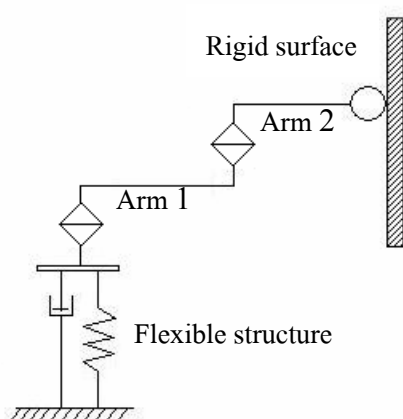


บทที่ 4

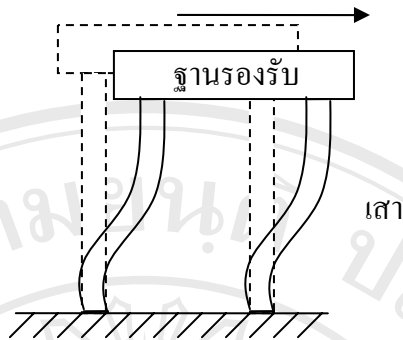
การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม

4.1 โครงสร้างยืดหยุ่นและโครงสร้างของแขนกลสำหรับการทดลอง

สำหรับโครงสร้างของแขนกลที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะแบบ 2 DOF เคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน โดยแขนกลถูกยึดอยู่บนฐานโครงสร้างยืดหยุ่น ดังรูป 4.1 โครงสร้างยืดหยุ่นในที่นี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยเสาทั้งหมด 4 เสา ถูกอัดแน่นอยู่ที่ฐานทั้งสี่มุม เพื่อให้การสั่นตัวของฐานอยู่ในระนาบแนวนอน ดังรูป 4.2 และลดพฤติกรรมการบิดตัวของฐานในขณะที่แขนกลมีการเคลื่อนที่ โดยมีค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดแรกเท่ากับ 7.9 เฮิรตซ์ แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข ที่ตำแหน่งปลายของแขน 2 มีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรง และที่แขน 1 มีการติดมวลถ่วง (Mass balance) ไว้ที่ส่วนท้ายของแขน เพื่อลดภาระ (Radial load) ของเบร็กที่จุดหมุน มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนให้แขนกลมีการเคลื่อนที่เป็นมอเตอร์กระแสตรง (Dc servo motor) ซึ่งมี Encoder ในการวัดมุม ที่ได้ฐานโครงสร้างยืดหยุ่นมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็ว โดยทำการติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของฐานเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัดสัญญาณเมื่อฐานเกิดการบิดตัว สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์และตำแหน่งการติดตั้ง แสดงโดยละเอียดในภาคผนวก ค และภาคผนวก ง ตามลำดับ



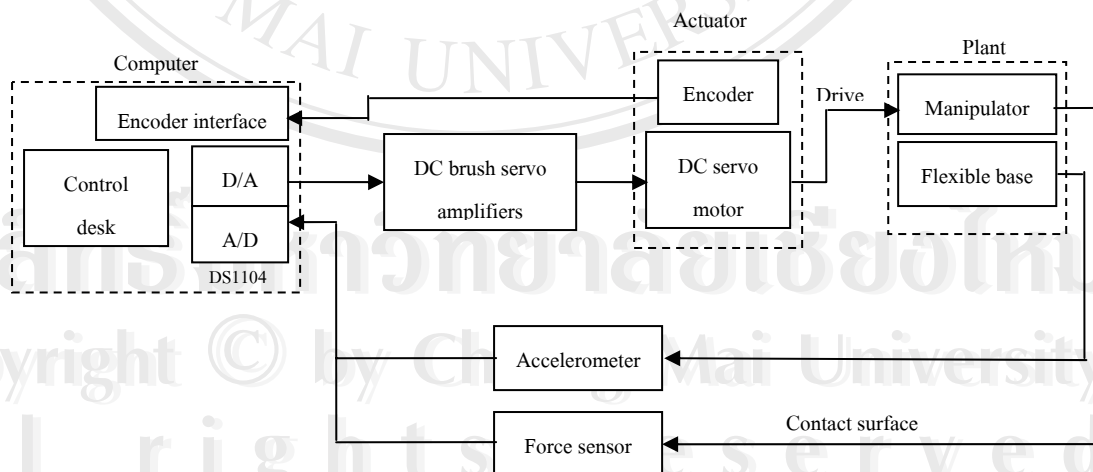
รูป 4.1 แสดงแขนกลสำหรับการทดลอง



รูป 4.2 แสดงการสั่นตัวในระนาบแนวนอนของฐานที่ถูกออกแบบ

4.2 การติดตั้งระบบสำหรับการทดลอง

อุปกรณ์ต่างๆ ถูกเชื่อมต่อกัน ดังรูป 4.3 โดยมีลักษณะการทำงาน คือ ผู้ทดสอบทำการควบคุมระบบแขนกลผ่านโปรแกรม Control desk สัญญาณจาก D/A ถูกส่งไปยังตัวขับเคลื่อนกระแส เพื่อจ่ายกระแสให้กับตัวกำเนิดแรง สร้างแรงบิดทำให้แขนกลมีการเคลื่อนที่ มุมบิดและความเร็วเชิงมุมของแขนถูกวัดด้วย Encoder ซึ่งสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางช่องรับสัญญาณ Encoder interface เมื่อแขนกลมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับพื้นผิว แรงที่จุดปลายและการสั่นตัวของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น ถูกวัดโดยเซ็นเซอร์วัดแรงและเซ็นเซอร์วัดความเร่งตามลำดับ สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่าน A/D จากนั้นคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผล โดยรายละเอียดและหลักการทำงานของอุปกรณ์และเซ็นเซอร์ต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูป 4.3 แผนผังการทำงานและการควบคุมของแขนกลทดสอบ

4.2.1 DC brush servo amplifiers

ทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ โดยปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะถูกควบคุมโดยความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวจ่ายกระแส กระแสที่ป้อนให้มอเตอร์จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ที่ป้อน เป็นไปตามสมการ (4.1)

$$I = K_i v \quad (4.1)$$

โดยที่ K_i คือ ค่าคงที่ของตัวจ่ายกระแส ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวจ่ายกระแสทั้งหมดสองตัว ได้ทำการปรับค่าคงที่ไว้ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงการปรับค่าคงที่ของตัวจ่ายกระแส

ตัวจ่ายกระแสที่ใช้	ค่าคงที่ K_i (Amp/Volt)
ขับมอเตอร์ตัวที่ 1	0.6
ขับมอเตอร์ตัวที่ 2	0.4

4.2.2 A/D (Analog to digital converter) และ D/A (Digital to analog converter)

ในการวัดแรงที่จุดปลายของแขนกลและความเร่งของฐานที่มีการสั่น สัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อก ซึ่งจำเป็นต้องใช้ A/D ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลได้ หลังจากทีคอมพิวเตอร์ประมวลผลแล้ว สัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวจ่ายกระแสในรูปของสัญญาณดิจิทัล จึงต้องทำการผ่าน D/A เพื่อเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกในรูปของความต่างศักย์ก่อนนำไปป้อนให้ตัวจ่ายกระแส ในงานวิจัยนี้จะใช้ บอร์ด DS1104 ของบริษัท dSpace Inc. ทำหน้าที่เป็น A/D และ D/A ความละเอียด 16 บิต

4.2.3 Digital incremental encoder interface

ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากการวัดมุมของ Encoder ในรูปของสัญญาณดิจิทัล สำหรับบอร์ด DS1104 มีช่องรับสัญญาณนี้อยู่ทั้งหมดสองช่อง สามารถนับสัญญาณพัลส์ ได้ถึง 6.6 MHz

4.2.4 โปรแกรม ControlDesk

เป็นโปรแกรมที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB และ Simulink ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Simulink ในการเขียนโปรแกรมควบคุม โดยใช้ Real time workshop (RTW) ของ Mathwork เป็นตัวแปลงโปรแกรมให้เป็น Real - time code และ Real - time interface (RTI) ซึ่งแปลง Real time code ลงสู่ Hardware สำหรับ ControlDesk นั้น ทำหน้าที่ในการสื่อสารกับ RTI

เพื่อให้ผู้ใช้งานสื่อสารกับ Hardware ของระบบได้ จึงสามารถแสดงผลการทดสอบและปรับค่าต่าง ๆ ได้ในโปรแกรมขณะที่ทำการทดลอง

4.2.5 เซ็นเซอร์วัดแรง

เซ็นเซอร์วัดแรงที่ใช้เป็นรุ่น Delta US-150-600 ของบริษัท ATI INDUSTRIAL AUTOMATION ทำหน้าที่ในการวัดแรงขณะที่แขนกลมีการสัมผัสกับพื้นผิว สัญญาณที่รับมาจาก เซ็นเซอร์วัดแรง มีค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถแปลงเป็นแรงได้โดยการคูณกับ Transformation matrix , W ซึ่ง Calibrate มาจากบริษัทผู้ผลิต ดังสมการ

$$[F] = [A][W]^T \quad (4.2)$$

โดย

$$[W] = \begin{bmatrix} -0.584836004 & -0.040209568 & 0.299891713 & -17.97134397 & -0.091554352 & 18.00751807 \\ -0.064260516 & 20.22977767 & 0.021070394 & -10.53691627 & 0.414654197 & -10.26103644 \\ 32.07777010 & -0.838836302 & 32.7843147 & -0.640933441 & 31.11259263 & -0.532857851 \\ -0.199511917 & 9.552029949 & -44.22418274 & -4.100788611 & 43.25645637 & -5.687852427 \\ 50.13741335 & -1.385651555 & -26.17927429 & 8.906818256 & -24.65945893 & -7.882272189 \\ -0.173545525 & -23.07400293 & 0.452582093 & -24.04912788 & 0.244503428 & -23.91568773 \end{bmatrix}$$

$[A]$ คือ เมตริกซ์ ปรับค่า (Adjust matrix) มีขนาด 1x6 สามารถหาได้ดังนี้

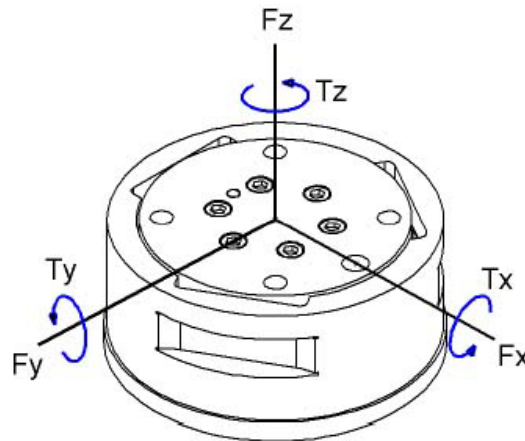
$$[A] = [R_m] - [B] \quad (4.3)$$

โดยที่ $[R_m]$ คือ เมตริกซ์สัญญาณที่วัดได้จริง (Real measurement matrix) ขนาด 1x6

$[B]$ คือ Bias matrix ขนาด 1x6 มีค่าดังนี้

$$[-0.011330 \quad 0.012963 \quad -0.008380 \quad -0.004950 \quad 0.024658 \quad 0.013794]$$

$[F]$ คือ เมตริกซ์ของแรงในหน่วย ปอนด์ และแรงบิดในหน่วย ปอนด์-นิ้ว โดยในแต่ละ ส่วนประกอบของเมตริกซ์คือ $[F_x \ F_y \ F_z \ T_x \ T_y \ T_z]$ แรงและแรงบิดที่เกิดขึ้นบน เซ็นเซอร์วัดแรงแสดงดังรูป 4.4



รูป 4.4 แสดงตำแหน่งของแรงและแรงบิดที่เกิดขึ้นบนหัววัด (บริษัท ATI INDUSTRIAL AUTOMATION)

4.2.6 เซ็นเซอร์วัดความเร่ง

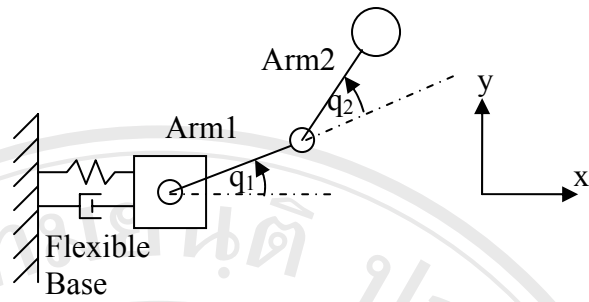
ทำหน้าที่ในการวัดความเร่งในการสั่นสะเทือนที่ฐาน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง รุ่น ADXL203EB ของบริษัท Analog Inc. โดยสามารถวัดได้ 2 แกน มีช่วงความเร่งที่วัดได้ คือ $\pm 1.7g$

4.3 การเคลื่อนตัวโดยตัวควบคุมแบบ PD-Computed torque

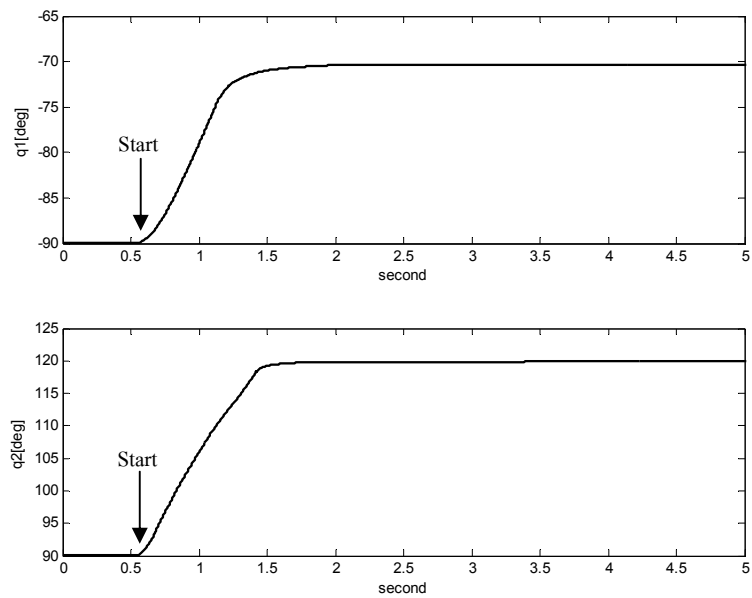
นำตัวควบคุมแบบ PD-Computed torque มาทดสอบกับระบบแขนกล เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ทำงานอยู่บนฐาน โครงสร้างยืดหยุ่น โดยกำหนดให้ค่า $k_p = \begin{bmatrix} 400 & 0 \\ 0 & 400 \end{bmatrix}$

และ $k_v = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix}$ มีการเคลื่อนที่ดังรูป 4.5 สถานะเริ่มต้นของแขน 1 อยู่ที่ -90 องศา และแขน 2 อยู่ที่ตำแหน่ง 90 องศา จากนั้นทำการเคลื่อนตัวมายังตำแหน่งสุดท้าย คือ แขน 1 อยู่ที่ -70 องศา และแขน 2 อยู่ที่ตำแหน่ง 120 องศา กำหนดความเร็ว $\dot{q}_1$ และ $\dot{q}_2$ เท่ากับ 0.61 rad/s ได้ผลการทดสอบตามรูป 4.6 ถึงรูป 4.9

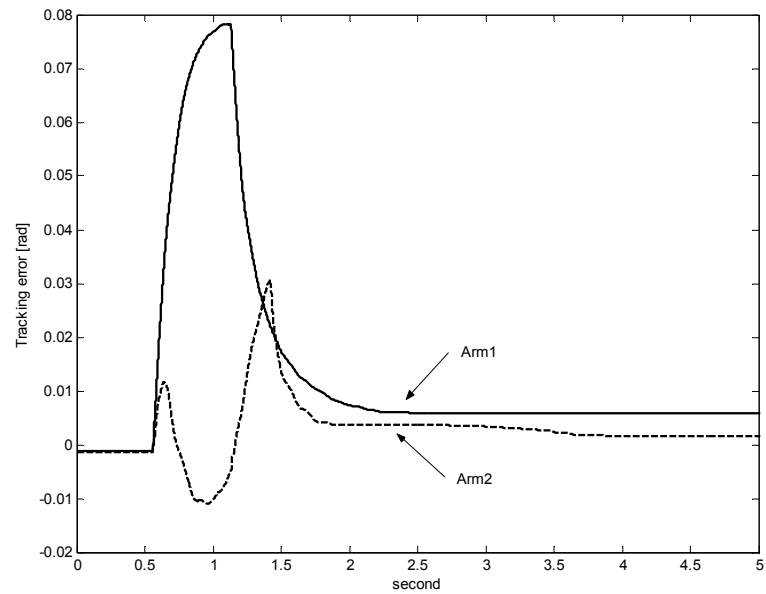
All rights reserved



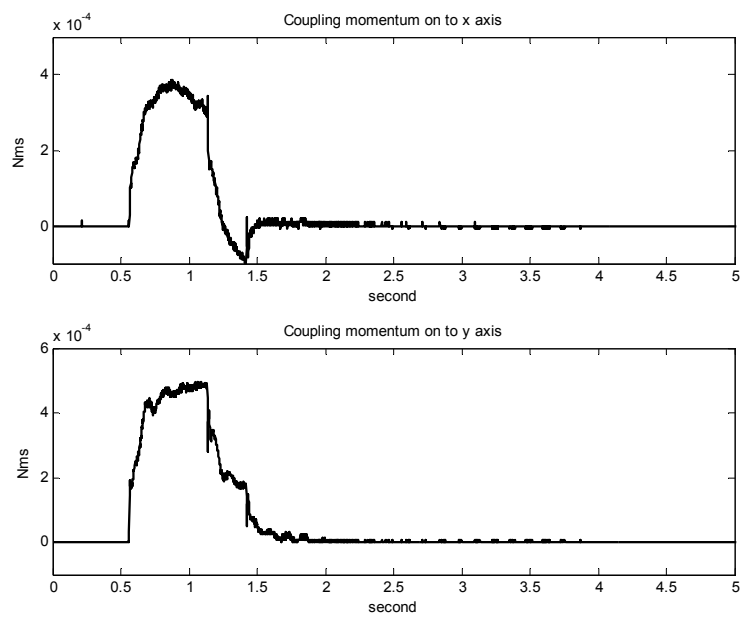
รูป 4.5 แสดงพฤติกรรมการบิดตัวของแขนกลทดสอบ



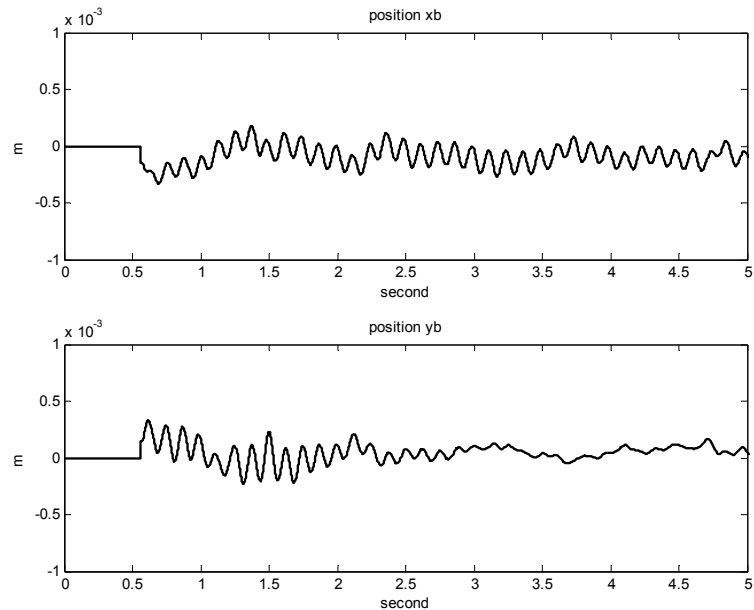
รูป 4.6 กราฟแสดงมุมของแขนกลที่บิดไปตามการเคลื่อนที่



รูป 4.7 Tracking error ที่เกิดขึ้นขณะที่แขนกลมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด

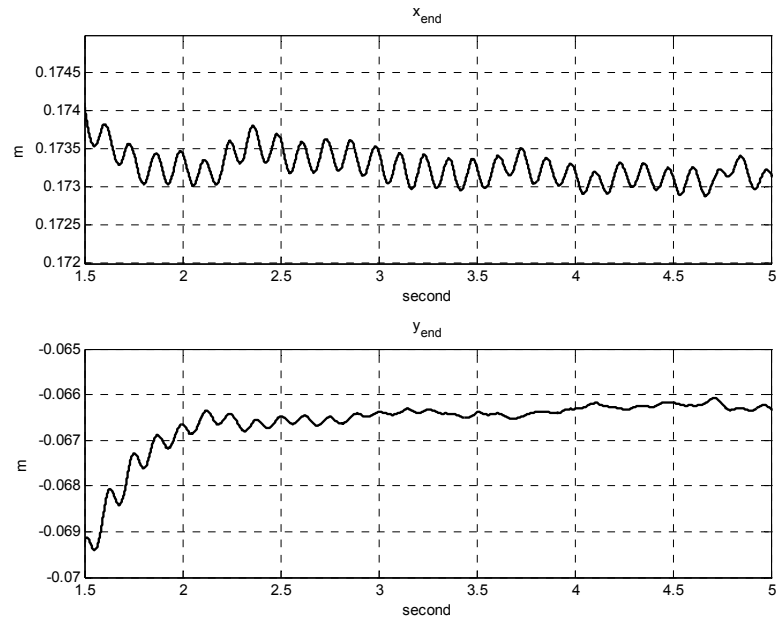


รูป 4.8 กราฟแสดงโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y



รูป 4.9 กราฟแสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน

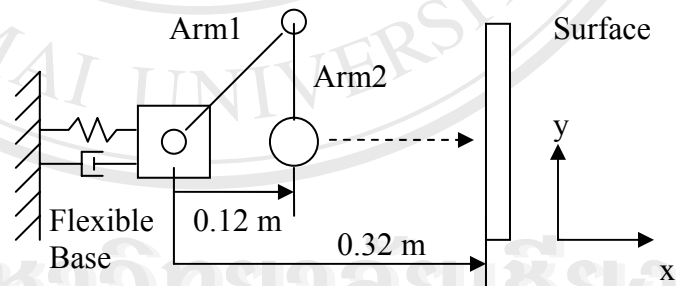
จากรูป 4.6 สังเกตได้ว่าแขนกลถูกสั่งให้มีการเคลื่อนที่ ที่เวลาประมาณ 0.6 วินาที เมื่อเวลาผ่านไปแขนกลพยายามเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบไว้จนเข้าสู่สมดุล โดยตำแหน่งสุดท้ายของแขน 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ -70 องศา (-1.2217 rad) และแขน 2 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 120 องศา (2.0944 rad) ซึ่งตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลจะอยู่ที่พิกัดประมาณ (0.1735, -0.0653) ขณะที่แขนกลพยายามเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดนั้น ค่าความผิดพลาดในการติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ (Tracking error) จะลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ดังแสดงในรูป 4.7 โดยที่ตำแหน่งสมดุล ค่าความผิดพลาดของแขน 1 มีค่าเป็น 0.334 องศา และแขน 2 มีค่าความผิดพลาดเป็น 0.0934 องศา ในขณะที่แขนกลมีการเคลื่อนที่อยู่นั้น จะเกิดโมเมนต์ดัดของแขนกลที่กระทำต่อฐานดังรูป 4.8 ส่งผลให้เกิดการสั่นที่ฐาน โครงสร้างยึดหุ่น แสดงดังรูป 4.9 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการสั่นตัวที่ฐานที่มีผลต่อการควบคุมแขนกล พบว่า ในขณะที่ฐานมีการสั่นตัวอยู่นั้น มุมของแขนกลจะไม่เกิดการสั่นตัวสังเกตได้จากรูป 4.6 ดังนั้นการสั่นตัวที่ฐานจะไม่มีผลต่อมุมของแขนกล แต่มีผลทำให้ตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลมีความคลาดเคลื่อนไปจากพิกัดอ้างอิง ดังรูป



รูป 4.10 อิทธิพลของการสั่นตัวที่ฐานที่มีผลต่อตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกล

4.4 การควบคุมแขนกลโดยตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลบนฐานโครงสร้างยืดหยุ่น โดยใช้ตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์นั้น แขนกลทดสอบถูกติดตั้งและบังคับให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดดังรูป 4.11



รูป 4.11 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลทดสอบ

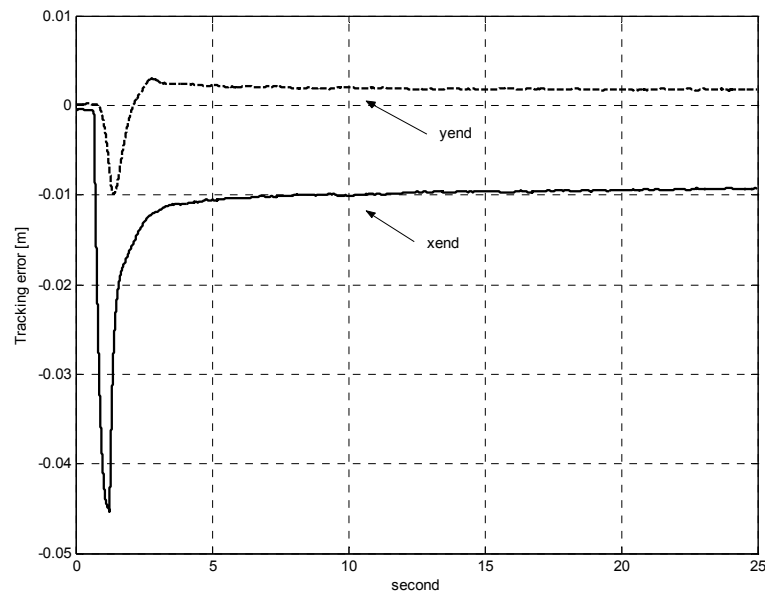
การทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 แขนกลทดสอบมีการเคลื่อนที่แต่ไม่มีการสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม และส่วนที่ 2 แขนกลทดสอบมีการเคลื่อนที่สัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม จากหัวข้อ 3.3 ทำการพิจารณาเลือกตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ในช่วงที่มีเสถียรภาพ โดยกำหนดให้ ω_d ในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s จากนั้นทดลองเพิ่มค่า ω_d ในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s ทำการกำหนดให้ตัวแปร K_d มีค่าสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 แสดงตัวแปรอิมพีแดนซ์ในการทดสอบ

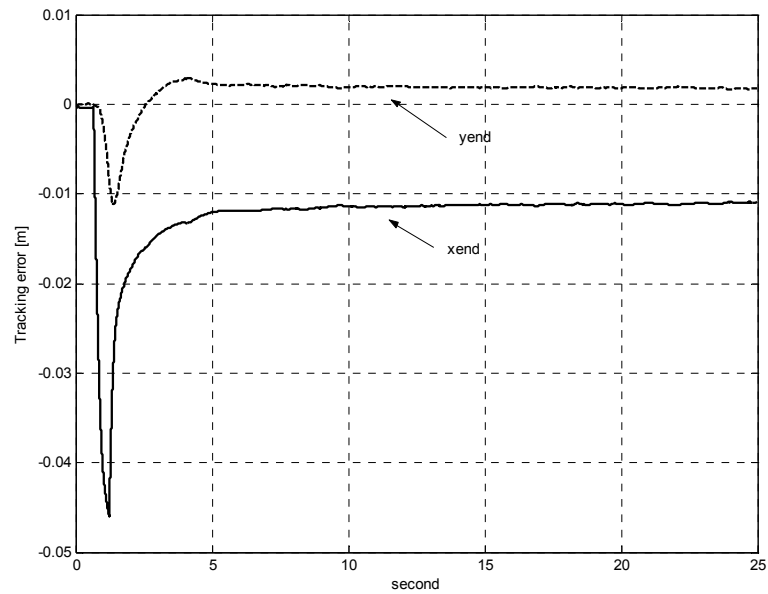
ตัวแปร	$\omega_d = 13 \text{ rad/s}$			$\omega_d = 18 \text{ rad/s}$		
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
M_{dx}	0.5917	0.8876	1.1834	0.3086	0.4630	0.6173
M_{dy}	0.5917	0.8876	1.1834	0.3086	0.4630	0.6173
B_{dx}	10.7692	16.1538	21.5385	7.7778	11.6667	15.5556
B_{dy}	10.7692	16.1538	21.5385	7.7778	11.6667	15.5556
K_{dx}	100	150	200	100	150	200
K_{dy}	100	150	200	100	150	200

4.4.1 แขนกลทดสอบมีการเคลื่อนที่แต่ไม่มีการสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม

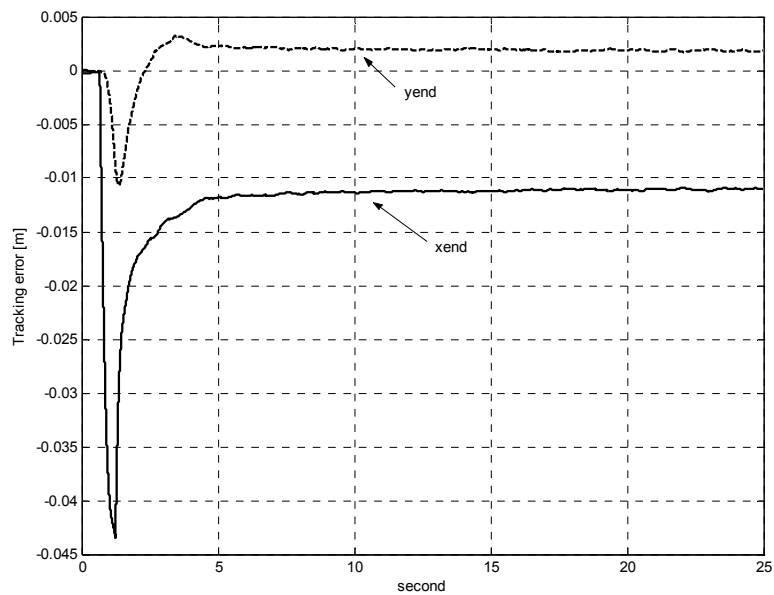
การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ที่มีผลต่อการติดตามเส้นทางที่กำหนด โดยกำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่ที่จุดปลายของแขนกลมีจุดเริ่มต้นที่พิกัด (0.12, 0) จากนั้นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจนถึงพิกัด (0.235, 0) ได้ผลตามรูป 4.12 ถึงรูป 4.17



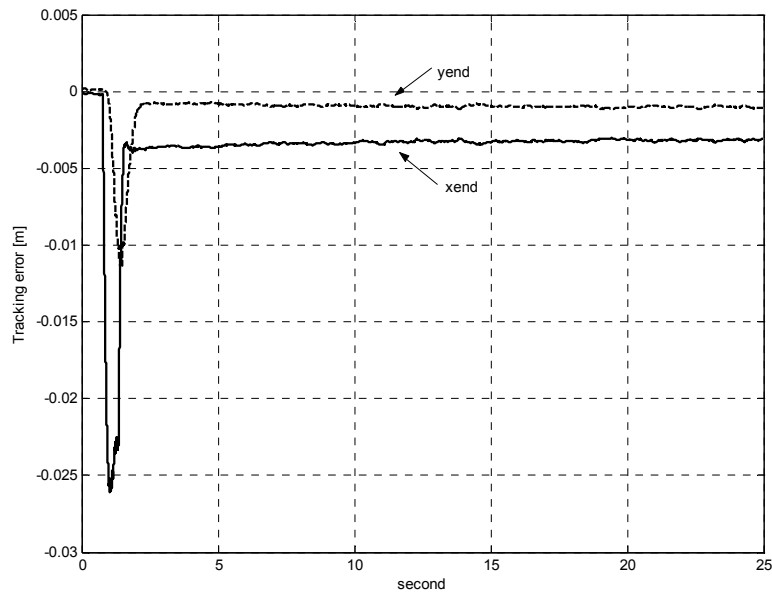
รูป 4.12 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณีที่ 1)



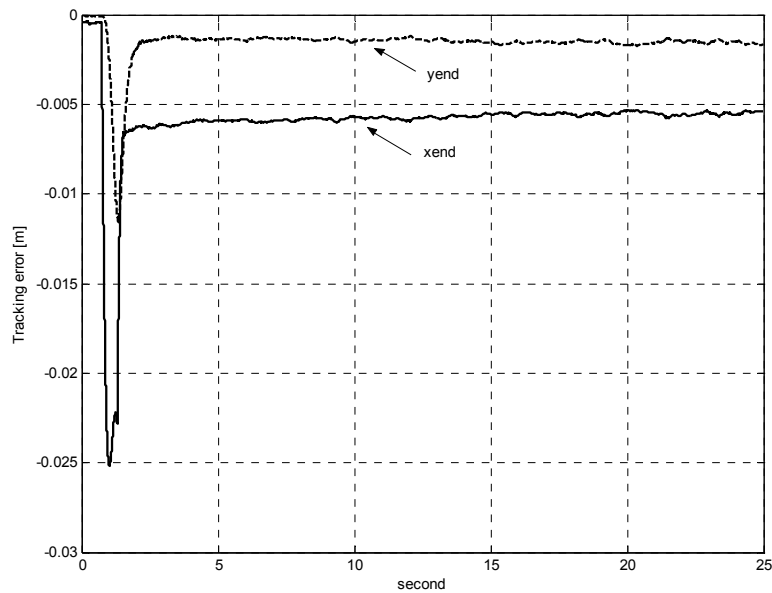
รูป 4.13 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 2)



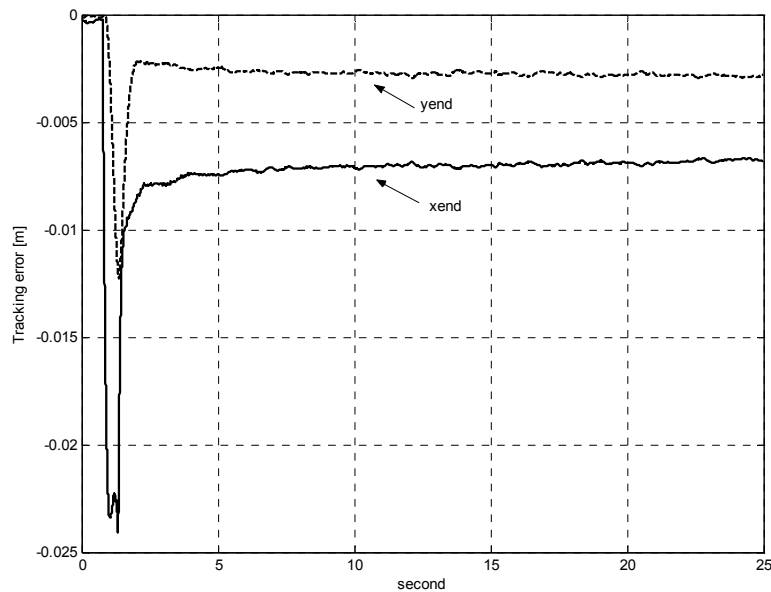
รูป 4.14 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 13 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณี ที่ 3)



รูป 4.15 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณี ที่ 4)



รูป 4.16 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณี ที่ 5)



รูป 4.17 Tracking error เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณีที่ 6)

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อพิจารณาเลือกตัวแปรอิมพีแดนซ์ให้มีความถี่ออกแบบเท่ากับ 13 rad/s ดังรูป 4.12 ถึงรูป 4.14 ตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลเข้าใกล้จุดสมดุลที่เวลาประมาณวินาทีที่ 5 และที่ความถี่ออกแบบเท่ากับ 18 rad/s ตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลเข้าใกล้จุดสมดุลที่เวลาประมาณวินาทีที่ 2 ดังรูป 4.15 ถึงรูป 4.17 ดังนั้นการเพิ่มความถี่ออกแบบทำให้ระบบเข้าสู่ตำแหน่งสมดุลเร็วขึ้น สำหรับค่าความผิดพลาดในการติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่จุดปลายของแขนกล เมื่อตำแหน่งเข้าสู่สมดุล สามารถสรุปผลดังตาราง 4.3

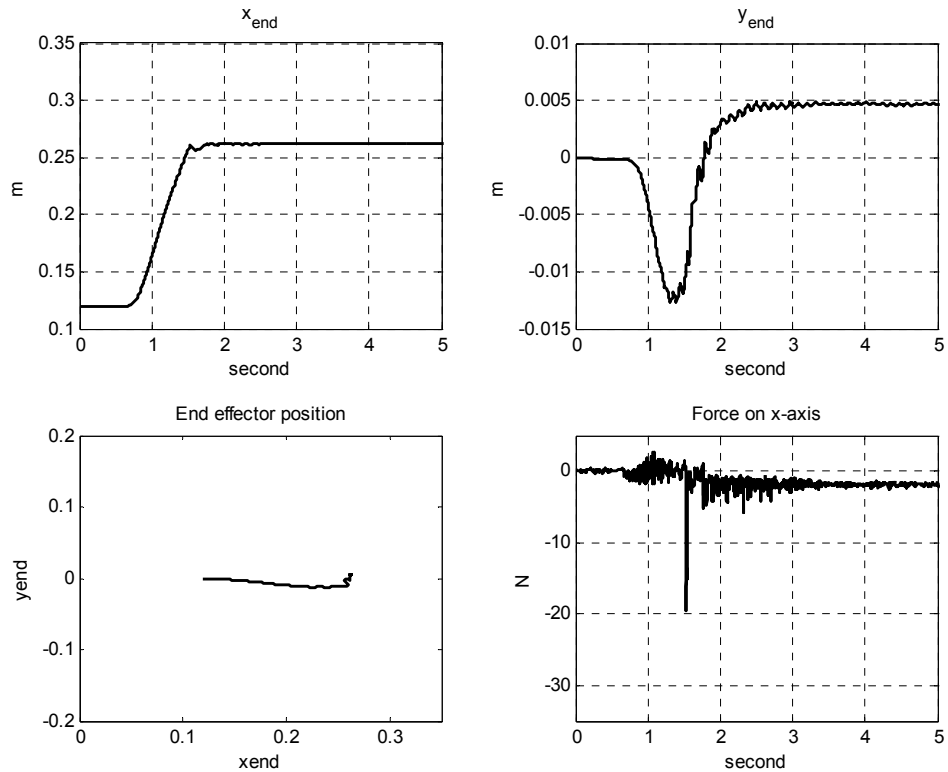
ตาราง 4.3 แสดงค่าความผิดพลาดในการติดตามตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลที่ตำแหน่งสมดุล

กรณีที่	K (N/m)	ω_d (rad/s)	xend error (m) (e_x)	yend error (m) (e_y)	การกระจัดที่ผิดพลาด $\sqrt{(e_x)^2 + (e_y)^2}$ (m)
1	100	13	-0.0095	0.0018	0.0097
2	150		-0.0110	0.0019	0.0112
3	200		-0.0110	0.0019	0.0112
4	100	18	-0.0033	-0.0012	0.0035
5	150		-0.0054	-0.0015	0.0056
6	200		-0.0065	-0.0026	0.0070

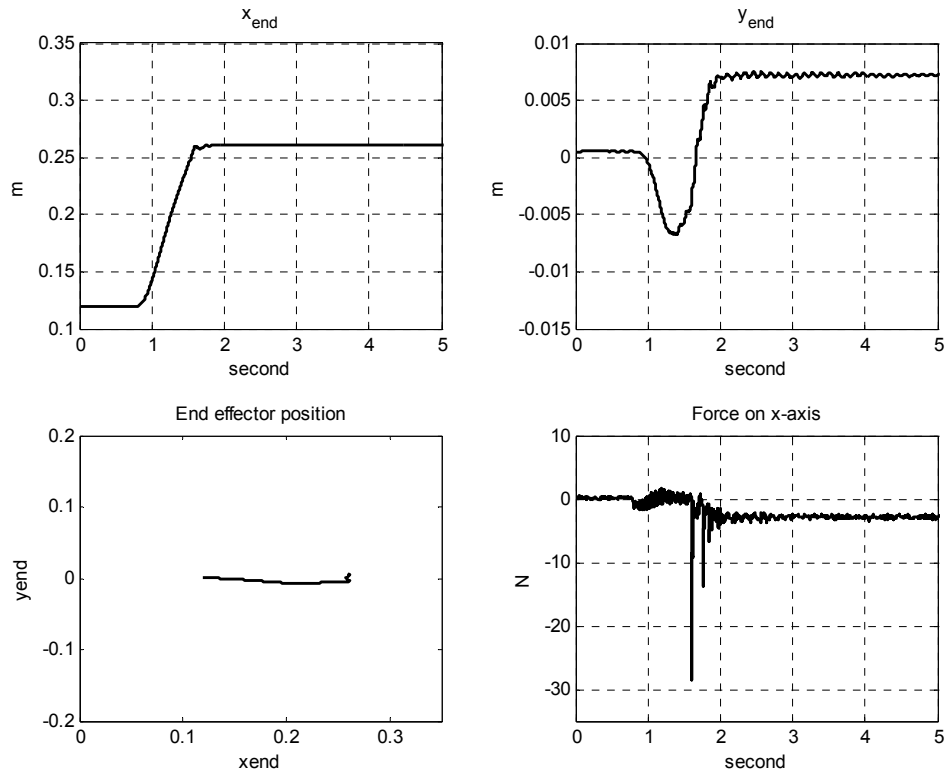
จากตาราง 4.3 พบว่าหากทำการเพิ่มค่าความถี่ของแบบมากขึ้น ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่จุดปลายแขนกล เมื่อตำแหน่งสมดุลจะมีค่าลดลง

4.4.2 แขนกลทดสอบมีการเคลื่อนที่สัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม

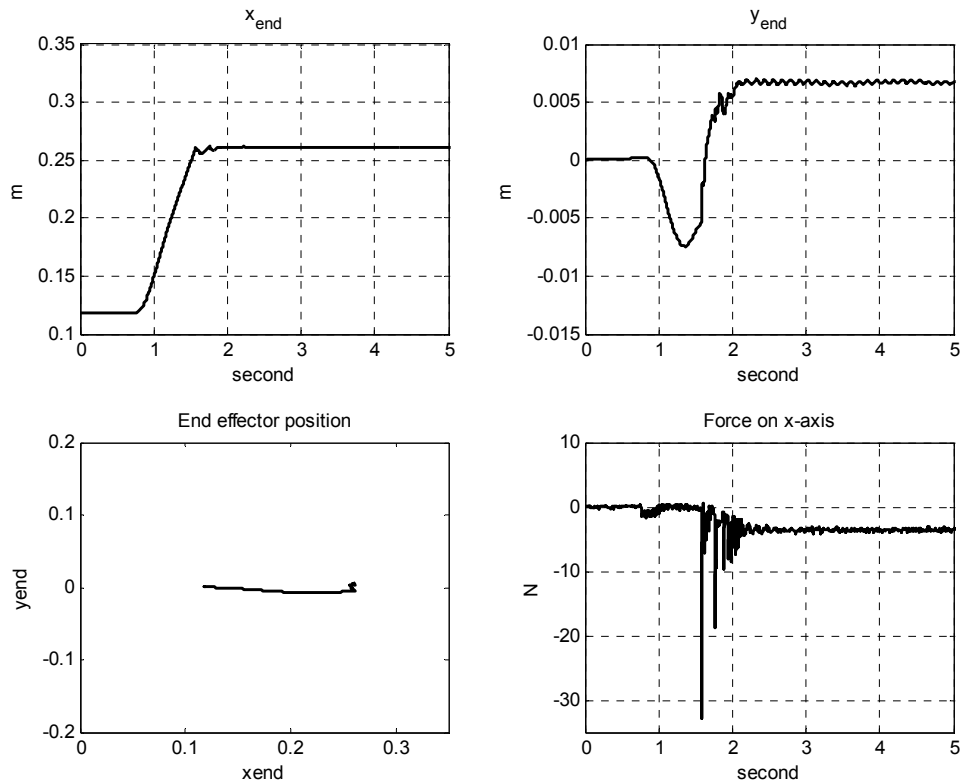
การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ที่มีผลต่อการตอบสนองต่อแรงภายนอก ในการควบคุมกำหนดให้จุดปลายของแขนกลมีการเคลื่อนที่เริ่มต้นที่พิกัด (0.12, 0) เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจนสัมผัสพื้นผิว และสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งพิกัด (0.285, 0) โดยที่พื้นผิวอยู่ห่างจากจุดกำเนิด (Origin) อ้างอิงเป็นระยะ 0.32 เมตร แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดแรงมีรัศมีขนาด 0.055 เมตร ดังนั้นตำแหน่งที่มีการชนพื้นผิว คือ พิกัด (0.265, 0) และผลต่างของระยะการกระจัดที่ตำแหน่งปลายแขนกลกับพื้นผิว (ΔX_e) ที่ตำแหน่งสมดุลมีค่าเท่ากับ 0.02 เมตร ในการทดสอบได้ใช้ค่าพารามิเตอร์จากตาราง 4.2 ในกรณี 4, 5 และ 6 ได้ผลตามรูป 4.18 ถึงรูป 4.20



รูป 4.18 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่
ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m (กรณีที่ 4)



รูป 4.19 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่
ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 150 N/m (กรณีที่ 5)



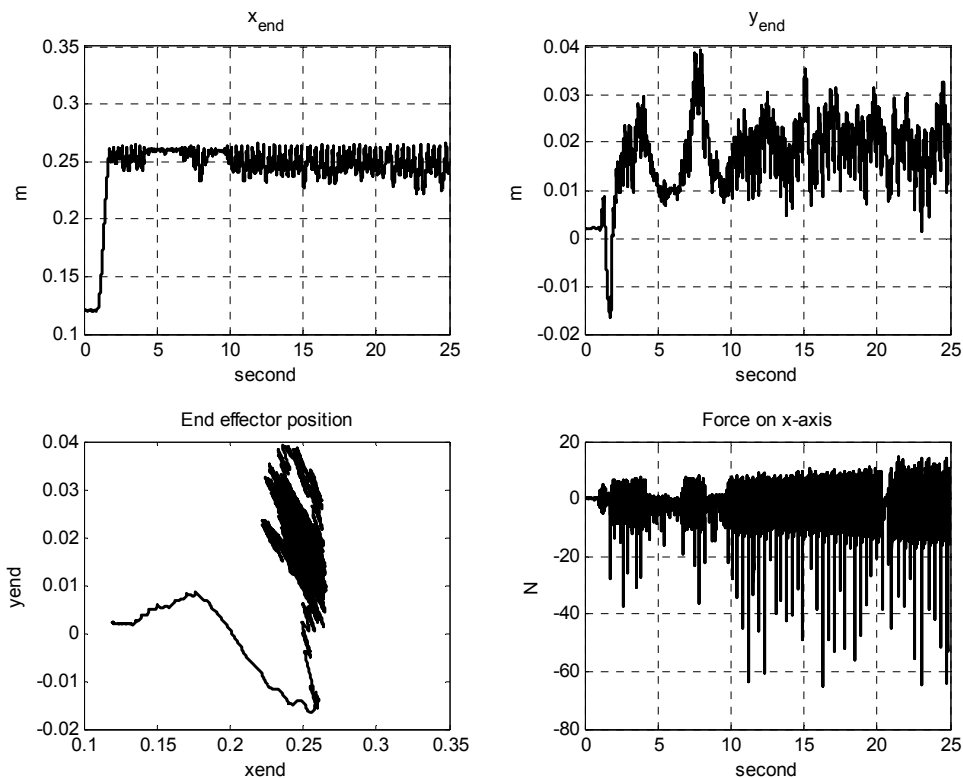
รูป 4.20 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิวเมื่อกำหนดให้ความถี่ ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 200 N/m (กรณีที่ 6)

จากรูป 4.18 ถึงรูป 4.20 แขนกลมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด เมื่อมีการสัมผัสพื้นผิว จะเกิดการกระแทกระหว่างจุดปลายของแขนกลกับพื้นผิวจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล การตอบสนองต่อแรงภายนอกที่จุดปลายขณะที่แขนกลสัมผัสพื้นผิว สามารถสรุปผลดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ผลการทดลองขณะที่แขนกลเคลื่อนที่และมีการสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม

กรณีที่	K_d (N/m)	แรงกระแทกเริ่มต้น (N)	แรงที่ตำแหน่งสมดุล (N)	แรงที่ออกแบบ (N)	error (%)
4	100	-19.5	-1.8	-2.0	10.0
5	150	-28.6	-2.8	-3.0	6.7
6	200	-32.8	-3.7	-4.0	7.5

จากตาราง 4.4 พบว่า การเพิ่มค่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ทำให้แรงกระแทก (Impact force) เริ่มต้นเมื่อแขนกลสัมผัสพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้น และแรงที่จุดปลายเมื่อตำแหน่งสมดุล (Static force) มีค่าใกล้เคียงกับแรงที่ออกแบบ แต่จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นของระบบ เมื่อทดลองลดค่าพารามิเตอร์ K_d โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรอิมพีแดนซ์ $K_d = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ $M_d = \begin{bmatrix} 0.1543 & 0 \\ 0 & 0.1543 \end{bmatrix}$ $B_d = \begin{bmatrix} 3.8889 & 0 \\ 0 & 3.8889 \end{bmatrix}$ พบว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ โดยเกิดการกระเทกอย่างต่อเนื่องที่จุดปลายของแขนกลในขณะสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม เป็นเหตุให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ ในการทดลองแรงที่จุดปลายวัดค่าได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ เนื่องจากผลรวมของสัญญาณรบกวนและแรงเฉื่อยที่เกิดจากมวลที่ติดอยู่บนเซ็นเซอร์วัดแรง ดังแสดงในรูป 4.21 ผลการทดลองสอดคล้องรูปแสดงพื้นที่เสถียรภาพ (Stability map) จากรูป 3.7 ซึ่งเมื่อ K_d มีค่าน้อย การเลือกค่า M_d ที่มีค่าน้อย อาจส่งผลให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้



รูป 4.21 แสดงพฤติกรรมของแขนกลเมื่อไม่มีเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 18 rad/s และ K_d เท่ากับ 50 N/m

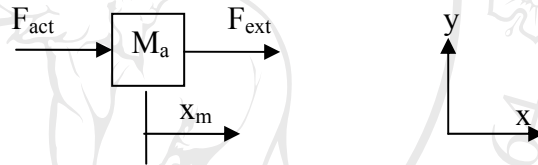
จากการศึกษาพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์กับแขนกลต้นแบบ พบว่า ในช่วงที่มีเสถียรภาพ พฤติกรรมของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ที่มีผลต่อการติดตามเส้นทางที่กำหนดและการ

ตอบสนองต่อแรงภายนอก มีพฤติกรรมสอดคล้องกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีผลต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการสัมผัสพื้นผิว

4.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพเบื้องต้นของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์

จากปัญหาของการกระทบพื้นผิวอย่างต่อเนื่องในหัวข้อ 4.4 พบว่า การพิจารณาออกแบบตัวควบคุมอิมพีแดนซ์สำหรับแขนกลที่มีการทำงานบนฐานโครงสร้างยืดหยุ่น ควรคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบขณะที่แขนกลมีการสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบถูกพิจารณาโดยวิธี Nyquist ดังรายละเอียดต่อไปนี้

พิจารณาระบบมวลและแรง เคลื่อนที่ในทิศทางแนวนอน x ดังรูป 4.22 ซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่เป็น



รูป 4.22 แสดงระบบมวลและแรง

$$M_a \ddot{X}_m = F_{act} + F_{ext} \quad (4.4)$$

โดย F_{act} คือ แรงที่เกิดจากตัวกระตุ้นกระทำต่อมวล M_a

F_{ext} คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อมวล M_a

หากกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_{ext} และ X_m ตามความสัมพันธ์แบบอิมพีแดนซ์ จะได้ว่า

$$M_d \ddot{X}_m + B_d (\dot{X}_m - \dot{X}_d) + K_d (X_m - X_d) = F_{ext} \quad (4.5)$$

กำหนดให้ $X_d = 0$ และ $\dot{X}_d = 0$ (Regulation problem) จัดรูปสมการใหม่จะได้เป็น

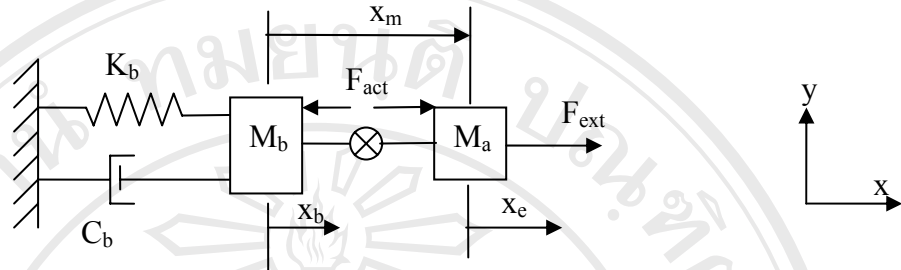
$$\ddot{X}_m = M_d^{-1} [-B_d \dot{X}_m - K_d X_m + F_{ext}] \quad (4.6)$$

แทน (4.6) ลงใน (4.4) จะได้สมการการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์เป็น

$$F_{act} = M_a M_d^{-1} [-B_d \dot{X}_m - K_d X_m] + [M_a M_d^{-1} - 1] F_{ext} \quad (4.7)$$

เมื่อพิจารณาระบบข้างต้นทำงานบนฐานโครงสร้างยืดหยุ่นที่มีมวล M_b ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น K_b และความหน่วง C_b แสดงดังรูป 4.23 โดย X_b คือ ตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงของ

ฐานยึดหยุ่น X_e คือ ตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงของมวล M_a และ X_m คือ ตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงของมวล M_b เมื่อวัดเทียบกับมวล M_b



รูป 4.23 แสดงระบบที่ถูกกระตุ้นอย่างง่ายที่อยู่บนฐาน โครงสร้างยึดหยุ่น

การเคลื่อนที่ของมวล M_a อธิบายโดย

$$M_a \ddot{X}_e = F_{act} + F_{ext} \quad (4.8)$$

โดย

$$X_e = X_b + X_m \quad (4.9)$$

หรือ

$$\dot{X}_e = \dot{X}_b + \dot{X}_m \quad (4.10)$$

แทนสมการ (4.9) และ (4.10) ลงในสมการ (4.7) จัดสมการในรูปแบบลาปลาซ ได้ว่า

$$F_{act}(s) = M_a M_d^{-1} [-B_d s - K_d] (X_e(s) - X_b(s)) + [M_a M_d^{-1} - 1] F_{ext}(s) \quad (4.11)$$

พิจารณาที่มวล M_b พบว่า

$$X_b(s) = R(s) F_{act}(s) \quad (4.12)$$

$$\text{โดย } R(s) = \frac{-1}{M_b s^2 + C_b s + K_b}$$

แทนสมการ (4.12) ลงในสมการ (4.11) จะได้เป็น

$$F_{act}(s) = M_a M_d^{-1} [-B_d s - K_d] (X_e(s) - R(s) F_{act}(s)) + [M_a M_d^{-1} - 1] F_{ext}(s) \quad (4.13)$$

จัดรูปใหม่ได้ว่า

$$[1 - M_a M_d^{-1} (B_d s + K_d) R(s)] F_{act}(s) = -M_a M_d^{-1} [B_d s + K_d] X_e(s) + [M_a M_d^{-1} - 1] F_{ext}(s) \quad (4.14)$$

สมการ (4.8) จัดอยู่ในรูปแบบลาปลาซได้เป็น

$$F_{act}(s) = M_a s^2 X_e(s) - F_{ext}(s) \quad (4.15)$$

แทนสมการ (4.15) ลงในสมการ (4.14) จะได้ว่า

$$\frac{X_e(s)}{F_{ext}(s)} = \frac{M_d^{-1}[1 - (B_d s + K_d)R(s)]}{s^2 - M_a s^2 M_d^{-1}(B_d s + K_d)R(s) + M_d^{-1}(B_d s + K_d)} = G(s) \quad (4.16)$$

และแทน $R(s)$ ลงใน (4.16) จะได้ Transfer function ระหว่าง $F_{ext}(s)$ และ $X_e(s)$ เป็น

$$\frac{X_e(s)}{F_{ext}(s)} = \frac{M_d^{-1}[M_b s^2 + (C_b + B_d)s + (K_b + K_d)]}{M_b s^4 + L_1 s^3 + L_2 s^2 + L_3 s + M_d^{-1}K_d K_b} = G(s) \quad (4.17)$$

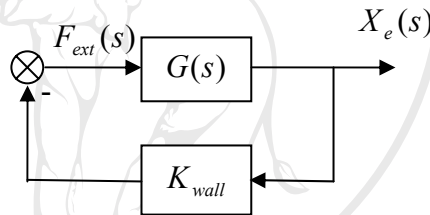
โดยที่ L_1 คือ $C_b + M_a M_d^{-1} B_d + M_d^{-1} B_d M_b$

L_2 คือ $K_b + M_a M_d^{-1} K_d + M_d^{-1} K_d M_b + M_d^{-1} B_d C_b$

L_3 คือ $M_d^{-1} K_d C_b + M_d^{-1} B_d K_b$

หากพิจารณาปัญหาการสัมผัสผนัง เมื่อพิจารณาผนังแบบยืดหยุ่น (Elastic) แรงที่กระทำกับมวล (M_a) จะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของมวลเป็น $F_{ext}(s) = K_{wall} X_e(s)$ ดังนั้น สำหรับการควบคุมที่มีการสัมผัสกับผนัง แรงที่ผนังจะส่งแรงป้อนกลับเปรียบเสมือนระบบ Feedback ดัง

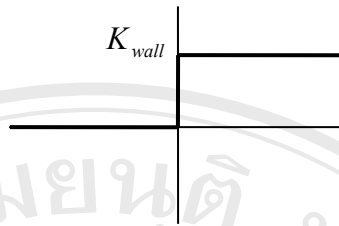
รูป 4.24



รูป 4.24 แสดงแผนผังของระบบปิด

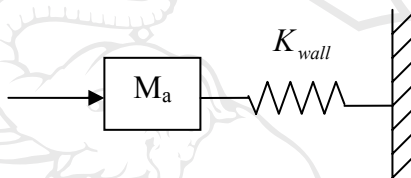
เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบแขนกลทดสอบจริงมีความยุ่งยาก และซับซ้อน เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของแขนกลเมื่อสัมผัสพื้นผิว หรือสิ่งแวดล้อม จึงทำการพิจารณากับระบบดังรูป 4.24 ทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น และผลลัพธ์นำมาสื่อเทียบกับระบบแขนกลได้

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้น หากพิจารณา K_{wall} ในรูป 4.24 เป็นค่าคงที่แล้ว เราสามารถใช้ Nyquist stability criteria ในการวิเคราะห์ เพื่อหาช่วงของค่า K_{wall} ที่ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพได้ อย่างไรก็ตาม ในปัญหาของการวิเคราะห์แขนกลเข้าชนกับผนังนั้น ตามจริงเราไม่สามารถ สมมติให้ K_{wall} เป็นค่าคงที่ได้ เนื่องจาก กรณีที่แขนกลไม่มีการสัมผัสกับผนัง จะไม่มีแรงภายนอกใด ๆ กระทำ ในลักษณะนี้ K_{wall} มีค่าตามรูป 4.25 ซึ่งเป็นองค์ประกอบแบบไม่เชิงเส้น ทำให้การวิเคราะห์นั้นซับซ้อน ควรเป็นหัวข้อศึกษาในงานต่อไป



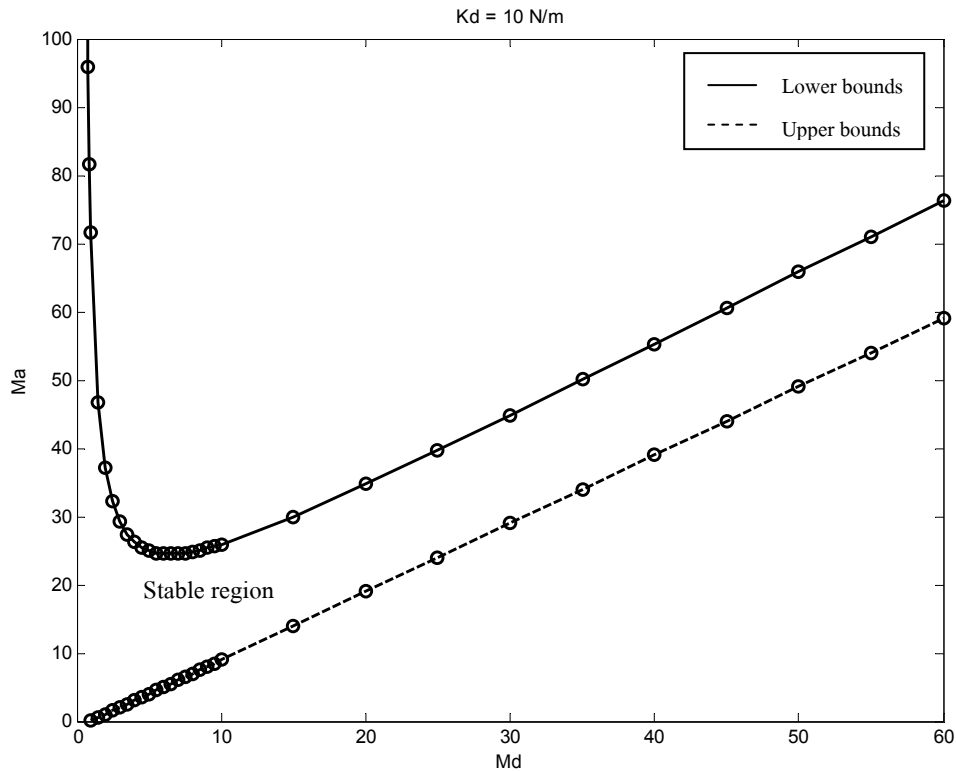
รูป 4.25 แสดง K_{wall} ที่เกิดขึ้นกับระบบจริง

ในการกำหนดให้ K_{wall} มีค่าคงที่นั้น เปรียบเสมือนปัญหาที่ปลายแขนกลยึดติดกับสปริง
ดังรูป 4.26



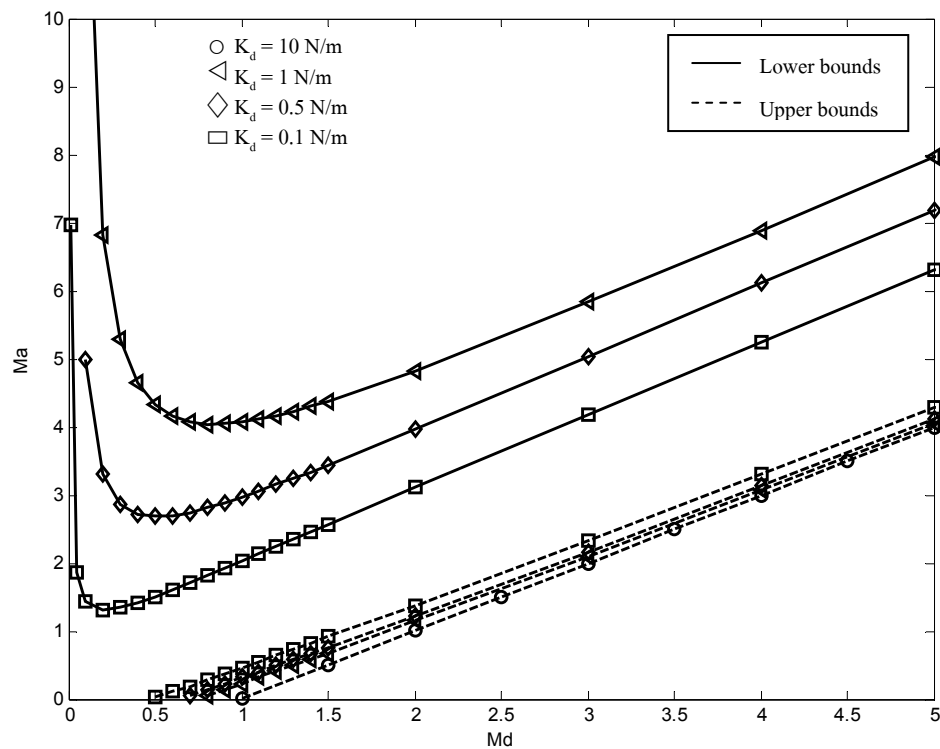
รูป 4.26 แสดงพฤติกรรมที่ปลายแขนกลเมื่อกำหนดให้ K_{wall} มีค่าคงที่

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์กับปัญหาที่สิ่งแวดล้อมมีรูปแบบเป็นสปริงยึดติดปลายแขนกล โดยพิจารณาวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพในทุกค่า K_{wall} มีหลักการคือ หาก Nyquist plot ของ $G(j\omega)H(j\omega)$ ทำให้มีค่า Gain margin เป็นอนันต์ ระบบจะมีเสถียรภาพทุกค่า K_{wall} โดยขึ้นต้นกำหนดให้ค่า $M_b = 1$ kg, $K_b = 1$ N/m, $D_b = 0.2$ Nsm⁻¹ และ $K_d = 10$ N/m ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ M_d และ M_a โดยในการทดลองจะคงค่า M_b , K_b , D_b และ K_d ไว้เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ M_a และ M_d ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบ แต่ละค่าของ M_d จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ M_a เพื่อตรวจสอบหาจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงจากระบบที่มีเสถียรภาพเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ พบว่า ในแต่ละค่าของ M_d จะมีจุดเปลี่ยนแปลงดังกล่าว 2 จุด เมื่อพิจารณาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง M_a กับ M_d เห็นได้ว่า ช่วงความมีเสถียรภาพของระบบจะถูกกำหนดโดยเส้นแนวโน้มน้ำที่แสดงขอบเขตบน (Upper bounds) และขอบเขตล่าง (Lower bounds) ดังรูป 4.27



รูป 4.27 แสดงแนวโน้มน้ำความมีเสถียรภาพเมื่อ K_{wall} มีค่าใด ๆ โดยที่ $K_d = 10 \text{ N/m}$
 ($M_b = 1 \text{ kg}$, $K_b = 1 \text{ N/m}$ และ $D_b = 0.2 \text{ Nsm}^{-1}$)

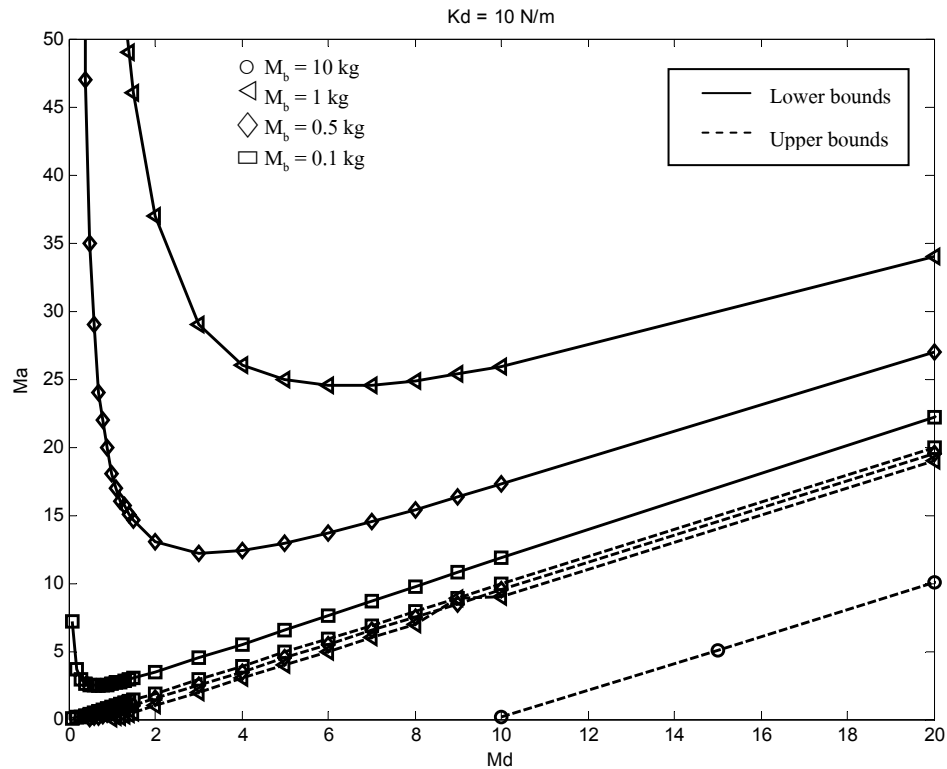
เนื่องจาก การตอบสนองต่อแรงภายนอกของระบบจะขึ้นอยู่กับความถี่การทำงาน ω_0 เมื่อ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นนอกแบบที่ต้องการ การเพิ่มความถี่การทำงานของระบบ สามารถทำได้โดยการลดค่า M_d ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 ดังนั้นหากพิจารณาช่วงความมี เสถียรภาพที่ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นนอกแบบต่าง ๆ ในช่วงของค่า M_d ที่มีค่าน้อย โดยทำการ ทดลองเช่นเดิม ได้ผลตามรูป 4.28



รูป 4.28 แสดงช่วงความมีเสถียรภาพเมื่อ K_{wall} มีค่าใด ๆ โดยทดลองที่ค่า K_d ต่างๆ ($M_b = 1$ kg, $K_b = 1$ N/m, $D_b = 0.2$ Nsm⁻¹ และขอบเขตบนเมื่อ $K_d = 10$ N/m ไม่ถูกแสดงในกราฟ เนื่องจากมีค่าสูงมาก)

จากรูป 4.28 พบว่า ขนาดหรือมวลของแกนกล (M_a) และการเลือกค่าตัวแปรอิมพีแดนซ์ M_d มีผลต่อเสถียรภาพของระบบขณะที่แกนกลมีการสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม โดยเมื่อเลือกให้ค่า K_d มีค่ามาก ช่วงความกว้างของระยะระหว่างเส้นขอบเขตบน และขอบเขตล่างจะมีค่ามากกว่าระบบที่เลือกให้ค่า K_d มีค่าน้อย และเมื่อพิจารณาระบบที่มีขนาดใหญ่หรือมีค่า M_a มาก ๆ พบว่าการเลือกค่าตัวแปร M_d ควรเลือกให้มีค่าน้อย

สำหรับระบบแกนกลที่มีการออกแบบตัวควบคุมไว้แล้ว เป็นไปได้ว่า มวลของฐานยึดหุ่นอาจมีผลต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของ M_b ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบ จำต้องคงค่า K_b , D_b และ K_d โดยทดลองเลือกให้ค่า K_d คงที่เท่ากับ 10 N/m และเปลี่ยนแปลงค่าของ M_b ได้ผลตามรูป 4.29



รูป 4.29 แสดงช่วงความมีเสถียรภาพเมื่อ K_{wall} มีค่าใด ๆ โดยทดลองที่ค่า M_b ต่างๆ ($K_d = 10$ N/m, $K_b = 1$ N/m, $D_b = 0.2$ Nsm⁻¹ และขอบเขตบนเมื่อ $M_b = 10$ kg ไม่ถูกแสดงในกราฟ เนื่องจากมีค่าสูงมาก)

จากรูป 4.29 พบว่าสำหรับระบบแกนกลที่มีฐานขนาดใหญ่ (M_b มีค่ามาก) ระยะห่างระหว่างเส้นขอบเขตบน และขอบเขตล่างจะมีช่วงกว้างมากกว่าระบบที่มีฐานขนาดเล็ก (M_b มีค่าน้อย)

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ข้างต้น ทำให้ทราบถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของแกนกลเมื่อสัมผัสพื้นผิว หรือสิ่งแวดล้อม ซึ่งพบว่า สำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่ควรเลือกค่าตัวแปร M_d ให้มีค่าน้อย การเพิ่มค่าตัวแปร K_d และมวลฐาน M_b ทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นขอบเขตบน และขอบเขตล่างมีช่วงกว้างมากขึ้น ซึ่งมีผลดี คือ ผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดค่าตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ และขนาดของแกนกลได้มากขึ้น เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน โดยที่แกนกลยังคงมีเสถียรภาพเมื่อสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม

4.6 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์โดยคำนึงถึงฐานยืดหยุ่น

หากนำทฤษฎีการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ โดยพิจารณารวม State ของฐานโครงสร้างยืดหยุ่นด้วยแล้ว สมการการควบคุมจะถูกจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

จากสมการ (3.9) พิจารณาเทอมบน เมื่อทำการกระจายเทอมจะได้ว่า

$$H_b \ddot{x}_b - F_b + F_m = -J_b^T F_{ext} \quad (4.18)$$

โดยที่ $F_b = -D_b \dot{x}_b - K_b x_b$ (Constrain force of flexible base)

$$F_m = H_{bm} \ddot{\theta} + H_{bm} \dot{\theta} \quad (\text{แรงปฏิกิริยาที่แขนกระทำต่อฐาน}) \text{ และ } H_{bm} \dot{\theta} = c_b$$

จากสมการ (3.9) พิจารณาเทอมล่าง เมื่อทำการกระจายเทอมจะได้ ดังนี้

$$H_{bm}^T \ddot{x}_b + H_m \ddot{\theta} + c_m = \tau_{act} - J_m^T F_{ext} \quad (4.19)$$

จากสมการ (4.18) จัดรูปใหม่เป็น

$$\ddot{x}_b = H_b^{-1} (-J_b^T F_{ext} + F_b - F_m) \quad (4.20)$$

แทนสมการ (4.20) ลงในสมการ (4.19) จะได้ว่า

$$\hat{H} \ddot{\theta} + \tilde{c} = \tau_{act} - \hat{J}^T F_{ext} - R F_b \quad (4.21)$$

กำหนดให้ $\hat{H} = H_m - H_{bm}^T H_b^{-1} H_{bm}$ (Generalized inertia tensor)

$$\hat{J} = J_m - J_b H_b^{-1} H_{bm} \quad (\text{Generalized jacobian matrix})$$

$$\tilde{c} = c_m - H_{bm}^T H_b^{-1} c_b$$

$$R = H_{bm}^T H_b^{-1}$$

จากสมการ (4.21) จัดรูปใหม่เป็น

$$\ddot{\theta} = \hat{H}^{-1} (\tau_{act} - \hat{J}^T F_{ext} - R F_b - \tilde{c}) \quad (4.22)$$

จาก Forward kinematics กรณีแขนกลอยู่บนฐานโครงสร้างยืดหยุ่น จะได้ว่า

$$\ddot{X}_e = J_m \ddot{\theta} + \dot{J}_m \dot{\theta} + J_b \ddot{x}_b + \dot{J}_b \dot{x}_b \quad (4.23)$$

จากสมการอิมพีแดนซ์ของแขนกลบนฐานโครงสร้างยืดหยุ่น

$$f_{ext} = M_d \ddot{X}_e + B_d \dot{X}_e + K_d X_e \quad (4.24)$$

แทนค่าสมการ (4.22) และ (4.24) ลงในสมการที่ (4.23) จะได้ว่า

$$M_d^{-1} [-K_d X_e - B_d \dot{X}_e - f_{ext}] = J_m \hat{H}^{-1} \hat{J}^T (f_{act} - f_{ext}) - J_m \hat{H}^{-1} (\tilde{c} + R F_b) + \dot{J}_m \dot{\theta} + \dot{J}_b \dot{x}_b + J_b \ddot{x}_b \quad (4.25)$$

จากสมการ (4.25) สามารถจัดรูปได้เป็น

$$J_m \hat{H}^{-1} \hat{J}^T f_{act} = M_d^{-1} [-K_d X_e - B_d \dot{X}_e - f_{ext}] + J_m \hat{H}^{-1} \hat{J}^T f_{ext} + J_m \hat{H}^{-1} (\tilde{c} + R F_b) - \dot{J}_m \dot{\theta} - \dot{J}_b \dot{x}_b - J_b \ddot{x}_b$$

กำหนดให้ $\tilde{W} = J_m \hat{H}^{-1} \hat{J}^T$ จะได้ว่า

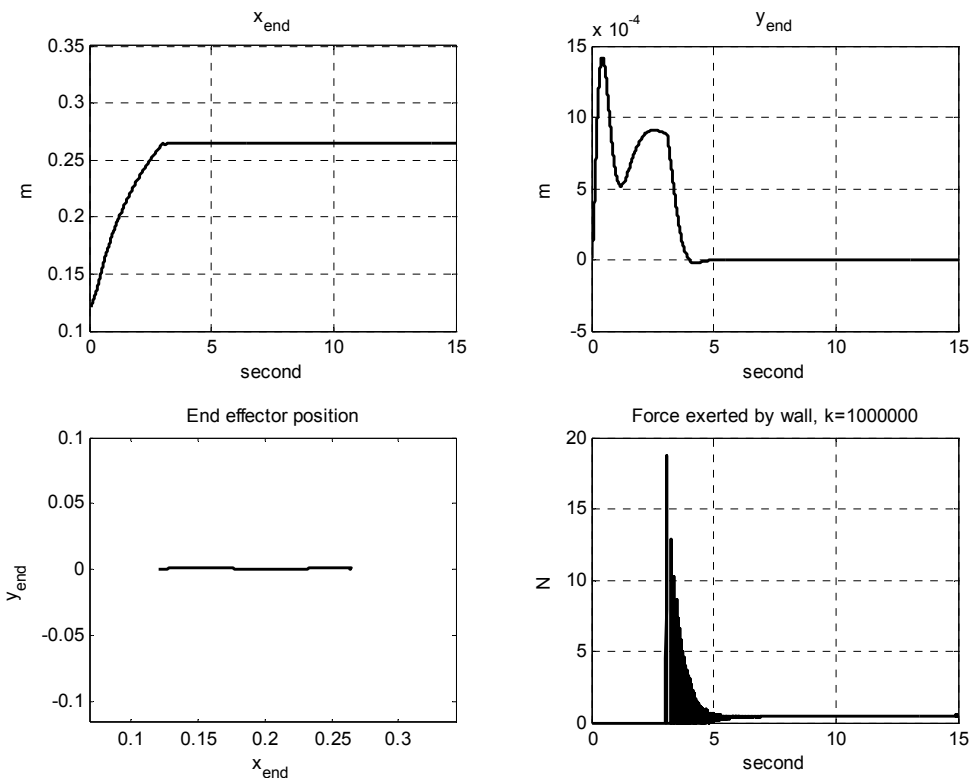
$$f_{act} = \tilde{W}^{-1} M_d^{-1} [-K_d e - B_d \dot{e}] + [I - \tilde{W}^{-1} M_d^{-1}] f_{ext} + \tilde{W}^{-1} [J_m \hat{H}^{-1} (\tilde{c} + R F_b) - \dot{J}_m \theta - \dot{J}_b x_b - J_b \ddot{x}_b] \quad (4.26)$$

ดังนั้นเราได้สมการการควบคุมเป็น

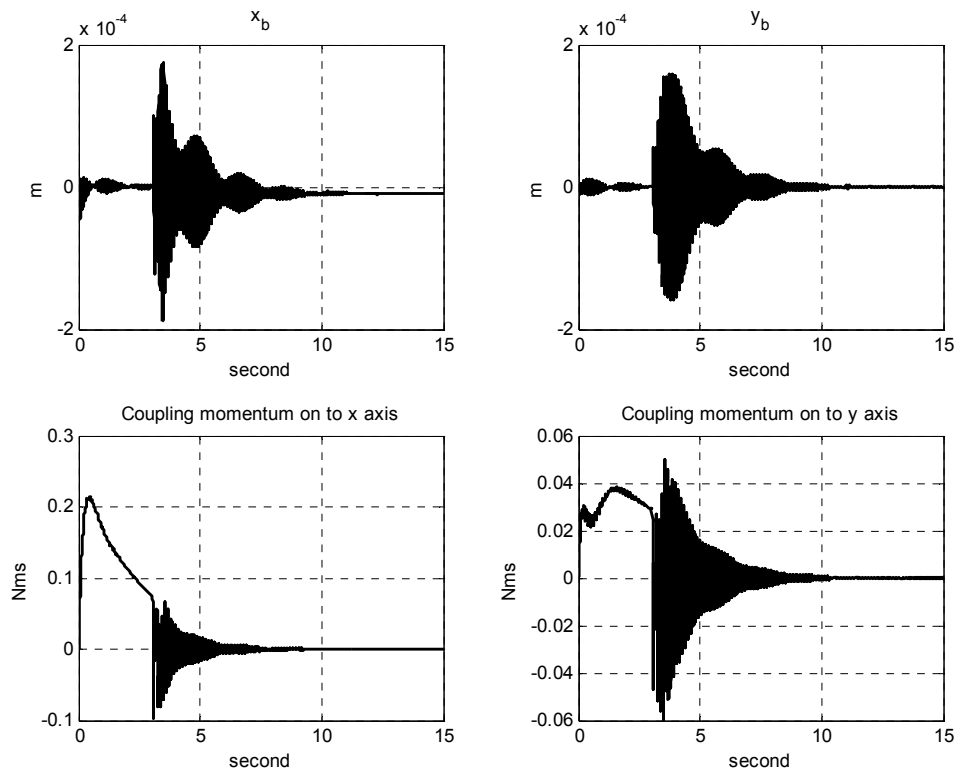
$$\tau_{act} = \hat{J}^T \tilde{W}^{-1} M_d^{-1} [-K_d e - B_d \dot{e}] + \hat{J}^T [I - \tilde{W}^{-1} M_d^{-1}] f_{ext} + \hat{J}^T \tilde{W}^{-1} [J_m \hat{H}^{-1} (\tilde{c} + R F_b) - \dot{J}_m \theta - \dot{J}_b x_b - J_b \ddot{x}_b] \quad (4.27)$$

จากสมการ (4.27) พบว่า สมการการควบคุมจะมี State ของฐานยึดหุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการควบคุมอิมพีแดนซ์ของแขนกลทั่วไป จากสมการ (3.7) ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องคิดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อวัด State ดังกล่าว

จากนั้นทำการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่และชุดของตัวแปรอิมพีแดนซ์เป็นเช่นเดียวกันกับการทดลองข้างต้นในหัวข้อ 3.4 กรณีที่แขนกลไม่มีเสถียรภาพ ได้ผลดังนี้

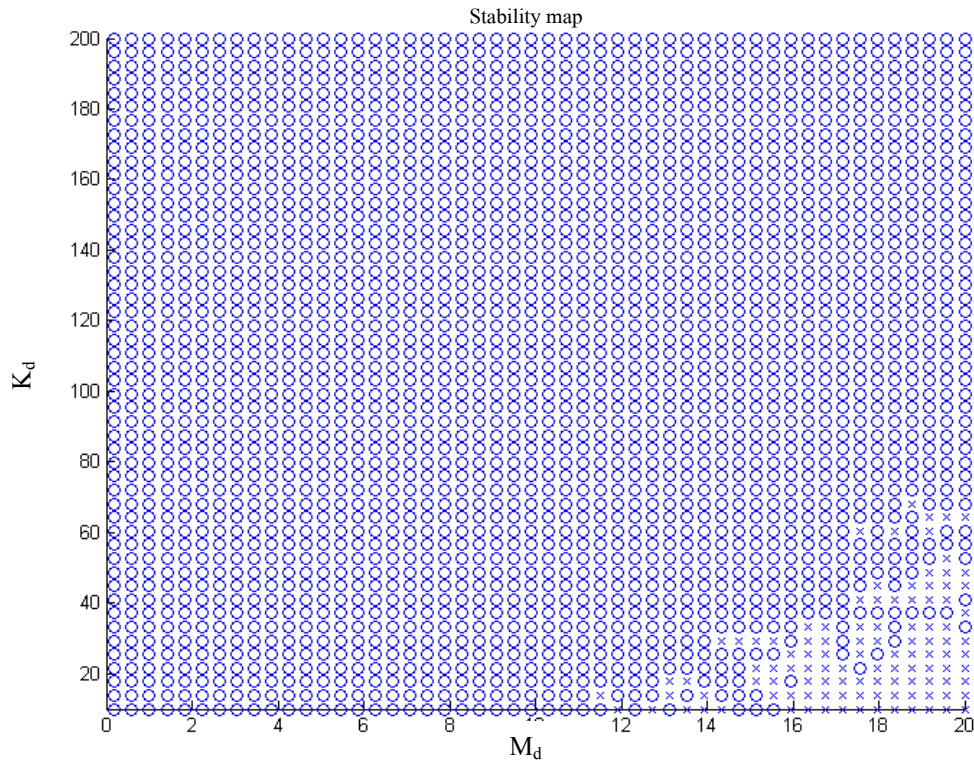


รูป 4.30 กราฟแสดงตำแหน่งที่จุดปลายของแขนกลและแรงที่กระทำต่อพื้นผิว เมื่อกำหนดให้ ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s เมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐานโครงสร้างยึดหุ่น



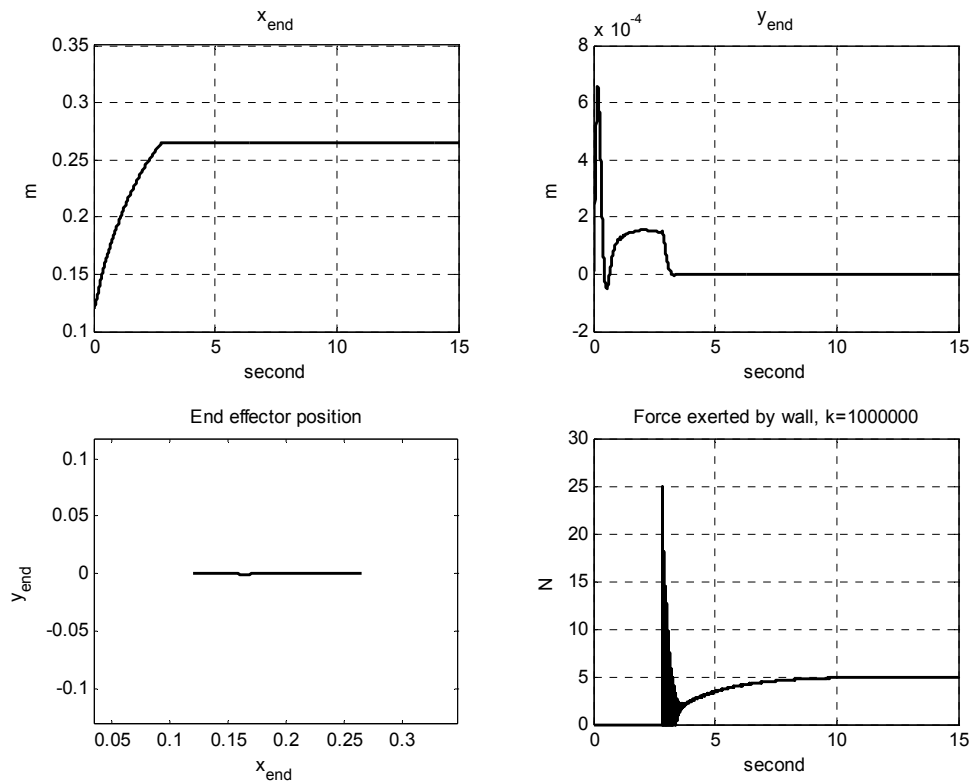
รูป 4.31 แสดงการสั่นสะเทือนที่ฐาน และโมเมนตัมที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y เมื่อกำหนดให้ ความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 4 rad/s เมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลจากรูป 4.30 และรูป 4.31 กับรูป 3.5 และรูป 3.6 ตามลำดับ พบว่า หากแกนกลถูกควบคุมโดยสมการควบคุม (4.27) เมื่อจุดปลายของแกนกลกระทบกับพื้นผิวแล้ว ระบบยังคงมีความเสถียรภาพอยู่ได้ พิจารณาตรวจสอบความมีเสถียรภาพโดยทำการสร้างกราฟ พื้นที่เสถียรภาพ (Stability map) แสดงช่วงของความมีเสถียรภาพ และไม่มีเสถียรภาพของแกนกล เมื่อสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม ในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าเมตริกซ์ K_d ตั้งแต่ 10 N/m ถึง 200 N/m และ M_d ตั้งแต่ 0.2 kg.m² ถึง 20 kg.m² โดยจุดที่แสดงถึงความมีเสถียรภาพถูกแสดงโดยสัญลักษณ์ “o” และจุดที่แสดงถึงความไม่มีเสถียรภาพถูกแสดงโดยสัญลักษณ์ “x” ดังรูป 4.32



รูป 4.32 กราฟแสดงพื้นที่เสถียรภาพ (Stability map) แสดงช่วงของความมีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพของแกนกลเมื่อสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อม เมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐานโครงสร้างยึดหยุ่น (จุดที่แสดงถึงความมีเสถียรภาพถูกแสดงโดยสัญลักษณ์ “o” และจุดที่แสดงถึงความไม่มีเสถียรภาพถูกแสดงโดยสัญลักษณ์ “x”)

จากรูป 4.32 เปรียบเทียบกับรูป 3.7 พบว่า การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์โดยพิจารณารวม State ของฐานโครงสร้างยึดหยุ่นทำให้พื้นที่ของความมีเสถียรภาพกว้างขึ้น และตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ ยังคงสามารถทำงานได้ดี ดังรูป 4.33 เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่ออกแบบที่จุดปลายในแนวแกน x และ y มีค่าเป็น 10 rad/s และ K_d เท่ากับ 100 N/m อย่างไรก็ตาม การพิจารณาตัวควบคุมโดยรวม State ของฐานโครงสร้างยึดหยุ่น ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบทั้งหมดของแกนกลเมื่อสัมผัสพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อนั้นมีเสถียรภาพ



รูป 4.33 พฤติกรรมของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ต่อแขนกลเมื่อตัวควบคุมรวม State ของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น

จากการทดลองข้างต้น เห็นได้ว่า การพิจารณารวม State ของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น สามารถปรับปรุงให้สมรรถนะของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ดีขึ้น แต่การควบคุมแบบนี้ มีข้อเสีย คือ จำเป็นต้องมีการติดตั้งเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น เพื่อวัดการสั่นตัวของฐานโครงสร้างยืดหยุ่น เป็นปัญหาค่าใช้จ่ายตามมา