ภาคผนวก ก

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ยึดอยู่บนฐานโครงสร้างยืดหยุ่น

จากแบบจำลองรูป 2.6 จะสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ได้ โดยคำนวณด้วยวิธีลากรางจ์แล้ว จัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ ดังนั้นจากสมการ (2.13) จะได้ว่า

$$H_b = \begin{bmatrix} m_{b1} + m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & m_{b2} + m_1 + m_2 \end{bmatrix}$$

$$H_{bm} = \begin{bmatrix} H_{bm11} & H_{bm12} \\ H_{bm21} & H_{bm22} \end{bmatrix}$$

$$H_m = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$$

$$D_b = \begin{bmatrix} D_{b1} & 0 \\ 0 & D_{b2} \end{bmatrix}$$

$$D_m = \begin{bmatrix} D_{m1} & 0 \\ 0 & D_{m2} \end{bmatrix}$$

$$K_b = \begin{bmatrix} K_{b1} & 0 \\ 0 & K_{b2} \end{bmatrix}$$

$$c_b = \begin{bmatrix} c_{b1} & c_{b2} \end{bmatrix}^T$$

$$c_m = \begin{bmatrix} c_{m1} & c_{m2} \end{bmatrix}^T$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 \end{bmatrix}^T$$

โดยที่สามารถแสดงสมการของแต่ละส่วนประกอบในเมตริกซ์ต่างๆได้ดังนี้

$$H_{bm11} = -m_1 lc_1 \sin\theta_1 - m_2 l_1 \sin\theta_1 - m_2 lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$H_{bm12} = -m_2 lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$H_{bm21} = m_2 lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_1 lc_1 \cos\theta_1 + m_2 l_1 \cos\theta_1$$

$$H_{bm22} = m_2 lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$H_{11} = m_1 {lc_1}^2 + m_2 {l_1}^2 + m_2 {lc_2}^2 + 2m_2 l_1 lc_2 \cos\theta_2 + I_1 + I_2$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$H_{12} = m_2 lc_2^{\,2} + m_2 l_1 lc_2 \cos\theta_2 + I_2$$

$$H_{21} = m_2 lc_2^{\,2} + m_2 l_1 lc_2 \cos\theta_2 + I_2$$

$$H_{22} = m_2 lc_2^{\,2} + I_2$$

$$c_{b1} = \{-m_2 lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - m_1 lc_1 \cos\theta_1 - m_2 l_1 \cos\theta_1\}\dot{\theta}_1^{\,2} - m_2 lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\dot{\theta}_2^{\,2}$$

$$- 2m_2 lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2$$

$$c_{b2} = \{-m_1 lc_1 \sin\theta_1 - m_2 l_1 \sin\theta_1 - m_2 lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\}\dot{\theta}_1^{\,2} - m_2 lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\}\dot{\theta}_2^{\,2}$$

$$- 2m_2 lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2$$

$$c_{m1} = -2m_2 l_1 lc_2 \sin\theta_2\,\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2 l_1 lc_2 \sin\theta_2\,\dot{\theta}_2^{\,2}$$

$$c_{m2} = m_2 l_1 lc_2 \sin\theta_2\,\dot{\theta}_1^{\,2}$$

โดยที่ m_1 - มวลของแขน 1

m_2 - มวลของแขน 2

m_b - มวลของฐาน

lc_1 - ความยาวจากจุดต่อที่1ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขน 1

lc_2 - ความยาวจากจุดต่อที่2ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขน 2

l_1 - ความยาวของแขน 1

l_2 - ความยาวของแขน 2

I_1 - โมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางมวลของแขน 1

I_2 - โมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางมวลของแขน 2

D_{b1} - Damping ที่ฐานในแนวแกน x

D_{b2} - Damping ที่ฐานในแนวแกน y

D_{m1} - Damping ของมอเตอร์ตัวที่ 1

D_{m2} - Damping ของมอเตอร์ตัวที่ 2

K_{b1} - ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับในแนวแกน x

K_{b2} - ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับในแนวแกน y

กำหนดให้ $m_{b1} = m_{b2} = m_b$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงคุณสมบัติต่าง ๆของวัสดุ

ตาราง ข-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน

ประเภท	หมายเลข	ชื่อชิ้นงาน	Mass-moment of inertia (kg.mm^2)	พิจารณารอบแขน	จำนวน (ชิ้น)	มวล/ชิ้น(kg)	ส่วนประกอบ
ชิ้นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Non-moving parts)	L4A001-0201	Plate 1	-	-	1	1.1697	บน
	L4A001-0202	Plate 2	-	-	2	1.0632	บน
	L4A001-0203	Plate 3	-	-	1	0.3700	บน
	L4A001-0204	Plate 4	-	-	1	0.6315	บน
	L4A001-0215	Base 1	-	-	1	4.6560	บน
	L4A001-0216	Base 2	-	-	1	6.1193	ล่าง
	L4A001-0218	Post	-	-	4	0.5909	ล่าง
	L4A001-0221	Contact Plate	-	-	1	1.2411	ยึดกับผนัง
ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving parts)	L4A001-0205	Arm 1	36,597	1	1	1.7246	บน
	L4A001-0206	Arm 2	3,902	2	1	0.7118	บน
	L4A001-0207	Plate 5	7,343	1	1	0.159	บน
	L4A001-0207	Plate 5	13,815	1	1	0.159	บน
	L4A001-0408	Plate Mounting	1,994	2	1	0.752	บน
	L4A001-0209	Sensor base	292	2	1	0.1794	บน
	L4A001-0210	Coupling 1	120	1	1	0.0415	บน
	L4A001-0211	Shaft 1	456	1	1	0.1635	บน
	L4A001-0211	Shaft 1	2721	2	1	0.1635	บน
	L4A001-0212	Key 1	11	1	2	0.0029	บน
	L4A001-0212	Key 1	48	2	2	0.0029	บน
	L4A001-0213	Mass balance	72,752	1	1	3.7001	บน
	L4A001-0214	Sensor Plate	-	2	1	0.1021	บน
	L4A001-0217	Coupling 2	766	2	1	0.0457	บน
	L4A001-0219	Plate 6	15,296	1	1	0.2322	บน
	L4A001-0220	Key 2	18	1	1	0.0067	บน
		motor 2	71,481	1	1	0.78	บน
		Motor 1	8,318	1	1	3.02	บน
		Force Sensor	-	2	1	0.8	บน

หมายเหตุ ส่วนประกอบบน หมายถึง ส่วนที่อยู่เหนือเสา (Post) ขึ้นไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากตาราง ข-1 จะได้ว่า

มวลรวมทั้งหมด	31.43	kg
มวลรวมชิ้นส่วนด้านบน	21.71	kg
มวลรวมแขน 1	6.97	kg
มวลรวมแขน 2	2.76	kg
มวลรวมของฐาน	11.97	kg
Moment of inertia 1	226,218	$kg.mm^2$
Moment of inertia 2	9,772	$kg.mm^2$

ตาราง ข-2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุ

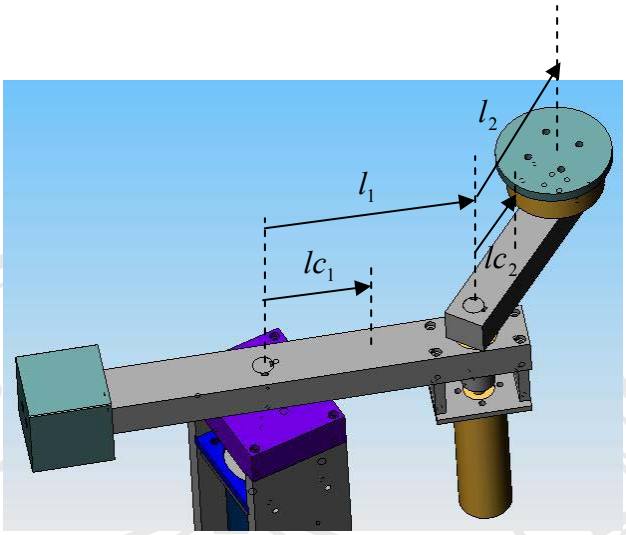
วัสดุชนิด	ความหนาแน่นDensity (kg/m^3)	ค่าโมดูลัส (GPa)
A5052	2,700	70
SUS304	8,000	201
SS400	7,300	100

ตาราง ข-3 แสดงค่าคงที่ของระบบแขนกลทดสอบ

รายละเอียด	ค่าคงที่
มวลของแขน 1(m_1)	6.97 kg
มวลของแขน 2 (m_2)	2.76 kg
มวลของฐาน (m_b)	11.97 kg
ความยาวของแขน 1 (l_1)	0.2020 m
ความยาวของแขน 2 (l_2)	0.1625 m
ความยาวจากจุดต่อที่ 1 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขน 1 (lc_1)	0.0524 m
ความยาวจากจุดต่อที่ 2 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขน 2 (lc_2)	0.1288 m
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับในแนวแกน x (K_{b1})	53,935 N/m
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับในแนวแกน y (K_{b2})	53,935 N/m
Mass moment of inertia รอบจุดศูนย์กลางมวลของแขน 1 (I_1)	0.2262 $kg.m^2$
Mass moment of inertia รอบจุดศูนย์กลางมวลของแขน 2 (I_2)	0.0098 $kg.m^2$

หมายเหตุ การหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ฐานรองรับสามารถหาได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป ข-1 แสดงความยาวและตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแขนกล

ขั้นต้นออกแบบให้ฐานโครงสร้างยืดหยุ่นมีความถี่ธรรมชาติที่ค่าประมาณ 8 เฮิรตซ์ โดยใช้เสาเหล็กกล้า (Stainless steel) ชนิด SUS304 โดยพิจารณาให้การสั่นของเสาเป็นการสั่นแบบอิสระ (Free vibration) โดยจะสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้ คือ

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \text{(ข-1)}$$

โดยในการหาค่า k_e (Equivalent stiffness coefficients) และ m_e (Equivalent mass) นั้นสามารถดูได้จากตาราง ข-4 แต่ค่าเนื่องจากฐานที่ถูกออกแบบมีเสาทั้งหมดสี่เสาดังนั้น

$$k = 4k_e \qquad \text{(ข-2)}$$

และ
$$m = m_e \qquad \text{(ข-3)}$$

ดังนั้นจากสมการ (ข-1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

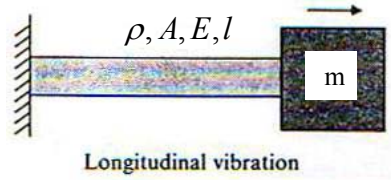
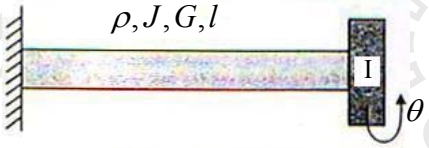
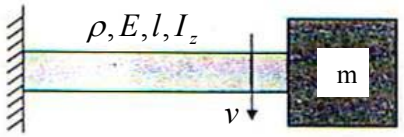
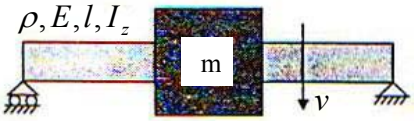
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{4k_e}{m_e}} \qquad \text{(ข-4)}$$

ค่าคุณสมบัติของวัสดุแสดงดังตาราง ข-2 โดยในที่นี้จะพิจารณาระบบเป็นการโก่งตัวของคานแคนทีลิเวอร์ (Bending of cantilever beam) แต่เนื่องจากการออกแบบที่ฐานมีลักษณะเป็นการโก่งของเสายาว (Buckling of long columns) ดังนั้นการแทนค่าความยาวของคาน (l) จะถูกแทนค่าด้วย $0.7l$ และค่า Area moment of inertia (I_z) สามารถหาได้โดย

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4} \qquad \text{(ข-5)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ข-4 แสดงค่ามวลและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเทียบเท่าของคานลักษณะต่างๆ (Shabana, 1996)

System	Shape Function	m_e	k_e
 Longitudinal vibration	$\phi(x) = \frac{x}{l}$	$m + \frac{\rho A l}{3}$	$\frac{EA}{l}$
 Torsional vibration	$\phi(x) = \frac{x}{l}$	$I + \frac{\rho J l}{3}$	$\frac{GJ}{l}$
 Bending of cantilever beam	$\phi(x) = \frac{3x^2 l - x^3}{2l^3}$	$m + \frac{33\rho A l}{140}$	$\frac{3EI_z}{l^3}$
 Bending of simply supported beam	$\phi(x) = \sin(\frac{\pi x}{l})$	$m + \frac{\rho A l}{2}$	$\frac{\pi^4 EI_z}{2l^3}$

จากสมการ (ข-4) และ (ข-5) สามารถหาขนาดและความยาวของเสาที่เหมาะสมได้ โดยเริ่มต้นกำหนดความยาวของเสาที่ต้องการ และทำการทดลองสุ่มค่ามาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา จากนั้นทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติ โดยในที่นี้จะได้ว่า ค่าความยาวเสาที่กำหนด คือ 40 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของเสา คือ 1 เซนติเมตร มีค่าความถี่ธรรมชาติ 7.9 เฮิรตซ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ค

รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆที่ใช้ในการทดลอง

ตาราง ค-1 แสดงรายละเอียดของเซ็นเซอร์วัดแรง (บริษัท ATI INDUSTRIAL AUTOMATION)

รายการ	รายละเอียดของอุปกรณ์	
บริษัทผู้ผลิต	ATI INDUSTRIAL AUTOMATION	
รุ่น	Delta US-150-600	
Sensing ranges		
Fx, Fy (± N)	660	
Fz (± N)	1,980	
Tx, Ty (± N-m)	60	
Tz (± N-m)	60	
Resolution	Controller F/T System	16 bit DAQ F/T System
Fx, Fy (± N)	1/2	1/32
Fz (± N)	1	1/16
Tx, Ty (± N-m)	3/100	3/1,600
Tz (± N-m)	3/100	3/1,600
Single- axis overload		
Fxy (± N)	3,400	
Fz (± N)	12,000	
Txy (± N-m)	220	
Tz (± N-m)	420	
Resonant frequency		
Fx, Fy, Tz	1,500 Hz	
Fz, Tx, Ty	1,700 Hz	
Physical specifications		
Weight	910 g	
Diameter	94.5 mm	
Height	33.3 mm	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

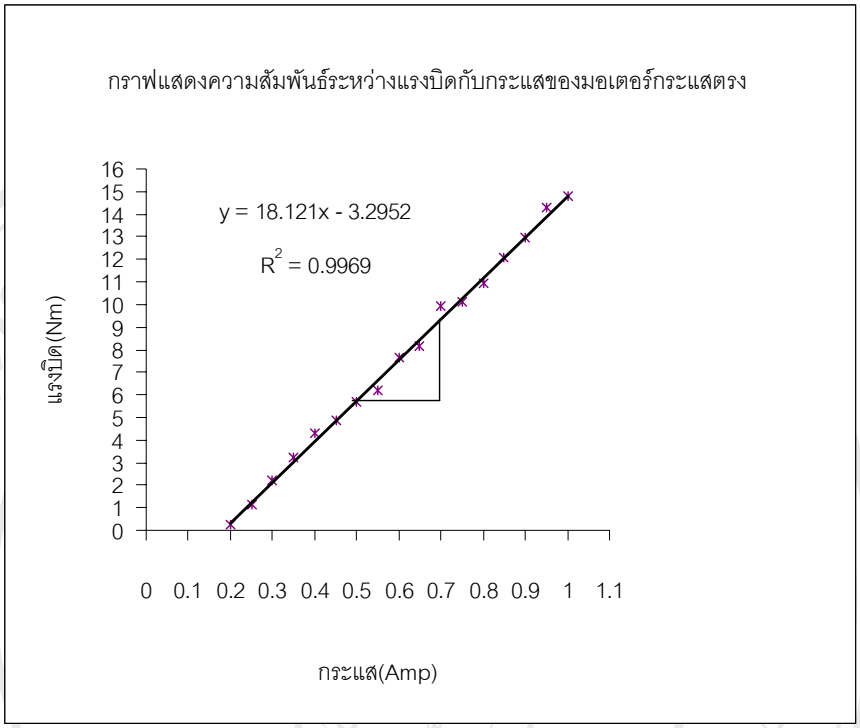
ตาราง ค-2 แสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิของหัววัดแรง (บริษัท ATI INDUSTRIAL AUTOMATION)

Deviation from 22 ^{o}C	Typical gain error
$\pm$ 5 ^{o}C	0.1%
$\pm$ 15 ^{o}C	0.5%
$\pm$ 25 ^{o}C	1%
$\pm$ 50 ^{o}C	5%

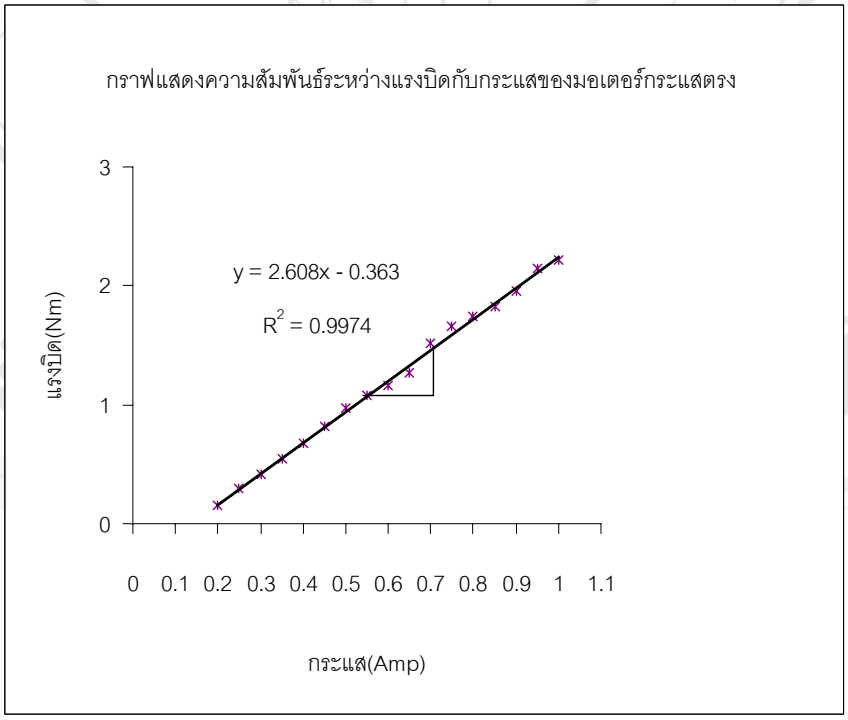
ตาราง ค-3 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์และอุปกรณ์วัดมุม (บริษัทHAMONIC DRIVE SYSTEM INC.)

รายการ	Dc servo motor 1 (big)	Dc servo motor 2 (small)
รุ่น	RH-20-3004-OEM	RH-14GH11OEM
บริษัทผู้ผลิต	HAMONIC DRIVE SYSTEM INC.	HAMONIC DRIVE SYSTEM INC.
Rate output power (W)	90	20.3
Rate current (A)	3	1.8
Peak current (A)	15	5.4
Torque constant (Nm/A)	18.121	2.602
Moment of inertia (kg.m^2)	0.000026 (armature)	0.021
Weight with encoder (kg)	3.02	0.78
Gear ratio	1/100	1/50
Encoder		
Resolution (ppr)	1,000	1,000
Output signal	A, A/, B, B/, Z, Z/	A, A/, B, B/, Z, Z/
Power supply (VDC)	+5 $\pm$ 5%	+5 $\pm$ 5%
Max.output current(mA)	20	20
Max. signal freq. (KHz)	100	100

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป ค-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1



รูป ค-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ค-4 แสดงรายละเอียดเซ็นเซอร์วัดความเร่งชนิด Dual axis accelerometer รุ่น ADXL203EB

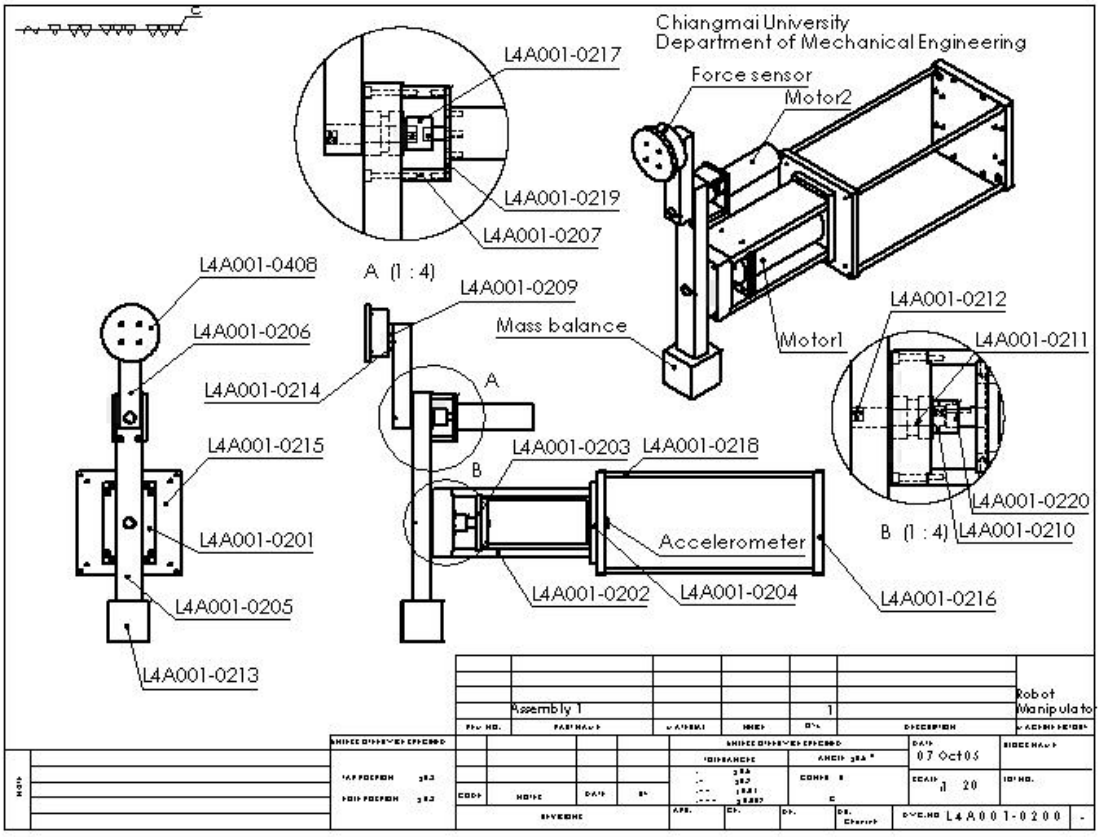
รายการ	รายละเอียดอุปกรณ์
Axis	2
Range	+/-1.7g
Sensitivity	1000mV/g
Sensitivity accuracy	± 6
Output type	Analog
Bandwidth	2.5kHz
Noise density	110
Supply current	0.7 mA
Supply voltage	3 to 6 VDC
Temp range	-40 to 125 ^{o}C
Package	E-8

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

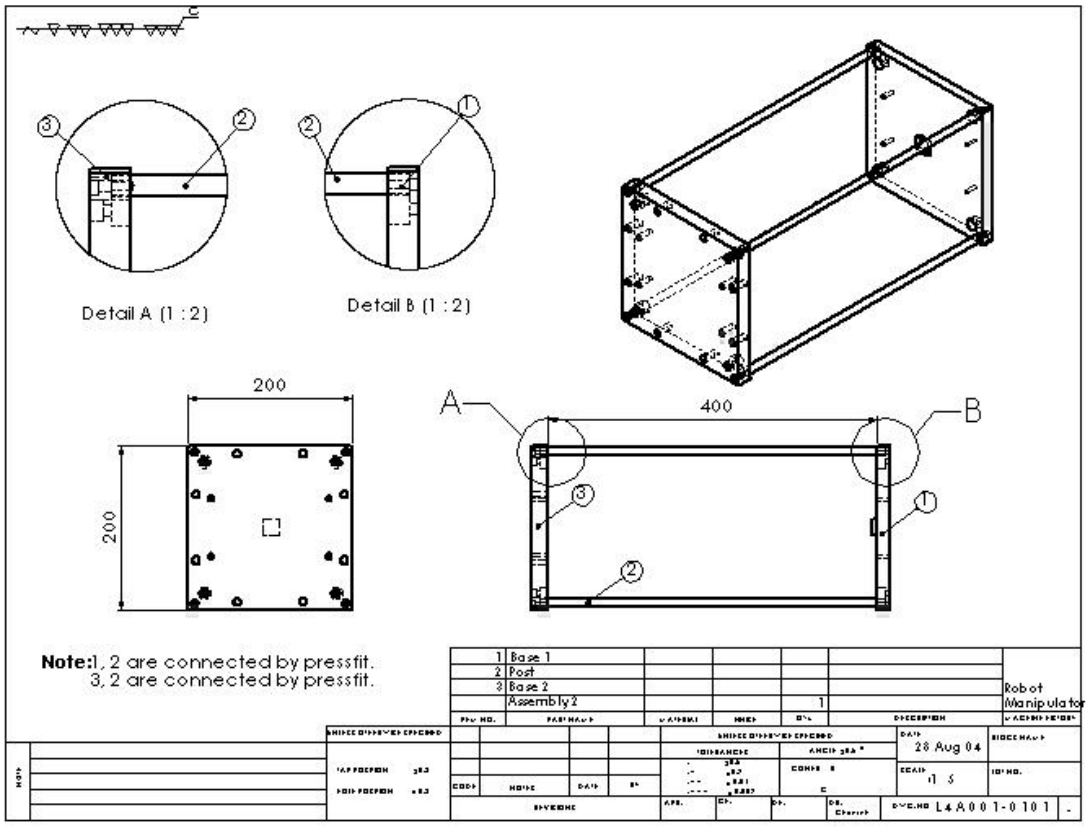
ภาคผนวก ง

แบบของแขนกลยึดติดกับโครงสร้างยืดหยุ่นที่ถูกสร้างขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายฌานสิทธิ์ ยอดพฤติการณ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 กรกฎาคม 2523
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย เชียงใหม่ ปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2544
ประสบการณ์	วิศวกรเครื่องกล บริษัท มูราตะ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2545-2546

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved