

หัวข้อคุณสมบัติ	การออกแบบตัวควบคุมแบบโรบัสต์ที่รวมแบบจำลองของการกักและโครงสร้างยืดหยุ่นเพื่อยับยั้งการเกิดปรากฏการณ์แซทเทอ์ในการขึ้นรูปชิ้นงาน	
ผู้เขียน	นายประพล รัตนไทร	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	
คณะกรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร. ระคม พงษ์วุฒิธรรม	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
	รศ.ดร. Matthew O. T. Cole	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
	รศ.ดร. ชีระพงษ์ ว่องรัตนไพศาล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

ความไม่มีเสถียรภาพของการสั่นในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน อาทิเช่น การกักและการกักโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า แซทเทอ์ (chatter) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นเนื่องจากการกระตุ้นตัวเองในโครงสร้างของเครื่องจักร และ/หรือ โครงสร้างของชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่น การเกิดขึ้นของแซทเทอ์เป็นปัจจัยที่จำกัดอัตราการตัดเฉือนชิ้นงาน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบแอ็กทิฟเพื่อยับยั้งความไม่มีเสถียรภาพของการสั่นในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน ที่มีแรงควบคุมกระทำต่อโครงสร้างของเครื่องจักร โดยตรงและมีชุดอุปกรณ์วัดการสั่นที่สามารถส่งสัญญาณให้ตัวควบคุมป้อนกลับแบบเวลาทันที (real-time)

เพื่อที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของการกักขึ้นรูปชิ้นงาน พลศาสตร์ของการกักขึ้นรูปชิ้นงานถูกพิจารณาให้เป็นระบบหน่วงเวลา (time-delay system) ในวิทยานิพนธ์นี้วิธีการควบคุมแบบโรบัสต์ (robust control approach) บนพื้นฐานของฟังก์ชันนัลของเลอปูนอฟ-คราซอฟสกี (Lyapunov-Krasovskii functional) สำหรับระบบหน่วงเวลาได้ถูกพัฒนาขึ้น รวมถึงการสร้างเกณฑ์กำหนดของเสถียรภาพแบบโรบัสต์ (robust stability criteria) จากความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้ของแบบจำลองที่เกิดขึ้นกับพลศาสตร์ของโครงสร้างในย่านความถี่สูง ความไม่แน่นอนของโครงสร้างจะถูกพิจารณาในโดเมนความถี่และถูกแสดงโดยใช้พลศาสตร์แต่งเติม (augmented dynamics) เกณฑ์กำหนดนี้นำไปสู่โจทย์ปัญหาการสังเคราะห์ตัวควบคุมที่อยู่ในรูปแบบเงื่อนไขบังคับของอสมการเมทริกซ์ (matrix inequality constraint) ภายใต้การแปลงตัวแปรที่เหมาะสมโจทย์ปัญหานี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของอสมการเมทริกซ์แบบเชิงเส้น (Linear Matrix Inequality) ที่สามารถถูกแก้ได้โดยใช้

วิธีการเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบคอนเวกซ์ (convex optimization) โจทย์ปัญหาการออกแบบตัวควบคุมในหลายรูปแบบได้ถูกนำมาร่วมพิจารณาร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับแบบต่าง ๆ ได้แก่ การป้อนกลับแบบฟูลสเตต (full state feedback) การป้อนกลับแบบสเตตหน่วง (delay state feedback) การป้อนกลับแบบเอาต์พุต (output feedback) และการป้อนกลับแบบเอาต์พุตที่ใช้ตัวแปรหน่วง (output feedback with delay feedback variables)

เพื่อที่จะประเมินผลของตัวควบคุมที่ถูกออกแบบ ระบบทดสอบแบบฮาร์ดแวร์อินลูป (hardware-in-the-loop) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น โครงสร้างของระบบทดสอบได้ถูกออกแบบเพื่อให้เกิดการสั่นพ้อง (resonance) ที่สองความถี่และมีพลศาสตร์เหมือนกับสปินเดิลกัดชิ้นงาน (milling spindle) ที่มีตัวรองรับเป็นเบริ่งแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแอ็กทีฟ (active magnetic bearing) และมีดอกกัดความยืดหยุ่นสูง ระบบมีตัวกระตุ้นสองตัว ตัวกระตุ้นตัวแรกเป็นตัวกระตุ้นเพื่อจำลองแรงกัดชิ้นงานที่กระทำกับดอกกัดซึ่งจะถูกคำนวณในเวลาทันที (real-time) ตามแบบจำลองของแรงกัดชิ้นงานในระบบฮาร์ดแวร์ ตัวกระตุ้นที่สองใช้เพื่อสร้างแรงควบคุมการสั่นเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพระยะกระจัดในการเคลื่อนที่ของโครงสร้างสามารถวัดได้โดยเซนเซอร์ แบบไม่มีการสัมผัส (non-contact) ชนิดกระแสไหลวน (eddy current) จำนวนสองตัวที่วางใกล้กับตัวกระตุ้นทั้งสอง นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อวัดการสั่นโดยใช้สเตรนเกจ (strain gauge) ติดเข้าไปกับโครงสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างของระบบทดสอบนี้ได้มาจาก (1) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) และ (2) ระเบียบวิธีระบุระบบ (system identification method) ความเหมาะสมในการเลือกใช้แบบจำลองทั้งสองแบบเพื่อออกแบบตัวควบคุมได้ถูกประเมินโดยการเปรียบเทียบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดได้

การประเมินและการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมแบบต่างๆครอบคลุมประเด็นสำคัญและเนื้อหา ดังนี้

1. คุณสมบัติของเสถียรภาพโรบัสต์ภายใต้ความผิดพลาดของแบบจำลอง

ตัวควบคุมทุกตัวสามารถถูกออกแบบให้มีระดับความทนทาน (robustness) ต่อความผิดพลาดของแบบจำลองได้ในระดับเดียวกันโดยใช้ขอบเขตที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของฟังก์ชันความไวเพิ่มเติม (complementary sensitivity function) ตัวเดียวกันในการสังเคราะห์ตัวควบคุม อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแต่ละแบบมีขีดจำกัดของเสถียรภาพในการกีดกันมาก ซึ่งสามารถเห็นได้จากข้อมูลการวัดขอบเขตของเสถียรภาพจากการทดสอบ

2. แผนภาพกลีบเสถียรภาพ (stability lobe diagram)

แผนภาพกลีบเสถียรภาพแสดงให้เห็นถึงขอบเขตการทำงานที่มีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพระหว่างความลึกในการกัดชิ้นงานกับความเร็วของสปินเดิล แผนภาพกลีบเสถียรภาพได้มาจากการวัดขีดจำกัดของเสถียรภาพโดยตรงจากระบบทดสอบที่ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ภายใต้การจำลองแรงในการกัดชิ้นงาน ข้อมูลจากแผนภาพแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันนำของเลอปูนอฟ-คราซอฟสกี (ภายใต้แบบจำลองระบบหนึ่งเวลา) เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบภายใต้วิธีการควบคุมแบบโรบัสต์แบบมาตรฐานที่ไม่ได้พิจารณาผลกระทบของการหน่วงเวลา ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือตัวควบคุมแบบสถานะป้อนกลับ (state feedback controller) ที่ใช้การป้อนกลับของสถานะปัจจุบัน (current state) และสถานะหน่วง (delayed state)

3. การจำลองการกัดชิ้นงาน (cutting emulations)

การจำลองการกัดชิ้นงานผ่านการควบคุมตัวกระตุ้น โดยตรงที่ถูกคำนวณจากแบบจำลองของแรงกัดชิ้นงานมาตรฐานทำให้สามารถวัดพฤติกรรมตอบสนองชั่วคราว (transient response) ในการทดสอบความลึกในการกัดชิ้นงานจะถูกเพิ่มขึ้นเป็นขั้นๆอย่างต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบระดับของการสั่นของโครงสร้างเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยระดับของการสั่นนี้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อการกัดมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตาม แรงที่ใช้ในการควบคุมการสั่นของตัวควบคุมแบบสัญญาณส่งออกป้อนกลับ (output feedback controller) มีค่าต่ำกว่าตัวควบคุมแบบสถานะป้อนกลับ (state feedback controller) มาก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ดีเนื่องจากจากการใช้ตัวชดเชยพลศาสตร์ โดยสามารถยืนยันได้จากระดับของสัญญาณรบกวนที่เหลือในตอนที่ไม่มีการกัดชิ้นงาน

สุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอโดยใช้แบบจำลองระบบหนึ่งเวลาสามารถใช้ควบคุมปัญหาแซทเทอรัได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้กรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการกัดชิ้นงานจริง ซึ่งสามารถนำไปใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานแบบอื่น ๆ ที่ใช้การควบคุมแบบแอ็กทิฟเพื่อยับยั้งการสั่นเนื่องจากแรงที่เกิดจากการกระตุ้นตัวเองผ่านการป้อนกลับของสัญญาณการสั่นของโครงสร้าง

Dissertation Title	Robust Controller Design for Chatter Suppression in Machining Using Integrated Cutting and Flexible Structure Models	
Author	Mr. Prapon Ruttanatri	
Degree	Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)	
Advisory Committee	Assoc. Prof. Dr. Radom Pongvuthithum	Advisor
	Assoc. Prof. Dr. Matthew O. T. Cole	Co-advisor
	Assoc. Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan	Co-advisor

ABSTRACT

Vibrational instability in machining processes such as turning and milling, is commonly referred to as *chatter*. This involves self-excitation of flexible structure vibration within the machine and/or the workpiece. The occurrence of chatter places practical limits on material removal rate. This thesis presents an active control approach for suppression of vibrational instability in machining processes. The promise of the approach is that active control force can be applied to the machine structure and that a set of vibration measurement are available for real-time control feedback.

To analyse stability, the cutting dynamics is treated as a time-delay system. In this thesis, a robust control approach is developing based on Lypunov-Krasovskii functionals for time-delay systems. Robust stability criteria are formulated where model error associated with high frequency structural dynamics is accounted for by a frequency domain uncertainty representation via augmented dynamics. This leads to a synthesis problem for feedback controllers that can be formulated in terms of matrix inequality constraints. By using a transformation of optimization variables this problem is converted to a Linear Matrix Inequality form that can be solved by numerical routines for convex optimization. Various versions of the controller design problem are considered encompassing different feedback control laws, including full state feedback, delayed state feedback, dynamic output feedback and dynamic output feedback with delayed feedback variables.

To evaluate the proposed controller designs, a hardware-in-the-loop test facility was developed. The structure of the test system was designed to exhibit two main resonances and is dynamically similar to an AMB-supported milling spindle that exhibits significant cutting tool flexibility. The system has two actuators. One actuator is an auxiliary actuator used to apply the simulated cutting force that is computed in real-time using a cutting force model implemented within the control hardware. The other actuator is used to apply stabilizing vibration control forces. Displacement of the structure can be measured by non-contact (eddy current) sensors positioned close to the actuators. Additional vibration measurements were obtained using strain gauges attached to the structure. Mathematical models of the test rig structure were obtained by (1) using finite element methods (FEM) and (2) using system identification methods. The suitability of these models for controller design was assessed by comparison with measured frequency response data to quantify errors.

The assessment and comparison of the controller designs covered the following main aspects and findings:

1. *Robust stability properties under model error*

Similar levels of robustness to model error could be achieved for all the designed controllers by applying the same frequency dependent bound on the complementary sensitivity function within the controller synthesis. However, the controllers showed significant differences in terms of stability limits for cutting operation, as evaluated from measured stability boundaries.

2. *Stability lobe diagrams*

Stability lobe diagrams show stable and unstable operating zones in terms of depth-of-cut versus spindle speed. These were obtained for the test system with the various controllers by direct measurement of stability limits under cutting force emulation. These results showed significant improvement could be obtained by LKF controller synthesis (based on time delay-system models) in comparison with designs based on standard robust control methods that do not explicitly account for time-delay effects. The best improvement in stability was obtained with a state feedback control involving with both current and time-delayed feedback components.

3. *Cutting emulations*

The emulation of cutting through direct implementation of a standard cutting force model allowed transient response behaviours to be measured. Tests involving sequential increases in depth-of-cut allowed comparison of vibration levels. The controllers showed similar levels of vibration during stable cutting. However, for the dynamic output feedback controllers, the peak control forces were significantly lower compared with the state feedback controllers. This is attributed to better noise attenuation properties achievable with dynamic compensators. This was confirmed by assessment of residual noise levels without cutting.

The proposed controller design approach based on time-delay system models has been shown to be effective for the problem of chatter control, based on the considered case-study involving emulation of an actuated milling spindle. As a general approach, the method can be applied to other machining processes where active control elements can be used to suppress regenerative cutting force vibration through feedback of measured structural vibration.