

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
สัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 หลักการ และทฤษฎี	4
1.4 สมมุติฐาน	6
1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.6 ขอบเขตการวิจัย	6
บทที่ 2 พลศาสตร์ของแขนกลยึดติด โครงสร้างยึดหุ่น	7
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	7
2.2 พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแขนกลยึดติด โครงสร้างยึดหุ่น	12
บทที่ 3 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์	17
3.1 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์สำหรับแขนกล	17
3.2 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์สำหรับแขนกลยึดติดกับ โครงสร้างยึดหุ่น	18
3.3 ขั้นตอนการเลือกตัวควบคุมอิมพีแดนซ์	19

3.4 ผลการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	22
บทที่ 4 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม	36
4.1 โครงสร้างยัดหยุนและโครงสร้างของแกนกลสำหรับการทดลอง	36
4.2 การติดตั้งระบบสำหรับการทดลอง	37
4.3 การเคลื่อนตัวโดยตัวควบคุมแบบ PD-Computed torque	40
4.4 การควบคุมแกนกลโดยตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์	44
4.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพเบื้องต้นของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์	54
4.6 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์โดยคำนึงถึงฐานยัดหยุน	61
บทที่ 5 บทสรุป	66
5.1 สรุปและประเมินผลการทดสอบ	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก ก สมการการเคลื่อนที่ของแกนกลที่ยึดอยู่บนฐานโครงสร้างยัดหยุน	71
ภาคผนวก ข ตารางแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ	73
ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง	77
ภาคผนวก ง แบบของแกนกลยึดติดกับโครงสร้างยัดหยุนที่ถูกสร้างขึ้น	79

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 แสดงตัวแปรอิมพีแดนซ์ในการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	28
4.1 แสดงการปรับค่าคงที่ของตัวจ่ายกระแส	38
4.2 แสดงตัวแปรอิมพีแดนซ์ในการทดสอบ	45
4.3 แสดงค่าความผิดพลาดในการติดตามตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลที่ตำแหน่งสมดุล	49
4.4 ผลการทดลองขณะที่แขนกลเคลื่อนที่และมีการสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม	52
ข-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน	73
ข-2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุ	74
ข-3 แสดงค่าคงที่ของระบบแขนกลทดสอบ	74
ข-4 แสดงค่ามวลและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเทียบเท่าของคานลักษณะต่างๆ	76
ค-1 แสดงรายละเอียดของเซ็นเซอร์วัดแรง	77
ค-2 แสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิของหัววัดแรง	78
ค-3 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์และอุปกรณ์วัดมุม	78
ค-4 แสดงรายละเอียดเซ็นเซอร์วัดความเร่งชนิด Dual axis accelerometer รุ่น ADXL203EB	80

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 แขนกลที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม	2
1.2 ก) แขนกลแบบ Flexible structure mounted manipulator ข) แขนกลแบบ Micro-macro Manipulator.	2
1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปลายของแขนกลกับสิ่งแวดล้อม	5
2.1 แขนกลชนิด PA-10	7
2.2 แขนกลชนิด PUMA	7
2.3 แขนกลชนิด IBM7575	8
2.4 แสดงทิศทางความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุมของข้อต่อแขนกล	8
2.5 แสดงโครงสร้างของแขนกลและข้อต่อ	9
2.6 แสดงแบบจำลองของระบบแขนกลที่อยู่บนโครงสร้างยืดหยุ่น	11
2.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแขน 1 และ 2 จากจุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดสุดท้าย	13
2.8 Tracking error ที่เกิดขึ้นขณะที่แขนกลมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด	14
2.9 แสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน และโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y	15
2.10 แสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลเมื่อมีการสั่นสะเทือน	15
3.1 แบบจำลองชุดทำการทดลองขณะจุดปลายสัมผัสพื้นผิวยืดหยุ่นหนืด	19
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\left \frac{\delta X_e(j\omega)}{\delta F(j\omega)} \right $ กับความถี่ ω เมื่อ $n=1$	21
3.3 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิว เมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 20 rad/s	23
3.4 แสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน และโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y เมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s	24

3.5 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกล และแรงที่กระทำต่อพื้นผิว เมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s	25
3.6 แสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน และ โมเมนตัมที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y เมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s	26
3.7 กราฟแสดงพื้นที่เสถียรภาพ (Stability map) แสดงช่วงของความถี่เสถียรภาพ และไม่มี เสถียรภาพของ แขนกลเมื่อสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม	27
3.8 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 5 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 1)	28
3.9 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 5 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 2)	29
3.10 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 5 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 3)	29
3.11 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 4)	30
3.12 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 5)	30
3.13 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 6)	31
3.14 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 4)	32
3.15 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 5)	33
3.16 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 4)	34
4.1 แสดงแขนกลสำหรับการทดลอง	36
4.2 แสดงการสั่นตัวในระนาบแนวนอนของฐานที่ถูกออกแบบ	37
4.3 แผนผังการทำงานและการควบคุมของแขนกลทดสอบ	37
4.4 แสดงตำแหน่งของแรงและแรงบิดที่เกิดขึ้นบนหัววัด	40

4.5 แสดงพฤติกรรมการบิดตัวของแกนกลทดสอบ	41
4.6 กราฟแสดงมุมของแกนกลที่บิดไปตามการเคลื่อนที่	41
4.7 Tracking error ที่เกิดขึ้นขณะที่แกนกลมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด	42
4.8 กราฟแสดงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y	42
4.9 กราฟแสดงแสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน	43
4.10 อิทธิพลของการสั่นตัวที่ฐานที่มีผลต่อตำแหน่งที่จุดปลายของแกนกล	44
4.11 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกลทดสอบ	44
4.12 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 1)	45
4.13 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 2)	46
4.14 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 3)	46
4.15 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 4)	47
4.16 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 5)	47
4.17 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 6)	48
4.18 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแกนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 4)	50
4.19 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแกนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 5)	51
4.20 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแกนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 6)	52
4.21 แสดงพฤติกรรมของแกนกลเมื่อไม่มีเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 50 N/m	53
4.22 แสดงระบบมวลและแรง	54

4.23 แสดงระบบที่ถูกกระตุ้นอย่างง่ายที่อยู่บนฐาน โครงสร้างยืดหยุ่น	55
4.24 แสดงแผนผังของระบบปิด	56
4.25 แสดง K_{wall} ที่เกิดขึ้นกับระบบจริง	57
4.26 แสดงพฤติกรรมที่ปลายแขนกลเมื่อกำหนดให้ K_{wall} มีค่าคงที่	57
4.27 แสดงแนวโน้มความมีเสถียรภาพเมื่อ K_{wall} มีค่าใด ๆ โดยที่ $K_d = 10 \text{ N/m}$	58
4.28 แสดงช่วงความมีเสถียรภาพเมื่อ K_{wall} มีค่าใด ๆ โดยทดลองที่ค่า K_d ต่างๆ	59
4.29 แสดงช่วงความมีเสถียรภาพเมื่อ K_{wall} มีค่าใด ๆ โดยทดลองที่ค่า M_b ต่างๆ	60
4.30 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิว เมื่อกำหนดให้ ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s เมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น	62
4.31 แสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y เมื่อกำหนดให้ ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s เมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น	63
4.32 กราฟแสดงพื้นที่เสถียรภาพ (Stability map) แสดงช่วงของความมีเสถียรภาพ และไม่มี เสถียรภาพของแขนกลเมื่อสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม เมื่อตัวควบคุมรวม State ของ ฐานโครงสร้างยืดหยุ่น	64
4.33 พฤติกรรมของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ต่อแขนกลเมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐาน โครงสร้างยืดหยุ่น	65
ข-1 แสดงความยาวและตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแขนกล	75
ค-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1	79
ค-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2	79

สัญลักษณ์

		หน่วย
θ	เป็นพิกัดบอกตำแหน่งของจุดต่อของแขน	rad
τ	แรงบิดที่จุดต่อแขน (Joint torque)	N.m
τ_{act}	แรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์	N.m
ζ	Damping ratio	-
B_d	ตัวแปรอิมพีแดนซ์ใช้แทนเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ความหน่วง	-
c_b	พจน์ความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วที่ฐานรองรับ	-
c_m	พจน์ความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วของแขนกล	-
D_b	Damping ที่ฐานรองรับ	Nsm ⁻¹
D_m	Damping ที่จุดต่อแขน	Nsm ⁻¹
D_{b1}	Damping ที่ฐานในแนวแกน x	Nsm ⁻¹
D_{b2}	Damping ที่ฐานในแนวแกน y	Nsm ⁻¹
D_{m1}	Damping ของมอเตอร์ตัวที่ 1	Nsm ⁻¹
D_{m2}	Damping ของมอเตอร์ตัวที่ 2	Nsm ⁻¹
$e(t)$	Tracking error	-
f_{ext}	แรงกระทำภายนอกที่จุดปลายของแขนกล	N
F_m	แรงปฏิกิริยาจากแขนกลที่กระทำต่อฐาน	N
F	Generalized force ของระบบแขนกล	N
g_b	Gravity torque ของฐานรองรับ	-
g_m	Gravity torque ของแขนกล	-
H_b	Base inertia matrix	kg
H_m	Inertia matrix ของแขนกล	kg.m ²
H_{bm}	Inertia coupling matrix	kg.m
I_1	Mass moment of inertia รอบจุดศูนย์กลางมวลของแขน 1	kg.m ²

I_2	Mass moment of inertia รอบจุดศูนย์กลางมวลของแขน 2	kg.m^2
I_z	Area moment of inertia	m^4
J	Geometric jacobian matrix	-
J_b	Geometric jacobian matrix ของฐาน	-
J_m	Geometric jacobian matrix ของแขนกล	-
K_b	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับ	N/m
K_{b1}	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับในแนวแกน x	N/m
K_{b2}	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับในแนวแกน y	N/m
K_d	ตัวแปรอิมพีแดนซ์ใช้แทนเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น	-
K_i	ค่าคงที่ของตัวจ่ายกระแส	A/V
k_p	Proportional gain	-
k_v	Derivative gain	-
l_1	ความยาวของแขน 1	m
l_2	ความยาวของแขน 2	m
lc_1	ความยาวจากจุดต่อที่ 1 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขน 1	m
lc_2	ความยาวจากจุดต่อที่ 2 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขน 2	m
m_1	มวลของแขน 1	kg
m_2	มวลของแขน 2	kg
m_b	มวลของฐาน	kg
M_d	ตัวแปรอิมพีแดนซ์ใช้แทนเมตริกซ์ความเฉื่อย	-
P_m	Coupling momentum	-
q_i	Generalized coordinate	-
Q_i	Generalized force	-
r	รัศมีของเสา	m
T	พลังงานจลน์รวม ของระบบ (Kinetic Energy)	-
U	พลังงานศักย์รวม ของระบบ (Potential Energy)	-
x_b	ตำแหน่งและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงของฐานรองรับ(State)	m
X_e	ตำแหน่งที่จุดปลายแขนกล (End-effector position)	m

ค

X_d	ตำแหน่งที่ออกแบบ (Desired position)	m
ω_d	ความถี่ออกแบบ	rad/s
ω_0	ความถี่สูงสุดที่ต้องการให้ระบบมีการตอบสนอง	rad/s
ω_{xend}	ความถี่ออกแบบในแนวแกน x	rad/s
ω_{yend}	ความถี่ออกแบบในแนวแกน y	rad/s



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved