

การหาสภาวะการกัดขึ้นรูป และการเฝ้าดูระยะไกล สำหรับเครื่องอินเทลลิเจนต์มาชีนนิ่งเซ็นเตอร์ Machining State Determination and Remote Monitoring for Intelligent Machining Center

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ¹ ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ^{2*} เด่นชัย วรเดชจำเริญ³
Mamoru MITSUISHI³, Shin'ichi WARISAWA⁴ and Ryohei HANAYAMA⁵
^{1, 2, 3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
^{3, 4, 5} Department of engineering synthesis, Faculty of engineering, The University of Tokyo, Japan
*E-mail: pairat.t@eng.chula.ac.th

Viboon Sangveraphunsiri¹ Pairat Tangpornprasert^{2*} Denchai Woradechjamreong³
Mamoru MITSUISHI³, Shin'ichi WARISAWA⁴ and Ryohei HANAYAMA⁵
^{1, 2, 3} Department of Mechanical engineering, Faculty of engineering, Pathumwan Bangkok 10330
^{3, 4, 5} Department of engineering synthesis, Faculty of engineering, The University of Tokyo, Japan
*E-mail: pairat.t@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความนี้จะแสดงถึงวิธีตรวจจับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงานแล้วหา Cutting condition ที่เหมาะสมเพื่อลดการสั่นสะเทือนนั้น โดยใช้วิธี Force Vector Locus¹ ในการตรวจจับแบบ Real-time ของการเกิด Chatter vibration จากนั้นทำการปรับโอเวอร์ไรด์ Feed speed และ/หรือ Spindle speed โดยผ่าน High speed serial port (HSSB) ที่เชื่อมต่อจาก PC กับ Controller ของ Machining center ซึ่งเป็นชนิด Open-Architecture สามารถโปรแกรม เพื่อควบคุมจากภายนอกได้ซึ่งทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการสั่นสะเทือนได้ภายในไม่กี่มิลลิวินาที พร้อมทั้งแสดงผลของการ Monitoring พารามิเตอร์ต่างๆผ่านระบบ Network

คำหลัก: สภาวะการกัดขึ้นรูป การเฝ้าดูระยะไกล การสั่นสะเทือน การทำงานระยะไกล สถาปัตยกรรมแบบเปิด

Abstract

In order to detect the chattering vibration in milling process, this paper adopted the force vector locus technique which determined from the measured force data to judge the machining state in real-time. The controller of machining center is an Open-Architecture type. It is possible to change the override value of the CNC controller by sending and override value from the external computer via High speed serial port (HSSB). The chattering vibration can be suppressed in real-time by adjusting

the override value for spindle speed or feed speed. Furthermore, machining parameter can be monitored through Network.

Keywords: Machining state, Remote monitoring, Chatter vibration, Tele-operation, Open-Architecture

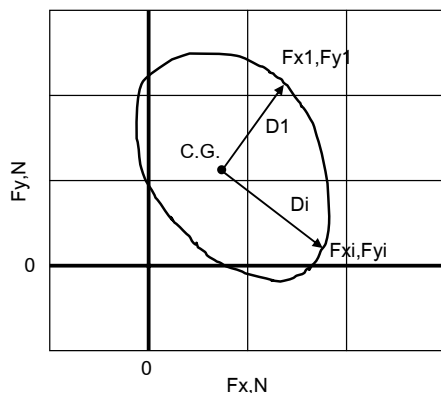
1. บทนำ

ขบวนการขึ้นรูปชิ้นงานในอนาคตนั้นแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปเป็นในเชิง Information-oriented และ intelligent manufacturing มากขึ้น หรือ Global intelligent manufacturing system ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนและเวลาในการผลิต ปรับปรุงคุณภาพและส่งเสริมผลผลิต นอกจากนี้แล้วยังจะช่วยลดเวลาและต้นทุนของการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นอีกด้วย ในระบบการผลิตแบบนี้ นักออกแบบสามารถทำงานแบบ Concurrent ชิ้นส่วนต่างๆ สามารถผลิตได้โดยโรงงานที่อยู่ใกล้มีลูกค้า วิศวกรผู้เชี่ยวชาญสามารถให้คำแนะนำ ช่าง วิศวกรด้วยกัน หรือแม้แต่ลูกค้าได้ นอกจากนี้การ Operate เครื่องจักรยังสามารถทำได้จากที่ห่างไกล ส่วนลักษณะที่สำคัญสำหรับขบวนการผลิตแบบนี้อย่างแรก ระบบจะต้องมี Information network ที่ดีสามารถเชื่อมต่อกับ สำนักงาน โรงงาน สถาบัน มหาวิทยาลัยได้ เป็นต้น และสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ส่วนลักษณะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือเครื่องจักรต้องมีความฉลาด นั้นหมายถึงระบบ Sensor ต่างๆได้มีการติดตั้งเข้าไปในเครื่องจักรและข้อมูลข่าวสารต่างๆถูกเชื่อมต่อเข้าสู่ Information network สามารถรับและส่งข้อมูลข่าวสารซึ่งกันและกันได้ ทำให้สามารถ Monitoring สภาวะการทำงานและนำไปสู่การควบคุมใน

เชิงต่างๆได้ภายในระบบ เช่น Compensation of thermal deformation, Detection and avoidance of chatter, Remote monitoring และ tele-operation เป็นต้น

2. การตรวจจับการสั่นสะเทือนด้วยวิธี Force Vector Locus¹

การตรวจรู้สภาวะการสั่นสะเทือนขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงานนั้นจะประเมินจากข้อมูลของแรงกัด(Cutting force) ที่ได้จาก Force sensor โดยใช้วิธีการ Force vector locus method รูปที่ 1 แสดงตัวอย่าง Force vector locus ของการกัดแบบ immersion end milling การวาดทางเดินของแรงทำได้โดยการนำเอาข้อมูลของแรงกัด F_x และ F_y ของการหมุนของ Cutting tool เพียง 1 รอบมา แล้วนำมา Plot บนระนาบ X-Y ก็จะได้ Force vector locus ดังรูป



รูปที่ 1 Variance of distance

วิธีการตรวจจับความสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยพิจารณารูปร่างของ Force vector locus ที่ได้ จากรูปที่ 1 ถ้าสภาวะการกัดขึ้นรูปเป็นแบบปกติไม่เกิดการสั่น รูปร่างของ Force vector locus จะมีลักษณะคล้ายวงกลม แต่ถ้าสภาวะการกัดขึ้นรูปเกิดการสั่นขึ้นรูปร่างของ Force vector locus จะมี Variation ที่ผิดปรกติ Superimposed รวมเข้าไปกับ รูปร่างปกติของ Force vector locus นอกจากนี้รูปร่างจะมีแนวโน้มแบบขึ้นหรือเป็นวงรีมากขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากการเกิด Chatter vibration ซึ่งเกิดจาก Resonant vibration ของ Cutting tool ขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงาน

ส่วนการประเมินรูปร่างของ Force vector locus จะเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า Center of gravity ของ Force vector locus แล้วหาระยะทางจาก จุด C.G.นี้ไปยังแต่ละ Sample point ของข้อมูลของแรงกัด จากนั้นคำนวณหา Variation ของระยะทางที่ได้ซึ่งจะนำไปใช้ในการประเมินว่าเกิด Chatter vibration ขึ้นหรือไม่ โดยสภาวะการกัดจะเป็นปรกติถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย แต่ถ้ามีค่ามากก็จะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในระบบ

3. โครงสร้างของระบบการหาสภาวะ การกัดขึ้นรูป และการเฝ้าดูระยะไกล

ระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆ เช่น Open-architecture machining center, External computer

controller Multi-axis Force sensor และระบบ Network เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2

3.1 Open-architecture CNC

CNC controller ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด Open-architecture ความสามารถของตัวควบคุมแบบ Open-architecture นั้นทำให้เราสามารถ overwrite คำสั่งควบคุมบางคำสั่งที่สั่งโดยรหัส-จีในขณะเครื่อง CNC นั้นกำลังทำการกัดขึ้นงานอยู่ การควบคุมทำได้โดยการติดต่อสื่อสารระหว่างตัวควบคุม CNC กับตัวควบคุมภายนอก (External controller) ผ่านทาง High Speed Serial Port (HSSB) นอกจากนี้ระบบยังสามารถติดต่อโดยใช้ระบบเครือข่าย TCP/IP ได้ด้วยเช่นกัน ทำให้เราสามารถส่งข้อมูลของอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) ต่างๆ และสภาวะการทำงานของเครื่องกัดและของ controller มายัง Remote operator ได้ อุปกรณ์ตรวจรู้ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Multi-axis force sensor

3.2 External computer

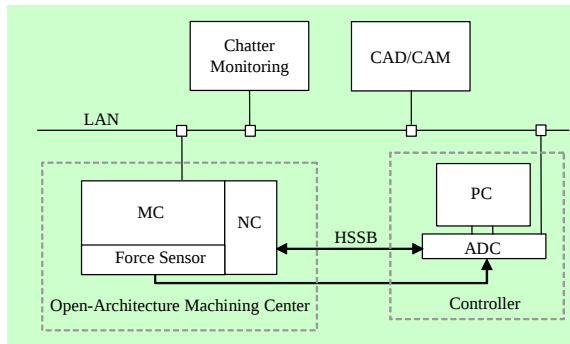
การควบคุมพารามิเตอร์ที่สนใจที่มีผลกระทบกับคุณภาพของการกัดขึ้นงาน เช่น Chattering vibration ที่เกิดขึ้นในขณะการกัดที่ความเร็วสูงจะถูกควบคุมโดย External computer ผ่านทาง High speed serial port (HSSB) นอกจากนี้ข้อมูลของอุปกรณ์ตรวจรู้ต่างๆก็ได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ External computer นี้โดยตรง ผ่านอุปกรณ์ Data acquisition card เพื่อใช้ในการประมวลผล

3.3 Force sensor

ในการเฝ้าตรวจ (Monitor) สภาวะการกัดขึ้นงานมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ตรวจรู้ต่างๆ เช่น Cameras, microphones, force sensor, deformation sensor, and temperature sensor เป็นต้น ในการทดลองนี้จะใช้ 3-Axis Force sensor ของ Kistler Type 9255B เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรงกัดแล้วประเมินสภาวะการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี Force vector locus ตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว

3.4 Remote monitoring Network

ระบบควบคุมภายนอกที่ควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้เชื่อมต่อเชื่อมเข้ากับระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์หรือ TCP/IP Network ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้สามารถสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลทางไกลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ไกลออกไปได้ (Remote computer) ในการทดลองนี้นอกจากทำการตรวจจับความสั่นสะเทือนของระบบที่คอยเฝ้าตรวจ (Monitor) ที่หน้าเครื่องแล้วก็ตาม เนื่องจากการกัดขึ้นงานส่วนมากจะกินเวลาค่อนข้างมาก ดังนั้นถ้าข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความสั่นสะเทือนในระหว่างการกัดสามารถส่งผ่านไปแสดงที่หน้าจอของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ไกลออกไปได้ (Remote computer) จะทำให้สามารถตรวจสอบสภาวะของการกัดขึ้นงานที่มีผลต่อคุณภาพของการกัดได้โดยไม่ต้องไปอยู่ที่หน้าเครื่อง CNC เทคนิคที่ใช้นี้เรียกว่า Remote monitoring นอกจากจะช่วยให้การเฝ้าตรวจ (Monitor) แล้ว ยังสามารถใช้เทคนิคดังกล่าวนี้มาช่วยในการควบคุมการทำงานของตัวควบคุมภายนอก (External controller) ดังกล่าวได้ด้วย



รูปที่ 2 Machining State Determination and Remote Monitoring System

4. การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1.การหาค่า Threshold Variance ของ Force vector locus ที่เป็นช่วงเปลี่ยนจากการกัดแบบปกติไม่มีการสั่นสะเทือนกับการเกิด Chatter vibration ซึ่งแตกต่างกันไปตามระบบ ทั้งนี้เนื่องจาก Variance นั้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆของระบบหลายตัว เช่น เงื่อนไขของการกัด (Cutting condition) วัสดุของ Workpiece วัสดุของ Cutting Tool การสึกหรอ Tool wear และโครงสร้างของ Machining center เป็นต้น 2.การควบคุมสภาวะการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน ให้อยู่ในสภาวะการกัดแบบปกติไม่เกิดการสั่น หรือหลีกเลี่ยง Chatter vibration ที่เกิดขึ้นโดยทำการปรับโอเวอร์ไรด์ Feed speed และ/หรือ Spindle speed พร้อมทั้งแสดงผลของสภาวะการกัดขึ้นรูปชิ้นงานผ่านระบบ Network

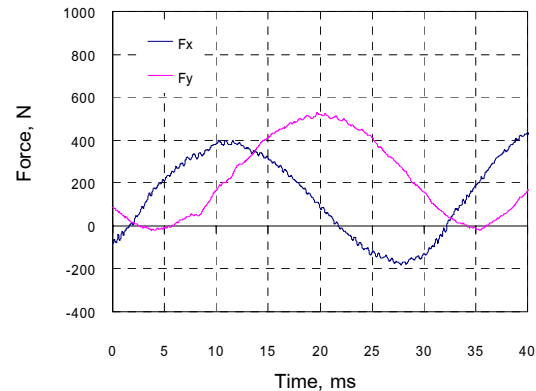
4.1 Threshold Variance ของ Force vector locus

เพื่อที่จะหา threshold Variance ของระบบ ทำการทดลองกัดชิ้นงานเหล็กS50C โดยใช้ Carbide Square endmill 2-Flutes ขนาด ϕ 10mm ด้วยเงื่อนไขการกัด (Cutting condition) แบบ Full immersion มีการหล่อเย็น เซต Depth of cut คงที่ไว้ที่ค่าๆหนึ่ง แล้วเปลี่ยนแปลง Spindle speed ครึ่งละ 500 rpmกับ Feed rate ด้วย Feed/tooth คงที่ 0.04 mm ตามตารางที่ 1

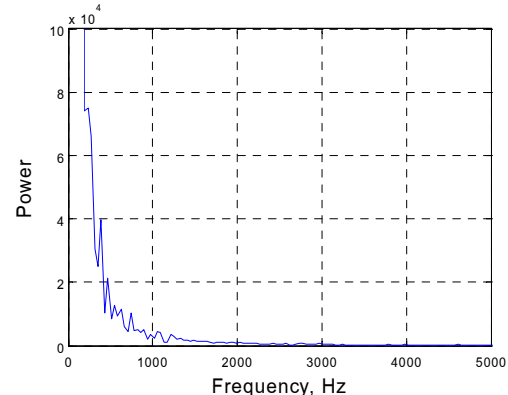
ตารางที่ 1 Cutting condition

No	Depth of cut (mm)	Spindle Speed (rpm) [Feed Rate (mm/min)]
1	1.0	500 : 1,000 : 2,500 : ... 5,500 :6,000 [40 : 80 : 120 : ... 440 : 480]
2	2.0	500 : 1,000 : 2,500 : ... 5,500 :6,000 [40 : 80 : 120 : ... 440 : 480]
3	3.0	500 : 1,000 : 2,500 : ... 5,500 :6,000 [40 : 80 : 120 : ... 440 : 480]
4	4.0	500 : 1,000 : 2,500 : ... 5,500 :6,000 [40 : 80 : 120 : ... 440 : 480]
5	5.0	500 : 1,000 : 2,500 : ... 5,500 :6,000 [40 : 80 : 120 : ... 440 : 480]

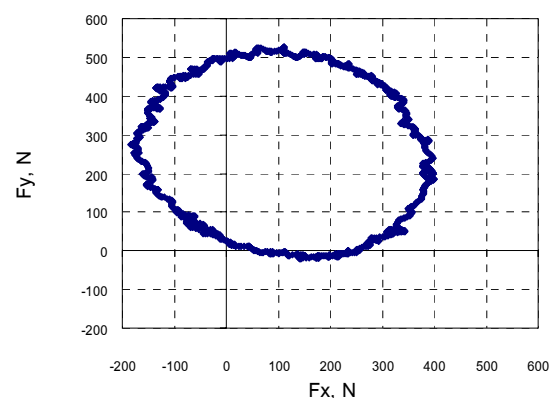
ในการทดลองได้เก็บ Force data ขณะกัดชิ้นงานที่ Cutting condition ต่างๆ แล้วนำมาคำนวณหา Fourier transform และ Variance ของ Force vector locus ตามวิธีดังกล่าวข้างต้น แล้วนำมา Plot ได้รูปที่ 3 และ รูปที่ 4ซึ่งทำให้สามารถประเมินสภาวะการกัดที่ปกติไม่เกิดการสั่นกับสภาวะเกิด Chatter vibrationได้



(a) Cutting force

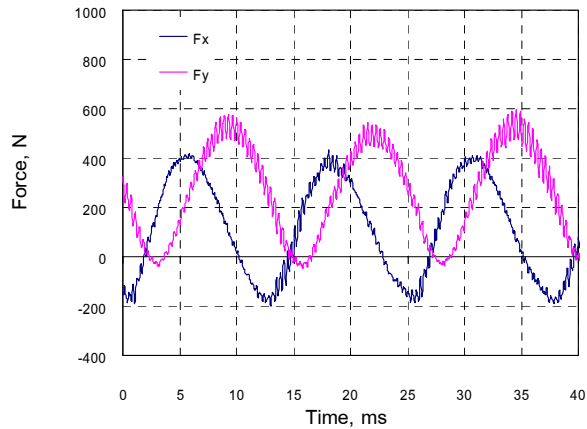


(b) Power spectrum of force data (Fy)

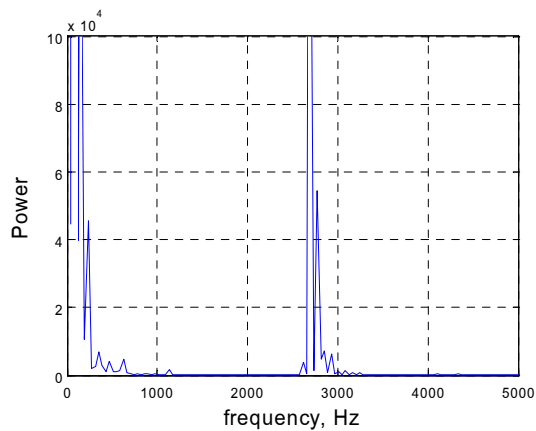


(c) Force vector locus, Variance = 479 N^2

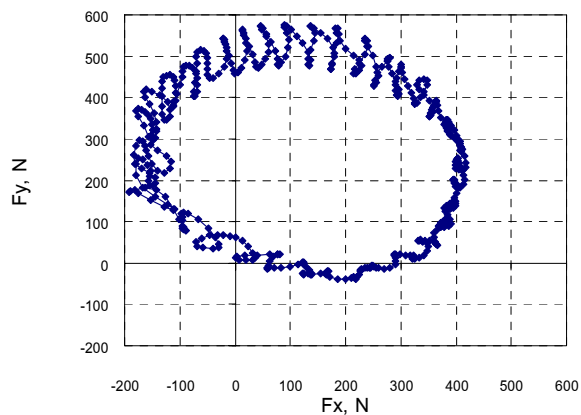
รูปที่ 3 สภาวะการกัดปกติไม่เกิดการสั่น
ที่ Depth of cut = 5 mm, Spindle speed = 1000 rpm



(a) Cutting force



(b) Power spectrum of force data (fy)



(c) Force vector locus, Variance = 1060 N²

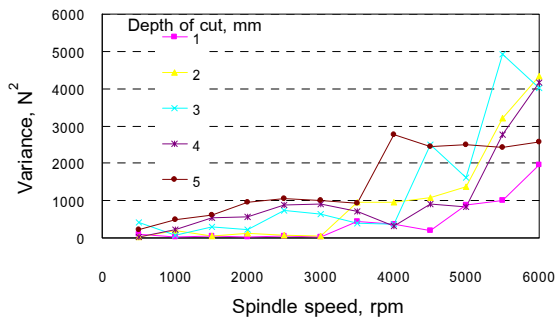
รูปที่ 4 สภาวะการกัดขึ้นรูปชิ้นงานขณะเกิด Chatter vibration ที่ Depth of cut = 5 mm, Spindle speed = 2500 rpm

เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการกัดแบบปกติไม่เกิดการสั่นดังแสดงในรูปที่ 3 กับสภาวะการกัดขณะเกิด Chatter vibration ในรูปที่ 4 จะเห็นได้ชัดเจนว่า Force data ขณะกัดแบบปกติไม่สั่นจะเรียบกว่า ส่วน

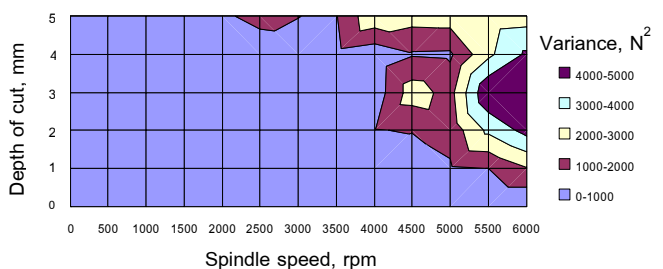
การกัดแบบเกิด Chatter vibration จะมี Variation ของแรงที่ความถี่สูงซ้อนเพิ่มเข้าไปด้วยและขณะกัดมีเสียงดังที่ความถี่สูงเกิดขึ้นด้วย หลังจากทำ Fourier transform แล้วพบว่า Peak ที่ความถี่ประมาณ 2,700 Hz เกิดขึ้นเนื่องจาก Chatter vibration

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะของ Force vector locus ที่เกิดขึ้นพบว่าการกัดแบบปกติไม่สั่น จะมีรูปร่างที่คล้ายวงกลมที่เรียบกว่าในกรณีที่เกิด Chatter vibration ซึ่งเป็นรอยหยักบนเส้นรอบวงซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาวะการกัดที่ขาดเสถียรภาพ และค่า Variance ที่คำนวณได้ก็มีความมากกว่าการกัดแบบปกติไม่สั่น ฉะนั้นค่า Variance นี้สามารถใช้เป็น Index สำหรับบอกได้ว่าสภาวะการกัดนั้นมี Chatter vibration เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการทำ Fourier transform โดยมีข้อสังเกตว่าการประเมินสภาวะการกัดว่าเกิด Chatter แล้วหรือยังด้วยวิธี Force vector locus Method นี้ใช้จำนวนข้อมูลและเวลาในการเก็บข้อมูลน้อยมาก Cutting tool หมุนเพียง 1 รอบก็สามารถคำนวณหาค่า Variance และบอกสภาวะการกัดที่เกิดขึ้นได้แบบ Real-time

จากนั้นรวบรวมผลการทดลองและผลการคำนวณทั้งหมดที่ได้นำมา Plot กราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ของ Variance กับ Cutting condition ต่างๆ ได้ตามรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Variance กับ Cutting condition

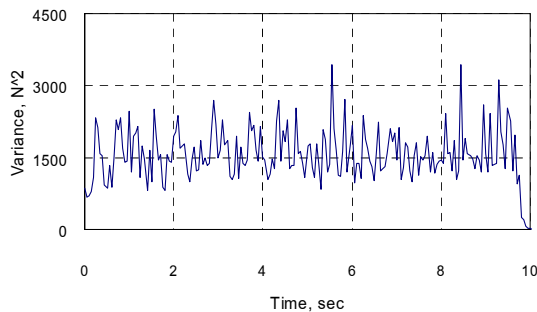


รูปที่ 6 Contour of variance

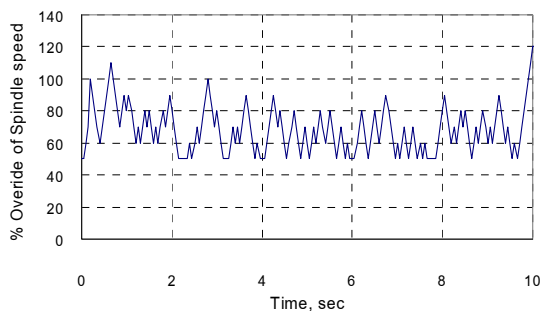
ค่าของ Variance มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ Spindle speed เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 5 และที่ Depth of cut เพิ่มมากขึ้น Variance ก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามรูปที่ 6 จากการทดลองพบว่า Cutting condition บริเวณที่มี Variance ตั้งแต่ช่วง 1000-1500 จะเกิด Chatter vibration ขึ้น ซึ่งเป็น Threshold Variance ของข้อมูลนี้

4.2 Detection and avoidance of chatter vibration

เนื่องจากในขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงาน ผลของพารามิเตอร์บางตัว เช่น Cutting condition การสึกหรอของ Cutting tool รูปร่างของชิ้นงาน ที่ทำการกัดเป็นต้น จะมีผลต่อการเกิด Chatter vibration ฉะนั้น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นได้ขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงาน แบบ Real-time จึงใช้วิธีตรวจสอบความสั่นสะเทือนด้วย Force vector locus ดังกล่าว โดยในการทดลองเริ่มต้นกัดขึ้นงานด้วย Cutting condition ที่ Depth of cut 2.0 mm, Feed per tooth 0.04 mm/tooth, Spindle speed 2,000 rpm จากนั้นค่อยๆ เพิ่มประสิทธิภาพในการกัด ให้เร็วขึ้นโดยการเพิ่ม Spindle speed และ Feed Speed พร้อมกับ รักษา Feed per Tooth ให้คงที่ ในขณะเดียวกันก็พยายามรักษา Variance ของข้อมูลของแรงไม่ให้เป็นค่า Threshold Variance ของระบบ โดยเซตค่าไว้ที่ 1500 N² ขณะกัดขึ้นงาน ถ้า Variance ยังไม่ เกิน Threshold คอนโทรลเลอร์ก็จะปรับโอเวอร์ไรด์ Spindle speed เพิ่มขึ้น 10 % ทุกๆ 50 ms แต่ถ้า Variance เกิน Threshold คอนโทรลเลอร์ก็จะปรับโอเวอร์ไรด์ Spindle speed ลดลงเช่นกัน 10 % ซึ่ง ส่งผลให้ระบบสามารถลดเวลาในการ Machining เพิ่มคุณภาพให้กับผิว ชิ้นงานและหลีกเลี่ยงการเกิด Chatter vibration ได้



รูปที่ 7 Variance ขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 8 % Override of Spindle speed ขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงาน

เริ่มต้นการทดลอง % Override อยู่ที่ 50 % หรือ Spindle speed เป็น 2000 rpm จากรูปที่ 7 ค่า Variance มีค่าประมาณ 700 N² ซึ่งต่ำกว่าค่า Threshold Variance ที่ตั้งไว้ (1500 N²) ระบบจึงปรับตัวเองเพิ่ม % Override หรือ Spindle speed ซึ่งส่งผลให้ Variance มีค่าสูงขึ้นตาม จากนั้นระบบทำการควบคุมแบบย้อนกลับตลอดเวลา Variance จึงถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1500 N² แต่จากผลการทดลองตามรูปที่ 7 ค่า Variance ที่ได้ยังมี Fluctuation อยู่ระดับหนึ่ง

เนื่องจาก Resolution ของ % Override มีค่าหยาบอยู่ (10%) ส่วนรูปที่ 8 ขณะระบบทำการควบคุม ค่าของ % Override มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งนี้ก็เพื่อปรับ Variance ให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ ฉะนั้นในการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน ถ้าต้องการคุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีขึ้นก็สามารถเซตค่า Variance ให้ต่ำลงมาอีกได้แต่เวลาที่ใช้ในการกัดก็เพิ่มขึ้น

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงานพร้อมทำการควบคุม จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) วิธีการ Force vector locus method สามารถตรวจสอบ Chatter vibration ขณะกัดขึ้นรูปชิ้นงานได้แบบ Real-time กล่าวคือภายใน 1 รอบการหมุนของ Cutting tool ใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาที
- 2) Threshold Variance ขึ้นอยู่กับระบบเช่น Cutting condition, Machine structure, Workpiece material, Cutting tool เป็นต้น ดังนั้น Data base ของระบบจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการรวบรวม ในการทดลองค่า Threshold Variance มีค่าอยู่ที่ช่วง 1000-1500 N²
- 3) ด้วยวิธีการตรวจสอบการสั่นสะเทือนแบบ Real-time ทำให้ระบบใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาที (เช่น 50 ms สำหรับ Spindle speed 2,000 rpm) สำหรับการลด Chatter vibration ที่เกิดขึ้นได้
- 4) ระบบได้เชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์หรือ TCP/IP Network ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลต่างๆ ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ไกลออกไปได้ (Remote computer) ทำให้สามารถตรวจสอบสถานะของการกัดขึ้นงานที่มีผลต่อคุณภาพของการกัดได้ (Remote monitoring) และยังสามารถควบคุมการทำงานของ (External controller) ของระบบได้

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยทั้งในด้านเครื่องจักร และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนทุนการทำวิจัยร่วมกับมหาวิทยาลัยโตเกียว จากโครงการเงินกู้ TJTTP-OECF

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mitsuishi, M., et al., "Real-time Machining State detection Using Multi-axis Force Sensing" CIRP Ann., 41, 1, pp.505-508, 1992.
- [2] Mitsuishi, M., "An Intelligent Manufacturing System with Technology Transfer Capability," Proceedings of Asian Machine Tool Engineers Forum'99, pp.85-96, Bangkok, Thailand, 1999.
- [3] N.H. Hanna, S.A. Tobias, "A theory of nonlinear regenerative chatters", J. of Eng for Industry 96, pp247-255, 1974
- [4] B.Y. Lee, Y.S. Tarng, S.C. Ma, "Modeling of the process damping force in chatter vibration", International Journal of Machine Tools and Manufacturing 35 (7) pp.951-962, 1995