Thesis Title Active Control of a Multi Axis Vibration Isolation System with Unknown Dynamics and Subject to Unstructured Uncertainties

Author Mr. Wichaphon Fakkaew

Degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Assoc. Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan	Advisor
Assoc. Prof. Dr. Matthew O.T. Cole	Co-advisor
Assoc. Prof. Dr. Radom Pongvuthithum	Co-advisor

ABSTRACT

This thesis proposes novel control strategies for a multi-axis active vibration isolation system (AVIS) with unknown payload mass and subject to unstructured dynamics. The results are applicable to the design of controllers for a general purpose bench-top AVIS. The overall objective of the work is to study ways to control an AVIS in order to isolate vibration to an acceptable level without destabilizing the closed-loop system or generating excessive drift. This should be achieved for a range of payloads with nonspecific shape and mass. The problem is considered as a controller design for a linear time invariant (LTI) system subject to both constant real parameter uncertainty due to unknown payload and non-parametric uncertainty due to unstructured dynamics. The uncertainties are introduced into the system by using a linear fractional representation (LFR). The performance of the multi-axis AVIS is defined in terms of effective transmissibility which is the maximum singular value of the transmissibility matrix. The overall isolation performance index is defined as the $\mathcal{H}_g$ norm of the transmissibility matrix. In addition, the worst effective transmissibility is considered in

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

terms of the $\mathcal{H}_\infty$ norm of the transmissibility matrix. A key aspect of this work is the development of model-based conditions for robust stability and performance that are less conservative than those used previously. This is achieved by adapting the quadratic Lyapunov function that incorperates the kinetic energy of the uncertain payload mass. Quadratic constraints obtained from the positive semi-definite property of the uncertain mass, we also incorporated in the conditions. The optimal output feedback controller synthesis method based on robust stability and performance criteria has been developed. The resulting controller existence conditions are expressed as BLMIs, for which the solutions can be obtained by iteration schemes. A modal sky-hook-damper controller is used to initialize the iteration. Simulations show that the proposed synthesis technique results in controllers that perform well under realistic conditions. An AVIS lab-prototype has been constructed for experimental validation. The experiments show that the trend of actual performance agrees well with the simulation results. It was observed that the critical point for instability due to non-parametric uncertainty is at the no-load condition and the worst effective transmissibility occurs at the maximum allowable mass. And so the experimental tests focus on these two conditions. The experiments have been used to investigate the feasibility of the control approach, and to identify difficulties that might be encountered in practice.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การควบคุมระบบแยกการสั่นสะเทือนหลายแกนแบบแอคทีฟที่ไม่ทราบพลศาสตร์และมีความไม่แน่นอนเชิงไม่เป็นโครงสร้าง

ผู้เขียน นายวิชญ์พล ฟักแก้ว

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
รศ. ดร. แมทธิว โคล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
รศ. ดร. ระดม พงษ์วุฒิธรรม	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนากลยุทธ์การควบคุมสำหรับแท่นแยกการสั่นสะเทือนหลายแกนแบบแอคทีฟซึ่งไม่ทราบภาระโหลดและอยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนเชิงไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructure uncertainty) ผลลัพธ์นำไปประยุกต์ใช้ได้กับการออกแบบแท่นแยกการสั่นสะเทือนสำหรับการใช้งานในหลากหลายวัตถุประสงค์ วัตถุประสงค์โดยรวมของวิทยานิพนธ์นี้ คือการศึกษาแนวทางการควบคุมแท่นแยกการสั่นสะเทือนแบบแอคทีฟ เพื่อลดการสั่นให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยไม่ทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพและไม่ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวไปมาอย่างช้า ๆ มากเกิน (Excessive drift) สำหรับอุปกรณ์ที่มีมวลและรูปร่างอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดปัญหานี้ถูกพิจารณาว่าเป็นปัญหาการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่ขึ้นกับเวลาและอยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนเชิงตัวแปร (parametric uncertainty) ที่ไม่ขึ้นกับเวลาเนื่องจากภาระโหลดที่ไม่ทราบและความไม่แน่นอนที่ไม่เกี่ยวกับตัวแปร (non-parametric uncertainty) เนื่องจากความผิดพลาดของแบบจำลองความไม่แน่นอนถูกรวมเข้ากับระบบในรูปของวงลูปแบบป้อนกลับ (linear fractional representation (LFR)) สมรรถนะของระบบแยกการสั่นสะเทือนหลายแกนแบบแอคทีฟถูกนิยามในรูปของการส่งผ่านประสิทธิผล (effective transmissibility) ซึ่งคือค่ามากที่สุดของค่าเอกฐาน(singular value) ของเมตริกซ์ส่งผ่าน (transmissibility matrix) ส่วนสมรรถนะโดยรวมถูกนิยามจาก เอชจี นอร์ม ($\mathcal{H}_g$ - norm) ของเมตริกซ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ส่งผ่าน นอกจากนี้ค่าการส่งผ่านประสิทธิผลที่แย่ที่สุดสามารถหาได้จากเอชอินฟินิตีนอร์ม ($\mathcal{H}_\infty$ - norm) ของเมตริกซ์ส่งผ่าน แง่มุมสำคัญของวิทยานิพนธ์คือการพัฒนาเกณฑ์ที่อิงกับแบบจำลองสำหรับประเมินเสถียรภาพทนทาน (robust stability) และ สมรรถนะทนทาน (robust performance) ที่ให้ผลการประเมินที่อนุรักษ์นิยมน้อย ซึ่งสามารถหาได้จากฟังก์ชันของเลียปูนอฟ (Lyapunov function) ที่อยู่ในรูปของผลรวมของฟังก์ชันกำลังสองกับพลังงานจลน์ของภาระโหลดที่ไม่ทราบโดยใช้ร่วมกับเงื่อนไขบังคับกำลังสอง (Quadratic constraints) ซึ่งหาได้จากคุณสมบัติความเป็นบวกแน่นอน (positive definite) ของภาระโหลดที่ไม่ทราบค่าการสังเคราะห์ตัวควบคุมโดยฐานของเกณฑ์เสถียรภาพทนทานและ เกณฑ์สมรรถนะทนทานได้ถูกพัฒนาขึ้น เงื่อนไขของการมีอยู่ของตัวควบคุม (controller existence conditions) ถูกแสดงในรูปของอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นคู่ (Bi-Linear matrix inequality (BLMI)) การหาคำตอบของอสมการสามารถหาได้จากแบบแผนของการวนซ้ำ (iteration schemes) ตัวควบคุมแบบตัวหน่วงแบบโมดอลสกายฮุค (modal sky-hook-damper) ถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการทำวนซ้ำเทคนิคการจำลองสถานการณ์ (simulations) แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการสังเคราะห์ตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ผลลัพธ์ของตัวควบคุมที่ใช้งานได้ดีภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนดให้เหมือนจริงแท่นแยกการสั่นหลายแกนแบบแอคทีฟต้นแบบ ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ยืนยันความถูกต้องเชิงการทดลอง (experimental validation) ผลการทดลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลจากการจำลองสถานการณ์ จากการสังเกตพบว่าภาวะเสี่ยงที่จะสูญเสียเสถียรภาพจากความไม่แน่นอนที่ไม่เกี่ยวกับตัวแปรคือภาวะที่ระบบไม่ได้บรรทุกภาระโหลด และภาวะที่การส่งผ่านแย่ที่สุดเกิดขึ้นที่ภาระโหลดมากที่สุด ดังนั้นในการทดลองจึงได้ให้ความสนใจในสองเงื่อนไขนี้ การทดลองยังถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการควบคุมที่สร้างขึ้นและใช้ค้นหาความยากลำบากในการใช้งานเมื่อนำไปใช้กับระบบจริง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved