



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขนหุ่นยนต์ที่มีค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ
	Robust Position Controller Design of Robot Arm with Parametric Uncertainty Using Quantitative Feedback Theory (QFT)
นามผู้วิจัย	นายชวลิต นฤมิตรกุล
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( รองศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( อาจารย์สมบัติ รุจานุรักษ์, Ph.D. )
หัวหน้าภาควิชา	( รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขนหุ่นยนต์ที่มี  
ค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

Robust Position Controller Design of Robot Arm with Parametric  
Uncertainty Using Quantitative Feedback Theory (QFT)

โดย

นายชวลิต นฤมิตรบรรกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชวลิต นฤมิตรบรรกุล 2555: การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขน  
หุ่นยนต์ที่มีค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์  
พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc. 104 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนสำหรับหุ่นยนต์ โดยใช้ทฤษฎี  
ป้อนกลับเชิงปริมาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาและออกแบบตัวควบคุมของหุ่นยนต์ 2  
ชนิด คือ หุ่นยนต์ 1 แขนและหุ่นยนต์ 2 แขนประเภทหุ่นยนต์ศกการา ซึ่งหุ่นยนต์ 1 แขนเป็นระบบ  
หนึ่งสัญญาณขาเข้าและหนึ่งสัญญาณขาออกที่มีค่าความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ซึ่งมาจากการ  
ติดตั้งและขนาดที่แตกต่างกันของโหลด ส่วนหุ่นยนต์ศกการาเป็นระบบหลายสัญญาณขาเข้าและ  
หลายสัญญาณขาออกซึ่งเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้น จึงเป็นการยากที่จะสามารถหาแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ให้มีความถูกต้องและแม่นยำ เนื่องจากความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นของ  
พลานต์ สิ่งรบกวนทางด้านเข้าและสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบและสัญญาณรบกวนจากการ  
วัด ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนโดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณจึงถูกนำมา  
ประยุกต์ใช้และสามารถทำให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่กำหนด พร้อมทั้งได้ทำการเปรียบเทียบการ  
ควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณกับการควบคุมแบบพีไอดีซึ่งจากผลการจำลองและผลทดลอง  
ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณมีประสิทธิภาพมากกว่าการควบคุมแบบพีไอ  
คืออย่างชัดเจน

Chawalit Narumitbowornkul 2012: Robust Position Controller Design of Robot Arm with Parametric Uncertainty Using Quantitative Feedback Theory (QFT). Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Peerayot Sanposh, D.Sc. 104 pages.

This research proposes a robust control system design using quantitative feedback theory for two types of robots: one-link robot and two-link SCARA robot. One-link robot is a Single-Input Single-Output (SISO) system with parametric uncertainty because load installations and load sizes are different. Two-link SCARA robot is a Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system since it is nonlinear. Thus, it is difficult to find accurate robot mathematical model because of uncertainty in the plant, disturbance at the plant input, disturbance in the plant output, and measurement noise. Therefore, the robust control using quantitative feedback theory is applied to cope with these problems. Both simulation and experimental results show that the designed controllers can control both types of the manipulators to desired responses. Moreover, the quantitative feedback controllers are more accurate and more efficient than PID controllers.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ ประธานกรรมการ ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและนำไปแก้ปัญหาที่ประสบขณะทำการวิจัย พร้อมทั้งให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทิศ ฉัตรรัตนกุลชัย ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบตัวควบคุม โดยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

ขอขอบคุณบริษัท Terasoft ที่มีความอนุเคราะห์ให้ข้าพเจ้าใช้ QFT Toolbox Design (Evaluation Version) for MATLAB

ขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ตลอดมา จนประสบความสำเร็จในชีวิตและการเรียนในวันนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการ IMARC ที่ให้คำปรึกษาและช่วยในการแก้ปัญหาในระหว่างการทำวิจัยหลายครั้ง

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโทจนประสบผลสำเร็จในการเล่าเรียน

ชวลิต นฤมิตรบรรณกุล

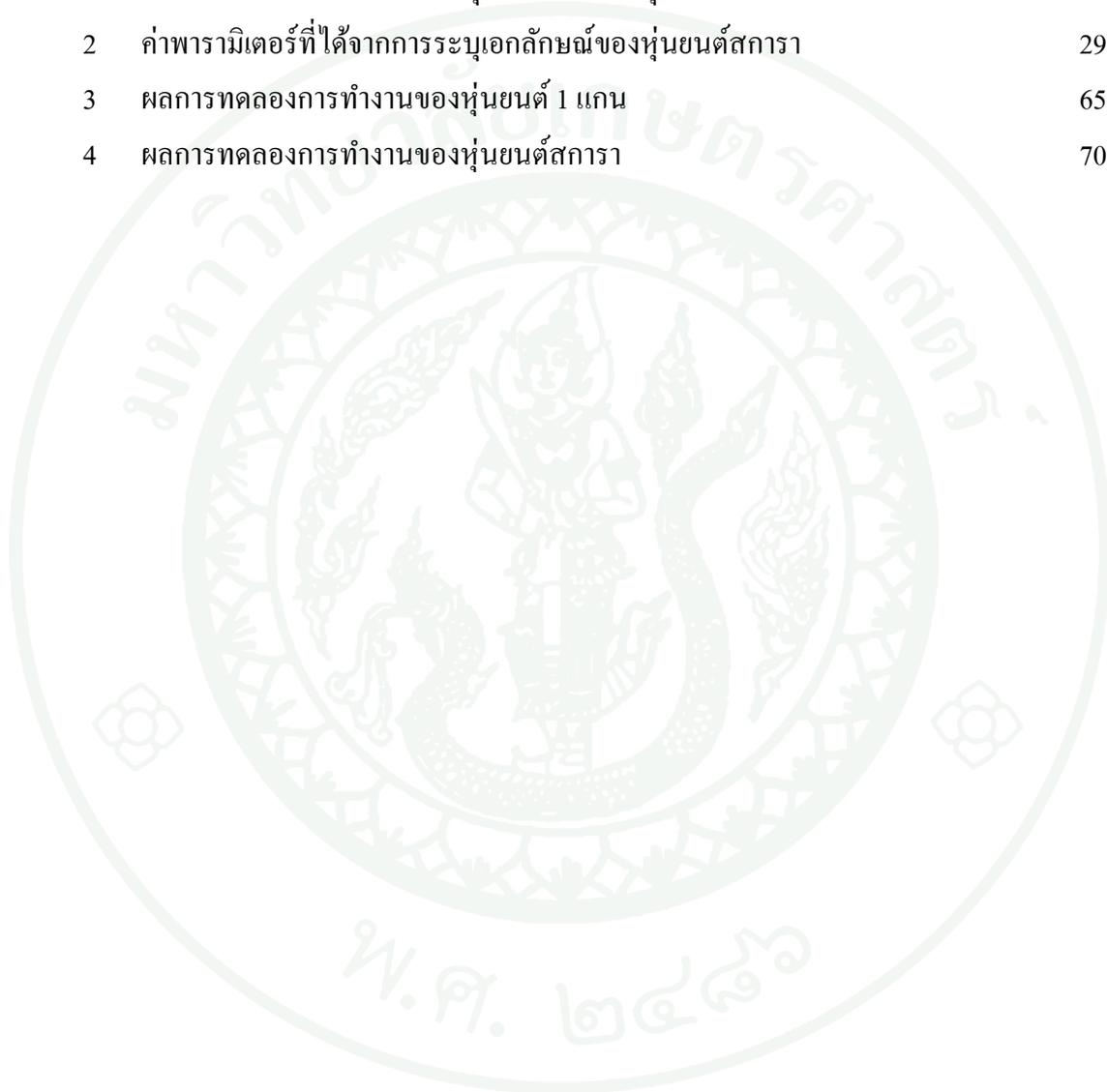
เมษายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก โปรแกรม MATLAB สำหรับหุ่นยนต์ 1 แกน	74
ภาคผนวก ข โปรแกรม MATLAB สำหรับหุ่นยนต์ศการา	79
ภาคผนวก ค บทความตีพิมพ์การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า	86
ภาคผนวก ง บทความตีพิมพ์การประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	93
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	104

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์ 1 แกน	24
2	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์ศการา	29
3	ผลการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ 1 แกน	65
4	ผลการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ศการา	70



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ระบบควบคุมระบบเปิด (Open-Loop Control System)	5
2	ระบบควบคุมระบบปิด (Close-Loop Control System)	6
3	บริเวณค่าความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต	8
4	แผนภาพโบเดบนช่วงความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต	9
5	แผ่นแบบพลาเน็ตที่ความถี่เท่ากับ 1 เรเดียน/วินาที	10
6	แผ่นแบบพลาเน็ตบนความถี่ที่สนใจ	10
7	เอาต์พุตมีค่าอยู่ในระหว่างขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound)	11
8	อินพุตมีขอบเขตการทำงานตามที่กำหนด	12
9	ค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนโดเมนเวลา	14
10	ค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนโดเมนความถี่	15
11	ระบบที่มีสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกหลายสัญญาณ (MIMO)	16
12	ตัวควบคุม MIMO แบบทะแยงมุม	17
13	ตัวควบคุม MIMO แบบสมบรูณ์	17
14	หุ่นยนต์ 1 แกน และ โหลดชนิดต่างๆ ของบริษัท Quanser	18
15	หุ่นยนต์สกรายี่ห้อ TOSHIBA รุ่น TH180	19
16	Data acquisition card (DAQ) NI PCI 6251	20
17	Data acquisition card (DAQ) NI PCI 7380R	20
18	ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ยี่ห้อ YASKAWA	21
19	ผังวัตถุอิสระของแขนหุ่นยนต์ชนิดสองข้อต่อ	24
20	กระบวนการการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง	30
21	แผ่นแบบพลาเน็ตบนแผนภาพนิโคลส์ของแขนหุ่นยนต์ 1 แกน	31
22	แผนภาพนิโคลส์แสดงขอบเขตการติดตามสำหรับหุ่นยนต์ 1 แกน	32
23	แผนภาพนิโคลส์แสดงขอบเขตเสถียรภาพสำหรับหุ่นยนต์ 1 แกน	33
24	ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม $G_1$ ของหุ่นยนต์ 1 แกน	34
25	ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวควบคุม $G_1$ ของหุ่นยนต์ 1 แกน	34
26	ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบกรอง $F_1$ ของหุ่นยนต์ 1 แกน	35
27	ลักษณะของระบบหลังการออกแบบกรอง $F_1$ ของหุ่นยนต์ 1 แกน	35

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	แผ่นแบบพลาตันต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง $P_{11}$	36
29	แผ่นแบบพลาตันต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง $P_{12}$	37
30	แผ่นแบบพลาตันต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง $P_{21}$	37
31	แผ่นแบบพลาตันต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง $P_{22}$	38
32	ขอบเขตการติดตามบน โดเมนเวลา	39
33	ขอบเขตการติดตามบน โดเมนความถี่	40
34	ขอบเขตการติดตามสำหรับการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	42
35	ขอบเขตการติดตามสำหรับการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	42
36	ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	45
37	ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	45
38	ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	48
39	ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	48
40	แผนภาพสำหรับการคำนวณหา $L_1$	49
41	ขอบเขตเสถียรภาพสำหรับการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	51
42	ขอบเขตเสถียรภาพสำหรับการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	52
43	ขอบเขตที่ทับซ้อนกันสำหรับการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	52
44	ขอบเขตที่ทับซ้อนกันสำหรับการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	53
45	ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	54
46	ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวควบคุม $g_1$	55
47	ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวกรอง $f_1$	55
48	ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวกรอง $f_1$	56
49	ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	57
50	ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวควบคุม $g_2$	57

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวกรอง $f_2$	58
52	ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวกรอง $f_2$	58
53	บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ	60
54	บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแบบพีดี	60
55	ผลจำลองการทำงานสำหรับการควบคุมแบบพีดี	60
56	ผลจำลองการทำงานสำหรับการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ	61
57	เสถียรภาพระบบวงปิดของหุ่นยนต์ 1 แกน	61
58	ผลการทดลองการควบคุมแบบพีดีของหุ่นยนต์ 1 แกน	62
59	ผลการทดลองการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณของหุ่นยนต์ 1 แกน	62
60	ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตการติดตามบนซ้าย คือ $t_{r11}$ บนขวา คือ $t_{r12}$ ล่างซ้าย คือ $t_{r21}$ และล่างขวา คือ $t_{r22}$	64
61	ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตเสถียรภาพของระบบ ซ้าย คือ $L_1$ และขวา คือ $L_2$	64
62	ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตการจัดตั้งระบบกวนด้านเข้าของระบบบนซ้าย คือ $t_{DI11}$ บนขวา คือ $t_{DI12}$ ล่างซ้าย คือ $t_{DI21}$ และล่างขวา คือ $t_{DI22}$	65
63	ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตการจัดตั้งระบบกวนด้านออกของระบบบนซ้าย คือ $t_{DO11}$ บนขวา คือ $t_{DO12}$ ล่างซ้าย คือ $t_{DO21}$ และล่างขวา คือ $t_{DO22}$	65
64	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการควบคุมแขนหุ่นยนต์ศกกรา	66
65	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงบนแกนที่ 1 ของหุ่นยนต์ศกกรา	67
66	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงบนแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์ศกกรา	67

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$C(q, \dot{q})$	=	เมทริกซ์ของแรงเหวี่ยงและแรงโคริโอลิส
$D(q)$	=	เมทริกซ์ของมวล
$D_I$	=	ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ
$D_O$	=	ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ
$E$	=	ค่าความผิดพลาด
$F$	=	ตัวกรองของระบบ
$G$	=	ตัวควบคุม
$H$	=	เซนเซอร์
$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหุ่นยนต์
$K$	=	พลังงานจลน์
$K_D$	=	ค่าอัตราขยายอนุพันธ์
$K_P$	=	ค่าอัตราขยายสัดส่วน
$L$	=	ลากรางเจียน
$l_i$	=	ความยาวในแต่ละแกนของหุ่นยนต์
$L_i$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดในแต่ละแกนของหุ่นยนต์
$m_i$	=	ค่ามวลในแต่ละแกนของหุ่นยนต์
$M_p$	=	ค่าพุงเกินสูงสุด
$N$	=	สัญญาณรบกวนจากการวัด
$P$	=	พลาเน็ต
$P$	=	พลังงานศักย์
$\dot{q}$	=	ความเร็วของแขนหุ่นยนต์
$\ddot{q}$	=	ความเร่งของแขนหุ่นยนต์
$q_i$	=	ค่าของมุมในแต่ละแกนของหุ่นยนต์
$R$	=	สัญญาณอ้างอิง
$r_i$	=	จุดศูนย์กลางมวลในแต่ละแกนของหุ่นยนต์
$T_{DI}$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบถึงสัญญาณ ขาออกของระบบ

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_{DO}$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบถึงสัญญาณขาออกของระบบ
$T_r$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณอ้างอิงของระบบถึงสัญญาณขาออก
$T_{rl}$	=	ช่วงเวลาเพิ่มระดับของขอบเขตล่าง
$T_{ru}$	=	ช่วงเวลาเพิ่มระดับของขอบเขตบน
$T_{sl}$	=	ค่าเวลาเข้าที่ของขอบเขตล่าง
$T_{su}$	=	ค่าเวลาเข้าที่ของขอบเขตบน
$U$	=	สัญญาณตัวควบคุม
$W_{Di}$	=	ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการจัดสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ
$W_{Do}$	=	ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการจัดสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ
$W_{low}$	=	ค่าขอบเขตล่าง
$W_M$	=	ขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพ
$W_N$	=	ค่าขอบเขตของสัญญาณรบกวน
$W_{up}$	=	ค่าขอบเขตบน
$Y$	=	สัญญาณขาออกของระบบ
$\tau$	=	ค่าทอร์กของแกนหุ่นยนต์

## การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขนหุ่นยนต์ที่มี ค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

### Robust Position Controller Design of Robot Arm with Parametric Uncertainty Using Quantitative Feedback Theory (QFT)

#### คำนำ

ในปัจจุบันนี้หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อมนุษย์ อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตและประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อช่วยประหยัดเวลา และเพิ่มปริมาณในการผลิตให้ทันต่อความต้องการของตลาด ดังนั้นในการศึกษาการควบคุมระบบของหุ่นยนต์นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรกระทำ เพื่อรองรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ในอนาคต ซึ่งจะมีระบบพลวัตที่สลับซับซ้อน ดังนั้นแล้วจึงเป็นการยากในการที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ระบบการควบคุมของหุ่นยนต์จะต้องมีสมรรถนะสูง และจะต้องทนทานต่อความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต รวมไปถึงสิ่งรบกวนที่เข้ามายังจุดต่างๆ ของระบบได้ เพราะฉะนั้นแล้วการออกแบบระบบควบคุมจึงจำเป็นต้องนำเอาสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มาพิจารณา เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ จึงจะทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพ แต่ก็จะทำให้ปัญหาการออกแบบมีความซับซ้อนมากขึ้น

ในการควบคุมหุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันนั้นจะทำการควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งไม่ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบตัวควบคุม และไม่ได้คำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบ อย่างเช่น ในขณะที่หุ่นยนต์ทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโหลดที่ย่อมจะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ถ้าหากตัวควบคุมมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีพอก็จะส่งผลทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่มากขึ้นและอาจจะส่งผลเสียหายต่อกระบวนการผลิตนั้นได้

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นทฤษฎีที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อรองรับกับค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบ โดยทำการออกแบบทางด้านโดเมนความถี่ และกำหนดคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีตามที่กำหนด ตามวิธีการของ ซาคริต (2552) และ Houpis (2006) ส่วนการจำลองและการทดลองใน

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการจำลองและการทดลองกับแขนหุ่นยนต์ 1 แขนของบริษัท Quanser รุ่น SRV-02 และแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสกรารุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA ซึ่งจากผลการจำลองและผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาตรนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีมาก อย่างเห็นได้ชัดเจน



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อระบุเอกลักษณ์ของแขนหุ่นยนต์ 1 แกน ของบริษัท Quanser และแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสกรารุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA
2. เพื่อออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณสำหรับแขนหุ่นยนต์ 1 แกน ของบริษัท Quanser และแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสกรารุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA
3. เพื่อนำตัวควบคุมและตัวกรองที่ได้ทำการออกแบบไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ 1 แกน ของบริษัท Quanser และแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสกรารุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA

## การตรวจเอกสาร

ในการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์สการานั้นมีผู้วิจัย ได้เผยแพร่งานวิจัยที่น่าสนใจต่างๆ ดังนี้ Louis *et al.* (1990) ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบปรับค่าได้โดยตรง (direct adaptive controller) สำหรับการติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่มีความเร็วสูงอย่างหุ่นยนต์สการา Meng and Liew (1997) ได้ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการติดตามการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละข้อต่อ ต่อมา Philip *et al.* (2009) ได้นำทฤษฎี Polynomial Chaos Theory (PCT) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระบบพลวัต และออกแบบตัวควบคุมของหุ่นยนต์สการา และ Yusuf *et al.* (2010) ทำการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคลุมเครือสำหรับการควบคุมการติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สการา

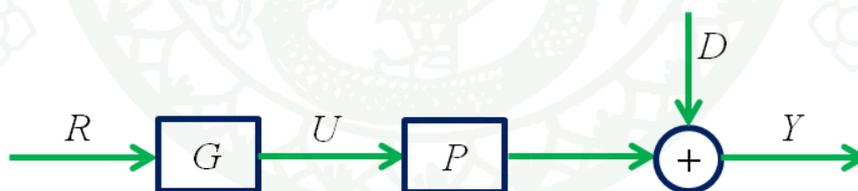
ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory) ผู้คิดค้นและพัฒนาทฤษฎีนี้คือ Isaac Horowitz ในปี 1960 (Houpis *et al.*, 2006) มีงานวิจัยหลายงานที่นำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณไปประยุกต์ใช้เช่น Philips *et al.* (1998) ใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณในการออกแบบตัวควบคุมของเครื่องบินรบ F-16 Vista ในโหมดการบินที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง โดยทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าการออกแบบด้วยทฤษฎีนี้สามารถทำงานได้ดีกับระบบที่มีความไม่แน่นอนสูง นอกจากนี้ยังสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องการใช้พลังงานในการควบคุมที่มากเกินไปได้ด้วย ต่อมา Hamilton *et al.* (1997) ได้ออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนโดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ในการควบคุมความเร็วรอบเดินเบาของเครื่องยนต์แบบหัวฉีดพอร์ด ต่อมา Karpenko *et al.* (2004) ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยการป้อนกลับเชิงพลวัตของแรงดัน โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ เพื่อควบคุมตำแหน่งของกระบอกนิวมติก ซึ่งทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพรวมไปถึงเสถียรภาพของระบบที่น่าพึงพอใจเป็นอย่างยิ่ง ต่อมา Chatlatanagulchai *et al.* (2007) ได้นำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุม ลูกตุ้มหัวกลับที่ทำการเพิ่ม โหลดที่ไม่ทราบค่า แต่ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ลูกตุ้มหัวกลับสามารถทรงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในปี 2552 ชาคริต ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของแขนกลชนิดสองข้อต่อ โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ซึ่งการควบคุมแบบย้อนกลับเชิงปริมาณทำให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

## ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (QFT)

Norman (2008) ระบบควบคุมหนึ่งสัญญาณด้านเข้าและหนึ่งสัญญาณด้านออก (SISO) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open - loop control systems) และระบบควบคุมแบบวงปิด (Close - loop control systems)

### 1. ระบบควบคุมแบบวงเปิด

ในระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้การควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเนและการตัดสินใจของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยเตาผิง ถ้าเตาผิงที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์ตั้งเวลาเปิด-ปิดเท่านั้น ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมจะต้องคาดคะเนและตั้งเวลาในการเปิดเตาผิงที่นานพอเหมาะเพื่อให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยมนุษย์เช่นนี้จะมีความแม่นยำน้อย และไม่ค่อยมีความน่าเชื่อถือเท่าใดนัก เนื่องจากผู้ควบคุมไม่สามารถรู้ถึงคุณสมบัติเฉพาะในการสร้างความร้อนของเตาผิงนี้ อีกทั้งยังมีปัจจัยต่างๆจากภายนอก เช่น อุณหภูมิภายนอกห้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องมาจากปัจจัยจากภายนอกได้ แต่ข้อดีของระบบนี้ คือเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบ และมีราคาถูก



ภาพที่ 1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open - loop control system)

เมื่อ  $R$  คือสัญญาณอินพุตอ้างอิง,  $G$  คือตัวควบคุม,  $U$  คือสัญญาณตัวควบคุม,  $D$  คือค่าของสิ่งรบกวนระบบ,  $P$  คือพลานต์ และ  $Y$  คือสัญญาณขาออกของระบบ

จากภาพที่ 1 ทำการป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิงไปให้กับตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมก็จะคำนวณและส่งค่าสัญญาณควบคุมไปยังพลานต์ ซึ่งในการควบคุมระบบนี้จะไม่สามารถทราบค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ และยังมีสิ่งรบกวนของระบบที่จะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการ

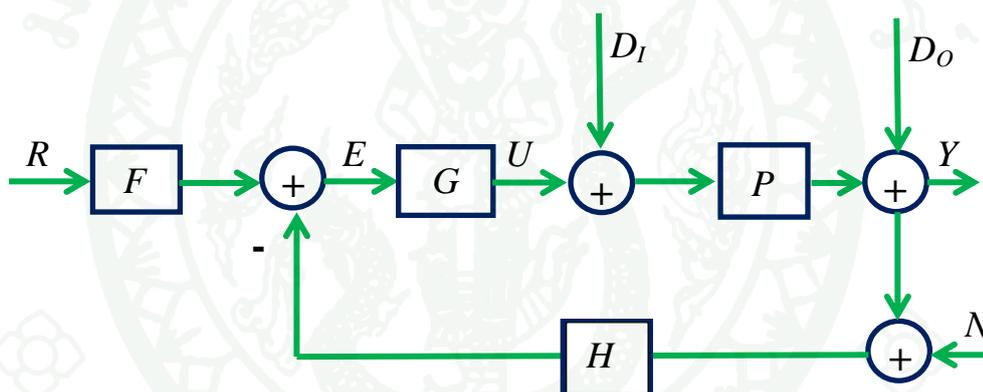
ควบคุมได้ และจากภาพที่ 1 สามารถพิจารณาสัญญาณตัวควบคุมและสัญญาณขาออกของระบบจากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$U = GR \quad (1)$$

$$Y = PU + D \quad (2)$$

จากสมการที่สองถึงแม้ว่าจะทราบถึงสมการที่ถูกต้องของพลานต์และสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบแล้วก็ตาม แต่ก็อาจจะมีดีเลย์เกิดขึ้นกับระบบได้ จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการควบคุมอยู่ดี

## 2. ระบบควบคุมแบบวงปิด



ภาพที่ 2 ระบบควบคุมแบบวงปิด (Close - loop control system)

เมื่อ  $P$  คือพลานต์,  $G$  คือตัวควบคุม,  $F$  คือตัวกรองของระบบ,  $H$  คือเซนเซอร์,  $R$  คือสัญญาณอ้างอิง,  $E$  คือค่าความผิดพลาด,  $U$  คือสัญญาณตัวควบคุม,  $Y$  คือสัญญาณขาออกของระบบ,  $N$  คือสัญญาณรบกวนจากการวัด,  $D_1$  คือค่าของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบและ  $D_o$  คือค่าของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ

จากภาพที่ 2 สามารถเขียนสมการสัญญาณเอาต์พุต ค่าความผิดพลาด และสัญญาณควบคุมได้ดังสมการที่ (3), (4) และ (5)

$$Y = \frac{1}{1+PGH} D_o + \frac{P}{1+PGH} D_1 + \frac{PG}{1+PGH} FR - \frac{PGH}{1+PGH} N \quad (3)$$

$$E = -\frac{H}{1+PGH} D_o + \frac{PH}{1+PGH} D_i + \frac{1}{1+PGH} FR - \frac{H}{1+PGH} N \quad (4)$$

$$U = \frac{G}{1+PGH} FR + \frac{GH}{1+PGH} (N + D_o + PD_i) \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และสามารถออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ค่าสัญญาณขาออกนั้นมีค่าเท่ากับสัญญาณอ้างอิงตามสมการที่ (3) ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ถูกต้องของพลานต์ และนั่นคือข้อดีของการออกแบบระบบควบคุมแบบวงปิด แต่ก็จะทำให้การออกแบบตัวควบคุมนั้นมีความสลับซับซ้อนมากขึ้น เช่น จะต้องออกแบบตัวควบคุมโดยคำนึงถึงสิ่งรบกวนทางด้านเข้า สิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ และสัญญาณรบกวนจากการวัด รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบควบคุมก็เพิ่มมากขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงมีการคิดค้นทฤษฎีที่เข้ามาแก้ปัญหาเพื่อลดผลกระทบที่เกิดเหล่านี้โดยเฉพาะนั่นคือ ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณแล้ว พบว่าทฤษฎีนี้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ได้ ซึ่งกระบวนการในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนี้จะทำการออกแบบบนโดเมนความถี่และใช้แผนภาพนิโคลส์เป็นเครื่องมือในการออกแบบ ขั้นตอนในการออกแบบประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนแรก คือ การสร้างแผ่นแบบพลานต์ (Plant template) จากความไม่แน่นอนของระบบ ขั้นตอนที่สอง คือ การกำหนดคุณสมบัติให้กับระบบ ขั้นตอนที่สาม คือ การสร้างขอบเขต (Bounds calculation) ขั้นตอนที่สุด คือ การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง (Loop shaping process)

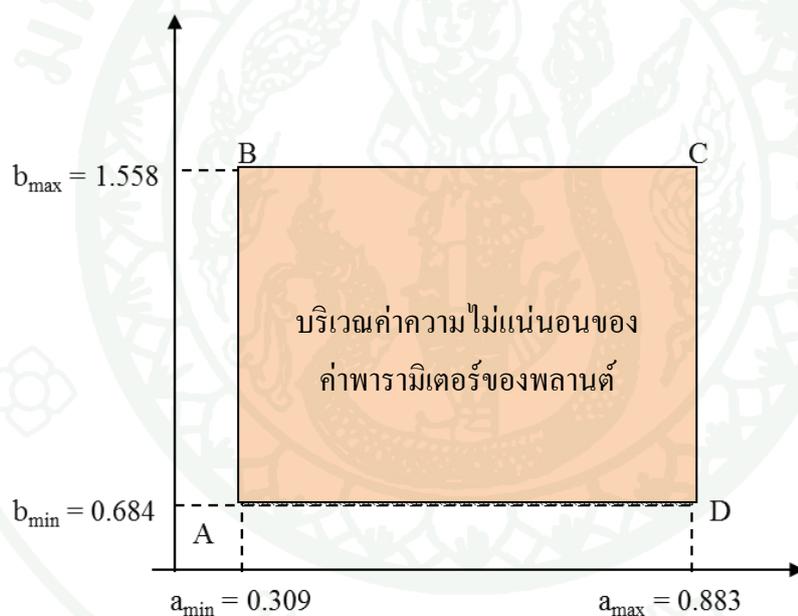
### 1. การสร้างแผ่นแบบพลานต์ (Plant template) จากความไม่แน่นอนของระบบ

เนื่องจากทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนี้ มีลักษณะของการออกแบบโดยการพิจารณาจากความไม่แน่นอนของระบบพลศาสตร์ ในกระบวนการออกแบบนั้นทำได้โดย การแทนระบบทั้งหมดที่ต้องการออกแบบด้วยเซตของฟังก์ชันถ่ายโอน  $P \in \mathcal{P}$  โดยที่  $\mathcal{P}$  คือ เซตของพลานต์ที่เกิดจากความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ โดย  $P$  คือ พลานต์ที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งสามารถแปรผันได้ตามปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบ ตัวอย่างเช่น สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องบินโบอิง 707 (Vinod et al., 2009) มีลักษณะดังนี้

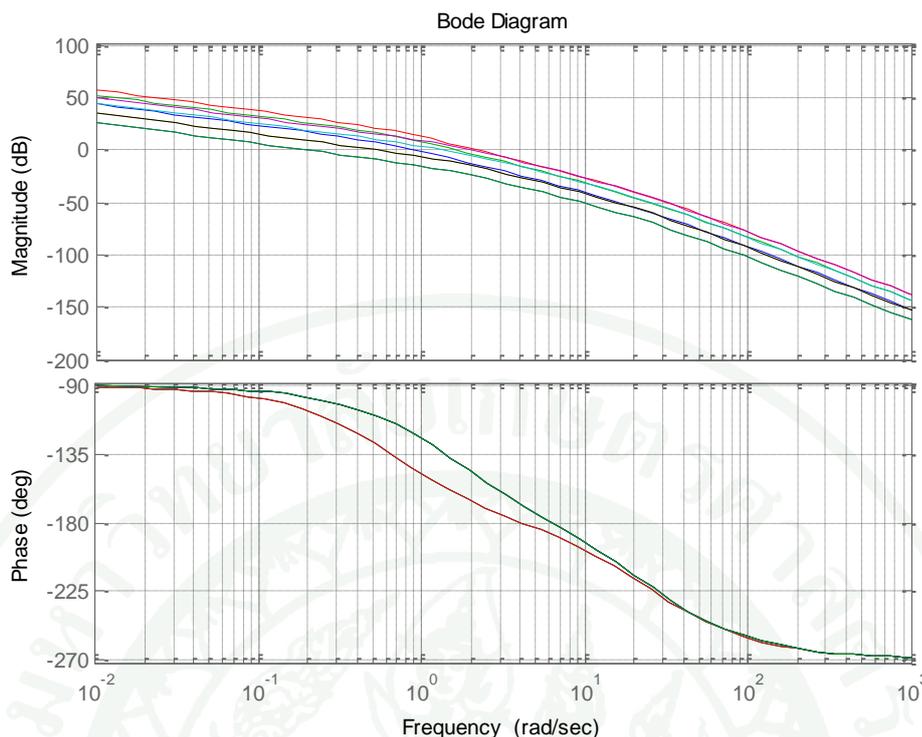
$$P(s) = \frac{25a}{s^3 + (25+b)s^2 + 25bs} \quad (6)$$

โดยที่ช่วงของค่าความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์จะมีค่าดังนี้  $a = [0.309, 0.883]$  และ  $b = [0.684, 1.558]$

จากตัวอย่างนี้ สามารถนำค่าต่างๆ มาเขียนให้อยู่ในรูปของระบบที่น่าสนใจในลักษณะของบริเวณค่าความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลานต์ (Region of plant parametric uncertainty) ได้ดังภาพที่ 3 เมื่อนำช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในระบบไปกำหนดจุดลงบนแผนภาพโพลเดในภาพที่ 4 พบว่า เมื่อค่าของตัวแปรเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้คุณสมบัติของระบบที่แสดงบนแผนภาพโพลเดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงสรุปได้ว่า ถ้าทำการออกแบบตัวควบคุมโดยไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอนตรงจุดนี้แล้วอาจทำให้ได้ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการทำงานไม่ดีเท่าที่ควร



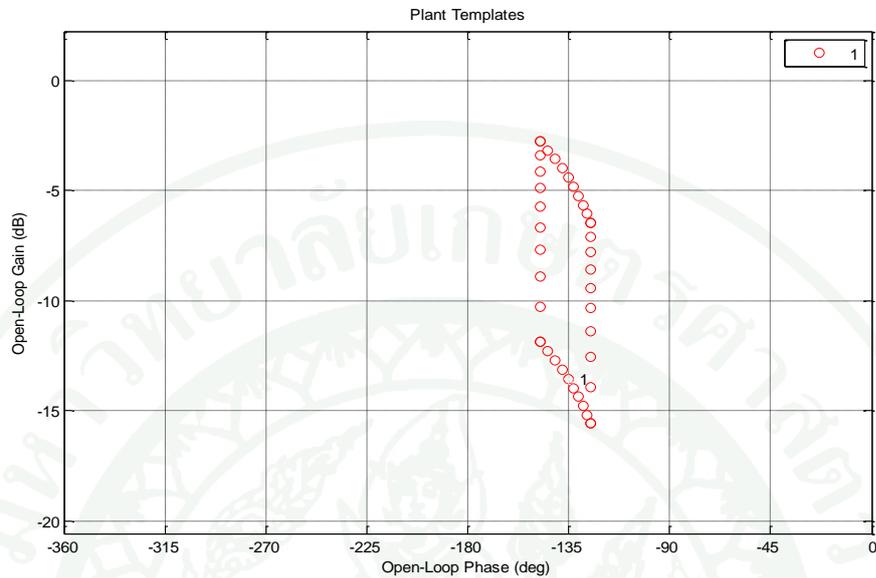
ภาพที่ 3 บริเวณค่าความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลานต์



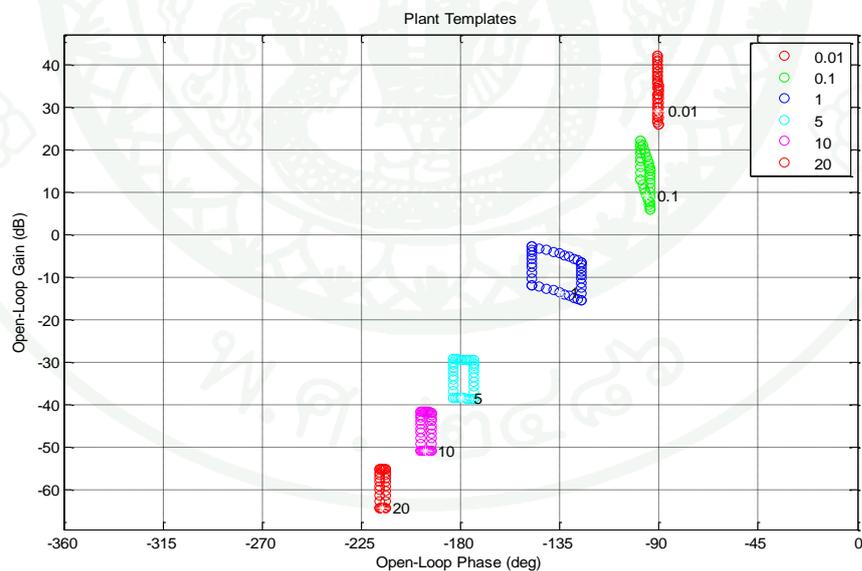
ภาพที่ 4 แผนภาพโบเดบนช่วงความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต ที่มีค่า  $a$  อยู่ระหว่าง  $[0.309 - 0.883]$  และมีค่า  $b$  อยู่ระหว่าง  $[0.684 - 1.558]$

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ในขั้นตอนของการสร้างแผ่นแบบพลาเน็ตนี้ มีการดำเนินการบนแผนภาพนิโคลส์ ซึ่งในแต่ละค่าบนบริเวณของความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ตนั้นสามารถนำมากำหนดจุดบนแผนภาพนิโคลส์ได้ โดยการกำหนดจุดต่างๆ นั้น ต้องสอดคล้องกับการเลือกความถี่ที่สนใจด้วย เนื่องจากความถี่ที่ระดับต่างๆกัน ย่อมส่งผลให้ได้จุดบนแผนภาพนิโคลส์ที่ต่างกันไปด้วย ซึ่งเราเรียกจุดในแต่ละความถี่เหล่านี้ว่า “แผ่นแบบพลาเน็ต” (Plant template) ดังภาพที่ 5 ซึ่งระดับของความถี่ที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้น ไม่มีหลักเกณฑ์ในการเลือกที่ตายตัว โดยสามารถเลือกได้ตามความเหมาะสมกับระบบงานที่ต้องการออกแบบ ซึ่งในตัวอย่างนี้ เป็นการสร้างแผ่นแบบพลาเน็ตของระดับความถี่ที่สนใจดังนี้  $\omega = [0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20]$  เรเดียน/วินาที ดังภาพที่ 6 แต่การนำแผ่นแบบพลาเน็ตทั้งหมดไปทำการออกแบบตัวควบคุมเลยนั้นทำได้ยากเนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีการกำหนดจุดอ้างอิงลงบนแผ่นแบบพลาเน็ตเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยเรียกจุดอ้างอิงนี้ว่าจุดนอมินัล (Nominal point) ในการกำหนดจุดอ้างอิงนั้น สามารถเลือกจุดใดก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักทำการเลือกบริเวณที่จุดมุมล่างซ้ายของแผ่นแบบ

พลานต์ หลังจากที่ทำตามขั้นตอนต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขั้นตอนต่อไปนั้นเป็นขั้นตอนของการออกแบบและการสร้างขอบเขตตามวิธีการการออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ



ภาพที่ 5 แผ่นแบบพลานต์ที่ความถี่เท่ากับ 1 เรเดียน/วินาที



ภาพที่ 6 แผ่นแบบพลานต์บนความถี่ที่สนใจ

## 2. การกำหนดคุณสมบัติให้กับระบบ

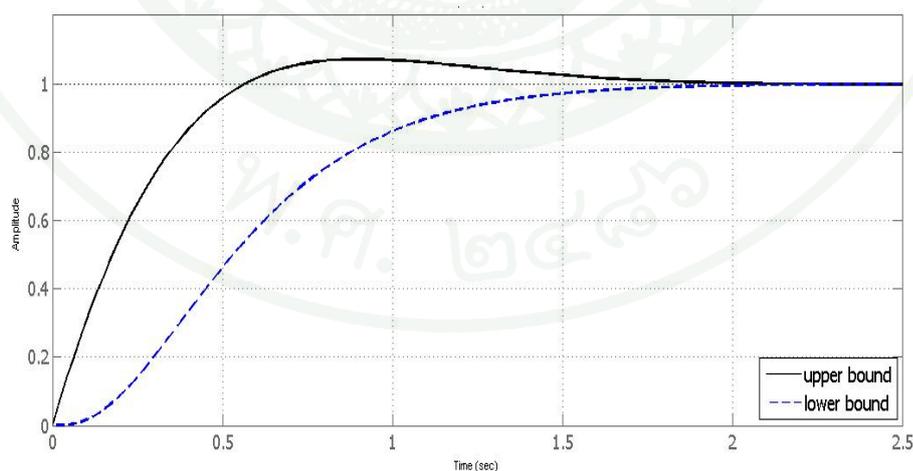
ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้นจะทำการกำหนดคุณลักษณะบนโดเมนเวลา (Time-domain specification) แล้วแปลงให้มีคุณลักษณะที่กำหนดบนโดเมนความถี่ (Frequency-domain specification)

### 2.1 การกำหนดคุณลักษณะบนโดเมนเวลา (Time-domain specification)

ข้อกำหนดคุณสมบัติการควบคุมแบบปิดดังแสดงในภาพที่ 2 สามารถแสดงข้อกำหนดคุณสมบัติบนโดเมนเวลาในเทอมของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบ เพื่อเป็นการกำหนดขอบเขตการทำงานของระบบและการออกแบบผลตอบสนองต่อเวลา โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ คือ

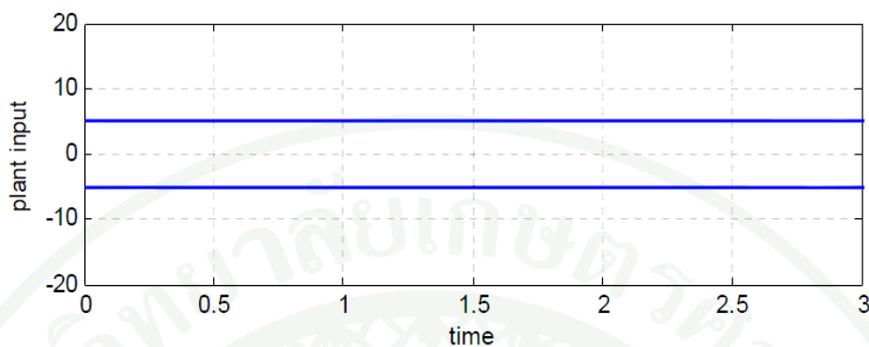
ก. การให้เอาต์พุตมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์หรือไม่เท่ากับศูนย์

ข. การออกแบบให้เอาต์พุตมีค่าอยู่ในระหว่างขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound) อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของระบบดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เอาต์พุตมีค่าอยู่ในระหว่างขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound)

ค. การให้อินพุตสำหรับสัญญาณรบกวนจากการวัดหรือสัญญาณรบกวนของระบบ หรือคำสั่งในการติดตาม มีขอบเขตการทำงานตามที่กำหนดดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 อินพุตมีขอบเขตการทำงานตามที่กำหนด

## 2.2 การกำหนดคุณสมบัติบน โดเมนความถี่ (Frequency-domain specification)

จากภาพที่ 2 สามารถกำหนดคุณสมบัติบน โดเมนความถี่ โดยจะพิจารณาสมการที่ได้จากบล็อกไดอะแกรมดังนี้

ก. ขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบ

$$\left| \frac{Y}{R} \right| = \left| \frac{PG}{1+PGH} F \right| \leq W_M \quad (7)$$

ข. การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านเข้าของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_i} \right| = \left| \frac{P}{1+PGH} \right| \leq W_{D_i} \quad (8)$$

ค. การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านออกของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_o} \right| = \left| \frac{1}{1+PGH} \right| \leq W_{D_o} \quad (9)$$

ง. ขอบเขตการติดตาม

$$W_{low} \leq \left| \frac{PG}{1+PGH} F \right| \leq W_{up} \quad (10)$$

จ. การขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด

$$\left| \frac{Y}{N} \right| = \left| \frac{-PGH}{1+PGH} \right| \leq W_N \quad (11)$$

โดยที่  $W_M$  คือ ขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพ,  $W_{D_i}$  คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการขจัดสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ,  $W_{D_o}$  คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการขจัดสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ,  $W_{up}$  คือ ค่าขอบเขตบน,  $W_{low}$  คือ ค่าขอบเขตล่าง,  $W_N$  คือ ค่าขอบเขตของสัญญาณรบกวน

### 3. การสร้างขอบเขต (Bounds calculation)

การสร้างขอบเขตของขนาดส่วนเพื่อเสถียรภาพจากสมการที่ (7) สามารถกำหนดได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{ขนาดของส่วนเพื่อเกณฑ์ต่ำสุด (GM)} \geq 1 + \frac{1}{W_M} \quad (12)$$

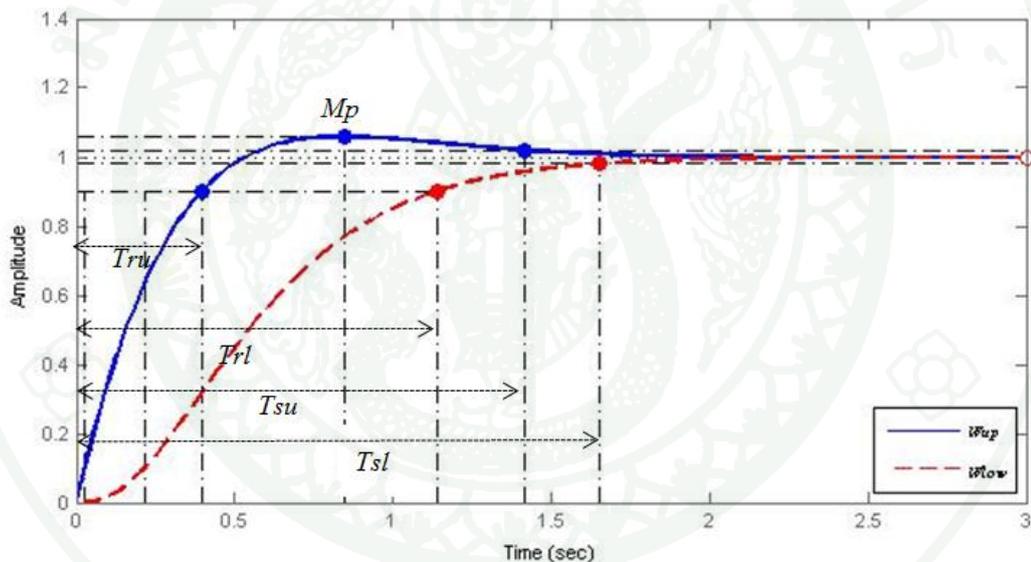
$$\text{ขนาดของส่วนเพื่อเฟสต่ำสุด (PM)} \geq 180^\circ - \theta, \quad \theta = \cos(0.5W_M^{-1} - 1) > 0 \quad (13)$$

จากสมการที่ (10) สามารถกำหนดขอบเขตการติดตามให้กับระบบบนโดเมนเวลาแล้วแปลงให้อยู่บนโดเมนความถี่ การกำหนดค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างดังภาพที่ 9 และภาพที่ 10 ซึ่งในภาพที่ 9 นั้นเป็นการกำหนดค่าขอบเขตบน และขอบเขตล่างของระบบบนโดเมนเวลา โดยค่า  $M_p$  คือ ค่าพุงเกินสูงสุด,  $T_{ru}$  คือ ช่วงเวลาเพิ่มระดับของขอบเขตบน,  $T_{rl}$  คือ ช่วงเวลาเพิ่มระดับของขอบเขตล่าง,  $T_{su}$  คือ ค่าเวลาเข้าที่ของขอบเขตบน,  $T_{sl}$  คือ ค่าเวลาเข้าที่ของขอบเขตล่าง ในส่วนของการคำนวณนั้นได้ใช้วิธีคำนวณช่วงเวลาเพิ่มระดับที่ 90% โดยค่าเวลาเข้าที่จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (14) (คิดที่ช่วง 2% ของค่าสภาวะคงตัว) ซึ่งจากการกำหนดค่าพุงเกินบนโดเมนเวลาทำให้เราสามารถทราบค่า  $\zeta$  จากสมการที่ (15) ดังนั้นจะได้สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนของขอบเขตบน

และขอบเขตล่างดังสมการที่ (16) และ (17) ซึ่งในสมการที่ (16) นั้นจะทำการเพิ่มซีโรให้กับสมการ ซึ่งจะไม่มีผลในทางโดเมนเวลา แต่จะทำการเพิ่มค่าโพลในสมการที่ (17) เพื่อให้ผลตอบสนองทางความถี่หลังจากจุดตัดนั้นมีความชันลดลง และจะทำการเพิ่มค่าโพลในสมการที่ (17) เพื่อให้ผลตอบสนองทางความถี่หลังจากจุดตัดนั้นมีความชันเพิ่มขึ้น

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (14)$$

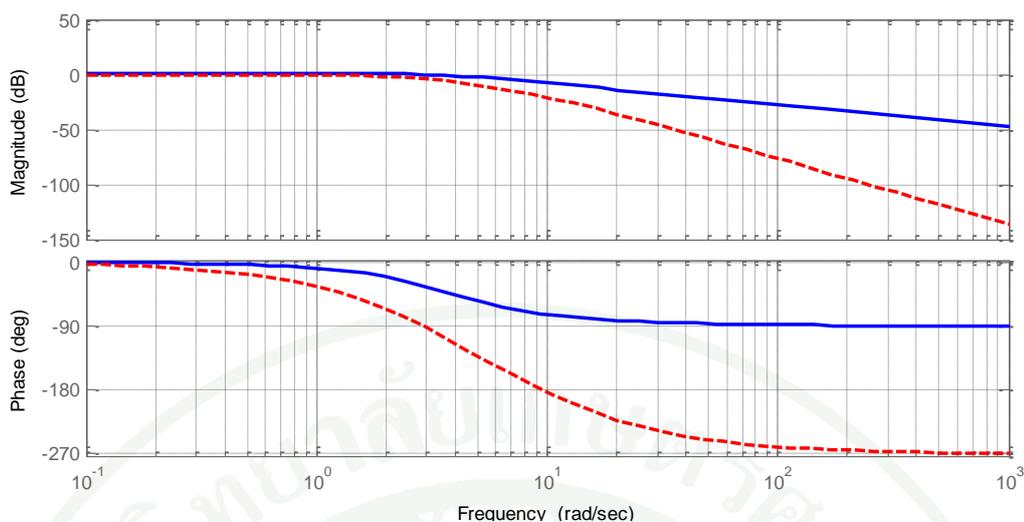
$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{\%OS}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{\%OS}{100}\right)}} \quad (15)$$



ภาพที่ 9 ค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนโดเมนเวลา

$$W_{up} = \frac{\omega_n^2 [s + a]}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

$$W_{low} = \frac{a_1 \times a_2 \times a_3}{(s + a_1)(s + a_2)(s + a_3)} \quad (17)$$



ภาพที่ 10 ค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างบนโดเมนความถี่

โดยในการกำหนดค่าขอบเขตบนนั้นจะกำหนดให้ระบบมีผลตอบสนองแบบ overdamped และเลือกค่า  $a$  ที่ความถี่สูง และในการกำหนดค่าขอบเขตล่างนั้นจะกำหนดให้ระบบมีผลตอบสนองแบบ underdamped และเลือกค่า  $a_3$  ที่ความถี่สูง

#### 4. การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง (Loop shaping process)

ในการออกแบบตัวควบคุม แผ่นแบบพลาเน็ตจะถูกนำมาใช้งานร่วมกับขอบเขตที่กำหนดตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ เพื่อให้มีความสอดคล้องกันและจะเลือกนอมินัลพลาเน็ต  $P_o$  จากเซตของความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของพลาเน็ต เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $G$  ที่จะทำได้วงนอมินัล (nominal loop)  $L_o = GP_o$  มีคุณลักษณะ และประสิทธิภาพตามที่ต้องการ โดยในการออกแบบนั้นจะนำฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาใช้งาน และในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมทั้งหมดบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ QFT Control Design Toolbox evaluation version (Borghesani *et al.*, 2003) ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. Gain:  $K$

2. Integrator และ differentiator:  $\left(\frac{1}{s^n}\right), (s^n)$

3. Real pole และ real zero:  $\left(\frac{1}{s/p+1}\right), (s/z+1)$

4. Complex pole และ complex zero:  $\left( \frac{1}{s^2 / \omega_n^2 + 2\xi s / \omega_n + 1} \right), (s^2 / \omega_n^2 + 2\xi s / \omega_n + 1)$
5. Lead และ lag:  $\left( \frac{s / z + 1}{s / p + 1} \right)$
6. Notch:  $\left( \frac{s^2 / \omega_{n1}^2 + 2\xi_1 / \omega_{n1} + 1}{s^2 / \omega_{n2}^2 + 2\xi_2 / \omega_{n2} + 1} \right)$

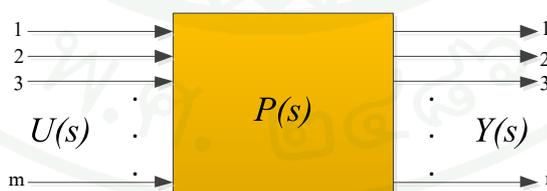
## 5. การออกแบบในโดเมนความถี่สำหรับระบบหลายตัวแปร

ในการออกแบบระบบที่มีสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกหลายสัญญาณ (MIMO) ยังคงใช้หลักการพื้นฐานโดยทั่วไป (วโรดม, 2550) แต่จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากขึ้น ซึ่งในภาพที่ 11 ได้แสดงระบบ MIMO ที่มีจำนวนสัญญาณขาเข้าเท่ากับ  $m$  และมีจำนวนสัญญาณขาออกเท่ากับ  $n$  ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอน  $P(s)$  สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ที่มีขนาด  $m \times n$  เรียกว่า “เมทริกซ์ถ่ายโอน” โดยสมการปริภูมิสแตตสำหรับระบบ MIMO สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 18

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (18)$$

โดยเมทริกซ์  $A, B, C$  และ  $D$  จะมีขนาด  $a \times a, a \times n, m \times a$  และ  $m \times n$  ตามลำดับ เมทริกซ์ถ่ายโอนสามารถหาได้จาก

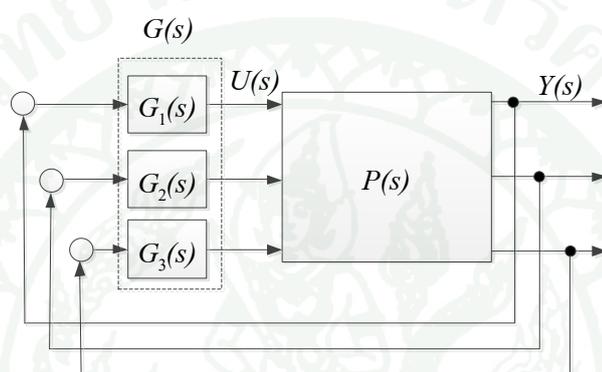
$$P(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (19)$$



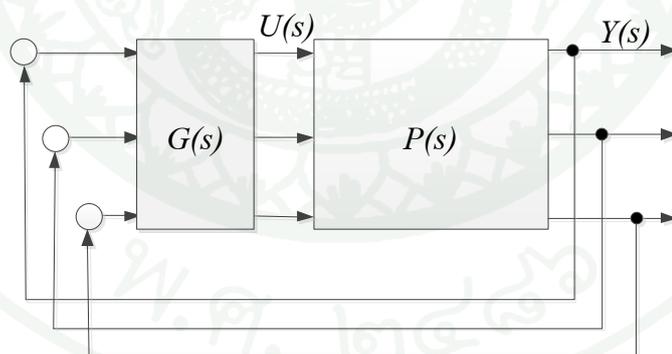
ภาพที่ 11 ระบบที่มีสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกหลายสัญญาณ (MIMO)

การออกแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับระบบ MIMO คือทำการแบ่งระบบออกเป็นระบบ SISO แล้วทำการออกแบบทีละวงดังภาพที่ 12 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าจะเริ่มทำการออกแบบตัวควบคุม  $G_1(s)$  สำหรับวงที่หนึ่งก่อนแล้วทำการปิดวงที่หนึ่ง ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวควบคุม  $G_2(s)$  ถ้า

หากว่า  $P(s)$  มีการเชื่อมต่อระหว่างวงที่หนึ่งและสอง ผลกระทบจากการเชื่อมต่อนั้นจะปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกับตัวควบคุม  $G_2(s)$  ขณะที่ทำการออกแบบสำหรับวงที่สอง หลังจากนั้นทำการปิดวงที่สอง และทำการออกแบบตัวควบคุม  $G_3(s)$  ทำเช่นนี้จนครบทั้งหมด ลักษณะของตัวควบคุมเมื่อทำการรวมเข้าเป็นเมทริกซ์ถ่ายโอนจะมีค่าแต่เฉพาะสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์ เรียกตัวควบคุมแบบนี้ว่า “ตัวควบคุมทแยงมุม” (Diagonal controller) ลักษณะภาพที่ 12 ซึ่งแตกต่างจากกรณีทั่วไป ที่ตัวควบคุมจะเป็นระบบ MIMO ดังภาพที่ 13 ซึ่งอยู่ในรูปเมทริกซ์ถ่ายโอนที่สามารถมีสมาชิกอื่นนอกเหนือจากแนวเส้นทแยงมุมได้



ภาพที่ 12 ตัวควบคุม MIMO แบบทแยงมุม



ภาพที่ 13 ตัวควบคุม MIMO แบบสมบรูณ์

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

สำหรับอุปกรณ์การทดลองในงานวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ในการทดลองที่ 1 จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองการควบคุมแขนหุ่นยนต์ 1 แขน และการทดลองที่ 2 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสกรารา

#### การทดลองที่ 1 การควบคุมแขนหุ่นยนต์ 1 แขน

1. หุ่นยนต์ 1 แขน และ โหลดชนิดต่างๆ

หุ่นยนต์ 1 แขน และ โหลดชนิดต่างๆนั้น เป็นอุปกรณ์การทดลองของบริษัท Quanser รุ่น SRV-02



ภาพที่ 14 หุ่นยนต์ 1 แขน และ โหลดชนิดต่างๆ ของบริษัท Quanser

2. เครื่องคอมพิวเตอร์

ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์ ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง พร้อมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ 1 แขน โดยจะทำบนโปรแกรม MATLAB 2010 ซึ่งได้ทำการติดตั้ง QFT Control Design Toolbox Evaluation Version และการ์ดรับ – ส่งข้อมูล NI PCI 6251

## การทดลองที่ 2 การควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสการา

### 1. หุ่นยนต์สการา

หุ่นยนต์สการายี่ห้อ TOSHIBA รุ่น TH180 เป็นหุ่นยนต์ที่รับน้ำหนักของโหลดได้สูงสุด 2 กิโลกรัม โดยมีแกนที่ 1 ยาว 70 มิลลิเมตร และแกนที่ 2 ยาว 110 มิลลิเมตร



ภาพที่ 15 หุ่นยนต์สการายี่ห้อ TOSHIBA รุ่น TH180

### 2. เครื่องคอมพิวเตอร์

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีทั้งหมด 3 เครื่อง ซึ่งในแต่ละเครื่องนั้นมีโปรแกรมและการทำงานที่ต่างกันดังนี้

2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์และใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองบนโปรแกรม MATLAB 2010 ซึ่งได้ทำการติดตั้ง QFT Control Design Toolbox Evaluation version ไว้บนเครื่อง

2.2 เครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Host computer หมายถึง เครื่องคอมพิวเตอร์ตัวหลัก ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุม สั่งการทำงาน และแสดงผลการทำงาน ซึ่งการทำงานทั้งหมดนั้นเป็นการติดต่อ และส่งผ่านข้อมูลกับ Target computer ผ่านทางสาย LAN ในการส่งผ่านข้อมูลนี้ได้มีการนำโปรแกรม LabVIEW 2010 มาใช้งาน

2.3 เครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 3 ทำหน้าที่เป็น Target computer มีหน้าที่ในการประมวลผลการทำงาน รับสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์ และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่ง Target computer ประกอบด้วย Data acquisition card (DAQ) NI PCI 7380R ดังภาพที่ 17 ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้ในการรับ – สัญญาณควบคุมและเซ็นเซอร์ต่างๆ โดยมีโปรแกรม NI-RIO 4.0 เป็นตัวสนับสนุนการทำงานของบอร์ดนี้



ภาพที่ 16 Data acquisition card (DAQ) NI PCI 6251



ภาพที่ 17 Data acquisition card (DAQ) NI PCI 7380R

### 3. ชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณควบคุมจาก Target computer เพื่อไปขับให้เซอร์โวมอเตอร์มีตำแหน่งตามที่กำหนด ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับยี่ห้อ YASKAWA ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ยี่ห้อ YASKAWA (ซ้าย) รุ่น SGDM – 01ADA (ขวา) รุ่น SGDA – 01S

### วิธีการ

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวิธีการในการออกตัวควบคุมของหุ่นยนต์ 2 ชนิด คือ หุ่นยนต์ 1 แกน และหุ่นยนต์สกรู ซึ่งจะมึกระบวนการในการออกแบบที่เหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่คุณสมบัติของตัวควบคุมใช้ในการควบคุม และวิธีการในการออกแบบที่หุ่นยนต์ 1 แกนนั้นจะมีระบบเป็นแบบ SISO ส่วนหุ่นยนต์สกรูนั้น จะมีระบบเป็นแบบ MIMO ซึ่งวิธีการในการออกแบบจะมีกระบวนการดังนี้

1. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์ 1 แกน และหุ่นยนต์สกรู

2. ออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณตามขั้นตอนดังนี้
  - 2.1 สร้างแผนแบบพลาเน็ตจากเซตความไม่แน่นอนของระบบ
  - 2.2 การกำหนดคุณสมบัติของระบบ และสร้างขอบเขตตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ
  - 2.3 ออกแบบตัวควบคุม และตัวกรอง
  
3. จำลองการทำงานตามขอบเขตของทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

#### การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ 1 แกน

จากความรู้พื้นฐานในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของหุ่นยนต์แกนเดียวซึ่งประกอบไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เฟืองขับ แกนของหุ่นยนต์ และโหลดที่ป้อนให้กับแกนหุ่น โดยมีอินพุตเป็นโวลต์  $V$  และเอาต์พุตเป็นตำแหน่งมุมของแกนหุ่น  $Q$  ดังนั้นเราสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{Q(s)}{V(s)} = \frac{a_m}{s(s+b_m)} \quad (20)$$

โดยค่า  $a_m$  และ  $b_m$  ได้จากการหาเอกลักษณ์ของระบบ ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้อุปกรณ์การทดลองของบริษัท Quanser รุ่น SRV-02 ดังภาพที่ 14 และใช้ data acquisition card (DAQ) NI PCI 6251 ในการรับ-ส่งสัญญาณควบคุม และเซ็นเซอร์ต่างๆ ดังรูปภาพที่ 16

ทำการทดลองหาเอกลักษณ์ของระบบโดยการป้อน  $V$  ด้วยการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณเซิร์ป ที่ความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 0.1 มิลลิเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 20 เฮิร์ตซ์ ด้วยระยะเวลา 10 วินาที และมีเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 10 มิลลิวินาที การทดลองหาเอกลักษณ์ของระบบด้วยการป้อน โหลดที่มีขนาดแตกต่างกันและการติดตั้ง โหลด ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกันบนแกนของหุ่นยนต์ ในบทความนี้ได้ทำการทดลองทั้งหมด 8 การทดลองดังนี้

1. ทดลองโดยมีเพียงแคแกนของหุ่นยนต์ ไม่ได้ทำการเพิ่มโหลดเข้าไป
2. ทดลองโดยเพิ่มมวลทรงกระบอก โดยวางห่างจากจุดศูนย์กลางของแกนเพลลาแกนหุ่น เป็นระยะ 5.5 เซนติเมตร

3. ทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 2 แต่เลื่อนมวลให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของแกนเพลลาแกนหุ่นเป็นระยะ 11 เซนติเมตร
4. ทดลองโดยเพิ่มแท่งเหล็กอีก 1 แท่ง บนแกนของหุ่น โดยวางห่างจากจุดศูนย์กลางของแกนเพลลาแกนหุ่นเป็นระยะ 3.5 เซนติเมตร
5. ทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 4 แต่เลื่อนแท่งเหล็ก ให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของแกนเพลลาแกนหุ่นเป็นระยะ 9 เซนติเมตร
6. ทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 5 แต่เพิ่มมวลทรงบอковиบนแท่งเหล็ก
7. ทดลองโดยการนำ rotary flexible joint (อยู่ทางขวามือสุดของภาพที่ 14) ติดตั้งบนส่วนปลายของแกนหุ่น
8. ทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 7 แต่นำมวลทรงกระบอกติดตั้งตรงส่วนปลายของ rotary flexible joint

โดยที่จะแสดงค่าพารามิเตอร์ในการทดลองแต่ละครั้งดังตารางที่ 1 เมื่อได้ทำการทดลองครบทั้งหมดแล้วจะได้ช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอนดังนี้

$$a_m \in [287.90, 660.03]$$

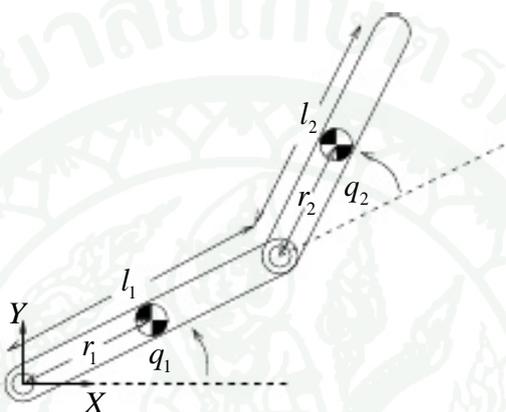
$$b_m \in [3.79, 8.64]$$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์ 1 แกน

การทดลองที่	ค่า $a_m$	ค่า $b_m$
1	660.03	8.64
2	570.83	7.93
3	477.00	7.85
4	464.84	7.46
5	460.36	7.00
6	431.22	6.48
7	307.73	6.07
8	287.90	3.79

### การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ศการา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ศการาในแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ซึ่งสมการของแขนหุ่นยนต์ 2 แกนนั้นจะใช้สมการลากรางจ์มาใช้ในการพิจารณาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ศการา โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันลากรางจ์ของแขนหุ่นยนต์สองข้อต่อดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ฟังก์ชันลากรางจ์ของแขนหุ่นยนต์ชนิดสองข้อต่อ

กำหนดให้  $m_1$  และ  $m_2$  คือมวลของแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์  
 $l_1$  และ  $l_2$  คือความยาวของแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์  
 $r_1$  และ  $r_2$  คือระยะจุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์  
 $q_1$  และ  $q_2$  คือขนาดของมุมที่เคลื่อนที่ของแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์  
 $I_1$  และ  $I_2$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์

จากภาพที่ 19 สามารถหาพิกัดของจุดปลายในแต่ละแกนดังสมการต่อไปนี้

$$x_1 = r_1 c_1; \quad y_1 = r_1 s_1 \quad (21)$$

$$x_2 = l_1 c_1 + r_2 c_{12}; \quad y_2 = l_1 s_1 + r_2 s_{12} \quad (22)$$

$$\dot{x}_1 = -r_1 s_1 \dot{q}_1; \quad \dot{y}_1 = r_1 c_1 \dot{q}_1 \quad (23)$$

$$\dot{x}_2 = -(l_1 s_1 + r_2 s_{12})\dot{q}_1 - r_2 s_{12}\dot{q}_2; \dot{y}_2 = (l_1 c_1 + r_2 c_{12})\dot{q}_1 + r_2 c_{12}\dot{q}_2 \quad (24)$$

โดยที่  $s_1 = \sin(q_1)$ ;  $s_{12} = \sin(q_1 + q_2)$  และ  $c_1, c_{12}$  ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน

ซึ่งสมการลากรางจ์นั้นจะมีค่าเท่ากับค่าความแตกต่างระหว่างสมการพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์ดังสมการที่ (25) ซึ่งในการพิจารณาแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์การานั้นจะมีแค่เฉพาะเทอมของพลังงานเท่านั้นส่วนเทอมของพลังงานศักย์จะมีค่าเป็นศูนย์

$$L = K - P \quad (25)$$

โดย  $L$  คือลากรางจ์เกียน,  $K$  คือพลังงานจลน์ และ  $P$  คือพลังงานศักย์

ดังนั้นสมการของพลังงานจลน์รวมของระบบทั้งหมด ( $K = T(q, \dot{q})$ ) จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (26)

$$T(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2 \quad (26)$$

และในระบบของหุ่นยนต์ 2 แกนนั้น จะมีเทอมของฟังก์ชันพลังงานส่วนขยายที่เกิดขึ้น  $\mathcal{D}$  นั้นก็คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแต่ละแกน (Akamatsu *et al.*, 2009) โดยเทอมของฟังก์ชันพลังงานส่วนขยายจะมีลักษณะดังนี้

$$V = \frac{1}{2} v_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} v_2 \dot{q}_2^2 \quad (27)$$

โดย  $v_1$  และ  $v_2$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแกนที่ 1 และแกนที่ 2

จากนั้นแทนค่าสมการที่ (26) และสมการที่ (27) ลงในสมการที่ (28) ซึ่งเป็นสมการลากรางจ์ที่นำเทอมของฟังก์ชันพลังงานส่วนขยายมาพิจารณาด้วย ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad (28)$$

โดย  $i$  คือลำดับของแกนที่ 1 และแกนที่ 2

$\tau$  คือค่าทอร์กของแขนหุ่นยนต์ที่เกิดขึ้น

เมื่อได้ทำการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (28) เรียบร้อยแล้ว ก็จะได้สมการเชิงพลวัตของหุ่นยนต์สกร่าซึ่งถึงถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$D(q)(\ddot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + V\dot{q} = \tau \quad (29)$$

โดยที่  $D(q)$  คือเมทริกซ์ของมวล,  $C(q, \dot{q})$  คือเมทริกซ์ของแรงเหวี่ยงและแรงโคริโอลิส,  $V$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน,  $\tau$  คือค่าทอร์กของแขนหุ่นยนต์,  $\dot{q}$  คือ ค่าความเร็วของแขนหุ่นยนต์ และ  $\ddot{q}$  คือ ค่าความเร่งของแขนหุ่นยนต์

ดังนั้นสมการเชิงพลวัตของแขนหุ่นยนต์สกร่า ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้นจะมีลักษณะดังนี้

$$\begin{bmatrix} \theta_1 + 2\theta_2 c_2 & \theta_3 + \theta_2 c_2 \\ \theta_3 + \theta_2 c_2 & \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\theta_2 s_2 \dot{q}_2 & -\theta_2 s_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \theta_2 s_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 & 0 \\ 0 & v_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

โดย

$$\theta_1 = I_1 + I_2 + m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + r_2^2)$$

$$\theta_2 = m_2 l_1 r_2$$

$$\theta_3 = I_2 + m_2 r_2^2$$

จากสมการไม่เชิงเส้นของสมการเชิงพลวัตของแขนหุ่นยนต์นั้นสามารถประมาณให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นตรงรอบจุดสมดุล (0,0) ได้ดังสมการที่ (31) และ (32)

$$[\theta_1 + 2\theta_2] \ddot{q}_1 + [\theta_3 + \theta_2] \ddot{q}_2 + v_1 \dot{q}_1 = \tau_1 \quad (31)$$

$$[\theta_3 + \theta_2] \ddot{q}_1 + \theta_3 \ddot{q}_2 + v_2 \dot{q}_2 = \tau_2 \quad (32)$$

ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์สกรานั้น จะทำการวิเคราะห์จากสมการเชิงพลวัตของหุ่นยนต์สกรานาโดยใช้การวิเคราะห์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สมการเชิงเส้นและจัดให้อยู่ในรูป

$$Y = \Phi\Theta \quad (33)$$

โดย

$$Y \in \mathbb{R}^{n \times 1} = \begin{bmatrix} \tau_1(t_1) + \tau_2(t_1) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\Phi \in \mathbb{R}^{n \times 5} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1(t_1) & (3\ddot{q}_1(t_1) + \ddot{q}_2(t_1)) & (\dot{q}_1(t_1) + \dot{q}_2(t_1)) & \dot{q}_1(t_1) & \dot{q}_2(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\Theta \in \mathbb{R}^{5 \times 1} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad v_1 \quad v_2]^T$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนครั้งของการทดลองเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์

จากนั้นหาค่าความผิดพลาดที่มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ค่าความผิดพลาดนั้นจะสอดคล้องกับสมการ

$$E = \sqrt{(Y - \Phi\Theta)^2}$$

ดังนั้นจะได้สมการที่จะใช้หาค่าประมาณของ  $\Theta$  ดังนี้

$$\hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (34)$$

ในการทดลองนั้นจะทำการป้อนทอร์กให้กับมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์สกรานาในแกนที่ 1 และแกนที่ 2 เป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เท่ากับ 10 เฮิร์ตซ์ มีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 ในระยะเวลา 10 วินาที จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์สกรู

ครั้งที่	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$v_1$	$v_2$
1	1.40	1.00	5.68	0.23	43.96
2	2.66	1.19	5.59	0.47	44.69
3	3.86	1.53	6.36	0.57	43.99
4	3.75	2.43	6.31	0.35	44.96
5	8.26	1.01	5.87	0.68	45.21

จากตารางที่ 2 ทำให้ทราบถึงช่วงของความไม่แน่นอนในแต่ละค่าของพารามิเตอร์ โดยแต่ละค่าจะมีช่วงของความไม่แน่นอนต่างๆดังนี้

$$\theta_1 = [1.4, 8.3] \quad \theta_2 = [1.2, 2.4] \quad \theta_3 = [5.6, 6.4] \quad v_1 = [0.23, 0.68] \quad v_2 = [43.96, 45.21]$$

จากสมการเชิงเส้นของแขนหุ่นยนต์สกรูในสมการที่ (31) และสมการที่ (32) ทำการแปลงลาปลาซและจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$[\theta_1 + 2\theta_2]s^2Q_1(s) + [\theta_3 + \theta_2]s^2Q_2(s) + v_1sQ_1(s) = \tau_1(s) \quad (35)$$

$$[\theta_3 + \theta_2]s^2Q_1(s) + \theta_3s^2Q_2(s) + v_2sQ_2(s) = \tau_2(s) \quad (36)$$

จากสมการที่ (35) และ (36) สามารถเขียนในให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์และค่าทอร์กที่ป้อนให้กับแขนของหุ่นยนต์

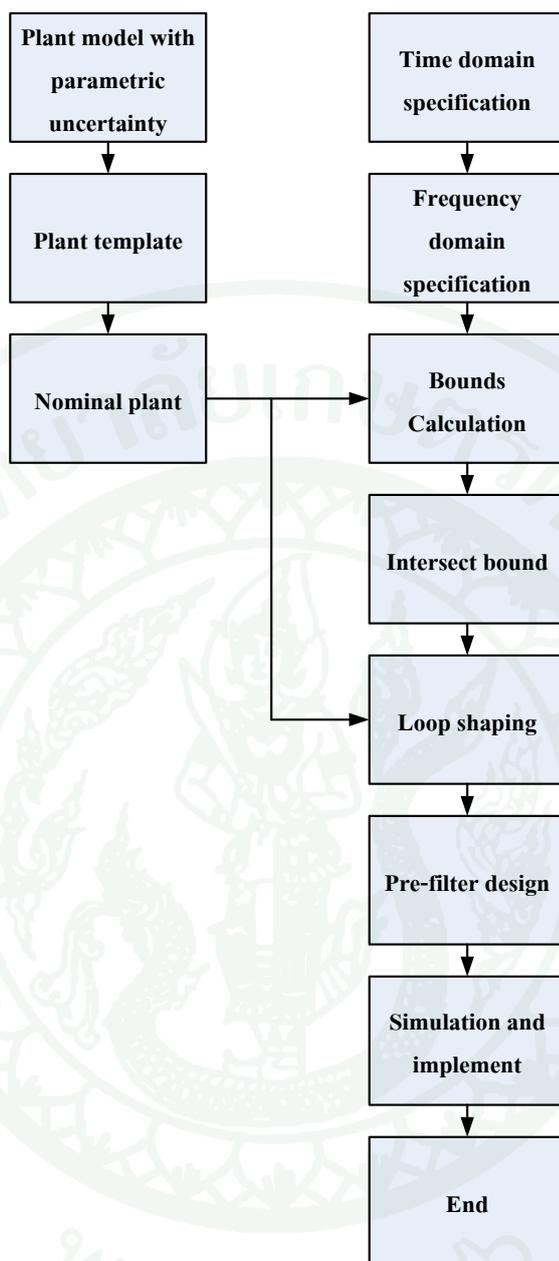
$$\begin{bmatrix} (\theta_1 + 2\theta_2)s^2 + v_1s & (\theta_3 + \theta_2)s^2 \\ (\theta_3 + \theta_2)s^2 & \theta_3s^2 + v_2s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1(s) \\ \tau_2(s) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\theta_1 + 2\theta_2)s^2 + v_1s & (\theta_3 + \theta_2)s^2 \\ (\theta_3 + \theta_2)s^2 & \theta_3s^2 + v_2s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau_1(s) \\ \tau_2(s) \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau_1(s) \\ \tau_2(s) \end{bmatrix} \quad (39)$$

### การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

ในส่วนนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองซึ่งจะเป็นส่วนที่สำคัญของวิทยานิพนธ์นี้ โดยในการออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้น สามารถสรุปขั้นตอนในการออกแบบดังแสดงในภาพที่ 20 โดยการออกแบบจะเริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติบนโดเมนเวลาก่อนแล้วทำการเปลี่ยนคุณสมบัติบนโดเมนเวลามาเป็นคุณสมบัติบนโดเมนความถี่ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้สร้างเป็นขอบเขตของทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณร่วมกับพลาตันต์นอมินัล (Nominal plant) สำหรับในส่วนของ การสร้างแผ่นแบบพลาตันต์ (Plant template) นั้น ก็สร้างจากความไม่แน่นอนของระบบ ซึ่งการออกแบบได้นำเซตนี้มาทำการกำหนดจุดลงบนแผนภาพนิโคลส์ ซึ่งจะเรียกกลุ่มต่างๆที่อยู่บนแผนภูมินิโคลส์ว่า “แผ่นแบบพลาตันต์” และในขั้นตอนของการสร้างแผ่นแบบพลาตันต์นั้น ได้มีการกำหนดจุดนอมินัลพลาตันต์ เพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการออกแบบ โดยเรียกขั้นตอนนี้ว่า “กระบวนการจัดสัญญาณรอบวง” ซึ่งเป็นการออกแบบตัวควบคุมนั่นเอง และเมื่อออกแบบตัวควบคุมเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นขั้นตอนของการออกแบบตัวกรอง

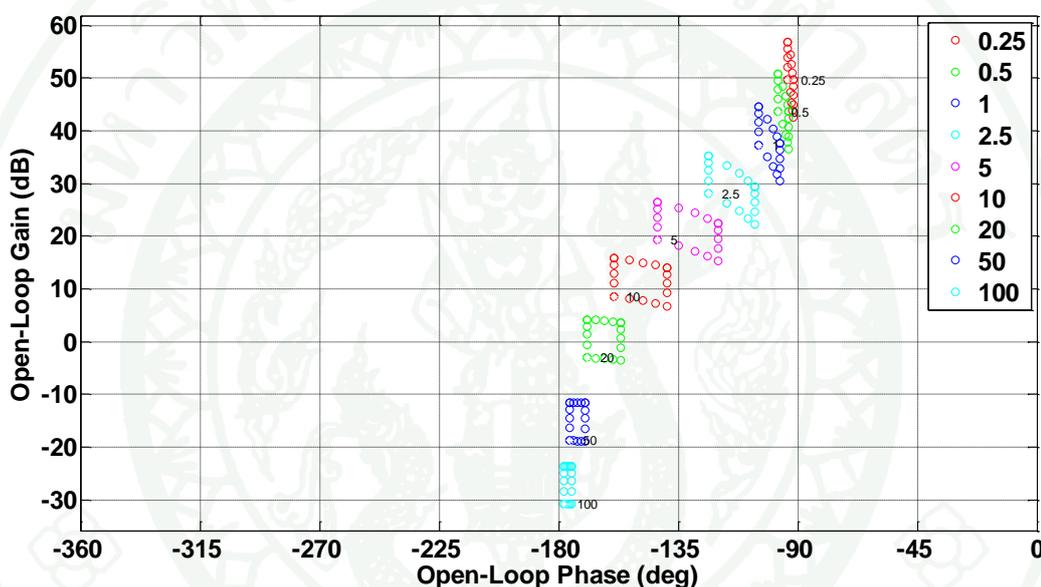


ภาพที่ 20 กระบวนการการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง

## การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของหุ่นยนต์ 1 แกน

### 1. การสร้างแผนแบบพลาเน็ตของหุ่นยนต์ 1 แกน

จากการหาเอกลักษณ์ของระบบของแขนหุ่นยนต์ 1 แกน นำสมการที่ (20) และช่วงของความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่หามาได้แล้ว มาทำการกำหนดจุดบนแผนภาพนิโคลส์ที่แสดงได้ดังภาพที่ 21 บนความถี่  $\omega = [0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20, 50, 100]$  และในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกจุด  $a_m = 287.9$  และ  $b_m = 3.79$  เป็นพลาเน็ตนอมินัล



ภาพที่ 21 แผนแบบพลาเน็ตบนแผนภาพนิโคลส์ของแขนหุ่นยนต์ 1 แกน

### 2. การกำหนดคุณสมบัติและการสร้างขอบเขตคุณสมบัติของหุ่นยนต์ 1 แกน

การออกแบบตัวควบคุมนั้นจะออกแบบเพื่อให้มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะของระบบที่ต้องการดังนี้

ข้อกำหนดสมรรถนะ

ค่าพุงเกิน:  $\leq 5\%$

ค่าเวลาเข้าที่:  $\leq 2$  วินาที (เกณฑ์ 2%)

ข้อกำหนดเสถียรภาพ ( $W_M = 1.2$ )

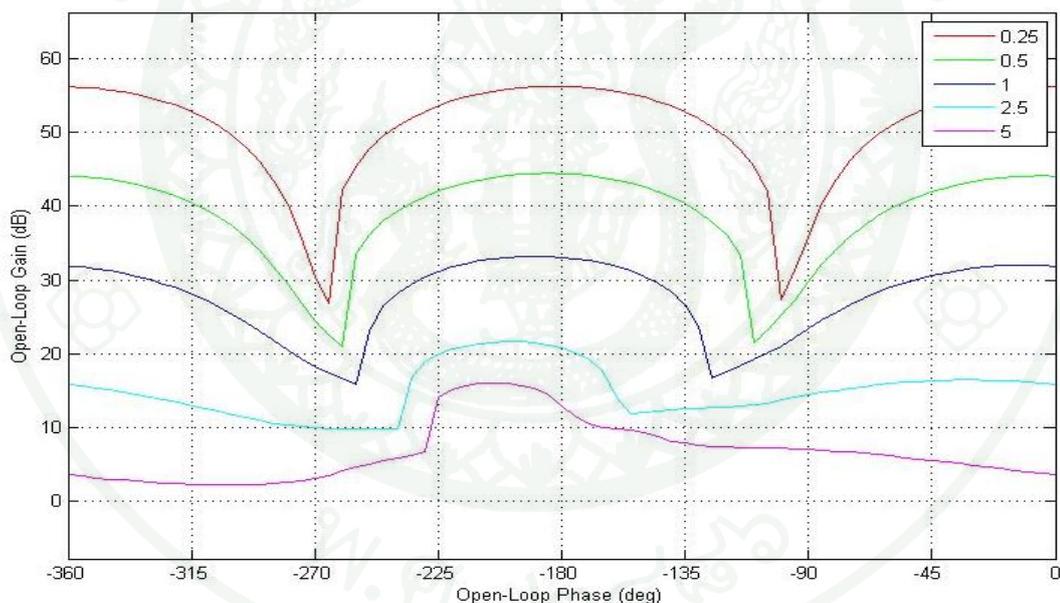
ส่วนเพื่อเกณฑ์:  $\geq 1.83$  (หรือ 5.26 dB)

ส่วนเพื่อเฟส:  $\geq 50$  องศา

จากข้อกำหนดสมรรถนะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของขอบเขตบน และขอบเขตล่างได้ดังสมการที่ (40) และ (41) จากนั้นจึงนำค่าของขอบเขตที่ออกแบบไว้ไปกำหนดจุดลงบนแผนภาพนิโคลส์ดังภาพที่ 22

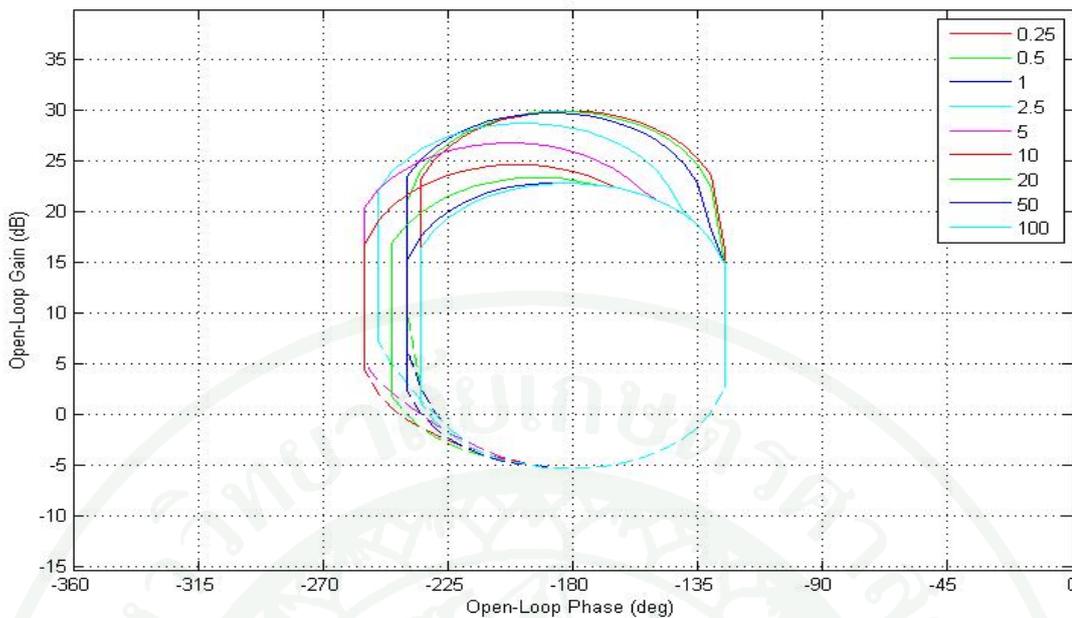
$$W_{up}(s) = \frac{3.427(s+3)}{s^2 + 5s + 10.28} \quad (40)$$

$$W_{low}(s) = \frac{153.8}{s^3 + 17.84s^2 + 93.81s + 153.8} \quad (41)$$



ภาพที่ 22 แผนภาพนิโคลส์แสดงขอบเขตการติดตามสำหรับหุ่นยนต์ 1 แกน

จากข้อกำหนดเสถียรภาพ สามารถกำหนดขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบตามสมการ (7) ได้ เมื่อได้ขอบเขตการติดตามและขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบแล้ว จึงนำไปกำหนดจุดบนแผนภาพนิโคลส์ ซึ่งลักษณะของขอบเขตดังกล่าวลักษณะดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แผนภาพนิโคลส์แสดงขอบเขตเสถียรภาพสำหรับหุ่นยนต์ 1 แกน

เมื่อได้ขอบเขตการติดตามกับขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบเรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องทำการรวมขอบเขตของทั้งสองไว้ด้วยกันและถ้ามีขอบเขตใดที่ซ้ำกันก็จะทำการรวมขอบเขตที่ซ้ำกันเข้าด้วยกัน

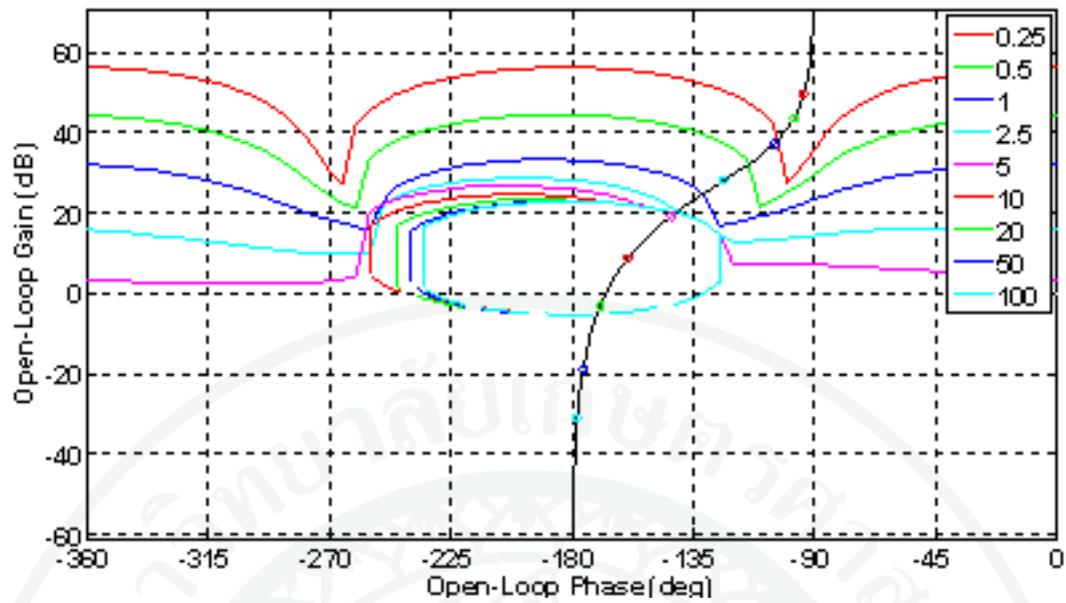
### 3. การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของหุ่นยนต์ 1 แกน

ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการออกแบบตัวควบคุมหลังจากที่ได้ขอบเขตตามที่ต้องการแล้ว ซึ่งวงนอมนัล  $L_o$  ก่อนการออกแบบตัวควบคุมจะมีลักษณะดังภาพที่ 24 และจะทำการเพิ่มค่า Gain:

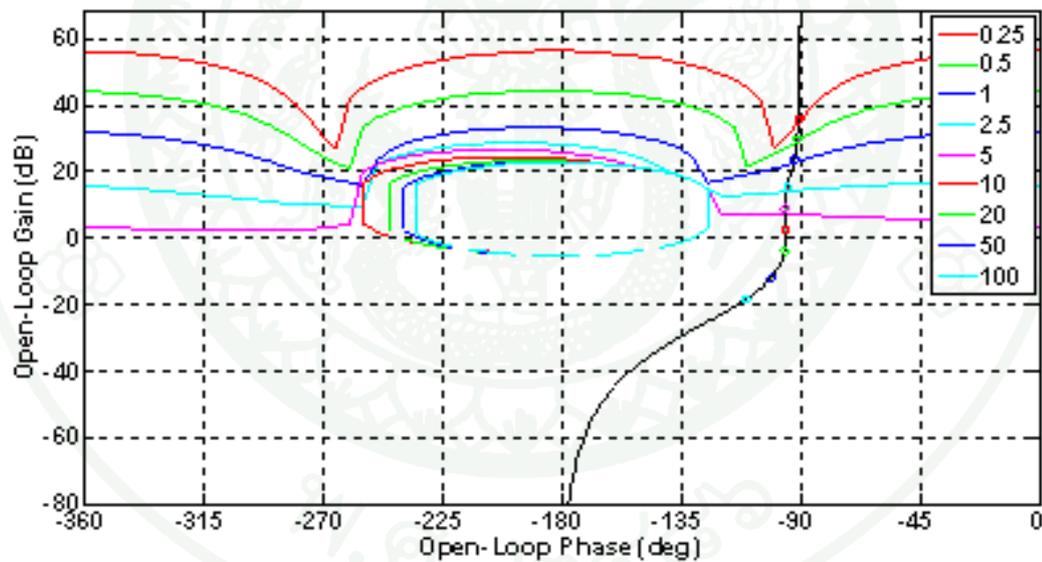
$$K = 0.1835 \text{ หลังจากนั้นจึงใส่ค่าซีโรบนแกนจริง: } \frac{s}{4.5} + 1 \text{ และสุดท้ายใส่ค่าโพลบนแกนจริง:}$$

$$\frac{s}{272.5} + 1 \text{ เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้แล้วจะได้ตัวควบคุม ดังแสดงในสมการที่ 42 และวงนอมนัล } L_o$$

หลังจากออกแบบตัวควบคุมแล้วจะมีลักษณะดังภาพที่ 25



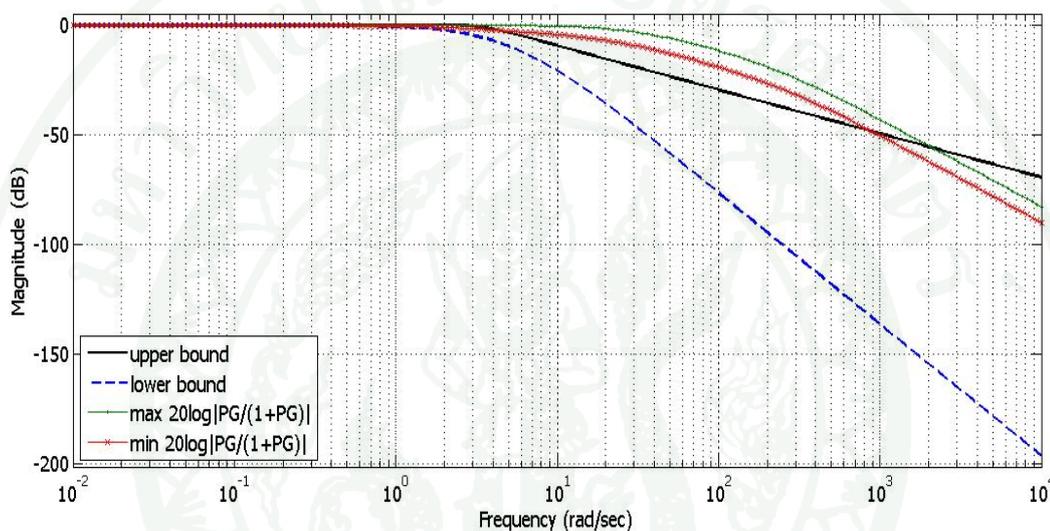
ภาพที่ 24 ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม  $G_1$  ของหุ่นยนต์ 1 แกน



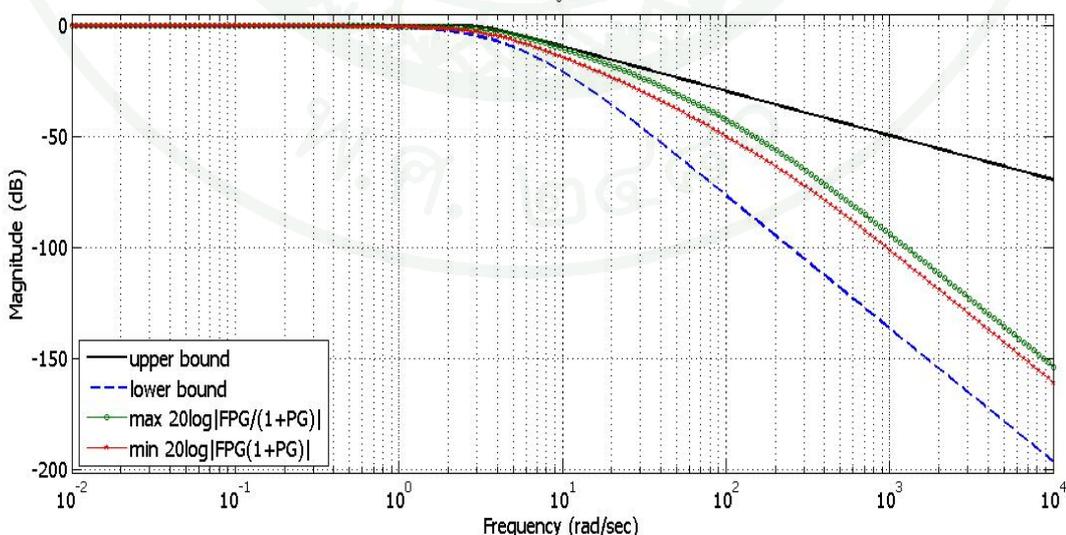
ภาพที่ 25 ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวควบคุม  $G_1$  หุ่นยนต์ 1 แกน

$$G_1(s) = \frac{0.1835\left(\frac{s}{4.5} + 1\right)}{\frac{s}{272.5} + 1} \quad (42)$$

เมื่อออกแบบตัวควบคุม  $G_1$  เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวกรอง  $F_1$  ซึ่งในภาพที่ 25 จะแสดงลักษณะผลตอบสนองบนแผนภาพโบเดก่อนการออกแบบตัวกรอง จากนั้นจึงทำการใส่ค่าซีโรบนแกนจริง:  $\frac{s}{7} + 1$  และค่าโพลเชิงซ้อน:  $\frac{1}{20.25}s^2 + \frac{1.72}{4.5}s + 1$  และจะแสดงลักษณะของผลตอบสนองหลังจากการออกแบบตัวกรองดังภาพที่ 25 และสมการของตัวกรองจะมีลักษณะดังสมการที่ (43)



ภาพที่ 26 ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวกรอง  $F_1$  ของหุ่นยนต์ 1 แกน



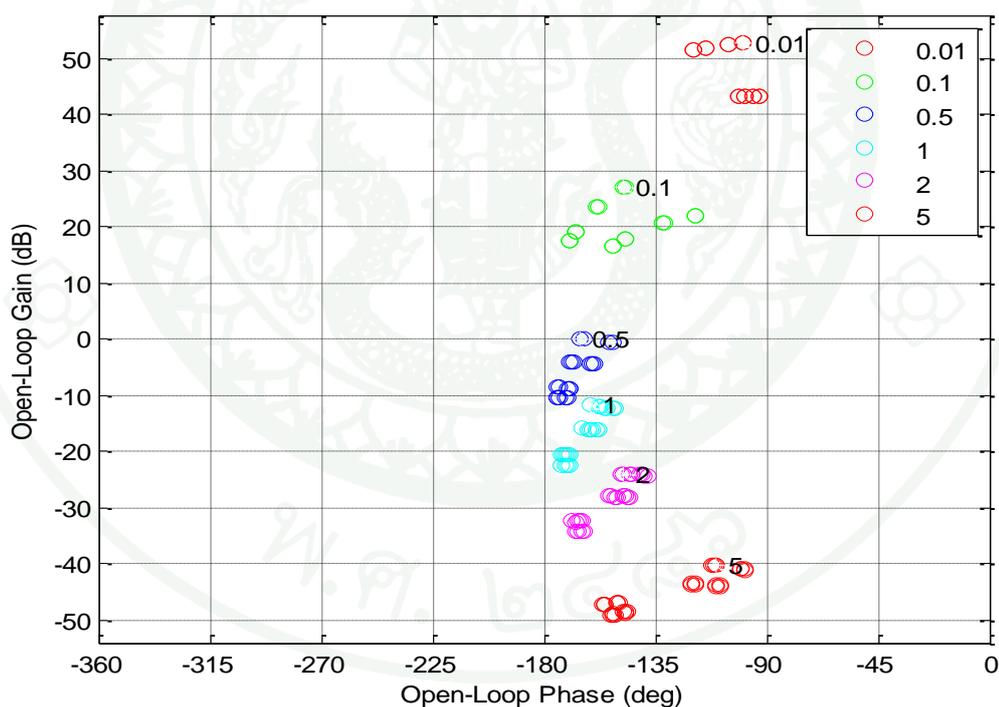
ภาพที่ 27 ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวกรอง  $F_1$  ของหุ่นยนต์ 1 แกน

$$F_1(s) = \frac{\frac{s}{7} + 1}{\frac{1}{20.25}s^2 + \frac{1.72}{4.5}s + 1} \quad (43)$$

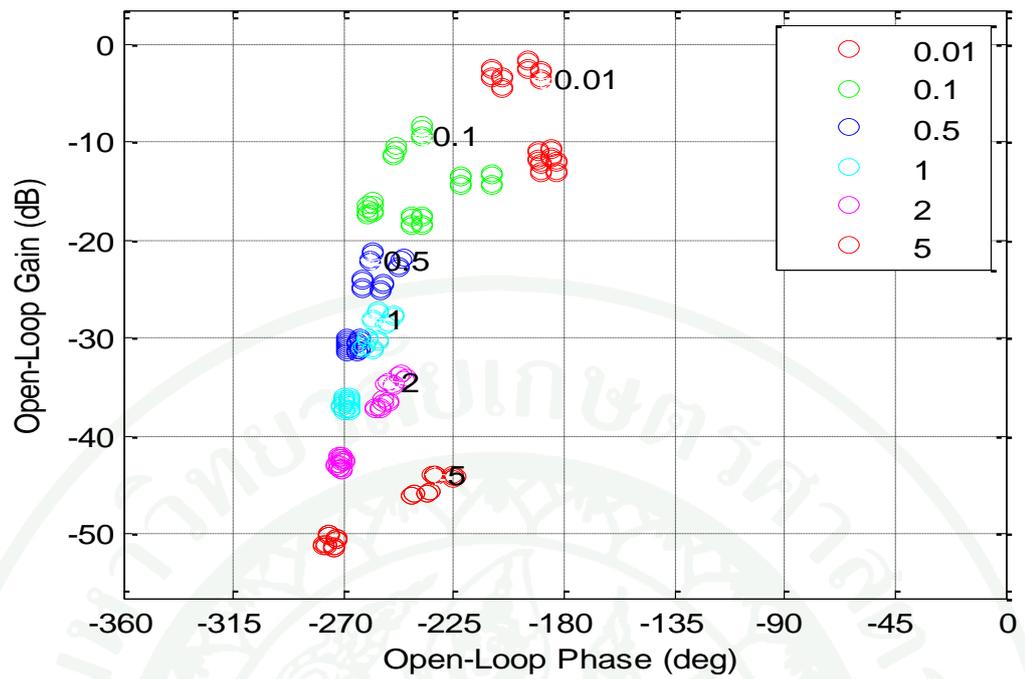
### การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของหุ่นยนต์สการา

#### 1. การสร้างแผนแบบพลานต์ของหุ่นยนต์สการา

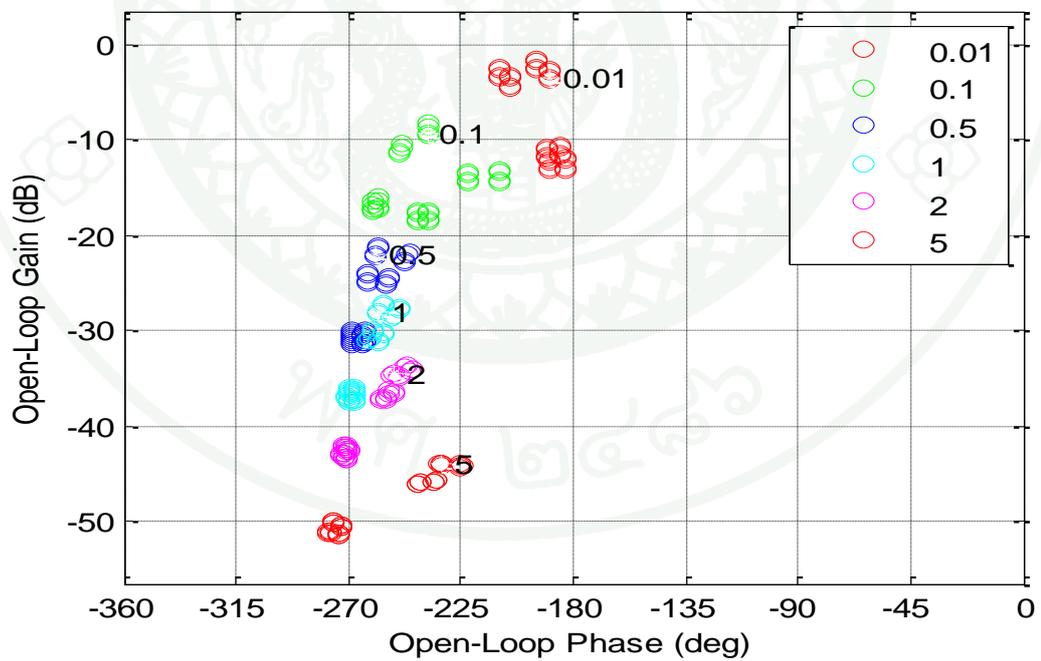
จากการหาเอกลักษณ์ของระบบ นำสมการที่ (37) และนำช่วงของความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้หามาแล้ว มาทำการกำหนดจุดลงบนแผนภาพนิโคลส์ในแต่ละความถี่ที่สนใจ พร้อมทั้งเลือกนอมนัลพลานต์ ที่ตำแหน่ง  $\theta_1 = 1.4$ ,  $\theta_2 = 1.2$ ,  $\theta_3 = 5.6$ ,  $\nu_1 = 0.23$  และ  $\nu_2 = 43.96$  เพื่อเป็นพลาตันนอมนัลในการออกแบบตัวควบคุม



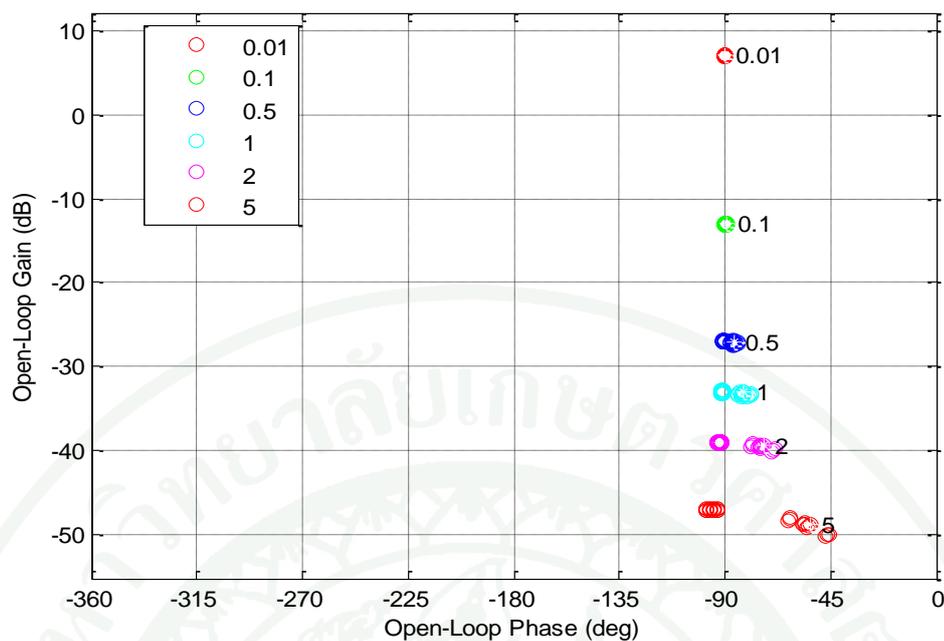
ภาพที่ 28 แผนแบบพลานต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง  $P_{11}$



ภาพที่ 29 แผ่นแบบพลานต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง  $P_{12}$



ภาพที่ 30 แผ่นแบบพลานต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง  $P_{21}$



ภาพที่ 31 แผ่นแบบพลานต์บนแผนภาพนิโคลส์สำหรับตำแหน่ง  $P_{22}$

## 2. การกำหนดคุณสมบัติและการสร้างขอบเขตคุณสมบัติของหุ่นยนต์ศการา

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปดังภาพที่ 2 โดยที่ระบบที่จะทำการออกแบบนั้นเป็นแบบ MIMO ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $2 \times 2$

ซึ่งจะทำการออกแบบตัวควบคุม  $G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_2 \end{bmatrix}$  และออกแบบตัวกรอง  $F = \begin{bmatrix} f_1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{bmatrix}$  โดยที่

ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นของพลานต์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$$

และกำหนดให้

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix}$$

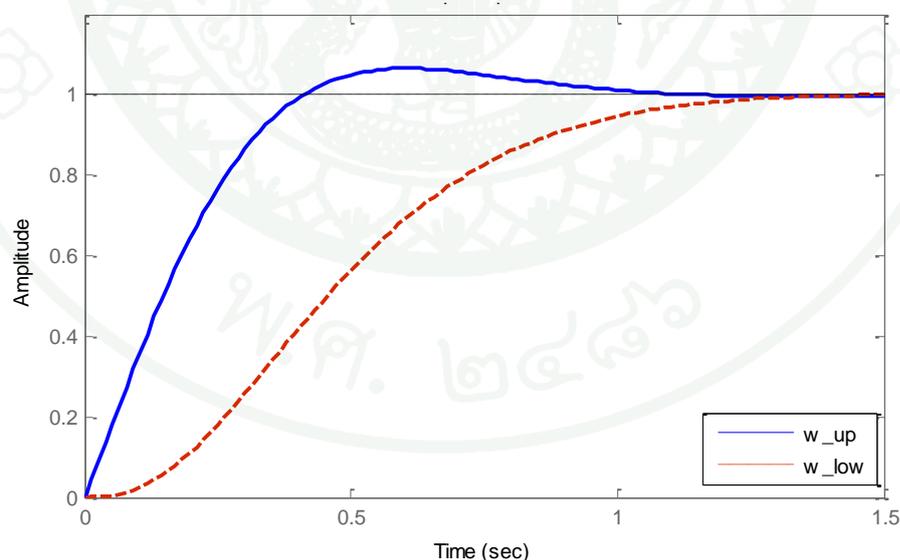
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบคุณสมบัติในโดเมนความถี่ 4 คุณสมบัติดังนี้ 1. ขอบเขตการติดตาม 2. ขอบเขตเสถียรภาพ 3. การจัดสัญญาณสิ่งรบกวนที่ด้านเข้าของระบบ 4. การจัดสัญญาณสิ่งรบกวนที่ด้านออกของระบบ

## 2.1) ขอบเขตการติดตาม

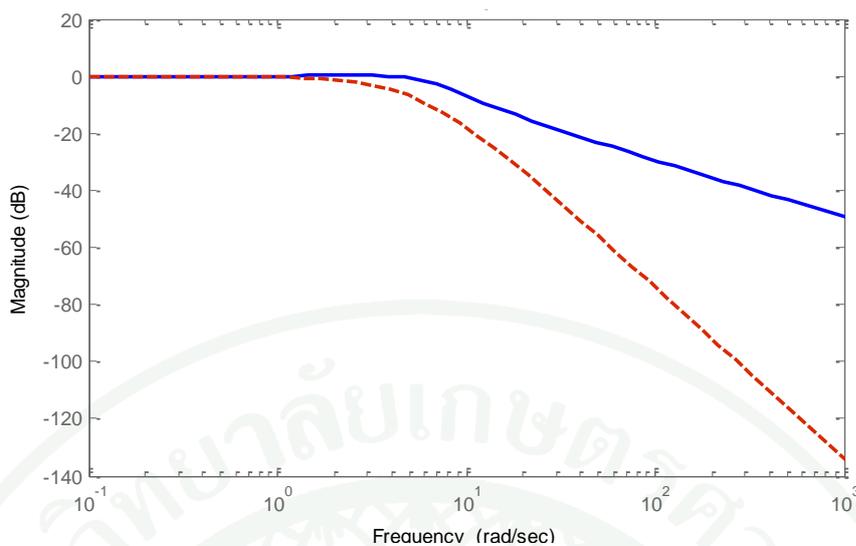
ในการวิเคราะห์และกำหนดขอบเขตการติดตามนั้นจะใช้ภาพที่ 2 และสมการที่ 10 มาใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้คุณสมบัติของระบบมีค่าดังนี้ ค่าพุงเกินน้อยกว่า 10% และมีค่าเวลาเข้าที่น้อยกว่า 1 วินาที ซึ่งจากการกำหนดคุณสมบัติดังกล่าวสามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของขอบเขตบนกับขอบเขตล่างได้ดังสมการที่ (44) และ (45) และสามารถแสดงผลตอบสนองทางด้านโดเมนเวลาในภาพที่ 32 และแสดงผลตอบสนองทางความถี่ในภาพที่ 33

$$W_{up} = \frac{3.36(s+10)}{s^2 + 8s + 33.6} \quad (44)$$

$$W_{low} = \frac{200.9}{s^3 + 18s^2 + 100.1s + 200.9} \quad (45)$$



ภาพที่ 32 ขอบเขตการติดตามบนโดเมนเวลา



ภาพที่ 33 ขอบเขตการติดตามบนโดเมนความถี่

จากภาพที่ 2 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณอ้างอิงของระบบถึงสัญญาณขาออกเมื่อ  $H = 1$  คือ

$$\frac{Y}{R} = T_r = \frac{PG}{I + PG} F \quad (46)$$

$$(I + PG)T_r = PGF \quad (47)$$

จากสมการที่ (47) คูณด้วย  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\beta_{21} & 1 \\ \beta_{11} + g_1 & 1 \end{bmatrix} P^{-1}$  ทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} + g_1 & \beta_{12} \\ 0 & \beta_{22} + g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{r11} & t_{r12} \\ t_{r21} & t_{r22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ -\beta_{21} & g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{bmatrix} \quad (48)$$

จากสมการที่ (48) สามารถหาสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละตำแหน่งดังนี้

$$t_{r11} = \frac{g_1 f_1 - \beta_{12} t_{r21}}{\beta_{11} + g_1} \quad (49)$$

$$t_{r12} = \frac{-\beta_{12}t_{r22}}{\beta_{11} + g_1} \quad (50)$$

$$t_{r21} = \frac{-\beta_{21}^*f_1}{\beta_{22}^* + g_2} \quad (51)$$

$$t_{r22} = \frac{g_2f_2}{\beta_{22}^* + g_2} \quad (52)$$

โดย

$$\beta_{21}^* = \beta_{21} - \frac{\beta_{21}\beta_{11}}{\beta_{11} + g_1} = \frac{\beta_{21}g_1}{\beta_{11} + g_1}$$

$$\beta_{22}^* = \beta_{22} - \frac{\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1}$$

ดังนั้นคุณสมบัติของขอบเขตการติดตามของระบบ คือ

$$W_{lowij} \leq |t_{rij}| \leq W_{upij}; \quad i, j = 1, 2 \quad (53)$$

โดย

$W_{lowij}$  คือ ค่าขอบเขตล่าง

$W_{upij}$  คือ ค่าขอบเขตบน

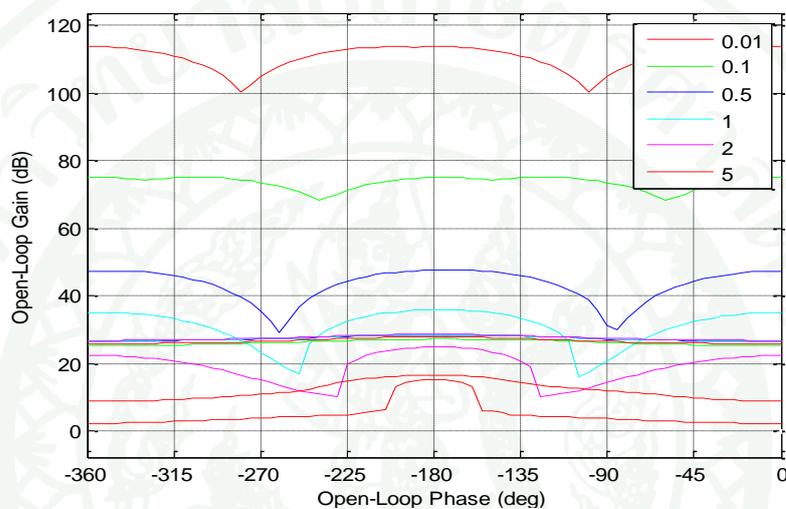
$$W_{low11} \leq \left| \frac{|g_1f_1| \pm |\beta_{12}|W_{up21}}{\beta_{11} + g_1} \right| \leq W_{up11} \quad (54)$$

$$W_{low12} \leq \left| \frac{\pm |\beta_{12}|W_{up22}}{\beta_{11} + g_1} \right| \leq W_{up11} \quad (55)$$

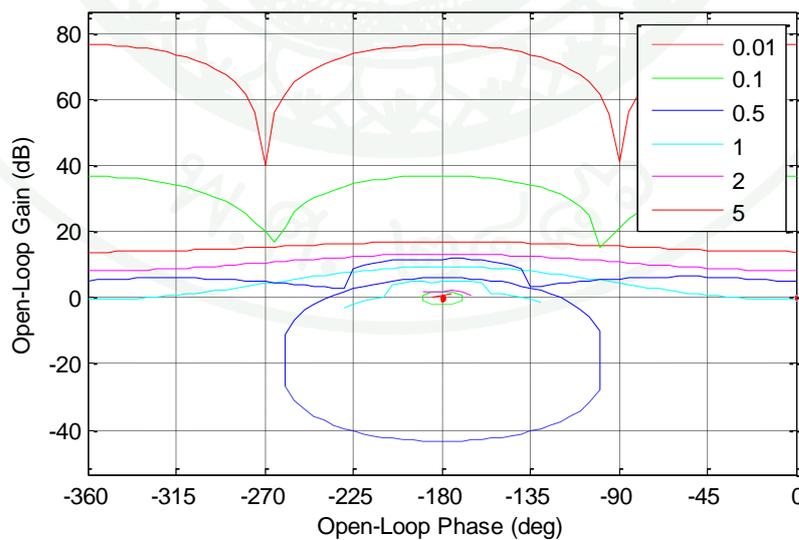
$$W_{low21} \leq \left| \frac{\frac{-\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1}(g_1f_1)}{\frac{-\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1}\beta_{12} + \beta_{22} + g_2} \right| \leq W_{up21} \quad (56)$$

$$W_{low22} \leq \left| \frac{g_2 f_2}{\frac{-\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1} \beta_{12} + \beta_{22} + g_2} \right| \leq W_{up22} \quad (57)$$

จากคุณสมบัติบนโดเมนเวลาตามที่กำหนดสามารถนำมาสร้างขอบเขตบนแผนภาพนิโคลส์  
เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  กับ  $g_2$  ดังภาพที่ 34 และภาพที่ 35



ภาพที่ 34 ขอบเขตการติดตามสำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$



ภาพที่ 35 ขอบเขตการติดตามสำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$

2.2) การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ (Plant-input disturbance rejection)

จากภาพที่ 2 สามารถวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบถึงสัญญาณขาออกของระบบ เมื่อ  $H = 1$  คือ

$$\frac{Y}{D_I} = T_{DI} = \frac{P}{I + PG} \quad (58)$$

$$(I + PG)T_{DI} = P \quad (59)$$

จากสมการที่ (59) คูณด้วย  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\beta_{21} & 1 \\ \beta_{11} + g_1 & 1 \end{bmatrix} P^{-1}$  ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} + g_1 & \beta_{12} \\ 0 & \frac{-\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} + g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{DI11} & t_{DI12} \\ t_{DI21} & t_{DI22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\beta_{21} & g_2 \\ \beta_{11} + g_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (60)$$

จากสมการที่ (60) สามารถหาสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละตำแหน่งดังนี้

$$t_{DI11} = \frac{1 + \beta_{12}t_{DI21}}{\beta_{11} + g_1} \quad (61)$$

$$t_{DI12} = \frac{-\beta_{12}t_{DI22}}{\beta_{11} + g_1} \quad (62)$$

$$t_{DI21} = \frac{\frac{-\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1}}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} + g_2} \quad (63)$$

$$t_{DI22} = \frac{1}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} + g_2} \quad (64)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนในตำแหน่งต่าง ๆ นั้น การออกแบบต้องการให้ผลกระทบของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบต่อสัญญาณขาออกมีค่าน้อย ดังนั้นคุณสมบัติการขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ คือ

$$0 \leq |t_{DIj}| \leq W_{DIj}; \quad i, j = 1, 2 \quad (65)$$

โดย

$W_{DIj}$  คือ ค่าคงที่ ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า  $W_{DIj} = 0.1$  เมื่อแทนค่าสมการที่ (61), (62), (63) และ (64) ลงในสมการที่ (65) จะได้สมการใหม่ดังต่อไปนี้

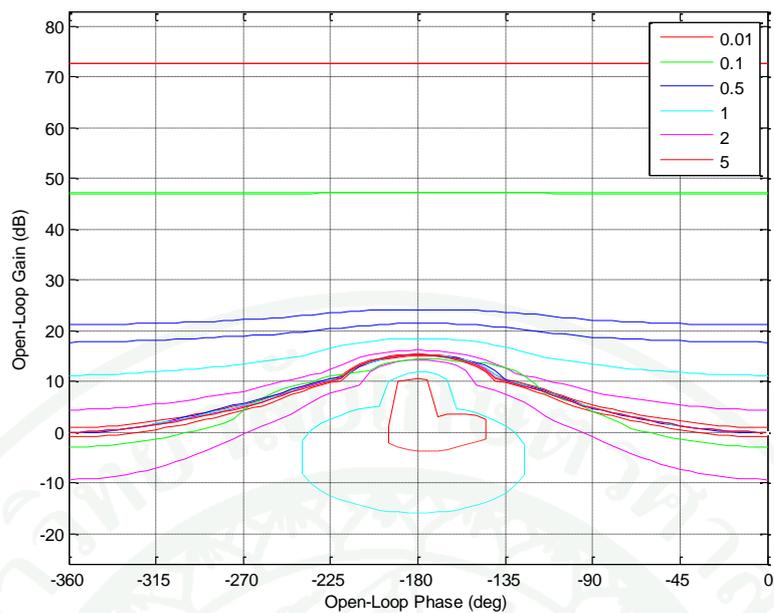
$$0 \leq \left| \frac{1 \pm |\beta_{12}| W_{DI21}}{\beta_{11} + g_1} \right| \leq W_{DI11} \quad (66)$$

$$0 \leq \left| \frac{\pm |\beta_{12}| W_{DI22}}{\beta_{11} + g_1} \right| \leq W_{DI12} \quad (67)$$

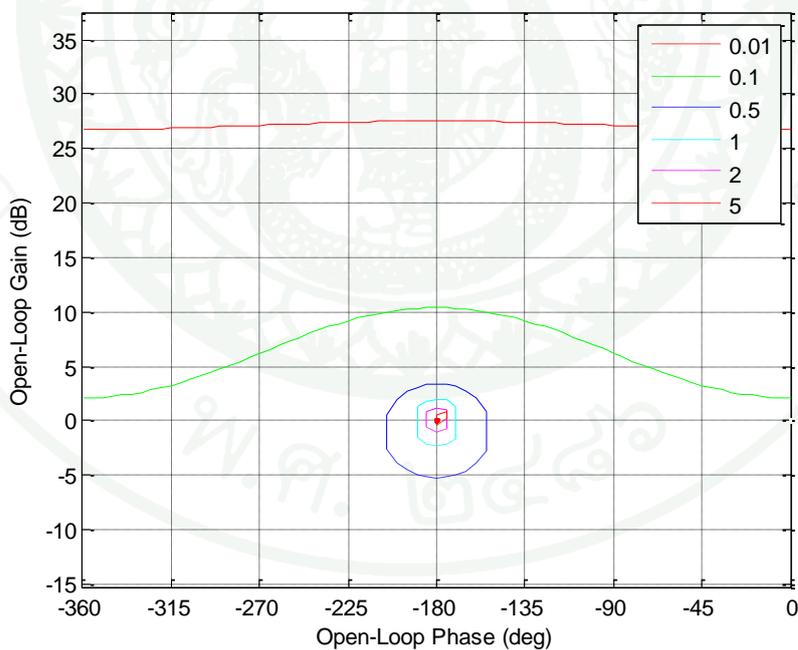
$$0 \leq \left| \frac{\frac{-\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1}}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12} + \beta_{22} + g_2}{\beta_{11} + g_1}} \right| \leq W_{DI21} \quad (68)$$

$$0 \leq \left| \frac{1}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12} + \beta_{22} + g_2}{\beta_{11} + g_1}} \right| \leq W_{DI22} \quad (69)$$

จากนั้นจะนำสมการที่ (66) ถึงสมการที่ (69) ไปสร้างขอบเขตบนแผนภาพนิโคลส์เพื่อใช้ในการออกแบบตัวคุม ซึ่งจะใช้สมการที่ (66) กับ (67) ไปใช้ในการสร้างขอบเขตเพื่อออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  ซึ่งจะมีลักษณะดังภาพที่ 36 และใช้สมการที่ (68) กับ (69) ไปใช้ในการสร้างขอบเขตเพื่อออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  และมีลักษณะดังภาพที่ 37 โดยในการสร้างขอบเขตเพื่อขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ ในช่วงความถี่  $\omega = [0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 5]$  เรเดียน/วินาที



ภาพที่ 36 ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$



ภาพที่ 37 ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$

2.3) การกำจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ (Plant-output disturbance rejection)

จากภาพที่ 2 สามารถหาสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบถึงสัญญาณขาออกของระบบเมื่อ  $H = 1$  คือ

$$\frac{Y}{D_o} = T_{DO} = \frac{1}{I + PG} \quad (70)$$

$$(I + PG)T_{DO} = 1 \quad (71)$$

จากสมการที่ (71) คูณด้วย  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1} & 1 \end{bmatrix} P^{-1}$  ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} + g_1 & \beta_{12} \\ 0 & \frac{-\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} + g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{DO11} & t_{DO12} \\ t_{DO21} & t_{DO22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \frac{-\beta_{21}\beta_{11}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{21} & \frac{-\beta_{21}\beta_{11}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} \end{bmatrix} \quad (72)$$

จากสมการที่ (72) สามารถหาสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละตำแหน่งดังนี้

$$t_{DO11} = \frac{\beta_{11} - \beta_{12}t_{DO21}}{\beta_{11} + g_1} \quad (73)$$

$$t_{DO12} = \frac{\beta_{12} - \beta_{12}t_{DO22}}{\beta_{11} + g_1} \quad (74)$$

$$t_{DO21} = \frac{\frac{-\beta_{21}\beta_{11}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{21}}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} + g_2} \quad (75)$$

$$t_{DO22} = \frac{\frac{-\beta_{21}\beta_{11}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{21}}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{11} + g_1} + \beta_{22} + g_2} \quad (76)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนในตำแหน่งต่าง ๆ นั้น การออกแบบต้องการให้ผลกระทบของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบต่อสัญญาณขาออกมีค่าน้อย ดังนั้นคุณสมบัติการขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ คือ

$$0 \leq |t_{DOij}| \leq W_{DOij}; \quad i, j = 1, 2 \quad (77)$$

โดย

$W_{DOij}$  คือ ค่าคงที่ ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า  $W_{DOij} = 0.1$  เมื่อแทนค่าสมการที่ (73), (74), (75) และ (76) ลงในสมการที่ (77) จะได้สมการใหม่ดังต่อไปนี้

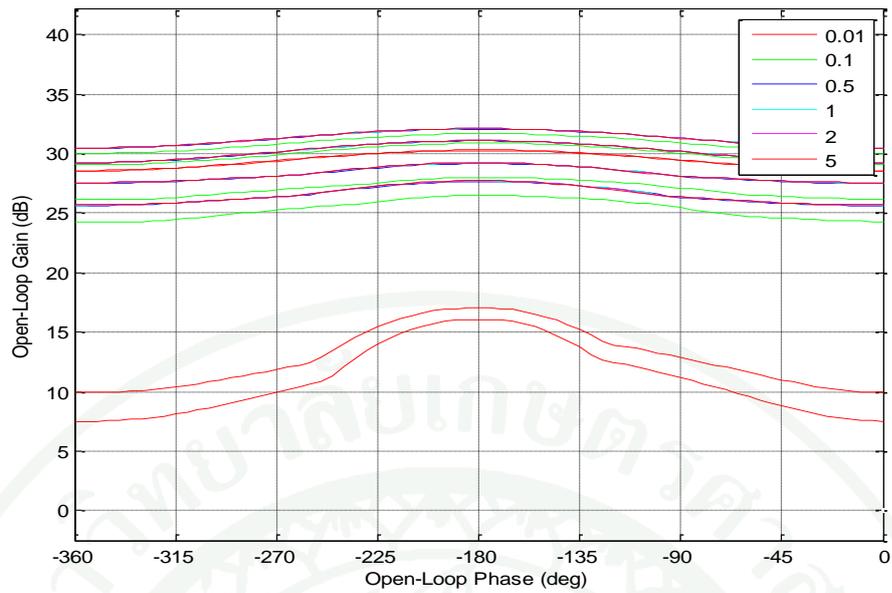
$$0 \leq \left| \frac{\beta_{11} \pm |\beta_{12}| W_{DO21}}{\beta_{11} + g_1} \right| \leq W_{DO11} \quad (78)$$

$$0 \leq \left| \frac{\beta_{12} \pm |\beta_{12}| W_{DO22}}{\beta_{11} + g_1} \right| \leq W_{DO12} \quad (79)$$

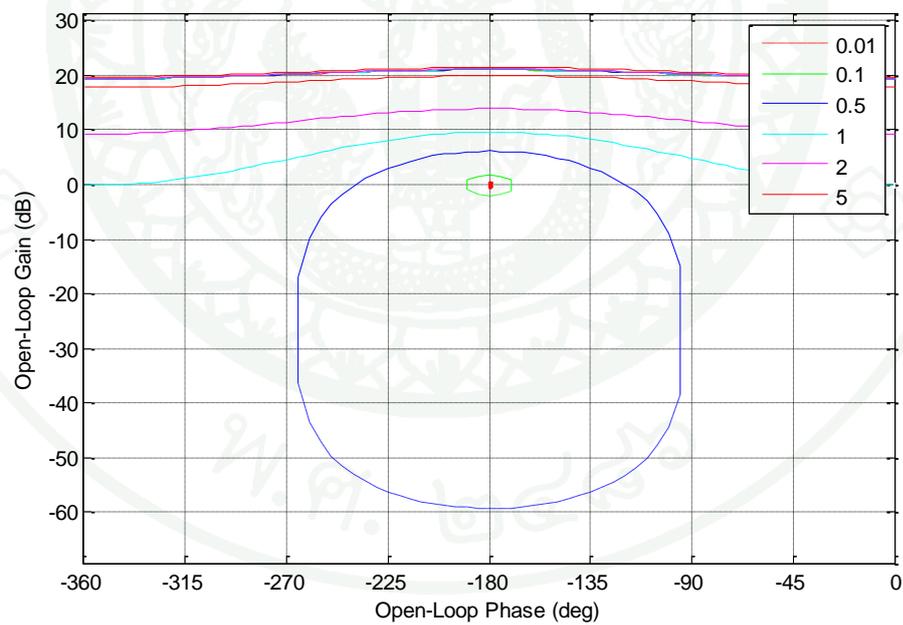
$$0 \leq \left| \frac{\frac{-\beta_{21}\beta_{11} + \beta_{21}}{\beta_{11} + g_1}}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12} + \beta_{22} + g_2}{\beta_{11} + g_1}} \right| \leq W_{DO21} \quad (80)$$

$$0 \leq \left| \frac{\frac{-\beta_{21}\beta_{12} + \beta_{22}}{\beta_{11} + g_1}}{\frac{-\beta_{21}\beta_{12} + \beta_{22} + g_2}{\beta_{11} + g_1}} \right| \leq W_{DO22} \quad (81)$$

จากนั้นจะนำสมการที่ (78) ถึงสมการที่ (81) ไปสร้างขอบเขตบนแผนภาพนิโคลส์เพื่อใช้ในการออกแบบตัวคุม ซึ่งจะใช้สมการที่ (78) กับ (79) ไปใช้ในการสร้างขอบเขตเพื่อออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  ซึ่งจะมีลักษณะดังภาพที่ 38 และใช้สมการที่ (80) กับ (81) ไปใช้ในการสร้างขอบเขตเพื่อออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  และมีลักษณะดังภาพที่ 39 โดยในการสร้างขอบเขตเพื่อขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ ในช่วงความถี่  $\omega = [0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 5]$  เรเดียน/วินาที



ภาพที่ 38 ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$



ภาพที่ 39 ขอบเขตของสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$

2.4) ขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบ

สำหรับระบบที่มีหลายสัญญาณขาเข้าและหลายสัญญาณขาออก (MIMO) นั้นจะพิจารณาจากสมการที่ (82) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้เพื่อกำหนดขอบเขตของส่วนเพื่อเสถียรภาพ คือ

$$\left| \frac{L_r}{1+L_r} \right| = M_{mr} \tag{82}$$

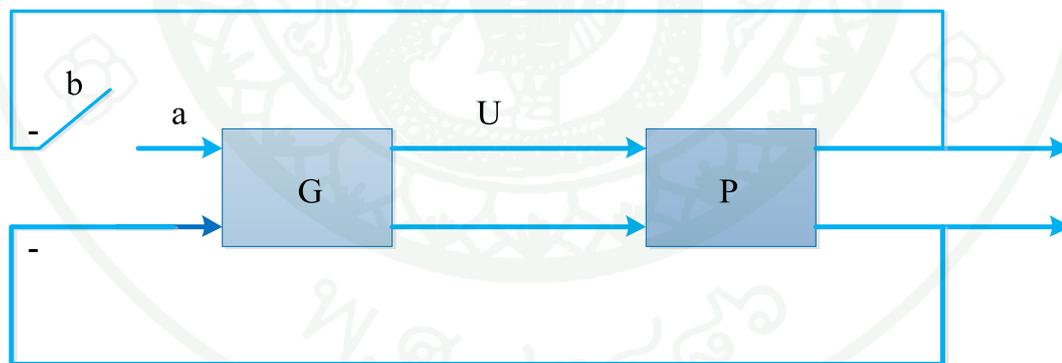
โดย

$L_r$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

$M_{mr}$  คือ ขอบเขตของช่องสัญญาณ

$r$  คือ ช่องสัญญาณ

ภาพที่ 40 แสดงการหา  $L_1$  ทำการหาวงฟังก์ชันถ่ายโอนจาก b ถึง a โดยการปิดช่องสัญญาณ  $L_2$  สำหรับการหา  $L_2$  ทำการหาโดยลักษณะเดียวกับค่า  $L_1$  โดยที่ระบบมีลักษณะเป็นแบบ  $2 \times 2$



ภาพที่ 40 แผนภาพสำหรับการคำนวณหา  $L_1$

$$L_1 = \frac{g_1}{\beta_{11} - \frac{\beta_{21}\beta_{12}}{\beta_{12} + g_2}} = \frac{g_1(p_{11} + g_2 \det P)}{1 + p_{22}g_2} \tag{83}$$

$$L_2 = \frac{g_2}{\beta_{22} - \frac{\beta_{12}\beta_{21}}{\beta_{11} + g_1}} = \frac{g_2(p_{22} + g_1 \det P)}{1 + p_{11}g_1} \quad (84)$$

ดังนั้นคุณสมบัติของขอบเขต  $L_1$  คือ

$$\left| \frac{\frac{g_1(p_{11} + g_2 \det P)}{1 + p_{22}g_2}}{1 + \frac{g_1(p_{11} + g_2 \det P)}{1 + p_{22}g_2}} \right| \leq M_{m1} \quad (85)$$

จากสมการที่ (83) พบว่าคุณสมบัติของขอบเขตของ  $L_1$  เป็นฟังก์ชันของตัวควบคุม  $g_2$  แต่ในการการออกแบบนั้นจะต้องทำการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  ก่อน เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันของขอบเขตคุณสมบัติอื่นๆ ดังนั้นจากสมการที่ (85) จะได้สมการดังต่อไปนี้

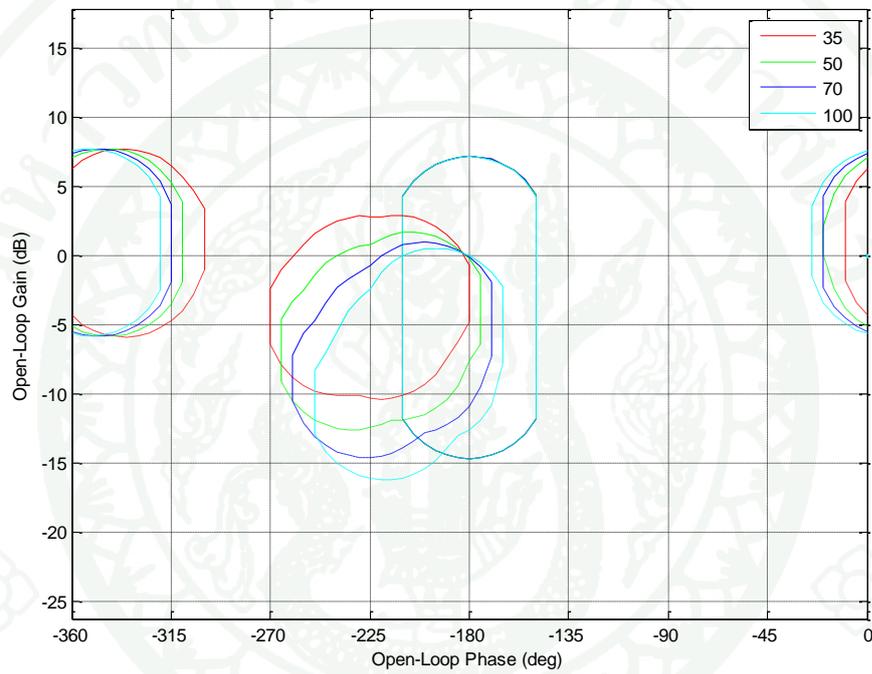
$$\lim_{|g_2| \rightarrow \infty} \left| \frac{L_1}{1 + L_1} \right| = \left| \frac{g_1 / \beta_{11}}{1 + g_1 / \beta_{11}} \right| \leq M_{m1} \quad (86)$$

$$\lim_{|g_2| \rightarrow 0} \left| \frac{L_1}{1 + L_1} \right| = \left| \frac{g_1 p_{11}}{1 + g_1 p_{11}} \right| \leq M_{m1} \quad (87)$$

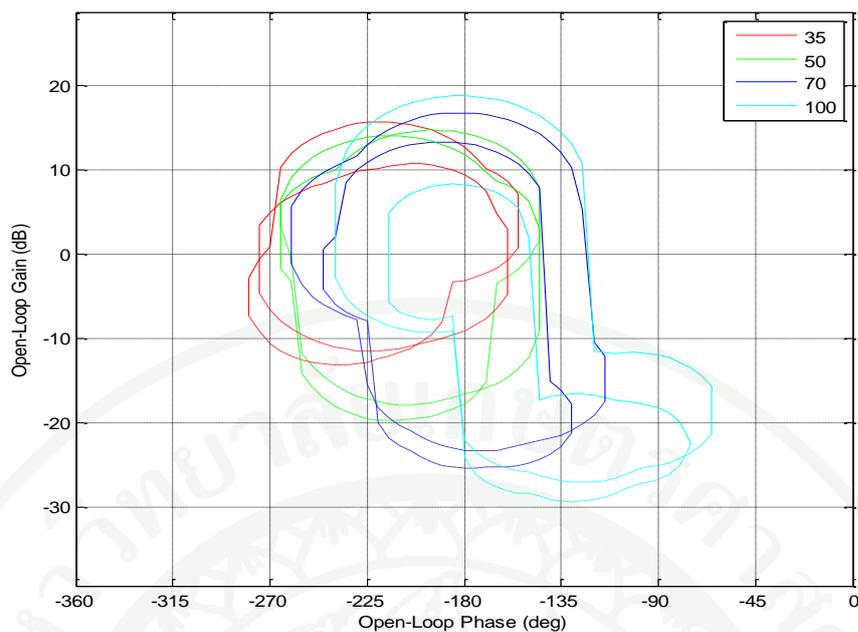
เพราะฉะนั้นแล้วในการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  คุณสมบัติของขอบเขตของเสถียรภาพ คือ สมการ (86) และสมการ (87) สำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  คุณสมบัติของขอบเขตของเสถียรภาพ คือ สมการ (85) และสมการ (88) โดยในการออกแบบนั้นกำหนดค่าขอบเขตของส่วนเพื่อเสถียรภาพ  $M_{m1} = M_{m2} = 5 \text{ dB}$  จากนั้นนำมาสร้างขอบเขตบนแผนภาพนิโคลส์ที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  และ  $g_2$  ดังแสดงในภาพที่ 41 และ 42 โดยจะทำการสร้างขอบเขตเสถียรภาพของระบบ ในช่วงความถี่  $\omega = [35, 50, 70, 100]$  เรเดียน/วินาที

$$\left| \frac{\frac{g_2(p_{22} + g_1 \det P)}{1 + p_{11}g_1}}{1 + \frac{g_2(p_{22} + g_1 \det P)}{1 + p_{11}g_1}} \right| \leq M_{m2}$$

$$\left| \frac{g_2(p_{22} + g_1 \det P)}{1 + p_{11}g_1 + g_2(p_{22} + g_1 \det P)} \right| \leq M_{m2} \quad (88)$$

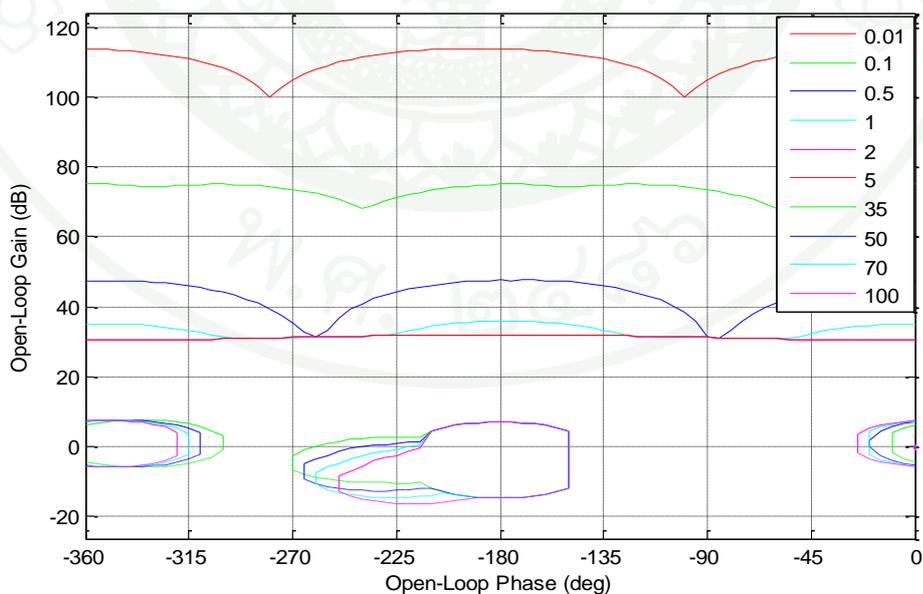


ภาพที่ 41 ขอบเขตเสถียรภาพสำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$

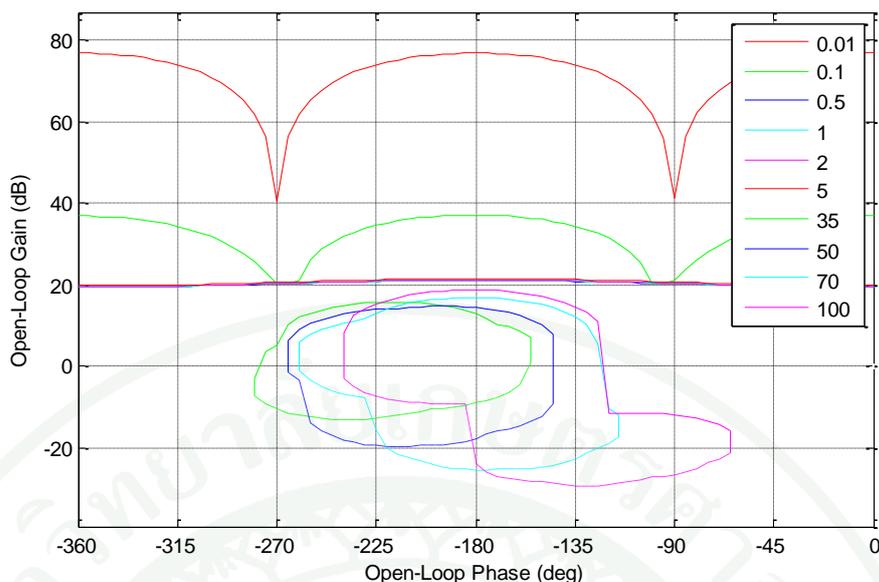


ภาพที่ 42 ขอบเขตเสถียรภาพสำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$

จากขั้นตอนในการหาขอบเขตของคุณสมบัติทั้งหมดที่ต้องการออกแบบแล้ว จากนั้นจึงทำการรวมขอบเขตคุณสมบัติทั้งหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งได้แสดงไว้ในภาพที่ 43 และ 44 และจะนำพลาตันต์นอมนัลที่ได้เลือกไว้ข้างต้นมาใช้งานเพื่อทำการออกแบบตัวควบคุม



ภาพที่ 43 ขอบเขตที่ทับซ้อนกันสำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$



ภาพที่ 44 ขอบเขตที่ทับซ้อนกันสำหรับการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$

### 3. การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของหุ่นยนต์ศกร

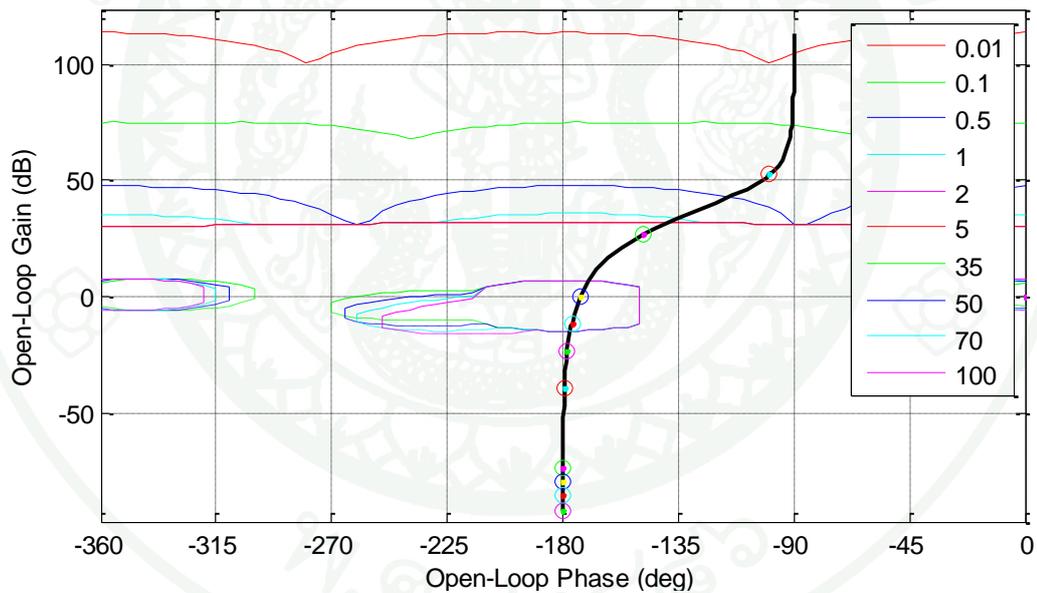
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการที่สำคัญในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งเรียกว่า กระบวนการจัดสัญญาณรบกวน ซึ่งในการออกแบบจะทำการออกแบบให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเปิด  $L_o = GP_o$  ในแต่ละความถี่ให้อยู่ในขอบเขตของคุณสมบัติต่างๆตามที่ได้กำหนดไว้แล้ว โดยจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาใช้ในการออกแบบ สำหรับขั้นตอนในการออกแบบนั้นจะเริ่มจากการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  และออกแบบตัวกรอง  $f_1$  จากนั้นจึงค่อยไปออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  และออกแบบตัวกรอง  $f_2$  เป็นลำดับถัดไป

จากภาพที่ 45 ได้แสดงถึงลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองในแต่ละความถี่นั้นไม่สอดคล้องกับขอบเขตของคุณสมบัติที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุม โดยทำการใส่ค่าอัตราขยาย  $K : 6050$ , ค่าซีโรบนแกนจริง :  $\frac{s}{20} + 1$  และค่าโพลบนแกนจริง :  $\frac{s}{89} + 1$  เพราะฉะนั้นจะได้สมการของตัวควบคุม  $g_1$  ดังสมการที่ (88) และมีลักษณะผลตอบสนองหลังการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  ดังภาพที่ 46

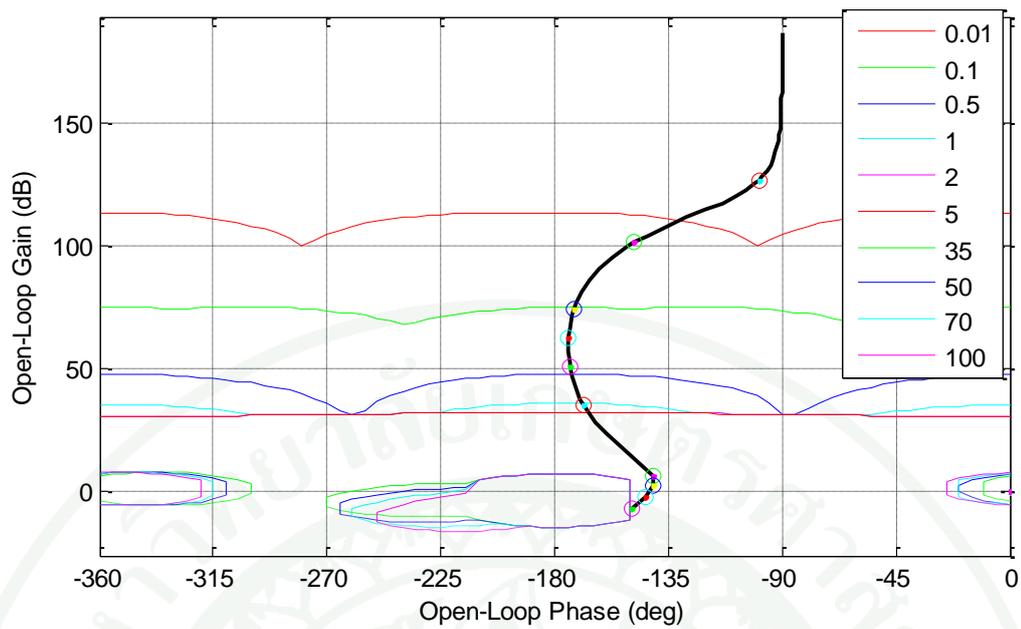
$$g_1 = 6050 \frac{\left(\frac{s}{20} + 1\right)}{\left(\frac{s}{89} + 1\right)} \quad (88)$$

เมื่อออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวกรอง  $f_1$  ซึ่งในภาพที่ 47 จะแสดงลักษณะผลตอบสนองบนแผนภาพโบเดก่อนการออกแบบตัวกรอง จากนั้นจึงทำการใส่ค่าโพลบนแกนจริง :  $\frac{s}{5} + 1$  และจะแสดงลักษณะผลตอบสนองหลังจากการออกแบบตัวกรอง ดังภาพที่ 48 และสมการของตัวกรองจะมีลักษณะดังสมการที่ (89)

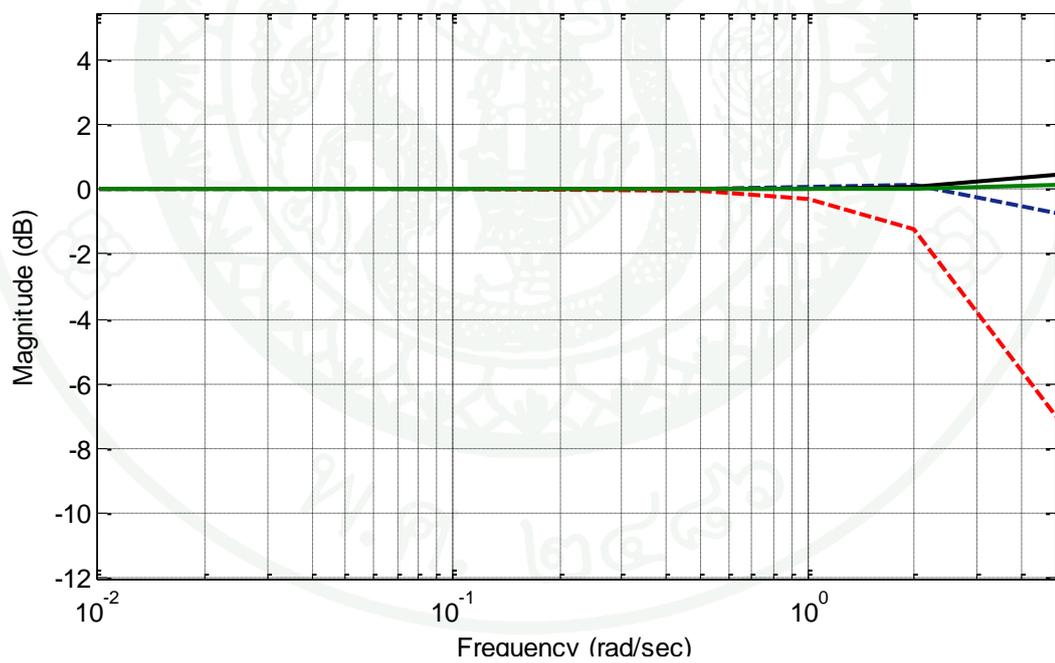
$$f_1 = \frac{1}{\frac{s}{5} + 1} \quad (89)$$



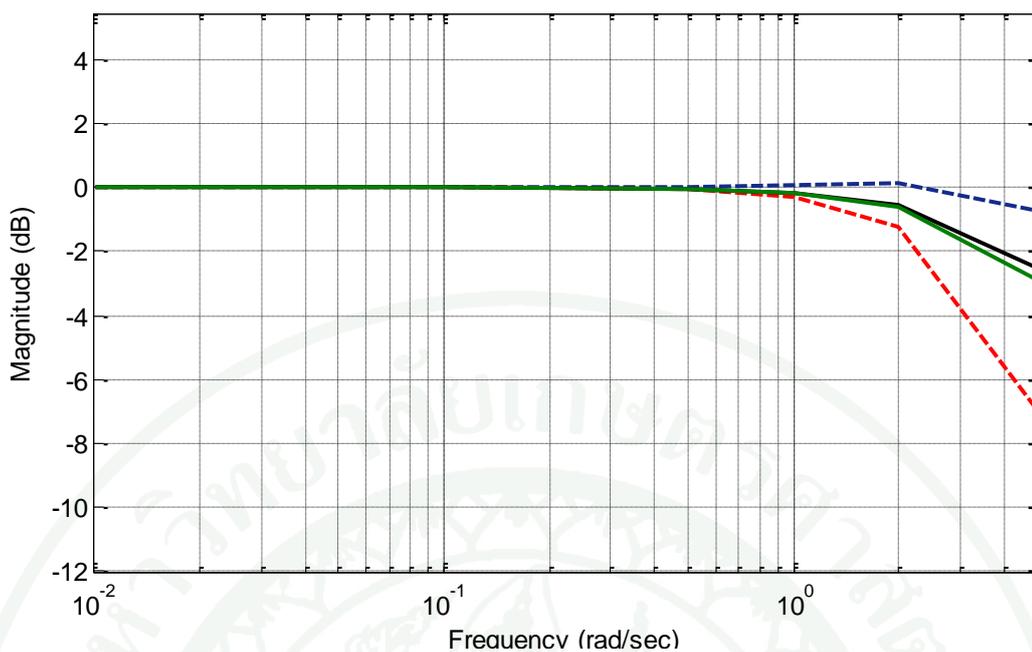
ภาพที่ 45 ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$



ภาพที่ 46 ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวควบคุม  $g_1$



ภาพที่ 47 ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวกรอง  $f_1$



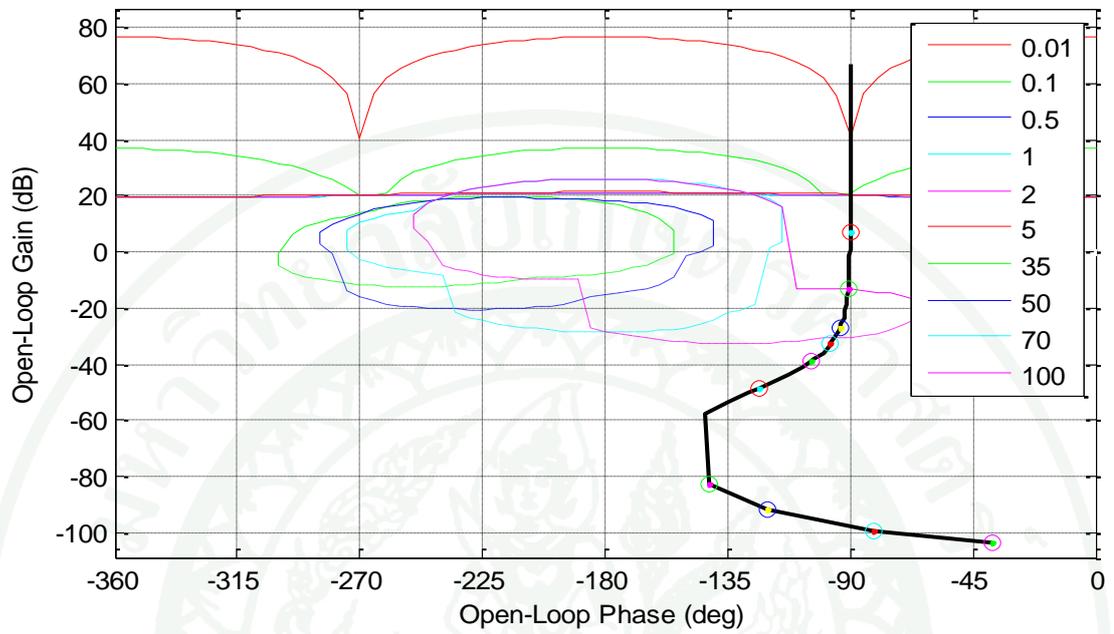
ภาพที่ 48 ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวกรอง  $f_1$

หลังจากที่ออกแบบตัวควบคุม  $g_1$  และตัวกรอง  $f_1$  เรียบร้อยแล้วลำดับถัดไปก็จะทำการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  ซึ่งจากภาพที่ 49 ได้แสดงถึงลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองในแต่ละความถี่นั้นไม่สอดคล้องกับขอบเขตของคุณสมบัติที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุม โดยทำการใส่ค่าอัตราขยาย  $K : 6100$ , ค่าซีโรบนแกนจริง :  $\frac{s}{5} + 1$  และค่าโพลบนแกนจริง :  $\frac{s}{17} + 1$  เพราะฉะนั้นจะได้สมการของตัวควบคุม  $g_2$  ดังสมการที่ (90) และมีลักษณะผลตอบสนองหลังการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  ดังภาพที่ 50

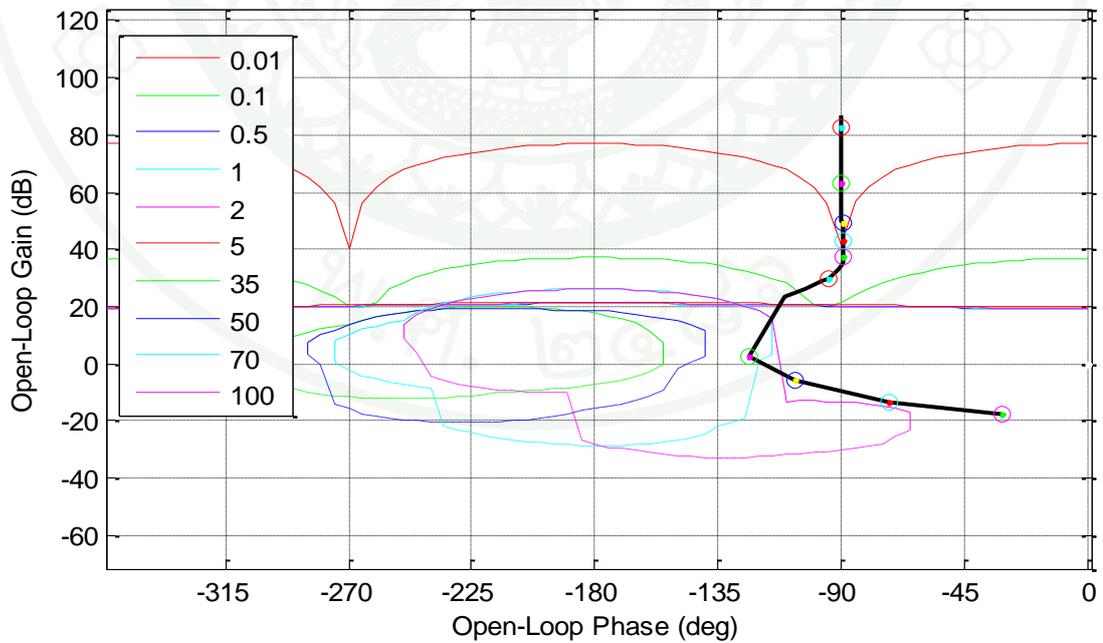
$$g_2 = 6100 \frac{\left(\frac{s}{5} + 1\right)}{\left(\frac{s}{17} + 1\right)} \quad (90)$$

เมื่อออกแบบตัวควบคุม  $g_2$  เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวกรอง  $f_2$  ซึ่งในภาพที่ 51 จะแสดงถึงลักษณะผลตอบสนองบนแผนภาพโพลเดก่อนการออกแบบตัวกรอง จากนั้นจึงทำการใส่ค่าโพลบนแกนจริง :  $\frac{s}{6} + 1$  และจะแสดงถึงลักษณะผลตอบสนองหลังจากการออกแบบตัวกรองดังภาพที่ 52 และสมการของตัวกรองจะมีลักษณะดังสมการที่ (91)

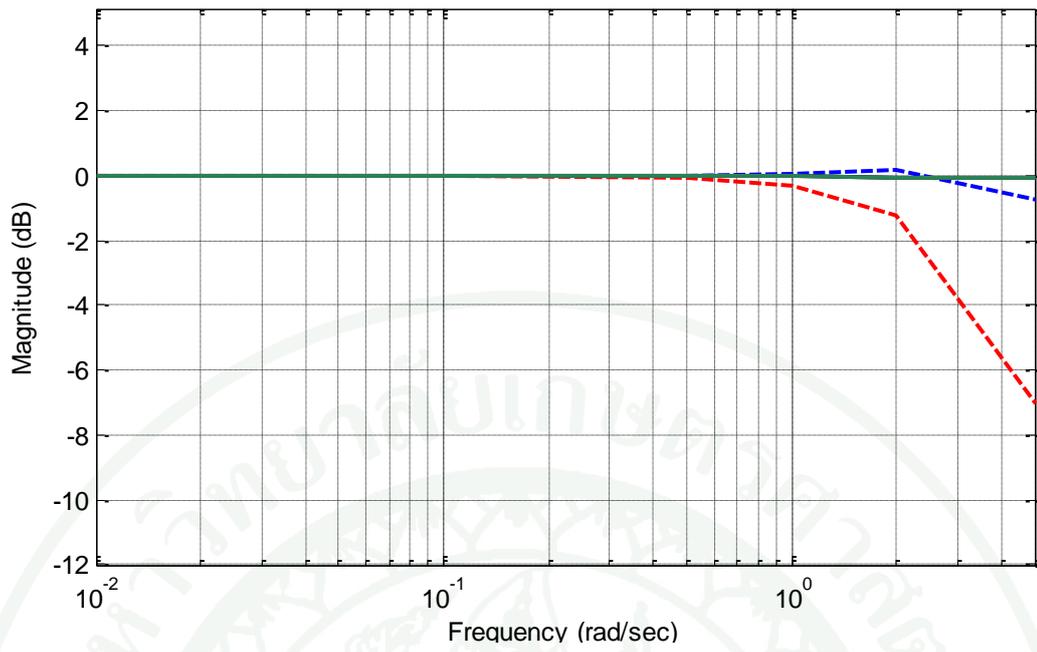
$$f_2 = \frac{1}{\frac{s}{6} + 1} \quad (91)$$



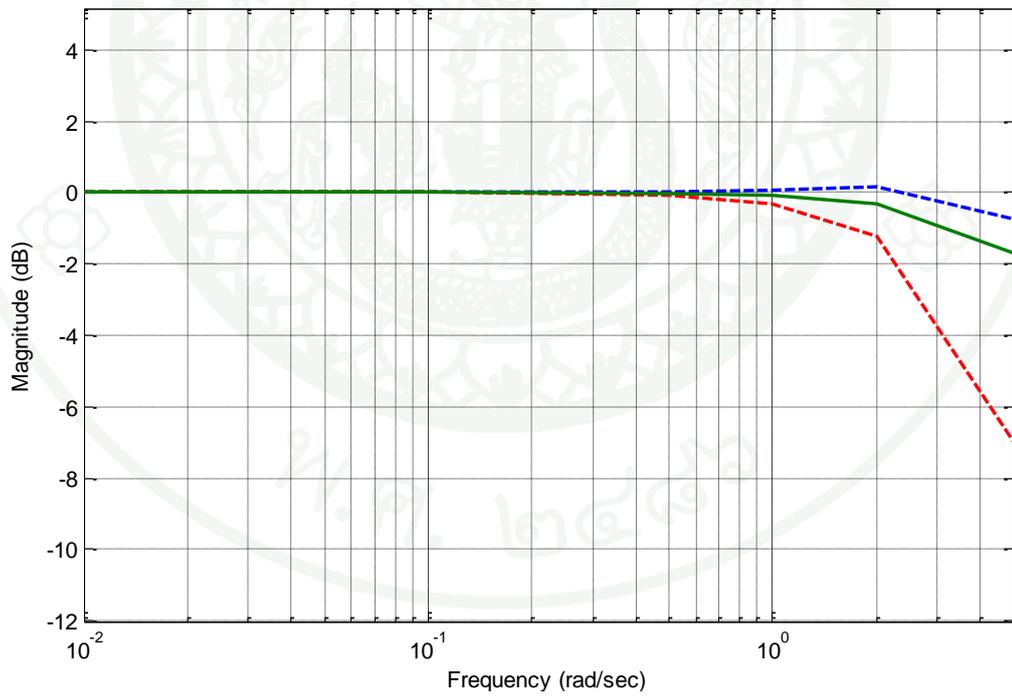
ภาพที่ 49 ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$



ภาพที่ 50 ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวควบคุม  $g_2$



ภาพที่ 51 ลักษณะของระบบก่อนการออกแบบตัวกรอง  $f_2$



ภาพที่ 52 ลักษณะของระบบหลังการออกแบบตัวกรอง  $f_2$

## ผลและวิจารณ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองการควบคุมแขนหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วย การทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ 1 แกน และการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ศกกรา และได้แบ่งการแสดงผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในส่วนแรก เป็นการแสดงผลการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ 1 แกน และส่วนที่สอง เป็นการแสดงผลการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ศกกรา

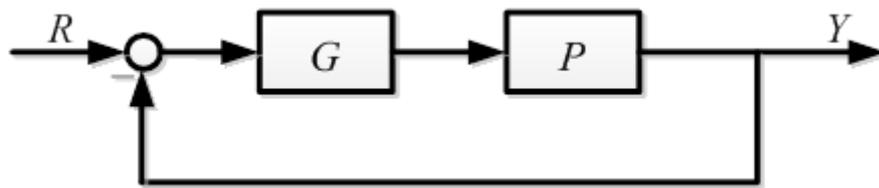
### 1. การทำงานของหุ่นยนต์ 1 แกน

ในการแสดงผลการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ 1 แกนนั่นก็จะแบ่งออกเป็นผลการจำลองและผลการทดลองที่ได้นำตัวควบคุมและตัวกรองที่ออกแบบโดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบผลกับการควบคุมแบบพีดี ซึ่งค่าพีดีที่ใช้จะมีค่า  $K_p = 0.0505$  และ  $K_D = 0.0051$

#### 1.1 ผลการจำลองของหุ่นยนต์ 1 แกน

ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์ 1 แกน จะมีลักษณะการทำงานสำหรับการควบคุมแบบพีดีดังภาพที่ 53 และการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้นจะมีลักษณะการทำงานดังภาพที่ 54 และผลการจำลองการควบคุมแบบพีดีนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 55 และผลการจำลองการควบคุมแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณก็จะแสดงได้ดังภาพที่ 56 และผลการจำลองเสถียรภาพวงปิดบนโดเมนความถี่นั้นแสดงได้ดังภาพที่ 57

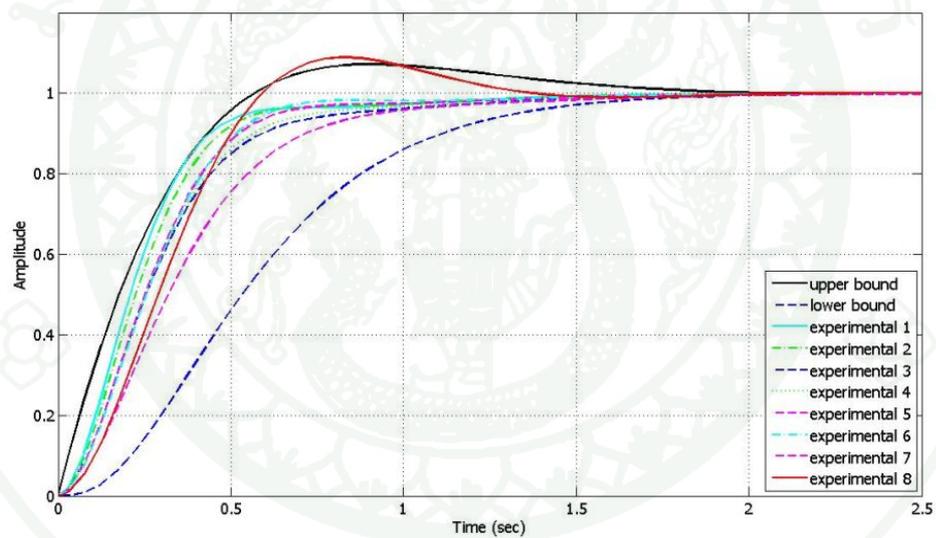
จากผลการจำลองบนโดเมนเวลาจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตัวควบคุมแบบพีดีนั้นไม่สามารถควบคุมค่าความไม่แน่นอนของพลานต์ที่เกิดขึ้นให้อยู่ในข้อกำหนดทั้งหมดได้ แต่ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณสามารถควบคุมให้ระบบทำงานตามคุณลักษณะที่ออกแบบไว้ ในทุกค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ทั้งหมดได้ และจากผลการจำลองเสถียรภาพวงปิดบนโดเมนความถี่นั้นได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ได้ออกแบบนั้น สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีตามที่กำหนดไว้



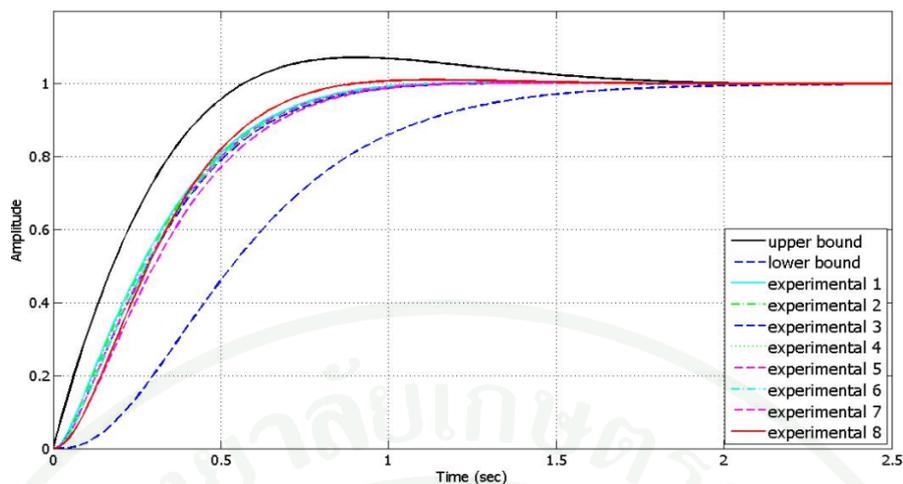
ภาพที่ 53 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ



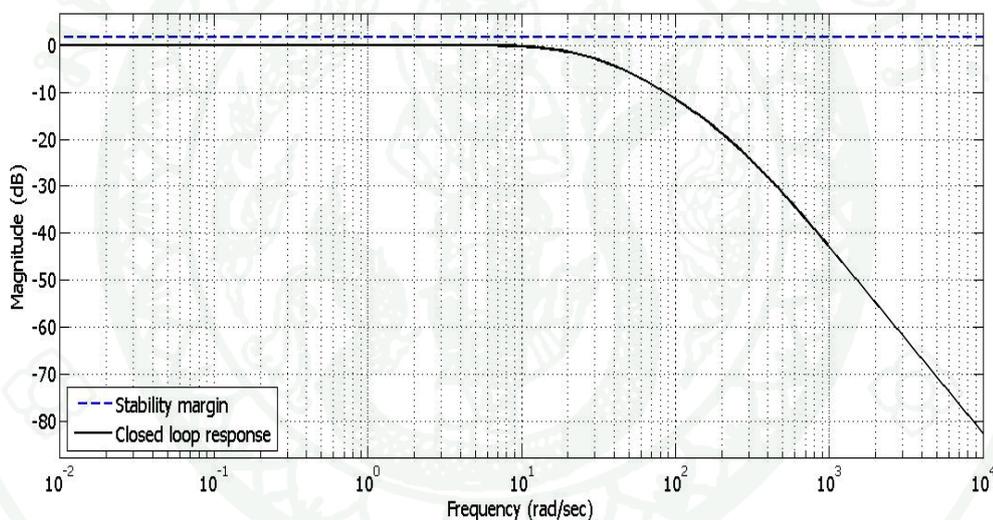
ภาพที่ 54 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแบบพีดี



ภาพที่ 55 ผลจำลองสำหรับการควบคุมแบบพีดีของหุ่นยนต์ 1 แกน



ภาพที่ 56 ผลจำลองสำหรับการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณของหุ่นยนต์ 1 แกน

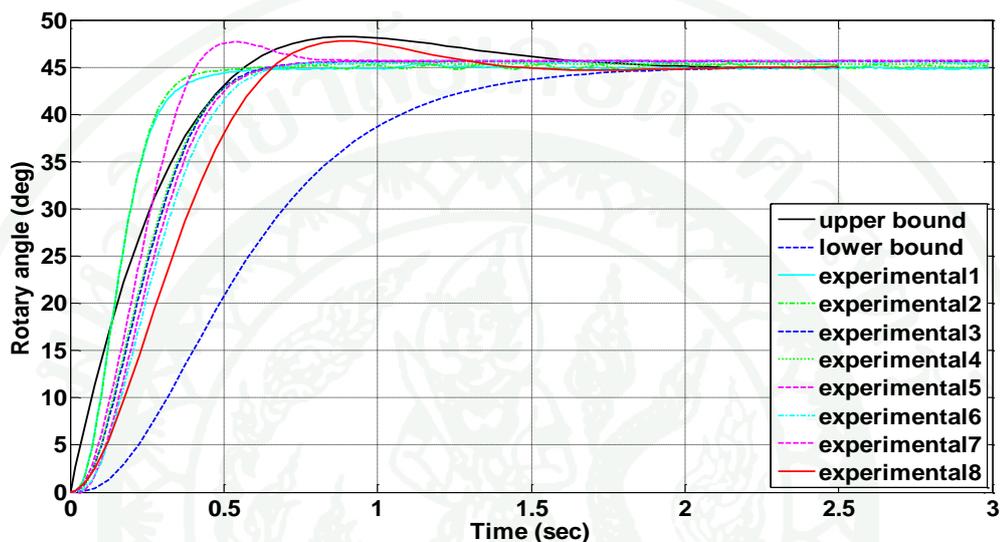


ภาพที่ 57 เสถียรภาพระบบวงปิดของหุ่นยนต์ 1 แกน

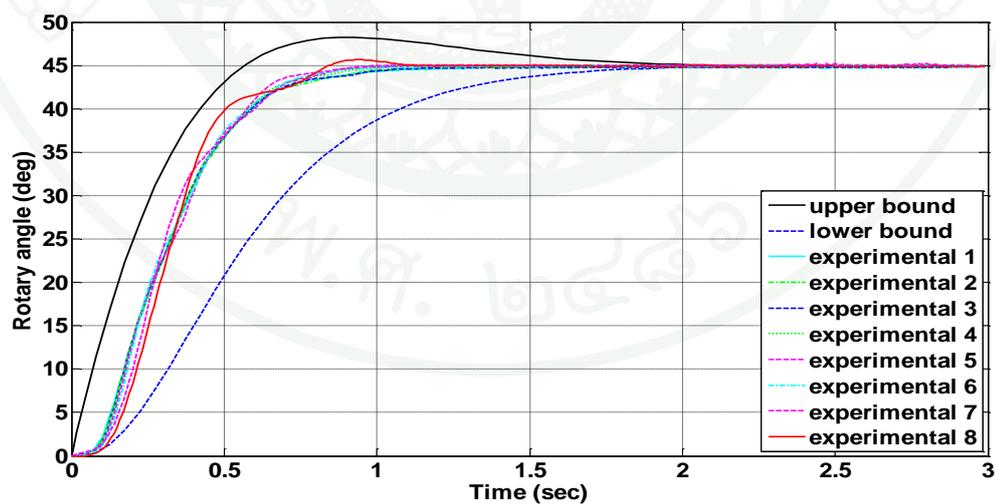
## 1.2 ผลการทดลองของหุ่นยนต์ 1 แกน

ในการทดลองได้จัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง และทำการทดลองโดยการป้อน โหลดที่มีขนาด และการติดตั้งโหลด ณ ตำแหน่งที่ต่างกันบนแขนของหุ่นยนต์ทั้งสิ้น 8 กรณี เช่นเดียวกับการระบุเอกลักษณ์ของแขนหุ่นยนต์แกนเดียวของบริษัท Quanser และการทดลองทั้งหมดจะทำบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งวิธีการทดลอง คือ กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของแขนหุ่นยนต์ที่ 0 องศา แล้วเคลื่อนไปยังตำแหน่ง 45 องศา

เมื่อพิจารณาผลการทดลองตามภาพที่ 58 ซึ่งเป็นการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีดีพบว่า ไม่อาจควบคุมให้ระบบทำงานตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ได้ในบางกรณี แต่การควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้น สามารถทำให้ระบบทำงานได้ตามคุณลักษณะที่ได้กำหนดไว้ทุกประการในทุกกรณีดังภาพที่ 59 คือ ค่าพุงเกินประมาณ 2 % และค่าเวลาเข้าที่เท่ากับ 1.1 วินาที ซึ่งจะแสดงผลการทดลองในกรณีเลวร้ายที่สุดในตารางที่ 3



ภาพที่ 58 ผลการทดลองการควบคุมแบบพีดีของหุ่นยนต์ 1 แกน



ภาพที่ 59 ผลการทดลองการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณของหุ่นยนต์ 1 แกน

### ตารางที่ 3 ผลการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ 1 แกน

คุณสมบัติ	QFT	PD
1. ค่าพุ่งเกิน (%OS)	2 %	5 %
2. ค่าเวลาเข้าที่	1.1	1.4
3. ค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัว	0.002	0.032

## 2. การทำงานของหุ่นยนต์สการา

ในการแสดงผลการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการแสดงผลการจำลองบนโปรแกรม MATLAB และในส่วนที่ 2 นั้นจะเป็นการแสดงผลการทดลองที่นำตัวควบคุมและตัวกรองที่ออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์รุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับการควบคุมแบบพีไอ โดยที่ค่าพีไอมีค่า  $k_p = \text{diag}[3800 \ 4300]$  และ  $T_I = \text{diag}[0.09 \ 0.08]$

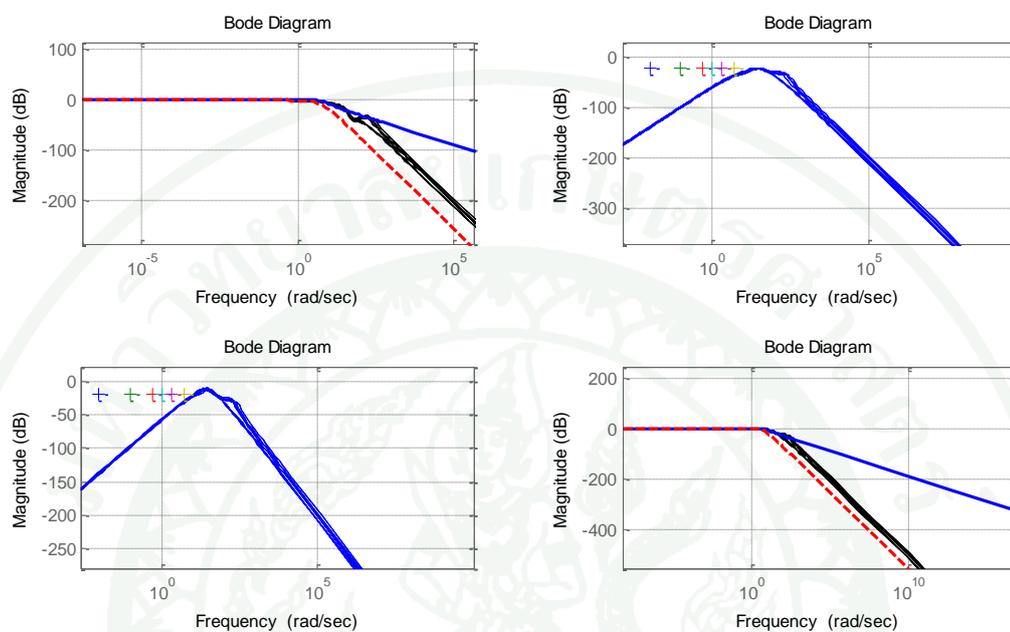
### 2.1 ผลการจำลองของหุ่นยนต์สการา

ภาพที่ 60 เป็นการจำลองการควบคุมป้อนกลับสำหรับขอบเขตการติดตามโดยเส้นที่บสีน้ำเงิน คือ ค่าขอบเขตบน, เส้นประสีแดง คือ ค่าขอบล่าง และเส้นสีดำ คือ ผลตอบสนองของระบบในทุกค่าความไม่แน่นอน พบว่าในทุกค่าความถี่ที่ทำการออกแบบนั้น ระบบจะอยู่ภายในขอบเขตของคุณสมบัติการติดตามในทุกความถี่

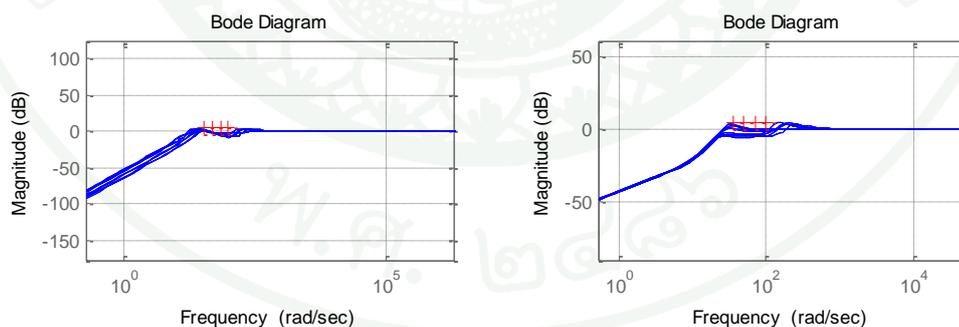
ภาพที่ 61 เป็นการจำลองการควบคุมป้อนกลับสำหรับขอบเขตของเสถียรภาพของระบบ พบว่าในทุกความถี่นั้นระบบจะทำงานอยู่ภายในขอบเขตของคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

ภาพที่ 62 เป็นการจำลองการควบคุมป้อนกลับสำหรับการขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ ซึ่งจะมีเครื่องหมายบวกเป็นการแสดงค่าขอบเขตบนและจะแสดงในทุกภาพที่แสดงผลการจำลอง พบว่าในทุกความถี่นั้นระบบจะทำงานอยู่ภายในขอบเขตของคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

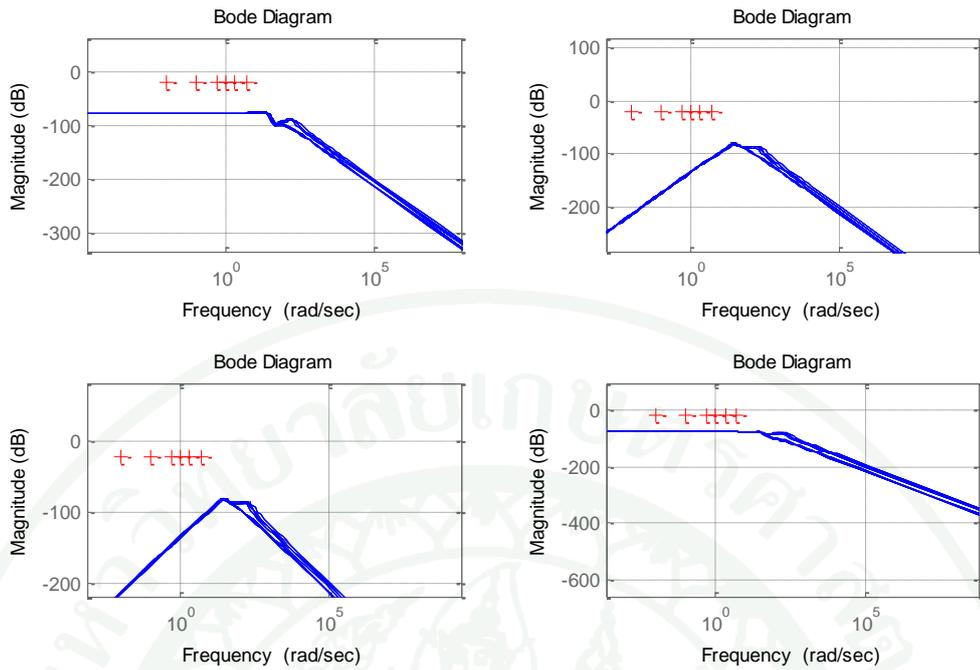
ภาพที่ 63 เป็นการจำลองการควบคุมป้อนกลับสำหรับการขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ พบว่าในช่วงความถี่ต่ำนั้นระบบจะทำงานอยู่ในขอบเขตของคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ แต่ที่ความถี่สูงจะอยู่นอกขอบเขต



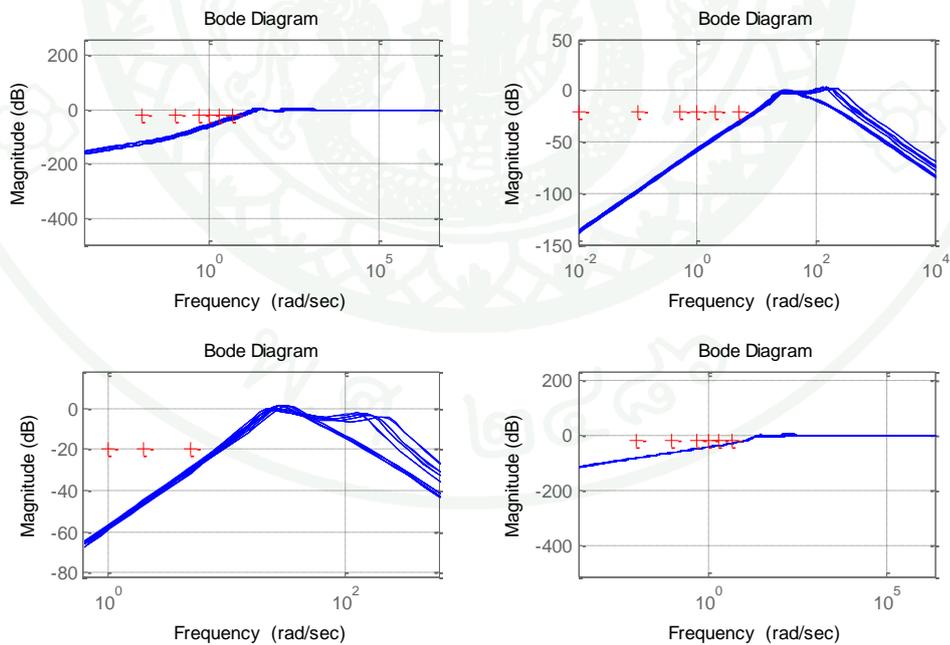
ภาพที่ 60 ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตการติดตามบนซ้าย คือ  $t_{r11}$  บนขวา คือ  $t_{r12}$  ล่างซ้าย คือ  $t_{r21}$  และล่างขวา คือ  $t_{r22}$



ภาพที่ 61 ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตเสถียรภาพของระบบ ซ้าย คือ  $L_1$  และขวา คือ  $L_2$



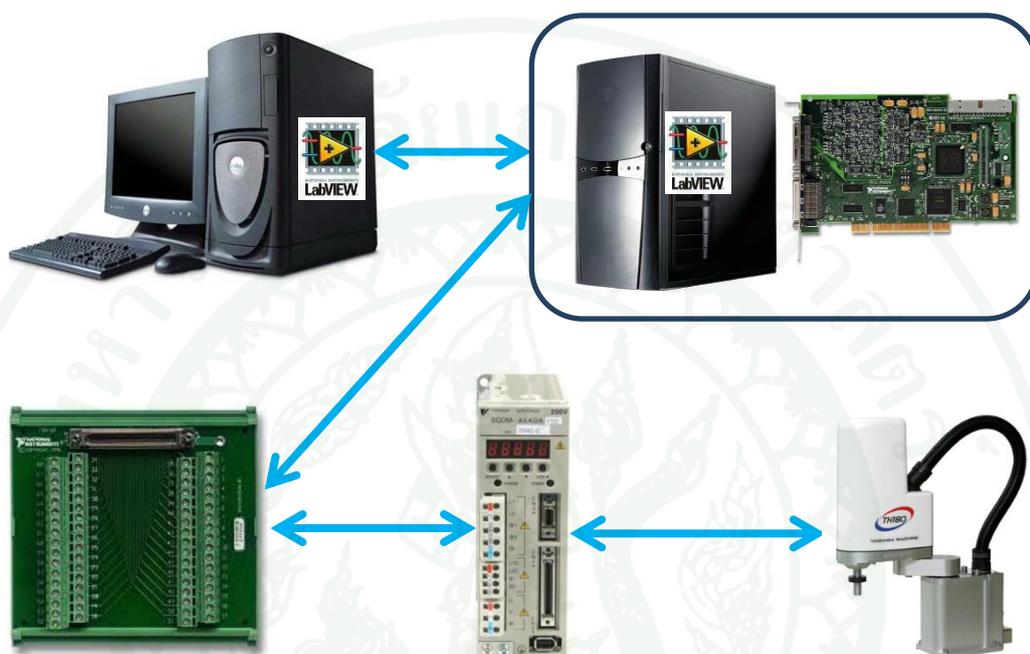
ภาพที่ 62 ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตการขจัดสิ่งรบกวนด้านเข้าของระบบบนซ้าย คือ  $t_{DI11}$  บนขวา คือ  $t_{DI12}$  ล่างซ้าย คือ  $t_{DI21}$  และล่างขวา คือ  $t_{DI22}$



ภาพที่ 63 ผลการจำลองการควบคุมป้อนกลับบนโดเมนความถี่สำหรับขอบเขตการขจัดสิ่งรบกวนด้านออกของระบบบนซ้าย คือ  $t_{DO11}$  บนขวา  $t_{DO12}$  คือ ล่างซ้าย  $t_{DO21}$  คือ และล่างขวา คือ  $t_{DO22}$

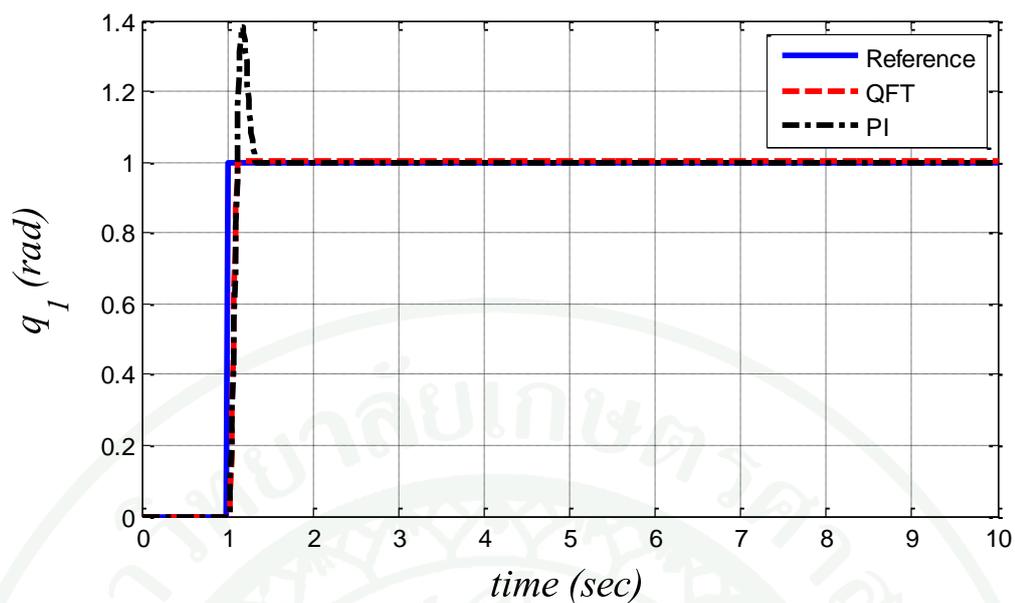
## 2.2 ผลการทดลองของหุ่นยนต์ศการา

ในการทดลองนี้จะติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยมีลักษณะดังภาพที่ 64

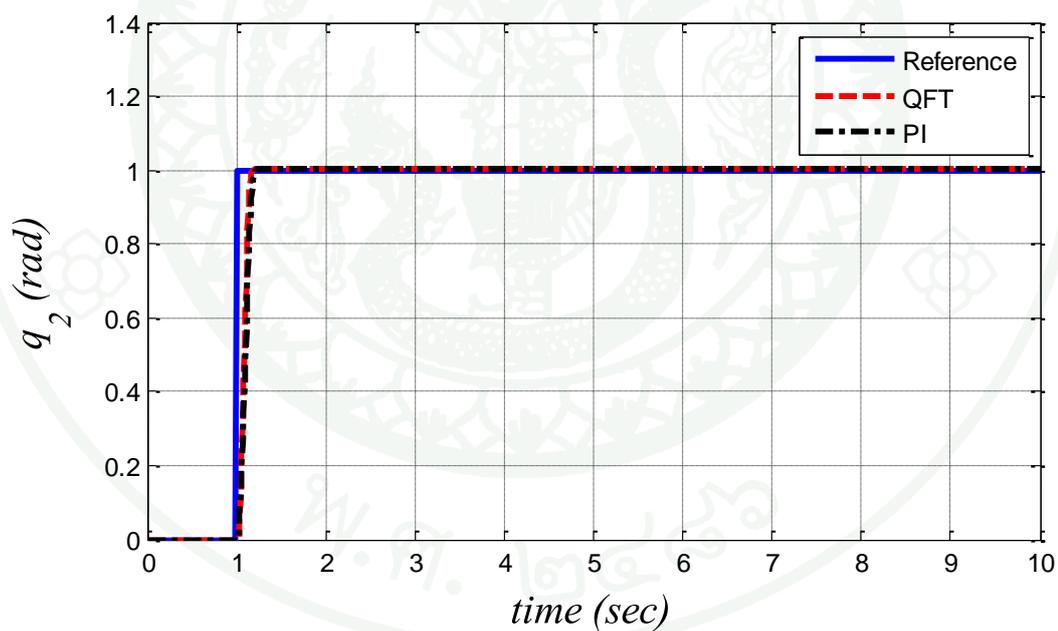


ภาพที่ 64 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการควบคุมแขนหุ่นยนต์ศการา

จากการทดลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์โดยกำหนดให้แขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เรเดียน ที่เวลา 1 วินาที โดยในการทดลองนั้นได้ใช้ค่าเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 10 มิลลิวินาที ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 65 และภาพที่ 66



ภาพที่ 65 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงบนแกนที่ 1 ของหุ่นยนต์ศกราร



ภาพที่ 66 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงบนแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์ศกราร

#### ตารางที่ 4 ผลการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ศากรา

คุณสมบัติ	QFT		PI	
	แกนที่ 1	แกนที่ 2	แกนที่ 1	แกนที่ 2
1. ค่าพุ่งเกิน (%OS)	0 %	0 %	36 %	0 %
2. ค่าเวลาเข้าที่	0.15	0.19	0.33	0.21
3. ค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัว	0.002	0.003	0.01	0.003

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณกับการควบคุมแบบพีไอนั้น จะเห็นได้ชัดเจนถึงความแตกต่างในแกนที่ 1 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการควบคุมแบบพีไอนั้นจะมีค่าพุ่งเกินที่สูงมาก เนื่องจากการควบคุมแบบพีไอนั้นไม่ได้มีการชดเชยแรงที่เกิดจากการคาบเกี่ยวกันในการเคลื่อนที่ระหว่างแกนที่ 1 และแกนที่ 2 จึงทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของค่าพุ่งเกิน แต่การควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้นจะไม่มีปัญหาในส่วนนี้ ในส่วนของค่าเวลาเข้าที่นั้น การควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้นจะมีค่าเวลาเข้าที่ของทั้งแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์นั้นน้อยกว่าการควบคุมแบบพีไอ และในส่วนของค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวนั้นจะเห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนในแกนที่ 1 ซึ่งการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณจะมีค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวที่ต่ำกว่า การควบคุมแบบพีไอที่ค่อนข้างมาก แต่ในแกนที่ 2 นั้นจะมีค่าเท่ากัน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์ 1 แขน ของบริษัท Quanser ที่ประกอบด้วยโหลดที่มีขนาด และน้ำหนักที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนขนาด และน้ำหนักของโหลด เพื่อทำการทดลองระบุเอกลักษณ์ของระบบนั้น จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้นก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน และในการทดลองเพื่อระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์สการารุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA นั้น ก็จะสามารถเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละครั้งนั้น มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น และแรงที่เกิดจากการคาบเกี่ยวกันระหว่างแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ในขณะที่หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่

ในการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณในการควบคุมหุ่นยนต์ 1 แขน ซึ่งเป็นระบบที่มีหนึ่งสัญญาณขาเข้า และหนึ่งสัญญาณขาออก (SISO) นั้น ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับ ข้อกำหนดสมรรถนะ และข้อกำหนดเสถียรภาพ และได้ทำการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณในการควบคุมแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์สการา ซึ่งเป็นระบบที่มีหลายสัญญาณเข้าและหลายสัญญาณออก (MIMO) โดยทำการออกแบบให้มีคุณสมบัติที่ระบบสามารถจะขจัดสัญญาณรบกวนได้ มีค่าเวลาเข้าที่น้อย ไม่มีค่าพุ่งเกิน มีค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวมีค่าต่ำ พร้อมทั้งออกแบบระบบให้มีเสถียรภาพที่ดี

จากผลการจำลองของหุ่นยนต์ 1 แขน บนโดเมนเวลาของขอบเขตการติดตามนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และจากผลการจำลองบนโดเมนความถี่ของขอบเขตเสถียรภาพวงปิดนั้น ก็ชี้ให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพที่ดีตามขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ และจากผลการจำลองการจำลองของหุ่นยนต์สการา บนโดเมนความถี่ของขอบเขตการติดตามนั้นชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานอยู่ในขอบเขตตามที่กำหนด แต่ในการขจัดสิ่งรบกวนนั้นอาจจะมีผลผิดพลาดในช่วงความถี่สูง เนื่องจากสิ่งรบกวนทางด้านออกจะมีผลกระทบกับระบบในช่วงความถี่ต่ำ แต่ที่ความถี่สูงๆนั้นจะมีผลกระทบกับระบบที่น้อยมาก

จากผลการทดลองในการนำตัวควบคุมและตัวกรอง ไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ 1 แกน ของบริษัท Quanser และหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบสกรารุ่น TH180 ของบริษัท TOSHIBA นั้น เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณกับการควบคุมแบบพีไอดี พบว่าการควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ดังนั้นสามารถที่จะนำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ไปประยุกต์ใช้ได้จริงในการออกแบบระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในโรงงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

### ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของหุ่นยนต์ 1 แกนนั้น ได้ทำการกำหนดคุณสมบัติของระบบเพียง 2 คุณสมบัติ ประกอบด้วย ขอบเขตการติดตาม และขอบเขตเสถียรภาพ ซึ่งถ้าหากทำการกำหนดคุณสมบัติเพิ่มเติมจากที่กล่าวมานี้ ก็จะทำให้ผลการทดลองมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งกว่า

ในการทดลองการระบุเอกลักษณ์ของหุ่นยนต์สกรารุ่น ได้ทำการประมาณค่าของระบบเป็นเชิงเส้น จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อกรออกแบบตัวควบคุม ทำให้มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งถ้าหากทำการออกแบบให้เป็นแบบไม่เชิงเส้นก็อาจจะทำให้ได้ตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบได้ดีกว่าแบบเชิงเส้น และในการระบุเอกลักษณ์ของระบบจะใช้การวิเคราะห์แบบกำลังสองน้อยสุด ก็ทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองของหุ่นยนต์สกรารุ่น ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดคุณสมบัติของระบบ เพียง 4 คุณสมบัติ ประกอบด้วย ขอบเขตของการติดตาม, การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ, การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ และขอบเขตเสถียรภาพ ซึ่งถ้าหากว่าทำการออกแบบตัวควบคุมในคุณสมบัติอื่นๆอีก ก็จะทำให้ผลการทดลองที่ดียิ่งขึ้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชาคริต ศรีนางแถม. 2552. การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณของแขนกลชนิดสองข้อต่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วโรดม ตู้จินดา. 2550. การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Akamatsu, S., M. Konishi and J. Imai. 2009. Position Control of 2-Link SCARA Robot by using Internal Model Control. **Memoirs of the Faculty of Engineering** 43: 49-54.
- Borghesani, C., Y. Chait and O. Yaniv. 2003. **The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox User's Guide**. Terasoft Inc, San Diego, CA.
- Chatlatanagulchai, W., B. Inseemeeesak and W. Siwakosit. 2007. Quantitative Feedback Control of a Pendulum with Uncertain Payload. **Journal of Research in Engineering and technology** 4 (4): 347-367.
- Hamilton, G. K., and M. A. Franchek. 1997 Robust Controller Design and Experimental Verification of I.C. Engine Speed Control. **Int. J. of Robust and Nonlinear Control** 7 (6): 609-627.
- Houpis, C.H., S.J. Rasmussen and M. Gracia-Sanz. 2006. Quantitative Feedback theory Fundamentals and Applications. **CRC Press**, Boca Raton, FL.
- Karpenko, M. and N. Sepehri. 2004. QFT Design of a PI Controller with Dynamic Pressure Feedback for Positioning a Pneumatic Actuator, pp. 5084–5089. *In Proceeding of the 2004 American Control Conference*. 30 June – 2 July 2004. Boston, MA.

- Louis – A, D. M. S., H. Bernard and K. Al – Haddad. 1990. An Adaptive Controller for a Direct-Drive Scara Robot. *In Proceeding of IEEE Industrail Electronics Society*. 27-30 Nov 1990, Pacific Grove, CA.
- Meng, J. E. and K. C. Liew. 1997. Control of Adept One SCARA Robot Using Neural Networks **IEEE Trancation on Industrail Electronics** 44 (6): 762-768.
- Norman S. N. 2008. **Control Systems Engineering**. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- Philips, S. N., M. Pachter, C. H. Houppis and S. J. RasmussenA. 1998. A QFT Subsonic Envelope Flight Control System Design. **International Journal of Robust and Nonlinear Control** 7 (6): 581-589.
- Philip, V., A.C. Smith and A. Monti. 2009. Dynamic Performance of a SCARA Robot anipulator With Uncertainty Using Polynomial Chaos Theory. **IEEE Trancation on Industrail Electronics** 25 (1): 206-210.
- Vinod, K., S. Indulal and K. P. Rema. 2009. Quantitative Feedback Design for SISO Systems **NCTT09**, Kerala, India.
- Yusuf, S., M. Tinkir and A. Ankarali. 2010. Neuro-Fuzzy Trajectory Control of A Scara Robot *In Proceeding of IEEE Computer and Automation Engineering* 44(6): 298 – 302. Pacific Grove, CA.





ภาคผนวก ก  
โปรแกรม MATLAB สำหรับหุ่นยนต์ 1 แกน

```
clc

clear all

close all

c = 1; k = 660.03;
for a = linspace(3.79,8.64,10),
    P(1,1,c) = tf(k,[1,a,0]); c = c + 1;
end

k = 287.9;
for a = linspace(3.79,8.64,10),
    P(1,1,c) = tf(k,[1,a,0]); c = c + 1;
end

a = 8.64;
for k = linspace(287.9,660.03,10),
    P(1,1,c) = tf(k,[1,a,0]); c = c + 1;
end

a = 3.79;
for k = linspace(287.9,660.03,10),
    P(1,1,c) = tf(k,[1,a,0]); c = c + 1;
end

nompt = 11; % define nominal plant case1

w = [1,2.5,5,10,20,50,100]; % working frequencies

disp(' ')

disp('plottmpl(w,P,nompt); %show templates')

drawnow
```

```

plottmpl(w,P,nompt), title('Plant Templates')

% ROBUST MARGINS BOUNDS

disp(' ')
disp('Computing bounds...')
disp(' ')
disp('bdb1=sisobnds(1,w,W1,P,R); %margins');
drawnow
Ws1 = 1.2; % robust margins weight
bdb1 = sisobnds(1,w,Ws1,P);
disp('plotbnds(bdb1); %show bounds');
plotbnds(bdb1),title('Robust Margins Bounds');

%TRACKING BOUNDS

disp(' ')
disp('bdb7=sisobnds(7,wbd7,Ws7,P); %tracking bounds');
drawnow
wbd7 = w(1:4);
sysTru = tf([3.427 10.28],[1 5 10.28]);
sysTrl = tf([153.8],[1 17.84 93.81 153.8]);
Ws7 = [sysTru;sysTrl]; % tracking weight
bdb7 = sisobnds(7,wbd7,Ws7,P);
disp('plotbnds(bdb7); %show bounds');
plotbnds(bdb7),title('Robust Tracking Bounds');

%GROUPING BOUNDS

disp(' ')
disp('bdb=grpbnnds(bdb1,bdb7); %grouping bounds')
drawnow
bdb=grpbnnds(bdb1,bdb7);
disp('plotbnds(bdb); %show all bounds')
plotbnds(bdb),title('Margins and Tracking Bounds');

```

```

%INTERSECT BOUNDS

disp(' ')

disp('ubdb=sectbnds(bdb); %intersect bounds')

drawnow

ubdb=sectbnds(bdb);

disp('plotbnds(ubdb); %show bounds')

drawnow

plotbnds(ubdb),title('Intersection of Bounds');

qpause;close(gcf);

% DESIGN CONTROLLER

disp(' ')

disp('Design')

disp('lpshape(wl,ubdb,P(1,1,nompt),G); %loop shaping')

drawnow

wl=logspace(-2,4,200);

numG = 0.1835*[1/4.5 1];

denG = [1/272.5 1];

G = tf(numG,denG);

lpshape(wl,ubdb,P(1,1,nompt),G); qpause;

%DESIGN PREFILTER

disp(' ')

disp('pfshape(7,[],Ws7,P,[],G,[],F); %pre-filter shaping')

drawnow

ind = find(wl<=50);

numF = [1/7];

denF = [1/20.25 1.72/4.5 1];

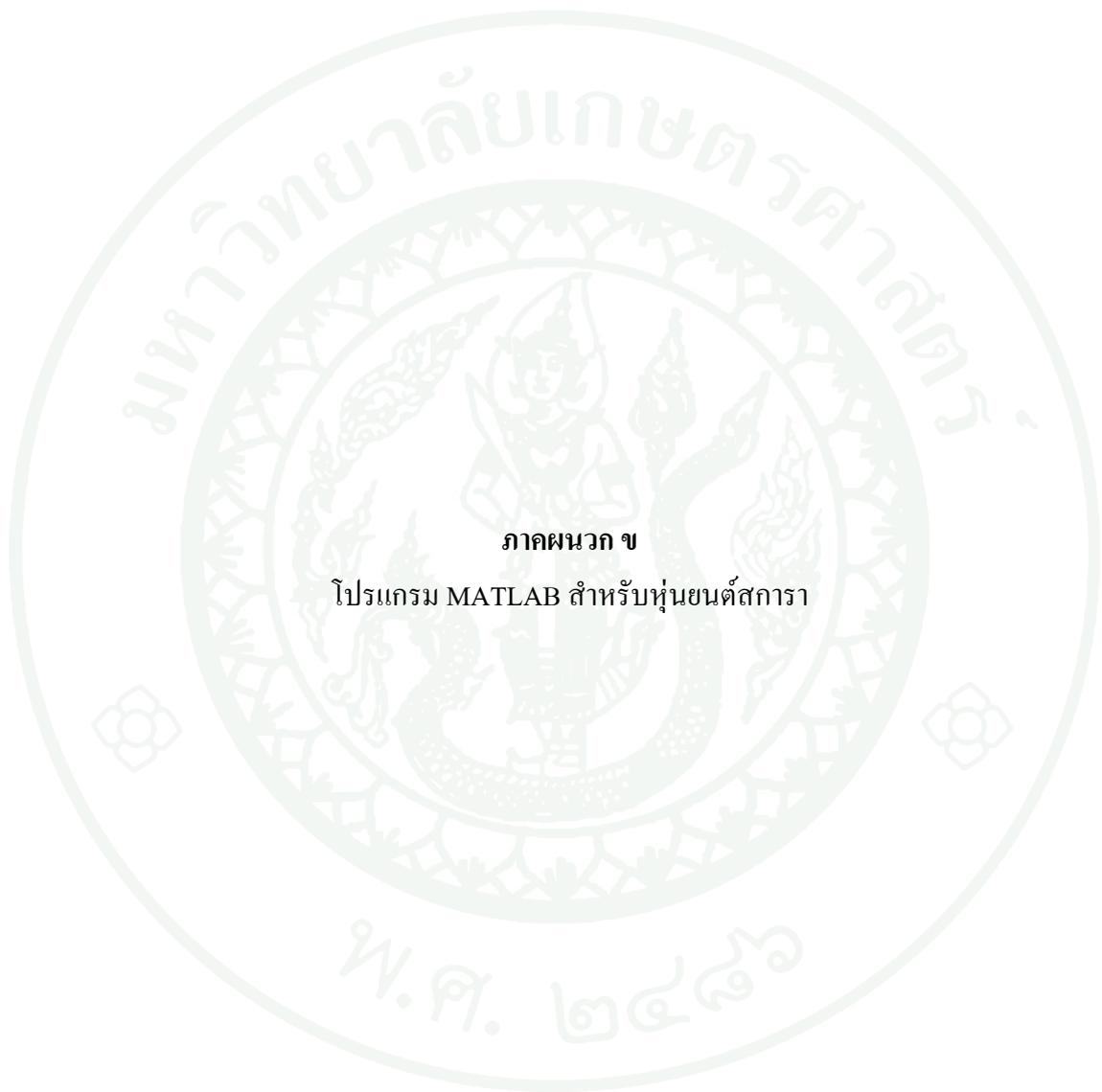
F = tf(numF,denF);

pfshape(7,wl,Ws7,P,[],G,[],F); qpause;

```

```
% ANALYSIS  
disp(' ')  
disp('Analysis...')  
disp(' ')  
disp('chksiso(1,w1,Ws1,P,[],G); %margins spec')  
drawnow  
chksiso(1,w1,Ws1,P,[],G);
```





ภาคผนวก ข  
โปรแกรม MATLAB สำหรับหุ่นยนต์ศการา

```

clear

close all

ts = 0.01;

%lower bound
w_low = tf([200.9],[1 18 100.1 200.9]);

%upper bound
w_up = tf([3.36 33.6],[1 8 33.6]);

%*****Other Specs & Frequencies Vectors*****
wbd = [.01 0.1 0.5 1 2 5]; %for tracking and disturbance bounds;
wh = [35 50 70 100]; %for stability bounds;
w = sort([wbd,wh]);
w1 = logspace(-5,1); %for loop shaping;

ws1 = 10^(5/20); % for stability 5dB
b11 = w_up; % for tracking
a11 = w_low;
b12 = 0.1;
a12 = 0;
b21 = 0.1;
a21 = 0;
b22 = w_up;
a22 = w_low;
bDI = 0.1; % for input disturbance rejection
bDO = 0.1; % for output disturbance rejection

theta1Min = 1.4; theta1Max = 8.3;
theta2Min = 1.2; theta2Max = 2.4;
theta3Min = 5.6; theta3Max = 6.4;

```

```
V1Min = 0.23; V1Max = 0.68;
V2Min = 43.96; V2Max = 45.22;
```

```
c=1;
```

```
for theta1=[theta1Min theta1Max]
```

```
for theta2=[theta2Min theta2Max]
```

```
for theta3=[theta3Min theta3Max]
```

```
for V1=[V1Min V1Max]
```

```
for V2=[V2Min V2Max]
```

```
    pinv(1,1,c)=tf([(theta1+(2*theta2)) V1 0],1);
```

```
    pinv(1,2,c)=tf([(theta3+theta2) 0 0],1);
```

```
    pinv(2,1,c)=tf([(theta3+theta2) 0 0],1);
```

```
    pinv(2,2,c)=tf([theta3 V2 0],1);
```

```
c=c+1;
```

```
end
```

```
for i=1:c-1
```

```
    p(:,i)=inv(pinv(:,i));
```

```
end
```

```
nompt=1; %nominal plant
```

```
plottmpl(w(1:5),p(1,1,:),nompt)
```

```
plottmpl(w(1:5),p(1,2,:),nompt)
```

```
plottmpl(w(1:5),p(2,1,:),nompt)
```

```

plottmpl(w(1:6),p(2,2,:),nompt)
bds_tr11 = sisobnds(7,wbd,[b11;a11],inv(pinv(1,1,:)));
plotbnds(bds_tr11);

% T12
% syntax --> bdb = genbnds(ptype,w,Ws,A,B,C,D,P0,phs)
bds_tr12 = genbnds(10,wbd,b12,inv(pinv(1,2,:))*b22(1),0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_tr12);
bds_tr1 = grpbnnds(bds_tr11,bds_tr12);
%plotbnds(bds_tr1);
%
% _____

% Plant-input disturbance rejection bounds
bds_idr111 = genbnds(10,wbd,bDI,1+inv(pinv(1,2,:))*bDI,0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_idr111);
bds_idr112 = genbnds(10,wbd,bDI,1-inv(pinv(1,2,:))*bDI,0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_idr112);
bds_idr12 = genbnds(10,wbd,bDI,inv(pinv(1,2,:))*bDI,0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_idr12);
bds_idr1 = grpbnnds(bds_idr111,bds_idr112,bds_idr12);
%plotbnds(bds_idr1);
%
% _____

% Plant-output disturbance rejection bounds
bds_odr111 =
genbnds(10,wbd,bDO,inv(pinv(1,1,:))+inv(pinv(1,2,:))*bDO,0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_odr111);
bds_odr112 = genbnds(10,wbd,bDO,inv(pinv(1,1,:))-
pinv(1,2,:))*bDO,0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_odr112);
bds_odr121 =
genbnds(10,wbd,bDO,inv(pinv(1,2,:))+inv(pinv(1,2,:))*bDO,0,inv(pinv(1,1,:)),1,inv(pinv(1,1,nompt)));

```

```

%plotbnds(bds_odr121);
bds_odr122 = genbnds(10,wbd,bDO,pinv(1,2,:)-
pinv(1,2,:)*bDO,0,pinv(1,1,:),1,inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_odr122);
bds_odr1 = grpbnnds(bds_odr111,bds_odr112,bds_odr121,bds_odr122);
%plotbnds(bds_odr1);
%
%
% Stability margins
bds_st11 = sisobnds(1,wh,ws1,1/inv(pinv(1,1,:)));
%plotbnds(bds_st11);
bds_st12 = genbnds(10,wh,ws1,1,0,1,p(1,1,:),inv(pinv(1,1,nompt)));
%plotbnds(bds_st12);
bds_st1 = grpbnnds(bds_st11,bds_st12);
%plotbnds(bds_st1);
%
% Worst-case bounds
bdb1 = grpbnnds(bds_tr1,bds_idr1,bds_odr1,bds_st1);
ubdb1 = sectbnnds(bdb1);
%plotbnds(ubdb1);
%
%Controller design
lpshape(wl,ubdb1,inv(pinv(1,1,nompt)),tf(1,1));
g1=6050*tf([1/20 1],[1/89 1]);
%Pre - Filter design
pfshape(7,wbd,[b11;a11],inv(pinv(1,1,:)),[],g1);
f11=tf(1,[1/5 1]);

%*****Calculating Bounds for Loop #2*****
pinv22bn = pinv(2,2,nompt)-pinv(2,1,nompt).*pinv(1,2,nompt).*inv(pinv(1,1,nompt)+g1);
pinv22b = pinv(2,2,:)-pinv(2,1,:).*pinv(1,2,:).*inv(pinv(1,1,:)+g1);

```

```

pinv21b = pinv(2,1,:)*g1.*inv(pinv(1,1,:)+g1);
detp = p(1,1,:).*p(2,2,:)-p(1,2,:).*p(2,1,:);

% Tracking bounds
% T11
% syntax --> bdb = sisobnds(ptype,w,Ws,P,R,nom,C,loc,phs)
% T21
bds_tr21 = genbnds(10,wbd,b21,-pinv21b*f11, 0, pinv22b, 1, inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_tr21);
% T22
bds_tr22 = sisobnds(7,wbd,[b22;a22],inv(pinv22b),[],nompt);
%plotbnds(bds_tr22);
bds_tr2 = grpbnds(bds_tr21,bds_tr22);
%plotbnds(bds_tr2);
%
% Plant-input disturbance rejection bounds
bds_idr21 = genbnds(10, wbd, bDI, -pinv(2, 1,:)*inv(pinv(1,1,:)+g1), 0, pinv22b, 1, ...
inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_idr21);
bds_idr22 = genbnds(10, wbd, bDI, 1, 0, pinv22b, 1, inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_idr22);
bds_idr2 = grpbnds(bds_idr21,bds_idr22);
%plotbnds(bds_idr2)
%
% Plant-output disturbance rejection bounds
bds_odr21 = genbnds(10,wbd,bDO, pinv(2,1,:)-pinv(2,1,:).*pinv(1,1,:)*inv(pinv(1,1,:)+g1), 0,...
pinv22b, 1, inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_odr21);
bds_odr22 = genbnds(10,wbd,bDO, pinv(2,2,:)-pinv(2,1,:).*pinv(1,2,:)*inv(pinv(1,1,:)+g1), 0,...
pinv22b, 1, inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_odr22);

bds_odr2 = grpbnds(bds_odr21,bds_odr22);

```

```

%plotbnds(bds_odr2)
%


---


% Stability margins
bds_st21 =
genbnds(10,wh,ws1,g1*p(1,1,:),g1*detp,1+g1*p(1,1,:),p(2,2,:)+g1*detp,inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_st21);
bds_st22 = genbnds(10,wh,ws1,g1*detp,p(2,2,:),1+g1*p(1,1,:),p(2,2,:)+g1*detp,inv(pinv22bn));
%plotbnds(bds_st22);
bds_st2 = grpbnnds(bds_st21,bds_st22);
%plotbnds(bds_st2)
%


---


% Worst-case bounds
bdb2 = grpbnnds(bds_tr2,bds_idr2,bds_odr2,bds_st2);
ubdb2 = sectbnds(bdb2);
plotbnds(ubdb2);
%


---


%***** Shaping for Loop #2*****
% Controller design
lpshape(wl,ubdb2,inv(pinv22bn),tf(1,1));
g2=6100*tf([1/5 1],[1/17 1]);

% Pre - Filter design
pfshape(7,wbd,[b22;a22],inv(pinv22b),[],g2);
f22=1.0*tf(1,[1/7 1]);

```



Split by PDF Splitter



กลับสู่สารบัญหลัก

The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-34)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

## Volume II

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

อิเล็กทรอนิกส์ (EL)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

ฟิสิกส์ (PH)

วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554

ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม



ลิขสิทธิ์ © มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## สารบัญ

CM031	การวิเคราะห์การประวิงเวลาของอัลกอริทึมการแก้ปัญหาการขน สำหรับช่องสัญญาณสื่อสารที่มีกำหนดเวลาแพร่กระจายยาว กมลวรงค์ <sup>1</sup> อัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ <sup>1</sup> นรรัตน์ วัฒนนงกุล <sup>1</sup> และ ทิสิฐ วมิขานันท์ <sup>2</sup> <sup>1</sup> จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย <sup>2</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	765
CM032	Analysis of Recovery Time in Multi-layer Network Recovery for Multicast Traffic <i>Junpon Sukwattananukit and Chaiyachet Saivichit</i> Chulalongkorn University	769
CM033	การจัดสรรช่องสัญญาณสำหรับเครือข่ายแลนไร้สายที่มีความหนาแน่นสูง ศุภฤกษ์ นามิตทรสุทธ์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	773
CM034	Study on Indoor Positioning with RSS, TOA and Fingerprinting Techniques Using UWB Signal <i>Jirapat Sanghong<sup>1</sup> Kobkarn Thepsupomkul<sup>2</sup> Pichaya Supanakoon<sup>2</sup> and Sathaporn Promwong<sup>2</sup></i> <sup>1</sup> Mahanakorn University of Technology <sup>2</sup> King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang	777
<b>สาขาระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)</b>		
CT001	วิธีแยกแยะที่สำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับหอคัน วิมลรัตน์ เอมอัม และ เดวิด บรรณเจตทงส์ชัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	781
CT002	การวางแผนเส้นทางเดินด้วยเวลาน้อยที่สุดสำหรับหุ่นยนต์ศการาโดยใช้วิธีกำลังจูโคสเปกคว็ล ภาณุพันธ์ มิ่งกลา และ ทิระชช แสน โกชน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	785
CT003	การควบคุมตำแหน่งแบบกนของแขนหุ่นยนต์ก้ำมเดียวที่มีค่าความไม่แน่นอน เชิงพารามิเตอร์โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ชวลิต นฤมิตรวรกุล และ ทิระชช แสน โกชน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	789
CT004	Reducing Control Input for Robust Linear Control Using Class-gamma Stability Analysis Theorem <i>Pinū Ngansom</i> Rangsit University	793

การควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขนหุ่นยนต์ก้านเดียว  
ที่มีค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

Robust Position Controller Design of One Link Robot Arm  
with Parametric Uncertainty using Quantitative Feedback Theory (QFT)

ชาลิต นฤมิตรวรกุล<sup>1</sup> และพีระยศ แสนโคชนี<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านแมคคาทรอนิกส์ หุ่นยนต์และการควบคุมชาญฉลาด

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ.งามวงศ์วาน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10903

โทร 0-2942-8555 ต่อ 1502-4 โทรสาร 0-2942-8555 ต่อ 1550 E-mail : g5214500912@ku.ac.th<sup>1</sup>, peerayot.s@ku.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนองานวิจัยการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ก้านเดียวที่มีความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบป้อนกลับมีผลตอบสนองตามที่กำหนด รวมถึงให้เสถียรภาพของระบบอยู่ในขอบเขตที่กำหนดทุกช่วงของความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ได้ ซึ่งเรียกว่า “การควบคุมแบบคงทน” ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีดี จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบคงทนนั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่า

**คำสำคัญ:** แขนหุ่นยนต์ก้านเดียว ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ การควบคุมแบบคงทน ความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์

### Abstract

This research paper proposes a position control design method of one link robot arm with parametric uncertainty. The objective is to make the feedback system response as required. Furthermore, the system stability is in the pre-determined bound in all the range of parametric uncertainty. This control method is called robust control. Therefore, this research uses the Quantitative Feedback Theory (QFT) to design a robust controller. It can be seen that the robust control is more efficient than PD controller.

**Keywords:** single link robot arm, quantitative feedback theory, robust control, parametric uncertainty

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่านวัตกรรมที่มนุษย์คิดค้นมานั้น ไม่ว่าจะเป็นในทางอุตสาหกรรม ทางทหารและเทคโนโลยีทางการคมนาคมขนส่ง ล้วนแล้วแต่มีระบบพลวัตที่ซับซ้อนมากขึ้นตามการพัฒนาที่มีอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้

ระบบเหล่านี้ยังต้องการตัวควบคุมที่มีสมรรถนะสูงและจะต้องทนทานต่อความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของพลานต์ รวมไปถึงสิ่งรบกวนที่เข้ามายังจุดต่างๆ ของระบบ เพราะฉะนั้นแล้วการออกแบบจึงต้องนำเอาสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มาพิจารณาเพื่อออกแบบตัวควบคุมให้สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ จึงจะทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพ [1]

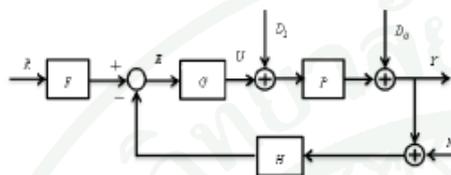
จากการศึกษาพบว่า การออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative Feedback Theory – QFT) มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เพราะไม่ได้ต้องการความแม่นยำของพลานต์ที่สูงมาก แต่จะออกแบบจากเขตของค่าความไม่แน่นอนของพลานต์ โดยผู้ที่คิดค้นและพัฒนาทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ คือ Professor Isaac Horowitz ในปี ค.ศ.1960 [2] ซึ่งเป็นทฤษฎีวิเคราะห์และออกแบบทางด้านโดเมนความถี่ โดยจะออกแบบบนแผนภาพนิโคลส์ (Nichols Chart) และมีงานวิจัยหลายงานที่ได้นำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เช่น การควบคุมความเร็วรอบของรถยนต์ที่มีเครื่องยนต์แบบหัวฉีด [3] การควบคุมระบบการบินของเครื่องบิน F-16 [4] การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียที่มีขนาดใหญ่ [5] ระบบการควบคุมของกังหันลมขนาดใหญ่ [6]

ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ [7] โดยจะเริ่มจากพื้นฐานของทฤษฎีระบบป้อนกลับเชิงปริมาณ การหาค่าความไม่แน่นอนของพลานต์ที่เกิดขึ้นไปจนถึงการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบสามารถรองรับค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบได้

### 2. ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้น มีขั้นตอนหลักในการออกแบบ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นที่ 1 คือ กำหนดคุณลักษณะของระบบตามที่ต้องการ ขั้นที่ 2 คือ การสร้างแผ่นแบบพลานต์ (plant template) ที่เกิดจากเขตของค่าความไม่แน่นอนของพลานต์บนความถี่ที่สนใจ พร้อมทั้งเลือกอนมินัลพลานต์

(nominal plant) เพื่อใช้เป็นพลาตันในการออกแบบตัวควบคุม ชั้นที่ 3 คือ การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง โดยในการออกแบบระบบควบคุม จะพิจารณาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [8] ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย  $P$  คือ พลาตันที่ประกอบด้วยเซต  $\mathcal{P}$  ซึ่งครอบคลุมค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นทั้งหมด,  $G$  คือ ตัวควบคุม,  $F$  คือ ตัวกรองของระบบ,  $H$  คือ เซนเซอร์,  $R$  คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง,  $D_i$  คือ ค่าความผิดพลาด,  $V$  คือ สัญญาณตัวควบคุม,  $Y$  คือ สัญญาณเอาออกของระบบ,  $N$  คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด,  $D_o$  คือ ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ,  $D_o$  คือ ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ



รูปที่ 1 การควบคุมระบบแบบป้อนกลับ

ในการสร้างขอบเขตตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณเพื่อ ออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการนั้นจะพิจารณา ออกสมการที่ได้จากบล็อก โดอะแกรมของรูปที่ 1 และจะออกแบบทางด้าน โดเมนความถี่ ดังนี้

1. ขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพของระบบ

$$\left| \frac{Y}{R} \right| = \left| F \frac{PG}{1+PGH} \right| \leq W_T \quad (1)$$

2. การจำกัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านเข้าของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_i} \right| = \left| \frac{P}{1+PGH} \right| \leq W_{D_i} \quad (2)$$

3. การจำกัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านออกของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_o} \right| = \left| \frac{1}{1+PGH} \right| \leq W_{D_o} \quad (3)$$

4. ขอบเขตการติดตาม

$$W_{low} \leq \left| F \frac{PG}{1+PGH} \right| \leq W_{up} \quad (4)$$

5. การจำกัดสัญญาณรบกวนจากการรบกวนจากการวัด

$$\left| \frac{Y}{N} \right| = \left| \frac{-PGH}{1+PGH} \right| \leq W_N \quad (5)$$

โดยที่  $W_T$  คือ ขอบเขตส่วนเพื่อเสถียรภาพ,  $W_{D_i}$  คือ ปริมาณของ ขอบเขตที่ใช้ในการจำกัดสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ,  $W_{D_o}$  คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการจำกัดสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ,  $W_{up}$  คือ ค่าขอบเขตบน,  $W_{low}$  คือ ค่าขอบเขตล่าง, คือ  $W_N$  ค่าขอบเขต ของสัญญาณรบกวน

ในการออกแบบตัวควบคุม แผ่นแบบพลาตันจะถูกนำมาใช้ ร่วมกับขอบเขตที่กำหนดตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ เพื่อให้มีความ สอดคล้องกันและจะเลือกนอมินัลพลาตัน  $P_o$  จากเซตของความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของพลาตัน เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม  $G$  ที่จะทำให้ได้วงนอมินัล (nominal loop)  $L_o = GP_o$  มีคุณลักษณะและ

ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ โดยในการออกแบบนั้นจะนำฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาใช้งาน และในบทความนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุม ทั้งหมดบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ QFT Control Design Toolbox

### 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ก้านเดียว

แขนหุ่นยนต์ก้านเดียวประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เฟืองขับ แขนของหุ่นยนต์ และโหลดที่ป้อนให้กับแขนหุ่น [9] โดยมี อินพุตเป็น โวลต์  $V$  และเอาท์พุตเป็นตำแหน่งมุมของแขน  $\theta$  โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{a_m}{s(s+b_m)} \quad (6)$$

โดยค่า  $a_m$  และ  $b_m$  ได้จากการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งใช้อุปกรณ์การทดลอง ของบริษัท Quanser รุ่น SRV-02 ดังรูปที่ 2 และใช้ DAQ รุ่น PCI 6251 โดยทำงานโปรแกรม MATLAB



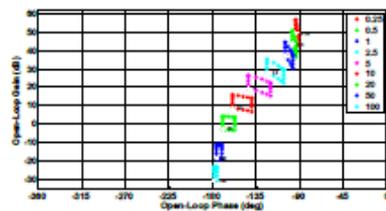
รูปที่ 2 หุ่นยนต์ก้านเดียวและโหลดชนิดต่างๆ

ทำการทดลองระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยการป้อน โวลต์ ด้วยการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณเชิงรีพี ที่ความถี่จาก 0.1 มิลลิเฮิรตซ์ ถึง 20 เฮิรตซ์ ในเวลา 10 วินาที และมีเวลาพักตัวอย่างเท่ากับ 0.01 วินาที การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยการป้อน โหลดที่มีขนาดและการติดตั้ง โหลด ณ ตำแหน่งที่ต่างกันบนแขนของหุ่นยนต์ 8 กรัม โดยแต่ละกรณี ได้เก็บข้อมูลอย่างละ 5 ครั้ง หลังจากนั้นจึงได้หาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการทดลองจะได้ช่วงของค่าพารามิเตอร์ของระบบดังนี้  $a_m \in [287.90, 660.03]$  และ  $b_m \in [3.79, 8.64]$

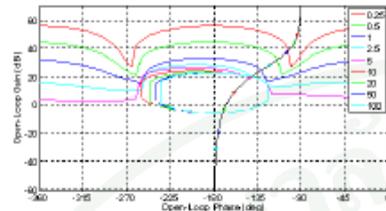
ตารางที่ 1 ผลการทดลองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

กรณีที่	ค่า $a_m$	ค่า $b_m$
1	660.03	8.64
2	570.83	7.93
3	477.00	7.85
4	464.84	7.46
5	460.36	7.00
6	431.22	6.48
7	307.73	6.07
8	287.90	3.79

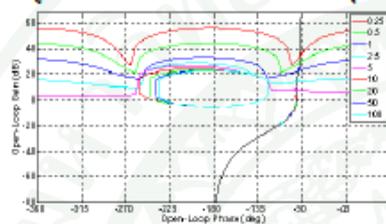
เมื่อนำค่าที่ได้มาวาดแผ่นแบบพลาตันบนแผ่นภาพนิโกลส์ตาม ความถี่ที่สนใจจะได้ดังรูปที่ 3 ในบทความนี้ได้เลือกจุด  $a_m = 287.9$  และ จุด  $b_m = 3.79$  เป็นนอมินัลพลาตันในการออกแบบ



รูปที่ 3 แฉ่นแบบพลาตันต้นแบบพลาตัน โคลสตามความถี่ที่สนใจ



รูปที่ 4 วงนอมนัลก่อนการออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 5 วงนอมนัลหลังการออกแบบตัวควบคุม

#### 4. การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง

การออกแบบตัวควบคุมนั้นจะออกแบบเพื่อให้ความสอดคล้องกับคุณลักษณะของระบบที่ต้องการดังนี้

- ข้อกำหนดสมรรถนะ

- ค่าพุงเกิน:  $\leq 10\%$
- ค่าเวลาเข้าที่:  $\leq 2$  วินาที (เกณฑ์ 2%)

- ข้อกำหนดเสถียรภาพ ( $W_1 = 1.2$ )

- ส่วนต่อเกณฑ์:  $\geq 1.83$  (หรือ 5.26 dB)
- ส่วนต่อเฟส:  $\geq 50$  องศา

จากข้อกำหนดสมรรถนะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของขอบเขตบน และขอบเขตล่างได้ดังสมการที่ (7) และสมการที่ (8) โดยสมการที่ (7) นั้นคำนวณโดยกำหนดให้ค่าพุงเกินน้อยกว่า 10% และค่าเวลาเข้าที่น้อยกว่า 2 วินาที ส่วนสมการที่ (8) คำนวณโดยกำหนดให้ค่าพุงเกินเท่ากับ 0% และให้ค่าเวลาเข้าที่น้อยกว่า 2 วินาที

จากข้อกำหนดเสถียรภาพ สามารถกำหนดขอบเขตส่วนต่อเสถียรภาพของระบบตามสมการ (1) ได้ เมื่อได้ขอบเขตการติดตามและขอบเขตส่วนต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว จึงนำไปกำหนดคูลูปบนแผนภาพนิโคลส์ ซึ่งลักษณะของขอบเขตดังกล่าวและวงนอมนัลก่อนการออกแบบจะเป็นดังรูปที่ 4

$$W_{up}(s) = \frac{3.427(s+3)}{s^2+5s+10.28} \quad (7)$$

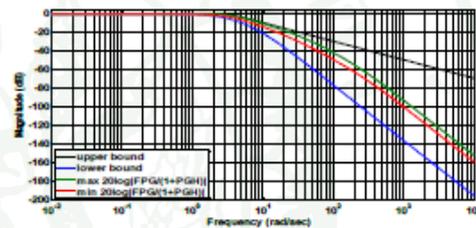
$$W_{low}(s) = \frac{153.8}{s^3+17.84s+93.81s+153.8} \quad (8)$$

ขั้นตอนต่อไป คือ การออกแบบตัวควบคุม ซึ่งสมการของตัวควบคุมหลังจากออกแบบเรียบร้อยแล้วจะเป็นไปตามสมการที่ (9) และวงนอมนัลหลังการออกแบบตัวควบคุม จะมีลักษณะดังรูปที่ 5

$$G(s) = \frac{0.1835\left(\frac{s}{4.5}\right)+1}{\frac{s}{272.5}+1} \quad (9)$$

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการออกแบบตัวกรอง ซึ่งต้องพิจารณาจากระบบหลังจากที่ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแล้ว โดยจะพิจารณาจากผลตอบสนองทางความถี่ระบบวงปิดที่ค่าพารามิเตอร์ของพลาตันมีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด โดยสมการของตัวกรองจะเป็นไปตามสมการที่ 10 และรูปที่ 6 จะเป็นผลตอบสนองทางความถี่ของระบบหลังจากที่ได้ออกแบบตัวกรองแล้ว

$$F(s) = \frac{\frac{s}{7}+1}{\frac{1}{20.25}s^2+\frac{1.72}{4.5}s+1} \quad (10)$$



รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางความถี่หลังการออกแบบตัวกรอง

#### 5. ผลการจำลอง

ในบทความนี้ได้เปรียบเทียบผลจำลองการทำงานของระบบกับการควบคุมแบบฟีดแบ็ค ซึ่งจะป้อนสัญญาณอินพุตอ้างอิงด้วยสัญญาณขั้นบันได โดยที่ตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ค มีค่า  $K_p = 0.0405$  และ  $K_d = 0.0041$  ในการออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คนี้ ได้ทำการออกแบบบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชัน `sisotool` เป็นเครื่องมือในการออกแบบ และใช้นอมนัลพลาตันเช่นเดียวกับการควบคุมแบบทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ โดยให้มีผลตอบสนองของระบบตามข้อกำหนดสมรรถนะที่กำหนดไว้ ซึ่งจะแสดงการทำงานของระบบที่ควบคุมแบบฟีดแบ็คในทุกค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของพลาตันดังรูปที่ 7 (ซ้าย) และจะแสดงการทำงานของระบบที่ออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณดังรูปที่ 7 (ขวา)

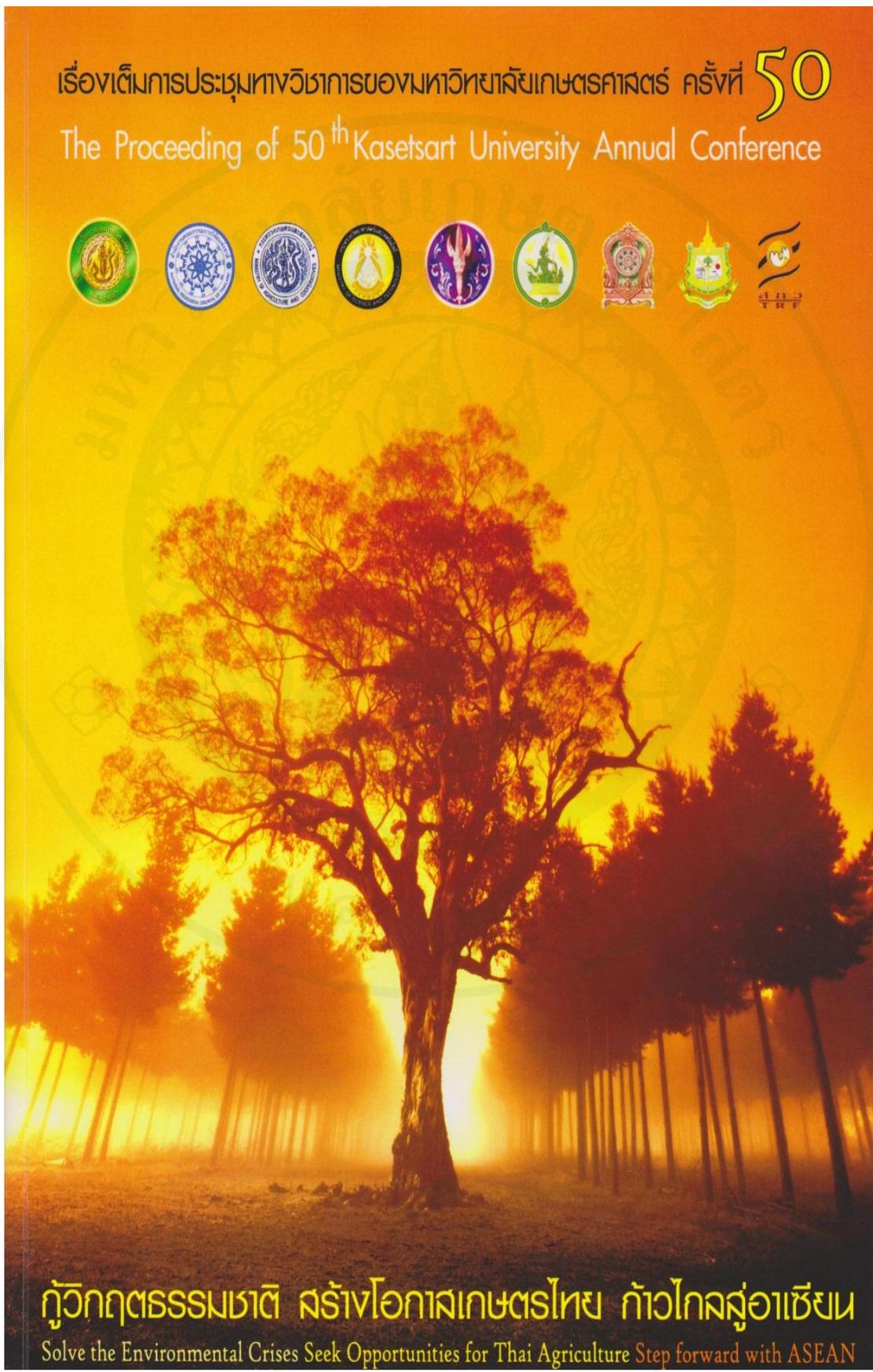
เมื่อพิจารณาผลการจำลองจะเห็นได้ชัดเจนว่าตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คไม่สามารถควบคุมค่าความไม่แน่นอนของพลาตันที่เกิดขึ้นให้อยู่ในข้อกำหนดทั้งหมดได้ แต่ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณสามารถควบคุมให้ระบบทำงานตามคุณลักษณะที่ออกแบบไว้ ในทุกค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ทั้งหมดได้





ภาคผนวก ง  
บทความตีพิมพ์การประชุมทางวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50  
The Proceeding of 50<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference



แก้วิกฤตธรรมชาติ สร้างโอกาสเกษตรไทย ก้าวไกลสู่อาเซียน  
Solve the Environmental Crises Seek Opportunities for Thai Agriculture Step forward with ASEAN

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

30. สท.วศ.54/O203 การออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนสำหรับหุ่นยนต์สการา โดยใช้ทฤษฎี  
ป้อนกลับเชิงปริมาณ..... 240  
Robust Control System Design for SCARA Robots Using Quantitative  
Feedback Theory

โดย ชวลิต นฤมิตรบรรกุล พีระยศ แสนโกชณ์  
และวิฑิต ฉัตรรัตน์กุลชัย

31. สท.วศ.55/O208 การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบพีชพรรณเพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน.....248  
Feasibility Study of Bioretention System for Domestic Wastewater  
Treatment

โดย พีรกานต์ บรรเจิดกิจ

32. สท.วศ.57/O220 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพีชพรรณและช่วงอายุของยางพารา  
โดยการใช้ข้อมูลจากดาวเทียม SMMS..... 256  
Study on Relation between Vegetation Index and Range of Rubber  
Age Using SMMS Satellite Imagery

โดย ประเสริฐษา ญาคำ ศุภกิจ นนทนานันท์  
และตีบุญญ เมธากุลชาติ

#### ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. สท.วศ.2/P7 รถไฟฟ้า 2 ล้อแบบสมดุล..... 267  
Balancing Electric Scooter

โดย ไพโรจน์ ทองประศรี

2. สท.วศ.4/P40 การปรับปรุงสมบัติของยางอะคริลิกเพื่อใช้ผลิตซีลกันน้ำมันสำหรับรถยนต์  
ด้วยวัสดุยี่ตยูนอนุภาคขนาดนาโนเมตร..... 275  
Modification of Acrylic Rubber for the Production of Oil-seal by  
Using Elastomeric Nanoparticles

โดย นิตยา ธาตุทอง และสิริจุฑารัตน์ โคภาวิสารัช

การออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนสำหรับหุ่นยนต์สการา โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ  
Robust Control System Design for SCARA Robots using Quantitative Feedback Theory

ชวลิต นฤมิตรวรกุล<sup>1</sup> พีระยศ แสนโภชนี<sup>1</sup> และ วิหิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>2</sup>

Chawalit Narumitbowornkul<sup>1</sup> Peerayot Sanposh<sup>1</sup> and Withit Chatlatanagulchai<sup>2</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนสำหรับหุ่นยนต์สการา โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาและออกแบบตัวควบคุมของแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์สการา ซึ่งพบว่าระบบนั้นเป็นระบบหลายสัญญาณป้อนเข้าป้อนออก อีกทั้งยังเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้นอีกด้วย จึงเป็นความยากที่จะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ให้มีความถูกต้องและแม่นยำ เนื่องจากความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นของพลาเน็ต สิ่งรบกวนทางด้านเข้าและด้านออกของระบบ และสัญญาณรบกวนจากการวัด ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ และสามารถทำให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่กำหนด โดยจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมนี้ด้วยผลการจำลองการควบคุมตำแหน่ง

**ABSTRACT**

This research presents a robust control system for a SCARA robot using quantitative feedback theory. To control 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> link of SCARA Robot, we considerate and design controller. Also, the system of SCARA Robot are multi-input multi-output (MIMO) and non-linear. Therefore, it is difficult to find a mathematical model of the robot arm with accuracy, including plant uncertainty, plant-input and plant-output disturbance, and arising noise measurements. So, the durable design of control systems using quantitative feedback theory can be applied and given the demand response. The result demonstrates the effectiveness of this control system with simulation of the control position.

Key Word: SCARA robot, quantitative feedback theory, MIMO system, plant uncertainty

Email address: g521450091@ku.ac.th

<sup>1</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านแมคคาทรอนิกส์ หุ่นยนต์และการควบคุมชาตฤฉลาด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>1</sup>Intelligent Mechatronics Robotic and Control Research (IMARC) Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngam Wong Wan Rd, Ladyaow, Chatuchuck, Bangkok 10900, Thailand

<sup>2</sup>ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

<sup>2</sup>Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

### คำนำ

ในปัจจุบันนี้หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อมนุษย์ อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตและประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อช่วยประหยัดเวลา และเพิ่มปริมาณในการผลิตให้ทันต่อความต้องการของตลาด ดังนั้นในการศึกษาการควบคุมระบบของหุ่นยนต์นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรกระทำ เพื่อรองรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ในอนาคต ซึ่งจะมีระบบพลวัตที่สลับซับซ้อน ดังนั้นแล้วจึงเป็นการยากในการที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ระบบการควบคุมของหุ่นยนต์ต้องมีสมรรถนะสูงและจะต้องทนทานต่อความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต รวมไปถึงสิ่งรบกวนที่เข้ามายังจุดต่างๆของระบบได้ เพราะฉะนั้นแล้วการออกแบบระบบควบคุมจึงจำเป็นต้องนำเอาสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มาพิจารณา เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ จึงจะทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพ แต่ก็ทำให้ปัญหาการออกแบบมีความซับซ้อนมากขึ้น (วโรตม, 2550)

จากการศึกษาพบว่าการออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative Feedback Theory – QFT) มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เพราะไม่ได้ต้องการความแม่นยำของพลาเน็ตที่สูงมาก แต่จะออกแบบจากเซตของค่าความไม่แน่นอนของพลาเน็ต โดยผู้ที่คิดค้นและพัฒนาทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ คือ Professor Isaac Horowitz ในปี ค.ศ. 1960 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์และออกแบบทางด้านโดเมนความถี่ โดยจะออกแบบบนแผนภาพนิโคลส์ (Nichols Chart) และมีงานวิจัยหลายงานที่ได้นำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เช่น การนำเอาทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมการบิน (Phillips *et al.*, 1995) ระบบการควบคุมของกังหันลมขนาดใหญ่ (Houpis *et al.* 2006) เป็นต้น และในงานวิจัยก่อนหน้านี (ชวลิต และ พีระยศ. 2554) ได้ทำการออกแบบกับหุ่นยนต์ก้านเดียวซึ่งเป็นแบบหนึ่งสัญญาณป้อนเข้าและหนึ่งสัญญาณป้อนออก (SISO)

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของหุ่นยนต์สกรู โดยจะทำการออกแบบตัวควบคุมในแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นแบบระบบหลายสัญญาณป้อนเข้าป้อนออก (MIMO) พร้อมทั้งแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมในแกนที่ 1 และแกนที่ 2

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์สกรู

สมการเชิงพลวัตของหุ่นยนต์ 2 แกน (Noorbaksh and Yazdizadeh, 2010) ถูกกำหนดโดย

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = \tau \quad (1)$$

โดยที่  $M(q)$  คือ เมทริกซ์ของมวล  $V(q, \dot{q})$  คือ เมทริกซ์ของแรงเหวี่ยงและแรงโคริโอลิส  $G(q)$  คือ เวกเตอร์ในเทอมของแรงโน้มถ่วงของโลก และ  $F(\dot{q})$  คือ แรงเสียดทาน

ซึ่งสมการลากรางจ์จะถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาหาสมการเชิงพลวัตของหุ่นยนต์ 2 แกน โดยรายละเอียดของสมการเชิงพลวัตแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะมีลักษณะดังสมการต่อไปนี้

$$[\theta_1 + 2\theta_2 \cos(q_2)]\ddot{q}_1 + [\theta_3 + \theta_2 \cos(q_2)]\ddot{q}_2 + F_1\dot{q}_1 = \tau_1 = u_1 \quad (2)$$

$$[\theta_2 + \theta_3 \cos(q_2)]\ddot{q}_1 + \theta_2\ddot{q}_2 + F_2\dot{q}_2 = \tau_2 = u_2 \quad (3)$$

โดยที่  $F_i$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแกนที่  $i$ ,  $q_i$  คือมุมที่เกิดขึ้นของแกนที่  $i$  โดยกำหนดให้เป็นเอราพิทของระบบ,  $\tau_i$  คือแรงบิดของมอเตอร์ของแกนที่  $i$  โดยกำหนดให้  $u_i$  เป็นอินพุตของระบบ และกำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= I_1 + I_2 + m_1 x_1^2 + m_2 (l_1^2 + x_2^2) \\ \theta_2 &= m_2 l_1 x_2 \\ \theta_3 &= I_2 + m_2 x_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

โดยที่  $I_i$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนที่  $i$ ,  $m_i$  คือ มวลของแกนที่  $i$ ,  $l_i$  คือ ความยาวของแกนที่  $i$  และ  $x_i$  คือ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแกนที่  $i$

จากสมการไม่เป็นเชิงเส้น (2) และ (3) สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้น รอบจุดสมดุล (0,0) และสามารถหาองค์ประกอบของพลานต์  $P$  จากสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น ซึ่งกำหนดโดย

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$p_{11}(s) = \frac{\theta_2 s + F_2}{s\beta(s)} \quad (6)$$

$$p_{12}(s) = \frac{-(\theta_3 + \theta_2 h)}{\beta(s)} \quad (7)$$

$$p_{21}(s) = \frac{-(\theta_3 + \theta_2 h)}{\beta(s)} \quad (8)$$

$$p_{22}(s) = \frac{(\theta_1 + 2\theta_2 h)s + F_1}{s\beta(s)} \quad (9)$$

โดย

$$\beta(s) = A_2 s^2 + A_1 s + A_0 \quad (10)$$

โดยมีสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= \theta_3 (\theta_1 + 2\theta_2) - (\theta_3 + \theta_2 h)^2 \\ A_1 &= \theta_3 F_1 + F_2 (\theta_1 + 2\theta_2 h) \\ A_0 &= F_1 F_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

และค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์สการา (Garcia et al., 2002) จะแสดงไว้ใน Table 1

Table 1 SCARA robot parameter

Parameter	Nominal value	Minimum value	Maximum value
$m_1$	15 kg	12 kg	18 kg
$m_2$	12 kg	9 kg	15 kg
$I_1$	0.23 kgm <sup>2</sup>	-	-
$I_2$	0.16 kgm <sup>2</sup>	-	-
$l_1$	0.25 m	-	-
$l_2$	0.25 m	-	-
$x_1$	0.125 m	-	-
$x_2$	0.125 m	-	-
$F_1$	2.99 s/rad	0.89 s/rad	5.08 s/rad
$F_2$	0.69 s/rad	0.155 s/rad	1.225 s/rad

**การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง**

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้น มีขั้นตอนหลักในการออกแบบ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นที่ 1 คือ กำหนดคุณลักษณะของระบบตามที่ต้องการ ขั้นที่ 2 คือ การสร้างแผ่นแบบพลานต์ (plant template) ที่เกิดจากเซตของค่าความไม่แน่นอนของพลานต์บนความถี่ที่สนใจ พร้อมทั้งเลือกนอมินัลพลานต์ (nominal plant) เพื่อใช้เป็นพลานต์ในการออกแบบตัวควบคุม ขั้นที่ 3 คือ การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง โดยในการออกแบบระบบควบคุมจะทำการพิจารณาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดัง Figure 1 ซึ่งประกอบด้วย  $P$  คือ พลานต์ที่ประกอบด้วยเซต  $P$  ซึ่งครอบคลุมค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นทั้งหมด,  $G$  คือ ตัวควบคุม,  $F$  คือ ตัวกรองของระบบ,  $H$  คือ เซนเซอร์,  $R$  คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง,  $E$  คือ ค่าความผิดพลาด,  $U$  คือ สัญญาณตัวควบคุม,  $Y$  คือ สัญญาณขาออกของระบบ,  $N$  คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด,  $D_i$  คือ ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ,  $D_o$  คือ ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ

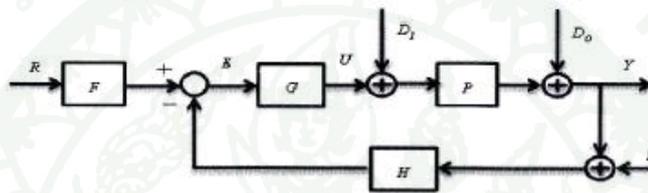


Figure 1 Feedback control system configuration

ในการสร้างขอบเขตตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณเพื่อออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการนั้น จะพิจารณาสถิติที่ได้จากบล็อกไดอะแกรมของ Figure 1 และจะออกแบบทางด้านโดเมนความถี่ (Craig et al, 2003) ดังนี้

1. ขอบเขตส่วนเผื่อเสถียรภาพของระบบ

$$\left| \frac{Y}{R} \right| = \left| F \frac{PG}{1+PGH} \right| \leq W_{s1} \tag{12}$$

2. การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านเข้าของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_i} \right| = \left| \frac{P}{1+PGH} \right| \leq W_{D_i} \tag{13}$$

3. การขจัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านออกของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_o} \right| = \left| \frac{1}{1+PGH} \right| \leq W_{D_o} \tag{14}$$

4. ขอบเขตการติดตาม

$$W_{low} \leq \left| F \frac{PG}{1+PGH} \right| \leq W_{up} \tag{15}$$

5. การขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด

$$\left| \frac{Y}{N} \right| = \left| \frac{-PG}{1+PGH} \right| \leq W_N \tag{16}$$

โดยที่  $W_{s1}$  คือ ขอบเขตส่วนเผื่อเสถียรภาพ,  $W_{D_i}$  คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการขจัดสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ,  $W_{D_o}$  คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการขจัดสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ,  $W_{up}$  คือ ค่าขอบเขตบน,  $W_{low}$  คือ ค่าขอบเขตล่าง,  $W_N$  คือ ค่าขอบเขตของสัญญาณรบกวน

ในการออกแบบตัวควบคุม แผ่นแบบพลาเน็ตจะถูกนำมาใช้ร่วมกับขอบเขตที่กำหนดตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ เพื่อให้มีความสอดคล้องกันและจะเลือกนอมินัลพลาเน็ต  $P_o$  จากเขตของความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของพลาเน็ต เพื่อให้ในการออกแบบตัวควบคุม  $G$  ที่จะทำให้ได้วงนอมินัล (nominal loop)  $L_o = GP_o$  มีคุณลักษณะและประสิทธิภาพตามที่ต้องการ โดยในการออกแบบนั้นจะนำฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาใช้งาน และในบทความนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมทั้งหมดบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ QFT Control Design Toolbox

การออกแบบตัวควบคุมของหุ่นยนต์สกรานั้นจะออกแบบเพื่อให้มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะดังนี้

ข้อกำหนดเสถียรภาพ: ส่วนเมื่อเกินอย่างน้อย 1.833 (5.26 dB) และมีส่วนเมื่อเฟสอย่างน้อย  $50^\circ$

ข้อกำหนดสมรรถนะ: ค่าพุ่งเกินน้อยกว่า 10% และค่าเวลาเข้าที่น้อยกว่า 5 วินาที

จากข้อกำหนดสมรรถนะสามารถคำนวณหาค่านวนหาฟังก์ชันถ่ายโอนของขอบเขตบนและขอบเขตล่าง

ได้ดังสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$W_{up} = \frac{0.5862(s+10)}{s^2 + 4s + 5.862} \quad (17)$$

$$W_{low} = \frac{1.256}{(s^2 + 2s + 1.256)(s+10)} \quad (18)$$

โดยในการออกแบบการระบบควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์สกรานั้น เนื่องจากเป็นระบบระบบหลายสัญญาณป้อนเข้าป้อนออก หลักการโดยทั่วไปยังคงสามารถใช้หลักการพื้นฐาน เพียงแต่อาจมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ในระบบ MIMO ถ้าหากว่าเมทริกซ์ถ่ายโอน  $P(s)$  ไม่ได้มีค่าแต่เฉพาะสมาชิกในแนวทแยงมุมหมายความว่าระบบจะมีการเชื่อมต่อระหว่างแกนแนล อาจจะพบว่าการออกแบบตัวควบคุมในแต่ละแกนแนลเป็นอิสระต่อกัน สามารถได้ระบบป้อนกลับที่มีคุณสมบัติที่ดี การออกแบบจะทำการออกแบบทีละแกนแนลและทำการปิดวงป้อนกลับแกนแนลที่ออกแบบแล้ว ก่อนที่จะออกแบบแกนแนลต่อไป วิธีการนี้เรียกว่า "การปิดวงโดยลำดับ" (Sequential loop closure) การออกแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับระบบ MIMO คือทำการแบ่งระบบออกเป็นระบบ SISO แล้วทำการออกแบบทีละวง ดัง Figure 2 แสดงให้เห็นว่าจะเริ่มทำการออกแบบตัวควบคุม  $G_1(s)$  สำหรับวงที่หนึ่งก่อนแล้วทำการปิดวงที่หนึ่ง ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวควบคุม  $G_2(s)$  ถ้าหากว่า  $P(s)$  มีการเชื่อมต่อระหว่างวงที่หนึ่งและสอง ผลกระทบจากการเชื่อมต่อนั้นจะปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกับตัวควบคุม  $G_2(s)$  ขณะที่ทำการออกแบบสำหรับวงที่สองหลังจากนั้นทำการปิดวงที่สอง และทำการออกแบบตัวควบคุม  $G_3(s)$  ทำเช่นนี้จนครบทั้งหมด ลักษณะของตัวควบคุมเมื่อทำการรวมเข้าเป็นเมทริกซ์ถ่ายโอนจะมีค่าแต่เฉพาะสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์ เรียกตัวควบคุมแบบนี้ว่า "ตัวควบคุมทแยงมุม" (Diagonal controller) ลักษณะ Figure 2 (ขวา) ซึ่งแตกต่างจากกรณีทั่วไป ที่ตัวควบคุมจะเป็นระบบ MIMO ดัง Figure 2 (ซ้าย) ซึ่งอยู่ในรูปเมทริกซ์ถ่ายโอนที่สามารถมีสมาชิกอื่นนอกเหนือจากแนวเส้นทแยงมุมได้

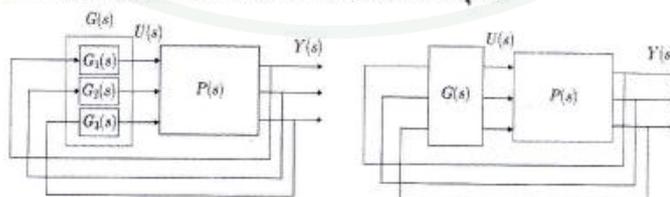


Figure 2 Diagonal MIMO controller (left) and general MIMO controller (right)

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองเพื่อให้มีลักษณะสอดคล้องกับคุณสมบัติที่กำหนดแล้วและจะออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองโดยการพิจารณาระบบวงปิดซึ่งมีลักษณะดัง Figure 3

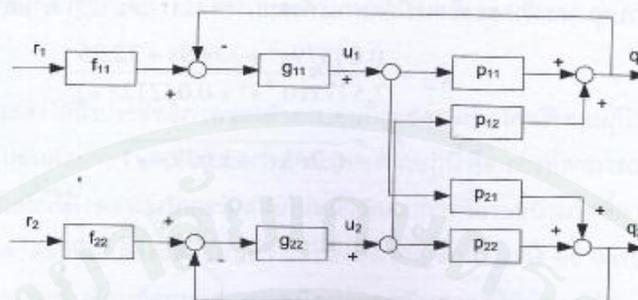


Figure 3 Diagonal closed-loop controller for two-input two-output system

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 1 ( $g_{11}$  กับ  $f_{11}$ ) เป็นลำดับแรกและตามด้วยการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 2 ( $g_{22}$  กับ  $f_{22}$ ) เป็นลำดับถัดไป ซึ่งผลที่ได้หลังจากออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 1 จะเป็นดังสมการที่ (19) และ (20) และมีลักษณะหลังการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองดัง Figure 4 และ 5

$$g_{11} = \frac{1.211s^3 + 17.14s^2 + 61.29s + 31.5}{0.001339s^3 + 0.06046s^2 + 1.044s + 1} \tag{19}$$

$$f_{11} = \frac{1}{0.04726s^2 + 0.6724s + 1} \tag{20}$$

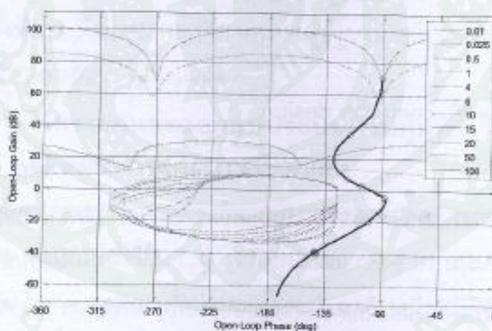


Figure 4 Nichols chart after  $g_{11}$  controller design

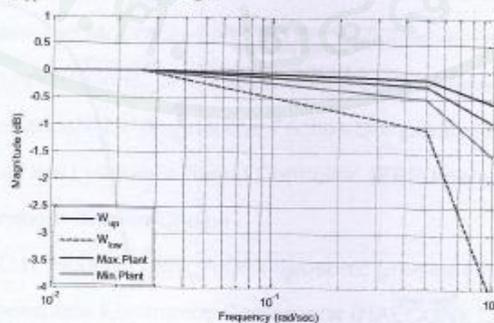


Figure 5 Bode plot after  $f_{11}$  controller design

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 1 เรียบร้อยแล้วก็จะทำการออกแบบตัวควบคุมของวงที่ 2 ซึ่งผลที่ได้หลังการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองก็จะมีลักษณะดัง Figure 6 และ 7 แล้วจึงจะได้สมการของตัวควบคุมและตัวกรองซึ่งจะมีลักษณะดังสมการที่ (21) และ (22) ตามลำดับ

$$g_{22} = \frac{0.04879s^2 + 3.669s + 32.35}{7.577 \times 10^{-5}s^2 + 0.04212s + 1} \tag{21}$$

$$f_{22} = \frac{1}{0.263s^2 + 1.077s + 1} \tag{22}$$

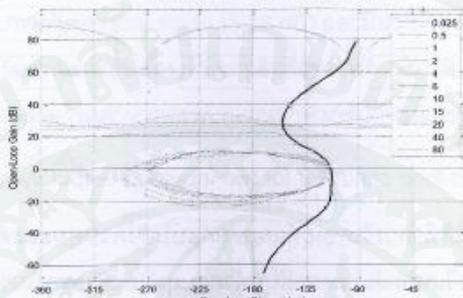


Figure 6 Nichols chart after  $g_{22}$  controller design

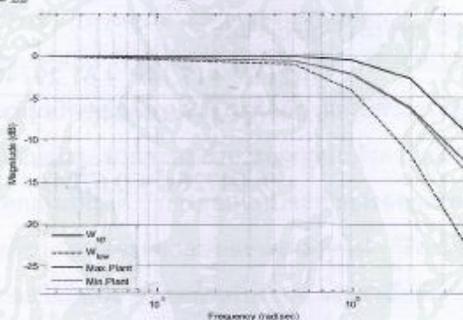


Figure 7 Bode plot after  $f_{22}$  controller design

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองจำลองระบบการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ โดยกำหนดให้แกนที่ 1 ( $q_1$ ) เคลื่อนที่เป็นมุม 10 องศา และแกนที่ 2 ( $q_2$ ) เคลื่อนที่เป็นมุม 45 องศา ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าน้อยที่สุด ค่าเฉลี่ยและค่าที่มากที่สุด ตามลำดับ

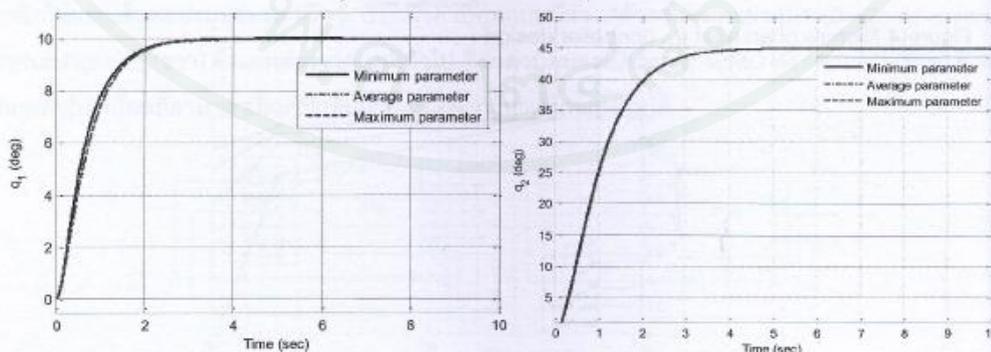


Figure 8 Simulation results of the first link ( $q_1$ ) (left) and of the second link ( $q_2$ ) (right)

จากผลการทดลองใน Figure 8 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองการทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองแกนนั้นสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดทุกประการ และสามารถเอาชนะความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดจาก ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นของพลาเน็ตได้

### สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ถูกออกแบบ โดยใช้ทฤษฎีฟีดแบ็กเชิงปริมาณเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์สกปราก จุดเด่นประการสำคัญของทฤษฎีนี้ คือ การที่สามารถเอาชนะความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นได้ เพราะนวัตกรรมสมัยใหม่มีวิวัฒนาการที่ก้าวหน้ามากขึ้น ย่อมเป็นการยากที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ และสิ่งที่สำคัญอีกประการ คือ การออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยมาก เพราะมีสมการคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ค่อนข้างน้อย แต่จะเน้นไปในทางปฏิบัติ ซึ่งสามารถนำทฤษฎีฟีดแบ็กเชิงปริมาณไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในงานอุตสาหกรรมต่อไป และจะทำการออกแบบและเปรียบเทียบกับทฤษฎีของการควบคุมคงทนแบบอื่นในงานวิจัยต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท Terasoft จำกัด ที่ให้นำ QFT Control Design Toolbox Evaluation Version สำหรับใช้กับโปรแกรม MATLAB และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่ทุน IUG5280005 ที่ส่งเสริมการทำโครงการวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- ชวลิต นฤมิตรบรรกุล และ พีระยศ แสนโกชณ์. 2554. การควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขนหุ่นยนต์ก้านเดียวที่มีค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์โดยใช้ทฤษฎีฟีดแบ็กเชิงปริมาณ. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34** วันที่ 30 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม พ.ศ.2554, โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จ.ชลบุรี, หน้า 789-792
- วโรตม ตูจันดา. 2550. **การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรมศาสตร์**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Craig, B., Y. Chait and O. Yaniv. 2003. The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox For Use with MATLAB. Terasoft Inc.
- Garcia, A., E. R. De Pieri., and R. Guenther. 2002. Experimental study applied to an industrial robot by using variable structure controllers and friction compensation. **J. Braz. Soc. Mech. Sci.** vol.24
- Houpis, C.H., S.J. Rasmussen and M. Gracia-Sanz. 2005. Quantitative Feedback theory: Fundamentals and Applications. CRC Press. United State of America.
- Noorbakhsh, M. and A. Yazdizadeh. 2010. Adaptive Friction Compensation in a Two-Link Planar Robot Manipulator Using a New Lyapunov-Based Controller. **IEEE International Conference on Control and Automation**. Xiamen China .
- Philips, S., M. Pachter and C.H. Houpis. 1995. A QFT Subsonic Envelope Flight Control System Design. **National Aerospace Electronics Conference (NAECON)**. Dayton, OH, May 1995.

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายชวลิต นฤมิตรวรกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (เมคาทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (พ.ศ. 2550)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่ทุน IUG5280005

