษะและประสบการณ์สูง

7. ช่างควบคุมเครื่องมีเวลาว่างจากการควบคุมเครื่อง สามารถที่จะจัดเตรียมงานอื่นๆ ไว้ล่วงหน้าได้

8. การตรวจสอบคุณภาพไม่จำเป็นต้องกระทำทุกขั้นตอนและทุกชิ้น

9. ลดขั้นตอนการจัดเก็บเอกสาร แบบงาน และอะไหล่ เพียงแต่เก็บโปรแกรมคำสั่งไว้เท่านั้น

10. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานไม่มีผลต่อการผลิต เนื่องจากเครื่องจักรกลCNC ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ หรือ จิ๊ก ฟิกเจอร์ เพียงแต่เปลี่ยนแปลงโปรแกรมคำสั่งเท่านั้น

ข้อเสียของเครื่องจักรกล NC และ CNC มีดังนี้

1. ราคาของเครื่องจักรค่อนข้างสูง

2. การบำรุงรักษามีความซับซ้อนมาก

3. จำเป็นต้องใช้ช่างเขียนโปรแกรม (Part Programmer) ที่มีทักษะสูงและฝึกอบรมมาโดยเฉพาะ

4. ชิ้นส่วนหรืออะไหล่ที่ใช้ในการซ่อมบำรุง ไม่สามารถผลิตได้ในประเทศ จำเป็นต้องสั่งซื้อหรือนำเข้าจากต่างประเทศ

5. การซ่อมบำรุงจะต้องใช้ช่างที่มีประสบการณ์สูงและผ่านการฝึกอบรมมาโดยเฉพาะ

6. ราคาของเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการตัดเฉือน เช่น แกนเพลายึดใบมีด มีดกลึงแบบใช้อินเสิร์ต (Insert) เป็นต้น มีราคาสูง

7. พื้นที่ติดตั้งเครื่องจักร จะต้องควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ระบบแกนเครื่องจักร (Machine axis) [20]

Lin 1994 ได้กล่าวว่าเครื่องมือกลแต่ละเครื่องจะมีการเคลื่อนที่ของแกนอยู่2แบบด้วยกัน คือแบบเชิงเส้นตรง (Linear motion) และแบบหมุน(Rotary motion) การเคลื่อนที่เชิงเส้น เครื่องจักรจะเคลื่อนที่ไปเป็นเส้นตรงขนานกับแกนอ้างอิง (reference axis) การเคลื่อนที่แบบหมุน จะเป็นการหมุนรอบแกนอ้างอิง สมาคมอุตสาหกรรมอิเลคทรอนิกส์ (EIA) ได้สร้างมาตรฐาน สำหรับกำหนดแกนของเครื่องจักรCNC ไว้ใน EIA-267-B มาตราฐานนี้ได้มีการกำหนดแกนต่างๆ ไว้ 14 แกนด้วยกัน ประกอบด้วยแกนเชิงเส้น 9 แกน และแกนหมุน5แกน แกนเชิงเส้นของ เครื่องจักรอาจจะประกอบไปด้วยแกนเชิงเส้น ปฐมภูมิ(Primary linear axis) 3 แกน แกนเชิงเส้น ทุติยภูมิ (Secondary linear axis) 3 แกน และตติยภูมิ (Tertiary linear axis) 3 แกน ในแกนหมุนจะ ประกอบไปด้วยแกนหมุนปฐมภูมิ (Primary rotary axis) 3 แกน แกนหมุนทุติยภูมิ(Secondary rotary axis) 2 แกน แต่โดยทั่วไปเครื่องจักรCNC ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแกนเชิงเส้นเพียง 3 แกน และแกนหมุน 1 แกน สำหรับการจัดวางตำแหน่งชิ้นงาน

2.3.1 แกนเชิงเส้นปฐมภูมิ : X,Y, และ Z

แกนเชิงเส้นปฐมภูมิมักจะถูกกำหนดเป็นแกน X, Y, และ Z การกำหนดแกนเหล่านี้บน เครื่องจักรCNC จะใช้กฎพิกัดมือขวา ดังในรูปที่ 2.2

2.3.2 แกนหมุนปฐมภูมิ : A,B,และ C

แกนหมุนปฐมภูมิ จะถูกกำหนดชื่อเป็น : A,B, และ C โดยใช้เป็นการชี้ทิศทางการ หมุนรอบแกน X, Y, และ Z ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งทิศทางการหมุนใช้กฎหัวแม่มือของมือขวา

2.3.3 แกนเชิงเส้นทุติยภูมิ : U,Y ,และ W

เครื่องจักร CNC บางเครื่องอาจจะมีการเคลื่อนที่ของแกนเชิงเส้นเพิ่มเติม แกนเชิงเส้น ทุติยภูมิ U จะขนานกับแกน X, แกน V จะขนานกับแกน Y และแกน W จะขนานกับแกน Z

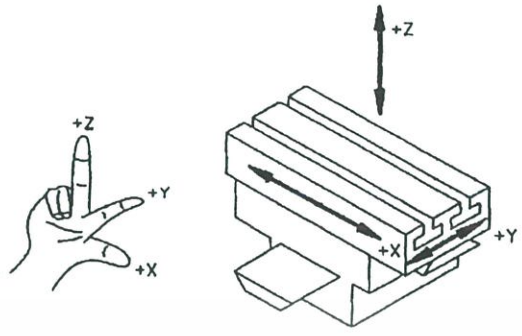
2.3.4 แกนหมุนทุติยภูมิ : D และ E

ตัวอักษร D และ E จะถูกนำมาใช้แทนแกนหมุนทุติยภูมิ ซึ่งแกนหมุนนี้อาจจะขนานกับ แกนหมุน A, B, หรือ C หรือเป็นแกนพิเศษก็ได้

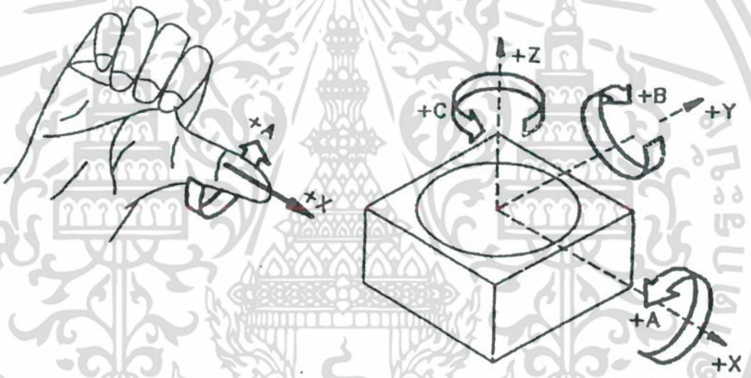
2.3.5 แกนเชิงเส้นตติยภูมิ : P,Q และ R

เครื่องจักรCNC ที่ซับซ้อนมากๆ อาจจะมีชุดของแกนเคลื่อนที่เชิงเส้น ชุดที่ 3 ขนานกับ 1 แกนเชิงเส้นก็ปฐมภูมิได้ ตัวอักษร P,Q และ R จะแทนแกนเชิงเส้นตติยภูมิที่ขนานกับแกน X,Y, และ Z ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการกำหนด แกนเชิงเส้นปฐมภูมิ :X,Y,และ Z ตามกฎมือขวา



รูปที่ 2.3 แสดงการกำหนดแกนหมุนปฐมภูมิ : A,B,และ C ตามกฎมือขวา

การที่ชิ้นงานจะถูกตกแต่งให้มีรูปแบบตามที่ต้องการได้นั้นจำเป็นที่จะต้องให้เครื่องมือกลมีการเคลื่อนที่ที่สัมพัทธ์กับชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบที่ชิ้นงานอยู่กับที่แล้วให้เครื่องมือกลเคลื่อนที่ หรือ เครื่องมือกลอยู่กับที่ แล้วให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของแท่นยึดจับชิ้นงาน หรืออาจเป็นไปในรูปแบบที่ทั้งสองต่างเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกัน

ลักษณะของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สามารถกำหนดได้โดยอาศัยระบบแกนอ้างอิง (Coordinate Systems) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิยมที่จะให้แท่นยึดจับเคลื่อนที่โดยการเลื่อนไปในแนวแกน X.,Y และ Z ซึ่งเป็นทิศทางหลักของการเคลื่อนที่ โดยทิศทางที่เป็นบวกหรือลบจะถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต และการเคลื่อนที่ไปในแต่ละทิศอาจจะมีการหมุนรอบแกนนั้นด้วยก็ได้ นอกจากนี้ยังอาจมีทิศทางรองของการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจจะกำหนดโดยแนวแกน U,V และ W โดยจำนวนแกนอ้างอิงต่างๆ เหล่านี้จะบอกถึงการสัมพัทธ์ของการเคลื่อนที่และตำแหน่งรวมถึงมุมระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

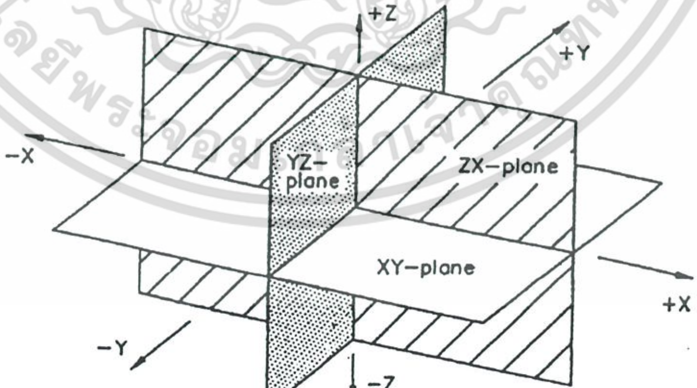
ดังนั้นความสามารถในจำนวนแกน เช่น 2 แกน,3 แกน หรือ 5 แกน จึงเป็นสิ่งที่บอกถึงจำนวนแกนที่สามารถควบคุมได้ในขณะเดียวกัน

2.4 ระบบพิกัดบอกตำแหน่ง (Coordinate systems)

หลักการของการทำโปรแกรมชิ้นงาน NC คือการนำเครื่องมือตัดเคลื่อนไปรอบๆ ชิ้นงาน เพื่อสร้างรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานมา ในการนี้ผู้ใช้โปรแกรมชิ้นงานต้องวางแผนว่าจะทำชิ้นงานงานอย่างไร ปฏิบัติการตัดเฉือนอะไรที่ควรจะเลือกมาใช้ และมีลำดับของปฏิบัติการอย่างไร จะเลือกใช้เครื่องมือตัดอะไร และจะใช้เครื่องจักรอะไร การแปลงข้อมูลเหล่านี้ไปเป็นชิ้นงานจะต้องอาศัยระบบพิกัดตำแหน่ง ในเครื่องจักรCNC จะมีระบบพิกัดตำแหน่งที่แสดงถึงลักษณะของชิ้นงานอยู่สองแบบด้วยกันคือระบบพิกัดคาร์ตีเซียน (Cartisian coordinate system) และระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate system)

2.4.1 ระบบพิกัดคาร์ตีเซียน (Cartisian coordinate system)

พิกัดคาร์ตีเซียน หรือระบบพิกัดฉาก (Rectangular coordinate system) เป็นระบบที่กำหนดตำแหน่งของจุดใดๆ ตามแกนสามอันซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยมีระนาบ XY,ZX, และ YZ ดังแสดงในรูปที่ โดยส่วนใหญ่ระนาบ XY มักจะเป็นระนาบของโต๊ะที่วางชิ้นงาน ชิ้นงานเหล่านี้จะถูกนิยามในรูปอนุกรมของจุด เส้นตรง และเส้นโค้ง นั่นคือ นิยามให้อยู่ในรูปเรขคณิตของผิวหน้าชิ้นงาน (part surfaces) กระบวนการ NC นี้ได้ใช้ระบบของคู่ลำดับ (coordinates) เพื่อสร้างรูปเราขาคณิต ระบบนี้จะแสดงได้เป็นสองแบบคือ



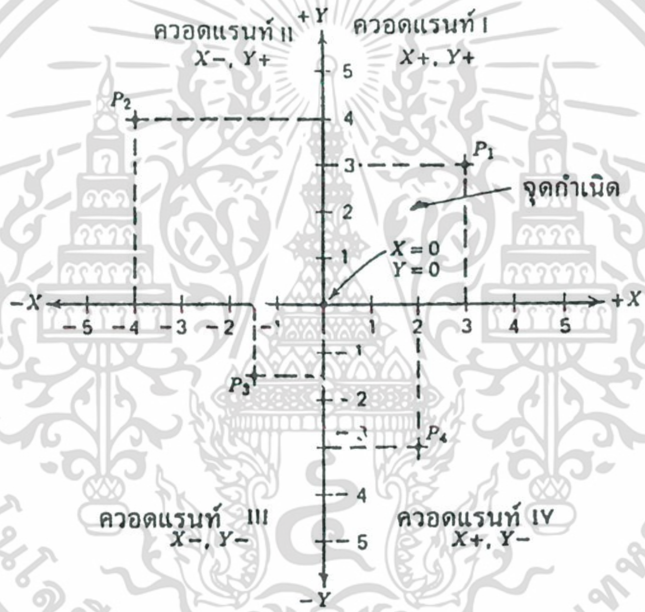
รูปที่ 2.4 แสดงแกนหลักทั้งสามของระบบพิกัดคาร์ตีเซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 ระบบสองมิติ (2D)

ระบบคู่ลำดับที่ง่ายที่สุดคือ ระบบสองมิติ (two-dimension system) หรือระบบสองแกน ดังรูปที่2.5 เป็นระบบสองมิติที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเส้นตรงสองเส้นที่มีสเกลบ่งอยู่ และเส้นตรงสองเส้นนี้ต่างตั้งฉากซึ่งกันและกัน จุดที่ตัดกันของเส้นตรงสองเส้นนี้ จะเป็นจุดศูนย์ของเส้นตรงทั้งสอง ดังนั้น เส้นตรงทั้งสองจึงเป็นแกนคู่ลำดับ (coordinate axes) และจุดตัดกันจะเรียกว่าจุดกำเนิด (Origin) ซึ่งจะกำหนดว่า X = 0 ,Y = 0

เครื่องหมายของแกนนั้น พิจารณาจากทิศทางที่ออกจากจุดกำเนิด ดังที่ได้แสดง ไว้ในรูปที่2.5 แกน x อยู่ทางซ้ายของจุดกำเนิดจะเป็นลบ และเป็นบวกเมื่ออยู่ทางขวาของจุดกำเนิด ในทำนองเดียวกัน แกน y ที่อยู่ใต้จุดกำเนิดจะเป็นลบ และเป็นบวกเมื่ออยู่เหนือจุดกำเนิด ตำแหน่งจุดใดๆ บนระนาบ นี้จะถูกพิจารณา และถูกบรรยายโดยอ้างอิงจุดกำเนิด



จุด	ค่า X	ค่า Y
1	+3	+3
2	−4	+4
3	−1.5	−1.5
4	2	−3

รูปที่ 2.5 แสดงระบบพิกัดคาร์ตีเซียนแบบสองมิติ

2.4.1.2 ระบบสามมิติ (3D)

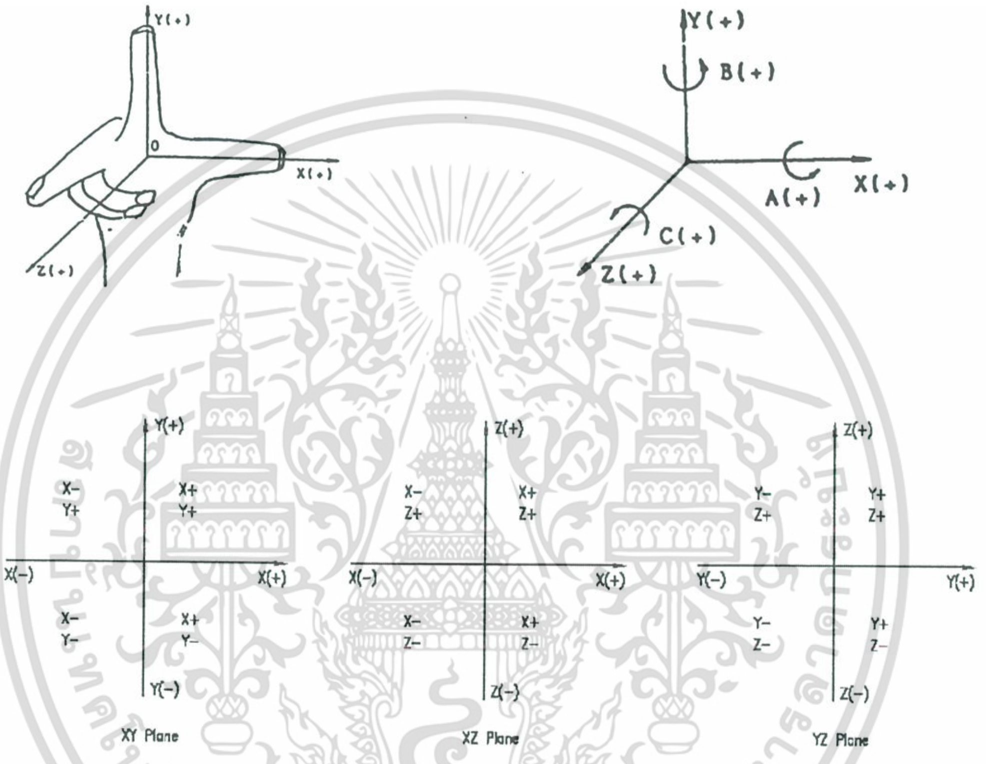
เมื่อเพิ่มแกนคู่ลำดับ Z อีกแกนหนึ่ง เข้ากับแกน x และแกน y ของระบบคู่ลำดับ สองมิติแล้ว จะสามารถสร้างระบบสามมิติ (three dimensional system) หรือสามแกนขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อาจจะกล่าวได้อีกว่า ระบบคู่ลำดับสามมิตินั้น สร้างขึ้นจากเส้นตรงที่ตั้งฉากซึ่งกัน และกันในสเปซ (spece) เส้นตรงเหล่านี้จะถูกนิยามให้มีหน่วยเหมือนกัน และให้ชื่อแกนคู่ลำดับเป็น x ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

y และ z ส่วนจุดตัดกันก็จะเหมือนกรณีของระบบสองมิติ กล่าวคือ จุดนี้จะเป็นจุดกำเนิด และมีค่าคู่ลำดับของ x = 0, y = 0 และ z = 0 ดังรูป เป็นรูปที่2.6 แสดงระบบคู่ลำดับมือขวา

แกนที่จับกันเป็นคู่ๆ จะทำให้เกิดระนาบคู่ลำดับ xy, xz และ yz ถ้า p เป็นจุดใดๆ ในสเปซค่าคู่ลำดับ x, y และ z จะสามารถสร้างได้จากระนาบที่ตั้งฉากกับแกนคู่ลำดับในแต่ละแกนกับจุดตัดที่ p ระยะทางที่วัดจากจุดกำเนิดไปตามแกน x, y และ z คือ คู่ลำดับ x, y และ z ของจุด p



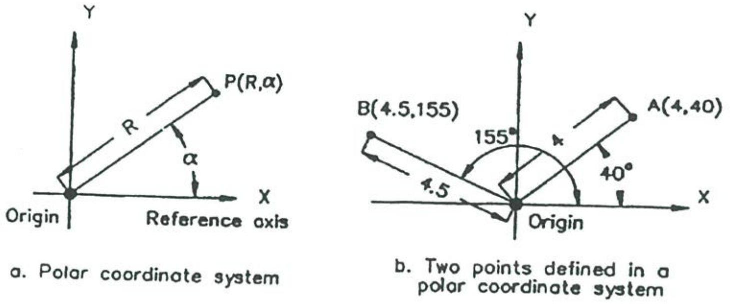
รูปที่ 2.6 แสดงกฎมือขวา การหมุนรอบแนวแกนและระนาบต่างๆ

2.4.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate system)

ในระบบพิกัดเชิงขั้วจะบอกตำแหน่งเป็นค่ารัศมีอันหนึ่งวัดจากจุดอ้างอิง และค่ามุมอันหนึ่งที่รัศมีอันนี้ทำกับแกนอ้างอิงดังรูปที่ 2.7 จุดอ้างอิงนี้มักจะเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉากและแกนอ้างอิงมักจะเป็นแกน X บวกของระบบพิกัดฉาก ค่ามุมจะเป็นบวกเมื่อวัดทวนเข็มนาฬิกา และมีค่ามุมเป็นลบเมื่อวัดตามเข็มนาฬิกา การบอกค่าในพิกัดเชิงขั้วมักจะแบ่งเป็น (R,θ) โดย R แทนรัศมี, θ แทนค่ามุมดังรูปที่ 2.7

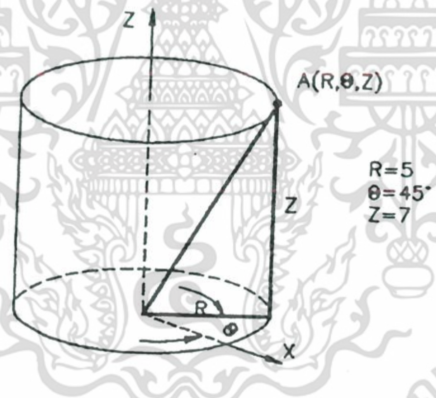
60252

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงระบบพิกัดเชิงขั้ว

สำหรับระบบพิกัดเชิงขั้วที่มีขนาดมิติทางแกน Z ด้วยนั้น เราเรียกเป็นระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate system) โดยจะมีการกำหนดจุดเป็น (R,θ, Z) ตัวอย่างเช่นจุด A ในรูปที่ 2.8

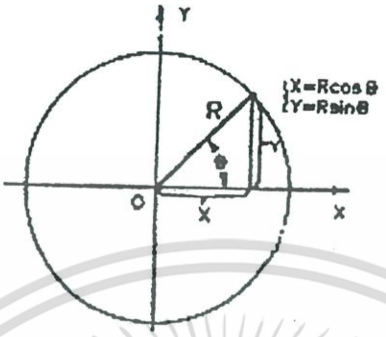


รูปที่ 2.8 ระบบพิกัดทรงกระบอก

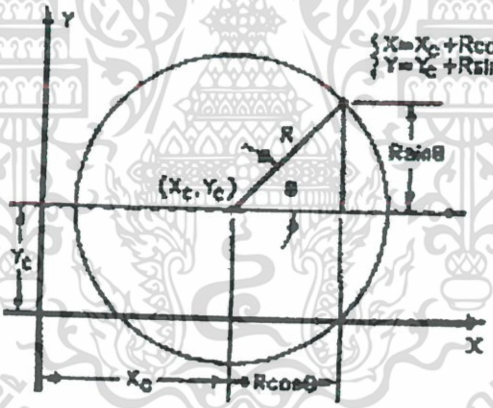
ระบบพิกัดทรงกระบอกจะมีประโยชน์มากในการประมาณระบบเฮลิคอลอินเทอร์โปเลชัน (Helical Interpolation) ซึ่งการหมุนมักจะอยู่ในระนาบ XY และการเคลื่อนที่เชิงเส้นมักจะอยู่ในแนวแกน Z ในทางคณิตศาสตร์ ระบบพิกัดเชิงขั้วและระบบพิกัดคาร์ตีเซียนจะมีความสัมพันธ์กัน ดังในรูปที่ 2.9 นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = R\cos\theta \quad (2.1)$$
$$Y = R\sin\theta \quad (2.2)$$
$$Z = Z \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ตีเซียนและระบบพิกัดเชิงขั้ว



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ตีเซียนและระบบพิกัดเชิงขั้ว กรณีจุดกำเนิดไม่อยู่ที่เดียวกัน

ในกรณีที่จุดกำเนิดของระบบพิกัดอ้างอิงไม่ได้อยู่ที่เดียวกับจุดกำเนิดของระบบพิกัดคาร์ตีเซียน ความสัมพันธ์ของระบบทั้งสองอาจเขียนออกมาอยู่ในรูปที่ คือ

$$X = X_c + R\cos\theta \quad (2.4)$$
$$Y = Y_c + R\sin\theta \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระบบการเคลื่อนที่มีดตัดของเครื่องจักรCNC

ในการทำโปรแกรมชิ้นงานCNC จะมีการบ่งบอกตำแหน่งสองวิธีด้วยกัน คือ

2.5.1 ระบบการบอกตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (Abosolute Positioning System) ในระบบนี้ตำแหน่งต่างๆ จะแบ่งออกมาเป็นค่าเทียบกับจุดอ้างอิงเดิมเสมอ

2.5.2 ระบบการบอกตำแหน่งแบบส่วนเพิ่ม (Incremental Positioning System) ระบบนี้ค่าตำแหน่งที่บ่งบอกจะเป็นค่าที่อ้างอิงจากจุดก่อนหน้านี้หนึ่งจุดเสมอ

ระบบการบอกตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ จะดีกว่าระบบการบอกตำแหน่งแบบส่วนเพิ่มในเรื่องความผิดพลาดของตำแหน่ง (positioning errors) เนื่องจากระบบการบอกตำแหน่งแบบสัมบูรณ์จะมีจุดอ้างอิงเพียงจุดเดียว หากมีการผิดพลาดก็ผิดพลาดเพียงจุดเดียว ไม่มีผลกระทบกับจุดอื่น ต่างกับระบบการบอกตำแหน่งแบบส่วนเพิ่ม ซึ่งจะมีการเปลี่ยนจุดอ้างอิงไปเรื่อยๆ หากมีการผิดพลาดเพียงจุดเดียวจะทำให้จุดต่อไปผิดพลาดไปด้วย

2.6 ระบบพิกัดอ้างอิง

ในการ โปรแกรม NC จะต้องมีจุดอ้างอิงอย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อใช้คำนวณค่าพิกัดตำแหน่งต่างๆ จุดอ้างอิงเหล่านี้จะถือเป็นจุดศูนย์อ้างอิง (Zero point) ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็นสี่แบบด้วยกัน

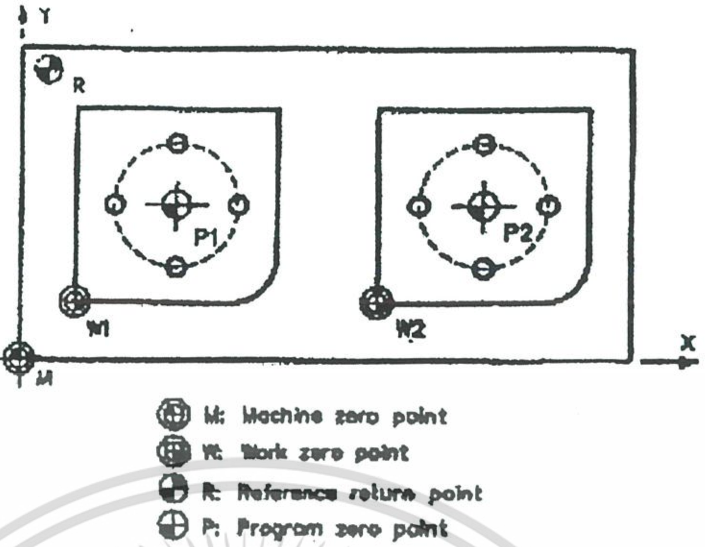
2.6.1 จุดศูนย์อ้างอิงของเครื่องจักร (Machine reference zero point) จุดกำเนิดนี้เป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดของเครื่องจักร จุดนี้จะเปลี่ยนแปลงไม่ได้

2.6.2 จุดอ้างอิงสำหรับการกลับที่เดิม (Reference return point) จุดเหล่านี้เป็นจุดที่กำหนดไว้ล่วงหน้าอย่างถูกต้อง เพื่อให้แต่ละแกนเคลื่อนที่กลับมาซึ่งอาจใช้ลิมิตสวิทซ์ตั้งระยะไว้ได้ เพื่อให้สปินเดิล(spindle) หรือ โต๊ะจับชิ้นงานกลับมาประจำที่ตำแหน่งนี้

2.6.3 จุดศูนย์อ้างอิงของงาน (Work reference zero point) จะเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดของชิ้นงาน อาจมีการกำหนดจุดศูนย์ของชิ้นงานมากกว่าหนึ่งจุดก็ได้บน โต๊ะจับชิ้นงานของเครื่องจักร จุดสำหรับการติดตั้งอาจอยู่ที่จุดศูนย์ของชิ้นงานก็ได้

2.6.4 จุดศูนย์อ้างอิงของโปรแกรม (Program reference zero point) ตำแหน่งจุดศูนย์อ้างอิงเหล่านี้อาจกำหนดหรือเลือกใช้โดยผู้เขียนโปรแกรมเอง ซึ่งอาจจะมีมากกว่าหนึ่งจุดอยู่ในโปรแกรมเดียวกัน ตัวอย่างการกำหนดจุดอ้างอิงเหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงระบบพิกัดอ้างอิง

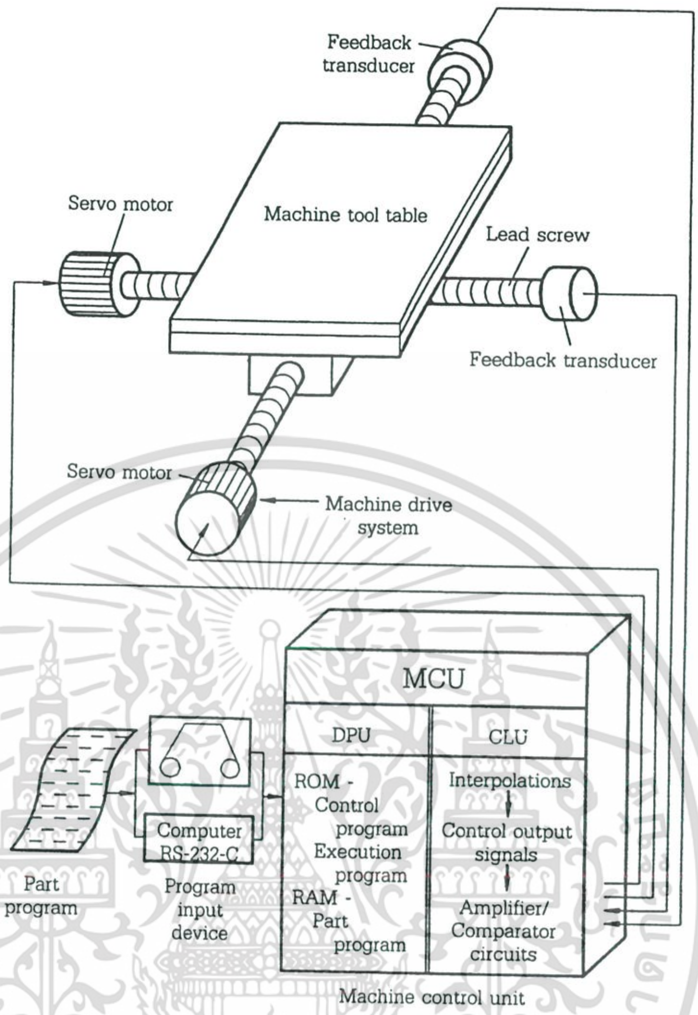
2.7 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องกัด CNC

การควบคุมเครื่องจักรด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control) นั้น เป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกล เพื่อทำให้สามารถผลิตชิ้นงานทางเรขาคณิตที่ซับซ้อน ให้เกิดความรวดเร็วต่อการผลิตชิ้นงาน อีกทั้งยังให้ความเที่ยงตรงสูง จึงมีการนำการควบคุมเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรหลายๆ ประเภท เช่น เครื่องกล เครื่องตัดโลหะ เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า และอื่นๆ โดยจะมีการทำงานดังรูปที่ 2.12 ซึ่งหน่วยอินพุท (Input) จะทำการรับข้อมูลคำสั่ง และประมวลผลของคำสั่งแล้วจึงไปควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล ให้ผลิตตามข้อมูลที่ได้รับ ดังแสดงรูปที่ 2.12 จากรูปที่ 2.12 สามารถแสดงถึงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ CNC เป็น 5 ส่วนสำคัญ ดังนี้

2.7.1 ส่วนโปรแกรมสั่งงาน (Part Program)

ในโปรแกรมสั่งงานของระบบ CNC จะมีลักษณะเรียงกันเป็นแถวลำดับ ซึ่งแต่ละแถวจะถูกเขียนเป็นคำสั่งในรูปแบบของตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์ การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้เพื่อใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลนั้น มีหลายแบบ เช่น ภาษาโปรแกรมรหัส NC ภาษาเอสพีพีแอล ภาษาเอพีที ซึ่งภาษาเหล่านี้จะแทนตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดบนเครื่องจักร CNC เพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ CNC

2.7.1.1 เลขฐานต่างๆ (Number System)

ระบบเลขฐานสิบเป็นระบบที่เราใช้กันอยู่ในโลกปัจจุบันนี้ ในทางทฤษฎีเราอาจใช้เลขฐานจำนวนใดๆ ก็ได้แต่นิยมใช้กันจะได้แก่ เลขฐานสิบ (Decimal : BCD) ใช้เลข 0 ถึง 9 เลขฐานสอง (Binary : BIN) ใช้เลข 0 หรือ 1 เลขฐานแปด (Octal)ใช้เลข 0 ถึง 7 และเลขฐานสิบหก (Hexadecimal : HEX) ใช้เลข 0 ถึง 9 และ ถึง F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของเลขฐานต่างๆ

HEX	BCD	FOUR DIGIT BINARY			
		$2^3 = 8$	$2^2 = 4$	$2^1 = 2$	$2^0 = 1$
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1
2	2	0	0	1	0
3	3	0	0	1	1
4	4	0	1	0	0
5	5	0	1	0	1
6	6	0	1	1	0
7	7	0	1	1	1
8	8	1	0	0	0
9	9	1	0	0	1
A	-	1	0	1	0
B	-	1	0	1	1
C	-	1	1	0	0
D	-	1	1	0	1
E	-	1	1	1	0
F	-	1	1	1	1

หมายเหตุ BIN (Binary) = ระบบเลขฐานสอง

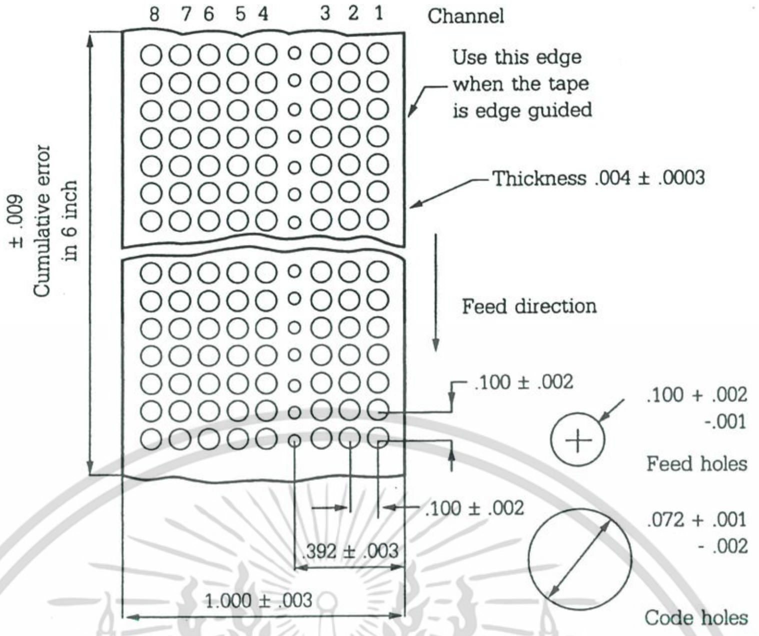
BCD (Binary Code Decimal) = ระบบเลขฐานสิบ

HEX (Hexadecimal) = ระบบเลขฐานสิบหก

2.7.1.2 ระบบรหัสของเทป NC (NC TAPE CODING SYSTEM)

สำหรับเครื่องจักร NC มีระบบของเทป หรือ ระบบรหัส NC ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายสองระบบด้วยกันคือ ระบบ EIA (Electronic Industries Association) และระบบ ASCII (American Standard Code for Information Interchange) ระบบทั้งสองนี้จะใช้เทปขนาด 1 นิ้ว มี 8 ช่องและใช้ระบบ BCD สำหรับข้อมูลเชิงตัวเลขระบบการให้รหัสแบบ EIA จัดทำขึ้นโดย EIA ตามมาตรฐาน RS-244-B ระบบรหัสนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในอเมริกาเหนือก่อนที่จะมีการจัดทำรหัส ASCII ขึ้นเป็นระบบรหัสขนาด 7 บิท ที่อยู่ในรูปแบบของเทปแบบ 8 ช่อง รหัส EIA ที่สมบูรณ์ที่ได้แสดงไว้ในรูป 2.13 พอจะสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงแถบเทปกระดาษมาตรฐาน EIA สำหรบโปรแกรม NC

1. ตัวเลข 1-9 จะใช้ 4 ช่องแรก (ช่อง 1 ถึง 4) มาแทนตัวเลขด้วยรหัสเลขฐานสอง

2. การตรวจสอบภาวะคู่หรือคี่ (Parity Check) ช่องที่ห้าจะเป็นบิทที่ใช้ตรวจสอบภาวะคี่ (odd-parity check bit) ช่องนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อให้จำนวนรูเจาะในแต่ละแถวมีจำนวนเป็นเลขคี่ และจะไม่ถูกนำมาใช้คิดคำนวณในระบบเลขฐานสอง

3. เลขศูนย์ (Digit zero) ช่องที่6 จะถูกใช้แทนเลขศูนย์และสมมูลย์กับเลขฐานสิบ 16

4. ตัวอักษร ช่องที่ 6 และ 7 จะถูกนำมาใช้ร่วมกับช่องที่ 1 ถึง 4 เพื่อแทนด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษทั้ง 26 ตัว ตลอดจนอักขระพิเศษและสัญลักษณ์ต่างๆ เพื่อให้เจาะจงขึ้น ตัวอักษรจะถูกแทนโดยใช้รหัสตัวเลข 1-9 ร่วมกับช่องที่6 และ / หรือ ช่องที่7 ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3

5. จุดสิ้นสุดบล็อค (End of block) ช่อง 8 จะถูกนำมาใช้แทนการสิ้นสุดของบล็อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การให้โค้ดตัวอักษรของชุดรหัส EIA

รูเจาะในช่องที่ 6 และ 7 ร่วมกับ ค่าตัวเลข:	รูเจาะในช่องที่ 7 ร่วมกับ ค่าตัวเลข:	รูเจาะในช่องที่ 6 ร่วมกับ ค่าตัวเลข:
1=a	1=j	
2=b	2=k	2=s
3=c	3=l	3=t
4=d	4=m	4=u
5=e	5=n	5=v
6=f	6=o	6=w
7=g	7=p	7=x
8=h	8=q	8=y
9=I	9=r	9=z

2.7.1.3 ระบบรหัสเทปแบบ ASCII

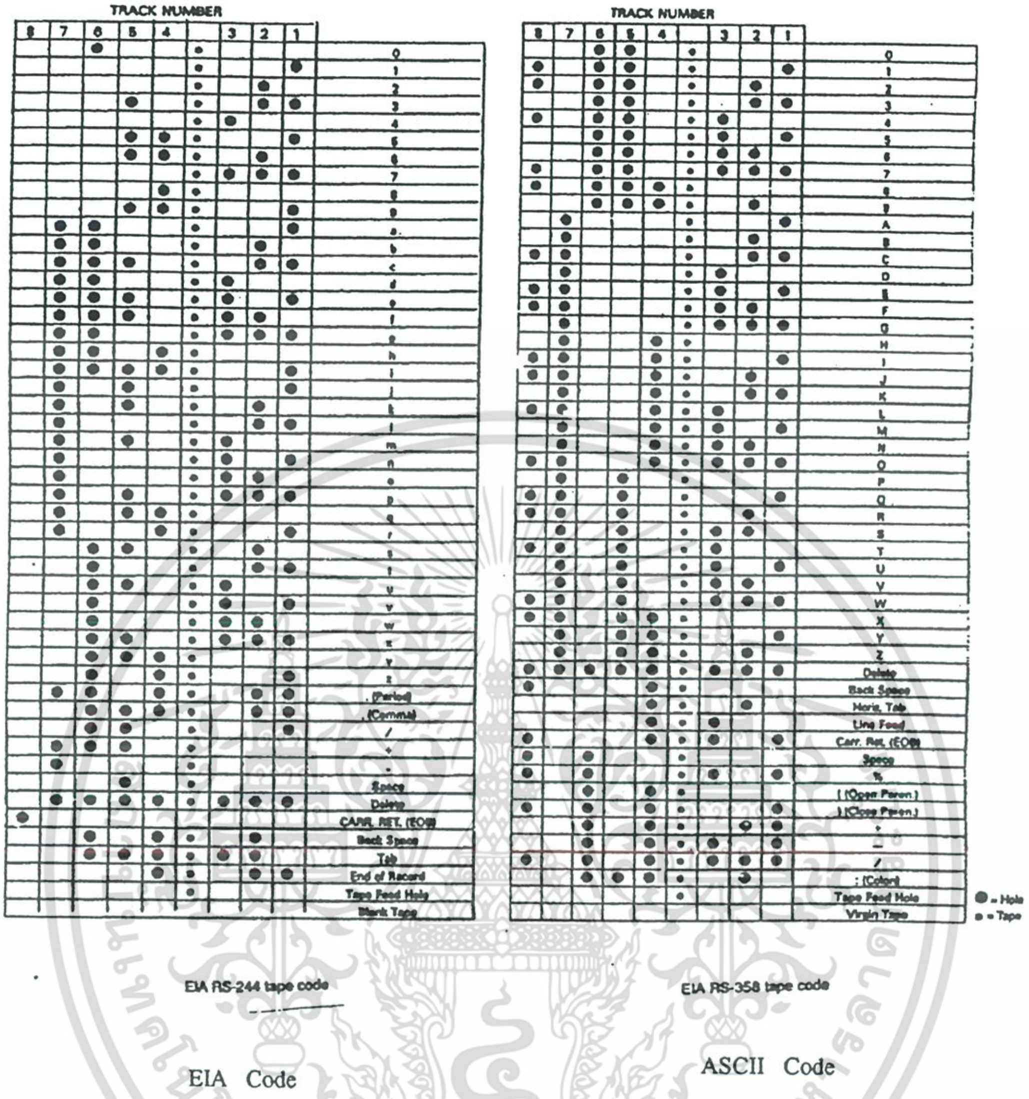
รหัส ASCII ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย American National Standards Institute (ANSI) จากความพยายามที่จะสร้างระบบรหัสอันหนึ่งที่เป็นมาตรฐานนานาชาติสำหรับกระบวนการสารสนเทศและระบบการสื่อสารทั้งหลาย รหัส ASCII (EIA RS-358) ถูกสร้างขึ้นเป็นระบบรหัสเทปเจาะแบบ 8 ช่องขนาด 1 นิ้ว เพื่อใช้สำหรับภาคราชการ , การโทรศัพท์ ,การโทรเลข ,คอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมอื่นๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมเชิงตัวเลข ASCII จึงได้ดัดแปลงรหัส ASCII เพื่อมาสร้างเป็นเซ็ทย่อยสำหรับรหัส ASCII (RS-385-B) ชุดอักขระ ASCII ที่ได้แสดงไว้ในรูป 2.21 พอจะสรุปได้ดังนี้

1. บิทภาวะคู่หรือคี่ (Parity bit) ช่องที่8 (บิทที่สำคัญที่สุด) จะถูกนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบภาวะคู่ (even-parity check)

2. ตัวเลข (1-9) จะคล้ายกับรหัสEIA ใช้ช่องที่ 1ถึง4 มาแทนตัวเลขโดยช่องที่ 1เป็นบิทที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด แต่ตัวเลขในรหัส ASCII จะมีการเจาะรูที่ช่องที่ 5 และ 6

3. ตัวอักษร (A-Z) ตัวอักษรทั้งหลายจะใช้การเจาะรูในช่องที่ 7 โดยช่องที่ 8 ใช้สำหรับการตรวจภาวคู่ ช่องที่ 1 ถึง 5 จะถูกนำมาใช้แทนตัวอักษรทั้ง 26 ตัวในภาษาอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบแถบเทปกระดาษมาตรฐาน EIA กับมาตรฐานASCII

รหัส ASCII จะใช้กันได้กับ รหัส ISO (International Standards Organization) ตัวอักษร และตัวเลขจะแทนด้วยรหัสที่เหมือนกันในระบบทั้งสอง ดังนั้นในหลายๆ กรณี รหัส ASCII และ รหัส ISO จะถูกนำมาใช้แทนกันได้โดยไม่มีความแตกต่าง

2.7.2 ส่วนที่ใช้ป้อนข้อมูลของโปรแกรม (Program Input Device)

ในการป้อนข้อมูลโปรแกรมในเครื่องจักรเป็นแบบซอฟไวร์ (Soft Wired) หมายความว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะถูกส่งไปตามสายไฟที่ต่อไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าทางกล เช่น โซลีนอยด์ ซึ่ง สามารถนำไปควบคุมเครื่องมือกล เครื่องเดียวหรือหลายๆ เครื่อง พร้อมกันได้ การส่งสัญญาณจะ ถูกส่งด้วยสายส่งสัญญาณ (Interface bus) เช่น RS-232-C ไปยังชุดเครื่องมือกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 หน่วยควบคุมการทำงานของเครื่อง (Machine Control Unit)

หน่วยควบคุมการทำงาน (MCU) ที่ประกอบไปด้วยชุดวงจรอิเลคทรอนิกส์จะทำหน้าที่อ่านโปรแกรมที่ป้อนเข้าไปจากเทปกระดาษ เปลี่ยนรหัสโปรแกรมนั้นให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยส่งสัญญาณนี้เข้าไปในราคาขยายสัญญาณของระบบขับ (Drive amplified) เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากหน่วยควบคุมนี้มีกำลังน้อย ไม่สามารถหมุนมอเตอร์ของแกนที่ต้องการเคลื่อนที่ได้โดยตรง

ส่วนที่สำคัญของหน่วยควบคุมการทำงาน (MCU) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ที่สำคัญได้แก่ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการอ่านโปรแกรมที่ป้อนเข้า (Input Data Processing Unit : DPU) เช่น เครื่องอ่านเทปกระดาษ เครื่องอ่านเทปแม่เหล็ก และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องกล (Control Loop Unit : CLU) เช่น ความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อน การเปิดหรือปิดน้ำหล่อเย็น การเปลี่ยนเครื่องมือตัด เป็นต้น

2.7.4 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ (Drive System)

การเคลื่อนที่ของเครื่องจักร CNC จะเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในการขับเคลื่อนแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ มอเตอร์กระแสตรง (AC Motor) มอเตอร์แบบเป็นชั้น (Stepping Motor) และระบบไฮดรอลิค (Hydraulic System)

2.7.5 เครื่องกล

ลักษณะการควบคุมเครื่องจักรกลระบบCNCนั้น จะสามารถแบ่งระบบการควบคุมได้เป็น 2 ลักษณะ คือ แบบวงรอบเปิด แบบวงรอบปิด และในบางกรณี จะเป็นแบบผสมผสานกันระหว่างแบบวงรอบปิดและวงรอบเปิด ภารวงจรแบบวงรอบเปิด จะสามารถอธิบายได้อย่างง่ายๆ ดังนี้ เมื่อระบบควบคุมส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์ขับเคลื่อนโต๊ะจับชิ้นงานเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการตามที่ได้โปรแกรมไว้ล่วงหน้า ซึ่งในระบบรอบเปิดนี้จะไม่มีการตรวจสอบสัญญาณย้อนกลับ (Feed back) ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าสัญญาณที่ส่งมานั้นได้ทำแล้วหรือยังข้อผิดพลาดจากการส่งสัญญาณนั้นหรือไม่

ซึ่งต่างจากระบบปิดคือ เมื่อโต๊ะเลื่อนชิ้นงานถึงตำแหน่งที่ถูกโปรแกรมไว้ ก็จะมีสัญญาณจากอุปกรณ์ เช่น เซ็นเซอร์ (Sensor) จับเพื่อควบคุมให้โต๊ะเลื่อนชิ้นงานหยุดการเคลื่อนที่

2.8 การโปรแกรม CNC

การกำหนดขั้นตอนการทำงานให้แก่ CNC หรือการโปรแกรม CNC สามารถกระทำได้โดยอาศัยการป้อน code ต่างๆ ตามหน้าที่การทำงานในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งภาษาที่ใช้มีมากมายหลายรูปแบบ แต่ภาษาหรือ code ที่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปนั้น เป็น code ที่กำหนดโดย EIA (Electronic Industrial Association) และ ASCII (American Standard Code for Information Interchange) ซึ่งผู้ผลิตส่วนใหญ่นำมาใช้ในการกำหนดการทำงานให้แก่เครื่อง CNC ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตนผลิตโดยมีการเพิ่มเติม code เฉพาะเครื่องของตนเสริมลงไป เพื่อให้ทำหน้าที่พิเศษที่ออกแบบมาเฉพาะเครื่องของตน code ที่ใช้ในการปฏิบัติงานของ CNC นั้นอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

2.8.1 G-Code เป็น Code ที่บอกถึงการเตรียมการปฏิบัติงานในขั้นตอนต่างๆ หรือ Preparatory Functions ตัวอย่างเช่น G00 ระบุให้เคลื่อนที่จากจุดๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยความเร็วสูง, G91 ระบุว่าตำแหน่งที่ระบุในบรรทัดต่างๆ ต่อไปนี้ กำหนดโดยอ้างอิงจากตำแหน่งปัจจุบันหรือเป็นระยะสัมพัทธ์นั้นเอง เป็นต้น

2.8.2 M-Code เป็น Code ที่กำหนดหน้าที่เบ็ดเตล็ดต่างๆ หรือ Miscellaneous Functions ตัวอย่างเช่น M00 แสดงถึงการหยุดโปรแกรมโดย Spindle (หัวยึดจับเครื่องมือ) และ Coolant (น้ำหล่อเย็น) หยุดด้วย, M02 บอกถึงจุดสุดท้ายของโปรแกรม, M03 หมุน Spindle ตามเข็มนาฬิกา เป็นต้น

2.8.3 Code อื่นๆ ที่มีความหมายเฉพาะตัว ซึ่งทำหน้าที่ด้วยตัวอักษรอื่นๆ และรวมไปจนถึง Code ที่บอกถึงการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆ เช่น X,Y และ Z เป็นต้น ตัวอย่างเช่น F25.0 ระบุ Feed rate หรือความเร็วของการเคลื่อนที่เท่ากับ 25 นิ้ว/นาที

จาก Code ต่างๆ ที่กล่าวมานั้น เนื่องจาก G-Code เป็น Code ที่ใช้มากที่สุดในโปรแกรม ดังนั้นเมื่อกล่าวถึง G-Code จึงหมายถึงภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม CNC และเป็นภาษาที่นิยมมากรูปแบบหนึ่ง ส่วนขั้นตอนการทำงานแต่ละขั้น หรือแต่ละบรรทัด ของโปรแกรม ก็จำเป็นที่จะต้องมีหมายเลขระบุขั้นตอน หรือ Sequence Number ขึ้นต้น ซึ่งหมายเลขเหล่านี้ จะถูกนำด้วยตัวอักษร N เช่น N001, N002,….. เป็นต้น การให้หมายเลขระบุขั้นตอนเหล่านี้จะมีประโยชน์อย่างมากในเวลาตรวจสอบแก้ไขโปรแกรมซึ่งไม่จำเป็นต้องให้หมายเลขเรียงกัน สามารถให้หมายเลขกระโดดข้ามกันก็ได้ เช่น การสร้างรูปโค้งอินเวอลูทของฟันเฟือง การสะท้อนภาพของฟันเฟือง การหมุนภาพ

2.9 คอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบ(Computer Aided Design: CAD)

เป็นการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งในการสร้างหรือเขียนแบบภาพลงบนจอของคอมพิวเตอร์ หรือการนำคอมพิวเตอร์กราฟฟิกส์มาช่วยในการสร้างแบบงานทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นการพัฒนาจากการเขียนแบบบนโต๊ะด้วยมือ ซึ่งต้องอาศัย ปากกา วงเวียน หรืออุปกรณ์ช่วยในการเขียนแบบต่างๆด้วยมือ มาเป็นการเขียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์ที่สามารถเขียน เส้นตรง ส่วนโค้ง วงกลม วงรีและ รวมทั้งการเขียนเป็นภาพสามมิติ โดยกำหนดเป็นรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน หรือถ้าเราต้องการเราก็สามารถเขียนแยกส่วนจากภาพประกอบสามมิติได้ด้วย รายละเอียดของชิ้นส่วน ก็จะใช้เพื่อทำการเลือกออกแบบเครื่องจับยึดชิ้นงานฟิกเจอร์ (Fixture) แสดงตำแหน่งที่แคลมป์จับชิ้นงาน ตำแหน่งของบล็อกตลอด จนรายละเอียดเกี่ยวกับชื่อชิ้นส่วนวัสดุ (Bill of Materials) และเป็นไปได้ที่จะใช้ให้โปรแกรมวิเคราะห์การออกแบบอย่างเช่น ความแข็งแรงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น เพื่อการวิจัยและค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ ระยะพิกัดเผื่อ ความคลอนในการประกอบ ประเมินค่าพิกัดความเผื่อ และค่าผิดพลาดที่ยอมได้ก่อนการผลิต โดยระบบ CAD จะต้องมีทั้งส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยส่วนฮาร์ดแวร์โดยทั่วไปประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง จอกราฟิกส์ เมาส์ แป้นพิมพ์ ขณะที่ซอฟต์แวร์ประกอบไปด้วยโปรแกรมสร้างแบบชิ้นส่วนและกำหนดขนาด

วิธีการทำงานในระบบCADนั้น จะทำการสร้างรูปภาพ ออกแบบชิ้นส่วนต่าง โดยการสร้างรูปภาพให้แสดงที่จอภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยคำสั่งต่างๆที่มีอยู่ภายในโปรแกรม ข้อมูลของรูปภาพสามารถทำการบันทึกลงในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของแฟ้มข้อมูล เพื่อที่สามารถนำไปใช้งานตามความต้องการ สำหรับระบบการสร้างภาพโดยโปรแกรม CAD นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ คือ

2.9.1 ระบบเส้นรอบรูป(Wire frame modeler)

2.9.2 ระบบผิวสัมผัส (Surface Modeller)

2.9.3 ระบบรูปทรงวัตถุตัน (Solid Modeller)

2.10 คอมพิวเตอร์ช่วยงานการผลิต (Computer Aided Manufacturing : CAM)

ในการผลิตชิ้นงานจริงจากข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตที่จาก CAD นั้นจะถูกนำมาคำนวณหาค่าพิกัดต่างๆ และสร้างเส้นทางเดินของมีดตัดสำหรับสั่งให้เครื่องจักร CNC ซึ่งประยุกต์ได้กับกรรมวิธีการผลิตทั้งแบบงานมีเศษและงานไร้เศษ เช่น งานกัด งานกลึง งานปั๊มขึ้นรูป การตัดปาดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้า(Electrical discharge machining) งานกัดเซาะร่องด้วยไฟฟ้า(Wire-cut machine) งานตัดปาดลำน้ำฉีดความเร็วสูง(Water-jet machining) การนำระบบ CAMเข้ามาช่วยในการผลิต ทำให้สามารถเชื่อมระบบการผลิตเป็นสายการผลิตที่ต่อเนื่องได้คือ เมื่อมีความต้องการผลิตชิ้นงานใดๆ ก็จะทำการออกแบบและเขียนโปรแกรม CAMจากนั้นก็เก็บข้อมูลส่งผ่านเป็นรหัสโปรแกรม (Program Code) ผ่านไปยังส่วนควบคุมระบบ CAM ซึ่งทั้งสองระบบที่เชื่อมโยงกันนี้เรียกว่าขบวนการผลิตแบบ CAD - CAM

ระบบ CAMโดยทั่วไปสามารถแบ่งแยกตามลักษณะของงานได้เป็น 2 ประเภท คือ ระบบ CAM สำหรับการทำงานในระบบสองมิติครึ่ง (2 1/2 axis) และระบบ CAM สำหรับการทำงานในระบบ 3 มิติ (3 axis) ระบบ CAM สามารถรวมเป็นโมดูล (Module) เดียวกับระบบ CAD หรือแยกทำงานอย่างอิสระจากระบบ CAD การส่งข้อมูลจากระบบ CAM สู่เครื่องจักร CNC สามารถกระทำได้โดยตรงระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับชุดควบคุมของเครื่องจักร CNC โดยผ่านสายส่งข้อมูลมาตรฐาน หรือโดยใช้แผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งสถานการณ์เชื่อมต่อระหว่างระบบ CAM กับเครื่องจักร CNC สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ

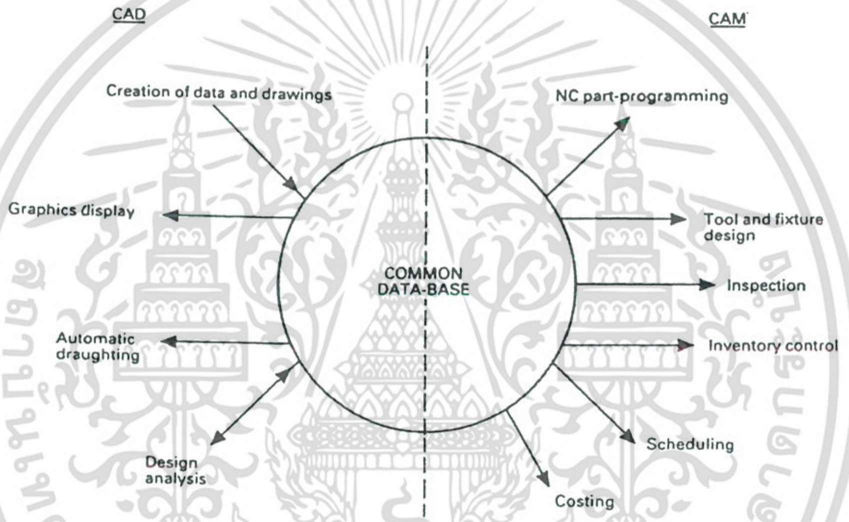
2.10.1 ระบบ On-line คือการนำเอาคอมพิวเตอร์ต่อเข้าโดยตรงกับส่วนควบคุมของเครื่องจักร CNC แล้วส่งข้อมูลที่ประมูลผลแล้ว อาจจะส่งเป็นข้อมูลเป็นบล็อก (Bock) หรือข้อมูล

เอกสาร...เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสส่งเข้าโดยตรงที่ตัว Interpovator ของเครื่องจักร จุดเด่นของลักษณะนี้คือสามารถส่งข้อมูลได้ไม่จำกัดขนาดของข้อมูล

2.10.2 ระบบOff-line คือการนำเอาผลจากการประมวลข้อมูลทางเรขาคณิตที่ได้รับจากโปรแกรม แปลค่าพิกัดมาเป็นและซึ่งจะได้แบบเป็นรูปแบบบล็อค แล้วบันทึกผลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลแล้วจึงนำไปเข้าเครื่องอ่านแผ่นข้อมูลที่เครื่องจักร

การใช้ CAD - CAM ให้เกิดผลอย่างสมบูรณ์นั้นจะต้องสามารถส่งข้อมูลถึงกันและกันได้ โดยข้อมูลที่ออกแบบ โดยซึ่งเป็นข้อมูลของของรูปภาพกราฟฟิกส์ สามารถนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานซึ่งมีขนาดและรูปร่างเหมือนกับที่ออกแบบไว้ในทุกประการสำหรับการใช้มูลร่วมกันของระบบและแล้วดังรูปที่2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการใช้ฐานข้อมูลร่วมกันของระบบCAD-CAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สมการพาราเมตริก

3.1 การแสดงถึงพื้นฐานของสมการพาราเมตริก (Parametric Equations)

สำหรับการวิเคราะห์เส้นโค้ง (Analytic curves) ซึ่งส่วนมากใช้สำหรับการสร้างภาพในลักษณะ แบบเส้นรอบรูป (Wire frame Modelling) ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การวิเคราะห์ และการสังเคราะห์ (Analytic and synthetic entities) ซึ่ง

3.1.1 การวิเคราะห์ (Analytic Entities) นั้นโดยมากจะเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่มีสมการแน่นอน เช่นจุด(Points) เส้นตรง (Lines) วงกลม (Circle) พาราโบลา (Parabolas) ใช้ไฮเพอร์โบลา (Hyperbola) เช่น สมการเส้นตรง มีสมการคือ $y = ax + b$ หรือ สมการวงกลมเป็น $x^2 + y^2 = R^2$

3.1.2 การสังเคราะห์ (Synthetic Entities) จะอยู่ในรูปที่ไม่มีสมการแน่นอน แต่ขึ้นอยู่กับจุดของข้อมูลที่กำหนด ในส่วนของการจัดสมการจะมีความยุ่งยากในการคำนวณมากกว่า เช่น Cubic Spline, Beziers, B-Spline Curve

3.2 สมการสำหรับเส้นโค้ง (Curve Equations) [6]

เราสามารถที่จะอธิบายสมการสำหรับเส้นโค้ง ได้ในทางคณิตศาสตร์ได้ 2 แบบ คือ

3.2.1 สมการที่ไม่เป็นแบบอิงตัวแปรเสริม (Nonparametric Equation) คือ พิกัดตำแหน่งของจุด x, y, z บนส่วนโค้งจะถูกกำหนดความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชั่น เช่น ในระบบ 2 มิติ จะกำหนดได้โดยฟังก์ชั่น $y = f(x)$ และในระบบ 3 มิติ จะเป็น $z = f(x, y)$ ดังรูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งของ p อยู่ที่พิกัด (x, y, z) โดยที่ y และ z เป็นฟังก์ชั่นของ x ดังนั้น $p = [x \;\; f(x) \;\; g(x)]^T$ หรือจุด p สามารถอธิบายในอีกรูปแบบได้ดังนี้

$$F(x, y, z) = 0 \qquad (3.1)$$

$$G(x, y, z) = 0 \qquad (3.2)$$

โดยที่ F และ G เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ หากกำหนดค่า x แล้วก็จะสามารถแก้สมการหาค่า y และ x ได้

จากการศึกษาจะพบถึงข้อเสียของวิธีการใช้สมการที่ไม่เป็นแบบอิงตัวแปรเสริม ดังนี้

3.2.1.1 ความชันของเส้นที่เกือบจะเป็นแนวดิ่งจะมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity)

3.2.1.2 ถ้าหากเส้นที่กำลังพิจารณาประกอบด้วยเส้นตรงเล็กๆ เป็นจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของจุดต่างๆ ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ จะถูกแสดงในหัวข้อของวิธีการตัวแปรอ้างอิงเสริมในหัวข้อถัดไป

3.2.2 สมการแบบอิงตัวแปรเสริม (Parametric Equation) สำหรับสมการเส้นโค้งแบบอิงตัวแปรเสริมนั้น แต่ละจุดที่อยู่บนเส้นจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปร t โดยที่ t ปกติจะถูกกำหนดให้มีค่าระหว่าง 0 และ 1 พิจารณาจากรูปที่ 3.1 สมการของเส้นในรูปของปริภูมิ 3 มิติ คือ

$$p(t) = [x(t)\ y(t)\ z(t)]^T \tag{3.3}$$

โดยที่ค่า $t_{\min} < t < t_{\max}$ โดยสามารถแสดงถึงจุดที่อยู่บนเส้นที่เป็นส่วนประกอบของเวกเตอร์ตำแหน่ง ที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์ $\vec{p}(t)$ และ $\vec{p}(t)$ จากรูปที่3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปร x, y และ z เขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันได้ คือ

$$\begin{aligned} x &= f(t) \\ y &= g(t) \\ z &= h(t) \end{aligned} \tag{3.4}$$

พิจารณาหาค่าความชันของเส้น ที่ถูกแสดงในรูปของเวกเตอร์ $\vec{p}'(t)$ โดยทำการดิฟเฟอเรนเชียล $p(t)$

$$\vec{p}'(t) = \frac{dp(t)}{dt} \tag{3.5}$$

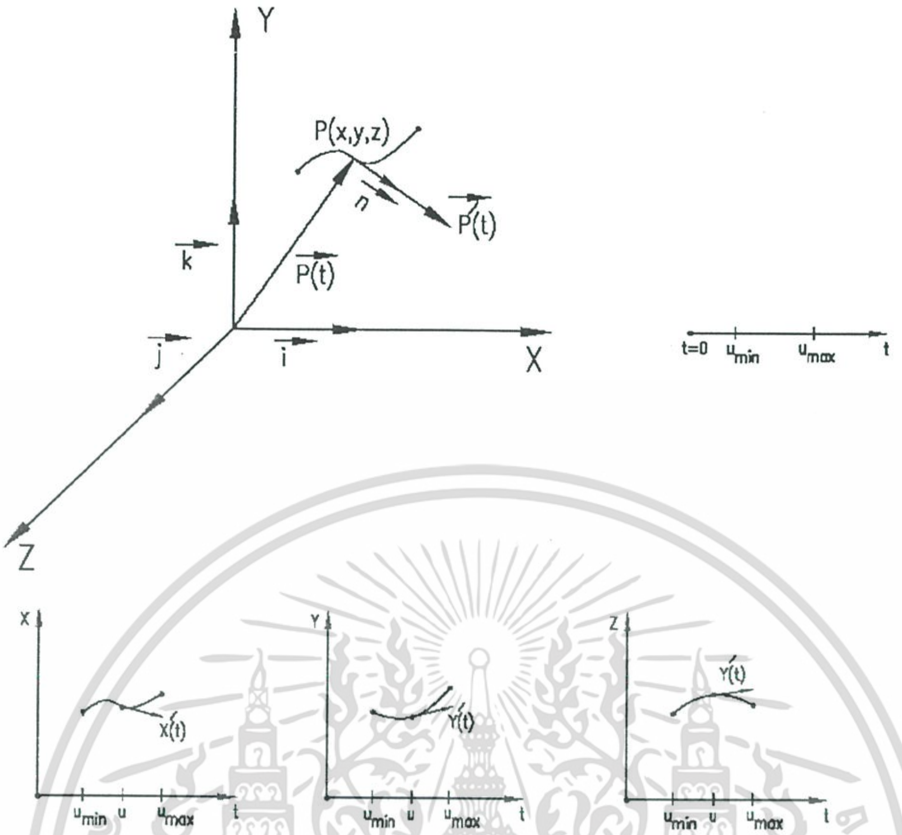
นำค่า $p(t)$ ในสมการที่ (3.5) แทนในสมการที่ (3.3) เพื่อหาเส้นสัมผัส

$$\vec{p}(t) = [x'(t) \quad y'(t) \quad z'(t)]^T \tag{3.6}$$

จากการที่กำหนดให้ค่า t นั้นเป็นฟังก์ชันของ x, y และ z นั้น y จะเป็นฟังก์ชันของ x ได้ก็ตัวผ่านความสัมพันธ์จาก t มาก่อน เราเรียกฟังก์ชันชนิดนี้ว่า Function to a Function ซึ่งสามารถหาค่าได้ตามทฤษฎีของดิฟเฟอเรเชียล คือ $\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} . \frac{dt}{dx}$ ดังนั้นสมการที่ (3.5) สามารถแปลงรูปได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{y'}{x'} \\ \frac{dz}{dy} &= \frac{z'}{x'} \end{aligned} \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงค่าความชันของรูปปริภูมิทั้ง 3 แกน

ขนาดและทิศทางของเส้นสัมผัส สามารถหาได้โดย สมการของขนาด

$$|p'(t)| = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} \quad (3.8)$$

สมการของทิศทาง

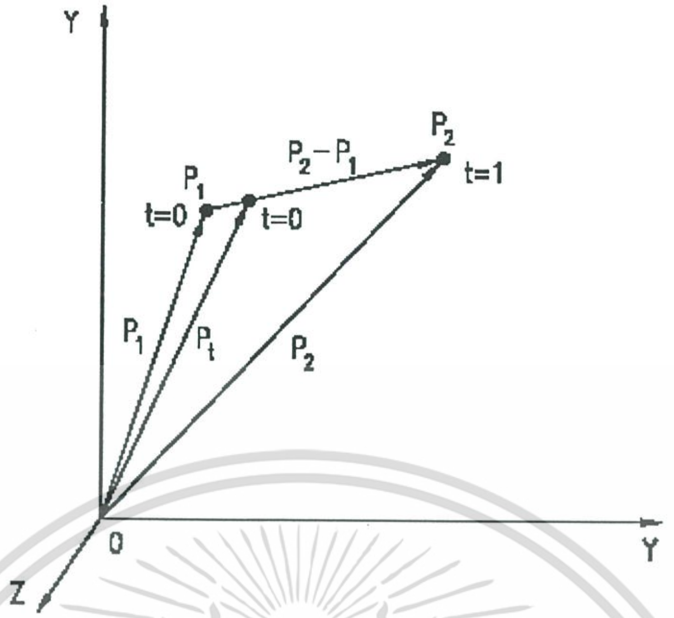
$$\vec{n} = \frac{p'(t)}{|p'(t)|} = h_x\vec{i} + h_y\vec{j} + h_z\vec{k} \quad (3.9)$$

3.2.2.1 สมการเส้นโค้งตัวแปรเสริมแบบวิเคราะห์

1. เส้นตรง (Line)

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาเส้นตรงที่เชื่อมกันระหว่างจุด p_1 และ p_2 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ t มีค่าเป็น $t = o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงเส้นตรงที่เกิดจากจุดสองจุด P_1 และ P_2

ที่จุด p_1 และ $t = 1$ ที่จุด p_2 ซึ่งในรูปของ $\Delta\, opp_1$ เราสามารถเขียนสมการเพื่อคำนวณหาเวกเตอร์ $\vec{p}$ ดังนี้

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + (\vec{p} - p_1) \tag{3.10}$$

เนื่องจาก $\vec{p} - \vec{p}_1$ เป็นสัดส่วนกับ $\vec{p}_2 - \vec{p}_1$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\vec{p} - \vec{p}_1 = t(\vec{p}_2 - \vec{p}_1) \tag{3.11}$$

แทนค่าสมการ (3.10) ในสมการ (3.11) จะได้

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + t(\vec{p}_2 - \vec{p}_1) \qquad 0 \le t \le 1 \tag{3.12}$$

เนื่องจากเวกเตอร์ $\vec{p}_1$ มีส่วนประกอบ (x_1, y_1, z_1) (x, y, z) และ $\vec{p}_2$ มีส่วนประกอบ (x_2, y_2, z_2) เพราะฉะนั้นจะเขียนในรูปของเวกเตอร์ย่อยได้คือ

$$x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} = \left(x_1\hat{i} + y_1\hat{j} - z_1\hat{k}\right) + t\left(x_2\hat{i} + y_2\hat{j} + z_2\hat{k}\right) \tag{3.13}$$

หรือเขียนในรูปของสเกลาร์ (Scalar) ได้เป็น

$$\begin{aligned} x &= x_1 + t(x_2 - x_1) \\ y &= y_1 + t(y_2 - y_1) \\ z &= z_1 + t(z_2 - z_1) \end{aligned} \tag{3.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.14) นี้เรียกว่าสมการอิงตัวแปรเสริม (Parametric Equation) ของเส้นตรง p โดยมี t เป็นตัวแปรเสริม (Parametric) และจากการที่เส้นตรงลากผ่านจุดที่ไม่อยู่แนวดิ่งเดียวกัน จะทำให้เกิดค่า x_1 และ x_2 หรือ y_1 และ y_2 มีค่าแตกต่างกันนั้น จะถูกเรียกว่า ความชัน (Slope) พิจารณารูปที่ 3.2 จะสามารถหาค่าความชันได้ดังนี้

$$\vec{p}' = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 \tag{3.15}$$

จัดอยู่ในรูปสเกลาร์ คือ

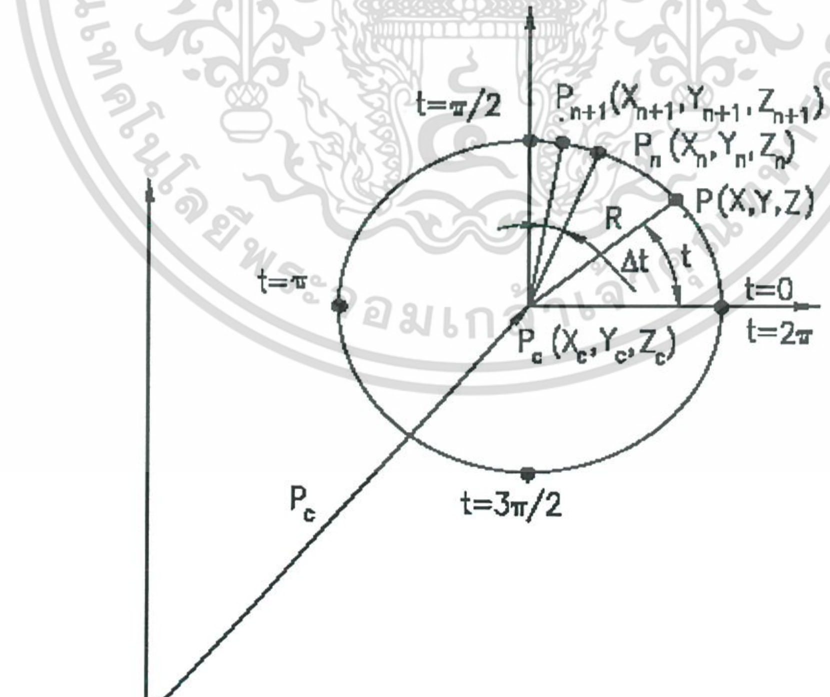
$$\begin{aligned} x' &= x_2 - x_1 \\ y' &= y_2 - y_1 \\ z' &= z_2 - z_1 \end{aligned} \tag{3.16}$$

สำหรับความยาวของเส้นตรงสมการคำนวณได้จาก $\vec{p}_2 - \vec{p}_1$

$$L = |\vec{p}_2 - \vec{p}_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \tag{3.17}$$

2. วงกลม (Circles)

วงกลมจะประกอบไปด้วยจุดต่างๆ ประกอบกันเป็นวงกลม โดยจุดเหล่านั้นจะอยู่ห่างจากจุดที่คงที่ด้วยระยะทางที่เท่ากัน จุดคงที่นั้นเรียกว่า จุดศูนย์กลาง และเรียกระยะทางคงที่ว่า รัศมี



รูปที่ 3.3 แสดงเส้นตรงที่เกิดจากการกำหนดโดยจุดศูนย์กลางและรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 กำหนดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมใดๆ เป็นจุด $p_c(x_c, y_c, z_c)$ และกำหนดรัศมีของวงกลมเท่ากับ R เราสามารถคำนวณหาสมการอ้างอิงตัวแปรเสริมของวงกลมที่จุด P โดยกำหนดให้ระนาบที่วงกลมอยู่คือระนาบที่วงกลมอยู่คือ ระนาบ XY

$$\left.\begin{aligned} x &= x_c + R\cos t \\ y &= y_c + R\sin t \\ z &= z_c \end{aligned}\right\} \quad 0 \le t \le 2\pi \tag{3.18}$$

ในการสร้างรูปวงกลมโดยทั่วไปนิยมใช้ Δt เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 360 องศา จากรูปเราพบว่า Δt ที่กำหนดระหว่างจุด Δt ที่กำหนดระหว่างจุด $p_n(x_n, y_n, z_n)$ และจุด $p_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ จากความสัมพันธ์เราสามารถคำนวณหาพิกัดบนเส้นวงกลม ได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} x_n &= x_c + R\cos t \\ y_n &= y_c + R\sin t \\ z_n &= z_n \end{aligned}\right\} \tag{3.19}$$

$$\left.\begin{aligned} x_{n+1} &= x_c + R\cos(t+\Delta t) \\ y_{n+1} &= y_c + R\sin(t+\Delta t) \\ Z_{n+1} &= z_n \end{aligned}\right\} \tag{3.20}$$

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ

$$\begin{aligned} \sin(A \pm B) &= \sin A\cos B \pm \cos A\sin B \\ \cos(A \pm B) &= \cos A\cos B \pm \sin A\sin B \end{aligned} \tag{3.21}$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์กับสมการ (3.20) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_c + R(\cos t\cos\Delta t - \sin t\sin\Delta t) \\ y_{n+1} &= y_c + R(\sin t\cos\Delta t + \cos t\sin\Delta t) \\ z_{n+1} &= z_c \end{aligned} \tag{3.22}$$

จัดรูปสมการ (3.19) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (x_n - x_c) &= R\cos t \\ (y_n - y_c) &= R\sin t \end{aligned} \tag{3.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

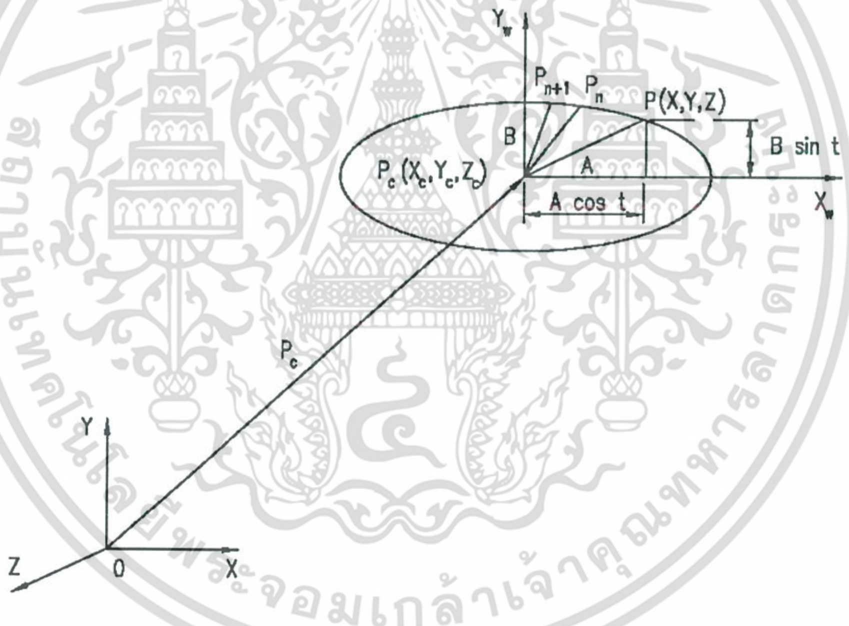
แทนค่าสมการ (3.23) ลงในสมการ (3.22) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_c + (x_n - x_c)\cos\Delta t - (y_n - y_c)\sin\Delta t \\ y_{n+1} &= y_c + (y_n - y_c)\cos\Delta t - (x_n - x_c)\sin\Delta t \end{aligned} \qquad (3.24)$$

การวาดเส้นวงกลม โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หากใช้สมการ (3.24) จะสามารถเขียนวงกลมได้รวดเร็วกว่าใช้สมการ (3.20) เนื่องจากค่า $\sin\Delta t$ และ $\cos\Delta t$ จะถูกคำนวณเพียงครั้งเดียว ซึ่งแตกต่างสมการ (3.20) จะต้องคำนวณค่า $\sin t$ และ $\cos t$ ที่ทุกๆ ค่า t

3. วงรี (Ellipses)

วงรี เกิดจากเซทของจุดบนระนาบ ที่ผลบวกของระยะทางจากจุดใดๆ เซทนี้ไปยังจุดคงที่สองจุดที่สองจุดที่มีค่าคงตัวเสมอ



รูปที่ 3.4 แสดงรูปวงรีที่ได้จากการกำหนดจุดศูนย์กลางแกนหลักและแกนรอง

จากรูปที่ 3.4 พิจารณาที่จุด $p(x, y, z)$ จะได้สมการอ้างอิงตัวแปรเสริมสำหรับจุด p ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} x &= x_c + A\cos t \\ y &= y_c + B\sin t \\ z &= z_c \end{aligned}\right\} \qquad 0 \le t \le 2\pi \qquad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 3.4 ของสมการอ้างอิงตัวแปรเสริมของวงรีนั้นจะพบว่ามีรูปแบบเหมือนกันกับสมการอ้างอิงตัวแปรเสริมของวงกลม โดยจะแตกต่างกันที่ค่าคงที่ A และ B ของสมการวงรี จะมีค่าเท่ากันในสมการแบบวงกลม และจากการทำการแทนค่าโดยใช้วิธีเดียวกันกับสมการอ้างอิงตัวแปรเสริมของวงกลมที่ผ่านมาแล้วนั้น สุดท้ายจะได้สมการอยู่ในรูปของ

$$
\begin{aligned}
x_{n+1} &= A\cos(t+\Delta t) \\
y_{n+1} &= B\sin(t+\Delta t) \\
z_n &= z_c
\end{aligned}
\tag{3.26}
$$

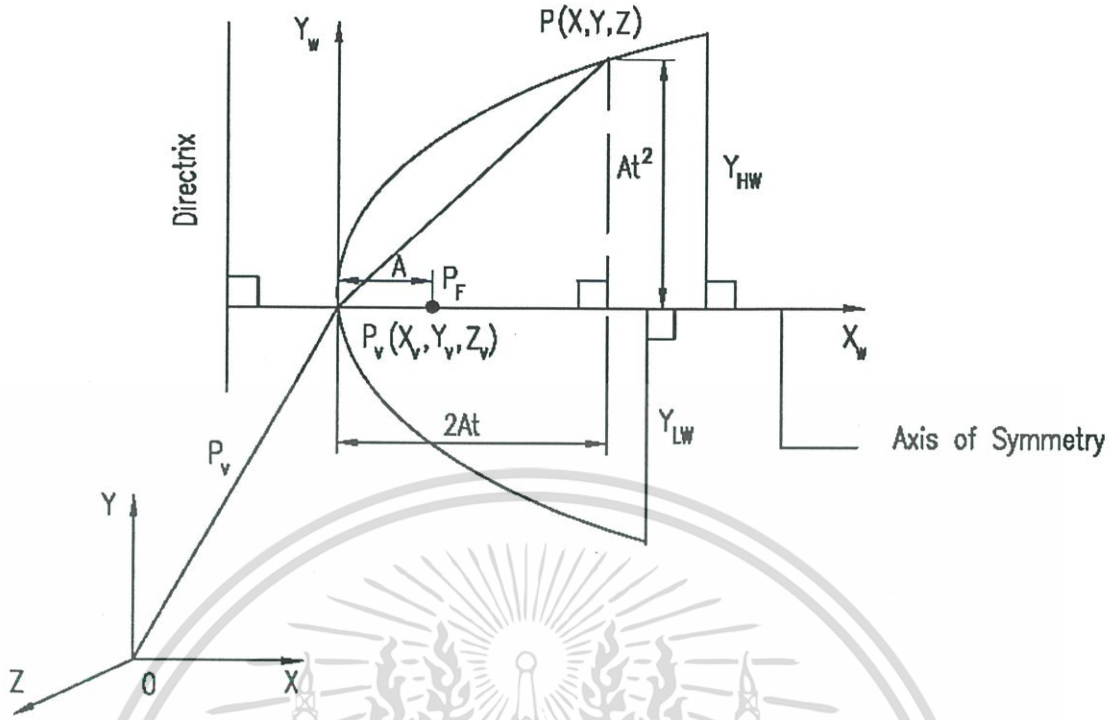
และ

$$
\begin{aligned}
x_{n+1} &= x_c + (x_n - x_c)\cos\Delta t - \frac{A}{B}(y_n - y_c)\sin\Delta t \\
y_{n+1} &= y_c + (y_n - y_c)\cos\Delta t + \frac{A}{B}(x_n - x_c)\sin\Delta t \\
z_{n+1} &= z_n
\end{aligned}
\tag{3.27}
$$

4. พาราโบลา (Parabola)

พาราโบลา คือ เซตของจุดในระนาบที่มีระยะทางห่างจากเส้นตรงเส้นหนึ่งเท่ากับระยะทางห่างจากจุดคงที่จุดหนึ่งซึ่งไม่อยู่บนเส้นตรง จุดคงที่นั้นเรียกว่า จุดโฟกัส (Focus) มักเขียนแทนด้วย F และ เส้นตรงนี้เรียกว่า ไดเรกตริกซ์ เรียกว่าแกนของพาราโบลาจุดที่กราฟตัดกับแกนเรียกว่า จุดยอด (Vertex) เส้นคอร์ดที่ลากผ่านโฟกัส และตั้งฉาก กับแกนพาราโบลาว่า ลาตัสเรกตัม (Latus rectum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของพาราโบลา

พิจารณาจากรูปที่ 3.5 กำหนดให้แกนระนาบของพาราโบลาอยู่ในแกนระนาบ xy และพิจารณาจากรูปสมการในรูปทั่วไปของพาราโบลา คือ $y^2 = 4ax$

จากสมการในรูปทั่วไปของพาราโบลานั้น กำหนดให้ค่า a เป็นค่าคงที่ และกำหนดให้ค่า x_n ในเทอมของตัวแปรอ้างอิงเสริม ดังสมการ

$$x_n = at^2 \tag{3.28}$$

แทนค่า x_n ในรูปสมการทั่วไปของพาราโบลา จะได้สมการของ y_n คือ

$$y_n = 2at \tag{3.29}$$

ทั้งค่า x_n และ y_n นั้นถูกแสดงในแนวแกน x และ y ของรูปที่ (3.24) และในการหาค่าที่จุด $p(x, y, z)$ นั้นสามารถกำหนดสมการได้ ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} x &= x_v + at^2 \\ y &= y_v + 2at \\ z &= z_v \end{aligned}\right\} \quad 0 \le t \le \alpha \tag{3.30}$$

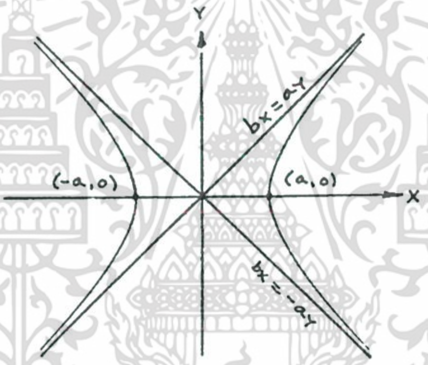
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในการพิจารณาหาค่าจุดต่อๆ ไปของพาราโบลานั้น เราสามารถทำได้โดยใช้วิธีการกำหนดช่วงที่เพิ่มขึ้นของจุดบนเส้นโค้งพาราโบลา คือ t และ $t+\Delta t$ โดยที่ค่า Δt นั้นเป็นสัญญลักษณ์แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของจุดในแต่ละช่วงของพาราโบลา พิจารณาเทียบกับสมการ (3.28) และ (3.29) จะได้สมการของ x_{n+1} และ y_{n+1} คือ

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= a(t+\Delta t)^2 \\ &= at^2 + 2at\Delta t + a\Delta t^2 \\ &= x_n + y_n\Delta t + a\Delta t^2 \end{aligned} \tag{3.31}$$

และ

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= 2a(t+\Delta t) \\ y_{n+1} &= y_n + 2a\Delta t \end{aligned} \tag{3.32}$$



รูปที่ 3.6 แสดงรูปทั่วไปของไฮเพอร์โบลา

5. ไฮเพอร์โบลา (Hyperbola)

สมการอ้างอิงตัวแปรเสริมสำหรับไฮเพอร์โบลานั้นเราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

5.1 แบบฟังก์ชั่นตรีโกณมิตจากรูปที่ 3.6 แบบทั่วไปของสมการไฮเพอร์โบลาที่มีแกนผ่าขนานแกน x คือ

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{3.33}$$

จากคุณสมบัติของตรีโกณมิติ $\sec^2 t - \tan^2 t = 1$ นำสมการทั้งสองมาพิจารณาเปรียบเทียบกัน จะพบความสัมพันธ์ในรูปของสมการอิงตัวแปรเสริม ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \pm a \sec t$$
$$y = \pm b \tan t \quad ,0 \le t \le \pi/2 \tag{3.34}$$

จากสมการที่ได้นำมาหาค่าในพิกัด x, y บนจุดต่างๆของไฮเพอร์โบลา ดังนี้

$$x_n = x_c + a \sec t$$
$$y_n = y_c + b \tan t \tag{3.35}$$
$$z_n = z_n$$

และที่ t+Δt จะได้สมการ

$$x_{n+1} = x_c + a \sec(\mathrm{t} + \Delta\mathrm{t})$$
$$y_{n+1} = y_c + b \tan(\mathrm{t} + \Delta\mathrm{t}) \tag{3.36}$$
$$z_{n+1} = z_n$$

5.2 แบบฟังก์ชั่นไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic function)

พิจารณาจากคุณสมบัติฟังก์ชั่นตรีโกณมิติ $\cosh^2 t - \sinh^2 t = 1$ เปรียบเทียบกับแบบทั่วไปของสมการไฮเพอร์โบลาที่มีแกนผ่าขนานแกนx ที่ผ่านมาในหัวข้อที่แล้วนั้นจะสามารถเขียนสมการอิงตัวแปรเสริมดังสมการ

$$x = a \cosh t$$
$$y = b \sinh t \tag{3.37}$$

โดยที่

$$\cosh t = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$
$$\sinh t = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad ,0 < t < \alpha \tag{3.38}$$

จากสมการที่ได้นำมาหาค่าในพิกัด x, y บนจุดต่างๆ ของไฮเพอร์โบลา ดังนี้

$$x_n = x_c + a \cosh t$$
$$y_n = y_c + b \sinh t \tag{3.39}$$
$$z_n = z_n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่ t+Δt จะได้สมการ

$$x_{n+1} = x_c + a\cosh(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})$$
$$y_{n+1} = y_c + b\sinh(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) \quad (3.40)$$
$$z_{n+1} = z_n$$

พิจารณาจากสูตรของมุมที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

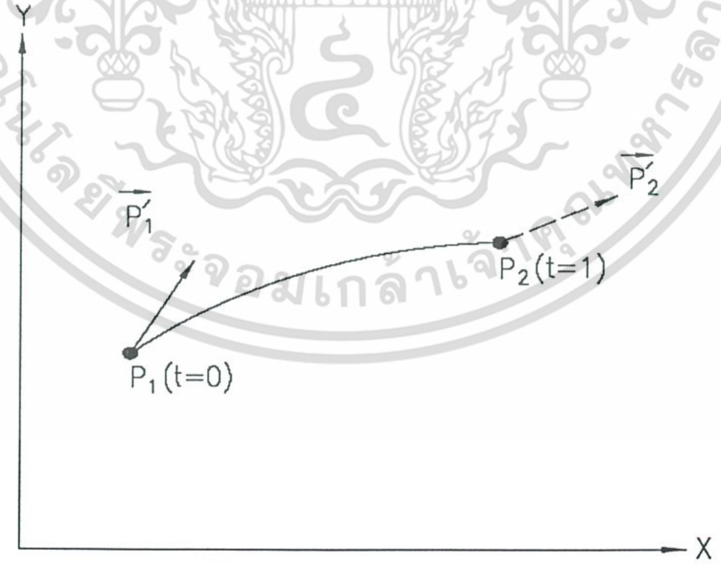
$$\cosh(t+\Delta t) = \cosh t\cosh\Delta t + \sinh t\sinh\Delta t$$
$$\sinh(t+\Delta t) = \sinh t\cosh\Delta t + \cosh t\sinh\Delta t \quad (3.41)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.40) สุดท้ายจะได้สมการ

$$x_{n+1} = x_n\cosh\Delta t + \left(\frac{a}{b}\right)y_n\sinh\Delta t$$
$$y_{n+1} = \left(\frac{b}{a}\right)x_n\sinh\Delta t + y_n\cosh\Delta t \quad (3.42)$$

6. สมการพาราเมตริกคิวบิกสไปลน์ (Parametric Cubic Splines Equation) [7], [8]

จากการพิจารณาจากช่วงระหว่างจุดต่อ 2 จุด โดยที่เราทราบตำแหน่งของจุด และความชันของเส้นที่จุดทั้งสอง ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงรูปเส้นโค้งของสมการพาราเมตริกคิวบิกสไปลน์

จากการที่เงื่อนไขที่ t = 0 ทำให้เรารู้ค่า $\vec{p}_1, \vec{p}_1'$ และที่ t = 1 ทำให้เรารู้ค่า $\vec{p}_2, \vec{p}_2'$ เราจึงสามารถเขียนสมการอ้างอิงตัวแปรเสริม ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{p}(t)=\sum_{i=1}^{m+1} a_i t^{i-1} \qquad ,t_i \le t \le t_2 \tag{3.43}$$

โดยที่ $\vec{p}(t)$ เป็นเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุดบนสไปลน์ และ a_i คือค่าสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียล สมการที่ (3.43) จะเขียนในรูปของสกาลาร์ได้เป็น

$$\begin{aligned} x(t)&=a_{1x}+a_{2x}t+a_{3x}t^2+a_{4x}t^3 \\ y(t)&=a_{1y}+a_{2y}t+a_{3y}t^2+a_{4y}t^3 \\ z(t)&=a_{1z}+a_{2z}t+a_{3z}t^2+a_{4z}t^3 \end{aligned} \tag{3.44}$$

และเรานำสมการที่ (3.44) มาเขียนใหม่ในรูปของเวกเตอร์ได้ว่า

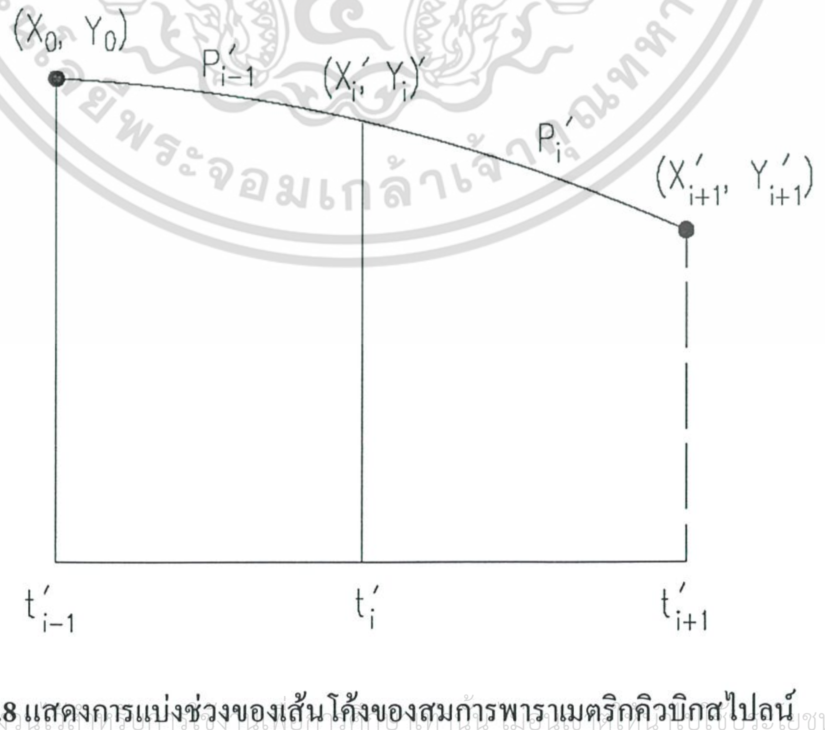
$$\vec{p}(t)=\vec{a}_1+\vec{a}_2+\vec{a}_3t^2+\vec{a}_4t^3 \tag{3.45}$$

สำหรับพารามิเตอร์ t จะถูกกำหนดให้เพิ่มขึ้นจากช่วงของเส้นโค้ง โดยกำหนดให้ $0 \le t \le 1$ และ

$$\begin{aligned} t_1 &= 0 \\ t_i &= t_{i-1}+\sqrt{(x_i-x_{i-1})^2+(y_i-y_{i-1})^2} \\ t_{n+1} &= t_n+\sqrt{(x_1-x_n)^2+(y_1-y_n)^2} \end{aligned} \tag{3.46}$$

โดยที่ $i=2,3,\ldots n$

การหาสมการจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จากรูปที่ 3.8 พิจารณาช่วงเส้นโค้งกำลังสามบนช่วง $[t_i,t_{i+1}]$ ซึ่งแสดงแทนด้วยค่าจะสามารถเขียนได้เป็น p_i สามารถเขียนได้เป็น



รูปที่ 3.8 แสดงการแบ่งช่วงของเส้นโค้งของสมการพาราเมตริกคิวบิกสไปลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left.\begin{array}{l} p(t_i) \ \ = y_i \\ p(t_{i+1}) = y_{i+1} \end{array}\right\} \ 0 \le i \le n \tag{3.47}$$

$$p(x) = \begin{cases} p_o(x), & t_0 \le x \le t_1 \\ p_1(x), & t_1 \le x \le t_2 \\ \ \ . & \\ \ \ . & \\ \ \ . & \\ p_{n-1}(x), & t_{n-1} \le x \le t_n \end{cases} \tag{3.48}$$

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของความต่อเนื่องที่จุดต่อภายใน $t_1, t_2, ___, t_{n-1}$ มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$p_{i-1}^{(k)}(t_i) = p_i^{(k)}(t_i) \ \text{ สำหรับ } k = 0,1,2, \tag{3.49}$$

เนื่องจากเราทราบสภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด $p(t_i) = y_i$ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจากความสัมพันธ์ของอนุพันธ์อันดับ2 ที่ตำแหน่งจุดปลายทั้งสอง นั่นคือที่ t_0และ t_n นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์

$$p''(t_0) = p''(t_n) = 0 \tag{3.50}$$

ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวนี้เรียกกันทั่วไปว่า Natural cubic spline พิจารณาบนช่วง $[t_i, t_{i+1}]$ อนุพันธ์อันดับสองของ P จะเป็นแบบพหุนามเชิงเส้น (Linear polynomial) และคิดที่จุดปลายจะเขียนได้ ดังรูปสมการ

$$p_i''(x) = \frac{P''(t_{i+1})(x - t_i)}{(t_{i+1} - t_i)} + \frac{p''(t_{i+1})(t_{i+1} - x)}{(t_{i+1} - t_i)} \tag{3.51}$$

กำหนดให้ $h_i = t_{i+1} - t_i$ และ $z_i = p''(t_i)$ สำหรับ $0 \le i \le n-1$ แทนค่าลงในสมการที่ (3.51) จะได้ว่า

$$p_i''(x) = \frac{z_{i+1}}{h_i}(x - t_i) + \frac{z_i}{h_i}(t_{i+1} - x) \tag{3.52}$$

ทำการอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้ว่า

$$p_i''(x) = \frac{z_{i+1}}{2h_i}(x - t_i)^2 + \frac{z_i}{2h_i}(t_{i+1} - x)^2 + c$$

$$p_i(x) = \frac{z_{i+1}}{6h_i}(x - t_i)^3 + \frac{z_i}{6h_i}(t_{i+1} - x)^3 + cx + d \tag{3.53}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า c และ d ที่ได้จากการอินทิเกรตเป็นค่าคงที่ ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยกำหนดให้ $p_i(t_i) = y_i$ และ $p_i(t_i) = y_{i+1}$ ลงในสมการที่ (3.53) จะเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$y_i = \frac{z_i}{6h_i}(t_{i+1} - t_i)^3 + ct_i + d$$
$$y_i = \frac{z_i h_i^2}{6} + ct_i + d \quad (3.54)$$

$$y_{i+1} = \frac{z_{i+1}}{6h_i}(t_{i+1} - t_i)^3 + ct_{i+1} + d$$
$$y_{i+1} = \frac{z_{i+1}}{6} h_i^2 + ct_{i+1} + d \quad (3.55)$$

จัดรูปสมการหาค่าคงที่ c และ d จากสมการที่ (3.54) จะได้ว่า

$$d = y_i - \frac{z_i h_i^2}{6} - ct_i \quad (3.56)$$

แทนค่า d ลงในสมการที่ (3.55) จะได้ว่า

$$y_{i+1} = \frac{z_{i+1} h_i^2}{6} + ct_{i+1} + y_i - \frac{z_i h_i^2}{6} + ct_i$$
$$ch_i = y_{i+1} - y_i - \frac{h_i^2}{6}(z_{i+1} - z_i)$$
$$c = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{h_i^2}{6}(z_{i+1} - z_i) \quad (3.57)$$

โดยที่ค่า c และ d ที่ได้จากการอินทิเกรตเป็นค่าคงที่ โดยวิธีการปรับปรุงค่าคงที่ ที่ได้จากการอินทิเกรตเพื่อให้ง่ายขึ้น ดังนี้

$$p_i(x) = \frac{z_{i+1}}{6h_i}(x - t_i)^3 + \frac{z_i}{6h_i}(t_{i+1} - x)^3 + c(x - t_i) + d(t_{i+1} - x) \quad (3.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า c และ d เป็นค่าคงที่ จากการดิฟเฟอเรียลสมการที่ (3.58) สองครั้ง จะได้ผลลัพธ์ตรงกับสมการที่ (3.52) ในการประมาณค่าทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยกำหนดให้ $p_i(t_i)=y_i$ และ $p_i(t_{i+1})=y_{i+1}$ ลงในสมการที่ (3.58) จะเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$
\begin{aligned}
y_i &= \frac{z_i}{6h_i}(t_{i+1}-t_i)^3 + d(t_{i+1}-t_i)\\
y_i &= \frac{z_i h_i^2}{6} + dh_i\\
d &= \frac{y_i}{h_i} - \frac{z_i h_i}{6}\\
y_{i+1} &= \frac{z_{i+1}}{6h_i}(t_{i+1}-t_i)^3 + c(t_{i+1}-t_i)\\
y_{i+1} &= \frac{z_{i+1}}{6h_i}h_i^2 + ch_i\\
c &= \frac{y_{i+1}}{h_i} - \frac{z_{i+1}h_i}{6}
\end{aligned}
\tag{3.59}
$$

แทนค่าคงที่ c และ d ในสมการที่ (3.53) จะได้

$$
p_i(x)=\frac{z_{i+1}}{6h_i}(x_i-t_i)^3+\frac{z_i}{6h_i}(t_{i+1}-x)^3+\left(\frac{y_{i+1}}{h_i}-\frac{z_{i+1}h_i}{6}\right)(x-t_i)+\left(\frac{y_i}{h_i}-\frac{z_i h_i}{6}\right)(t_{i+1}-x) \tag{3.60}
$$

ค่าของ $z_0, z_1, ...z_n$ จะเป็นตัวกำหนดของฟังก์ชั่นของทุกๆ ฟังก์ชั่น $p_o(x), p_1(x),...p_{n-1}(x)$ กำหนดให้ $u=\frac{x-t_i}{h_i}$ และ $v=\frac{t_{i+1}-x}{h_i}$ และ $w=\frac{z_i}{6}$ แทนค่าลงในสมการที่ (3.60) ทำให้สมการลดรูปได้เป็น

$$
\begin{aligned}
p_i(x) &= w_{i+1}h_i^2u^3 + w_{i+1}h_i^2v^3 + \left(\frac{y_{i+1}}{h_i}-w_{i+1}h_i\right)h_iu + \left(\frac{y_i}{h_i}-w_ih_i\right)h_iv\\
p_i(x) &= uy_{i+1} + vy_i + w_{i+1}h_i^2u^3 - w_{i+1}h_i^2u + w_ih_i^2v^3 - w_ih_iv\\
p_i(x) &= uy_{i+1} + vy_i + h_i^2\left[(u^3-u)w_{i+1} + (v^3-v)w_i\right]
\end{aligned}
\tag{3.61}
$$

ทำการดิพเพอรเรลเรียลฟังก์ชัน $p_i(x)$ โดยใช้กฎลูกโซ่ และใช้ค่า $w'=\frac{1}{h_i}$ และ $v'=\frac{-1}{h_i}$ ทำให้ได้สมการ

$$
p_i'(x)=\frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}+h_i\left[(3u^2-1)w_{i+1}-(3v^2-1)w_i\right] \tag{3.62}
$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 ค่าความชันของ $p'_{i-1}(t_i)$ จะมีค่าเท่ากับค่าความชันของ $p_i'(t_i)$ จากความสัมพันธ์นี้เราสามารถนำค่าสมการเพื่อจัดอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้

$$p_i'(t_i) = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - h_i w_{i+1} - 2w_i \tag{3.63}$$

กำหนดให้ $b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i}$ จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$p_i'(t_i) = b_i - h_i(w_{i+1} + 2w_i)$$

$$p_{i-1}'(t_i) = \frac{y_i - y_{i+1}}{h_{i+1}} - h_{i+1}(2w_i + w_{i-1}) \tag{3.64}$$

$$p_{i-1}'(t_i) = b_{i-1} + h_{i-1}(2w_i + w_{i-1})$$

เนื่องจาก $p_{i-1}'(t_i) = p_i'(t_i)$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} b_{i-1} + h_{i-1}(2w_i + w_{i-1}) &= b_i - h_i(w_{i+1} + 2w_i) \\ h_{i-1}w_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)w_i + h_i w_{i+1} &= b_i - b_{i-1} \end{aligned} \tag{3.65}$$

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของจุดเริ่มต้นและจุดปลายของเส้นนั้น ทำได้โดยการกำหนดค่า $c_1(x)$ และ $c_n(x)$ ซึ่งค่าทั้งสองนี้เปรียบเหมือนเส้นโค้งกำลังสามที่ผ่านข้อมูลสี่จุดแรกและข้อมูลสี่จุดสุดท้ายและเงื่อนไขขอบเขตทั้งสองปลายนั้น เป็นเสมือนอนุพันธ์อันดับที่ 3 ของฟังก์ชัน $p(x)$

$$p'''(t_1) = c_1'''$$

และ

$$p'''(t_n) = c_n''' \tag{3.66}$$

จากค่าคงที่ c_1''' และ c_n''' สามารถกำหนดได้โดยการจากข้อมูลของ $c_1(t)$ และ $c_n(t)$

$$\Delta i = \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i} \tag{3.67}$$

สำหรับค่าประมาณของอนุพันธ์อันดับที่1 กำหนดโดย

$$\Delta^2{}_i = \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{t_{i+2} - t_i}$$

และ

$$\Delta^3{}_i = \frac{\Delta^2{}_{i+1} - \Delta_i}{t_{i+3} - t_i} \tag{3.68}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปริมาณเราทราบได้จากการแบ่งส่วนที่แตกต่างได้ $2\Delta_i^2$ และ $6\Delta_i^3$ เมื่อนำไปเทียบค่ากับอนุพันธ์อันดับที่สาม แสดงได้ดังนี้

$$c_1''' = 6\Delta_1^3 \tag{3.69}$$

และ

$$c_n''' = 6\Delta_{n-3}^3 \tag{3.70}$$

สามารถนำมาเขียนในรูปของ

$$\frac{w_2 - w_1}{h_1} = \Delta^3{}_1 \tag{3.71}$$

$$\frac{w_n - w_{n-1}}{h_{n-1}} = \Delta^3{}_{n-3} \tag{3.72}$$

$$\Delta^3{}_1 = \frac{\Delta_2^2 - \Delta_1^2}{t_4 - t_1} = \frac{\dfrac{\Delta_3 - \Delta_2}{t_4 - t_2} - \dfrac{\Delta_2 - \Delta_1}{t_3 - t_1}}{t_4 - t_1} \tag{3.73}$$

จัดรูปใหม่ ดังนี้

$$\Delta^3{}_1 = \frac{\dfrac{\dfrac{y_4 - y_3}{t_4 - t_3} - \dfrac{y_3 - y_2}{t_3 - t_2}}{t_4 - t_2} - \dfrac{\dfrac{y_3 - y_2}{t_3 - t_2} - \dfrac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}}{t_3 - t_1}}{t_4 - t_1}$$

$$\Delta^3{}_{n-3} = \frac{\Delta^2{}_{n-2} - \Delta^2{}_{n-3}}{t_n - t_{n-3}} = \frac{\dfrac{\Delta_{n-1} - \Delta_{n-2}}{t_n - t_{n-2}} - \dfrac{\Delta_{n-2} - \Delta_{n-3}}{t_{n-2} - t_{n-3}}}{t_n - t_{n-3}}$$

$$\Delta^3{}_{n-3} = \frac{\left(\dfrac{\dfrac{y_n - y_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} - \dfrac{y_{n-1} - y_{n-2}}{t_{n-1} - t_{n-2}}}{t_n - t_{n-2}}\right) - \left(\dfrac{\dfrac{y_{n-1} - y_{n-2}}{t_{n-1} - t_{n-2}} - \dfrac{y_{n-2} - y_{n-3}}{x_{n-2} - x_{n-3}}}{t_{n-2} - x_{n-3}}\right)}{t_n - t_{n-3}} \tag{3.74}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้เราสามารถกำหนดระบบสมการ

(จุดเริ่มต้น) $$-h_1 w_1 + h_1 w_2 = h^2{}_1 \Delta^3{}_1$$

$$h_{i-1} w_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i) w_i + h_i w_{i+1} = b_i - b_{i-1}$$

(จุดสุดท้าย) $$\mathrm{h}_{n-1} \mathrm{w}_{n-1} \mathrm{h}_{n-1} \mathrm{w}_n = -\mathrm{h}^2{}_{n-1} \Delta^3{}_{n-3}$$

จากการแทนค่า $i = 1,2,\ldots,n-1$ จะได้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} -h_1 & h_1 & 0 & 0 & \\ h_1 & 2(h_1+h_2) & h_2 & 0 & \\ & h_2 & 2(h_2+h_3) & h_3 & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & h_{n-2} & 2(h_{n-2}+h_{n-1}) & h_{n-1} \\ & & 0 & h_{n-1} & -h_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_{n-1} \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^2 \Delta_1^3 \\ b_2 - b_1 \\ b_3 - b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n-1} - b_{n-2} \\ -h^2{}_{n-1} \Delta^3{}_{n-3} \end{bmatrix} \tag{3.75}$$

สำหรับระบบสมการที่เขียนในรูปของเมตริกซ์นี้มีจำนวนสมการเท่ากับ n สมการซึ่งสามารถหาค่า w โดยการวิธีกำจัดค่า (Elimination) แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์มีคุณสมบัติพิเศษหลายข้อคือ

6.1 เมตริกซ์เป็นแบบเชิงทแยงมุม (Tridiagonal matrix)

6.2 เมตริกซ์สมมาตร (Symmetric matrix)

6.3 สำหรับทุก ๆ ค่าของ $t_1 < t_2 < \ldots < t_n$ เมตริกซ์อยู่ในรูปนอนซิงกูลาร์ เมตริกซ์ (Non singular matrix) และจากคุณสมบัติของเมตริซ์นี้เราสามารถคำนวณหาค่าตัวแปร w ได้โดยการใช้ระเบียบวิธีการจำกัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) โดยไม่ต้องทำการปรับปรุงค่าโดยการจัดสเกล (Scaling) และการกำหนดจุดหมุน (Pivoting) และจากการประยุกต์วิธีการจำกัดแบบเกาส์ทำให้เมตริกซ์ลดรูปเป็น

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & h_1 & & & \\ & \alpha_2 & h_2 & & \\ & & \alpha_3 & h_3 & \\ & & \cdot & \cdot & \\ & & & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot \\ & & & & \alpha_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_n \end{bmatrix} \tag{3.76}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สมาชิกในแนวทแยงมุม (Diagonal elements) α_i หาค่าได้โดย

$$\alpha_1 = -h_1$$
$$\alpha_i = 2(h_{i-1} + h_i) - \frac{h_{i-1}^2}{\alpha_{i-1}} \;, i = 2,3...,n-1 \tag{3.77}$$
$$\alpha_n = -h_{n-1} - \frac{h_{n-1}^2}{\alpha_{n-1}}$$

และส่วนที่ไม่เป็นเอกพันธ์ (Inhomogeneous elements) β_i หาค่าได้โดย

$$\beta_1 = h_1^2 \Delta_1^3$$
$$\beta_i = (b_i - b_{i-1}) - \frac{h_{i-1}\beta_{i-1}}{\alpha_{i-1}} \;, i = 2,3,...,n-1 \tag{3.78}$$
$$\beta_n = -h_{n-1}^2 \Delta_{n-1}^3 - h_{n-1}\frac{\beta_{n-1}}{\alpha_{n-1}}$$

โดยการแทนค่าย้อนกลับ (Back substitution) ทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ w_i คือ

$$w_i = \frac{\beta_i - h_i w_{i+1}}{\alpha_i} \;, i = n-1, n-2,...,1$$
$$w_n = \frac{\beta_n}{\alpha_n} \tag{3.79}$$

จากสมการที่ (3.60) นั้นพบว่าไม่เหมาะสำหรับรูปแบบของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เนื่องจากต้องคำนวณค่าหลาย ๆ ครั้ง เราจึงต้องทำการจัดเรียงเทอมของสมการใหม่ เพื่อให้สามารถคำนวณผลลู่เข้าหาค่าที่ต้องการคำนวณได้รวดเร็วนั้น โดยการคำนวณและจัดเก็บค่าที่แท้จริงของสัมประสิทธ์เส้นโค้งกำลังสาม B_i, C_i และ D_i โดยที่ $i = 1,2,...,n-1$ สำหรับช่วง (t_i, t_{i+1}) ดังนั้นสมการที่ (3.60) จะเปลี่ยนรูปเป็น

$$P_i(x) = A_i + B_i(x - t_i) + C_i(x - t_i)^2 + D_i(x - t_i)^3 \tag{3.80}$$

จากรูปแบบสมการที่ได้พบว่าสามารถจัดเข้าอยู่ในรูปของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) กล่าวคือ สำหรับฟังก์ชั่น f (x)เป็นฟังก์ชั่นที่หาอนุพันธ์ได้ทุกอันดับ ณ ที่จุด $x = a$ จะอยู่ในรูปของ

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + ... + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n + ... \tag{3.81}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถกำหนดค่า A_i, B_i, C_i และ D_i โดยพิจารณาเป็นอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ของจุด t_i ดังนั้น

$$\begin{aligned} A_i &= P_i(t_i) \\ B_i &= P_i'(t_i) \\ C_i &= \frac{1}{2}P''(t_i) \\ D_i &= \frac{1}{6}P'''(t_i) \end{aligned} \tag{3.82}$$

เนื่องจากเรากำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ $P_i(t_i) = y_i$ ดังนั้น

$$A_i = y_i \tag{3.83}$$

และค่า $P''(t_i) = Z_i$ ดังนั้น

$$C_i = \frac{Z_i}{2} \tag{3.84}$$

เนื่องจาก $Z_i = 6w_i$ ดังนั้น

$$C_i = 3w_i \tag{3.85}$$

พิจารณาหาค่า D_i โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ที่ค่า x^3 ในสมการที่ x เป็นค่าของเทอมของ D_i และนำไปเปรียบเทียบค่า x^3 ของสมการที่ (3.60) คือ $(z_{i+1} - z_i)/6h_i$ ดังนั้นจึงหาค่า D_i ได้จากสมการ

$$D_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{6h_i} \tag{3.86}$$

เนื่องจาก $z_{i+1} = 6w_{i+1}$ และ $z_i = 6w$ ดังนั้นเราสามารถกำหนดว่าค่า D_i ในเทอมของ w_{i+1} และ w_i ได้ดังนี้

$$D_i = \frac{w_{i+1} - w_i}{h_i} \tag{3.87}$$

สำหรับค่า B_i นั้นเราสามารถหาค่าได้จากหาอนุพันธ์อันดับ 1 ของสมการที่ 3.60 ที่จุด t_i ดังนี้

$$P_i'(x) = \frac{z_{i+1}}{2h_i}(x - t_i)^2 - \frac{z_i}{2h_i}(t_{i+1} - x)^2 + \frac{y_{i+1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}z_{i+1} - \frac{y_i}{h_i} + \frac{h_i z_i}{6} \tag{3.88}$$

ที่จุด t_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_i = \frac{-h_i}{6} z_{i+1} - \frac{h_i}{3} z_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \tag{3.89}$$

แทนค่า $z_{i+1} = 6w_{i+1}$ และ $z_i = 6w$ จะได้สมการ B_i ดังนี้

$$B_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - h_i\left(w_{i+1} + 2w_i\right) \tag{3.90}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทำโปรแกรมแบบพารามิเตอร์

4.1 การทำโปรแกรมแบบพารามิเตอร์บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคล

จากการที่คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสามารถนำมาใช้ในการสร้างโปรแกรมชิ้นงานสำหรับเครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลข (NC) โปรแกรมชิ้นงานที่สร้างขึ้นบนPC นี้ สามารถทำออกมาได้ทั้งในลักษณะของรหัสระบบควบคุมเชิงตัวเลข (NC Code) หรือของรหัสระบบควบคุมเชิงตัวเลขแบบพารามิเตอร์ (Parametrical NC Code) ในกรณีของรหัสควบคุมเชิงตัวเลขแบบปกติทั่วไป ผู้โปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมบน PC แบบเชิงโต้ตอบด้วยภาษาที่ใช้กับเครื่อง PC โปรแกรมนี้จะสร้างโปรแกรมชิ้นงานNCนี้ตามข้อมูลของชิ้นงานที่ป้อนเข้าไป โปรแกรมลักษณะนี้จะถูกกระทำขึ้นเพื่อใช้ทำงานเฉพาะอย่างที่ซับซ้อน โดยเฉพาะในกรณีที่รัศมีบนขอบในระนาบ XZ, XY และ YZ ไม่คงที่ โปรแกรมสำเร็จทางด้าน CAM แบบ 2D ไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินมีดตัด (Toolpath) ของชิ้นงานที่มีปัญหาเหล่านี้ได้ถึงแม้ว่างานในลักษณะนี้มิใช่งานในลักษณะที่ต้องทำการประมาณค่าระบบสามมิติ (3D interpolation) แต่ในทางปฏิบัติผู้ทำงานมักจะต้องแก้ปัญหาโดยการนำโปรแกรมสำเร็จทางด้าน CAMแบบ 3D ที่มีราคาสูงมากมาใช้งาน ลักษณะงานเช่นนี้เราอาจนำปัญหาต่างๆ มาทำการวิเคราะห์อย่างละเอียด และทำการโปรแกรมแบบเชิงโต้ตอบด้วยโปรแกรมภาษาคอมพิวเตอร์บน PC ได้ตัวอย่างเช่น การใช้โปรแกรมภาษาเบสิครุ่นต่างๆ (GWBASIC, QBASIC, ฯลฯ) นำมาเขียนโปรแกรมแบบเชิงโต้ตอบที่สร้างรหัสสำหรับหน่วยควบคุมของเครื่องควบคุมเชิงตัวเลข ตัวอย่างการทำงานนี้ยังจัดว่าเป็นการทำงานในลักษณะหนึ่งโปรแกรมต่อหนึ่งชิ้นงาน (one program one part) อยู่

การประยุกต์ใช้งานที่นิยมทำกันมากอีกกรณีหนึ่งคือ ผู้โปรแกรมจะสร้างโปรแกรมแบบพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมในระดับหน่วยควบคุมของเครื่องจักร CNC และทำการเขียนโปรแกรมแบบเชิงโต้ตอบสำหรับการนี้โดยอาศัยโปรแกรมภาษาในระดับ PC เพื่อสร้างแฟ้มข้อมูลที่สามารถรองรับโปรแกรมแบบพารามิเตอร์ในหน่วยควบคุมของเครื่องจักร CNC แฟ้มข้อมูลเหล่านี้สามารถส่งต่อไปยังหน่วยควบคุมของ CNC ในรูปของโปรแกรมชิ้นงาน NC โปรแกรมข้อมูลนี้จะประกอบด้วยข้อมูลของชิ้นงานสำหรับการโปรแกรมชิ้นงานบนหน่วยควบคุมของเครื่องจักร CNC โปรแกรมชิ้นงานจะประกอบด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ของมีดตัด และปฏิบัติการต่างๆ ของมีดตัด แฟ้มข้อมูลในการนี้เป็นทางเดินมีดตัดจะถูกคำนวณด้วยตัวของหน่วยควบคุมเอง กรรมวิธีแบบนี้จะถูกจัดว่าเป็นการทำงานในลักษณะหนึ่งโปรแกรมต่อชิ้นงานหนึ่งตระกูล (one program one family)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 เป้าหมายของโปรแกรม

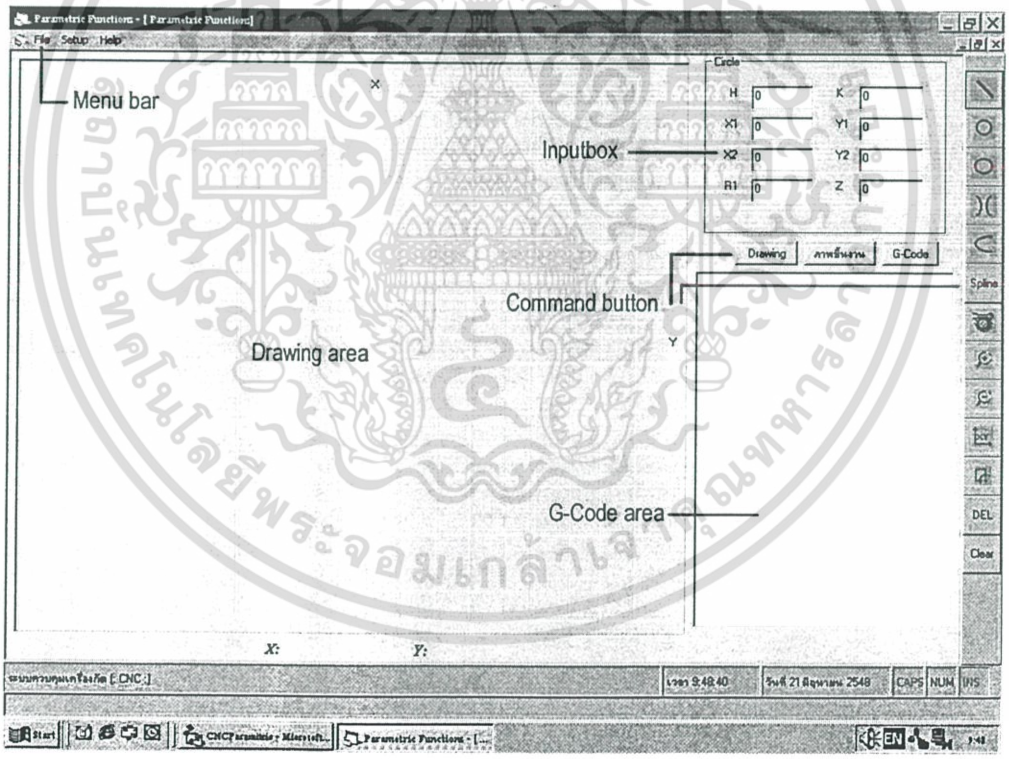
4.1.1.1 เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบชิ้นงานชนิด 2 แกน คือ แกน x และแกน y โดยสามารถกำหนดค่าความลึก (แกนz) คงที่ โดยมีเครื่องมือพื้นฐานทางเรขาคณิตในการออกแบบอันได้แก่ เส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า ไฮเพอร์โบล่า สไปลน์ และมีคำสั่งพิเศษใช้ในการเขียนเฟืองตรงแบบโมดุล

4.1.1.2 เป็นโปรแกรมที่เปลี่ยนข้อมูลที่ป้อนเข้าสำหรับออกแบบชิ้นงาน ให้เป็นรหัส G-code ให้สามารถทำงานร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซี

4.1.1.3 สามารถทำงานได้บนบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคล (Personal computer) ได้ทุกรุ่นโดยไม่ต้องดัดแปลงส่วนประกอบใดๆ

4.1.2 การใช้งานของโปรแกรม

เมื่อทำการเปิดโปรแกรมจากไฟล์ ProCNC.exe จะพบเมนูหลักของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่พื้นที่ใช้งานของโปรแกรมที่ถูกแสดงบนจอภาพ แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบหลักของโปรแกรม

4.1.2.1 เมนูบาร์ (Menu bar) และแถบเครื่องมือหลัก ซึ่งแสดงปุ่มไอคอน (icon) ที่เป็นตัวเรียกคำสั่ง เส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า ไฮเพอร์โบล่า สไปลน์ และเฟืองตรง มาใช้งานเมื่อเราคลิก (click) ที่ปุ่มไอคอนจะเกิดกล่องป้อนข้อมูล (Input box) ขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 กล่องป้อนข้อมูล (Input box) เป็นกล่องที่ถูกเขียนขึ้นมาเพื่อให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าพิกัดที่จำเป็นในการเขียนคำสั่ง เส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า ไฮเพอร์โบล่า สไปลน์ และเฟืองตรง

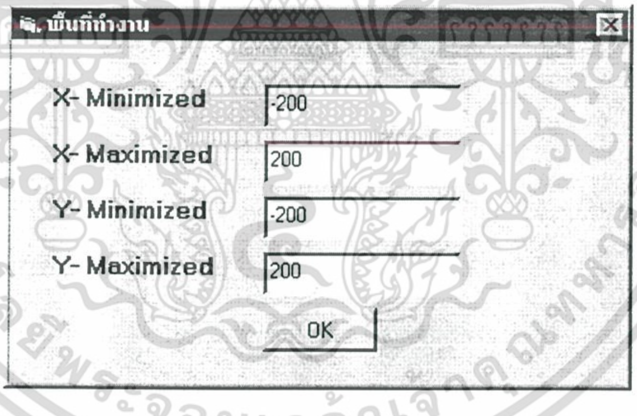
4.1.2.3 พื้นที่แสดงรูปชิ้นงาน (Drawing area) พื้นที่บริเวณนี้เป็นพื้นที่สำหรับใช้แสดงรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการป้อนค่าผ่านกล่องข้อมูล (Input box) ซึ่งพื้นที่นี้เปรียบเสมือนกระดาษเขียนแบบที่แสดงภาพชิ้นงานที่ได้จากคำสั่งต่างๆที่มีให้เลือกใช้ในโปรแกรม

4.1.2.4 พื้นที่แสดงค่าG-Code (G-Code area) พื้นที่บริเวณนี้เป็นพื้นที่แสดงค่า G-codeที่ได้จากคำสั่งที่ผู้ใช้ป้อนค่าเข้าไป และค่า G-code ที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นคำสั่งให้เครื่องกัด CNC ทำงาน

4.1.3 การทำงานของชุดคำสั่งของโปรแกรม

ในการใช้โปรแกรมภาษาVisual Basic มาสร้างโปรแกรมชิ้นงานCNCแบบเชิงโต้ตอบนั้น สามารถนำมาเขียนเป็นโฟลชาร์ตได้ดังรูปที่ ซึ่งมีขั้นตอนรายละเอียดดังนี้

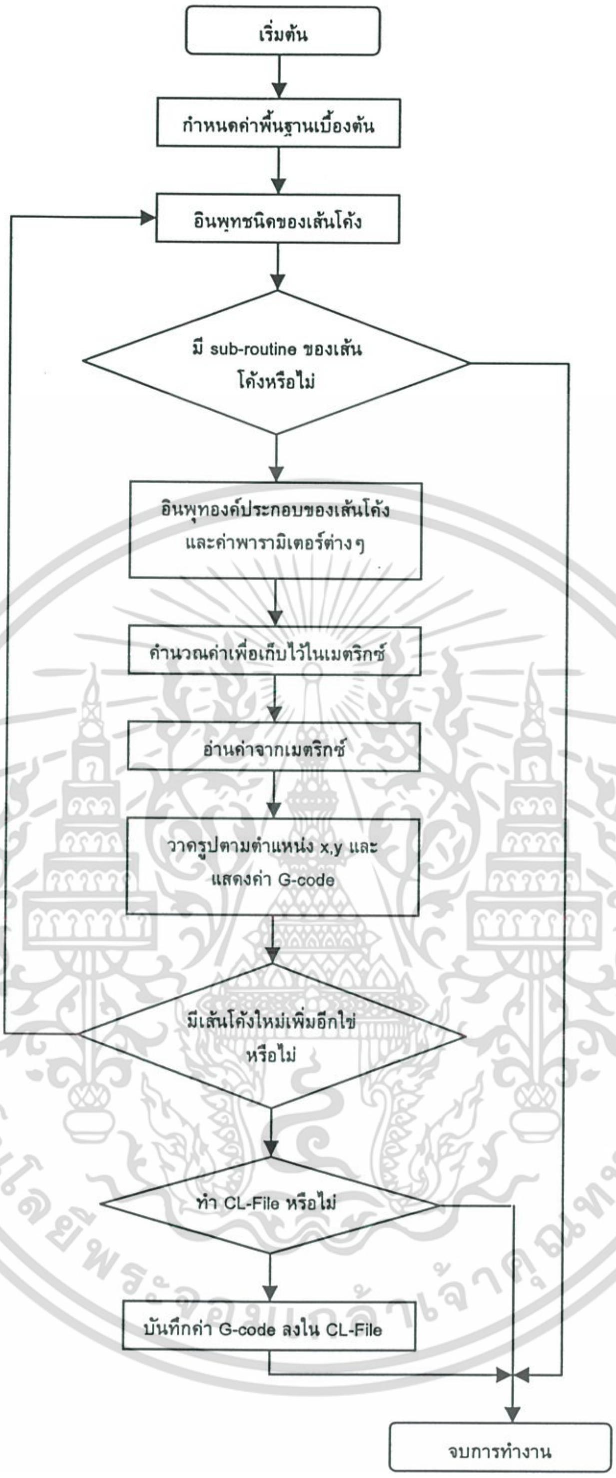
4.1.3.1 กำหนดค่าพื้นฐานเบื้องต้น ได้แก่ การกำหนดพื้นที่วาดรูป โดยกำหนดให้สามารถแสดงรูปทั้งหมดได้ในขอบเขต ซึ่งผู้ที่ใช้งานจะเป็นผู้ที่ป้อนค่าเข้าไป



รูปที่ 4.2 แสดงกรอบกำหนดขอบเขตพื้นที่วาดรูป

4.1.3.2 รับเงื่อนไขการวาดรูป ซึ่งในที่นี้แบ่งออกได้เป็น คำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า ไฮเพอร์โบล่า สไปลน์ และเฟืองตรง และรับค่าตัวแปร สำหรับโปรแกรมนี้ได้ออกแบบให้มีแถบเครื่องมือ ที่มีคำสังต่างๆ อำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ใช้ ผู้ใช้สารมารถใช้คำสั่งเหล่านี้ได้โดยใช้เมาส์คลิกไปที่ปุ่มไอคอน (icon) ซึ่งมีรายละเอียดของคำสั่งต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงโฟลชาร์ตของการตรวจแก้ข้อมูล

1. เส้นตรง (Line) เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับเขียนเส้นตรงโดยเป็นการเชื่อมระหว่างจุดสองจุด โดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

x_1 คือจุดเริ่มต้นของเส้นตรง ในพิกัดแกน x

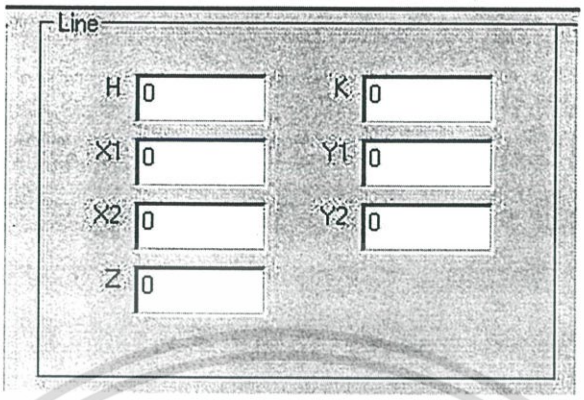
y_1 คือจุดเริ่มต้นของเส้นตรง ในพิกัดแกน y

x_2 คือจุดสุดท้ายของเส้นตรง ในพิกัดแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y_2 คือจุดสุดท้ายของเส้นตรง ในพิกัดแกน y

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)



รูปที่ 4.4 แสดงกล่องรับข้อมูลของเส้นตรง

2. วงกลม(Circle) เป็นคำสั่งสำหรับเขียนรูปวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม โดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

h คือจุดกำเนิด ของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม ในพิกัดแกน x

k คือจุดกำเนิด ของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม ในพิกัดแกน y

x_1 คือจุดเริ่มต้นของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม ในพิกัดแกน x

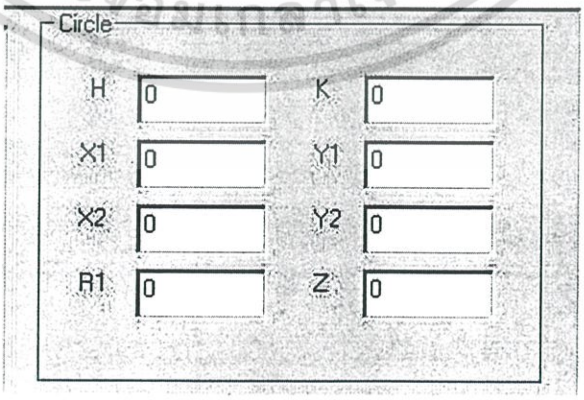
y_1 คือจุดเริ่มต้นของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม ในพิกัดแกน y

x_2 คือจุดสุดท้ายของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม ในพิกัดแกน x

y_2 คือจุดสุดท้ายของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม ในพิกัดแกน y

R_1 คือรัศมีของวงกลมหรือส่วนโค้งของวงกลม

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)



รูปที่ 4.5 แสดงกล่องรับข้อมูลของวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วงรี(Ellipse) เป็นคำสั่งสำหรับเขียนรูปวงรีโดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

h คือจุดกำเนิด ของวงรี ในพิกัดแกน x

k คือจุดกำเนิด ของวงรี ในพิกัดแกน y

x_1 คือจุดเริ่มต้นของวงรี ในพิกัดแกน x

y_1 คือจุดเริ่มต้นของวงรี ในพิกัดแกน y

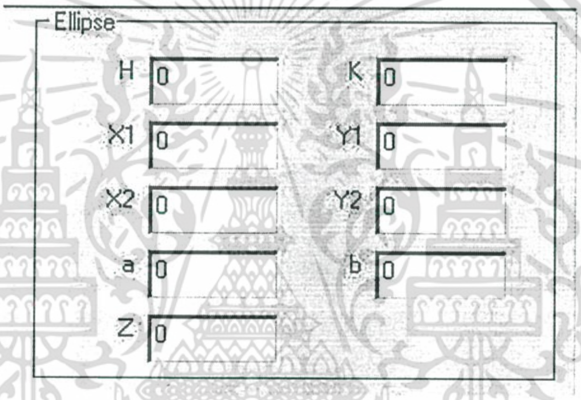
x_2 คือจุดสุดท้ายของวงรี ในพิกัดแกน x

y_2 คือจุดสุดท้ายของวงรี ในพิกัดแกน y

R_1 คือรัศมีของวงรี ในพิกัดแกน x

R_2 คือรัศมีของวงรี ในพิกัดแกน y

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)



รูปที่ 4.6 แสดงกล่องรับข้อมูลของวงรี

4. พาราโบล่า(Parabola)เป็นคำสั่งสำหรับเขียนรูปพาราโบล่าโดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

h คือจุดกำเนิด ของพาราโบล่า ในพิกัดแกน x

k คือจุดกำเนิด ของพาราโบล่า ในพิกัดแกน y

x_1 คือจุดเริ่มต้นของพาราโบล่า ในพิกัดแกน x

y_1 คือจุดเริ่มต้นของพาราโบล่าในพิกัดแกน y

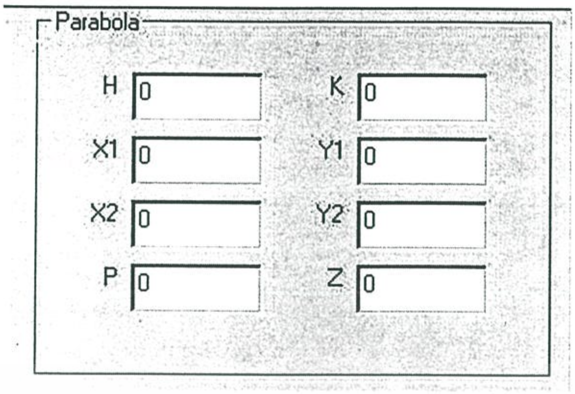
x_2 คือจุดสุดท้ายของพาราโบล่า ในพิกัดแกน x

y_2 คือจุดสุดท้ายของพาราโบล่า ในพิกัดแกน y

P คือของพาราโบล่า

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงกล่องรับข้อมูลของพาราโบล่า

5. ไฮเพอร์โบล่า(Hyperbola)เป็นคำสั่งสำหรับเขียนรูปไฮเพอร์โบล่าโดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

h คือจุดกำเนิด ของไฮเพอร์โบล่า ในพิกัดแกน x

k คือจุดกำเนิด ของไฮเพอร์โบล่า ในพิกัดแกน y

x_1 คือจุดเริ่มต้นของไฮเพอร์โบล่าในพิกัดแกน x

y_1 คือจุดเริ่มต้นของไฮเพอร์โบล่าในพิกัดแกน y

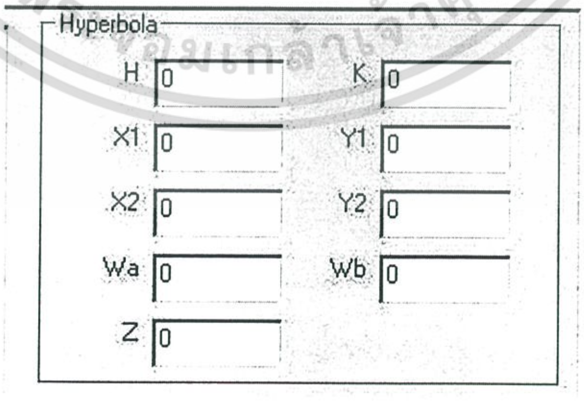
x_2 คือจุดสุดท้ายของไฮเพอร์โบล่าในพิกัดแกน x

y_2 คือจุดสุดท้ายของไฮเพอร์โบล่า ในพิกัดแกน y

W_a คือของไฮเพอร์โบล่า ในพิกัดแกน x

W_b คือของไฮเพอร์โบล่า ในพิกัดแกน y

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)



รูปที่ 4.8 แสดงกล่องรับข้อมูลของไฮเพอร์โบล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

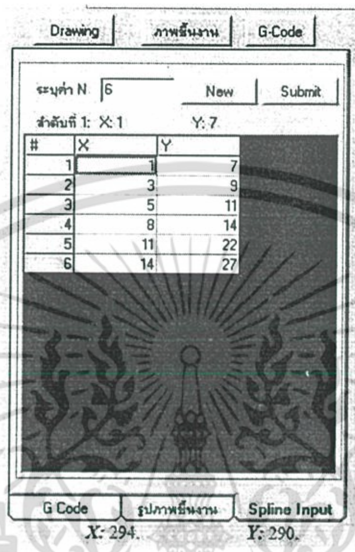
6. สไปลน์ (Spline) เป็นคำสั่งสำหรับเขียนรูปสไปลน์โดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

n คือจำนวนข้อมูล

x_1- x_n คือค่าลำดับพิกัดแกน x

y_1- y_n คือค่าลำดับพิกัดแกน y

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)



#	X	Y
1	1	7
2	3	9
3	5	11
4	8	14
5	11	22
6	14	27

รูปที่ 4.9 แสดงกล่องรับข้อมูลของสไปลน์

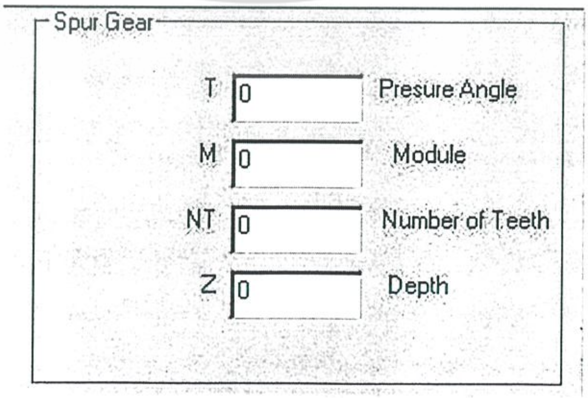
7. เฟืองตรง(Spur gear) เป็นคำสั่งสำหรับเขียนรูปเฟืองตรงโดยมีข้อมูลป้อนเข้า ดังนี้

T คือค่ามุมกดดัน(Pressure angle) ของฟันเฟือง

M คือค่าโมดุล(Module)ของเฟืองตรง

NT คือจำนวนฟันเฟือง(Number of teeth)

Z คือค่าความลึกของชิ้นงานที่ต้องการกัด(โดยปกติระบุค่าเป็นลบ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.10 แสดงกล่องรับข้อมูลของเฟืองตรง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าเมตริกซ์ [X] , [Y] แล้วทำการตรวจสอบสถานะว่ามีการเปิดไฟล์งานเพื่อบันทึกค่าG-Code หรือไม่ ถ้ายังโปรแกรมก็จะมีกล่องข้อความให้กรอกชื่อไฟล์งาน หลังจากนั้นก็จะทำการอ่านค่าเมตริกซ์ที่ได้จากการคำนวณ

4.1.3.3 แสดงรูปภาพที่ได้จากข้อมูลป้อนเข้า และแสดงG-Code ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลแสดงออกไปยังหน้าจอของโปรแกรม

4.1.3.4 ตรวจรับคำสั่งเขียนเส้นเพิ่มเติม ถ้ามีก็ทำซ้ำโดยเริ่มจากขั้นตอนที่1-3 ถ้าไม่มีคำสั่งโปรแกรมจะสอบถามต้องการบันทึกค่า CL-File หรือไม่ก่อนจะออกจากโปรแกรม

หลังจากจบขั้นตอนการป้อนข้อมูลทั้งหมดของโปรแกรมแล้วสามารถนำไฟล์งานที่บันทึกค่าG-Code มาตรวจสอบหรือปรับปรุงเพิ่มเติมได้ด้วยโปรแกรม"Note pad"ซึ่งสามารถส่งถ่ายไปยังเครื่องจักรCNC เพื่อทำการผลิตชิ้นงานต่อไป

4.2 การออกแบบคำสั่งโปรแกรมเฟืองตรง [9]

4.2.1 ส่วนประกอบของเฟืองตรง

วงกลมพิตช์ (Pitch Circle) d คือวงกลมทางทฤษฎีซึ่งในการคำนวณคู่เฟืองที่ขบกันเส้นวงกลมพิตช์จะสัมผัสกัน และเฟืองสองตัวที่ขบกันเฟืองตัวเล็กกว่าจะเรียกว่า พิเนียน (Pinion) และเฟืองตัวที่ใหญ่กว่าจะถูกเรียกว่าเฟือง (gear)

พิตช์ในแนวเส้นรอบวง (Circular pitch) p เป็นระยะทางที่วัดจากจุดหนึ่งบนวงกลมพิตช์ของฟันเฟืองหนึ่งไปยังตำแหน่งเดียวกันของฟันเฟืองถัดไป มีค่าเท่ากับความหนาของฟัน (tooth thickness) บวกความกว้างของรองฟัน (width of space)

โมดุล (Module) m เป็นดัชนีขนาดของฟันเฟืองในระบบ SI ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ (Pitch diameter) ต่อจำนวนฟัน (Number of teeth) เฟืองคู่ที่ขบกันจะต้องเป็นเฟืองที่ขนาดโมดุลเดียวกัน เฟืองที่มีโมดุลมากจะมีขนาดฟันใหญ่ เฟืองที่มีโมดุลน้อยจะมีขนาดฟันเล็ก

อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำหนดขนาดของฟันเฟือง ที่ใช้ระบบหน่วยวัดเป็นนิ้ว ซึ่งนิยมใช้กันมากในแถบอเมริกา และยุโรป ฟันเฟืองจะถูกกำหนดเป็น ไดมิทรัลพิตช์ (Diametral pitch) DP คือใช้จำนวนฟันต่อความยาวหนึ่งนิ้วของเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ (Pitch diameter) ซึ่งเป็นส่วนกลับของโมดุล

ช่วงสูงบนของฟัน (Addendum) a เป็นระยะทางที่วัดในแนวรัศมีวัดระหว่างปลายฟัน (Top land) ถึงวงกลมพิตช์ (Pitch circle)

ช่วงสูงล่างของฟัน (dedendum) b เป็นระยะทางที่วัดในแนวรัศมีระหว่างจากโคนฟัน (Botton land) ถึงวงกลมพิตช์ (Pitch circle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลึกทั้งหมดของร่องฟัน (Whole depth) เป็นผลรวมของช่วงสูงบนฟัน (Addendum) กับช่วงสูงล่างของฟัน (dedendum)

วงกลมช่องว่าง (Clearance circle) เป็นวงกลมที่สัมผัสกับวงกลมแอดเดนดัมของเฟืองคู่ที่ขบกัน

ช่องว่าง (Clearance) C เป็นช่องว่างที่เกิดจากผลต่างของระยะช่วงระยะสูงล่าง b กับระยะช่วงสูงบน a ของเฟืองคู่ที่ขบกัน

ความหลวม (blacklash) เป็นระยะที่ช่องว่างระหว่างฟัน (Tooth space) มีค่ามากกว่าความหนาของฟันเฟือง (Tooth thickness) ที่มาขบกันโดยวัดตามแนววงกลมพิตช์

วงกลมฐาน (Base circle) เป็นวงกลมที่ทำให้เกิดส่วนโค้งของฟันเฟือง และเป็นวงกลมที่สัมผัสกับแนวกดดัน

รูปที่ 4.11 แสดงส่วนประกอบของเฟืองตรง

4.2.2 สูตรที่ใช้ในการเขียนแบบเฟืองตรง

จากการออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการเขียนแบบเฟืองตรง การโปรแกรมได้ออกแบบไว้ให้ผู้ใช้งานระบุถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ3ค่าที่จำเป็นจะต้องระบุ คือ โมดุล (Module,m) จำนวนฟันเฟือง(Number of teeth,N) มุมกดดัน(pressure angle,ϕ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3ค่าที่ถูกป้อนใน

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่องโต้ตอบ (Inputbox) ทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของส่วนประกอบต่างๆของเฟือง ดังนี้

พิตซ์ในแนวเส้นรอบวง (circular pitch)

$$p = m.\pi \tag{4.1}$$

วงกลมพิตซ์ (pitch circle)

$$d = m.N \tag{4.2}$$

ช่วงสูงบนของฟัน (addendum)

$$a = \frac{1}{p} \tag{4.3}$$

ช่วงสูงล่างฟัน (dedendum)

$$b = \frac{1.25}{p} \tag{4.4}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางยอดฟัน(outside diameter)

$$d_o = d + 2a \tag{4.5}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางโคนฟัน(root diameter)

$$d_r = d + 2b \tag{4.6}$$

วงกลมฐาน(base circle)

$$d_b = d\cos\phi \tag{4.7}$$

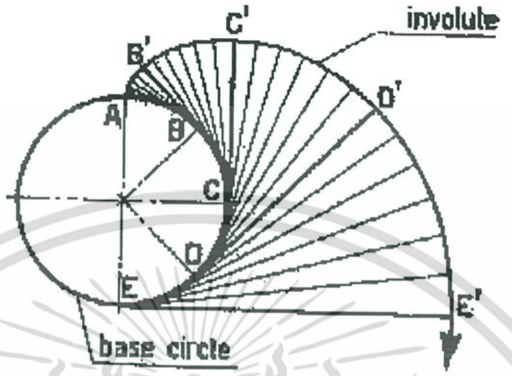
4.2.3 เส้นโค้งอินโวลูท (Involute Curve)และคุณสมบัติต่าง ๆ ของอินโวลูท(Involutes) [26], [29]

เนื่องจากเฟืองหนึ่งไปยังเฟืองคู่ที่ขบกันอย่างต่อเนื่อง และวิ่งได้เรียบมีเสียงดัง และเกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุดดังนั้นรูปทรงความโค้งของฟันเฟือง จะต้องเป็นรูปทรงเรขาคณิตในปัจจุบันนิยมใช้เป็นแบบเส้นโค้งอินโวลูท

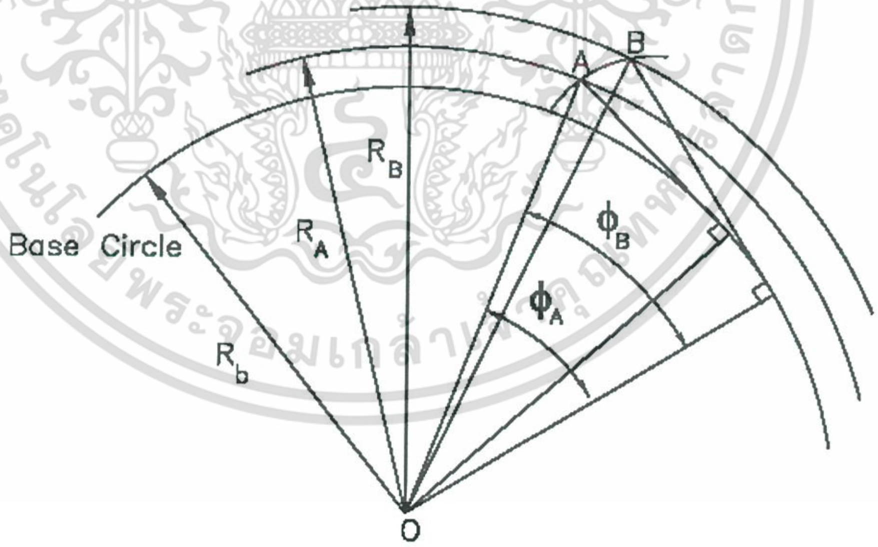
การเกิดลักษณะเส้นโค้งอินโวลูท พิจารณาจากรูปที่ 4.12 ถ้าใช้เชือกพันรอบรูปทรงกระบอก ซึ่งเส้นรอบวงของทรงกระบอกนั้นเปรียบเสมือนวงกลมฐาน (Base Circle) จากนั้นค่อยๆ คลายปลายเชือกนั้นออกโดยดึงเชือกนั้นไว้ให้ตึง แนวที่ปลายเชือกเคลื่อนที่ไปจะเกิดเป็นลักษณะส่วนโค้งสัมพันธ์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างจุด BB', CC', DD' และ EE' ซึ่งส่วนโค้งที่เกิดขึ้นนี้ เราเรียกว่า เส้นโค้งอินโวลูท (Involute Curve)



รูปที่ 4.12 แสดงการเกิดเส้นโค้งอินโวลูท



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของมุมกดดันบนจุดต่างๆของเส้นโค้งอินโวลูท

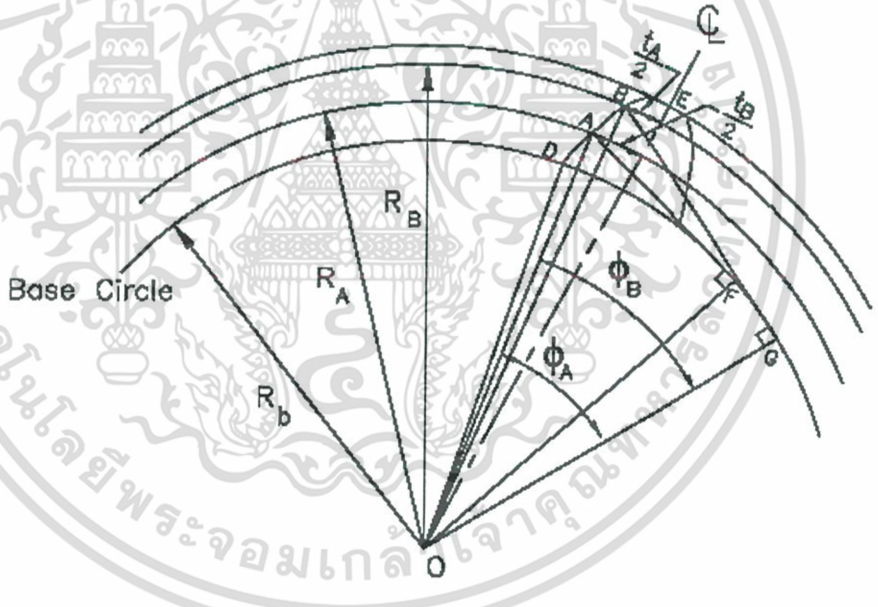
ในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงเส้นโค้งอินโวลูทซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากวงกลมฐาน (Base Circle) ที่มีรัศมี R_b กำหนดให้ A และ B เป็นจุด 2 จุดบนอินโวลูทโดยมีระยะรัศมีเป็น R_A และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_B รวมทั้งมุมกดดันอินโวลูท (Involute Pressure Angle) เป็น Φ_A และ Φ_B ตามลำดับ ความสัมพันธ์ต่าง ๆ มีดังนี้

$$\left.\begin{aligned} R_b &= R_A \cos\Phi_A \\ R_b &= R_B \cos\Phi_B \\ \cos\Phi_B &= \frac{R_A}{R_B}\cos\Phi_A \end{aligned}\right\} \qquad (4.8)$$

จะเห็นว่าสามารถใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (4.8) หาค่ามุมกดดันอินโวลูท(Involute Pressure Angle) ที่จุดใด ๆ บน อินโวลูท(Involute) ที่บอกระยะรัศมีมาให้โดยอาศัยคุณสมบัติของอีกจุดหนึ่ง



รูปที่ 4.14 เป็นรูปที่แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของฟันแบบอินโวลูท (Involute)

จากรายละเอียดในรูปที่ 4.12 ความหนาของฟันที่จุด B อาจจะหาได้ถ้ารู้ความหนาของฟันที่จุดอื่น ๆ เช่นจุด A โดยมีขั้นตอนดังนี้ จากหลักการของการสร้างอินโวลูท (Involute) ส่วนโค้ง DG จะเท่ากับความยาวของเส้นตรง BG ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left.\begin{aligned} \frac{DG}{OG} &= \frac{BG}{OG} \\ \tan\Phi_B &= \frac{BG}{OG} \\ D\hat{O}G = \therefore \quad D\hat{O}G &= \tan\Phi_B \\ D\hat{O}B &= D\hat{O}G - \Phi_B \\ &= \tan\Phi_A \end{aligned}\right\} \quad (4.9)$$

ในทำนองเดียวกัน $D\hat{O}A \quad = \quad \tan\Phi_A - \Phi_A$

$(\tan\Phi - \Phi)$ เรียกว่า อินโวลูทฟังก์ชั่น(Involute Function) และเขียนแทนด้วย $inv\ \Phi$ มุม Φ มีหน่วยเป็นเรเดียน ตารางที่ 4.1 เป็นค่า อินโวลูทฟังก์ชั่น(Involute Function) มีค่ามุมต่าง ๆ กัน

$$\left.\begin{aligned} DOE = DOB + \frac{0.5t_B}{R_B} &= inv\ \Phi_B + \frac{t_B}{2R_B} \\ DOE = DOA + \frac{0.5t_B}{R_A} &= inv\ \Phi_A + \frac{t_A}{2R_A} \end{aligned}\right\} \quad (4.10)$$

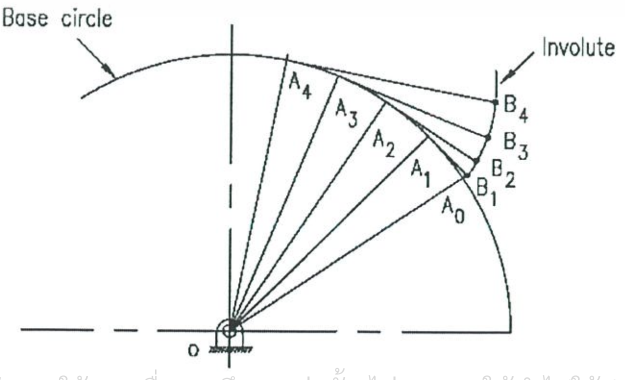
จากสมการ (4.10)

$$t_B = 2R_B\left[\frac{t_A}{2R_A} + inv\,\Phi_A - inv\,\Phi_B\right] \quad (4.11)$$

จากสมการ (4.11) จะเห็นว่าสามารถหาค่าความหนาของฟันที่จุดใด ๆ บน Involutes ก็ได้ ถ้ารู้ความหนาของฟันที่จุดอื่น

4.2.4 หลักการสร้างรูปโค้งอินโวลูทของฟันเฟือง

จากรูป 15 แสดงหลักการสร้างเส้นโค้งอินโวลูท เริ่มจากการแบ่งวงกลมฐานให้เป็นส่วนเท่า ๆ กัน และสร้างเส้นรัศมี (Radial Line) OA_0, OA_1, OA_2, OA_3 และ OA_4 ตามลำดับ ลากเส้นตั้งฉากสัมผัสผังวงกลมฐาน (Base circle) คือ A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 และ A_4B_4 โดยกำหนดให้มีความยาวเท่ากับ $A_1A_0, A_2A_0 A_3A_0$ และ A_4A_0 ดังนั้นจุดต่อที่เชื่อมระหว่าง A_0, B_1, B_2, B_3 และ B_4 จะเกิดเป็นเส้นโค้งอินโวลูท



รูปที่ 4.15 แสดงหลักการสร้างรูปโค้งอินโวลูทของฟันเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

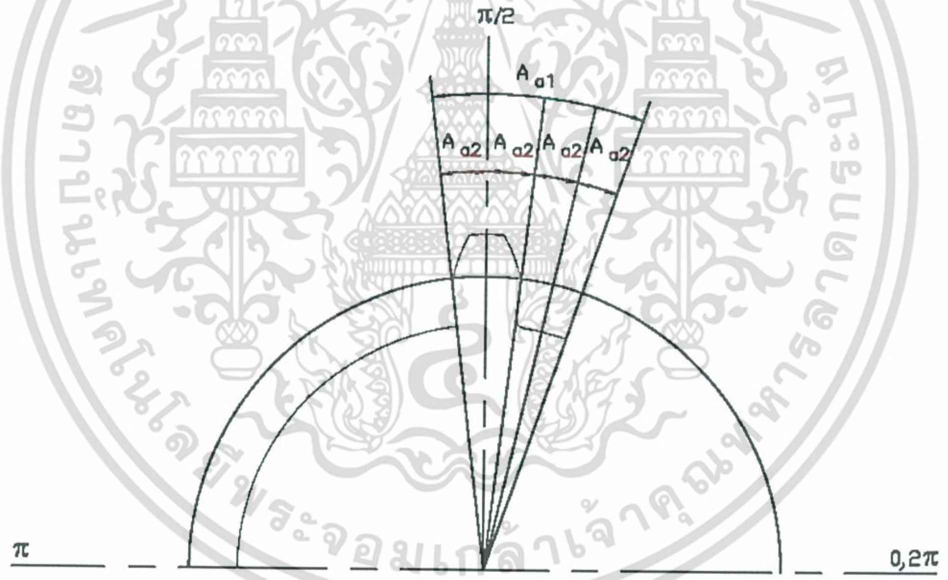
4.2.5 ขั้นตอนการแบ่งมุมสำหรับเขียนรูปฟันเฟืองตรง

4.2.5.1 กำหนดมุม Aa_1 ซึ่งเป็นมุมรวมของฟันเฟือง 1 ฟัน ซึ่งจะกำหนดได้จากมุม 360 องศา หารด้วยจำนวนฟันเฟืองทั้งหมด ตามสูตร $Aa_1 = \frac{360}{NT}$

4.2.5.2 แบ่งมุม Aa_1 เป็นสี่ส่วนเท่า ๆ กัน เพื่อแบ่งเป็นขอบเขตในการเขียนรูป ดังนี้

ส่วนที่ 1 และ 2 จะถูกกำหนดไว้สำหรับเขียนเส้นโค้งอินเวอลูท (Involute Curve) และพื้นที่ปลายพัน (Top Segment of the Tooth) ส่วนที่ 3 จะถูกกำหนดไว้สำหรับเขียนรัศมีฟิลเลต (Fillet Radius) ส่วนที่ 4 จะถูกกำหนดไว้สำหรับรัศมีโคนฟัน

4.2.5.3 การกำหนดจุดเริ่มสร้างเส้นโค้งอินเวอลูท (Involute Curve) โดยกำหนดมุม A_1 ซึ่งเกิดจากการกำหนดให้สร้างรูปภาพเริ่มจากควอแรนท์ที่2 โดยกำหนด $\frac{\pi}{2} + Aa_2$ เป็นจุดเริ่มสร้างเส้นโค้ง ณ จุดตัดของมุมกับวงกลมฐาน (Base Cirde)

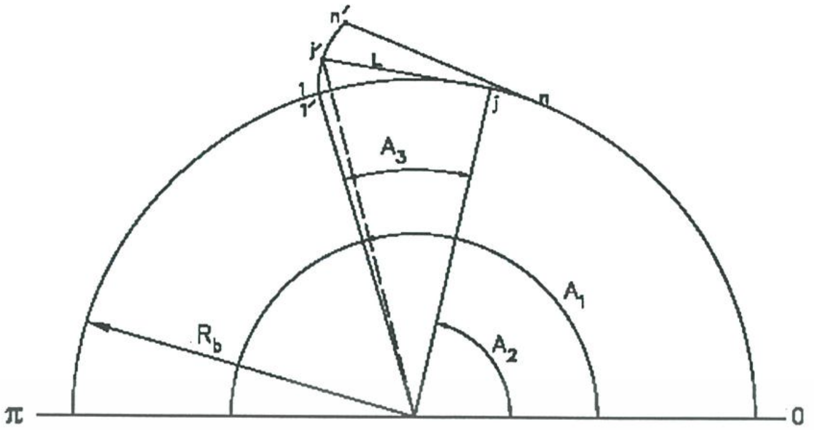


รูปที่ 4.16 แสดงการแบ่งมุมสำหรับเขียนรูปฟันเฟืองตรง

4.2.6 หลักการเขียนเส้นโค้งอินเวอลูทสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [10], [11]

การเขียนเส้นโค้งอินเวอลูทสามารถทำได้โดยการกำหนดจุดต่อต่าง ๆ ของเส้นโค้งเท่ากัน n จุด พิจารณาจากรูป โดยที่ R_b คือรัศมีของวงกลมฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงการแบ่งมุมสำหรับเขียนเส้นโค้งอินเวอลูท

พิจารณาจากรูปของเส้นโค้งอินเวอลูทสำหรับจุดเริ่มต้น (x_1, y_1) เกิดขึ้นที่จุด 1 สามารถหาค่า (x_1, y_1) ได้จากสมการ

$$x_1 = R_b \cos A_1$$
$$y_1 = R_b \sin A_1 \qquad (4.12)$$

และที่สำหรับจุดใด ๆ บนเส้นโค้งเราสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดย่อย ๆ ของเส้นโค้งออกเท่ากับ n ช่วงโดยแต่ละช่วงจะมีค่ามุมเปลี่ยนแปลงไปเท่ากัน ตัวอย่างเช่น j' เราสามารถหาค่า (x_j, y_j) ได้โดยการลากเส้นสัมผัสโค้ง $j - j'$ ทำให้หาค่า (x_j, y_j) ได้ตามสมการ

$$L = R_b \times \frac{\pi}{180} \times (A_1 - A_3) \quad \text{หน่วยเรเดียน} \qquad (4.13)$$

ดังนั้นจุดพิกัด (x_j, y_j) หาได้จากสมการ

$$x_j = R_b \cos(A_1 - A_3) - L\cos(A_1 - A_3 - 90)$$
$$y_j = R_b \sin(A_1 - A_3) - L\sin(A_1 - A_3 - 90) \qquad (4.14)$$

ดังนั้นหากเรากำหนดให้ช่วงมุมระหว่างมุม A_1 และ A_2 ถูกแบ่งเป็นช่วงมุมย่อย ๆ จำนวน n ช่วง โดยเริ่มจากมุม A_1 ไปยัง A_2 จะสามารถหาค่าแต่ละช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยกำหนดให้มุมที่ถูกเปลี่ยนแปลงแต่ละช่วงเป็นมุม θ_i โดที่ i มีค่าเท่ากับ 1,2,...,n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_i = R_i \cos\left(A_i - \theta_i\right) - L\cos\left(A_1 - \theta_i - 90\right)$$
$$y_i = R_i \sin\left(A_i - \theta_i\right) - L\sin\left(A_1 - \theta_i - 90\right) \qquad (4.15)$$

ในการเขียนโปรแกรมจะทำการกำหนดค่า x_i และ y_i เก็บไว้ในเมตริกซ์ ในส่วนของจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งอินเวอลูท เราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์กับรัศมีของยอดฟัน R_a กล่าวคือจุดสุดท้ายของเส้นโค้งอินเวอลูทต้องมีค่าน้อยกว่า R_a แสดงได้โดยสูตร

$$\left.\begin{aligned} & if\sqrt{x_i^2 + y_i^2} > R_a^2, then \\ & [x_{Limit}]_i = [x_{Limit}]_{i-1}, else \\ & [x_{Limit}]_i = [x_i] \\ & if\sqrt{x_i^2 + y_i^2} > R_a^2, then \\ & [y_{Limit}]_i = [y_{Limit}]_{i-1}, else \\ & [y_{Limit}]_i = [y_i] \end{aligned}\right\} \qquad (4.16)$$

4.2.7 การเขียนเส้นรัศมีปลายฟันของเฟืองตรง

เนื่องจากเราสามารถหาค่ามุม α ของจุดสุดท้ายของเส้นโค้งอินเวอลูท ได้จากสมการ

$$\alpha = \tan^{-1}\left|\frac{x_{Limit}}{y_{Limit}}\right| \qquad (4.17)$$

พิจารณาแบ่งมุมที่จะเขียนรูปเส้นรัศมีปลายฟันออกเป็นช่วงมุมย่อย ๆ n ช่วงเราสามารถกำหนดเขียนเส้นโค้งเป็นครึ่งหนึ่งของส่วนโค้งฟันเฟืองโดยกำหนดอ้างอิงจากเส้นตั้งฉากลบด้วยค่ามุมเริ่มต้นของเส้นรัศมีปลายฟันของเฟืองตรง คือ $\frac{\pi}{2} - \alpha$ โดยแบ่งช่วงของมุมเป็น θ_i

โดยที่ $\theta_i = 1,2,...,n$ เราสามารถคำนวณหาค่า x_i, y_i ของเส้นรัศมีปลายฟันของเส้นทั้งหมดได้จากสูตร

$$\left.\begin{aligned} x_i &= R_a \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta_i\right) \\ y_i &= R_a \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta_i\right) \end{aligned}\right\} \qquad (4.18)$$

4.2.8 การเขียนภาพสะท้อนของเส้นโค้งอินเวอลูท (Modeling the mirrored involute)

จากการเขียนภาพเส้นโค้งอินเวอลูทด้านที่อยู่ในจตุภาคที่ 2 แล้วนั้น เรานำข้อมูลพิกัด x,y ของเส้นโค้งอินเวอลูทจัดเก็บไว้เป็นเมตริกซ์ ซึ่งทำให้สะดวกในการเขียนภาพสะท้อนของเส้นโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอลูทด้านจตุภาคที่ 1 (ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) เนื่องจากมีการแตกต่างค่าลบเปลี่ยนไปเป็นบวก สำหรับค่า x ในจตุภาคที่ 1 ทำให้สามารถเขียนเป็นสูตรคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_i &= -R_b \cos(A_1 - \theta_i) - L\cos(A_1 - \theta_i - 90) \\ y_i &= R_b \sin(A_1 - \theta_i) - L\sin(A_1 - \theta_i - 90) \end{aligned} \quad (4.19)$$

สำหรับจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งอินเวอลูทในส่วนของการเขียนภาพสะท้อนใช้หลักเกณฑ์เดียวกับการเขียนเส้นโค้งอินเวอลูทดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อการเขียนเส้นโค้งอินเวอลูท

4.2.9 การเขียนเส้นผ่าศูนย์กลางโคนฟันระหว่างฟันเฟือง (Modeling the root diameter between teeth)

ในการเขียนเส้นผ่าศูนย์กลางโคนเฟือง (root diameter) เราสามารถกำหนดมุมสำหรับเริ่มการเขียนภาพกับมุมสิ้นสุดการเขียนภาพได้โดยพิจารณาจากขั้นตอนการแบ่งมุมสำหรับเขียนรูปฟันเฟือง พบว่ามุมดังกล่าวคือมุม Aa_2 องศา มุมเริ่มต้นที่มุม $A_1 - 3Aa_2$ และมุมสิ้นสุดคือมุม $A_1 - 4Aa_2$ จากนั้นกำหนดให้มุมที่ถูกเปลี่ยนแปลงแต่ละช่วงเป็นมุม θ_i โดยที่ i มีค่าเท่ากับ 1,2,...n และแบ่งมุม Aa_2 เท่ากับ n ช่วง จะได้สมการหาพิกัดของเส้นผ่าศูนย์กลางโคนฟัน คือ

$$\begin{aligned} x_i &= R_r \cos(A_1 - 3Aa_2 + \theta_i) \\ y_i &= R_r \sin(A_1 - 3Aa_2 + \theta_i) \end{aligned} \quad (4.20)$$

4.2.10 การหมุนภาพ (Rotation)

การหมุนภาพเป็นการแปลงภาพเรขาคณิต (geometric transformations) โดยการหมุนภาพนี้จะต้องกำหนดจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดหมุนเสมอ ซึ่งขณะนี้จะแสดงให้เกิดขึ้นที่จุดอ้างอิง (Origin) ดังรูปที่ 4.18 เมื่อกำหนดให้ $|P| = r$ การอ้างอิงถึงระบบพิกัด $P(x, y)$ เราใช้ระบบพิกัดโพลาร์ (การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้เวกเตอร์) ที่ตำแหน่งของ P ดังนี้

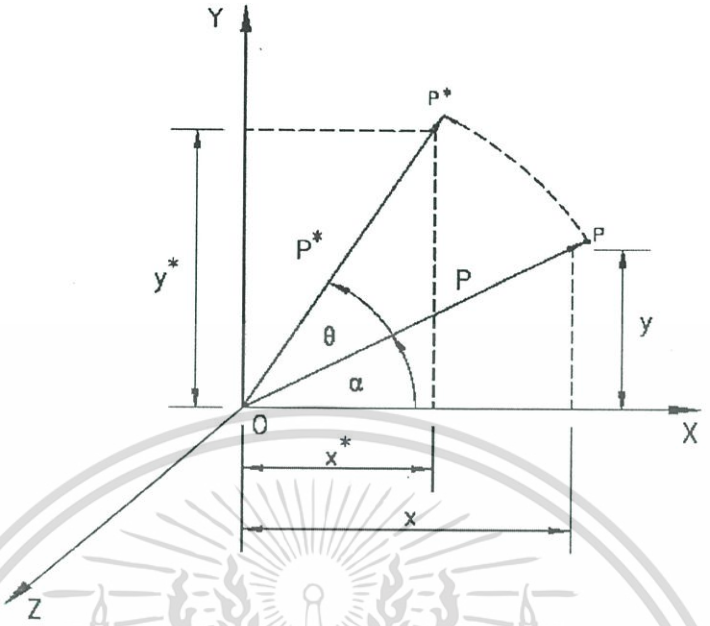
$$\begin{aligned} x &= r\cos\alpha \\ y &= r\sin\alpha \end{aligned} \quad (4.21)$$

ถ้า (x, y) ถูกหมุนไปจากจุดเดิมเป็นมุม θ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะได้จุดใหม่ $p^*(x^*, y^*)$ และหลังจากภาพถูกหมุนไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพจะยังคงมีค่าเท่าเดิม คือ

$$|p^*| = |p| = r \quad (4.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรูปร่างลักษณะของภาพก็ยังคงเดิม แต่ภาพถูกจัดวางในที่ต่างไปจากเดิม



รูปที่ 4.18 แสดงการหมุนภาพรอบจุดกำเนิด

$$\begin{aligned} x^* &= r\cos(\alpha+\theta) \\ y^* &= r\sin(\alpha+\theta) \\ z^* &= z \end{aligned} \tag{4.23}$$

ซึ่งอาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x^* &= r\cos\alpha\cos\theta - r\sin\alpha\sin\theta \\ y^* &= r\sin\alpha\cos\theta - r\cos\alpha\sin\theta \\ z^* &= z \end{aligned} \tag{4.24}$$

แทนค่า $r\cos\alpha$ ด้วย x และ $r\sin\alpha$ ด้วย y จะได้

$$\begin{aligned} x^* &= x\cos\theta - y\sin\theta \\ y^* &= x\sin\theta + y\cos\theta \\ z^* &= z \end{aligned} \tag{4.25}$$

สมการข้างต้นเป็นสมการการหมุนภาพในกรณีหมุนรอบแกน z สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

ในการหมุนภาพนิยมทำการหมุนภาพรอบจุดหมุนในทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา เนื่องจากในทางคณิตศาสตร์จะกำหนดให้ทิศทางการหมุนเป็นบวกในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แต่ถ้าต้องการกำหนดในทิศทางตามเข็มนาฬิกาก็สามารถทำได้โดย กำหนดค่า $-\theta$ แทน θ ลงในสมการข้างต้น

4.3 การทำโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์ในระดับตัวควบคุมของเครื่องจักร (Parametrical Part Programming on controller level)

ในทำนองเดียวกันกับการโปรแกรมชิ้นงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเราจะนำการวิเคราะห์แบบพิมพ์เขียวและสร้างแมโครของโปรแกรมย่อย (macro subprograms) กับโปรแกรมแมโครควบคุมเราไม่สามารถสร้างโปรแกรมแมคโครที่ครอบคลุมรูปทรงทางเรขาคณิตที่จะใช้ผลิตได้ทั้งหมด จึงมีการพัฒนารูทีน(routines) ที่จะสามารถครอบคลุมรูปแบบทางเรขาคณิตส่วนใหญ่ไว้ แต่การโปรแกรมแมโครเหล่านี้ก็สามารถปรับแต่งไปใช้งานได้และผู้ใช้ก็สามารถสร้างรูทีนเฉพาะงานขึ้นมาใช้งานเองก็ได้ ซับรูทีนของแมโครที่เตรียมสำหรับเครื่องมือหรืออุปกรณ์เฉพาะอย่างตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์กลุ่มต่างๆ ก็มีลักษณะเดียวกันการโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลนั่นเอง ดังนั้นความแตกต่างที่สำคัญของการโปรแกรมทั้งสองระดับนี้ก็คือบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเราสามารถสร้างพารามิเตอร์สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างใดๆ ก็ได้ แต่ในส่วนของเครื่องควบคุมจะไม่สามารถทำได้ทุกรูปร่าง

4.4 ระบบการทำงานแบบโต้ตอบ (Interactive System)

ระบบการทำงานแบบโต้ตอบมักจะใช้การแสดงผลผ่านหน้าจอกราฟิกส์เพื่อแสดงข้อมูลแก่ผู้ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงหรือการแก้ไขข้อมูลตามความต้องการของผู้ใช้งานได้ดี ดังนั้นนักออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้(user interface designer) จะต้องคำนึงถึงปัญหาเหล่านี้ให้มากที่สุด

4.4.1 การตรวจแก้ข้อมูลแบบโต้ตอบ (Interactive Data Editor)

ในการออกแบบ "การตรวจแก้ข้อมูล (data editor)" จะมีหลักการที่สำคัญจากพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวกับมนุษย์ (human engineering) ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญจะได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 ผลป้อนกลับ (feedback)

ผลป้อนกลับเป็นส่วนที่สำคัญมากของระบบการทำงานแบบโต้ตอบ โดยปกติแล้ว ผลป้อนกลับจะเกิดขึ้นจากการที่คำสั่งแต่ละอันเป็นที่ยอมรับของระบบ รูปแบบของผลป้อนกลับที่ให้คุณประโยชน์สูงสุดจะบอกผู้ใช้งานได้ด้วยว่าการปฏิบัติการได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว ในการนี้มักจะมีการดัดแปลงหรือจัดหน้าจอการแสดงผลออกมาใหม่หรือมีการให้เสียงต่างๆ บอกออกมาให้ทราบ

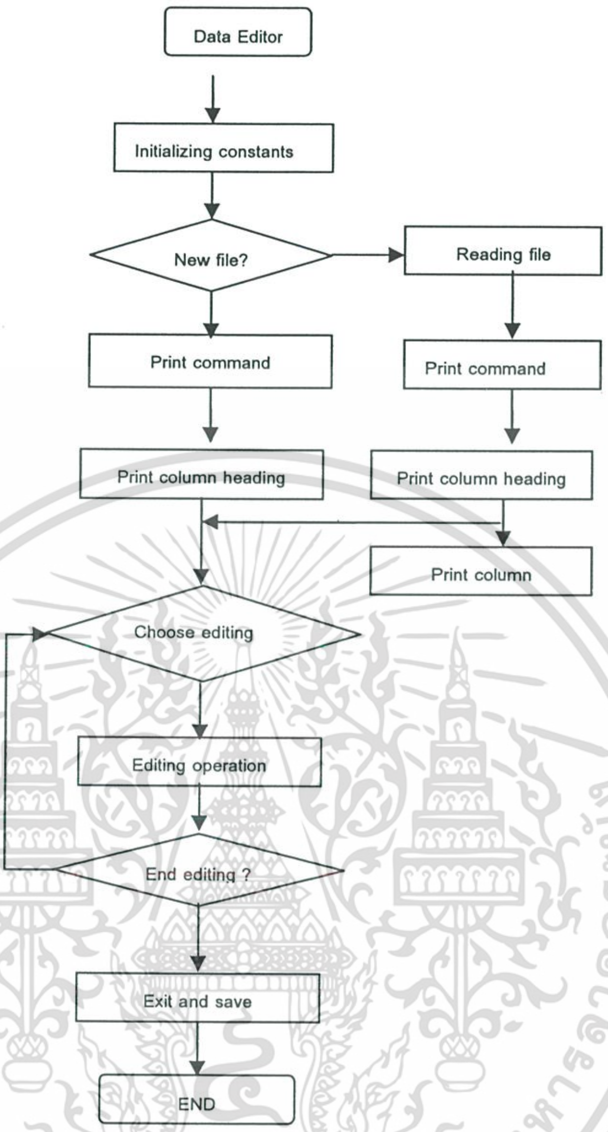
4.4.1.2 ความต้องกัน (consistency)

การสร้างความต้องกันหรือความสอดคล้องเข้าใจตรงกันนั้นตำแหน่งหน้าจอของหัวข้อต่างๆ เช่น เมนู(menu), คำสั่ง(commands) และผลป้อนกลับ(feedback) เป็นสิ่งสำคัญมาก ปกติเราจะกำหนดส่วนต่างๆของหน้าจอไว้สำหรับหัวข้อต่างๆ เหล่านี้ ความต้องกันนี้จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถหาหัวข้อเมนูที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว สำหรับตัวอย่างในการสร้างความต้องกันอื่นๆ ได้แก่ การใช้รหัสสี(color coding) และการใช้คำย่อต่างๆ

4.4.1.3 การจำน้อยที่สุด (minimal memorization)

หลักการที่สำคัญสำหรับการนี้คือทำสิ่งจำเป็นที่จะต้องจำให้อยู่ในรูปแบบที่จำได้ง่ายที่สุดเท่าที่จะทำได้ และถ้าหลีกเลี่ยงได้ต้องพยายามอย่าให้มีสิ่งที่จะต้องจำในการปฏิบัติการ ซึ่งตัวอย่างตรรกะของการโปรแกรมคอมพิวเตอร์(Computer programming logic) ของการตรวจแก้ข้อมูลได้แสดงดังผังงานในรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงชาร์ทการใช้หน่วยความจำน้อยสุด

4.4.1.4 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการผลิตเชิงโต้ตอบ (Interactive Computer-Aided Design and Manufacture)

การออกแบบและการผลิตแบบใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจะใช้ศาสตร์ทางด้านเรขภาพคอมพิวเตอร์(computer graphics) มาใช้เป็นเครื่องมือในการทำงานโดยจะมีการพัฒนาชุดคำสั่งกราฟิกส์ (graphics commands) ที่ใช้คีย์บอร์ดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับป้อนอินพุท อาจมีการใช้ฟังก์ชันคีย์ (function key) ในคำสั่งกราฟิกส์หรือมีการออกแบบหน้าจอในรูปของคำสั่งที่ทำงานตามรายการเลือก (menu-driven commands) ข้อความพร้อมรับ (prompt) และข้อความบอกสถานะ (status massages)ที่แสดงผลออกมาตามข้อมูลกราฟิกส์ประกอบอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

5.1 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษา โดยจัดทำโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิคสำหรับใช้ในการทำแฟ้มข้อมูลโปรแกรมชิ้นงาน NC ตามข้อมูลเส้นทางเดินมีดตัด (cutter Location Data File หรือ CL – Data) ขึ้นมาจากการรับข้อมูลป้อนเข้าตามพิกัดตำแหน่งป้อนเข้าของไอคอนต่างๆ คือเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบลา ไฮเพอร์โบลา สไปลน์ และเฟืองตรง แล้วบันทึกแฟ้มข้อมูลเก็บไว้ในลักษณะของแฟ้มข้อมูลรหัสแอสกี (ASCII text file) แฟ้มข้อมูลที่ได้นั้นสามารถนำมาตรวจสอบความถูกต้องและปรับปรุงได้โดยโปรแกรม Notepad บน WINDOWS และนำมาตรวจสอบกับโปรแกรมCAM สำเร็จรูปโดยแปลงข้อมูลจากไฟล์นามสกุล.txt เป็นนามสกุล .nci ในโปรแกรม Master CAM เพื่อจำลองภาพกราฟฟิกส์และข้อมูลของทาวงเดินมีดตัดระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์และโปรแกรมสำเร็จรูป หลังจากนั้นได้ทำการทดลองผลิตชิ้นงานจริงโดยเชื่อมต่อข้อมูลเส้นทางเดินมีดตัดระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องจักร CNC โดยเชื่อมต่อผ่านพอร์ท RS – 232 – C (มาตรฐานของการเชื่อมต่อที่นิยมใช้ระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องจักร CNC คือ RS – 232 – C มาตรฐานนี้ประกาศใช้เมื่อปี 1969 โดย Electronic Industries Association : ETA อักษร RS แทน Recommended Standard 232 แทนหมายเลขของมาตรฐาน และอักษร C แสดงให้รู้ว่ามาตรฐานได้มีการแก้ไขปรับปรุงกี่ครั้ง)

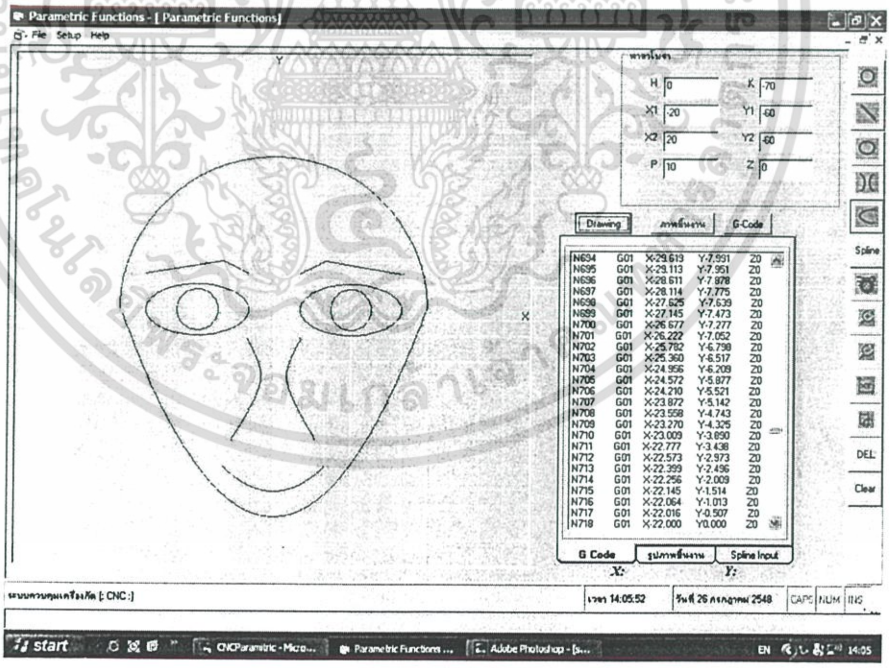
5.2 ผลการทดสอบจากการสร้างคำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า และไฮเพอร์โบล่า

จากการทดสอบป้อนข้อมูลดังตารางที่ 5.1 ได้ผลการทดลองตามรูปที่5.1 และรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงการเขียนรูปที่และค่าG-Code ซึ่งสามารถนำไปใช้เชื่อมโยงกับเครื่องจักรCNC ทำให้สามารถทำให้เกิดชิ้นงานดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

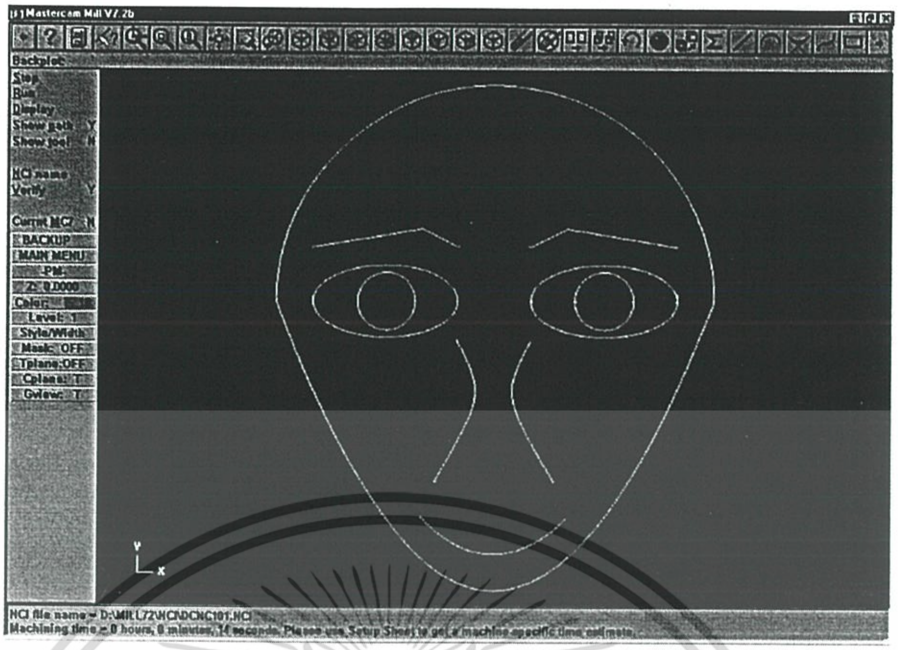
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรมสร้างคำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่าและไฮเพอร์โบล่า

PATH	SHAPE	H	K	X1	Y1	X2	Y2	P	R	A	B	WA	WB
P1	Parabola	0	-80	-60	0	60	0	11	-	-	-	-	-
C1	Circle	0	0	60	0	-60	0	-	60	-	-	-	-
L1	Line	-	-	-50	15	-20	20	-	-	-	-	-	-
L2	Line	-	-	-20	20	-10	15	-	-	-	-	-	-
L3	Line	-	-	10	15	20	20	-	-	-	-	-	-
L4	Line	-	-	20	20	50	15	-	-	-	-	-	-
E1	Ellipse	30	0	50	0	50	0	-	-	20	10	-	-
C2	Circle	30	0	38	0	38	0	-	8	-	-	-	-
E2	Ellipse	-30	0	10	0	10	0	-	-	20	10	-	-
C3	Circle	-30	0	-22	0	-22	0	-	8	-	-	-	-
H1	Hyperbola	0	-25	10	-10	15	-50	-	-	-	-	5	8
P2	Parabola	0	-70	-20	-60	20	-60	10	-	-	-	-	-

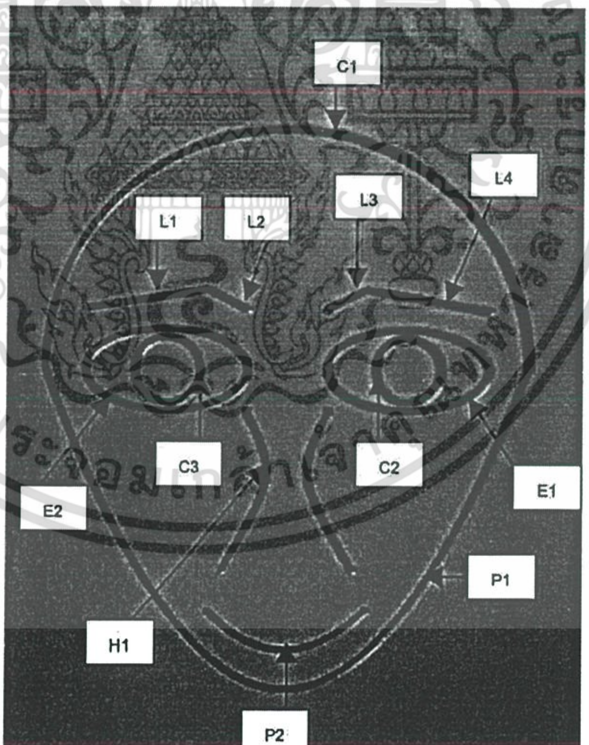


รูปที่ 5.1 แสดงภาพกราฟฟิกส์และ G-code ที่ได้จากการป้อนข้อมูลคำสั่งเส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า และ ไฮเพอร์โบล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงภาพกราฟฟิกส์ที่ได้จากการแปลงข้อมูลเทียบกับโปรแกรม Master CAM

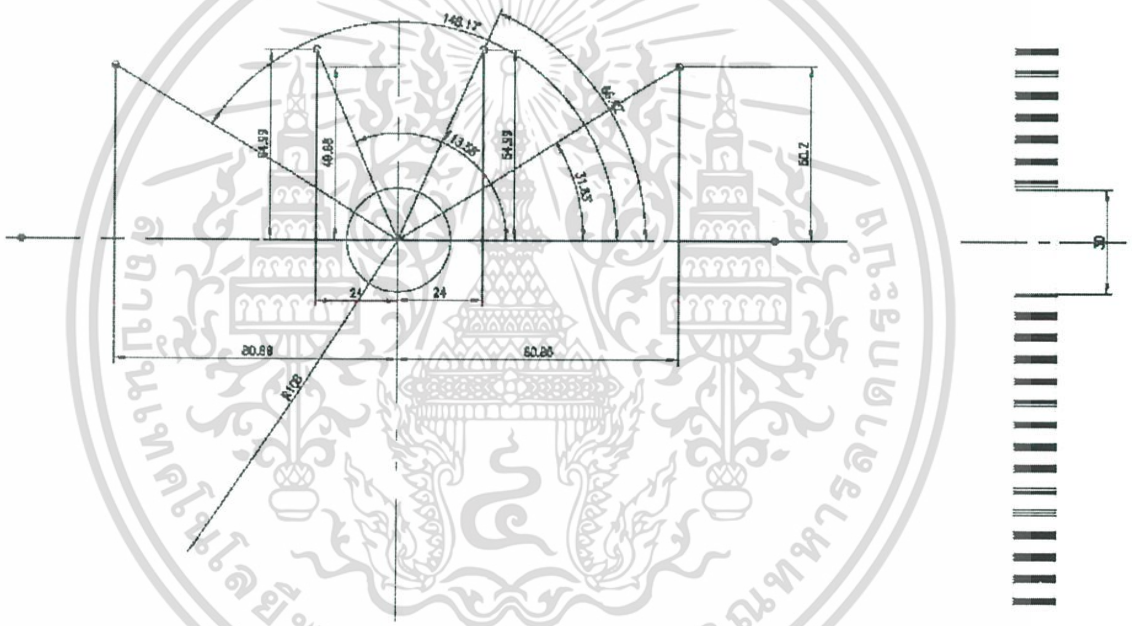


รูปที่ 5.3 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักรCNC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดสอบจากการสร้างคำสั่งสไปลน์

ในการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับคำสั่งสไปลน์นั้นได้ทำการทดลองออกแบบชิ้นงานเป็นลูกเบี้ยว(Cam) ที่มีรูปร่างสมมาตรโดยกำหนดจุดควบคุม (Control point) ของสไปลน์เป็นจุดข้อมูลป้อนเข้าสู่โปรแกรมกัดชิ้นงาน ซึ่งข้อมูลป้อนเข้าแสดงให้เห็นในตารางที่ 5.2 การเขียนรูปกราฟฟิกส์ที่ได้จากการป้อนค่าเข้าสู่โปรแกรมและค่าG-Code ซึ่งสามารถนำไปใช้เชื่อมโยงกับเครื่องจักรCNC ทำให้สามารถทำให้เกิดชิ้นงานแสดงโดยรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.3 แสดงผลลูกเบี้ยวที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักรCNCและผลจากการเปรียบเทียบค่าระหว่างจุดควบคุมกับการวัดค่าแสดงโดยรูปที่ 5.4

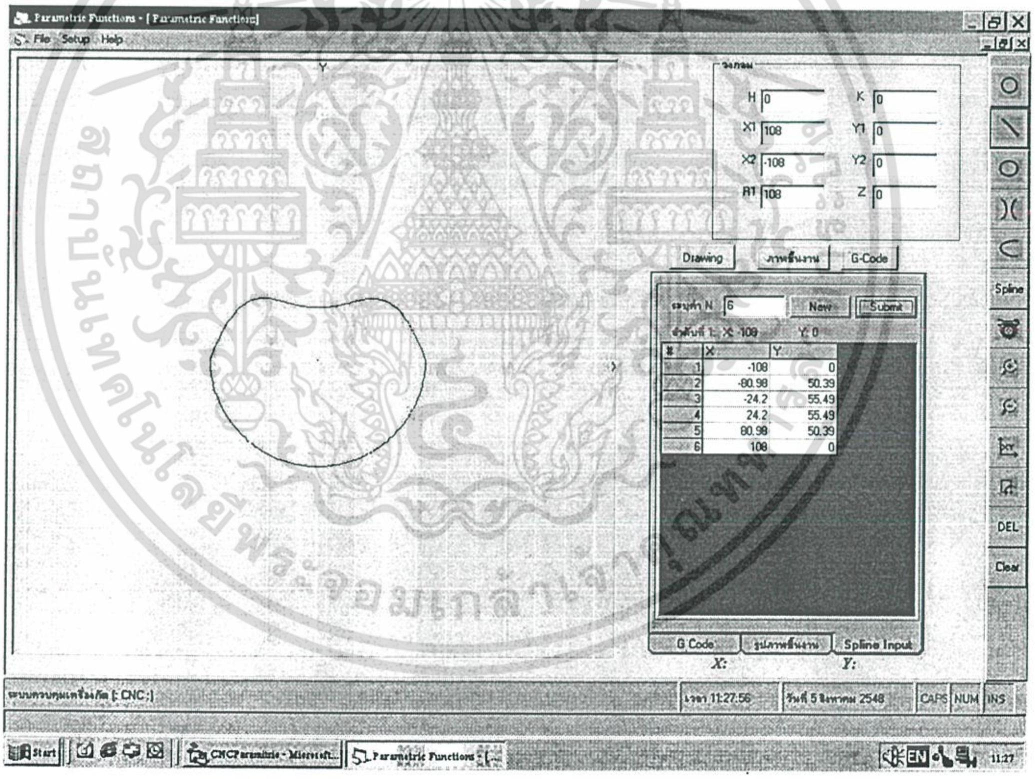


รูปที่ 5.4 แสดงแบบงานที่กำหนดขนาดของลูกเบี้ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

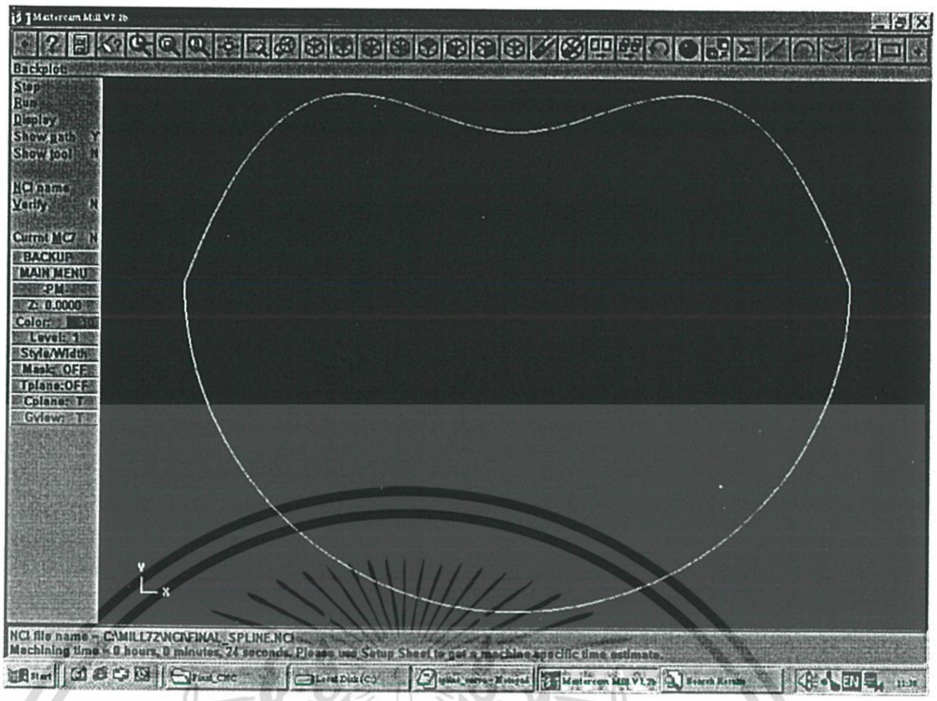
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรมสร้างคำสั่งสไปลน์

PATH	SHAPE	H	K	X1	Y1	X2	Y2	R
A1	Circle	0	0	108	0	-108	0	108
A2	Spline	0	0	-108	0	-	-	-
A3	Spline	-	-	-80.86	50.2	-	-	-
A4	Spline	-	-	-24	54.99	-	-	-
A5	Spline	-	-	0	49.98	-	-	-
A6	Spline	-	-	80.86	50.2	-	-	-
A7	Spline	30	0	80.86	50.2	-	-	-
A8	Spline	30	0	108	0	-	-	-

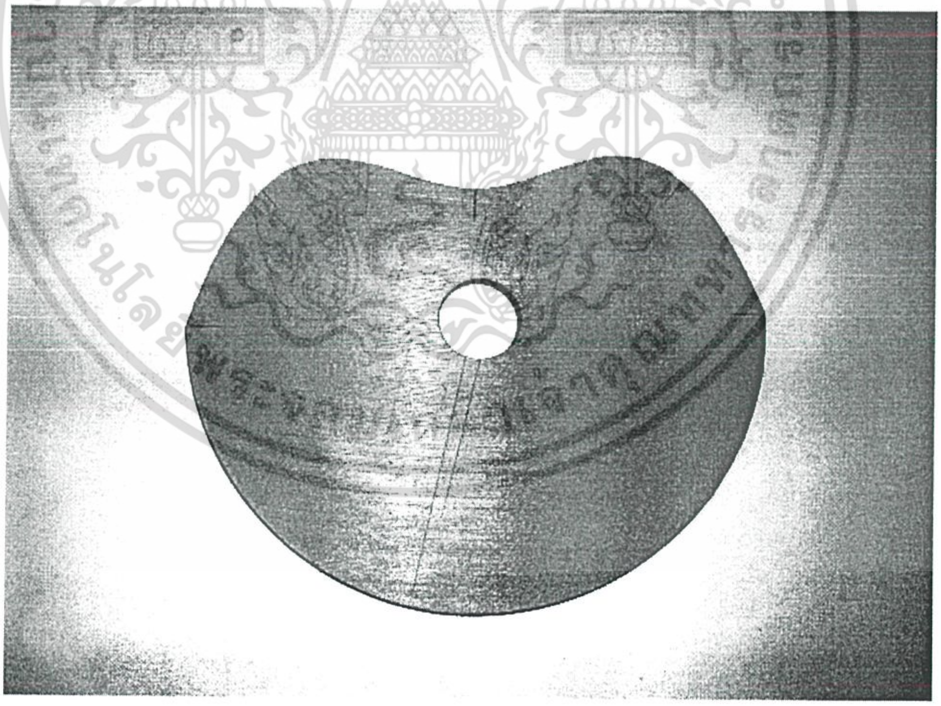


รูปที่ 5.5 แสดงภาพกราฟฟิกส์และG-code ที่ได้จากการป้อนข้อมูลคำสั่งสไปลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงภาพกราฟฟิกส์ของคำสั่งสไปลน์ในโปรแกรมMaster CAM

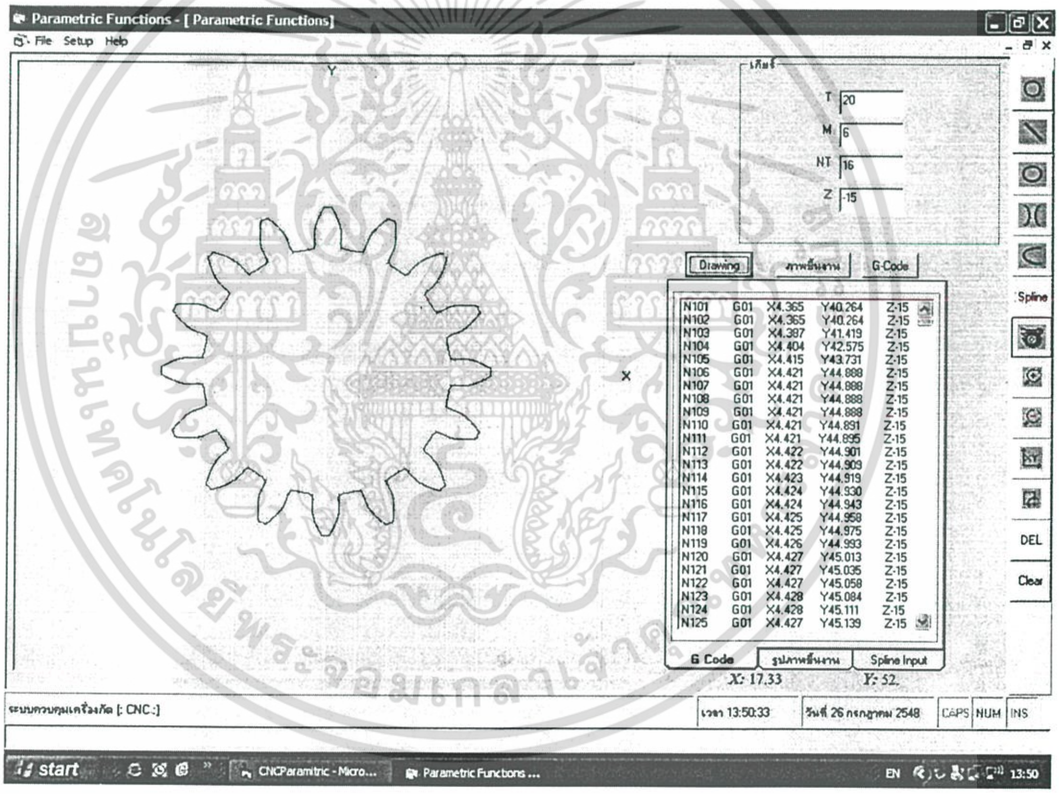


รูปที่ 5.7 แสดงผลจากคำสั่งสไปลน์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักรCNC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่และพิกัดที่วัดได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป

คำสั่ง	พิกัดป้อนเข้า					พิกัดที่วัดได้					ค่าแตกต่าง				
	x1	y1	x2	y2	รัศมี	x1	y1	x2	y2	รัศมี	x1	y1	x2	y2	รัศมี
Circle	108	0	-108	0	108	107.946	-0.073	-108	-0.073	107.979	-0.054	0.073	0	0.073	-0.021
Spline	-108	0	-	-	-	-108	-0.073	-	-	-	0	-	-	-	-
Spline	- 80.86	50.2	-	-	-	-80.865	50.123	-	-	-	0.005	-	-	-	-
Spline	-24	54.99	-	-	-	-24.059	55.048	-	-	-	0.059	-	-	-	-
Spline	0	49.98	-	-	-	0	50.001	-	-	-	0	-	-	-	-
Spline	24	54.99	-	-	-	24.054	55.037	-	-	-	0.054	-	-	-	-
Spline	80.86	50.2	-	-	-	80.893	50.141	-	-	-	0.033	-	-	-	-
Spline	108	0	-	-	-	107.946	-0.073	-	-	-	-0.054	-	-	-	-



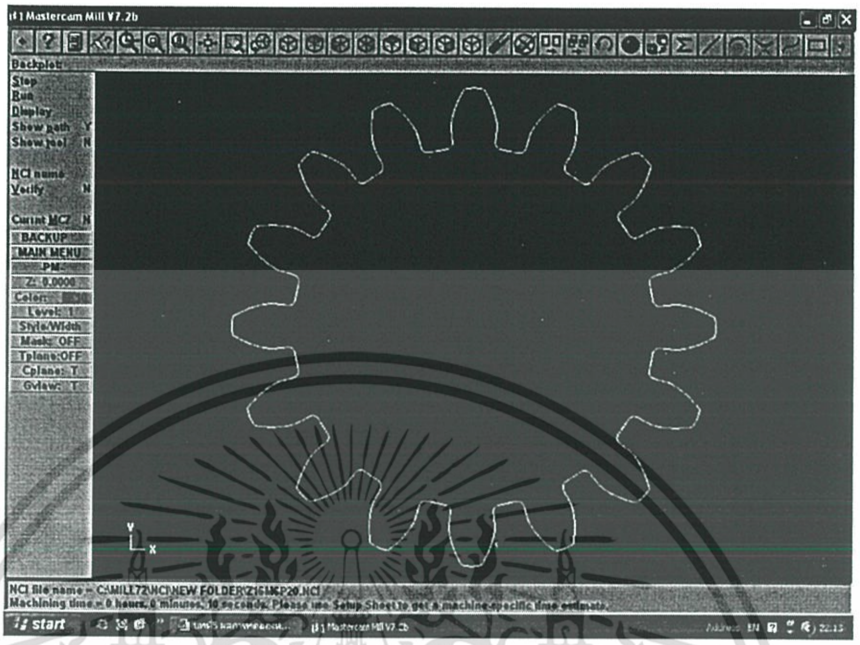
รูปที่ 5.8 แสดงภาพกราฟฟิกส์และG-code ที่ได้จากการป้อนข้อมูลคำสั่งเฟืองตรง

5.4 ผลการทดสอบจากการสร้างคำสั่งเฟืองตรง

ในการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับคำสั่งเฟืองตรงนั้นได้ทำการทดลอง โดยกำหนดเฟืองตัวอย่างที่มีโมดุล คือ 5 และมุมกดดัน คือ 20 องศา และมีจำนวนฟันเฟืองเท่ากับ 16 ฟัน จากนั้นป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมกัดชิ้นงานในคำสั่งเฟืองตรง การเขียนรูปกราฟฟิกส์ที่ได้จากการป้อนค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสู่โปรแกรมและค่าG-Code ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งสามารถนำไปใช้เชื่อมโยงกับเครื่องจักร CNC ทำให้สามารถทำให้เกิดชิ้นงานแสดงโดยรูปที่5.10

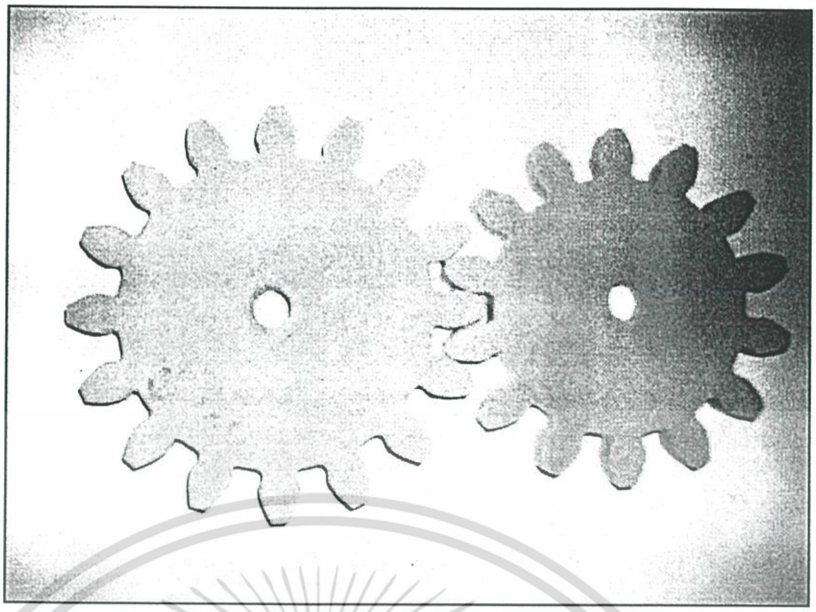


รูปที่ 5.9 แสดงภาพกราฟฟิกส์ของคำสั่งเฟืองในโปรแกรม Master CAM

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าพิกัดที่วัดได้ของเฟืองตรง 16 ฟัน โมดุล=5 , มุมกดดัน=20 องศาและค่าที่คำนวณได้จากสูตร

ชื่อส่วนประกอบของเฟือง	สูตรที่ใช้คำนวณ	ค่าที่ได้จากการคำนวณ (mm.)	ค่าที่วัดได้ (mm.)	ค่าแตกต่าง (mm.)
Addendum (a)	1.000 / Pd	5	5.014	0.14
Dedendum (b)	1.25 / Pd	6.25	6.167	-0.083
Fillet radius (rf)	0.304 / Pd	1.52	1.284	0.236
Tooth Thickness	1.5708 / Pd	7.854	7.908	0.054
Outside diameter	(d x Z)+2m	90	89.966	-0.034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงผลจากคำสั่งเฟืองที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องจักร CNC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์ของรูปทรงเรขาคณิต ต่างๆ เช่น เส้นตรง วงกลม วงรี พาราโบล่า ไฮเพอร์โบล่า และการประมาณค่าด้วยวิธีพาราเมตริกคิวบิคสไปลน์ รวมถึงการประยุกต์ใช้ความรู้ทางการเขียนแบบวิศวกรรมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์นำมาใช้ประยุกต์ใช้สร้างรูปฟันเฟืองตรง โดยการใช้โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกในการสร้างหน้าจอแบบกราฟฟิกส์และคำนวณหา G-code สำหรับสร้างทางเดินมีดตัดให้กับเครื่องจักร CNC

จากการวิจัยพบว่าโปรแกรมCNCแบบเชิงโต้ตอบนั้นสามารถนำมาใช้กับงานกัด (Milling) แบบ 2 มิติได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าตัวเลขที่คำนวณได้จากโปรแกรมนั้นมีค่าเบี่ยงเบนทางตัวเลขน้อยมาก ทำให้สามารถนำไปใช้สร้างชิ้นงานที่มีรูปทรงที่เป็นไปตามหลักการทางเรขาคณิตและต้องการความเที่ยงตรงสูงได้เป็นอย่างดีและเหมาะสำหรับเครื่องจักรCNC ที่ไม่มีชุดควบคุมสำหรับแปลงค่าเป็น G-code ได้

แนวทางที่สามารถนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้ให้บังเกิดผล คือ การลดปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากผู้ปฏิบัติการที่ใช้ในการออกแบบคำสั่งรหัสเครื่องจักร (G – Code) ที่ใช้สำหรับป้อนข้อมูลให้เครื่องจักรที่ถูกระบุตามแบบงานที่ต้องการใช้เวลาในการทำความเข้าใจกับแบบงาน และสร้างคำสั่ง G – Code อีกทั้งยังต้องเสียเวลาป้อนค่า G – Code เข้าสู่ชุดควบคุมของเครื่องจักรCNC และยังสามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้จากรูปกราฟิกส์ที่แสดงบนหน้าจอของของโปรแกรม อีกทั้งยังเป็นการทำงานในระบบ off-line program คือสามารถสร้างข้อมูลได้ล่วงหน้าก่อนทำการผลิต ทำให้ลดเวลาในการเตรียมข้อมูลการผลิตเป็นอย่างมาก

หลักการในการนำสมการพาราเมตริกมาใช้กับเครื่องจักรCNCนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมกับงานทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการแสดงภาพกราฟฟิกส์ที่สมบูรณ์โดยใช้เทคนิคจุดต่อจุดอย่างต่อเนื่อง

จากการทดลองคำสั่งสไปลน์นั้นพบว่าค่าพิกัดข้อมูลที่ได้จากการป้อนข้อมูลและคำนวณค่านั้นมีความถูกต้องและแม่นยำ เนื่องจากโปรแกรมได้แก้ไขที่จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของจุดต่อโดยใช้วิธีกำหนดอนุพันธ์อันดับที่3 เพื่อลดค่าความผิดพลาด

การทดลองคำสั่งเฟืองตรง จากการป้อนข้อมูลทดลองและวัดรูปร่างของเฟืองนั้น พบว่าโปรแกรมสามารถคำนวณหาจุดพิกัดต่างๆของเฟืองตรงได้อย่างถูกต้อง และสามารถนำเฟืองตรงไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นข้อมูลที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มุ่งหวังให้ง่ายต่อผู้ใช้งานในงานกัดพิกัด2มิติ ไม่ได้ครอบคลุมถึงงานแบบ 3 มิติ ซึ่งควรมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถรองรับในการนำมาใช้กับงานในระบบ 3 มิติได้ เพื่อให้โปรแกรมมีความสามารถในการรองรับการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

อีกทั้งการพัฒนาโปรแกรมต่อไปนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มชุดคำสั่งเข้าไปเป็นไอคอนเพิ่มเติมได้โดยตรง เช่น คำสั่งเขียนเฟืองโซ่ หรือลูกเบี้ยว ซึ่งทำได้โดยง่ายเพราะมีคำสั่งในการรองรับในการแสดงผลกราฟฟิกส์ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ และการสร้างเส้นทางเดินของมีดตัดรองรับเป็นโปรแกรมย่อย (Sub directory) ไว้อยู่แล้วทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการในการเขียนโปรแกรมใหม่ทั้งหมด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Gregory Charles Loney 1985 **Interactive Design and NC Machining** MS.Thesis of Lehigh University.

[2] Dusko Savic, BASIC **Interactive Graphics.** Butteworth & Co (Publishers) Ltd., 1985.

[3] Roy E.Mayers., **Microcomputer Graphics**. Addison-Wesley Publishing Company, 1985.

[4] C.S. Park, **Elements of Computer** Wesley Publishing Company, Inc., U.S.A., 1984.

[5] A.W. Goodman, **Analytic Geomety and the Calculus** 4^{th} edition, Macmillian Publishing Co., Inc., 1980

[6] Abraham Zeid, **CAD/CAM Theory and Proactive** Mcgaw-Hill, Inc.

[7] G. Forsythe, M. Malcolm and C. Moler, **Computer Method for Mathematic Computations**, Prentice Hall, Inc. c1977.

[8] Steven C. Chapra and Raymond P.Cauale 2002., **Numerical Methods for Engineers with software and Programming Application** fourth edition McGvaw – Hill Company.

[9] .Steve F. Krar and J.Willian Oswald 1991 **Technology of Machine Tools** forth eddition Mcgraw – Hill International Editions.

[10] Y.C.PAO **Elements of Computer-Aide Design and Manufacturing** John Wiley & Sons., Inc., U.S.A.,1994.

[11] Joseph B. Ferreira **Using Spreadsheets to Parameterize Spur Gear Design for Laser Cutter** BS. Thesis of Massachusetts Institute of Technology.

[12] Frederick E.Giesecke , Alva Mitchell and Henry Cecil Spencer **Technical Drawing** fourth edition , The Macmillan Company Newyork.

[13] Dann D'Hont "Off Line Parametrical Programming Facilities for Stand Alone CNC Machine Tools" การประชุมใหญ่ทางวิชาการ หัวข้อเทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ 26-28 ตุลาคม 2532 หน้า1810-816

[14] Eugene A. Avallone Theodore Baumetster III **Marks Standard Handbook foor Mechanical Engineering** Tenth Edition MaGraw-Hill, c1997.

[15] กิตติ ภักดีวัฒนะกุลและจำลอง ครูอุตสาหะ. 2542. **Visual Basic 6 ฉบับโปรแกรมเมอร์** กรุงเทพฯ : ไทยเจริญการพิมพ์

[16] คณิส สุจินัย. **เทคนิคการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการเขียนแบบวิศวกรรม** กรุงเทพฯ: **สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] จงกล งามวิวิทย์ 2533 **การควบคุมเชิงตัวเลข** กรุงเทพฯ: พิมพ์ครั้งที่1 ตำราชุด วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[18] ทวี เทศเจริญ 2535 **การออกแบบเครื่องมือกล** กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[19] บรรเลง ศรนิล และประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์ ผู้แปล 2524 **ตารางงานโลหะ** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สจพ.

[20] บุญชู ลีลาขจรจิต "การประยุกต์ใช้โปรแกรมภาษาเบสิคกับชิ้นงาน CNC รูปแพนอากาศ" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[21] ปรียา ขุมทรัพย์ **คณิตศาสตร์ เล่ม 1 สำนักพิมพ์** กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[22] พูลพงษ์ บุญพราหมณ์ **คอมพิวเตอร์ช่วยงานอุตสาหกรรม** กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น)

[23] โยธิน เปรมปราณีรัชต์ **Numerical Control** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[24] วิชัย ศิวรานนท์ 2541 "การโปรแกรมและการจำลองภาพการทำงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซี" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[25] วุฒิชัย กิปลกาญจน์ 2533 "กลไกและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกล" สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

[26] วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน 2535 **การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 2**. กรุงเทพฯ : บริษัท ซี เอ็ดยูเคชั่น จำกัด

[27] สมยศ จันเกษม และ กิโยคัตสึ ซึ่ง 2540 **การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล** กรุงเทพฯ : พิมพ์ครั้งที่ 3 บริษัทสำนักพิมพ์ดวงกมล (2520) จำกัด

[28] สมพัฒน์ รุ่งตะวันเรืองศรี **เรียนรู้คอมพิวเตอร์กราฟฟิกส์ 2 มิติ ด้วยภาษาซี** กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด

[29] อนันต์ วงศ์กระจ่าง, มนตรี บุญชูและยุทธนา หริรักษาพิทักษ์ 2526 **เฟืองและเทคนิคการผลิตเฟือง** กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ศรีสยาม

[30] สุธาทิพย์ จิวัชยากุล 2536 "ระบบซอฟท์แวร์เพื่อการใช้งานเครื่องมือกลควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[31] อำนาจ ทองแสน 2543 **เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ช่วยออกแบบและผลิต CAD / CAM Technology** กรุงเทพฯ: พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

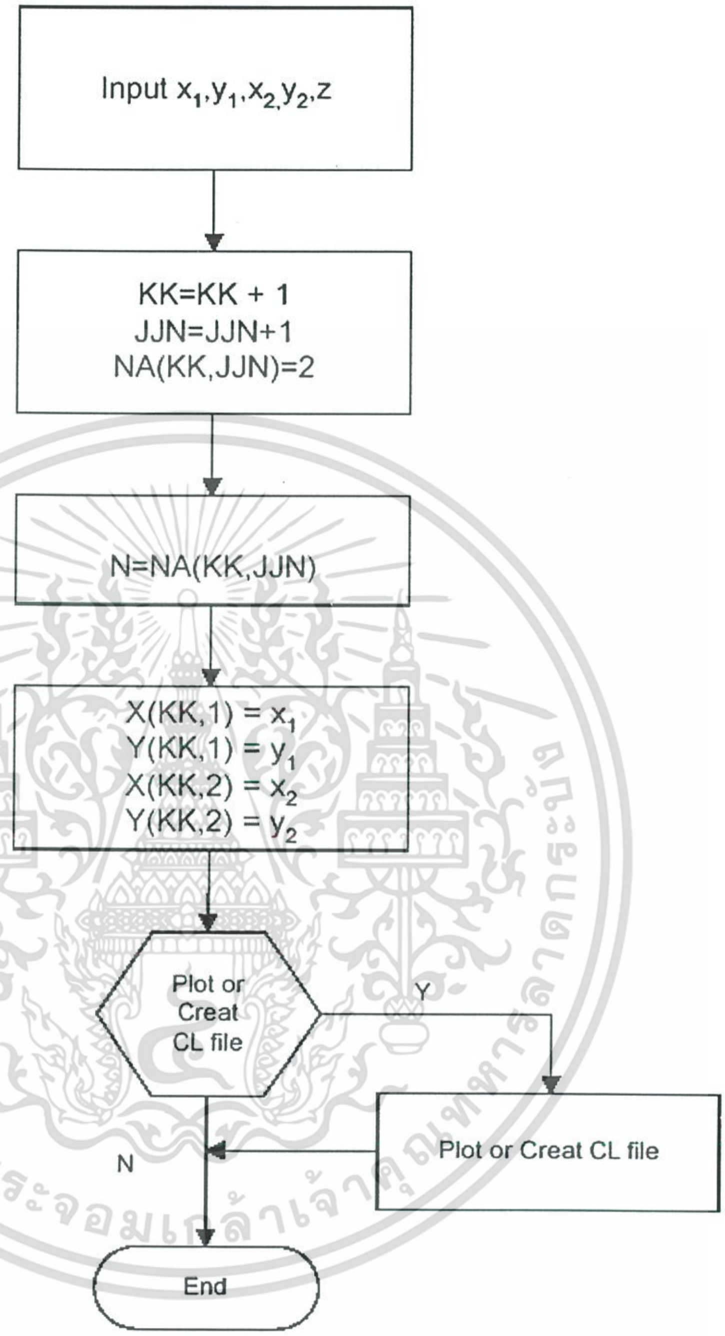
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

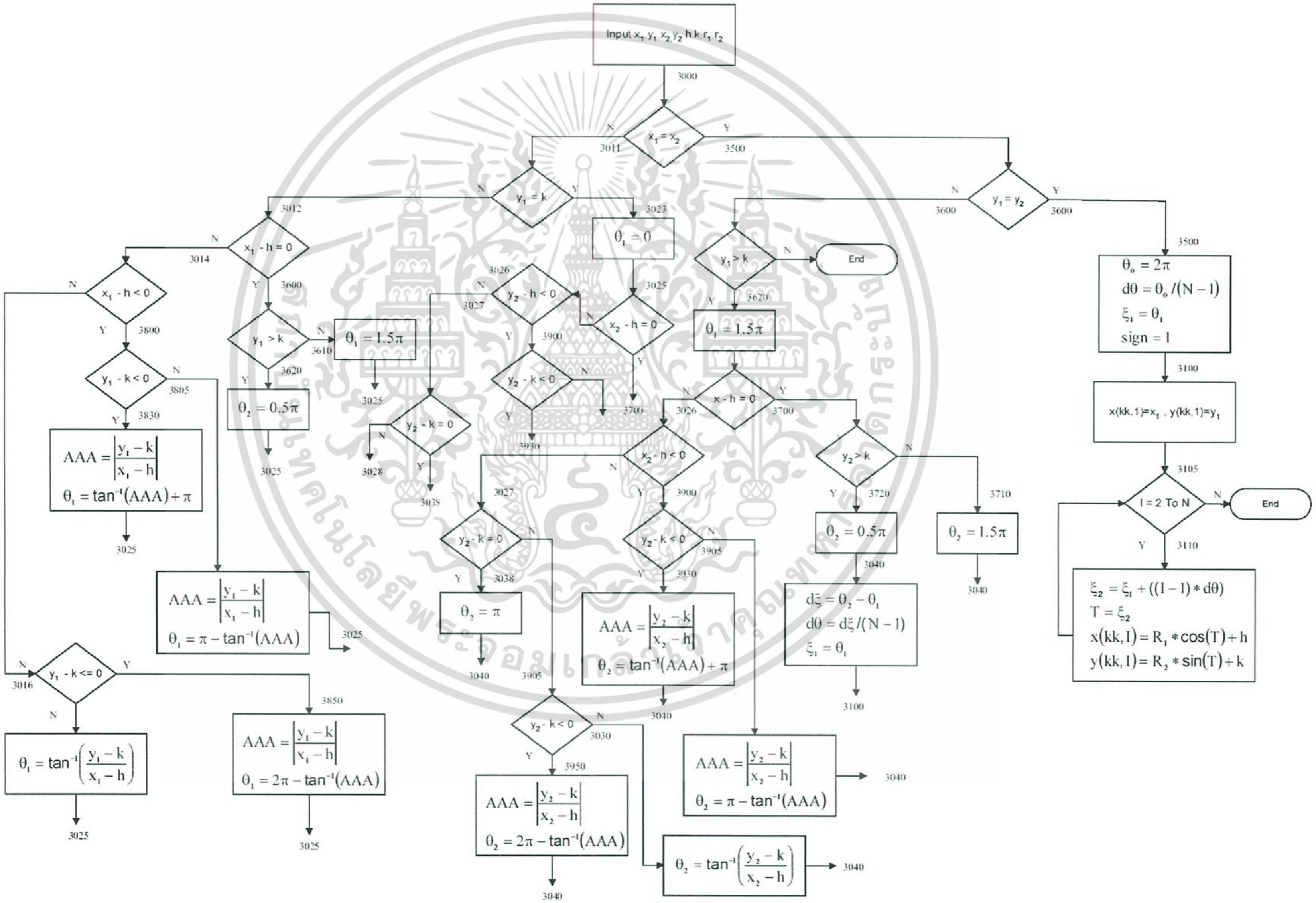
โครงสร้างโปรแกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

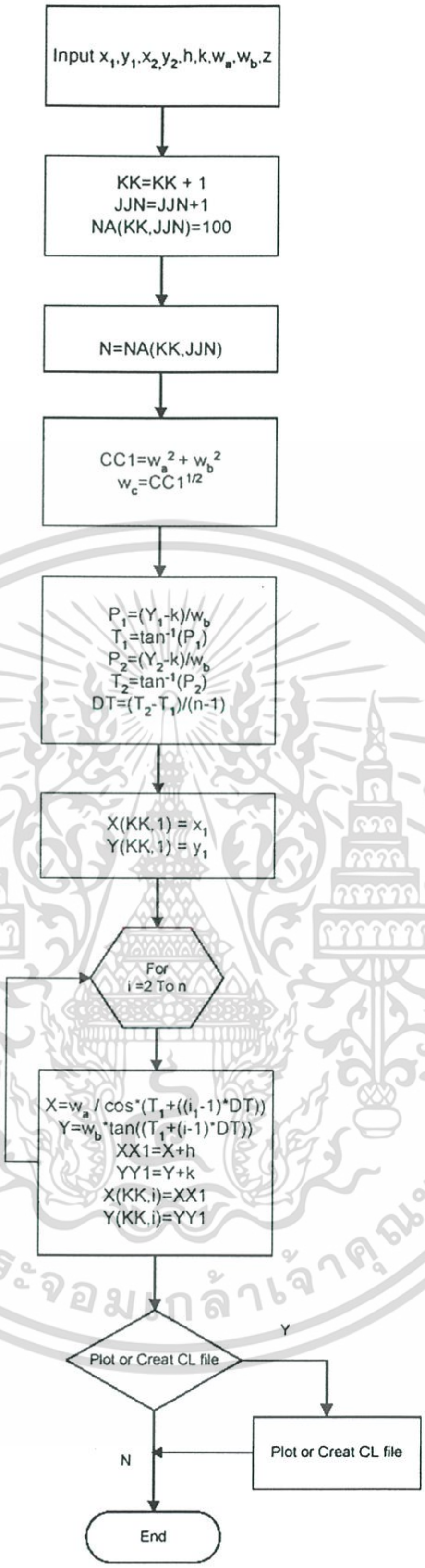


รูปที่ ก.1 แสดงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

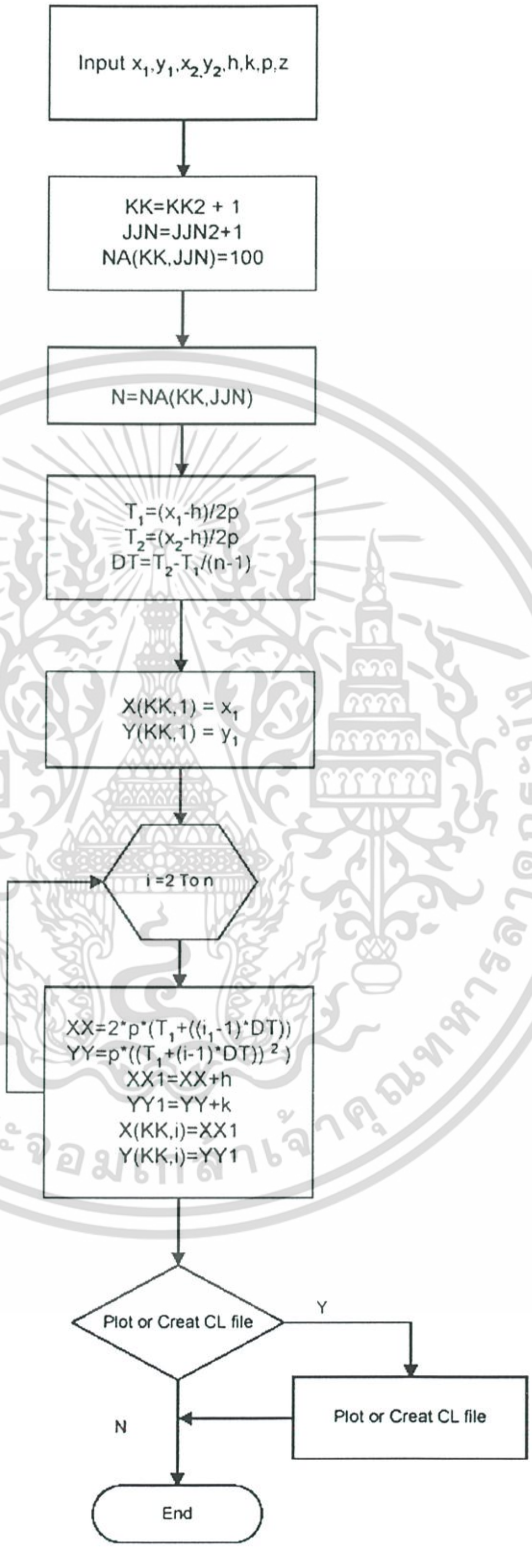


รูปที่ ก.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งวงกลมและวงรี



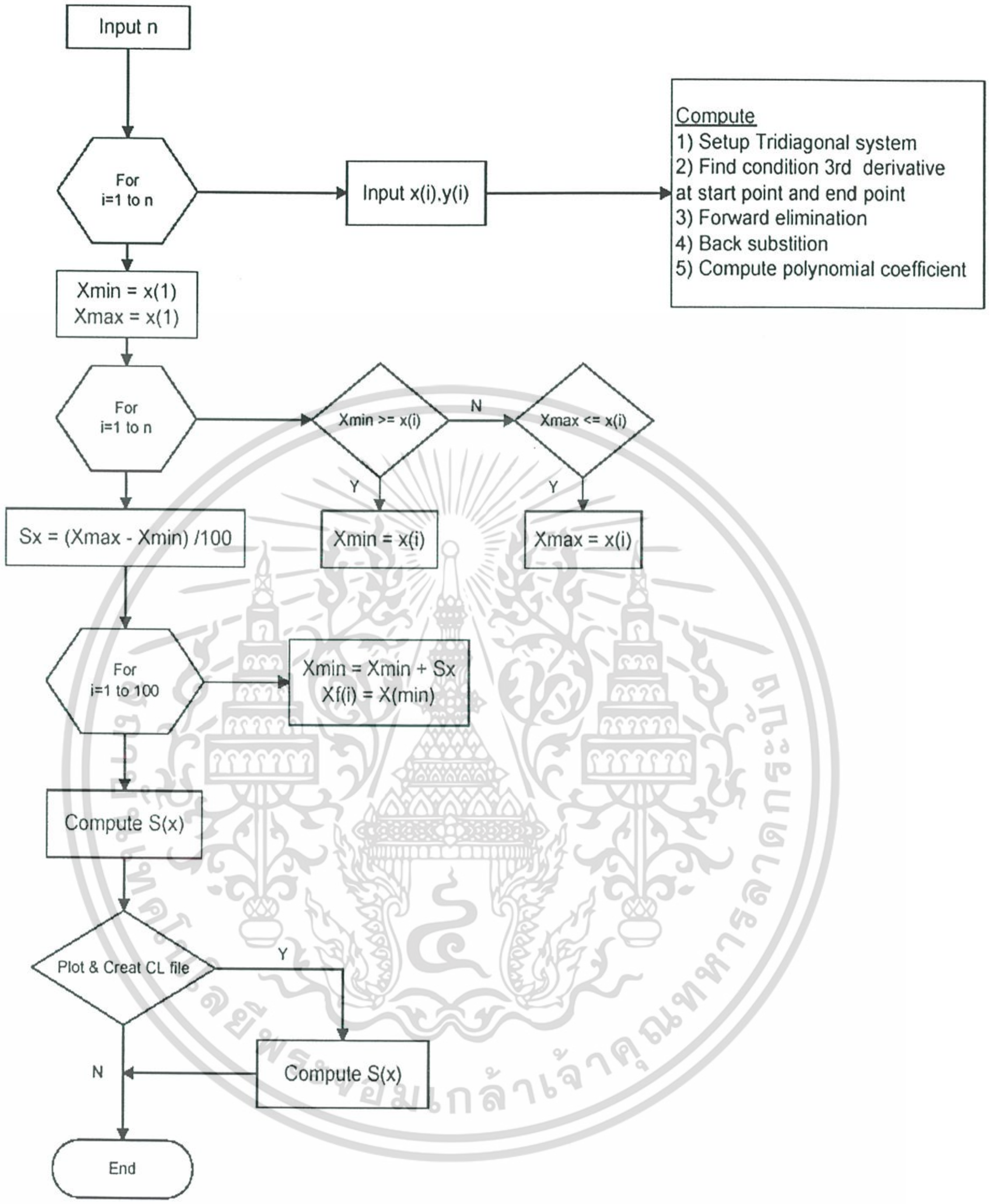
รูปที่ ก.3 แสดงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งพาราโบล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



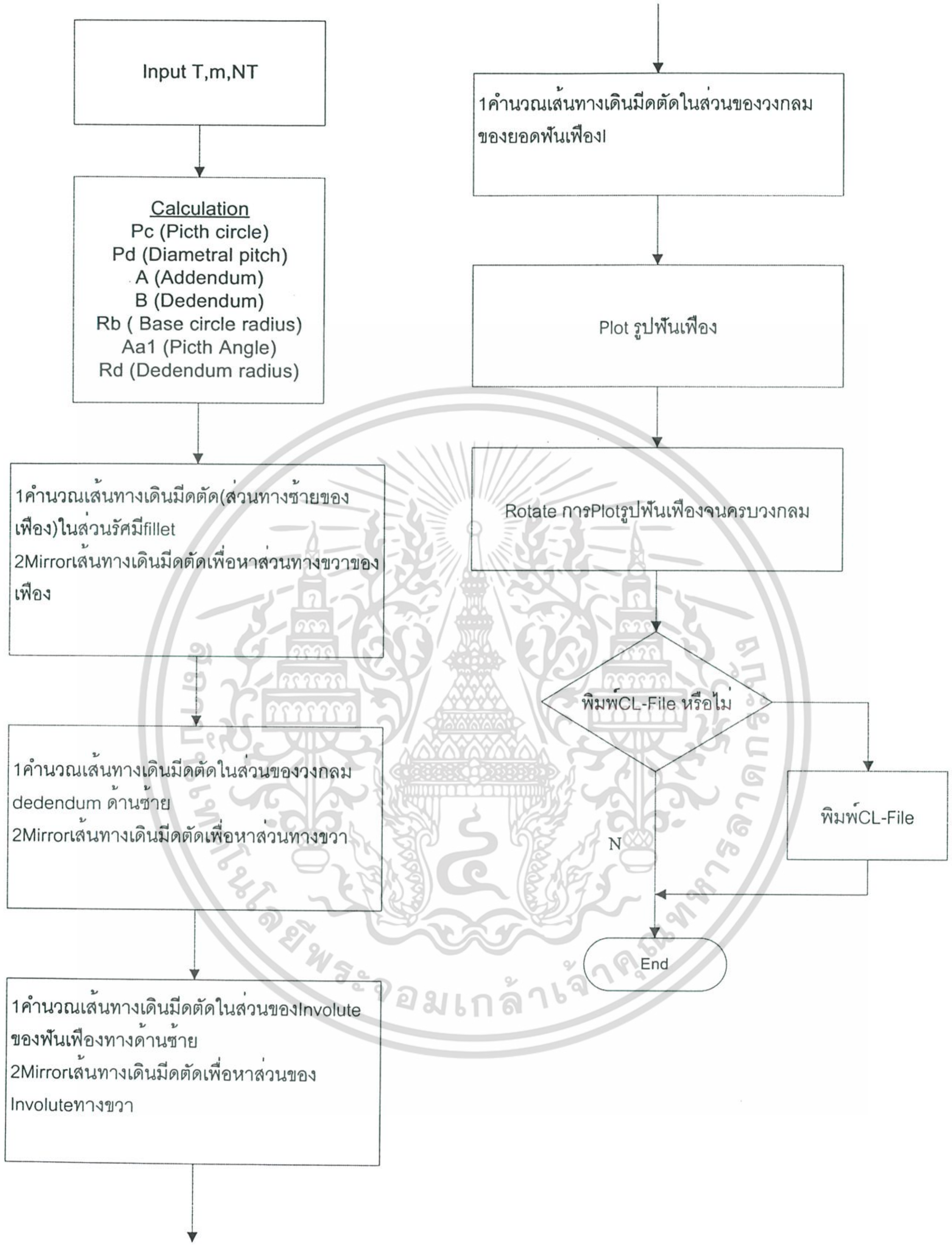
รูปที่ ก.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งไฮเพอร์โบล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งสไปลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของคำสั่งเฟืองตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างโปรแกรมคำสั่งและไฟล์โปรแกรม
ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งเส้นตรง

```
Private Sub Line()


2000: KK = KK1 + 1: JJN = JJN1 + 1: NA(KK, JJN) = 2
      n = NA(KK, JJN)
        X(KK, 1) = X1: Y(KK, 1) = Y1
          X(KK, 2) = X2: Y(KK, 2) = Y2
          G7000
          G8000
End Sub
```

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งวงกลมและวงรี

```
Private Sub CirclePlot()
On Error GoTo Err
3000: Rem CIRCLE
3002:     KK = KK1 + 1: JJN = JJN1 + 1: NA(KK, JJN) = 100
3005:     n = NA(KK, JJN)
3010:     If X2 = X1 Then GoTo 3500
3012:     If (X1 - H) = 0 Then GoTo 3600
3014:     If (X1 - H) < 0 Then GoTo 3800
3016:     If (Y1 - K) <= 0 Then GoTo 3850
3020:     THETA1 = Atn((Y1 - K) / (X1 - H))
3025:     If (X2 - H) = 0 Then GoTo 3700
3026:     If (X2 - H) < 0 Then GoTo 3900
3027:     If (Y2 - K) <= 0 Then GoTo 3950

'K3-Code
3030:     THETA2 = Atn((Y2 - K) / (X2 - H))
3040:     dZeta = THETA2 - THETA1
3050:     dTHETA = dZeta / (n - 1): Zeta1 = THETA1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
3100:   X(KK, 0) = X1: Y(KK, 0) = Y1
3105:   For i = 1 To n
3110:       Zeta2 = Zeta1 + ((i - 1) * dTHETA): T = Zeta2
3120:       X(KK, i) = R1 * Cos(T) + H
3130:       Y(KK, i) = R2 * Sin(T) + K
3150:   Next i
        C7000
        Exit Sub
3500:   If Y2 = Y1 Then THETA0 = 2 * 3.14159: Rem 360 degrees
3510:   dTHETA = THETA0 / (n - 1): Zeta1 = THETA1
3520:   SIGN = 1: GoTo 3100
3530: 'End

3600:   If Y1 > K Then GoTo 3620
3610:   THETA1 = 1.5 * 3.14159: GoTo 3025
3620:   THETA1 = 0.5 * 3.14159: GoTo 3025

3700:   If Y2 > K Then GoTo 3720
3710:   THETA2 = 1.5 * 3.14159: GoTo 3040
3720:   THETA2 = 0.5 * 3.14159: GoTo 3040

3800:   If Y1 - K < 0 Then GoTo 3830
3805:   AAA = Abs((Y1 - K) / (X1 - H))
3810:   THETA1 = (3.14159 - Atn(AAA))
3820:   GoTo 3025

3830:   AAA = Abs((Y1 - K) / (X1 - H))
3835:   THETA1 = (Atn(AAA) + 3.14159)
3840:   GoTo 3025
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
3850:   AAA = Abs((Y1 - K) / (X1 - H))
3860:   THETA1 = ((2 * 3.14159) - Atn(AAA))
3870:   GoTo 3025

3900:   If Y2 - K < 0 Then GoTo 3930
3905:   AAA = Abs((Y2 - K) / (X2 - H))
3910:   THETA2 = (3.14159 - Atn(AAA))
3920:   GoTo 3040

3930:   AAA = Abs((Y2 - K) / (X2 - H))
3935:   THETA2 = (Atn(AAA) + 3.14159)
3940:   GoTo 3040

3950:   AAA = Abs((Y2 - K) / (X2 - H))
3960:   THETA2 = ((2 * 3.14159) - Atn(AAA))
3970:   GoTo 3040
Err:      Exit Sub
End Sub
```

ตัวอย่างการเขียน โปรแกรมคำสั่งพาราโบล่า

```
Private Sub G4000()     '======Parametric  PARABOLA  Equation============
On Error GoTo Err
       KK = KK2 + 1: JJN = JJN2 + 1: NA(KK, JJN) = 100
       n = NA(KK, JJN)
       T1 = (X1 - H) / (2 * p)
       T2 = (X2 - H) / (2 * p)
       DT = (T2 - T1) / (n - 1)
       X(KK, 1) = X1: Y(KK, 1) = Y1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
For i = 2 To n
    XX = 2 * p * (T1 + ((i - 1) * DT))
    YY = p * ((T1 + ((i - 1) * DT)) ^ 2)
    XX1 = XX + H: YY1 = YY + K
    X(KK, i) = XX1: Y(KK, i) = YY1
Next i
G7000
Err:                    Exit Sub
End Sub
```

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งไฮเพอร์โบล่า

```
Private Sub G5000(): 'Rem PARAMETRIC HYPERBOLA
On Error GoTo Err
    If KK = 0 Then KK = KK + 1
    If JJN = 0 Then JJN = JJN + 1
    NA(KK, JJN) = 100
    n = NA(KK, JJN)
    CC1 = (wa ^ 2) + (WB ^ 2): WC = Sqr(CC1)
    P1 = (Y1 - K) / WB: T1 = Atn(P1)
    P2 = (Y2 - K) / WB: T2 = Atn(P2)
    DT = (T2 - T1) / (n - 1)
    X(KK, 1) = X1: Y(KK, 1) = Y1
    For i = 2 To n
        Xi1 = wa / Cos(T1 + ((i - 1) * DT))
        Yi1 = WB * Tan(T1 + ((i - 1) * DT))
        XX1 = Xi1 + H: YY1 = Yi1 + K
        X(KK, i) = XX1: Y(KK, i) = YY1
    Next i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        G7000
Err:                Exit Sub
End Sub
```

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งสไปลน์

```
Public Sub Sp1500()
n = txtN.Text
Xmin = flng_Min
Xmax = flng_Max
MsgBox "n " & n
If n < 1 Or n > 100 Then End
   For i = 1 To n
         Xxi(i) = Fg_SplineInput.TextMatrix(i, 1)
         Yxi(i) = Fg_SplineInput.TextMatrix(i, 2)
   Next i
   Coefficients
   G1000
   G7000
   G8000
End Sub

Private Sub Coefficients()
10  Rem PROGRAM FOR PARAMETRIC CUBIC SPLINE
122  Rem  SUBROUTINE SPLINE
130  NM1 = n - 1
140  If n < 2 Then End
150  If n < 3 Then
560       Bxi(1) = (Yxi(2) - Yxi(1)) / (Xxi(2) - Xxi(1))
570       Cxi(1) = 0
580       Dxi(1) = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
590     Bxi(2) = Bxi(1)
600     Cxi(2) = 0
610     Dxi(2) = 0
        InputData
  End If
  If n >= 3 Then
160  Rem SET UP TRIDIAGONAL SYSTEM
170  Rem Bxi=DIAGONAL,Dxi=OFFDIAGONAL,Cxi =RIGHT HAND SIDE
180  Dxi(1) = Xxi(2) - Xxi(1)
190  Cxi(2) = (Yxi(2) - Yxi(1)) / Dxi(1)
200  For i = 2 To NM1
210  Dxi(i) = Xxi(i + 1) - Xxi(i)
220  Bxi(i) = 2 * (Dxi(i - 1) + Dxi(i))
230  Cxi(i + 1) = (Yxi(i + 1) - Yxi(i)) / Dxi(i)
240  Cxi(i) = Cxi(i + 1) - Cxi(i)
250  Next i
260  Rem  CONDITIONS, THIRD DERIVATIVE AT Xxi(1) AND Xxi(N)
270  Bxi(1) = -Dxi(1)
280  Bxi(n) = -Dxi(n - 1)
290  Cxi(1) = 0
300 Cxi(n) = 0
310  If (n = 3) Then GoTo 370
320  Cxi(1) = Cxi(3) / (Xxi(4) - Xxi(2)) - Cxi(2) / (Xxi(3) - Xxi(1))
330 Cxi(n) = Cxi(n - 1) / (Xxi(n) - Xxi(n - 2)) - Cxi(n - 2) / (Xxi(n - 1) - Xxi(n - 3))
340 Cxi(1) = Cxi(1) * Dxi(1) ^ 2 / (Xxi(4) - Xxi(1))
350 Cxi(n) = -Cxi(n) * (Dxi(n - 1) ^ 2) / (Xxi(n) - Xxi(n - 3))
360  Rem FORWARD ELIMINATION
370 For i = 2 To n
380  T = Dxi(i - 1) / Bxi(i - 1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
390  Bxi(i) = Bxi(i) - T * Dxi(i - 1)
400  Cxi(i) = Cxi(i) - T * Cxi(i - 1)
405  Next i
410   Rem BACK SUBSTITUTION
420  Cxi(n) = Cxi(n) / Bxi(n)
430  For IB = 1 To NM1
440  i = n - IB
450  Cxi(i) = (Cxi(i) - Dxi(i) * Cxi(i + 1)) / Bxi(i)
460  Next IB
470  Rem COMPUTE POLYNOMIAL COEFFICIENTS
480  Bxi(n) = (Yxi(n) - Yxi(NM1)) / Dxi(NM1) + Dxi(NM1) * (Cxi(NM1) + 2 * Cxi(n))
490  For i = 1 To NM1
500  Bxi(i) = (Yxi(i + 1) - Yxi(i)) / Dxi(i) - Dxi(i) * (Cxi(i + 1) + 2 * Cxi(i))
510  Dxi(i) = (Cxi(i + 1) - Cxi(i)) / Dxi(i)
515  Cxi(i) = 3 * Cxi(i)
520 Next i
530 Cxi(n) = 3 * Cxi(n)
540 Dxi(n) = Dxi(n - 1)
   InputData
   End If
   End Sub

Private Sub InputData()
75   XMIN1 = flng_Min
MsgBox "Xmin " & flng_Min
80  SX = (flng_Max - flng_Min) / 100
83  For i = 1 To 100
84  XMIN1 = XMIN1 + SX
85  Xf(i) = XMIN1
88  Next i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
89  Xf(0) = Xmin
   Evaluates
End Sub


Private Sub Evaluates()
Dim Dx(101) As Variant
Dim S(101) As Variant
640  Rem SUBROTINE FOR EVALUATES CUBIC SPLINE FUNCTION
   KK = 1
641   For Z = 0 To 100
642           Uxi(Z) = Xf(Z)
650  If i >= n Then i = 1
660  If Uxi(Z) < Xxi(i) Then GoTo 680
670  If Uxi(Z) <= Xxi(i + 1) Then GoTo 740
680 i = 1
690 J = n + 1
700 K = (i + J) / 2
710 If (Uxi(Z) < Xxi(K)) Then J = K
720 If (Uxi(Z) >= Xxi(K)) Then i = K
730 If (J > i + 1) Then GoTo 700
740 Dx(Z) = Uxi(Z) - Xxi(i)
750 S(Z) = Yxi(i) + Dx(Z) * (Bxi(i) + Dx(Z) * (Cxi(i) + Dx(Z) * Dxi(i)))
   X(KK, i) = Uxi(Z)
   Y(KK, i) = S(Z)
   KK = KK + 1
752   Next Z
     JJN = KK
  End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งเฟืองตรง

```
Public Sub G10000() 'Rem   *PROGRAM GEAR*
On Error GoTo Err
P1 = 3.141593 / 180:  Picture1.Cls
FixCoordinates
T = Round(TgT.Text, 3): 'INPUT "PRESSURE ANGLE = "; T
Md = Round(TgMd.Text, 3): 'INPUT "MODULE = "; m
NT = Round(TgNT.Text, 3): 'INPUT "NUMBER OF TEETH ="; NT
PC = 3.141593 * Md
Pd = 3.141593 / PC
D = Md * NT
A = 1 / Pd
B = 1.25 / Pd
R1 = D / 2
Rb = R1 * Cos(T * P1)
Ra = R1 + A
Rd = R1 - B
Aa1 = 360 / NT
Aa2 = Aa1 / 4
A1 = 90 + Aa2: A2 = 60
A3 = (A1 - A2) / 100
xadj = 1     'X-adjusting coeff.
adj = 1     'Y-adjusting coeff.
DLtime = 1000
G13200
G17000
G15000: G18000: G10899
Err:    Exit Sub
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
' Rem * SUBROUTINE INVOLU - PLOTS GEAR TOOTH INVOLUTE*
Private Sub G13200()
On Error GoTo Err
NG = 255: Sgp = 0: KGp = 1
KKG = (90 + Aa2)
Tp1(1) = R1 * Cos(KKG * P1)
Tp2(1) = R1 * Sin(KKG * P1)
For J = 1 To NG
            Sgp = Sgp + 1: KGp = KGp + 1
            A4 = A1 - (J - 1) * A3
            L = R1 * 0.017453 * (J - 1) * A3
            If KGp <= NG Then
                Tp1(KGp) = Rb * Cos(A4 * P1) - L * Cos((A4 - 90) * P1)
                Tp2(KGp) = Rb * Sin(A4 * P1) - L * Sin((A4 - 90) * P1)
                XX = Tp1(KGp): YY = Tp2(KGp)
                rr = Sqr((XX * XX) + (YY * YY))
                rr1 = rr - R1
                rr2 = R1 - rr1
                If rr2 <= Rb Then G13300
            Else
                Exit Sub
            End If
Next J
Err:      Exit Sub
End Sub
Private Sub G17000()
On Error GoTo Err
ss = 2 * Sg
For i = 1 To Sg
    w = ss + 1
    T3(w - i) = -T3(i)
    T4(w - i) = T4(i)
Next i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Err:        Exit Sub
End Sub
Private Sub G15000() 'Rem  * SUBROUTINE CIRCLE *" Part of Gear
ANG = 2 * Aa2
ANG1 = ANG / 20
For J = 1 To 19 Step 1
    JJ = (A10) + (ANG1 * J)
    DDX3(J) = (Rd * Cos(JJ * P1))
    DDY3(J) = (Rd * Sin(JJ * P1))
Next J
Err:        Exit Sub
End Sub
Private Sub G18000()
'18000 ------------------------
  AB1 = Aa2 / 2: Rfillet = Rd * Sin(AB1 * P1)
  ABG1 = AB1 / 10
  Rf1 = Rd + Rfillet: JJ1 = 90 + Aa2
  DDX4 = Rf1 * Cos(JJ1 * P1): DDX3(1) = DDX4
  DDY4 = Rf1 * Sin(JJ1 * P1): DDY3(1) = DDY4
  H401 = DDX4 - (Rfillet * Cos(Aa2 * P1))
  K401 = DDY4 - (Rfillet * Sin(Aa2 * P1))
  ABG2 = (90 / 10): NJ3 = 1
  For J = 2 To 10
    NJ3 = NJ3 + 1
    JJ3 = Aa2 - (J * ABG2)
    DDX5 = Rfillet * Cos(JJ3 * P1)
    DDY5 = Rfillet * Sin(JJ3 * P1)
    DDX3(NJ3) = DDX5 + H401
    DDY3(NJ3) = DDY5 + K401
    'Print NJ3; "  "; DDX3(NJ3); ","; DDY3(NJ3),
    'Picture1.PSet (Q1(ss), Q2(ss)), RGB(215, 0, 215)
  Next J
  For i = 2 To 21
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        NJ3 = NJ3 + 1
        II3 = (90 + (1.5 * Aa2)) + (ABG1 * (i - 1))
        DDX3(NJ3) = Rd * Cos(II3 * P1)
        DDY3(NJ3) = Rd * Sin(II3 * P1)
        'Print NJ3; "  "; DDX3(NJ3); ","; DDY3(NJ3),
    Next i
    Aa3 = 3 * Aa2: JJ2 = 90 + Aa3
    DDX4 = Rf1 * Cos(JJ2 * P1)
    DDY4 = Rf1 * Sin(JJ2 * P1)
    H402 = DDX4 + (Rfillet * Cos(Aa3 * P1))
    K402 = DDY4 + (Rfillet * Sin(Aa3 * P1))
    For J = 2 To 10
        NJ3 = NJ3 + 1
        JJ3 = ((2 * Aa2) - 90) - (J * ABG2)
        DDX5 = Rfillet * Cos(JJ3 * P1)
        DDY5 = Rfillet * Sin(JJ3 * P1)
        DDX3(NJ3) = DDX5 + H402
        DDY3(NJ3) = DDY5 + K402
Next J
NJ3 = NJ3 + 1
X1 = -DDX6
 Y1 = DDY6
DDX3(NJ3) = Cos(Aa1 * P1) * X1 - Sin(Aa1 * P1) * Y1
DDY3(NJ3) = Sin(Aa1 * P1) * X1 + Cos(Aa1 * P1) * Y1
End Sub
Private Sub G10899() '----------PLOT GEAR -------------
On Error GoTo Err
  FixCoordinates
  KK = KK + 1: NNG = 0
  n = 300
  For i = 1 To ss
  '     NNG = NNG + 1
          Q1(i) = T3(i)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Q11 = Q1(i) * 1000
        Q12 = Int(Q11)
        Q13 = Q12 / 1000
        Q1(i) = Q13
        Q2(i) = T4(i)
        Q21 = Q2(i) * 1000
        Q22 = Int(Q21)
        Q23 = Q22 / 1000
        Q2(i) = Q23
    Next i
    Picture1.PSet (Q1(ss), Q2(ss)), RGB(215, 0, 215)
      For K = ss To 1 Step -1
        '-----------------------------------------------
        NNG = NNG + 1: X(KK, NNG) = Q1(K): Y(KK, NNG) = Q2(K)
        Xi1 = Q1(K): Yi1 = Q2(K)
       Next K
    For II = 1 To 43
       Q3(II) = DDX3(II)
       Q31 = Q3(II) * 1000
       Q32 = Int(Q31)
       Q33 = Q32 / 1000
       Q3(II) = Q33
       Q4(II) = DDY3(II)
       Q41 = Q4(II) * 1000
       Q42 = Int(Q41)
       Q43 = Q42 / 1000
       Q4(II) = Q43
    Next II
       Picture1.PSet (Q3(1), Q4(1)), RGB(215, 0, 215)
       For KKG = 1 To 43
            Xi1 = Q3(KKG): Yi1 = Q4(KKG)
            '-----------------------------------------------
            NNG = NNG + 1: X(KK, NNG) = Q3(KKG): Y(KK, NNG) = Q4(KKFG)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Next KKG
If NNG > n Then GoTo G12000
        XXG = X(KK, NNG): YYG = Y(KK, NNG): NG2 = n - NNG: NNG2 = NNG
For i = 1 To NG2
        NNG3 = NNG2 + i: X(KK, NNG3) = XXG: Y(KK, NNG3) = YYG
Next i
        X(KK, n) = XXG: Y(KK, n) = YYG
G12000: For C3 = Aa1 To 360 Step Aa1
    KK = KK + 1: NNG = 0
    n = 300
    For i = 1 To ss
        X1 = T3(i)
        Y1 = T4(i)
        G16500
        Q1(i) = X2
        Q11 = Q1(i) * 1000
        Q12 = Int(Q11)
        Q13 = Q12 / 1000
        Q1(i) = Q13
        Q2(i) = Y2
        Q21 = Q2(i) * 1000
        Q22 = Int(Q21)
        Q23 = Q22 / 1000
        Q2(i) = Q23
    Next i
    For K = ss To 1 Step -1
        'Print #iFileNum, ss; KK; NNG; Chr$(13)
        'Picture1.Line -(xadj * Q1(K), adj * Q2(K))
        '-----------------------------------------------------
        NNG = NNG + 1: X(KK, NNG) = Q1(K): Y(KK, NNG) = Q2(K)
        Xi1 = Q1(K): Yi1 = Q2(K)
        'If Xi1 <> 0 Then X9 = (Xi1)
        'If Yi1 <> 0 Then Y9 = (Yi1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            'Picture1.Line -(X9, Y9), RGB(215, 0, 215)
            For m = 1 To DLtime: Next m
        Next K
        For II = 1 To 43
             X1 = DDX3(II)
             Y1 = DDY3(II)
              G16500
             Q3(II) = X2
             Q31 = Q3(II) * 1000
             Q32 = Int(Q31)
             Q33 = Q32 / 1000
             Q3(II) = Q33
             Q4(II) = Y2
             Q41 = Q4(II) * 1000
             Q42 = Int(Q41)
             Q43 = Q42 / 1000
             Q4(II) = Q43
        Next II

        For KKG = 1 To 43
               Xi1 = Q3(KKG): Yi1 = Q4(KKG)
               '-----------------------------------------------------
               NNG = NNG + 1: X(KK, NNG) = Q3(KKG): Y(KK, NNG) = Q4(KKG)
        Next KKG
            If NNG >= n Then GoTo G12500
               XXG = X(KK, NNG): YYG = Y(KK, NNG): NG2 = (n - NNG)
            For i = 1 To NG2
               NNG = NNG + 1: X(KK, NNG) = XXG: Y(KK, NNG) = YYG
            Next i
G12500: Next C3
Err:    Exit Sub
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างไฟล์โปรแกรมที่ได้จากการทดลองหัวข้อ5.2

```
'C:\face
' Program for Line , conic curve
'N101  G01  X-60.000  Y0.000  Z-3
N102  G01  X-60  Y0  Z-3
N103  G01  X-58.788  Y-1.455  Z-3
N104  G01  X-57.576  Y-4.660  Z-3
N105  G01  X-56.364  Y-7.799  Z-3
N106  G01  X-55.152  Y-10.871  Z-3
N107  G01  X-53.940  Y-13.876  Z-3
N108  G01  X-52.728  Y-16.815  Z-3
N109  G01  X-51.516  Y-19.687  Z-3
N110  G01  X-50.304  Y-22.492  Z-3
N111  G01  X-49.091  Y-25.230  Z-3
N112  G01  X-47.879  Y-27.901  Z-3
N113  G01  X-46.667  Y-30.506  Z-3
N114  G01  X-45.455  Y-33.043  Z-3
N115  G01  X-44.243  Y-35.514  Z-3
N116  G01  X-43.031  Y-37.919  Z-3
N117  G01  X-41.819  Y-40.256  Z-3
N118  G01  X-40.607  Y-42.527  Z-3
N119  G01  X-39.394  Y-44.730  Z-3
N120  G01  X-38.182  Y-46.868  Z-3
N121  G01  X-36.970  Y-48.938  Z-3
N122  G01  X-35.758  Y-50.941  Z-3
N123  G01  X-34.546  Y-52.878  Z-3
N124  G01  X-33.334  Y-54.748  Z-3
N125  G01  X-32.122  Y-56.551  Z-3
N126  G01  X-30.910  Y-58.288  Z-3
...........................................................
...........................................................
N285  G01  X12.727  Y-65.951  Z-3
N286  G01  X13.131  Y-65.690  Z-3
N287  G01  X13.535  Y-65.420  Z-3
N288  G01  X13.939  Y-65.143  Z-3
N289  G01  X14.343  Y-64.857  Z-3
N290  G01  X14.747  Y-64.563  Z-3
N291  G01  X15.151  Y-64.261  Z-3
N292  G01  X15.555  Y-63.951  Z-3
N293  G01  X15.959  Y-63.633  Z-3
N294  G01  X16.363  Y-63.306  Z-3
N295  G01  X16.767  Y-62.972  Z-3
N296  G01  X17.171  Y-62.629  Z-3
N297  G01  X17.575  Y-62.278  Z-3
N298  G01  X17.979  Y-61.919  Z-3
N299  G01  X18.383  Y-61.551  Z-3
N300  G01  X18.787  Y-61.176  Z-3
N301  G01  X19.191  Y-60.792  Z-3
N302  G01  X19.595  Y-60.400  Z-3
N303  G01  X20.000  Y-60.000  Z-3
N304  G01  X20  Y-60  Z-3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างไฟล์โปรแกรมที่ได้จากการทดลองหัวข้อ5.3

```
'C:\spline
N101 G01 X108.000 Y0 Z-3
N102 G01 X107.946 Y-3.427 Z-3
N103 G01 X107.783 Y-6.85 Z-3
N104 G01 X107.511 Y-10.266 Z-3
N105 G01 X107.131 Y-13.672 Z-3
N106 G01 X106.643 Y-17.064 Z-3
N107 G01 X106.048 Y-20.439 Z-3
N108 G01 X105.346 Y-23.794 Z-3
N109 G01 X104.538 Y-27.124 Z-3
N110 G01 X103.625 Y-30.427 Z-3
N111 G01 X102.608 Y-33.7 Z-3
N112 G01 X101.487 Y-36.938 Z-3
N113 G01 X100.264 Y-40.14 Z-3
N114 G01 X98.940 Y-43.3 Z-3
N115 G01 X97.516 Y-46.418 Z-3
N116 G01 X95.994 Y-49.488 Z-3
N117 G01 X94.376 Y-52.509 Z-3
N118 G01 X92.662 Y-55.477 Z-3
N119 G01 X90.855 Y-58.389 Z-3
N120 G01 X88.957 Y-61.242 Z-3
N121 G01 X86.969 Y-64.034 Z-3
N122 G01 X84.894 Y-66.761 Z-3
N123 G01 X82.733 Y-69.421 Z-3
N124 G01 X80.489 Y-72.011 Z-3
N125 G01 X78.163 Y-74.528 Z-3
N126 G01 X75.759 Y-76.971 Z-3
N127 G01 X73.279 Y-79.336 Z-3
N128 G01 X70.725 Y-81.621 Z-3
N129 G01 X68.100 Y-83.824 Z-3
N132 G01 X59.823 Y-89.917 Z-3
.................................
.................................
N272 G01 X44.727 Y61.293 Z-3
N273 G01 X46.909 Y61.695 Z-3
N274 G01 X49.090 Y62.009 Z-3
N275 G01 X51.272 Y62.224 Z-3
N276 G01 X53.454 Y62.329 Z-3
N277 G01 X55.636 Y62.316 Z-3
N278 G01 X57.818 Y62.174 Z-3
N279 G01 X60.000 Y61.892 Z-3
N280 G01 X62.181 Y61.461 Z-3
N281 G01 X64.363 Y60.871 Z-3
N282 G01 X66.545 Y60.111 Z-3
N283 G01 X68.727 Y59.171 Z-3
N284 G01 X70.909 Y58.041 Z-3
N285 G01 X73.090 Y56.711 Z-3
N286 G01 X75.272 Y55.171 Z-3
N287 G01 X77.454 Y53.411 Z-3
N288 G01 X79.636 Y51.42 Z-3
N289 G01 X81.818 Y49.189 Z-3
N290 G01 X84.000 Y46.708 Z-3
N291 G01 X86.181 Y43.965 Z-3
N292 G01 X88.363 Y40.952 Z-3
N293 G01 X90.545 Y37.659 Z-3
N294 G01 X92.727 Y34.074 Z-3
N295 G01 X94.909 Y30.189 Z-3
N296 G01 X97.090 Y25.993 Z-3
N297 G01 X99.272 Y21.476 Z-3
N298 G01 X101.454 Y16.628 Z-3
N299 G01 X103.636 Y11.44 Z-3
N300 G01 X105.818 Y5.9 Z-3
N301 G01 X108.000 Y-.001 Z-3
N302 G01 X108 Y-.001 Z-3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างไฟล์โปรแกรมที่ได้จากการทดลองหัวข้อ5.4

c:\Z16M5P20

N 101	G01	X 7.568	Y 32.89
N 102	G01	X 7.568	Y 32.89
Z 0			
N 103	G01	X 7.195	Y 32.973
N 104	G01	X 6.822	Y 33.053
N 105	G01	X 6.448	Y 33.128
N 106	G01	X 6.073	Y 33.199
N 107	G01	X 5.697	Y 33.265
N 108	G01	X 5.32	Y 33.327
N 109	G01	X 5.05	Y 33.392
N 110	G01	X 5.05	Y 33.392
N 111	G01	X 5.05	Y 33.392
N 112	G01	X 5.05	Y 33.392
N 113	G01	X 5.05	Y 33.392
N 114	G01	X 4.858	Y 33.43
N 115	G01	X 4.674	Y 33.497
N 116	G01	X 4.502	Y 33.592
N 117	G01	X 4.347	Y 33.713
N 118	G01	X 4.214	Y 33.856
N 119	G01	X 4.104	Y 34.019
N 120	G01	X 4.021	Y 34.196
N 121	G01	X 3.967	Y 34.385
N 122	G01	X 3.943	Y 34.579
………………………………………………			
N 4330	G01	X 10.377	Y 36.139
N 4331	G01	X 10.374	Y 36.134
N 4332	G01	X 10.374	Y 36.13
N 4333	G01	X 10.373	Y 36.128
N 4334	G01	X 10.372	Y 36.127
N 4335	G01	X 10.372	Y 36.127
N 4336	G01	X 9.658	Y 33.64
N 4337	G01	X 9.59	Y 33.456
N 4338	G01	X 9.493	Y 33.286
N 4339	G01	X 9.371	Y 33.132
N 4340	G01	X 9.226	Y 33
N 4341	G01	X 9.063	Y 32.891
N 4342	G01	X 8.884	Y 32.81
N 4343	G01	X 8.695	Y 32.758
N 4344	G01	X 8.5	Y 32.736
N 4345	G01	X 8.304	Y 32.744
N 4346	G01	X 8.112	Y 32.783
N 4347	G01	X 8.112	Y 32.783
N 4348	G01	X 8.112	Y 32.783
N 4349	G01	X 8.112	Y 32.783
N 4350	G01	X 8.112	Y 32.783
N 4351	G01	X 7.837	Y 32.826
N 4352	G01	X 7.465	Y 32.913
N 4353	G01	X 7.093	Y 32.996
N 4354	G01	X 6.719	Y 33.074
N 4355	G01	X 6.345	Y 33.148
N 4356	G01	X 5.969	Y 33.216
N 4357	G01	X 5.593	Y 33.282
N 4358	G01	X 5.593	Y 33.282

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ตารางค่ามาตรฐานต่างๆของเฟืองตรง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 สัดส่วนฟันของมีดตัดฟันเฟืองมาตรฐานของระบบมาตรฐานเกียร์อินเวอลูท

Tooth parameter (of basic rack)	Symbol, Figs. 8.3.1*a* and 8.3.2	Tooth proportions for various standard systems					
		1	2	3	4	5	6
		Full-depth involute, 14½°	Full-depth involute, 20°	Stub involute, 20°	Coarse-pitch involute spur gears, 20°	Coarse-pitch involute spur gears, 25°	Fine-pitch involute, 20°
1. System sponsors		ANSI and AGMA	ANSI	ANSI and AGMA	AGMA	AGMA	ANSI and AGMA
2. Pressure angle	ϕ	14½°	20°	20°	20°	25°	20°
3. Addendum	a	$1/P_d$	$1/P_d$	$0.8/P_d$	$1.000/P_d$	$1.000/P_d$	$1.000/P_d$
4. Min dedendum	b	$1.157/P_d$	$1.157/P_d$	$1/P_d$	$1.250/P_d$	$1.250/P_d$	$1.200/P_d + 0.002$
5. Min whole depth	h_t	$2.157/P_d$	$2.157/P_d$	$1.8/P_d$	$2.250/P_d$	$2.250/P_d$	$2.2002/P_d$ 0.002 in
6. Working depth	h_k	$2/P_d$	$2/P_d$	$1.6/P_d$	$2.000/P_d$	$2.000/P_d$	$2.000/P_d$
7. Min clearance	h_c	$0.157/P_d$	$0.157/P_d$	$0.200/P_d$	$0.250/P_d$	$0.250/P_d$	$0.200/P_d + 0.002$ in
8. Basic circular tooth thickness on pitch line	t	$1.5708/P_d$	$1.5708/P_d$	$1.5708/P_d$	$\pi/(2P_d)$	$\pi/(2P_d)$	$1.5708/P_d$
9. Fillet radius in basic rack	r_f	1⅓ × clearance	1½ × clearance	Not standardized	$0.300/P_d$	$0.300/P_d$	Not standardized
10. Diametral pitch range		Not specified	Not specified	Not specified	19.99 and coarser	19.99 and coarser	20 and finer
11. Governing standard:							
ANSI		B6.1	B6.1	B6.1			
AGMA		201.02		201.02	201.02	201.02	1,003–G93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 เทียบค่ามาตรฐานเฟืองระบบเมตริก กับระบบอเมริกา

Diametral pitch P_d	Module m	Circular pitch		Circular tooth thickness		Addendum	
		in	mm	in	mm	in	mm
1/2	50.8000	6.2832	159.593	3.1416	79.7965	2.0000	50.8000
0.5080	50	6.1842	157.080	3.0921	78.5398	1.9685	50
0.5644	45	5.5658	141.372	2.7850	70.6858	1.7730	45
0.6048	42	5.1948	131.947	2.5964	65.9734	1.6529	42
0.6513	39	4.8237	122.522	2.4129	61.2610	1.5361	39
0.7056	36	4.4527	113.097	2.2249	56.5487	1.4164	36
3/4	33.8667	4.1888	106.396	2.0943	53.1977	1.3333	33.8667
0.7697	33	4.0816	103.673	2.0400	51.8363	1.2987	33
0.8467	30	3.7105	94.248	1.8545	47.1239	1.1806	30
0.9407	27	3.3395	84.823	1.6693	42.4115	1.0627	27
1	25.4000	3.1416	79.800	1.5708	39.8984	1.0000	25.4001
1.0583	24	2.9685	75.398	1.4847	37.6991	0.9452	24
1.1546	22	2.7210	69.115	1.3600	34.5575	0.8658	22
1.2700	20	2.4737	62.832	1.2368	31.4159	0.7874	20
1.4111	18	2.2263	56.548	1.1132	28.2743	0.7087	18
1.5	16.9333	2.0944	53.198	1.0472	26.5988	0.6667	16.933
1.5875	16	1.9790	50.267	0.9894	25.1327	0.6299	16
1.8143	14	1.7316	43.983	0.8658	21.9911	0.5512	14
2	12.7000	1.5708	39.898	0.7854	19.949	0.5000	12.7000
2.1167	12	1.4842	37.699	0.7420	18.8496	0.4724	12
2.5	10.1600	1.2566	31.918	0.6283	15.9593	0.4000	10.1600
2.5400	10	1.2368	31.415	0.6184	15.7080	0.3937	10
2.8222	9	1.1132	28.275	0.5565	14.1372	0.3543	9
3	8.4667	1.0472	26.599	0.5235	13.2995	0.3333	8.4667
3.1416	8.0851	1.0000	25.400	0.5000	12.7000	0.3183	0.0851
3.1750	8	0.9895	25.133	0.4948	12.5664	0.3150	8.00
3.5	7.2571	0.8976	22.799	0.4488	11.3994	0.2857	7.2571
3.6286	7	0.8658	21.991	0.4329	10.9956	0.2756	7.000
3.9078	6.5	0.8039	20.420	0.4020	10.2101	0.2559	6.5
4	6.3500	0.7854	19.949	0.3927	9.9746	0.2500	6.3500
4.2333	6	0.7421	18.850	0.3710	9.4248	0.2362	6.0000
4.6182	5.5	0.6803	17.279	0.3401	8.6394	0.2165	5.5
5	5.0801	0.6283	15.959	0.3142	7.9794	0.2000	5.080
5.0802	5	0.6184	15.707	0.3092	7.8537	0.1968	5.000
5.3474	4.75	0.5875	14.923	0.2938	7.4612	0.1870	4.750
5.6444	4.5	0.5566	14.138	0.2783	7.0688	0.1772	4.500
6	4.2333	0.5236	13.299	0.2618	6.6497	0.1667	4.233
6.3500	4	0.4947	12.565	0.2473	6.2827	0.1575	4.000
6.7733	3.75	0.4638	11.781	0.2319	5.8903	0.1476	3.750
7	3.6286	0.4488	11.399	0.2244	5.6998	0.1429	3.629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Diametral pitch P_d	Module m	Circular pitch		Circular tooth thickness		Addendum	
		in	mm	in	mm	in	mm
7.2571	3.5	0.4329	10.996	0.2164	5.4979	0.1378	3.500
7.8154	3.25	0.4020	10.211	0.2010	5.1054	0.1279	3.250
8	3.1750	0.3927	9.974	0.1964	4.9886	0.1250	3.175
8.4667	3	0.3711	9.426	0.1855	4.7130	0.1181	3.000
9	2.8222	0.3491	8.867	0.1745	4.4323	0.1111	2.822
9.2364	2.75	0.3401	8.639	0.1700	4.3193	0.1082	2.750
10	2.5400	0.3142	7.981	0.1571	3.9903	0.1000	2.540
10.1600	2.50	0.3092	7.854	0.1546	3.9268	0.0984	2.500
11	2.3091	0.2856	7.254	0.1428	3.6271	0.0909	2.309
11.2889	2.25	0.2783	7.069	0.1391	3.5344	0.0886	2.250
12	2.1167	0.2618	6.646	0.1309	3.3325	0.0833	2.117
12.7000	2	0.2474	6.284	0.1236	3.1420	0.0787	2.000
13	1.9538	0.2417	6.139	0.1208	3.0696	0.0769	1.954
14	1.8143	0.2244	5.700	0.1122	2.8500	0.0714	1.814
14.5143	1.75	0.2164	5.497	0.1082	2.7489	0.0689	1.750
15	1.6933	0.2094	5.319	0.1047	2.6599	0.0667	1.693
16	1.5875	0.1964	4.986	0.0982	2.4936	0.0625	1.587
16.9333	1.5	0.1855	4.712	0.0927	2.3562	0.0591	1.500
18	1.4111	0.1745	4.432	0.0873	2.2166	0.0556	1.411
20	1.2700	0.1571	3.990	0.0785	1.9949	0.0500	1.270
20.3200	1.25	0.1546	3.927	0.0773	1.9635	0.0492	1.250
22	1.1545	0.1428	3.627	0.0714	1.8136	0.0455	1.155
24	1.0583	0.1309	3.325	0.0655	1.6624	0.0417	1.058
25.4000	1	0.1237	3.142	0.0618	1.5708	0.0394	1.000
28	0.90701	0.1122	2.850	0.0561	1.4249	0.0357	0.9071
28.2222	0.9	0.1113	2.827	0.0556	1.4137	0.0354	0.9000
30	0.84667	0.1047	2.659	0.0524	1.3329	0.0333	0.8467
31.7500	0.8	0.0989	2.513	0.04945	1.2566	0.0315	0.8000
32	0.79375	0.0982	2.494	0.04909	1.2468	0.0313	0.7937
33.8667	0.75	0.0928	2.357	0.04638	1.1781	0.0295	0.7500
36	0.70556	0.0873	2.217	0.04363	1.1083	0.0278	0.7056
36.2857	0.7	0.0865	2.199	0.04325	1.0996	0.0276	0.7000
40	0.63500	0.0785	1.994	0.03927	0.9975	0.0250	0.6350
42.3333	0.6	0.0742	1.885	0.03710	0.9423	0.0236	0.6000
44	0.57727	0.0714	1.814	0.03570	0.9068	0.0227	0.5773
48	0.52917	0.0655	1.661	0.03272	0.8311	0.0208	0.5292
50	0.50800	0.0628	1.595	0.03141	0.7976	0.0200	0.5080
50.8000	0.5	0.06184	1.5707	0.03092	0.7854	0.0197	0.5000
63.5000	0.4	0.04947	1.2565	0.02473	0.6283	0.0157	0.4000
64	0.39688	0.04909	1.2469	0.02454	0.6234	0.0156	0.3969
67.7333	0.375	0.04638	1.1781	0.02319	0.5890	0.0148	0.3750
72	0.35278	0.04363	1.1082	0.02182	0.5541	0.0139	0.3528
72.5714	0.35	0.04329	1.0996	0.02164	0.5498	0.0138	0.3500
78.1538	0.325	0.04020	1.0211	0.02010	0.5105	0.0128	0.3250
80	0.31750	0.03927	0.9975	0.01964	0.4987	0.0125	0.3175
84.6667	0.3	0.03711	0.9426	0.01856	0.4713	0.0118	0.3000
92.3636	0.275	0.03401	0.8639	0.01700	0.4319	0.0108	0.2750
96	0.26458	0.03272	0.8311	0.01636	0.4156	0.0104	0.2646
101.6000	0.25	0.03092	0.7854	0.01546	0.3927	0.00984	0.2500
120	0.21167	0.02618	0.6650	0.01309	0.3325	0.00833	0.2117
125	0.20320	0.02513	0.6383	0.01256	0.3192	0.00800	0.2032
127.0000	0.2	0.02474	0.6284	0.01237	0.3142	0.00787	0.2000
150	0.16933	0.02094	0.5319	0.01047	0.2659	0.00667	0.1693
169.3333	0.15	0.01855	0.4712	0.00928	0.2356	0.00591	0.1500
180	0.14111	0.01745	0.4432	0.00873	0.2216	0.00555	0.1411
200	0.12700	0.01571	0.3990	0.00786	0.1995	0.00500	0.1270
203.2000	0.125	0.01546	0.3927	0.00773	0.1963	0.00492	0.1250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. 3 แสดงค่าอินเวอลูทฟังก์ชั่น

Degrees	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	0.001252
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	0.002894	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	0.044516	0.044516	0.045024	0.045537	0.046054	0.046575	0.047100	0.047630

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. 3 (ต่อ)

Degrees	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
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
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	0.082697	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	0.163165	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	0.290570	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	0.644297	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

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การทำโปรแกรมชิ้นงานCNCแบบเชิงโต้ตอบ

Interactive CNC Part Programming

รัฐพล นวมพพัฒน์[1] บุญชู ลีลาขจรจิต[2] ทวี เทศเจริญ[3]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-23264197 โทรสาร 0-23264198 E-mail: s4611533@kmitl.ac.th[1]

Rattapol Noumpipat[1] Boonchu Leelakajohnjit[2] Thavee Teschareon[3]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
3 Moo 2 Chalongkung Rd, Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
Tel: 0-23264197 Fax: 0-23264198 E-mail: s4611533@kmitl.ac.th[1]

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้จะเป็นการประยุกต์ใช้การทำข้อมูลแบบล่วงหน้าอย่างง่ายโดยอาศัยการโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์มาช่วยในการจัดทำโปรแกรมชิ้นงานCNCแบบเชิงโต้ตอบ ซึ่งช่วยให้สามารถทำโปรแกรมได้ง่ายและยังช่วยให้สามารถจัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆเพื่อให้มีศักยภาพในการรองรับการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆของอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

การโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์(parametrical part programming) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเตรียมข้อมูลเชิงตัวเลขได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะสามารถเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆได้มาก ซึ่งเป็นผลดีต่อระดับการสื่อสารข้อมูลเชิงตัวเลขระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องจักรCNC นอกจากนี้การโปรแกรมชิ้นงานแบบพารามิเตอร์สามารถพัฒนารูปแบบการทำงานโดยผู้ปฏิบัติการเองและยังสามารถปรับแต่งให้เข้ากับรูปแบบปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต

Abstract

The main objective of this study is to explain how interactive CNC part programming can be generated from parametrical part programming method on PC level (or off line programming).

By this technique we are able to get less lead time for program preparation, less human interventions, thus, resulting in less mistakes, and smoother throughput of programs, data, and worksheets. The system is constructive and based on skilled experiences that results in a high flexibility for the user, and can be implemented in any manufacturing process, for small batch or large scale production.

Parametrical part programming can be developed to prepare numerical data effectively, and offers a wide range of potential industrial applications, provides a lot of facilities at both PC and controller level. Parametrical part programs can be developed by the user himself and tailored to his manufacturing problems

1.บทนำ

การฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงาน ให้มีทักษะความชำนาญในด้านการโปรแกรมชิ้นงานCNC เป็นการลงทุนที่ค่อนข้างสูงเพราะจะต้องใช้ทั้งเงินและเวลาสำหรับการฝึกอบรม การโปรแกรมชิ้นงานCNCเชิงโต้ตอบนี้จะช่วยให้สามารถทำโปรแกรมชิ้นงานCNC ได้สะดวกรวดเร็วขึ้นทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการฝึกอบรมสำหรับการโปรแกรมชิ้นงานCNCแบบดั้งเดิม

---
[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] นักวิชาการ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อกทงระบบยังมีความยืดหยุนอย่างมากทำให้สามารถประยุกต์ไปใช้งานในดานต่าง ๆได้ในจำนวนมาก

การใช้งานเครองจักรกลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์CNC ได้ขยายตวเข้าไปในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างรวดเรว ไดมการคิดค้นเทคนิคใหม่เพอนามาประยุกต์ใชกบเทคโนโลยีการผลิตและมีการปรับตัวให้สามารถใช้งานกับเครองจกรกลCNCได้ การบูรณาการสงต่าง ๆ เหล่านเข้าด้วยกันได้กอให้เกิดปัญหาแกสวนต่าง ๆ ทเกยวข้องอย่างมาก ปัญหาหลักทสาคัญยงอนหนงกยงคงเป็นการตระเตรียมข้อมูลเชิงตัวเลขสำหรับเครองจักรCNC เพราะส่วนมากแล้วผู้ใช้งานยังคงใช้กรรมวธการโปรแกรมแบบหนงโปรแกรมต่อหนงชนงานอยู

การนำคอมพิวเตอรสวนบุคคล(PC) มาใช้ในงานเครองจักร CNC ไดชวยให้การจัดเตรียมขอมูลเชิงตัวเลขของเครองจักรดขนมาก และทาให้สามารถตระเตรียมขอมูลบนเครองคอมพิวเตอรสวนบุคคลอน ๆ ทไม่ตองเชอมต่ออยูกบเครองจักรCNCกได้ แต่กระนนก็ตามการทำงานกยงคงเป็นแบบกรรมวธการโปรแกรมหนงชนงานใช้หนงโปรแกรมอยู่ในการศกษานจงไดศกษาการทำโปรแกรมชนงานCNCเชิงโต้ตอบขนมาโดยตงอยูบนพนฐานของการโปรแกรมชนงานแบบใช้พารามิเตอร์(Parametric Part Programming) ซงช่วยให้สามารถทำโปรแกรมไดงายและจัดเตรียมสงอำนวยความสะดวกต่าง ๆใหมศกยภาพในการรองรับการประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆได้ ซงวธการนสามารถใชทางานทงบนเครองคอมพิวเตอรสวนบุคคลและบนตัวควบคุมของเครองจักร โดยเฉพาะการโปรแกรมชนงานแบบใช้พารามิเตอรนจะช่วยใหผูใช้งานสามารถพัฒนารูปแบบการทำงานของตัวเองขนมาได้และสามารถปรับแต่งให้เข้ากับปัญหาในด้านการผลิตทเขาประสพอยู่ได้

2. การทำโปรแกรมแบบใช้พารามิเตอร์ (Parametrical Programming)

2.1 การทำโปรแกรมแบบพารามิเตอร์บนเครองคอมพิวเตอรสวนบุคคล

จากการทคอมพิวเตอรสวนบุคคลสามารถนำมาใช้ในการสร้างโปรแกรมชนงานสำหรับเครองจักรควบคุมเชิงตัวเลข(NC) โปรแกรมชนงานทสร้างขนบนPC น สามารถทำออกมาไดทงในลักษณะของรหัสระบบควบคุมเชิงตัวเลข(NC Code) หรือของรหัสระบบควบคุมเชิงตัวเลขแบบพารามิเตอร์(Parametrical NC Code) ในกรณีของรหัสควบคุมเชิงตัวเลขแบบปกตทวไป ผู้โปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมบนPC แบบเชิงโต้ตอบด้วยภาษาทใชกบเครองPC โปรแกรมนจะสร้างโปรแกรมชนงานNCนตามข้อมูลของชนงานทีป้อนเข้าไป โปรแกรมลักษณะนจะถูกกระทำขนเพอใชทางานเฉพาะอย่างทซบซ้อน โดยเฉพาะในกรณทรศมีบนขอบในระนาบXZ, XY และYZไม่คงท โปรแกรมสำเร็จทางด้านCAMแบบ2D ไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินมีดตด(Toolpath) ของชนงานทีมีปัญหาเหล่านไดถงแมวางานในลักษณะนมใช่งานในลักษณะทตองทำการประมาณคาระบบสามมต(3D interpolation) แต่ในทางปฏบตผูทางานมักจะต้องแก้ปัญหาโดยการนำโปรแกรมสำเร็จทางด้านCAMแบบ3D ทมราคาสูงมากมาใช้งาน ลกษณะงานเช่นน เราอาจนำปัญหาต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดและทำการโปรแกรมแบบเชิงโต้ตอบด้วยโปรแกรมภาษาคอมพิวเตอร์บนPC ไดตวอย่างเชน การใช้โปรแกรมภาษาเบสิครุนตาง ๆ(GWBASIC,QBASIC,ฯลฯ) นามาเขียนโปรแกรมแบบเชิงโต้ตอบทสร้างรหัสสำหรับหน่วยควบคุมของเครองควบคุมเชิงตัวเลข ตวอย่างการทางานนยงจัดว่าเป็นการทำงานในลักษณะหนงโปรแกรมต่อหนงชนงาน(one program one part) อยู

การประยุกต์ใช้งานทนยมทำกันมากอีกกรณีหนงคอ ผูโปรแกรมจะสร้างโปรแกรมแบบพารามิเตอรสาหรับการควบคุมในระดับหน่วยควบคุมของเครองจกรCNC และทำการเขียนโปรแกรมแบบเชิงโต้ตอบสำหรับการนโดยอาศัยโปรแกรมภาษาในระดบPC เพอสร้างแฟ้มข้อมูลทสามารถรองรบโปรแกรมแบบพารามิเตอร์ในหน่วยควบคุมของเครองจักรCNC แฟมขอมูลเหล่านสามารถส่งต่อไปยังหน่วยควบคุมของCNC ในรูปของโปรแกรมชนงานNC โปรแกรมข้อมูลนจะประกอบด้วยข้อมูลของชนงานสาหรับการโปรแกรมชนงานบนหน่วยควบคุมของเครองจักร CNC โปรแกรมชนงานจะประกอบด้วยลักษณะการเคลอนทของมีดตด และปฏบตการต่าง ๆของมีดตด แฟ้มข้อมูลในการนเป็นทางเดินมีดตัดจะถูกคานวณด้วยตัวของหน่วยควบคุมเอง กรรมวธแบบนจะถูกจัดว่าเป็นการทำงานในลักษณะหนงโปรแกรมตอชนงานหนงตระกูล(one program one family)

2.2 การทำโปรแกรมชนงานแบบพารามิเตอร์ในระดับตัวควบคุมของเครองจักร(Parametrical Part Programming on controller level)

ในทำนองเดียวกันกับการโปรแกรมชนงานบนเครองคอมพิวเตอร์สวนบุคคลเราจะนำการวิเคราะห์แบบพิมพ์เขียวและสร้างแมโครของโปรแกรมย่อย(macro subprograms) กบโปรแกรมแมโครควบคุมเราไม่สามารถสร้างโปรแกรมแมโครทครอบคลุมรูปทรงทางเรขาคณิตทจะใช้ผลิตไดทงหมด จงมีการพัฒนารูทน(routines) ทจะสามารถครอบคลุมรูปแบบทางเรขาคณิตส่วนใหญ่ไว้แต่การโปรแกรมแมโครเหล่านกสามารถปรับแต่งไปใช้งานได้และผู้ใชกสามารถสร้างรูทนเฉพาะงานขนมาใช้งานเองก็ได้ ชบรูทนของแมโครทเตรียมสำหรับเครองมือหรืออุปกรณ์เฉพาะอย่างตลอดจนเครองมือและอุปกรณ์กลุมต่าง ๆ กมลกษณะเดียวกันการโปรแกรมชนงานแบบพารามิเตอร์บนเครองคอมพิวเตอรสวนบุคคลนนเองดงนนความแตกต่างทสาคัญของการโปรแกรมทงสองระดับนกคอบนเครองคอมพิวเตอรสวนบุคคลเราสามารถสร้างพารามิเตอรสาหรับชนงานทมรูปร่างใด ๆ กได้ แต่ในส่วนของเครองควบคุมจะไม่สามารถทำไดทุกรูปราง

2.3 สมการพาราเมตรก(Parametrical Equations)

ในการอธิบายลักษณะของเส้นโคง(curves)ตาง ๆ เวกเตอร์จะเป็นเครองมอทมประโยชน์มาก ถาเรากำหนดเวกเตอร์ R เป็นฟังกชนของสเกลาร์ t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราอาจเขียนเวกเตอร์ฟังก์ชันออกมาได้ในรูป R = R(t) ซงสำหรับเวกเตอร์ในระนาบเราอาจเขียนองค์ประกอบออกมาได้เปน

$$R(t) = f(t)\,i + g(t)\,j \qquad \text{..........(2.3.1)}$$

โดย f(t) เป็นฟังกชันทใหค่าองค์ประกอบในแนวแกน x ของ R และ g(t) เป็นฟังก์ชันทให้ค่าองค์ประกอบในแนวแกน y ของ R เมอทราบค่าฟังก์ชันสเกลาร์ f(t) และ g(t) เราจะสามารถหาค่าเวกเตอร์ R(t)ได้ โดยความเป็นจริงแล้ว สมการ (2.3.1) เป็นเพียงแนวทางในการเขียนสมการคูหนงอย่างย่อ ๆรูปแบบหนง นนคอ

$$x = f(t), \qquad y = g(t) \qquad \text{.........(2.3.2)}$$

สมการ (2.3.2) เรียกว่าสมการพาราเมตริก หรือ สมการอิงตัวแปรเสริม (parametric equations) โดย t จะถูกเรียกวา พารามิเตอร์ (parameter) สมการพาราเมตริกนช่วยให้สามารถกำหนดทิศทางของเส้นโค้งได้ โดยให้ทิศทางทพารามิเตอร์มีค่าเพมขนมีค่าเป็นบวก นอกจากนเรายังสามารถกลับทิศทางบวกของเส้นโค้งได้โดยจัดรูปแบบของพารามิเตอร์ให้เหมาะสม ดังนนเส้นโค้งบนระนาบนอกจากจะใช้สมการ (2.3.3) และ (2.3.4) เป็นตัวแทนแลว อาจใช้สมการ (2.3.2) หรอ (2.3.5) แทนก็ได้

ตัวอย่างสมการในระบบพกัดฉาก

$$g(x,y) = 0 \quad \text{หรอ} \quad y = f(x) \qquad \text{..........(2.3.3)}$$

ตัวอย่างสมการเชิงขว

$$g(r;\theta) = 0 \quad \text{หรอ} \quad r = f(r;\theta) \qquad \text{..........(2.3.4)}$$

ตัวอย่างสมการพาราเมตรก

$$x = x(t), \quad y = y(t) \qquad \text{..........(2.3.5a)}$$

$$\text{หรอ} \quad r = r(t), \quad \theta = \theta(t) \qquad \text{..........(2.3.5b)}$$

สำหรับเส้นโค้งในกลุมภาคตัดกรวย(conic section) ซงนำมาใช้เป็นเส้นโค้งหลักในการศึกษาน จะมรูปแบบของสมการต่าง ๆดังน

ก.) วงรีและวงกลม มรูปแบบสมการทวไปในระบบพกัดฉากเปน

$$\frac{(X-H)^2}{A^2} + \frac{(Y-K)^2}{B^2} = 1$$

ส่วนในรูปสมการพาราเมตริกจะได้เปน

$$(X-H) = A\cos(t)$$
$$(Y-K) = B\sin(t)$$

โดยสมการทงสองรูปแบบจะเป็นวงกลมเมอ A = B

ข.) พาราโบลา มรูปแบบสมการทวไปในระบบพกัดฉากเปน

$$(Y-H) = (X-H)^2 / 4P$$

ส่วนในรูปสมการพาราเมตริกจะได้เปน

$$(X-H) = 2Pt$$
$$(Y-K) = Pt^2$$

โดยความกว้างของพาราโบลาทจุดโฟกัสมค่าเท่ากบ 4P

ค.) ไฮเพอร์โบลา มรูปแบบสมการทวไปในระบบพกัดฉากเปน

$$\frac{(X-H)^2}{A^2} - \frac{(Y-K)}{B^2} = 1 ; B = \sqrt{C^2 - A^2}$$

ส่วนในรูปสมการพาราเมตริกจะได้เป็น

$$(X-H) = A\sec(t)$$
$$(Y-K) = B\tan(t)$$

3. ระบบการทำงานแบบโต้ตอบ (Interactive System)

ระบบการทำงานแบบโต้ตอบมักจะใช้การแสดงผลผ่านหน้าจอกราฟิกส์เพื่อแสดงข้อมูลแก่ผู้ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงหรือการแก้ไขข้อมูลตามความต้องการของผู้ใช้งานได้ดี ดังนั้นนักออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้(user interface designer)จะต้องคำนึงถึงปัญหาเหล่านี้ให้มากที่สุด

3.1 การตรวจแก้ข้อมูลแบบโต้ตอบ(Interactive Data Editor)

ในการออกแบบ "การตรวจแก้ข้อมูล(data editor)" จะมีหลักการที่สำคัญจากพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวกับมนุษย์(human engineering) ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญจะได้แก่

3.1.1 ผลป้อนกลับ (feedback)

ผลป้อนกลับเป็นส่วนที่สำคัญมากของระบบการทำงานแบบโต้ตอบ โดยปกติแล้วผลป้อนกลับจะเกิดขึ้นจากการที่คำสั่งแต่ละอันเป็นที่ยอมรับของระบบ รูปแบบของผลป้อนกลับที่ให้คุณประโยชน์สูงสุดจะบอกผู้ใช้งานได้ด้วยว่าการปฏิบัติการได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว ในการนี้มักจะมีการดัดแปลงหรือจัดหน้าจอการแสดงผลออกมาใหม่หรือมีการให้เสียงต่าง ๆบอกออกมาให้ทราบ

3.1.2 ความต้องกัน (consistency)

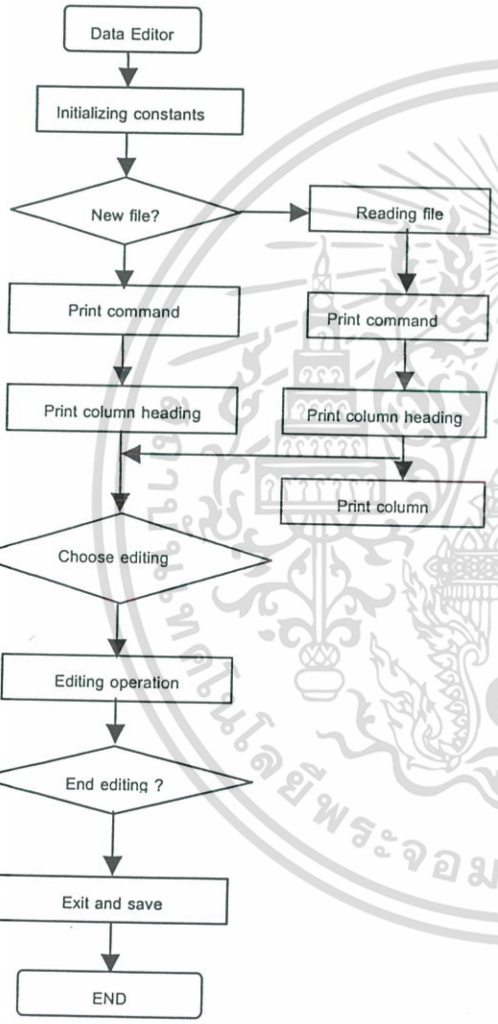
การสร้างความต้องกันหรือความสอดคล้องเข้าใจตรงกันนั้นตำแหน่งหน้าจอของหัวข้อต่าง ๆเช่น เมนู(menu), คำสั่ง(commands) และผลป้อนกลับ(feedback) เป็นสิ่งสำคัญมาก ปกติเราจะกำหนดส่วนต่าง ๆของหน้าจอไว้สำหรับหัวข้อต่าง ๆเหล่านี้ ความต้องกันนี้จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาหัวข้อเมนูทต้องการได้อย่างรวดเร็ว สำหรับตัวอย่างในการสร้างความต้องกันอนๆได้แก่ การใช้รหัสสี(color coding) และการใชคำยอต่างๆ

3.1.3 การจำน้อยทสุด (minimal memorization)

หลักการทสำคัญสำหรับการนคือทำสงจำเป็นทจะต้องจำให้อยูในรูปแบบทจำไดง่ายทสุดเท่าทจะทำได้ และถ้าหลีกเลยงไดต้องพยายามอย่าให้มีสงทจะต้องจำในการปฏิบัติการ ซงตัวอย่างตรรกะของการโปรแกรมคอมพิวเตอร์(computer programming logic) ของการตรวจแก้ข้อมูลได้แสดงดังผังงานในรูปท1



รูปที่1 แสดงโฟลชาร์ตของการตรวจแก้ข้อมูล

3.2 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการผลิตเชิงโต้ตอบ(Interactive Computer-Aided Design and Manufacture)

การออกแบบและการผลิตแบบใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจะใช้ศาสตร์ทางด้านเรขภาพคอมพิวเตอร์(computer graphics) มาใช้เป็นเครื่องมือในการทำงานโดยจะมีการพัฒนาชุดคำสั่งกราฟิกส์(graphics commands) ที่ใช้คีย์บอร์ดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับป้อนอินพุท อาจมีการใช้ฟังก์ชันคีย์(function key) ในคำสั่งกราฟิกส์หรือมีการออกแบบหน้าจอในรูปของคำสั่งที่ทำงานตามรายการเลือก(menu-driven commands) ข้อความพร้อมรับ(prompt) และข้อความบอกสถานะ(status massages)ที่แสดงผลออกมาตามข้อมูลกราฟิกส์ประกอบอยู่ด้วย

4 การโปรแกรมชิ้นงาน

ในการใช้โปรแกรมภาษาVisual Basic มาสร้างโปรแกรมชิ้นงาน CNCแบบเชิงโต้ตอบนั้น สามารถนำมาเขียนเป็นโฟลชาร์ตได้ดังรูปที่2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่1 กำหนดค่าพื้นฐานเบื้องต้น ได้แก่ การกำหนดพื้นที่วาดรูปโดยกำหนดให้สามารถแสดงรูปทั้งหมดได้ในขอบเขต ซึ่งผู้ใช้งานจะเป็นผู้ที่ป้อนค่าเข้าไป

ขั้นตอนที่2 รับเงื่อนไขการวาดรูป ซึ่งในที่นี้แบ่งออกได้เป็น Line Circle Ellipse Parabola Hyperbola และรับค่าตัวแปร ดังนี้

-คำสั่ง Line รับค่า X1,X2,Y1,Y2

-คำสั่ง Circle รับค่า H,K,X1,X2,Y1,Y2,R

-คำสั่ง Ellipse รับค่า H,K,X1,X2,Y1,Y2,A,B

-คำสั่ง Parabola รับค่า H,K,X1,X2,Y1,Y2,P

-คำสั่ง Hyperbola รับค่า H,K,X1,X2,Y1,Y2,WA,WB

หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าเมตริกซ์ [X] , [Y] แล้วทำการตรวจสอบสถานะว่ามีการเปิดไฟล์งานเพื่อบันทึกค่าG-Code หรือไม่ ถ้ายังไม่ปโรแกรมก็จะมีกล่องข้อความให้กรอกชื่อไฟล์งาน หลังจากนั้นก็จะทำการอ่านค่าเมตริกซ์ที่ได้จากการคำนวณ

ขั้นตอนที่3 แสดงรูปภาพที่ได้จากข้อมูลป้อนเข้า และแสดงG-Code ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลแสดงออกไปยังหน้าจอของโปรแกรม

ขั้นตอนที่4 ตรวจรับคำสั่งเขียนเส้นเพิ่มเติม ถ้ามีก็ทำซ้ำโดยเริ่มจากขั้นตอนที่1-3 ถ้าไม่มีคำสั่งโปรแกรมจะสอบถามต้องการบันทึกค่า CL-File หรือไม่ก่อนจะออกจากโปรแกรม

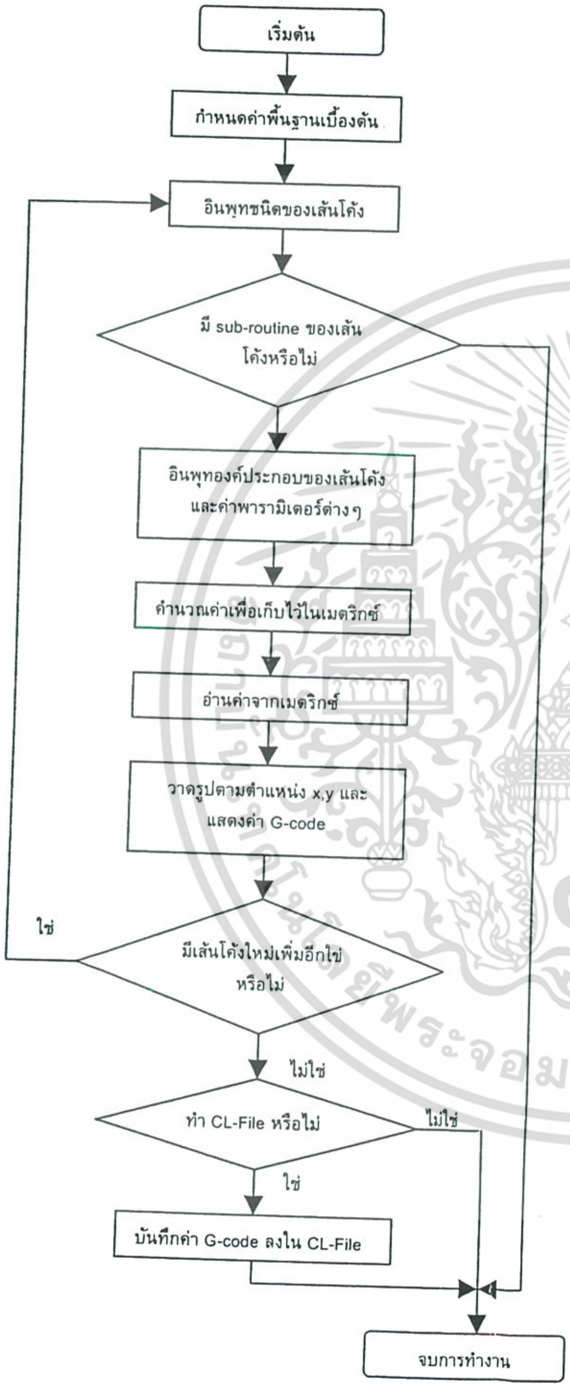
หลังจากจบขั้นตอนการป้อนข้อมูลทั้งหมดของโปรแกรมแล้วสามารถนำไฟล์งานที่บันทึกค่าG-Code มาตรวจสอบหรือปรับปรุงเพิ่มเติมได้ด้วยโปรแกรม"Note pad"ซึ่งสามารถส่งถ่ายไปยังเครื่องจักรCNC เพื่อทำการผลิตชิ้นงานต่อไป

5 วิธีการใช้งานโปรแกรม

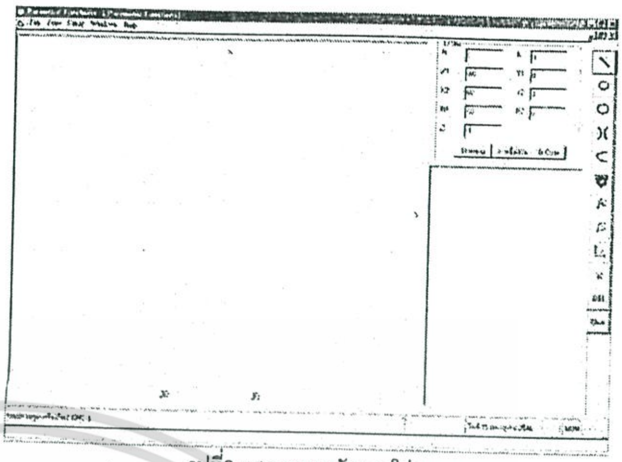
เมื่อทำการเปิดโปรแกรมจะพบเมนูหลักของโปรแกรมดังที่แสดงดังรูปที่3 ซึ่งใช้สำหรับเขียนแบบงานตามรูปร่างพื้นฐานที่กำหนด ได้แก่ Line Circle Ellipse Parabola Hyperbola ซึ่งก่อนเริ่มเขียนรูปผู้ใช้งานต้องกำหนดขนาดพื้นที่เพื่อสำหรับวาดรูปเสียก่อนดังแสดงเป็นกรอบโต้ตอบในรูปที่4 แล้วจึงทำการคลิ๊กไอคอนรูปร่างพื้นฐานที่กำหนดเพื่อแสดงกรอบโต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

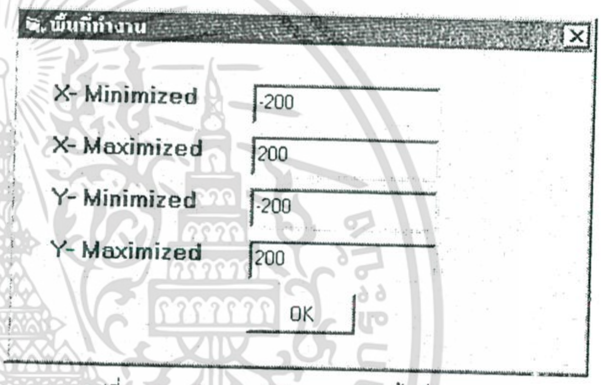
ตอบเพอรอรับข้อมูลทจะป้อนเข้า เมอป้อนข้อมูลครบถ้วนแล้วโปรแกรมก็จะแสดงรูปภาพและค่าG-Code หลังจากนนทำการบันทึกบันทึกค่าลงบนไฟล์งานทตงชอไว้



รูปที่2 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



รูปที่3 แสดงเมนูหลักของโปรแกรม



รูปที่4 แสดงเป็นกรอบโต้ตอบการระบุพื้นที่ในการสร้างรูป

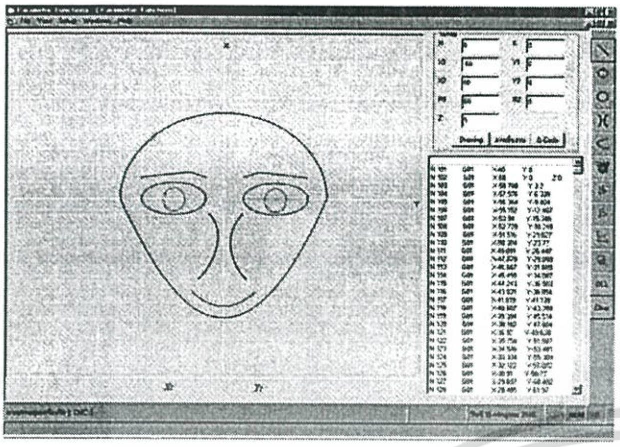
6 ผลการทดสอบโปรแกรม

จากการทดสอบป้อนข้อมูลดังตารางที่1 ได้ผลการทดลองตามรูปที่5 ซึ่งแสดงการเขียนรูปที่และค่าG-Code ซึ่งสามารถนำไปใช้เชื่อมโยงกับเครื่องจักรCNC ทำให้สามารถทำให้เกิดชิ้นงานดังรูปที่6

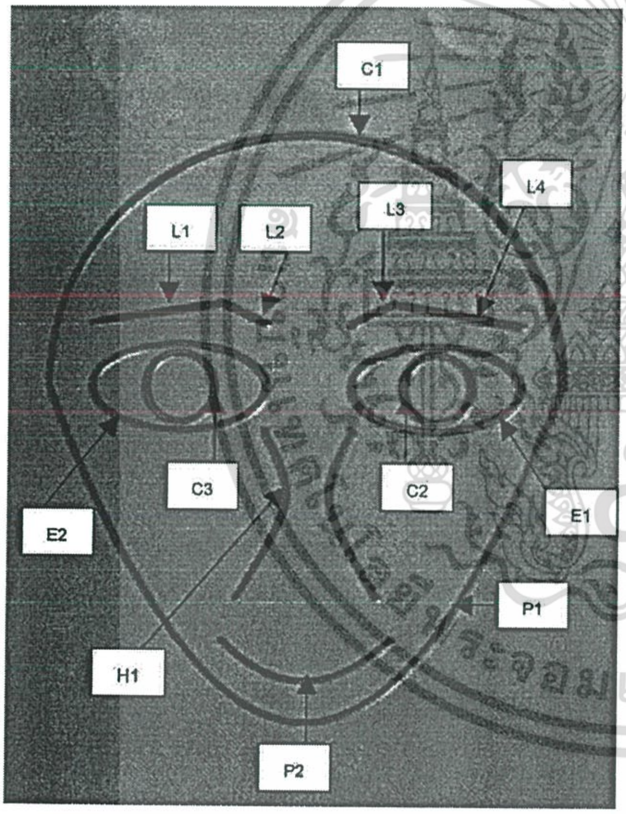
ตารางที่1 แสดงค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม

PATH	SHAPE	H	K	X1	Y1	X2	Y2	P	R	A	B	WA	WB
P1	Parabola	0	-80	-60	0	60	0	11	-	-	-	-	-
C1	Circle	0	0	60	0	-60	0	-	60	-	-	-	-
L1	Line	-	-	-50	15	-20	20	-	-	-	-	-	-
L2	Line	-	-	-20	20	-10	15	-	-	-	-	-	-
L3	Line	-	-	10	15	20	20	-	-	-	-	-	-
L4	Line	-	-	20	20	50	15	-	-	-	-	-	-
E1	Ellipse	30	0	50	0	50	0	-	-	20	10	-	-
C2	Circle	30	0	38	0	38	0	-	8	-	-	-	-
E2	Ellipse	-30	0	10	0	10	0	-	-	20	10	-	-
C3	Circle	-30	0	-22	0	-22	0	-	8	-	-	-	-
H1	Hyperbola	0	-25	10	-10	15	-50	-	-	-	-	5	8
P2	Parabola	0	-70	-20	-60	20	-60	10	-	-	-	-	.-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปท5 แสดงผลทได้จากการป้อนขอมูลเข้าสูโปรแกรม



รูปท6 แสดงผลทได้จากการทดสอบโปรแกรมกับเครองจักรCNC

7 สรุป

การโปรแกรมชนงานแบบพารามิเตอร์สามรถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นระดับการผลิตจำนวนน้อยๆ หรือการผลิตขนาดใหญ่ โดยทผูปฏิบติงานไมต้องทำการเขียนG-codeเอง และยังสามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้จากรูปทแสดงในโปรแกรม อีกทงยังทำชนงานทมีรูปร่างเดียวกันหรืออยูในตระกูลเดียวกัน โดยไม่ต้องเขียนชนงานใหม่ทงหมด รวมถึงการทำชนงานทมีรูปร่างซับซ้อนได้ง่ายขน ซงจะทำให้เกิดผลประโยชน์ตอบแทนสูงมากแม้ว่าจะเป็นการทำงานในช่วงสนๆ และมีการขีดจำกัดจากปัญหาทางด้านพนักงานน้อยกว่า ทำให้เกิดผลผลิตทราบรนกว่าทงในด้านโปรแกรมข้อมูลและการทำงาน ประการสุดท้ายทสำคัญคือมันเป็นระบบทสร้างสรรค์และตงอยูบนทักษะความชำนาญของผูใช้ซงให้ความคล่องตัวในการใช้งานสำหรับผูใช้เป็นอย่างมาก

เอกสารอ้างอง

[1] Dann D'Hont "Off Line Parametrical Programing Facilities for Stand Alone CNC Machine Toos" การประชุมใหญ่ทางวิชาการ หัวข้อเทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 26-28 ตุลาคม 2532 หนา810 -816

[2] บุญชู ลีลาขจรจิต บุญสืบ ราชรัตนารักษ์ ทวี เทศเจริญ อัครเดช สินธุภัค,"การประยุกต์ใช้โปรแกรมภาษาเบสิคกับชนงานCNCรูปแพนอากาศ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครองกลแห่งประเทศไทยครงท 14, ปี พ.ศ. 2543 หนา 84-92

[3] เลิศ สิทธิโกศล, " เรขาคณิตวิเคราะห์และแคลคูลัส II " บริษัท สกายบุกส์ จำกด, ปี พ.ศ. 2544, หนา 75-81

[4] Dusko Savic "BASIC Interactive Graphics" Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1985

[5] Roy E. Myers. "Microcomputer Graphics "Addison-Wesley Publishing Company, Inc., U.S.A., 1982

[6] Y. C. PAO "Elements of Computer-Aicd Design and Manufacturing" John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 1984

[7] C. S. Park, " Interactive Microcomputer Graphics " Addison-Wesley Publishing Company, 1985, 458 p.

[8] A. W. Goodman, " Analytic Geometry and the Calculus " 4th edition, Macmillan Publishing Co., Inc., 1980, pp.582-662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายรัฐพล นวมพิพัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2515 ที่กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2540 หลังจากสำเร็จการศึกษาแล้วได้เข้าทำงานที่ บริษัท อลูคอน จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุง จนถึงปัจจุบัน

สิ่งตีพิมพ์และผลงานทางวิชาการ

2544 "ผลกระทบพฤติกรรมการลดเสียงของอุปกรณ์ลดเสียงความถี่สูงแบบHelmholtz" วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 12 ฉบับที่ 4

2546 "การทำโปรแกรมชิ้นงานCNCแบบเชิงโต้ตอบ" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 วันที่15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้