

การควบคุมหุ่นเพนดูลบอทที่มีสัญญาณรบกวน  
CONTROL OF PENDUBOT WITH CHAOTIC PERTURBATION

พงศ์ภัทร อวุธโสภ  
PONGPHUT AWOOTSOA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2357-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมหุ่นเพนดิวบอทที่มีสัญญาณรบกวนอลวน

CONTROL OF PENDUBOT WITH CHAOTIC PERTURBATION

พงศ์ภัทร อวุธโสภา

PONGPHUT AWOOTSOPA

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....61712  
วัน,เดือน,ปี.....19 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2357-2

**CONTROL OF PENDUBOT WITH CHAOTIC PERTURBATION**

**PONGPHUT AWOOTSOPA**

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

**2006**

**ISBN 974-15-2357-2**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมหุ่นเพนดิวอทที่มีสัญญาณรบกวน
นักศึกษา	นายพงศ์ภัทร อวุธ โสภา
รหัสนักศึกษา	44061817
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

### บทคัดย่อ

นี่เสนอการควบคุมหุ่นเพนดิวอท (Pendubot) ที่มีสัญญาณรบกวน โดยสร้างชุดควบคุมแบบฟัซซีพีดี (Fuzzy PD Controller) สองชุดทำงานอิสระแบบขนาน โดย "เพนดิวอท" เป็นชื่อเรียกของคานเบิ้ลเพนดิวอทที่ทำงานแทนหุ่นยนต์ โดยมีมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ข้อแรกเพื่อส่งผ่านการควบคุมไปยังแขนข้อที่สองเพื่อบังคับให้ตั้งตรง ในการปรับแต่งพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมนั้น ใช้ทฤษฎีบทเกนน้อย (Small Gain Theorem) เพื่อประกันเสถียรภาพแบบบีไอบีโอ (BIBO) อันเป็นเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงในการออกแบบระบบควบคุม

ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าระบบควบคุมหุ่นเพนดิวอทมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนแบบออสซิลเลชันได้ดีเมื่ออัตราส่วนของสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณอินพุตไม่เกิน 1.5 เปอร์เซ็นต์

<b>Thesis Title</b>	Control of Pendubot with Chaotic Pertubation
<b>Student</b>	Mr. Pongphut Awootsopa
<b>Student ID.</b>	44061817
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Pitikhate Sooraksa

### **ABSTRACT**

This research presents control of Pendubot with chaotic perturbation using two fuzzy PD controllers working in paralelle. A "Pendubot " consisis of a double pendulum actuated only at the first joint to control the second link in order to stay up-right all the time. To ensure stability of the system, the bounded-input/bounded-output(BIBO) stability is derived from the small gain theorem under the uncertain perturbation. The sufficient condition for stability is then obtained accordingly.

Computer simulation results show that the Pendubot system is robust to the chaotic perturbation if the perturbed signal to input ratio is less than 1.5 percent.

## กิตติกรรมประกาศ

จากความเมตตาของ รศ. ดร. ปิติเขต สุริรักษา ที่กรุณาให้คำชี้แนะและเป็นที่ปรึกษาแก่ผู้วิจัย ด้วยดีตลอดมา ในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจมาตลอด

และสุดท้ายที่จะลืมเสียไม่ได้คือ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชาย อันเป็นที่รักยิ่ง ที่คอยอบรมเลี้ยงดูตั้งแต่เล็กจนสำเร็จในสิ่งที่มุ่งหวังไว้และประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ข้าพเจ้าเติบโต มาจนมีวันนี้ ฉะนั้น ขอให้คุณงามความดีใด ๆ ก็ตามที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่ทุก ๆ ท่านที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

พงศภัทร อวูธโสภา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของงานวิจัย.....	2
<b>บทที่ 2 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี.....</b>	<b>3</b>
2.1 งานวิจัยนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมพีไอดี.....	3
2.2 งานวิจัยภายในประเทศที่เกี่ยวข้องกับฟัซซี.....	5
2.3 งานวิจัยนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบฟัซซี.....	7
<b>บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมหุ่นเพนดูลบอท.....</b>	<b>10</b>
3.1 ทฤษฎีระบบหุ่นเพนดูลบอท.....	10
3.2 การออกแบบชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอท.....	12
3.3 การออกแบบชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนดูลบอท.....	13
3.4 เงื่อนไขการเลือกชุดควบคุมหุ่นเพนดูลบอท.....	14
3.5 การออกแบบชุดประมวลผลหุ่นเพนดูลบอท.....	15
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....</b>	<b>16</b>
4.1 ทฤษฎีบทเกนน้อย.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีพีดี.....	17
4.3 นอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี.....	19
<b>บทที่ 5 ผลการจำลองโดยคอมพิวเตอร์.....</b>	<b>23</b>
5.1 แบบจำลองหุ่นเพนคูบอทโดยคอมพิวเตอร์.....	23
5.2 การจำลองควบคุมหุ่นเพนคูบอท.....	27
5.3 การจำลองควบคุมหุ่นเพนคูบอทที่มีสัญญาณรบกวนแรงดล.....	29
5.4 การจำลองควบคุมหุ่นเพนคูบอทที่มีสัญญาณรบกวนอลวน.....	40
5.5 การจำลองควบคุมหุ่นเพนคูบอทที่มีสัญญาณรบกวนแบบขาว.....	51
5.6 การจำลองควบคุมหุ่นเพนคูบอทที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์.....	59
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>66</b>
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
6.2 แนวทางพัฒนาในอนาคต.....	67
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>68</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>72</b>
<b>ภาคผนวก ข.....</b>	<b>76</b>
<b>ภาคผนวก ค.....</b>	<b>85</b>
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>91</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ตัวควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท.....	12
3.2 พารามิเตอร์ตัวควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท.....	13
4.1 ค่านอร์มของชุดควบคุมฟัซซีพีดีการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท.....	21
4.2 ค่านอร์มของชุดควบคุมฟัซซีพีดีการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท.....	22
5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมหุ่นเพนคูบอท.....	23
5.2 นอร์มของชุดควบคุมฟัซซีพีดีการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท.....	25
5.3 นอร์มของชุดควบคุมฟัซซีพีดีการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท.....	26

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ทฤษฎีระบบหุ่นเพนคูบอท.....	10
3.2 แผนภาพการควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท.....	12
3.3 แผนภาพการควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท.....	13
3.4 แผนภาพจากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมาย.....	14
3.5 แผนภาพการออกแบบเงื่อนไขการควบคุม.....	14
3.6 แผนภาพการประมวลผลของหุ่นเพนคูบอท.....	15
4.1 ระบบควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นทั่ว ๆ ไป.....	16
4.2 ระบบควบคุมพีชชีพีดี.....	18
4.3 พื้นที่ทั้งหมดของพีชชีพีดี.....	21
5.1 ระบบควบคุมหุ่นเพนคูบอท.....	23
5.2 แผนภาพการควบคุมระบบหุ่นเพนคูบอทโดย Simulink.....	24
5.3 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก.....	27
5.4 ค่ามุมระหว่างแกนสอง สอดคล้องกับรูปที่ 5.3.....	28
5.5 ค่าแรงบิด สอดคล้องกับรูปที่ 5.3.....	28
5.6 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 สอดคล้องกับรูปที่ 5.3.....	29
5.7 แผนภาพการประมวลผลหุ่นเพนคูบอท โดยมีสัญญาณรบกวนแรงคล.....	29
5.8 สัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาด 0.01 V.....	30
5.9 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (noise=0.01 V).....	31
5.10 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (noise=0.01 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.7.....	31
5.11 ค่าแรงบิด (noise=0.01 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.7.....	32
5.12 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (noise=0.01 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.7.....	32
5.13 สัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาด 0.014 V.....	33
5.14 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (noise=0.014 V).....	34
5.15 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (noise=0.014 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.14.....	35
5.16 ค่าแรงบิด (noise=0.014 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.14.....	35
5.17 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (noise=0.014 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.14.....	36
5.18 สัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาด 0.015 V.....	36
5.19 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (noise=0.015 V).....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (noise=0.015 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.19.....	38
5.21 ค่าแรงบิด (noise=0.015 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.19.....	39
5.22 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (noise=0.015 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.19.....	39
5.23 แผนภาพการประมวลผลหุ่นเพนคูบอท โดยมีสัญญาณรบกวนอลวน.....	40
5.24 สัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาด 0.05 V.....	41
5.25 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Chaotic noise=0.05 V).....	42
5.26 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Chaotic noise=0.05 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.20.....	42
5.27 ค่าแรงบิด (Chaotic noise=0.05 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.20.....	43
5.28 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (noise=0.05 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.20.....	43
5.29 สัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาด 0.08 V.....	44
5.30 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Chaotic noise=0.08 V).....	45
5.31 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Chaotic noise=0.08 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.30.....	46
5.32 ค่าแรงบิด (Chaotic noise=0.08 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.30.....	46
5.33 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (noise=0.08 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.30.....	47
5.34 สัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาด 0.09 V.....	47
5.35 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Chaotic noise=0.09 V).....	49
5.36 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Chaotic noise=0.09 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.35.....	49
5.37 ค่าแรงบิด (Chaotic noise=0.09 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.35.....	50
5.38 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (noise=0.09 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.35.....	50
5.39 แผนภาพการประมวลผลหุ่นเพนคูบอท โดยมีสัญญาณรบกวนแบบขาว.....	51
5.40 สัญญาณรบกวนแบบขาวขนาด 0.10 V.....	52
5.41 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (White noise=0.010 V).....	53
5.42 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (White noise=0.10 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.41.....	53
5.43 ค่าแรงบิด (White noise=0.10 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.41.....	54
5.44 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (White noise=0.10 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.41.....	54
5.45 สัญญาณรบกวนแบบขาวขนาด 0.015 V.....	55
5.46 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (White noise=0.15 V).....	56
5.47 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (White noise=0.15 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.46.....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.48 ค่าแรงบิด (White noise=0.15 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.46.....	57
5.49 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (White noise=0.15 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.46.....	58
5.50 แผนภาพการประมวลผลหุ่นเพนคูบอทโดยมีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์.....	59
5.51 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.16 V.....	59
5.52 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Gaussian Noise=0.16V).....	60
5.53 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Gaussian Noise=0.16 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.52.....	61
5.54 ค่าแรงบิด (Gaussian Noise=0.16 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.52.....	61
5.55 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1 (Gaussian Noise=0.16 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.52.....	62
5.56 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีขนาดสูงสุด 0.21 V.....	62
5.57 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Gaussian Noise=0.21 V).....	64
5.58 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Gaussian Noise=0.21 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.57.....	64
5.59 ค่าแรงบิด (Gaussian Noise=0.21 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.57.....	65
5.60 ค่าระยะห่างระหว่าง d กับ d1(Gaussian Noise=0.21 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.57.....	65
ก.1 โครงสร้างหุ่นเพนคูบอท.....	66
ข.1 พื้นที่ทั้งหมดของพีซีพีดี.....	66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปี 1994 [1] Spong เป็นผู้ริเริ่มการแก้ปัญหาโดยสร้างตัวควบคุมพีไอดีเพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นอะโรบอท และในปี 1995 [2] Spong ได้สร้างตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ในการควบคุมหุ่นเพนคูบอทซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้จะเกิดค่าผิดพลาดมากกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมโดยใช้พีซี ในปี 1998 [3] Sanchez, Nuno, Hsu และ Chen ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมพีซีพีดีในการควบคุมหุ่นเพนคูบอท ในปี 2002 [4] Sanchez และ Flores ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมพีซีพีไอพลัสพีดีในงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นยังคงเปิดประเด็นการค้นหาวิธีที่ดีในการควบคุมหุ่นเพนคูบอท ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเสนอการประยุกต์ตัวควบคุมพีซีพีดี สำหรับควบคุมหุ่นเพนคูบอท โดยเลือกที่จะจำลองสัญญาณรบกวนหลายรูปแบบเพื่อทำการทดสอบระบบควบคุมหุ่นเพนคูบอทที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน และได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

จากการศึกษาค้นคว้าในเรื่องการควบคุมหุ่นเพนคูบอทที่มีสัญญาณรบกวน ระบบต้องมีตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการตอบสนองระบบที่รวดเร็วและแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วสัญญาณรบกวนอาจเกิดจากภายนอกหรือภายในระบบก็ได้ จึงได้สร้างแบบจำลองสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นการรบกวนในขั้นที่ไม่อาจทำนายได้แทรกเข้าภายในระบบหุ่นเพนคูบอท แต่จากการทดสอบโดยคอมพิวเตอร์ตัวควบคุมสามารถควบคุมสัญญาณรบกวนได้ระดับหนึ่งเท่านั้น ถ้าสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นชุดควบคุมก็จะไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในสภาวะปกติได้ ถ้าเกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่มีมากเกินไปจนจำกัดหุ่นเพนคูบอทอาจทำงานผิดพลาด ผู้วิจัยจึงออกแบบวิธีควบคุมและกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวถึงในบทต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเป็นการออกแบบตัวควบคุมหุ่นเพนคูบอท ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
- 2) เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์แก้ปัญหาคำสั่งการทำงานผิดพลาดของการควบคุมแขนกล การทรงตัว การควบคุมรถอัตโนมัติให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องแม่นยำ

### 1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น

- 1) ระบบควบคุมที่ออกแบบจะสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้
- 2) ทดสอบความคงทนของหุ่นเพนคูบอทที่มีสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ทฤษฎีการเคลื่อนที่หุ่นเพนดูลบอท
- 2) ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีดีและพีซีพีดี

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการจำลองการทำงานของหุ่นเพนดูลบอทโดยใช้คอมพิวเตอร์
- 2) สร้างแบบจำลองสัญญาณรบกวนอลวนแบบต่าง ๆ เพื่อทดสอบระบบ
- 3) ทำการจำลองเปรียบเทียบผลการรบกวนแบบอลวนกับการรบกวนแบบอื่น ๆ

#### 1.6 ขั้นตอนของงานวิจัย

- 1) ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาเอกสารและข้อมูลที่รวบรวมได้
- 3) ออกแบบระบบและจำลองการทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์
- 4) หาเงื่อนไขวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีซีพีดี
- 5) จำลองระบบควบคุม ระบบควบคุมที่ได้ออกแบบ
- 6) สรุปผลการวิจัย

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์เพนคูบอทการควบคุมแบบพีไอดีและควบคุมแบบพีซี จะกล่าวได้ดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมพีไอดี

ปี 1992

Tong และ Bobis [5] ได้ร่วมกันออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในโดเมนตอบสนองทางเวลาและความถี่ โดยอาศัยการควบคุมแบบขนานระหว่างตัวควบคุมอะนาล็อกพีไอดีและตัวควบคุมดิจิทัลพีไอดี แล้วได้ออกแบบการทำงานแต่ละส่วนของตัวควบคุมแบบพีดีและแบบพีไอ ทำให้สามารถพิจารณาการตอบสนองของตัวควบคุมดิจิทัลพีไอดีจากการออกแบบตัวควบคุมอะนาล็อกพีไอดีในแพลตฟอร์มของระบบออเดอ์สองและออเดอ์สาม

ปี 1994

Spong [1] ได้ศึกษาปัญหาของการควบคุมการแกว่งแขนกลขึ้นของหุ่นอะโรบอทซึ่งหุ่นอะโรบอทมีสองแขน โดยจับเร้าที่มอเตอร์ข้อที่สอง ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการป้อนกลับแบบเชิงเส้นเพื่อปรับปรุงการแกว่งขึ้นของหุ่นอะโรบอท ในการควบคุมนี้ประกอบด้วยกัน 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการควบคุมการแกว่งขึ้นและส่วนที่สองเป็นการรักษาการทรงตัว

ปี 1995

Block และ Spong [2] ได้ร่วมกันสร้างหุ่นเพนคูบอทซึ่งมีการจับเร้าที่มอเตอร์ข้อแรกเพื่อควบคุมการแกว่งแขนกลขึ้นและควบคุมการทรงตัวให้อยู่ในตำแหน่งเป้าหมายโดยชุดควบคุมการแกว่งแขนกลขึ้นใช้ตัวควบคุมพีไอดีและชุดทำการทรงตัวใช้ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์

Spong [6] ได้ศึกษาปัญหาของการควบคุมการแกว่งขึ้นและการทรงตัวของหุ่นอะโรบอทโดยมีการจับเร้าที่มอเตอร์ข้อที่สองเพื่อควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งเป้าหมายโดยชุดควบคุมการแกว่งแขนกลขึ้นใช้ตัวควบคุมพีไอดีและชุดทำการทรงตัวใช้ตัวควบคุมแบบแอลคิวอาร์

ปี 1996

Yamakita, Iwashiro, Sugahara และ Furuta [7] ได้ร่วมกันศึกษาอินเวอร์สเพนดูลัมซึ่งเป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบควบคุมคืบเบิ้ลเพนดูลัมจากตำแหน่งที่ถูกแขวนไปสู่ตำแหน่งเป้าหมาย

ปี 1997

Back และ Kuc [8] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมพีไอดีที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเองเพื่อแก้สัญญาณรบกวนจากเดิมเป็นการควบคุมแบบพีไอดี การเรียนรู้นี้ได้จากการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จัดเก็บไว้

ปี 1998

Samet, Masmoudi, Kharrat และ Kamoun [9] ได้ร่วมกันทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมพีไอดีทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบอนุกรม แบบขนานและแบบผสม ผลที่ได้แบบอนุกรมสามารถควบคุมได้ 89.8 เปอร์เซ็นต์ แบบขนานสามารถควบคุมได้ 88 เปอร์เซ็นต์และแบบผสมสามารถควบคุมได้ 87 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจากผลการทดลองการควบคุมแบบอนุกรมดีที่สุด

Kuc และ Han [10] ได้ร่วมกันทำการดัดแปลงตัวควบคุมพีไอดีเพื่อทำนายการเคลื่อนที่หุ่นยนต์โดยนำตัวควบคุมพีไอดีแบบดัดแปลงเป็นตัวป้อนกลับ ผลที่ได้ตัวควบคุมพีไอดีแบบดัดแปลงป้อนกลับทำการรักษาเสถียรภาพการตอบสนองของระบบ

ปี 1999

Chen [11] ได้สร้างตัวควบคุมพีไอดีและตัวควบคุมเกย์พีไอดีทำงานแบบขนานโดยที่ตัวควบคุมพีไอดีนำค่าอินพุตมาเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาดเพื่อป้อนเข้าตัวควบคุมพีไอดี ส่วนตัวควบคุมเกย์พีไอดีนำค่าอินพุตเข้ามาเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาดของการทำนายเกย์เพื่อป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมเกย์พีไอดี

ปี 2001

Kelly และ Moreno [12] ได้ร่วมกันปรับปรุงตัวควบคุมพีไอดีให้สามารถเรียนรู้พร้อมกับทำงานอัตโนมัติและได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อแสดงการรับประกันเสถียรภาพของการควบคุม

ปี 2002

Udueht, Ordys และ Grimble [13] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมและแบบจำลองจีพีซีเพื่อแก้ปัญหาเสถียรภาพของโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดี โดยการทดลองนี้ได้แทรกสัญญาณรบกวนหลายรูปแบบในการทดสอบประสิทธิภาพ

ปี 2003

Guo, Wang, Han และ Yu [14] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมพีไอดีต่อกันแบบอนุกรมเพื่อแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนโดยตัวควบคุมพีไอดีนี้ประกอบด้วยแบบจำลองตัวควบคุมเสมือนและตัวควบคุมค่าผิดพลาด

ปี 2004

Kim และ Cho [15] ได้ร่วมกันออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่มีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนในมอเตอร์ ตัวควบคุมพีไอดีนี้ได้คิดเพิ่มเงื่อนไขตัวรบกวนแล้วได้ทำการทดสอบผ่านกระบวนการรักษาความคงทน

ปี 2005

Ho และ Tu [16] ได้ร่วมกันออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้สำหรับแกนกลสองข้อต่อโดยขับเร็วที่แกนแรกและแกนที่สองให้อยู่ในตำแหน่งเป้าหมายสำหรับการทดลองนี้ได้แทรกสัญญาณรบกวนเพื่อทดสอบความคงทนของระบบ

## 2.2 งานวิจัยภายในประเทศที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมพีซีซี

ปี 2000

ธนา [17] นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบพีซีซีพีเอสแควร์ไอดี ซึ่งตัวควบคุมที่นำเสนอนี้เป็นตัวควบคุมแบบระบบไฮบริดที่ประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบพีซีซีพีไอและตัวควบคุมแบบพีซีซีพีดีโดยตัวควบคุมทั้งสองนี้มีการปรับเปลี่ยนเกนอัตโนมัติ (Automatic Gain Control, AGC) การสลับการควบคุมทำโดยตัวเลือก (Selector) และการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบมานี้ได้ทำการทดลองกับการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-varying loads) และการทดลองการควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการควบคุมแบบพีซีซีพีเอสแควร์ไอดีซึ่งทำการทดลองควบคู่ไปกับการควบคุมแบบพีไอดี ผลที่ได้จากการทดลองทั้งสองนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบพีซีซีพีเอสแควร์ไอดีที่ออกแบบให้เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งแทนตัวควบคุมแบบพีไอดีดั้งเดิม

ณัฐพงศ์ [18] นำเสนอการประยุกต์และสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับควบคุมแขนกลคาร์ทีเซียน นำหนักเบาชนิดสามแกน โดยใช้ระบบควบคุมที่นำมาประยุกต์เป็นตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอพลัสดี (Fuzzy PI+D Control) โดยสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วย ภาษาซี พลัส พลัส (Turbo C++) ผลการทดลองแสดงสำรวจควบคุมกับชุดควบคุมที่ใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) และระบบควบคุมแบบพีไอพลัสดี (PI+D Control) โดยแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมควบคุมทั้งสามแบบให้ผลสัมฤทธิ์ในการควบคุมที่ดี แต่สำหรับสถานะการทำงานที่ต้องรับภาระที่มากขึ้นนั้น การควบคุมแบบฟัซซีพีไอพลัสดีให้ผลดีโดยสามารถทำงานได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอพลัสดี ซึ่งผลที่ได้แสดงขีดความสามารถที่จะนำระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาใช้งานได้จริงและสามารถพัฒนาเพื่อใช้แทนเครื่องจักร CNC ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศได้อีกด้วย

ปี 2003

ทศพล [19] นำเสนอการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีแอสควาร์ไอดีด้วยใช้วิธีทางพันธุศาสตร์ จะแบ่งตัวควบคุมออกเป็น 2 ชนิด โดยจะเป็นตัวควบคุมฟัซซีพีไอและฟัซซีพีดี ทำงานขนานกัน และจะมีการเลือกใช้ตัวควบคุมโดยใช้สวิทช์เป็นตัวเลือก ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเพื่อให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพ หน้าที่ที่สำคัญของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี จะทำให้เอาท์พุทที่ได้นั้นมี rise-time ที่ดี จะมีการเปลี่ยนไปใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอเพื่อทำงานต่อ กระบวนการของตัวควบคุมฟัซซีพีแอสควาร์ไอดี จะประกอบด้วยวิธีทางพันธุศาสตร์ ฟัซซีพีดีและฟัซซีพีไอ โดยจะมีการนำไปใช้กับพลาสมาที่ไม่เป็นเชิงเส้นและโมเดลของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ผลที่ได้จะแสดงถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบ

ปี 2005

มนตรี [20] นำเสนอระบบการขนส่งแบบลอยเหนื่อราง โดยการลอยตัวจะใช้การดูดผลึกของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เข้ามาช่วย ซึ่งเรียกระบบการลอยตัวนี้ว่า Magnetic Levitation (Maglev) โดยการศึกษาจะค้นคว้าหาตัวควบคุมของระบบ Maglev ให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ และนุ่มนวล จากการจำลองผลโดยคอมพิวเตอร์ได้เลือกตัวควบคุมพีไอ (PI) และแบบฟัซซีพีไอ (Fuzzy PI) มาใช้ควบคุม จากการจำลองเปรียบเทียบทดสอบผลตอบสนองที่ได้พบว่าแบบฟัซซีพีไอ มีประสิทธิภาพดีกว่า จึงเลือกตัวควบคุมฟัซซีพีไอจากการออกแบบมาสร้างจริงสำหรับซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำมาใช้ในระบบลำเลียงวัสดุ ระบบรถไฟ และระบบที่ช่วยในการออกตัวยานพาหนะ

## 2.3 งานวิจัยนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบฟuzzy

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถพัฒนาการควบคุมแบบฟuzzyไปสู่ระบบฟuzzyได้ เกิดจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีเซตฟuzzyของ Zadeh ในปี 1965 [21] และในปี 1974 [22] Mamdani นำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ซึ่งหลังจากนั้นทฤษฎีฟuzzyได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย

ปี 1989

Siler และ Ying [23] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมฟuzzyแบบเชิงเส้นโดยเงื่อนไขหนึ่งอินพุทหนึ่งเอาต์พุทโดยมีกฎของตัวควบคุมฟuzzyแบบเชิงเส้นและได้ทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมระหว่างฟuzzyฟuzzyฟuzzyกับตัวควบคุมฟuzzy

ปี 1990

Ying, Siler และ Buckley [24] ได้ร่วมกันออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบไม่เชิงเส้นสำหรับวิเคราะห์ตัวควบคุมโดยมีเงื่อนไขสองอินพุทหนึ่งเอาต์พุทประกอบไปด้วยกระบวนการฟuzzyฟuzzy การควบคุมฟuzzy การหาค่าฟuzzyของการควบคุมและกระบวนการดีฟuzzyฟuzzy

ปี 1992

Nagib, Gharieb และ Binder [25] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมฟuzzyแทนตัวควบคุมฟuzzy โดยได้ประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

Wang [26] ได้สร้างตัวควบคุมฟuzzyดัดแปลงจากกฎฟuzzyโดยได้ดัดแปลงตัวแปรการเป็นสมาชิกเพื่อใช้ในการควบคุมแพลนอันดับสูงที่ไม่เป็นเชิงเส้น ตัวควบคุมแบบดัดแปลงต้องมีเงื่อนไขเริ่มต้นและกระบวนการออฟไลน์จากสองเงื่อนไขสามารถดัดแปลงให้ทำงานออนไลน์

ปี 1993

Kacprzyk [27] ได้ศึกษาค้นการควบคุมฟuzzyโดยการห้วงเวลาโดยมีจุดเริ่มต้นดำเนินการทดลอง ดังนี้ การควบคุมโดยมีตำแหน่งเป้าหมายคงที่ การควบคุมโดยการห้วงเวลา ซึ่งการทดลองทั้งหมดนี้สามารถสร้างการควบคุมแบบฟuzzyโดยการห้วงเวลา

ปี 1994

Alvarez [28] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการควบคุมแขนกลหนึ่งข้อต่อ โดยใช้ตัวควบคุม ในการวิเคราะห์แขนกลหนึ่งข้อต่อนี้ใช้วิธีเมลนิกอฟสำหรับศึกษาพฤติกรรมอลวนในแขนกลหนึ่งข้อต่อ

Wang [29] ได้สร้างตัวควบคุมฟัซซีเพื่อสลับการทำงานในแต่ละพื้นที่และได้ทำการวิเคราะห์ระบบควบคุมฟัซซีเพื่อการันตีเสถียรภาพระบบและได้ประยุกต์ตัวฟัซซีเพื่อแก้ปัญหาคำทรงตัวของอินเวอร์สเพนคูล์ม

ปี 1995

Erbatur, Kaynak และ Rudas [30] ได้คิดค้นการควบคุมฟัซซีของแขนกลสองข้อต่อเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับไม่เชิงเส้นและได้ทำการทดลองควบคุมกับหุ่นยนต์ชนิดเอสซีเออาร์เอ

ปี 1996

Sooraksa และ Chen [31] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมฟัซซีสแควร์ฟี่โอพลัสพีดีสำหรับควบคุมแขนกลอ่อนตัว โดยมีตัวควบคุมสองชุดทำงานแบบขนาน การทำงานแบบขนานนี้ประกอบด้วยตัวควบคุมฟัซซีพีไอและตัวควบคุมแบบฟัซซีดี

Zheng, Shi, Feng, Zhou และ Liu [32] ได้ร่วมกันประยุกต์ตัวควบคุมฟัซซีแบบเวลาจริงสำหรับการควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมโดยตัวควบคุมนี้มีหลายอินพุทหลายเอาท์พุท

Wu และ Liu [33] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบสไลด์เพื่อรักษาเสถียรภาพโดยงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กับการควบคุมมอเตอร์ไซค์ การสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบสไลด์นี้ได้พัฒนามาจากทฤษฎีฟัซซีและทฤษฎีแบบสไลด์ของมอเตอร์ไซค์

ปี 1997

Chen และ Ying [34] ได้ร่วมกันวิเคราะห์เสถียรภาพบีโอบีโอของระบบควบคุมฟัซซีพีไอแบบไม่เชิงเส้นซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพบีโอบีโอนี้ได้ใช้ทฤษฎีบทเกนน้อยในการหาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบ

Chen และ Zhang [35] ได้ร่วมกันแก้ปัญหาของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้หลักการโคงร การควบคุมนี้ได้ทำการแบ่งตัวควบคุมฟัซซีออกเป็น 9 กฎ

Feng, Cao, Rees และ Cheng [37] ได้ร่วมกันวิเคราะห์และคำนวณค่าที่ใช้งานในฟัซซีเสมือนพีไอในตัวควบคุมฟัซซีเพื่อนำมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ งานวิจัยนี้ได้ทำการหาอินพุทของฟัซซีเสมือนพีไอและทำการวิเคราะห์ระบบฟัซซีเสมือนพีไอ

ปี 1998

Sanchez, Nuno, Hsu และ Chen [38] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมโดยใช้ฟัซซีพีดีเพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นเพนคูบอลประกอบด้วยฟัซซีพีดี 2 ชุดทำงานแบบขนาน โดยมีเงื่อนไขในการตัดสินใจที่ระยะห่างของปลายแขนที่สองเทียบกับตำแหน่งเป้าหมาย

ปี 2000

Tao และ Shih [39] ได้สร้างตัวควบคุมฟuzzyเหมือนพีไอดีเป็นการออกแบบให้ระบบมีความยืดหยุ่นและทำให้มีความซับซ้อนน้อยลงโดยสร้างชุดตัวควบคุมฟuzzyและชุดค่าวนค่าผิดพลาดของระบบควบคุมฟuzzyเหมือนพีไอดี

ปี 2001

Hsu, Chen และ Li [40] ได้ทำการควบคุมแรงบิดแกนกลหุ่นยนต์โดยควบคุมมอเตอร์ที่แกนแรกและแกนที่สองเพื่อเปรียบเทียบการควบคุมเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนกับมีสัญญาณรบกวน

Tang, Man และ Chen [41] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมฟuzzyพีไอดีซึ่งมีจุดเด่นคือสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ได้อัตโนมัติ โครงสร้างตัวควบคุมประกอบด้วยตัวควบคุมฟuzzyพีไอและตัวควบคุมฟuzzyดีโดยนำตัวควบคุมทั้งสองนี้ใช้งานร่วมกัน

ปี 2003

Sanchez และ Flores [43] ได้สร้างตัวควบคุมฟuzzyพีดีเพื่อทำการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอบทและชุดการทรงตัวได้ใช้ตัวควบคุมฟuzzyพีไอพลัสพีดีเพื่อทำการทรงตัวของหุ่นเพนดูลบอบท ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แทรกสัญญาณรบกวนหลังจากควบคุมหุ่นเพนดูลบอบทให้อยู่ในตำแหน่งเป้าหมายได้

ปี 2005

Li, Zhang, Cai และ Chen [44] ได้ร่วมกันสร้างตัวควบคุมฟuzzyพีไอดีเพื่อทำการปรับปรุงระบบจากเดิมเป็นการควบคุมแบบพีไอดี

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงงานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมพีไอดีและตัวควบคุมแบบฟuzzy ซึ่งในบทที่ 3 เป็นการออกแบบควบคุมหุ่นเพนดูลบอบทโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzyพีดีในการควบคุมหุ่นเพนดูลบอบท

ในอดีตการควบคุมหุ่นเพนดูลบอบทได้สร้างตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมมีค่าผิดพลาดมากต่อมาได้พัฒนาจนกระทั่งได้สร้างตัวควบคุมแบบฟuzzyผลที่ได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีแต่ยังไม่ได้มีการทดสอบระบบในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

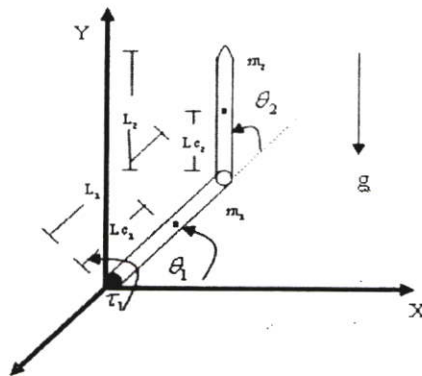
### บทที่ 3

## การออกแบบระบบควบคุมหุ่นเพนดูลอย

ในบทนี้เป็นการแสดงแบบจำลองหุ่นเพนดูลอยพร้อมสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นเพนดูลอย โดยอาศัยสมการ ทำให้สามารถออกแบบชุดควบคุมในรูปแบบ Simulink ได้ดังนี้ ชุดประมวลผลหุ่นเพนดูลอย ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นหุ่นเพนดูลอย ชุดควบคุมการทรงตัว และเงื่อนไขในการเลือกชุดควบคุม

### 3.1 ทฤษฎีระบบหุ่นเพนดูลอย

การเคลื่อนที่ของหุ่นเพนดูลอยสามารถบรรยายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบกลสองแกนต่อกัน โดยมีการจับเร้าที่มอเตอร์ข้อต่อแรกและแกนที่สองเป็นอิสระ สมการเคลื่อนที่ที่สามารถสร้างโดยใช้สมการ Euler-Lagrange ในการหาสมการของระบบ ในสภาวะเริ่มต้นนั้น  $\theta_1 = -90^\circ$  และ  $\theta_2 = 0$  ซึ่งเป้าหมายในการควบคุมนี้ คือ  $\theta_1 = 90^\circ$  และ  $\theta_2 = 0$  ซึ่งก็คือการเหยียดลำแขนทั้งสองให้ตั้งตรงโดยการเคลื่อนที่เพื่อให้เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายดังกล่าวสามารถแสดงรูปได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองหุ่นเพนดูลอย

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล n-link สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (3.1)$$

โดยที่

$\theta \in R^n$  เป็นตำแหน่งข้อต่อของแขนกล

$\tau \in R^n$  เป็นค่าแรงบิด

$D(\theta) \in R^{n \times n}$  เป็นค่าความเฉื่อย

$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} \in R^n$  เป็นการตอบสนองของแรงสู่ศูนย์กลางและแรงโคลิโอลิส

$G(\theta) \in R^n$  เป็นค่านิตโน้มถ่วงที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 3.1 มีค่าตัวแปร ดังนี้

$g$  = แรงนิตโน้มถ่วงของโลก

$L_1$  = ความยาวแขนแรก

$L_2$  = ความยาวแขนที่สอง

$L_{c1}$  = ระยะห่างจากข้อต่อถึงจุดกึ่งกลางแขนที่แรก

$L_{c2}$  = ระยะห่างจากข้อต่อแรกถึงจุดกึ่งกลางแขนที่สอง

$m_1$  = น้ำหนักแขนแรก

$m_2$  = น้ำหนักแขนที่สอง

$X$  = ตำแหน่งแกนแนวนอน

$Y$  = ตำแหน่งแกนแนวตั้ง

$\theta_1$  = มุมระหว่างแกนแนวนอนกับแขนแรก

$\theta_2$  = มุมระหว่างแขนที่สอง

$\tau_1$  = อินพุตแรงบิดข้อต่อแรก

จากสมการที่ (3.1) สามารถเขียนในรูปเมทริก ดังนี้

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดยที่

$$D_{11} = (m_1 + m_2)L_1^2 + m_2L_2^2 + 2m_2L_1L_2 \cos\theta_2 \quad (3.3)$$

$$D_{12} = m_2L_2^2 + m_2L_1L_2 \cos\theta_2 \quad (3.4)$$

$$D_{21} = D_{12} \quad (3.5)$$

$$D_{22} = m_2L_2^2 \quad (3.6)$$

$$C_1 = -m_1L_1L_2(2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2) \sin\theta_2 \quad (3.7)$$

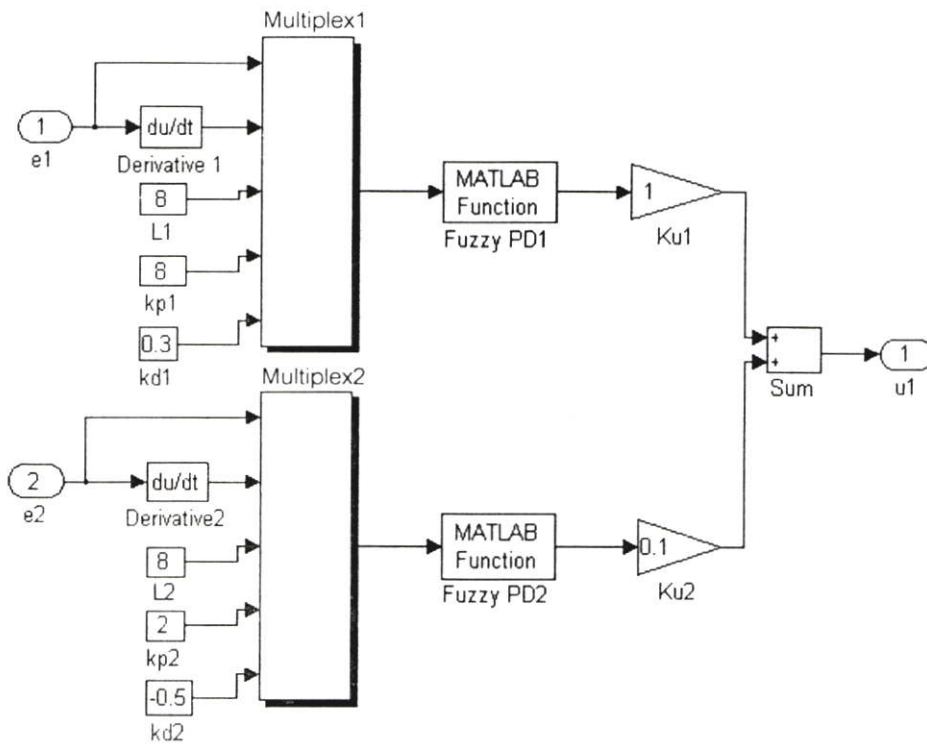
$$C_2 = m_2L_1L_2\dot{\theta}_1 \sin\theta_2 \quad (3.8)$$

$$G_1 = (m_1 + m_2)gL_1 \cos\theta_1 + m_2gL_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.9)$$

$$G_2 = m_2gL_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.10)$$

### 3.2 การออกแบบชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอท

การออกแบบชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอททำหน้าที่แกว่งแขนให้เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายโดยมีการขับเร็วที่มอเตอร์ข้อแรกแสดงได้ในรูปที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์  $kd_1, kp_1, L_1, Ku_1, kd_2, kp_2, L_2, Ku_2$  มาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3.1



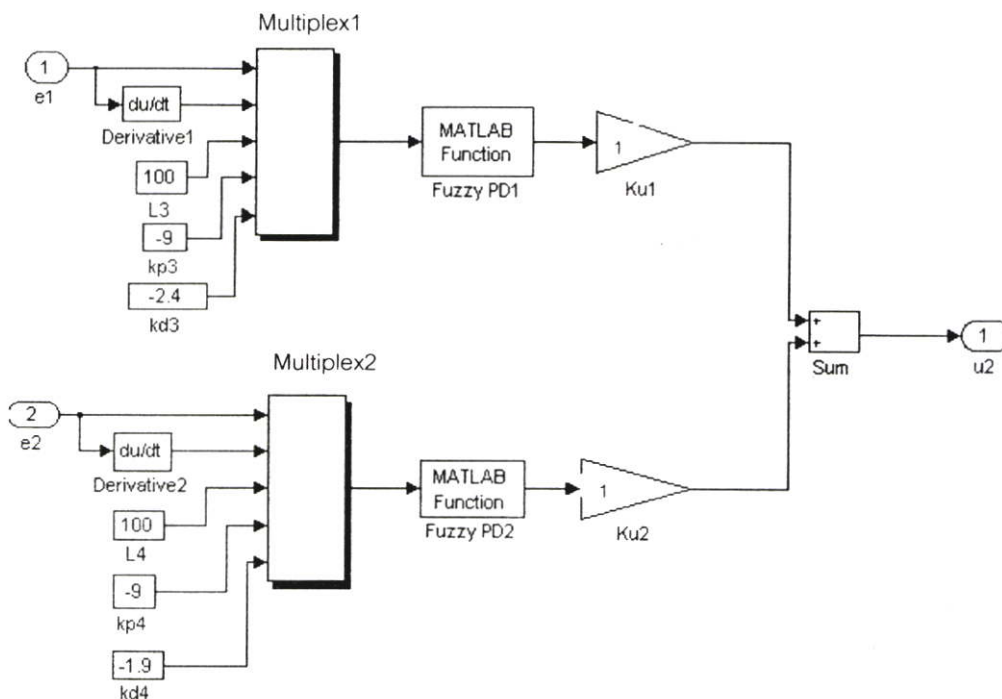
รูปที่ 3.2 แผนภาพการควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอท

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอท

Parameter	Kp	Kd	Lp	Kupd
Fuzzy Controller1	8	8	8	1
Fuzzy Controller2	2	-0.5	8	0.1

### 3.3 การออกแบบชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนดูลอย

เมื่อชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลอยแกว่งให้  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  เข้าสู่ระยะที่กำหนดไว้ชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนดูลอยนั้น ทำหน้าที่ควบคุมให้แขนที่สองทรงตัวให้อยู่จากตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนดไว้แสดงได้ในรูปที่ 3.3 และค่าพารามิเตอร์  $kd_3, kp_3, L_3, Ku_3, kd_4, kp_4, L_4$  ได้มาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่กล่าวในบทที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมการทรงตัวแสดงในตารางที่ 3.2



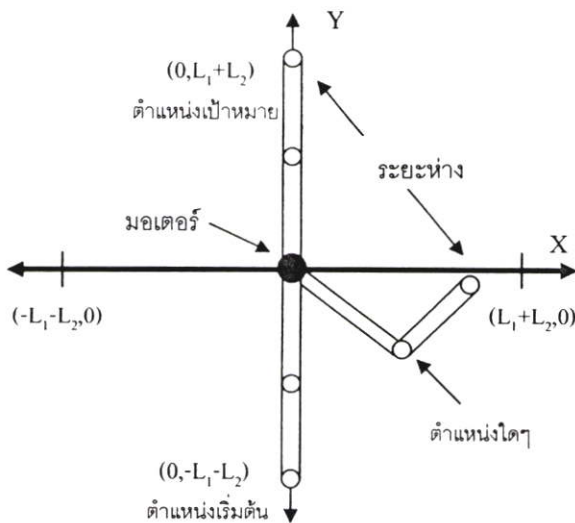
รูปที่ 3.3 แผนภาพการควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนดูลอย

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนดูลอย

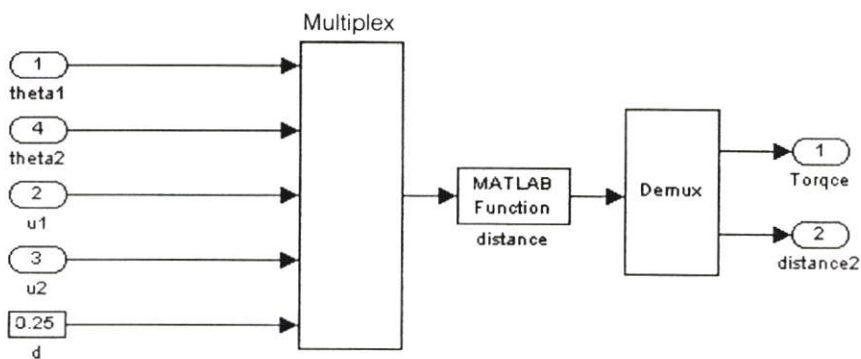
Parameter	Kp	Kd	Lp	Kupd
Fuzzy Controller1	-9	-2.4	100	1
Fuzzy Controller2	-9	-1.9	100	1

### 3.4 เงื่อนไขการเลือกชุดควบคุมหุ่นยนต์

ทำหน้าที่ในการเลือกชุดควบคุมการแกว่งขึ้นหรือชุดควบคุมการทรงตัวโดยมีเงื่อนไขจากค่าระยะห่าง (distance) เปรียบเทียบกับตำแหน่งเป้าหมายแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 และสร้าง Simulink ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แผนภาพจากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมาย



รูปที่ 3.5 แผนภาพการออกแบบเงื่อนไขการควบคุม

สามารถคำนวณหาค่า d ได้ดังนี้

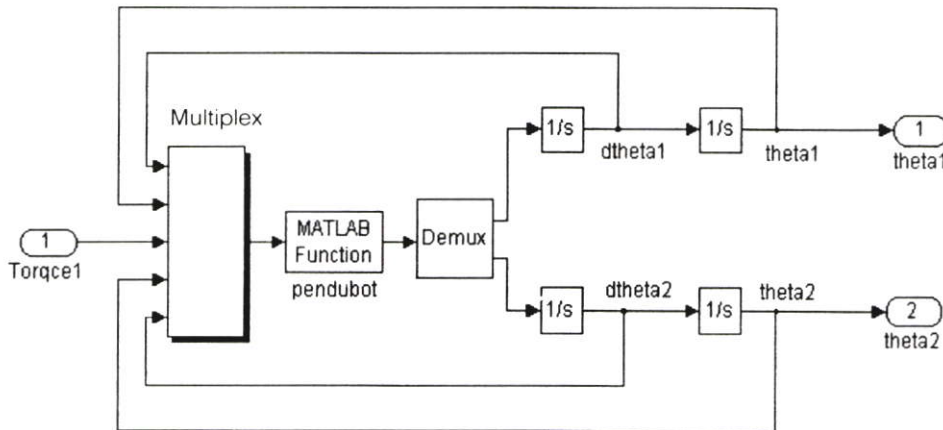
$$a = (L_1 + L_2 - L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2))^2 \tag{3.11}$$

$$b = (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))^2 \tag{3.12}$$

$$d = \sqrt{a+b} \tag{3.13}$$

### 3.5 การออกแบบชุดประมวลผลหุ่นเพนดูลบอท

ชุดการออกแบบชุดประมวลผลหุ่นเพนดูลบอทนี้มีอินพุต  $\tau$  เป็นตัวกระตุ้นให้แขนกลทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายจากการป้องกันค่าอินพุตผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์ของหุ่นเพนดูลบอททำให้ได้ค่าเอาต์พุตจะได้  $\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพการประมวลผลของหุ่นเพนดูลบอท

จากบทรนี้ได้ทำการพิสูจน์สมการหุ่นเพนดูลบอทและออกแบบชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอท ชุดควบคุมการทรงตัวและชุดเงื่อนไขในการเลือกตัวควบคุมซึ่งค่าพารามิเตอร์ในบทรนี้ได้มาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้กล่าวในบทรที่ 4

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์เสถียรภาพ

บทนี้แสดงการหาเงื่อนไขเสถียรภาพแบบบีบีโอ (BIBO Stability) ของระบบควบคุมแบบพีซีพีดีที่ทำงานแบบขนาน โดยเป็นการคำนวณหาค่าอินพุตให้กับระบบแต่ละพื้นที่ในระนาบเฟสความผิดพลาด (Phase Plane) เพื่อประกันเสถียรภาพระบบ กล่าวคือในระบบใด ๆ ที่มีอินพุตมีการจำกัดขอบเขตและให้อาต์พุตที่มีขอบเขตจำกัดด้วยในย่านการทำงานที่ระบบสามารถดำเนินได้ตามปกติ จะสามารถรับประกันได้ว่า ระบบนี้มีเสถียรภาพแบบบีบีโอ (BIBO Stability)

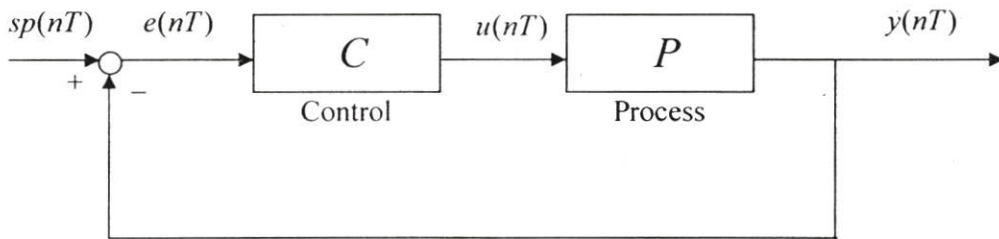
#### 4.1 ทฤษฎีบทเกนน้อย (Small Gain Theorem)

ทฤษฎีบทเกนน้อย เป็นวิธีการตรวจสอบเพื่อตัดสินเสถียรภาพบีบีโอของระบบควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นทั่ว ๆ ไป ซึ่งมีแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่  $C$  คือตัวควบคุมใด ๆ และ  $P$  คือกระบวนการที่ถูกควบคุม หรือระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่

$sp(nT)$  คือ อินพุตของระบบควบคุม

$u(nT)$  คือ อินพุตของกระบวนการ

$y(nT)$  คือ เอาต์พุตของระบบ



รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นทั่ว ๆ ไป

จากรูปที่ 4.1 สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$e(nT) = sp(nT) - y(nT)$$

$$u(nT) = C \cdot e(nT)$$

$$y(nT) = P \cdot u(nT)$$

เงื่อนไขเริ่มต้นจากรูปที่ 4.1 สามารถกำหนดเงื่อนไขเสถียรภาพบีโอบีโอบีของระบบควบคุมวงปิดนั้น จะกำหนดให้นอร์มของอินพุทของตัวควบคุม  $u(nT)$  แสดงในรูปที่ 4.1

$$\|u(nT)\| = \|C \cdot e(nT)\| \leq \alpha_c \|e(nT)\| + \beta_c \quad \alpha_c, \beta_c \geq 0 \quad (4.1)$$

และนอร์มของเอาต์พุทของระบบ แสดงได้ดังนี้

$$\|y(nT)\| = \|P \cdot u(nT)\| \leq \alpha_p \|u(nT)\| + \beta_p \quad \alpha_p, \beta_p \geq 0 \quad (4.2)$$

โดยที่  $\alpha_c, \beta_c, \alpha_p, \beta_p$  เป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (4.1) สามารถหานอร์มของค่าผิดพลาด  $\|e(nT)\|$  ได้ นั่นคือ

$$\|e(nT)\| \leq \frac{\|sp(nT)\| + \alpha_p \|u(nT)\| + \alpha_p \beta_c + \beta_p}{1 - \alpha_c \cdot \alpha_p} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) พิจารณาให้เทอมของ  $(\|sp(nT)\| + \alpha_p \|u(nT)\| + \alpha_p \beta_c + \beta_p)$  เป็นค่าคงที่ ฉะนั้น ถ้าเทอมของ  $\alpha_c \cdot \alpha_p$  มีค่าน้อยกว่า 1 จะทำให้ขนาดของค่าผิดพลาดอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพบีโอบีโอบีของระบบควบคุมคือ

$$\alpha_c \cdot \alpha_p < 1 \quad (4.4)$$

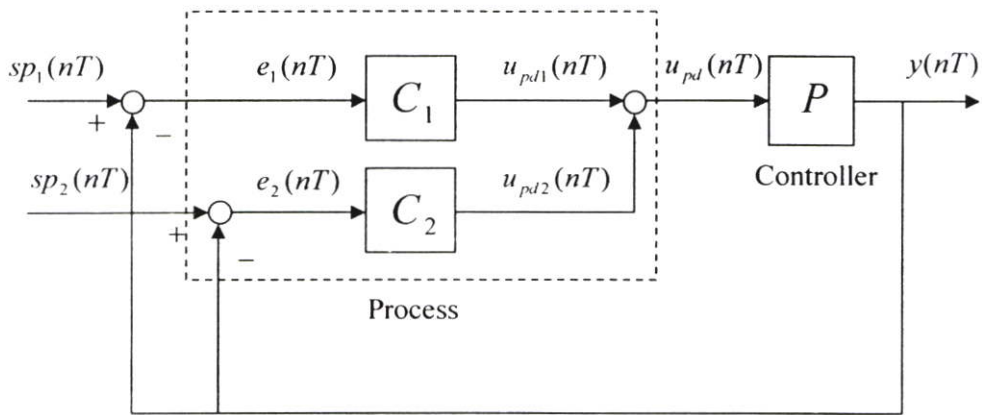
โดยที่  $\alpha_c$  และ  $\alpha_p$  อีกนัยหนึ่งหมายถึงค่าของนอร์มของตัวควบคุมและนอร์มของกระบวนการตามลำดับ สำหรับกระบวนการ  $P$  ใดๆ สามารถหาค่า  $\alpha_p$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\|P \cdot u(nT)\| \leq \|P\| \cdot \|u(nT)\| \quad \text{เมื่อ } \|P\| \leq \infty \quad (4.5)$$

ดังนั้น  $\alpha_p = \|P\|$  โดยที่  $\|P\|$  หมายถึง นอร์มของผลการตอบสนองของกระบวนการที่มากที่สุด

#### 4.2 เงื่อนไขเสถียรภาพระบบควบคุมพีชชีพีดี

บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมพีชชีพีดีที่นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ในที่นี้  $P$  คือกระบวนการที่ถูกควบคุม



รูปที่ 4.2 ระบบควบคุมพีซีพีดี

เงื่อนไขเริ่มต้นที่จะนำไปสู่เงื่อนไขเสถียรภาพบีโอบีโอบีของระบบควบคุมวงปิด คือ

$$e_1(nT) = sp_1(nT) - y(nT) \quad (4.6)$$

$$e_2(nT) = sp_2(nT) - y(nT) \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.6) จะได้ ดังนี้

$$y(nT) = sp_1(nT) - e_1(nT) \quad (4.8)$$

แทนค่า  $y(nT)$  จากสมการที่ (4.8) ในสมการที่ (4.7) จะได้

$$e_2(nT) = sp_2(nT) - sp_1(nT) + e_1(nT) \quad (4.9)$$

$$\|u_{pd1}(nT)\| \leq \|\Delta u_{pd1}(nT) \cdot k_{upd1}(nT)\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_1(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (4.10)$$

$$\|u_{pd2}(nT)\| \leq \|\Delta u_{pd2}(nT) \cdot k_{upd2}(nT)\| \leq \alpha_{pd2} \cdot \|e_2(nT)\| + \beta_{pd2} \quad (4.11)$$

$$\|u_{pd}(nT)\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_1(nT)\| + \beta_{pd1} + \alpha_{pd2} \cdot \|e_2(nT)\| + \beta_{pd2} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \|y(nT)\| &\leq \|P\| \cdot \|u_{pd}(nT)\| \leq \|P\| \cdot \|u_{pd1}(nT) + u_{pd2}(nT)\| \\ &\leq \|P\| \cdot \|\alpha_{pd1} \cdot \|e_1(nT)\| + \beta_{pd1}\| + \|P\| \cdot \|\alpha_{pd2} \cdot \|e_2(nT)\| + \beta_{pd2}\| \\ &\leq \alpha_{pd1} \cdot \|P\| \cdot \|e_1(nT)\| + \|P\| \cdot \beta_{pd1} + \alpha_{pd2} \cdot \|P\| \cdot \|e_2(nT)\| + \|P\| \beta_{pd2} \end{aligned} \quad (4.13)$$

แทนสมการที่ (4.8) และ (4.9) ในสมการที่ (4.13) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \|sp_1(nT) - e_1(nT)\| &\leq \alpha_{pd1} \cdot \|P\| \cdot \|e_1(nT)\| + \|P\| \cdot \beta_{pd1} + \|P\| \beta_{pd2} \\ &\quad + \alpha_{pd2} \cdot \|P\| \cdot \|sp_2(nT) - sp_1(nT) + e_1(nT)\| \\ \|e_1(nT)\| &\leq \frac{\alpha_{pd2} \cdot \|P\| \cdot \|sp_2(nT)\| + (\alpha_{pd2} \cdot \|P\| - 1) \cdot sp_1(nT) + \|P\|(\beta_{pd1} + \beta_{pd2})}{1 - (\frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2}) \cdot \|P\|} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \|e_2(nT)\| &\leq \frac{\alpha_{pd2} \cdot \|P\| \cdot \|sp_2(nT)\| + (\alpha_{pd2} \cdot \|P\| - 1) \cdot sp_1(nT) + \|P\|(\beta_{pd1} + \beta_{pd2})}{1 - (\frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2}) \cdot \|P\|} \\ &\quad + \frac{[1 - (\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}) \cdot \|P\|] [sp_2(nT) - sp_1(nT)]}{1 - (\frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2}) \cdot \|P\|} \end{aligned} \quad (4.15)$$

ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพบีโอบีโของระบบควบคุมพีชชีพีดี คือ

$$\left(\frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2}\right) \cdot \|P\| < 1 \quad (4.16)$$

### 4.3 นอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี

จากการทำดีพีชชีพีเคชัน ในบทที่ 2 พบการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมพีชชีพีดีในบริเวณของ ICI คือ

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L [k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d |e_v(nT)|)} \quad (4.17)$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (4.18)$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีพีดีในบริเวณของ IC1 ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  ในบริเวณของ IC1 คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d |e_v(nT)|)} \cdot k_{upd} \right\| \quad (4.19)$$

ในบริเวณของ IC1  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ  $k_d |e_v(nT)| = 0$  ซึ่งจะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{Lk_p - Lk_d}{4L} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{Lk_d k_{upd}}{4L} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (4.20)$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

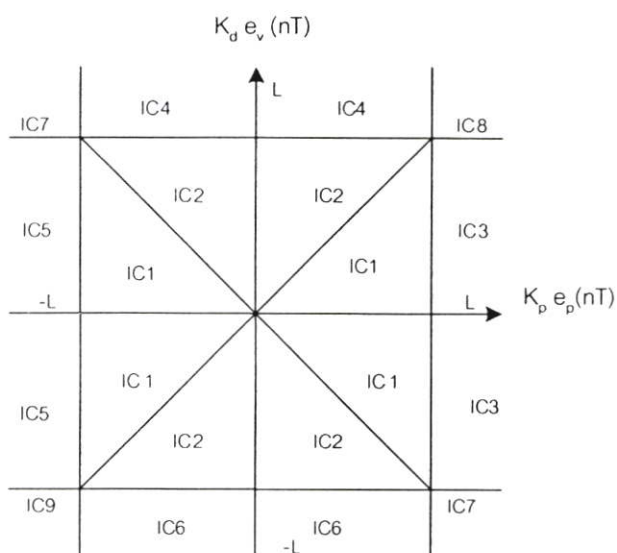
$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (4.21)$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{Lk_p - Lk_d}{4L} \right\| \cdot k_{upd} \quad \text{คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{Lk_d k_{upd}}{4L} \right\| \cdot M_e \quad \text{คือ ค่าคงที่}$$

ในบริเวณของ IC2 ถึง IC9 จะสามารถหา  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  ได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งค่านอร์ม  $\alpha_{pd1}$  ของตัวควบคุมพีชชีพีดีทั้ง 20 บริเวณ คือ ค่านอร์มมากที่สุดในแต่ละบริเวณ และสามารถจัดสรุปค่านอร์มทั้งหมดได้ 9 กลุ่มที่ภาคผนวก ข. ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งกลุ่มที่ 1 ถึง 9 จะใช้เป็นสูตรคำนวณค่านอร์ม  $\alpha_{pd1}$  ของตัวควบคุมพีชชีพีดีและพื้นที่ทั้งหมดของพีชชีพีดีแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 พื้นที่ทั้งหมดของฟิซซีฟีด

ตารางที่ 4.1 ค่าแอมพลิจูดของชุดควบคุมฟิซซีฟีดการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอท

บริเวณของ IC	$\alpha_{pd1}$	$\alpha_{pd2}$
IC1	$\left\  \frac{L_1 k_{p1} - L_1 k_{d1}}{4L_1} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{L_2 k_{p2} - L_2 k_{d2}}{4L_2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC2	$\left\  \frac{L_1 k_{p1} + L_1 k_{d1}}{4L_1} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{L_2 k_{p2} + L_2 k_{d2}}{4L_2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC3	$\left\  \frac{-k_{d1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{-k_{d2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC4	$\left\  \frac{k_{p1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{k_{p2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC5	$\left\  \frac{-k_{d1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{-k_{d2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC6	$\left\  \frac{k_{p1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{k_{p2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC7	0	0
IC8	0	0
IC9	0	0

ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุมฟิซซีฟีดสำหรับการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนดูลบอทนั้นจะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม  $k_{p1}$ ,  $k_{d1}$ ,  $k_{upd1}$ ,  $L_1$  และ  $k_{p2}$ ,  $k_{d2}$ ,  $k_{upd2}$ ,  $L_2$  ให้มีค่า  $\alpha_{pd1}$  และ

$\alpha_{pd2}$  ให้สอดคล้องกับสมการที่ 4.16 และสามารถหาค่านอร์มของชุดการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่านอร์มของชุดควบคุมพีซีพีดีการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท

บริเวณของ IC	$\alpha_{pd1}$	$\alpha_{pd2}$
IC1	$\left\  \frac{L_1 k_{p1} - L_1 k_{d1}}{4L_1} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{L_2 k_{p2} - L_2 k_{d2}}{4L_2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC2	$\left\  \frac{L_1 k_{p1} + L_1 k_{d1}}{4L_1} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{L_2 k_{p2} + L_2 k_{d2}}{4L_2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC3	$\left\  \frac{-k_{d1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{-k_{d2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC4	$\left\  \frac{k_{p1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{k_{p2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC5	$\left\  \frac{-k_{d1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{-k_{d2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC6	$\left\  \frac{k_{p1}}{2} \right\  \cdot k_{upd1}$	$\left\  \frac{k_{p2}}{2} \right\  \cdot k_{upd2}$
IC7	0	0
IC8	0	0
IC9	0	0

ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุมพีซีพีดีสำหรับการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอทนั้นจะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม  $k_{p1}$ ,  $k_{d1}$ ,  $k_{upd1}$ ,  $L_1$  และ  $k_{p2}$ ,  $k_{d2}$ ,  $k_{upd2}$ ,  $L_2$  ให้มีค่า  $\alpha_{pd1}$  และ  $\alpha_{pd2}$  ให้สอดคล้องกับสมการที่ 4.16 ดังนั้น ในบทนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อให้สอดคล้องกับหุ่นเพนคูบอทสำหรับในบทที่ 5 เป็นการจำลองหุ่นเพนคูบอท

## บทที่ 5

### ผลการจำลองโดยคอมพิวเตอร์

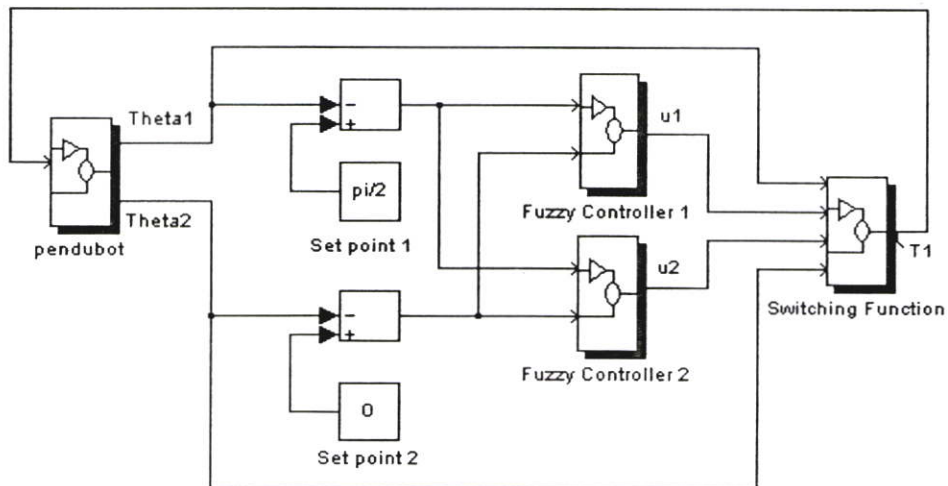
ในบทนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบควบคุมหุ่นเพนคูบอทโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีฟีดทำงานขนานกันเป็นการจำลองโดยสร้างสัญญาณรบกวนหลาย ๆ แบบเพื่อทำการทดสอบระบบ

#### 5.1 แบบจำลองหุ่นเพนคูบอทจากคอมพิวเตอร์

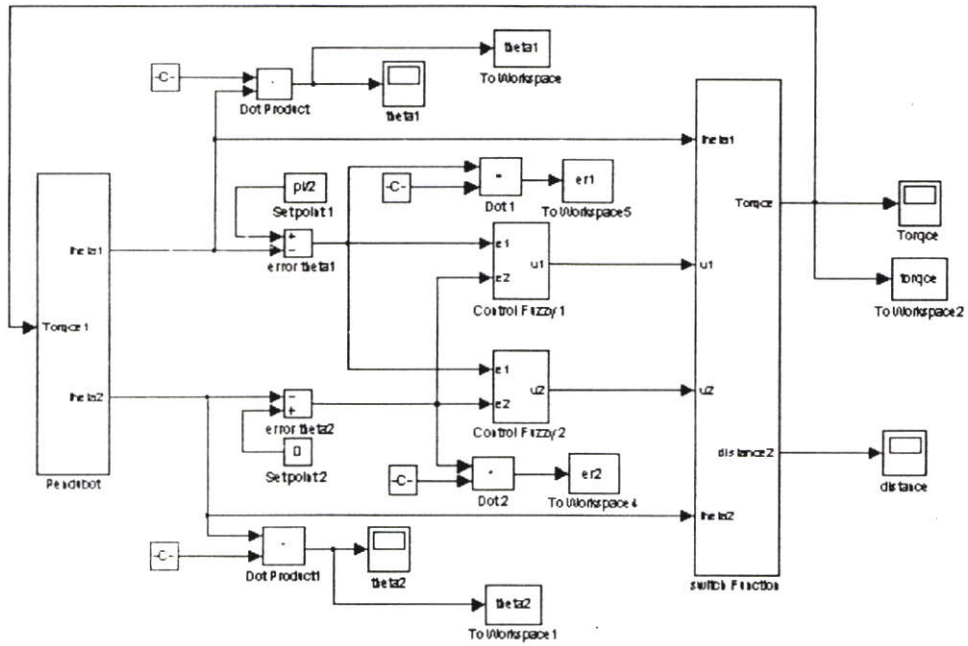
แบบจำลองหุ่นเพนคูบอทสามารถแบ่งชุดการทำงานหลัก ได้ดังรูปที่ 5.1 โดยสร้างแบบจำลอง Simulink ได้ดังรูปที่ 5.2 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมหุ่นเพนคูบอท

Parameter	$k_p$	$k_d$	$L_p$	$k_{upd}$
Fuzzy Controller1	8	8	8	1
Fuzzy Controller2	2	-0.5	8	0.1
Fuzzy Controller3	-9	-2.4	100	1
Fuzzy Controller4	-9	-1.9	100	1



รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมหุ่นเพนคูบอท



รูปที่ 5.2 แผนภาพการควบคุมระบบหุ่นยนต์สองข้อโดย Matlab Simulink

ในการจำลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$m_1 = 0.5289 \text{ Kg}$$

$$m_2 = 0.3346 \text{ Kg}$$

$$L_1 = 0.26897 \text{ m}$$

$$L_2 = 0.38417 \text{ m}$$

$$L_{c1} = 0.13494 \text{ m}$$

$$L_{c2} = 0.19208 \text{ m}$$

จากรูปที่ 5.2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอินพุตของหุ่นยนต์ ได้ดังนี้

$$P_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} \quad (5.1)$$

และ

$$P_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} \quad (5.2)$$

เมื่อแปลงแซด(Z-transform) ของ  $P_1(s)$  และ  $P_2(s)$  โดยใช้คาบเวลาการสุ่ม  $T = 0.01$  วินาที และทำการจับระดับสัญญาณอันดับศูนย์(zero-order hold) แล้วหาค่าอินฟินิตี้นอร์มของหุ่นเพนคูบอท ได้ดังนี้

$$\|P_1(z)\| = \sup_{|z|=1} \left| \frac{\theta_1(z)}{\tau(z)} \right| = 0.132 \quad (5.3)$$

และ

$$\|P_2(z)\| = \sup_{|z|=1} \left| \frac{\theta_2(z)}{\tau(z)} \right| = 0.208 \quad (5.4)$$

สามารถดูรายละเอียดการหาค่า  $\|P_1(z)\|$  และ  $\|P_2(z)\|$  ที่ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 5.2 ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดีการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท

บริเวณของ IC	$\alpha_{pd1}$	$\alpha_{pd2}$
IC1	0	0.0625
IC2	0	0.0375
IC3	4	0.025
IC4	4	0.1
IC5	4	0.025
IC6	4	0.1
IC7	0	0
IC8	0	0
IC9	0	0

จากตารางที่ 5.2 ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดีที่มีค่ามากที่สุดคือ  $\alpha_{pd1} = 4$  และ  $\alpha_{pd2} = 0.1$  ตามลำดับ เมื่อแทนค่านอร์มของตัวควบคุมในช่วงการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท จะได้ดังนี้

$$\left( \frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2} \right) \cdot \|P_1(z)\| < 1 \quad (5.5)$$

เมื่อทำการแทนค่าที่มีมากที่สุดจะได้

$$\left(\frac{4+0.1}{2}\right) \cdot \|0.1324\| < 1 \quad (5.6)$$

ค่าที่ได้  $0.2706 < 1$  ซึ่งแสดงว่าระบบควบคุมพีชชีพีดีนี้มีเสถียรภาพแบบ BIBO

และสามารถหาค่านอร์มของชุดการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท แสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 ค่านอร์มของชุดควบคุมพีชชีพีดีการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอท

บริเวณของ IC	$\alpha_{pd1}$	$\alpha_{pd2}$
IC1	1.65	1.775
IC2	2.85	2.725
IC3	1.2	0.95
IC4	4.5	4.5
IC5	1.2	0.95
IC6	4.5	4.5
IC7	0	0
IC8	0	0
IC9	0	0

จากตารางที่ 5.3 ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดีที่มีค่ามากที่สุดคือ  $\alpha_{pd1} = 4.5$  และ  $\alpha_{pd2} = 4.5$  ตามลำดับ เมื่อแทนค่านอร์มของตัวควบคุมในช่วงการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอท จะได้ดังนี้

$$\left(\frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2}\right) \cdot \|P_2(z)\| < 1$$

เมื่อทำการแทนค่าที่มีมากที่สุดจะได้

$$\left(\frac{4.5+4.5}{2}\right) \cdot \|0.135\| < 1$$

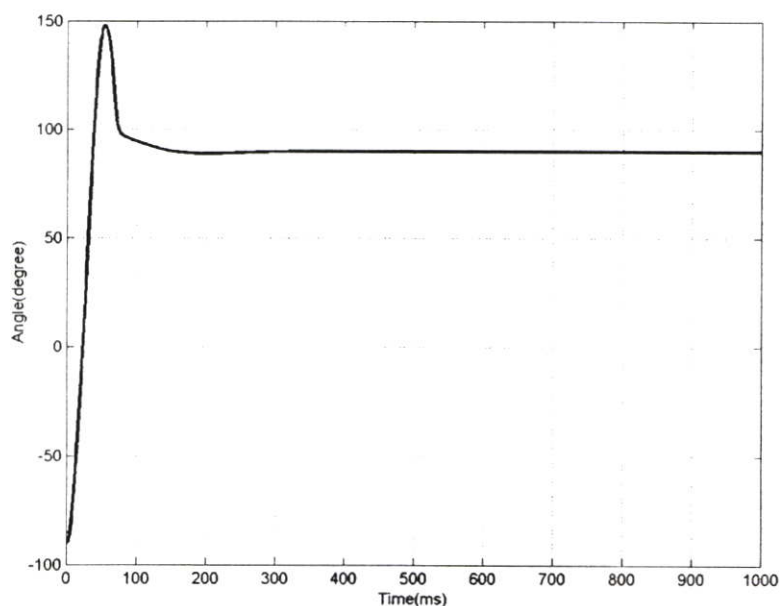
ค่าที่ได้  $0.6075 < 1$  ซึ่งแสดงว่าระบบควบคุมพีชชีพีดีนี้มีเสถียรภาพแบบ BIBO

จากการคำนวณเสถียรภาพของระบบควบคุมหุ่นเพนคูบอทนี้มีค่าไม่เกิน 1 ทั้งสองชุดที่ใช้ในการควบคุมแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมระบบนี้ได้

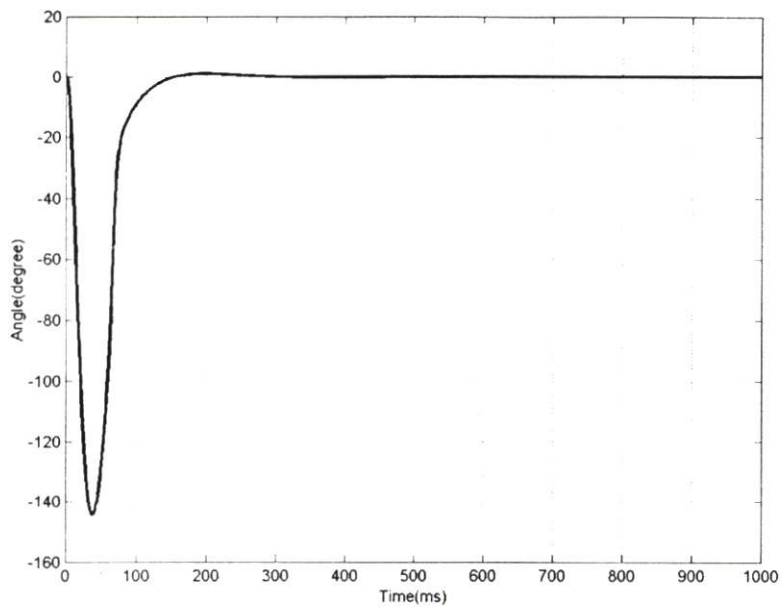
## 5.2 การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์

จากรูปที่ 5.3-5.6 นี้ ในช่วงเวลาดังแต่ 0-0.5 วินาที ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นจะทำงานก่อน เนื่องจากเงื่อนไขที่  $d > 0.25$  m โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 5.6 แต่พอหลังจากเวลา 0.6-3 วินาที ชุดควบคุมการทรงตัวจะทำงาน เนื่องจากเงื่อนไขที่  $d < 0.25$  m เมื่อเวลาผ่านเกิน 3 วินาทีนี้ระบบควบคุมจะสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้อยู่ในตำแหน่ง  $\theta_1 = 90^\circ$  และ  $\theta_2 = 0$  ซึ่งค่ามุมทั้งสองนี้แสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ส่วนรูปที่ 5.5 เป็นการแสดงค่าแรงบิดที่มีความสอดคล้องกับรูปที่ 5.3-5.5

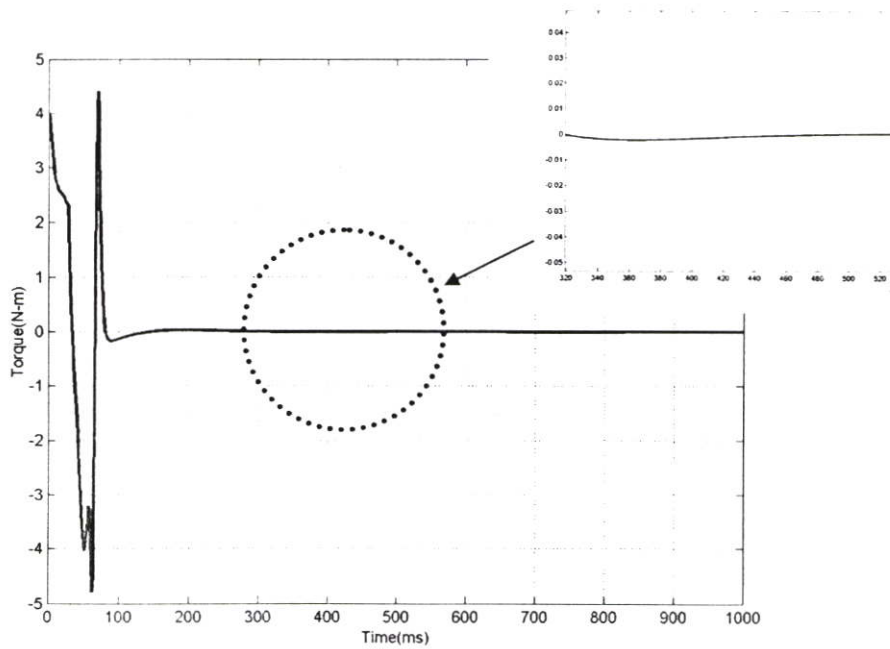
การจำลองจากรูปที่ 5.2 ซึ่งได้ผลการจำลอง ดังนี้



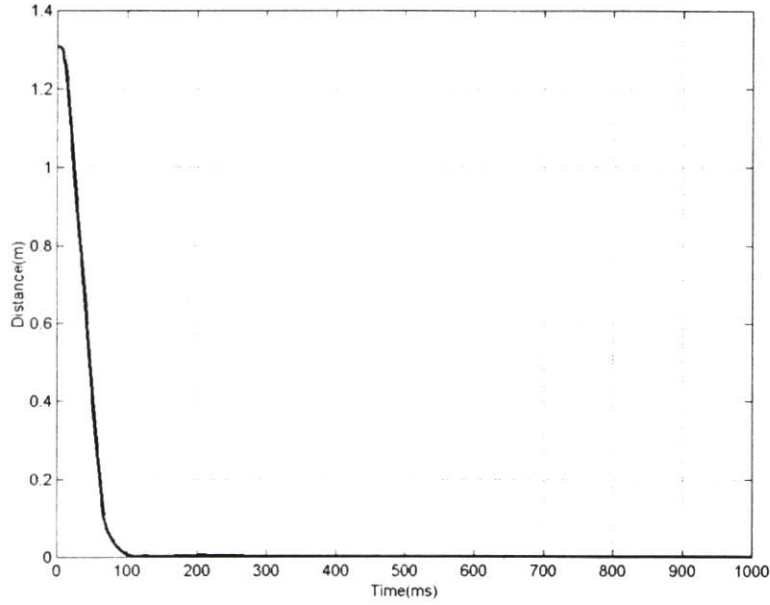
รูปที่ 5.3 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก



รูปที่ 5.4 ค่ามุมระหว่างแขนสอง สอดคล้องกับรูปที่ 5.3



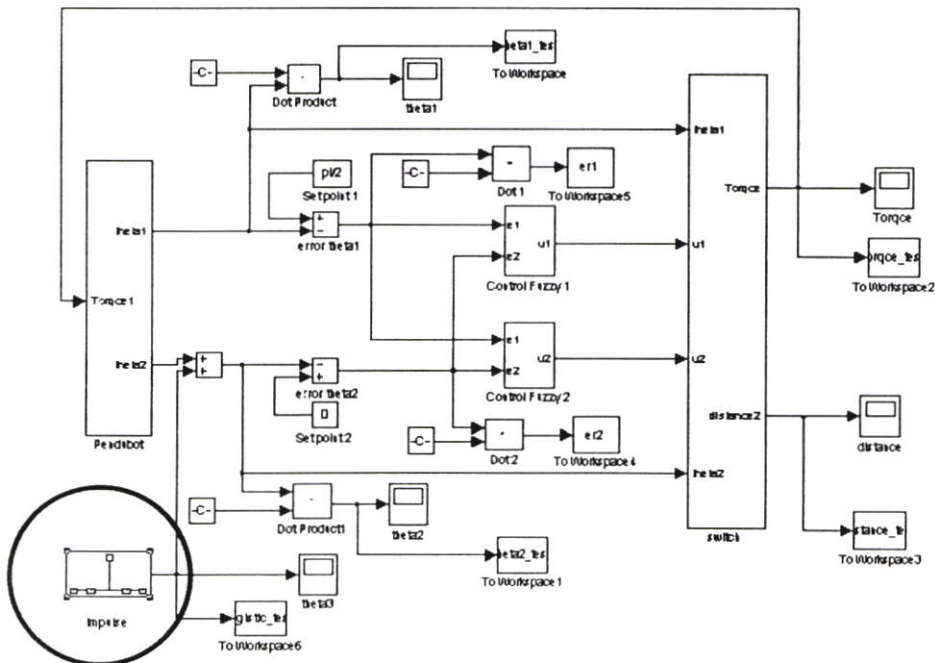
รูปที่ 5.5 ค่าแรงบิด สอดคล้องกับรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.6 ระยะห่างระหว่างตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สองสอดคล้องกับรูปที่ 5.3

### 5.3 การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแรงดล

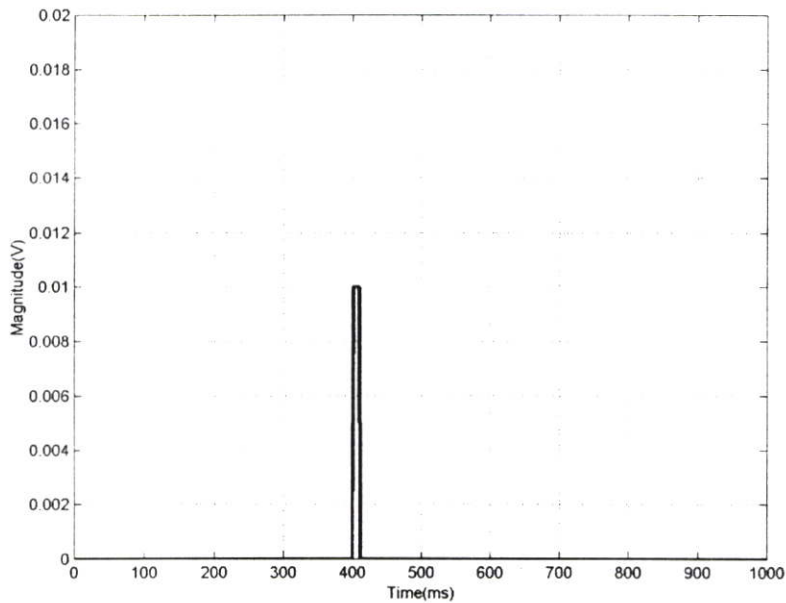
แบบจำลองสัญญาณแรงดลซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ดังนี้



รูปที่ 5.7 แผนภาพการประมวลผลหุ่นยนต์ โดยมีสัญญาณรบกวนแรงดล

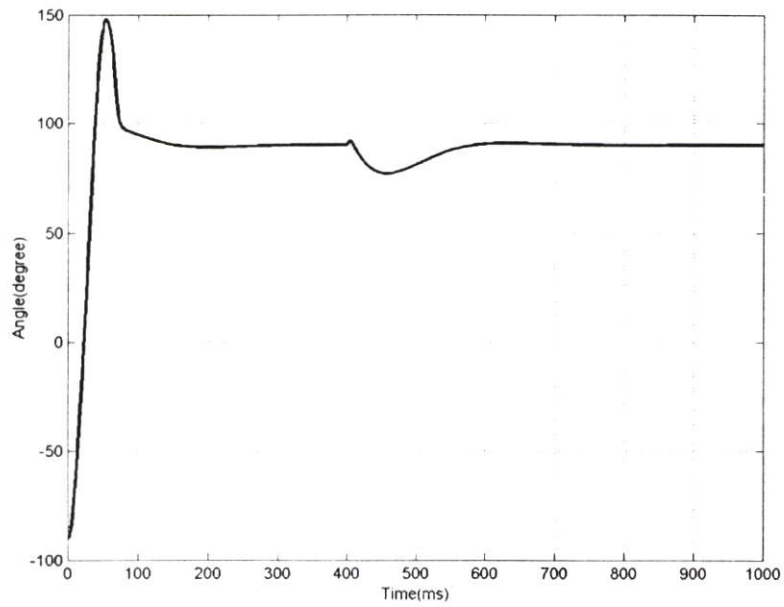
การทดลองที่ 5.3.1 เมื่อทำการแทรกสัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาดสูงสุด 0.01 V แสดงดังรูปที่

5.8

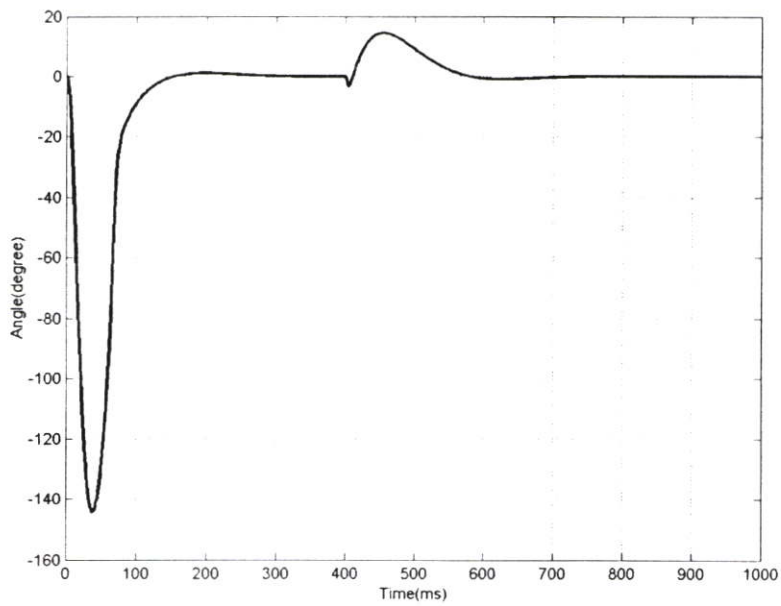


รูปที่ 5.8 สัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.01 V

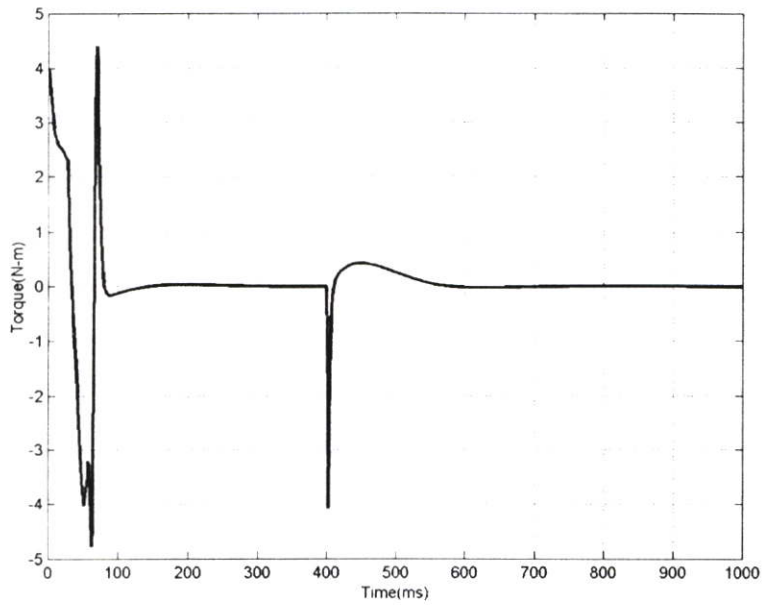
จากรูปที่ 5.9-5.12 เมื่อระบบสามารถควบคุมหุ่นเพนคูบอทได้แล้วจึงทำการแทรกสัญญาณแรงคลที่มีขนาดสูงสุด 0.01 V ในวินาทีที่ 4 เพื่อทดสอบความคงทน(robustness) ของระบบ พบว่าทำให้แขนที่สองเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\theta_2 = 0$  เป็น  $\theta_2 = 20^\circ$  ในช่วงเวลาที่ 4.5 วินาที ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุดแล้วกลับเข้าสู่  $\theta_2 = 0$  ในช่วงเวลาที่ 6 วินาที แสดงดังรูปที่ 5.10 จากการเปลี่ยนแปลงแขนที่สองทำให้แขนแรกเปลี่ยนแปลงตามเพื่อไม่ให้แขนที่สองหลุดจากตำแหน่ง เป้าหมายซึ่งแขนแรกมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $\theta_1 = 90^\circ$  เป็น  $\theta_1 = 75^\circ$  ในช่วงเวลาที่ 4.5 วินาทีและกลับเข้าสู่  $\theta_1 = 90^\circ$  ในช่วงเวลาที่ 6 วินาที แสดงในรูปที่ 5.9 ส่วนค่าแรงบิดเมื่อเกิดสัญญาณแรงคลที่มีขนาด 0.01 V ค่าแรงบิดสูงสุดเท่ากับ -7 V ในช่วงหลังจากเกิดสัญญาณแรงคลแล้วค่าแรงบิดจะค่อย ๆ ลดลงจนเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 5.11 ส่วนค่าระยะห่างระหว่างจุดปลายของแขนที่สองกับจุดเป้าหมายเมื่อเกิดสัญญาณแรงคลที่มีขนาด 0.01 V แล้วค่าระยะห่างเปลี่ยนจาก  $d_1 = 0$  ไปเป็น  $d_1 = 0.1$  ในช่วงเวลาที่ 4.5 วินาทีแล้วกลับเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อเวลา 6 วินาที แสดงดังรูปที่ 5.12



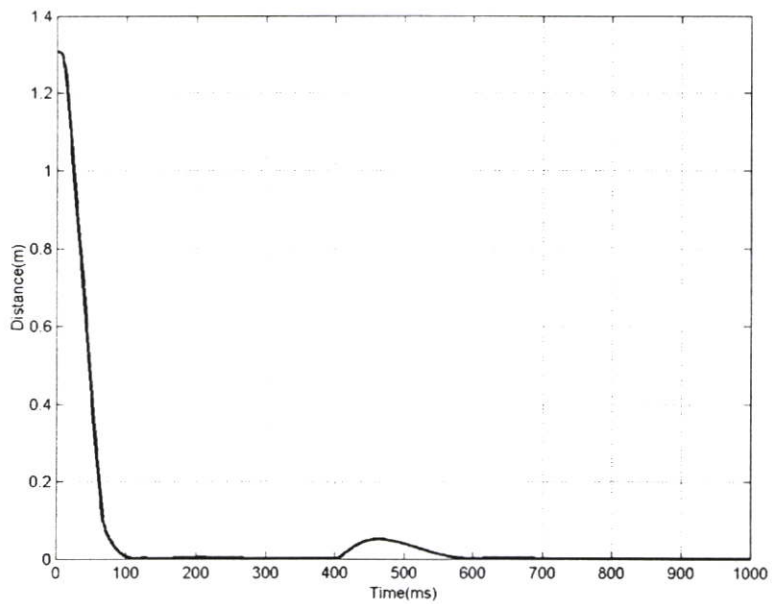
รูปที่ 5.9 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (noise=0.01 V)



รูปที่ 5.10 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (noise=0.01 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.9

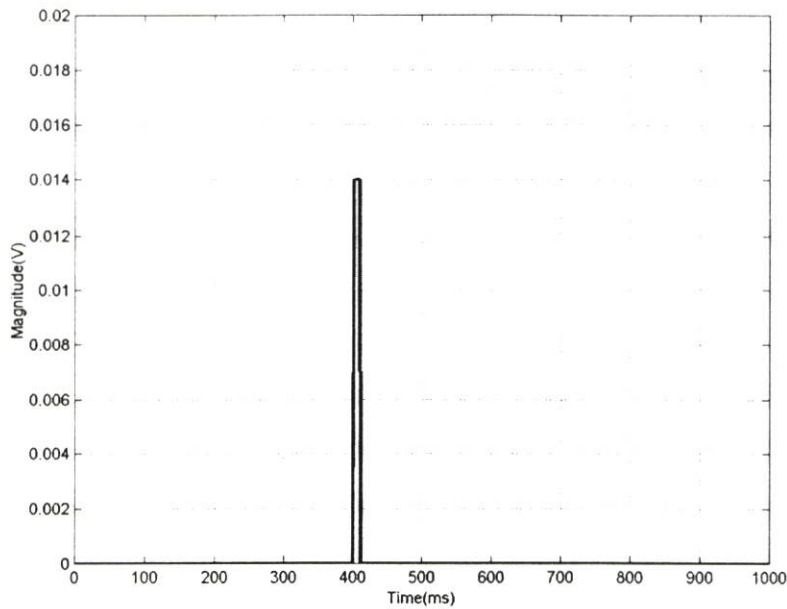


รูปที่ 5.11 ค่าแรงบิด (noise=0.01 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.12 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (noise=0.01 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.9

การทดลองที่ 5.3.2 เมื่อทำการแทรกสัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาดสูงสุด 0.014 V แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 สัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาดสูงสุด 0.014 V

ในการคำนวณหาเสถียรภาพของระบบโดยที่มีสัญญาณรบกวน โดยได้ตรวจสอบเงื่อนไขใช้สมการ ดังนี้

$$\left( \frac{\alpha_{pd1} + \alpha_{pd2}}{2} \right) \cdot \|P_1(z) + \Delta P\| < 1$$

โดย

$$\Delta P = \frac{0.00014}{0.01} = 0.014$$

เพราะฉะนั้น ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูลัมจะได้ดังนี้

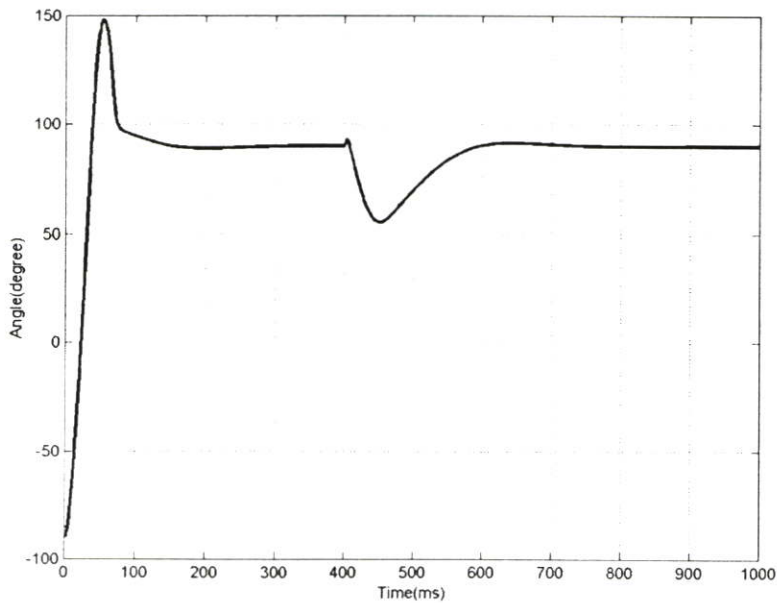
$$\left( \frac{4 + 0.1}{2} \right) \cdot \|0.132 + 0.014\| < 1$$

และชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูลัมจะได้ดังนี้

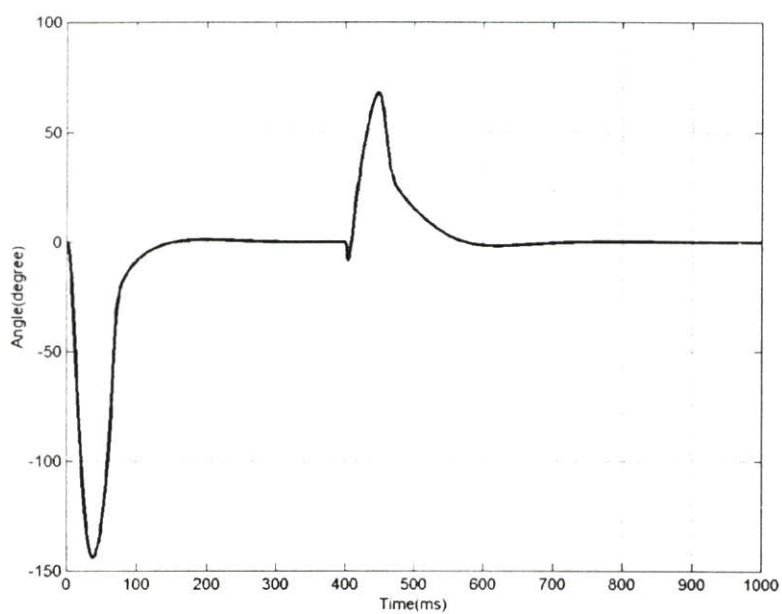
$$\left(\frac{4.5 + 4.5}{2}\right) \cdot \|0.208 + 0.014\| < 1$$

จากการหาเสถียรภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวนแรงคลสามารถหาค่าได้ดังนี้ ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นมีค่า  $0.2993 < 1$  และชุดควบคุมการทรงตัวมีค่า  $0.999 < 1$  เพราะฉะนั้นแสดงว่าระบบควบคุมนี้มีเสถียรภาพแบบ BIBO

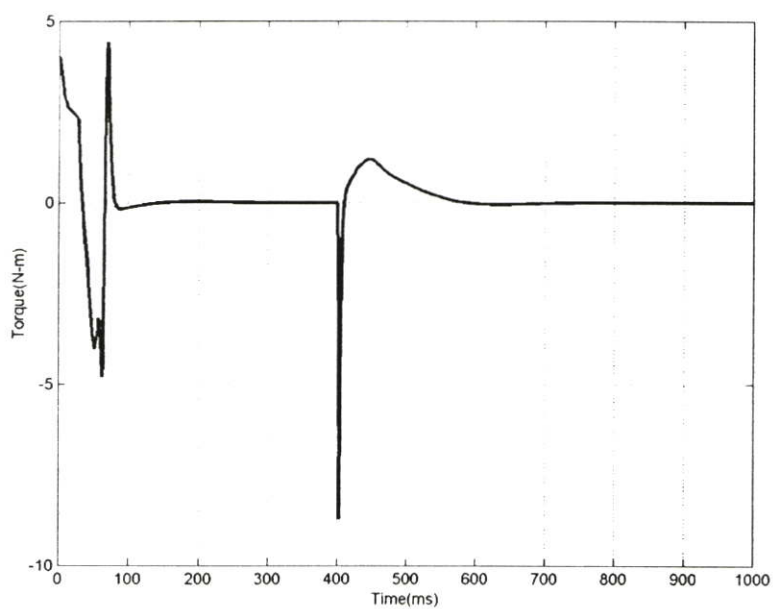
จากรูปที่ 5.14-5.17 เมื่อมีสัญญาณแรงคลที่ขนาดสูงสุด  $0.014 \text{ V}$  ในวินาทีที่ 4 ทำให้แขนที่สองเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ได้รับผลกระทบจากแรงคลหลังจากนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\theta_2 = 0$  เป็น  $\theta_2 = 70^\circ$  ในช่วงเวลาที่  $4.5$  วินาที ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุดแล้วกลับเข้าสู่  $\theta_2 = 0$  ในช่วงเวลาที่  $6$  วินาที แสดงดังรูปที่ 5.15 จากการเปลี่ยนแปลงแขนที่สองทำให้แขนแรกเปลี่ยนแปลงตามเพื่อไม่ให้แขนที่สองหลุดจากตำแหน่งเป้าหมายซึ่งแขนแรกมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $\theta_1 = 90^\circ$  เป็น  $\theta_1 = 25^\circ$  ในช่วงเวลาที่  $4.5$  วินาทีและกลับเข้าสู่  $\theta_1 = 90^\circ$  ในช่วงเวลาที่  $6$  วินาที แสดงในรูปที่ 5.14 ส่วนค่าแรงบิดเมื่อเกิดสัญญาณแรงคลที่ขนาด  $0.014 \text{ V}$  ค่าแรงบิดสูงสุดเท่ากับ  $-15 \text{ V}$  ในช่วงหลังจากเกิดสัญญาณแรงคลแล้วค่าแรงบิดจะค่อย ๆ ลดลงจนเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 5.16 ส่วนค่าระยะห่างระหว่างจุดปลายของแขนที่สองกับจุดเป้าหมายเมื่อเกิดสัญญาณแรงคลที่ขนาด  $0.014 \text{ V}$  แล้วค่าระยะห่างเปลี่ยนจาก  $d_1 = 0$  ไปเป็น  $d_1 = 0.22$  ในช่วงเวลาที่  $4.5$  วินาทีแล้วกลับเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อเวลา  $6$  วินาที แสดงดังรูปที่ 5.17



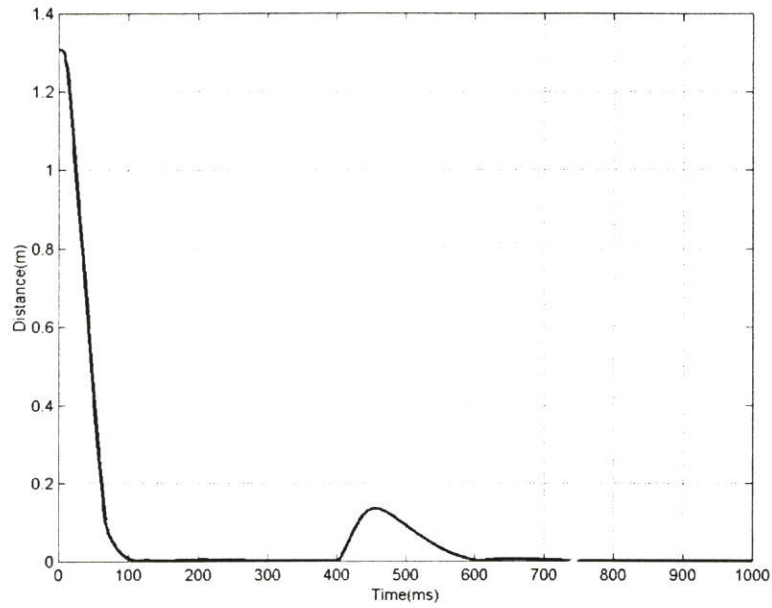
รูปที่ 5.14 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแขนแรก (noise=0.014 V)



รูปที่ 5.15 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (noise=0.014 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.14

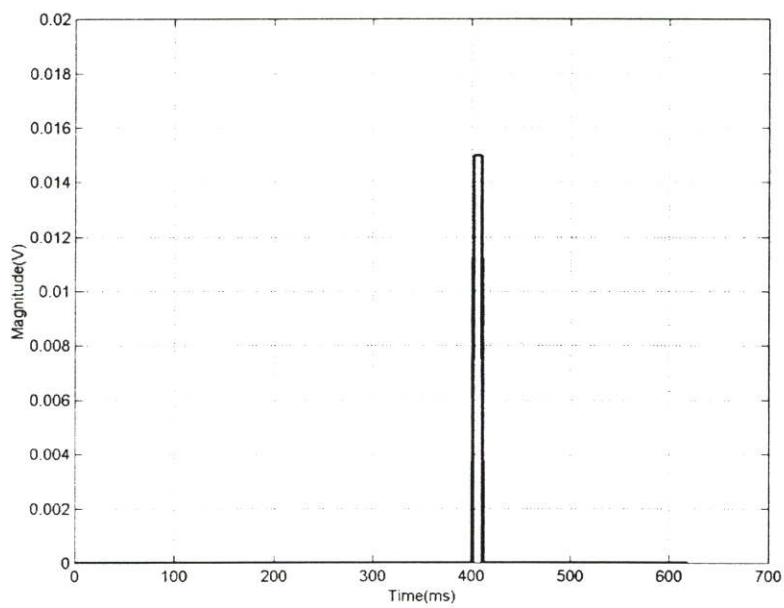


รูปที่ 5.16 ค่าแรงบิด (noise=0.014 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.17 ระยะห่างระหว่างจุด ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (noise=0.014 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.14

การทดลองที่ 5.3.3 เมื่อทำการแทรกสัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาดสูงสุด 0.015 V แสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 สัญญาณรบกวนแรงคลที่มีขนาดสูงสุด 0.015 V

จากรูปที่ 5.18 สามารถหาค่า  $\Delta P$  ได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{0.00015}{0.01} = 0.015$$

เพราะฉะนั้น ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอทจะได้

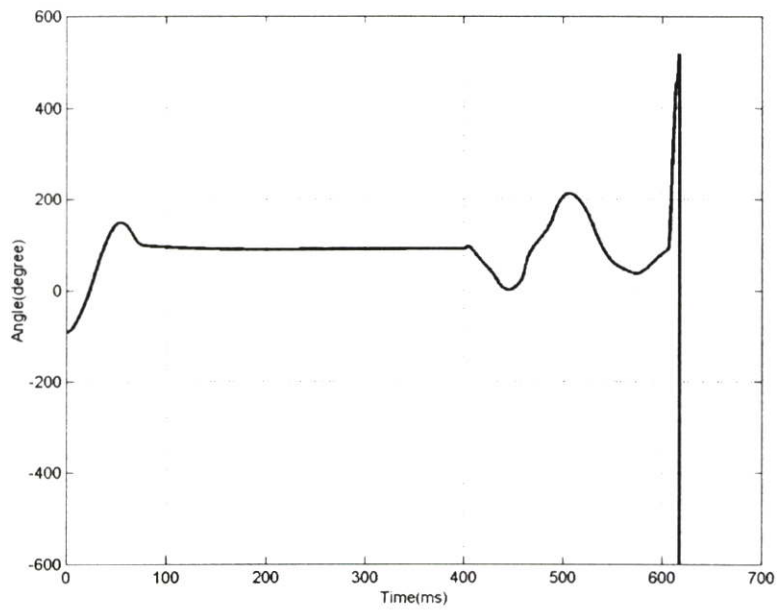
$$\left( \frac{4 + 0.1}{2} \right) \cdot \|0.132 + 0.015\| < 1$$

และชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอทจะได้

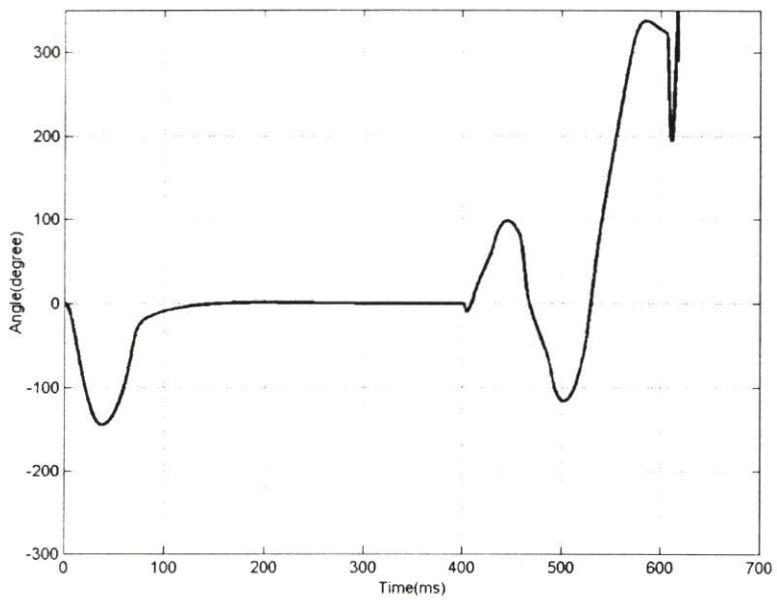
$$\left( \frac{4.5 + 4.5}{2} \right) \cdot \|0.208 + 0.015\| < 1$$

จากการหาเสถียรภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวนแรงกลสามารถหาค่าชุดควบคุมการแกว่งขึ้นมีค่า  $0.30135 < 1$  และชุดควบคุมการทรงตัวมีค่า  $1.0035 < 1$  เพราะฉะนั้นแสดงว่าระบบควบคุมนี้ไม่มีเสถียรภาพ

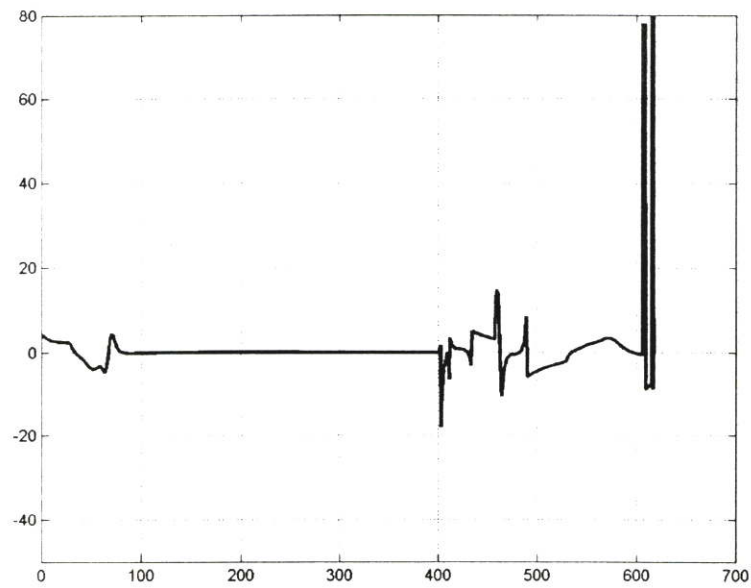
จากรูปที่ 5.19-5.22 เมื่อมีสัญญาณแรงกลที่ขนาดสูงสุด  $0.015 \text{ V}$  ในวินาทีที่ 4 ทำให้แขนที่สองได้รับผลกระทบจากแรงกลมากจนไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งเป้าหมายได้ ซึ่งเกิดจากแขนสองได้รับผลกระทบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากทำให้แขนสองเกิดการหมุนรอบตัวเอง แสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ทำให้แขนแรกไม่สามารถควบคุมแขนสองที่เกิดการแกว่งได้ในการควบคุมแขนสองไม่ได้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 ซึ่งค่าแรงบิดนี้พยายามที่จะควบคุมให้แขนสองเข้าสู่เป้าหมายจึงต้องใช้แรงดันมากแต่ก็ไม่เป็นผล แสดงได้ในรูปที่ 5.21 ส่วนค่าระยะห่างนี้หลังจากเกิดสัญญาณแรงกลในช่วง 4 วินาทีแล้วจุดปลายเกิดการแกว่งระยะห่างที่  $0.35$  ในช่วง 4.5 วินาทีแล้วเหมือนจะทำการควบคุมเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้ในช่วง 4.7 วินาทีแต่สุดท้ายเกิดการแกว่งที่แขนสองทำให้ไม่สามารถควบคุมค่าแรงกลที่มีขนาด  $0.015 \text{ V}$  ได้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.22



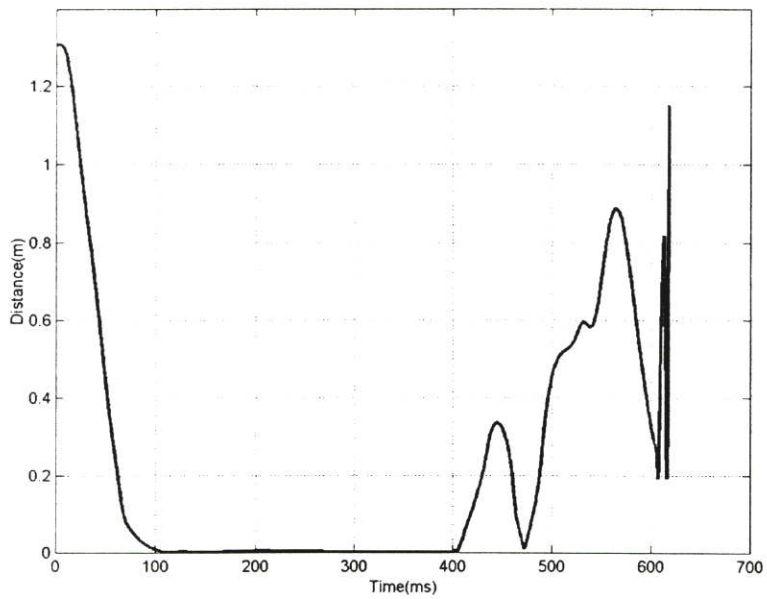
รูปที่ 5.19 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (noise=0.015 V)



รูปที่ 5.20 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (noise=0.015 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.19



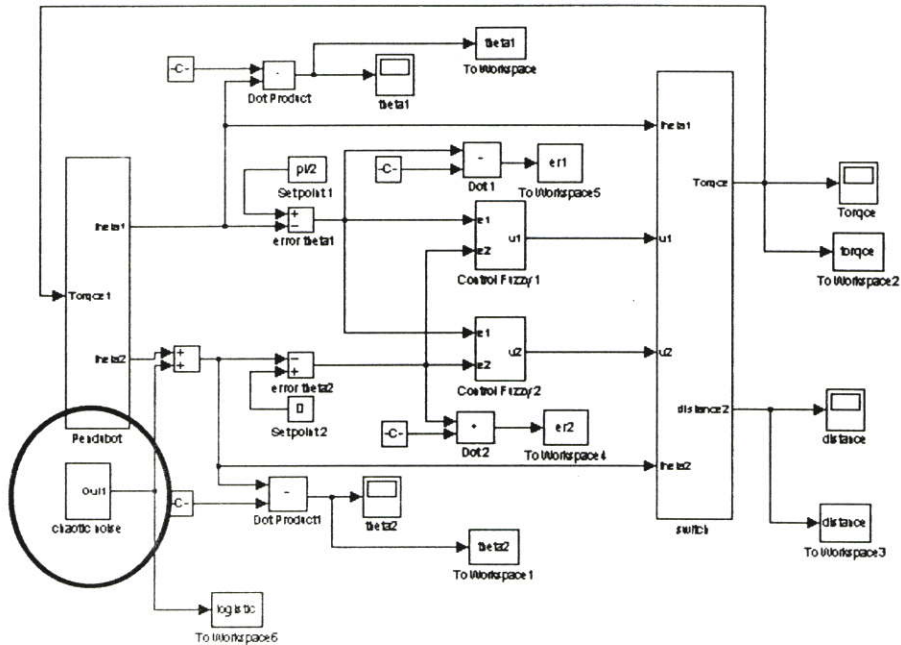
รูปที่ 5.21 ค่าแรงบิด (noise=0.015 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.22 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (noise=0.015 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.19

## 5.4 การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนอลวน

แบบจำลองสัญญาณรบกวนอลวน สามารถแสดงในรูปที่ 5.23 ดังนี้



รูปที่ 5.23 แผนภาพการประมวลผลหุ่นยนต์โดยมีสัญญาณรบกวนอลวน (Chaotic noise)

จากรูปที่ 5.23 สามารถขยายส่วนของสัญญาณรบกวนอลวน สามารถเขียนในรูปสมการได้ ดังนี้

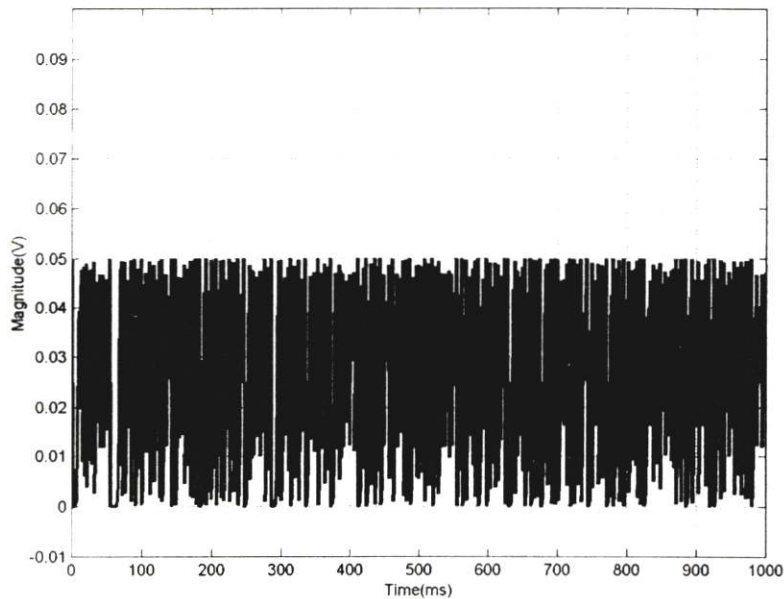
$$f(x) = rx(1-x) \quad \text{โดยที่ } 0 < r \leq 4 \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.1) เพื่อให้สมการนี้เกิดสัญญาณอลวนจึงกำหนดให้  $r = 4$  โดยที่ให้ค่า  $x_0 = 0.4999$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5.2)

$$f(x) = 4x(1-x) \quad (5.8)$$

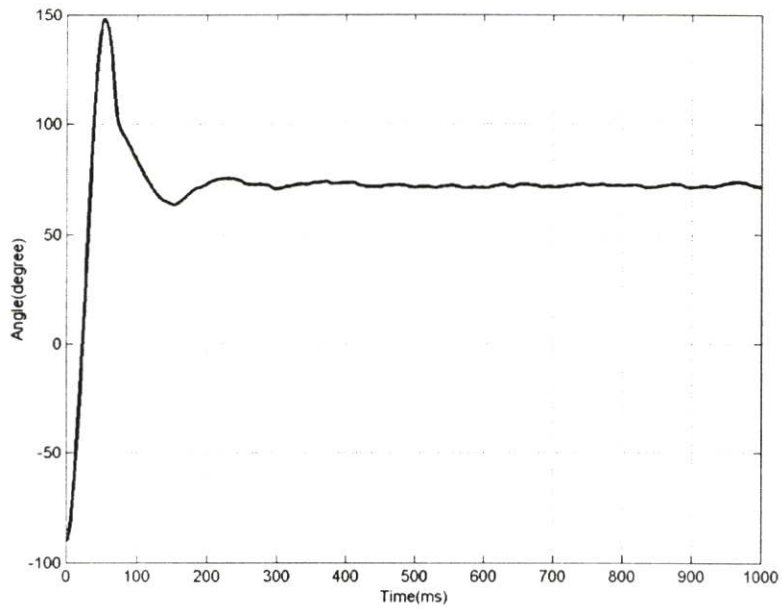
เพราะฉะนั้น จึงนำสมการที่ (5.2) มาทำการสร้างสัญญาณอลวน (Chaotic Noise) ทำให้ได้ผลการทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 5.4.1 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาดสูงสุด 0.05 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.24

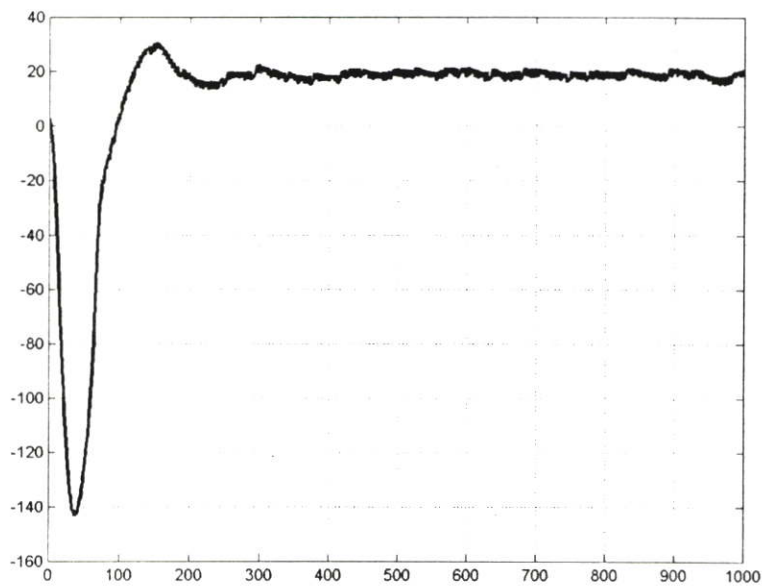


รูปที่ 5.24 สัญญาณรบกวนอลวนสูงสุด (Chaotic noise=0.05 V)

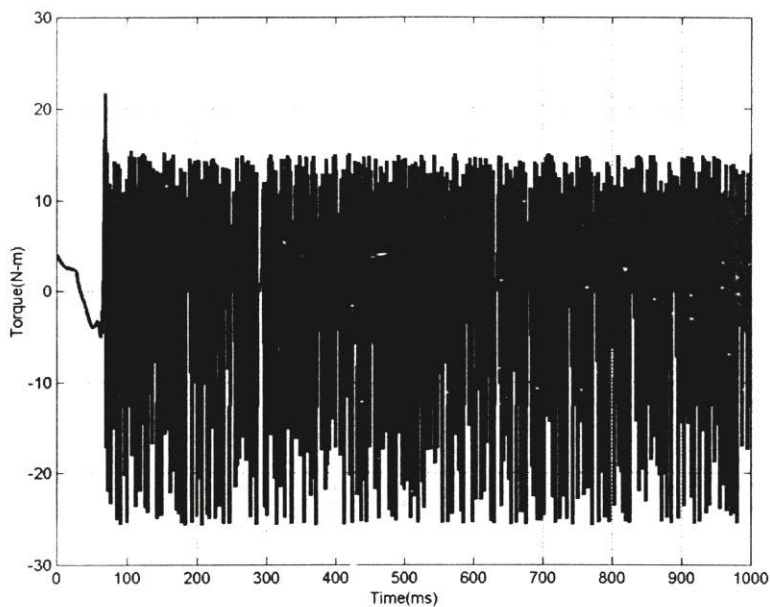
จากรูปที่ 5.25-5.28 เมื่อมีสัญญาณรบกวนอลวนสูงสุดเท่ากับ 0.05 V ดังรูปที่ 5.24 เข้าทำการรบกวนหุ่นเพนคูบอททำให้แขนแรกจากเดิมมีค่าเป้าหมายอยู่ที่  $\theta_1 = 90^\circ$  ปรากฏว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาทำให้จุดเป้าหมายอยู่ที่  $\theta_1 = 120^\circ$  แสดงดังรูปที่ 5.25 และทำให้ค่ามุมแขนที่สองเปลี่ยนตำแหน่งเป้าหมายจากเดิม  $\theta_2 = 0$  กลายเป็น  $\theta_2 = -30^\circ$  ส่วนค่าแรงบิดนี้ ถ้าปกติเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนเมื่อค่ามุมทั้งสองเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายแล้วค่าของแรงบิดจะเท่ากับศูนย์เสมอ แต่เนื่องจากตำแหน่งเป้าหมายเปลี่ยนก็ทำให้ค่าแรงบิดเปลี่ยนเช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.27 และค่าระยะห่างเมื่อตำแหน่งเป้าหมายเปลี่ยนไปทำให้ค่าระยะห่างไม่เท่ากับศูนย์เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 5.28 สรุปก็คือ เมื่อมีสัญญาณรบกวนสามารถทำให้ค่าเป้าหมายเลื่อนตำแหน่งไปแต่ยังคงรักษาการทรงตัวไว้ได้



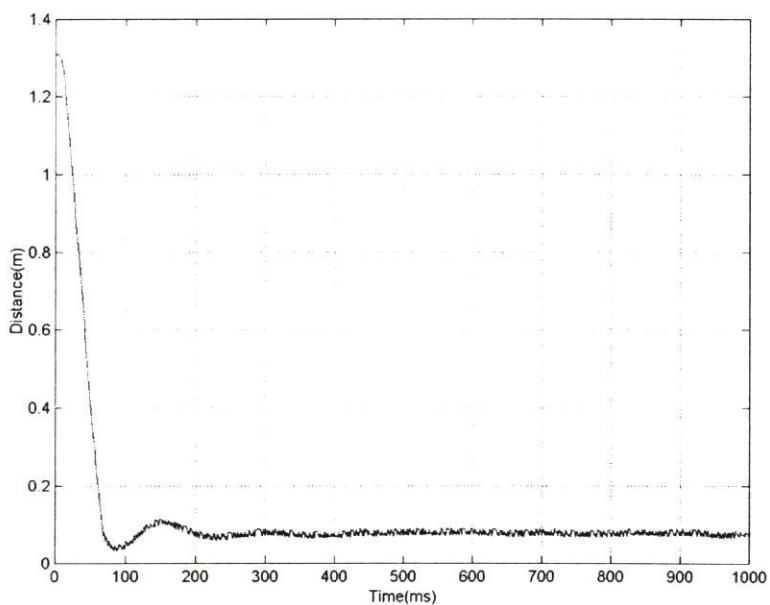
รูปที่ 5.25 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Chaotic noise=0.05 V)



รูปที่ 5.26 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Chaotic noise=0.05 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.25

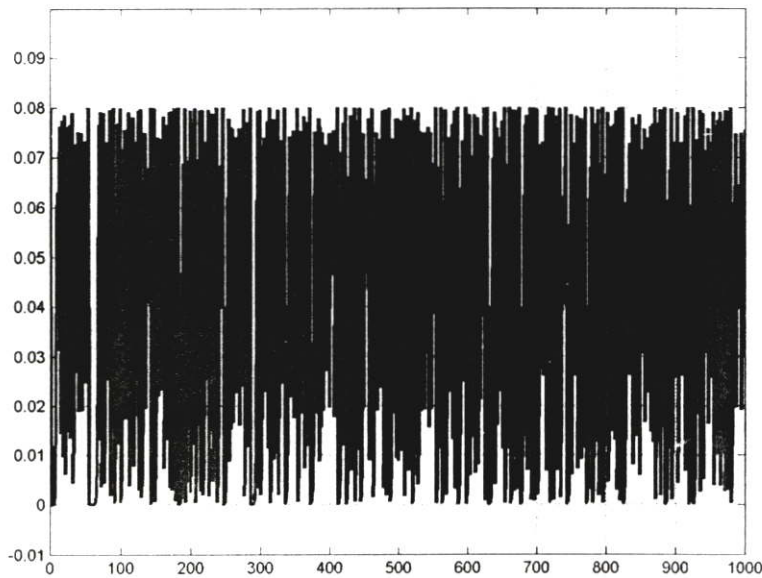


รูปที่ 5.27 ค่าแรงบิด (Chaotic noise=0.05 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.28 ระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (Chaotic noise=0.05 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.25

การทดลองที่ 5.4.2 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาดสูงสุด 0.08 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 สัญญาณรบกวนอลวนสูงสุด (Chaotic noise=0.08 V)

จากรูปที่ 5.29 สามารถหาค่า  $\Delta P$  ได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{0.0569}{4.4} = 0.0132$$

เพราะฉะนั้น ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอที่จะได้

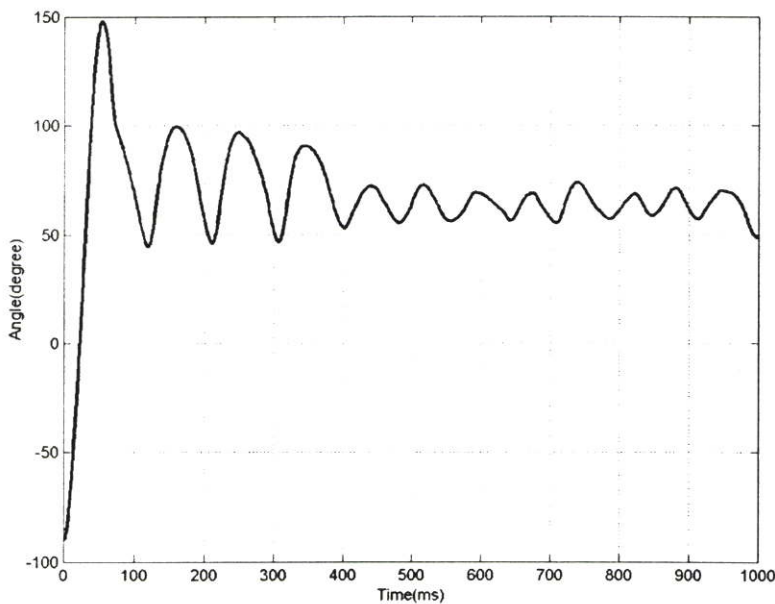
$$\left( \frac{4 + 0.1}{2} \right) \cdot \|0.132 + 0.0132\| < 1$$

และชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอที่จะได้

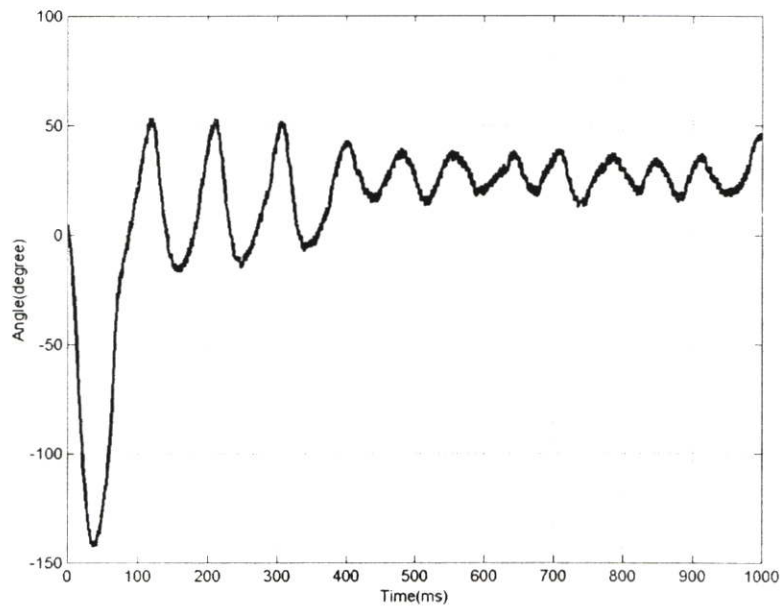
$$\left( \frac{4.5 + 4.5}{2} \right) \cdot \|0.208 + 0.0132\| < 1$$

จากการหาเสถียรภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวนอลวนหาค่าได้ดังนี้ ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นมีค่า  $0.2976 < 1$  และชุดควบคุมการทรงตัวมีค่า  $0.9954 < 1$  เพราะฉะนั้นแสดงว่าระบบควบคุมนี้มีเสถียรภาพแบบ BIBO

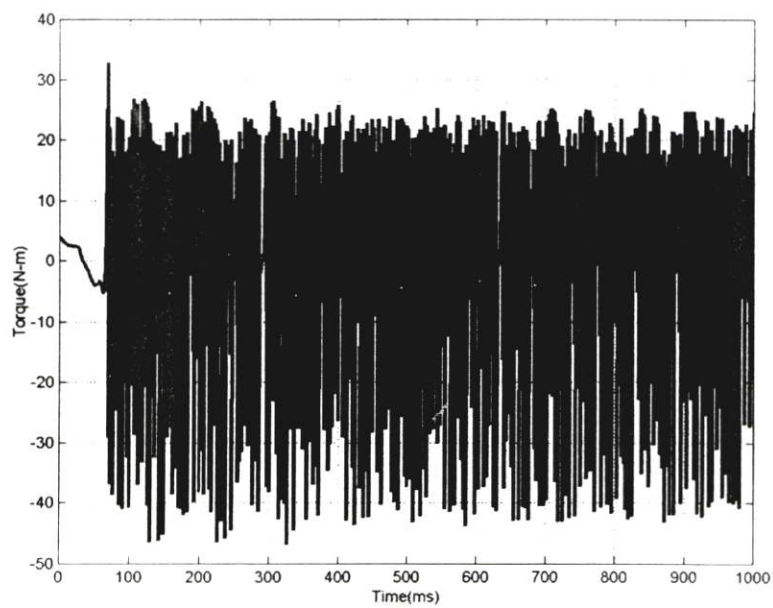
จากรูปที่ 5.30-5.33 เมื่อมีสัญญาณรบกวนอลวนสูงสุดเท่ากับ  $0.08 \text{ V}$  ดังรูปที่ 5.29 เข้าทำการรบกวนหุ่นยนต์ทำให้แกนแรกจากเดิมมีค่าเป้าหมายอยู่ที่  $\theta_1 = 90^\circ$  ปรากฏว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาทำให้จุดเป้าหมายอยู่ที่  $\theta_1 = 150^\circ$  แสดงดังรูปที่ 5.30 และทำให้ค่ามุมแกนที่สองเปลี่ยนตำแหน่งเป้าหมายจากเดิม  $\theta_2 = 0$  กลายเป็น  $\theta_2 = -60^\circ$  แสดงดังรูปที่ 5.31 ส่วนค่าแรงบิดนี้ ถ้าปกติเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนเมื่อค่ามุมทั้งสองเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายแล้วค่าของแรงบิดจะเท่ากับศูนย์เสมอ แต่เนื่องจากตำแหน่งเป้าหมายเปลี่ยนก็ทำให้ค่าแรงบิดเปลี่ยนเช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.32 และค่าระยะห่างเมื่อตำแหน่งเป้าหมายเปลี่ยนไปทำให้ค่าระยะห่างไม่เท่ากับศูนย์เช่นกัน ซึ่งในที่นี้ค่าระยะห่างเท่ากับ  $0.22 \text{ m}$  แสดงดังรูปที่ 5.33



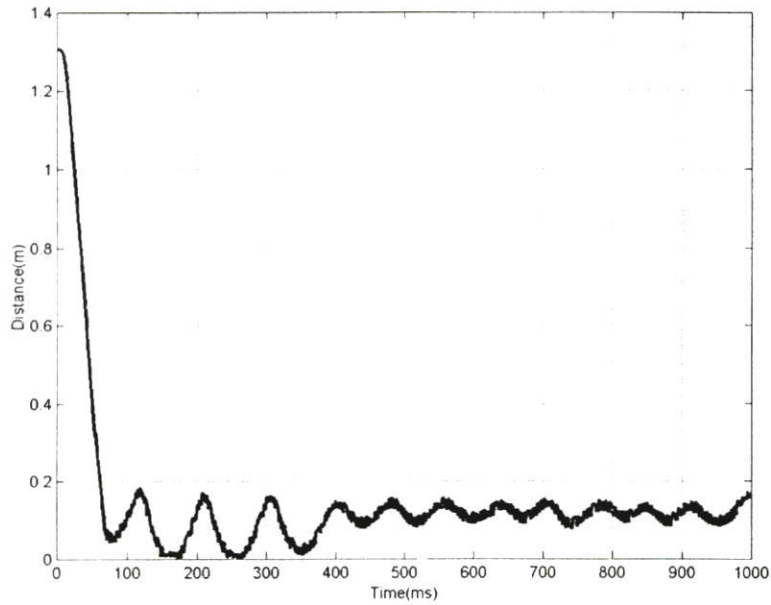
รูปที่ 5.30 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Chaotic noise=0.08 V)



รูปที่ 5.31 ค่ามุมระหว่างแขนสอง (Chaotic noise=0.08 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.30

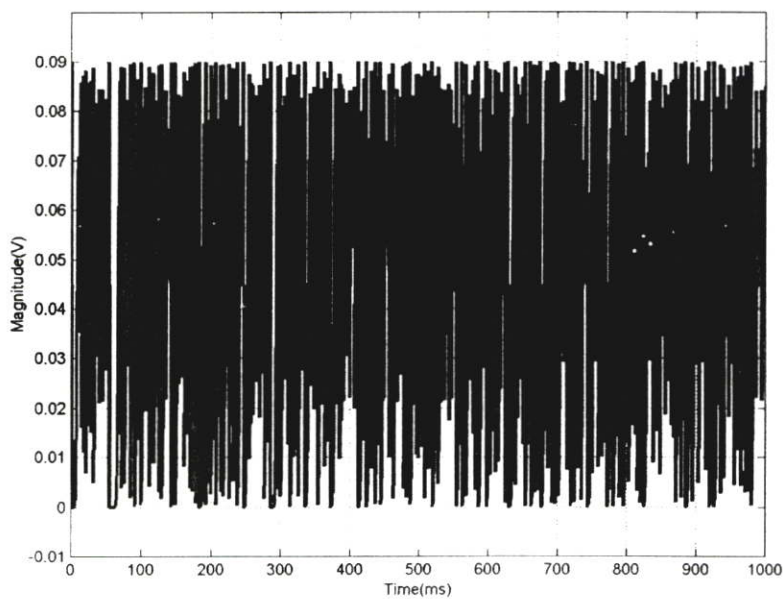


รูปที่ 5.32 ค่าแรงบิด (Chaotic noise=0.08 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.33 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (Chaotic noise=0.08 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.30

การทดลองที่ 5.4.3 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาดสูงสุด 0.09 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 สัญญาณรบกวนอลวนสูงสุด (Chaotic noise=0.09 V)

จากรูปที่ 5.34 สามารถหาค่า  $\Delta P$  ได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{0.0685}{4.5} = 0.0152$$

เพราะฉะนั้น ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอทจะได้

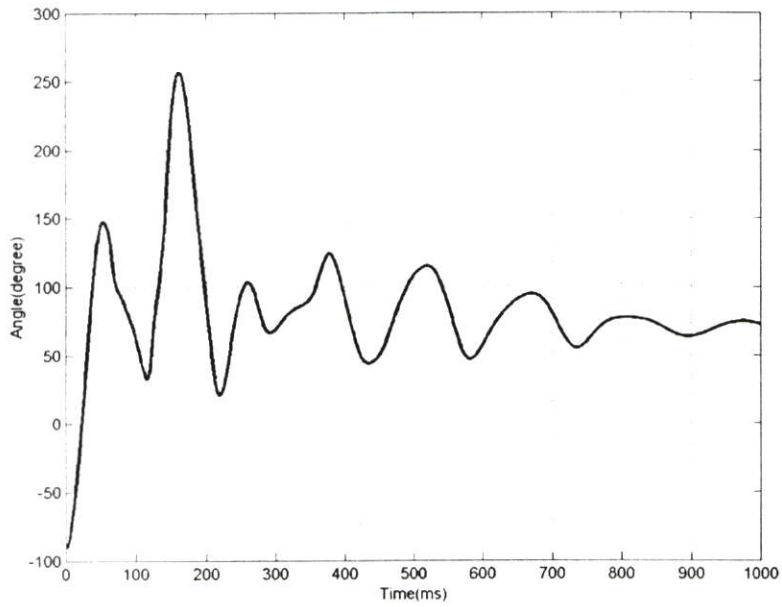
$$\left(\frac{4+0.1}{2}\right) \cdot \|0.132 + 0.0152\| < 1$$

และชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอทจะได้

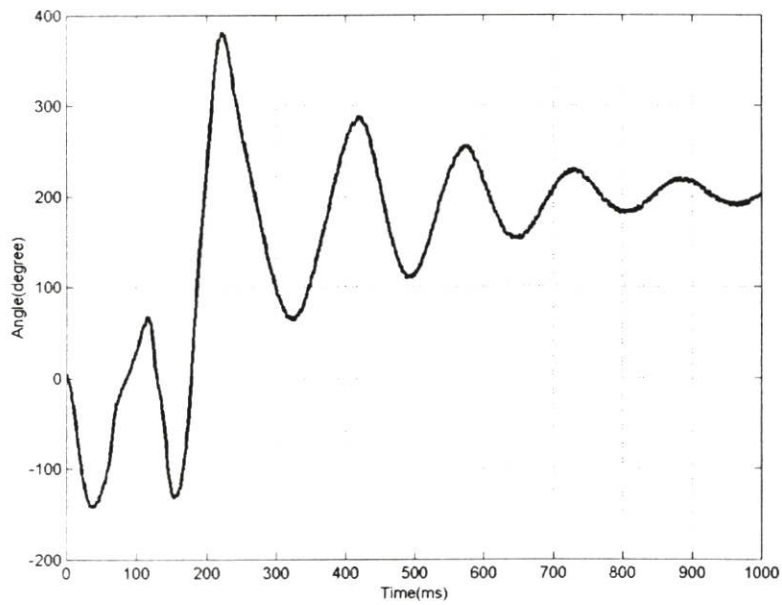
$$\left(\frac{4.5+4.5}{2}\right) \cdot \|0.208 + 0.0152\| < 1$$

จากการหาเสถียรภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวนอลวนหาค่าได้ดังนี้ ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นมีค่า  $0.3017 < 1$  และชุดควบคุมการทรงตัวมีค่า  $1.0044 < 1$  เพราะฉะนั้นแสดงว่าระบบควบคุมนี้ไม่มีเสถียรภาพ

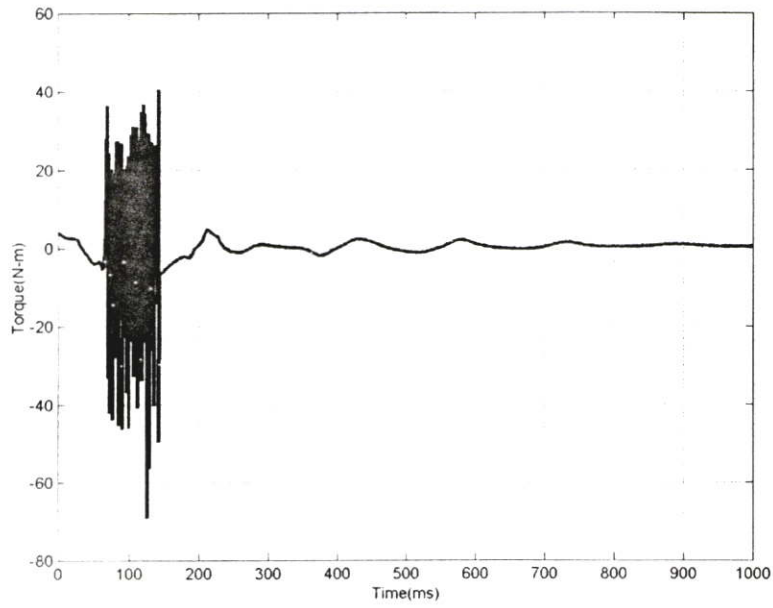
จากรูปที่ 5.35-5.38 เมื่อมีสัญญาณรบกวนอลวนสูงสุดเท่ากับ  $0.09 \text{ V}$  ในช่วงเวลา 0-2 วินาที แขนแรกเข้าสู่สภาวะคงที่ที่มุม  $\theta_1 = 150^\circ$  จากช่วงเวลา 2.1-5 วินาที แขนแรกทำการควบคุมให้แขนที่สองทำการทรงตัวอยู่ได้จนถึง 5 วินาที เมื่อหลังจาก 5 วินาที แสดงดังรูปที่ 5.35 ส่วนค่ามุมแขนที่สองนั้น ทำการรักษาระดับและตำแหน่งให้คงที่อยู่ตั้งแต่ 2.1-5 วินาที แต่เมื่อเวลา 5.1 วินาทีเป็นต้นไปแขนแรกไม่สามารถรักษาการทรงตัวของแขนสองไว้ทำให้แขนที่สองหลุดจากตำแหน่งเป้าหมาย แสดงดังรูปที่ 5.36 ส่วนค่าแรงบิดนั้นในช่วงเวลาที่ 5.1 ชุดควบคุมพยายามควบคุมไม่ให้ตำแหน่งของแขนที่สองเปลี่ยนแต่ทำให้ไม่สำเร็จ แสดงได้ดังรูปที่ 5.37 และค่าระยะห่างนั้นรักษาระดับไว้ได้ที่  $0.2 \text{ m}$  เมื่อถึงช่วงเวลาที่ 5.5 วินาที ระบบก็ไม่สามารถรักษาระดับไว้ได้เช่นกัน สรุปก็คือ เมื่อมีสัญญาณรบกวนอลวนสูงสุดเกิน  $0.09 \text{ V}$  ระบบจะไม่สามารถรักษาระดับตำแหน่งไว้ได้



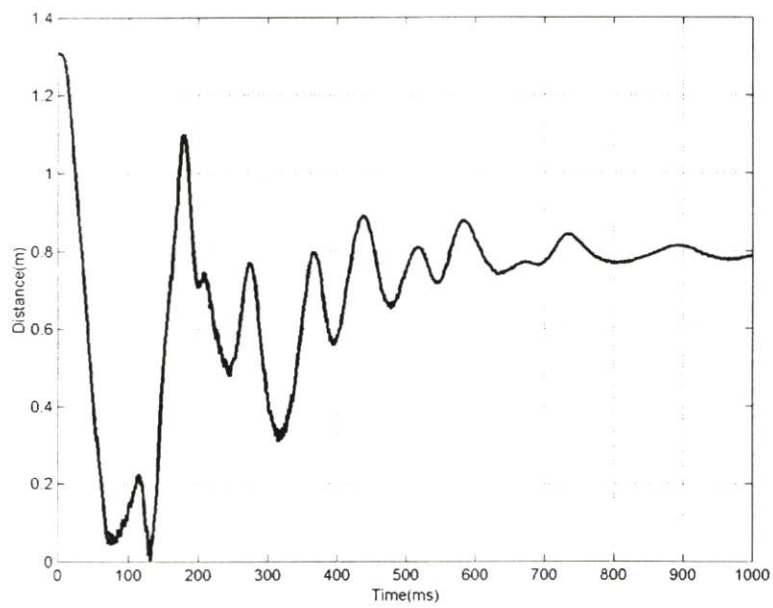
รูปที่ 5.35 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Chaotic noise=0.09 V)



รูปที่ 5.36 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Chaotic noise=0.09 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.35



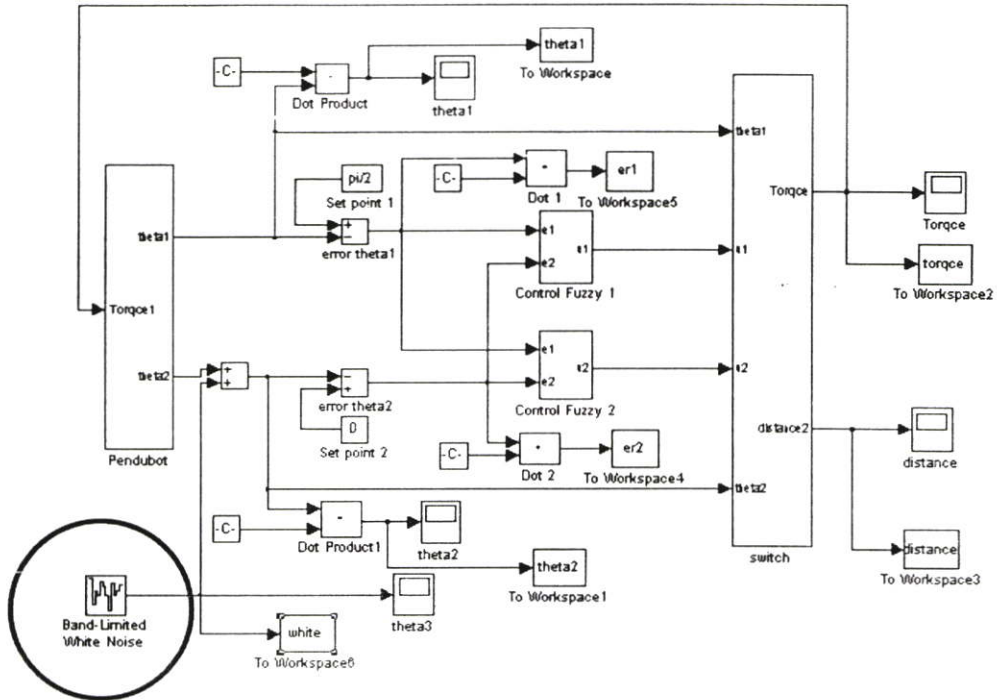
รูปที่ 5.37 ค่าแรงบิด (Chaotic noise=0.09 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.38 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (Chaotic noise=0.09 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.35

## 5.5 การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแบบขาว

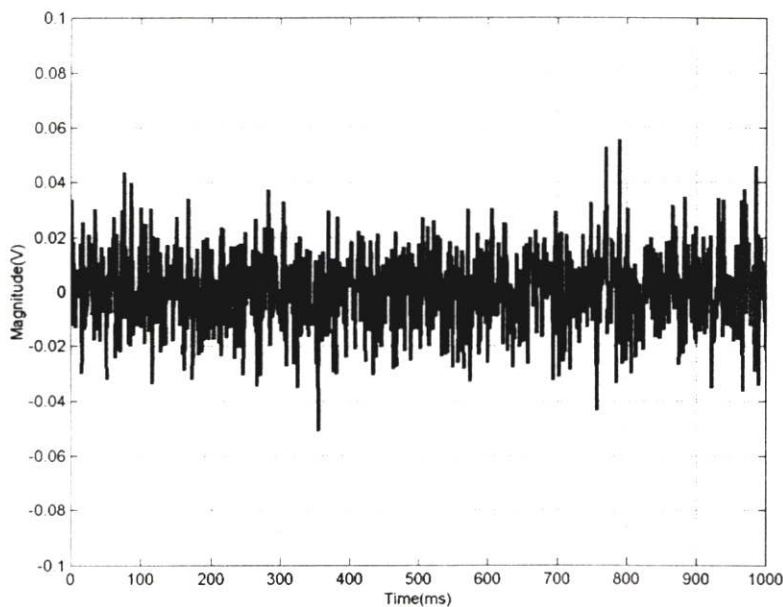
สามารถออกแบบจำลองสัญญาณแบบขาว ได้ดังรูปที่ 5.39



รูปที่ 5.39 แผนภาพการประมวลผลหุ่นยนต์โดยมีสัญญาณรบกวนแบบขาว

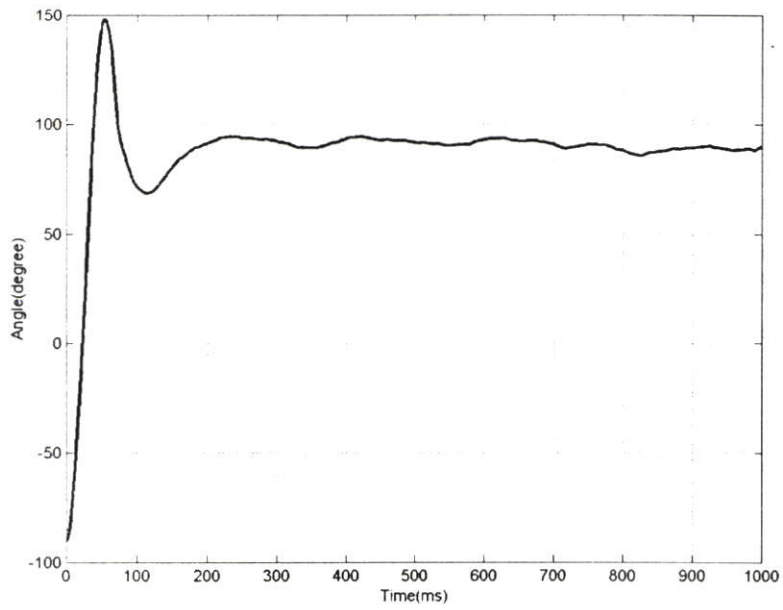
การทดลองที่ 5.5.1 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนอลวนที่มีขนาดสูงสุด 0.10 V แสดงได้ดังรูปที่

5.40

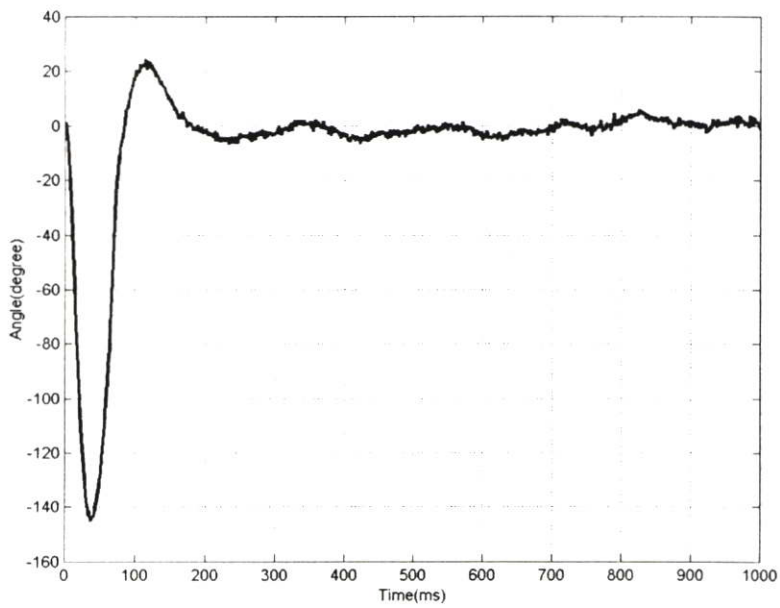


รูปที่ 5.40 สัญญาณรบกวนแบบขาวที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.10 V

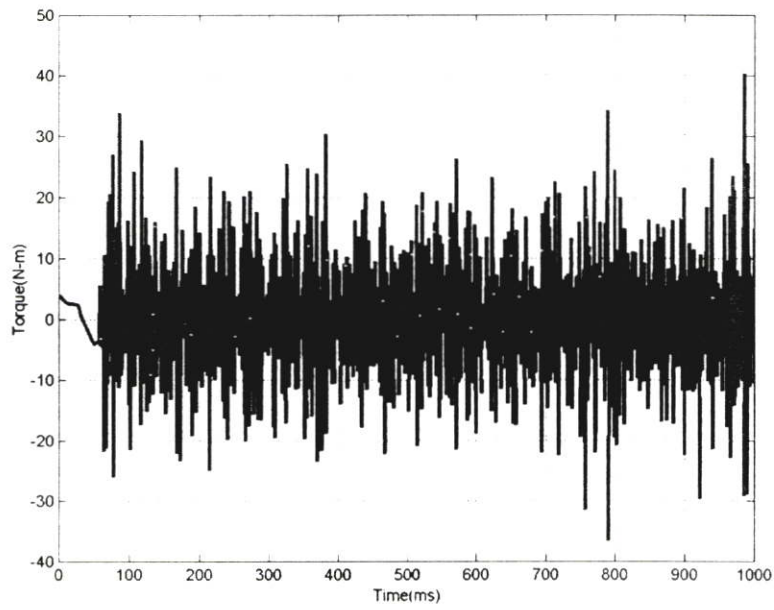
จากรูปที่ 5.41-5.44 เมื่อมีขนาดสัญญาณรบกวนแบบขาวที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.10 โวลต์ ทำการรบกวนหุ่นเพนคูบอทผลที่ได้จากการจำลองสรุปได้ดังนี้ ค่ามุมแกนแรกที่ได้จากกราฟมีการเคลื่อนที่ไม่มากเมื่อเทียบกับแกนที่สองซึ่งผลที่ได้ค่ามุมแกนแรกและแกนที่สองสามารถตั้งอยู่ตำแหน่งเป้าหมายแต่แกนทั้งสองจะไม่นิ่ง แสดงได้ดังรูปที่ 5.41 และ 5.42 เมื่อถ้าสังเกตจากค่ามุมแกนแรกค่าแรงบิดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าแกนแรก ถ้าแกนแรกมีการขยับก็จะมีค่าแรงบิดจากมอเตอร์เข้าไปทำการควบคุมแกนที่สอง แสดงได้ดังรูปที่ 5.43 และค่าระยะห่างระหว่างจุดปลายแกนที่สองกับตำแหน่งเป้าหมายซึ่งแกนแรกและแกนที่สองเกิดการเคลื่อนที่เล็กน้อยค่าระยะห่างก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 5.44



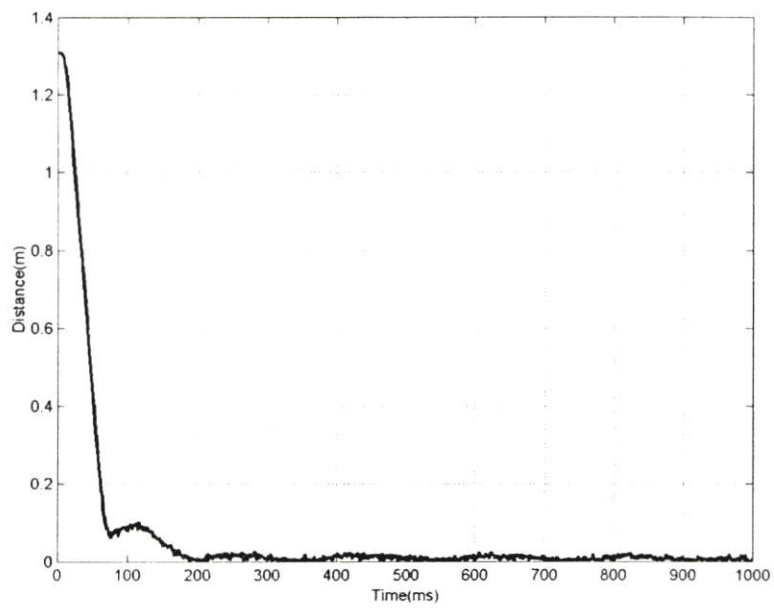
รูปที่ 5.41 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (White noise=0.10 V)



รูปที่ 5.42 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (White noise=0.10 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.41

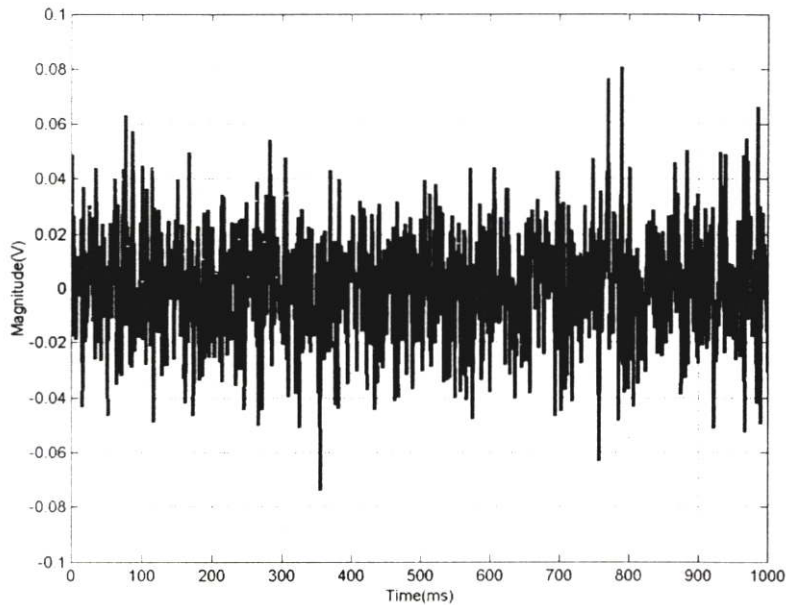


รูปที่ 5.43 ค่าแรงบิด (White noise=0.10 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.44 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (White noise=0.10 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.41

การทดลองที่ 5.5.2 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนอสมมาตรมีขนาดสูงสุด 0.15 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 สัญญาณรบกวนแบบขาวที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.15 V

จากรูปที่ 5.45 สามารถหาค่า  $\Delta P$  ได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{0.0953}{7.5} = 0.0127$$

เพราะฉะนั้น ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอที่จะได้

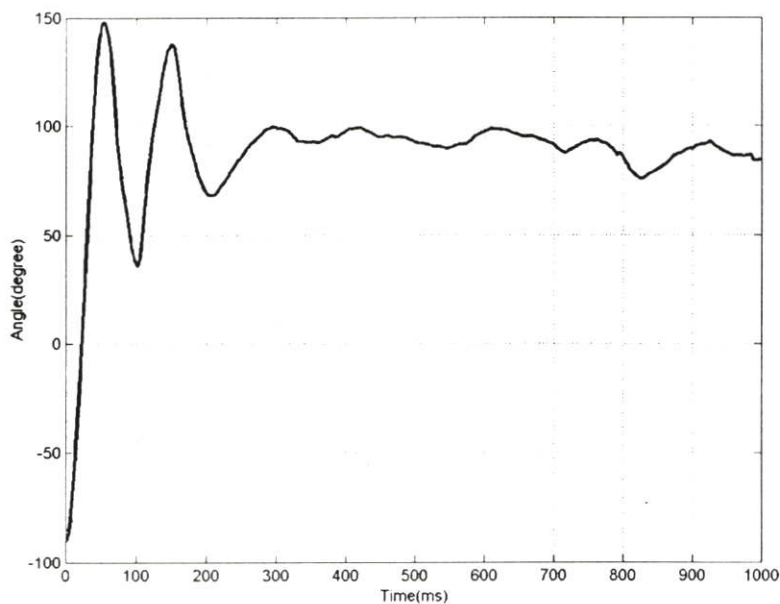
$$\left( \frac{4 + 0.1}{2} \right) \cdot \|0.132 + 0.0127\| < 1$$

และชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอที่จะได้

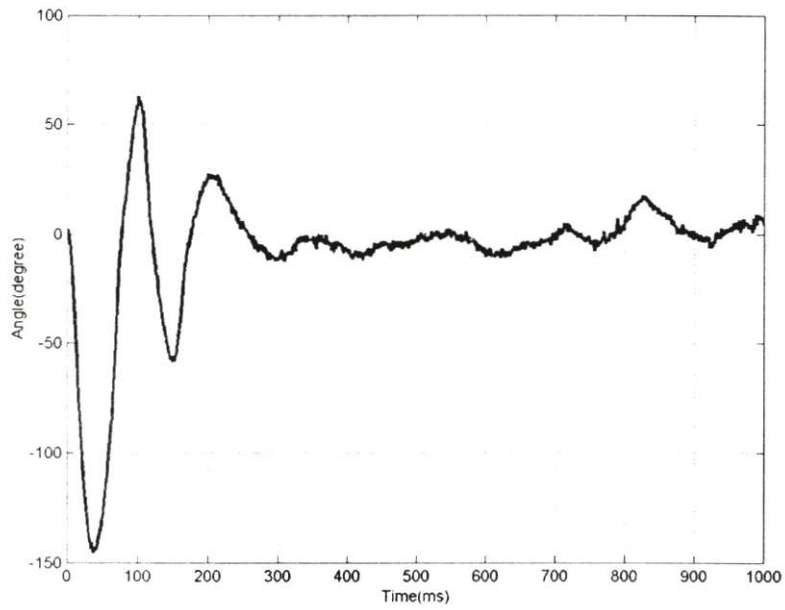
$$\left( \frac{4.5 + 4.5}{2} \right) \cdot \|0.208 + 0.0127\| < 1$$

จากการหาเสถียรภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวนลอวนค่าได้ดังนี้ ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นมีค่า  $0.2966 < 1$  และชุดควบคุมการทรงตัวมีค่า  $0.993 < 1$  เพราะฉะนั้นแสดงว่าระบบควบคุมนี้มีเสถียรภาพแบบ BIBO

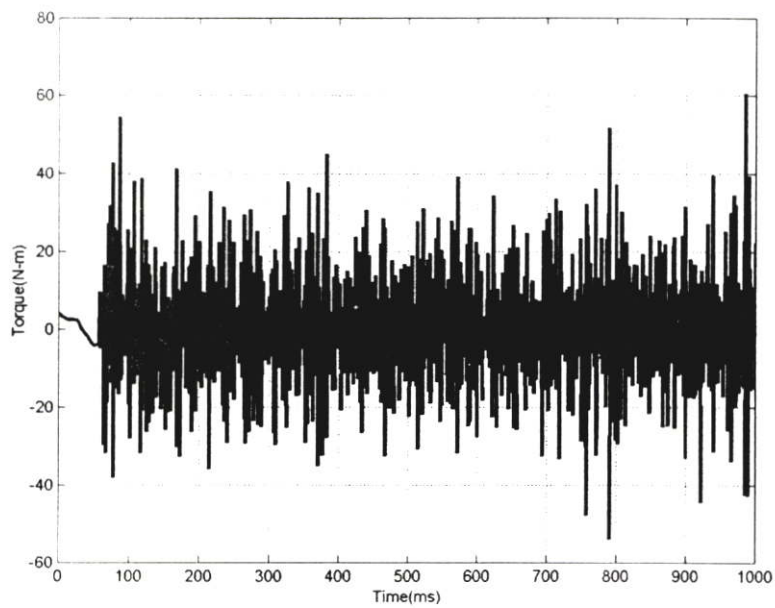
จากรูปที่ 5.46-5.49 เมื่อมีสัญญาณรบกวนแบบขาวสูงสุดเท่ากับ  $0.15 \text{ V}$  ทำให้แกนแรกทำการแกว่งแกนที่สองและทำการทรงตัวได้ในช่วงเวลา  $0-3$  วินาที ซึ่งหลังจากเวลา  $3$  วินาทีไปแล้วการทรงตัวจะทำได้ยากเพราะมีสัญญาณรบกวนทั้งค่าบวกและค่าลบทำให้เกิดการแกว่งบ้างเล็กน้อยแสดงในรูปที่ 5.46 ส่วนแกนที่สองนั้นมีการเปลี่ยนแปลงมากแต่แกนแรกยังทำการทรงตัวไม่ไห้แกนที่สองหลุดจากตำแหน่งได้ แสดงในรูปที่ 5.47 ค่าแรงบิดนี้ เมื่อมีค่าสัญญาณรบกวนมากขึ้นทำให้การออกแบบตัวให้มอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับเพราะต้องใช้แรงดันมาก แสดงดังรูปที่ 5.48 และค่าระยะห่างระหว่างจุดปลายแกนสองกับตำแหน่งเป้าหมายนั้นจะทำงานสัมพันธ์กับแกนแรกและแกนที่สอง แสดงในรูปที่ 5.49 ถ้ามีสัญญาณรบกวนแบบขาวสูงสุดมากกว่า  $0.15 \text{ V}$  ระบบควบคุมหุ่นยนต์จะไม่สามารถควบคุมได้



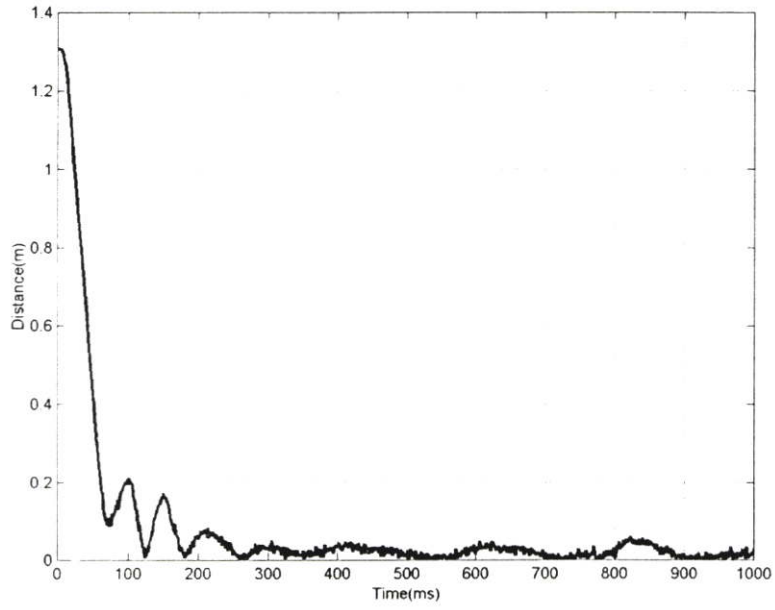
รูปที่ 5.46 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (White noise=0.15 V)



รูปที่ 5.47 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (White noise=0.15 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.46



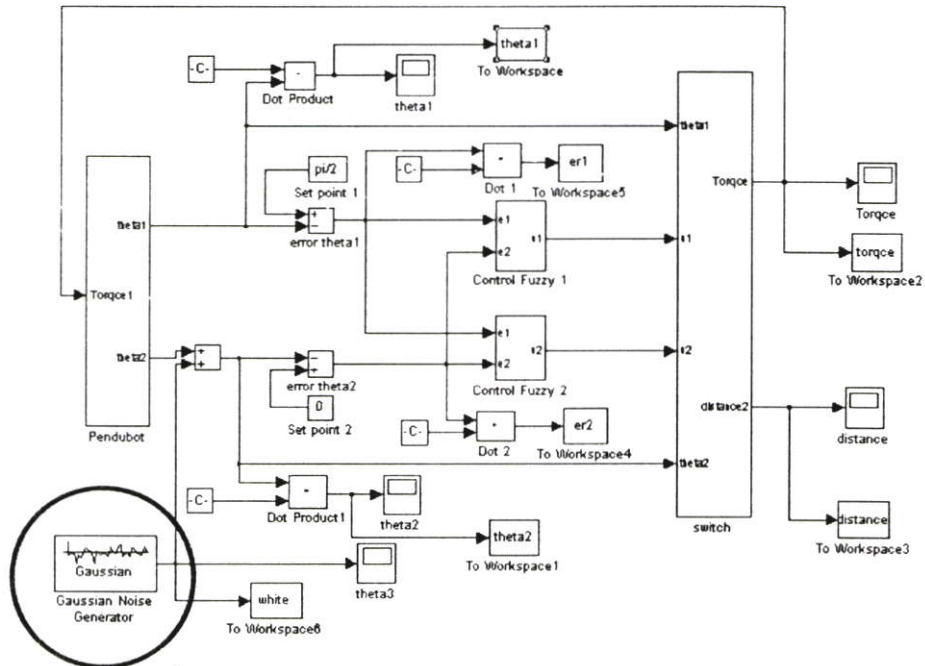
รูปที่ 5.48 ค่าแรงบิด (White noise=0.15 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.49 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (White noise=0.15 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.46

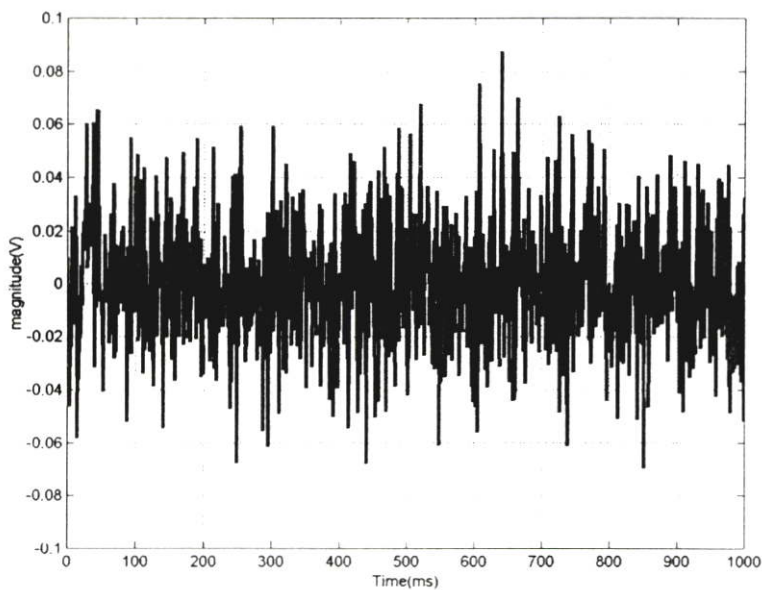
## 5.6 การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์

สามารถออกแบบจำลองสัญญาณแบบเกาส์ ได้ดังรูปที่ 5.50



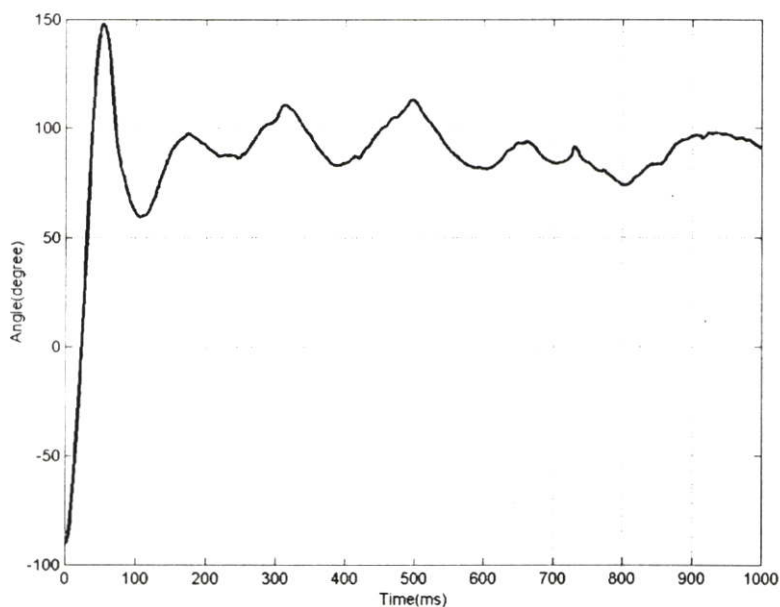
รูปที่ 5.50 แผนภาพการประมวลผลหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์

การทดลองที่ 5.6.1 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีขนาดสูงสุด 0.16 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.51

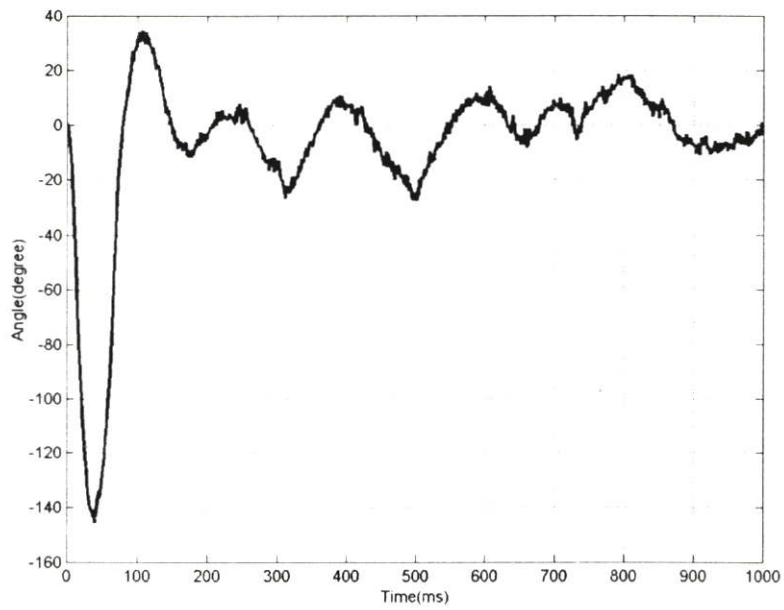


รูปที่ 5.51 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.16 V

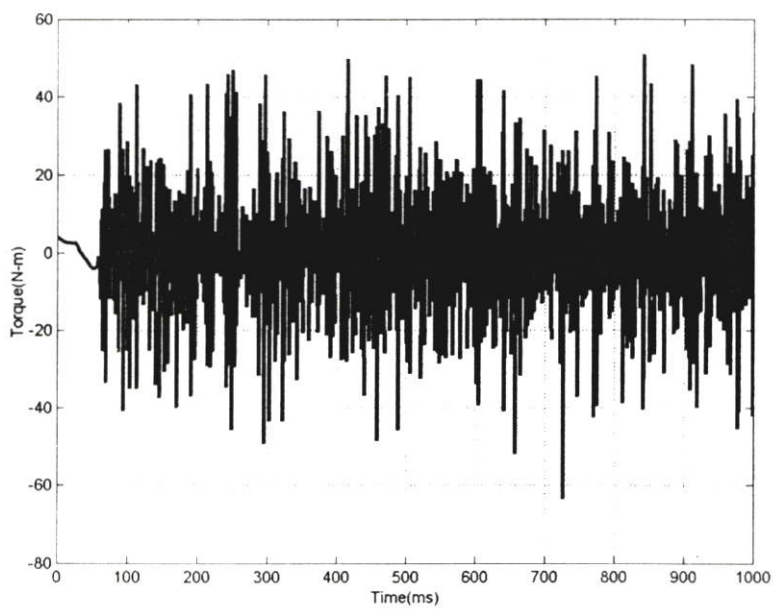
จากรูปที่ 5.52-5.55 เมื่อมีขนาดสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.16 โวลต์ ทำการรบกวนหุ่นเพนคูบอท ผลที่ได้จากการจำลองมีดังนี้ จากรูปที่ 5.52 ค่ามุมแกนแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $75^{\circ}$  ถึง  $110^{\circ}$  ส่วนรูปที่ 5.53 แกนที่สองมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $-30^{\circ}$  ถึง  $15^{\circ}$  ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแกนที่สองทำให้แกนแรกเปลี่ยนแปลงตรงข้ามเพื่อรักษาสมดุลการทรงตัว ส่วนรูปที่ 5.54 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแกนแรกและรูปที่ 5.55 แสดงค่าระยะห่างระหว่างจุด และค่าระยะห่างระหว่างจุดปลายแกนที่สองกับตำแหน่งเป้าหมายซึ่งแกนแรกและแกนที่สองเกิดการเคลื่อนที่เล็กน้อยค่าระยะห่างก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 5.55



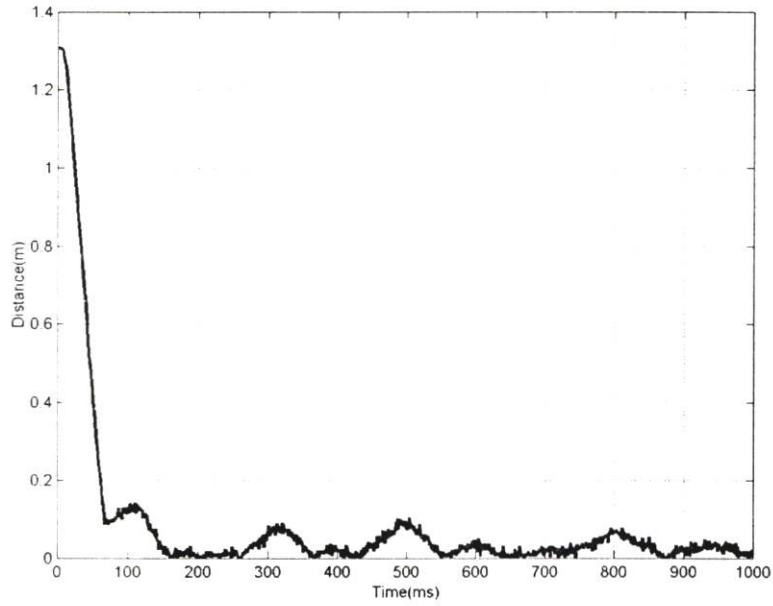
รูปที่ 5.52 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Gaussian Noise=0.16V)



รูปที่ 5.53 ค่ามุมระหว่างแขนสอง (Gaussian Noise=0.16 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.52

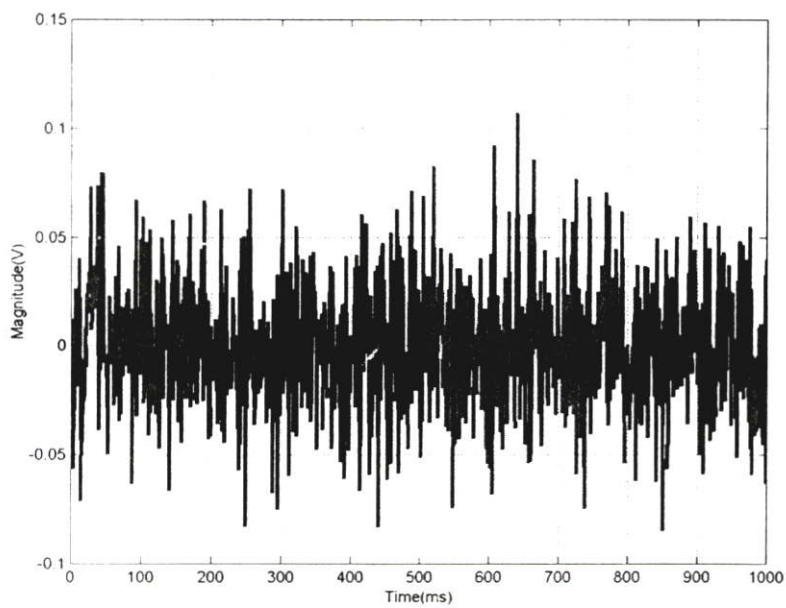


รูปที่ 5.54 ค่าแรงบิด (Gaussian Noise=0.16 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.55 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (Gaussian Noise=0.16 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.52

การทดลองที่ 5.6.2 เมื่อกำหนดให้ค่าสัญญาณรบกวนแบบเกาส์มีขนาดสูงสุด 0.21 V แสดงได้ดังรูป  
ที่ 5.56



รูปที่ 5.56 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีขนาดสูงสุด 0.21 V

จากรูปที่ 5.56 สามารถหาค่า  $\Delta P$  ได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{0.143}{10.6} = 0.0134$$

เพราะฉะนั้น ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นของหุ่นเพนคูบอทจะได้

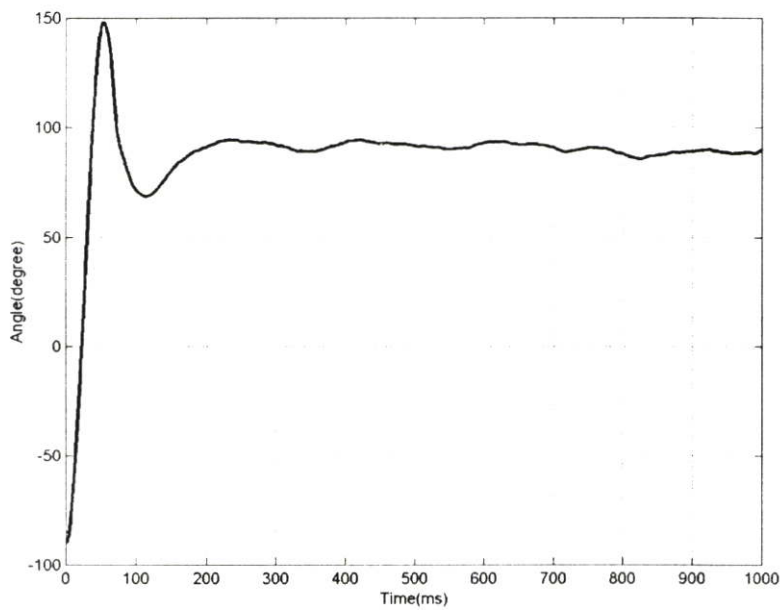
$$\left( \frac{4+0.1}{2} \right) \cdot \|0.132 + 0.0134\| < 1$$

และชุดควบคุมการทรงตัวของหุ่นเพนคูบอทจะได้

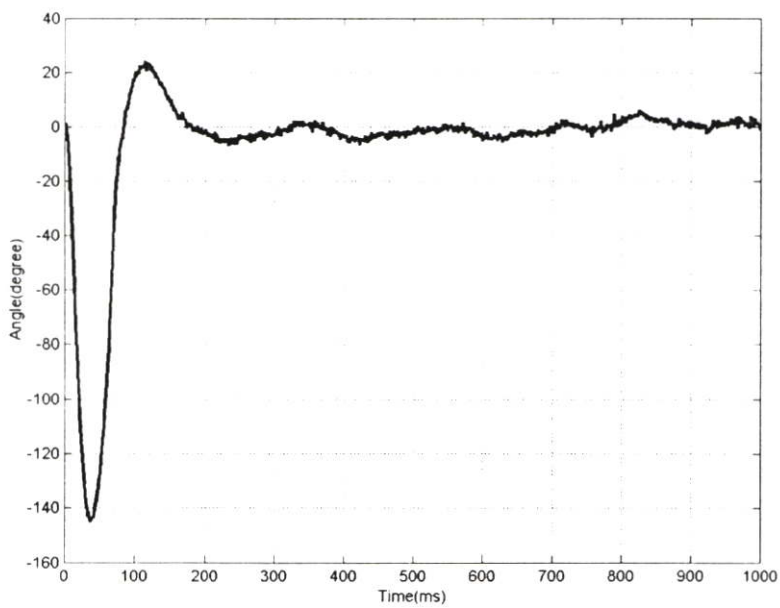
$$\left( \frac{4.5+4.5}{2} \right) \cdot \|0.208 + 0.0134\| < 1$$

จากการหาเสถียรภาพของระบบที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์หาค่าได้ดังนี้ ชุดควบคุมการแกว่งขึ้นมีค่า  $0.2981 < 1$  และชุดควบคุมการทรงตัวมีค่า  $0.9963 < 1$  เพราะฉะนั้นแสดงว่าระบบควบคุมนี้มีเสถียรภาพแบบ BIBO

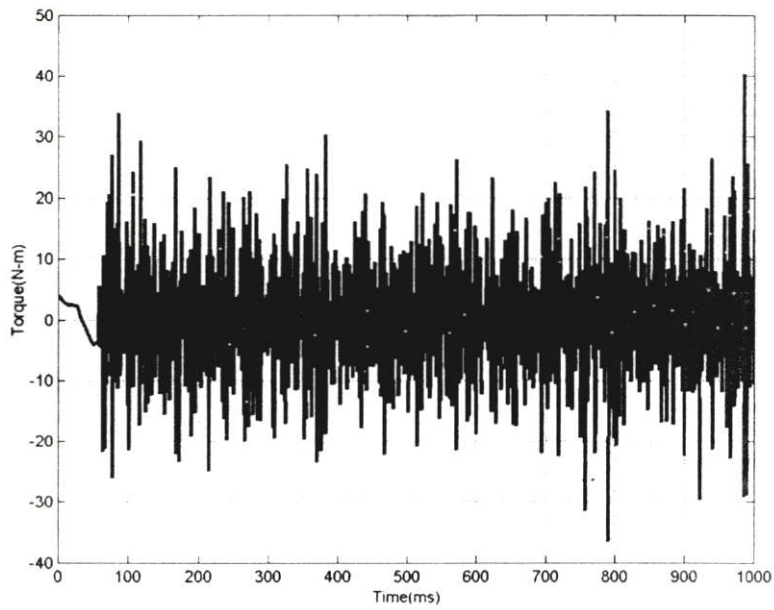
จากรูปที่ 5.57-5.60 เมื่อมีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สูงสุดเท่ากับ 0.21 V ทำให้แขนแรกทำการแกว่งแขนที่สองและทำการทรงตัวได้ในช่วงเวลา 0-3 วินาที ซึ่งหลังจากเวลา 3 วินาทีไปแล้ว การทรงตัวจะทำได้ยากเพราะมีสัญญาณรบกวนทั้งค่าบวกและค่าลบทำให้เกิดการแกว่งบ้างเล็กน้อย แสดงในรูปที่ 5.57 ส่วนแขนที่สองนั้นมีการเปลี่ยนแปลงมากแต่แขนแรกยังทำการทรงตัวไม่ทำให้แขนที่สองหลุดจากตำแหน่งได้ แสดงในรูปที่ 5.58 ค่าแรงบิดนี้ เมื่อมีค่าสัญญาณรบกวนมากขึ้นทำให้การออกแบบตัวให้มอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับเพราะต้องใช้แรงดันมาก แสดงดังรูปที่ 5.59 และค่าระยะห่างระหว่างจุดปลายแขนสองกับตำแหน่งเป้าหมายนั้นจะทำงานสัมพันธ์กับแขนแรกและแขนที่สอง แสดงในรูปที่ 5.60 ถ้ามีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ มากกว่า 0.21 V ระบบควบคุมหุ่นเพนคูบอทจะไม่สามารถควบคุมได้



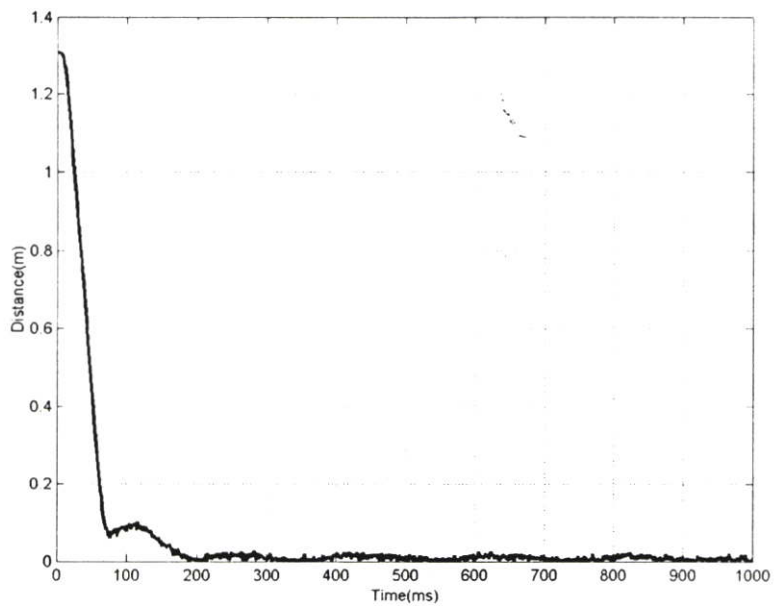
รูปที่ 5.57 ค่ามุมระหว่างแกนแนวนอนกับแกนแรก (Gaussian Noise=0.21 V)



รูปที่ 5.58 ค่ามุมระหว่างแกนสอง (Gaussian Noise=0.21 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.57



รูปที่ 5.59 ค่าแรงบิด (Gaussian Noise=0.21 V) สอดคล้องกับรูปที่ 5.57



รูปที่ 5.60 ค่าระยะห่างระหว่าง ตำแหน่งเป้าหมายกับปลายแขนที่สอง (Gaussian Noise=0.21 V)  
สอดคล้องกับรูปที่ 5.57

ในบทนี้เป็นการจำลองผลการทดลองพร้อมกับแสดงประสิทธิภาพที่ระบบสามารถรองรับกับสัญญาณรบกวนในแต่ละรูปแบบและจะกล่าวสรุปผลการจำลองได้ในบทที่ 6

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวควบคุมระบบหุ่นยนต์ (Pendubot) โดยการนำตัวควบคุมพีซีพีดีทำงาน โดยมีสถาปัตยกรรมแบบขนานและนำสัญญาณรบกวนต่างๆ ทำการรบกวนหุ่นยนต์ เพื่อดูผลของการทดสอบความคงทนของระบบและตรวจสอบเสถียรภาพของระบบเพื่อให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วและแม่นยำ

#### 6.1 สรุปผลการจำลอง

##### 6.1.1 การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

ในการควบคุมหุ่นยนต์ที่ไม่มีสัญญาณรบกวนนี้ ใช้เวลาการแกว่งให้เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายและทำให้แขนที่สองมีการทรงตัวทั้งหมด 3 วินาที โดยใช้เวลาในการแกว่งขึ้น 0.5 วินาที และการทำให้แขนที่สองมีการทรงตัวหลังจากการแกว่งขึ้น 2.5 วินาที

##### 6.1.2 การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแรงดล

การควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนอิมพัลส์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่แขนสองซึ่งการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนี้ ถ้ามีค่าสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 0.014 V ระบบยังสามารถควบคุมให้ระบบกลับสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้ แต่ถ้ามีค่าสัญญาณที่มีขนาดเกิน 0.015 V แล้วระบบจะไม่สามารถควบคุมแขนที่สองให้ตั้งตรงได้ทำให้เกิดการแกว่ง

##### 6.1.3 การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนอลวน

การควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนอลวนนั้นทำให้ตำแหน่งเป้าหมายเปลี่ยนไปแต่ยังคงรักษาการทรงตัวให้อยู่ได้ ถ้ามีค่าสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 0.09V ระบบจะยังรักษาการทรงตัวให้อยู่ได้แต่ถ้ามีค่าสัญญาณที่มีขนาดเกิน 0.09V แล้วระบบจะไม่สามารถรักษาการทรงตัวซึ่งจะทำให้ตำแหน่งเปลี่ยนไป

##### 6.1.4 การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแบบขาว

การควบคุมหุ่นยนต์ที่มีสัญญาณรบกวนแบบขาวนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ตลอดเวลา ส่วนค่าแขนแรกและแขนที่สองนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ถ้าค่าสัญญาณแบบขาวมีค่าขนาดรบกวนสูงสุดน้อยกว่า 0.15 V แล้วระบบจะสามารถควบคุมให้เข้าสู่ตำแหน่ง

เป้าหมายได้ แต่ถ้าค่าสัญญาณแบบขาวมีค่าขนาดครบถ้วนมากกว่า 0.15 V แล้วระบบจะไม่สามารถควบคุมตำแหน่งได้

## 6.2 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

เนื่องจากตัวควบคุมพีซีพีดีที่ทำงานแบบขนานให้การตอบสนองของระบบที่ออกแบบมาแล้วนั้นมีความพารามิเตอร์ค่อนข้างมากในการปรับแต่งอีกทั้งการปรับแต่งให้ได้ค่าที่ตรงกับความต่อนั้นทำได้ยาก ในอนาคตอาจใช้เทคนิคอัลกอริธึม (Genetic Algorithm) หรือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) มาช่วยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ผลที่ดีที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

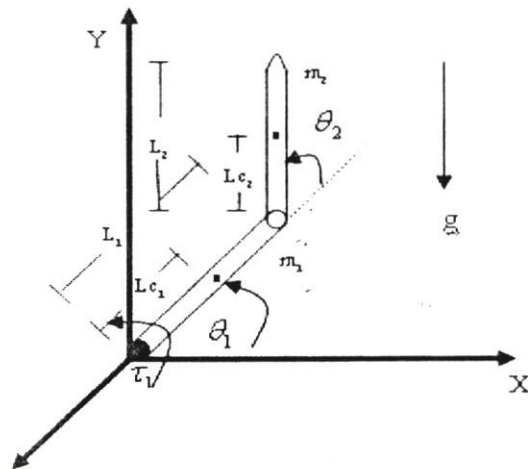
- [1] M. W. Spong, “**Swing-up Control of the Acrobot,**” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 314-321, 1994
- [2] D. J. Block, M. K. Spong, “**Mechanical design and control of the pendubot,**” in Proc. of the SAE 46<sup>th</sup> Annual Earthmoving Industry, pp.1-8, April 1995.
- [3] E. N. Sanchez, L. A. Nuno, Y. Hsu and G. Chen, “**Fuzzy PD scheme for underactuated robot swing-up control,**” IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1997
- [4] E. N. Sanchez, L. A. Nuno, Y. Hsu and G. Chen, “**Real-time fuzzy swing-up control for an underactuate robot,**” in Proc. of 1998 Joint Conference on Information Science(JICS'98), vol. 1, 1998.
- [5] Jose L. Tong and James P. Bobis, “**A Model for Designing Digital PID Controllers,**” IEEE Control System, pp.1157-1162, 1992.
- [6] M. W. Spong, “**The swing up control problem for the acrobot ,**” IEEE Control Systems, pp 49-55, 1995.
- [7] M. Yamakita, M. Iwashiro, Y. Sugahara and K. Furuta, “**Robust Swing Up Control of Double Pendulum,**” Proceedings of the American Control Conference Sesttle, pp.290-295, June 1996.
- [8] S.M. Baek and T.Y. Kuc, “**An Adaptive PID Learning Control of DC Motors,**” IEEE Control System, pp.2877-2882, 1997.
- [9] L. Samet, N. Masmoudi, M.W. Kharrat and L. Kamoun, “**A Digital PID Controller for Real Time and Multi Loop Control: A Comparative Study,**” IEEE Control Systems, pp.291-296, 1998.
- [10] T.Y. Kuc and W.G. Han, “**Adaptive PID Learning of Periodic Robot Motion,**” IEEE Conference on Decision & Control Tampa, pp.186-191, 1998.
- [11] J.Y. Chen, “**An Integration Design Approach in PID Controller,**” IEEE Control Systems, pp.901-907, 1999.
- [12] R. Kelly and J. Moreno, “**Learning PID Structures in an Introductory Course of Automatic Control,**” IEEE Transactions on Education, pp.373-376, November 2001.

- [13] D. Uduehi, A. Ordys and M.J. Grimble, “**Multivariable PID Controller Design Using Online Generalised Predictive Control Optimisation,**” IEEE International Conference on Control Applications, pp.272-277, September 2002.
- [14] Q. Guo D. Wang, P. Han and P. Yu, “**Virtual Cascade PID Controller with Strong Robustness,**” IEEE Control Systems, pp.654-659, 2003.
- [15] D.H. Kim and J.H. Cho, “**Design of Robust PID Controller with Disturbance Rejection for Motor Using Immune Algorithm,**” IEEE International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 2004.
- [16] M.T. Ho and Y.W. Tu, “**PID Controller Design for a Flexible-Link Manipulator,**” IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, pp.6841-6846, December 2005.
- [17] ธนา ภัทรเดช, การออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบพีซีพีเอสแควร์ไอดี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2000.
- [18] ญัฐพงศ์ จินดาคาม, การประยุกต์และสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับควบคุมแขนกลคาร์ทีเซียนนำหนักเบาชนิดสามแกน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2000.
- [19] ทศพล อ่อนบุญเอื้อ, การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีซีพีเอสแควร์ไอดีโดยใช้วิธีทางพันธุศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2003.
- [20] มนตรีชาติพจน์, ระบบการขนส่งแบบลอยเหนือราง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2005.
- [21] L.A. Zadeh, “**Fuzzy Set Information and Control,**” IEEE, pp.338-353, 1965.
- [22] E.H. Mandani, “**Application of Fuzzy Algorithms for The Control to Dynamic Plant,**” IEEE, pp.1585-1588, 1974.
- [23] W. Siler and H. Ying, “**Fuzzy Control Theory: The Linear Case,**” Fuzzy Sets and Systems 33, pp.275-290, 1989.
- [24] H. Ying, W. Siler and J. Buckley, “**Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case,**” International federation of Automatic Control, pp.513-520, 1990.
- [25] G. Nagib, W. Gharieb and Z. Binder, “**application of Fuzzy Control to A Non-Linear Thermal Process,**” IEEE Conference on Decision and Control Tucson, pp.1154-1159, December 1992.

- [26] L.X. Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems," **IEEE conference on Decision and Control Tucson**, pp.2511-2516, December 1992.
- [27] J. Kacprzyk, "Interpolative Reasoning in Optimal Fuzzy Control," **IEEE Control Systems**, pp.1259-1263, 1993.
- [28] J. Alvarez, "Chaotic Dynamics in a PD-Controlled Pendulum," **American Control Conference Baltimore**, pp.553-557, June 1994.
- [29] L.X. Wang, "A Supervisory Controller for Fuzzy Control Systems that Guarantees Stability," **IEEE Transactions on Automatic Control**, pp.1845-1847, September 1994.
- [30] K. Erbaturo, O. Kaynak and I. Rudas, "A Study of Fuzzy Schemes for Control of Robotic Manipulators," **IEEE Control Systems**, pp.63-68, 1995.
- [31] P. Sooraksa and G. Chen, "Fuzzy (PI+D)<sup>2</sup> Control for Flexible Robot Arms," **IEEE International System on Intelligent Control**, pp.536-541, September 1996.
- [32] F.J. Zheng, F. Shi, X.G. Feng, C.M. Zhou and Z.Q. Liu, "A Real-time Fuzzy Control for a Kind of Multivariable Object," **IEEE International Conference on Industrial Technology**, pp.617-620, 1996.
- [33] J.C. Wu and T.S. Liu, "Fuzzy Control Stabilization with Applications to Motorcycle Control," **IEEE Transactions on Systems**, pp.836-847, December, 1996.
- [34] G. Chen and H. Ying, "BIBO Stability of Nonlinear Fuzzy PI Control Systems," **Journal of Intelligent and Fuzzy Systems**, pp.245-256, 1997.
- [35] G. Chen and D. Zhang, "Back-Driving a Truck with Suboptimal Distance Trajectories: A Fuzzy Logic Control Approach," **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, pp.369-380, August 1997.
- [36] G.K.I. Mann, B.G. Hu and R.G. Gosine, "Analysis and Performance Evaluation of Linear-Like Fuzzy PI and PID Controllers," **IEEE Control Systems**, pp.383-390, 1997.
- [37] G. Feng, S.G. Cao, N.W. Rees and C.M. Cheng, "Analysis and Design of Model Based Fuzzy Control Systems," **IEEE Control Systems**, pp.901-906, 1997.

- [38] E.Sanchez, L.A. Nuno, Y.C. Hsu and G. Chen, "**Fuzzy PD Scheme for Underactuated Robot Swing-up Control,**" IEEE Control Systems, pp.302-306, 1998.
- [39] C.W. Tao and J.S. Taur, "**Flexible Complexity Reduced PID-Like Fuzzy Controllers,**" IEEE Transactions on Systems, pp.510-516, August 2000.
- [40] Y.C. Hsu, G. Chen and H.X. Li, "**A Fuzzy Adaptive Variable Structure Controller with Applications to Robot Manipulators,**" IEEE Transactions on Systems, pp.331-340, June 2001.
- [41] K.S. Tang, K.F. Man, G. Chen and S. Kwong, "**An Optimal Fuzzy PID Controller,**" IEEE Transaction on Industrial Electronics," pp.757-765, August 2001.
- [42] P. Cominos and N. Munro, "**PID Controllers: recent tuning methods and design to specification,**" IEEE Proc. Control Theory Application, pp.46-53, January 2002.
- [43] E.N. Sanchez and V. Flores, "**Real-Time Fuzzy PI+PD Control for an Underactuated Robot,**" IEEE International Symposium on Intelligent Control Vancouver, pp.137-141, October 2002.
- [44] H.X. Li, L. Zhang, K.Y. Cai and G. Chen, "**An Improved Robust Fuzzy-PID Controller with Optimal Fuzzy Reasoning,**" IEEE Transactions on Systems, pp.1283-1294, December 2005.

ภาคผนวก ก  
การหาสมการของหุ่นเพนดูลบอท  
ในบทที่ 3



รูปที่ ก.1 โครงสร้างหุ่นเพนดูลบอท

จากรูปสามารถหาสมการตำแหน่ง ได้ดังนี้

$$x_1 = L_1 \cos \theta_1 \quad (\text{ก.1})$$

$$y_1 = L_1 \sin \theta_1 \quad (\text{ก.2})$$

$$x_2 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.3})$$

$$y_2 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.4})$$

เพราะฉะนั้น สามารถหาสมการความเร็ว ได้ดังนี้

$$\dot{x}_1 = -L_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \quad (\text{ก.5})$$

$$\dot{y}_1 = L_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \quad (\text{ก.6})$$

$$\dot{x}_2 = -L_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.7})$$

$$\dot{y}_2 = L_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.8})$$

สามารถเขียนสมการพลังงานกลได้ดังนี้

$$P = P_1 + P_2 \quad (\text{ก.9})$$

$$P_1 = m_1 g y_1 \quad (\text{ก.10})$$

$$= m_1 g L_1 \sin \theta_1 \quad (\text{ก.11})$$

$$P_2 = m_2 g y_2 \quad (\text{ก.12})$$

$$= m_2 g [L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (\text{ก.13})$$

$$= m_2 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.14})$$

$$\therefore P = m_1 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.15})$$

และสามารถเขียนสมการพลังงานจลน์ได้ดังนี้

$$K = K_1 + K_2 \quad (\text{ก.16})$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \quad (\text{ก.17})$$

$$v_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \quad (\text{ก.18})$$

$$= [-L_1 \sin^2 \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1]^2 + [L_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1]^2 \quad (\text{ก.19})$$

$$= L_1^2 \dot{\theta}_1^2 (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) \quad (\text{ก.20})$$

$$v_1^2 = L_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (\text{ก.21})$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (\text{ก.22})$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (\text{ก.23})$$

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \quad (\text{ก.24})$$

$$= [-L_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2)]^2 + [L_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2)]^2 \quad (\text{ก.25})$$

$$= L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cdot \dot{\theta}_1 [\sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)]$$

$$= L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \cdot [\cos(\theta_2 - (\theta_1 + \theta_2))] \quad (\text{ก.26})$$

$$v_2^2 = L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (\text{ก.27})$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 [L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2] \quad (\text{ก.28})$$

$$\therefore K = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (\text{ก.29})$$

สามารถเขียนสมการลากรางจ์ของการเคลื่อนที่ ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (\text{ก.30})$$

$$L = K - P \quad (\text{ก.31})$$

$$L = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - (m_1 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \quad (\text{ก.32})$$

$$\therefore L = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - (m_1 + m_2) g L_1 \sin \theta_1 - m_2 g L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.33})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) L_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 L_1 L_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (\text{ก.34})$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) L_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 L_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 L_1 L_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 - m_2 L_1 L_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \quad (\text{ก.35})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2) g L_1 \cos \theta_1 - m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.36})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 + m_2 L_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (\text{ก.37})$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 L_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 + m_2 L_1 L_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 \quad (\text{ก.38})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_2} &= -m_2 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 - m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ (m_1 + m_2) L_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 L_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 L_1 L_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 - m_2 L_1 L_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ + (m_1 + m_2) g L_1 \cos \theta_1 + m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= \tau_1 \end{aligned} \quad (\text{ก.39})$$

$$\begin{aligned} \therefore [(m_1 + m_2) L_1^2 + m_2 L_2^2 + 2m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 L_2^2 + m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_2 \\ - m_1 L_1 L_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 + (m_1 + m_2) g L_1 \cos \theta_1 + m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= \tau_1 \end{aligned} \quad (\text{ก.40})$$

$$\begin{aligned} m_2 L_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 + m_2 L_1 L_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 + m_2 L_1 L_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ + m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{ก.41})$$

$$\begin{aligned} \therefore [m_2 L_2^2 + m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2] \ddot{\theta}_1 + m_2 L_2^2 \ddot{\theta}_2 + m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= 0 \\ &(\text{ก.42}) \end{aligned}$$

สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการการเคลื่อนที่ เวกเตอร์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) L_1^2 + m_2 L_2^2 + 2m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2 & m_2 L_2^2 + m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2 \\ m_2 L_2^2 + m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2 & m_2 L_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} -m_1 L_1 L_2 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g L_1 \cos \theta_1 + m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{ก.43})$$

กำหนดให้

$$D_{11} = (m_1 + m_2) L_1^2 + m_2 L_2^2 + 2m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2 \quad (\text{ก.44})$$

$$D_{12} = m_2 L_2^2 + m_2 L_1 L_2 \cos \theta_2 \quad (\text{ก.45})$$

$$D_{21} = D_{12} \quad (\text{ก.46})$$

$$D_{22} = m_2 L_2^2 \quad (\text{ก.47})$$

$$C_1 = -m_1 L_1 L_2 (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \quad (\text{ก.48})$$

$$C_2 = m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \quad (\text{ก.49})$$

$$G_1 = (m_1 + m_2) g L_1 \cos \theta_1 + m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.50})$$

$$G_2 = m_2 g L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{ก.51})$$

เพราะฉะนั้น เขียนในรูปสมการการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.52})$$

หรือ

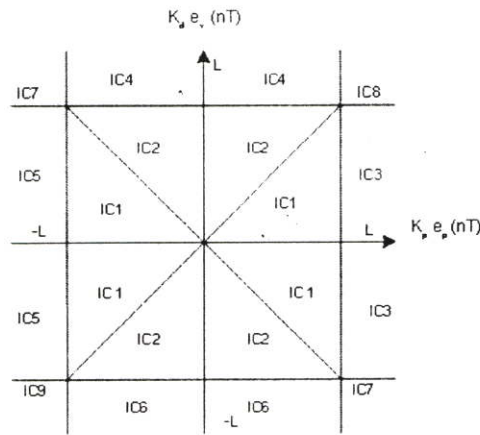
$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (\text{ก.53})$$

ภาคผนวก ข

**การหาสมการนอร์มประจำพื้นที่ของระบบควบคุมพีชชีพีดี**

**ในบทที่ 4**

จากรูปที่ ข.1 จะเห็นได้ว่ามีด้วยกันทั้งหมด 20 พื้นที่ซึ่งสามารถสรุปได้ 9 กฎด้วยกัน ดังนี้



รูปที่ ข.1 พื้นที่ทั้งหมดของพีชชีพีดี

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[K_p e_p(nT) - K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_d |e_v(nT)|]} \quad \text{IC1}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[K_p e_p(nT) + K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_p |e_p(nT)|]} \quad \text{IC2}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}[-K_d e_v(nT) + L] \quad \text{IC3}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}[K_p e_p(nT) - L] \quad \text{IC4}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}[-K_d e_v(nT) - L] \quad \text{IC5}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}[K_p e_p(nT) + L] \quad \text{IC6}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = L \quad \text{IC7}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = -L \quad \text{IC8}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = 0 \quad \text{IC9}$$

1. พื้นที่ IC1 สามารถหาค่านอร์มของพีชชีพีดี ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[K_p e_p(nT) - K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_d |e_p(nT)]} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมพีชชีพีดี ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d |e_p(nT)|)} \cdot k_{upd} \right\| \quad (\text{ข.3})$$

ในบริเวณของ IC1  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ  $k_d |e_v(nT)| = 0$  ซึ่งจะสมการดังนี้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{Lk_p - Lk_d}{4L} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{Lk_d k_{upd}}{4L} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (\text{ข.4})$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{Lk_p - Lk_d}{4L} \right\| \cdot k_{upd} \quad \text{คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{Lk_d k_{upd}}{4L} \right\| \cdot M_e \quad \text{คือ ค่าคงที่}$$

2. พื้นที่ IC2 สามารถหาค่านอร์มของพีชชีพีดี ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[K_p e_p(nT) + K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_p |e_v(nT)|]} \quad (\text{ข.6})$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (\text{ข.7})$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมพีชชีพีดี ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  ในบริเวณของ IC2 คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{L[K_p e_p(nT) + K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_p |e_v(nT)|]} \cdot k_{upd} \right\| \quad (\text{ข.8})$$

ในบริเวณของ IC2  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ  $k_p |e_v(nT)| = 0$  ซึ่งจะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{Lk_p + Lk_d}{4L} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{Lk_d k_{upd}}{4L} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (\text{ข.9})$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{Lk_p + Lk_d}{4L} \right\| \cdot k_{upd} \text{ คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{Lk_d k_{upd}}{4L} \right\| \cdot M_e \text{ คือ ค่าคงที่}$$

3. พื้นที่ IC3 สามารถหาค่านอร์มของพีชชีพีดี ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}[-K_d e_v(nT) + L] \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (\text{ข.12})$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมพีชชีพีดี ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  ในบริเวณของ IC3 คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{1}{2}[-K_d e_v(nT) + L] \cdot k_{upd} \right\| \quad (\text{ข.13})$$

ในบริเวณของ IC3  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (\text{ข.14})$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (\text{ข.15})$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot k_{upd} \quad \text{คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot M_e \quad \text{คือ ค่าคงที่}$$

4. พื้นที่ IC4 สามารถหาค่านอร์มของพีชชีพีดี ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2} [K_p e_p(nT) - L] \quad (\text{ข.16})$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (\text{ข.17})$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาที่พหุของตัวควบคุมพีชชีพีดี ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{1}{2} [K_p e_p(nT) - L] \cdot k_{upd} \right\| \quad (\text{ข.18})$$

ในบริเวณของ IC4  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (\text{ข.19})$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (\text{ข.20})$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot k_{upd} \quad \text{คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot M_e \quad \text{คือ ค่าคงที่}$$

5. พื้นที่ IC5 สามารถหาค่านอร์มของพีชชีพีดี ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2} [-K_d e_v(nT) - L] \quad (\text{ข.21})$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (\text{ข.22})$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมพีชชีพีดี ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  ในบริเวณของ IC5 คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{1}{2} [-K_d e_v(nT) - L] \cdot k_{upd} \right\| \quad (\text{ข.23})$$

ในบริเวณของ IC3  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (\text{ข.24})$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (\text{ข.25})$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot k_{upd} \text{ คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{-k_d}{2} \right\| \cdot M_e \text{ คือ ค่าคงที่}$$

6. พื้นที่ IC6 สามารถหาค่านอร์มของพีชชีพีดี ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2} [K_p e_p(nT) + L] \quad (\text{ข.26})$$

เมื่อทำการหาค่านอร์มของ  $u_{pd}(nT)$  จะได้ ดังนี้

$$\|u_{pd}(nT)\| = \|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \quad (\text{ข.27})$$

โดยที่  $\Delta u_{pd}(nT)$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมพีชชีพีดี ดังนั้น  $\|u_{pd}(nT)\|$  คือ

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| = \left\| \frac{1}{2} [K_p e_p(nT) + L] \cdot k_{upd} \right\| \quad (\text{ข.28})$$

ในบริเวณของ IC4  $\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\|$  จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot k_{upd} \cdot \|e_p(nT)\| + \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot \|e(nT - T)\| \quad (\text{ข.29})$$

แทน  $M_e = \sup_{n \geq 1} |e(nT - T)|$  จะได้

$$\|\Delta u_{pd}(nT) \cdot k_{upd}\| \leq \alpha_{pd1} \cdot \|e_p(nT)\| + \beta_{pd1} \quad (\text{ข.30})$$

โดยที่

$$\alpha_{pd1} = \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot k_{upd} \quad \text{คือ ค่านอร์มของตัวควบคุมพีชชีพีดี}$$

$$\beta_{pd1} = \left\| \frac{k_p}{2} \right\| \cdot M_e \quad \text{คือ ค่าคงที่}$$

7. พื้นที่ IC7 สามารถหาค่าแอมพลิจูดของพัลส์พัลส์ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = L \quad (\text{ข.31})$$

จากสมการพื้นที่ IC7 สามารถหาค่าแอมพลิจูดของพัลส์พัลส์ได้เท่ากับศูนย์

8. พื้นที่ IC8 สามารถหาค่าแอมพลิจูดของพัลส์พัลส์ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = -L \quad (\text{ข.32})$$

จากสมการพื้นที่ IC8 สามารถหาค่าแอมพลิจูดของพัลส์พัลส์ได้เท่ากับศูนย์

9. พื้นที่ IC9 สามารถหาค่าแอมพลิจูดของพัลส์พัลส์ได้ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = 0 \quad (\text{ข.33})$$

จากสมการพื้นที่ IC9 สามารถหาค่าแอมพลิจูดของพัลส์พัลส์ได้เท่ากับศูนย์

## ภาคผนวก ก

## ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **P.Awootsopa**, U.Sritheerawirojana, N.Komina, and P.Sooraksa “**Control of Pendubot with Chaotic Perturbation,**” IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, May 2006.

# Control of Pendubot with Chaotic Perturbation

Pongphut Awootsopa<sup>1</sup>    Uthai Sritheerawirojana<sup>1</sup>    Noriyuki Komine<sup>2</sup>  
 Pitikhate Sooraksa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Engineering  
 Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
 Chalongkrung Rd., Bangkok, Thailand 10520  
 s7061143@kmitl.ac.th, kkkitdak@kmitl.ac.th, kspitikh@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>Department of Applied Computer Engineering  
 School of Information and Electronics, Tokai University  
 1117 Kitakaname, Hiratsuka-Shi, Kanagawa-ken, Japan  
 komine@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

## Abstract

This research aims to improve the performance of controlling a Pendubot disturbed by chaotic perturbation. The perturbation is in the form of chaotic noises generating using a logistic map type. The control mechanism comprises of two fuzzy controllers working in parallel: one for the actuator located at the first link, the other is for the second one. The propose architecture is said to be robust in the sense that the system can cope with the injected chaotic perturbation proved by simulation results.

## 1 Introduction

The success of fuzzy PD controllers of [1-3] and Fuzzy PI+PD [6] for a two-link swing-up robot or a "Pendubot" [4-5] is motivated the authors to investigate more about issues in the same control architectures when an input chaotic perturbation is applied to the system. In the past literatures [1-5, 6], even the control of the Pendubot has been achieved; however, the topic of robustness under chaotic perturbation has not yet been investigated. To extend the work, when a chaotic perturbation is injected to the system, this issue creates curiosity of pursuit for the answer whether or not the system has adequate robustness for such kinds of perturbation. This short paper presents a further study of control of a Pendubot under chaotic perturbation. A model for a Pendubot is briefly reviewed in the next section.

## 2 Model of a Pendubot

A two-link model of a swing up robot or a Pendubot used in this paper is shown in Fig. 1. A generalized model for N-link one can be expressed mathematically by equation (1):

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (1)$$

Where

$\theta \in R^n$  is a joint parameter.

$\tau \in R^n$  is a torque.

$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} \in R^n$  is the Coriolis force,

$G(\theta) \in R^n$  is a term of potential function.

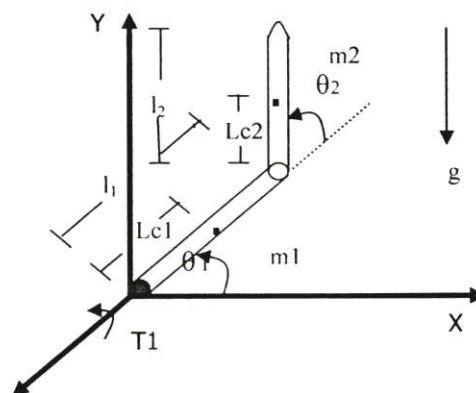


Fig. 1 model of a two-link Pendubot

Parameters in Fig. 1 are listed as follows:

$g$  = the gravitational constant,

$l_1$  = the length of the first link,

$l_2$  = the length of the second link,

$L_{c1}$  = distance between the first joint to the middle of the first link,

$L_{c2}$  = distance between the second joint to the middle of the second link,

$M_1$  = mass of the first link,

$M_2$  = mass of the second link,

$X$  = position along the X-axis,

$Y$  = position along the Y-axis,

$\theta_1$  = the angle between horizontal axis and the first link,

$\theta_2$  = the angle between the first link and the second one,

$\tau_1$  = the input torque applied at the first joint,

Equation 1 can be expressed in a form of matrix as

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Where

$$D_{11} = (m_1 + m_2)L_1^2 + m_2L_2^2 + 2m_2L_1L_2 \cos \theta_2$$

$$D_{12} = m_2L_2^2 + m_2L_1L_2 \cos \theta_2$$

$$D_{21} = D_{12}$$

$$D_{22} = m_2L_2^2$$

$$C_1 = -m_1L_1L_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin \theta_2$$

$$C_2 = m_2L_1L_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2$$

$$G_1 = (m_1 + m_2)gL_1 \cos \theta_1 + m_2gL_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$G_2 = m_2gL_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

Detail derivation for this model can be found in many textbooks both in robotics and classical mechanics. Next section provides a brief review about fuzzy PD controllers and the control system architecture.

### 3 Fuzzy Control System

To avoid redundancy from those in [1-3, 6-8], this section provides a brief review on the architecture of the control system shown in Fig. 2(a) and 2(b). Detail calculation can be found in the references. As mentioned earlier, the goal in this research is to extend the investigation of [1-2] as well as to verify the effectiveness of the designed system. The presentation for this section will be kept merely minimum length as necessity.

Consider the Pendubot in Fig. 1; it is easy to see that the system has 2 inputs and 2 outputs, which has the structure of an MIMO system. One may select an architecture consisted of two fuzzy controllers working in parallel to control the two variables shown in Fig. 2. The control input of each sub-controller can be expressed by

$$u(t) = K_u u^*(t) \quad (3a)$$

Where

$K_u$  is a fuzzy gain, and

$u^*(t)$  = output value of the fuzzy sub-controller.

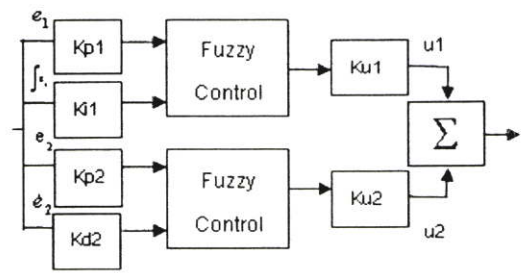


Fig. 2(a) The control architecture of the fuzzy PI+PD control system

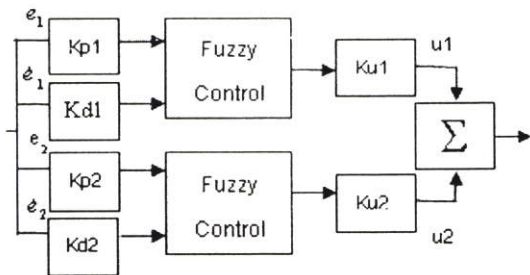


Fig. 2(b) The control architecture of the MIMO fuzzy PD control system

Simulation diagram for the Pendubot control system can be shown in Fig. 3. The choice of sub-controller hereafter is a fuzzy PD controller in [8] and Fuzzy PI+PD in [6] where its control decision is fired based on the situation that of which location on the error phase plane the error coordinate is.

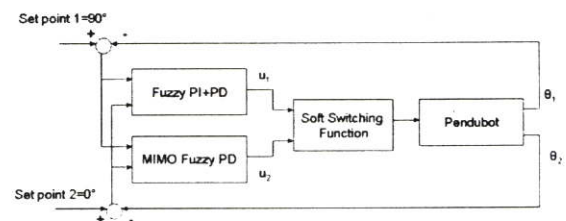


Fig. 3 Simulation diagram for the Pendubot control system

The switch function is used to switch control signal between Fuzzy PI+PD and MIMO Fuzzy PD. If the distance ( $d$ ) from tip of the second link to the stable position is longer than specific distance then apply MIMO Fuzzy PD, else apply Fuzzy PI+PD. Distance function is shown in [1].

### 4 The Logistics Map

This section presents computer simulation to validate the design in [8] in case of 2 inputs- 2 output system with the presence of chaotic perturbation.

The general form of the logistic map is given by the following equation:

$$f(x) = rx(1-x), \quad 0 < r \leq 4 \quad (4)$$

The behavior of the steady-state solution of this map depends on the value of parameter  $r$ . For  $0 < r < 1$ , the steady-state solution is 0; for  $1 \leq r < 3$ , a fixed point; for  $3 \leq r < 3.57$ , periodic; and finally for  $3.57 \leq r < 4$ , chaotic[9], the successive values of  $x$  are very irregular and a small change in the initial condition yields a significantly different sequence of  $x$ . In the following, we consider a special case of the logistic map by selecting  $r = 4$ . Although other values of  $r$  close to 4 can also be used,  $r = 4$  guarantees that the function is chaotic

$$f(x) = 4x(1-x) \quad (5)$$

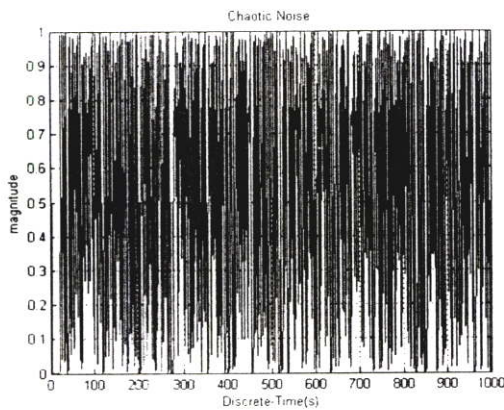


Fig. 4 Chaotic noise from the Logistic Map( $x_0=0.4999$ )

## 5 Computer Simulation Results

In this section, the simulation diagram in Fig. 3 is employed to as a model for Simulink. The model's parameters used here are similar to the set in [1,2], which are:

$$\begin{aligned} g &= 9.81 \text{ m/s}^2 & m_2 &= 0.3346 \text{ kg.} \\ m_1 &= 0.5289 \text{ kg.} & l_2 &= 0.38417 \text{ m.} \\ l_1 &= 0.26897 \text{ m.} & Lc_2 &= 0.19208 \text{ m.} \\ Lc_1 &= 0.13494 \text{ m.} & & \end{aligned}$$

We choose distance ( $d$ ) equals 0.25 m.

For which no input perturbation, the outputs are obtained similar to those in [2, 3] as shown in Figs. 5-6. The goal for the control system is the two links must stay in up-right position. In other words, the first link makes a right angle respected to the horizontal plane (90-degree) and the second link must stay in parallel to the vertical plane (0 degree with respect to Y-axis). Fig. 5 demonstrates that the first joint has the correct target position within 3 minutes. So as the second one shown in Figure 6. Figure 7 shows the corresponding torque produced by the controller located at the first joint. Note that there is no actuator located at the second joint. The motor at the first joint has to generate and

compensate the control signal for both joint tracking to the up-right position.

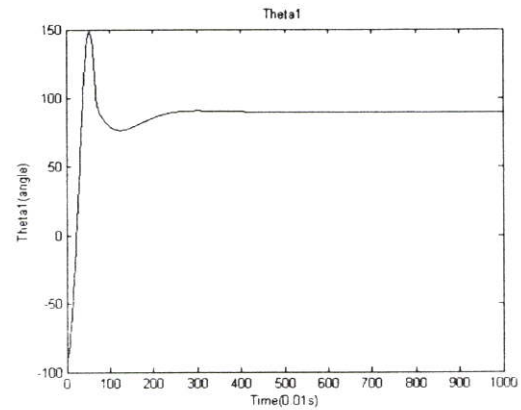


Fig. 5 The trajectory of the first joint without input perturbation

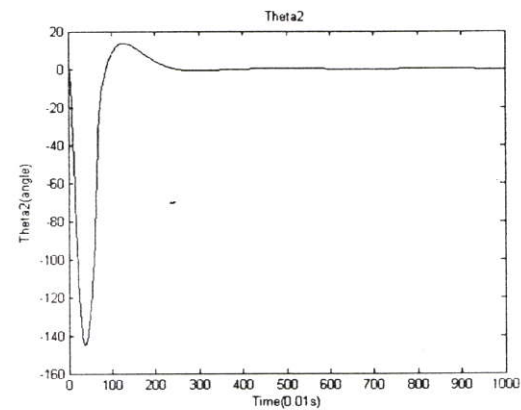


Fig. 6 The trajectory of the second joint without perturbation

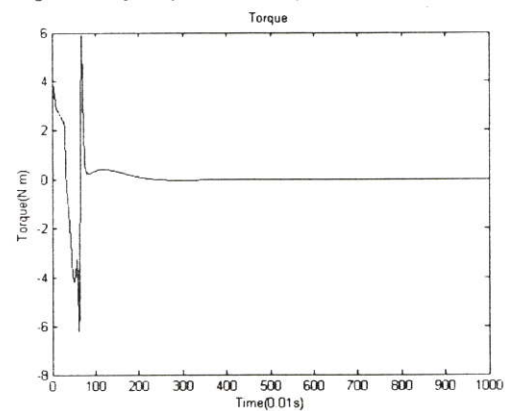


Fig. 7 The corresponding torque in case of no input perturbation

When the 0.05 V chaotic signals generated by logistic map shown in Fig. 8(a) is applied to the control signal before feeding to the Pendubot. The Pendubot can still tracking the target for both joints as shown in Figs. 9 and 10. The corresponding torque produced in this case is presented in Fig. 11.

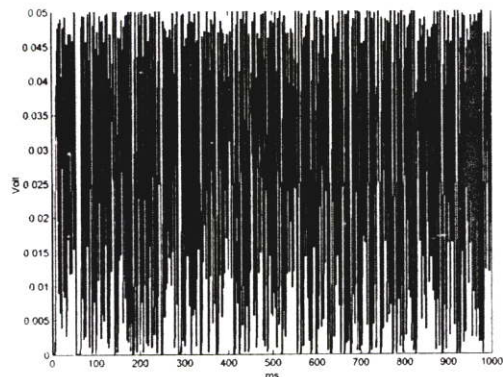


Fig. 8(a) The chaotic perturbation signal with 0.05 V injected at the control input signal

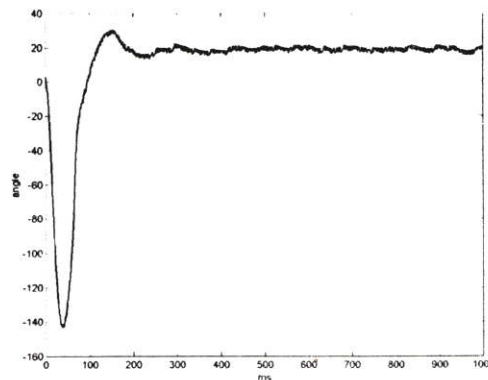


Fig. 10 The trajectory of the second joint with chaotic noise of 0.05 V contaminated at control input signal

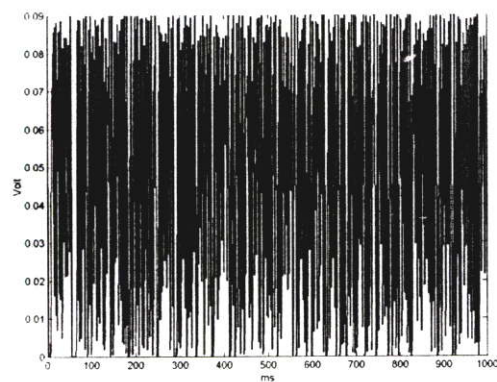


Fig. 8(b) The chaotic perturbation signal with 0.09 V injected at the control input signal

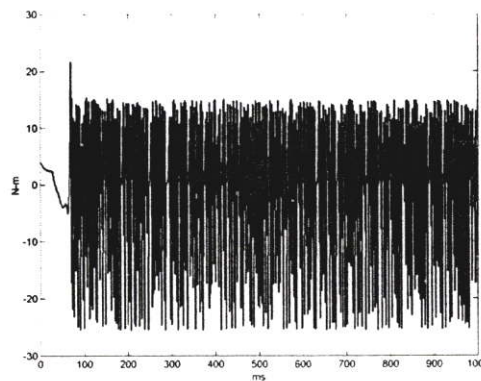


Fig. 11 Corresponding torque for the case of the 0.05 V chaotic noise contaminations

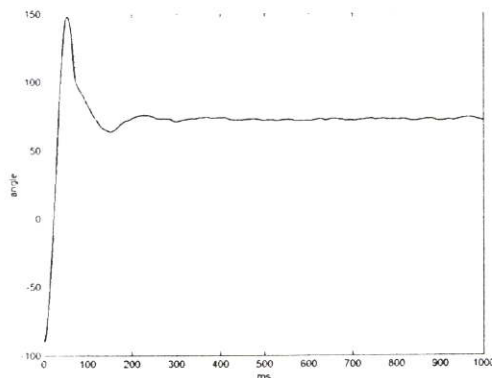


Fig. 9 The trajectory of the first joint with chaotic noise of 0.05 V contaminated at control input signal

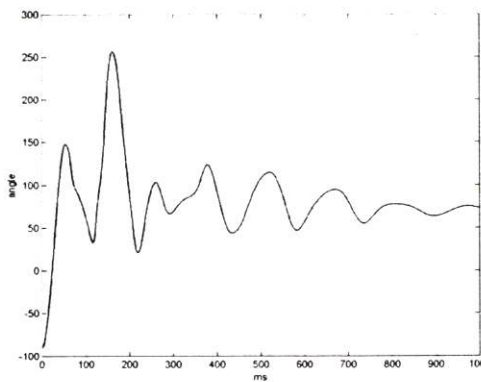


Fig. 12 The trajectory of the first joint with chaotic noise of 0.09 V contaminated at control input signal

When the amplitude of the chaotic noise injected to perturb the system at the control input has been amplified till around 0.09 V, the system will be eventually lost tracking ability and be imbalance finally. The phenomenon can be evidently shown in Figs. 12-14. Undoubtedly, the system cannot be tolerated the 0.09 V perturbed signal which apparently then becomes

a large disturbance with high signal to noise ratio at the action input. The system is now proved to be preserved a margin of robustness. And, hence, the system can reject a chaotic noise contaminated as an input disturbance

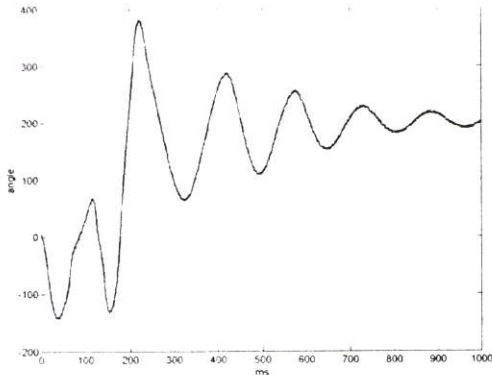


Fig. 13 The trajectory of the second joint with chaotic noise of 0.09 V contaminated at control input signal

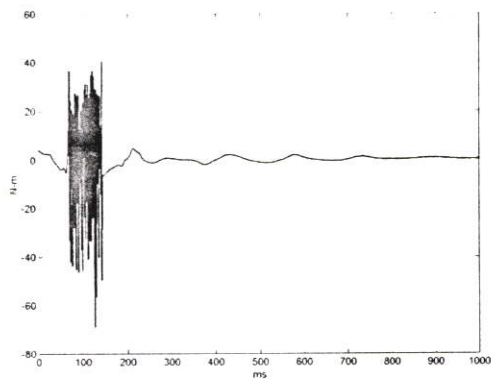


Fig. 14 Corresponding torque for the case of the 0.09 V chaotic noise contamination

## 6 Concluding Remark

This paper presents further examination of the fuzzy control paradigm to a Pendubot in case of chaotic signal is injected as a perturbed noise at the control input. For small amplitude of the perturbed signal, the control system can reject the perturbation. As the amplitude change the perturbed signal to be the disturbance one, the control system still in function at the certain level of tolerance. For the large amplitude of the chaotic noises, the system cannot be tolerated due to the control action is dominated by chaotic noise led eventually to establish chaotic behavior of the arms. It is now obvious that the control architecture, appeared in this investigation, could be used to reject the chaotic signal contamination in the Pendubot system. Different type of chaotic

perturbation beyond the logistic map used here is also encouraged for the future work.

## 7 Acknowledgement

This paper is supported in part by SVPJ 2005 under JICA project for AUN-SeedNet.

## References

- [1] E. N. Sanchez, L. A. Nuno, Y. Hsu and G. Chen, "Fuzzy PD scheme for underactuated robot swing-up control" in *Proc. 1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Anchorage, Alaska, USA 1997*
- [2] E. N. Sanchez, L. A. Nuno, Y. Hsu and G. Chen, "Real-time fuzzy swing-up control for an underactuate robot" in *Proc. Of 1998 Joint Conference on Information Science (JICS'98)*, vol. 1 Reseach Triangle Park, N. C., USA, 1998.
- [3] Y. Hsu, G. Chen and E. N. Sanchez, "A fuzzy PD controller for multi-link robot control. Stability Analysis", in *Proc. Of 1997 IEEE Intl Conf. On Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997*.
- [4] D. J. Block, M. K. Spong, "Mechanical design and control of the pendubot", in *Proc. Of the SAE 46<sup>th</sup> Annual Earthmoving Industry, Peoria, Illinois, USA, 1995*.
- [5] Isabelle Fantoni, Rogelio Lozano, and Mark W. Spong, "Energy Base Control of the pendubot", *IEEE Tran. On Automatic Control, Vol. 45, No. 4, April, 2000*.
- [6] Edgar N. Sanchez and Victor Flores, "Real-time Fuzzy PI+PD Control for an Underactuate Robot", *Proc. Of the 2002 IEEE, International Symposium on Intelligent Control Vancouver, Canada, October 27-30, 2002*
- [7] Edgar Sanchez, Luis A. Nuno, Ya-Chen Hsu and Guanrong Chen, "Fuzzy PD Scheme for Underactuated Robot Swing-up Control", *IEEE 1998*.
- [8] Hsu Y., Chen G. And Sanchez E. N., "A fuzzy PD controller for multi-link robot control. Stability Analysis" in *Proc. Of 1997 IEEE Intl. Conf. On Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, April 1997*.
- [9] Toshinori Munakata, Sudeshna Sinha, and William L. Ditto, "Chaos Computing: Implementation of Fundamental Logical Gates by Chaotic Elements" *On Ciruits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 49, No. 11, November 2002*.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพงศ์ภัทร อาวุธโสภา
วัน เดือน ปีเกิด	20 มกราคม 2522
ที่อยู่	35 ถ.จมีนไวย ต.ท่าพี่เลี้ยง อ.เมือง จ.สุพรรณบุรี
ประวัติการศึกษา	2540 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี 2542 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาเทคนิคคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ 2545 อดศากรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและงานวิจัย	
ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกร บริษัท TN Information System Ltd., กทม.