

การลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยวิธีฟัซซีสไลดิงโหมด

FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR VIBRATION SUPPRESSION
OF A TWO-LINK FLEXIBLE MANIPULATOR

สมชาย วิริยาทรพันธ์
SOMCHAI WIRIYATHORNPAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-924-269-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยวิธีฟัซซีสไลดิงโหมด

FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR VIBRATION SUPPRESSION
OF A TWO-LINK FLEXIBLE MANIPULATOR



สมชาย วิริยาทรพันธุ์
SOMCHAI WIRIYATHORNPAN

เลขหม.....
เลขทะเบียน 47524
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2546
ISBN 974-324-269-4

FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR VIBRATION SUPPRESSION
OF A TWO-LINK FLEXIBLE MANIPULATOR

SOMCHAI WIRIYATHORNPAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-269-4

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ โดยวิธีฟัซซีสไลดิงโหมด
FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR VIBRATION
SUPPRESSION OF A TWO-LINK FLEXIBLE MANIPULATOR






ชื่อนักศึกษา นายสมชาย วิทยาทรพันธุ์

รหัสประจำตัว 41061008

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ปิติเขต ผู้รักษา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย	วีรจจา	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
รศ.อรลาภ	แสงอรุณ	
ผศ.อุทัย	ศรีธีระวิโรจน์	
ผศ.ดร.ปิติเขต	ผู้รักษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 กุมภาพันธ์ 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... 4เดือน..... เมษายน..... พ.ศ. 2546.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยวิธีพีซีซี
สไลดิงโหมด

นักศึกษา

นายสมชาย วิทยาทรพันธุ์

รหัสประจำตัว

41061008

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2546

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา

บทคัดย่อ

แขนกลอ่อนตัวมีคุณสมบัติเด่นกว่าแขนกลแบบดั้งเดิม ในแง่ของการมีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานน้อย และต้องการตัวขับเคลื่อนที่มีขนาดเล็กกว่า อย่างไรก็ตาม จุดด้อยของแขนกลอ่อนตัวคือการสั่นโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานอันเนื่องมาจากเป็นคุณสมบัติทางโครงสร้างการอ่อนตัวของแขนกล สภาพการณ์เช่นนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมดังตัวอย่าง การใช้แขนกลสำหรับในงานทาสีหรืองานเชื่อมที่มีความละเอียด วิทยานิพนธ์นี้เสนอหลักการลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวโดยวิธีพีซีซีสไลดิงโหมด ผลการจำลองการทำงานแสดงถึงประสิทธิผลและสมรรถนะการควบคุมแขนกลชนิดนี้โดยอาศัยวิธีการลดการสั่นของแขนกลด้วยวิธีพีซีซีสไลดิงโหมด

Thesis Title	Fuzzy Sliding Mode Control For Vibration Suppression of A Two-Link Flexible Manipulator
Student	Mr.Somchai Wiriyathornphan
Student ID.	41061008
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr.Pitikhate Sooraksa

ABSTRACT

Flexible-link robot arms have advantages over the conventional ones such as less weight, less energy consumption, and smaller actuators. However, a disadvantage of the manipulators is the vibration occurred inherently due to the flexible behavior of the arms during operation. This situation may effect control performance in some applications. For example, the use of the robot for fine painting or welding. This thesis presents vibration suppression of a two-link flexible manipulator by means of fuzzy sliding mode control. Simulation results show an effectiveness and control performance of the proposed method for vibration suppression of the robot links.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับแรงใจและความเมตตา จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติเขต สุรักษา ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังได้เชื้อเพื่ออุปการะ และการช่วยพัฒนาโปรแกรมในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทศท คอร์ปอเรชั่น จำกัด(มหาชน) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา ตั้งแต่ระดับปริญญาตรีจนถึงปริญญาโท ที่จำเป็นต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศที่ให้อำลัใจและสนับสนุนช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านต่อผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ รวมทั้งผู้บริหารที่มีวิสัยทัศน์กว้างไกลทุกคนที่สนับสนุนทั้งร่างกายและแรงใจ จากบริษัท ทศท คอร์ปอเรชั่น จำกัด(มหาชน)

และที่ลืมเสียมิได้คือ ขอขอบคุณภรรยา และบุตร อันเป็นที่รักยิ่ง รวมทั้งดวงวิญญาณของคุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนช่วยเหลือและเป็นแรงบันดาลใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและสิ่งที่มีประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สมชาย วิริยาทรพันธุ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	7
1.6 สมมติฐานเบื้องต้น.....	7
บทที่ 2 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ.....	8
2.1 กล่าวนำ.....	8
2.2 สมการลากราง.....	8
2.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์.....	12
2.3.1 แขนกลอ่อนตัวสององศาเสรีภาพ.....	12
2.3.2 ระบบพิกัด.....	13
2.3.3 ผลคูณแบบจุดของความเร็ว.....	14
2.3.4 พลังงานจลน์และพลังงานศักย์.....	15
2.3.5 สมการการเคลื่อนที่.....	15
2.4 สมการปริภูมิสถานะ (State Space).....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีตรรกศาสตร์พีชคณิตที่เกี่ยวข้อง.....	17
3.1 กล่าวนำ.....	17
3.2 ประพจน์แบบพีชคณิต.....	17
3.2.1 ประพจน์พีชคณิตเดี่ยว.....	17
3.2.2 ประพจน์พีชคณิตผสม.....	17
3.3 กฎของพีชคณิต.....	18
3.4 ตัวควบคุมพีชคณิต.....	19
3.4.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีชคณิตแบบฐานความรู้.....	19
3.4.1.1 พีชคณิตเคชันโมดูล.....	20
3.4.1.2 ฐานความรู้พีชคณิต.....	20
3.4.1.3 กลไกการอนุมาน.....	20
3.4.1.4 ดีพีชคณิตเคชัน.....	21
บทที่ 4 การออกแบบควบคุมการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อด้วยวิธีพีชคณิตไอ-สไลดิงโหมด.....	23
4.1 กล่าวนำ.....	23
4.2 การออกแบบการควบคุมแบบพีชคณิตไอ-สไลดิงโหมด.....	23
4.3 การควบคุมแบบพีชคณิตไอ.....	24
4.4 การพีชคณิตเคชัน.....	24
4.5 สไลดิงโหมดและกฎการควบคุมแบบพีชคณิต.....	25
4.6 การดีพีชคณิตเคชัน.....	27
บทที่ 5 ผลของงานวิจัย.....	31
5.1 กล่าวนำ.....	31
5.2 ผลการจำลองพารามิเตอร์การควบคุมเกินน้อย (Small-Overlab).....	32
5.3 ผลการจำลองพารามิเตอร์การควบคุมเกินใหญ่ (Large-Overlab).....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
6.1 บทสรุปของงานวิจัย	70
6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	70
6.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย.....	71
6.4 แนวทางการพัฒนา.....	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก.....	76
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 กฎการควบคุมพีซี PI.....	27
5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ขนาดความยาว น้ำหนักของแกนกล การควบคุมโดยผ่านค่าเกน L, K_{pi}, K_i, K_{uPI} , และค่าสัญญาณอินพุท A.....	32
5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ขนาดความยาว น้ำหนักของแกนกล การควบคุมโดยผ่านค่าเกน L, K_{pi}, K_i, K_{uPI} , และค่าสัญญาณอินพุท A.....	51

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	แกนกลอ่อนตัวสองระดับชั้นความเร็ว.....12
3.1	โครงสร้างของตัวควบคุมพีซีซี.....19
4.1	แสดงการควบคุมแบบพีซีซีไฟโอ.....24
4.2	แสดงความเป็นสมาชิกด้านอินพุท.....25
4.3	แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้านเอาท์พุท.....25
4.4	ระนาบสไลดิง.....26
4.5	ระบบผลตอบสนองขั้นบันไดสำหรับกฎแบบข้อเท็จจริง.....26
4.6	ระบบการตอบสนองบนระนาบเฟส26
4.7	พื้นที่การกระจายของค่ากลุ่มอินพุท.....29
5.1	แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.4, m_2=0.1$33
5.2	แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.2, K_{upl}=1, A=0.4$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....34
5.3	ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)....34
5.4	แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=0.2, K_i=1, K_{upl}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....35
5.5	ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)....35
5.6	แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.45, m_2=0.1$36
5.7	แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.2, K_{upl}=1, A=0.2$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..... 37
5.8	ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)....37
5.9	แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.1, K_{upl}=1, A=0.8$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....38
5.10	ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..38
5.11	แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.4, m_2=0.2$39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.12 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=0.8, K_i=0.1, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	40
5.13 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของชั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..	40
5.14 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.1, K_{upi}=1, A=0.7$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....	41
5.15 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของชั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..	41
5.16 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.6, L_2=0.6, m_1=0.4, m_2=0.1$	42.
5.17 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=3, K_i=0.5, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	43
5.18 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของชั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..	43
5.19 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=3, K_i=0.5, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....	44
5.20 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของชั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..	44
5.21 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.1, L_2=0.1, m_1=0.1, m_2=0.1$	45
5.22 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=1, K_{upi}=1, A=0.4$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	46
5.23 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของชั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..	46
5.24 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=0.3, K_i=0.3, K_{upi}=1, A=1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....	47
5.25 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของชั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..	47
5.26 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.4, m_2=1$	48
5.27 แสดงผลตอบสนองของชั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.8, K_{upi}=1, A=0.01$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.28 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1)..	49
5.29 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.1, K_{upi}=1, A=0.01$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2).....	50
5.30 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2)..	50
5.31 แสดงค้ำแอมพลิจูดการตบสนองของล้าแชนกลที่ 1 และ 2 ตามล้าดับ เมือเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.4, m_2=0.1$	52
5.32 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=50, K_{pi}=0.6, K_i=0.4, K_{upi}=1, A=1$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1).....	53
5.33 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1)..	53
5.34 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.01, K_{upi}=0.4, A=0.1$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2).....	54
5.35 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2)..	54
5.36 แสดงค้ำแอมพลิจูดการตบสนองของล้าแชนกลที่ 1 และ 2 ตามล้าดับ เมือเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.45, m_2=0.1$	55
5.37 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=50, K_{pi}=0.1, K_i=0.8, K_{upi}=1, A=0.3$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1).....	56
5.38 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1)..	56
5.39 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=1, K_{upi}=1, A=0.2$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2).....	57
5.40 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2)..	57
5.41 แสดงค้ำแอมพลิจูดการตบสนองของล้าแชนกลที่ 1 และ 2 ตามล้าดับ เมือเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.4, m_2=0.2$	58
5.42 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=50, K_{pi}=0.8, K_i=0.1, K_{upi}=1, A=0.5$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1).....	59
5.43 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 1 (L_1)..	59
5.44 แสดงผลตบสนองซันบ้นดไ โดย $L=50, K_{pi}=0.8, K_i=0.3, K_{upi}=1, A=0.5$ ของแชนกล ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2).....	60
5.45 ระบุเนบเฟสควมมิตพลลดที่สอดคล้องกับผลตบสนองซันบ้นดไที่ด้าเน่งแชนที่ 2 (L_2)..	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.46 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.6, L_2=0.6, m_1=0.4, m_2=0.1$	61
5.47 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=0.9, K_i=0.5, K_{upi}=1, A=0.5$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	62
5.48 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..	62
5.49 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.5, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....	63
5.50 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..	63
5.51 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.1, L_2=0.1, m_1=0.1, m_2=0.1$	64
5.52 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=1, K_{upi}=1, A=0.4$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	65
5.53 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..	65
5.54 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=1, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....	66
5.55 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..	66
5.56 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5, L_2=0.5, m_1=0.4, m_2=0.1$	67
5.57 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.7, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1).....	68
5.58 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)..	68
5.59 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.7, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2).....	69
5.60 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)..	69

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_{ai}	พื้นที่ตัดขวางของข้อที่ i (ค่าคงที่)	m^2
d	ค่าคงตัวของการหน่วง	$N*s/m$
d_i	ค่าคงตัวของการหน่วงของข้อที่ i	$N*s/m$
E	ค่ามอดูลัสของยัง	N/m^2
E_i	โมดูลัสความยืดหยุ่นของข้อที่ i	N/m^2
$F(t)$	แรงภายนอก	N
F_d	แรงต้านของตัวหน่วง	N
F_s	แรงต้านของสปริง	N
F_x	แรงในทิศทางของ x	N
k	ค่าคงตัวของสปริง	N/m
I_i	พื้นที่โมเมนต์ความเฉื่อยของข้อที่ i	m^4
L_i	ความยาวของข้อที่ i	m
M_i	มวลที่ปลายแขนของข้อที่ i	kg
Q	แรงวางนัยทั่วไป	N
t	เวลา	s
T	พลังงานจลน์	$N*m$
U	พลังงานศักย์	$N*m$
w_{1,L_1}	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของข้อที่ 1 ณ ตำแหน่ง L_1 เมื่อเทียบกับระยะทาง	
w_{2,L_2}	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของข้อที่ 2 ณ ตำแหน่ง L_2 เมื่อเทียบกับระยะทาง	
$w_{1,t}$	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของข้อที่ 1 ณ ตำแหน่ง L_1 เมื่อเทียบกับเวลา	
$w_{2,t}$	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของข้อที่ 2 ณ ตำแหน่ง L_2 เมื่อเทียบกับเวลา	
$w_i(x, t)$	ระยะการโค้งงอในแนวตามขวางของข้อที่ i	
W	งาน	$N*m$

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
x_i	ระยะทางสำหรับข้อที่ I	m
\dot{x}	ความเร็ว	m/s
\ddot{x}	ความเร่ง	m/s ²
ρ	ความหนาแน่นของมวล	kg/m ³
ρ_i	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของข้อที่ I	kg/m ³
θ	การกระจัดเชิงมุม	rad
$\dot{\theta}_i$	ความเร็วเชิงมุม	rad/s
$\ddot{\theta}_i$	ความเร่งเชิงมุม	rad/s ²
ω	ความถี่ธรรมชาติ	rad/s
K_{uPI}	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีซี	
K_{pi}	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PI	
K_i	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

แขนกลเป็นเครื่องจักรกลอัตโนมัติชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม และในงานสำรวจในที่อื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการใช้กำลังงานและประหยัดเวลาของมนุษย์ เพื่อความแม่นยำและรวดเร็วในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น

- งานที่กระทำซ้ำกันเป็นประจำ
- งานที่ทำแล้วเกิดอันตรายได้ง่าย
- งานที่ใช้ความละเอียดค่อนข้างสูง
- งานที่สภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวย

แนวความคิดในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อนี้แตกต่างจากแขนกลแบบดั้งเดิมที่ทำจากเหล็ก โดยแขนกลแบบอ่อนตัวจะมีลักษณะทางกายภาพที่มีน้ำหนักเบา เคลื่อนที่เร็ว มีลักษณะของแขนเหมือนกันตลอดทั้งแขน ข้อดีของแขนกลแบบนี้คือน้ำหนักเบาจะช่วยให้ลดพลังงาน และในการขับเคลื่อนสามารถให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว ซึ่งน่าจะให้ผลที่ดีกว่าแขนกลแบบดั้งเดิม (conventional robot arm) หรือแขนกลหลายข้อต่อที่พบเห็นได้ในปัจจุบันที่มีน้ำหนักมาก การเคลื่อนที่ช้า และต้องใช้พลังงานมากในการขับเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวขับเคลื่อน (actuator) ที่มีความสามารถสูง นอกจากนี้แขนของหุ่นยนต์แบบแข็งเกร็งยังมีอัตราส่วนภาระ (payload ratio) ต่ำ

สำหรับแบบจำลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อได้ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งในการวิจัยนี้ได้นำเอาสมการพลศาสตร์ลากรางเจียน (Lagrangian dynamics) และทฤษฎีบีมของ Euler-Bernoulli มาใช้ในการวิเคราะห์

ปัญหาพื้นฐานในการทำงานของแขนกลอ่อนตัวในอวกาศคือ จะเกิดการแกว่งที่ตำแหน่งปลายเมื่อแขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ ทำให้การควบคุมทำได้ยากกว่าแขนหุ่นยนต์แบบแข็งเกร็ง จึงต้องใช้ตัวควบคุมที่มีความสามารถสูงและมีประสิทธิภาพที่แน่นอนรวมทั้งการควบคุมที่เชื่อถือได้ด้วยข้อเท็จจริงนี้จึงเกิดแรงสนใจในการใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีสมรรถภาพที่สูงกว่าในการประยุกต์ใช้ทางพาณิชย์และด้านอวกาศ ข้อได้เปรียบของแขนกลที่มีน้ำหนักเบา มีมากมายทั้งทางการตอบสนองของระบบที่เร็วกว่า การสูญเสียพลังงานต่ำกว่า ตัวกระตุ้นที่เล็กกว่า และการออกแบบเครื่องกลไกที่เด่นกว่า อย่างไรก็ตามก็จะมีปัญหาความยุ่งยากในการควบคุมแขนกลอ่อนตัว ที่จะต้องมีความสนใจอย่างสูงในการออกแบบการควบคุมสำหรับชดเชยผลกระทบของการอ่อนตัว

1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบควบคุมการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ มีผู้ที่สนใจมากมาย และได้เสนอแนวคิดและทฤษฎีที่น่าสนใจดังนี้

ในปี ค.ศ.1989 Chemousko, Akulenko and Bolotnik [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการควบคุมเวลาที่ดียิ่งที่สุดที่นำไปสู่โครงสร้างการควบคุมของหุ่นยนต์เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยได้พัฒนาถึงปัญหาที่แตกต่างของการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับหุ่นยนต์ในโรงงาน เราให้ความสำคัญเกี่ยวข้องกับงานที่ทำในทำนองนี้และนำเสนอผลลัพธ์ใหม่ที่เหมาะสมที่สุดของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จักรกลซึ่งพัฒนาการขับเคลื่อนโดยการผสมโลหะที่เกี่ยวกับไฟฟ้า เราจะได้วงรอบเปิด (open-loop)

ในปี ค.ศ.1990 Feddema, Eisler and Segaman [2] ได้วิเคราะห์ผลการทดลองการควบคุมแบบจำลองและการเซนเซอร์ (sensor) สำหรับแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อในแนวระนาบโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ในการหาเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่าการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบอ่อนตัว โดยมีส่วนประกอบของมอเตอร์ (motor) อยู่ด้วย และในปีเดียวกัน Luca [3] ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อที่มีน้ำหนักเบาในแนวระนาบ (โดยไม่คิดผลสะท้อนของการบิด) และความสามารถในการรับน้ำหนักของแขน โดยได้นำแนวความคิดของ W.J. Book ซึ่งใช้สมการออยเลอร์-เบอร์นูลีและวิธีแบบแผนสมมติสำหรับแต่ละข้อต่อ รวมทั้งใช้วิธีลากรางจ์หาผลเฉลยของสมการ

ในปี ค.ศ.1991 Hillsley and Yurkovich [4] ได้ทำการวิเคราะห์และทดลองเกี่ยวกับการควบคุมการสั่นของแขนกลสองข้อต่อ โดยมี การเชื่อมต่อเป็นแบบหมุนและมีส่วนประกอบของมอเตอร์ด้วย และในปีเดียวกัน Wang and Viyasagar [5,6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการป้อนข้อมูลแก่อุปกรณ์ ควบคุมแบบเชิงเส้น ในการอินพุท-เอาต์พุท (input-output) ของสมการสำหรับกลุ่มของหุ่นยนต์หลายข้อต่อ ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) และข้อต่อของแขนกลซึ่งแสดงว่าสมการอินพุท-เอาต์พุทเป็นเพียงการป้อนข้อมูลแก่อุปกรณ์ควบคุมแบบเชิงเส้น ทำการศึกษาเพิ่มเติมอีกด้วยว่าการควบคุมและการออกแบบการสังเกตสำหรับกลุ่มของเครื่องจักรหลายข้อต่อที่มีลำแขนเป็นแบบยืดหยุ่นซึ่งแสดงว่ามีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงสมการปริภูมิสถานะ (state-space) ของเครื่องจักรเหล่านี้ไปในเซตของสมการที่เท่ากันซึ่งเป็นเชิงเส้นเกือบหมด การควบคุมโดยใช้การป้อนข้อมูลแก่อุปกรณ์ควบคุมที่มีสถานะไม่เชิงเส้น ซึ่งถูกออกแบบให้เป็นพื้นฐานเท่านั้นในส่วนเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงระบบสมการ การสังเกตซึ่งประมาณสถานะเข้าสู่สถานะแท้จริงเลขชี้กำลังซึ่งแสดงว่าส่วนประกอบของการสังเกตกับการควบคุมมีผลลัพธ์ในระบบซึ่งเป็นค่าเสถียรในการอินพุท-เอาต์พุทที่จำกัดในเหตุผลที่จำกัด

ในปี ค.ศ.1993 Lewis and Vandegrift [7] ได้นำเสนอการควบคุมไม่เชิงเส้นสำหรับตำแหน่งปลายของแขนและความเร็วของแขนหุ่นยนต์ยึดหุ่นหลายท่อนถูกออกแบบโดยยืนยันการแสดงผลการควบคุมมี 3 ส่วน โดยส่วนภายนอกเป็นพื้นฐานภายในการอินพุท-เอาต์พุทข้อมูลแก่อุปกรณ์ควบคุมและการเพิ่มส่วนภายในว่ามีความเสถียรในช่วงการเคลื่อนที่ (เช่นโหมดการยึดหุ่น) ใช้ออกแบบเอกสารที่มีความยุ่งเหยิงซึ่งหากว่าโหมดการยึดหุ่นตั้งฉากกับ 2 ตำแหน่งส่วนหนึ่งควบคุมพีชคณิตบนความต้องการตำแหน่งปลาย และ (ขอบเขตของขั้นตอนในการแก้ไข) ส่วนที่สามารถใช้ให้เกิดความเสถียรในการเคลื่อนที่ที่ยึดหุ่น และในปีเดียวกัน Matsuno and Yamamoto [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการแสดงทั้งติดต่อกับแรงที่ใช้โดยเครื่องจักรที่ยึดหุ่นและควบคุมตำแหน่งของจุดปลายเมื่อติดต่อกับพื้นผิว ซึ่งได้ประมาณค่าการเปลี่ยนรูปที่ยึดหุ่นโดยความหมายของฟังก์ชัน และสมการการเคลื่อนที่ของมุมที่เชื่อมต่อกัน การสั่นของแขนที่ยึดหุ่นและการจำกัดแรง การควบคุมสำหรับการผสมตำแหน่ง/แรงควบคุมสำหรับเครื่องจักรกลยึดหุ่นถูกออกแบบบนพื้นฐานของวิธีการที่ยุ่งยากและ แสดงผลที่ยอมรับได้ว่าการรูปแบบการสังเกตที่ดีต่อมา Luo and Guo [9] ได้แสดงการวิเคราะห์ความเสถียรสำหรับบางสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองโดยทั่วไปแสดงจากการควบคุมความเครียดของการป้อนข้อมูลแก่อุปกรณ์ควบคุมโดยตรง การแสดงออกของความเสถียรของเลขชี้กำลังต้องอาศัยสามส่วนของสมการอนุพันธ์หนึ่งในนั้นอยู่ในรูปแบบทั่วไปของสมการย่อยที่ปรากฏขึ้นและอีกสองชนิดอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย จะได้ผลลัพธ์เป็นทฤษฎีเฉพาะที่น่าสนใจเพราะแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของการควบคุมความตึงเครียดของการป้อนข้อมูลแก่อุปกรณ์ควบคุมโดยตรงและสาธิตกำลังในการควบคุมแขนกลยึดหุ่นด้วย

ในปี ค.ศ.1997 Wang,Xu, Tsu and Zhang [10] ได้กําผลเฉลยของการทดลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อในแนวระนาบโดยแขนกลขนาดใหญ่จะรวมกับแขนกลขนาดเล็กที่จุดปลายแขนของแขนกลขนาดใหญ่ด้วยการเชื่อมต่อแบบหมุนซึ่งใช้แสงเลเซอร์พีเอสดี(Laser-PSD) สำหรับวัดตำแหน่งของปลายแขนของแขนกลขนาดเล็ก

ในปี ค.ศ.1998 Yang, Krishnan and Ang [11] ได้สร้างแบบจำลองการควบคุมการสั่นแบบการป้อนข้อมูลแก่อุปกรณ์ควบคุม (feedback) ของแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อ ซึ่งแสดงการพิสูจนด้วยทฤษฎีเลียปูนอฟ(Lyapunov)และในปีเดียวกัน Dogan and Ifter [12] ได้สร้างแบบจำลองและการควบคุมของแขนกล 2 ข้อต่อ ซึ่งข้อต่อแรกแข็งเกร็งและข้อที่ 2 ยึดหุ่น เราแสดงสมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยความหมายของหลักแฮมิลตันอันดับแรกเป็น PD และ PD แบบไม่เชิงเส้น ลักษณะการควบคุมและการออกแบบได้รับแนวทางของความต้องการการอ้างอิงสัญญาณและค่าเบี่ยงเบนที่ถูกกำจัดที่จุดปลายของแขนที่ยึดหุ่นแล้วพื้นฐานการควบคุมที่ตรงกันข้ามกับวิธี singular perturbation ถูกออกแบบซึ่งได้รับผลการควบคุมที่เหมือนกันกับวัตถุประสงค์

ของการดำเนินการของการควบคุมการออกแบบถูกเปรียบเทียบกับแต่ละพื้นฐานอื่นๆ ในการแสดงผล ลัฟท์ และ Sarkar, Yamamoto and Mohri [13] ได้พบแนวทางข้อผิดพลาดของแบบจำลองแขน กลอ่อนตัว โดยใช้ทฤษฎีของออยเลอร์-เบอร์นูลีกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกลอ่อน ตัวและหาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ ซึ่งแสดงด้วยสมการลากรางจ์โดยใช้วิธีของไฟไนท์ อีลีเมนต์

สำหรับการสร้างแบบจำลองของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อนั้น ในปี ค.ศ.1975 Book, Maizza-Neto and Whitney [14] ได้ประมาณค่าแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยตรงด้วยแบบ จำลองอนุพันธ์เชิงเส้น

ในปี ค.ศ. 1978 Balas [15] ได้ประมาณค่าแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อในแบบจำลอง การแจกแจงตัวแปรแบบไม่เชิงเส้น

ในปี ค.ศ. 1979 Book [16] ได้ใช้เทคนิคพิเศษซึ่งวิเคราะห์แขนกลอ่อนตัวโดยสมมติว่า ข้อต่อนั้นโค้งงอในโหมดแรกของการสั่น

ในปี ค.ศ. 1982 ในงานของ Truckenbrodt [17] ได้วิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของกลุ่มของ ข้อต่อที่ยืดหยุ่นโดยใช้วิธีการของ Ritz-Kantorovitch และศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตที่เป็นแนงเส้น ตรงโดยมีความสัมพันธ์กับสมการเชิงอนุพันธ์

ในปี ค.ศ. 1985 Karkkainen and Hakme [18] ได้ศึกษาปัญหาการประมาณค่าการ อ่อนตัวของแขนกล Judd and Falkenburg [19] ได้ประยุกต์เทคนิคดังกล่าวกับต่อของแขนกลที่ไม่ แข็งเกร็ง โดยนำเทคนิคของ Sunada and Dubowsky [20] มาใช้และได้ปรับปรุงแนวทางของ การพิจารณาโหมดการสั่นที่เพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ Chassiakos and Bekey [21] ได้ประมาณค่า ผลตอบรับของระบบการแจกแจงของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับแขนกลดังกล่าว

ในปี ค.ศ. 1997 Zeman, Patel, and Khorasani, [22] ได้ศึกษาวิธีการควบคุมแขน กลอ่อนตัวโดยใช้การควบคุมแบบโครงข่ายนิเวรอล สามารถลดการสั่นของช่วงปลายแขนได้ดี และ ในปีเดียวกัน Moallem, Patel, and Khorasani, [23] ได้ทำการทดลองใช้วิธีการควบคุมแบบพลวัต ร์กลับในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของส่วนปลายของแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อ

ในปี ค.ศ. 2000 Yazdizadeh, Khorasani, and Patel, [24] ทำการปรับปรุงระบบแขน กลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยวิธีโครงข่ายนิเวรอลแบบเวลาอแดปทีป และ Moallem, Patel, and Khorasani, [25] ใช้วิธีการออกแบบการควบคุมโครงสร้างในการควบคุมแขนกลอ่อนตัว ในปีเดียวกัน Jin-Soo Kim, Masaru Uchiyama [26] ได้สร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์พลวัตของการสอด ประสานงานระหว่างแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

ในปี ค.ศ. 2001 Cheng and Patel, [27] ได้ทำการทดลองระบบแขนกลอ่อนตัวแมค โคร-ไมโคร (macro-micro) การควบคุมการเคลื่อนที่สูงสุดเป้าหมายบนพื้นฐานโครงข่ายนิเวรอล

และในปี ค.ศ. 2002 ได้พัฒนาโดยวิธีเดียวกันในการลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวแบบ มหาภาค-จุลภาค

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาและออกแบบการควบคุมการลดการสั่นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีสไลดิงโหมด โดยนำการควบคุมแบบสไลดิงโหมด (Sliding Mode Control) และ ฟัซซีพีไอคอนโทรล (Fuzzy-PI Control) มาทำงานร่วมกันเป็นฟัซซีพีไอ-สไลดิงโหมดคอนโทรล (Fuzzy PI Sliding Mode Control, FPISC)

การพิจารณาปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงของระบบ, การสิ้นเปลืองพลังงานและน้ำหนักของอุปกรณ์ใน แขนกล ซึ่งแต่ละแบบจะมีรูปแบบการจำลองวิธีการ โดยทั่วไปในแบบของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อจะมีความคล้ายกับแขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดียวแต่มีประโยชน์และคล่องตัวกว่าแขนกลอ่อนตัวหนึ่งข้อต่อที่มีปัญหาในการเชื่อมจับอุปกรณ์ ดังนั้นรูปแบบจำลองและผลอื่นๆ ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อจึงยังไม่ง่ายนักในการพัฒนาโดยตรงที่จะนำรูปแบบของกลอ่อนตัวข้อต่อเดียว 2 ชุด มาซ้อนทับกัน ปฏิบัติการ การรวมกันทางพลศาสตร์ระหว่างแขนกลแขนเดียวยังต้องการรูปแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น

ปัญหาหนึ่งในการควบคุมแขนกลอ่อนตัวคือการสั่นระหว่างการทำงาน การสั่นที่เกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุที่มีขนาดบางที่นำมาใช้ แขนที่ยาวและบางจะมีการสั่นมากกว่าแขนที่สั้นและหนา ด้วยหลักธรรมดาเช่นนี้จึงต้องเลือกใช้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างของแขนกลเพื่อลดธรรมชาติการอ่อนตัว ซึ่งดูเหมือนว่าจะง่ายในการลดความสั่นของแขนกล นักวิจัยบางคนมักจะนิยมทำงานและวิจัยกับแขนกลที่บางเพื่อให้มีความรู้ที่กระจ่างและชัดเจนกับธรรมชาติของการสั่น

ในจำพวกรูปแบบการควบคุมต่างๆ การควบคุมโครงสร้างผันแปร (variable structure control) หรือการควบคุมแบบสไลดิงโหมด (sliding mode control ; SMC) สามารถจะออกแบบสำหรับผลที่เป็นแบบจำลองที่ไม่สามารถมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้ สามารถจัดการรบกวนและควบคุมเส้นทางเดิน ซึ่งนักวิจัยแต่ละคนก็มีวิธีที่คล้ายกันสำหรับโครงสร้างของแขนกลอ่อนตัว การเสริมสร้างประสิทธิภาพของตัวควบคุมและวิธีการแก้ไขผลของการสั่นสะเทือน การควบคุม ทั้งแบบฟัซซีพีไอ (Fuzzy-PI) และสไลดิงโหมด (SMC) ถูกนำไปใช้สำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

การควบคุมแบบฟัซซีพีไอ-สไลดิงโหมด (Fuzzy-PI Sliding mode) ออกแบบเพื่อการลดการสั่นสะเทือนและ การเข้าถึงวิธีการเดินของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ การออกแบบการควบคุมแบบฟัซซีพีไอ-สไลดิงโหมด (FPISC) ในวิทยานิพนธ์ฉบับที่นำเสนอนี้มีข้อดี คือ

- สามารถออกแบบโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการไม่มาก
- สามารถควบคุมกระบวนการที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์
- สามารถปรับตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของขบวนการหรือสภาวะแวดล้อม

- สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอกและจากสัญญาณรบกวน (noise)
- สามารถนำไปใช้งานภายในการควบคุมกระบวนการในเวลาจริง

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ-สไลดิ้งโหมด สำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้ระบบเกิดความคงทน (Robustness) และเสถียรภาพ (stability) ความผิดพลาดของเส้นทางเดินที่ลู่เข้าหาสภาพแวดล้อมของเส้นศูนย์ในพื้นผิวสไลดิ้ง (Sliding Surface) และยังสามารถขจัดปรากฏการณ์การสั่นสะเทือน (chattering) เนื่องจากเป็นการรวมถึงข้อได้เปรียบของทั้งแบบเข้าด้วยกันเมื่อการออกแบบการควบคุมอินพุตไปที่ระนาบสไลดิ้งเป็นที่น่าพอใจแล้วจะเกิดผลดังนี้

1. สภาพของระบบจะไปถึงระนาบสไลดิ้ง (Sliding Surface) ด้วยเวลาที่กำหนดแน่นอน
2. เมื่อสภาพของระบบอยู่บนระนาบสไลดิ้ง (Sliding Surface) มันจะยังคงพักที่จะจุดนั้น
3. ถ้าสภาพของระบบยังพักอยู่บนจุดนั้นของระนาบสไลดิ้ง (Sliding Surface) ความผิดพลาดของเส้นทางเดินจะลู่เข้าหาจุดศูนย์

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาหาค่าตัวประกอบฟัซซีลอจิกเพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมสไลดิ้งโหมด เพื่อลดการสั่นของแขนกลสองข้อต่อ
- 2) เพื่อพัฒนาโครงสร้างของตัวควบคุม FPISC ที่ออกแบบให้เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างด้วยซอฟต์แวร์บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการในเวลาจริง
- 3) เพื่อประยุกต์รวมระบบควบคุมแบบฟัซซีและสไลดิ้งโหมด มาทำงานร่วมกันเพื่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) นำระบบควบคุมที่ออกแบบมาทำการทดลองการลดการสั่นของแขนกลสองข้อต่อ
- 2) นำผลของระบบควบคุมแบบ FPISC ที่ได้จากการทดลองมาพิจารณาผลการจำลองโดยกราฟ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1) ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลของระบบที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาเอกสารและข้อมูลที่รวบรวมได้
- 3) หาผลเฉลยของสมการในกรณีต่างๆ ของแกนกลเพื่อพิจารณาการสั่นของแกนกลสองข้อต่อ
- 4) ออกแบบระบบควบคุม FPISC
- 5) ทำการทดลองจากระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ทำการบันทึกผล
- 6) สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.6 สมมติฐานเบื้องต้น

- 1) ลักษณะของแกนกลเป็นเนื้อเดียวกันมีลักษณะเบาและบางตลอดทั้งลำแขน
- 2) การเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งอยู่ในแนวระดับบนระนาบ XY
- 3) แรงโน้มถ่วงของโลก แรงดึงในแนวแกน แรงอัดตัวที่ทำให้เสียรูปและความเสียดทาน จะไม่นำมาพิจารณา
- 4) ผลกระทบการหน่วงโดยโครงสร้างภายในจะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากมีผลกระทบน้อยต่อระบบ
- 5) การนำระบบควบคุมแบบพีซีพีไอทำงานร่วมกับแบบสไลดิงโหมด

บทที่ 2

จำลองแบบคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

2.1 กล่าวนำ

ปัญหาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบแขนกลอ่อนตัวเป็นปัญหาที่ช่วยให้ความเข้าใจพลศาสตร์ของระบบนี้เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวนั้น Cannon and Schmitz (1984) เป็นผู้ริเริ่มทำการทดลองโดยทำการควบคุมและหาแบบจำลองแขนกลอ่อนตัว งานวิจัยดังกล่าวสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการทดลอง โดยทำการควบคุมตำแหน่งของแขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดียวมาแสดง Book, Maizza-Neto และ Whitney (1975) สร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์อ่อนตัวสองข้อต่อโดยอาศัยแบบจำลองอนุพันธ์เชิงเส้นจากแบบจำลองการแจกแจงตัวแปรแบบไม่เชิงเส้น ในงานวิจัยของ Balas (1978), Karkkainen และ Halme (1985) ได้ศึกษาปัญหาการประมาณค่าการอ่อนตัวโดยทั่วไปของลำแขนกลดังกล่าว Book (1979) ใช้เทคนิคพิเศษโดยสมมุติว่าข้อต่อนั้นโค้งงอในโหมด (Mode) แรกของการสั่น Judd และ Falkenburg (1985) ประยุกต์วิธีการดังกล่าวกับข้อต่อของหุ่นยนต์ที่ไม่แข็งเกร็งโดยนำเทคนิคของ Sunada และ Dubowsky (1983) มาใช้และได้ปรับปรุงแนวทางของการพิจารณาโหมดการสั่นที่เพิ่มขึ้นด้วย Chassiakos และ Bekey (1985) ได้ประมาณค่าผลตอบรับระบบการแจกแจงของตัวแปรต่าง ๆ Truckenbrodt (1982) ได้วิเคราะห์การเปลี่ยนรูปกลุ่มของข้อต่อที่ยืดหยุ่นโดยใช้วิธีการของ Ritz-Kantorovitch และศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ (Dynamic) ที่เป็นแนวเส้นตรงโดยมีความสัมพันธ์กับสมการเชิงอนุพันธ์ ในงานวิจัยนี้แตกต่างจากการสร้างแบบจำลองดังกล่าวข้างต้น โดยจะใช้ทฤษฎี Lagrange เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

2.2 สมการของ Lagrange

การหาสมการอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ ในเทอมของพิกัดทั่วไปนิยมเริ่มด้วยสมการการเคลื่อนที่ของ Newton

$$F_i = m_i \ddot{x}_i \quad (2.1)$$

สมการที่ 2.1 นี้อาจมีปัญหาเรื่องการค้นหาแรงภายในที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในระบบหากไม่ทราบแรงที่เกี่ยวข้อง แบบจำลองอาจคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตาม เราสามารถใช้ทางเลือกอีกวิธีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่โดยวิธีแบบ Lagrange โดย เขียนสมการของการเคลื่อนที่ให้อยู่ในเทอมของพิกัดทั่วไป โดยใช้พื้นฐานการพิจารณาในแง่พลังงาน อาจเลือกคำนวณหาพลังงานจลน์ในเทอมของพิกัดฉาก แล้วบรรยายลักษณะฟังก์ชันของพิกัดแบบทั่วไป โดยมีพลังงานจลน์ T ของระบบ N อนุภาค เป็น

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \quad (2.2)$$

หรือเขียนแบบง่าย ๆ เป็น

$$T = \sum_{i=1}^{3n} m_i x_i^2 \quad (2.3)$$

เมื่อพิกัดฉาก x_i เป็นฟังก์ชันของพิกัดทั่วไป q_k และเป็นอนุพันธ์ของเวลากล่าวคือ

$$\dot{x}_i = \dot{x}_i(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \quad (2.4)$$

ดังนั้น เมื่อเราหาอนุพันธ์สมการ (2.4) จะได้

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial x_i}{\partial q_k} \dot{q}_k + \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

ในที่นี้ i เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง $3N$, N เป็นจำนวนอนุภาคของระบบ, k เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง n และ n เป็นจำนวนพิกัดแบบทั่วไป หรือจำนวนระดับขั้นดีกรีความเสรีของระบบ

จากการอธิบายค่า $\frac{\partial x_i}{\partial q_k}$ ในสมการ (2.5) เราได้

$$\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \quad (2.6)$$

โดยการคูณสมการ (2.6) กับ \dot{x}_i แล้วดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลา t

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right) &= \frac{d}{dt} \left(x_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right) \\ &= \dot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + x_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial q_k} \end{aligned} \quad (2.7)$$

หรือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \left(\frac{1}{2} x_i^2 \right)}{\partial \dot{q}_k} \right) = \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial \left(\frac{1}{2} x_i^2 \right)}{\partial q_k} \quad (2.8)$$

เมื่อเอา m_i คูณตลอด

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \left(\frac{1}{2} m_i x_i^2 \right)}{\partial \dot{q}_k} \right) = m_i \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial \left(\frac{1}{2} x_i^2 \right)}{\partial q_k} \quad (2.9)$$

โดยการใส่ \sum_i ตลอด แล้วแทนค่า จากสมการ (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) &= \sum_i \left(m_i \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial \dot{q}_k} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_k} \\ &= \sum_i \left(F_i \frac{\partial x_i}{\partial \dot{q}_k} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_k} \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากนิยามของแรงแบบทั่วไป

$$Q_k = \sum_i \left(F_i \frac{\partial x_i}{\partial \dot{q}_k} \right)$$

ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) = Q_k + \frac{\partial T}{\partial q_k} \quad (2.11)$$

สมการ (2.11) เป็นสมการ อนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ในพิกัดทั่วไปซึ่งเรารู้จักในชื่อของ "สมการการเคลื่อนที่ของ Lagrange"

ในกรณีเป็นการเคลื่อนที่ของระบบอนุภาค ซึ่งค่าของแรงทั่วไป Q_k สมการของ ดังนั้น สมการ Lagrange เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.12)$$

เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ Lagrange กำหนดฟังก์ชัน (Lagrangian) เป็น

$$L = T - V \quad (2.13)$$

โดยที่ T และ V บรรยายในเทอมของพิกัดแบบทั่วไป และสมการ (2.13) เราเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial V}{\partial \dot{q}_k} \quad (2.14)$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.15)$$

ดังนั้นเมื่อ $V = V(g)$ และ $\frac{\partial V}{\partial \dot{q}_k} = 0$ แล้ว

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \quad (2.16)$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.17)$$

จากการแทนค่าสมการ (2.17) ในสมการ (2.12) ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของ Lagrange ในกรณีระบบอนุรักษ์ คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_k} \quad (2.18)$$

สำหรับกรณีของระบบไม่อนุรักษ์ กล่าวคือแรงแบบทั่วไป Q_k ไม่เป็นไปตามสมการ

$$Q_k = - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.19)$$

ซึ่งทำให้ปริมาณ Q_k เป็นปริมาณส่วนที่เปลี่ยนไปดังนั้น

$$Q_k = Q_k - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของ Lagrange ในกรณีของระบบไม่อนุรักษ์ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) = Q_k + \frac{\partial L}{\partial q_k} \quad (2.21)$$

หมายเหตุ ตัวอย่างของแรงแบบทั่วไป Q_k อาจเป็นแรงเสียดทาน เป็นต้น

การประยุกต์สมการของ Lagrange ไปใช้ในบางกรณี

การใช้สมการของ Lagrange หาสมการอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ สำหรับระบบใด ๆ นั้น เรามีหลักเกณฑ์โดยทั่วไป ดังนี้

- 1) กำหนดพิกัดทั่วไปที่เหมาะสมสำหรับเป็นโครงสร้างของระบบ
- 2) หาค่าของพลังงานจลน์ T ในเทอมของพิกัดทั่วไป
- 3) ถ้าเป็นระบบอนุรักษ์ ให้หาค่าของพลังงานศักย์ V ในเทอมของพิกัดทั่วไปถ้าไม่ใช่ระบบอนุรักษ์ให้หาค่าของแรงแบบทั่วไปในเทอมของพิกัดทั่วไป
- 4) สมการของ Lagrange ที่จะประยุกต์มาใช้ คือสมการ (2.11), (2.18) และ (2.21)

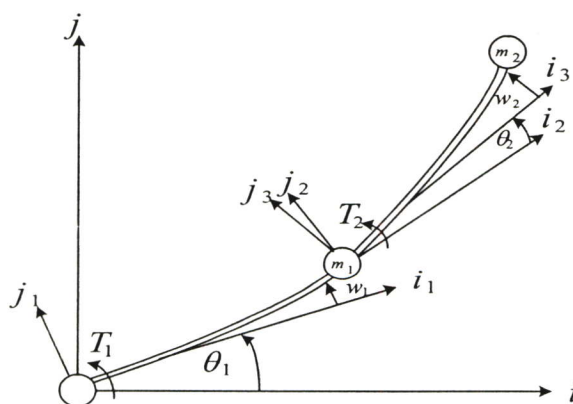
2.3 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเป็นปัญหาวิจัยหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากนักวิจัยทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการศึกษา หนึ่งในปัญหาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำลังเป็นที่สนใจจากนักวิจัยก็คือ การสร้างแบบจำลองแขนกลอ่อนตัวเพื่อใช้ในงานการออกแบบระบบควบคุมชนิดต่าง ๆ ที่ต้องการแบบจำลองในการช่วยออกแบบและจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

ในบทนี้จะพิจารณาแบบจำลองแขนกลของวงรอบเปิด (Open loop) โดยอันดับแรกจะพิจารณาแขนกลสองข้อต่อซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่ได้แสดงลักษณะตัวแปรต่อผลกระทบทางพลศาสตร์ของวงรอบเปิดด้วยรูปแบบของ Smart [28] ซึ่งจะพิจารณาในรูปแบบสองระดับชั้นความเสรี

2.3.1 แขนกลอ่อนตัวสองระดับชั้นความเสรี

เนื้อหาในบทนี้จะบรรยายถึงแบบจำลองเชิงเส้นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา



ภาพที่ 2.1 แสดงภาพแขนกลอ่อนตัวสองระดับชั้นความเสรี

กำหนดให้ θ_1 เป็นปัจจัยกำหนด (Parameter) ของข้อที่ 1 ของแขนกลซึ่งเป็นมุมของหัวไหล่ และ θ_2 เป็นมุมของข้อต่อของข้อศอก ในภาพ(A) m_1 และ m_2 เป็นมวลของข้อที่ 1 และข้อที่ 2 ตามลำดับ วิธีการที่ใช้สร้างแบบจำลองคือการสมมุติโหมดเพื่อแสดงระยะโค้งงอในแนวตามขวาง และเพื่อประยุกต์สมการพลศาสตร์ลากรางเจียน (Lagrange dynamic) ในการกำหนดพลังงานจลน์ (Kinetic energy) และพลังงานศักย์ (Potential energy) สำหรับระบบสองข้อต่อ โดยแบบจำลองที่สร้างจะมีรูปแบบสุดท้ายเป็นสมการการเคลื่อนที่ปริภูมิสถานะ ที่เหมาะกับการออกแบบระบบการควบคุมเชิงเส้น

2.3.2 การกำหนดระบบพิกัด

เนื่องจากลักษณะของแขนกลเป็นแขนลักษณะบาง ความเฉื่อยในการหมุนและแรงเค้นเฉือนในการเปลี่ยนรูปมีค่าน้อยมากโดยอาจจะไม่นำมาพิจารณา โดยใช้ทฤษฎีบีมของออยเลอร์-เบอร์นูลลี (Euler-Bernoulli) โดยระบบพิกัดกำหนดได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} i_1 \\ j_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I \\ J \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{Bmatrix} i_2 \\ j_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(w'_{1,L_1}) & \sin(w'_{1,L_1}) \\ -\sin(w'_{1,L_1}) & \cos(w'_{1,L_1}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_1 \\ j_1 \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{Bmatrix} i_3 \\ j_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_2 \\ j_2 \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

ในสมการที่ 2.23 นั้นหมายถึงการสมมุติว่ามุมที่จุดปลายของข้อที่ 1 สร้างโดยการเปลี่ยนรูปการยืดหยุ่นของข้อต่อนั้นโดยการประมาณค่าด้วย $\left(\frac{\partial w_1}{\partial x_1}\right)_{x_1=L_1}$ นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าการหมุนของข้อที่ 2 ของวัตถุแข็งเกร็งมีความสัมพันธ์กับความชันที่จุดปลายของข้อที่ 1 ในแกนพิกัดในสมการที่ 2.22-2.24 ดังภาพที่ 2.1 โดย I และ J แสดงเฉพาะแกนในแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ พิกัด i_1 และ j_1 แสดงการเลื่อนของวัตถุแข็งเกร็งของข้อที่ 1 เทียบกับ I และ J พิกัด i_2 และ j_2 แสดงการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งของข้อที่ 2 เทียบกับ i_1 และ j_1 ใช้การแปลงพิกัดของสมการที่ 2.23 และ 2.24 สำหรับตำแหน่งมวลบนข้อที่ 1 และ 2 ที่จุด x_1 และ จุด x_2 ตามลำดับ จะได้

$$\vec{r}_{1,x} = L_1 \hat{i}_1 + w_{1,L_1} \hat{j}_1 \quad (2.25)$$

$$\vec{r}_{2,x} = L_1 \hat{i}_1 + w_{1,L_1} \hat{j}_1 + x_2 \hat{i}_3 + w_2 \hat{j}_3 \quad (2.26)$$

เมื่อเปลี่ยนเป็นความเร็วสำหรับมวลบนข้อที่ 1 และ 2 ที่จุด x_1 และ x_2 ตามลำดับ จะได้สมการของความเร็ว คือ

$$\vec{r}_{2,x} = L_1 \dot{\hat{i}}_1 + w_{1,L_1} \dot{\hat{j}}_1 + x_2 \dot{\hat{i}}_3 + w_2 \dot{\hat{j}}_3 \quad (2.27)$$

$$\dot{\vec{r}}_{2,x} = (L_1 \dot{\theta}_1 + \dot{w}_{1,L_1}) \dot{\hat{j}}_1 - w_{1,L_1} \dot{\theta}_1 \hat{i}_1 + (x_2 \omega + \dot{w}_2) \dot{\hat{j}}_3 - w_2 \omega \hat{i}_3 \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$\omega = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{w}'_{1,L_1} \quad (2.29)$$

เนื่องจากมุมในสมการที่ (2.23) ที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยสมมุติว่า w'_{1,L_1} มีขนาดเล็กมาก ซึ่งทำให้ $\cos(w'_{1,L_1}) \cong 1$ และ $\sin(w'_{1,L_1}) \cong w'_{1,L_1}$ ดังนั้น

$$\cos(\Omega + w'_{1,L_1}) \approx \cos \Omega - w'_{1,L_1} \sin \Omega \quad (2.30)$$

$$\sin(\Omega + w'_{1,L_1}) \approx \sin \Omega + w'_{1,L_1} \cos \Omega$$

เมื่อ Ω เป็นผลรวมเชิงเส้นในการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง และจะสมมุติว่าเทอมที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันการโค้งงอและอนุพันธ์ของฟังก์ชันนี้ที่มีกำลังมากกว่าสองนั้นจะไม่นำมาพิจารณา พลังงานศักย์และพลังงานจลน์สามารถลดรูปให้อยู่ในรูปของพหุนามเอกพันธ์กำลังสอง (Quadratic form)

2.3.3 ผลคูณแบบจุดของความเร็ว (Dot Product)

โดยผลคูณแบบจุด (dot product) ของความเร็ว คือ

$$\dot{\vec{r}}_{1,x} \cdot \dot{\vec{r}}_{1,x} = L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{w}'_{1,L_1} + \dot{w}'_{1,L_1}{}^2 + w_{1,L_1}^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned}
\dot{\vec{r}}_{2,x} \cdot \dot{\vec{r}}_{2,x} = & L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{w}_{1,L_1} + \dot{w}_{1,L_1}^2 + x_2^2 \omega^2 + 2x_2 \omega \dot{w}_2 + \dot{w}_2^2 + 2L_1 \dot{\theta}_1 x_2 \omega \cos \theta_2 \\
& + 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{w}_2 \cos \theta_2 + 2\dot{w}_{1,L_1} x_2 \omega \cos \theta_2 + 2\dot{w}_{1,L_1} \dot{w}_2 \cos \theta_2 \\
& + w_{1,L_1}^2 \dot{\theta}_1^2 + w_2^2 \omega^2 + 2w_{1,L_1} \dot{\theta}_1 w_2 \omega \cos \theta_2
\end{aligned} \quad (2.32)$$

2.3.4 พลังงานจลน์และพลังงานศักย์

ในการกำหนดพลังงานจลน์ของระบบสองข้อต่อ ระยะโค้งงอตามขวางของแต่ละข้อต่อ $w_i(x, t); i = 1, 2$ สัมพันธ์กับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งซึ่งได้มาจากค่า $\theta_i; i = 1, 2$ ของแต่ละข้อต่อ ตามลำดับ พหุนามเอกพันธ์กำลังสองของพลังงานจลน์สำหรับข้อที่ 1 และข้อที่ 2 สามารถหาในรูป T คือ

$$\begin{aligned}
T = & T_{L_1} + T_{L_2} \\
= & \frac{1}{2} \int_0^{L_1} (\rho A)_1 (\dot{\vec{r}}_{1,x} \cdot \dot{\vec{r}}_{1,x}) dx_1 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{\vec{r}}_{1,x} \cdot \dot{\vec{r}}_{1,x}) \Big|_{x_1=L_1} \\
& + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} (\rho A)_2 (\dot{\vec{r}}_{2,x} \cdot \dot{\vec{r}}_{2,x}) dx_2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{\vec{r}}_{2,x} \cdot \dot{\vec{r}}_{2,x}) \Big|_{x_2=L_2}
\end{aligned} \quad (2.33)$$

2.3.5 สมการการเคลื่อนที่

ในสมการที่ (2.33) มวลที่จุดปลายจำลองเสมือนมวลโดยรวมที่ปราศจากความเฉื่อยของการหมุน การกำหนดพลังงานศักย์อาศัยสมมุติฐานให้เป็นบีมเอกรูป (Isotropic beams) ในสถานะที่โค้งงอ หลังจากโค้งงอแขนจะเข้าสู่ระนาบเดิมซึ่งสมบัติทางพลศาสตร์ของแขนเป็นไปตามกฎของ Hooke และสมมุติให้ระยะขจัดมีค่าน้อย ๆ ในการพิจารณา ซึ่งสมการการเคลื่อนที่สร้างโดยใช้วิธีการสมมุติโหมดและใช้สมการ Lagrange โดยใช้ฟังก์ชันการโค้งงอตามขวางของแต่ละแขนเขียนอยู่ในรูปผลรวมเชิงเส้นของฟังก์ชันพิกัดคูณด้วยพิกัดทั่วไปที่ขึ้นกับเวลาควบคุมพิกัด (Meirovitch, 1967) นั่นคือ

$$\begin{aligned}
w_1(x, t) = & \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i(x_1) a_i(t) = \phi^T a = a^T \phi \\
w_2(x, t) = & \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j(x_2) c_j(t) = \psi^T c = c^T \psi
\end{aligned} \quad (2.34)$$

โดยที่พหุนามเอกพันธ์กำลังสองของพลังงานศักย์ V คือ

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} (EI)_1 (w_1'')^2 dx_1 + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} (EI)_2 (w_2'')^2 dx_2 \quad (2.35)$$

2.4 สมการปริภูมิสถานะ (State-Space)

จากสมการ Lagrange, $L = T - V$ โดยการใช้สมการ (2.33) และ (2.35) จะได้สมการปริภูมิสถานะที่อนุพันธ์อันดับ 1 คือ

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$x = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad a^T \quad c^T \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{a}^T \quad \dot{c}^T]^T \quad (2.37)$$

และสมการสุดท้ายของระบบที่จะนำไปออกแบบระบบควบคุมจะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_L \\ \dot{\psi}_L \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_L \\ \dot{\psi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} & I \\ -\text{inv}(M_{\text{sys}}^*)K_{\text{sys}} & \underline{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \phi_L \\ \psi_L \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_L \\ \dot{\psi}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \text{inv}(M_{\text{sys}}^*)f \end{bmatrix} \cdot u \quad (2.38)$$

ซึ่งสมการ (2.38) นี้สามารถนำไปใช้งานในการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ในบทต่อไป

บทที่ 3

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงสาระสำคัญเกี่ยวกับทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซีพอเป็นสังเขปได้แก่ ทฤษฎีพื้นฐานของฟัซซี กฎพื้นฐานของระบบ (Rule-base system) จะมีกฎฟัซซี (Fuzzy rule) เป็นตัวตัดสินใจกลไกการทำงานของระบบควบคุมนั้นให้มีการปรับเปลี่ยนไปตามผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบ จุดมุ่งหมายของระบบควบคุมแบบฟัซซีก็คือการให้ระบบกฎพื้นฐานแบบฟัซซี (fuzzy rule-base system) นี้เข้าไปแทนการควบคุมแบบเก่าซึ่งใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุม (Skilled human operator)

3.2 ประพจน์แบบฟัซซี(Fuzzy Proposition)

ประพจน์คือ ข้อความแสดงถึงความจริงทางคุณสมบัติหรือค่าปริมาณของข้อความใดข้อความหนึ่ง หรือตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง

3.2.1 ประพจน์ฟัซซีเดี่ยว (Atomic fuzzy propositions)

ประพจน์แบบฟัซซีเดี่ยว คือ ข้อความแสดงคุณสมบัติทางฟัซซีของตัวแปรทางภาษา (Linguistic variable) ซึ่งมีรูปแบบคือ

$$X \text{ is } A$$

โดยที่

X = ตัวแปรทางภาษา เช่น ความเร็ว อุณหภูมิ เป็นต้น

is = คุณสมบัติของการเป็น

A = ค่าตัวแปรทางภาษา

3.2.2 ประพจน์ฟัซซีผสม (Compound fuzzy propositions)

ประพจน์ฟัซซีผสม คือ ประพจน์ฟัซซีเดี่ยวตั้งแต่ 2 ประพจน์ขึ้นไปซึ่งเชื่อมกันด้วยตัวเชื่อมต่างๆเช่น " AND " " OR " และ " NOT " เป็นต้น

ดังนั้น ประพจน์ฟัซซีผสมเทียบได้กับความสัมพันธ์ฟัซซี โดยมีตัวปฏิบัติการดังนี้

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย " AND " ใช้ตัวปฏิบัติการ ฟัซซีอินเตอร์เซกชัน ดังแสดง

$X \text{ is } A \text{ AND } Y \text{ is } B$

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

โดย μ เป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “ OR ” ใช้ตัวปฏิบัติการพีชชียูเนียน

$X \text{ is } A \text{ OR } Y \text{ is } B$

$$\mu_{A \cup B}(x, y) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “ NOT ” ใช้ตัวปฏิบัติการคอมพลีเมนต์ของพีชชีเซต

$X \text{ is } \text{NOT } A$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

3.3 กฎของพีชชี(Fuzzy Rules)

กฎของพีชชี เป็นข้อความแบบมีเงื่อนไข ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ IF-THEN ดังนี้

IF (fuzzy proposition) $THEN$ (fuzzy proposition)

เช่น

$IF X \text{ is } A \text{ THEN } Y \text{ is } B$

โดยที่ $X \text{ is } A$ เป็นส่วนเงื่อนไขของกฎ(rule antecedent)

$Y \text{ is } B$ เป็นส่วนข้อสรุปหรือผลลัพธ์ของกฎ(rule consequent)

การอนุมานเชิงซ้อน

การอนุมานเชิงซ้อน คือการตีความหมายกฎของพีชชี ซึ่งมีหลายวิธี แต่ที่ได้รับความนิยม คือวิธีการอนุมานเชิงซ้อนที่ใช้โดย Mamdani [18]

กำหนดให้

$IF (R_1) \text{ THEN } (R_2)$

เป็นกฎของพีชชี โดย R_1 เป็นความสัมพันธ์พีชชีใน $X = X_1 \times \dots \times X_n$, R_2 เป็นความสัมพันธ์พีชชีใน $Y = Y_1 \times \dots \times Y_n$ และ x และ y เป็นตัวแปรลึงกวิสติกใน X และ Y ตามลำดับ

Mamdani Implication คือความเป็นความสัมพันธ์ฟัซซี Q ใน $X \times Y$ ด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังแสดงในสมการ

$$\mu_Q(x, y) = \min\{\mu_{R_1}(x), \mu_{R_2}(y)\}$$

หรือ

$$\mu_Q(x, y) = \mu_{R_1}(x) \times \mu_{R_2}(y)$$

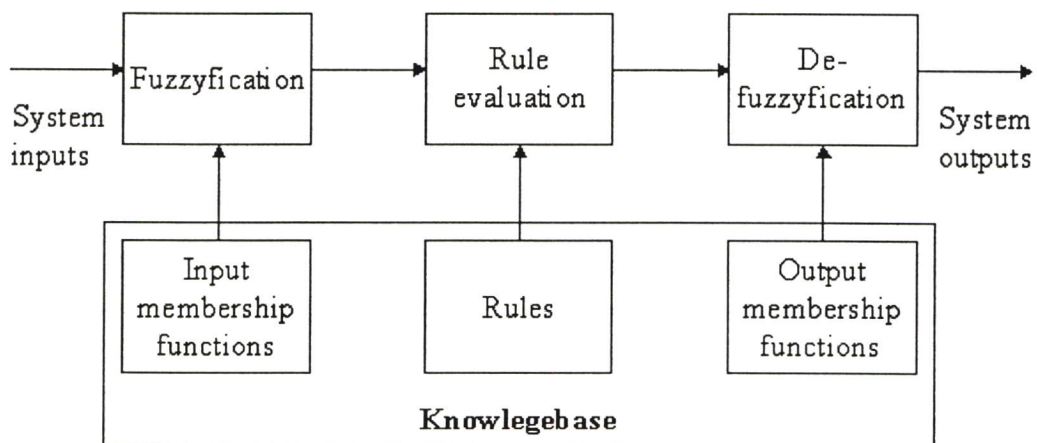
3.4 ตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Controller)

ตัวควบคุมฟัซซีที่กล่าวนี้จะเป็นตัวควบคุมแบบใช้ฐานความรู้ (Knowledge base) หรือ ประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ เป็นกฎหรือแนวทางในการควบคุมเราจะเรียกตัวควบคุมได้อีกชื่อหนึ่งว่า “ตัวควบคุมฟัซซีแบบฐานความรู้” (Fuzzy Knowledge Base Controller : FKBC)

3.4.1 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบฐานความรู้

โครงสร้างของ ตัวควบคุมฟัซซีแบบฐานความรู้ (FKBC) จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังแสดงในรูป

1. ฟัซซิฟิเคชันโมดูล (Fuzzyfication Module)
2. ฐานความรู้ (Knowledge Base)
3. กลไกการอนุมาน (Inference Engine)
4. ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Module)



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี

3.4.1.1 ฟัชซีฟิเคชันโมดูล ประกอบด้วย 2 ส่วน

การนอมอลไลซ์เซชัน (Normalization) ทำหน้าที่ เปลี่ยนสเกลจากค่าทางกายภาพของตัวแปรสถานะไปสู่เอกภพสัมพัทธ์ซึ่งถูกนอมอลไลซ์แล้ว

ฟัชซีฟิเคชัน (Fuzzyfication) ทำหน้าที่ เปลี่ยนค่าเชิงปริมาณที่เป็นคลิซิปเซตของตัวแปรสถานะไปเป็นฟัชซีเซต โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

3.4.1.2 ฐานความรู้ฟัชซี (Fuzzy Knowledge base) ประกอบด้วย 2 ส่วน

ฐานข้อมูล เป็นส่วนที่เก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต ค่าเอกภพสัมพัทธ์ และสเกลต่างๆ ที่ใช้ในการนอมอลไลซ์เซชัน และดีนอมอลไลซ์เซชัน

ฐานกฎ เป็นส่วนที่เก็บกฎที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของ *IF-THEN*

IF (process state) THEN (control output)

3.4.1.3 กลไกการอนุมาน (Inference Engine)

กลไกการอนุมานถูกใช้เพื่อรวมกฎฟัชซีในฐานความรู้เพื่อหาข้อสรุป ซึ่งมีหลายวิธี ดังนี้

1. วิธี Max-min วิธีการอินเฟอเรนซ์แบบนี้ จะใช้ตัวปฏิบัติการ *min* การเชื่อมโยงกันของประพจน์แบบฟัชซีในส่วนเงื่อนไขของกฎแต่ละกฎซึ่งจะได้ระดับความเข้มของข้อสรุปในแต่ละกฎและใช้ตัวปฏิบัติการ *max* ในการรวมส่วนข้อสรุปแต่ละกฎเข้าด้วยกันเป็นข้อสรุปสุดท้าย ดังแสดงในสมการ และ รูปที่

โดยที่

$$\mu_B(y) = \max_j \min(\beta_j, \mu_{B_j}(y))$$

$\mu_B(y)$ = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปหลังจากทำการอินเฟอเรนซ์

β_j = ระดับความเข้มของกฎที่ j

$\mu_{B_j}(y)$ = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปในกฎที่ j

2. วิธี Max-product วิธีการอินเฟอเรนซ์แบบนี้จะใช้ตัวปฏิบัติการ "*" (product) ในการอิมพลีเคชัน และใช้ตัวปฏิบัติการ *max* ในการรวมข้อสรุปของกฎต่างๆ เข้าด้วยกัน ส่วนการเชื่อมโยงระหว่าง ประพจน์แบบฟัชซีในส่วนเงื่อนไขของกฎจะใช้ตัวปฏิบัติการ *min* หรือ *product* ใดอย่างหนึ่ง ดังแสดง

$$\mu_{B'}(y) = \max_j (\beta_j * \mu_{B_j}(y))$$

โดยที่

$\mu_{B'}(y)$ = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปหลังจากทำการอินเฟอเรนซ์

β_j = ระดับความเข้มของกฎที่ j

$\mu_{B_j}(y)$ = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปในกฎที่ j

3. วิธี Sum-product วิธีการอินเฟอเรนซ์แบบนี้ใช้ตัวปฏิบัติการ "*" ในการอิมพลีเคชัน เช่นเดียวกับวิธี Max-product แต่การรวมข้อสรุปของกฎต่างๆจะใช้ตัวปฏิบัติการ sum ดังแสดงใน

$$\mu_{B'}(y) = \sum_j \beta_j * \mu_{B_j}(y)$$

3.4.1.4 ดิฟฟิวซิเคชัน (Defuzzification) ประกอบด้วย 2 ส่วน

ดิฟฟิวซิเคชัน ทำหน้าที่แปลงค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อสรุปที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าคลิซิปเซต ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการควบคุมระบบต่อไป วิธีการดิฟฟิวซิเคชันนั้นมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

1. วิธีจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity) กำหนดค่าที่ได้จากการดิฟฟิวซิไฟให้เท่ากับ y_c ซึ่งเป็นค่าศูนย์กลางพื้นที่ซึ่งครอบคลุมด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อสรุปของแต่ละกฎ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu_{B'}(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{B'}(y_i)}$$

2. วิธีผลรวมศูนย์กลาง (Center of Sums) วิธีการนี้จะหลีกเลี่ยงการนำฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้จากการอนุมานมาคูณเนี่ยกัน ซึ่งจะนำมารวมกันแทนซึ่งทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่เร็ว ค่า y_c คำนวณได้จาก

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot [\mu_{B_1}(z_i) + \mu_{B_2}(z_i) + \dots + \mu_{B_n}(z_i)]}{\sum_{i=1}^n [\mu_{B_1}(z_i) + \mu_{B_2}(z_i) + \dots + \mu_{B_n}(z_i)]}$$

3. วิธีค่ากลางของค่าสูงสุด (Mean of Maxima) กำหนดค่าที่ได้จากการดิฟฟิไซไฟด์ให้เท่ากับ y_c คือ ค่าเฉลี่ยของสมาชิกที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเออร์ทพุทเป็นหนึ่ง สามารถหาได้จากสมการ

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{m}$$

โดยที่ y_i คือสมาชิกที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกของเออร์ทพุทเป็นหนึ่ง

m คือ จำนวนสมาชิกที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกของเออร์ทพุทเป็นหนึ่ง

4. วิธีโมเมนต์ (moment) ซึ่งก็คือวิธีหาค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ย ซึ่งใช้ค่าคลิธิ์ป ของแต่ละเออร์ทพุท B_i และสร้างค่าถ่วงน้ำหนักโดยใช้ความสูงของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้จากการอินทิเกรตของแต่ละกฎ แทนด้วย h_1 ดังนั้น ค่า y_c สามารถคำนวณได้จาก

$$y_c = \frac{y_1 \cdot h_1 + y_2 \cdot h_2 + \dots + y_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}$$

บทที่ 4

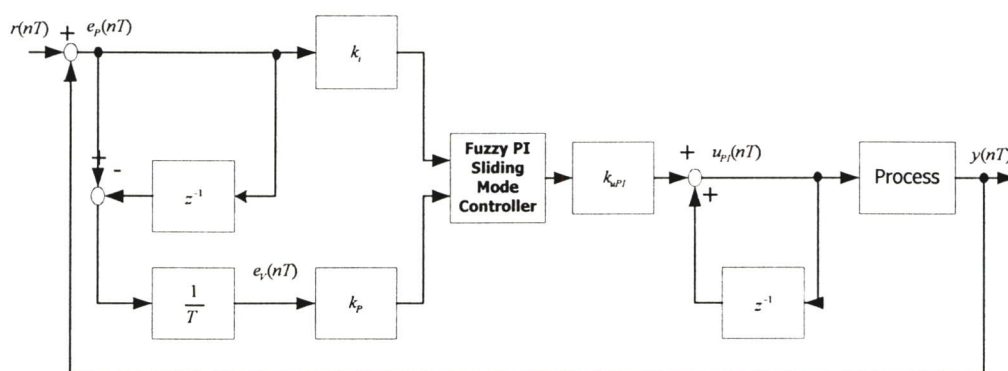
การออกแบบการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลอ่อนตัว สองข้อต่อ ด้วยวิธีฟัซซีพีไอ-สไลดิงโหมด

4.1 บทนำ

การออกแบบการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ ด้วยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีพีไอ-สไลดิงโหมด (Fuzzy Proportional Integral Sliding Mode Control : FPISC) บนพื้นฐานการควบคุมแบบฟัซซีพีไอต้นแบบจากการพัฒนาของ Chen และคณะ [29,30] จุดประสงค์ของการออกแบบชนิดใหม่นี้ได้ตัวควบคุมที่ทำให้เกิดผลการตอบสนองที่ดี ผลสำเร็จที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีประสิทธิภาพและทำให้ระบบคงทนดีเลิศ แต่ยังคงรักษาโครงสร้างการควบคุมแบบฟัซซีพีไอต้นแบบไว้ โดยได้เพิ่มโครงสร้างการควบคุมแบบสไลดิงโหมด ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบสามารถที่จะเสริมสร้างระบบการควบคุมซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้สามารถจัดปัญหาการสั่นในช่วงที่สัญญาณเข้าหาระนาบสไลดิงโหมดโดยผลของกฎการควบคุมแบบฟัซซีพีไอ หรืออีกนัยหนึ่งองค์ประกอบการควบคุมแบบสไลดิงโหมดสามารถรับรองผลวิถีโคจรเอาท์พุทจะลู่เข้าหาขอบเขตการทำงานของการควบคุมแบบฟัซซีพีไอ ซึ่งสามารถรับมือการภาระหน้าที่เพื่อที่จะปรับการควบคุมให้ราบเรียบสู่จุดหมายสภาวะคงตัวในช่วงเวลาที่สั้น

4.2 การออกแบบการควบคุมฟัซซีพีไอสไลดิงโหมด

การบรรยายถึงการออกแบบ FPISC การหาอนุพันธ์และรายละเอียดทางรูปแบบคณิตศาสตร์ จะแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลัก คือ การควบคุมแบบฟัซซีพีไอ และการควบคุมแบบสไลดิงโหมด โดยหลักการ การควบคุมแบบสไลดิงโหมดจะถูกใช้เป็นตัวหลักในการขณะเริ่มทำงาน และการควบคุมแบบฟัซซีพีไอเป็นการทำงานเสริมต่อจากการควบคุมแบบสไลดิงโหมด โดยในหน้าที่แรกสุดการควบคุมแบบสไลดิงโหมดจะทำหน้าที่ในการควบคุมให้ถึงจุดเส้นทางเดิน โดยการวางระบบทางด้านเอาท์พุทลงในบริเวณการออกแบบ การควบคุมแบบฟัซซีพีไอจึงทำหน้าที่ต่อจากนั้นในการควบคุมแบบละเอียดสำหรับการเข้าถึงเส้นทางสู่ค่าเป้าหมายสุดท้ายการควบคุมแบบสไลดิงโหมดจะเป็นมาตรฐานหนึ่งขณะที่การควบคุมแบบคือการควบคุมที่เป็นการพัฒนาขึ้นใน [31,32], [33,34] ที่แสดงใน ภาพที่ 4.1 ซึ่งจะทบทวนในบทนี้และจะเพิ่มเติมในบทย่อย ความเป็นมาของการควบคุมแบบ FPISC จะบรรยายในรายละเอียดบางส่วน



ภาพที่ 4.1 แสดงระบบการควบคุมแบบฟัซซีพีไอ

4.3 การควบคุมแบบฟัซซีพีไอ [31,32]

การควบคุมแบบฟัซซีพีไอถูกออกแบบบนพื้นฐานของการควบคุมพีไอดิจิทัลแบบดั้งเดิม โดยการแทนพจน์ $T\Delta u_{PI}(nT)$ ของการควบคุมแบบดิจิทัลพีไอดั้งเดิมด้วย $k_{uPI} \Delta u_{PI}(nT)$ ของการควบคุมแบบฟัซซีพีไอ ที่ $T > 0$ คือค่าคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่าง $\Delta u_{PI}(nT)$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงการควบคุมสัญญาณสุ่มที่ $nT, n = 0, 1, 2, \dots$, และ K_{uPI} คือค่าอัตราการขยายการควบคุมแบบฟัซซี ดังนั้นกฎการควบคุมจะได้

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{uPI} \Delta u_{PI}(nT) \quad (4.1)$$

โดยที่ K_{uPI} คืออัตราการขยายของตัวควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy control gain)
 K_{PI} คืออัตราการขยายของตัวควบคุมแบบ PI (Proportional Integral gain)
 K_I คืออัตราการขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral gain)

4.4 การฟัซซีพีเคชัน

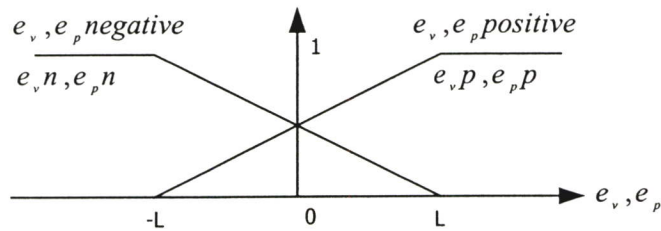
การควบคุมแบบฟัซซีพีไอ จะมี 2 อินพุตดังแสดงใน ภาพที่ 4.2 โดยมีสัญญาณความผิดพลาดของเส้นทางสู่ค่าเป้าหมาย

$$e_p(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \quad (4.2)$$

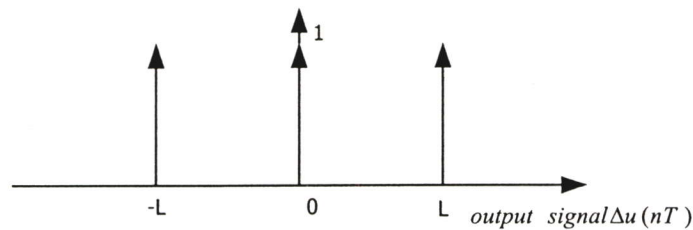
และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความผิดพลาด (อัตราความเร็ว)

$$e_v(nT) = \frac{e_p(nT) - e_p(nT - T)}{T} \quad (4.3)$$

การควบคุมแบบพีซีพีไอจะมีเอาต์พุตเพียง 1 ค่า ซึ่งเรียกว่า สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสะสม จะแสดงโดย $\Delta u(nT)$ ใน ภาพที่ 4.3 หลังจากที่ได้ตัดสินใจในการออกแบบจะทำการเลือกค่าคงที่ $L > 0$ โดยที่ L คือ ค่าพารามิเตอร์การควบคุมหรือเกณฑ์การควบคุม



ภาพที่ 4.2 แสดงความเป็นสมาชิกด้านอินพุต



ภาพที่ 4.3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้านเอาต์พุต

4.5 สไลดิงโหมดและกฎการควบคุมแบบพีซีพี

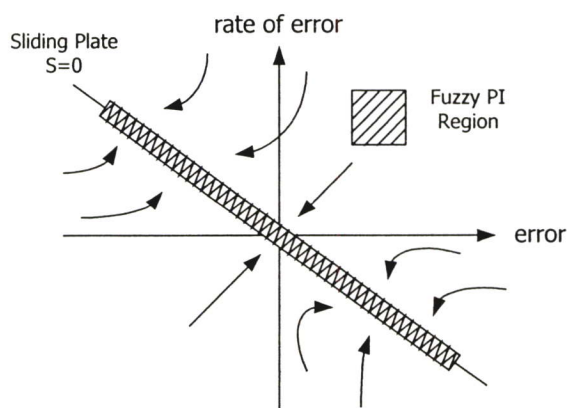
ในรูปแบบการควบคุมแบบสไลดิงโหมด [35] ฟังก์ชันความอิ่มตัว (saturation function) ของตัวแปร y จะถูกใช้ในการกำจัดผลของการสั่นดัง ภาพที่ 4.4 ที่กำหนดโดย

$$sat(y) = \begin{cases} y, & \text{if } |y| \leq 1 \\ \text{sgn}(y), & \text{if } |y| > 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

การกำหนดของเขตภาระหน้าที่สำหรับ ทั้ง 2 ตัวควบคุมที่รวมอยู่ใน FPISC จะแสดงใน ภาพที่ 4.5 ฟังก์ชันความอิ่มตัวใน (4.4) จะถูกทำการปรับปรุงเป็น

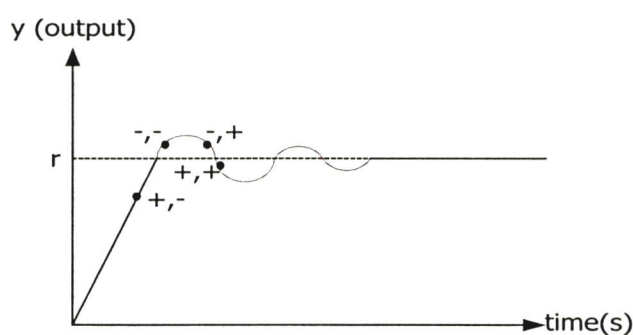
$$sat(y) = \begin{cases} \text{fuzzyPI}, & \text{if } |y| \leq L \\ \text{sgn}(y), & \text{if } |y| > L \end{cases} \quad (4.5)$$

โดยฟuzzyพีไอจะแสดงถึงปฏิบัติการควบคุมที่ถูกทำให้เกิดจากการควบคุมแบบฟuzzyพีไอถ้าเส้นทางโคจรบนความผิดพลาดบนระนาบเฟสตกลงสู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.6

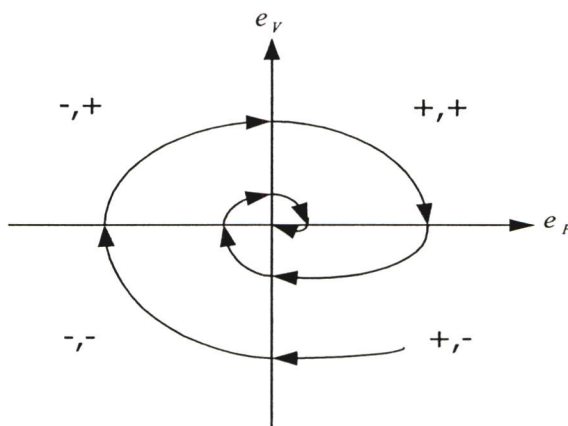


ภาพที่ 4.4 ระนาบสไลด์ิงและแนวคิดการควบคุม

การใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกบรรยายแล้วในบทย่อที่ 4.4 กฎการควบคุมแบบฟuzzy ถูกสร้างให้สอดคล้องกับภาพที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.6. โดยสรุปใน ตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.5 การวิเคราะห์กฎการควบคุมจากระบบผลตอบสนองขั้นบันไดในเทอมฟังก์ชัน (e_p ,



ภาพที่ 4.6 ระบายการตอบสนองบนระนาบเฟส

ตารางที่ 4.1 กฎการควบคุมพีซี PI

Rule	e_p	e_v	$\Delta u (nT)$	Selected Output
R1	P	P	Positive	L
R2	P	N	Zero	0
R3	N	P	Zero	0
R4	N	N	Negative	-L

ในตารางที่ 4.1 $e_p = r - y$ คือค่าความผิดพลาด , P=Positive , N=Negative

$e_v = \Delta e_p / T = -\Delta y / T$ คือค่าอัตราความผิดพลาด

T คือเวลาในการสุ่มตัวอย่าง

$PI - output$ คือการควบคุมพีซีด้านเอาต์พุต

วิธีการของกฎเกณฑ์เหล่านี้สามารถทำความเข้าใจจาก ภาพที่ 4.5. และ ภาพที่ 4.6.

- กฎข้อที่ 1 (R1) : จากตารางที่ 4.1 ให้ e_p, P (ความผิดพลาดทางด้านบวก) และ e_v, P (อัตราความผิดพลาดทางด้านบวก) ที่อยู่ในช่วงของ $r > y$ จะต้องควบคุมเอาต์พุต y ให้เข้าสู่ในทิศทางที่ต้องการ ใช้ค่า r หรือ L เป็นบวก
- กฎข้อที่ 2 (R2) : เมื่อระบบทำงานอยู่ในช่วงที่ y ไม่ได้ถูกควบคุม ซึ่งจะมีเอาต์พุตจะไปถึงจุดหมายโดยธรรมชาติ
- กฎข้อที่ 3 (R3) : จะมีความคล้ายคลึงกับกฎข้อที่ 2 (R2) แต่แทนที่ e_p, n และ e_v, p การนำ ระบบความผิดพลาดเอาต์พุตให้ไปถึงศูนย์ โดยปราศจากการใช้การควบคุมเอาต์พุต จะเคลื่อนที่กลับไปจุดเป้าหมายโดยตัวของมันเอง
- กฎข้อที่ 4 (R4) : เป็นขั้นตอนการควบคุมกลับด้านไปที่ขั้นตอนกฎข้อที่ 1 ซึ่งขณะนี้ e_p, n และ e_v, n เอาต์พุต y จะผ่านเส้น $r (y > r)$ ในจุดอิมตัว ดังนั้นมันจะต้องถูกควบคุมเพื่อกลับไปตำแหน่ง r

4.6 การดิฟฟิเคชัน

ในขั้นตอนการดิฟฟิเคชัน โดยทั่วไปจะใช้กรรมวิธี "ค่าจุดศูนย์กลางมวล" ในการดิฟฟิเคชัน ควบคุมที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมแบบพีซีพีไอ

$$\Delta u_p(nT) = (A * B) / C \quad (4.6)$$

โดย A = ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุท

B = ค่าเอาต์พุทที่สอดคล้องกับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุท

C = ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุท

ผลสุดท้ายที่แตกต่างกันของการนำเสนอตัวควบคุมฟuzzyพีไอ [31-34] ที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยสูตรทั้ง 9 ข้อ ที่มีการตัดสินใจใช้ในการควบคุมโครงสร้าง FPISC แบบใหม่จะมีสูตรที่ไม่ซับซ้อนเพียง 3 สูตร ที่สอดคล้องกับแต่ละอินพุทที่มีความเป็นไปได้การรวมกันของความผิดพลาดและอัตราความผิดพลาดที่กำหนดความผิดพลาดบนระนาบเฟสสำหรับจำกัดขอบเขตภายในสี่เหลี่ยมของตัวแปรฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $L \times L$ ตัวควบคุมฟuzzy PI จะขจัดผลของการสั่นที่เกิดจากการควบคุมแบบสไลดิงโหมด ด้วยวิธีนี้ยังเป็นการเพิ่มความคงทนให้กับระบบการควบคุมทั้งระบบ

ในขอบเขตอื่นทั้งหมดที่มีเลขหมาย 3 จะถูกกำหนดให้ใช้ตัวควบคุมแบบสไลดิงโหมด เพื่อควบคุมให้เข้าสู่เส้นทางโคจรผ่านเข้าไปในขอบเขตของ $L \times L$ ไปให้ถึงจุดศูนย์กลางของพื้นราบเพื่อให้ถึงจุดหมายของเส้นทางเดิน

ตัวแปรผิวพื้นสไลดิงสำหรับพื้นที่ที่ 3 กำหนดโดย

$$S = e_p + \lambda e_v \quad \text{ที่ } \lambda > 0 \quad (4.7)$$

กฎการควบคุมจะต้องถูกกำหนดเพื่อสร้างความมั่นคงให้ระบบเส้นทางโคจรของเอาต์พุทที่ จะต้องบรรลุถึงระนาบสลับเปลี่ยนในขอบเขตที่ควบคุมปฏิกริยาในตัวควบคุมแบบฟuzzyพีไอ ขั้นตอนมาตรฐานของการควบคุมแบบสไลดิงโหมด โดยการออกแบบระนาบสลับเปลี่ยน (switching surface) ของรูปแบบ

$$S(e_p) = 0 \quad (4.8)$$

สภาพการของอัตราส่วนที่เกิดขึ้นคือ

$$\frac{e_p}{e_v} = -\lambda \quad (4.9)$$

สำหรับการควบคุมในระบบเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง สภาพการการไปสู่จุดหมายจะถูกพัฒนาเป็น

$$\frac{S(nT + T) - S(nT)}{T} = -(\alpha S(nT) + \beta \operatorname{sgn}(S(nT))) \tag{4.10}$$

ที่ $\alpha, \beta > 0$

$\operatorname{sgn}(\ast)$ คือ ฟังก์ชันซิกนัม (signum function)

กฎการควบคุมอาจจะเป็นสาเหตุให้เส้นทางโคจรเกิดการเคลื่อนที่เป็นรูปฟันเลื่อย โดยช่วงขณะการสับเปลี่ยน (ก่อนที่จะถึงขอบเขตของการควบคุมแบบพีซีพีไอ) ดังนี้

$$u(e_p) = \begin{cases} u^+(e_p) = A & \text{when } S(e_p) > 0 \\ u^-(e_p) = -A & \text{when } S(e_p) < 0 \end{cases} \tag{4.11}$$

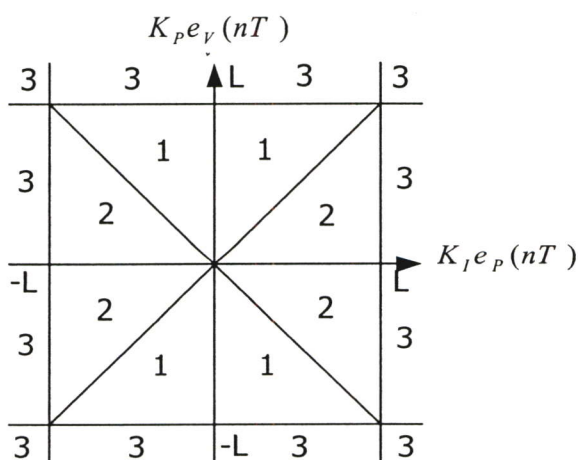
โดย $A > 0$ คือ สัญญาณควบคุมค่าคงที่

ดังนั้น เครื่องหมายของระนาบสไลด์ิง S จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลบวกของความผิดพลาดและอัตราความผิดพลาด สมการที่ (4.11) สามารถจะปรับปรุงเพิ่ม ตัวแปร S จะได้รูปแบบใหม่เป็น

$$u(e_p) = (\operatorname{sgn}(S))A \tag{4.12}$$

โดยทั่ว ๆ ไป อัตราของความเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจะมีน้อยกว่าความผิดพลาดในตัวเอง สมการที่ (4.12) จึงสามารถปรับปรุงใหม่ได้เป็น

$$u(e_p) = SA \tag{4.13}$$



ภาพที่ 4.7 พื้นที่การกระจายของค่ากลุ่มอินพุท

โดยสรุปในทุกขอบเขตบนระนาบเฟส แสดงใน ภาพที่ 4.7 จะได้สูตรที่ไม่ซับซ้อน 3 สูตร สำหรับ 20 พื้นที่ที่ทำการปรับปรุงจะได้

$$\begin{aligned} \Delta u_{pi}(nT) &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)|]} && \text{พื้นที่ที่ 1} \\ &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)|]} && \text{พื้นที่ที่ 2} \\ &= SA && \text{พื้นที่ที่ 3} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะพบว่าในพื้นที่ที่ 1,2 คือการใช้ควบคุมแบบพีซี PI ขณะที่การควบคุมแบบสไลดิง โหมดจะทำงานในพื้นที่ที่ 3 สูตรการควบคุมทั้งสามพื้นที่นี้จะเป็นกฎแจกการควบคุมซึ่งจะได้นำไป ใช้ในบทต่อไป

บทที่ 5

ผลของงานวิจัย

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นนำการออกแบบระบบการควบคุมด้วยวิธีพีซีพีไอ-สไลดิงโหมด มาใช้ในการควบคุมเพื่อลดการสั่นสะเทือนของแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ โดยแสดงผลจากการให้อินพุตการตอบสนองการดล (impulse response) พิจารณาผลการทดลองที่ขนาดของแขนกลขนาดต่าง ๆ เพื่อสามารถนำผลการจำลองผลไปใช้ในการออกแบบแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อเพื่อลดการสั่นขณะปฏิบัติงาน ในการทดลองจะใช้สมการปริภูมิสถานะ โดยกำหนดอินพุต และเอาต์พุตในรูปของการดล ที่ตำแหน่งมุมที่เบี่ยงเบน กำหนดค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียม $\rho = 2710 \text{ kg/m}^3$, พื้นที่หน้าตัดของแขนกล $A = 1.613 \cdot 10^{-5}$ ความเกร็งของการโค้งงอ $EI = 0.0684 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ค่ามุมต่าง ๆ ในสมการปริภูมิสถานะ

1. θ_1 คืออินพุตการดล ที่ทำการป้อนโดยตรงต่อตำแหน่งที่ทำให้ค่าของมุมที่เบี่ยงเบนไปจากแกนอ้างอิงของลำแขนที่ 1 หรือ L_1
2. θ_2 คืออินพุตการดล ที่ทำการป้อนโดยตรงต่อตำแหน่งที่ทำให้ค่าของมุมที่เบี่ยงเบนไปจากแกนอ้างอิงของลำแขนที่ 2 หรือ L_2
3. ϕ_1 คืออินพุตการดล ที่ทำการป้อนในเชิงกลต่อส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งเดิมของความยาวของลำแขนที่ 1 หรือ L_1
4. ψ_1 คืออินพุตการดล ที่ทำการป้อนในเชิงกลต่อส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งเดิมของความยาวของลำแขนที่ 2 หรือ L_2

โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีการจำลองผลทางด้านการตอบสนองทางอินพุตและเอาต์พุต การใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดทำการควบคุมลดการสั่นของแขนกลที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเป็นการทดลองใน 6 กรณีที่มีลักษณะความยาวของลำแขนและภาระมวล (mass load)

$$L_1=0.5 \text{ เมตร}, L_2=0.5 \text{ เมตร}, m_1=0.4 \text{ กิโลกรัม และ } m_2=0.1 \text{ กิโลกรัม}$$

$$L_1=0.5 \text{ เมตร}, L_2=0.5 \text{ เมตร}, m_1=0.45 \text{ กิโลกรัม และ } m_2=0.1 \text{ กิโลกรัม}$$

$$L_1=0.5 \text{ เมตร}, L_2=0.5 \text{ เมตร}, m_1=0.4 \text{ กิโลกรัม และ } m_2=0.2 \text{ กิโลกรัม}$$

$$L_1=0.6 \text{ เมตร}, L_2=0.6 \text{ เมตร}, m_1=0.4 \text{ กิโลกรัม และ } m_2=0.1 \text{ กิโลกรัม}$$

$$L_1=0.1 \text{ เมตร}, L_2=0.1 \text{ เมตร}, m_1=0.1 \text{ กิโลกรัม และ } m_2=0.1 \text{ กิโลกรัม}$$

$$L_1=0.5 \text{ เมตร}, L_2=0.5 \text{ เมตร}, m_1=0.4 \text{ กิโลกรัม และ } m_2=1 \text{ กิโลกรัม}$$

5.2 ผลการจำลองพารามิเตอร์การควบคุมเกินน้อย (Small-Overlap)

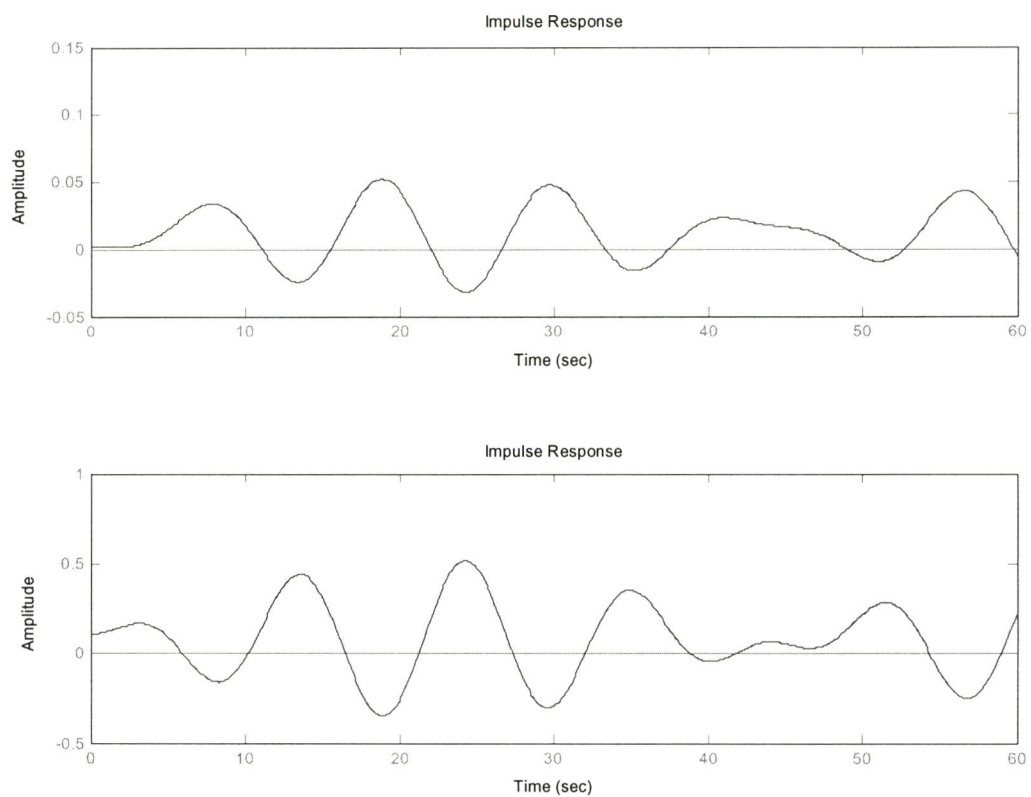
การจำลองผลในส่วนนี้เป็นการจำลองผลในการพิจารณาธรรมชาติของการสั้นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อจากการใช้การดลในแต่ละจุดจะไม่พิจารณาการหน่วง เนื่องจากมีผลน้อยมาก การจำลองผลโดยใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมที่ค่าเกินต่าง ๆ

ภาพที่ 5.1 แสดงค่าแอมพลิจูดเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอาท์พุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั้นของแขนกล เกิดขึ้นจากธรรมชาติของวัสดุและลักษณะบางของแขน ภาพที่ 5.2 แสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั้นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) ซึ่งจะเห็นได้ว่า แขนกลมีการสั้นของลำแขนลดลง และปลายแขนกลติดตามอินพุทขั้นบันได ได้เอาท์พุทตามต้องการ และภาพที่ 5.3 แสดงถึงระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดของแขนที่ 1 (L_1) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแขนกลโดยพิจารณาที่พารามิเตอร์การควบคุมเกิน $L=1$ แสดงในตารางที่ 5.1

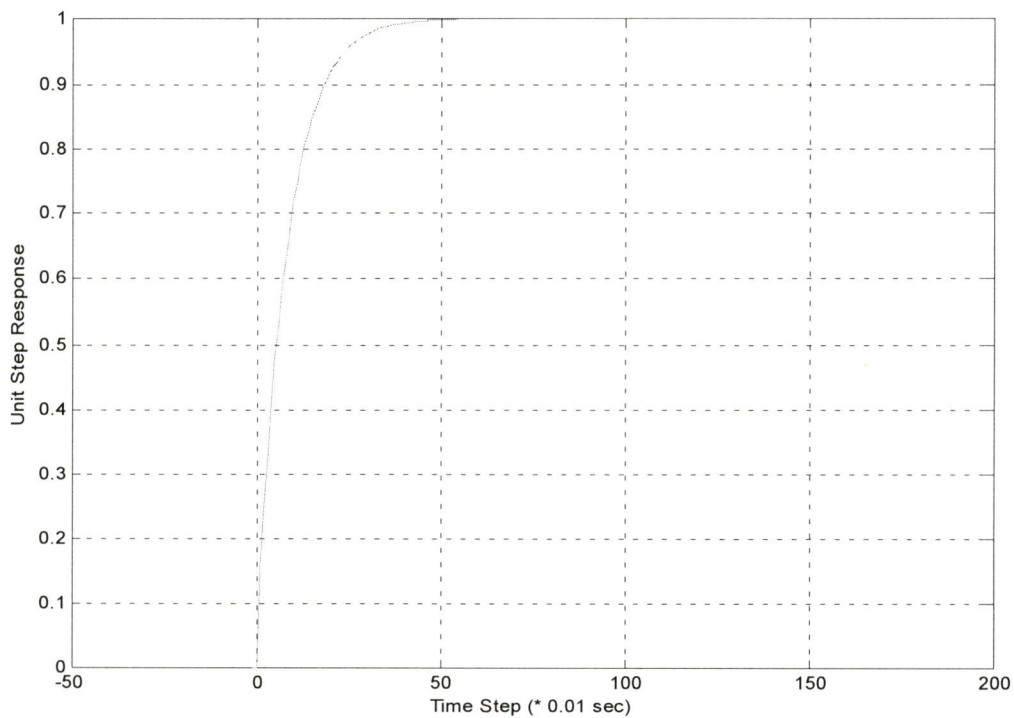
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ขนาดความยาว น้ำหนักของแขนกล การควบคุมโดยค่าเกิน

L, K_{pi}, K_i, K_{upi} , และค่าสัญญาณอินพุท A

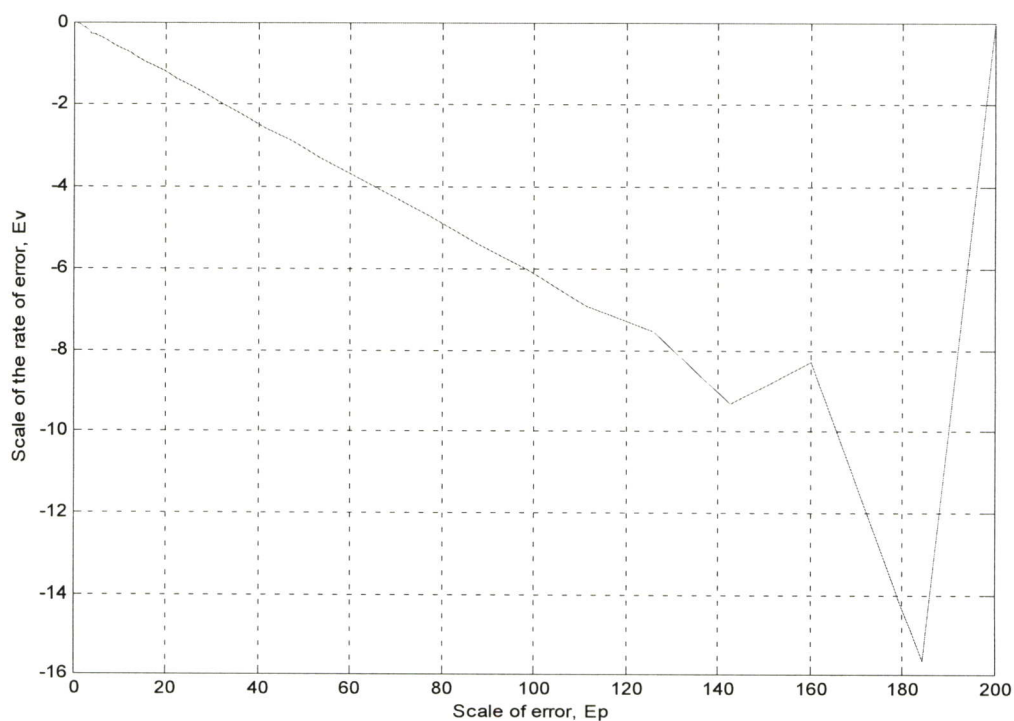
L_1 (เมตร)	L_2 (เมตร)	m_1 (กิโลกรัม)	m_2 (กิโลกรัม)	L	K_{pi}	K_i	K_{upi}	A	แขนที่ถูกควบคุม
0.5	0.5	0.4	0.1	1	1	0.2	1	0.4	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.4	0.1	1	0.2	1	1	0.1	แขนที่ 2
0.5	0.5	0.45	0.1	1	1	0.2	1	0.2	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.45	0.1	1	1	0.1	1	0.8	แขนที่ 2
0.5	0.5	0.4	0.2	1	0.8	0.1	1	1	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.4	0.2	1	1	0.1	1	0.7	แขนที่ 2
0.6	0.6	0.4	0.1	1	3	0.5	1	0.1	แขนที่ 1
0.6	0.6	0.4	0.1	1	3	0.5	1	0.1	แขนที่ 2
0.1	0.1	0.1	0.1	1	1	1	1	0.4	แขนที่ 1
0.1	0.1	0.1	0.1	1	0.3	0.3	1	1	แขนที่ 2
0.5	0.5	0.4	1	1	1	0.8	1	0.01	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.4	1	1	1	0.1	1	0.01	แขนที่ 2



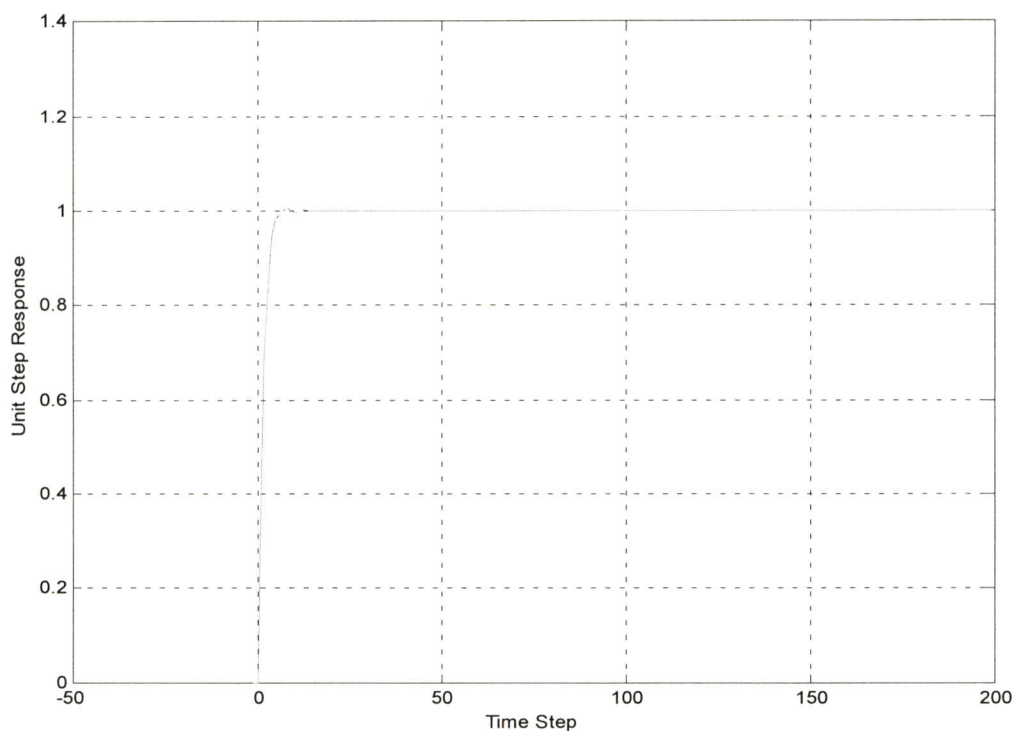
ภาพที่ 5.1 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$



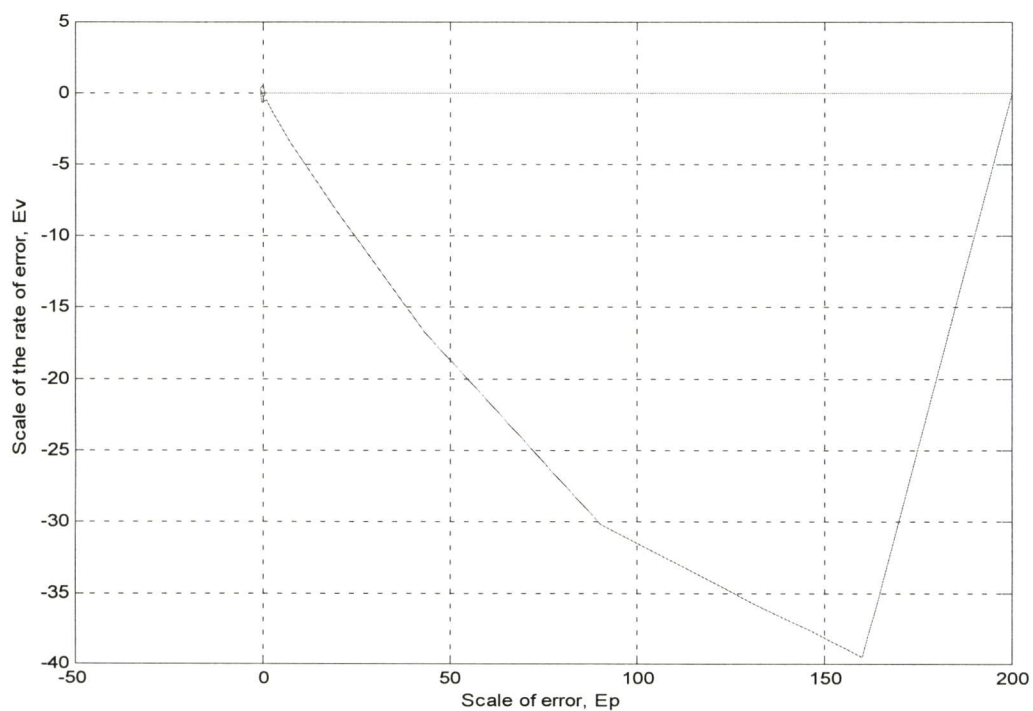
ภาพที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.2, K_{uPI}=1, A=0.4$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



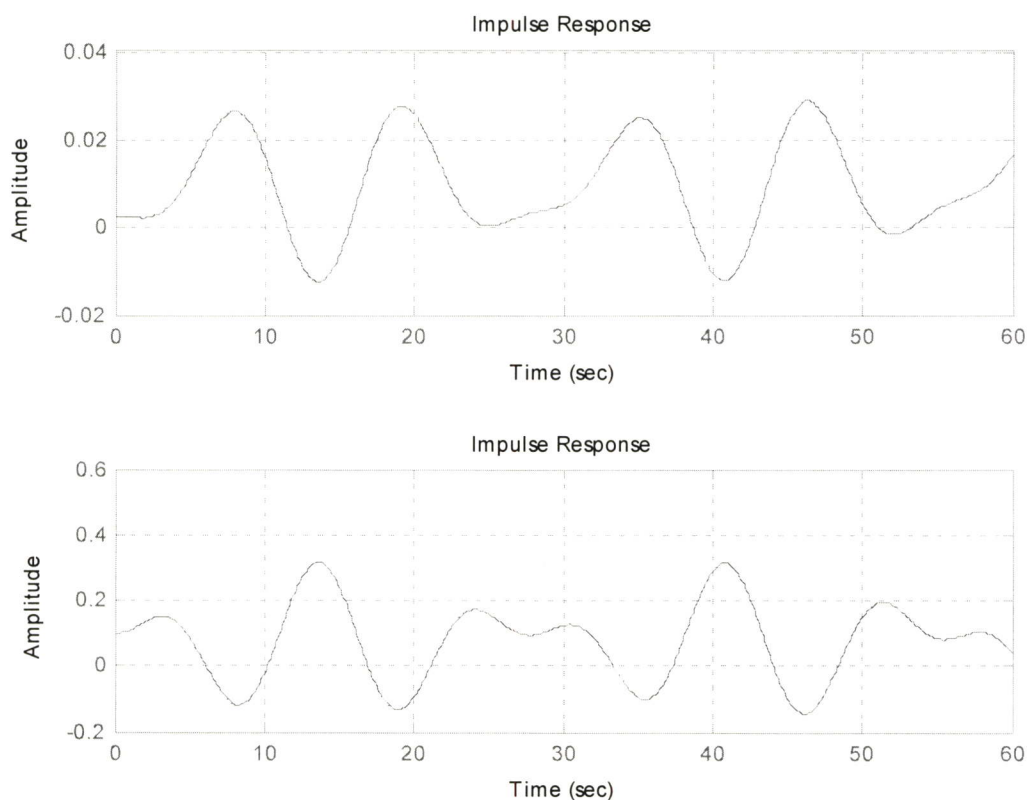
ภาพที่ 5.3 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.4 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=0.2, K_i=1, K_{uPI}=1, A=0.1$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

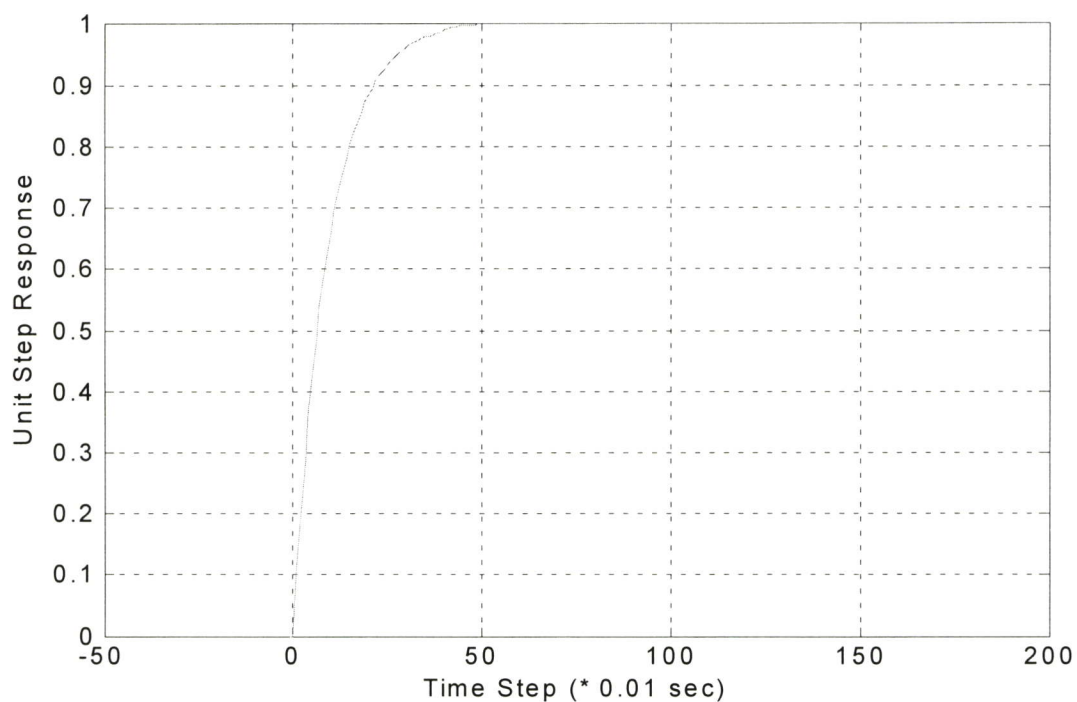


ภาพที่ 5.5 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2
(L_2)

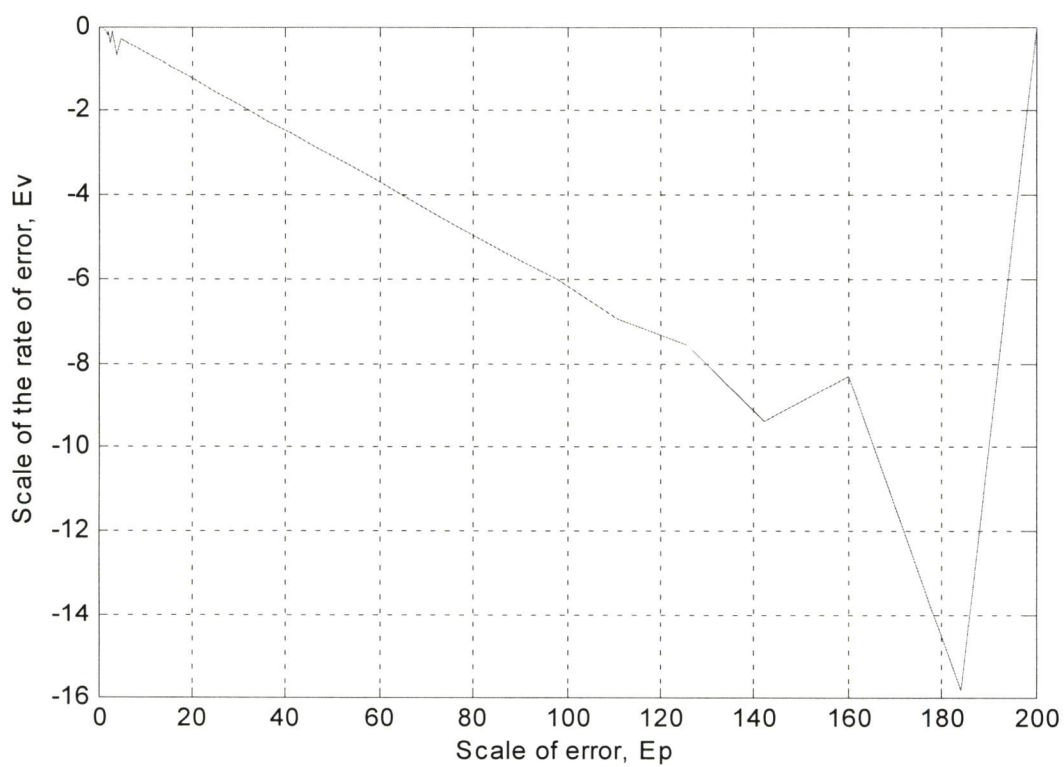


ภาพที่ 5.6 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.45$, $m_2=0.1$

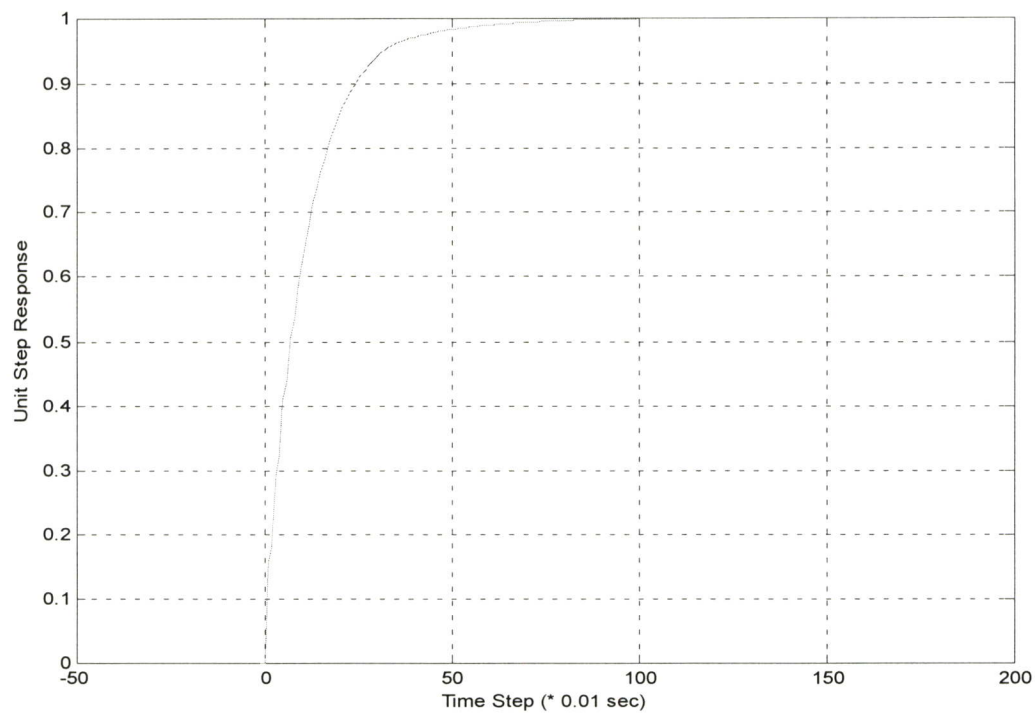
ภาพที่ 5.6 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.45$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลมีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดน้ำหนักที่ m_1 เพิ่มขึ้น โดยการใช้พารามิเตอร์การควบคุม $L=1$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกินค่าน้อย ภาพที่ 5.7-5.8 จะแสดงถึงการให้การควบคุมแบบพีซีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.9-5.10 จะแสดงถึงการให้การควบคุมแบบพีซีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าที่ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดเข้าสู่เป้าหมายที่ต่างกันและมีมากขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของ m_1 เพิ่มขึ้น



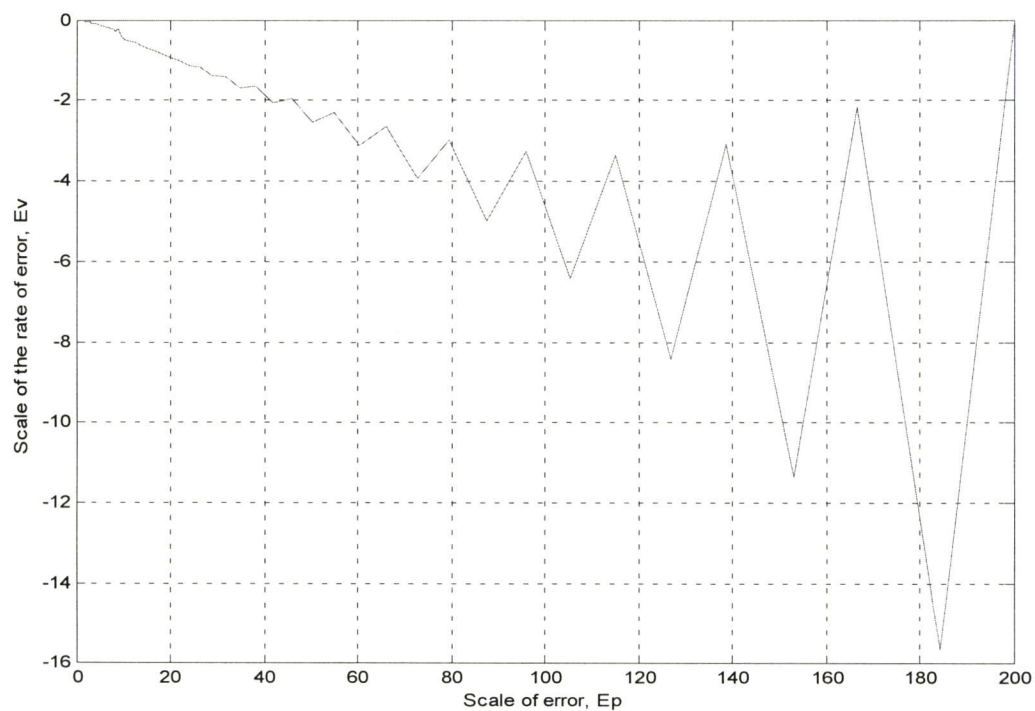
ภาพที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.2, K_{uPI}=1, A=0.2$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



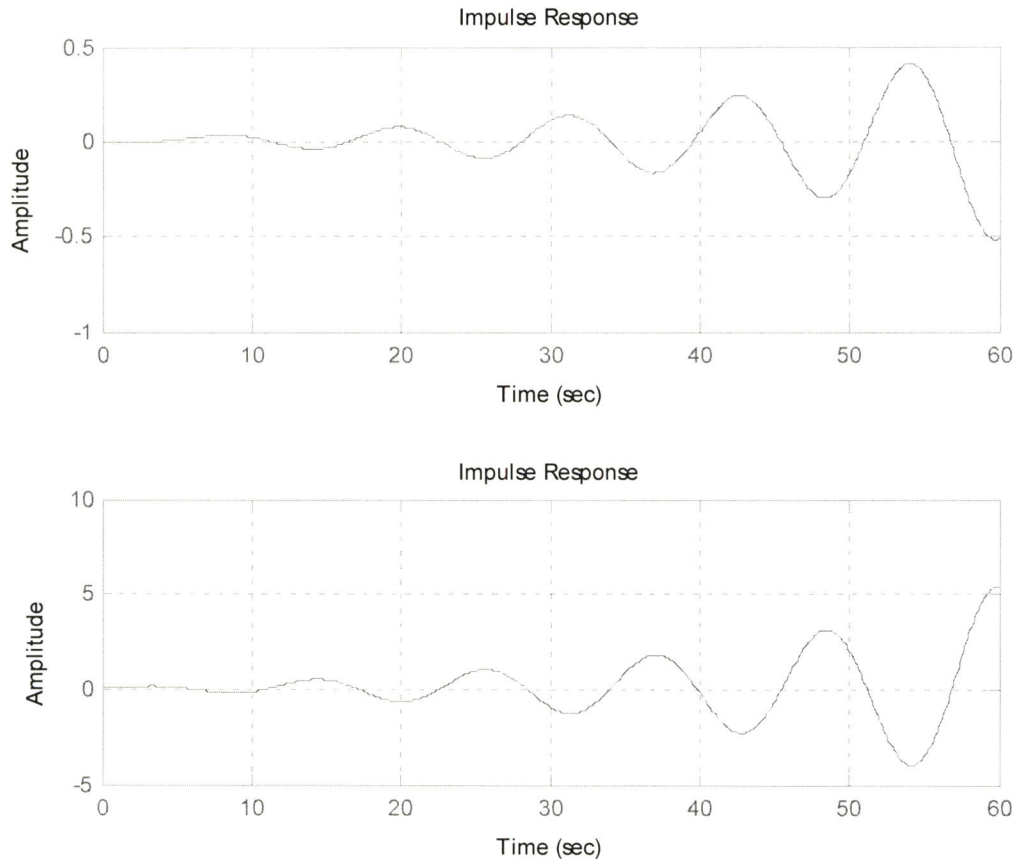
ภาพที่ 5.8 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองขั้นบันไดโดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.1, K_{uPI}=1, A=0.8$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

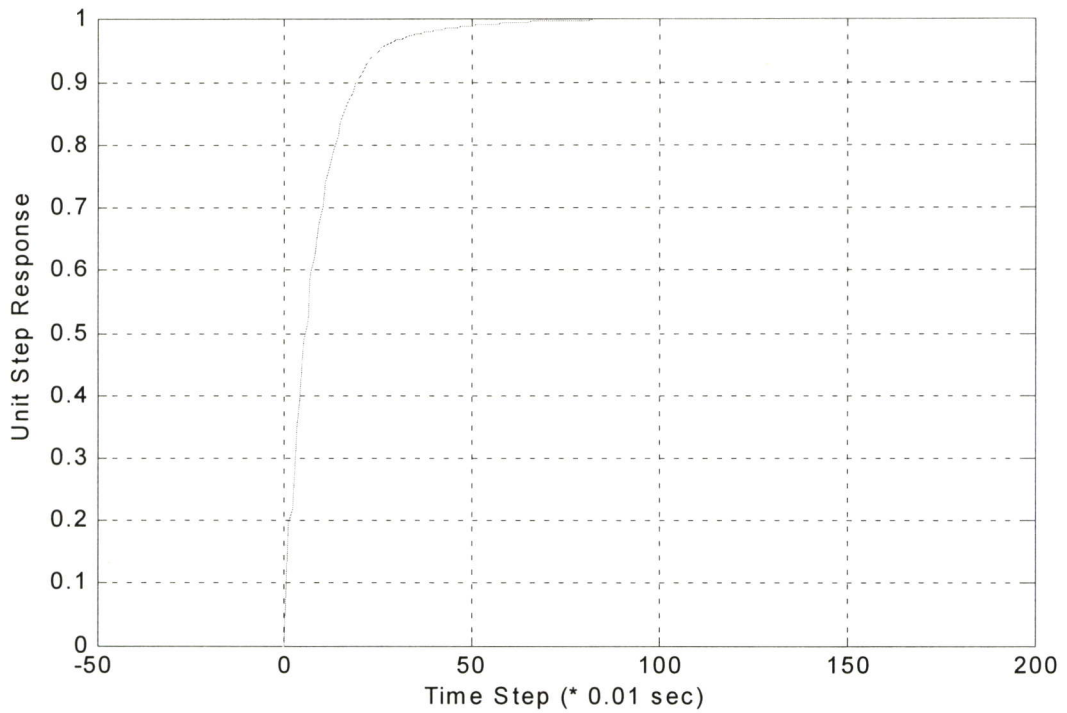


ภาพที่ 5.10 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2
(L_2)

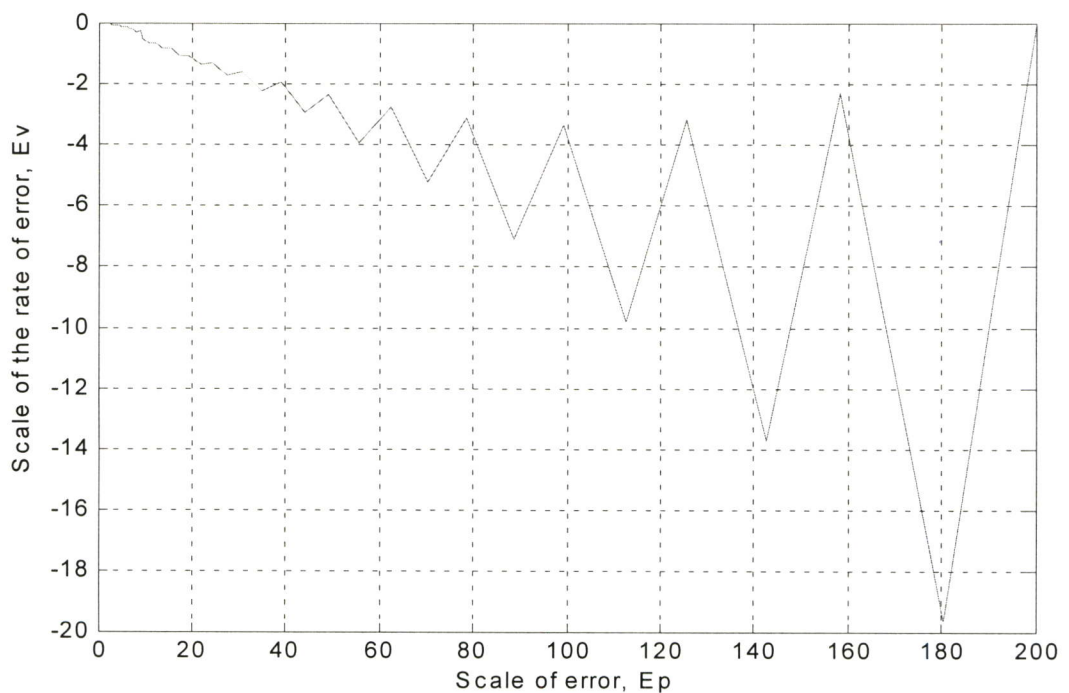


ภาพที่ 5.11 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.2$

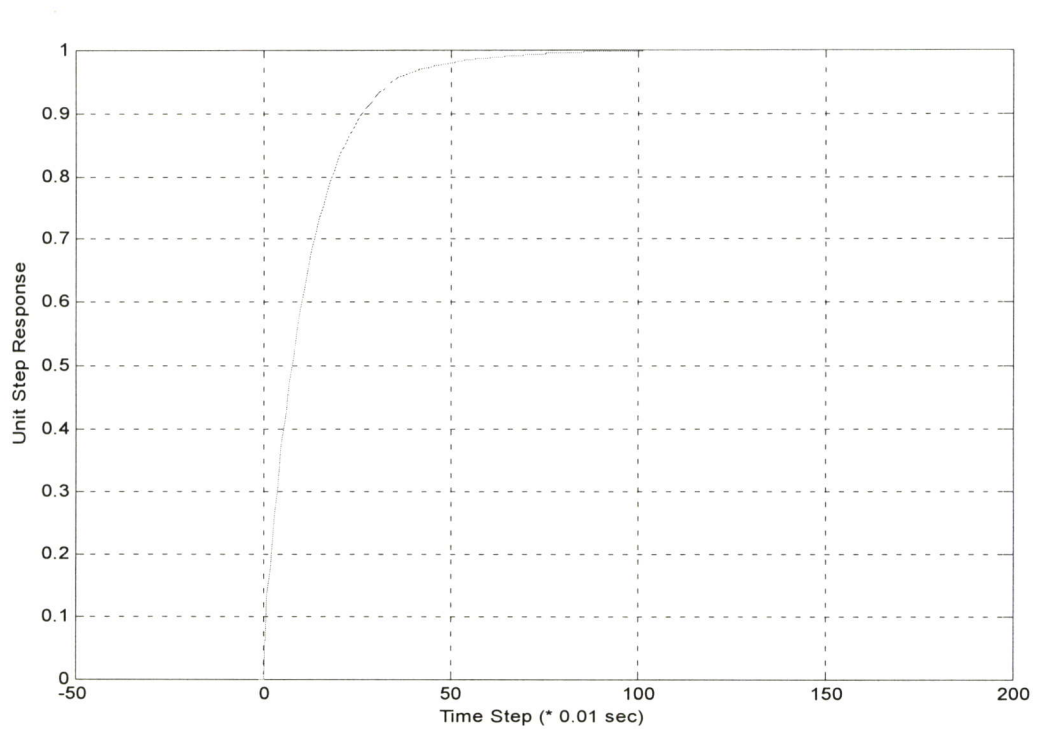
ภาพที่ 5.11 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.2$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลเกิดขึ้นที่ส่วนปลายอันเนื่องมาจากขนาดน้ำหนักที่ m_2 เพิ่มขึ้น โดยการใช้พารามิเตอร์การควบคุม $L=1$ ภาพที่ 5.12-5.13 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.14-5.15 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดเข้าสู่เป้าหมายที่ต่างกันและมีมากขึ้นเพราะน้ำหนักของ m_2 เพิ่มขึ้น ลักษณะการออกแบบชนิดนี้จะมีความยุ่งยากในการควบคุม เนื่องจากน้ำหนักจะถ่วงที่ส่วนปลาย เมื่อพิจารณาจากกราฟจะมีการสั่นตลอดเส้นทางสู่เป้าหมาย



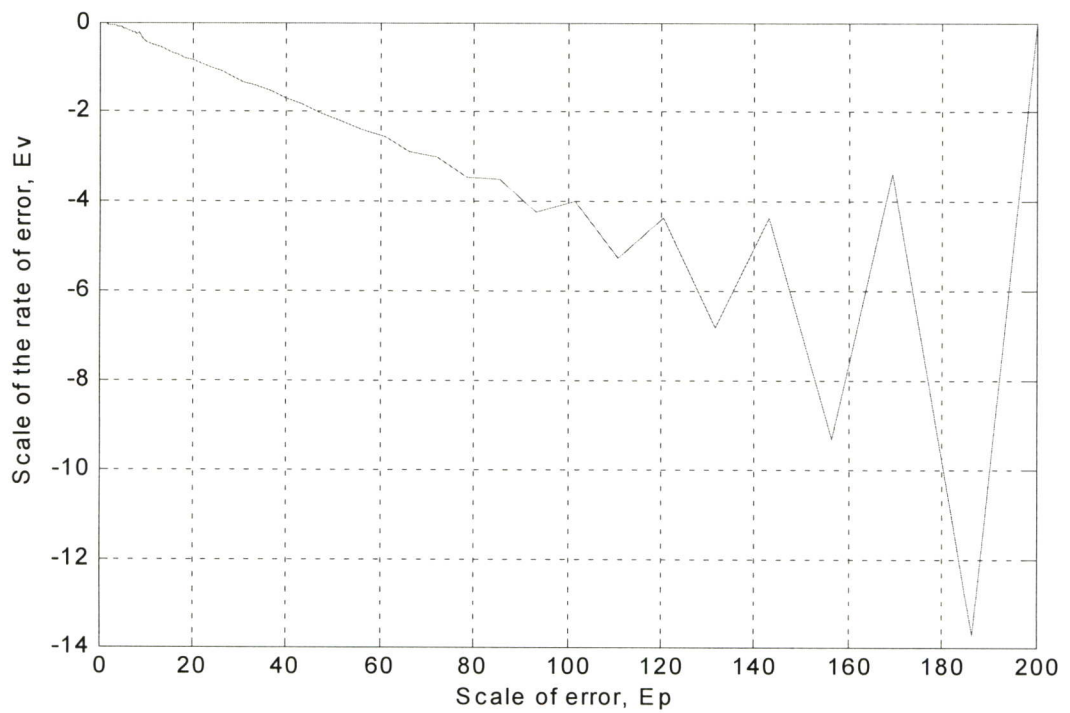
ภาพที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=0.8, K_i=0.1, K_{upi}=1, A=1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



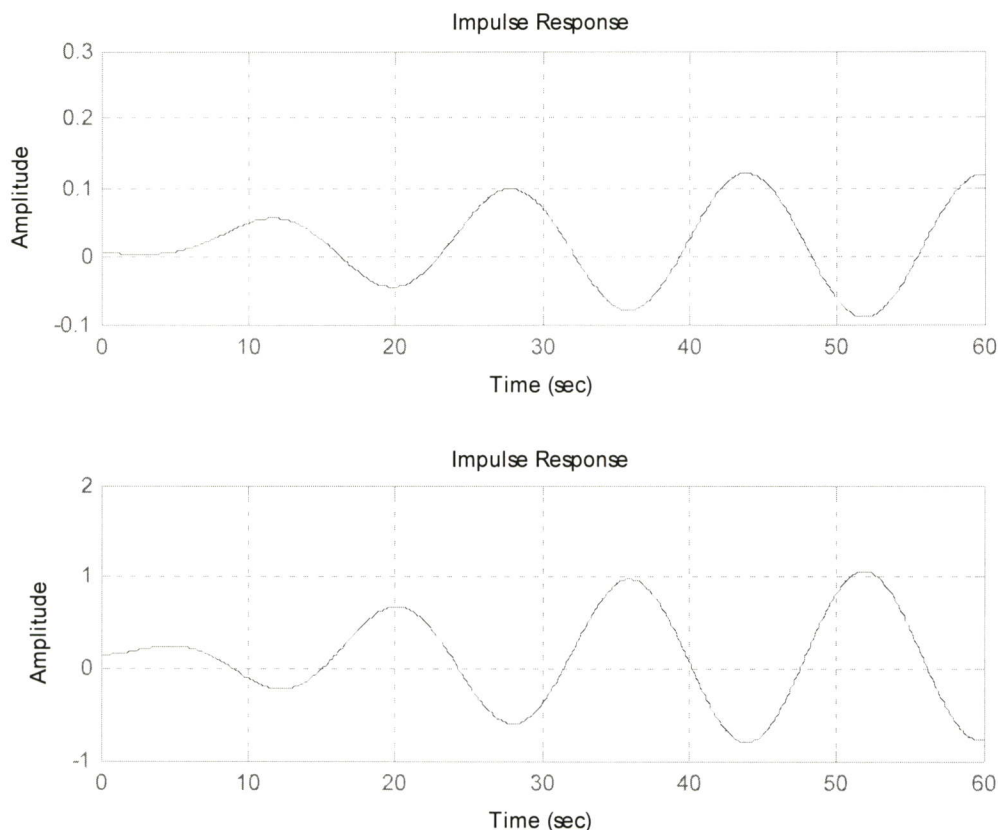
ภาพที่ 5.13 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.1, K_{uPI}=1, A=0.7$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

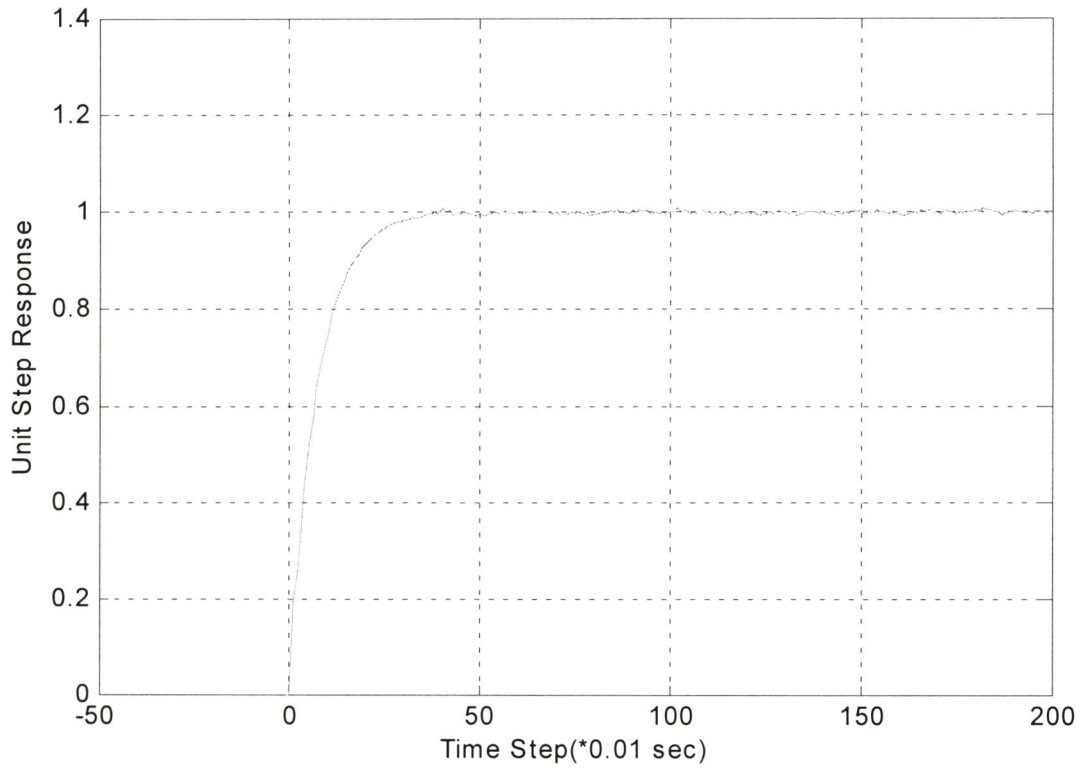


ภาพที่ 5.15 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2
(L_2)

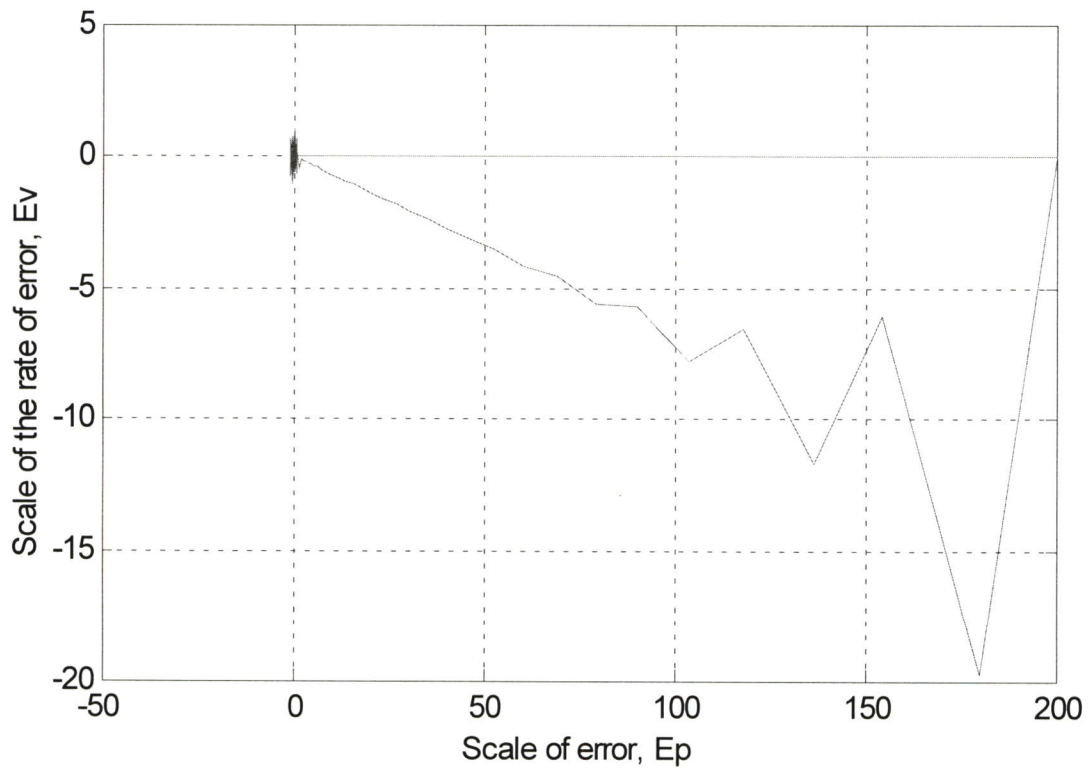


ภาพที่ 5.16 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.6$, $L_2=0.6$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$

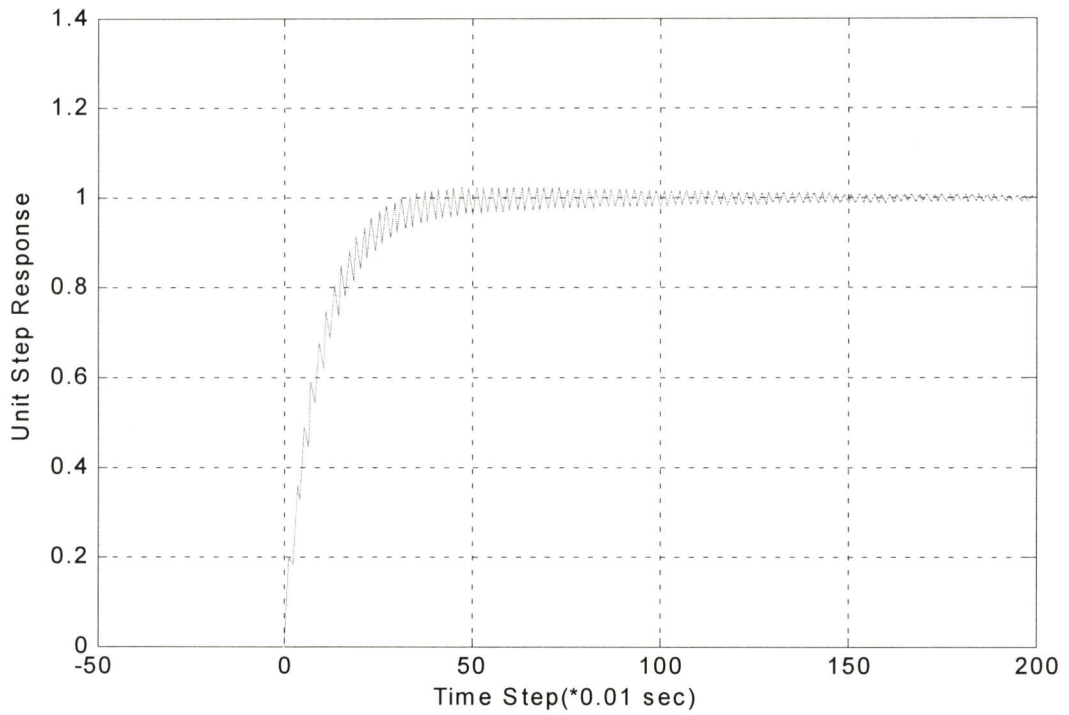
ภาพที่ 5.16 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.6$, $L_2=0.6$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลเกิดขึ้นที่ส่วนลำแขนมากอันเนื่องมาจากขนาดความยาวที่ L_1 และ L_2 เพิ่มขึ้น โดยการใช้พารามิเตอร์การควบคุมเกน $L=1$ ภาพที่ 5.17 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.18 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าค่าความผิดพลาดและอัตราค่าความผิดพลาดที่เข้าสู่เป้าหมายที่ต่างกันและมีมากเพราะความยาวของ L_1 และ L_2 เพิ่มขึ้น ลักษณะการออกแบบชนิดนี้จะมีความยุ่งยากในการควบคุม เมื่อพิจารณาจากกราฟจะมีการสั่นตลอดเส้นทางจนเกือบไม่ถึงเป้าหมายและใช้เวลานาน



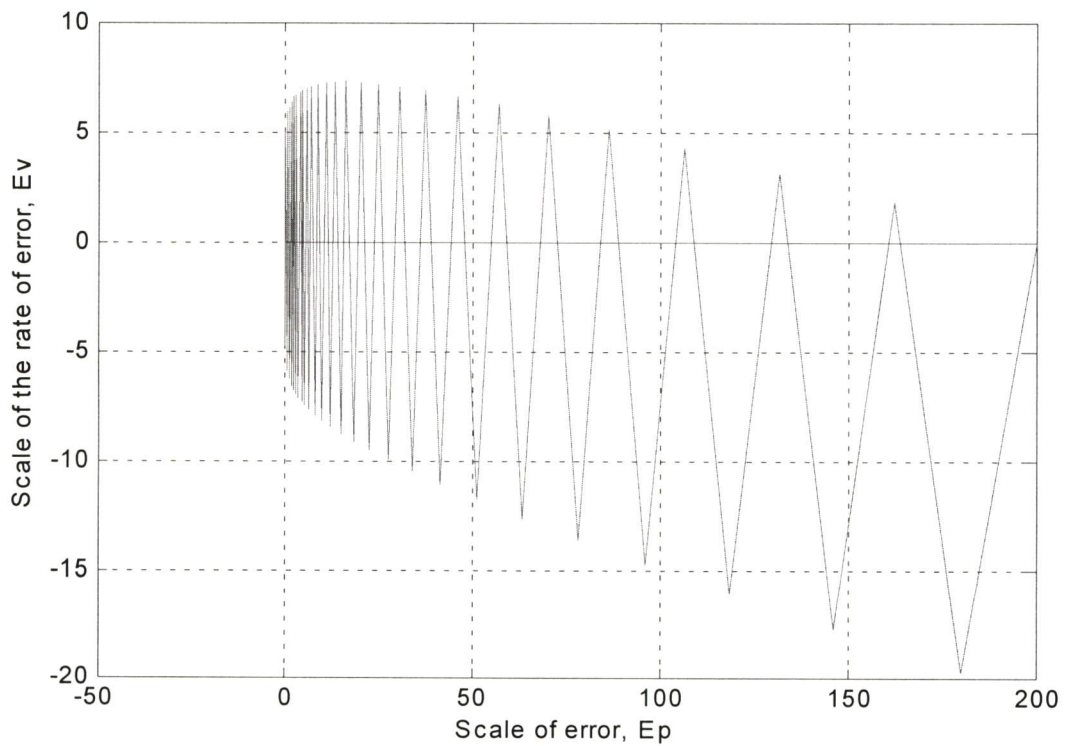
ภาพที่ 5.17 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=3, K_i=0.5, K_{upl}=1, A=0.1$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



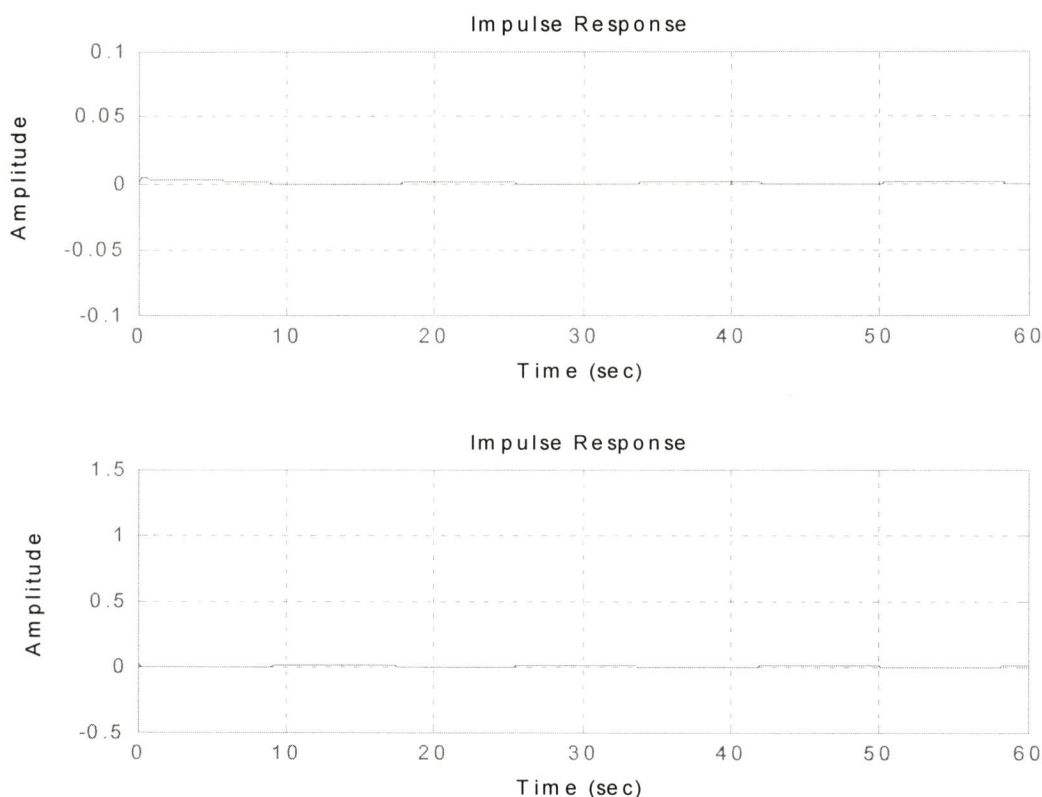
ภาพที่ 5.18 ระบุว่าเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.19 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=3, K_i=0.5, K_{uPI}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

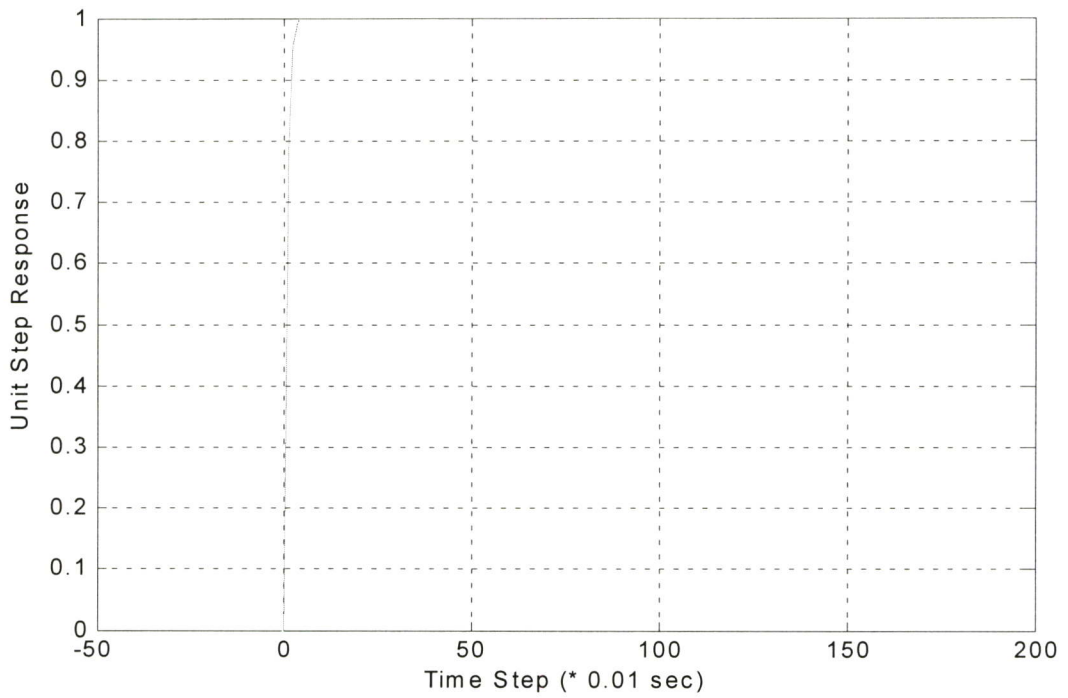


ภาพที่ 5.20 ระบุขนาดเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

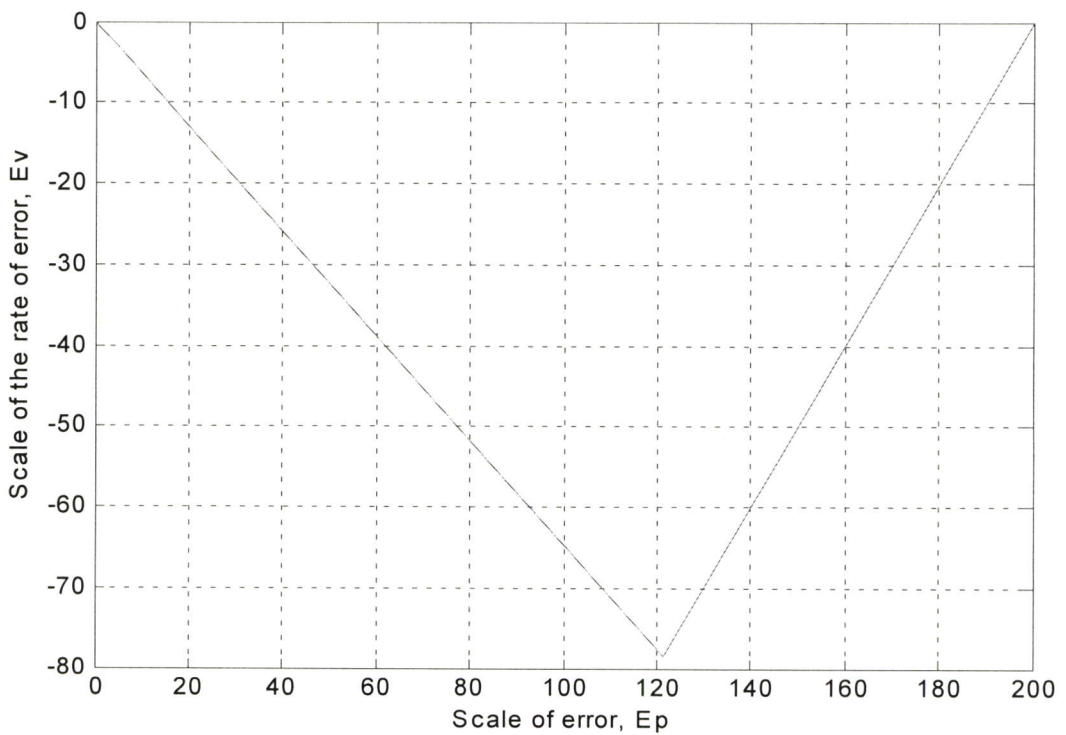


ภาพที่ 5.21 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.1$, $L_2=0.1$, $m_1=0.1$, $m_2=0.1$

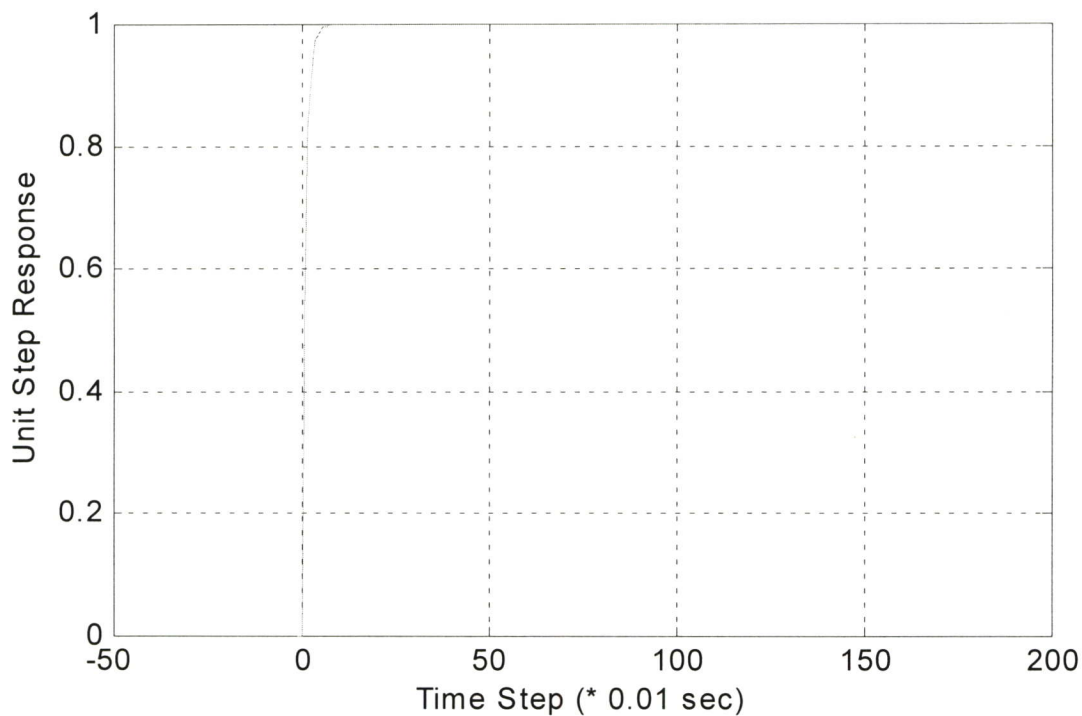
ภาพที่ 5.21 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.1$, $L_2=0.1$, $m_1=0.1$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่า การสั่นของแขนกล เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากแขนกลมีขนาดสั้นและเบาด้วยขนาดพารามิเตอร์ทางกายภาพเท่าเดิม จึงเปรียบเสมือนแขนกลแข็งเกร็ง โดยการใช้พารามิเตอร์การควบคุมเกน $L=1$ ภาพที่ 5.22-5.23 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.24 -5.25 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดเข้าสู่เป้าหมายเกิดขึ้นน้อยมาก เส้นทางที่เข้าสู่เป้าหมายเป็นไปอย่างรวดเร็ว



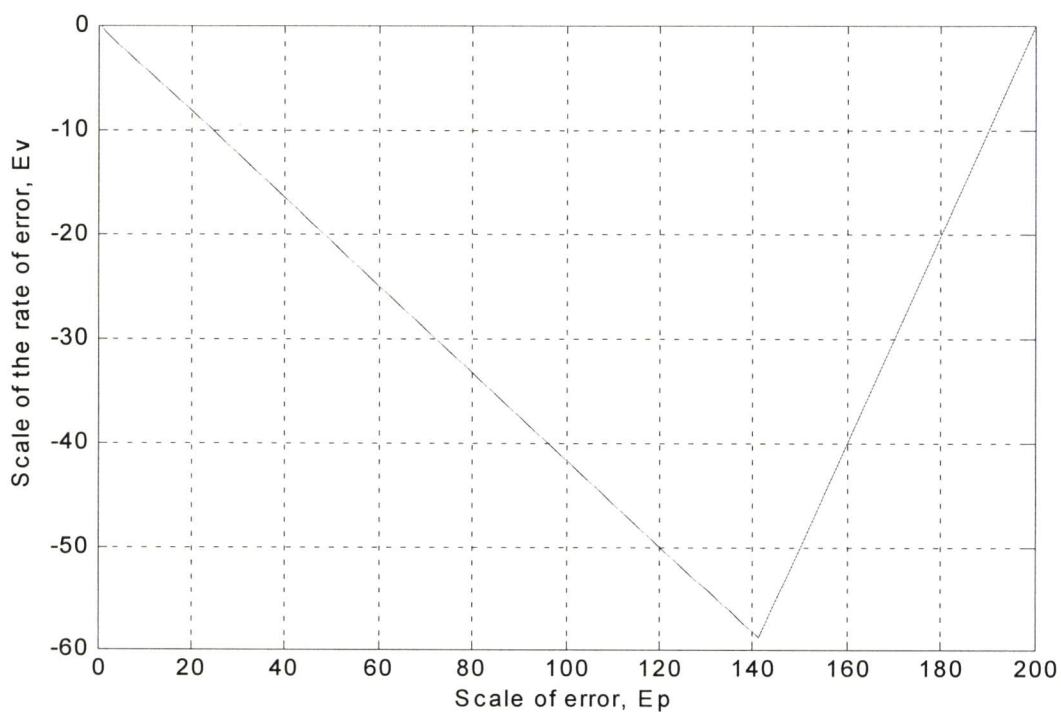
ภาพที่ 5.22 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=1, K_{uPI}=1, A=0.4$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



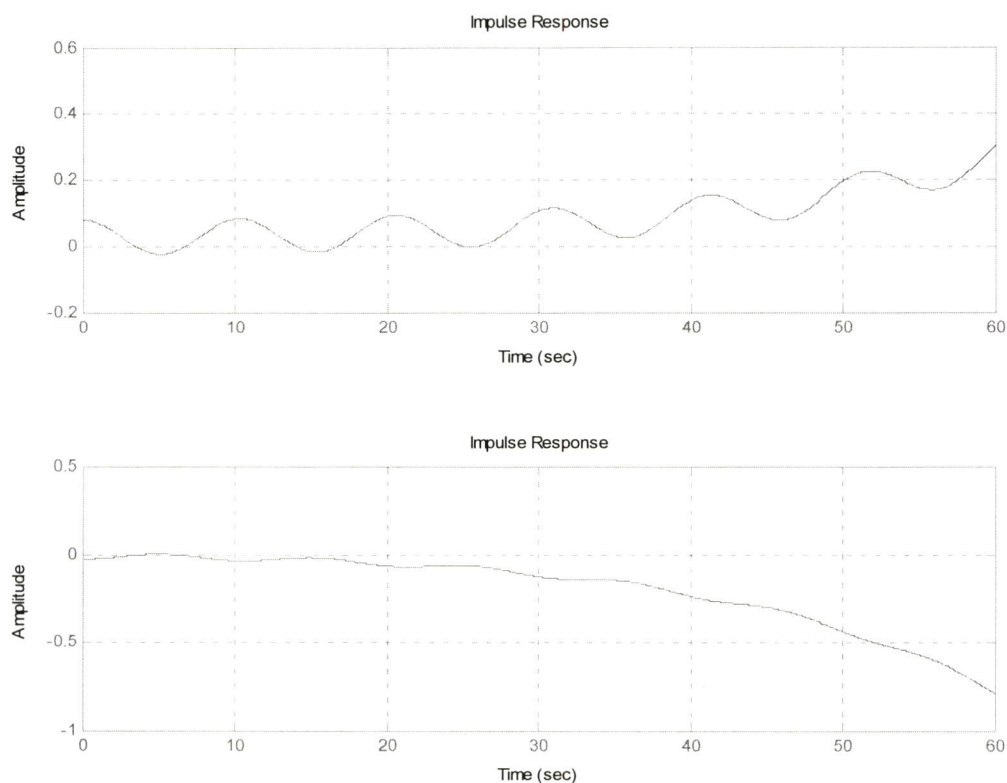
ภาพที่ 5.23 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.24 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=0.3, K_i=0.3, K_{upi}=1, A=1$ ของแกนกล ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

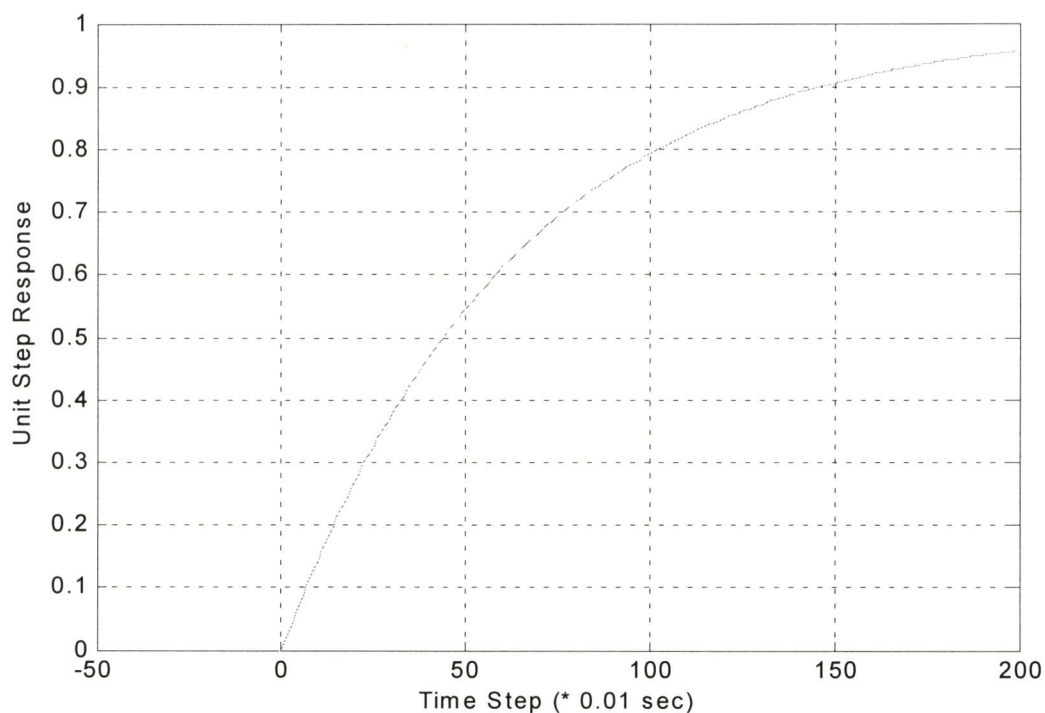


ภาพที่ 5.25 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของขั้นบันไดที่ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

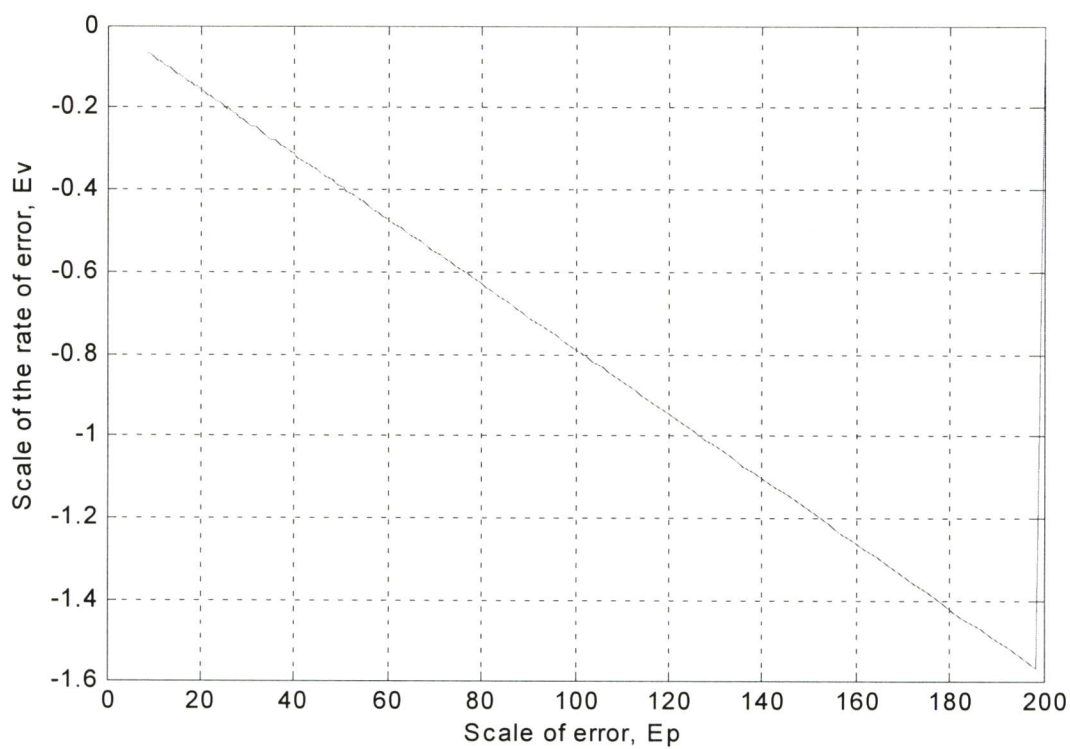


ภาพที่ 5.26 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=1$

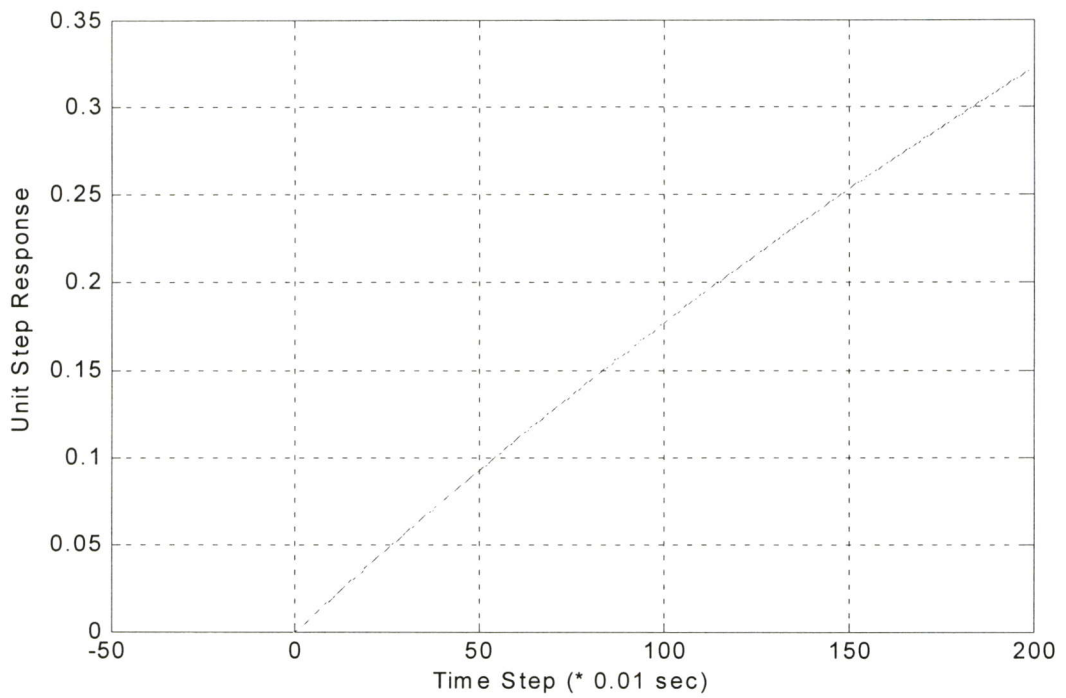
ภาพที่ 5.26 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลเกิดขึ้นที่ส่วนลำแขนมากและมีความอ่อนตัวมากเนื่องจากถูกถ่วงน้ำหนักด้วย m_2 การใช้พารามิเตอร์การควบคุมเกน $L=1$ ภาพที่ 5.27-5.28 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.29 -5.30 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งพบว่าไม่สามารถควบคุมให้เข้าสู่เป้าหมายได้ จะไม่ใช้ข้อมูลทางกายภาพลักษณะนี้ในการออกแบบ



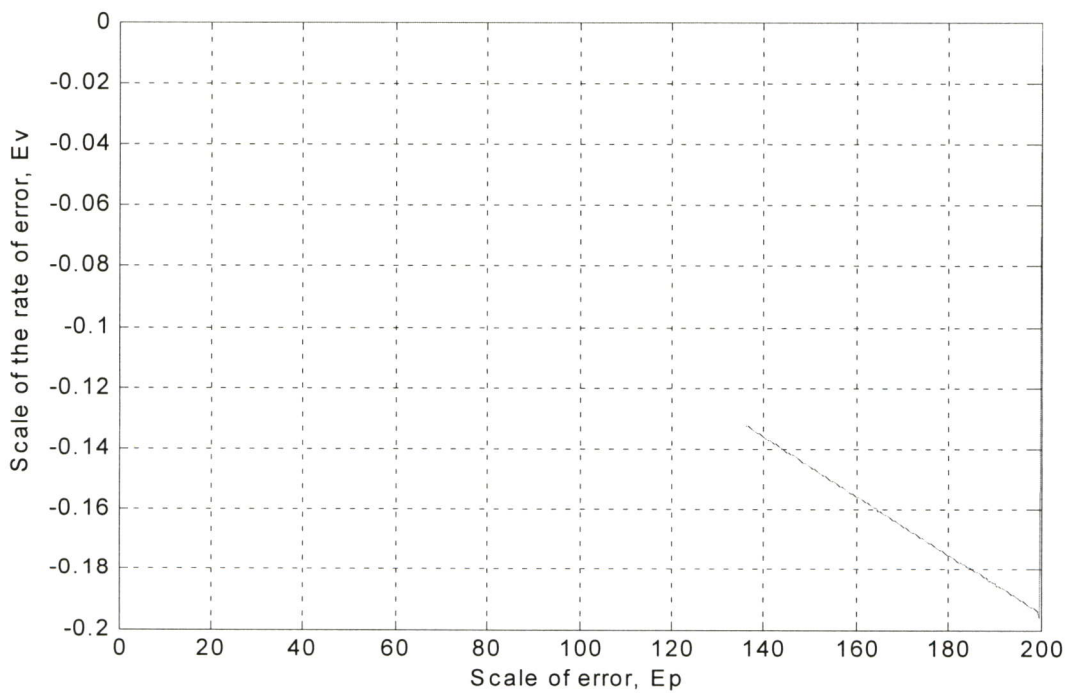
ภาพที่ 5.27 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โด $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.8, K_{uPI}=1, A=0.01$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.28 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.29 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=1, K_{pi}=1, K_i=0.1, K_{uPI}=1, A=0.01$ ของแกนกล ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)



ภาพที่ 5.30 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

5.3 ผลการจำลองพารามิเตอร์การควบคุมเกินใหญ่ (Large-Overlap)

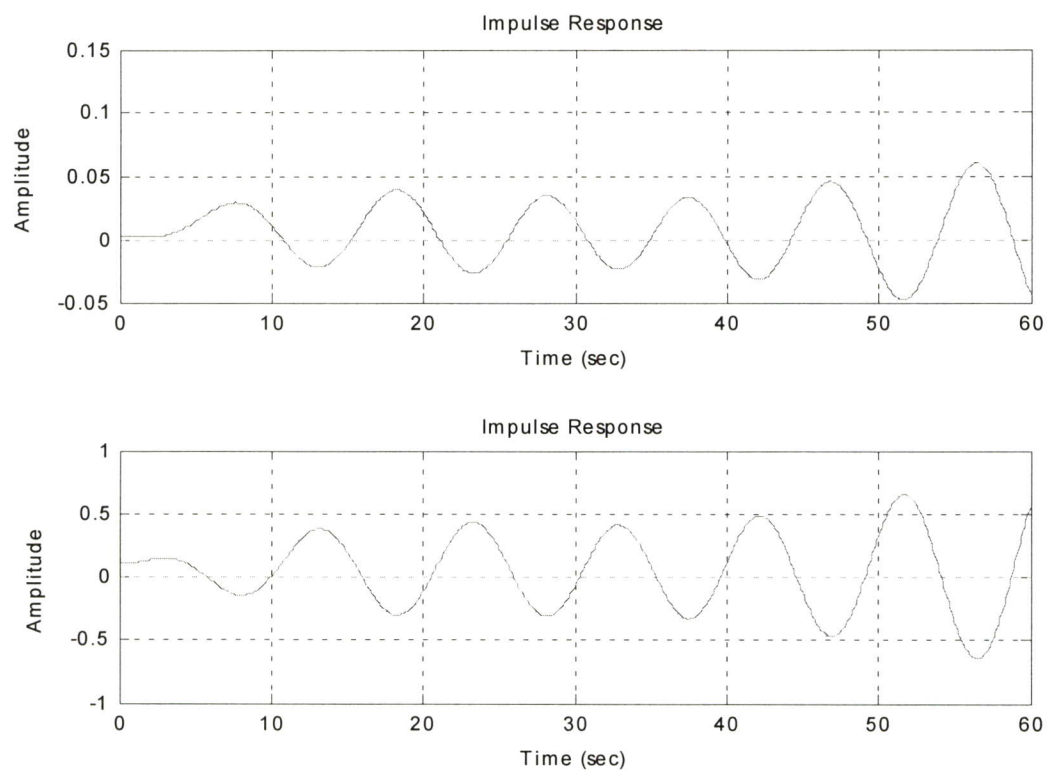
การจำลองผลในส่วนนี้เป็นการจำลองผลในการพิจารณาธรรมชาติของการสั้นของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อจากการใช้การดล การจำลองผลโดยใช้การควบคุมแบบพีซีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมที่ค่าเกณฑ์ต่าง ๆ

ภาพที่ 5.31 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับโดยใช้พารามิเตอร์การควบคุมเกินใหญ่ ภาพที่ 5.32-5.33 แสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั้นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) ภาพที่ 5.34-5.35 แสดงถึงระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดของแขนที่ (L_2) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแขนกลโดยพิจารณาที่ค่าพารามิเตอร์การควบคุมเกินใหญ่ $L=50$ แสดงในตารางที่ 5.2

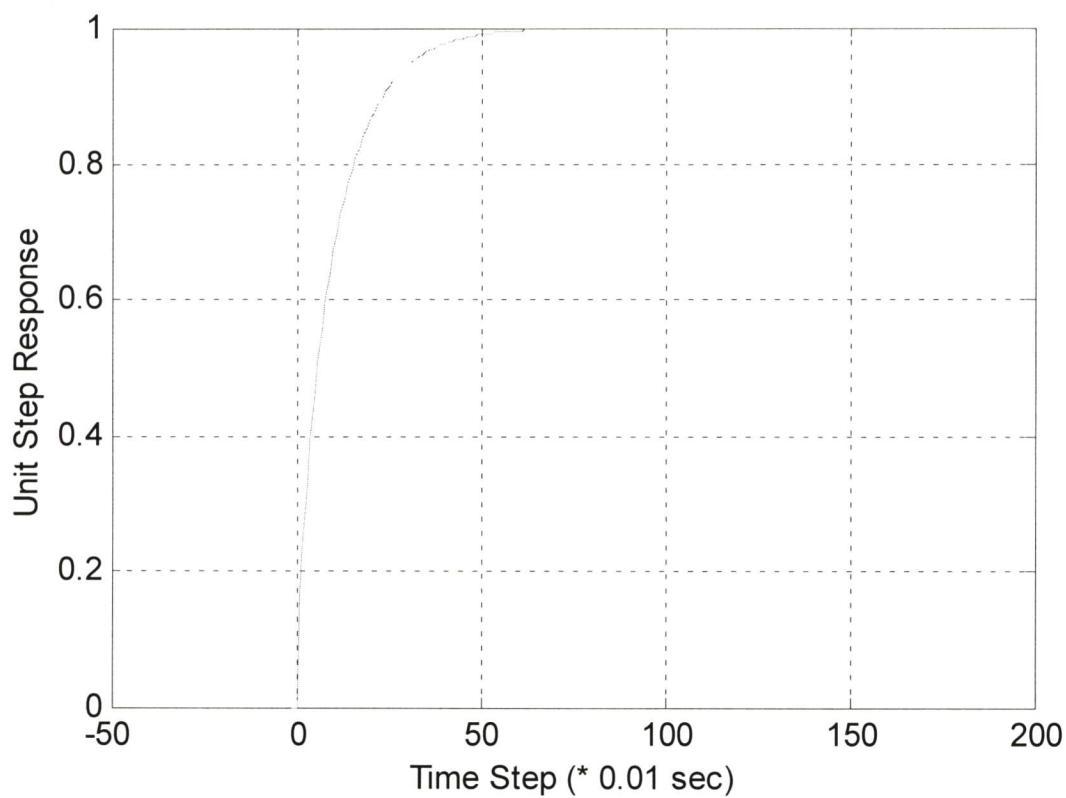
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ขนาดความยาว น้ำหนักของแขนกล การควบคุมโดยค่าเกณฑ์

L, K_{pi}, K_i, K_{UPI} , และค่าสัญญาณอินพุท A

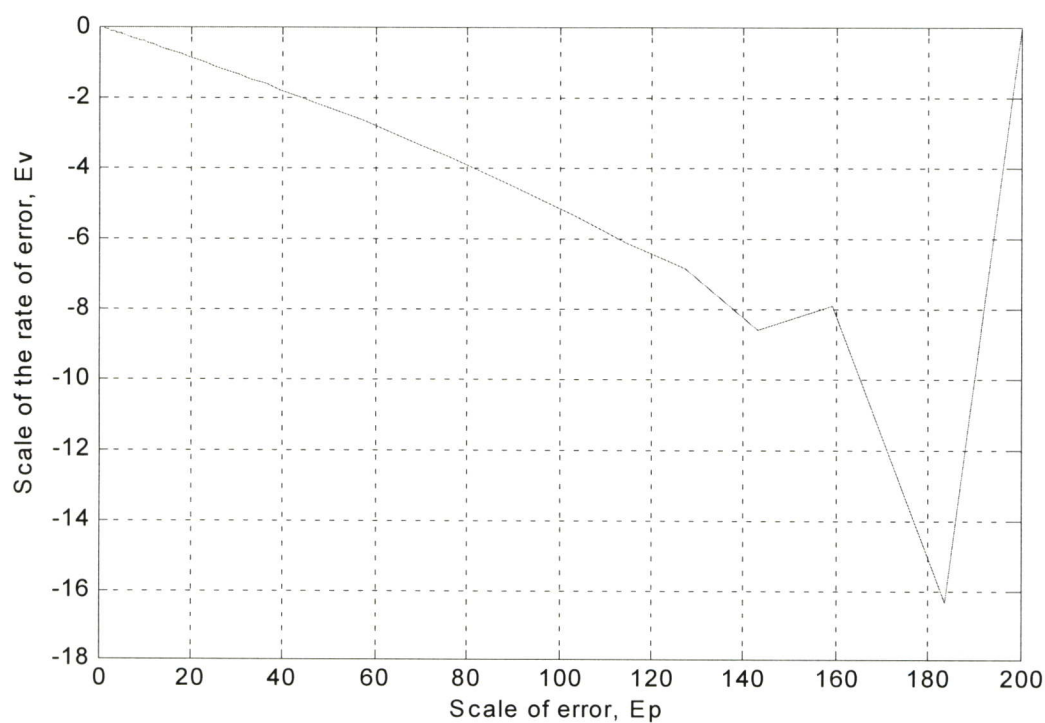
L_1 (เมตร)	L_2 (เมตร)	m_1 (กิโลกรัม)	m_2 (กิโลกรัม)	L	K_{pi}	K_i	K_{UPI}	A	แขนที่ถูกควบคุม
0.5	0.5	0.4	0.1	50	0.6	0.4	1	1	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.4	0.1	50	0.01	0.4	1	0.1	แขนที่ 2
0.5	0.5	0.45	0.1	50	0.1	0.8	1	0.3	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.45	0.1	50	1	1	1	0.2	แขนที่ 2
0.5	0.5	0.4	0.2	50	0.8	0.1	1	0.5	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.4	0.2	50	0.8	0.3	1	0.5	แขนที่ 2
0.6	0.6	0.4	0.1	50	0.9	0.5	1	0.5	แขนที่ 1
0.6	0.6	0.4	0.1	50	1	0.5	1	0.1	แขนที่ 2
0.1	0.1	0.1	0.1	50	1	1	1	0.4	แขนที่ 1
0.1	0.1	0.1	0.1	50	1	1	1	0.1	แขนที่ 2
0.5	0.5	0.4	1	50	1	0.7	1	0.1	แขนที่ 1
0.5	0.5	0.4	1	50	1	0.7	1	0.1	แขนที่ 2



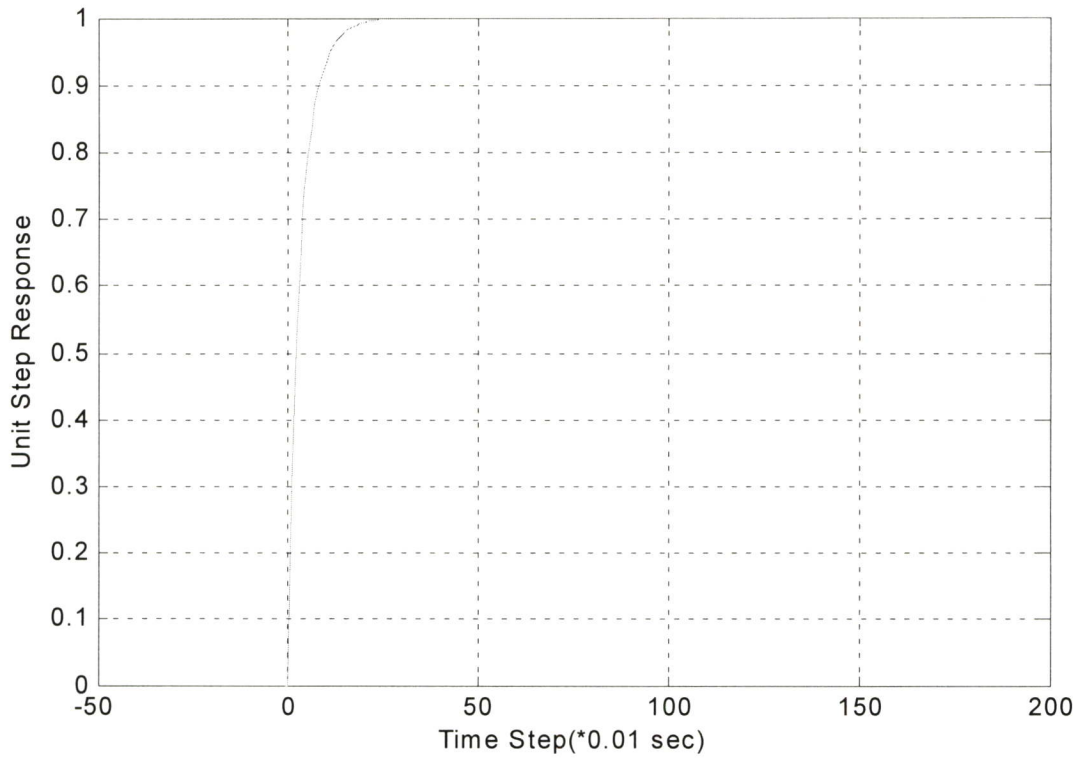
ภาพที่ 5.31 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$



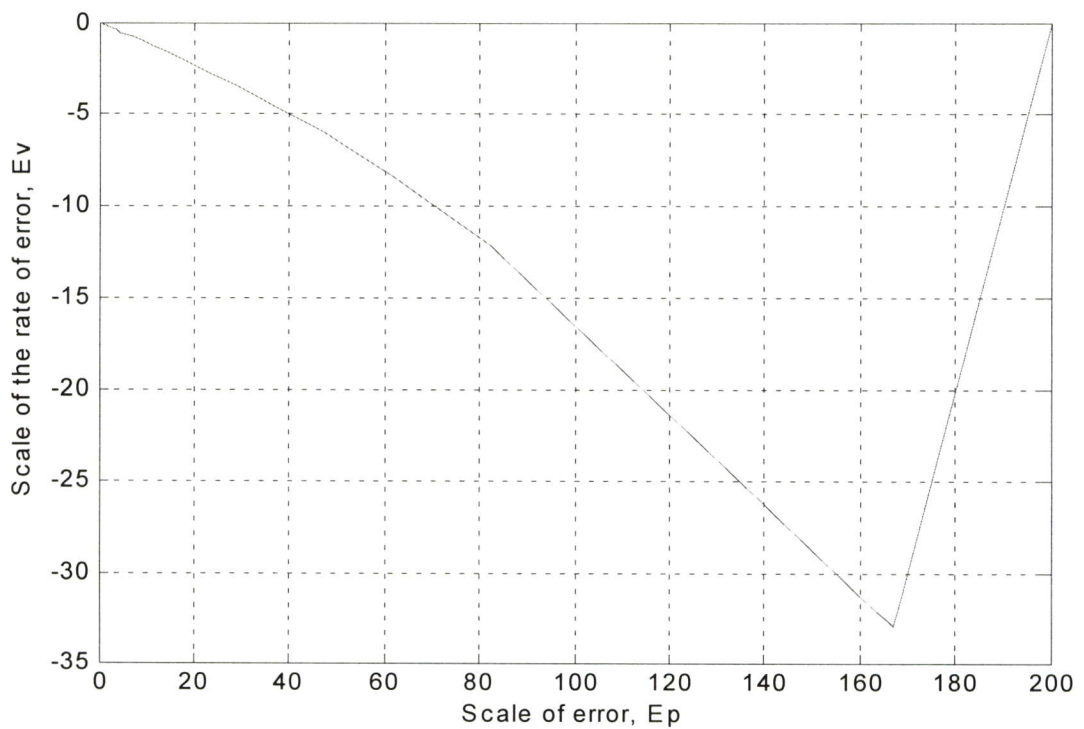
ภาพที่ 5.32 แสดงผลตอบสนองขั้นบันไดโดย $L=50, K_{pi}=0.6, K_i=0.4, K_{UPI}=1, A=1$ ของแขนกล
ตำแหน่งแกนที่ 1 (L_1)



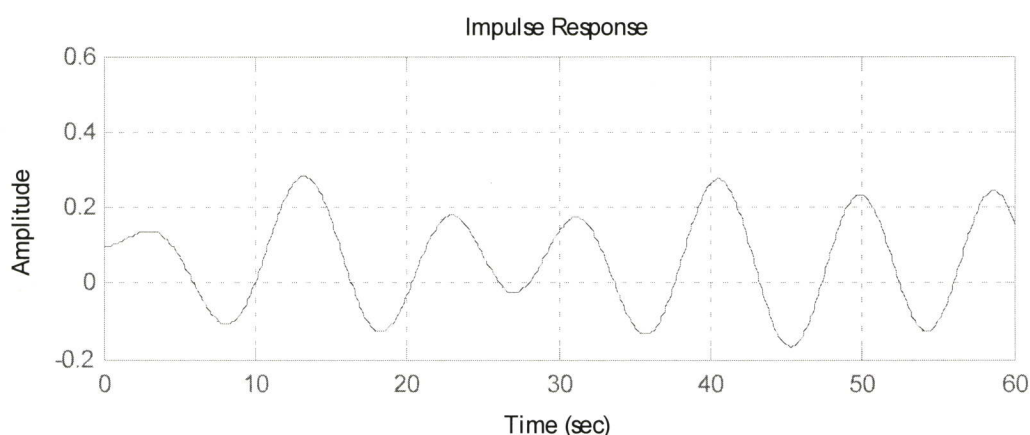
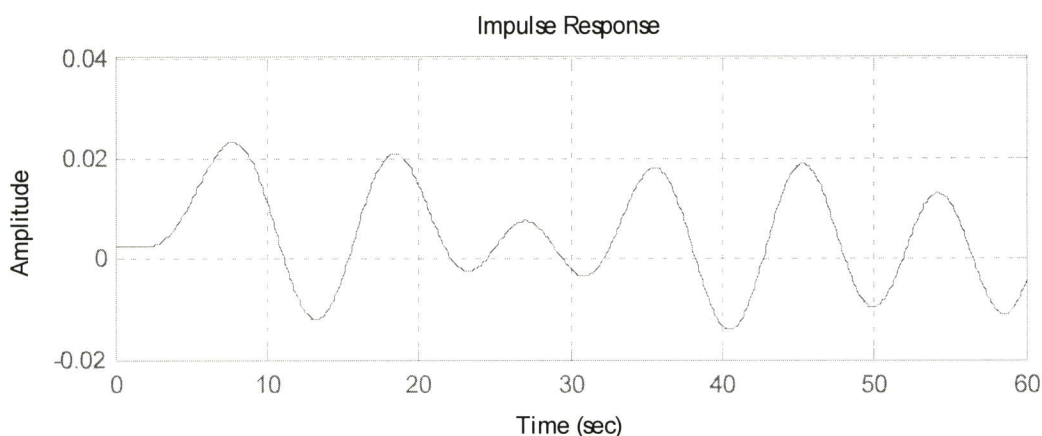
ภาพที่ 5.33 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแกนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.34 แสดงผลตอบสนองขั้นบันไดโดย $L=50, K_{pi}=0.01, K_i=0.4, K_{upi}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

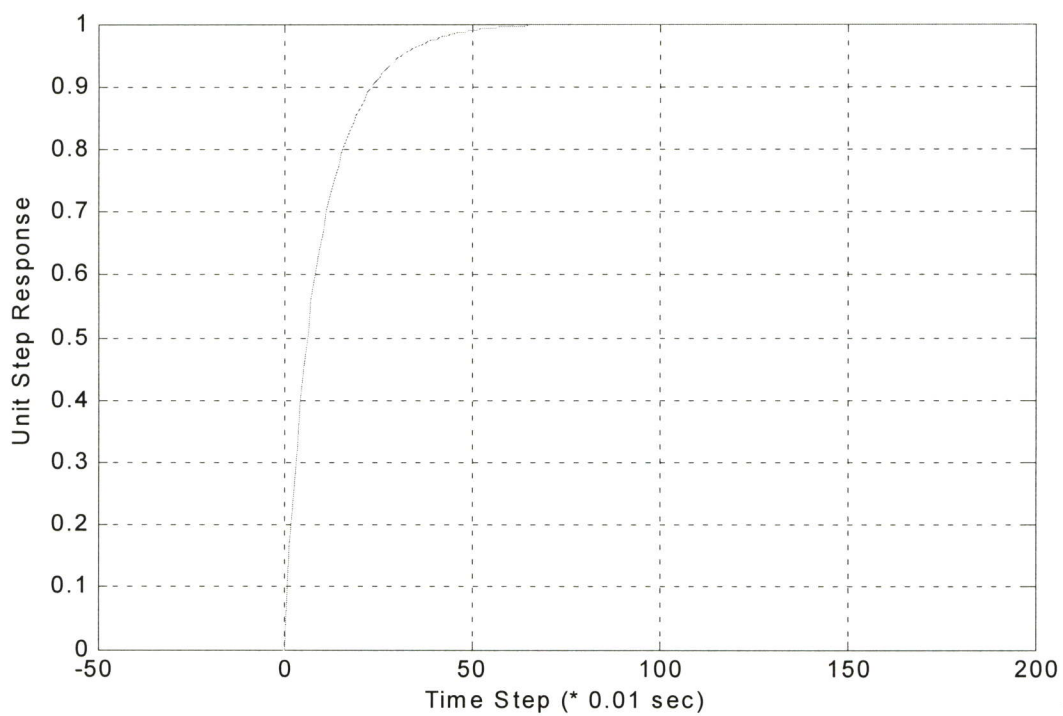


ภาพที่ 5.35 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

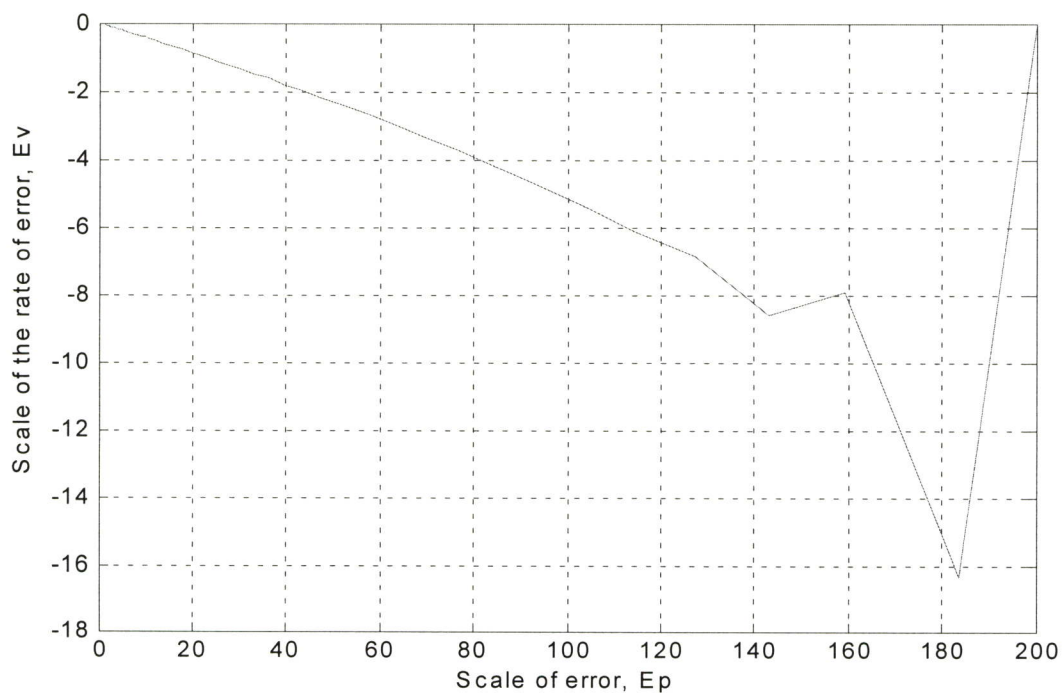


ภาพที่ 5.36 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.45$, $m_2=0.1$

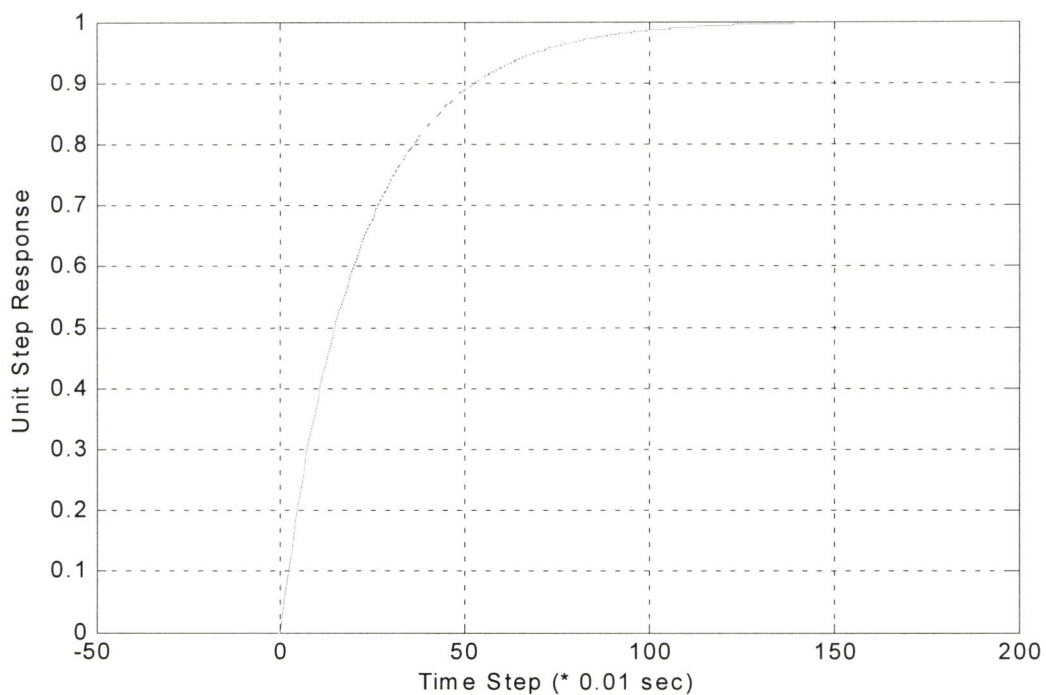
ภาพที่ 5.36 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.45$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ของแขนกลเดิม แต่ใช้พารามิเตอร์การควบคุมแกน $L=50$ ภาพที่ 5.37-5.38 จะแสดงถึงการควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแกนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.39-5.40 จะแสดงถึงการควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแกนที่ 1 (L_2) ซึ่งพบว่าเมื่อให้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมแกนมากขึ้น การควบคุมจะทำให้เอทพุทที่ได้มีความราบเรียบมากขึ้นเนื่องจากระบบจะทำงานในพีซีพีไอโหมดมากกว่าสไลดิงโหมด



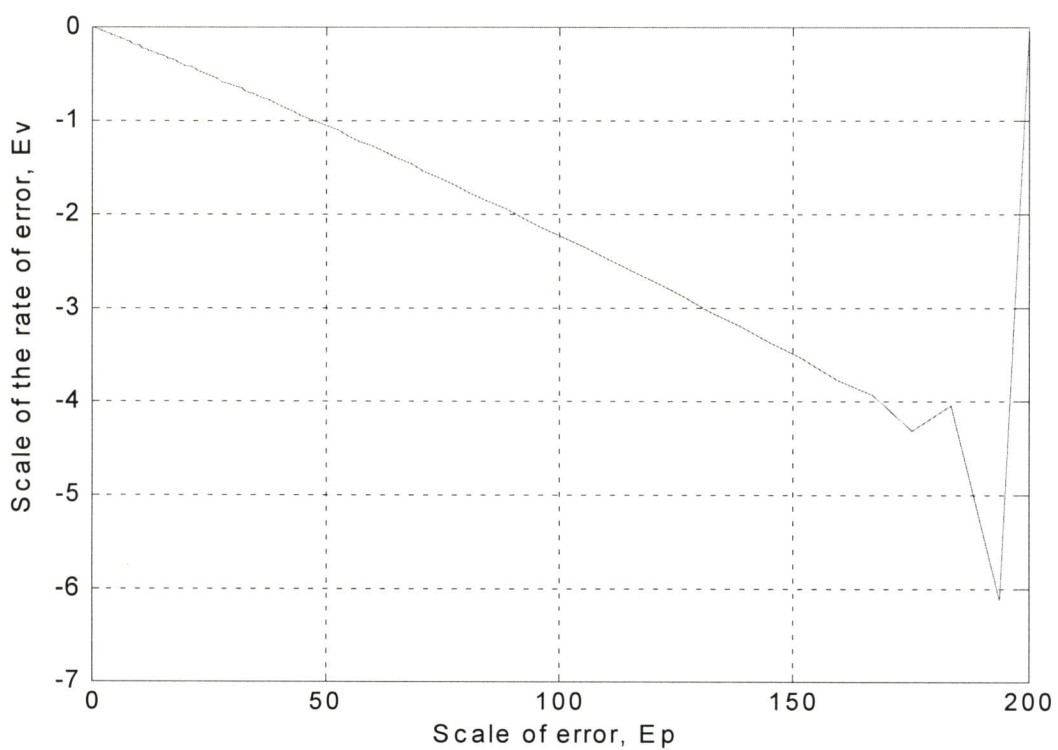
ภาพที่ 5.37 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=0.1, K_i=0.8, K_{upi}=1, A=0.3$ ของแกนกลตำแหน่งแกนที่ 1 (L_1)



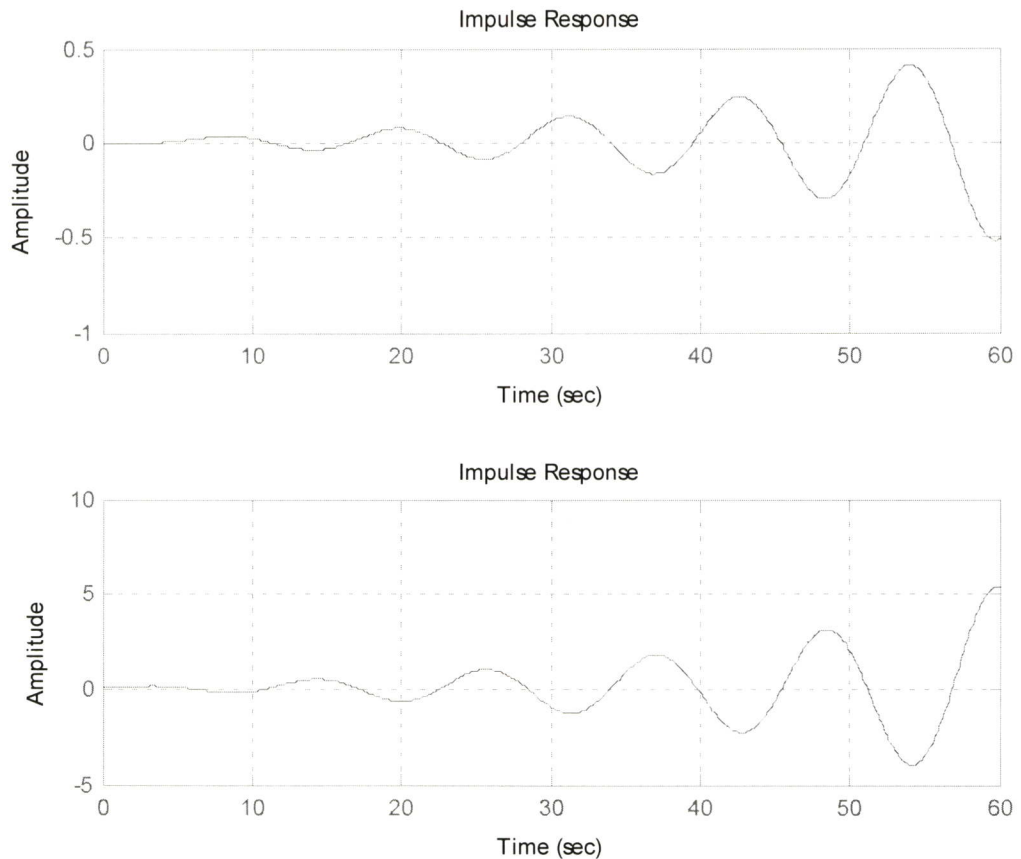
ภาพที่ 5.38 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแกนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.39 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=1, K_{uPI}=1, A=0.2$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

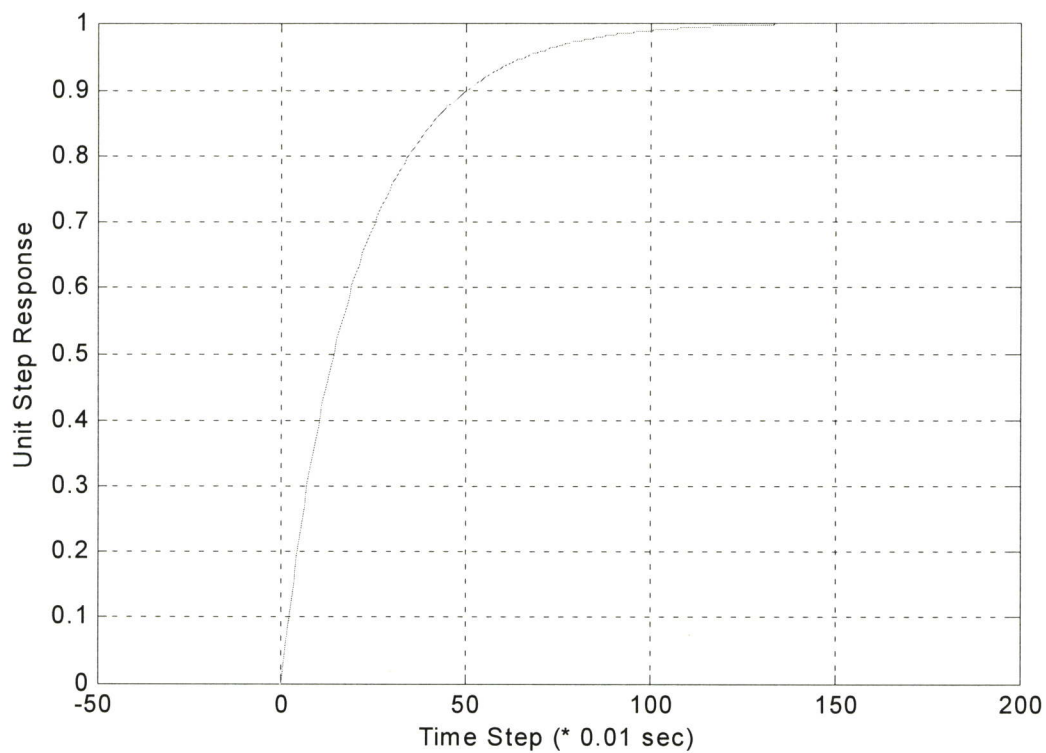


ภาพที่ 5.40 ระบายพลความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2
(L_2)

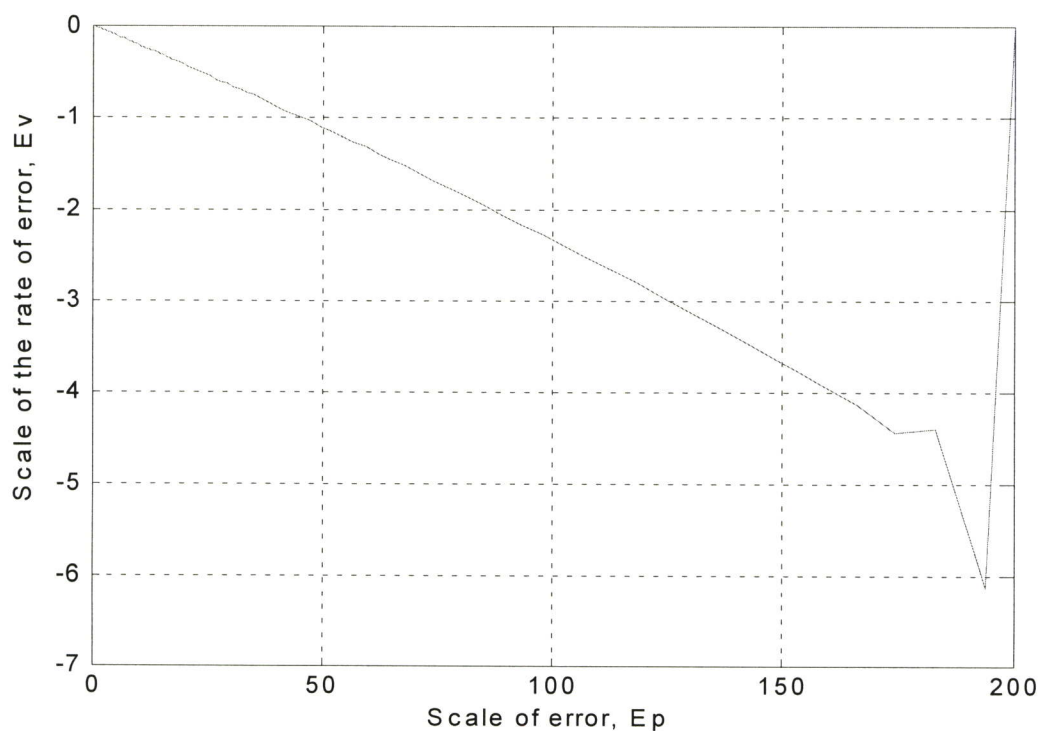


ภาพที่ 5.41 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.2$

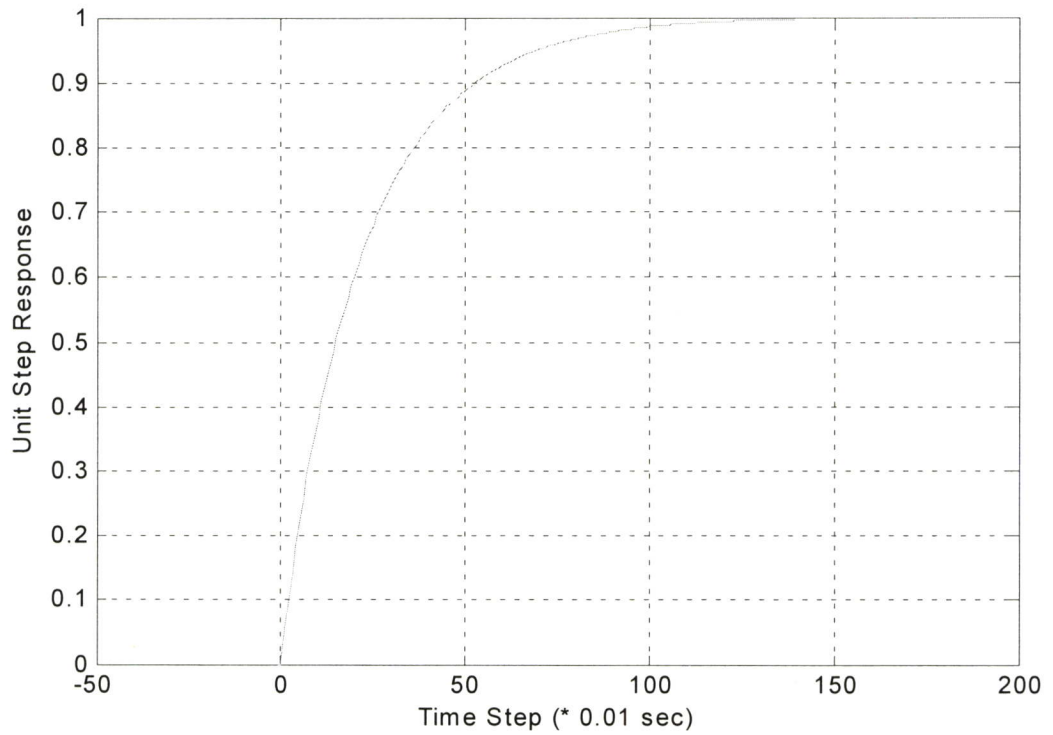
ภาพที่ 5.41 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=0.2$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลเกิดขึ้นที่ส่วนปลายอันเนื่องมาจากขนาดน้ำหนักที่ m_2 เพิ่มขึ้น ภาพที่ 5.42-5.43 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.44 -5.45 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าเมื่อให้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมเกินมากขึ้น ค่าเอทพุทที่ได้จะมีความราบเรียบ เนื่องจากถูกควบคุมให้เข้าสู่พีซีพีไอโหมดเร็วขึ้น



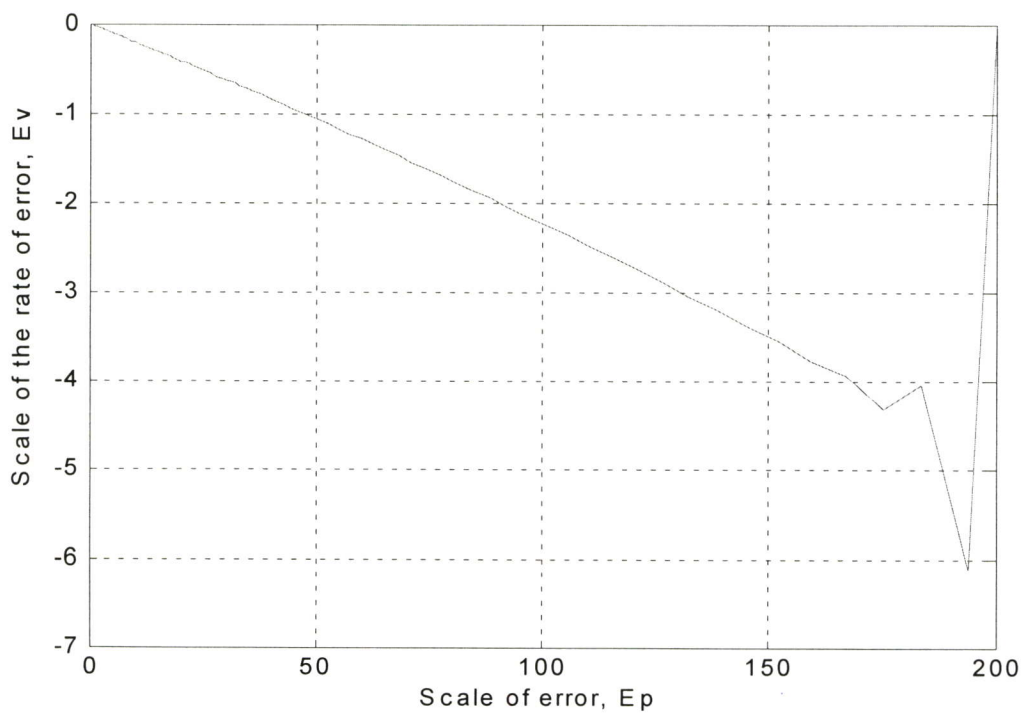
ภาพที่ 5.42 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=0.8, K_i=0.1, K_{uPI}=1, A=0.5$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



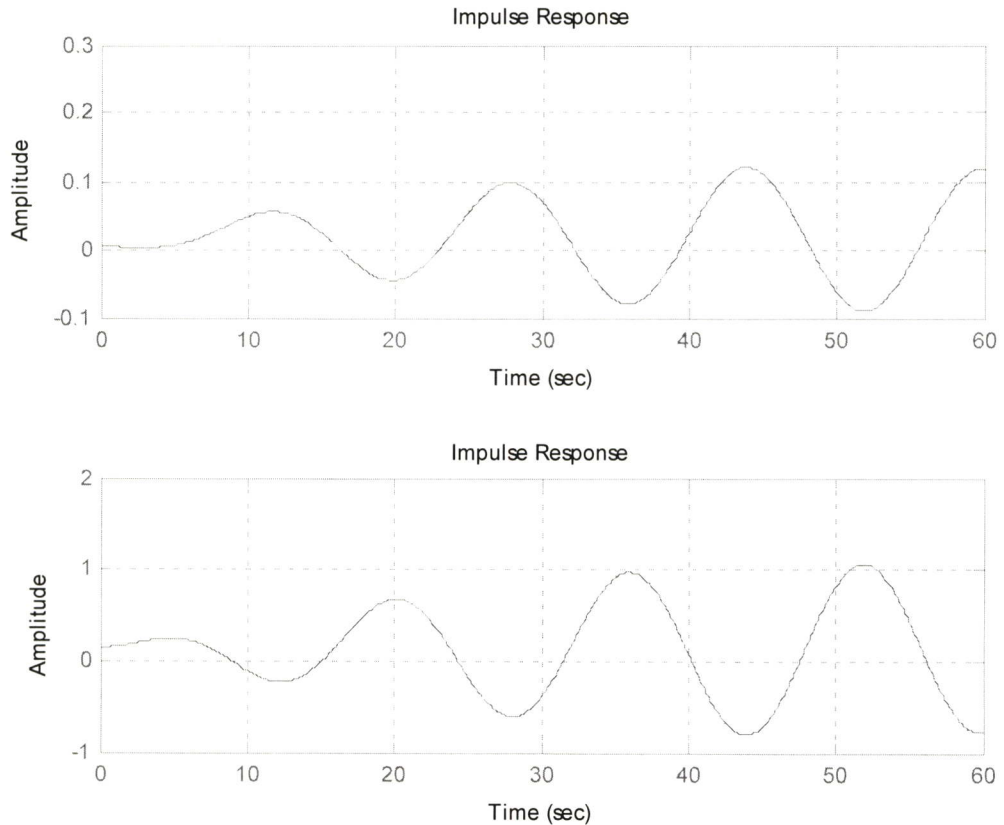
ภาพที่ 5.43 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.44 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=0.8, K_i=0.3, K_{uPI}=1, A=0.5$ ของแกนกล ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

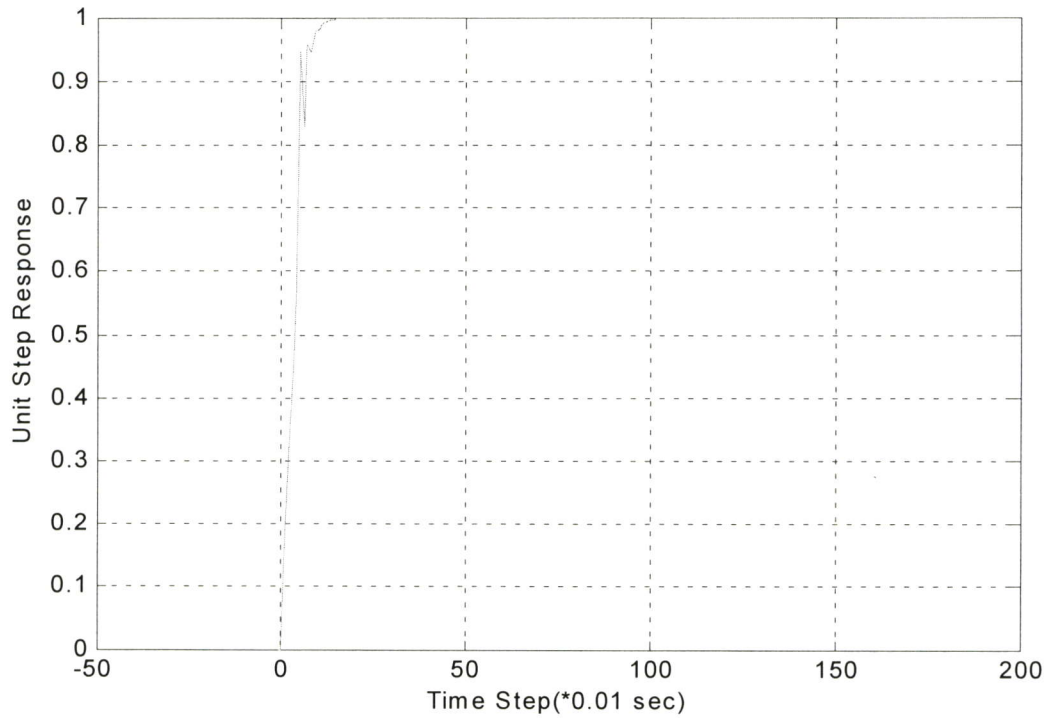


ภาพที่ 5.45 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

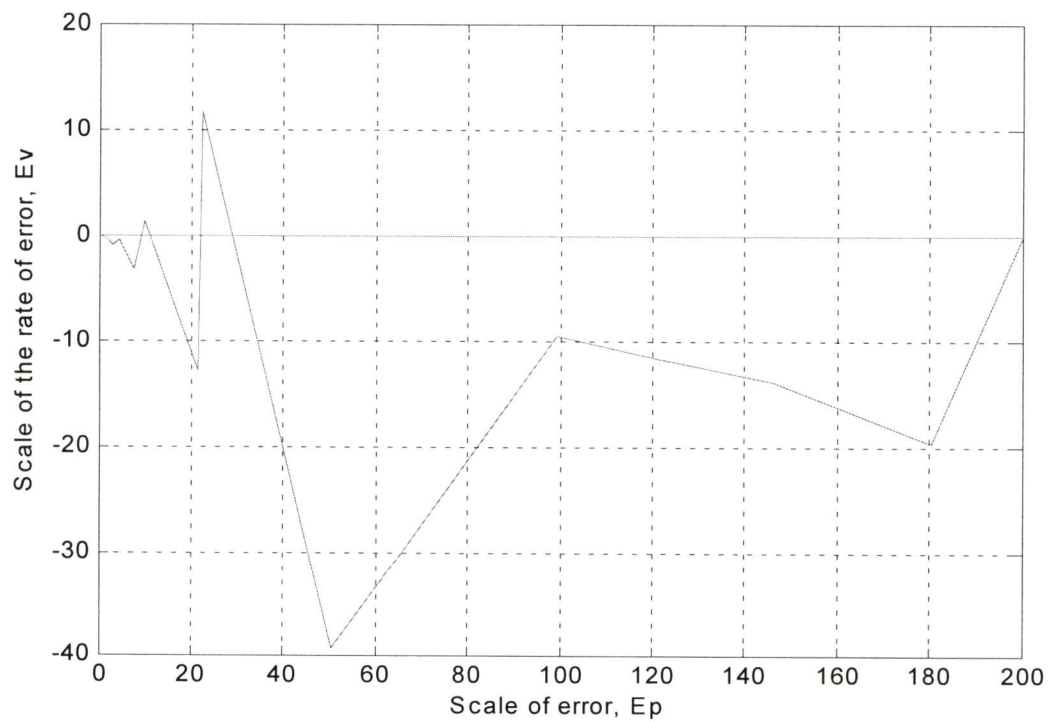


ภาพที่ 5.46 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.6$, $L_2=0.6$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$

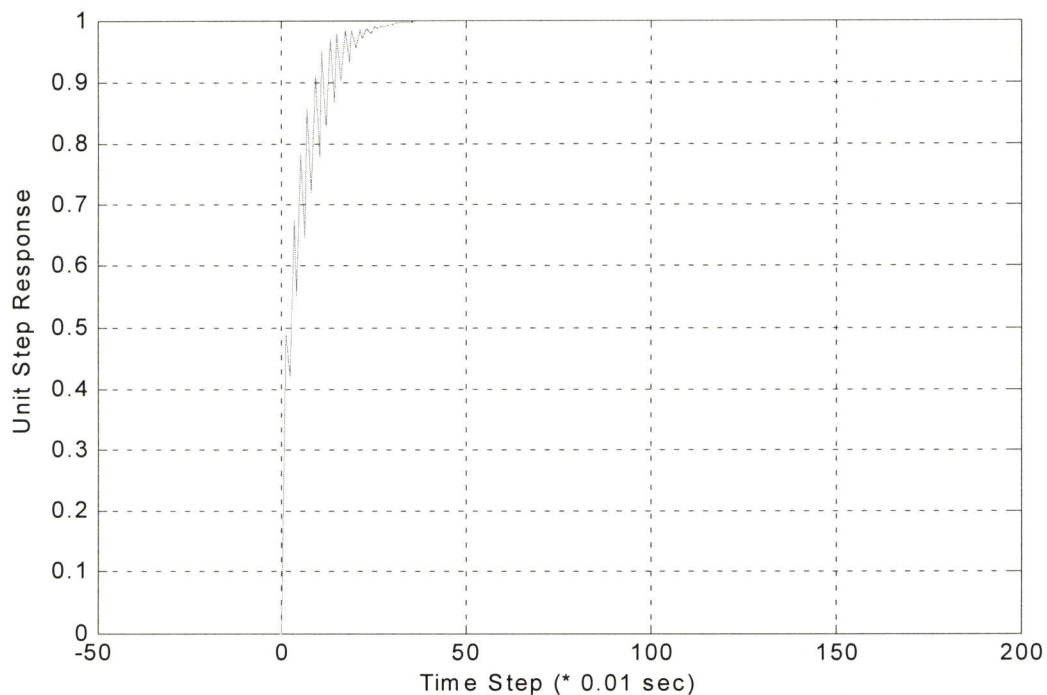
ภาพที่ 5.46 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.6$, $L_2=0.6$, $m_1=0.4$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลเกิดขึ้นที่ส่วนลำแขนมากอันเนื่องมาจากขนาดความยาวที่ L_1 และ L_2 เพิ่มขึ้น เมื่อใช้พารามิเตอร์การควบคุมเกณฑ์มากขึ้น $L=50$ ภาพที่ 5.47-5.48 จะแสดงถึงการใช้อำนาจควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) เมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์การควบคุมเกณฑ์น้อยการสั่นจะเกิดมากในช่วงสไลดิงโหมดแต่จะราบเรียบในช่วงพีซีพีไอโหมด และภาพที่ 5.49-5.50 จะแสดงถึงการใช้อำนาจควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าอำนาจควบคุมลำแขนกลที่ 2 (L_2) จะลดการสั่นลงได้มากและสามารถติดตามสู่ค่าเป้าหมายได้ในโหมดพีซีพีไอ



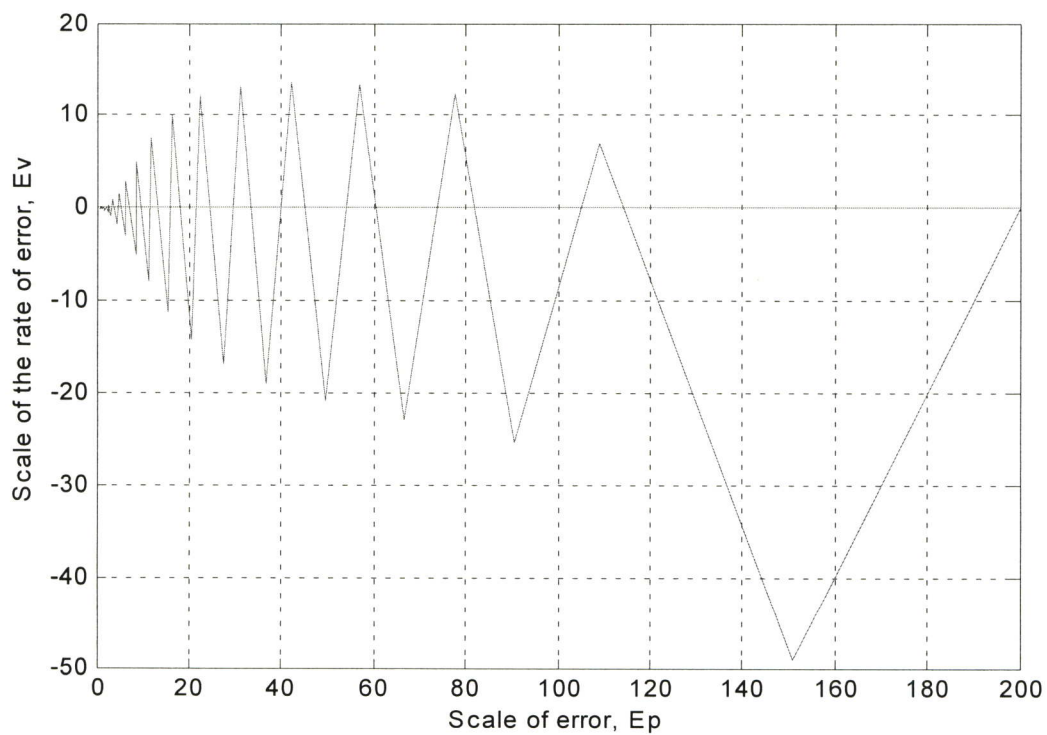
ภาพที่ 5.47 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=0.9, K_i=0.5, K_{UPI}=1, A=0.5$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



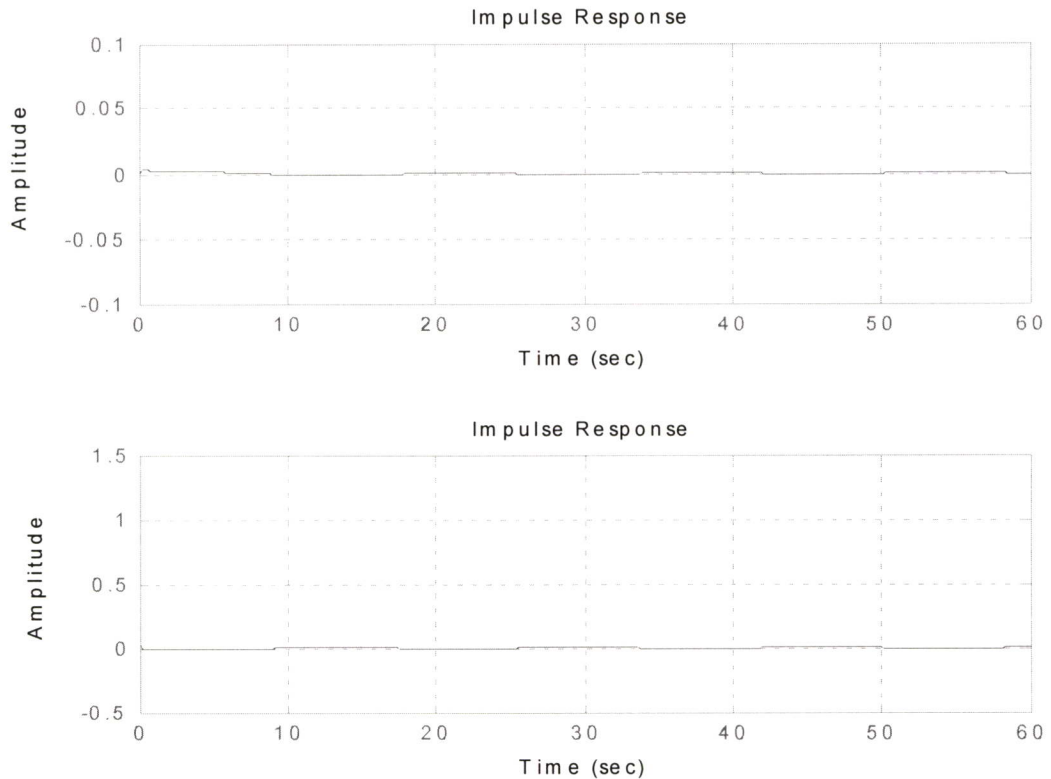
ภาพที่ 5.48 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.49 แสดงผลตอบสนองขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.5, K_{upl}=1, A=0.1$ ของแกนกลตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

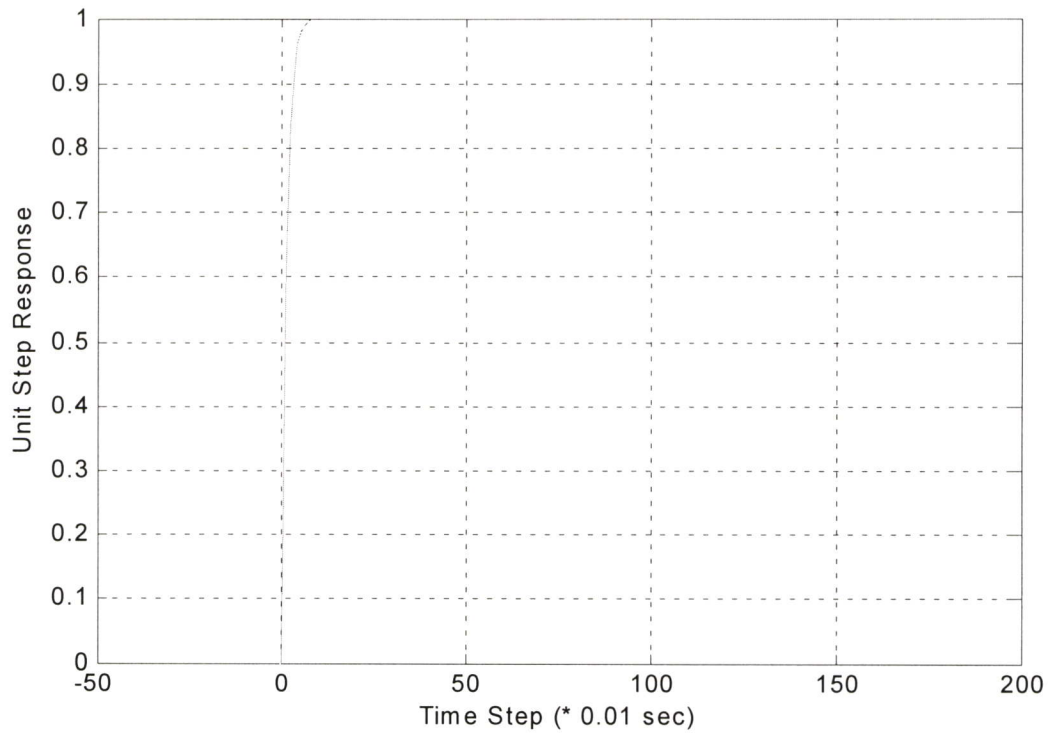


ภาพที่ 5.50 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดที่ตำแหน่งแกนที่ 2 (L_2)

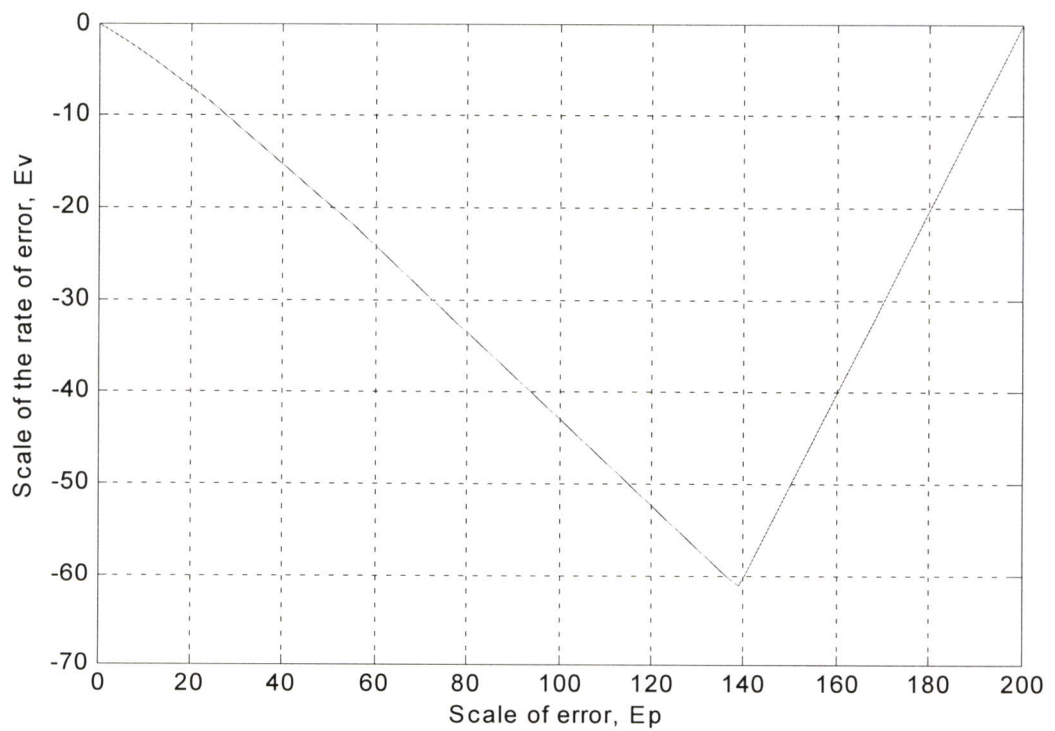


ภาพที่ 5.51 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.1$, $L_2=0.1$, $m_1=0.1$, $m_2=0.1$

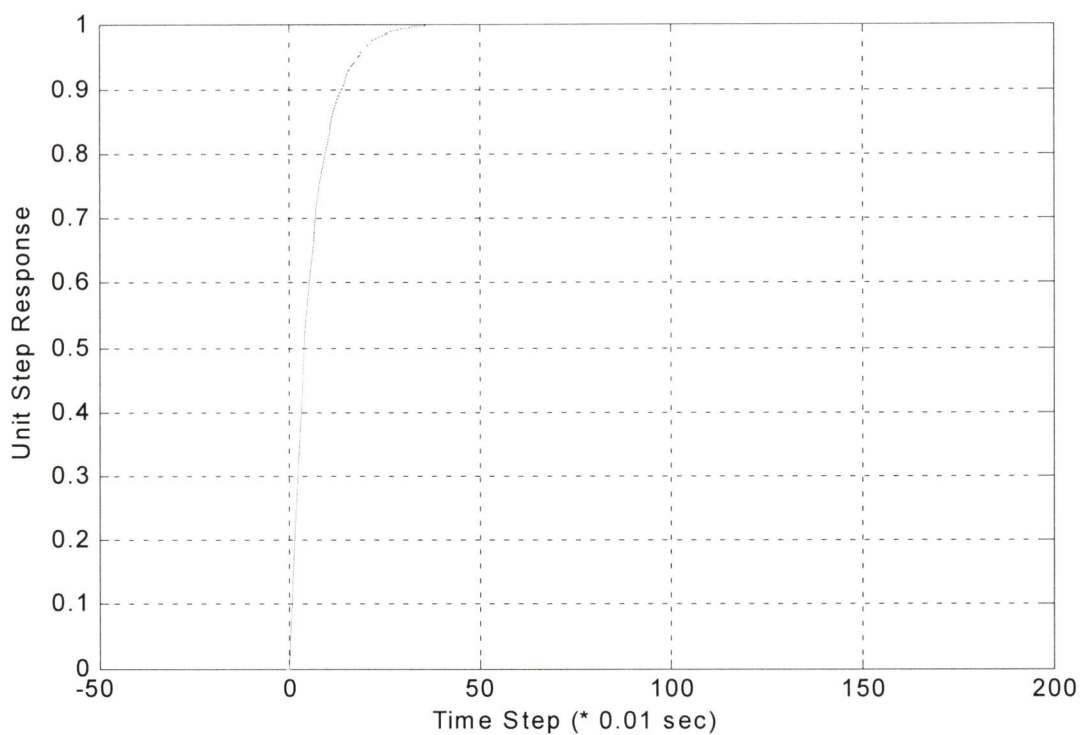
ภาพที่ 5.51 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.1$, $L_2=0.1$, $m_1=0.1$, $m_2=0.1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกล เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากแขนกลมีขนาดสั้นและเบาด้วยขนาดทางกายภาพเท่าเดิม จึงเปรียบเสมือนแขนกลแข็งเกร็ง ในการควบคุมลำแขนกลที่มีขนาดพารามิเตอร์ทางกายภาพแบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมเกณฑ์มากเนื่องจากไม่มีผลแตกต่างกันมากนักโดยใช้การควบคุมแบบสไลดิงโหมดเป็นหลัก ภาพที่ 5.52-5.53 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) และภาพที่ 5.54-5.55 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งจะพบว่าระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองขั้นบันไดเกิดขึ้นน้อยมาก เส้นทางที่เข้าสู่เป้าหมายเป็นไปอย่างรวดเร็ว



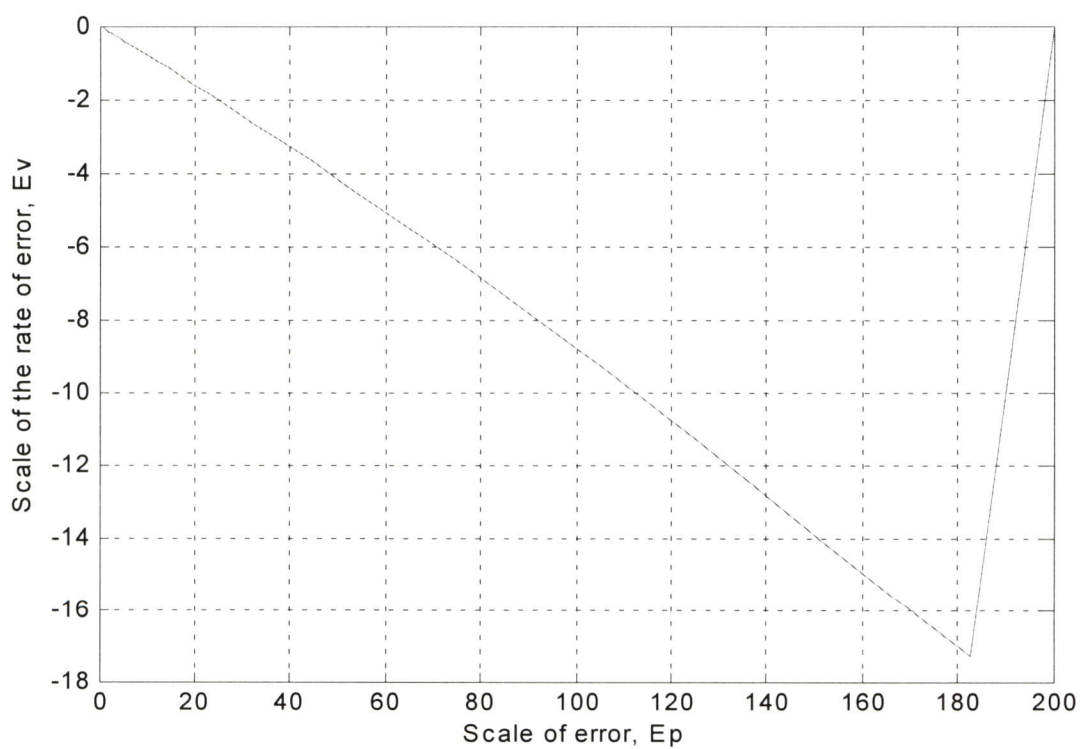
ภาพที่ 5.52 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=1, K_{upi}=1, A=0.4$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



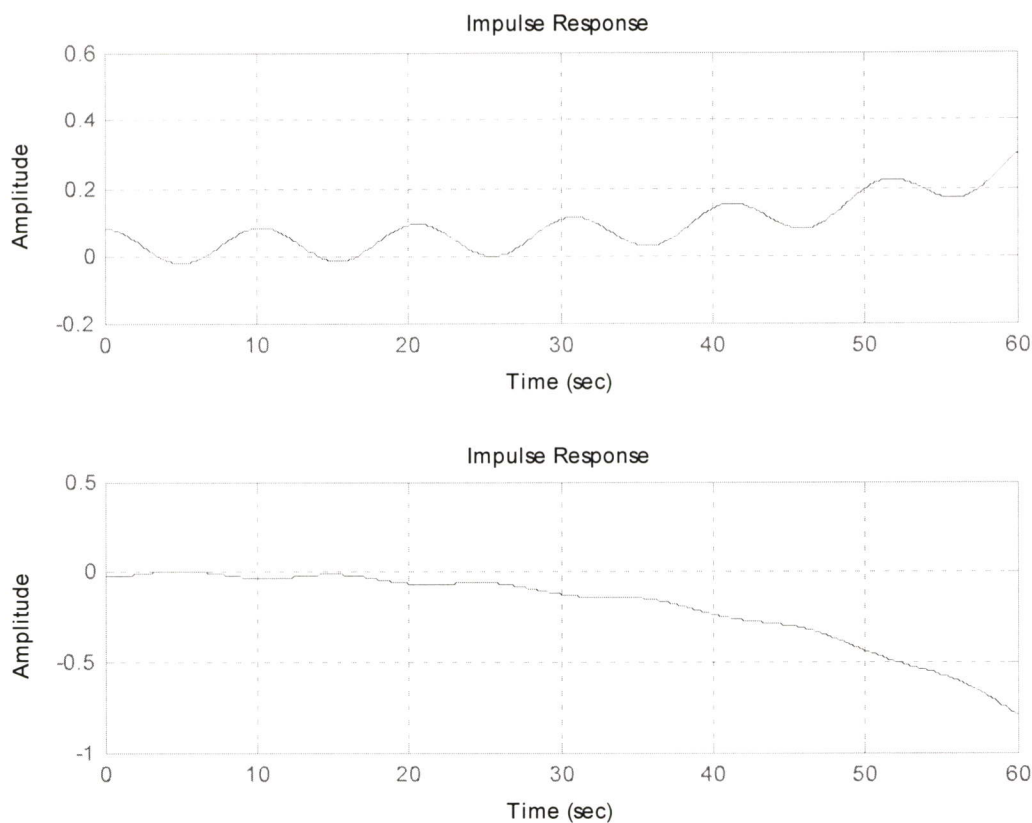
ภาพที่ 5.53 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1
(L_1)



ภาพที่ 5.54 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=1, K_{uPI}=1, A=0.1$ ของแขนกล
ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

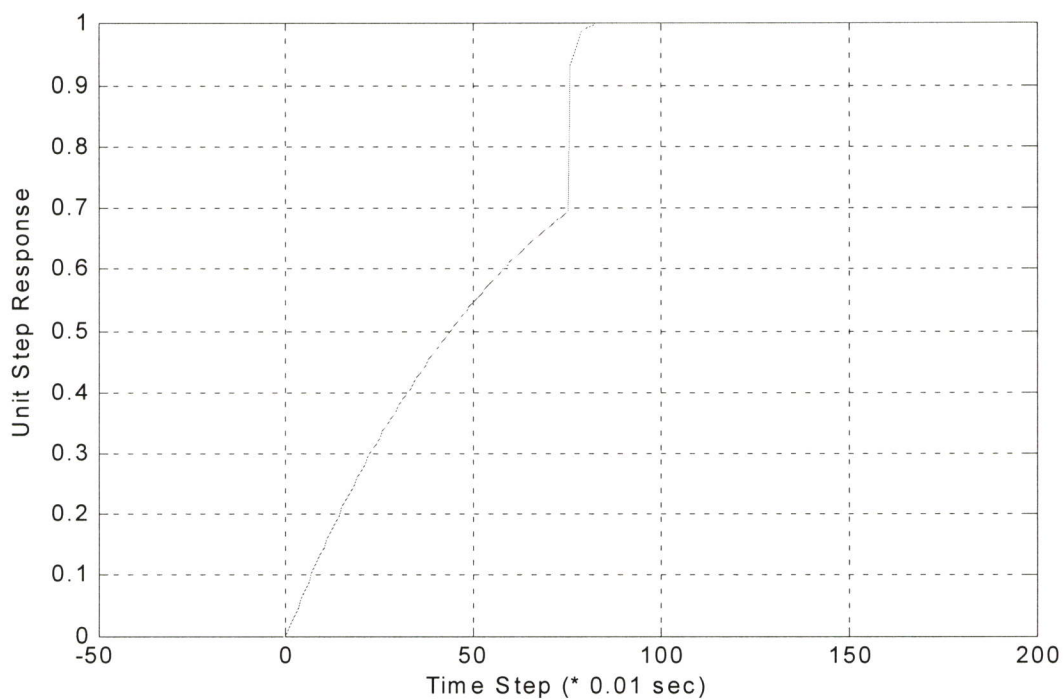


ภาพที่ 5.55 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2
(L_2)

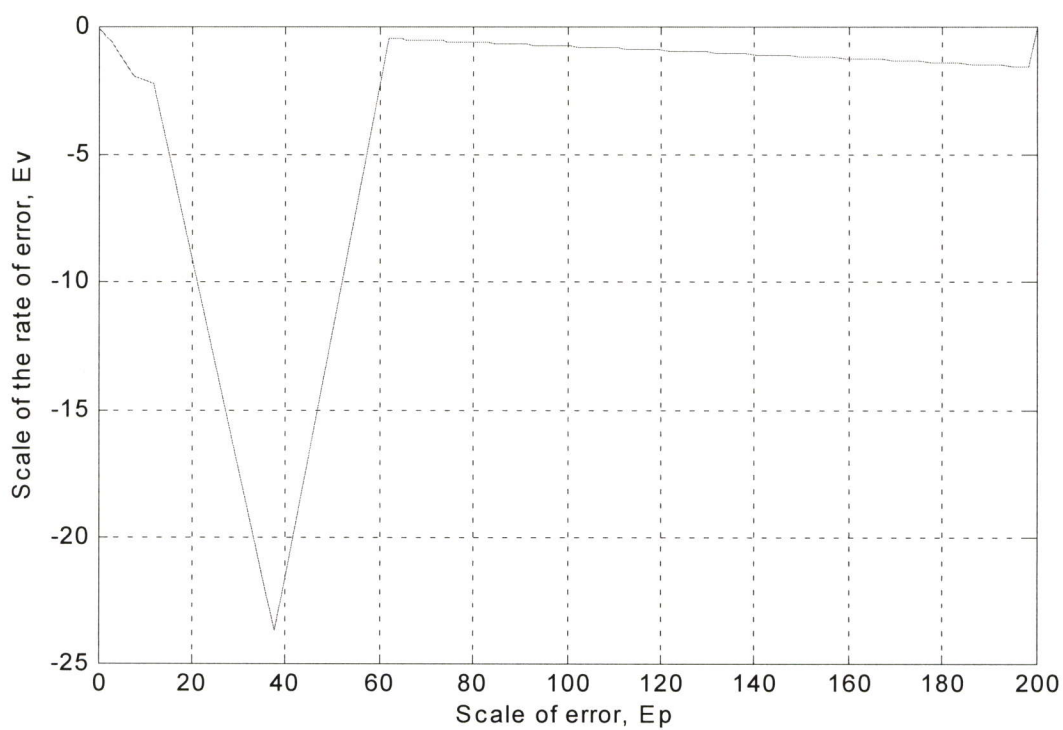


ภาพที่ 5.56 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=1$

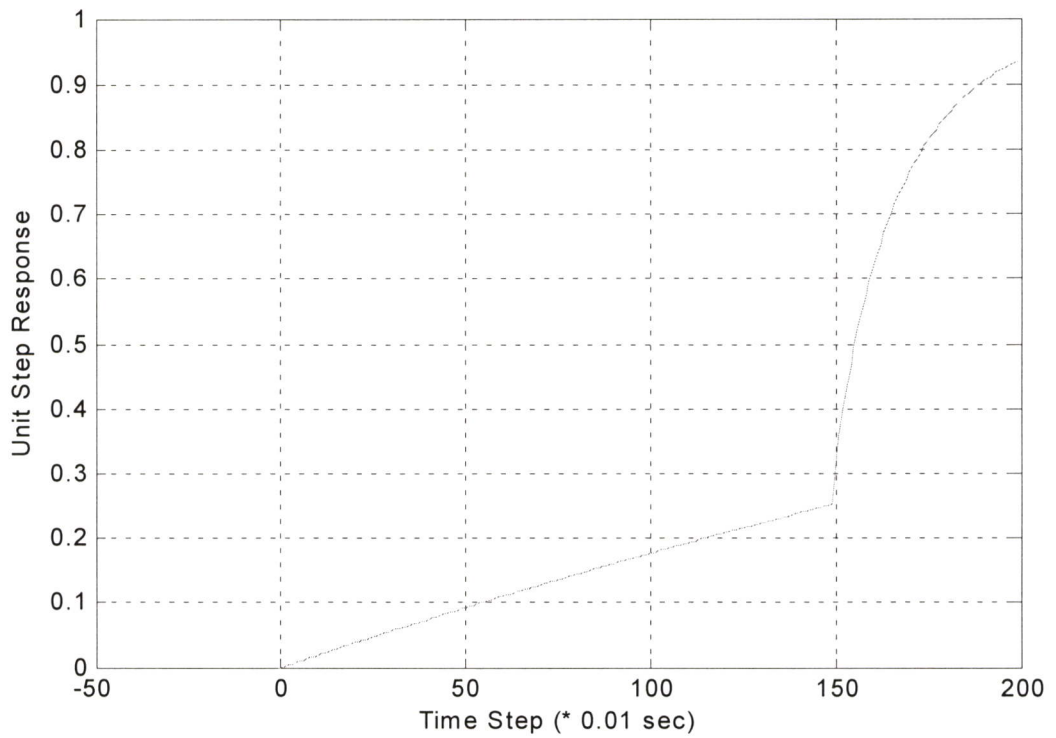
ภาพที่ 5.56 แสดงค่าแอมพลิจูดการตอบสนองของลำแขนกลเมื่อเทียบกับเวลา โดย $L_1=0.5$, $L_2=0.5$, $m_1=0.4$, $m_2=1$ ซึ่งมีค่าเอทพุท ที่ L_1 , L_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าการสั่นของแขนกลเกิดขึ้นที่ส่วนลำแขนมากและมีความอ่อนตัวมากเนื่องจากถูกถ่วงน้ำหนักด้วย m_2 ภาพที่ 5.57-5.58 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 1 (L_1) จะพบว่าเมื่อให้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมเกณฑ์ที่มีขนาดมาก $L=50$ สามารถที่จะควบคุมลำแขนกลแขนที่ 1 เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยช่วงนี้ให้พีซีพีไอทำงาน ภาพที่ 5.59 - 5.60 จะแสดงถึงการใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการสั่นของแขนกลในแขนที่ 2 (L_2) ซึ่งพบว่าไม่สามารถควบคุมให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เนื่องจากน้ำหนัก m_2 มีขนาดมากเกินไป



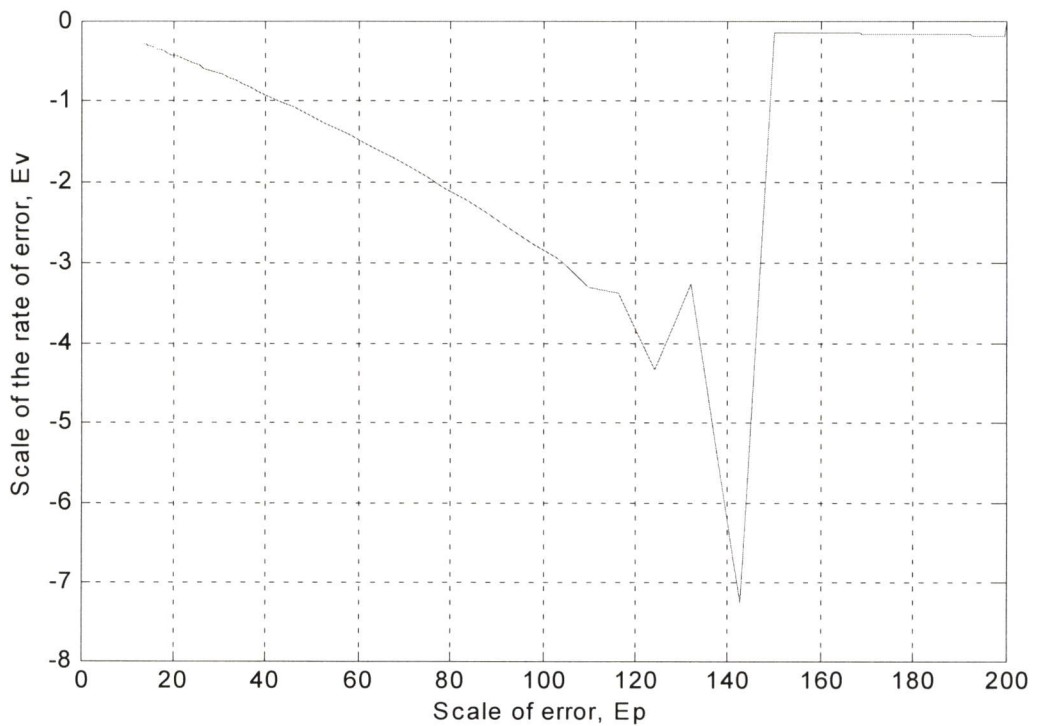
ภาพที่ 5.57 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.7, K_{uPI}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.58 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 1 (L_1)



ภาพที่ 5.59 แสดงผลตอบสนองของขั้นบันได โดย $L=50, K_{pi}=1, K_i=0.7, K_{upl}=1, A=0.1$ ของแขนกล ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)



ภาพที่ 5.60 ระบายเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของขั้นบันไดที่ตำแหน่งแขนที่ 2 (L_2)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุปของงานวิจัย

จากการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อแบบบางได้ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งในการวิจัยนี้ได้นำเอาสมการพลศาสตร์ลากรางเจียน (Lagrangian dynamics) และทฤษฎีบีมของ Euler-Bernoulli มาใช้ในการวิเคราะห์ ทำให้ลดความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาแรงที่กระทำต่อมวลในแต่ละแขน ซึ่งทฤษฎีวิธีของ Lagrange จะพิจารณาพลังงานของลำแขน โดยจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปของสมการปริภูมิสถานะ (state space) แล้วนำสมการปริภูมิสถานะมาใช้ในการออกแบบการควบคุมโดยวิธีพีซีพีไอ-สไลดิงโหมด ผลสำเร็จที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีประสิทธิภาพและทำให้ระบบคงทนดีเลิศ แต่ยังคงรักษาโครงสร้างการควบคุมแบบพีซีพีไอต้นแบบไว้ โดยได้เพิ่มโครงสร้างการควบคุมแบบสไลดิงโหมด ซึ่งทั้งสองส่วนประกอบสามารถที่จะเสริมสร้างระบบการควบคุมซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้สามารถขจัดปัญหาการสั่นในช่วงที่สัญญาณเข้าหาระนาบสไลดิงโหมดโดยผลของกฎการควบคุมแบบพีซีพีไอ หรืออีกนัยหนึ่งองค์ประกอบการควบคุมแบบสไลดิงโหมดสามารถรับรองผลวิถีโคจรเอาท์พุทจะลู่เข้าหาขอบเขตการทำงานของการควบคุมแบบพีซีพีไอ ซึ่งสามารถรับมือภาระหน้าที่เพื่อที่จะปรับการควบคุมให้ราบเรียบสู่จุดหมายสภาวะคงตัวในช่วงเวลาที่สั้น

ในการจำลองผลการทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ และโปรแกรม MATLAB ในการจำลองผลได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถใช้การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดในการควบคุมการตอบสนองของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ สามารถขจัดปัญหาการสั่นสะเทือนได้ในสภาพทางกายภาพที่เหมาะสม การเสริมสร้างการควบคุมระหว่างพีซีพีไอและสไลดิงโหมดเป็นไปอย่างต่อเนื่องทำให้ระบบมีความคงทนเที่ยงตรงและเสถียรภาพสูง ทั้งนี้มีข้อนำสังเกตจากผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จากการใช้เกนน้อยและเกนใหญ่ คือ การปรับเกน หรือ การปรับพารามิเตอร์ในการควบคุมไม่ควรใช้ค่าเกนที่มากเกินไป

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

ในการนำวิธีการออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดนี้ไปใช้ในการควบคุมขบวนการจริงจะต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพ การจำลองผลโดยการ

เลือกสัญญาณทางเข้า อัตราการขยายที่เหมาะสมจึงจะทำให้การควบคุมได้ประสิทธิภาพสูงสุด ลดความผิดพลาดของระบบการควบคุม

6.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

1. ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวควบคุมใช้วิธีในการลองผิดลองถูกทำให้ใช้เวลาในการเลือกค่าที่เหมาะสม ปัญหานี้เป็นปัญหาจากการออกแบบของระบบควบคุมใน [31] ซึ่งสมมติว่าเราไม่ทราบค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

2. ปัญหาในช่วงที่มีการสลับการควบคุมระหว่างสไลดิงโหมดกับพีซีพีไออาจส่งผลให้ระบบไม่มีเสถียรภาพในช่วงอัตราการขยายที่มากเกินไปในบางช่วง ทั้งนี้ สิ่งที่ต้องทำต่อไปจากงานวิจัยนี้ คือ การวิเคราะห์หาเสถียรภาพของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบขึ้น

6.4 แนวทางการพัฒนา

การควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมดที่ใช้ในการจำลองผลการทดลองสามารถทำงานได้ดีแต่ต้องมีการหาค่าพารามิเตอร์หลายค่าในการทดลองผิดทดลองถูก ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร จึงอาจใช้วิธีการแบบนิรอรลเน็ตเวิร์ค (neural network-like structure) มาใช้ควบคู่กับการควบคุมแบบพีซีพีไอ-สไลดิงโหมด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chernousko, F.L., Akulenko, L.D. and Bolotnik, N.N. "Time-Optimal Control for Robotic Manipulators." *Optimal Control Application & Methods*. Vol.10, 1989. pp. 293-311.
- [2] Feddema, J.T., Eisler, G.R. and Segalman, D.J. "Integration of Model-Based and Sensor-Based Control for a Two-Link Flexible Robot Arm." *IEEE*. 1990. pp. 435-439.
- [3] Luca, A.D. "Explicit Dynamic modeling of a Planar Two-Link Flexible Manipulator." *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*. December 1990. pp. 528-530.
- [4] Hillsley, K.L. and Yurkovich, S. "Vibration Control of a Two-Link Flexible Robot Arm." *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. April 1991. pp. 2121-2126.
- [5] Wang, D. and Vidyasager, M. "Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link-Part I: Feedback Linearization." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. Vol.113, December 1991. pp. 655-661.
- [6] Wang, D. and Vidyasager, M. "Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link-Part II: Observer-Controller Stabilization." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. Vol.113, December 1991. pp. 662-668.
- [7] Lewis, F.L. and Vandegrift, M. "Flexible Robot Arm Control By a Feedback Linearization/Singular Perturbation Approach." *IEEE*. 1993. pp. 729-736.
- [8] Matsuno, F. and Yamamoto, K. "Dynamic Hybrid Position/Force Control of a Flexible Manipulator." *IEEE*. 1993. pp. 462-467.
- [9] Luo, Z.H. and Guo, B. "Further Theoretical Results on Direct Strain Feedback Control of Flexible Robot Arms." *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol.40, no.4, April 1995. pp. 747-751.
- [10] Wang, X.S., Xu, W.L., Tso, S.K. and Zhang, J.Z. "Path Error Compensation of a Two-Link Flexible Robot Arm Based on Integrated Laser Transducers." *1997 IEEE*. 1997. pp. 3786-3790.

- [11] Yang, H., Krishnan, H., Ang, M.H.Jr. "A Model Feedback Control Law for Vibration Control of Multi-Link Flexible Robots." Proceedings of the American Control Conference. June 1998. pp. 1821-1822.
- [12] Dogan, A. and Ifter, A. "Modeling and Control of a Two-Link Flexible Robot Manipulator." Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications. September 1998. pp. 761-765.
- [13] Sarkar, P.K., Yamamoto, M. and Mohri, A. "A Numerical Method to Minimize Tracking Error of Multi-Link Elastic Robot." Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. October 1998. pp. 685-690.
- [14] Book, W.J., Maizza-neto, and Whitney, D.E. "Feedback Control of two-beam two-joint Systems with distributed Flexibility." Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control. December 1975. pp. 424-431.
- [15] Balas, M. "Feedback Control of Flexible Systems." IEEE Transactions of Automatic Control. Vol.23, 1978. pp. 673-679.
- [16] Book, W.J. "Analysis of Masses Elastic Chains with Servo Controllers Joints." Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control. Vol. 101, 1979. pp. 187-192.
- [17] Truckenbrodt, A. "Control of Elastic Mechanical Systems." Regelungstechnik. Vol.30. 1982. pp. 277-285.
- [18] Karkkainen, P. and Halme, A. "Model Space Control of Manipulator Vibration Motion." SYROCO 1985. Barcelona, November 1985. pp. 101-105.
- [19] Judd, R.P. and Falkenburg, D.R. "Dynamics of Non rigid Articulated Robot Linkages." IEEE Transactions on Automatic Control. Vol.30, 1985. pp. 499-502.
- [20] Sunada, W.H. and Dubowsky, S. "On the Dynamic Analysis and behavior of industrial Robotic Manipulator with Elastic Members." Journal of Mechanical Design. Vol.105, 1983. pp. 42-51.
- [21] Chassiakos, A.G. and Bekey, G.A. "Pointwise Control of Flexible Manipulator Arm." SYROCO 1985. Barcelona, November 1985. pp. 113-117.
- [22] V. Zeman, R.V. Patel, and K. Khorasani, "Control of a flexible – joint robot using neural networks," IEEE Transactions on Control Systems vol.5, no.4, pp. 453 – 462, July 1997.

- [23] M. Moallem, K. Khorasani, and R.V. Patel, "An integral manifold approach for tip position tracking of flexible multi – link manipulators," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol.13, no.6, pp. 823 – 837, December 1997
- [24] A. Yazdizadeh, K. Khorasani, and R.V. Patel, "Identification of a two – link flexible manipulator using adaptive time–delay neural networks," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol.30,no.1, pp.165 – 172, Feb. 2000
- [25] M. Moallem, R.V. Patel, and K. Khorasani, "An inverse dynamics control strategy for tip position tracking of flexible multi – link manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol.14, no.9, pp. 649 – 658, September 1997.
- [26] Jin – Soo Kin, Masaru Uchiyama: Dynamic Modeling of Two Cooperating Flexible Manipulators, *KSME International Journal*, 14- - 2 (2000), 188-196.
- [27] D. Cheng and R.V. Patel, 2001, "Neural network based tracking control of a flexible macro – micro manipulator system," submitted to *Neural Networks*.
- [28] Smart, D. "Effect of Gravity on the Static and Dynamic Characteristics of a Single Link Component of Flexible Multibody Systems." *Proceedings of ASME 14th Biennial Component Conference on Mechanical Vibration and Noise*. Albuquerque, NM, September 19-22, 1993.
- [29] G. Chen, "Conventional and fuzzy PID controller: An overview," *Int. J. Intell. Control Systems*. Vol. 1, pp. 235-246. 1996.
- [30] T. Pattaradej, P. Sooraksa and G. Chen, "Implementation of a modified fuzzy proportional – integral computer aided control for DC servo motors," *Proc. Of Intelligent Technologies (In Tech 2001)*, Thailand, Nov.27 – 29, 2001, pp.85 – 90
- [31] P. Sooraksa and G. Chen, "Mathematical modeling and fuzzy control for flexible – link robots, *J. of Mathematical Computing and Modeling*, Vol. 27, No.6, pp.73 – 93, 1998.
- [32] D. Misir, H. A. Malki and G. Chen, "Design and analysis a fuzzy proportional – integral derivative controller," *Int.J. of Fuzzy Sets and Systems*, Vol.79, pp.297 – 314, 1996.
- [33] T. Pattaradej, P. Sooraksa and G. Chen, "Implementation of a modified fuzzy proportional – integral computer aided control for DC servo motors," *Proc. Of Intelligent Technologies (In Tech 2001)*, Thailand, Nov.27 – 29, 2001, pp.85 – 90

- [34] T. Pattaradej, P. Chandang, M. Lertwatechakul, P. Sooraksa and G. Chen, "A speed evaluation for conventional PID and fuzzy controllers," Proc. Of Intelligent Technologies (In Tech 2001), Thailand, Nov. 27 – 29, 2001, pp. 91 – 96.
- [35] H. K. Khalil, Nonlinear Systems, 2nd ed., Prentice Hall, NJ, 1996.

ภาคผนวก

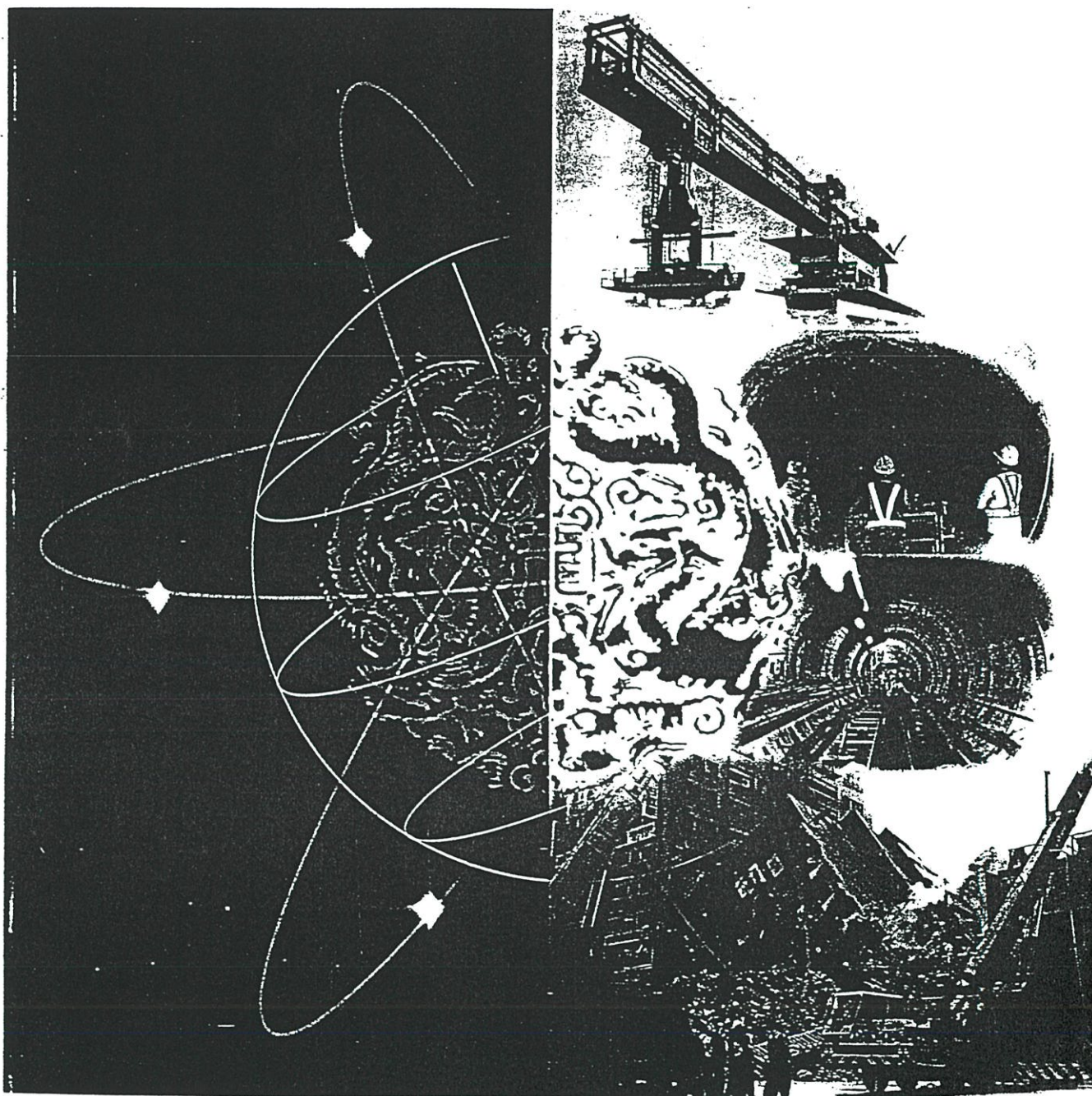
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
และได้รับการตีพิมพ์



IAARC/CIB/IEEE/IFAC/IFR

17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction

Proceedings



18-20 September 2000, Taipei, Taiwan



International Association for Automation and Robotics in Construction



International Council for Research and Innovation in Building and Construction



Institute of Electrical and Electronics Engineers



International Federation of Automatic Control



International Federation of Robotics

PROCEEDINGS OF THE

**17th IAARC/CIB/IEEE/IFAC/IFR International Symposium
on Automation and Robotics in Construction**



IAARC/CIB/IEEE/IFAC/IFR

Edited by

**Ming-Teh Wang
Jenn-Chuan Chern
H. Ping Tserng
Shang-Hsien Hsieh
Tao-Sheng Wu
Yen Wei**

September 18-20, 2000
Taipei, Taiwan

VIBRATION SUPPRESSION OF A TWO-LINK FLEXIBLE MANIPULATOR

Somchai Wiriyathornphan and Pitikhate Sooraksa

*Department of Industrial Technology and Information Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand
Email: kspitikh@kmitl.ac.th*

Abstract: Flexible-link robot arms have advantages over the conventional ones such as less weight, less energy consumption, and smaller actuators. However, a disadvantage of the manipulators is the vibration occurred inherently due to the flexible behavior of the arms during operation. This situation may effect control performance in some applications, for example, the use of the robot for fine painting or welding. This paper describes vibration suppression of a two-link flexible manipulator by means of fuzzy sliding mode control based neural network-like structure. Simulation and experimental results shows an effectiveness and control performance of the proposed method for vibration suppression of the robot links.

Keywords: bicycle robot, fuzzy logic control, modeling, intelligent control, two wheeled robot

1 INTRODUCTION

To improve the system response, energy consumption, and the overall mass components of robot manipulators, various types of flexible link manipulators have been modeled, designed, and implemented [1-3]. In [4], modeling and control of a single flexible-link robot arm was proposed and developed. However, the two-link counterpart, in general, is more versatile than the single-link robot arm at least in the sense of reachability. Since the dynamic model and other effects of a two-link flexible manipulator is not just simply developed by direct superposition of two models of two single flexible link robot arms, the interaction of dynamic coupling between one link to the other needs to be included in the working model.

One of the problems in control of a flexible-link manipulator is the vibration during operation of this type of robot arms. The vibration occurs due to the inherite properties of the material made of the arm and its dimension. Long and slim arms have more vibration than the short and thick ones. With this common sense, one may wish to choose the appropriate dimension for the robot arm's structure to reduce the flexible nature created the vibration. Intuitively, it seems to obtain an easy and inexpensive

way to suppress the vibration modes of the manipulator by enhancing the physical dimension and coping with some kind of vibration absorption material, instead of designing a sophisticate control scheme to suppress them. Some researcher prefers to work with very thin arms for the sake of enlightening the nature of vibration, while the others view the very thin arms as useless ones for many real-world applications dealt with loads. The key concept to adopt the ideas for the judgement of significant implementation between the two approaches would be the objective of the research — depending on for basic research or for applications. It is wise to investigate issues in both engineering applications and studying basic research.

Among various control schemes, variable structure control or sliding mode control (SLM) can be designed for handling nonlinear effects of the system, while having good disturbance rejection and trajectory tracking. Researchers have their own version of the similar approach for the flexible link structure [5-7]. To enhance the controller performance and remedy the chattering effects, fuzzy control, both sliding mode approach to fuzzy control and fuzzy approach to sliding mode control, has been proposed for the nonlinear systems. These fuzzy SLM controllers have been reported that the

satisfactory performance is achieved for given tasks [8-9].

In this paper, a fuzzy sliding mode control has been designed for vibration suppression and tracking trajectory of a two-flexible link robot arm. Unlike the above literatures, our fuzzy SMC contains a neural network-like structure. In other words, it has a layered appearance for the standard fuzzy control procedure. The paper is organized as follows: Section 2 describes development of model. In section 3, a fuzzy sliding mode control is described in a neural network-like structure. Section 4 gives simulation results to validate the proposed control law and Section 5 summarizes the study.

2. MATHEMATICAL MODEL

A two-flexible link robot manipulator is illustrated in Figure 1 and 2. The hardware of the system is under construction. As can be seen from Figure 1, the flexible robot arms is planar ones, we then adopt the mathematical model developed by Scott in [10]. The model is derived by using the Euler-Lagrange method. The equations of motion are developed using the assume mode method. That is

$$\begin{aligned} w_1(x, t) &= \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i(x_1) a_i(t) = \phi^T a = a^T \phi \\ w_2(x, t) &= \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j(x_2) c_j(t) = \psi^T c = c^T \psi \end{aligned} \quad (1)$$

The kinetic energy of the first and the second link is

$$T = T_{L_1} + T_{L_2} \quad (2),$$

$$T_{L_1} = \frac{1}{2} J_1^{(1)} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \dot{a}^T M_a^{(1)} \dot{a} + \dot{\theta}_1 \dot{a}^T M_{1a}^{(1)} \quad (3),$$

$$\begin{aligned} T_{L_2} &= \frac{1}{2} J_1^{(2)} \dot{\theta}_1^2 + J_{12} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} J_2^{(2)} \dot{\theta}_2^2 \\ &+ \dot{\theta}_1 \dot{a}^T M_{1a}^2 + \dot{\theta}_2 \dot{a}^T M_{2a} + \frac{1}{2} \dot{a}^T M_a^{(2)} \dot{a} \\ &+ \dot{\theta}_1 \dot{c}^T M_{1c} + \dot{\theta}_2 \dot{c}^T M_{2c} + \frac{1}{2} \dot{c}^T M_c \dot{c} \\ &+ \dot{c}^T M_{ca} \dot{a} \end{aligned} \quad (4),$$

where the subscripts L_1 and L_2 stand for the 1st and the 2nd link, respectively. Parameters J and M with the superscripts and subscripts correspond to the inertia term of the i -th link and the feedback (or

feedforward if it has transpose) from the joint angle to the generalized coordinate.

The potential energy V is

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{l_1} (EI)_1 (w_1'')^2 dx_1 + \frac{1}{2} \int_0^{l_2} (EI)_2 (w_2'')^2 dx_2 \quad (5).$$

We now have the Lagrangian $L = T - V$ by using (2)-(5). With some lengthy calculation by inserting the obtained Lagrangian L into the Euler-Lagrange equation and the aid of Mathcad software package, we can arrange the result in state-space form

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6),$$

where the state vector is defined as

$$x = \left[\theta_1 \quad \theta_2 \quad a^T \quad c^T \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{a}^T \quad \dot{c}^T \right]^T \quad (7).$$

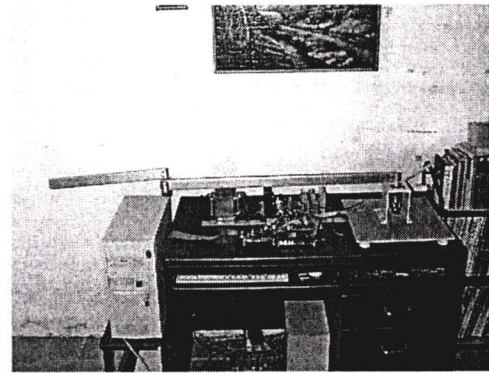


Figure 1. Photograph of the arms made of aluminum (under construction).

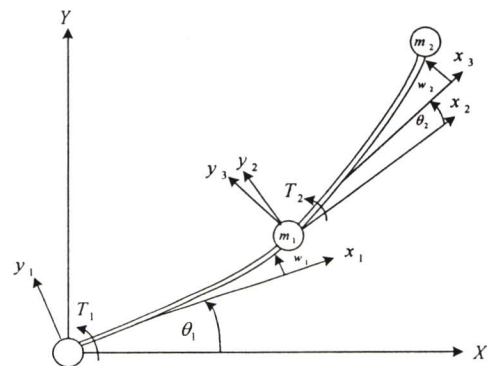


Figure 2. A two-link flexible robot manipulators.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_L \\ \dot{\psi}_L \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\phi}_L \\ \ddot{\psi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\text{inv}(M_{\text{sys}})K_{\text{sys}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \phi_L \\ \psi_L \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_L \\ \dot{\psi}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \text{inv}(M_{\text{sys}})f \end{bmatrix} u \quad (8).$$

For more detailed calculation and derivation, the reader is referred to [10].

3. FUZZY SLIDING MODE CONTROL DESIGN

The mathematical model of a two-flexible link robot arm is described in the last section. This section provides detailed design and analysis of a fuzzy sliding mode controller in a neural network structure. The neural network is structurally (not functionally) employed to illustrate the equivalent structure of the standard fuzzy control method (fuzzification, inference engine, and defuzzification). Figure 3 shows the hybrid digital-analog overall control system architecture, in which sampling and signal holding devices are not shown for the sake of convenience. The membership function and the singleton output membership function of S and dS are shown in Figure 4 and 5.

We now define the error signal $e(t)$, according to Figure 3, as $e(t) = r(t) - y(t)$, where $r(t)$ is the tracking reference or set point value and $y(t)$ is the output. These parameters are in vector forms and the elements of the vectors are corresponding to the link being consideration. The sliding variable and its derivative can be defined, as usual,

$$\begin{aligned} S &= e + \lambda e \\ dS &= \frac{S(t+T) - S(t)}{T} \end{aligned} \quad (9),$$

and λ is a selected positive constant.

Traditionally, the designed sliding mode control input $u(t)$ is defined in the form of signum function $u = H \text{sgn}(S)$, where H is the bounded control input signal. Upon observing this switching control law, it is easy to see that, as witness by many simulations and various practical applications, the signum or sign function can lead the system into chattering trajectory

around the sliding surface. To improve and remedy, the fuzzy control law based on the input variables can be categorized in Table 1. The control rule used here is derived based on natural tracking [4]. Parameters α and β in Figure 5 are two parameters to be determined from the trial and error process.

Table 1. The control rule for the action

IF		THEN
S	dS	Decision
>0	>0	H ₁
>0	0<	H ₂
0<	>0	H ₃
0<	0<	H ₄

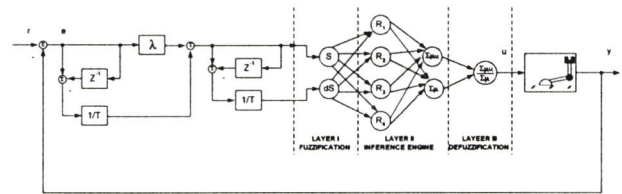


Figure 3. The fuzzy sliding mode based neural network-like structure.

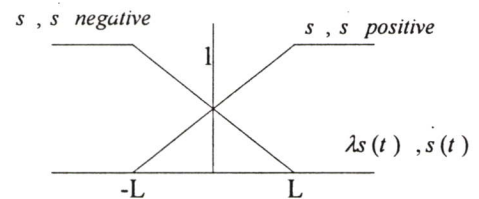


Figure 4. Input membership function of S and dS.

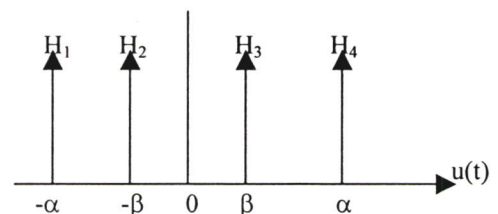


Figure 5. Output membership function.

4. SIMULATION RESULTS

Values used in simulation may be assumed, according to the dimension of the real physical system, to be shown in Table 2.

Table 2. Link Parameters

Parameters	Link 1	Link 2
Beam thickness	0.002 (m)	0.002 (m)
Beam width	0.038 (m)	0.038 (m)
Beam length	1	0.50 (m)
Flexural rigidity	4.1 (N m ²)	0.5 (N m ²)
Mass/unit length	0.3	0.3

The simulations were performed based on the robot arm model and are presented in Figure 6 and 7. Figure 6 shows the simulation of the tracking trajectory, which the desired set points of the joint angles for the link 1 and link 2 are 60 and 40 degrees, respectively. Figure 7 illustrates the corresponding tracking errors. The Figures are shown much alleviation of vibration.

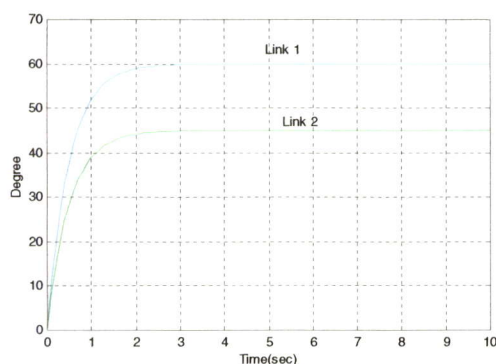


Figure 6. The tracking trajectory at the end point of the arm.

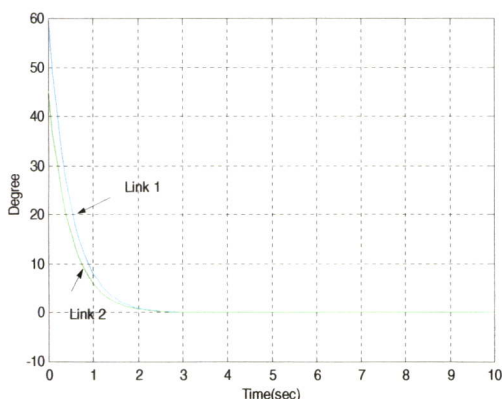


Figure 7. The tracking errors of the end point of the arm.

5. CONCLUSION

We have developed a fuzzy sliding mode controller based neural network-like structure. Our simulation results have shown that it is possible to implement the proposed control system. Further work is necessary to quantify the effectiveness of the proposed control scheme.

Acknowledgments

The research is supported by the Thailand Research Fund. The authors would like to thank Prof. Dr. G. R. Chen of the University of Houston for his valuable suggestion to initialize this work.

REFERENCES

- [1] Canon, R. H. Jr., and Schmitz, E., "Initial Experiment on the End-Point Control of flexible one-Link Robot," *The international Journal of Robotic Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 666-672, 1984
- [2] Lin, L., and Lewis, F., "Enhanced measurement and estimation methodology for flexible link arm control," *Journal of Robotic System*, Vol. 11(5), pp.367-385, 1994.
- [3] Ibrahimbegovic, A., and Mamouri, S., "Nonlinear dynamics of flexible beams in planar motion formulation and time-stepping scheme for stiff problems," *Computers and Structures*, pp. 1-22, 1999.
- [4] Sooraksa, P., and Chen, G., "Mathematical Modeling and Fuzzy Control of a Flexible-Link Robot Arm," *J. of Mathematical Computing and Modeling*, Vol. 27, pp. 73-93, 1998.
- [5] Drakunov, S. V., and Ozguner, U., "Vibration Suppression in Flexible Structures via the Sliding-Mode Control Approach," *Proceedings of the 31st Conference on Decision and control*, pp. 1365-1366, 1992.
- [6] Yeung, K. S., and Chen, Y. P., "Sliding mode controller design of a single link flexible manipulator under gravity," *Int. J. Contr.*, Vol. 52, No. 1, pp. 101-117, July 1990.
- [7] Sabanovic, A., and Jezernik, K., "Chattering Free Sliding modes in Robotic Manipulators Control," *Robotica (1996)*, Vol. 14, pp. 17-29, 1996.
- [8] Ha, Q. P., "Sliding performance enhancement with fuzzy tuning," *Electronics Letters 31st*, Vol.33, No.16, pp.1421-1423, July 1997.
- [9] Lo, J. -C. and Kuo, Y. -H., "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control" *IEEE Trans. on fuzzy systems*, Vol.6, No.3, pp.426-435, August 1998.
- [10] Scott, M. A., "Time Varying Compensator Design for Reconfigurable Structures using Non-Collocated Feedback," Ph.D. Dissertation, Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, 1995.

ประวัติผู้เขียน

นายสมชาย วิทยาทรพันธุ์ เกิดเมื่อวันอังคารที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2500 ที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี

สำเร็จการศึกษาปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เกียรตินิยมอันดับสอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540 โดยได้รับทุนการศึกษาเรียนนอกเวลาราชการเป็นเวลา 3ปี จากองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541 ได้รับทุนการศึกษาเรียนนอกเวลาราชการเป็นเวลา 4 ปี จากบริษัท ทศท คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

มีบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ ที่ประเทศไต้หวัน "17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction"

ได้รับการอบรมจากต่างประเทศ ณ ประเทศฝรั่งเศส ในวิชา Tranmission Network Expanding Project โดยรับทุนจาก องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

ปัจจุบันปฏิบัติงานในตำแหน่งวิศวกร 7 ฝ่ายโทรศัพท์ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5 บริษัท ทศท คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)