การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสถานะที่ขอบสำหรับคานตีโมเชนโค

นายธีรเดช พิญญพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
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	การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสถานะที่ขอบสำหรับคานตีโมเชนโค
โดย	นายธีรเดช พิญญพงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ โชวิฑูรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ โชวิฑูรกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย)

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

ธีรเดช พิญญพงษ์: การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสถานะที่ขอบสำหรับคานตีโมเชนโค (BOUNDARY STATE FEEDBACK CONTROLLER DESIGN FOR TIMOSHENKO BEAMS), อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. วัชรพงษ์ โชวิฑูรกิจ, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย, 57 หน้า.

ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบตัวควบคุมที่ขอบเพื่อทำให้มีเสถียรภาพสำหรับคานตีโมเชนโคที่มีการหน่วงเคลวิน-ฟอจ์ทในปริมาณน้อยภายใต้สมมติฐานว่าเป็นคานแบบเรียวยาว เราใช้ทฤษฎีการรบกวนเอกฐานเพื่อลดรูปแบบจำลองและทำให้เป็นระบบป้อนกลับโดยแท้ด้วยการควบคุมมุมหมุนหรือโมเมนต์ที่ปลายคาน ด้วยเหตุนี้เราสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคก้าวถอยหลังในการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การขับเร้าที่ฐานของคานเท่านั้น ส่วนอีกด้านหนึ่งติดตั้งแบบยึดหรือหมุด ตัวควบคุมต้องการเพียงผลเฉลยของสมการเคอร์เนลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไฮเพอร์โบลิกเชิงเส้นบนโดเมนสามเหลี่ยมด้วยการใช้วิธีการประมาณสืบเนื่องหรือวิธีเชิงตัวเลข จากการป้อนกลับที่ขอบแบบก้าวถอยหลังนี้ เราจะได้ระบบวงวนปิดที่มีเสถียรภาพแบบเลขชี้กำลัง สุดท้ายเราจะใช้วิธีการเวียนเกิด I_{MN} ของซาเกียนในการจำลองพลวัตของคาน พลวัตของคานลดรูป และผลตอบสนองของระบบวงวนปิด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็ว

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 โชวิฑูรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสผู้วิจัยเข้ามาเป็นนิสิตในที่ปรึกษา ให้ความรู้ในเรื่องการควบคุมระบบมิติอนันต์ ให้คำแนะนำในการทำงานและการเรียนด้วยเจตนาดีเสมอมา และดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความเอาใจใส่ กำลังใจ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอดเวลาตั้งแต่ผู้วิจัยศึกษาในระดับปริญญาตรีจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาทางด้านการคำนวณเชิงตัวเลข ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ ชนวีระยุทธ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้พื้นฐานทางด้านสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย และสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับความรัก ความห่วงใย กำลังใจ และการดูแลเอาใจใส่ที่ดีเสมอมา ขอบคุณความช่วยเหลือและมิตรภาพจากเพื่อนพ้องน้องพี่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมทุกคน

วิทยานิพนธ์นี้คงสำเร็จลงไม่ได้ถ้าขาดทุนการศึกษาและเงินอุดหนุนงานวิจัย จากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology, TGIST) และพี่ๆ ผู้ดำเนินงาน TGIST ทุกท่าน จึงขอบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ฏ

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา 1

1.1.1 คานตีโมเชนโค 1

1.1.2 การประยุกต์ใช้งานสำหรับคานตีโมเชนโค 3

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา 4

1.2.1 การควบคุมเพื่อทำให้เสถียร 4

1.2.2 การออกแบบด้วยเทคนิคการแปลงก้าวถอยหลัง 4

1.3 วัตถุประสงค์ 5

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 5

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน 5

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ 6

2 แบบจำลองลดรูปของคานตีโมเชนโค 7

2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการรบกวนเอกฐาน 7

2.1.1 กรณีคานปลายอิสระ 8

2.1.2 กรณีคานปลายยึด 9

2.1.3 กรณีคานปลายหมุด 11

2.2 สรุป 12

บทที่ หน้า

3 การออกแบบตัวควบคุม **13**
3.1 สมการเคอร์เนล 13
3.1.1 กรณีคานปลายอิสระ 14
3.1.2 กรณีคานปลายยึดหรือปลายหมุด 15
3.2 ผลเฉลยของสมการเคอร์เนล 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 สมการไฮเพอร์โบลิก 23
4.1.2 การเวียนเกิด I_{MN} ของซาเกียน 24
4.2 การจำลองแบบคานตีโมเชนโค 25
4.3 การจำลองแบบคานตีโมเชนโคลดรูป 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 การหาผลเฉลยของสมการเคอร์เนลด้วยวิธีการประมาณสืบเนื่อง 44
ก.2 การหาผลเฉลยของสมการเคอร์เนลด้วยวิธีเชิงตัวเลข 45
ก.3 การจำลองแบบพลวัตของคานตีโมเชนโคปลายยึดทั้งสองข้าง 46
ก.4 การจำลองแบบพลวัตของคานตีโมเชนโคลดรูป 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 สำหรับ $d = 0.01$ 33

4.2 ค่า max $|u(1,t)|$, max $\|u(\cdot,t)\|_2$ และ t_s สำหรับ $d = 0.1$ 33

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

1.1 คานตีโมเชนโค 2

3.1 ค่าลักษณะเฉพาะของสมการคลื่นที่มีเสถียรภาพเมื่อ $\epsilon = 1$, $a = 1$, $d = 0.1$ และ $c = 0$. ... 14
3.2 เปรียบเทียบการประมาณเคอร์เนลตั้งแต่ผลรวมของพจน์ที่ 0 ถึง 4 ที่ปลาย $x = 1$ 19
3.3 พจน์ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งและลำดับการคำนวณ 20
3.4 ผลเฉลย $k(x, y)$ ของสมการเคอร์เนล (3.39)-(3.41) และค่าที่ปลาย $x = 1$..... 21
3.5 ผลเฉลย $k(x, y)$ ของสมการเคอร์เนล (3.39)-(3.41) ที่ปลาย $x = 1$ ที่ค่า c ต่าง ๆ กัน 21
3.6 เปรียบเทียบการประมาณค่าผลเฉลยของสมการเคอร์เนลและค่าผลต่างของทั้งสองวิธี 22

4.1 การกระจัดตามขวางสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ 27
4.2 มุมหมุนสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ 35
4.3 สัญญาณควบคุมมุมหมุนหรือโมเมนต์เมื่อ 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 เปรียบเทียบนอร์มสองของการกระจัดตามขวางของคานสำหรับค่า d เท่ากับ 0, 0.01, 0.1 และ 1 ตามลำดับ 36
4.6 สัญญาณควบคุมมุมหมุนหรือโมเมนต์เมื่อ d เท่ากับ 0.01 และ 0.1 37
4.7 สัญญาณควบคุมการกระจัดที่ขอบ 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 สัญญาณควบคุมที่ขอบและนอร์มสองของการกระจัดตามขวาง สำหรับค่า $d = 0.01$ (ซ้าย) และ $d = 0.1$ (ขวา) 38

คำอธิบายสัญลักษณ์

$u(x,t)$	การกระจัดตามขวางที่ตำแหน่ง x และเวลา t
$\varphi(x,t)$	มุมหมุนที่ตำแหน่ง x และเวลา t
$u_x(x,t)$	อนุพันธ์ของการกระจัดตามขวางที่ตำแหน่ง x และเวลา t เทียบกับตำแหน่ง x
∂_t	ตัวดำเนินการอนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลา t
$\mathcal{L}\{\cdot\}$	ผลการแปลงลาปลาซ
$\mathbf{Re}\{z\}$	ส่วนจริงของจำนวนเชิงซ้อน z
$\mathbf{Im}\{z\}$	ส่วนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน z
$k_n(x,y)$	พจน์ที่ n ของอนุกรมจากการประมาณสืบเนื่องของสมการเคอร์เนล
$k^{i,j}$	$k((i-1)h,(j-1)h)$
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
$\mathbf{tridiag}(x_1,x_2,x_3)_m$	เมทริกซ์สามแนวเฉียงขนาด $m \times m$ นั่นคือ

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

$\|u(\cdot,t)\|_2$	นอร์มสองของการกระจัดตามขวาง เมื่อคิดเทียบกับตัวแปร x