



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การแก้ไขคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนภายใต้การควบคุม
อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

A Motion NC-file Modification for 5-Axis CNC Machine with Jerk
Constraint

นามผู้วิจัย นายศักเกษม สุจินตนารัตน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชัชพันธ์ จำญาติ, วศ.ค.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การแก้ไขคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนภายใต้การควบคุม
อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

A Motion NC-file Modification for 5-Axis CNC Machine with Jerk Constraint

โดย

นายศักเกษม สุจินตนารัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

พ.ศ. 2555

ศักเกษม สุจินตนารัตน์ 2555: การแก้ไขคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องจักร
ซีเอ็นซีห้าแกนภายใต้การควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ปรินญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รักษศิริ, D.Eng.
93 หน้า

เครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนเป็นเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน มีความถูกต้องและแม่นยำ การผลิตชิ้นงานในอุดมคติคือ ต้องการเวลาในการผลิตที่ต่ำที่สุดและมีรูปร่างตรงตามชิ้นงานกำหนด การวางแผนเส้นทางการเดินมีดกัดเป็นส่วนสำคัญในการผลิตชิ้นงานให้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ การที่ต้องการเวลาในการผลิตต่ำ ทำให้ต้องใช้ความเร็วและความเร่งในการตัดเฉือนที่สูง แต่เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่มีค่าสูง ๆ มีผลทำให้พิกัดในเส้นทางการเดินระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานคลาดเคลื่อน ทำให้เกิดพื้นผิวของชิ้นงานไม่ดี รูปร่างของชิ้นงานผิดพลาด และอาจสร้างความเสียหายบนชิ้นงานและอุปกรณ์ตัดเฉือนได้ จึงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดเส้นทางการเดินมีดกัด ดังนั้นการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสมจะช่วยทำให้การตัดเฉือนมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เนื่องจากพิกัดบนชิ้นงานและเครื่องจักรมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเส้นตรง ทำให้เกิดความเร่ง ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งบนชิ้นงานกับเครื่องจักรมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งบนชิ้นงาน บางครั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งบนเครื่องจักรยังคงมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนด ดังนั้นการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งจึงควรควบคุมที่ระบบแกนของเครื่องจักร โดยการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งจะใช้สมมติฐานว่าความเร่งเมื่อก่อนและหลังทำการควบคุมมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อให้เวลาในการกัดชิ้นงานใกล้เคียงกันของเดิมมากที่สุด เมื่อทำการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดพบว่า พิกัดชิ้นงานมีตำแหน่งเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้ต้องมีการกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของพิกัด ถ้าพิกัดเกินช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ต้องมีการพิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆ เพิ่มเติมต่อไป

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sakkasam Sujintanarat 2012: A Motion NC-file Modification for 5-Axis CNC Machine with Jerk Constraint. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 93 pages.

Five-axis CNC machine is a machine that can produce parts with complex shape, accuracy and precision. The ideal production is to minimize production time and obtain specified specifications. Therefore, trajectory planning is an important part in production in order to meet the design requirements. Because of the minimize time required in production, it needs for high value of velocity and acceleration. However, the higher value of Jerk (rate of change of acceleration) can cause trajectory tracking error which results in a poor surface or misshape of the workpiece. Furthermore, it can damage the workpiece and cutting tools. Hence, jerk is a key factor in tool-path generation. Accordingly, the jerk control in good condition can help cutting more efficient. However, due to the coordinate that the workpiece coordinate system and the machine tool axis system is non-linear relationship, the speed, acceleration and jerk between the workpiece coordinate system and the machine tool axis system is not equal. When controlling jerk on the workpiece sometimes jerk on the machine still has higher than a certain level. Therefore, controlling jerk should control machine tool axis system by controlling jerk on the assumption that acceleration before and after control have similar values. This is for machine time is closest to the original. When controlling jerk under the criteria set, it is found that the workpiece coordinate has changed from the original. So, the standard error of measurement of the workpiece coordinates is specified. If the deviation exceeds the specified coordinates, any further restrictions are considered.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อาจารย์ ดร.ชนะ รัศมีศิริ ผู้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยโดยตลอด ขอขอบพระคุณกรรมการที่ปรึกษาร่วมอาจารย์ ดร.รัชพันธ์ ขำญาติ รวมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่สนับสนุนทั้งกำลังใจทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

ศักเกษม สุจินตนารัตน์
พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
วิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	48
ผล	48
วิจารณ์	74
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก ผลการคำนวณความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ความเร่ง โดยวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	84
ภาคผนวก ข ผลการคำนวณพิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาภายใต้การควบคุม อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อมูลตำแหน่งมีดกัดที่ใช้ในการทดลอง	48
2	คำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง	52
3	เวลาที่ใช้ในการตัดเฉือน	52
ตารางผนวกที่		
ก1	ความเร็วในการกัดชิ้นงานของระบบพิกัดชิ้นงาน	85
ก2	ความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบพิกัดชิ้นงาน	85
ก3	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบพิกัดชิ้นงาน	85
ก4	ความเร็วในการกัดชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักร	86
ก5	ความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักร	86
ก6	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักร	86
ข1	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน X	88
ข2	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน Y	88
ข3	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน Z	89
ข4	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน A	89
ข5	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน C	90
ข6	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกัดชิ้นงานหลังปรับค่าในแกน X	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข7	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและ เวลาที่ใช้ในการกักขึ้นงานหลังปรับค่าในแกน Y	91
ข8	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและ เวลาที่ใช้ในการกักขึ้นงานหลังปรับค่าในแกน Z	91
ข9	พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและ เวลาที่ใช้ในการกักขึ้นงานหลังปรับค่าในแกน C	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	รายนามของเครื่องจักรซีเอ็นซี	4
2	บอลสกรูของเครื่องจักรซีเอ็นซี	4
3	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 2-0 machine	6
4	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 1-1 machine	6
5	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 0-2 machine	6
6	โครงสร้างของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนที่ใช้ทดลอง	21
7	การออกแบบเส้นทางการเดินมีดกัด	21
8	ขั้นตอนการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ในอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร่งที่กำหนด	26
9	ขั้นตอนการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งก่อนจุด i	27
10	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน	28
11	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ก. หลังปรับค่า	29
12	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ข. หลังปรับค่า	30
13	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศตรงข้ามกัน	30
14	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศตรงข้ามกัน กรณี ก. หลังปรับค่า	32
15	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศตรงข้ามกัน กรณี ข. หลังปรับค่า	33
16	ขั้นตอนการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งหลังจุด i	34
17	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน	35
18	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ก. หลังปรับค่า	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ข. หลังปรับค่า	37
20	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน	37
21	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน กรณี ก. หลังปรับค่า	39
22	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน กรณี ข. หลังปรับค่า	40
23	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $ J_{i+1} > J_{\max} $ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน	41
24	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $ J_{i+1} > J_{\max} $ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน หลังปรับค่า	41
25	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $ J_{i+1} > J_{\max} $ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงกันข้าม	42
26	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $ J_{i+1} > J_{\max} $ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงกันข้าม กรณี ก. หลังปรับค่า	44
27	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $ J_{i+1} > J_{\max} $ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงกันข้าม กรณี ข. หลังปรับค่า	46
28	ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ระบบพิกัดชิ้นงาน	49
29	ความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบพิกัดชิ้นงาน	49
30	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบพิกัดชิ้นงาน	50
31	ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ระบบแกนของเครื่องจักร	50
32	ความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบแกนของเครื่องจักร	51
33	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบแกนของเครื่องจักร	51

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	53
35	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	54
36	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	54
37	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน A	55
38	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน C	55
39	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	56
40	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	57
41	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	57
42	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A	58
43	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C	58
44	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	59
45	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	59
46	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	60
47	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A	60
48	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C	61
49	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	62
50	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	62
51	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	63
52	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A	63
53	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C	64
54	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับ ค่า	65
55	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับ ค่า	65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับ ค่า	66
57	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับ ค่า	66
58	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า	67
59	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า	68
60	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า	68
61	พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า	69
62	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า	69
63	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า	70
64	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า	70
65	ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า	71
66	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า	72
67	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า	72
68	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า	73
69	ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า	73
70	เปรียบเทียบความเร่งในแนวแกน X ก่อนและหลังปรับค่า	75
71	เปรียบเทียบพิกัดในแนวแกน X ก่อนและหลังปรับค่า	76

การแก้ไขคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนภายใต้การควบคุม อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

A Motion NC-file Modification for 5-Axis CNC Machine with Jerk Constraint

คำนำ

อุตสาหกรรมในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ได้ถูกออกแบบให้มีความซับซ้อนและต้องการขนาดของชิ้นงานให้มีความถูกต้อง ตลอดจนมีค่าความคลาดเคลื่อนในการผลิตที่มีค่าต่ำ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ ในอุตสาหกรรมยานยนต์จำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องการชิ้นงานที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง แต่ก็จำเป็นที่จะต้องผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าอย่างเพียงพอ ดังนั้น เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตจะต้องมีความแม่นยำและเที่ยงตรง และยังสามารถในการผลิตที่สูง เครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนเป็นเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน มีความถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งยังสามารถที่จะผลิตชิ้นงานได้ในปริมาณที่มาก การผลิตชิ้นงานในอุดมคติคือ ต้องการเวลาในการผลิตที่ต่ำที่สุดและมีรูปร่างตรงตามชิ้นงานกำหนด การวางแผนเส้นทางการเดินมีดกัดเป็นส่วนสำคัญในการผลิตชิ้นงานให้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ การที่ต้องการเวลาในการผลิตต่ำ ทำให้ต้องใช้ความเร็วและความเร่งในการตัดเฉือนที่สูง แต่เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่มีค่าสูง ๆ มีผลทำให้เกิดในเส้นทางเดินระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานคลาดเคลื่อน ทำให้เกิดพื้นผิวของชิ้นงานไม่ดี รูปร่างของชิ้นงานผิดพลาด และอาจสร้างความเสียหายบนชิ้นงานและอุปกรณ์ตัดเฉือนได้ จึงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดเส้นทางการเดินมีดกัด ดังนั้นการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสมจะช่วยทำให้การตัดเฉือนมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาดังนี้ คือ

1. เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าหาความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน
2. เพื่อคำนวณหาค่าสิ่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมในการกักตั้งงานของเครื่องจักร ซีเอ็นซี 5 แกนภายใต้เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

การตรวจเอกสาร

การดำเนินการวิจัยในเรื่องการแก้ไขคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนภายใต้การควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัย ซึ่งมีหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ

1. เครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน (5-Axis CNC Milling machine)
2. แบบจำลองการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนการเคลื่อนที่ทั่วไป (General Kinematic Model) ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน
3. ความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน
4. การวางแผนเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์ (Trajectory planning)

1. เครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

1.1 องค์ประกอบของเครื่องจักรซีเอ็นซี

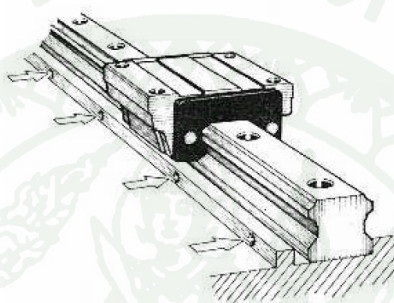
1.1.1 ชุดควบคุม เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บโปรแกรม (Memory) และแก้ไขดัดแปลงโปรแกรม (Edit) ได้ คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจโปรแกรมที่ป้อน แล้วทำการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีให้ทำงานตามคำสั่งโปรแกรมเอ็นซี ชุดควบคุมประกอบด้วย แผงควบคุม (Control Panel), จอภาพ (Monitor), แป้นพิมพ์ (Keyboard or Keypad) และปุ่มสวิตช์ควบคุมต่างๆ เช่น ความเร็วฟีด (Feed), ความเร็วสปินเดิล (Spindle Speed) เป็นต้น

1.1.2 กลไกการเคลื่อนที่ เป็นชุดขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ต่างๆ ประกอบด้วย

ก. เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) มีหน้าที่รับคำสั่งทางไฟฟ้าจากชุดควบคุมมาแปลงเป็นการเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งนั้นๆ

ข. ชุดรายงานตำแหน่ง (Position Feedback) มีหน้าที่อ่านตำแหน่งของแกนการเคลื่อนที่ต่างๆแล้วส่งค่ากลับไปให้กับชุดควบคุมโดยทั่วไปจะใช้เอ็นโค้ดเดอร์(Encoder) หรือลิเนียร์สเกล (Linear Scale)

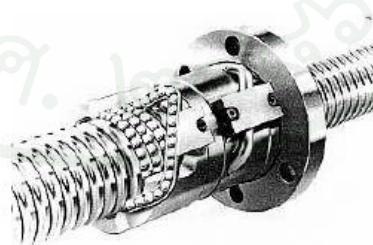
ค. รางนำทาง(Guide Way หรือ Slide Way) เป็นชุดประกอบให้แกนการเคลื่อนที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและให้ความแข็งแรงของโต๊ะและชุดสปินเดิลขณะขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 รางนำทางของเครื่องจักรซีเอ็นซี

ที่มา: ชนะ (2549)

ง. บอลสกรูเป็นอุปกรณ์ที่แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมจากเซอร์โวมอเตอร์ไปเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 บอลสกรูของเครื่องจักรซีเอ็นซี

ที่มา: ชนะ (2549)

1.1.3 ตัวเครื่องจักร คือ โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ ตัวเครื่องจักรมีส่วนประกอบหลักหลายๆส่วน คือ

ก. แท่นเครื่อง (Machine Bed) เป็น โครงสร้างหลักของตัวเครื่องจักรสำหรับรองรับอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักร

ข. หมอนรองหรือแสดเคิล (Saddle) เคลื่อนที่ได้ 1 แกนบนแท่นเครื่อง เช่น แกน X หรือแกน Y

ค. โต๊ะ (Table) สำหรับวางชิ้นงานโดยทั่วไปโต๊ะเคลื่อนที่อยู่บนหมอนรองมีร่องรูปตัวที (T-slot) สำหรับใช้ในการจับยึดชิ้นงานให้แนบติดกับโต๊ะมีระนาบโต๊ะตั้งติดกับเสา

ง. เสา (Column) เป็น โครงสร้างสำหรับติดตั้งสปินเดิลเครื่องแมชชีนนิ่งเช่นเตอร์แนวตั้งรุ่นใหม่นิยมสร้างเป็นแบบเสาคู่ (Double Column) เพราะให้ความแม่นยำที่ดีกว่า

จ. สปินเดิล (Spindle) สำหรับติดตั้งชุดจับทูลแบบเทเปอร์แชงก์ (Tapered Shank) หรือแบบไฮสปีด (High Speed) โดยมีมอเตอร์สปินเดิล (Spindle Motor) ขับเคลื่อนสปินเดิลผ่านเกียร์หรือสายพานหรือต่อตรงรวมเป็นชุดเดียวกัน

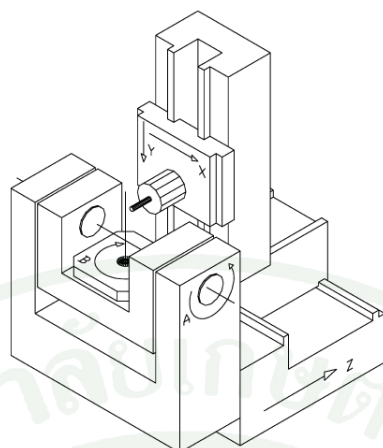
1.2 ประเภทของเครื่องกัดซีเอ็นซี 5 แกน

เครื่องจักร 5 แกนมีลักษณะโดยทั่วไปคือ มีแกนเลื่อน (Translational) 3 แกน และแกนหมุน (Rotational) 2 แกน โดยสามารถจำแนกเครื่องจักรห้าแกนได้จากการติดตั้งเครื่องมือและชิ้นงาน ได้ดังนี้

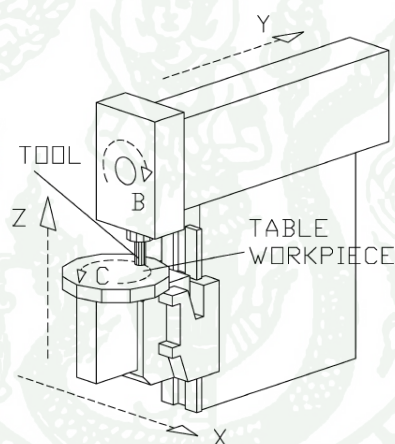
1.2.1 2-0 machine หมายถึงโต๊ะวางชิ้นงานสามารถหมุนได้ทั้ง 2 แกน

1.2.2 1-1 machine หมายถึงโต๊ะวางชิ้นงานหมุนได้ 1 แกนและเครื่องมือหมุนได้ 1 แกน

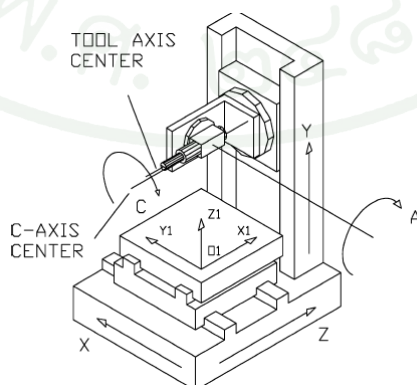
1.2.3 0-2 machine หมายถึงเครื่องมือหมุนได้ทั้ง 2 แกน



ภาพที่ 3 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 2-0 machine



ภาพที่ 4 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 1-1 machine



ภาพที่ 5 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 0-2 machine

3. แบบจำลองการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนการเคลื่อนที่ทั่วไป (General Kinematic Model) ของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

3.1 การเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

คำสั่งการเคลื่อนที่ 5 แกนโดยทั่วไปถูกกำหนดจากระบบพิกัดชิ้นงาน (Workpiece Coordinate System, WCS) ซึ่งเกิดจากชุดตำแหน่งของพิกัดหรือรูปแบบเส้นโค้ง (spline) จากการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของมีดกัดบนเส้นทางตัดเนื้อ (Tool-path) การเคลื่อนที่ของมีดกัดประกอบด้วยพิกัดคาร์ทีเซียน 3 ตัวของตำแหน่งศูนย์กลางมีดกัด (Tool Center Point, TCP) เองคือ $P = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ และเวกเตอร์บอกทิศทางของแกนมีดกัดคือ $O = [i \ j \ k]^T$ โดยที่ $\|O\| = 1$ เมื่อรวมพิกัดเข้าด้วยกันจะได้

$$R = [P, O]^T$$

โดยให้ R เป็นตำแหน่งและทิศทางของมีดกัดที่สอดคล้องกับแกนอ้างอิงกับตำแหน่งในคำสั่ง ในข้อมูลตำแหน่งมีดกัด (CL file) เครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนจะถูกรวมจากคาร์ทีเซียน 3 ตัว (X, Y, Z) และการหมุน 2 แกน (AB, BC หรือ AC)

$$Q = [x_6 \ y_6 \ z_6 \ A \ C]^T$$

โดยที่ $[x_6 \ y_6 \ z_6]$ และ $[A \ C]$ เป็นตำแหน่งของแกนเลื่อนและแกนหมุนของระบบแกนของอุปกรณ์ตัดเนื้อ (machine tool axis system) ตามลำดับ Q คำนวณได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องจักร การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากระบบพิกัดของชิ้นงานไปยังระบบแกนของเครื่องจักร การเปลี่ยนรูปร่างดังกล่าวเรียกว่า การเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ (inverse kinematics)

$$R \rightarrow Q$$

$$Q = HR$$

โดยที่ H คือ เมทริกซ์ 4×4 ของโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชัน

ส่วนการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากระบบแกนของเครื่องจักรไปยังระบบพิกัดของ
ชิ้นงาน (ปลายมีดกัด)

$$Q \rightarrow R$$

เรียกการเปลี่ยนรูปดังกล่าวว่า การเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่แบบไป
ข้างหน้า (forward kinematics)

3.2 สมการโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชัน (Homogeneous Transformation Model)

ตำแหน่งของเครื่องมือสัมพันธ์กับชิ้นงาน (Relative Positional) มีการเปลี่ยนแปลง ก็
ต่อเมื่อข้อต่อ (link) ของเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ นั่นคือ เมื่อเครื่องจักรซีเอ็นซีได้รับคำสั่งให้แกน
เลื่อนและแกนหมุนเกิดการเคลื่อนที่ และทำให้ตำแหน่งของเครื่องมือและชิ้นงานมีการเปลี่ยนไป
ตำแหน่งของเครื่องมือและชิ้นงานนี้ สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โฮโมจี
เนียสทรานสฟอร์มเมชันเมตริกซ์

3.2.1 การเลื่อน (Translation)

จุดใดๆ ในปริภูมิ (Space) สามารถแสดงตำแหน่งได้ ก็ต่อเมื่อมีกรอบอ้างอิง
(Frame) และตำแหน่งนั้นอธิบายจากระยะทางของจุดห่างจากกรอบอ้างอิงตามแนวแกน x , y และ z
ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์คือ

$$Trans(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ x , y และ z เป็นตำแหน่งที่ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน X , Y และ Z โดย
เทียบกับตำแหน่งอ้างอิงในระบบแกนพิกัด

3.2.2 การหมุน (Rotation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของระบบแกนพิกัดใหม่ โดยที่แกนนั้นๆ หมุนทำมุม θ กับแกนพิกัดเดิม ถ้ากำหนดให้ $X_1 Y_1 Z_1$ เป็นระบบพิกัดใหม่ และ $X Y Z$ เป็นระบบพิกัดเดิม โดยที่ $X_1 Y_1 Z_1$ หมุนทำมุม θ รอบแกน X ซึ่งสามารถหาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด $X Y Z$ คือ

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ถ้ากำหนดให้ $X_1 Y_1 Z_1$ หมุนทำมุม θ รอบแกน Y สามารถหาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด $X Y Z$ คือ

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และถ้ากำหนดให้ $X_1 Y_1 Z_1$ หมุนทำมุม θ รอบแกน Z สามารถหาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด $X Y Z$ คือ

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. ความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

4.1 จาโคเบียน

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อซึ่งมีผลต่อตำแหน่งของปลาย
เครื่องมือที่สัมพันธ์กับชิ้นงาน สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, x_4, x_5 \dots x_j)$$

$$y_2 = f_2(x_1, x_2, x_4, x_5 \dots x_j)$$

$$\vdots$$

$$y_i = f_i(x_1, x_2, x_4, x_5 \dots x_j)$$

ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อต่อเพียงเล็กน้อย สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลง
ตำแหน่งของปลายเครื่องมือที่สัมพันธ์กับชิ้นงาน สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\partial y_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \partial x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \partial x_2 + \dots \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \partial x_j$$

$$\partial y_2 = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \partial x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \partial x_2 + \dots \frac{\partial f_2}{\partial x_j} \partial x_j$$

$$\vdots$$

$$\partial y_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \partial x_1 + \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \partial x_2 + \dots \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \partial x_j$$

$$\begin{bmatrix} \partial y_1 \\ \partial y_2 \\ \vdots \\ \partial y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial x_1 \\ \partial x_2 \\ \vdots \\ \partial x_j \end{bmatrix}$$

ในเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้โดยที่ dx_1, dy_1 และ dz_1
คือการเปลี่ยนแปลงการตามแนวแกน X, Y และ Z di, dj และ dk คือการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ
เวกเตอร์ของชิ้นงาน

$$\begin{bmatrix} dx_6 \\ dy_6 \\ dz_6 \\ dA \\ dC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Jacobian} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dy_1 \\ dz_1 \\ di \\ dj \\ dk \end{bmatrix}$$

4.2 ความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

จากการทำการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ

$$Q = HR \quad (1)$$

ความเร็วคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งต่อหน่วยเวลา ทำการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ Q เทียบกับเวลา (\dot{Q}) จะได้

$$\frac{dQ}{dt} = \left[\frac{\partial h}{\partial R} \right] \frac{dR}{dt}$$

โดยที่ $\left[\frac{\partial h}{\partial R} \right]$ เป็นจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jac)

ดังนั้นความเร็วที่ระบบแกนของอุปกรณ์ตัดเฉือนเมื่อเปลี่ยนแปลงระบบพิกัดชิ้นงานไปยังระบบแกนของอุปกรณ์ตัดเฉือน

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_6}{dt} \\ \frac{dy_6}{dt} \\ \frac{dz_6}{dt} \\ \frac{dA}{dt} \\ \frac{dC}{dt} \end{bmatrix}_{Machine} = [Jac] \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dy_1}{dt} \\ \frac{dz_1}{dt} \\ \frac{di}{dt} \\ \frac{dj}{dt} \\ \frac{dk}{dt} \end{bmatrix}_{Workpiece}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ

$$\dot{Q}(t) = Jac\dot{R}(t) \quad (2)$$

ทำการหาอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สองและอันดับที่สามของ Q เทียบกับเวลา จะได้ ความเร่ง (\ddot{Q}) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง (\dddot{Q}) ตามลำดับ คือ

$$\ddot{Q}(t) = Jac\ddot{R}(t) + J\dot{a}c\dot{R}(t)^2 \quad (3)$$

$$\dddot{Q}(t) = J\dot{a}c\ddot{R}(t) + 3J\dot{a}c\dot{R}(t)\ddot{R}(t) + J\dot{a}c\dot{R}(t)^3 \quad (4)$$

5. การวางแผนเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์ (Trajectory planning)

ปัญหาในการวางแผนเส้นทางการเดินที่พบในผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่นั้น เกือบทุก ๆ เทคนิคเป็นการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์บางตัวหรือกำหนดวัตถุประสงค์การทำงานบางอย่างแต่จะยึดตามหลักเกณฑ์ที่สำคัญ คือ

1. การใช้เวลาปฏิบัติงานต่ำที่สุด
2. การใช้พลังงานต่ำที่สุด
3. การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้ต่ำที่สุด

5.1 การวางแผนเส้นทางการเดินโดยใช้เวลาปฏิบัติงานต่ำที่สุด

การทำให้เวลาปฏิบัติงานต่ำที่สุดเป็นแนวคิดแรกในการวางแผนเส้นทางการเดินที่ถูกนำเสนอในผลงานทางวิทยาศาสตร์ เพราะเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มผลผลิตในภาคอุตสาหกรรม

วิธีการแรกของแนวคิดนี้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระนาบของตำแหน่งและความเร็ว แนวคิดหลัก คือ การใช้ฟังก์ชันที่เป็นเส้นโค้งของเส้นทางเป็นพารามิเตอร์ เพื่อแสดงสมการแบบไดนามิกของหุ่นยนต์ในรูปแบบพารามิตรีค (Shim *et al*, 1985)

ต่อมาได้มีการใช้เทคนิคการเขียนโปรแกรมแบบพลศาสตร์ (Balkan, 1986) แต่วิธีดังกล่าวสร้างเส้นทางการเดินที่มีความเร่งและแรงบิดบนข้อต่อเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง เพราะโมเดลแบบไดนามิกที่ใช้สำหรับการคำนวณเส้นทางการเดินใช้สมมติฐานว่าสมาชิกหุ่นยนต์เป็นวัตถุแข็งเกร็ง โดยสมบรูณ์และแอกชูเอเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดผลเสีย 2 ประการ คือ

ประการแรก แอกชูเอเตอร์จริงของหุ่นยนต์ไม่สามารถสร้างแรงบิดที่ไม่ต่อเนื่องได้ เนื่องจากการเคลื่อนไหวของข้อต่อจะช้ากว่าเมื่อเทียบกับเส้นทางการเดินอ้างอิงเสมอ และอาจเกิดการสั่นสะเทือนในความถี่สูงที่สามารถทำลายโครงสร้างหุ่นยนต์ขึ้นได้ ทำให้เส้นทางการเดินด้วยวิธีนี้อาจไม่ถูกต้องนัก

ประการที่สอง การควบคุมเวลาที่เหมาะสมต้องการสภาวะการทำงานอย่างเต็มที่ของแอกชูเอเตอร์ของหุ่นยนต์อย่างน้อยหนึ่งตัวตลอดเวลา ซึ่งทำให้ตัวควบคุมไม่สามารถแก้ไขการติดตามความผิดพลาดที่เกิดจากสิ่งรบกวนหรือการสร้างแบบจำลองผิดพลาดได้

เพื่อที่ขจัดปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดข้อต่อเป็นข้อจำกัดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งบนแอกชูเอเตอร์ (Constantinescu *et al*, 2000) แต่วิธีการนี้เส้นทางการเดินที่สร้างขึ้นจะไม่ได้เวลาที่เหมาะสม (แม้ว่าใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด) อย่างไรก็ตาม เส้นทางการเดินที่สร้างขึ้นสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีการควบคุมที่ดีขึ้น

ในการสร้างเส้นทางการเดินที่มีความเร่งต่อเนื่อง วิธีที่พบได้บ่อยคือ เส้นทางการเดินที่ราบเรียบ เช่น ฟังก์ชันอิสระที่ได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางในผลงานทางวิทยาศาสตร์ในทั้งการวางแผนเส้นทางการเดินโดยใช้การวิเคราะห์จลนศาสตร์และพลศาสตร์ เริ่มแรกการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมโดยการแก้ไขลำดับของโหนดในพื้นที่ข้อต่อ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับของจุดต่อเนื้อที่เป็นตัวแทนของตำแหน่งและทิศทางของกรอบอ้างอิงที่เชื่อมโยงไปยังปลายของเอฟเฟลคเตอร์ของหุ่นยนต์ (Lin *et al*, 1983)

(Wang *et al*, 1990) ใช้อัลกอริทึมเดียวกัน แต่เส้นทางการเดินการใช้วิธีเส้นโค้งลูกบาศก์บี

(Jamhour *et al*, 1996) ได้แก้ไขอัลกอริทึม (Lin *et al*, 1983) ทำการเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อที่จะสามารถจัดการกับข้อจำกัดทางด้านพลศาสตร์และมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประเภททั่วไปมากขึ้น แต่การจำลองการรายงานยังอ้างถึงปัญหาการวางแผนของเส้นทางการเดินกับข้อจำกัดทางจลนศาสตร์

ขั้นตอนวิธีการทั้งหมดขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเส้นโค้งลูกบาศก์ที่กล่าวถึงในข้างต้นคือทางออกที่เหมาะสมเฉพาะรูปแบบนั้น ๆ ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับทั่วไป ดังนั้นขั้นตอนวิธีการบางอย่างได้รับการพัฒนาเพื่อมุ่งหาทางออกที่เหมาะสมทั่วไปสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการวางแผนเส้นทางสำหรับแขนกลของหุ่นยนต์ ตัวอย่างเช่น อัลกอริทึมที่นำเสนอขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ช่วงเวลา (Piazzi *et al*, 1998) และเทคนิคที่ใช้ขั้นตอนไฮบริดโดยใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Guarino Lo Bianco *et al*, 2001)

5.2 การวางแผนเส้นทางการเดินโดยใช้พลังงานต่ำที่สุด

การวางแผนเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์โดยใช้เกณฑ์เรื่องพลังงานมีข้อดีหลายประการ หนึ่งในนั้นคือมีเส้นทางการเดินที่เรียบราบส่งผลให้ง่ายต่อการติดตามและการลดความเครียดในแอกชูเอเตอร์และโครงสร้างหุ่นยนต์ นอกจากนี้การประหยัดพลังงานอาจจะเป็นผลดีในการใช้งานต่างๆ เช่น สำหรับที่มีความจุที่จำกัดของแหล่งพลังงาน (เช่น หุ่นยนต์สำหรับการบินสำรวจอวกาศหรือเรือดำน้ำ)

ตัวอย่างของการวางแผนพลังงานที่เหมาะสมของเส้นทางการโคจรได้แสดงไว้ใน (Von Stryk *et al*, 1994) พิจารณาเส้นทางการเดินแบบจุดต่อจุดที่มีพลังงานน้อยที่สุด ด้วยความกว้างของสัญญาณควบคุมและความเร็วข้อต่อ ใน (Martin *et al*, 1999) ได้หาเส้นทางการเดินที่เหมาะสมที่มีข้อจำกัดในการเคลื่อนไหวตั้งอยู่บนปลายเอฟเฟคเตอร์ ใช้เวลารวมของแรงบิดร่วมกันยกกำลังสองเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันค่าใช้จ่ายและใช้ค่าเฉลี่ยเส้นโค้งลูกบาศก์บีแสดงเส้นทางการเดิน ให้ผลลัพธ์คือแอกชูเอเตอร์มีการเคลื่อนที่ลดลง

การหาเส้นทางการเดินที่เหมาะสมด้วยเวลาและพลังงาน เช่น ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายที่มีการเชื่อมโยงกับเวลาดำเนินการและระยะการแสดงผลงานที่ใช้หมดไป ทำการชั่งน้ำหนักระหว่างความต้องการทั้ง 2 ปัจจุบันนี้ สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนน้ำหนักตามลำดับ (Shiller, 1996)

5.3 การวางแผนเส้นทางการเดินโดยลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งต่ำที่สุด

ลักษณะของโหนดที่จะต้องพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดในระบบคือ การที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งมีค่านันต์หรือเกิดโหนดแบบกระแทก (วุฒิชัย, 2533)

การจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่มีค่าสูง ๆ จะทำให้โครงสร้างหุ่นยนต์เกิดการสั่นหรือและเกิดความถี่เรโซแนนซ์อย่างหนัก การสั่นสะเทือนที่เกิดจากเส้นทางการเดินที่ไม่ราบเรียบสามารถสร้างความเสียหายแก่แอกชูเอเตอร์ของหุ่นยนต์และเกิดข้อผิดพลาดขนาดใหญ่ในขณะที่หุ่นยนต์กำลังปฏิบัติงาน เช่น การติดตามเส้นทางการเดิน นอกจากนี้เส้นทางการเดินที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งมีค่าน้อยสามารถดำเนินการอย่างรวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ข้อดีที่เกิดจากการลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง คือ

1. เส้นทางการเดินจะมีความผิดพลาดในระหว่างการติดตามลดลง
2. แอกชูเอเตอร์และ โครงสร้างของหุ่นยนต์มีความเครียดลดลง
3. ความถี่เรโซแนนซ์ของหุ่นยนต์ถูกจำกัด
4. หุ่นยนต์มีการประสานงานการเคลื่อนไหวที่เป็นธรรมชาติมากขึ้น

ข้อดีข้อสุดท้ายเป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก การศึกษาบางส่วน (Simon, 1993) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนไหวของแขนมนุษย์ดูเหมือนจะตอบสนองต่อเงื่อนไขที่เหมาะสมเชื่อมโยงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร่งที่ข้อต่อ ดังนั้นจึงอาจจะอนุมานได้ว่า เส้นทางการเดินที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ต่ำที่สุดเป็นตัวอย่างของความเหมาะสมตามเงื่อนไขทางกายภาพซึ่งเลียนแบบความสามารถของการประสานงานที่เป็นธรรมชาติของมนุษย์ (Bobrow *et al*, 2001)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee et.al. ได้เสนอขั้นตอนวิธีการวางแผนการป้อนมีดกัด (feed scheduling algorithm) สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกน โดยขั้นตอนครั้งแรกทำการแสกนเส้นโค้ง NURBS และหาจุดสำคัญภายในเส้นโค้งขนาดใหญ่ที่เรียกว่า critical point หรือมีความต่อเนื่อง G^0 (ให้ชื่อว่า breakpoint) จากนั้นทำการแยกย่อยกลายเป็นหลายๆ เส้นโค้ง NURBS ย่อย ความเร็วที่ critical point อยู่ภายใต้ข้อจำกัดของคอรัค ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง งานวิจัยนี้พบว่าการแก้ไข NURBS ทำให้เครื่องจักรซีเอ็นซีความเร็วสูงมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Lee et al., 2011)

Sencer et.al. ได้ขั้นตอนวิธีการวางแผนการป้อนมีดกัด สำหรับระบบซีเอ็นซี เพื่อลดเวลาของเครื่องจักร 5 แกนที่ใช้ในการกัดพื้นผิวชิ้นงาน ใช้รูปแบบ cubic-B-spline ในแสดงการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเดินของมีดกัด ปรับจุดควบคุมการป้อน (feed control point) ของ B-spline เพื่อหา feed ที่มากที่สุดตามเส้นทางการเดินของมีดกัด พิจารณาไม่ให้เกิดขีดจำกัด feed ของเครื่อง ซึ่งได้มาจากข้อจำกัดด้านความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง (Sencer et al., 2008)

Gasparetto และ Zanotto ได้วางแผนการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใหม่ เพื่อให้มีความราบเรียบมากขึ้น โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะมีตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาประกอบด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งยกกำลังสองตามเส้นทางการเคลื่อนที่และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ใช้ Fifth-order B-spline ในการประกอบเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด หลังจากได้ทำการทดสอบ พบว่าวิธีนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่อื่น ๆ (Gasparetto and Zanotto, 2007)

Dong et.al. ได้หาอัตราป้อนที่เหมาะสม ใช้ขั้นตอนวิธีการแสกนแบบสองทิศทาง (bidirectional scan algorithm) โดยเพิ่มขั้นตอนใหม่ของความเร่งต่อเนื่องลงในวิธีการเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง และลบความไม่ต่อเนื่องในโครงร่างอัตราเร่ง (acceleration profile) (Dong et al., 2007)

Qian et. al. ได้เปรียบเทียบกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนเงื่อนไขอัตราป้อน ในเวลาการผลิตและการเปลี่ยนอัตราป้อน โดยเวลาในการผลิตจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญถ้ามีการควบคุมตัวแปรอย่าง

เหมาะสม นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้กล่าวถึงประเด็นที่ว่า การปรับเปลี่ยนเงื่อนไขอัตราป้อน อาจจะไม่สามารถใช้ได้จริงในกรณีที่ตั้งตำแหน่งการกัด (cutting location) ใกล้เคียงมีระยะห่างเล็กน้อยกว่าที่เครื่องจักรทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขอัตราป้อน แล้วจะเข้าไปได้ (Qian *et al.*, 2008)

Yong และ Narayanaswami ได้เสนอการตรวจหาออฟไลน์ของ feed rate sensitive corners โครงร่างความเร็ว (velocity profile) ในบริเวณนี้ถูกวางแผนเพื่อให้มีความผิดพลาดของคอร์รัคอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในขณะที่รองรับข้อจำกัดทั้งเรื่องความเร็วและการลดความเร็วของเครื่องจักร ส่วนนอกเขต feed rate sensitive corners จะวางแผนโดยใช้การประมาณค่าของเทเลอร์ (Taylor approximation) ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าการตรวจจับแบบออฟไลน์ของ feed rate sensitive corners ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแก้ไขปัญหาแบบพารามетริก สำหรับการแก้ไขปัญหาแบบเรียลไทม์ ข้อมูลเส้นโค้งพารามетริกสามารถเพิ่มมากขึ้นด้วยการ feed rate sensitive corners ที่ตรวจสอบแล้วที่ถูกเก็บไว้ในเมตริกซ์ 2 คูณ 2 ได้ (Yong and Narayanaswami, 2003)

Shim และ Lee ได้เสนอวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์พื้นที่ทำงานความเร็วของระบบ cooperating multi-finger robot โดยใช้แบบจำลองของจุดสัมผัสกับแรงเสียดทาน พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเร็วของนิ้วกับวัตถุที่สัมผัส จากสมการพลวัต กำหนดขอบเขตของความเร่งเชิงเส้นและเชิงมุมสูงสุดของวัตถุตามข้อจำกัดเงื่อนไขการสัมผัสองค์ประกอบของนิ้วและขอบเขตของแรงบิดของข้อต่อแต่ละนิ้ว ผลการวิจัยพบว่าสามารถหาขอบเขตความเร็วได้และขอบเขตความเร็วจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของนิ้ว (Shim and Lee, 2008)

Erkorkmaz และ Heng ได้เสนอเทคนิค heuristic ในการหาอัตราป้อน ที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางการเดินมีดกัดของ NURBS งานวิจัยนี้ให้ cycle time ที่น้อยลงและหาค่า feasible solution เร็วกว่าวิธีการ gradient-based (Erkorkmaz and Heng, 2008)

Ko *et al.* ได้เสนอแนวคิดในการควบคุมการกัดใน NURBS interpolator โดยให้ขึ้นกับระดับของความโค้ง ใช้แรงตัดและสภาพพื้นผิวในการประเมินและพิสูจน์ระบบแนวคิดนี้จะช่วยในการปกป้องเครื่องมือกัดและปรับปรุงความสามารถของเครื่องจักรให้ดีขึ้น (Ko *et al.*, 2005)

So et.al. ได้เสนอ machine time estimation algorithm สำหรับเครื่องจักรความเร็วสูง 5 แกน โดย algorithm จะพิจารณาพฤติกรรมเคลื่อนที่ทั้งแบบ translation และ rotation ของเครื่องจักร 5 แกน พบว่ามุมของ feed เป็นตัวแปรอิสระของความเร็วเครื่องจักร จากการเปรียบเทียบ machining time ของ algorithm ที่นำเสนอในงานวิจัยกับ commercial program เมื่อเทียบกับเวลาที่เครื่องจักรทำงานจริง พบว่า algorithm ของงานวิจัยนี้คำนวณเวลาได้ใกล้เคียงกว่า (So et al., 2007a)

So et.al. ได้เสนอวิธีการหาคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ (NC data) ที่เหมาะสมของเครื่องจักร 5 แกน โดยพิจารณาจากพฤติกรรมลักษณะเฉพาะของเครื่องจักร ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ความเร็วของเครื่องจักร 5 แกนสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยไม่มีการสูญเสียความแม่นยำและไม่สูญเสียคุณภาพของพื้นผิวชิ้นงาน (So et al., 2007b)

Yongzhang et.al. ได้เสนอ NURBS interpolator ในเครื่องจักร 5 แกน โดยใช้รูปแบบคำสั่งของเส้นโค้ง NURBS คู่ โดยวิธีดังกล่าวให้ผลที่เหมาะสมสำหรับ 5-axis coordinated real-time interpolation คือ ให้ความเร็วดีกว่า ความแม่นยำมากกว่า และจำนวน NC-file ในการกัณฑ์พื้นผิวชิ้นงานน้อยกว่าการใช้ 5-axis coordinated linear interpolation (Yongzhang et al., 2007)

Chen et.al. ได้พัฒนา 5-axis NURBS real-time interpolator โดยใช้เส้นโค้ง NURBS ในการแสดงเครื่องมือและเส้นทางการเดินตามแกน งานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำของเครื่องจักรและ spline interpolator มีความเป็นไปได้ในระบบซีเอ็นซี 5 แกน (Chen et al., 2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

เครื่องคอมพิวเตอร์

วิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของ เครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน และคำนวณหาค่าสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมในการกักชิ้นงานของ เครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนภายใต้เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

1.1 ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงาน

$$F_{w,i} = \dot{R}_i(t_i) = \frac{dR_i}{dt_i} \quad (5)$$

$$a_{w,i} = \ddot{R}_i(t_i) = \frac{d^2 R_i}{dt_i^2} \quad (6)$$

$$J_{w,i} = \dddot{R}_i(t_i) = \frac{d^3 R_i}{dt_i^3} \quad (7)$$

โดย $F_{w,i}$ เป็นอัตราป้อนในระบบพิกัดชิ้นงานที่ลำดับการกักที่ i

$a_{w,i}$ เป็นความเร่งในระบบพิกัดชิ้นงานที่ลำดับการกักที่ i

$J_{w,i}$ เป็นอัตราเปลี่ยนแปลงของความเร่งในระบบพิกัดชิ้นงานที่ลำดับการกักที่ i

โดย t_i เป็นเวลาในการตัดเฉือนชิ้นงานที่ลำดับการกักที่ i ด้วยอัตราป้อน $F_{w,i}$ จาก ข้อมูลตำแหน่งมีดกัด สามารถคำนวณได้จาก

$$F_{w,i} = \sqrt{v_{x_{1,i}}^2 + v_{y_{1,i}}^2 + v_{z_{1,i}}^2 + v_{i,i}^2 + v_{j,i}^2 + v_{k,i}^2}$$

$$F_{w,i} = \sqrt{\left(\frac{(x_{1,i} - x_{1,i-1})}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{(y_{1,i} - y_{1,i-1})}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{(z_{1,i} - z_{1,i-1})}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{(i - i_{i-1})}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{(j - j_{i-1})}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{(k - k_{i-1})}{t_i}\right)^2}$$

$$t_i = \frac{1}{F_{w,i}} \sqrt{(x_{1,i} - x_{1,i-1})^2 + (y_{1,i} - y_{1,i-1})^2 + (z_{1,i} - z_{1,i-1})^2 + (i - i_{i-1})^2 + (j - j_{i-1})^2 + (k - k_{i-1})^2} \quad (8)$$

โดย $(x_{1,i}, y_{1,i}, z_{1,i}, i, j, k_i)$ และ $(x_{1,i-1}, y_{1,i-1}, z_{1,i-1}, i_{i-1}, j_{i-1}, k_{i-1})$ เป็นระยะห่างระหว่างลำดับการกวดที่ $i-1$ และ i ที่อยู่ติดกัน

1.2 ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบแกนของเครื่องจักร

จากภาพที่ 6 เครื่องจักรมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากระบบพิกัดของชิ้นงานไปยังระบบแกนของเครื่องจักรโดยสรุปดังนี้

$$\left. \begin{aligned} x_6 &= x_1 \cos C + x_{01}^{02} \cos C - y_1 \sin C - y_{01}^{02} \sin C \\ y_6 &= x_1 \cos A \sin C + y_1 \cos A \cos C - z_1 \sin A + x_{01}^{02} \cos A \sin C + y_{01}^{02} \cos A \cos C - z_{01}^{02} \sin A + y_{02}^{03} \cos A - z_{02}^{03} \sin A - y_{02}^{03} \\ z_6 &= x_1 \sin A \sin C + y_1 \sin A \cos C + z_1 \cos A + x_{01}^{02} \sin A \sin C + y_{01}^{02} \sin A \cos C + z_{01}^{02} \cos A + y_{02}^{03} \sin A + z_{02}^{03} \cos A - z_{02}^{03} + z_{04}^{05} - z_7 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{i}{j} \right)$$

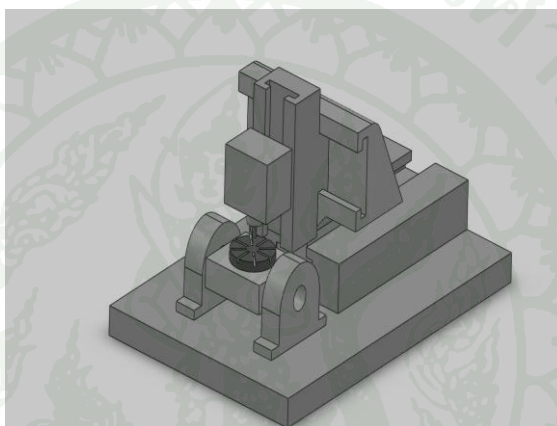
$$C = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{i^2 + j^2}}{k} \right)$$

โดย $x_{01}^{02}, y_{01}^{02}, z_{01}^{02}, x_{02}^{03}, y_{02}^{03}, z_{02}^{03}, z_{04}^{05}$ และ z_7 เป็นค่าคงที่

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้

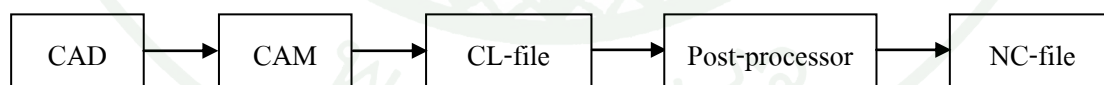
$x_{01}^{02} = y_{01}^{02} = z_{01}^{02} = 100$ มิลลิเมตร $x_{02}^{03} = y_{02}^{03} = 0$ มิลลิเมตร $z_{02}^{03} = -150$ มิลลิเมตร $z_{04}^{05} = 450$ มิลลิเมตร และ $z_r = 60$ มิลลิเมตร

เมื่อจัดรูปสมการที่ (9) ให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ดังสมการที่ (1) สามารถหาความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งของระบบแกนของเครื่องจักร ได้จากสมการที่ (2) (3) และ (4) ตามลำดับ



ภาพที่ 6 โครงสร้างของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนที่ใช้ทดลอง

2. การสร้างทางเดินมีดกัด



ภาพที่ 7 การออกแบบเส้นทางการเดินมีดกัด

จากภาพที่ 7 ในการออกแบบเส้นทางการเดินมีดกัด โดยปกติจะใช้โปรแกรม CAD (Computer-Aid-Design) ในการขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นใช้โปรแกรม CAM เพื่อให้ได้เส้นทางการเดินมีดกัด ณ พิกัดบนชิ้นงาน (CL-file) แล้วนำพิกัดบนชิ้นงานที่ได้ผ่านเข้าตัวแปลง (postprocessor) เพื่อให้ได้พิกัดที่จะใช้กับเครื่องจักรซีเอ็นซีหรือที่เรียกว่าคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ (NC-file) หรือ G-code

แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเส้นทางการเดินมีดกัดของเครื่องจักรที่มีปัญหาเรื่องอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเกินกว่าที่กำหนด เพื่อทำการปรับปรุงและเปรียบเทียบระหว่างเส้นทางการเดินมีดกัดเดิมกับเส้นทางการเดินมีดกัดใหม่ ดังนั้นจึงทำการสมมติเส้นทางการเดินมีดกัดขึ้นเองเป็นเส้นทางการเดินมีดกัดจากคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ (NC-file) จำนวน 5 ลำดับการกัด

3. คำนวณหาเวลา ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง และอัตราเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแต่ละแกน

3.1 เวลาที่ใช้ในการตัดเฉือน

เวลาที่ใช้ในการตัดเฉือนของลำดับการกัดที่ i จากพิกัดของลำดับการกัดที่ $i-1$ ถึง i ด้วยอัตราป้อน (Feedrate) ของลำดับการกัดที่ i ซึ่งคำนวณจาก

$$F_{M,i} = \sqrt{v_{x_{6,i}}^2 + v_{y_{6,i}}^2 + v_{z_{6,i}}^2 + v_{A_i}^2 + v_{C_i}^2}$$

$$F_{M,i} = \sqrt{\left(\frac{x_{6,i} - x_{6,i-1}}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{y_{6,i} - y_{6,i-1}}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{z_{6,i} - z_{6,i-1}}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{A_i - A_{i-1}}{t_i}\right)^2 + \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{t_i}\right)^2}$$

$$t_i = \frac{1}{F_{M,i}} \sqrt{(x_{6,i} - x_{6,i-1})^2 + (y_{6,i} - y_{6,i-1})^2 + (z_{6,i} - z_{6,i-1})^2 + (A_i - A_{i-1})^2 + (C_i - C_{i-1})^2} \quad (10)$$

โดยที่ $(x_{6,i}, y_{6,i}, z_{6,i}, A_i, C_i)$ และ $(x_{6,i-1}, y_{6,i-1}, z_{6,i-1}, A_{i-1}, C_{i-1})$ เป็นระยะห่างระหว่างลำดับการกัดที่ $i-1$ และ i ที่อยู่ติดกัน

3.2 ระยะทางในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

ระยะทางในการเคลื่อนที่จากลำดับการกัดที่ $i-1$ ถึง i ในแต่ละแกน คำนวณจาก

$$\left. \begin{aligned}
 S_{x_6,i} &= x_{6,i} - x_{6,i-1} \\
 S_{y_6,i} &= y_{6,i} - y_{6,i-1} \\
 S_{z_6,i} &= z_{6,i} - z_{6,i-1} \\
 S_{A,i} &= A_i - A_{i-1} \\
 S_{C,i} &= C_i - C_{i-1}
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

โดย $S_{x_6,i}, S_{y_6,i}, S_{z_6,i}, S_{A,i}$ และ $S_{C,i}$ เป็นระยะทางจากลำดับการกักที่ $i-1$ ถึง i ในแกน X, Y, Z, A และ C ตามลำดับ

ระยะทางในการเคลื่อนที่สะสมของแต่ละแกน คำนวณจาก

$$\left. \begin{aligned}
 SS_{x_6,i} &= SS_{x_6,i-1} + |S_{x_6,i}| \\
 SS_{y_6,i} &= SS_{y_6,i-1} + |S_{y_6,i}| \\
 SS_{z_6,i} &= SS_{z_6,i-1} + |S_{z_6,i}| \\
 SS_{A,i} &= SS_{A,i-1} + |S_{A,i}| \\
 SS_{C,i} &= SS_{C,i-1} + |S_{C,i}|
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3.3 ความเร็วในแต่ละแกน

ความเร็วเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะทางต่อหน่วยเวลา จากสมการที่ 11 สามารถคำนวณความเร็ว ณ ลำดับการกักที่ i ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned}
 v_{x_6,i} &= \frac{dS_{x_6,i}}{dt_i} = \frac{(x_{6,i} - x_{6,i-1})}{t_i} \\
 v_{y_6,i} &= \frac{dS_{y_6,i}}{dt_i} = \frac{(y_{6,i} - y_{6,i-1})}{t_i} \\
 v_{z_6,i} &= \frac{dS_{z_6,i}}{dt_i} = \frac{(z_{6,i} - z_{6,i-1})}{t_i} \\
 v_{A,i} &= \frac{dS_{A,i}}{dt_i} = \frac{(A_i - A_{i-1})}{t_i} \\
 v_{C,i} &= \frac{dS_{C,i}}{dt_i} = \frac{(C_i - C_{i-1})}{t_i}
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

โดย $v_{x_{6,i}}, v_{y_{6,i}}, v_{z_{6,i}}, v_{A,i}$ และ $v_{C,i}$ เป็นความเร็วจากลำดับการกักที่ $i-1$ ถึง i ในแกน X, Y, Z, A และ C ตามลำดับ

3.4 ความเร่งในแต่ละแกน

ความเร่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่อหน่วยเวลา จากสมการที่ 13 สามารถคำนวณความเร็ว ณ ลำดับการกักที่ i ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} a_{x_{6,i}} &= \frac{d^2 S_{x_{6,i}}}{dt_i^2} = \frac{(x_{6,i} - x_{6,i-1})}{t_i^2} \\ a_{y_{6,i}} &= \frac{d^2 S_{y_{6,i}}}{dt_i^2} = \frac{(y_{6,i} - y_{6,i-1})}{t_i^2} \\ a_{z_{6,i}} &= \frac{d^2 S_{z_{6,i}}}{dt_i^2} = \frac{(z_{6,i} - z_{6,i-1})}{t_i^2} \\ a_{A,i} &= \frac{d^2 S_{A,i}}{dt_i^2} = \frac{(A_i - A_{i-1})}{t_i^2} \\ a_{C,i} &= \frac{d^2 S_{C,i}}{dt_i^2} = \frac{(C_i - C_{i-1})}{t_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

โดย $a_{x_{6,i}}, a_{y_{6,i}}, a_{z_{6,i}}, a_{A,i}$ และ $a_{C,i}$ เป็นความเร่งจากลำดับการกักที่ $i-1$ ถึง i ในแกน X, Y, Z, A และ C ตามลำดับ

3.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแต่ละแกน

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งต่อหน่วยเวลา จากสมการที่ 14 สามารถคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ณ ลำดับการกักที่ i ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 J_{x_{6,i}} &= \frac{d^3 S_{x_{6,i}}}{dt_i^3} = \frac{2 \times (x_{6,i} - x_{6,i-1})}{t_i^3} \\
 J_{y_{6,i}} &= \frac{d^3 S_{y_{6,i}}}{dt_i^3} = \frac{2 \times (y_{6,i} - y_{6,i-1})}{t_i^3} \\
 J_{z_{6,i}} &= \frac{d^3 S_{z_{6,i}}}{dt_i^3} = \frac{2 \times (z_{6,i} - z_{6,i-1})}{t_i^3} \\
 J_{A,i} &= \frac{d^3 S_{A,i}}{dt_i^3} = \frac{2 \times (A_i - A_{i-1})}{t_i^3} \\
 J_{C,i} &= \frac{d^3 S_{C,i}}{dt_i^3} = \frac{2 \times (C_i - C_{i-1})}{t_i^3}
 \end{aligned} \tag{15}$$

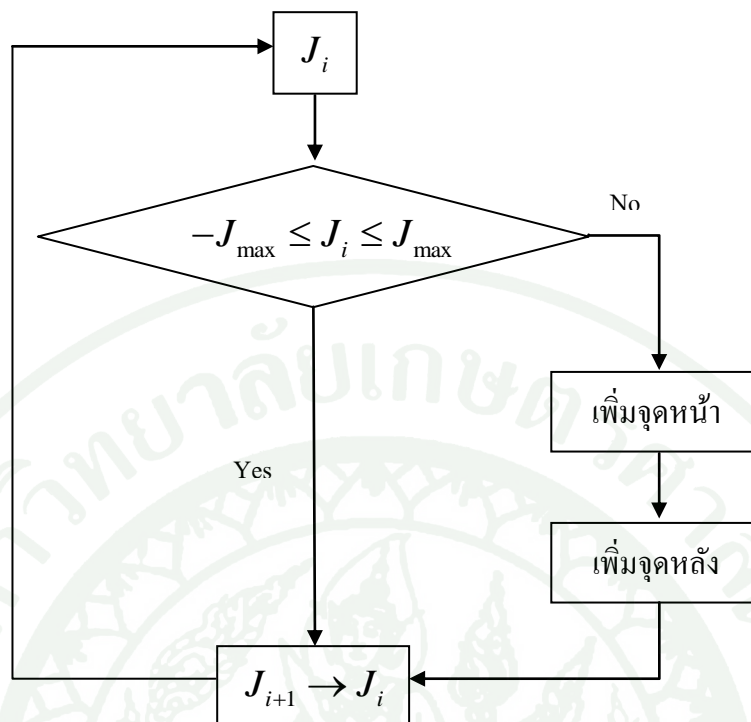
โดย $J_{x_{6,i}}, J_{y_{6,i}}, J_{z_{6,i}}, J_{A,i}$ และ $J_{C,i}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งจากลำดับการกักที่ $i-1$ ถึง i ในแกน X, Y, Z, A และ C ตามลำดับ

4. ควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ในอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร่งที่กำหนด

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งจะทำการควบคุมโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$-J_{\max} \leq J \leq J_{\max}$$

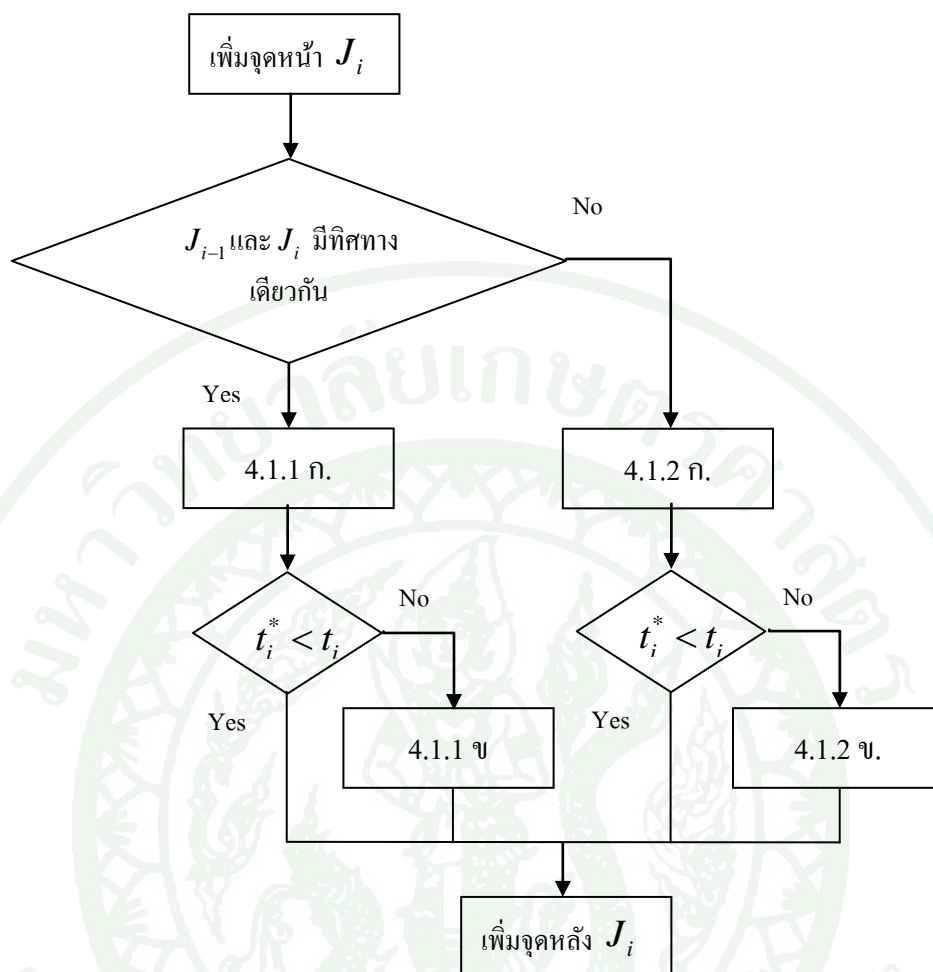
กล่าวคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งจะต้องมีค่าไม่เกินอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนดไว้ เมื่อพบค่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร่งเกินกว่าที่กำหนดไว้ จะทำการปรับค่าโดยการเพิ่มพิกัดการเดินมีดกักเข้าไปในช่วงเวลาของเส้นทาง หรือปรับเปลี่ยนช่วงเวลาของเส้นทางนั้นเพื่อให้ความเร่งภายในเส้นทาง (พื้นที่ใต้กราฟของกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับเวลา) มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับของเดิม ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ให้อยู่ในอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่กำหนด

4.1 การปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ก่อนจุด i

การปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ก่อนจุด i มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสว่างก่อนจุด i

กำหนดให้

J_i เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสว่างที่มีค่าเกินกว่าที่กำหนด ณ จุด i

J_{i-1} เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสว่างของจุดติดกันก่อนหน้าจุด i

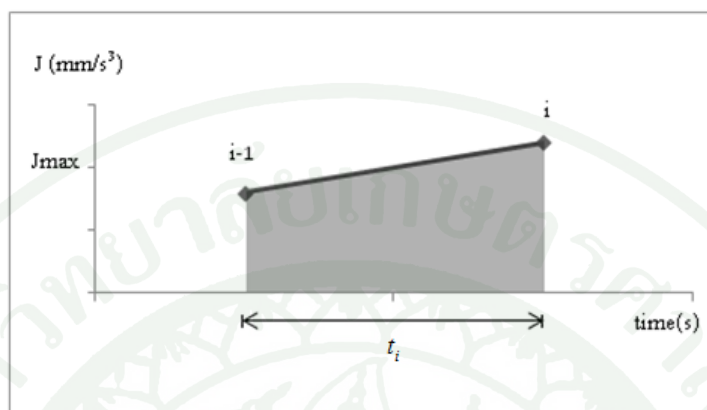
t_i เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ $i-1$ จนถึง i

t_i^* เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุดที่เพิ่มขึ้นใหม่จนถึง i

t_{inew}^* เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ $i-1$ จนถึงจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่

t_{inew} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุดที่เพิ่มขึ้นใหม่จนถึง i ในกรณี $t_i^* \geq t_i$

4.1.1 การปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งก่อนจุด i โดย J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 10 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน

แสดงได้ดังภาพที่ 10 แยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณี

ก. กรณี $t_i^* < t_i$

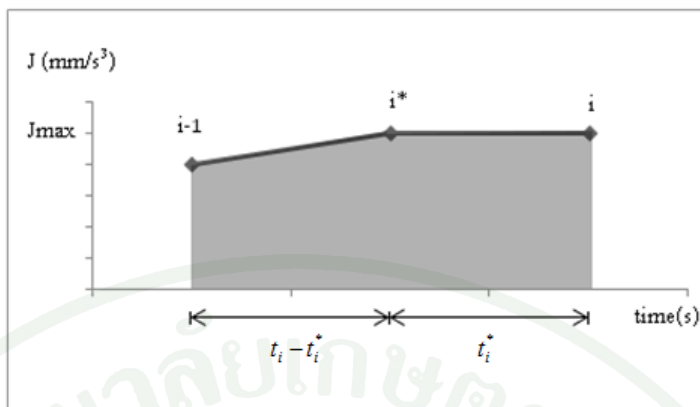
ต้องการให้ความเร่งก่อนและหลังปรับมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่าเดิม)

พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\frac{1}{2} \times t_i \times (J_i - J_{i-1}) = \frac{1}{2} \times (J_{\max} - J_{i-1}) \times (t_i + t_i^*)$$

$$t_i^* = \left(\frac{t_i \times (J_i - J_{i-1})}{(J_{\max} - J_{i-1})} \right) - t_i \quad \text{โดยที่ } t_i^* < t_i \quad (16)$$

ทำการเพิ่มจุดใหม่ขึ้นหลังจุด $i-1$ ไป $t_i - t_i^*$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} และปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่จุด i ให้เหลือเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} ด้วย แสดงได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ก. หลังปรับค่า

ข. กรณี $t_i^* \geq t_i$

จะไม่สามารถทำการชอยแบ่งเวลาภายในเส้นทางเพื่อสร้างพิกัดใหม่ ทำให้ต้องเพิ่มช่วงเวลายื่นเพื่อรองรับให้ความเร่งภายในเส้นทางยังคงมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงค่าเดิม

ทำการหา t_{inew}^* จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{J_{\max} - J_{i-1}}{t_{inew}^*} = \frac{J_i - J_{i-1}}{t_i}$$

$$t_{inew}^* = \left(\frac{J_{\max} - J_{i-1}}{J_i - J_{i-1}} \right) \times t_i \quad (17)$$

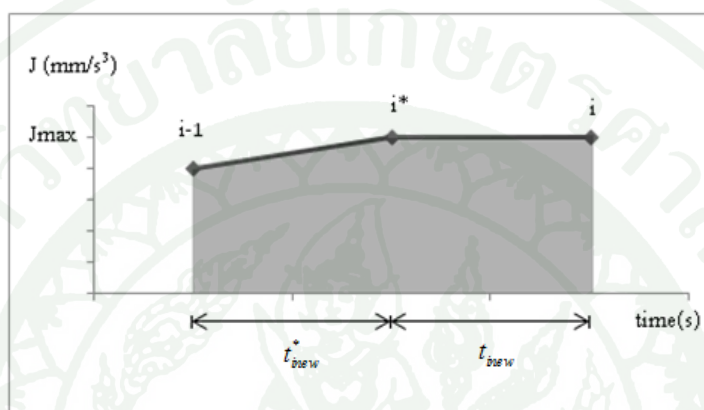
ทำการเพิ่มจุดใหม่ขึ้นหลังจุด $i-1$ ไป t_{inew}^* โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} จากนั้นเปลี่ยนช่วงเวลา t_i เป็น t_{inew}

พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู = พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\frac{1}{2} \times (t_i - t_{inew}^*) \times (J_i + J_{\max}) = J_{\max} \times t_{inew}$$

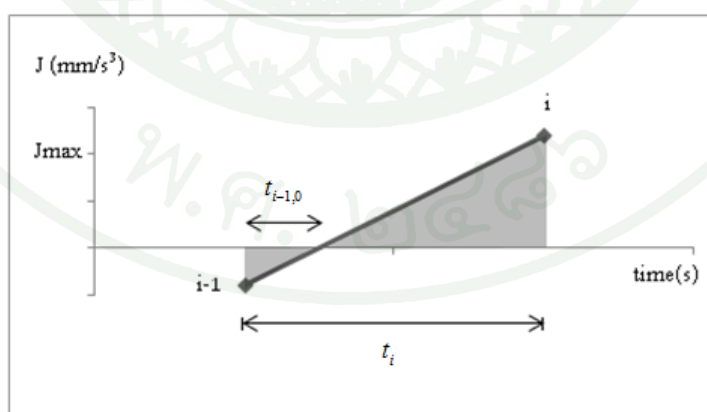
$$t_{inew} = \frac{(t_i - t_{inew}^*) \times (J_i + J_{max})}{2J_{max}} \quad (18)$$

ปรับจุด i ใหม่โดยเพิ่มเวลาจากจุดที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ไป t_{inew} โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{max}$ หรือ J_{max} แสดงได้ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ข. หลังปรับค่า

4.1.2 การปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งก่อนจุด i โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน



ภาพที่ 13 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศตรงข้ามกัน

แสดงได้ดังภาพที่ 13 แยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณี

ก. กรณี $t_i^* < t_i$

ต้องการให้ความเร่งก่อนและหลังปรับมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่าเดิม)

พื้นที่สามเหลี่ยม + พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สามเหลี่ยม + พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\left(\frac{1}{2} \times t_{i-1,0} \times J_{i-1}\right) + \left(\frac{1}{2} \times J_i \times (t_i - t_{i-1,0})\right) = \left(\frac{1}{2} \times t_{i-1,0}^* \times J_{i-1}\right) + \left(\frac{1}{2} \times J_{\max} \times ((t_i - t_{i-1,0}^*) - t_i^*)\right) \quad (19)$$

จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{|J_i| + |J_{i-1}|}{t_i} = \frac{|J_{i-1}|}{t_{i-1,0}}$$

$$t_{i-1,0} = \frac{|J_{i-1}| t_i}{|J_i| + |J_{i-1}|} \quad (20)$$

โดย $t_{i-1,0}$ เป็นช่วงเวลาจากจุด $i-1$ จนถึงจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นศูนย์

$$\frac{|J_{\max}| + |J_{i-1}|}{(t_i - t_i^*)} = \frac{|J_{i-1}|}{t_{i-1,0}^*}$$

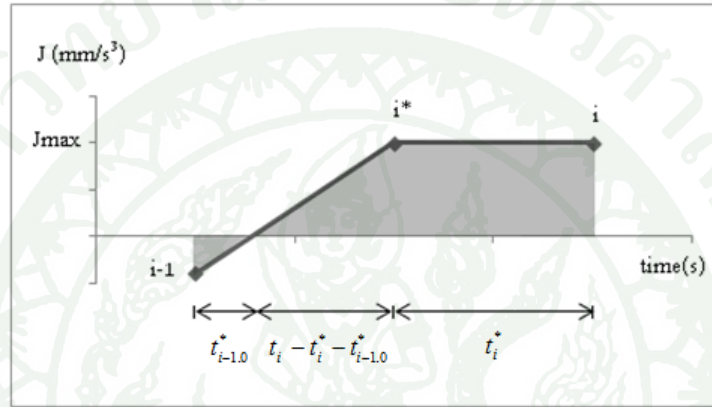
$$t_{i-1,0}^* = \frac{|J_{i-1}| (t_i - t_i^*)}{|J_{\max}| + |J_{i-1}|} \quad (21)$$

โดย $t_{i-1,0}^*$ เป็นช่วงเวลาจากจุด $i-1$ จนถึงจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นศูนย์หลังจากปรับค่า

แทนค่าสมการที่ (20) และ (21) ลงในสมการที่ (19) จะได้

$$t_i^* = \frac{J_{i-1}^2 + (|J_{\max} J_{i-1}| - |J_i J_{i-1}| - |J_{\max} J_i|) t_{i-1,0} + (|J_i J_{i-1}| + |J_{\max} J_i| + J_{i-1}^2 - J_{\max}^2) t_i}{J_{\max}^2 + |J_{\max}| + |J_{\max} J_{i-1}| - J_{i-1}^2} \quad (22)$$

ทำการเพิ่มจุดใหม่ขึ้นหลังจุด $i-1$ ไป $t_i - t_i^*$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} และปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่จุด i ให้เหลือเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} ด้วย แสดงได้ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศทางข้ามกัน กรณี ก. หลังปรับค่า

ข. กรณี $t_i^* \geq t_i$

จะไม่สามารถทำการซอยแบ่งเวลาภายในเส้นทางเพื่อสร้างพิกัดใหม่ ทำให้ต้องเพิ่มช่วงเวลานั้นเพื่อรองรับให้ความเร่งภายในเส้นทางยังคงมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงค่าเดิม

ทำการหา t_{inew}^* จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{|J_{\max}| + |J_{i-1}|}{t_{inew}^*} = \frac{|J_i| + |J_{i-1}|}{t_i}$$

$$t_{inew}^* = \left(\frac{|J_{\max}| + |J_{i-1}|}{|J_i| + |J_{i-1}|} \right) \times t_i \quad (23)$$

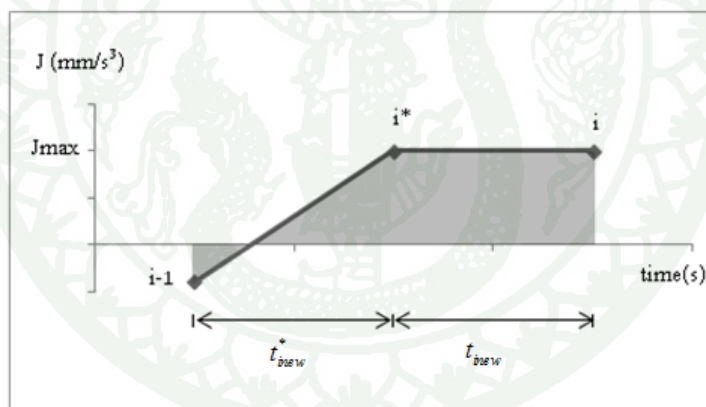
ทำการเพิ่มจุดใหม่ขึ้นหลังจุด $i-1$ ไป $t_{i-1,0}^*$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} จากนั้นเปลี่ยนช่วงเวลา t_i เป็น $t_{i-1,0}^*$

พื้นที่สามเหลี่ยม + พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สามเหลี่ยม + พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\left(\frac{1}{2} \times t_{i-1,0} \times J_{i-1}\right) + \left(\frac{1}{2} \times J_i \times (t_i - t_{i-1,0})\right) = \left(\frac{1}{2} \times t_{i-1,0} \times J_{i-1}\right) + \left(\frac{1}{2} \times J_{\max} \times ((t_i - t_{i-1,0}) + t_{i-1,0}^*)\right)$$

$$t_{i-1,0}^* = \frac{(t_i - t_{i-1,0})J_i - (t_i - t_{i-1,0})J_{\max}}{J_{\max}} \quad (24)$$

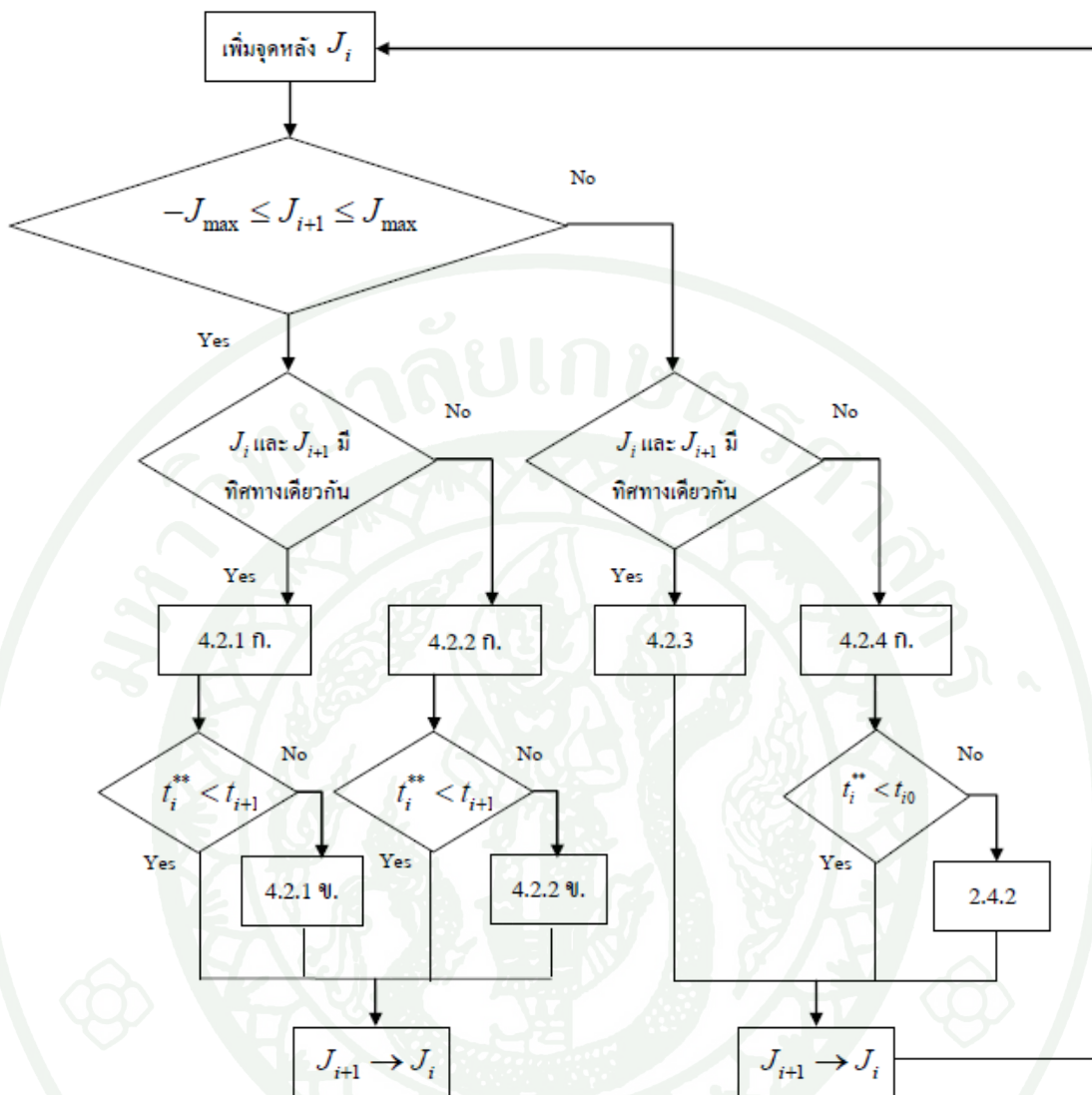
ปรับจุด i ใหม่โดยเพิ่มเวลาจากจุดที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ไป $t_{i-1,0}^*$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} แสดงได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง J_i และ J_{i-1} มีทิศตรงข้ามกัน กรณี ข. หลังปรับค่า

4.2 การปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งหลังจุด i

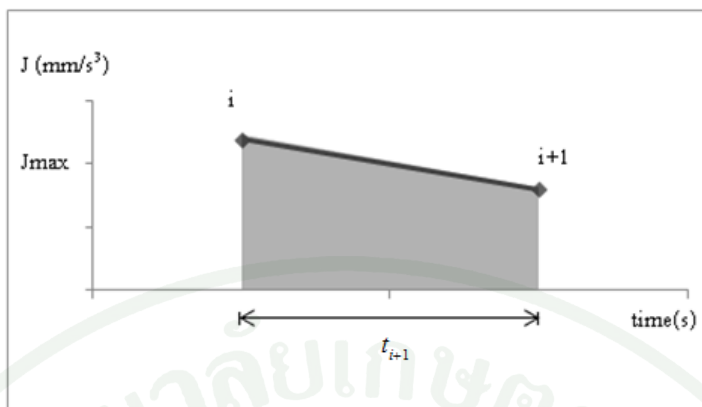
หลังจากปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งหน้าจุด i เรียบร้อยแล้ว มาถึงขั้นตอนการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งหลังจุด i ซึ่งเมื่อพิจารณาที่จุด $i+1$ จะจำแนกได้เป็น 4 กรณี โดยมีขั้นตอนดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งหลังจุด i

4.2.1 กรณีที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ณ จุดติดกันถัดไปมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนด ($-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$) โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน

แสดงได้ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน

กำหนดให้

J_{i+1} เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งของจุดติดกันถัดจากจุด i

t_{i+1} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ i จนถึง $i+1$

t_i^* เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุด i จนถึงจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่

t_{i+1}^{**} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุดที่เพิ่มขึ้นใหม่จนถึง $i+1$

t_{i+1}^{new} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ i จนถึงจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่ในกรณี $t_i^* \geq t_{i+1}$

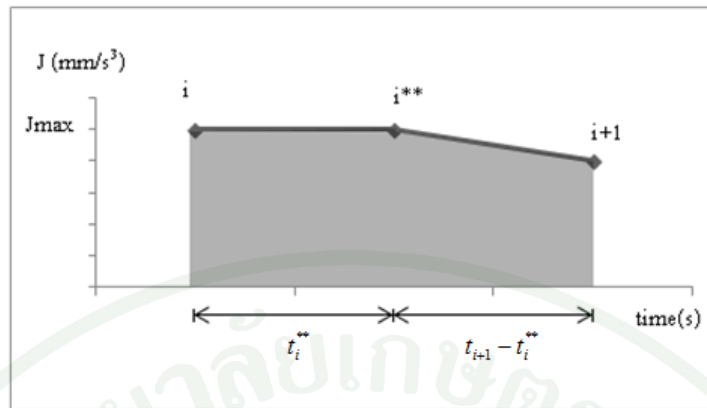
ก. กรณี $t_i^* < t_{i+1}$

พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\frac{1}{2} \times t_{i+1} \times (J_i - J_{i+1}) = \frac{1}{2} \times (J_{\max} - J_{i+1}) \times (t_{i+1} + t_i^{**})$$

$$t_i^{**} = \left(\frac{t_{i+1} \times (J_i - J_{i+1})}{(J_{\max} - J_{i+1})} \right) - t_{i+1} \quad \text{โดยที่ } t_i^{**} < t_{i+1} \quad (25)$$

ทำการเพิ่มจุดด้านหลังจุด i ไป t_i^{**} โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} แสดงได้ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ก. หลังปรับค่า

ข. กรณี $t_i^{**} \geq t_{i+1}$

ทำการหา $t_{i\text{new}}^{**}$ จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{J_{\max} - J_{i+1}}{t_{i\text{new}}^{**}} = \frac{J_i - J_{i+1}}{t_{i+1}}$$

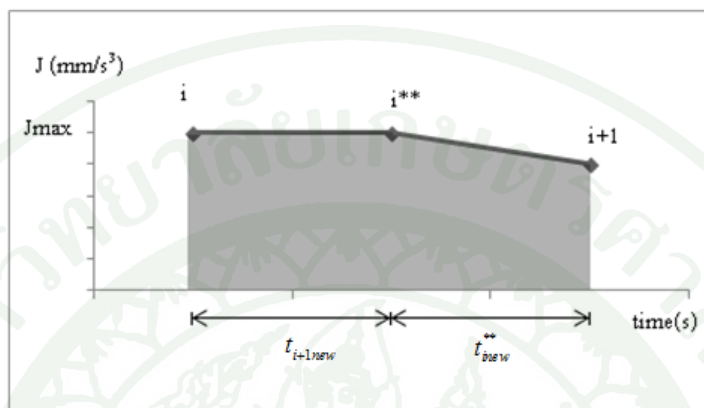
$$t_{i\text{new}}^{**} = \left(\frac{J_{\max} - J_{i+1}}{J_i - J_{i+1}} \right) \times t_{i+1} \quad (26)$$

พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู = พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\frac{1}{2} \times (t_{i+1} - t_{i\text{new}}^{**}) \times (J_i + J_{\max}) = J_{\max} \times t_{i+1\text{new}}$$

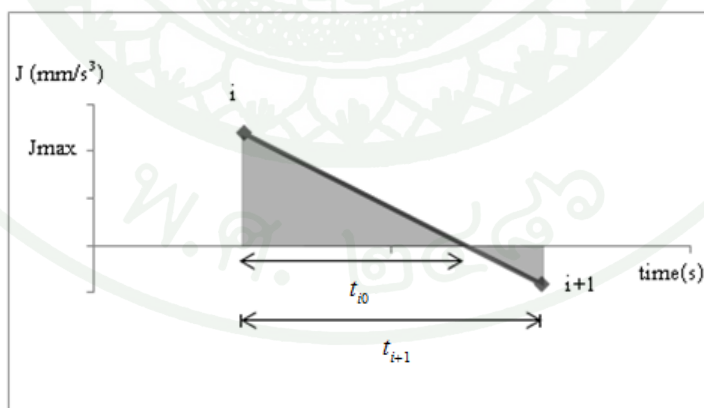
$$t_{i+1\text{new}} = \frac{(t_{i+1} - t_{i\text{new}}^{**}) \times (J_i + J_{\max})}{2J_{\max}} \quad (27)$$

ทำการเพิ่มจุดขึ้นใหม่ด้านหลังจุด i ไป t_{i+1new} ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{max}$ หรือ J_{max} และให้ใช้เวลาเท่ากับ t_{i+1new}^{**} เป็นเวลาจากจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่หลังจุด i ไปยังจุด $i+1$ แสดงได้ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{max} \leq J_{i+1} \leq J_{max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน กรณี ข. หลังปรับค่า

4.2.2 กรณีที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ณ จุดติดกันถัดไปมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนด ($-J_{max} \leq J_{i+1} \leq J_{max}$) โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน



ภาพที่ 20 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{max} \leq J_{i+1} \leq J_{max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน

แสดงได้ดังภาพที่ 20

ก. กรณี $t_i^{**} < t_{i+1}$

พื้นที่สามเหลี่ยม + พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สามเหลี่ยม + พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\left(\frac{1}{2} \times t_{i0} \times J_i\right) + \left(\frac{1}{2} \times J_{i+1} \times (t_{i+1} - t_{i0})\right) = \left(\frac{1}{2} \times (t_{i0}^* - t_i^{**}) \times J_{\max}\right) + \left(\frac{1}{2} \times J_{i+1} \times (t_{i+1} - t_{i0}^*)\right) \quad (28)$$

จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{|J_i| + |J_{i+1}|}{t_{i+1}} = \frac{|J_i|}{t_{i0}}$$

$$t_{i0} = \frac{|J_i| t_{i+1}}{|J_i| + |J_{i+1}|} \quad (29)$$

โดย t_{i0} เป็นช่วงเวลาจากจุด i จนถึงจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของ
ความเร่งเป็นศูนย์

$$\frac{|J_{\max}| + |J_{i+1}|}{(t_{i+1} - t_i^{**})} = \frac{|J_{\max}|}{t_{i0}^* - t_i^{**}}$$

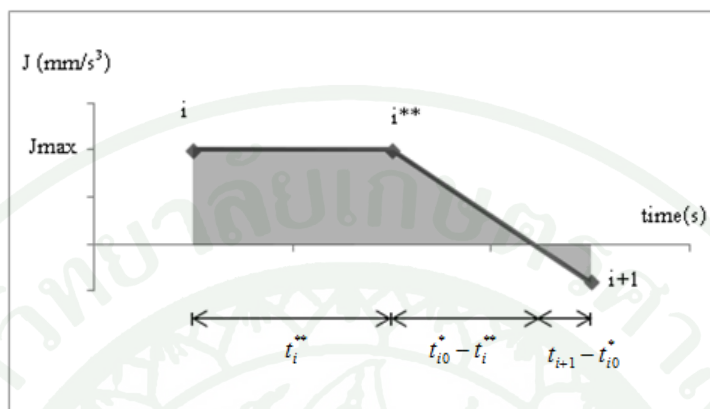
$$t_{i0}^* = \frac{|J_{\max}| (t_{i+1} - t_i^{**})}{|J_{\max}| + |J_{i+1}|} + t_i^{**} \quad (30)$$

โดย t_{i0}^* เป็นช่วงเวลาจากจุด i จนถึงจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของ
ความเร่งเป็นศูนย์หลังจากปรับค่า

แทนค่าสมการที่ (29) และ (30) ลงในสมการที่ (28) จะได้

$$t_i^{**} = \frac{(|J_{\max}| |J_i| + |J_i| |J_{i+1}| - |J_{\max}| |J_{i+1}| - J_{i+1}^2) t_{i0} + (|J_{\max}| - J_{\max}^2) t_{i+1}}{J_{\max}^2 + |J_{\max}| + |J_{\max}| |J_{i+1}| - J_{i+1}^2} \quad (31)$$

ทำการเพิ่มจุดด้านหลังจุด i ไป t_i^{**} โดยมีอัตราการการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{\max} \leq J_{i+1} \leq J_{\max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน กรณี ก. หลังปรับค่า

ข. กรณี $t_i^{**} \geq t_{i+1}$

ทำการหา t_{im} จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{J_i - J_{\max}}{t_{im}} = \frac{J_i + J_{i+1}}{t_{i+1}}$$

$$t_{im} = \left(\frac{|J_i| - |J_{\max}|}{|J_i| - |J_{i+1}|} \right) \times t_{i+1} \quad (32)$$

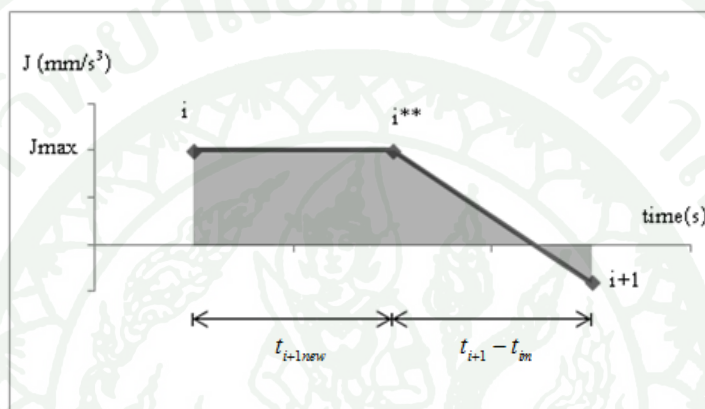
โดย t_{im} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ J_i จนถึงจุดที่มีอัตราการการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนด (J_{\max} หรือ $-J_{\max}$) ภายในช่วงเวลา t_{i+1}

พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู = พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\frac{1}{2} \times t_{im} \times (J_i + J_{\max}) = J_{\max} \times t_{i+1new}$$

$$t_{i+1new} = \frac{t_{im} \times (J_i + J_{max})}{2J_{max}} \quad (33)$$

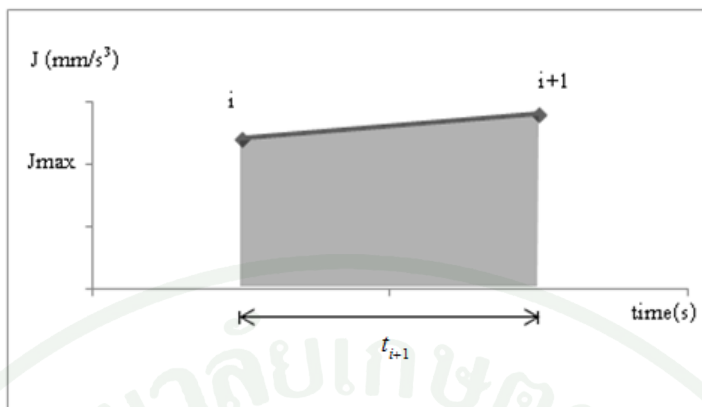
ทำการเพิ่มจุดขึ้นใหม่ด้านหลังจุด i ไป t_{i+1new} ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{max}$ หรือ J_{max} และให้ใช้เวลาเท่ากับ $t_{i+1} - t_{im}$ เป็นเวลาจากจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่หลังจุด i ไปยังจุด $i+1$ ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $-J_{max} \leq J_{i+1} \leq J_{max}$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงข้ามกัน กรณี ข. หลังปรับค่า

4.2.3 กรณีที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ณ จุดติดกันถัดไปมีค่ามากกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนดในทิศทางเดียวกัน

ถ้า $J_i > J_{max}$ แล้ว $J_{i+1} > J_{max}$ ด้วย หรือ $J_i < -J_{max}$ แล้ว $J_{i+1} < -J_{max}$ ด้วย แสดงได้ดังภาพที่ 23 กรณีนี้จะไม่สามารถทำการซอยแบ่งเวลาภายในเส้นทางเดิมได้ ทำให้ต้องเพิ่มช่วงเวลานั้นเพื่อรองรับให้ความเร่งภายในเส้นทางยังคงมีค่าเฉลี่ยใกล้ค่าเดิม



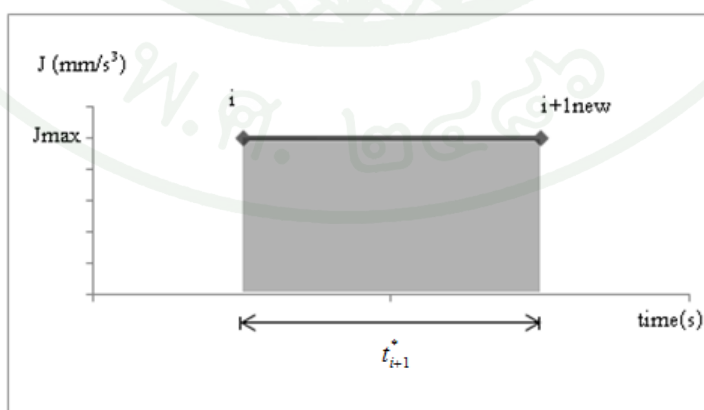
ภาพที่ 23 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $|J_{i+1}| > |J_{\max}|$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน

พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู = พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\frac{1}{2} \times t_{i+1} \times (J_i + J_{i+1}) = J_{\max} \times t_{i+1}^*$$

$$t_{i+1}^* = \frac{t_{i+1} \times (J_i + J_{i+1})}{2J_{\max}} \quad (34)$$

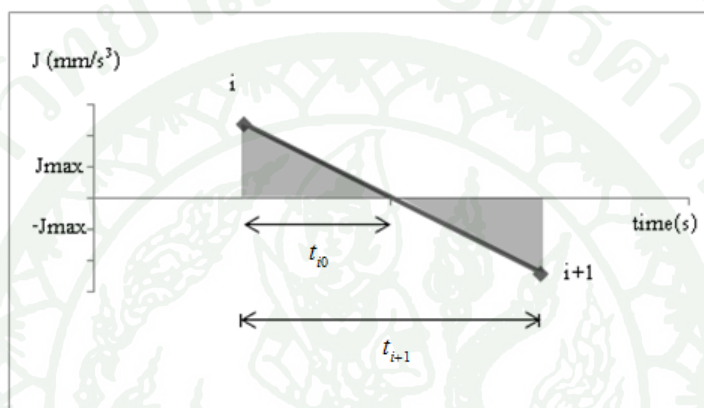
ทำการเลื่อนจุด $i+1$ ไป t_{i+1}^* โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} แสดงได้ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $|J_{i+1}| > |J_{\max}|$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางเดียวกัน
หลังปรับค่า

4.2.4 กรณีที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ณ จุดติดกันถัดไปมีค่ามากกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนดในทิศทางตรงกันข้าม

ถ้า $J_i > J_{\max}$ แล้ว $J_{i+1} < -J_{\max}$ หรือ $J_i < -J_{\max}$ แล้ว $J_{i+1} > J_{\max}$ แสดงได้ดังภาพที่ 25 กรณีนี้จะทำเพิ่มพิกัดใหม่ลงไป 2 จุดภายในเส้นทางเดินมีดกัด โดยจะสามารถเพิ่มได้ภายในช่วงเวลาเดิมหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี



ภาพที่ 25 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $|J_{i+1}| > |J_{\max}|$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงกันข้าม

กำหนดให้

t_i^{**} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุด i จนถึงจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่จุดที่ 1

t_i^{***} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุดที่เพิ่มขึ้นใหม่จุดที่ 2 จนถึง $i+1$

t_{i0} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ J_i จนถึงจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นศูนย์ภายในช่วงเวลา t_{i+1}

t_{m0}^{**} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุดที่เพิ่มขึ้นจุดที่ 1 จนถึงจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นศูนย์ภายในช่วงเวลา t_{i+1}

t_{m0}^{***} เป็นช่วงเวลาตั้งแต่จุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเป็นศูนย์จนถึงจุดที่เพิ่มขึ้นใหม่จุดที่ 2 ภายในช่วงเวลา t_{i+1}

ก. กรณีที่ $t_i^{**} < t_{i0}$

กรณีนี้สามารถสร้างพิกัดใหม่ 2 จุดภายในช่วงเวลาเดิมได้

หาช่วงเวลา t_{i0} จากกฎสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{|J_i| + |J_{i+1}|}{t_{i+1}} = \frac{J_i}{t_{i0}}$$

$$t_{i0} = \left(\frac{J_i}{|J_i| + |J_{i+1}|} \right) \times t_{i+1} \quad (35)$$

หาเวลาเพื่อเพิ่มจุดที่ 1 จาก

พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\frac{1}{2} \times t_{i0} \times |J_i| = \frac{1}{2} \times |J_{\max}| \times (t_{i0} + t_i^{**})$$

$$t_i^{**} = \left(\frac{t_{i0} \times |J_i|}{|J_{\max}|} \right) - t_{i0} \quad \text{โดยที่ } t_i^{**} < t_{i0} \quad (36)$$

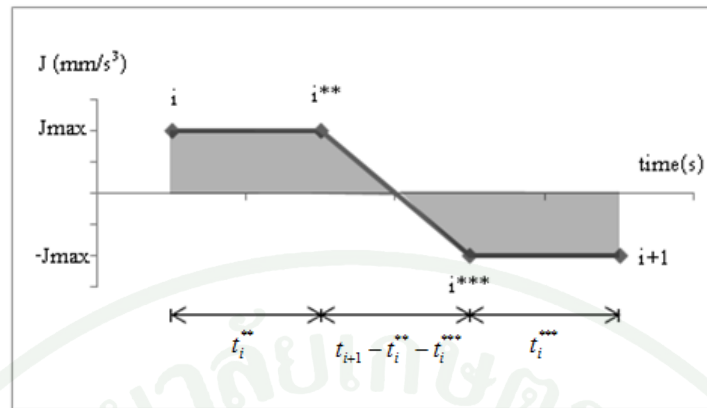
เมื่อตรวจสอบเงื่อนไขแล้วพบว่า $t_i^{**} < t_{i0}$ จึงทำการหาเวลาเพื่อเพิ่มจุดที่ 2

พื้นที่สามเหลี่ยม = พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู

$$\frac{1}{2} \times (t_{i+1} - t_{i0}) \times |J_{i+1}| = \frac{1}{2} \times |J_{\max}| \times ((t_{i+1} - t_{i0}) + t_i^{***})$$

$$t_i^{***} = \left(\frac{(t_{i+1} - t_{i0}) \times |J_{i+1}|}{|J_{\max}|} \right) - (t_{i+1} - t_{i0}) \quad (37)$$

ทำการเพิ่มจุดที่ 1 ไปด้านหลังจุด i ไป t_i^{**} โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} เพิ่มจุดที่ 2 ต่อจากจุดที่ 1 ไป $t_{i+1} - t_i^{**} - t_i^{***}$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} และเวลาจากจุดที่ 2 ไป $i+1$ เท่ากับ t_i^{***} โดยปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่จุด $i+1$ เท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} ด้วย แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $|J_{i+1}| > |J_{\max}|$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงกันข้าม กรณี ก. หลังปรับค่า

ข. กรณีที่ $t_i^{**} \geq t_{i0}$

กรณีนี้ไม่สามารถสร้างพิกัดใหม่ 2 จุดภายในช่วงเวลาเดิมได้ ต้องหาช่วงเวลาจากจุด i ไป $i+1$ ใหม่

หาเวลา t_{m0}^{**} จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{J_{\max}}{t_{m0}^{**}} = \frac{J_i}{t_{i0}}$$

$$t_{m0}^{**} = \left(\frac{J_{\max}}{J_i} \right) \times t_{i0} \quad (38)$$

หาเวลาเพื่อเพิ่มจุดที่ 1 จาก

พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู = พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\frac{1}{2} \times (t_{i0} - t_{m0}^{**}) \times (J_i + J_{\max}) = J_{\max} \times t_i^{**}$$

$$t_i^{**} = \frac{(t_{i0} - t_{m0}^{**}) \times (J_i + J_{\max})}{2J_{\max}} \quad (39)$$

หาเวลา t_{0m}^{***} จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{J_{\max}}{t_{0m}^{***}} = \frac{J_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i0}}$$

$$t_{0m}^{***} = \frac{J_{\max} \times (t_{i+1} - t_{i0})}{J_{i+1}} \quad (40)$$

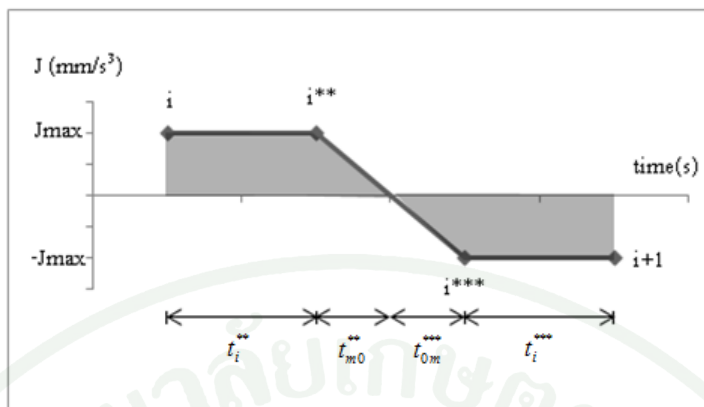
หาเวลาเพื่อเพิ่มจุดที่ 2 จาก

พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู = พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\frac{1}{2} \times ((t_{i+1} - t_{i0}) - t_{0m}^{***}) \times (J_{\max} + J_{i+1}) = J_{\max} \times t_i^{***}$$

$$t_i^{***} = \frac{((t_{i+1} - t_{i0}) - t_{0m}^{***}) \times (J_{\max} + J_{i+1})}{2J_{\max}} \quad (41)$$

ทำการเพิ่มจุดที่ 1 ไปด้านหลังจุด i ไป t_i^{**} โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} และเพิ่มจุดที่ 2 ต่อจากจุดที่ 1 ไป $t_{m0}^{**} + t_{0m}^{***}$ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} มีช่วงเวลาตั้งแต่จุด i ถึง $i+1$ เท่ากับ $t_i^{**} + t_{m0}^{**} + t_{0m}^{***} + t_i^{***}$ โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่จุด $i+1$ เท่ากับ $-J_{\max}$ หรือ J_{\max} แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง $|J_{i+1}| > |J_{\max}|$ โดย J_i และ J_{i+1} มีทิศทางตรงกันข้ามกรณี ข. หลังปรับค่า

5. คำนวณพิกัด ความเร็ว และความเร่งใหม่ในแต่ละแนวแกนหลังจากปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

การปรับเปลี่ยนตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งใหม่ในแต่ละแนวแกน จะปรับเฉพาะภายในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนช่วงเวลาไป ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มจุดภายในช่วงเวลาทำให้ได้พิกัดใหม่ หรืออาจจะเกิดจากการปรับช่วงเวลาใหม่เพื่อรองรับความเร่งที่เกิดขึ้นภายในเส้นทางชุดคำสั่งนั้นๆ จุดหรือชุดคำสั่งที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งอยู่ในอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร่งที่กำหนด ให้คงใช้ชุดคำสั่งเดิมต่อไป

ระยะทางในการเคลื่อนที่จากลำดับการกัณฑ์ $i-1$ ถึง i ในแต่ละแกน คำนวณจากหาได้จากสมการที่ 15 จะได้

$$\left. \begin{aligned} S_{x_6,i} &= \frac{J_{x_6,i} t_i^3}{2} \\ S_{y_6,i} &= \frac{J_{y_6,i} t_i^3}{2} \\ S_{z_6,i} &= \frac{J_{z_6,i} t_i^3}{2} \\ S_{A,i} &= \frac{J_{A,i} t_i^3}{2} \\ S_{C,i} &= \frac{J_{C,i} t_i^3}{2} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

พิกัดใหม่ในการเคลื่อนที่จากลำดับการกัณฑ์ $i-1$ ถึง i ในแต่ละแกน ได้จากการแทนค่าสมการที่ (42) ลงในสมการที่ 11 จะได้

$$\left. \begin{aligned} x_{6,i} &= x_{6,i-1} + S_{x_{6,i}} \\ y_{6,i} &= y_{6,i-1} + S_{y_{6,i}} \\ z_{6,i} &= z_{6,i-1} + S_{z_{6,i}} \\ A_i &= A_{i-1} + S_{A,i} \\ C_i &= C_{i-1} + S_{C,i} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

นำสมการที่ (42) แทนลงในสมการที่ (13) และ (14) จะได้ความเร็วและความเร่งใหม่ในแต่ละแนวแกนหลังจากปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งตามลำดับ

ผลและวิจารณ์

ผล

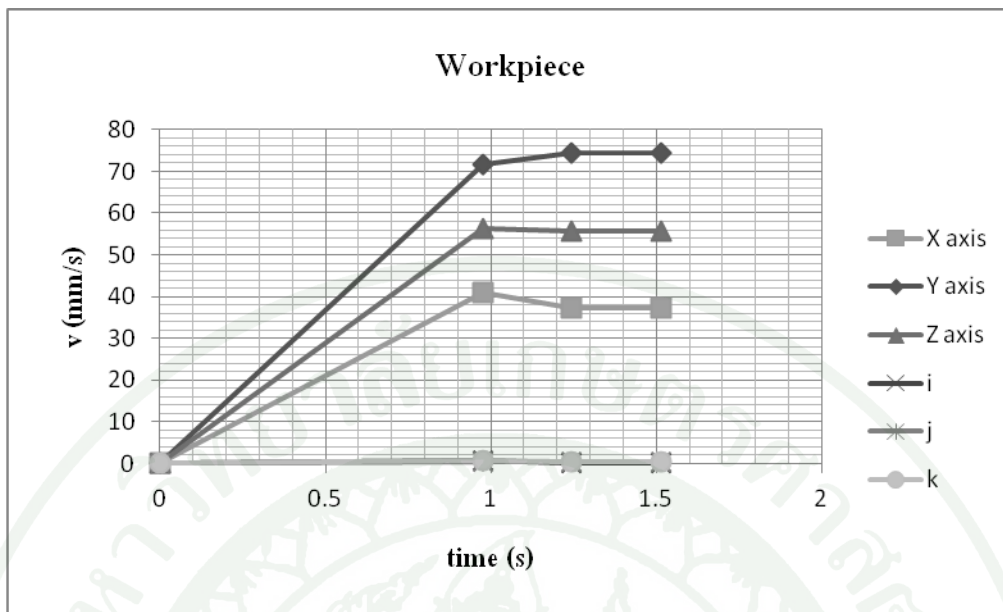
1. ความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

ทำการสร้างข้อมูลตำแหน่งมีดกัดที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 1

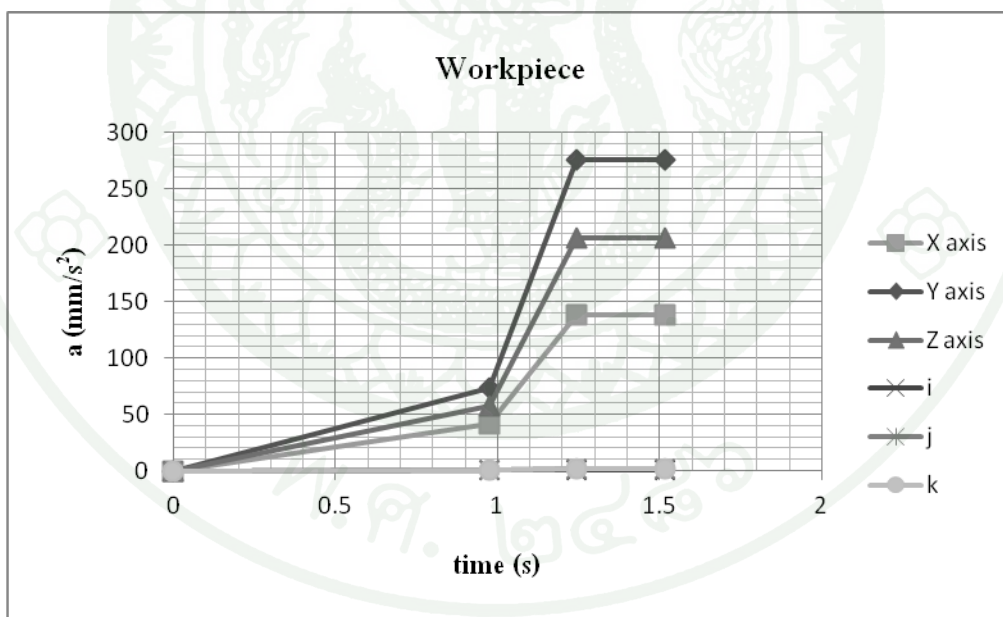
ตารางที่ 1 ข้อมูลตำแหน่งมีดกัดที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับการ กัด (i)	โคออร์ดิเนตในการกัดชิ้นงาน (มิลลิเมตร)						อัตราป้อน (มิลลิเมตร ต่อวินาที)
	X	Y	Z	i	j	k	
0	-10	-10	-10	-0.5	0	-0.5	0
1	30	60	45	0.12	0.3	0.3	100
2	40	80	60	0.16	0.4	0.4	100
3	50	100	75	0.2	0.5	0.5	100

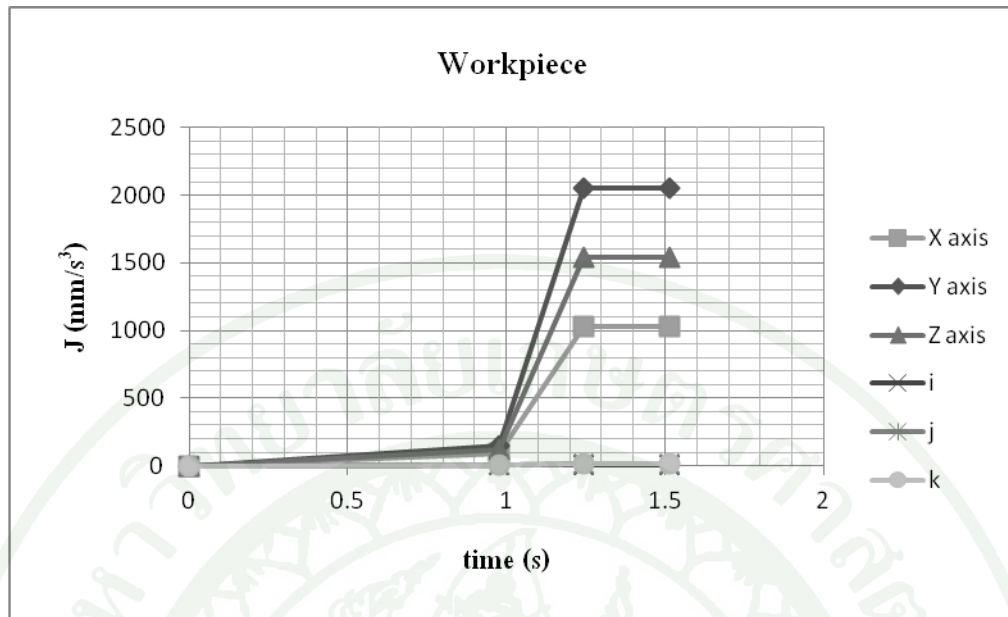
1.1 ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงาน



ภาพที่ 28 ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ระบบพิกัดชิ้นงาน

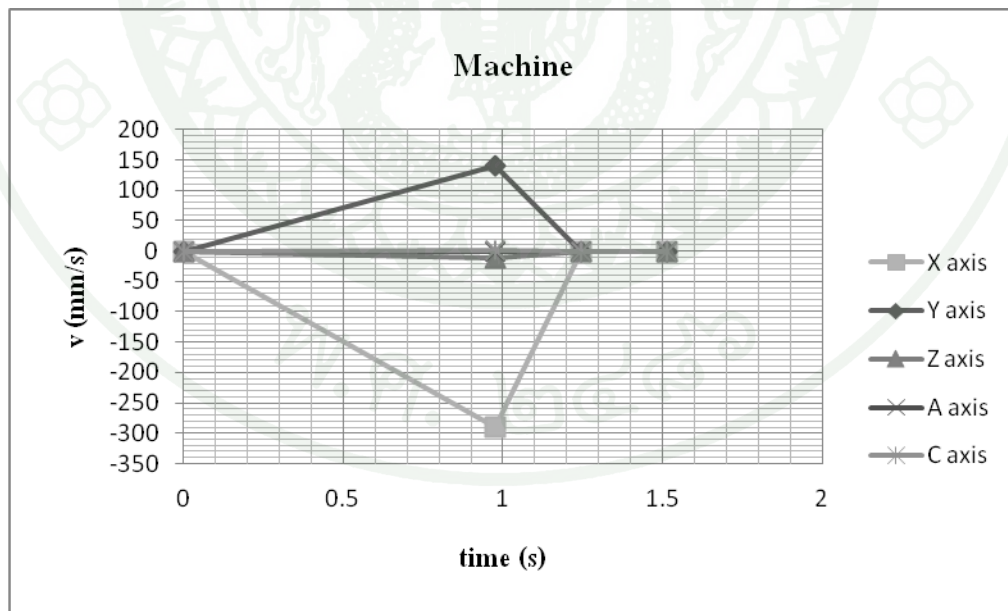


ภาพที่ 29 ความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบพิกัดชิ้นงาน

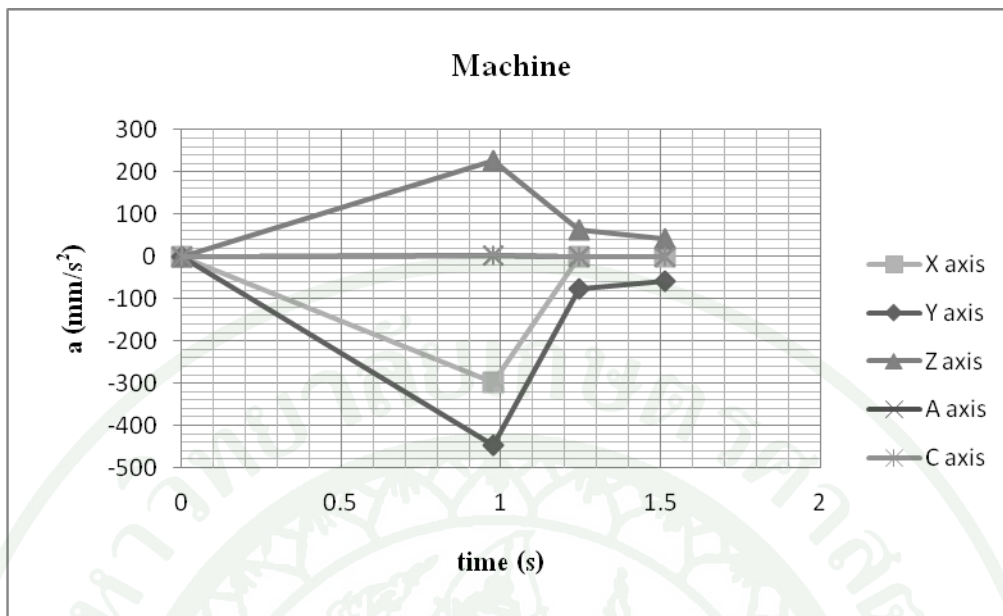


ภาพที่ 30 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบพิกัดชิ้นงาน

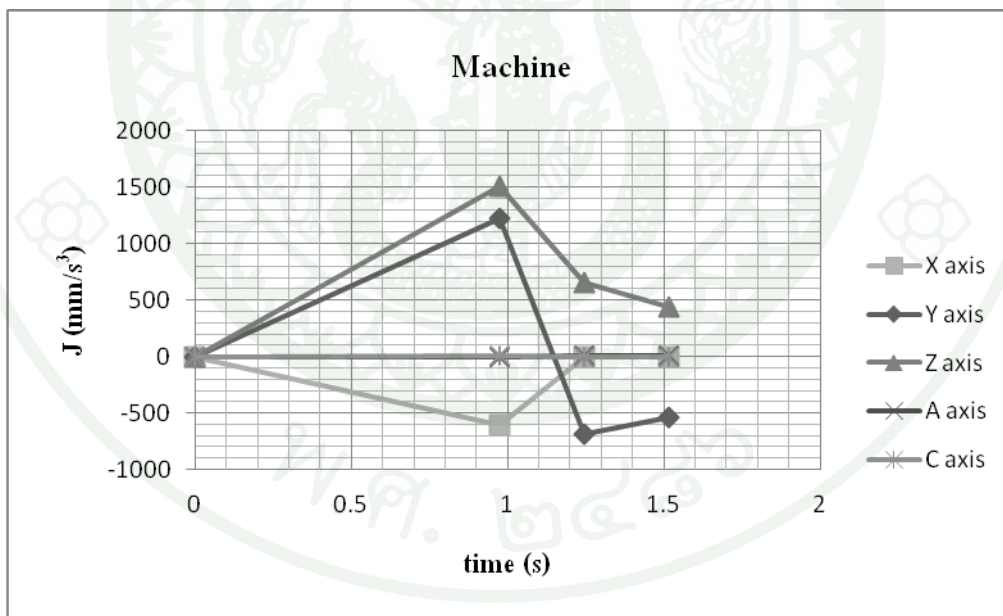
1.2 ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบแกนของเครื่องจักร



ภาพที่ 31 ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ระบบแกนของเครื่องจักร



ภาพที่ 32 ความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบแกนของเครื่องจักร



ภาพที่ 33 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ระบบแกนของเครื่องจักร

2. การสร้างเส้นทางการเดินมีดกัด

ทำการสร้างคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับการ กีด (i)	โคออร์ดิเนตในการกีดชิ้นงาน (มิลลิเมตร)					อัตราป้อน (มิลลิเมตร ต่อวินาที)
	แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน A	แกน C	
0	0	0	0	0	0	0
1	20	10	30	10	50	150
2	-40	20	0	10	30	150
3	10	30	-30	20	10	150
4	50	40	0	20	-10	150
5	60	50	30	20	-30	150

3. ผลคำนวณหาเวลา ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง และอัตราเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแต่ละแกน

3.1 เวลาที่ใช้ในการตัดเฉือน

จากสมการที่ 10 หาเวลาในการตัดเฉือนในแต่ละลำดับการกีดได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เวลาที่ใช้ในการตัดเฉือน

ลำดับการกีด (i)	เวลา (วินาที)	เวลาสะสม (วินาที)
0	0	0
1	0.422	0.422
2	0.471	0.893
3	0.422	1.315
4	0.365	1.680
5	0.258	1.938

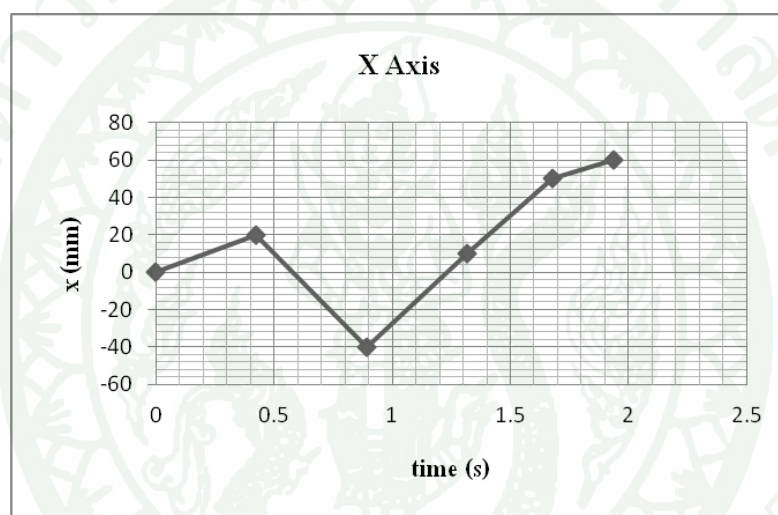
3.2 พิกัดในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

ดังนี้

จากตารางที่ 2 และ 3 สามารถเขียนกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของมีดกัดในแต่ละแกนได้

3.2.1 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

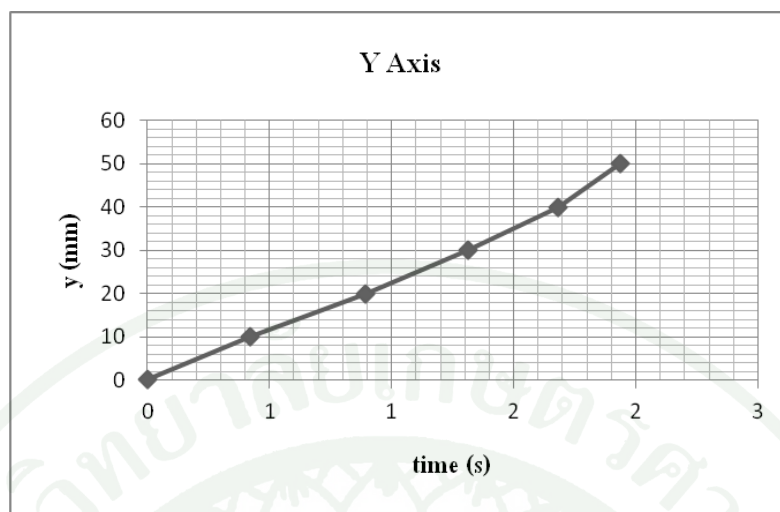
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

3.2.2 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

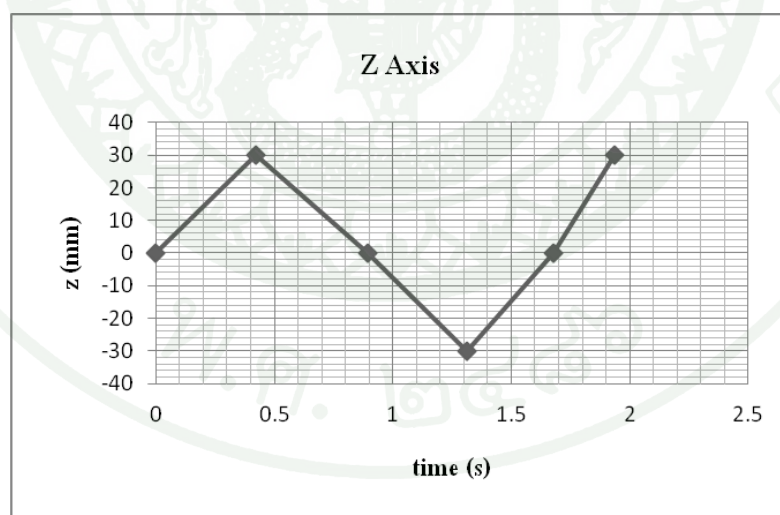
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

3.2.3 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

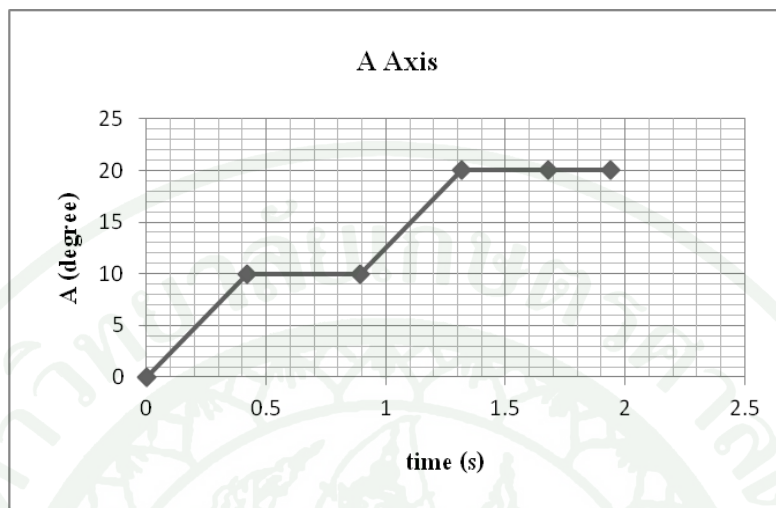
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

3.2.4 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

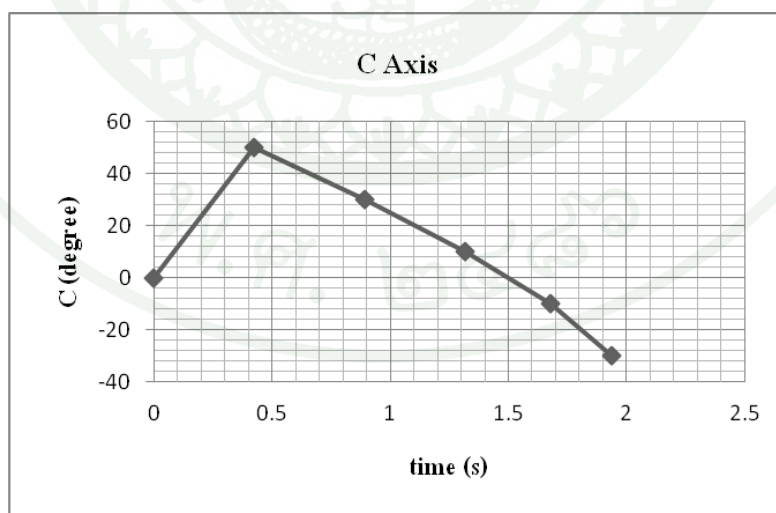
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

3.2.5 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 38



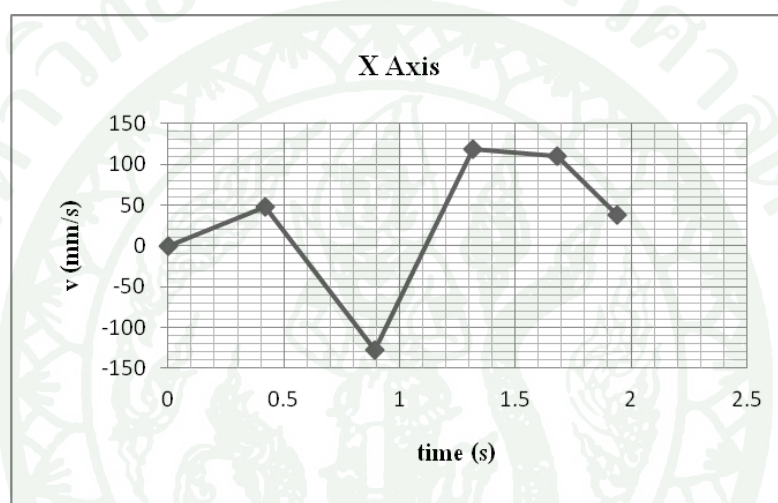
ภาพที่ 38 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

3.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

จากสมการที่ 13 สามารถคำนวณความเร่งการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนได้ดังนี้

3.3.1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

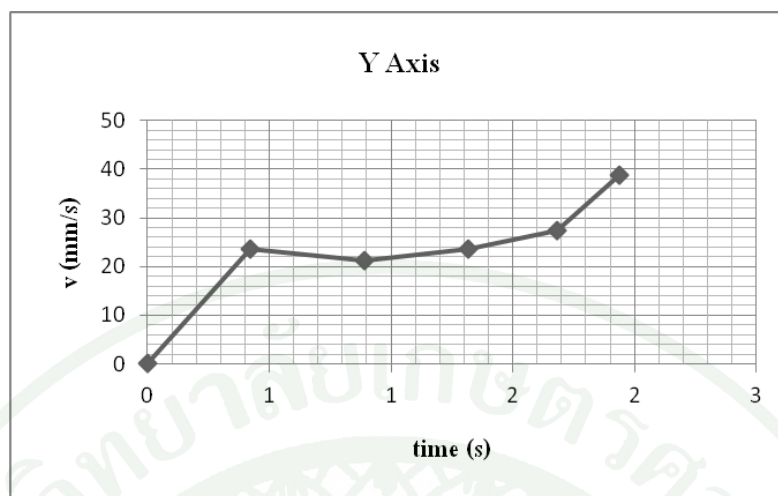
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

3.3.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

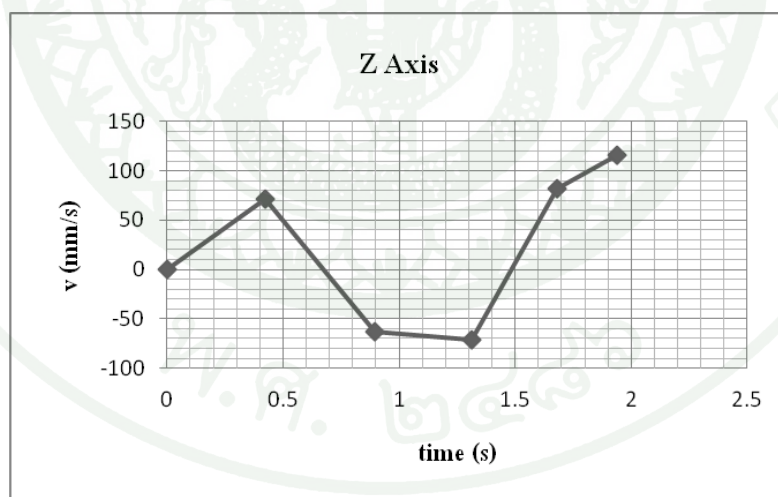
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

3.3.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

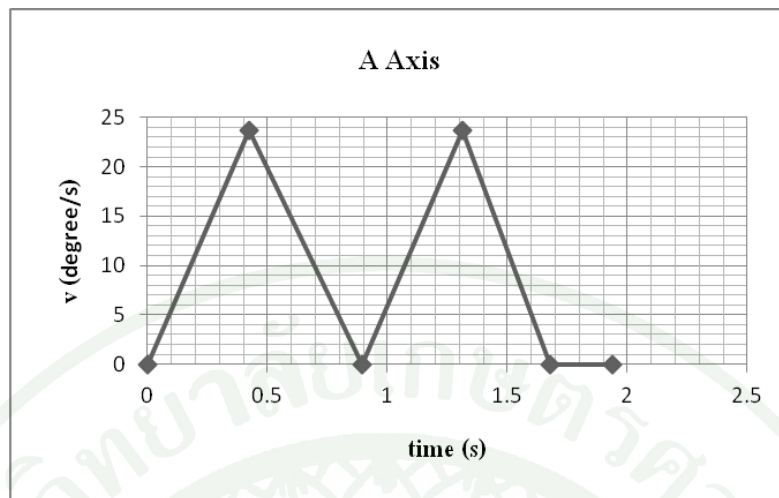
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

3.3.4 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

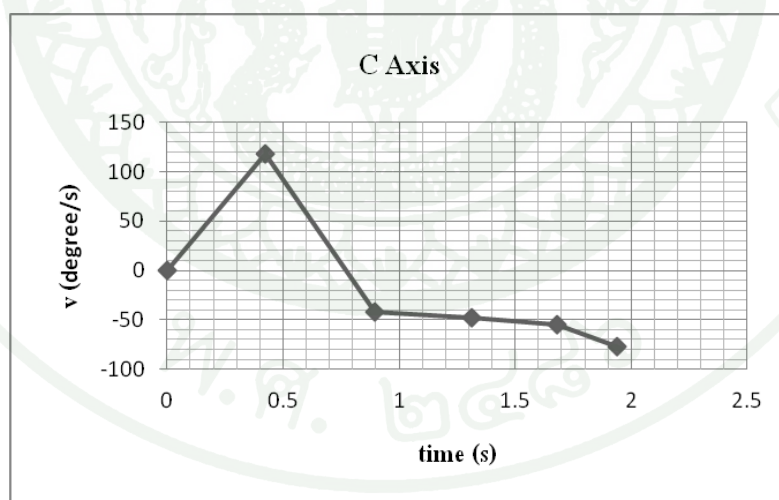
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

3.3.5 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 43



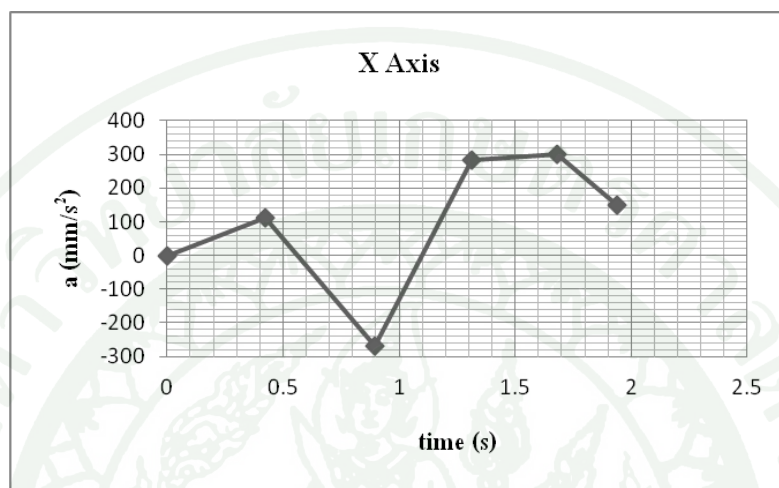
ภาพที่ 43 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

3.4 ความเร่งในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

จากสมการที่ 14 สามารถคำนวณความเร่งการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนได้ดังนี้

3.4.1 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

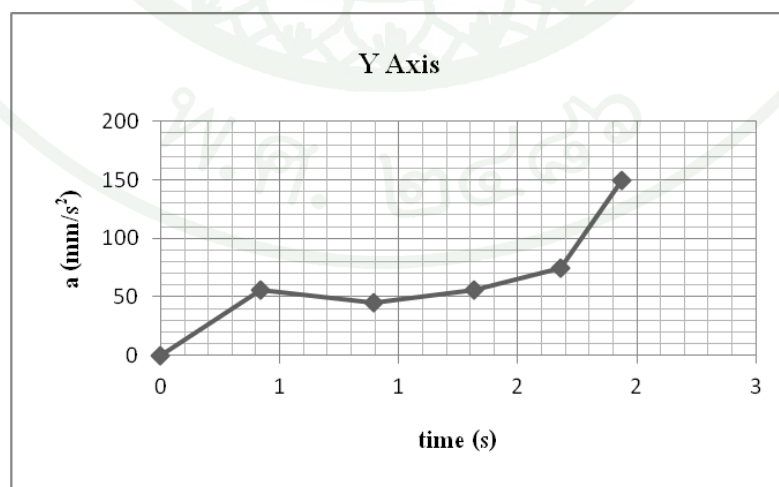
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

3.4.2 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

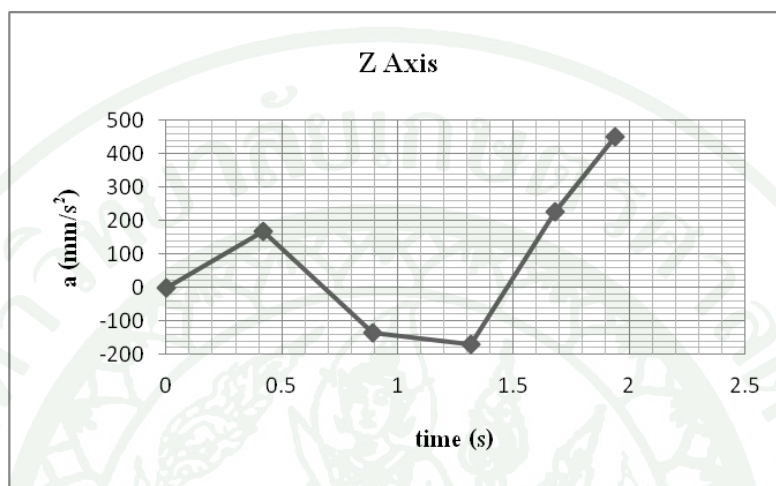
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

3.4.3 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

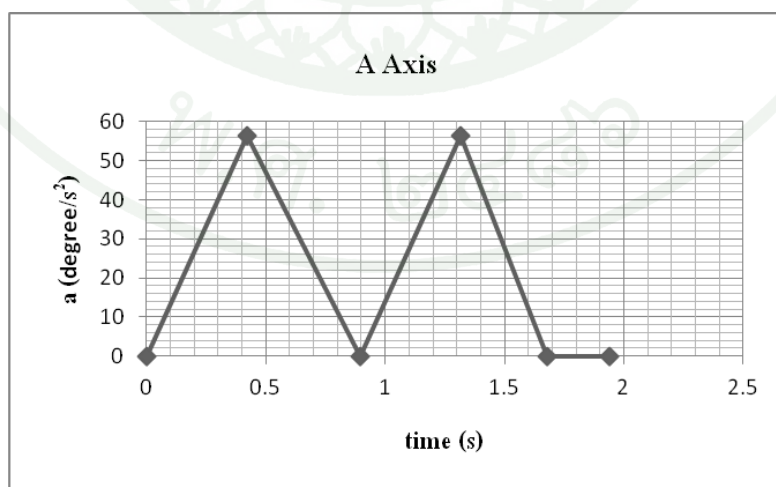
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

3.4.4 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

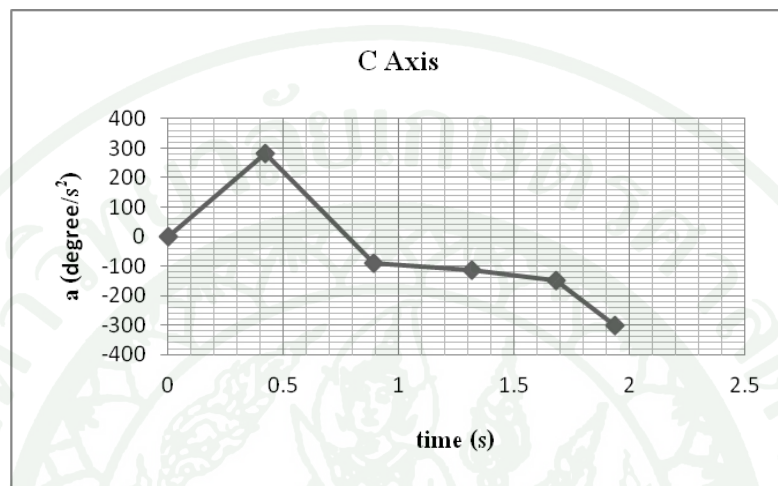
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

3.4.5 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 48



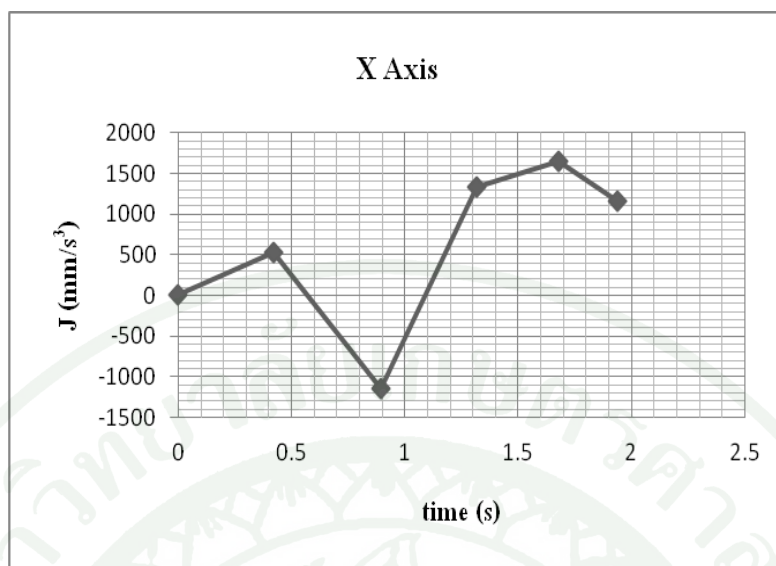
ภาพที่ 48 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

3.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

จากสมการที่ 15 สามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนได้ดังนี้

3.5.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

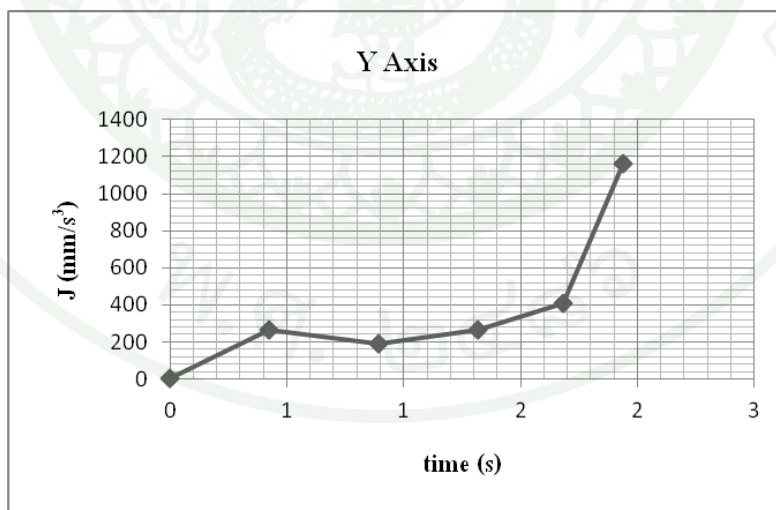
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

3.5.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

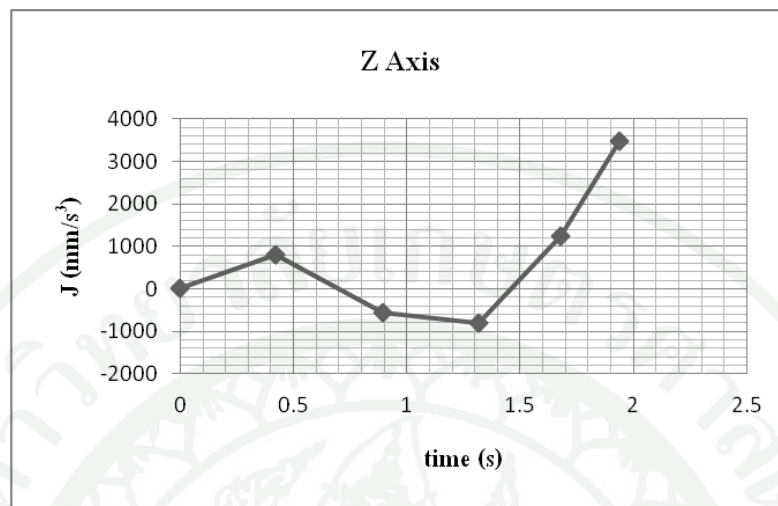
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

3.5.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

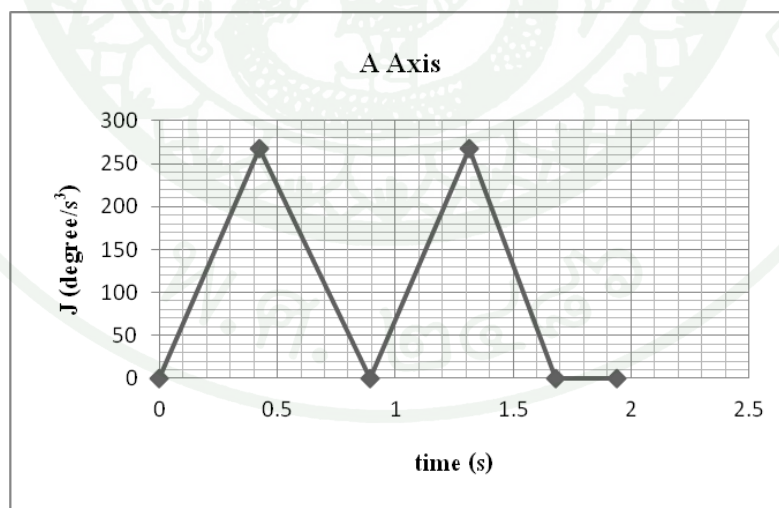
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

3.5.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

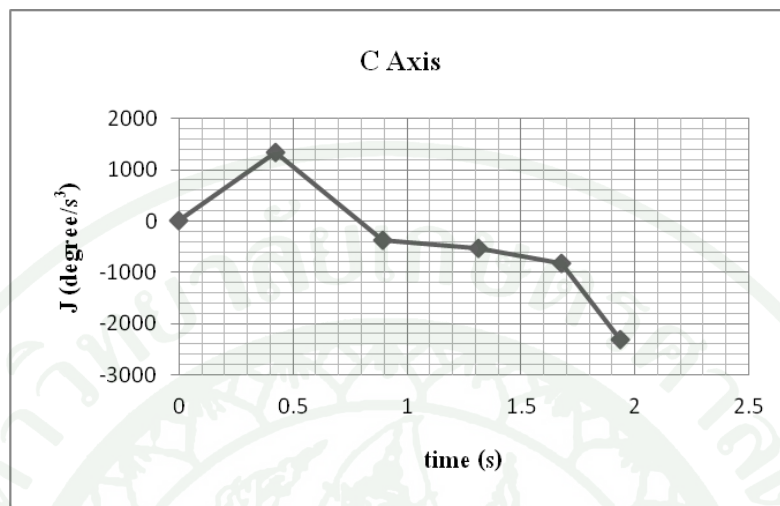
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

3.5.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 53



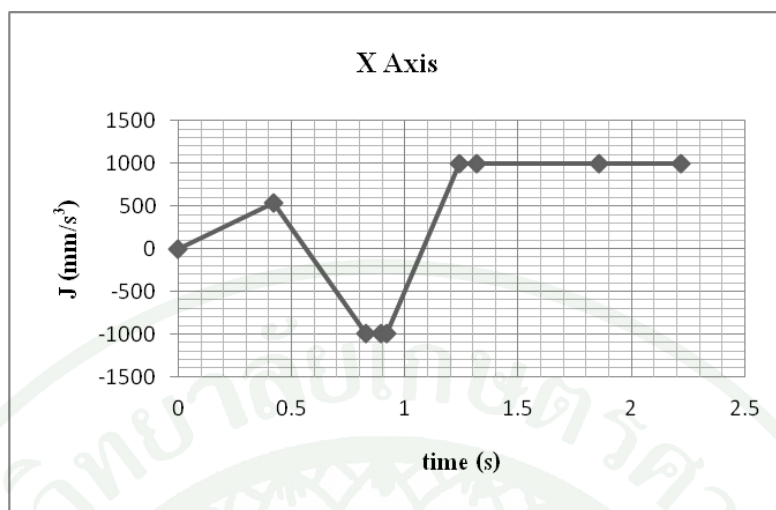
ภาพที่ 53 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C

4. ผลการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ในอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร่งที่กำหนด

กำหนดค่า $|J_{\max}|$ ซึ่งปกติเป็นค่าเฉพาะขึ้นอยู่กับเครื่องจักรซีเอ็นซีแต่ละประเภท ในงานวิทยานิพนธ์นี้ขอกำหนดให้ $|J_{\max}|$ เท่ากับ 1,000 มิลลิเมตรต่อวินาที³ พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเกินกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนดเฉพาะในแนวแกน X, Y, Z และแกน C จึงทำการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแกนดังกล่าว ส่วนแกน A อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งมีค่าอยู่ในอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนดทุกจุดอยู่แล้ว จึงไม่ต้องพิจารณาควบคุม ได้ผลดังนี้

4.1 ผลการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแนวแกน X

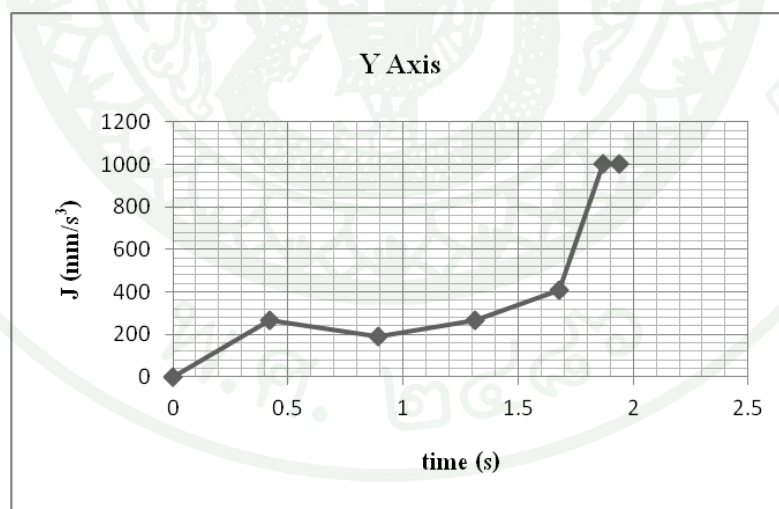
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

4.2 ผลการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแนวแกน Y

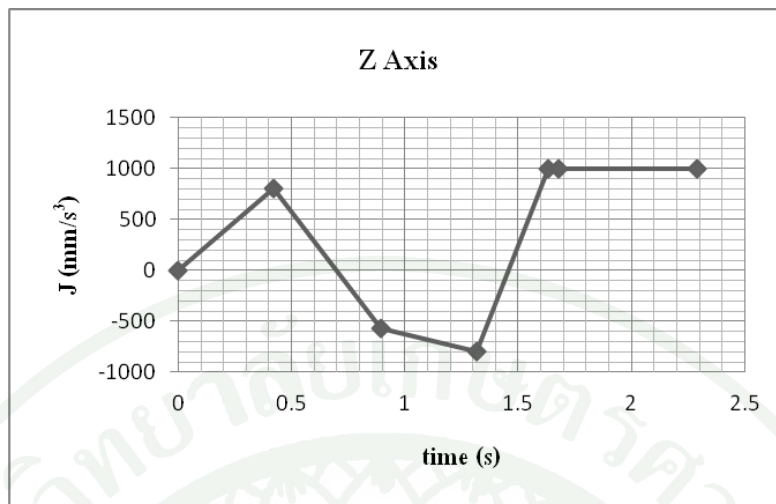
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

4.3 ผลการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแนวแกน Z

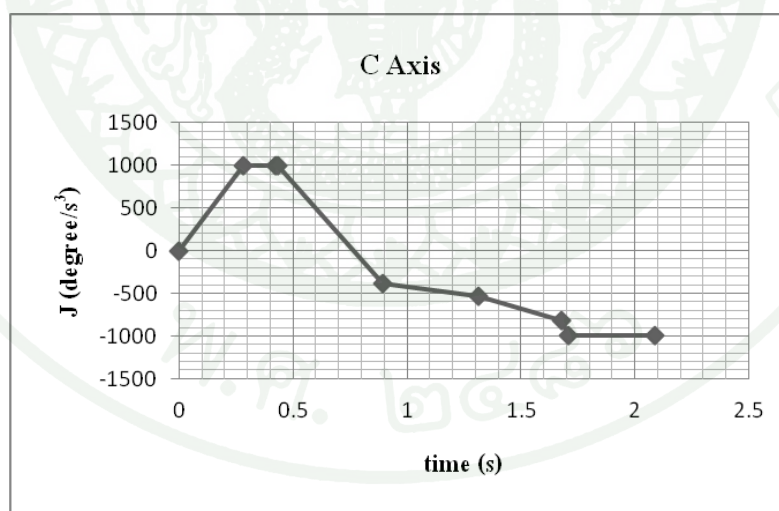
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

4.4 ผลการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแนวแกน C

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

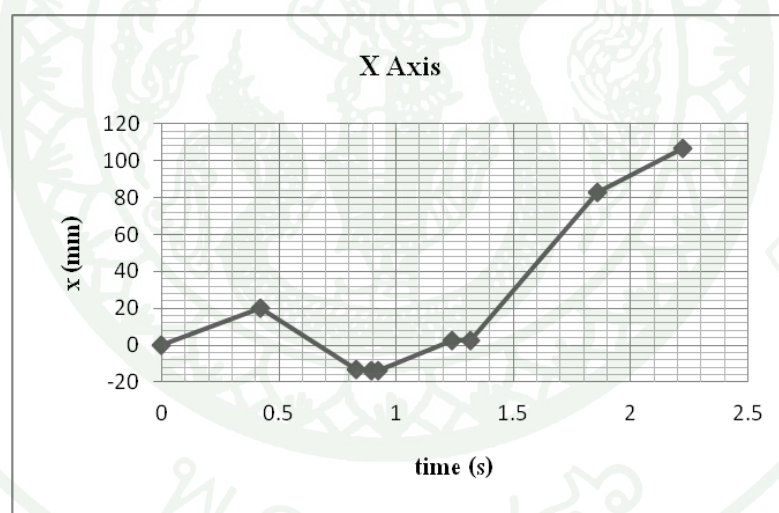
5. ผลการคำนวณพิกัด ความเร็ว และความเร่งใหม่ในแต่ละแนวแกนหลังจากปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

หลังจากควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ภายใต้อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนดแล้ว สามารถหาพิกัด ความเร็ว และความเร่งใหม่ของแกน X, Y, Z และ แกน C ได้ดังนี้

5.1 พิกัดในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

5.2.1 พิกัดการเคลื่อนที่ใหม่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

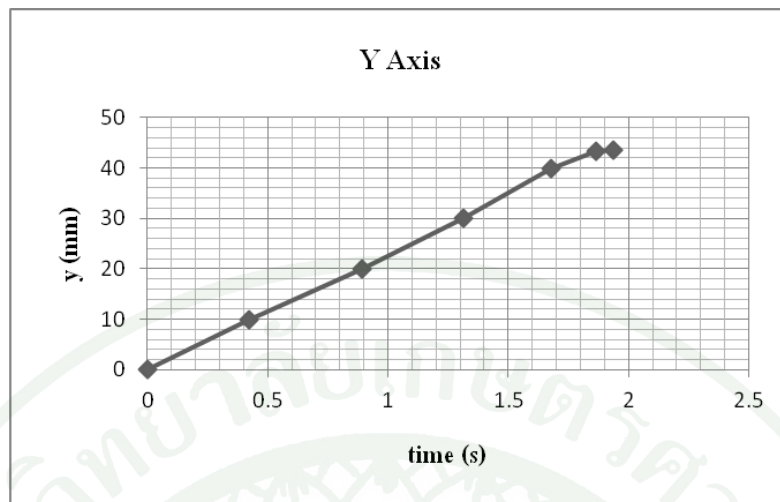
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 พิกัดการเคลื่อนที่ใหม่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

5.2.2 พิกัดการเคลื่อนที่ใหม่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

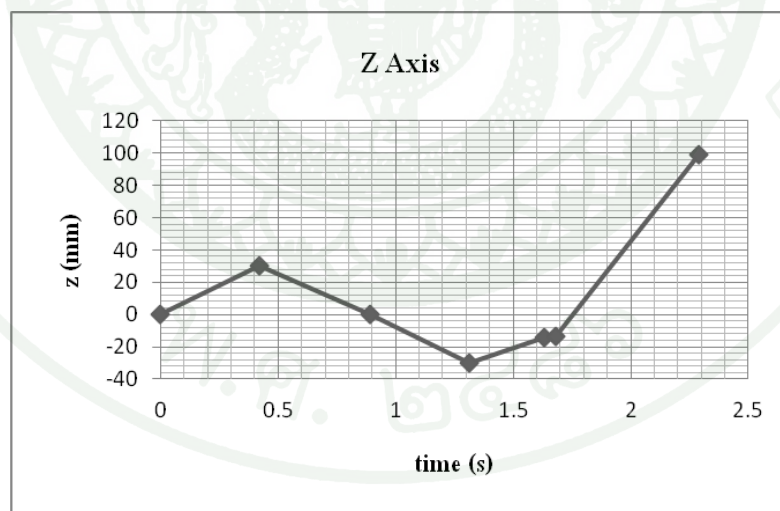
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 59



ภาพที่ 59 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

5.2.3 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

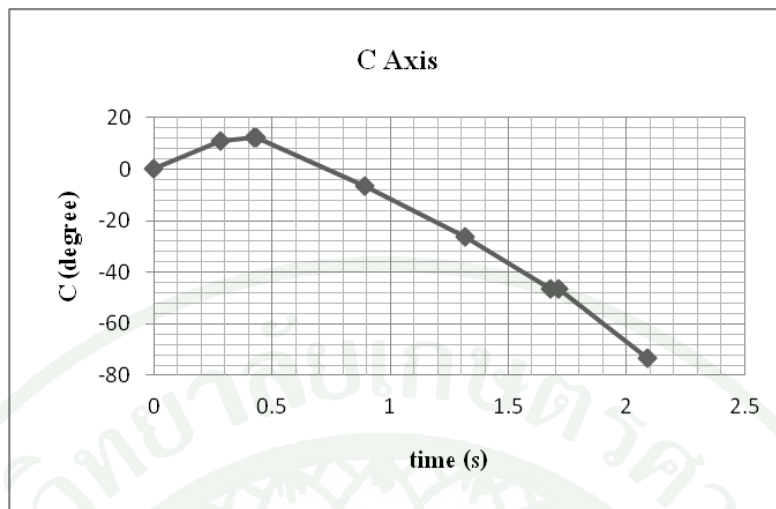
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

5.2.4 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 61

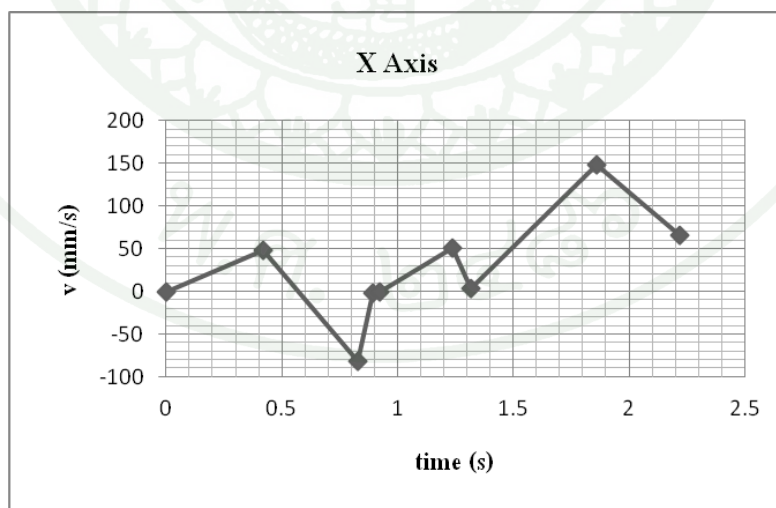


ภาพที่ 61 พิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

5.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

5.3.1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

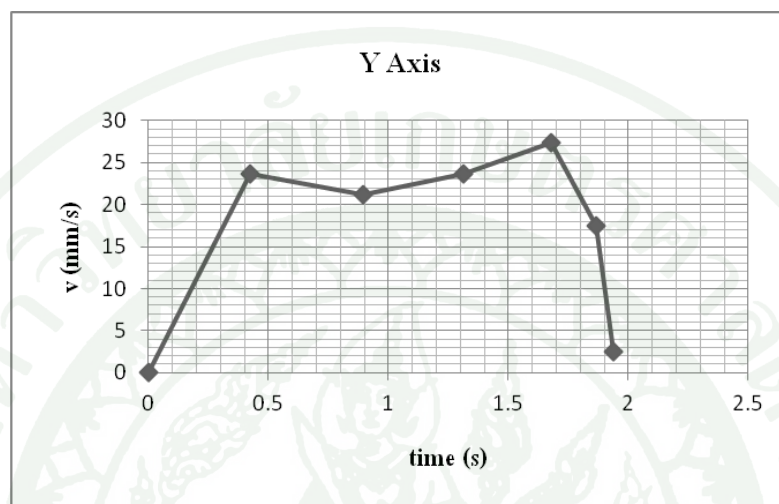
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

5.3.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

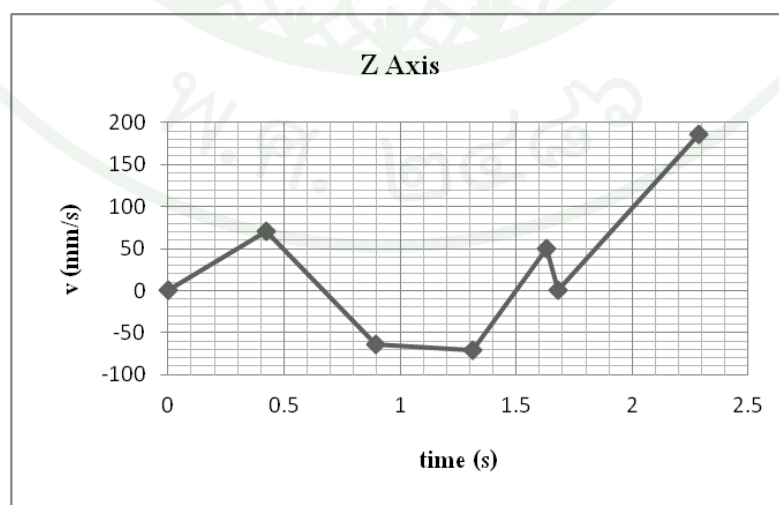
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 63



ภาพที่ 63 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

5.3.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

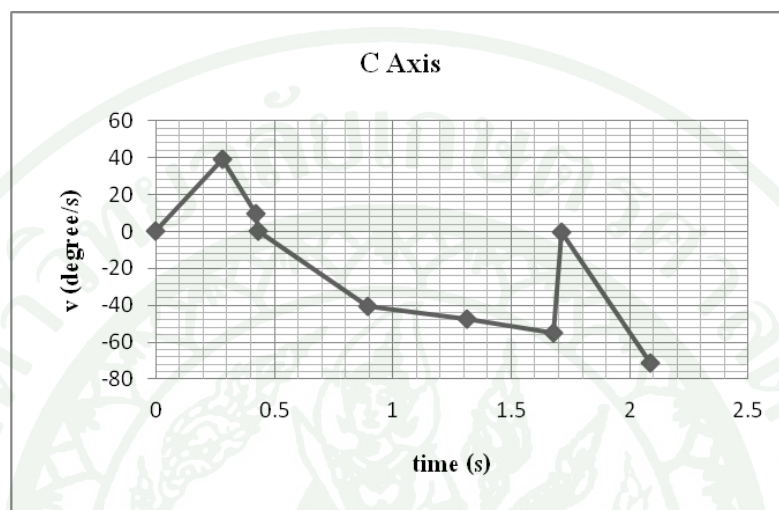
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 64



ภาพที่ 64 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

5.3.4 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 65

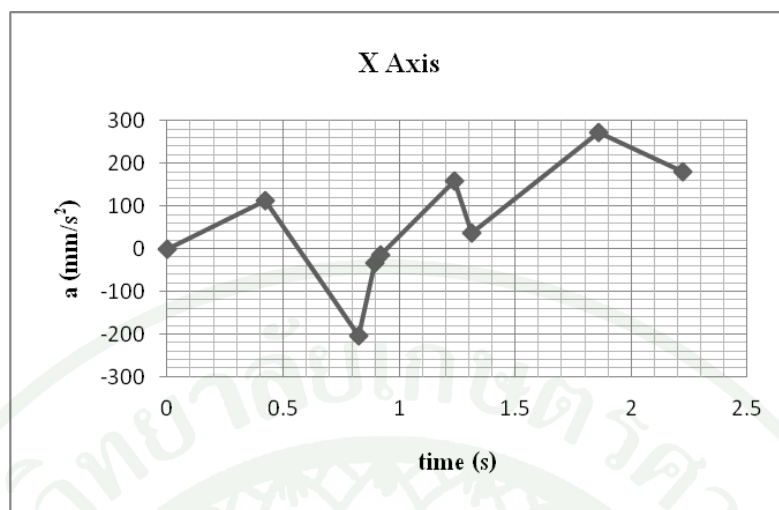


ภาพที่ 65 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

5.4 ความเร่งในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

5.4.1 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

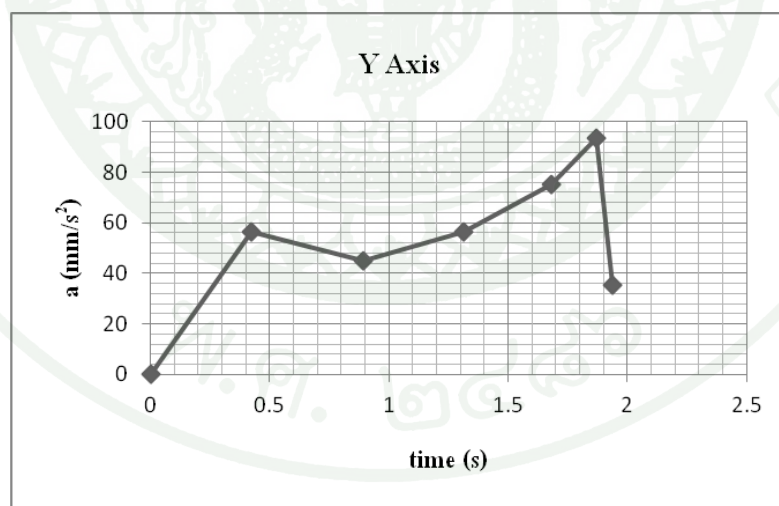
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X หลังปรับค่า

5.4.2 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

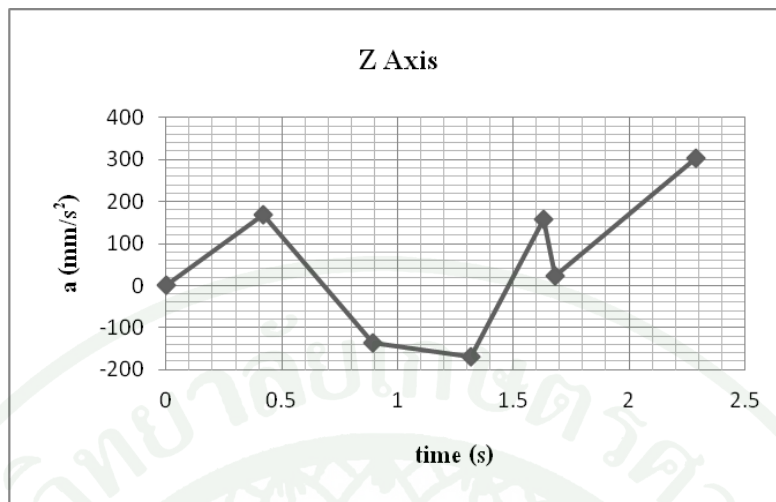
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 67



ภาพที่ 67 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หลังปรับค่า

5.4.3 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

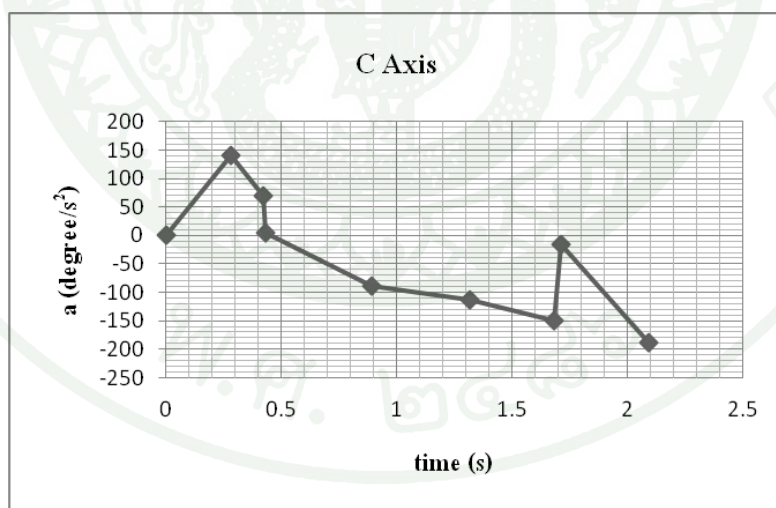
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 68



ภาพที่ 68 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หลังปรับค่า

5.4.4 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 69



ภาพที่ 69 ความเร่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน C หลังปรับค่า

วิจารณ์

จากการทดลองเรื่องความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนพบว่า

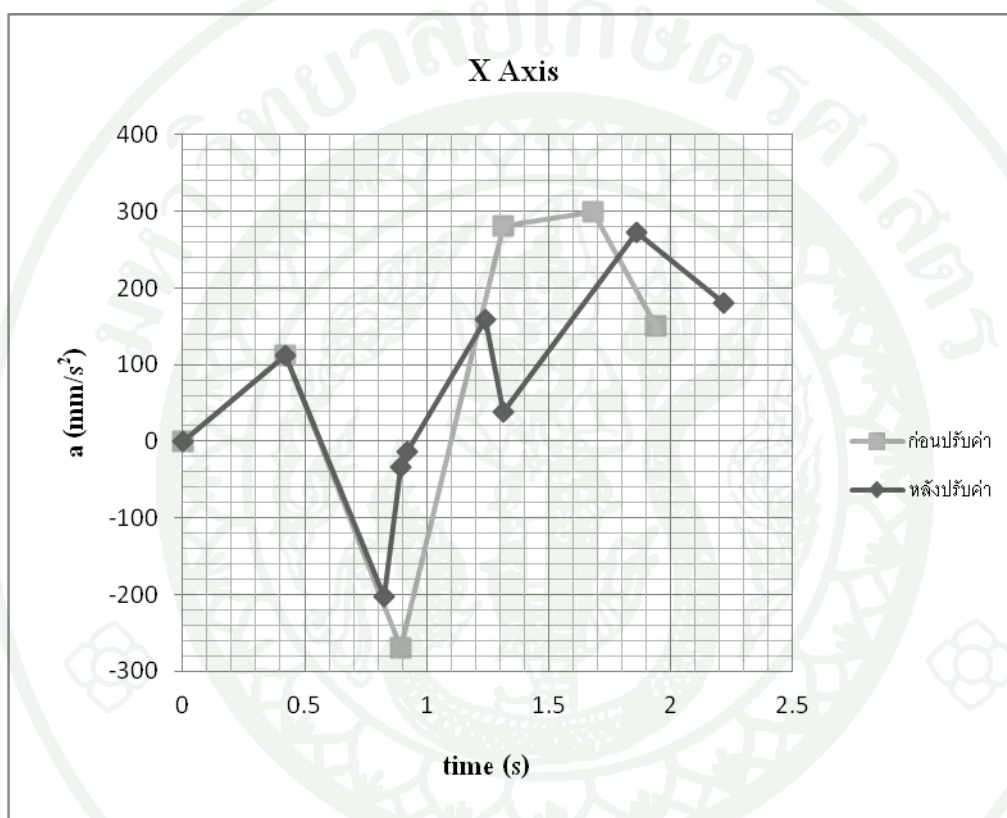
แกน X ในลำดับการกัดที่ 1, 2 และ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 86, 1024.5 และ 1024.5 mm/s^3 ตามลำดับ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักรเท่ากับ -608.4, 0 และ 0 mm/s^3 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า ที่ลำดับการกัดที่ 1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในระบบแกนของเครื่องจักรมีทิศทางกลับกันและมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เท่า แต่ในลำดับการกัดที่ 2 และ 3 กลับมีค่าเป็นศูนย์

แกน Y ในลำดับการกัดที่ 1, 2 และ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 150.6, 2050 และ 2049 mm/s^3 ตามลำดับ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักรเท่ากับ 1220.5, -690.6 และ -537 mm/s^3 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า ที่ลำดับการกัดที่ 1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในระบบแกนของเครื่องจักรมีทิศทางไปในทางเดียวกันและมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 8 เท่า ลำดับการกัดที่ 2 และ 3 กลับมีทิศทางตรงกันข้ามและมีค่าลดลง

แกน Z ในลำดับการกัดที่ 1, 2 และ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 118.3, 1536.7 และ 1536.7 mm/s^3 ตามลำดับ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกัดชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักรเท่ากับ 1508.8, 655.8 และ 437.6 mm/s^3 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า ที่ลำดับการกัดที่ 1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในระบบแกนของเครื่องจักรมีทิศทางไปในทางเดียวกันและมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 12 เท่า ลำดับการกัดที่ 2 และ 3 มีทิศทางเดียวกันแต่มีค่าลดลง

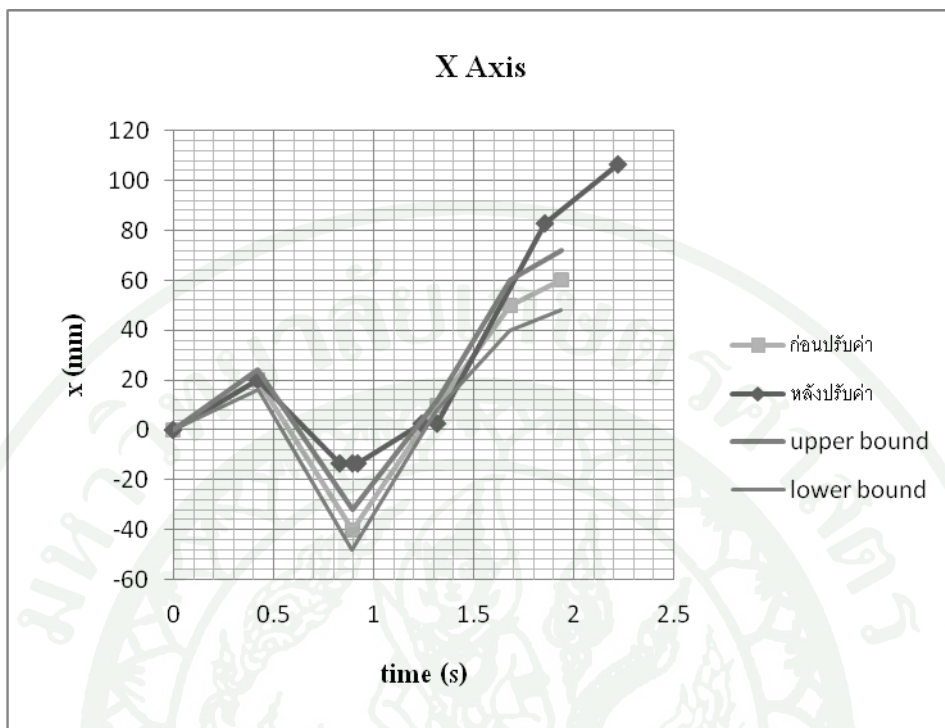
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงานมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเส้นตรง คือบางครั้งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ระบบพิกัดชิ้นงานสูง แต่อาจมีค่าต่ำที่ระบบแกนของเครื่องจักร หรือบางครั้งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่พิกัดชิ้นงานต่ำ แต่อาจมีค่าสูงที่ระบบแกนของเครื่องจักร

การคำนวณหาค่าสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมในการกักชิ้นงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนภายใต้เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนด ภายใต้สมมติฐานว่าความเร่งของเส้นทางที่มีพบปัญหา ก่อนและหลังทำการควบคุมจะมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ขอ ยกตัวอย่างผลการทดลองในแกน X เมื่อเปรียบเทียบความเร่งก่อนและหลังปรับค่า ดังภาพที่ 70 พบว่า



ภาพที่ 70 เปรียบเทียบความเร่งในแนวแกน X ก่อนและหลังปรับค่า

ที่ลำดับการกัก 2 ก่อนการปรับค่ามีค่าความเร่งเท่ากับ -270 mm/s^2 หลังจากการปรับค่า โดยมีการเพิ่มจุดทั้งด้านหน้าและด้านหลังจุดที่ 2 ได้จุดที่เพิ่มขึ้นหน้าจุดมีความเร่งเท่ากับ -220.925 mm/s^2 จุดที่ 2 หลังปรับค่ามีความเร่งเท่ากับ -32.777 mm/s^2 และจุดที่เพิ่มด้านหลังจุดมีความเร่งเท่ากับ -14.172 mm/s^2 เมื่อรวมความเร่งของทั้ง 3 จุดจะเท่ากับ -267.874 mm/s^2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับจุดที่ 2 เดิม การที่ความเร่ง ณ จุดที่เพิ่มขึ้นใหม่มีค่าไม่ใกล้เคียงกับกับค่าความเร่งที่จุดเดิม เนื่องจากเรากำหนดให้มีการเพิ่มจุดน้อยที่สุดที่จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ทำให้ค่าความเร่งจึงโดดไปมา แต่โดยรวมแล้วแล้วยังคงใกล้เคียงกับค่าเดิม



ภาพที่ 71 เปรียบเทียบพิกัดในแนวแกน X ก่อนและหลังปรับค่า

เมื่อทำการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด พบว่าตำแหน่งพิกัดหลังปรับค่าใหม่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นในการใช้งานจริงควรมีการกำหนดช่วงของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ตัวอย่างเช่น จากภาพที่ 71 เป็นการเปรียบเทียบพิกัดที่แกน X ก่อนและหลังปรับค่าเมื่อทดลองกำหนดค่าความคลาดเคลื่อน ณ พิกัดบนแกน X ก่อนปรับค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีค่าของพิกัดหลังปรับค่าเกินช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ควรไปพิจารณาข้อจำกัดต่างๆ เพิ่มเติม เช่น อาจมีการลดความเร็วหรือเพิ่มพิกัดมากขึ้น เป็นต้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาเรื่องความสัมพันธ์ของความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ความเร่งกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทั่วไปของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนพบว่า การเกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่มีค่าสูงๆ บนชิ้นงาน อาจจะไม่เกิดขึ้นบน เครื่องจักร และการที่ไม่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งบนชิ้นงานหรืออาจจะเกิดแต่มีค่า น้อย ๆ อาจจะไม่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งค่าสูงๆ บนเครื่องจักรได้ ดังนั้นการพิจารณา อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งจึงควรพิจารณาที่ตำแหน่งของเครื่องจักร (NC-file)

การคำนวณหาค่าสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมในการกัดชิ้นงานของเครื่องจักร ซีเอ็นซี 5 แกนภายใต้เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนด ภายใต้สมมติฐานว่า ความเร่งของเส้นทางที่มีพบปัญหา ก่อนและหลังทำการควบคุมจะมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการ ทดลองกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและสมมติหาค่าสั่งควบคุมการเคลื่อนที่เพื่อสร้าง เส้นทางเดินมีดกัดที่มีปัญหาเรื่องอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเกินกว่าความเร่งที่กำหนด พบว่า จุดที่พบปัญหาเรื่องอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเกินกว่าที่กำหนด เมื่อทำการควบคุม แล้วทุกจุดอยู่ภายใต้อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ได้กำหนดไว้ แต่เนื่องจากจุดที่เพิ่มขึ้นที่ทำให้ ความเร่งก่อนและหลังปรับค่ามีค่าใกล้เคียงเดิมมีจำนวนน้อยที่สุด เพื่อให้พิกัดบนระบบแกนของ เครื่องจักรที่คำนวณมาได้มีผลกระทบต่อพิกัดบนระบบชิ้นงานน้อยที่สุด (การเพิ่มจำนวนพิกัดบน ระบบแกนของเครื่องจักรมากขึ้นไม่ได้ช่วยเพิ่มความละเอียดบนพิกัดบนระบบพิกัดชิ้นงาน แต่กลับ จะทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนมากขึ้น เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงต่อกัน) ทำให้ความเร่ง ของจุดที่เพิ่มขึ้นอาจมีค่าความเร่งไม่ใกล้เคียงกับความเร่งของจุดเดิม แต่โดยรวมแล้วมีความเร่ง ของเส้นทางตัดเดือนก่อนและหลังควบคุมที่ใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าตั้งควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมในการกัดชิ้นงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกนภายใต้เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่กำหนด โดยชุดค่าตั้งควบคุมการเคลื่อนที่ที่กำหนดมาได้ มิได้พิจารณาขีดเซยค่าความผิดพลาดต่างๆ เช่น ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิต (Thermal Errors) และความผิดพลาดอันเนื่องมาจากแรงในการตัดเฉือนในกระบวนการผลิต (Cutting-force Induced Errors) ซึ่งอาจส่งผลให้การผลิตชิ้นงานจริง พื้นผิวที่ได้จากชุดค่าตั้งควบคุมการเคลื่อนที่ที่กำหนดได้ อาจจะได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในการใช้งานจริง ควรมีการขีดเซยค่าความผิดพลาดเหล่านั้นเพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรซีเอ็นซีมีความถูกต้องยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชนะ รัชศรีศิริ. 2549. เอกสารประกอบการสอนวิชาเครื่องจักรกลซีเอ็นซี I. ภาควิชาวิศวกรรม
อุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วุฒิชัย กปิลกาญจน์. 2533. กลไกและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกล. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์,
กรุงเทพฯ.
- Apro, K. 2008. **Secrets of 5-Axis Machining**. Industrial Press, Inc., New York.
- Balkan, T. 1986. A dynamic programming approach to optimal control of robotic manipulators.
Mechanics Research Communications. 25: 225-230.
- Bobrow, J.E., B. Martin, G. Sohl, E.C. Wang, F.C. Park and J. Kim. 2001. Optimal robot motion
for physical criteria. **Journal of Robotic System**. 18: 785-795.
- Chen, L., X. Feng and H. Li. 2010. Real-time 5-axis Spline Interpolation Method and Servo-
controlling Structure of CNC System. **Journal of Communication and Computer**. 7:
44-49
- Constantinescu, D. and E.A. Croft. 2000. Smooth and time-optimal trajectory planning for
industrial manipulators along specified paths. **Journal of Robotic Systems**. 17: 233-
249.
- Craig, J.J. 2005. **Introduction to robotics: mechanics and control**. 3rd ed. Pearson Education,
Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Dong, J., P.M. Ferreira and J.A. Stori. 2007. Feed-rate optimization with jerk constraints for
generating minimum-time trajectories. **International Journal of Machine Tools &
Manufacture**. 47: 1941-1955.

- Erkorkmaz, K. and M. Heng. 2008. A heuristic feedrate optimization strategy for NURBS toolpaths. **CIRP Annals–Manufacturing Technology**. 57: 407-410.
- Gasparetto, A. and V. Zanutto. 2007. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators. **Mechanism and Machine Theory**. 42: 455-471.
- Guarino Lo Bianco, C. and A. Piazzzi. 2001. **Semi-infinite Programming: Recent Advances**. Springer-Verlag, Berlin.
- Jamhour, E. and P.J. Andre. 1996. Planning smooth trajectories along parametric paths. **Mathematics and Computers in Simulation**. 41: 615-626.
- Ko, T.J., H.S. Kim and S.H. Park. 2005. Machineability in NURBS interpolator considering constant material removal rate. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 45: 665-671.
- Lee, A.C., M.T. Lin, Y.R. Pan and W.Y. Lin. 2011. The feedrate scheduling of NURBS interpolator for CNC machine tools. **Computer-Aided Design**. 43: 612-628.
- Lin, C.H., P.R. Chang, J.Y.S. Luh. 1983. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots. **IEEE Transaction on Automatic Control**. 28: 1066-1073.
- Martin, B.J. and J.E. Bobrow. 1999. Minimum effort motion for open chain manipulators with task-dependent end-effector constraints. **International Journal of Robotics Research**. 18: 213-224.
- Piazzzi, A. and A. Visioli. 1998. Global minimum-time trajectory planning of mechanical manipulators using interval analysis. **International Journal of Control**. 71: 631-652.

- Qian, L., B. Yang and S. Lei. 2008. Comparing and combining off-line feedrate rescheduling strategies in free-form surface machining with feedrate acceleration and deceleration. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. 24: 796-803.
- Sencer, B., Y. Altinlas and E. Croft. 2008. Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 48: 733-745.
- Shiller, Z. 1996. Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints. **Transactions of the ASME journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**. 118: 139-143.
- Shim, H.S. and J. Lee. 2008. Acceleration Workspace of Cooperating Multi-Finger Robot Systems. **Journal of Bionic Engineering**. 5: 103-110.
- Shin, K.G. and N.D. McKay. 1985. Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints. **IEEE Transaction on Automatic Control**. 30: 531-541.
- Simon, D. 1993. The application of neural networks to optimal robot trajectory planning. **Robotics and Autonomous System**. 11: 23-34.
- So, B.S., Y.H. Jung, J.W. Park and D.W. Lee. 2007a. Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics. **Journal of Materials Processing Technology**. 187-188: 37-40.
- So, B.S., Y.H. Jung, T.R. Kurfess and S.M. Hwang. 2007b. 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization. **Journal of Materials Processing Technology**. 187-188: 2-5.

Von Stryk, O. and M. Schlemmer. 1994. **International Series of Numerical Mathematics**.
Birkhauser, Basel.

Wang, C.H., J.G. Horng. 1990. Constrained minimum-time path planning for robot manipulators
via virtual knots of the cubic B-Spline functions. **IEEE Transaction on Automatic
Control**. 35: 573-577.

Yong, T., M. and R. Narayanaswami. 2003. A parametric interpolator with confined chord
errors, acceleration and deceleration for NC machining. **Computer-Aided Design**. 35:
1249-1259.

Yongzhang, W., M. Xiongbo, C. Liangji and H. Zhenyu. 2007. Realization methodology of a 5-
axis Spline Interpolator in an Open CNC system. **Chinese of Aeronautics**. 20: 362-369.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลการคำนวณความเร็ว ความเร่ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง
โดยวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตารางผนวกที่ ก1 ความเร็วในการกักชิ้นงานของระบบพิกัดชิ้นงาน

ลำดับการ กัก (i)	ความเร็วที่ใช้ในแต่ละแกน (mm/s)						เวลา เวลา (s)	สะสม (s)
	X	Y	Z	i	j	k		
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	40.983	71.720	56.351	0.635	0.307	0.820	0.976	0.976
2	37.139	74.277	55.708	0.149	0.371	0.371	0.269	1.245
3	37.139	74.277	55.708	0.149	0.371	0.371	0.269	1.515

ตารางผนวกที่ ก2 ความเร่งในการกักชิ้นงานของระบบพิกัดชิ้นงาน

ลำดับการ กัก (i)	ความเร่งที่ใช้ในแต่ละแกน (mm/s ²)						เวลา เวลา (s)	สะสม (s)
	X	Y	Z	i	j	k		
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	41.990	73.482	57.736	0.651	0.315	0.840	0.976	0.976
2	137.927	275.854	206.89	0.552	1.379	1.379	0.269	1.245
3	137.927	275.854	206.89	0.552	1.379	1.379	0.269	1.515

ตารางผนวกที่ ก3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกักชิ้นงานของระบบพิกัดชิ้นงาน

ลำดับการ กัก (i)	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร่งที่ใช้ในแต่ละแกน (mm/s ³)						เวลา เวลา (s)	สะสม (s)
	X	Y	Z	i	j	k		
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	86.043	150.576	118.309	1.334	0.645	1.721	0.976	0.976
2	1024.5	2050	1536.7	4.1	10.2	10.2	0.269	1.245
3	1024.5	2049	1536.7	4.1	10.2	10.2	0.269	1.515

ตารางผนวกที่ ก4 ความเร็วในการกักชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักร

ลำดับการกัก (i)	ความเร็วที่ใช้ในแต่ละแกน (mm/s)					เวลา (s)	เวลาสะสม (s)
	X	Y	Z	A	C		
0	0	0	0	0	0	0	0
1	-289.761	139.951	-10.651	-0.558	1.472	0.976	0.976
2	0	0	0	0	0	0.269	1.245
3	0	0	0	0	0	-0.269	1.515

ตารางผนวกที่ ก5 ความเร่งในการกักชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักร

ลำดับการกัก (i)	ความเร่งที่ใช้ในแต่ละแกน (mm/s ²)					เวลา (s)	เวลาสะสม (s)
	X	Y	Z	A	C		
0	0	0	0	0	0	0	0
1	-296.881	-447.860	227.351	2.965	1.508	0.976	0.976
2	0	-78.135	61.414	0.427	0	0.269	1.245
3	0	-57.387	40.215	0.273	0	0.269	1.515

ตารางผนวกที่ ก6 อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในการกักชิ้นงานของระบบแกนของเครื่องจักร

ลำดับการกัก (i)	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ใช้ในแต่ละแกน (mm/s ³)					เวลา (s)	เวลาสะสม (s)
	X	Y	Z	A	C		
0	0	0	0	0	0	0	0
1	-608.4	1220.5	1508.8	-0.5	3.1	0.976	0.976
2	0	-690.604	655.757	4.07	2.693	0.269	1.245
3	0	-537.027	437.650	0	0	0.269	1.515



ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณพิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลา
ภายใต้การควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง

ตารางผนวกที่ ข1 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน X

ลำดับการ กัด (i)	พิกัดใน แนวแกน X (mm)	ระยะทาง สะสม (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (mm/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	20	20	47.434	112.50	533.634	0.422	0.422
2	-60	80	-127.279	-270	-1145.513	0.471	0.893
3	50	130	118.585	281.25	1334.086	0.422	1.315
4	40	170	109.545	300	1643.168	0.365	1.680
5	10	180	38.730	150	1161.895	0.258	1.938

ตารางผนวกที่ ข2 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกัดชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน Y

ลำดับการ กัด (i)	พิกัดใน แนวแกน Y (mm)	ระยะทาง สะสม (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (mm/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	10	23.717	56.25	266.817	0.422	0.422
2	20	20	21.213	45	190.919	0.471	0.893
3	30	30	23.717	56.25	266.817	0.422	1.315
4	40	40	27.386	75	410.792	0.365	1.680
5	50	50	38.730	150	1161.895	0.258	1.938

ตารางผนวกที่ ข3 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกักชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน Z

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน Z (mm)	ระยะทาง สะสม (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (mm/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	30	30	71.151	168.75	800.452	0.422	0.422
2	0	60	-63.640	-135	-572.757	0.471	0.893
3	-30	90	-71.151	-168.75	-800.452	0.422	1.315
4	0	120	82.158	225	1232.376	0.365	1.680
5	30	150	116.189	450	3485.685	0.258	1.938

ตารางผนวกที่ ข4 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกักชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน A

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน A (degree)	ระยะทาง สะสม (degree)	ความเร็ว (degree/s)	ความเร่ง (degree/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (degree/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	10	23.717	56.25	266.817	0.422	0.422
2	10	10	0	0	0	0.471	0.893
3	20	20	23.717	56.25	266.817	0.422	1.315
4	20	20	0	0	0	0.365	1.680
5	20	20	0	0	0	0.258	1.938

ตารางผนวกที่ ข5 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกักชิ้นงานก่อนปรับค่าในแกน C

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน C (degree)	ระยะทาง สะสม (degree)	ความเร็ว (degree/s)	ความเร่ง (degree/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (degree/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	50	50	118.585	281.25	1334.086	0.422	0.422
2	30	70	-42.426	-90	-381.838	0.471	0.893
3	10	90	-47.434	-112.50	-533.634	0.422	1.315
4	-10	110	-54.772	-150	-821.584	0.365	1.680
5	-30	130	-77.460	-300	-2323.790	0.258	1.938

ตารางผนวกที่ ข6 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกักชิ้นงานหลังปรับค่าในแกน X

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน X (mm)	ระยะทาง สะสม (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (mm/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	20	20	47.434	112.500	533.634	0.422	0.422
2	-13.425	53.425	-82.357	-202.925	-1000	0.406	0.828
3	-13.566	53.566	-2.149	-32.777	-1000	0.066	0.893
4	-13.577	53.577	-0.402	-14.172	-1000	0.028	0.921
5	2.427	69.581	50.405	158.753	1000	0.318	1.239
6	2.645	69.798	2.872	37.894	1000	0.076	1.315
7	82.948	150.102	147.734	271.785	1000	0.544	1.858
8	106.693	173.847	65.570	181.066	1000	0.362	2.220

ตารางผนวกที่ ข7 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกักชั้นงานหลังปรับค่าในแกน Y

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน Y (mm)	ระยะทาง สะสม (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (mm/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	10	23.717	56.250	266.817	0.422	0.422
2	20	20	21.213	45.000	190.919	0.471	0.893
3	30	30	23.717	56.250	266.817	0.422	1.315
4	40	40	27.386	75.000	410.792	0.365	1.680
5	43.283	43.283	17.532	93.627	1000	0.187	1.867
6	43.462	43.462	2.517	35.472	1000	0.071	1.938

ตารางผนวกที่ ข8 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่ใช้ในการกักชั้นงานหลังปรับค่าในแกน Z

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน Z (mm)	ระยะทาง สะสม (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (mm/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	30	30	71.151	168.750	800.452	0.422	0.422
2	0	60	-63.640	-135.000	-572.757	0.471	0.893
3	-30	90	-71.151	-168.750	-800.452	0.422	1.315
4	-13.918	106.082	50.569	159.010	1000	0.318	1.633
5	-13.866	106.134	1.111	23.564	1000	0.047	1.680
6	99.123	219.123	185.501	304.550	1000	0.609	2.289

ตารางผนวกที่ ข9 พิกัด ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและเวลาที่
ใช้ในการกักขึ้นงานหลังปรับค่าในแกน C

ลำดับการ กัก (i)	พิกัดใน แนวแกน C (degree)	ระยะทาง สะสม (degree)	ความเร็ว (degree/s)	ความเร่ง (degree/s ²)	อัตราการ เปลี่ยนแปลง ของความเร่ง (degree/s ³)	เวลา (s)	เวลา สะสม (s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	11.067	11.067	39.417	140.387	1000	0.281	0.281
2	12.465	12.465	9.921	70.432	1000	0.141	0.422
3	12.465	12.465	0.042	4.581	1000	0.009	0.431
4	-6.391	31.322	-40.793	-88.251	-381.838	0.462	0.893
5	-26.391	51.322	-47.434	-112.500	-533.634	0.422	1.315
6	-46.391	71.322	-54.772	-150.000	-821.584	0.365	1.680
7	-46.406	71.336	-0.470	-15.333	-1000	0.031	1.711
8	-73.440	98.370	-71.493	-189.068	-1000	0.378	2.089

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายศักเกษม สุจินตนารัตน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 7 พฤษภาคม 2530
สถานที่เกิด	ระยอง
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมการผลิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์