

การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสถานะที่ขอบสำหรับงานตีโมเซนโค

นายธีรเดช พิญญุพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาบริหารและพัฒนาการ ภาควิชาบริหารและพัฒนาการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BOUNDARY STATE FEEDBACK CONTROLLER DESIGN FOR TIMOSHENKO BEAMS

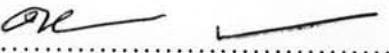
Mr. Teradach Pinyapong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2006
Copyright of Chulalongkorn University

491804

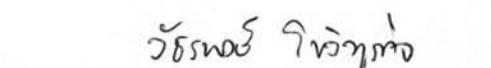
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบด้วยความคุณป้อนกลับสถานะที่ขอบสำหรับคนต่อเนื่อง
โดย นายธีรเดช พิญญาพงษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ไขวจูรกิจ

คณะกรรมการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

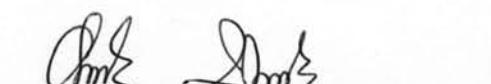

..... คณะกรรมการศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาเวนัยคิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุchin อรุณสวัสดิ์วงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ไขวจูรกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.สุรี ผู้เจริญชนะชัย)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ ชนวีระยุทธ)

ธีรเดช พิญญาพงษ์: การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสถานะที่ขอบสำหรับคานตี莫เซนโคน (BOUNDARY STATE FEEDBACK CONTROLLER DESIGN FOR TIMOSHENKO BEAMS),
อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. วัชรพงษ์ ไขวทุรกิจ, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ดร.
สุรี ผู้เจริญชนะชัย, 57 หน้า.

ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบตัวควบคุมที่ขอบเพื่อทำให้มีเสถียรภาพสำหรับคานตี莫เซนโคนที่มีการหน่วงเคลวิน-ฟอร์จในปริมาณน้อยภายใต้สมมติฐานว่าเป็นคานแบบเรียวยาว เราใช้ทฤษฎีการรับกรุณากลางเพื่อลดรูปแบบจำลองและทำให้เป็นระบบป้อนกลับโดยแท้ด้วยการควบคุมมุมหมุนหรือโมเมนต์ที่ปลายคาน ด้วยเหตุนี้เราสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคก้าวถอยหลังในการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การขับเร้าที่ฐานของคานเท่านั้น ส่วนอีกด้านหนึ่งติดตั้งแบบยึดหรือหมุด ตัวควบคุมต้องการเพียงผลเฉลยของสมการเคอร์เนลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่ออย่างเพอร์โบลิกเชิงเส้นบนโดเมนสามเหลี่ยมด้วยการใช้วิธีการประมาณสืบเนื่องหรือวิธีเชิงตัวเลข จากการป้อนกลับที่ขอบแบบก้าวถอยหลังนี้ เราจะได้ระบบงานปิดที่มีเสถียรภาพแบบเลขชี้กำลัง สุดท้ายเราจะใช้วิธีการวีนเกิด I_{MN} ของชาเกียนในการจำลองผลลัพธ์ของคาน พลวัตของคานลดรูป และผลตอบสนองของระบบงานปิด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็ว

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2549	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

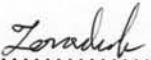
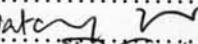
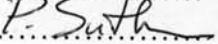
##4870328221: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : BOUNDARY CONTROL, TIMOSHENKO BEAM, BACKSTEPPING CONTROL,
ZAKIAN I_{MN} RECURSION

TERADACH PINYAPONG: BOUNDARY STATE FEEDBACK CONTROLLER DESIGN FOR
TIMOSHENKO BEAMS THESIS ADVISOR: WATCHARAPONG KHOVIDHUNGIJ, Ph.D.,
THESIS CO-ADVISOR: SUTHEE PHOOJARUENCHANACHAI, Ph.D., 57 pp.

In this thesis, we present boundary controller design to stabilize Timoshenko beams. The assumption is that the beam is slender and must have a small amount of Kelvin-Voigt damping (KVD). The singular perturbation theory is used for model reduction and the strict-feedback system is achieved by controlling rotational angle or moment at the end. Consequently, we can apply backstepping technique to design a controller using actuation only at the beam base and the opposite end is fixed or pinned. The controller requires the solution of a linear hyperbolic PDE on a triangular domain, which is obtained by applying successive approximation or numerical method. The closed-loop system with our backstepping boundary feedback is exponentially stable. Finally, we use the Zakian I_{MN} recursion to simulate the beam dynamics, the reduced beam dynamics and the closed-loop systems, which exhibit rapid convergence to the steady state.

Department Electrical Engineering
Field of study Electrical Engineering
Academic year 2006

Student's signature 
Advisor's signature 
Co-advisor's signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. วัชรพงษ์ ไขวทุรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสผู้วิจัยเข้ามาเป็นนิสิตในที่ปรึกษา ให้ความรู้ในเรื่อง การควบคุมระบบมิติอนันต์ ให้คำแนะนำในการทำงานและการเรียนด้วยเจตนาดีเสมอมา และดร. สุธี ผู้เชี่ยวชาญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความเอาใจใส่ กำลังใจ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอด เวลาตั้งแต่ผู้วิจัยศึกษาในระดับปริญญาตรีจึงครรชขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี่

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชน อรุณสวัสดิ์วงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาทางด้านการคำนวณเชิงตัวเลข ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ ชันวะระยุทธ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ พื้นฐานทางด้านสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย และสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวรรณควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ขอกราบขอขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับความรัก ความห่วงใย กำลังใจ และการดูแลเอาใจใส่ที่ดีเสมอมา ขอบคุณความช่วยเหลือและมิตรภาพจากเพื่อนพ้องน้องพี่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมทุกคน

วิทยานิพนธ์นี้คงสำเร็จลงไม่ได้ถ้าขาดทุนการศึกษาและเงินอุดหนุนงานวิจัย จากโครงการทุนสถาบัน บัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology, TGIST) และพี่ๆ ผู้ดำเนินงาน TGIST ทุกท่าน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี่

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	๔
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๕
กิตติกรรมประกาศ.....	๖
สารบัญ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๘
สารบัญภาพ.....	๙
คำอธิบายลักษณ์.....	๑๐
1 บทนำ.....	๑
1.1 ความเป็นมา	๑
1.1.1 ค่านิสัยโมเซนโค	๑
1.1.2 การประยุกต์ใช้งานสำหรับค่านิสัยโมเซนโค	๓
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	๔
1.2.1 การควบคุมเพื่อทำให้เสถียร	๔
1.2.2 การออกแบบด้วยเทคนิคการแปลงก้าวถอยหลัง	๔
1.3 วัตถุประสงค์	๕
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	๕
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	๕
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	๖
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	๖
2 แบบจำลองลดรูปของค่านิสัยโมเซนโค	๗
2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการรับทราบเอกสาร	๗
2.1.1 กรณีค่านิสัยอิสระ	๘
2.1.2 กรณีค่านิสัยยึด	๙
2.1.3 กรณีค่านิสัยหมุด	๑๑
2.2 สรุป	๑๒

บทที่	หน้า
3 การออกแบบตัวควบคุม.....	13
3.1 สมการเครื่องเนล	13
3.1.1 กรณีคานปลายอิสระ	14
3.1.2 กรณีคานปลายยึดหรือปลายหมุน	15
3.2 ผลเฉลยของสมการเครื่องเนล	16
3.2.1 การประมาณสืบเนื่อง	16
3.2.2 การคำนวณเชิงตัวเลข	19
3.3 สรุป	22
4 การจำลองแบบด้วยวิธีเชิงตัวเลข.....	23
4.1 ทฤษฎีการคำนวณเชิงตัวเลข	23
4.1.1 สมการไ酉เพอร์โอบลิก	23
4.1.2 การเวียนเกิด I_{MN} ของชาเกียน	24
4.2 การจำลองแบบคานตีโมเซนໂດ	25
4.3 การจำลองแบบคานตีโมเซนໂคลดรูป	28
4.4 การจำลองแบบระบบวงวนปิด	30
4.5 สรุป	34
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	39
5.1 บทสรุป	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
รายการอ้างอิง	40
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก ชุดคำสั่งในการคำนวณ	44
ก.1 การหาผลเฉลยของสมการเครื่องเนลด้วยวิธีการประมาณสืบเนื่อง	44
ก.2 การหาผลเฉลยของสมการเครื่องเนลด้วยวิธีเชิงตัวเลข	45
ก.3 การจำลองแบบพลวัตของคานตีโมเซนໂคลปลายยึดทึ้งสองข้าง	46
ก.4 การจำลองแบบพลวัตของคานตีโมเซนໂคลดรูป	48
ก.5 การจำลองแบบผลตอบสนองของระบบวงวนปิด	49
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	50

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ค่า $\max u(1, t) $, $\max \ u(\cdot, t)\ _2$ และ t_s สี่เหลี่ยม $d = 0.01$	33
4.2 ค่า $\max u(1, t) $, $\max \ u(\cdot, t)\ _2$ และ t_s สี่เหลี่ยม $d = 0.1$	33

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ค่าน์โนเซนโคน	2
3.1 ค่าลักษณะเฉพาะของสมการลินีที่มีเส้นยิ่งภาพเมื่อ $\epsilon = 1, a = 1, d = 0.1$ และ $c = 0$	14
3.2 เปรียบเทียบการประมาณเครอร์เนลตั้งแต่ผลรวมของพจน์ที่ 0 ถึง 4 ที่ปลาย $x = 1$	19
3.3 พจน์ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งและลำดับการคำนวณ	20
3.4 ผลเฉลย $k(x, y)$ ของสมการเครอร์เนล (3.39)-(3.41) และค่าที่ปลาย $x = 1$	21
3.5 ผลเฉลย $k(x, y)$ ของสมการเครอร์เนล (3.39)-(3.41) ที่ปลาย $x = 1$ ที่ค่า c ต่าง ๆ กัน	21
3.6 เปรียบเทียบการประมาณค่าผลเฉลยของสมการเครอร์เนลและค่าผลต่างของทั้งสองวิธี	22
4.1 การกระจัดตามขวางสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ	27
4.2 มุ่มมุนสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ	35
4.3 สัญญาณควบคุมมุ่มมุนหรือโมเมนต์เมื่อ d เท่ากับ 0.01, 0.1 และ 1	35
4.4 การกระจัดตามขวางของคานลดรูปสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ	36
4.5 เปรียบเทียบនอร์มสองของการกระจัดตามขวางของคานสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ	36
4.6 สัญญาณควบคุมมุ่มมุนหรือโมเมนต์เมื่อ d เท่ากับ 0.01 และ 0.1	37
4.7 สัญญาณควบคุมการกระจัดที่ขอน เมื่อ $d = 0.01$ (ซ้าย) $d = 0.1$ (ขวา)	37
4.8 การกระจัดตามขวางสำหรับ $c = 10$ เมื่อ $d = 0.01$ (ซ้าย) $d = 0.1$ (ขวา)	37
4.9 สัญญาณควบคุมที่ขอนและนอร์มสองของการกระจัดตามขวาง สำหรับค่า $d = 0.01$ (ซ้าย) และ $d = 0.1$ (ขวา)	38

คำอธิบายสัญลักษณ์

$u(x, t)$	การกระจายตามขวางที่ตำแหน่ง x และเวลา t
$\varphi(x, t)$	มุมหมุนที่ตำแหน่ง x และเวลา t
$u_x(x, t)$	อนุพันธ์ของการกระจายตามขวางที่ตำแหน่ง x และเวลา t เทียบกับตำแหน่ง x
∂_t	ตัวดำเนินการอนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลา t
$\mathcal{L}\{\cdot\}$	ผลการแปลงลาปลาซ
$\operatorname{Re}\{z\}$	ส่วนจริงของจำนวนเชิงซ้อน z
$\operatorname{Im}\{z\}$	ส่วนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน z
$k_n(x, y)$	พจน์ที่ n ของอนุกรมจากการประมาณสืบเนื่องของสมการเคอร์แนล
$k^{i,j}$	$k((i-1)h, (j-1)h)$
u^i	$u(ih, t)$
\mathbf{R}	เซตของจำนวนจริง
\mathbf{R}^m	เซตของเวกเตอร์ค่าจริงขนาด m
$\mathbf{R}^{m \times n}$	เซตของเมทริกซ์ค่าจริงขนาด $m \times n$
I_m	เมทริกซ์เอกลักษณ์ขนาด $m \times m$
X^T	เมทริกซ์สลับเปลี่ยนของเมทริกซ์ X
X^{-1}	เมทริกซ์ผกผันของเมทริกซ์ X
$\operatorname{tridiag}(x_1, x_2, x_3)_m$	เมทริกซ์สามแหนวดียงขนาด $m \times m$ นั้นคือ

$$\begin{bmatrix} x_2 & x_3 & 0 & 0 \\ x_1 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & x_3 \\ 0 & 0 & x_1 & x_2 \end{bmatrix}$$

$\|u(\cdot, t)\|_2$

นอร์มสองของการกระจายตามขวาง เมื่อคิดเทียบกับตัวแปร x