



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระโดยวิธีควบคุมแบบทำนายเดดปีท
โดย นายอำนาจ อิ่มเจริญ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรัตน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักษณ์)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

การลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระโดยวิธีควบคุมแบบทำนายเดดปีท

นายอำนาจ อิ่มเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายอำนาจ อิ่มเจริญ
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระโดยวิธีควบคุมแบบทำนาย
เด็ดปัท
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักษณ์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีควบคุมแบบทำนายเด็ดปัทเพื่อลดความสั่นสะเทือนของคานอูมิเนียมปลายอิสระ ซึ่งวิธีควบคุมนี้เป็นการรวมหลักการของการทำนายเอกลักษณ์ระบบ (System Identification) และระบบควบคุมแบบทำนาย (Predictive Control) เข้าด้วยกันโดยมีการสร้างเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ด้วยหลักการทำนายเอาท์พุทล่วงหน้าแบบหลายขั้น (Multi-Steps Ahead) จากแบบจำลองสมการถดถอยรวมกับอินพุทภายนอก (Auto Regressive with exogenous Input : ARX) กฎการควบคุมแบบทำนายเด็ดปัทถูกสร้างจากเมทริกซ์อัตราขยายการควบคุม (Control Gain Matrix) และเวกเตอร์ที่สลับแถวระหว่างข้อมูลเอาท์พุทกับอินพุทที่ผ่านมา ซึ่งเมทริกซ์อัตราขยายการควบคุมหาโดยใช้เทคนิครีเคอร์ซีฟลีตสแควร์ (Recursive Least-Square Technique) จากเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) โดยวิธีควบคุมนี้มีตัวแปรควบคุมสองประการได้แก่ ARX Model Order (p) และ Control Horizon (q) เพื่อควบคุมแรงด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้กับคานอูมิเนียมปลายอิสระเพื่อลดระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ผลการคำนวณเชิงตัวเลขกรณีระบบไม่มีสัญญาณรบกวนพิจารณาเป็นการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระและกรณีระบบมีสัญญาณรบกวนพิจารณาเป็นการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับทั้งสองกรณีที่กล่าวมาข้างต้นตัวควบคุมสามารถลดระดับความสั่นสะเทือนให้ต่ำลงได้ภายใต้ขอบเขตการควบคุม (Control Horizon) โดยผลการทดลองก็สอดคล้องกับผลการคำนวณเชิงตัวเลข

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 72 หน้า)

คำสำคัญ : เมทริกซ์ข้อมูล, รีเคอร์ซีฟลีตสแควร์, การควบคุมแบบทำนายเด็ดปัท, การลดความ
สั่นสะเทือน



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Umnat Imcharoen
Thesis Title : Vibration Suppression of Cantilever Beam by Deadbeat Predictive Control
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Assistant Professor Dr.Sinchai Chinvorarat
Assistant Professor Dr.Chak Chantalakhana
Academic Year : 2006

Abstract

This thesis presents an idea of deadbeat predictive control to suppress vibration of a cantilever beam. The method combines the concept of system identification and predictive control together. The multi-step ahead predictor is used to derive the Information matrix based on the Auto-Regressive with eXogenous input model (ARX model). The Control law of deadbeat predictive control can be constructed from control gain matrix and vector inverse row between input and output data. In which control gain matrix is determined by Recursive Least-Square Technique from Information matrix. This approach has "two" design parameters given by a ARX model order (p) and control horizon (q). Piezoelectric material is used as a control actuator for creating force to suppress the vibration of the cantilever beam. There are two cases of simulation results as free vibration control with no disturbance input and force vibration control with disturbance input. In both cases, the controller is capable of reducing the vibration as expected. The experimental has confirmed the actual result along with the simulation result.

(Total 72 pages)

Keywords : Information matrix,recursive least-square,deadbeat predictive control,suppress vibration



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ต้องผ่านอุปสรรคต่างๆมากมายหลายประการ หากต้องย้อนระลึกถึงบุคคลที่มีส่วนในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นับว่ายากยิ่งนักที่จะชานานามได้ครบทุกท่านดังที่ตั้งใจไว้ จึงขออภัยทุกท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามในโอกาสนี้ด้วย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยจาก บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรรัตน์ ผู้ซึ่งมอบศาสตร์วิชาความรู้ทางด้านระบบควบคุมอันมากมาย ทั้งยังชี้แนะแนวทางการประยุกต์ใช้ทฤษฎีในการแก้ไขปัญหาต่างๆอย่างมีเหตุผล ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำงานในอนาคตได้ดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักร จันทลักขณา ผู้ซึ่งมอบศาสตร์วิชาความรู้ทางด้านการสันตะเทือนอันมากมาย ทั้งยังชี้แนะแนวทางการทำงานให้สำเร็จลุล่วงโดยใช้หลักการคิดอย่างมีระเบียบ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำงานในอนาคตได้ดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.พิชัย อัมมมวงคล ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และชี้แนะให้เขียนวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนู ดุยฉาย ผู้ซึ่งให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อควบคุมการสันตะเทือนของคานปลายอิสระ

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาเอก นายสว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ และ นายเชมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในเรื่องการทดลองการควบคุม และ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ได้เคยพูดคุยแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและเป็นที่กำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย ที่มอบโอกาสอันมีค่ายิ่งในการทำวิจัยครั้งนี้รวมทั้งให้กำลังใจตลอดมา คอยอบรมสั่งสอนไม่ว่าจะเป็นเรื่องการค้าเดินชีวิต มอบความอบอุ่น ห่วงใย สงสัยเลี้ยงดู แม้ว่าจะต้องต่อสู้ดิ้นรนด้วยความยากลำบากเพื่อการศึกษาของลูกคนนี้

อำนาจ อิ่มเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 แบบจำลอง ARX	4
2.2 การทำนายเอาต์พุตล่วงหน้าหลายลำดับขั้น	5
2.3 การออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเดดปีท	8
2.4 รีเคอร์ซีฟริสแควร์เทคนิค	13
2.5 การป้อนกลับและป้อนไปข้างหน้าสำหรับสัญญาณรบกวน อินพุท	15
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	21
3.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ของคานปลายอิสระ	21
3.2 การคำนวณเชิงตัวเลขระบบควบคุมแบบทำนายเดดปีทด้วย โปรแกรม MATLAB เพื่อลดการสั่นสะเทือนของคานปลาย อิสระ	22
3.3 การคำนวณเชิงตัวเลขระบบควบคุมแบบทำนายเดดปีทด้วย โปรแกรม MATLAB เมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับ ระบบเพื่อลดการสั่นสะเทือนของคานอูมิเนียมปลายอิสระ	24
3.4 การทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดปีทในการลดการ สั่นสะเทือนคานอูมิเนียมปลายอิสระ	25
3.5 การทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดปีทในการลดการ สั่นสะเทือนคานอูมิเนียมปลายอิสระเมื่อมีสัญญาณอินพุท รบกวนกระทำกับระบบ	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ชุดอุปกรณ์การทดลอง	33
บทที่ 4 ผลการวิจัย	37
4.1 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติและแสดงรูปร่างการ สั่นสะเทือนคานปลายอิสระ	37
4.2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตในการ ลดการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม MATLAB	39
4.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตในการ ลดการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อมีสัญญาณ อินพุทรบกวนกระทำกับระบบ	46
4.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตในการลดการ สั่นสะเทือนคานปลายอิสระ	48
4.5 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตเมื่อมีสัญญาณ อินพุทรบกวนกระทำกับระบบในการลดการสั่นสะเทือนคาน ปลายอิสระ	59
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการคำนวณเชิงตัวเลข	63
5.2 สรุปผลการทดลอง	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก ก ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคาน	67
ภาคผนวก ข รายละเอียดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก	69
ประวัติผู้วิจัย	72

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	คุณสมบัติของคานอลูมิเนียม	23
4-1	ความถี่ธรรมชาติของคานอลูมิเนียมปลายอิสระ	38
4-2	ผลการคำนวณเชิงตัวเลขการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน	43
4-3	ผลการคำนวณเชิงตัวเลขการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม (q=100)	44
4-4	ผลการคำนวณเชิงตัวเลขค่าความถี่ธรรมชาติก่อนและหลังการ ควบคุมการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ ขอบเขตการควบคุม (q=100)	44
4-5	ผลการทดสอบตัวควบคุมการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน	56
4-6	ผลการทดสอบตัวควบคุมการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม (q=60)	58
4-7	ผลการทดสอบค่าความถี่ธรรมชาติก่อนและหลังการควบคุมการ สั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการ ควบคุม (q=60)	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แสดงการคำนวณการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระ	20
2-2 แสดงการคำนวณการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับ	20
3-1 แสดงลักษณะการรองรับและการแบ่งเอเลเมนต์ของคานปลายอิสระ	21
3-2 แสดงตำแหน่งอินพุตและเอาต์พุตบนคานปลายอิสระ	22
3-3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมระบบ	23
3-4 แสดงตำแหน่งอินพุตกระตุ้น อินพุตรบกวนและเอาต์พุตบนคานปลายอิสระ	24
3-5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมระบบเมื่อมีสัญญาณอินพุตรบกวน	25
3-6 การติดตั้งชุดทดลองหาค่าอัตราขยายการควบคุม	26
3-7 บล็อกไดอะแกรมแสดงการหาค่าอัตราขยายการควบคุม	27
3-8 การติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมการลดการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระ	27
3-9 การติดตั้งคานอลูมิเนียมในการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระ	28
3-10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมการลดการสั่นสะเทือน	29
3-11 การติดตั้งชุดทดลองหาค่าอัตราขยายการควบคุมเมื่อมีสัญญาณอินพุตรบกวน	30
3-12 บล็อกไดอะแกรมการหาค่าอัตราขยายการควบคุมเมื่อมีสัญญาณอินพุตรบกวน	31
3-13 การติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมการสั่นสะเทือนเมื่อมีสัญญาณอินพุตรบกวน	31
3-14 การติดตั้งคานอลูมิเนียมในการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับ	32
3-15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการลดการสั่นสะเทือนเมื่อมีสัญญาณอินพุตรบกวน	33
3-16 ตัวยังสัญญาณความเร่ง	33
3-17 ตัวขยายสัญญาณแบบประจุ	34
3-18 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	34
3-19 เครื่องรับส่งข้อมูล	35
3-20 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	35
3-21 เครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่จากการทดลองคานปลายอิสระ	37
4-2 รูปร่างการสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระ	38
4-3 แสดงข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข	39
4-4 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=4$ และ $q=20$	39
4-5 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=8$ และ $q=40$	40
4-6 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=20$ และ $q=60$	41
4-7 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=35$ และ $q=100$	41
4-8 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมเชิงตัวเลขในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน	42
4-9 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมเชิงตัวเลขในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม ($q=100$)	43
4-10 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมแบบทำนายเดคปีทหลาย โหมด	45
4-11 แสดงข้อมูลอินพุต สัญญาณอินพุตรบกวนและเอาต์พุตที่ได้จากการ คำนวณเชิงตัวเลข	46
4-12 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขเมื่อระบบมีสัญญาณอินพุตรบกวน $p=20$ และ $q=60$	47
4-13 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมเชิงตัวเลขเมื่อระบบมี สัญญาณอินพุตรบกวน $p=20$ และ $q=60$	48
4-14 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้	49
4-15 แสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนแบบอิสระ	52
4-16 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=4$ และ $q=20$	53
4-17 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=8$ และ $q=40$	54
4-18 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=20$ และ $q=60$	55
4-19 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=35$ และ $q=100$	55
4-20 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน	56
4-21 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมในแต่ละออเดอร์ แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม ($q=60$)	57
4-22 แสดงข้อมูลอินพุต ข้อมูลอินพุตรบกวนและเอาต์พุตที่วัดได้	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-23 แสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนแบบบังคับ	61
4-24 แสดงการควบคุมเมื่อระบบมีสัญญาณอินพุทรบกวน $p=20$ และ $q=60$	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

A	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ β_i ($i = 1, 2, \dots, p$)
B	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ α_i ($i = 1, 2, \dots, p$)
F	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์
H	เมทริกซ์เฮนเคิล (Hankel Matrix)
K	เมทริกซ์ความแข็งแกร่งสปริง
M	เมทริกซ์มวล
N	จำนวนข้อมูล
T	เมทริกซ์โทปไรส (Toeplitz Matrix)
j	ลำดับชั้นเวลาใดๆ
m	จำนวนของเอาต์พุต
n	ออเดอร์ของระบบ
p	ออเดอร์แบบจำลอง ARX (ARX Model Order)
q	ขอบเขตการควบคุม (Control Horizon)
r	จำนวนของอินพุต
u	ตัวแปรอินพุต
y	ตัวแปรเอาต์พุต

ตัวอักษรกรีก

ω	ความถี่ธรรมชาติของการสั่นของคาน
ρ	ความหนาแน่น
α_i, β_i	ตัวแปรออฟเซิร์ฟเวอร์มาร์โค (Observer Markov Parameters)

ตัวห้อย

d	สัญญาณรบกวน
k	ช่วงเวลาที่ k (k-th Time Step)
o	ตัวแปรออฟเซิร์ฟ
s	จำนวนข้อมูลในการทำนาย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ตัวยก

c

ตัวแปรควบคุม

เครื่องหมายที่อยู่บนสัญลักษณ์

'

เมทริกซ์ที่ออกแบบการควบคุม

*

การแปลงผกผันเสมือน (Pseudo-Inverse)

^

เมทริกซ์การประมาณค่า

คำย่อ

ARX

Auto-Regressive with eXogeneous Input

OMP

Observer Markov Parameters

DPC

Deadbeat Predictive Control

MIMO

Multi-input Multi-output

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบทางกลในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้จะมีการสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากความไม่สมดุลของโครงสร้างที่เกิดจากการออกแบบไม่ดีพอหรือผลกระทบจากการสั่นสะเทือนจากสิ่งแวดล้อมรอบข้างระบบจึงมีผลทำให้ระบบทางกลมีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดต่ำลงเมื่อไรก็ตามถ้าความถี่ในการสั่นสะเทือนของระบบตรงกันกับความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบทางกลได้เพราะฉะนั้นในการออกแบบระบบทางกลจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้ระบบที่ออกแบบแล้วเป็นระบบที่ไม่มีการสั่นสะเทือนและช่วงความถี่ใช้งานไม่เป็นช่วงที่มีความถี่ธรรมชาติของระบบอยู่แต่ถ้าการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำและไม่ได้อยู่ในช่วงที่มีความถี่ธรรมชาติเราสามารถควบคุมการลดการสั่นสะเทือนของระบบทางกลได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการสั่นแบบตายตัว (Passive Controlled) เนื่องจากระบบทางกลโดยทั่วไปนั้นมักจะทำงานอยู่หลายช่วงความถี่ของแรงกระทำทั้งหมด ดังนั้นการที่เราจะออกแบบอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติต่างๆที่แล้วกำหนดให้ทำงานได้ตลอดช่วงความถี่ของแรงกระทำทั้งหมดจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ลำบากยกเว้นว่าพลศาสตร์ของแรงกระทำเกิดในย่านความถี่ไม่กว้างมากนักและในบางครั้งการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการสั่นแบบตายตัว (Passive Controlled) แทนที่จะเป็นการลดการสั่นสะเทือนก็จะกลับกลายเป็นการเพิ่มการสั่นให้กับระบบ [1] ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหา ก็คือใช้การควบคุมแบบปรับค่าได้ (Active Control) เพื่อให้เราสามารถที่จะปรับค่าการตอบสนองต่างๆไม่ว่าจะเป็นการกระจัด ความเร็ว หรือ ความเร่ง ให้มีค่าตามที่เรต้องการได้ไม่ว่าแรงกระทำจะมีความถี่เท่าใดก็ตาม

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมแบบปรับค่าได้ (Active Control) โดยทั่วไปในการควบคุมการสั่นสะเทือนจะใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ซึ่งหมายความว่า จะมีอุปกรณ์ยังสัญญาณ (Sensor) ทำหน้าที่ส่งข้อมูลป้อนกลับให้กับอุปกรณ์กระตุ้น (Actuator) โดยสร้างแรงหรือโมเมนต์คืนสู่ระบบโดยขนาดและความถี่ของแรงที่ตัวควบคุมสร้างขึ้นเพื่อส่งการจะใช้กฎหรือหลักการที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าให้อยู่ในช่วงที่เรายอมรับได้ ซึ่งที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้ใช้การควบคุมแบบปรับค่าได้ในการลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

Jer-Nan Juang และ Minh Q. Phan [2] ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบีท (Deadbeat Predictive Controller) ด้วยอัลกอริทึมโดยอ้อม (Indirect Algorithm) และอัลกอริทึมโดยตรง (Direct Algorithm) ในการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อลดความสั่นสะเทือนของระบบ 3 DOF ที่

ประกอบด้วย สปริง มวลและตัวหน่วง

Jer-Nan Juang และ Minh Q. Phan [3] ใช้เทคนิครีเคอร์ซีฟลีสแควร์ (Recursive Least Square Technique) คำนวณเชิงตัวเลขการควบคุมแบบทำนายเดดบีทเพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบ 3 DOF ที่ประกอบด้วย สปริง มวลและตัวหน่วง กรณีไม่มีสัญญาณรบกวน (Free-Noise) และกรณีเพิ่มสัญญาณรบกวนที่วัดได้ (Measurement Noise)

Sinchai Chinvorarat และ Marco Schoen [4] ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบีทในการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนอินพุตของระบบสองออร์เดอร์ซึ่งตัวควบคุมแบบนี้เป็นการรวมหลักการเอกลักษณ์ระบบและตัวควบคุมแบบทำนายเดดบีทเข้าด้วยกันมีการออกแบบตัวแปรควบคุมสองตัวแปรคือ ARX Model Order (p) และ Control Horizon (q)

Kenneth W. Eure [5] ใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบทำนายปรับตัวได้สำหรับควบคุมความสั่นสะเทือนของแผ่นเรียบโดยใช้อัลกอริทึมการควบคุมสองอัลกอริทึมคือ การควบคุมแบบทำนายเจนเนอเรลไวส์ GPC (Generalized Predictive Control) และการควบคุมแบบทำนายเดดบีท DPC (Deadbeat Predictive Control)

จักร [6] ปรับปรุงเสถียรภาพของตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบโดยเพิ่มความหน่วงเริ่มต้นให้กับโครงสร้างเพื่อเลื่อนโหมดความสั่นสะเทือนจากขอบเขตใกล้มาร์จินไปอยู่ทางซ้ายของระนาบเอสเพื่อป้องกันการรบกวน ซึ่งอาศัยคู่ของอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมและวัดหยังสัญญาณที่ติดตั้งบนโครงสร้าง ณ ตำแหน่งเดียวกันในการควบคุมความสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียม

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น วิธีควบคุมแบบทำนายเดดบีทในเอกสารอ้างอิง [2,3] เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถลดการสั่นสะเทือนระบบ 3 DOF ได้ โดยการนำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากระบบมาใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบทำนายเดดบีท ผู้เขียนจึงมีความสนใจที่จะนำวิธีควบคุมแบบทำนายเดดบีทมาประยุกต์ใช้ในการลดความสั่นสะเทือนกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระโดยมีการออกแบบตัวแปรควบคุมสองตัวแปรคือ ARX Model Order (p) และ Control Horizon (q) ซึ่งคานอลูมิเนียมปลายอิสระนี้เป็นระบบที่เป็นเชิงเส้นตรง (Linear Systems) และมีความเสถียรภาพ (Stable)

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบทำนายเดดบีทโดยใช้แบบจำลองจากการหาเอกลักษณ์ระบบ

1.3.2 ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมในการลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการทำนายเอกลักษณ์ของระบบ

1.4.2 ศึกษาการควบคุมแบบทำนายเดดบีท

1.4.3 ทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดปีทในการลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระ

1.4.4 ทำเป็นชุดทดลองในห้องทดลองเพื่อการเรียนการสอนระดับปริญญาโทและเอก

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

1.5.2 ศึกษาการทำนายเอกลักษณ์ระบบและระบบควบคุมแบบทำนายเดดปีท

1.5.3 ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบทำนายเดดปีท

1.5.4 จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

1.5.5 ทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพตัวควบคุม

1.5.6 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 นำทฤษฎีการควบคุมแบบทำนายเดดปีทมาประยุกต์ใช้ในการลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระได้

1.6.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมความสั่นสะเทือนกับระบบทางกลอื่นๆ

1.6.3 เป็นฐานงานวิจัยสามารถนำไปพัฒนาต่อในระบบการสั่นสะเทือนอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎี

การผนวกการหาเอกลักษณ์ของระบบรวมกับการควบคุมแบบทำนายได้ถูกนำเสนอในบทนี้ซึ่งแตกต่างจากวิธีการออกแบบระบบควบคุมโดยทั่วไปที่มีสองขั้นตอน ได้แก่ การหาเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งวิธีการนี้จะสร้างกฎการควบคุมแบบทำนายเดดบิตจากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตโดยตรง โดยใช้แบบจำลอง ARX (Auto-Regressive with eXogenous Input) ที่แสดงในหัวข้อ 2.1 นำมาทำนายเอาต์พุตล่วงหน้าหลายลำดับขั้น (Multi-step Output Predictor) ดังแสดงในหัวข้อ 2.2 สมการที่ได้จากการทำนายในหัวข้อ 2.2 ใช้ออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเดดบิตในหัวข้อ 2.3 ประยุกต์ใช้เทคนิครีเคอร์ซีฟลีสแควร์ (Recursive Least Square) ในการคำนวณหาค่าเมทริกซ์อัตราขยายการควบคุม (Control Gain Matrix) ในหัวข้อ 2.4 เพิ่มสัญญาณรบกวนอินพุตให้กับระบบและออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเดดบิตในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 2.3 และหัวข้อ 2.4 เพื่อการป้อนกลับและป้อนไปข้างหน้าให้กับระบบควบคุมดังแสดงในหัวข้อ 2.5 วิธีการข้างต้นนี้ทำให้ลดขั้นตอนในการหาเอกลักษณ์ของระบบลงและทำให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพในการปรับตัวมากขึ้น ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวมาข้างต้นจะแสดงดังต่อไปนี้

2.1 แบบจำลอง ARX

ARX หมายถึง แบบจำลองแบบสมการถดถอยรวมกับอินพุตภายนอก (Auto-Regressive with eXogenous Input) แบบจำลองนี้เป็นการขยายแบบจำลอง AR โดยการเพิ่มอินพุตภายนอก (eXogenous Input) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ตามนี้

$$y(k) = \sum_{i=1}^p \alpha_i y(k-i) + \sum_{i=1}^p \beta_i u(k-i) + e(k) \quad (2-1)$$

โดยที่ $y(k)$ คือข้อมูลเอาต์พุตที่เวลาเต็มหน่วย k $y(k-i)$ คือส่วนการถดถอย (Autoregressive Part) ของเอาต์พุต $u(k-i)$ คือส่วนของอินพุตภายนอก (Exogenous Part) α_i และ β_i เป็นตัวแปรของแบบจำลอง ARX และ $e(k)$ เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ

เอาต์พุตวัดได้ที่เวลา $k+1$ สามารถแสดงในรูปผลรวมของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ผ่านมาโดยปราศจากเอาต์พุตวัดได้ที่เวลา $k, y(k)$ ดังนั้นเอาต์พุตวัดได้ที่เวลา $k+j, y(k+j)$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} y(k+j) = & \alpha_1^{(j)} y(k-1) + \alpha_2^{(j)} y(k-2) + \dots + \alpha_p^{(j)} y(k-p) \\ & + \beta_0 u(k+j) + \beta_0^{(1)} u(k+j-1) + \dots + \beta_0^{(j)} u(k) \\ & + \beta_1^{(j)} u(k-1) + \beta_2^{(j)} u(k-2) + \dots + \beta_p^{(j)} u(k-p) \end{aligned} \quad (2-7)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \alpha_1^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \alpha_1 + \alpha_2^{(j-1)} & \beta_1^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \beta_1 + \beta_2^{(j-1)} \\ \alpha_2^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \alpha_2 + \alpha_3^{(j-1)} & \beta_2^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \beta_2 + \beta_3^{(j-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{p-1}^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \alpha_{p-1} + \alpha_p^{(j-1)} & \beta_{p-1}^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \beta_{p-1} + \beta_p^{(j-1)} \\ \alpha_p^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \alpha_p & \beta_p^{(j)} &= \alpha_1^{(j-1)} \beta_p \end{aligned} \quad (2-8)$$

และ

$$\beta_0^{(j)} = \alpha_1^{(j-1)} \beta_0 + \beta_1^{(j-1)} \quad (2-9)$$

หมายเหตุ $\alpha_i^{(0)} = \alpha_i$ และ $\beta_i^{(0)} = \beta_i$ สำหรับจำนวนเต็มที่เป็นไปได้ $1, 2, \dots$ รวมทั้ง 0 ด้วยการกระทำเกี่ยวกับพีชคณิตสมการ (2-9) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\beta_0^{(0)} = \beta_0$$

$$\beta_0^{(k)} = \beta_k + \sum_{i=1}^k \alpha_i \beta_0^{(k-i)} \quad k = 1, \dots, p$$

$$\beta_0^{(k)} = \sum_{i=1}^p \alpha_i \beta_0^{(k-i)} \quad k = p+1, \dots, \infty \quad (2-10)$$

เหมือนกับสมการ (2-10) $\alpha_1^{(j)} = \alpha_1^{(j-1)} \alpha_1 + \alpha_2^{(j-1)}$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\alpha_1^{(0)} = \alpha_1$$

$$\alpha_1^{(k)} = \alpha_{k+1} + \sum_{i=1}^k \alpha_i \alpha_1^{(k-i)} \quad k = 1, \dots, p-1$$

$$\alpha_1^k = \sum_{i=1}^p \alpha_i \alpha_1^{(k-i)} \quad k = p, \dots, \infty \quad (2-11)$$

จากสมการ (2-10) และ (2-11) แสดงให้เห็นว่า $\beta_0^{(j)}$ และ $\alpha_1^{(j)}$ สำหรับ $j > p$ คือ การรวมกันเชิงเส้นของตัวแปร $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ ด้วยจำนวน p ตัวแปรที่ผ่านมาในอดีต คุณสมบัตินี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาการออกแบบระบบควบคุมแบบทำนาย จำนวน $\beta_0^{(i)}$ ($i = 0, 1, \dots$) ในความเป็นจริงคือ พัลส์เรสปอนซีเคเวน (Pulse Response Sequence) ที่ซึ่งจะแสดงภายหลัง และ $\alpha_1^{(i)}$ ($i = 0, 1, \dots$) คือ ออฟเซิร์ฟเวอร์เกนมาร์โคพารามิเตอร์ (Observer Gain Markov Parameters) ที่ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณตัวสังเกตการณ์สำหรับการประมาณค่าสเคต (State Estimator)

กำหนดให้ตัวบ่งชี้ j คือ $j = 1, 2, \dots, q, q+1, \dots, s-1$ จากสมการ (2-7) และสมการ (2-8) จะได้ผลตามสมการเมทริกซ์ดังนี้

$$y_s(k) = Tu_s(k) + Bu_p(k-p) + Ay_p(k-p) \quad (2-12)$$

โดยที่

$$y_s(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \vdots \\ y(k+q) \\ y(k+q+1) \\ \vdots \\ y(k+s-1) \end{bmatrix}_{s \times 1}, \quad u_s(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+q) \\ u(k+q+1) \\ \vdots \\ u(k+s-1) \end{bmatrix}_{s \times 1}$$

$$y_p(k-p) = \begin{bmatrix} y(k-p) \\ y(k-p+1) \\ \vdots \\ y(k-1) \end{bmatrix}_{p \times 1}, \quad u_p(k-p) = \begin{bmatrix} u(k-p) \\ u(k-p+1) \\ \vdots \\ u(k-1) \end{bmatrix}_{p \times 1} \quad (2-13)$$

และ

$$T = \begin{bmatrix} \beta_0 & & & & & \\ \beta_0^{(1)} & \beta_0 & & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \\ \beta_0^{(q)} & \beta_0^{(q-1)} & \dots & \beta_0 & & \\ \beta_0^{(q+1)} & \beta_0^{(q)} & \dots & \beta_0^{(1)} & \beta_0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \beta_0^{(s-1)} & \beta_0^{(s-2)} & \dots & \beta_0^{(s-q-1)} & \beta_0^{(s-q-2)} & \dots & \beta_0 \end{bmatrix}_{s \times s}$$

$$B = \begin{bmatrix} \beta_p & \beta_{p-1} & \dots & \beta_1 \\ \beta_p^{(1)} & \beta_{p-1}^{(1)} & \dots & \beta_1^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_p^{(q)} & \beta_{p-1}^{(q)} & \dots & \beta_1^{(q)} \\ \beta_p^{(q+1)} & \beta_{p-1}^{(q+1)} & \dots & \beta_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_p^{(s-1)} & \beta_{p-1}^{(s-1)} & \dots & \beta_1^{(s-1)} \end{bmatrix}_{s \times p}$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_p & \alpha_{p-1} & \dots & \alpha_1 \\ \alpha_p^{(1)} & \alpha_{p-1}^{(1)} & \dots & \alpha_1^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_p^{(q)} & \alpha_{p-1}^{(q)} & \dots & \alpha_1^{(q)} \\ \alpha_p^{(q+1)} & \alpha_{p-1}^{(q+1)} & \dots & \alpha_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_p^{(s-1)} & \alpha_{p-1}^{(s-1)} & \dots & \alpha_1^{(s-1)} \end{bmatrix}_{s \times p} \quad (2-14)$$

จำนวน $y_s(k)$ แสดงถึงเวกเตอร์เอาต์พุตด้วยข้อมูลทั้งหมด s จุดข้อมูล สำหรับแต่ละ เซนเซอร์ จากลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+s-1$ และ $y_p(k-p)$ ประกอบด้วย p จุดข้อมูล จากลำดับชั้นเวลา $k-p$ ถึง $k-1$ ในทำนองเดียวกัน $u_s(k)$ แสดงถึงเวกเตอร์อินพุตด้วยข้อมูล s จุดข้อมูลจากลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+s-1$ และ $u_p(k-p)$ ประกอบด้วย p จุดข้อมูล จากลำดับชั้นเวลา $k-p$ ถึง $k-1$ เมทริกซ์ T โดยทั่วไปเรียกว่าเมทริกซ์โทปริส (Toeplitz Matrix) ซึ่งคือรูปแบบจากตัวแปรพัลส์เรสปอนซีแควน $\beta_0, \beta_0^{(1)}, \dots$, และ $\beta_0^{(s-1)}$

เวกเตอร์ $y_s(k)$ ในสมการที่ (2-12) ประกอบด้วยสามเทอม เทอมแรก คือ เวกเตอร์ อินพุต $u_s(k)$ ประกอบด้วยอินพุตในอนาคตจากลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+s-1$ เทอมสองและ เทอมสาม $u_p(k-p)$ และ $y_p(k-p)$ คือเวกเตอร์อินพุตและเอาต์พุตที่รู้ในอดีตจาก $k-p$ ถึง $k-1$ เวกเตอร์อินพุตในอนาคต $u_s(k)$ คือถูกกำหนดสำหรับการควบคุมป้อนกลับ

2.3 การออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเด็คบิท

สมมุติให้ระบบปิด (Closed Loop) การควบคุมเริ่มต้นที่ลำดับชั้นเวลา k ก่อนเวลา k ระบบเปิด (Open Loop) เมื่อการควบคุมเริ่มต้นที่ลำดับชั้นเวลา k และสิ้นสุดที่เวลา $k+q$ นั้น คือ $u(k+q)$ และถัดไปเป็นศูนย์ทั้งหมด สมการที่ (2-12) กลายเป็น

$$y_p(k+q) = T'u_{p+q}(k) + B'u_p(k-p) + A'y_p(k-p) \quad (2-15)$$

โดยที่

$$y_p(k+q) = \begin{bmatrix} y(k+q) \\ y(k+q+1) \\ \vdots \\ y(k+q+p-1) \end{bmatrix}_{p \times 1}$$

และ

$$T' = T(qm+1 : pm+qm, :) = \begin{bmatrix} \beta_0^{(q)} & \beta_0^{(q-1)} & \dots & \beta_0^{(1)} & \beta_0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta_0^{(q+1)} & \beta_0^{(q)} & \dots & \beta_0^{(2)} & \beta_0^{(1)} & \beta_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_0^{(q+p-1)} & \beta_0^{(q+p-2)} & \dots & \beta_0^{(p)} & \beta_0^{(p-1)} & \beta_0^{(p-2)} & \dots & \beta_0 \end{bmatrix}_{pm \times (q+p)r}$$

$$B' = B(qm+1 : pm+qm, :) = \begin{bmatrix} \beta_p^{(q)} & \beta_{p-1}^{(q)} & \dots & \beta_1^{(q)} \\ \beta_p^{(q+1)} & \beta_{p-1}^{(q+1)} & \dots & \beta_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_p^{(q+p-1)} & \beta_{p-1}^{(q+p-1)} & \dots & \beta_1^{(q+p-1)} \end{bmatrix}_{p \times p}$$

$$A' = A(qm+1 : pm+qm, :) = \begin{bmatrix} \alpha_p^{(q)} & \alpha_{p-1}^{(q)} & \dots & \alpha_1^{(q)} \\ \alpha_p^{(q+1)} & \alpha_{p-1}^{(q+1)} & \dots & \alpha_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_p^{(q+p-1)} & \alpha_{p-1}^{(q+p-1)} & \dots & \alpha_1^{(q+p-1)} \end{bmatrix}_{p \times p} \quad (2-16)$$

สมการที่ (2-15) คือการลดรูปของสมการที่ (2-12) โดยจัดสมการแรกที่ลำดับชั้นเวลา $k+q$ ไปถึงสมการที่ลำดับชั้นเวลา $k+q+p-1$ เมทริกซ์ T' ขนาด $pm \times (q+p)r$ คือรูปแบบจากพัลส์เรสปอนส์ (Pulse Response) หรือตัวแปรมาร์โคเวท (System Markov Parameters) หมายถึง m คือ จำนวนของเอาต์พุต p คือ ออเดอร์ของแบบจำลอง ARX r คือ จำนวนของอินพุต และ q คือ จำนวนของลำดับชั้นการควบคุม qm คือการคูณของค่าจำนวนของลำดับชั้นการควบคุมกับจำนวนของเอาต์พุต pm คือการคูณของค่าออเดอร์แบบจำลอง ARX กับจำนวนเอาต์พุต เวกเตอร์เอาต์พุต $y_p(k+q)$ ในสมการที่ (2-15) ประกอบด้วยเอาต์พุตจากลำดับชั้นเวลา $k+q$ ถึง $k+q+p-1$ เวกเตอร์อินพุต $u_{p+q}(k)$ ประกอบด้วยอินพุตจากลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+q+p-1$ เช่นเดียวกัน $u_p(k-p)$ และ $y_p(k-p)$ ซึ่งประกอบด้วยอินพุตและเอาต์พุตจากลำดับชั้นเวลา $k-p$ ถึง $k-1$

กำหนดให้ T' แบ่งเป็นสองส่วนดังนั้นสมการ (2-15) กลายเป็น

$$y_p(k+q) = T_o u_p(k+q) + T_c u_q(k) + B' u_p(k-p) + A' y_p(k-p) \quad (2-17)$$

โดยที่

$$u_p(k+q) = \begin{bmatrix} u(k+q) \\ u(k+q+1) \\ \vdots \\ u(k+q+p-1) \end{bmatrix}_{pm \times 1}, \quad u_q(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+q-1) \end{bmatrix}_{qr \times 1} \quad (2-18)$$

และ

$$T_c = \begin{bmatrix} \beta_0^{(q)} & \beta_0^{(q-1)} & \dots & \beta_0^{(1)} \\ \beta_0^{(q+1)} & \beta_0^{(q)} & \dots & \beta_0^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_0^{(q+p-1)} & \beta_0^{(q+p-2)} & \dots & \beta_0^{(p)} \end{bmatrix}_{pm \times qr}, \quad T_o = \begin{bmatrix} \beta_0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta_0^{(1)} & \beta_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_0^{(p-1)} & \beta_0^{(p-2)} & \dots & \beta_0 \end{bmatrix}_{pm \times pr} \quad (2-19)$$

เมทริกซ์ T_c ขนาด $pm \times qr$ และ เมทริกซ์ T_o ขนาด $pm \times pr$ ทั้งคู่คือรูปแบบจากพัลส์เรสปอนส์ (Pulse Response) ของระบบหรือตัวแปรมาร์โคเวบ (System Markov Parameters) กำหนดให้ทุกๆลำดับอินพุต-เอาต์พุต $u(k)$ และ $y(k)$ ในสมการที่ (2-17) สามารถใช้สำหรับหาเอกลักษณ์เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ T_o, T_c, A' และ B' ถ้าสลับหลักที่หนึ่งของเมทริกซ์ T_c ในทิศทางจากซ้ายไปขวาและคงแถวไว้มันจะกลายเป็นเมทริกซ์เฮนเคิล (Hankel Matrix) ของพัลส์เรสปอนส์ (Pulse Response) นั่นคือ

$$H = \begin{bmatrix} \beta_0^{(1)} & \beta_0^{(2)} & \dots & \beta_0^{(q-1)} & \beta_0^{(q)} \\ \beta_0^{(2)} & \beta_0^{(3)} & \dots & \beta_0^{(q)} & \beta_0^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \beta_0^{(p)} & \beta_0^{(p+1)} & \dots & \beta_0^{(q+p-2)} & \beta_0^{(q+p-1)} \end{bmatrix}_{pm \times qr} \quad (2-20)$$

เมทริกซ์เฮนเคิล (Henkel Matrix) มีแรงค์ขนาด n โดยที่ n คืออันดับของระบบ ในกรณีที่ $qr \geq pm \geq n$ จำนวน qr เอลิเมนต์ใน $u_q(k)$ ขนาด $qr \times 1$ ด้วย n สมการอิสระเท่านั้นในสมการที่ (2-17) สมการที่ (2-17) ให้หลายคำตอบสำหรับ $u_q(k)$ ด้วยวิธีการนอร์มมินนิ้ม (Minimum-Norm) แสดงโดย

$$u_q(k) = T_c^* y_p(k+q) - T_c^* T_o u_p(k+q) - T_c^* B' u_p(k-p) - T_c^* A' y_p(k-p) \quad (2-21)$$

หรือในรูปแบบเมทริกซ์

$$u_q(k) = \begin{bmatrix} -T_c^* A' & -T_c^* B' & T_c^* & -T_c^* T_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_p(k-p) \\ y_p(k+q) \\ u_p(k+q) \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

สำหรับกรณีที่ $qr = pm$ สมการที่ (2-22) จะให้คำตอบเดียว ทำสมการ (2-22) ให้ง่ายขึ้นโดยกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้

$$F_c = \begin{bmatrix} -T_c^* A' & -T_c^* B' \end{bmatrix} \text{ และ } F_o = \begin{bmatrix} T_c^* & -T_c^* T_o \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

และ

$$v_p(k-p) = \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_p(k-p) \end{bmatrix} \text{ และ } v_p(k+q) = \begin{bmatrix} y_p(k+q) \\ u_p(k+q) \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

โดยที่เมทริกซ์ F_c และ F_o ขนาด $qr \times p(m+r)$ เวกเตอร์ $v_p(k-p)$ และ $v_p(k+q)$ ขนาด $(pm+pr) \times 1$ ดังนั้นสมการที่ (2-22) จะกลายเป็น

$$u_q(k) = \begin{bmatrix} F_c & F_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_p(k+q) \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

สมการที่ (2-25) คืออีกหนึ่งรูปแบบของแบบจำลองไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับการหาเอกลักษณ์ระบบ กำหนดให้สำหรับทุกๆ ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตโดยที่ยังคงเซตของ F_c และ F_o ให้เป็นจริงตามสมการที่ (2-25) ใช้สมการที่ (2-25) เพื่อพัฒนาตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่แสดงตามนี้

สมมติให้เวกเตอร์อินพุต $u_q(k)$ ถูกเลือกดังสมการด้านล่างนี้

$$u_q(k) = F_c v_p(k-p) \quad (2-26)$$

เพื่อให้สมการที่ (2-25) เป็นจริงจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$F_o v_p(k+q) = \begin{bmatrix} T_c^* & -T_c^* T_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p(k+q) \\ u_p(k+q) \end{bmatrix} = 0 \quad (2-27)$$

ถ้า T_c^* ขนาด $pm \times qr$ แรงค์เต็ม (Full Rank) คือ pm ด้วย $pm \geq qr$ และเซต $u_p(k+q)$ ให้เป็นศูนย์ ดังนั้น $y_p(k+q)$ จึงกลายเป็นศูนย์ ผลของการกระทำการควบคุม $u_q(k)$ ถูกคำนวณจากสมการที่ (2-26) คือตัวควบคุมเดดบีทที่ซึ่งทำให้ $y_p(k+q)$ เป็นศูนย์หลังจากลำดับขั้นเวลา q จำนวนเต็ม q ถูกเรียกว่าขอบเขตการควบคุมเดดบีท (Deadbeat Control Horizon) จำนวนเต็ม p โดยทั่วไปอ้างอิงถึงขอบเขตการหาเอกลักษณ์ระบบ (System Identification or Observer Horizon) เงื่อนไข $qr \geq pm$ หมายถึง การกระทำการควบคุมไม่ควรเร็วกว่าการประมาณค่าสเตตการสังเกตการณ์

ในสมการ (2-18) r แถวแรกของ $u_q(k)$ คือเวกเตอร์อินพุต $u(k)$ ที่เวลา k กำหนด F_{cl} และ F_{ol} คือ r แถวแรกของ F_c และ F_o ตามลำดับ การควบคุมที่ $u(k)$ ควรเป็น

$$\begin{aligned} u(k) &= [\text{the first } r \text{ rows of } F_c] v_p(k-p) \\ &= F_{cl} v_p(k-p) \end{aligned} \quad (2-28)$$

โดยที่ F_{cl} คือ เมทริกซ์อัตราขยายการควบคุม
 r แถวแรกของสมการที่ (2-25) ก่อให้เกิดสมการดังนี้

$$\begin{aligned} u(k) &= (\text{the first } r \text{ rows of } [F_c \quad F_o]) \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_p(k+q) \end{bmatrix} \\ &= [F_{cl} \quad F_{ol}] \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_p(k+q) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-29)$$

สมการที่ (2-29) แสดงถึงอินพุต $u(k)$ คือ ความสัมพันธ์ของลำดับขั้นอินพุตที่ผ่านมา $u(k-p)$ ถึง $u(k-1)$ และลำดับขั้นเอาต์พุตที่ผ่านมา $y(k-p)$ ถึง $y(k-1)$ ลำดับขั้นอินพุตในอนาคต $u(k+q)$ ถึง $u(k+q+p-1)$ และลำดับขั้นเอาต์พุตในอนาคต $y(k+q)$ ถึง $y(k+q+p-1)$ นั่นคืออินพุตทั้งหมด q ลำดับขั้นเวลา จาก k ถึง $k+q-1$ จำนวนเต็ม q ที่แตกต่างกันก่อให้เกิดเซตของเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ F_{cl} และ F_{ol} ที่แตกต่างกันด้วย เป็นจริงตามสมการที่ (2-29)

เพื่อหาคำตอบสมการที่ (2-29) กำหนดให้รูปแบบตามเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$U(k) = [u(k) \quad u(k+1) \quad \cdots \quad u(k+N-p-q+1)]_{rx(N-p-q+2)}$$

$$V_p(k-p) = \begin{bmatrix} y(k-p) & y(k-p+1) & \cdots & y(k+N-2p-q+1) \\ u(k-p) & u(k-p+1) & \cdots & u(k+N-2p-q+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k-1) & y(k) & \cdots & y(k+N-p-q) \\ u(k-1) & u(k) & \cdots & u(k+N-p-q) \end{bmatrix}_{p(r+m) \times (N-p-q+2)} \quad (2-30)$$

$$V_p(k+q) = \begin{bmatrix} y(k+q) & y(k+q+1) & \cdots & y(k+N-p+1) \\ u(k+q) & u(k+q+1) & \cdots & u(k+N-p+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k+q+p-1) & y(k+q+p) & \cdots & y(k+N) \\ u(k+q+p-1) & u(k+q+p) & \cdots & u(k+N) \end{bmatrix}_{p(r+m) \times (N-p-q+2)}$$

โดยที่ N คือจำนวนข้อมูลที่ถูกใช้สำหรับการประมาณค่าของเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ F_{cl} และ F_{ol} การประยุกต์ของสมการที่ (2-29) ให้ผลดังนี้

$$U(k) = \begin{bmatrix} F_{cl} & F_{ol} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p(k-p) \\ V_p(k+q) \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

ให้จำนวนเต็ม N ถูกเลือกมากพอ ดังนั้นเมทริกซ์ $U(k)$ ขนาด $r \times (N-p-q+2)$ มีแรงค์ r เมทริกซ์ $V_p(k-p)$ ขนาด $p(r+m) \times (N-p-q+2)$ และเมทริกซ์ $V_p(k+q)$ ขนาด $p(r+m) \times (N-p-q+2)$ มีแรงค์ $pr+n$ โดยที่ n คือ ออเดอร์ของระบบอีกครั้งหนึ่ง r หมายถึงจำนวนของอินพุตและ m แทนจำนวนของเอาต์พุต สมการที่ (2-31) หาคำตอบด้วยวิธีแควร์ตามนี้

$$\begin{bmatrix} F_{cl} & F_{ol} \end{bmatrix} = U(k) \begin{bmatrix} V_p(k-p) \\ V_p(k+q) \end{bmatrix}^* \quad (2-32)$$

โดยที่ $*$ หมายถึง การแปลงผกผันเสมือน (Pseudo-Inverse)

2.4 รีเคอร์ซีลีสแควร์เทคนิค (Recursive Least-Squares Technique)

เทคนิครีเคอร์ซีลีสแควร์สามารถนำมาประยุกต์ในการคำนวณหาคำตอบของสมการที่ (2-32) อย่างมีประสิทธิภาพโดยการจัดรูปแบบสมการให้สามารถทำการคำนวณหาคำตอบออนไลน์โดยทั่วไปแล้วมีเทคนิครีเคอร์ซีลีสแควร์อยู่หลายแบบ คลาสสิกรีเคอร์ซีลีสแควร์เทคนิคจัดเป็นวิธีที่นักวิจัยนิยมใช้เป็นส่วนมากเนื่องจากอัลกอริธึมเข้าใจง่ายและมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนคลาสสิกรีเคอร์ซีลีสแควร์ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

สมการ (2-29) สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบเมทริกซ์

$$\begin{aligned} u(k) &= \begin{bmatrix} F_{cl} & F_{ol} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_p(k+q) \end{bmatrix} \\ &= F \bar{v}_p(k-1) \end{aligned} \quad (2-33)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} F &= \begin{bmatrix} F_{cl} & F_{ol} \end{bmatrix} v(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \\ \bar{v}_p(k-1) &= \begin{bmatrix} v(k-p) \\ \vdots \\ v(k-1) \\ v(k+q) \\ \vdots \\ v(k+q+p-1) \end{bmatrix}, P_p(k-1) = [\bar{v}_p(k-1) \bar{v}_p^T(k-1)]^{-1} \end{aligned} \quad (2-34)$$

อันดับแรก กำหนดปริมาณตามนี้

$$G_p(k) = \frac{\bar{v}_p^T(k) P_p(k-1)}{1 + \bar{v}_p^T(k) P_p(k-1) \bar{v}_p(k)} \quad (2-35)$$

$$\hat{u}(k+1) = \hat{F}(k) \bar{v}_p(k) \quad (2-36)$$

จากนั้น คำนวณปริมาณตามนี้

$$P_p(k) = P_p(k-1) [I - \bar{v}_p(k) G_p(k)] \quad (2-37)$$

$$\hat{F}(k+1) = \hat{F}(k) + [u(k+1) - \hat{u}(k+1)] G_p(k) \quad (2-38)$$

สมการที่ (2-35)-(2-38) ประกอบด้วยรูปแบบพื้นฐานรีเคอร์ซีลิสแควร์ (Recursive Least-Squares) สำหรับคำนวณหาเมทริกซ์ F ซึ่งประกอบด้วย F_{cl} สำหรับออกแบบตัวควบคุม เจดบิทและ F_{ol} สำหรับความต้องการหาเอกลักษณ์ระบบ ค่าเริ่มต้นของ $P_p(0)$ และ $\hat{F}(1)$ สามารถกำหนดหรือได้มาจากการทำแบบทรีสแควร์หลังจากจำนวนข้อมูลเริ่มแรกมีค่าเพียงพอ ถ้าค่าเริ่มต้นเลือก $P_p(0)$ มีค่าเป็น $dI_{2p(r+m)}$ และ $\hat{F}(1)$ มีค่าเป็น $0_{r \times 2p(r+m)}$ โดยที่ d คือค่าจำนวนเต็มบวกที่มากๆ ค่าคงที่จำนวนเต็มบวก d คือตัวแปรเดียวที่ต้องการสำหรับการเริ่มต้น

การเลือกค่า d ที่เหมาะสมอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์ตามความเป็นจริงคือเลือกค่า d โดยการสุ่มค่าที่เป็นจำนวนเต็มบวกมากๆ แล้วดูค่าการคำนวณว่าถูกต้องหรือไม่ ซึ่งการเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อการประมาณค่าตัวแปร $\hat{F}(k)$ ที่แสดงโดยวิธีรีเคอร์ซีฟสแควร์ สำหรับข้อมูลหลายๆ ค่าความแน่นอนของค่าคงที่เริ่มต้นไม่ใช่สิ่งสำคัญเพราะโดยทั่วไปจะหาค่าเริ่มต้นด้วยการทำแบบรีสแควร์ในช่วงข้อมูลเริ่มต้น

2.4.1 ขั้นตอนการคำนวณสำหรับวิธีควบคุมเดคปีทด้วยเทคนิครีเคอร์ซีฟสแควร์ได้ดังต่อไปนี้

2.4.1.1 รูปแบบเวกเตอร์ $\bar{v}_p(k)$ แสดงในสมการที่ (2-34) ด้วยอินพุตใหม่ $v(k+q+p-1)$ ดังที่ $r+m$ แถวสุดท้าย

2.4.1.2 คำนวณเวกเตอร์ตัวคูณ $G_p(k)$ โดยใส่ $P_p(k-1)$ และ $\bar{v}_p(k)$ เข้าไปในสมการที่ (2-35) ในขั้นตอนนี้ อันดับแรกควรคำนวณ $\bar{v}_p^T(k)P_p(k-1)$ ก่อนและต่อจากนั้นใช้ผลเพื่อคำนวณ $[\bar{v}_p^T(k)P_p(k-1)]\bar{v}_p(k)$

2.4.1.3 คำนวณการประมาณค่าอินพุต $\hat{u}(k+1)$ โดยแทนค่า $\hat{F}(k)$ และ $\bar{v}_p(k)$ เข้าไปในสมการที่ (2-36)

2.4.1.4 ข้อมูลใหม่ของ $P_p(k-1)$ คือ $P_p(k)$ ด้วยรูปแบบ $\bar{v}_p(k)$ จากขั้นตอนแรกและ $G_p(k)$ ที่คำนวณจากขั้นตอนที่สอง

2.4.1.5 ข้อมูลใหม่ของ $\hat{F}(k)$ คือ $\hat{F}(k+1)$ จากสมการที่ (2-38) ด้วยสัญญาณอินพุต $u(k+1)$ การประมาณค่าอินพุต $\hat{u}(k+1)$ และการคำนวณเมทริกซ์ตัวคูณ $G_p(k)$

ไม่มีการอินเวอร์สเมทริกซ์เข้ามาเกี่ยวข้องในขั้นตอนการคำนวณนี้ ข้อมูลใหม่ของ $P_p(k)$ และ $G_p(k)$ ใช้เวลาการคำนวณมากกว่าปริมาณอื่นๆ ขั้นตอนรีเคอร์ซีฟสำหรับข้อมูลใหม่ของค่าตอบรีสแควร์ $\hat{F}(k)$ โดยทั่วไปมันคือเหตุผลสำหรับสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (2-32)

2.5 การป้อนกลับและป้อนไปข้างหน้าสำหรับสัญญาณรบกวนอินพุต

ในการเพิ่มอินพุตควบคุมอาจจะมีการประยุกต์สัญญาณรบกวนอินพุตอื่นให้กับระบบ สัญญาณรบกวนบางชนิดมาจากแหล่งที่รู้สามารถวัดได้ บางชนิดไม่รู้ค่าแต่รู้ภาวะที่สัมพันธ์กัน ในงานวิจัยนี้การออกแบบการป้อนกลับ (Feedback) แบบทำนายประกอบด้วยการป้อนไปข้างหน้า (Feedforward) จากสัญญาณรบกวนอินพุตที่สามารถวัดได้

รวมสัญญาณรบกวนอินพุตกับแบบจำลองไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในสมการที่ (2-2) กลายเป็น

$$\begin{aligned} y(k) = & \alpha_1 y(k-1) + \alpha_2 y(k-2) + \dots + \alpha_p y(k-p) \\ & + \beta_{c0} u_c(k) + \beta_{c1} u_c(k-1) + \beta_{c2} u_c(k-2) + \dots + \beta_{cp} u_c(k-p) \\ & + \beta_{d0} u_d(k) + \beta_{d1} u_d(k-1) + \beta_{d2} u_d(k-2) + \dots + \beta_{dp} u_d(k-p) \end{aligned} \quad (2-39)$$

ตัวห้อย c และ d ใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของอินพุตควบคุมและอินพุตรบกวนตามลำดับ จากหัวข้อที่ 2.2 สมการที่ (2-39) สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบดังนี้

$$y_p(k+q) = T_c u_{cq}(k) + T'_d u_{d(q+p)}(k) + T_o u_{cp}(k+q) + B'_c u_{cp}(k-p) + B'_d u_{dp}(k-p) + A'y_p(k-p) \quad (2-40)$$

โดยที่

$$y_p(k+q) = \begin{bmatrix} y(k+q) \\ y(k+q+1) \\ \vdots \\ y(k+q+p-1) \end{bmatrix}, \quad u_{d(q+p)}(k) = \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_d(k+1) \\ \vdots \\ u_d(k+q+p-1) \end{bmatrix}$$

$$u_{cp}(k+q) = \begin{bmatrix} u_c(k+q) \\ u_c(k+q+1) \\ \vdots \\ u_c(k+q+p-1) \end{bmatrix}, \quad u_{cq}(k) = \begin{bmatrix} u_c(k) \\ u_c(k+1) \\ \vdots \\ u_c(k+q-1) \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

$$T'_d = \begin{bmatrix} \beta_0^{(q)} & \beta_0^{(q-1)} & \cdots & \beta_0^{(1)} & \beta_0 & 0 & \cdots & 0 \\ \beta_0^{(q+1)} & \beta_0^{(q)} & \cdots & \beta_0^{(2)} & \beta_0^{(1)} & \beta_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_0^{(q+p-1)} & \beta_0^{(q+p-2)} & \cdots & \beta_0^{(p)} & \beta_0^{(p-1)} & \beta_0^{(p-2)} & \cdots & \beta_0 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์ T_c ขนาด $pm \times qr_c$ โดยที่ r_c คือจำนวนของอินพุตควบคุมและเมทริกซ์ T'_d ขนาด $pm \times qr_d$ โดยที่ r_d คือจำนวนของสัญญาณรบกวนอินพุต รูปแบบ B'_c และ B'_d คือเหมือนกัน แต่ต่างกันที่ชนิดของแรง หมายถึง T_c, T_o และ B'_c คือปริมาณที่ร่วมกับแรงควบคุม $u_c(k)$

สมการคล้ายกันกับสมการที่ (2-21) สามารถได้มาซึ่งแรงควบคุม $u_{cq}(k)$ ดังนี้

$$u_{cq}(k) = T_c^* y_p(k+q) - T_c^* T_o u_{cp}(k+q) - T_c^* T'_d u_{d(q+p)}(k) - T_c^* A' y_p(k-p) - T_c^* B'_c u_{cp}(k-p) - T_c^* B'_d u_{dp}(k-p) \quad (2-42)$$

หรือในรูปแบบเมทริกซ์

$$u_{cq}(k) = \begin{bmatrix} -T_c^* A' & -T_c^* B'_c & -T_c^* B'_d & T_c^* & -T_c^* T_o & -T_c^* T'_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_{cp}(k-p) \\ u_{dp}(k-p) \\ y_p(k+q) \\ u_{cp}(k+q) \\ u_{d(q+p)}(k) \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

เพื่อให้สมการ (2-42) ง่ายขึ้นโดยกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้

$$F'_c = \begin{bmatrix} -T_c^* A' & -T_c^* B'_c & -T_c^* B'_d \end{bmatrix} \quad F'_{co} = \begin{bmatrix} T_c^* & -T_c^* T_o \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad F'_d = -T_c^* T'_d \quad (2-44)$$

และ

$$v_p(k-p) = \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_{cp}(k-p) \\ u_{od}(k-p) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad v_{cp}(k+q) = \begin{bmatrix} y_p(k+q) \\ u_{cp}(k+q) \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

โดยที่ เมทริกซ์ F'_c ขนาด $qr_c \times p(m+r_c+r_d)$ เมทริกซ์ F'_{co} ขนาด $qr_c \times p(m+r_c)$ ปริมาณ
เวกเตอร์ $v_p(k-p)$ ขนาด $p(m+r_c+r_d) \times 1$ เวกเตอร์ $v_{cp}(k+q)$ ขนาด $p(m+r_c) \times 1$
ดังนั้นสมการที่ (2-43) กลายเป็น

$$u_{cq}(k) = \begin{bmatrix} F'_c & F'_{co} & F'_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_{cp}(k+q) \\ u_{d(q+p)}(k) \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

กำหนดให้สำหรับทุกๆข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตและยังคงเซตของ F'_c, F'_{co} และ F'_d เป็น
จริงตามสมการที่ (2-46)

สมมติกำหนดให้อินพุตเวกเตอร์ $u_{cq}(k)$ ถูกเลือกดังนี้

$$u_{cq}(k) = F'_c v_p(k-p) \quad (2-47)$$

จากสมการที่ (2-46) เอาต์พุตหลังจากลำดับขั้นเวลา q คือถูกควบคุม

$$F'_{co} v_{cp}(k+q) + F'_d u_{d(q+p)}(k) = 0$$

หรือจากสมการที่ (2-43)

$$T_c^* y_p(k+q) = T_c^* T_o u_{cq}(k+q) + T_c^* T_d^* u_{d(q+p)}(k) \quad (2-48)$$

ในที่นี้เราสมมติให้สมการที่ (2-47) จะใช้ได้ในกรณีที่สัญญาณรบกวนสามารถวัดได้เท่านั้น สมการที่ (2-48) แสดงเวกเตอร์เอาต์พุตจากเวลา $k+q$ ถูกสร้างโดยเวกเตอร์ควบคุมจากเวลา $k+q$ และเวกเตอร์สัญญาณรบกวนจากเวลา k ถ้าสัญญาณรบกวน $u_d(k)$ เหมือนสัญญาณ แรนดอม คือ ไม่สามารถทำนายได้ ดังนั้นเราไม่สามารถใช้สัญญาณรบกวนในการออกแบบการ ป้อนไปข้างหน้าสำหรับแรงควบคุม $u(k)$ ที่เวลา k การออกแบบการป้อนไปข้างหน้า ประกอบด้วยกฎการควบคุมในสมการที่ (2-47) คือวิธีการที่จะทำได้สำเร็จ เพราะว่าใช้สัญญาณ รบกวนก่อนเวลา k เท่านั้น จากสมการ (2-47) การควบคุม $u(k)$ ที่เวลา k คือ

$$\begin{aligned} u(k) &= (\text{the first } r \text{ rows of } F_c') v_p(k-p) \\ &= F_{ci}' v_p(k-p) \end{aligned} \quad (2-49)$$

โดยที่ F_{ci}' คือเมทริกซ์อัตราขยายการควบคุม
 r แถวแรกของสมการ (2-46) ก่อให้เกิดสมการดังนี้

$$\begin{aligned} u(k) &= (\text{the first } r \text{ rows of } [F_c' \quad F_{co}' \quad F_d']) \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_{cp}(k+q) \\ u_{d(q+p)}(k) \end{bmatrix} \\ &= [F_{ci}' \quad F_{coi}' \quad F_{di}'] \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_{cp}(k+q) \\ u_{d(q+p)}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-50)$$

เพื่อหาคำตอบสมการที่ (2-50) กำหนดให้รูปแบบตามเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$U(k) = [u_c(k) \quad u_c(k+1) \quad \cdots \quad u_c(k+N-p-q+1)]_{r_c \times (N-p-q+2)}$$

$$\begin{aligned}
 V_p(k-p) &= \begin{bmatrix} y(k-p) & y(k-p+1) & \cdots & y(k+N-2p-q+1) \\ u_c(k-p) & u_c(k-p+1) & \cdots & u_c(k+N-2p-q+1) \\ u_d(k-p) & u_d(k-p+1) & \cdots & u_d(k+N-2p-q+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k-1) & y(k) & \cdots & y(k+N-p-q) \\ u_c(k-1) & u_c(k) & \cdots & u_c(k+N-p-q) \\ u_d(k-1) & u_d(k) & \cdots & u_d(k+N-p-q) \end{bmatrix}_{p(r_c+r_d+m) \times (N-p-q+2)} \\
 V_{cp}(k+q) &= \begin{bmatrix} y(k+q) & y(k+q+1) & \cdots & y(k+N-p+1) \\ u_c(k+q) & u_c(k+q+1) & \cdots & u_c(k+N-p+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k+q+p-1) & y(k+q+p) & \cdots & y(k+N) \\ u_c(k+q+p-1) & u_c(k+q+p) & \cdots & u_c(k+N) \end{bmatrix}_{p(r_c+m) \times (N-p-q+2)} \\
 U_{d(q+p)}(k) &= \begin{bmatrix} u_d(k) & u_d(k+1) & \cdots & u_d(k+N-p-q+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_d(k+q+p-1) & u_d(k+q+p) & \cdots & u_d(k+N) \end{bmatrix} \\
 &\quad (2-51)
 \end{aligned}$$

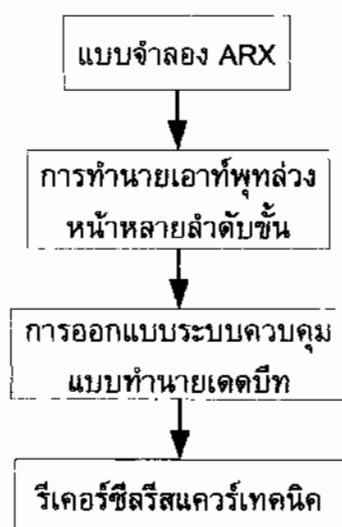
เหมือนกันกับสมการที่ (2-32) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} F'_{cl} & F'_{col} & F'_{dl} \end{bmatrix} = U(k) \begin{bmatrix} V_p(k-p) \\ V_{cp}(k+q) \\ U_{d(q+p)}(k) \end{bmatrix}^* \quad (2-52)$$

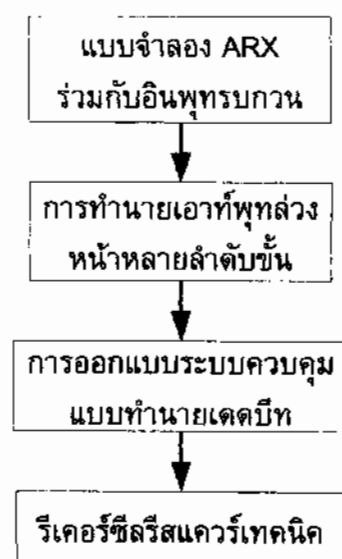
โดยที่ * หมายถึง การแปลงผกผันเสมือน (Pseudo-Inverse)

สมการ (2-51) $U_{d(q+p)}(k)$ มีขนาดเป็น $(q+p) \times (N-p-q+2)$ และสมการ (2-52) สามารถคำนวณด้วยเทคนิคเรย์ลีสแควร์จากหัวข้อ 2.5

จากทฤษฎีที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะถูกนำไปใช้ในบทที่ 4 ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเดตปีทจะถูกใช้ในการประยุกต์เพื่อลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระแบ่งการพิจารณาการควบคุมการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระออกเป็นสองกรณีคือการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระและการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับดังแสดงขั้นตอนในการคำนวณสัญญาณควบคุมในภาพด้านล่างนี้



ภาพที่ 2-1 แสดงการคำนวณการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระ



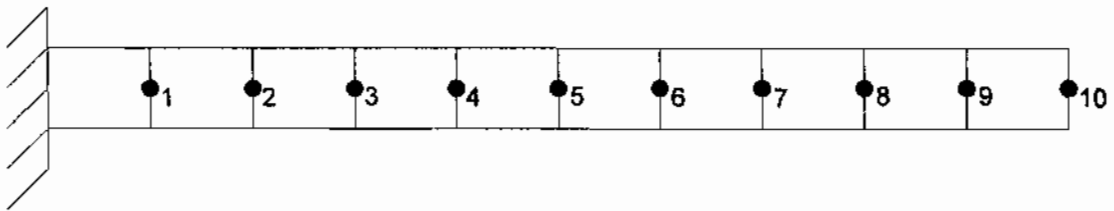
ภาพที่ 2-2 แสดงการคำนวณการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับ

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการทำวิจัยเริ่มจากขั้นตอนแรกคือการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ขั้นตอนที่สองคือการคำนวณเชิงตัวเลขระบบควบคุมแบบทำนายเดคปีทด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ขั้นตอนที่สามคือการคำนวณเชิงตัวเลขระบบควบคุมแบบทำนายเดคปีทด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบ เพื่อลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ขั้นตอนที่สี่ การทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดคปีทในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ขั้นตอนสุดท้ายคือทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดคปีทในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบ

3.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานปลายอิสระ



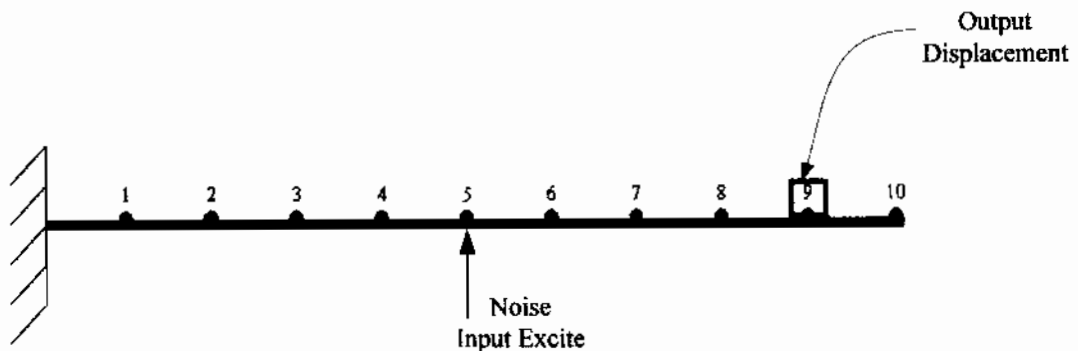
ภาพที่ 3-1 แสดงลักษณะการรองรับและการแบ่งเอลิเมนต์ของคานปลายอิสระ

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของคานอลูมิเนียม

คุณสมบัติของคานอลูมิเนียม	
ความหนาแน่น , ρ	2710 kg/m^3
ยังโมดูลัส , E	$70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
ความยาว , L	0.3 m
ความหนา , h	0.003 m
ความกว้าง , b	0.0254 m

เขียนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้เมทริกซ์มวลและเมทริกซ์ความแข็งเกร็งของคานจากภาคผนวก ก ส่วนเมทริกซ์ความหน่วงเป็นค่าอัตราส่วนของเมทริกซ์มวล ซึ่งมีการแบ่งคานออกเป็น 10 เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองโดยการกระตุ้นคานด้วยแรงอิมพัลส์ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้สร้างขึ้น หลังจากเปรียบเทียบจนมั่นใจแล้วว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกต้องแล้วจึงหาการประจักษ์การสั่นสะเทือนจากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น

3.2 การคำนวณเชิงตัวเลขระบบควบคุมแบบทำนายเคเบิ้ลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อลดการสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระ



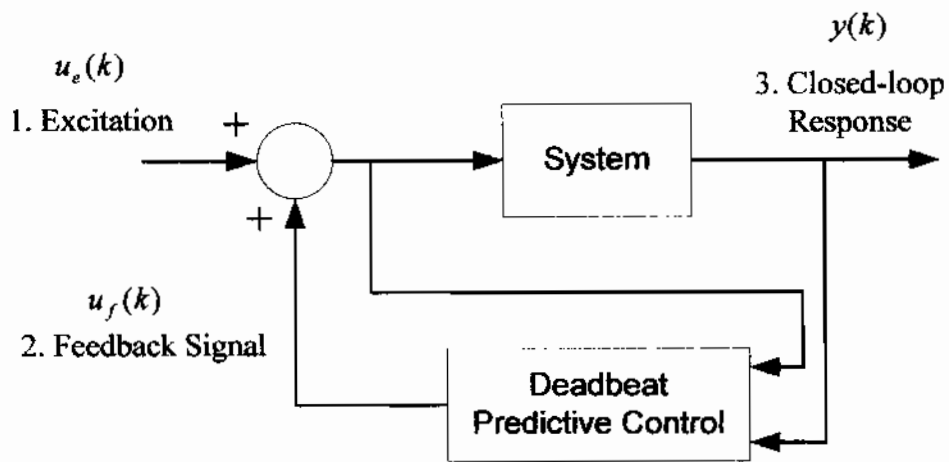
ภาพที่ 3-2 แสดงตำแหน่งอินพุตและเอาต์พุตบนคานปลายอิสระ

3.2.1 สร้างแบบจำลองสเตท-สเปซ ระบบเวลาเต็มหน่วย (Discrete-time State-Space) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานปลายอิสระที่ 10 เอลิเมนต์ กำหนดให้อินพุตกระตุ้นระบบเป็นจำนวนแรนดอมด้วยอัตราการสุ่มข้อมูลที่ 2.5kHz ($\Delta t = 0.0004 \text{ sec}$) จำนวนข้อมูล 2,000 จุดข้อมูล กระทำที่โหนด 5 และวัดเอาต์พุตเป็นระยะขจัดที่โหนด 9 ตามภาพที่ 3-2

3.2.2 สร้างเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ด้วยสมการที่ (2-30) จากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองสเตท-สเปซตามความสัมพันธ์ของจำนวนข้อมูล (N) ออกเตอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) จำนวนข้อมูลต้องเลือกให้มากพอที่จะสร้างเมทริกซ์ข้อมูลแทนระบบได้ การเลือกจำนวนข้อมูลมากก็สามารถสร้างเมทริกซ์ข้อมูลแทนระบบได้ถูกต้องมากแต่ก็มีผลเสียตามมาคือจะทำให้เมทริกซ์ข้อมูลมีขนาดใหญ่ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ การคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จะใช้เวลาคำนวณมากขึ้นในการคำนวณเชิงตัวเลขในที่นี้จะเลือกจำนวนข้อมูล 2,000 จุดข้อมูล ส่วนค่าออกเตอร์แบบจำลอง ARX (p) จะมีค่าเท่ากับออกเตอร์ของระบบ ซึ่งในความเป็นจริงเราจะไม่รู้ว่าจะมีออกเตอร์เป็นเท่าไร ฉะนั้นจะหาค่าโดยการสุ่มค่าไปเรื่อยๆจนกว่าระบบจะควบคุมได้ ส่วนค่าขอบเขตการ

ควบคุมจะเลือกค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าออเดอร์แบบจำลอง ARX เสมอแต่ค่าขอบเขตการควบคุมที่เลือกไม่ควรทำให้อุปกรณ์ควบคุมระบบ (Actuator) เกิดความเสียหายซึ่งการเลือกค่าขอบเขตการควบคุมที่มากขึ้นก็จะทำให้ต้องใช้เวลาในการควบคุมมากขึ้น

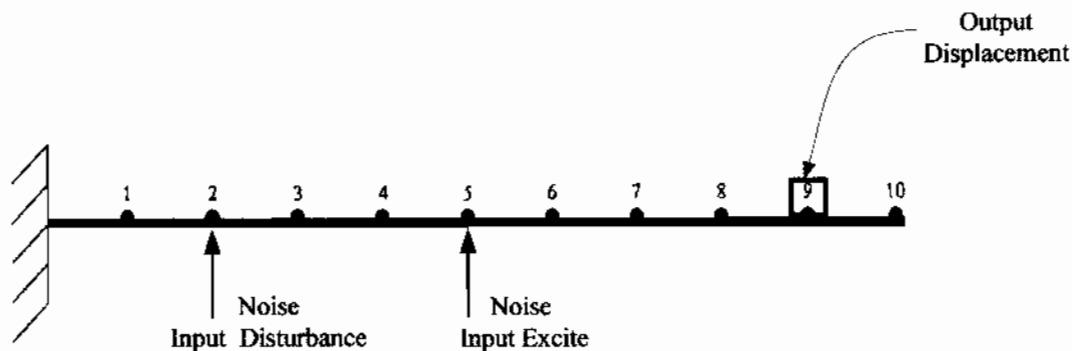
3.2.3 คำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จากเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ด้วยเทคนิครีเคอร์ซีฟลีสแควร์ (Recursive Least Square Technique) จากสมการที่ (2-35) - (2-38) และกำหนดค่าเริ่มต้น $P_p(0)$ จากสมการที่ (2-34) ด้วยการทำแบทริสแควร์ข้อมูลจำนวน 200 จุดข้อมูลแรก ส่วน $\hat{F}(1)$ กำหนดค่าเริ่มต้นเป็น $0_{1 \times 4p}$



ภาพที่ 3-3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมระบบ

3.2.4 การควบคุมการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระจากภาพที่ 3-2 กำหนดให้ระบบสั่นสะเทือนแบบอิสระโดยกระตุ้นระบบในช่วงเวลา 0.04 วินาทีต่อจากนั้นนำสัญญาณกระตุ้นระบบออกแล้วปล่อยให้ระบบหยุดนิ่งด้วยค่าความหน่วงของคานเอง ในช่วงเวลาก่อนที่ระบบจะหยุดนิ่งด้วยค่าความหน่วงของคานเองต้องการควบคุมให้ระบบหยุดนิ่งภายใต้เวลาที่กำหนดด้วยการควบคุมแบบทำนายเดดบิตโดยป้อนสัญญาณควบคุมที่ได้จากกฎการควบคุมในสมการที่ (2-28) ให้กับคานปลายอิสระที่โหนด 5 ที่เวลา 0.04 วินาทีหลังจากนำสัญญาณกระตุ้นระบบออก เพื่อลดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่โหนด 9 ให้ลดต่ำลงภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่ต้องการ แสดงการควบคุมระบบดังภาพที่ 3-3

3.3 การคำนวณเชิงตัวเลขระบบควบคุมแบบทำนายเคคบีทด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบเพื่อลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลาย อิสระ

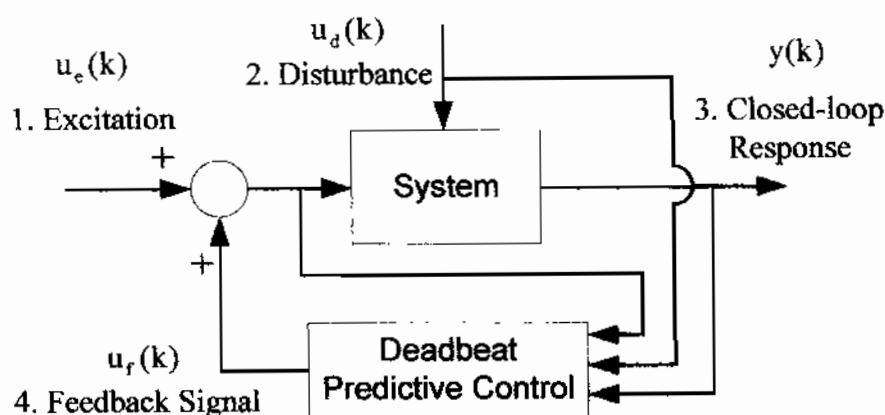


ภาพที่ 3-4 แสดงตำแหน่งอินพุทกระตุ้น อินพุทรบกวนและเอาต์พุตบนคานปลายอิสระ

3.3.1 สร้างแบบจำลองสเตท-สเปซระบบเวลาเต็มหน่วย (Discrete-time State-Space) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานปลายอิสระที่ 10 เอลิเมนต์ กำหนดให้อินพุทกระตุ้นระบบเป็นจำนวนแรนดอม (Random Number) ด้วยอัตราการสุ่มข้อมูลที่ 2.5 kHz ($\Delta t = 0.0004 \text{ sec}$) จำนวนข้อมูล 2,000 จุดข้อมูล กระทำที่โหนด 5 และสัญญาณอินพุทรบกวนเป็นจำนวนแรนดอม (Random Number) ที่อัตราการสุ่ม 2.5 kHz จำนวนข้อมูล 2,000 จุดข้อมูลกระทำที่โหนด 2 วัดเอาต์พุตเป็นระยะจัดที่โหนด 9 ตามภาพที่ 3-4

3.3.2 สร้างเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ด้วยสมการที่ (2-51) จากข้อมูลอินพุทกระตุ้นระบบ ข้อมูลสัญญาณอินพุทรบกวนที่กระทำกับระบบและเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองสเตท-สเปซตามความสัมพันธ์ของจำนวนข้อมูล (N) ออเดิร์ฟแบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ซึ่งตัวแปรทั้งสามเลือกค่าตามการพิจารณาเหมือนกับข้อ (3.2.2) ในข้างต้น

3.3.3 คำนวณหาอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จากเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ในหัวข้อ 3.3.2 ด้วยเทคนิครีเคอร์ซีฟลีสแควร์ (Recursive Least Square Technique) จากสมการที่ (2-35)-(2-38) และกำหนดค่าเริ่มต้น $P_p(0)$ จากสมการที่ (2-34) ด้วยการทำแบทรีสแควร์ข้อมูลจำนวน 200 จุดข้อมูลแรก ส่วน $\hat{F}(1)$ กำหนดค่าเริ่มต้นเป็น $0_{1 \times 4p}$



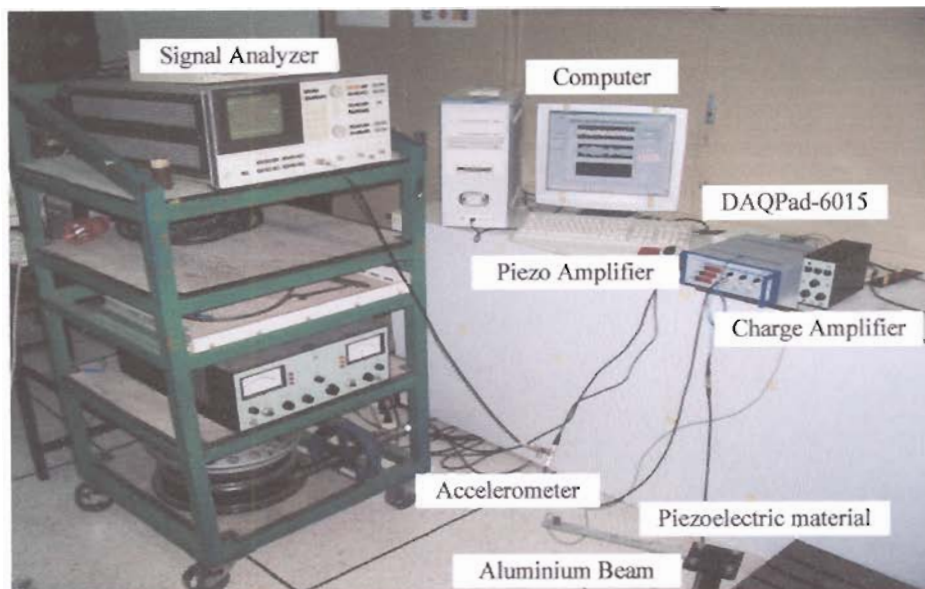
ภาพที่ 3-5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมระบบเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวน

3.3.4 การควบคุมการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระจากภาพที่ 3-4 กำหนดให้มีการกระตุ้นระบบในช่วงเวลา 0.04 วินาที ในช่วงเวลาเดียวกันก็มีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบด้วย หลังจากเวลา 0.04 วินาทีก็เอาสัญญาณกระตุ้นระบบออกและปล่อยให้สัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบต่อไป หลังจากเอาสัญญาณกระตุ้นระบบออกก็ป้อนสัญญาณควบคุมแทนที่ตำแหน่งเดิมจากการออกแบบระบบควบคุมจากข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวนและเอาที่พุทด้วยกฎการควบคุมในสมการที่ (2-49) คือการควบคุมแบบทำนายเดดบิตเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบ เพื่อควบคุมการลดการสั่นสะเทือนโดยเริ่มกระทำการควบคุมที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยการป้อนสัญญาณควบคุมให้กับคานปลายอิสระที่โหนด 5 และปล่อยให้สัญญาณอินพุทรบกวนกระทำที่โหนด 2 เพื่อลดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่โหนด 9 ให้ลดต่ำลง แสดงระบบการควบคุมเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนดังภาพที่ 3-5

3.4 การทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ

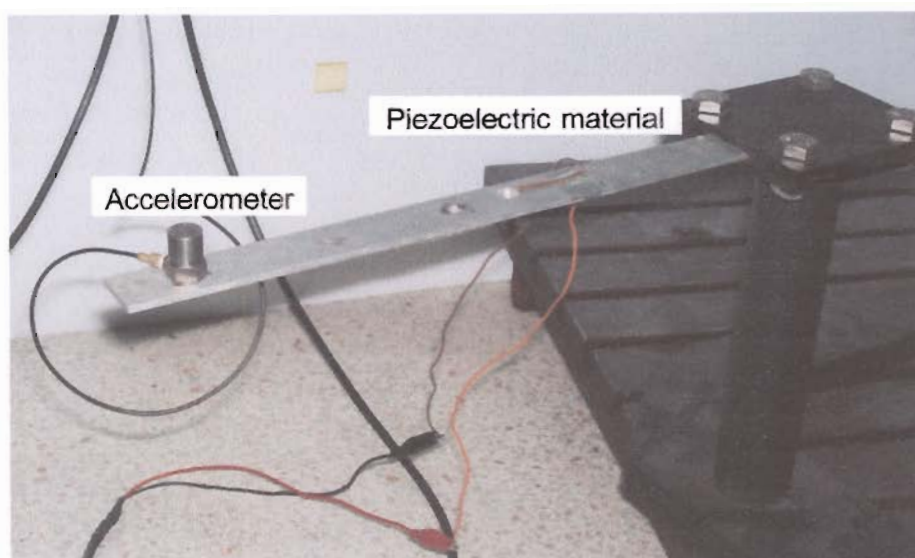
ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตนี้สามารถทำงานแบบปรับตัวเองได้หรือที่เรียกว่าตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตปรับตัวเองได้ (Adaptive Deadbeat Predictive Control) โดยนำหลักการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์มารวมกับตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิต การทำงานเมื่อระบบเปลี่ยนไปตามเวลาข้อมูลอินพุทและเอาที่พุทก็จะเปลี่ยนแปลงไปทำให้เมทริกซ์ข้อมูลที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยและใช้เทคนิครีเคอร์ซีฟลีทส์แควร์ (Recursive Least Square) ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมที่อัปเดตทุกๆเวลา แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ออกแบบระบบควบคุมให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์ได้เนื่องจากมีปัญหาเรื่องชุดรับส่งข้อมูลและคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานร่วมกันเพื่อคำนวณสัญญาณควบคุมได้ทันเวลาจึงต้องพิจารณาตัวควบคุมให้เป็นแบบออฟไลน์คือแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จากข้อมูลอินพุตที่ป้อนให้กับคานอลูมิเนียมปลายอิสระและข้อมูลเอาต์พุตที่วัดได้จากคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



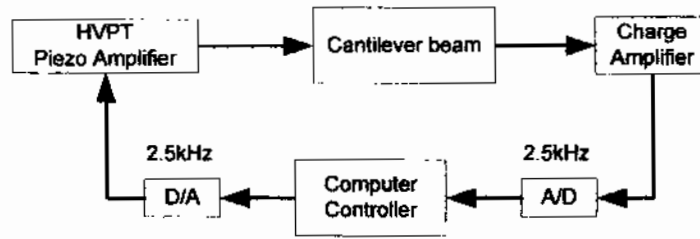
ภาพที่ 3-6 การติดตั้งชุดทดลองหาค่าอัตราขยายการควบคุม

ภาพที่ 3-6 แสดงการติดตั้งชุดทดลองเพื่อหาค่าอัตราขยายการควบคุมซึ่งมีการทำงานร่วมกันโดยเริ่มจากใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 2Vpk และช่วงความถี่ 0-500 Hz ป้อนให้กับเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (HVPT Piezo Amplifier) เพื่อนำไปกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้เขยื้อนคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 และในเวลาเดียวกันก็วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่โหนด 9 เนื่องจากการเขยื้อนด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่โหนด 5 นำสัญญาณที่วัดได้จากตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ไปขยายสัญญาณด้วยตัวขยายสัญญาณแบบประจุ (Charge Amplifier) ด้วยค่าอัตราขยาย 3.61 mV/Unit หลังจากนั้นก็นำสัญญาณอินพุตระบบที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) และสัญญาณเอาต์พุตระบบที่ได้จากตัวขยายสัญญาณแบบประจุ (Charge Amplifier) ป้อนให้กับอุปกรณ์รับส่งข้อมูล (DAQPad-6015) เพื่อนำไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมและเก็บข้อมูลเป็น file.txt เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบตัวควบคุมต่อไป



ภาพที่ 3-9 การติดตั้งคานอลูมิเนียมในการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

การทดสอบตัวควบคุมในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ เริ่มต้นโดยการพิจารณาคานอลูมิเนียมปลายอิสระให้มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระจากภาพที่ 3-6 ใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 2Vpk และช่วงความถี่ 0-500 Hz ป้อนให้กับเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (HVPT Piezo Amplifier) เพื่อนำไปกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ให้เขย่าคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 ในช่วงเวลาหนึ่งและปล่อยให้คานหยุดสั่นด้วยค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเอง ซึ่งวัดได้จากตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่โหนด 9 และเก็บข้อมูลเป็น file.txt เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงกับข้อมูลหลังจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเด็ดปัท ภาพที่ 3-8 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเด็ดปัทกับการสั่นสะเทือนแบบอิสระ เริ่มต้นโดยใช้ตัวควบคุมส่งสัญญาณอินพุตรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) ที่เป็นข้อมูลชุดเดียวกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณในตอนต้นไปกระตุ้นคานปลายอิสระที่โหนด 5 และวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่โหนด 9 เพื่อนำสัญญาณข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตมาทำนายสัญญาณควบคุมแล้วป้อนให้กับคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 หลังจากหยุดการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระ เพื่อลดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่โหนด 9 ให้ลดต่ำลงภายใต้ขอบเขตที่ต้องการก่อนการหยุดสั่นสะเทือนด้วยค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเอง ภาพที่ 3-9 แสดงการติดตั้งคานอลูมิเนียมปลายอิสระในการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระโดยติดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ที่โหนด 5 และตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่โหนด 9



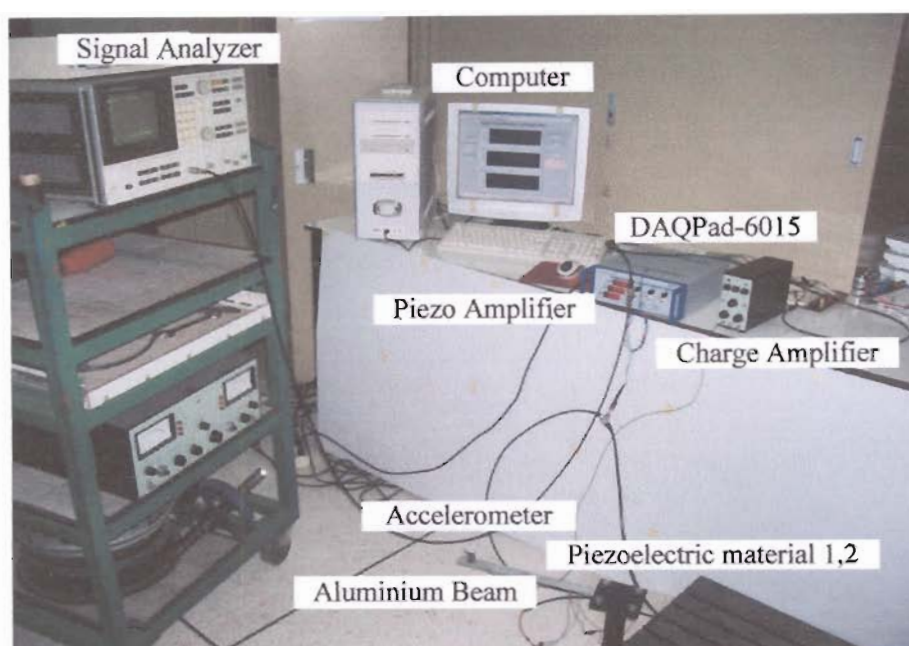
ภาพที่ 3-10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมการลดการสั่นสะเทือน

ภาพที่ 3-10 แสดงการเชื่อมต่อการติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมในการลดสัญญาณการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระจากการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่เกิดจากการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ในช่วงเวลาหนึ่งให้ลดต่ำลงภายใต้ขอบเขตที่ต้องการก่อนการหยุดสั่นสะเทือนด้วยค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเอง

3.5 การทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตในการลดการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบ

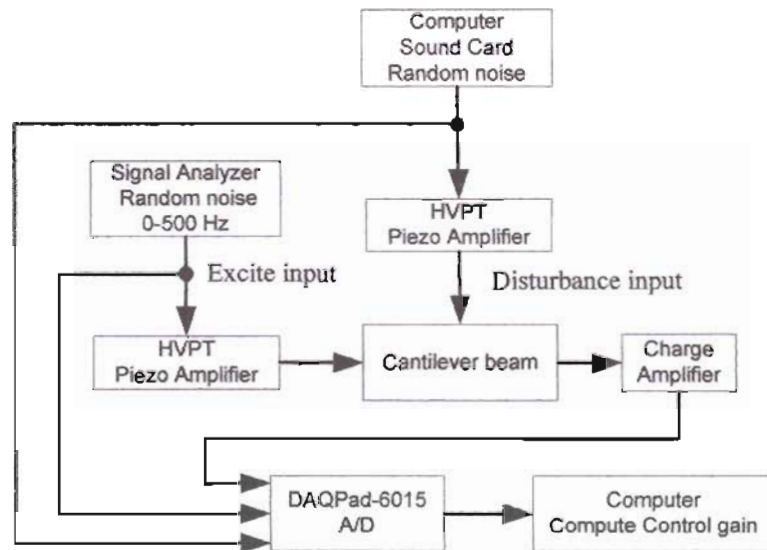
ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบมีการทำงานในลักษณะปรับตัวเองได้เหมือนกับตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิตปรับตัวเองได้ (Adaptive Deadbeat Predictive Control) โดยมีการเพิ่มสัญญาณรบกวนอินพุทเข้าไปในเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) การทำงานเมื่อระบบเปลี่ยนไปตามเวลาข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวนและเอาต์พุท ก็จะเปลี่ยนแปลงไปทำให้เมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยและใช้เทคนิครีเคอร์ซีฟลีทสแควร์ (Recursive Least Square) ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมที่อัปเดตทุกๆเวลา ซึ่งการควบคุมในกรณีนี้มีข้อเสียคือสัญญาณอินพุทรบกวนเราต้องรู้หรือวัดได้ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ออกแบบระบบควบคุมให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์ได้เนื่องจากมีปัญหาเรื่องชุดรับส่งข้อมูลและคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานร่วมกันเพื่อคำนวณสัญญาณควบคุมได้ทันเวลาจึงต้องพิจารณาการควบคุมให้เป็นแบบออฟไลน์คือแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 การทดสอบหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จากข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวนที่ป้อนให้กับคานอลูมิเนียมปลายอิสระและข้อมูลเอาต์พุทที่วัดได้จากคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



ภาพที่ 3-11 การติดตั้งชุดทดลองหาค่าอัตราขยายการควบคุมเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวน

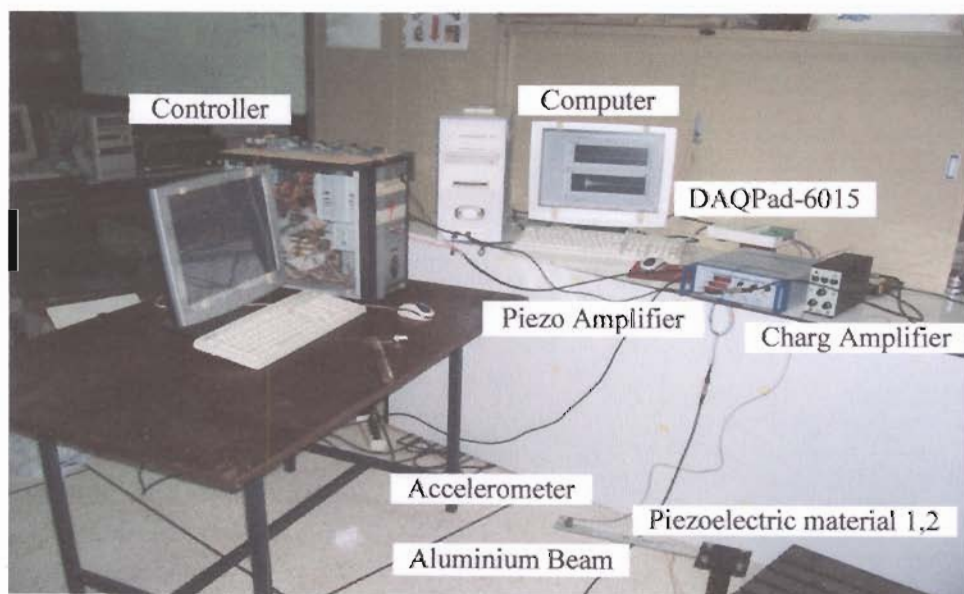
ภาพที่ 3-11 แสดงการติดตั้งชุดทดลองหาค่าอัตราขยายการควบคุมกรณีมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบซึ่งมีการทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 2Vpk และช่วงความถี่ 0-500 Hz ป้อนให้กับเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (HVPT Piezo Amplifier) เพื่อนำไปกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้เขย่าคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) ผ่านการ์ดการ์ด (Sound Card) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 1Vpk ด้วยอัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ป้อนให้กับเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (HVPT Piezo Amplifier) เพื่อนำไปกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้เขย่าคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 2 และในเวลาเดียวกันก็วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่โหนด 9 เนื่องจากการเขย่าด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ทั้งสองโหนด นำสัญญาณที่ได้จากตัวหยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ไปขยายสัญญาณด้วยตัวขยายสัญญาณแบบประจุ (Charge Amplifier) ด้วยค่าอัตราขยาย 100 mV/Unit หลังจากนั้นก็นำสัญญาณอินพุทระบบที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) สัญญาณอินพุทรบกวนระบบที่ได้จากการ์ดการ์ด (Sound Card) และสัญญาณเอาต์พุทระบบที่ได้จากตัวขยายสัญญาณแบบประจุ (Charge Amplifier) ป้อนให้กับอุปกรณ์รับส่งข้อมูล (DAQPad 6015) เพื่อนำไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมและเก็บข้อมูลเป็น file.txt เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมต่อไป



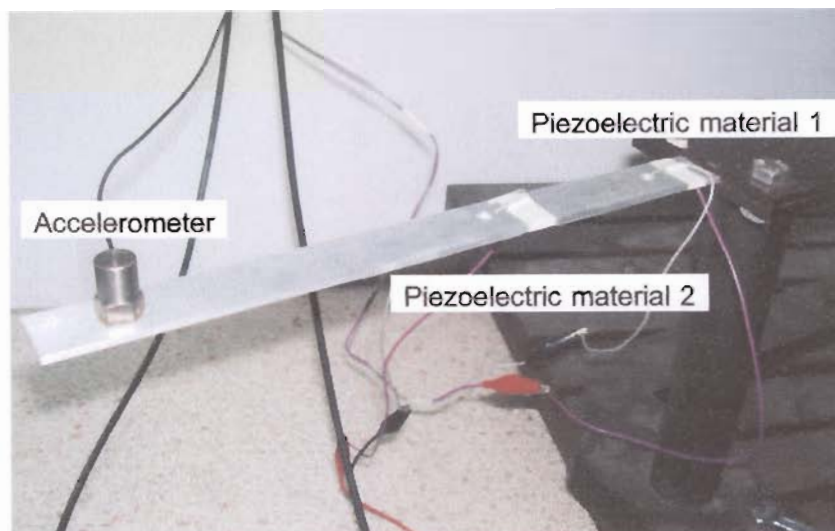
ภาพที่ 3-12 บล็อกไดอะแกรมการหาค่าอัตราขยายการควบคุมเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวน

ภาพที่ 3-12 แสดงการเชื่อมต่อชุดทดลองในการหาค่าอัตราขยายการควบคุมเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ซึ่งต่างจากภาพที่ 3-7 โดยการเพิ่มสัญญาณอินพุทรบกวนให้กับคานอลูมิเนียมปลายอิสระและเพิ่มสัญญาณอินพุทรบกวนเข้าบล็อกชุดรับส่งข้อมูล (DAQPad-6015) เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

3.5.2 การทดสอบตัวควบคุมในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบ

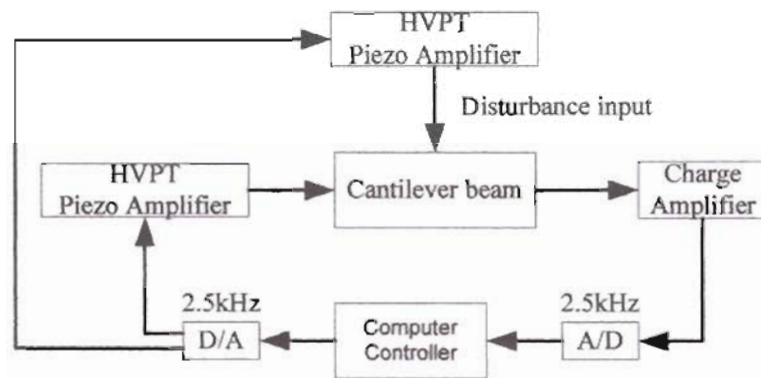


ภาพที่ 3-13 การติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมการสั่นสะเทือนเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวน



ภาพที่ 3-14 การติดตั้งคานอลูมิเนียมในการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับ

การทดสอบตัวควบคุมในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ เริ่มต้นโดยการพิจารณาคานอลูมิเนียมปลายอิสระให้มีการสั่นสะเทือนแบบบังคับจากภาพที่ 3-13 โดยใช้ตัวควบคุมส่งสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 1Vpk ด้วยอัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz เป็นข้อมูลอินพุตรบกวนให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตัวที่หนึ่ง (Piezoelectric Material 1) ที่โหนด 2 และสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 2Vpk ด้วยอัตราการสุ่มข้อมูล 2.5kHz เป็นข้อมูลอินพุตให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตัวที่สอง (Piezoelectric Material 2) ที่โหนด 5 ในเวลาเดียวกันก็วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่โหนด 9 ภาพที่ 3-13 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเดบิท์กับการสั่นสะเทือนแบบบังคับ เริ่มต้นโดยใช้ตัวควบคุมส่งสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) ที่เป็นข้อมูลชุดเดียวกับอินพุตรบกวนและอินพุตในข้างต้น เพื่อนำสัญญาณข้อมูลอินพุตรบกวน ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตมาทำนายสัญญาณควบคุมแล้วป้อนให้กับคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 หลังจากหยุดการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระ และคงการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 2 ไว้ เพื่อลดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่โหนด 9 ให้ลดต่ำลงตามต้องการ ภาพที่ 3-14 แสดงการติดตั้งคานอลูมิเนียมปลายอิสระในการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับโดยติดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตัวที่หนึ่ง (Piezoelectric Material 1) ที่โหนด 2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกตัวที่สอง (Piezoelectric Material 2) ที่โหนด 5 และตัวยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่โหนด 9



ภาพที่ 3-15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการลดการสั่นสะเทือนเมื่อมีสัญญาณรบกวนอินพุต

ภาพที่ 3-15 แสดงการเชื่อมต่อการติดตั้งชุดทดสอบการควบคุมในการลดสัญญาณการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระจากการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่เกิดจากการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ด้วยสัญญาณอินพุตรบกวนในระหว่างการควบคุมแบบทำนายเดบิตให้สัญญาณการสั่นสะเทือนลดต่ำลง

3.6 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

3.6.1 ตัวห้อยสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) จะมี 2 ตัวใช้ในการวัดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ตัวห้อยสัญญาณความเร่งจะทำหน้าที่เปลี่ยน ความเร่ง, ความเร็ว หรือระยะการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 3-16 ตัวห้อยสัญญาณความเร่ง

3.6.2 ตัวขยายสัญญาณแบบประจุ (Charge Amplifier) เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากตัวห้อยสัญญาณมีแรงดันไฟฟ้าต่ำดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ช่วยขยายสัญญาณและกรองสัญญาณรบกวน

ทั้ง เพื่อให้ได้สัญญาณที่บริสุทธิ์และตัวขยายสัญญาณยังทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่วัดได้จากตัว
 หึ่งสัญญาณที่ทางออกที่อยู่ในรูปความแรงให้กลายเป็นความเร็วหรือระยะทางได้อีกด้วย



ภาพที่ 3-17 ตัวขยายสัญญาณแบบประจุ

3.6.3 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) ภายในเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะ
 ประกอบด้วยตัวกรองสัญญาณ A/D และ FFT นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นเครื่องสร้างความถี่
 (Generator) สร้างสัญญาณรูปต่างๆและสามารถปรับความถี่ได้ตามต้องการเพื่อส่งสัญญาณไป
 เช้าขึ้นงาน



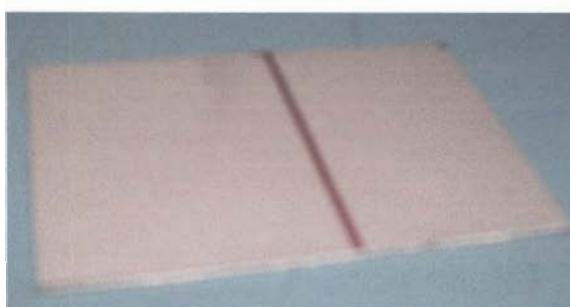
ภาพที่ 3-18 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ

3.6.4 อุปกรณ์รับส่งข้อมูล (DAQPad-6015) ใช้เป็นตัวรับข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตจากตัว
 หึ่งสัญญาณ (Transducer) ผ่าน A/D และ ส่งสัญญาณควบคุมไปสั่งให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก
 (Piezoelectric Material) กระตุ้นระบบผ่าน D/A



ภาพที่ 3-19 เครื่องรับส่งข้อมูล

3.6.5 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ใช้เป็นตัวกระตุ้นโครงสร้างด้วยแรงหรือโมเมนต์ ภายใต้หลักการของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล



ภาพที่ 3-20 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

3.6.6 เครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (HVPT Piezo Amplifier) ใช้เป็นตัวขับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



ภาพที่ 3-21 เครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง

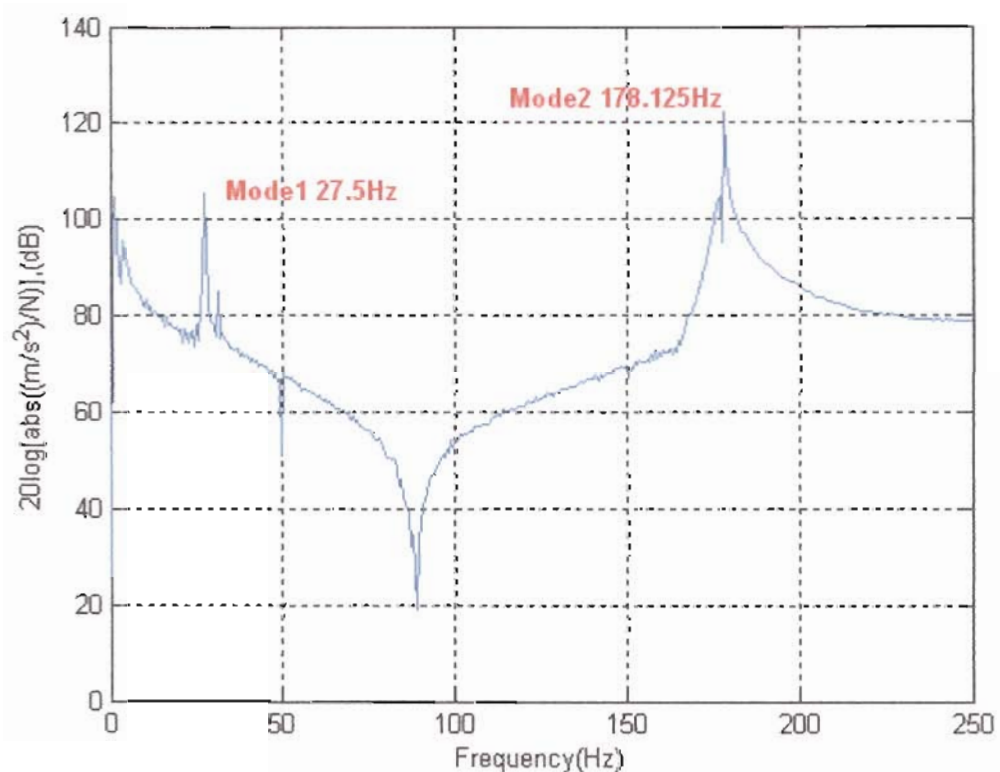
ก่อนที่จะทำการทดลองนั้นจะสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ของคานอลูมิเนียมปลายอิสระขึ้นมาเพื่อหาการกระจายการสั่นสะเทือนและความถี่ธรรมชาติ จากนั้นนำแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณการควบคุมแบบทำนายเด็ดปัทเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมกับหาออดเดอร์แบบจำลอง ARX ที่เหมาะสมกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระ โดยแบ่งการควบคุมการสั่นสะเทือนเป็นสองแบบคือการสั่นสะเทือนแบบอิสระและการสั่นสะเทือนแบบบังคับ ส่วนการทดลองจะควบคุมการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียมปลายอิสระกับการสั่นสะเทือนแบบอิสระโดยการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระในช่วงเวลาสั้นๆ และเปลี่ยนการกระตุ้นคานเป็นการควบคุมคานในช่วงเวลาต่อมาและการทดลองการควบคุมการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียมปลายอิสระกับการสั่นสะเทือนแบบบังคับโดยการกระตุ้นคานแบบรบกวนในช่วงเวลาที่มีการควบคุมคานอลูมิเนียมปลายอิสระ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติและแสดงรูปร่างการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระ

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานอลูมิเนียมปลายอิสระโดยแบ่งคานออกเป็น 10 เอลิเมนต์เพื่อศึกษาความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือน เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานด้วย MATLAB จึงได้นำความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งผลที่ได้ดังตารางที่ 4-1

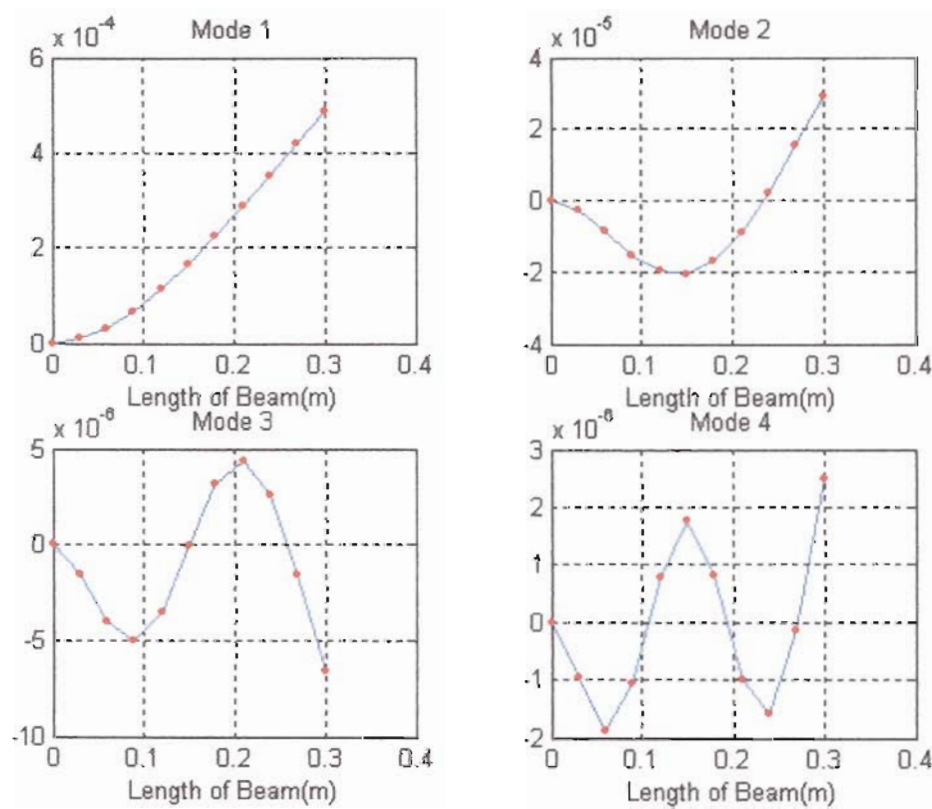


ภาพที่ 4-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่จากการทดลองคานปลายอิสระ

ตารางที่ 4-1 ความถี่ธรรมชาติของคานอลูมิเนียมปลายอิสระ

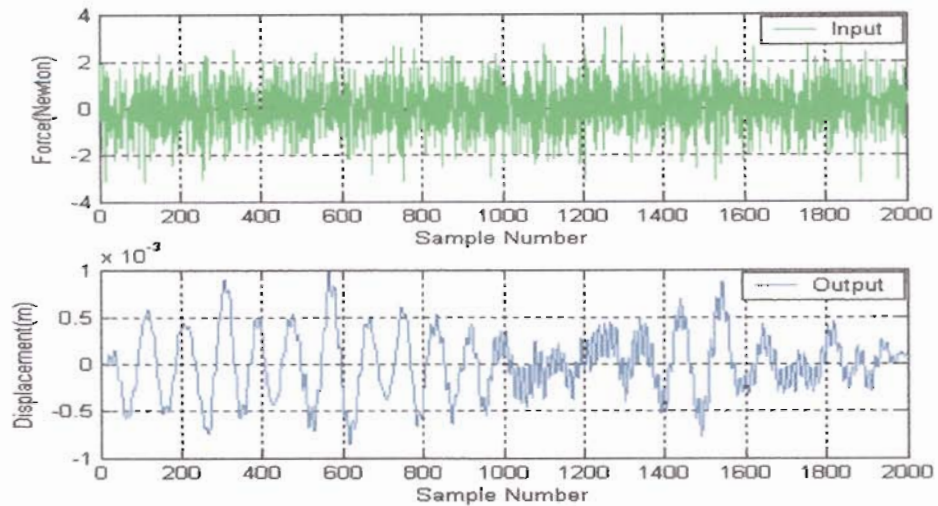
โหมดที่	MATLAB (Hz)	การทดลอง (Hz)
1	27.36	27.50
2	171.51	178.12

ความถี่ธรรมชาติที่แสดงในตารางที่ 4-1 จะเห็นว่าโหมดที่หนึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่า โหมดที่สองซึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้นก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้น อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานอลูมิเนียมปลายอิสระมีความถูกต้องเชื่อถือได้จากนั้นจึงทำการหารูปร่างการสั่นสะเทือนตามแนวขวางของคานจากค่าไอเกนแวกเตอร์ของเมทริกซ์ระบบ ในที่นี้จะพิจารณาใน 4 โหมดแรกเป็นหลักเพื่อให้เห็นถึงรูปร่างการสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระที่เกิดขึ้น



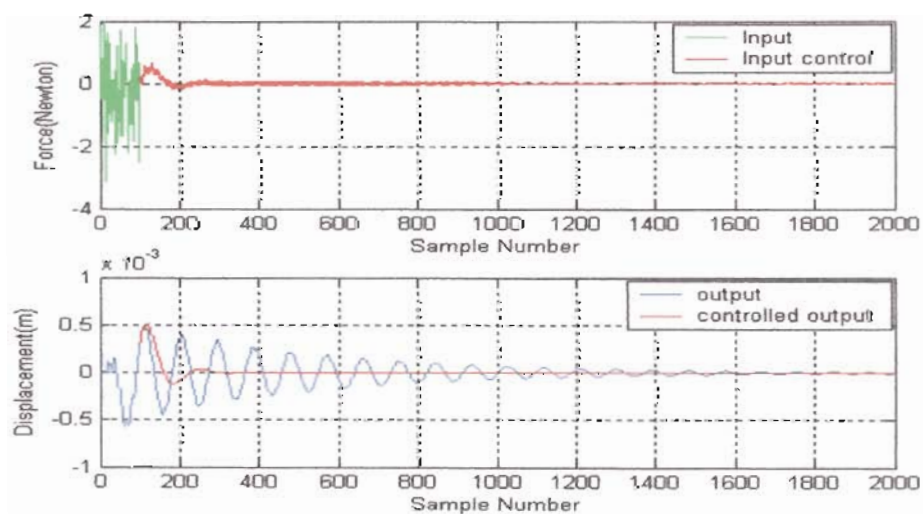
ภาพที่ 4-2 รูปร่างการสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระ

4.2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขควบคุมแบบทำนายเดคบีทในการลดการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม MATLAB



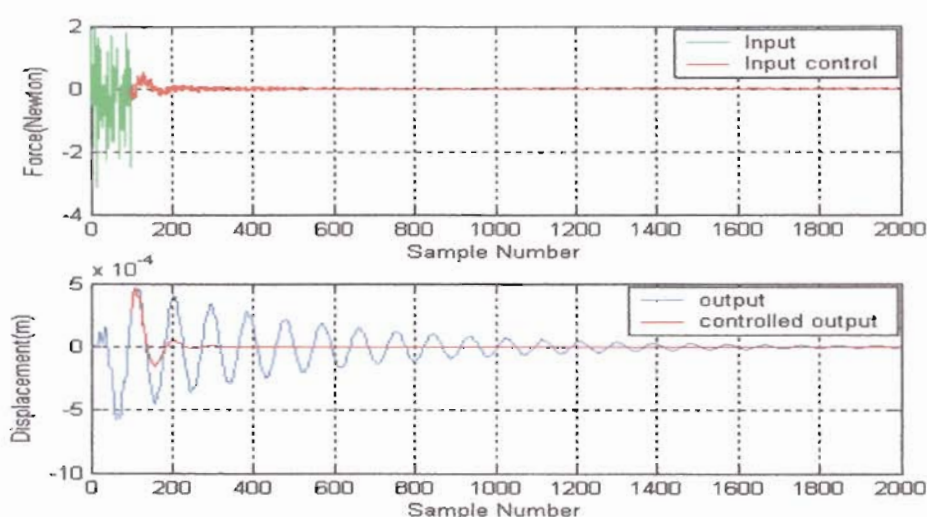
ภาพที่ 4-3 แสดงข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข

ภาพที่ 4-3 กราฟเส้นสีเขียวแสดงถึงข้อมูลอินพุตจำนวนแรนดอม (Random Number) ช่วง ± 2 Newton ที่ใช้กระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 ในช่วงเวลา 0.8 วินาที ที่อัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 2000 จุดข้อมูลและกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงข้อมูลเอาต์พุตระยะขจัดที่โหนด 9 ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยข้อมูลอินพุต



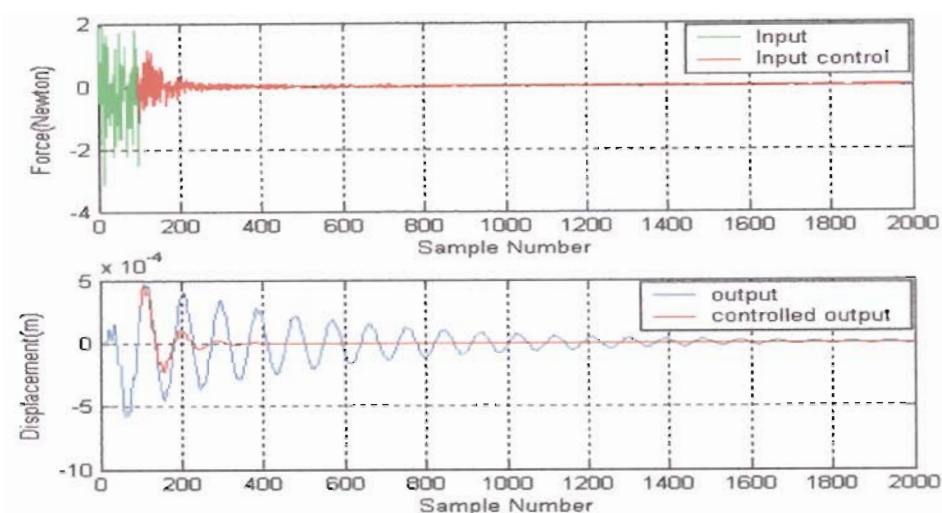
ภาพที่ 4-4 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=4$ และ $q=20$

ภาพที่ 4-4 กราฟเส้นสีเขียวคือข้อมูลที่ใช้กระตุ้นระบบก่อนการควบคุมในช่วงเวลา 0.04 วินาทีแรกด้วยจำนวนข้อมูล 100 จุดข้อมูล ทำให้เกิดเอิร์ทพุทในช่วงเวลาเดียวกันดังกราฟเส้นสีน้ำเงินด้านล่างในช่วงเวลา 0.04 วินาที ที่ข้อมูล 100 จุดข้อมูล หลังจากนั้นก็นำอินพุทที่กระตุ้นระบบออกทำให้กราฟเส้นสีน้ำเงินในรูปล่างหลังจาก 0.04 วินาทีลดลงด้วยค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเอง ต่อจากนั้นนำข้อมูลเอิร์ทพุทและอินพุทในช่วงเวลา 0.04 วินาทีแรกนี้ไปใช้ในการทำนายสัญญาณควบคุมร่วมกับค่าอัตราขยายการควบคุมที่คำนวณจากข้อมูลอินพุทและเอิร์ทพุทในภาพที่ 4-3 ด้วยค่าแบบจำลอง ARX ($p=4$) และค่าขอบเขตการควบคุม ($q=20$) ได้ดังกราฟเส้นสีแดงในรูปบนเป็นการเริ่มควบคุมระบบที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยสัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตการควบคุม (q) ที่กำหนดในที่นี้มีค่าเป็น 20 ลำดับขั้นเวลาทำให้สัญญาณการสั่นสะท้อนกราฟเส้นสีน้ำเงินในรูปด้านล่างมีขนาดลดลงดังกราฟเส้นสีแดงภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่กำหนดเป็น 20 ลำดับขั้นเวลาและทำให้สัญญาณการสั่นสะท้อนหลังจากขอบเขตการควบคุมเป็นศูนย์



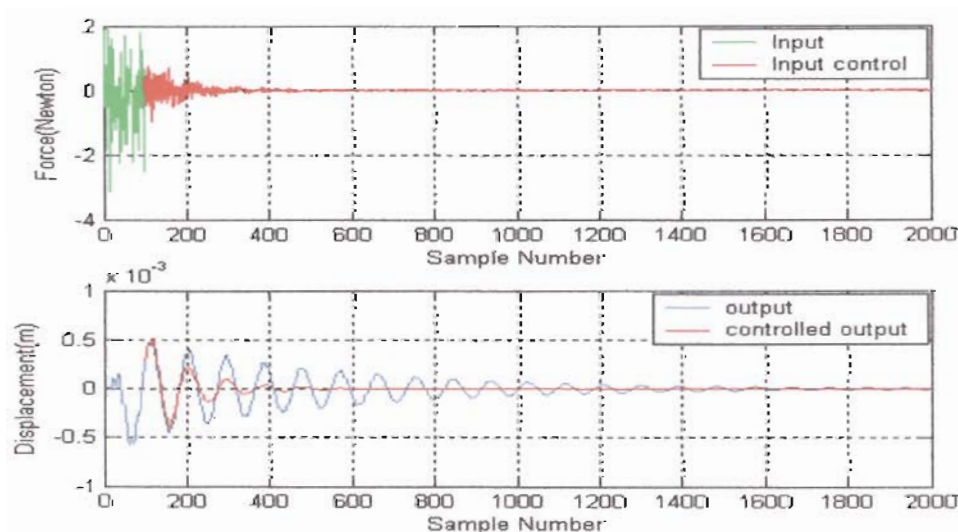
ภาพที่ 4-5 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=8$ และ $q=40$

ภาพที่ 4-5 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขโดยการเพิ่มค่าออร์เดอร์แบบจำลอง ARX ($p=8$) และขอบเขตการควบคุม ($q=40$) ซึ่งนำข้อมูลเอิร์ทพุทและอินพุทในช่วงเวลา 0.04 วินาทีแรกนี้ไปใช้ในการทำนายสัญญาณควบคุมร่วมกับค่าอัตราขยายการควบคุมที่คำนวณจากข้อมูลอินพุทและเอิร์ทพุทในภาพที่ 4-3 ด้วยค่าแบบจำลอง ARX ($p=8$) และค่าขอบเขตการควบคุม ($q=4$) ได้ดังกราฟเส้นสีแดงในรูปบนเป็นการเริ่มการควบคุมที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยสัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตการควบคุม ($q=40$) ทำให้สัญญาณการสั่นสะท้อนในช่วงการสั่นสะท้อนแบบอิสระในกราฟเส้นสีน้ำเงินลดต่ำลงได้ภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่กำหนดดังกราฟเส้นสีแดงคือ 40 ลำดับขั้นเวลาและทำให้การสั่นสะท้อนหลังขอบเขตการควบคุมเป็นศูนย์



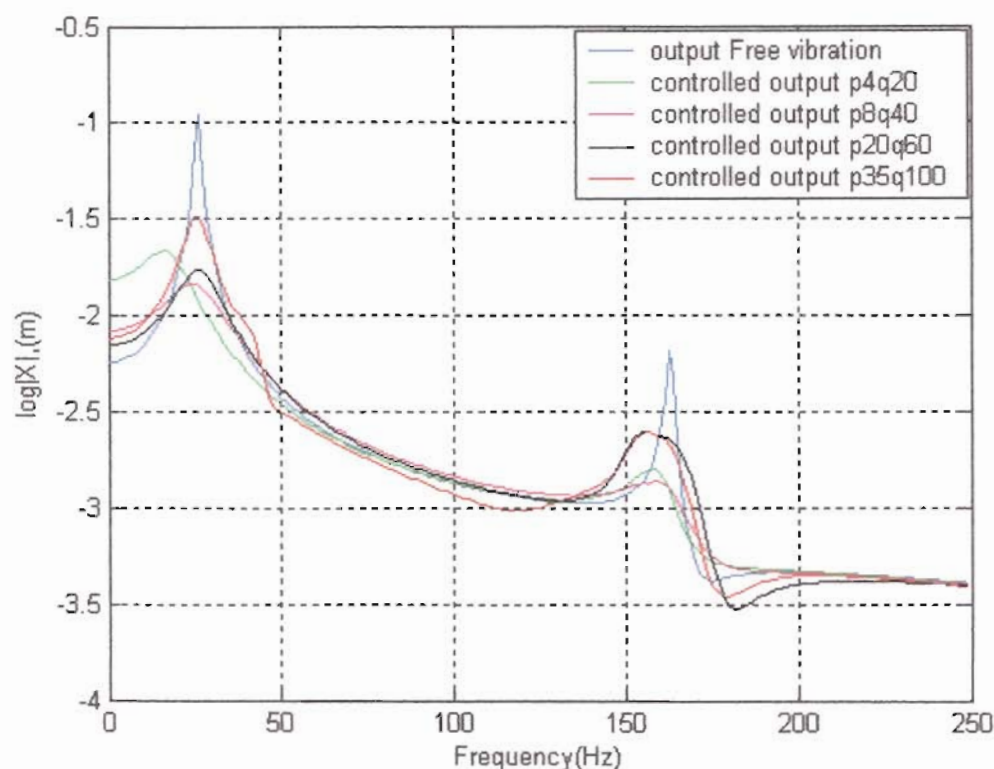
ภาพที่ 4-6 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=20$ และ $q=60$

ภาพที่ 4-6 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขโดยการเพิ่มค่าออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ซึ่งนำข้อมูลเอาต์พุตและอินพุตในช่วงเวลา 0.04 วินาทีแรกนี้ไปใช้ในการทำนายสัญญาณควบคุมร่วมกับค่าอัตราขยายการควบคุมที่คำนวณจากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตในภาพที่ 4-3 ด้วยค่าแบบจำลอง ARX ($p=20$) และค่าขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ได้ตั้งกราฟเส้นสีแดงในรูปบนเป็นการเริ่มการควบคุมที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยสัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนในช่วงการสั่นสะเทือนแบบอิสระในกราฟเส้นสีน้ำเงินลดต่ำลงได้ภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่กำหนดดังกราฟเส้นสีแดงคือ 60 ลำดับขั้นเวลาและทำให้การสั่นสะเทือนหลังขอบเขตการควบคุมเป็นศูนย์



ภาพที่ 4-7 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขที่ $p=35$ และ $q=100$

ภาพที่ 4-7 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขโดยการเพิ่มค่าออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=35$) และขอบเขตการควบคุม ($q=100$) ซึ่งนำข้อมูลเอาต์พุตและอินพุตในช่วงเวลา 0.04 วินาทีแรกนี้ไปใช้ในการทำนายสัญญาณควบคุมร่วมกับค่าอัตราขยายการควบคุมที่คำนวณจากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตในภาพที่ 4-3 ด้วยค่าแบบจำลอง ARX ($p=35$) และค่าขอบเขตการควบคุม ($q=100$) ได้ตั้งกราฟเส้นสีแดงในรูปบนเป็นการเริ่มการควบคุมที่เวลา 0.04 วินาทีด้วยสัญญาณควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตการควบคุม ($q=100$) ทำให้สัญญาณการสั่นสะท้อนในช่วงการสั่นสะท้อนแบบอิสระในกราฟเส้นสีน้ำเงินลดต่ำลงได้ภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่กำหนดตั้งกราฟเส้นสีแดงคือ 100 ลำดับขั้นเวลาและทำให้การสั่นสะท้อนหลังขอบเขตการควบคุมเป็นศูนย์



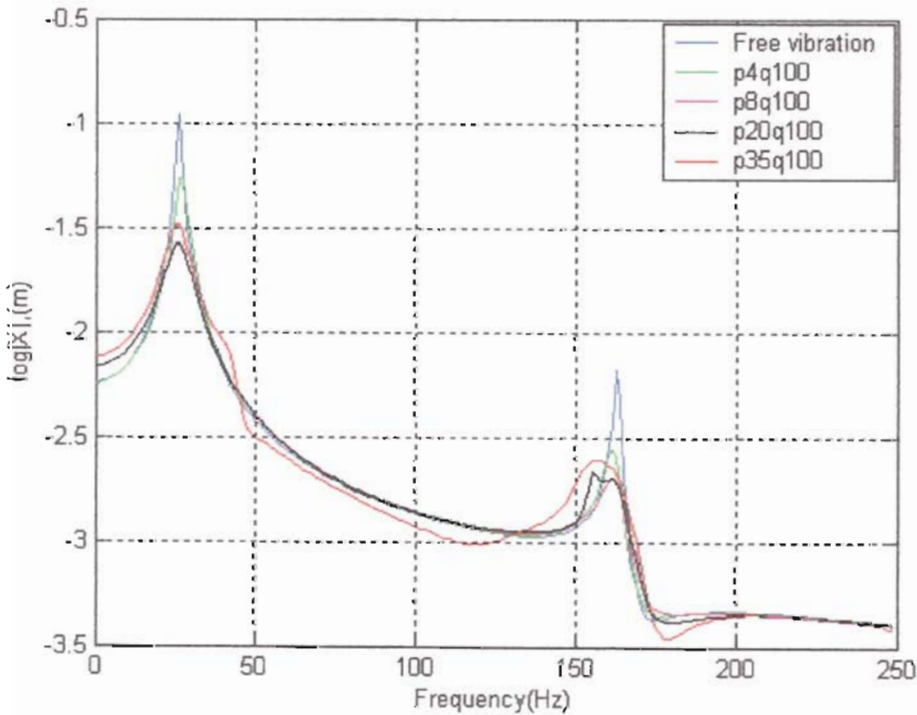
ภาพที่ 4-8 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมเชิงตัวเลขในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน

ภาพที่ 4-8 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่เพื่อดูสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่แตกต่างกัน ซึ่งสรุปการลดขนาดการสั่นสะท้อนจากการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยการควบคุมแบบทำนายเดบิตในสองโหมดความถี่ดังแสดงในตารางที่ 4-2 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4-2 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน

p and q	Amplitude โหมด 1			Amplitude โหมด 2		
	Free Vibrate	Control Vibrate	Difference Amplitude	Free Vibrate	Control Vibrate	Difference Amplitude
p=4,q=20	-0.96	-1.66	0.70	-2.18	-2.79	0.61
p=8,q=40	-0.96	-1.84	0.88	-2.18	-2.86	0.68
p=20,q=60	-0.96	-1.76	0.80	-2.18	-2.60	0.42
p=35,q=100	-0.96	-1.48	0.52	-2.18	-2.60	0.42

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการควบคุมการสั่นสะเทือนด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเดบิตที่สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ซึ่งมีขนาดการลดลงที่แตกต่างกันด้วยการกำหนดค่าขอบเขตการควบคุมถ้ากำหนดค่าขอบเขตการควบคุมน้อยจะสามารถลดการสั่นสะเทือนได้มากกว่าการกำหนดค่าขอบเขตการควบคุมมาก ซึ่งค่าขอบเขตการควบคุมที่เหมาะสมควรมากกว่าหรือเท่ากับออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) แต่ในทางปฏิบัติการเลือกค่าขอบเขตการควบคุมไม่ควรทำให้อุปกรณ์การทดลองเกิดความเสียหาย



ภาพที่ 4-9 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมเชิงตัวเลขในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม (q=100)

ภาพที่ 4-9 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่เพื่อเปรียบเทียบการควบคุมการสั่นสะเทือน ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขการควบคุมแบบทำนายเดบิตทีในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) โดยกำหนดให้ค่าขอบเขตการควบคุมคงที่ $q=100$ เพื่อหาออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่เหมาะสมกับระบบโดยพิจารณาการสั่นสะเทือนที่ลดลงในแต่ละออเดอร์ทั้งสองโหมดความถี่และมีการสรุปขนาดการสั่นสะเทือนที่ลดลงทั้งสองโหมดในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ดังตารางที่ 4-3 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม ($q=100$)

ARX model Order(p)	Amplitude โหมด 1			Amplitude โหมด 2		
	Free Vibration	Control Vibration	Difference Amplitude	Free Vibration	Control Vibration	Difference Amplitude
4	-0.96	-1.26	2.22	-2.18	-2.56	0.38
8	-0.96	-1.58	2.54	-2.18	-2.69	0.51
20	-0.96	-1.57	2.53	-2.18	-2.70	0.52
35	-0.96	-1.48	2.44	-2.18	-2.60	0.42

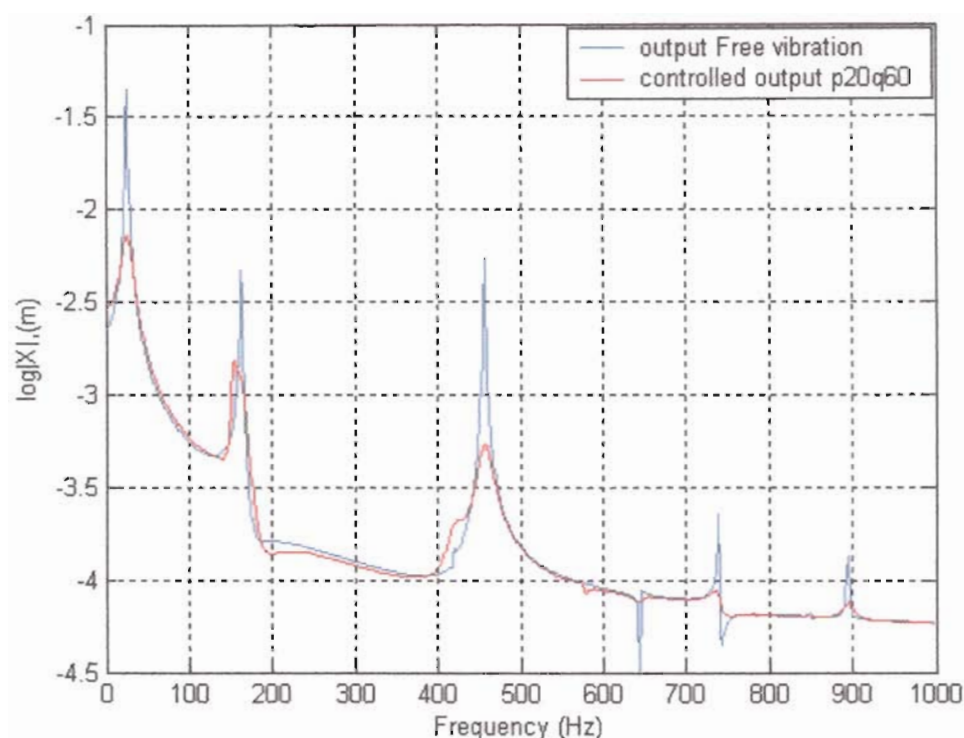
ตารางที่ 4-3 แสดงขนาดการสั่นสะเทือนที่ลดลงในแต่ละออเดอร์ ที่โหมดหนึ่งออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=8$) มีขนาดการลดการสั่นสะเทือนมากที่สุดคือขนาด 2.54 ส่วนโหมดสองออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) มีขนาดการลดการสั่นสะเทือนมากที่สุดคือขนาด 0.52 เมื่อดูการลดสั่นสะเทือนพร้อมกันทั้งสองโหมดความถี่จะเห็นว่าออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ในปริมาณที่มากกว่าออเดอร์อื่น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าออเดอร์ของแบบจำลอง ARX (p) ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเดบิตทีของคานอลูมิเนียมปลายอิสระมีค่าเป็น 20 ออเดอร์

ตารางที่ 4-4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขค่าความถี่ธรรมชาติก่อนและหลังการควบคุมการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX ที่ขอบเขตการควบคุม ($q=100$)

ARX model Order(p)	Frequency (Hz) โหมด 1			Frequency (Hz) โหมด 2		
	Free Vibration	Control Vibration	Difference Frequency	Free Vibration	Control Vibration	Difference Frequency
4	26.26	26.26	0	162.58	161.33	1.25
8	26.26	26.26	0	162.58	161.33	1.25
20	26.26	26.26	0	162.58	161.33	1.25
35	26.26	26.26	0	162.58	156.32	6.25

ตารางที่ 4-4 ค่าความถี่ธรรมชาติที่โหมดหนึ่งในแต่ละออเดิร์ฟแบบจำลอง ARX (p) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงในก่อนและหลังการควบคุม ส่วนโหมดสองค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละออเดิร์ฟแบบจำลอง ARX (p) มีค่าเปลี่ยนแปลง

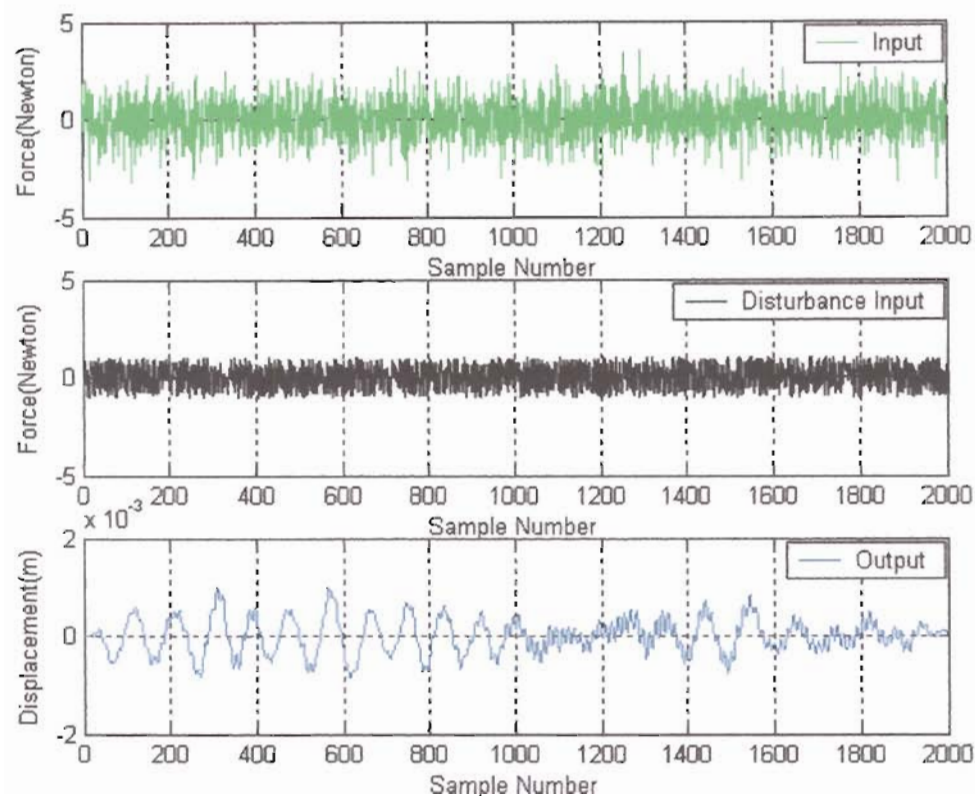
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบทำนายเดคบีทในการลดการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระกรณีการสั่นสะเทือนแบบอิสระโดยการเพิ่มช่วงความถี่ให้ครอบคลุมการสั่นสะเทือนใน 4 โหมดการสั่นสะเทือนแสดงดังภาพด้านล่างนี้



ภาพที่ 4-10 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมแบบทำนายเดคบีทหลายโหมด

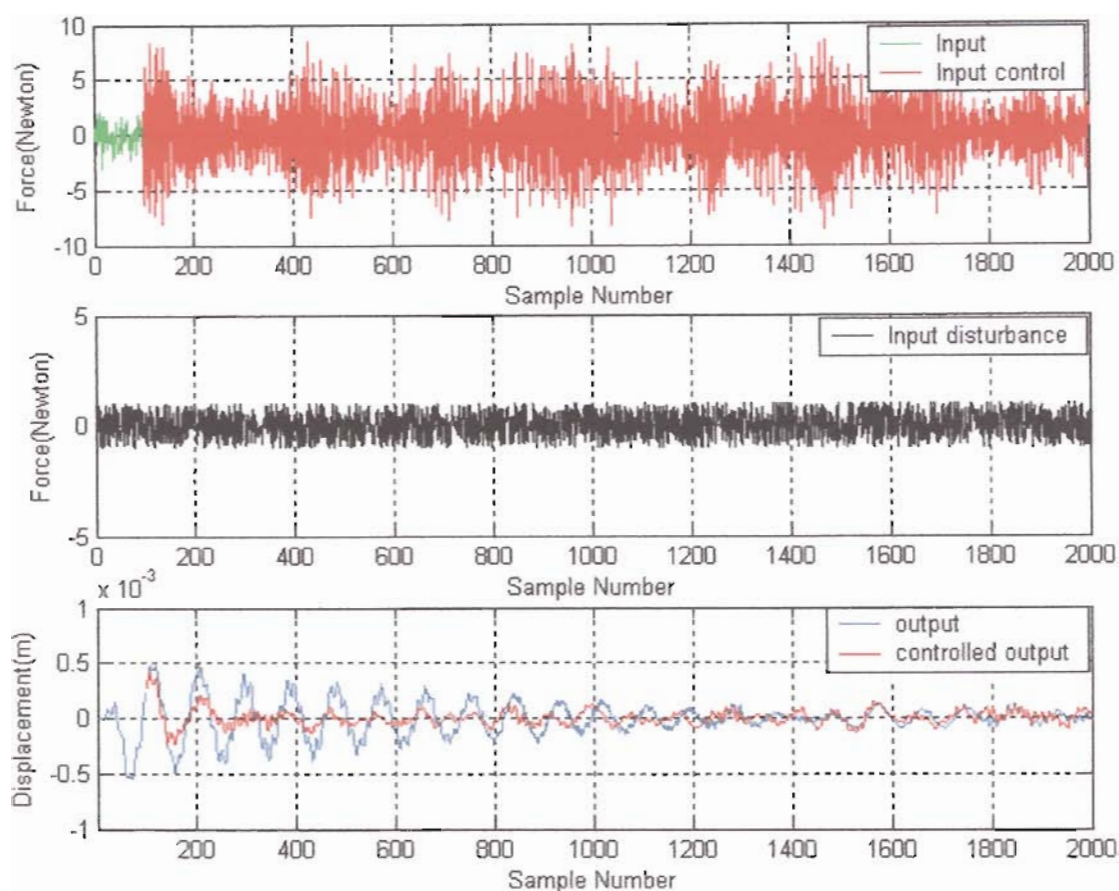
ภาพที่ 4-10 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การคำนวณเชิงตัวเลขการควบคุมแบบทำนายเดคบีทคานอลูมิเนียมปลายอิสระโดยกระตุ้นและควบคุมคานปลายอิสระที่โหมด 3 และลดการสั่นสะเทือนแบบอิสระของคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่ โหมด 9 ที่ช่วงความถี่กว้างครอบคลุมการสั่นสะเทือนทั้ง 4 โหมด โดยใช้อัตราการสุ่มข้อมูลที่ 2.5 kHz ออเดิร์ฟแบบจำลอง ARX (p=20) และขอบเขตการควบคุม (q=60) ผลการคำนวณเชิงตัวเลขการควบคุมแบบทำนายเดคบีทสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ทั้ง 4 โหมดความถี่ โดยโหมดแรกที่มีความถี่ 26.26 Hz ลดลงขนาด 0.79 โหมดสองที่มีความถี่ 162.60 Hz ลดลงขนาด 0.48 โหมดสามที่มีความถี่ 456.50 Hz ลดลงขนาด 1.00 โหมดสี่ที่มีความถี่ 894.20 Hz ลดลงขนาด 0.24

4.3 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิทในการลดการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อมีสัญญาณอินพุตรบกวนกระทำกับระบบ



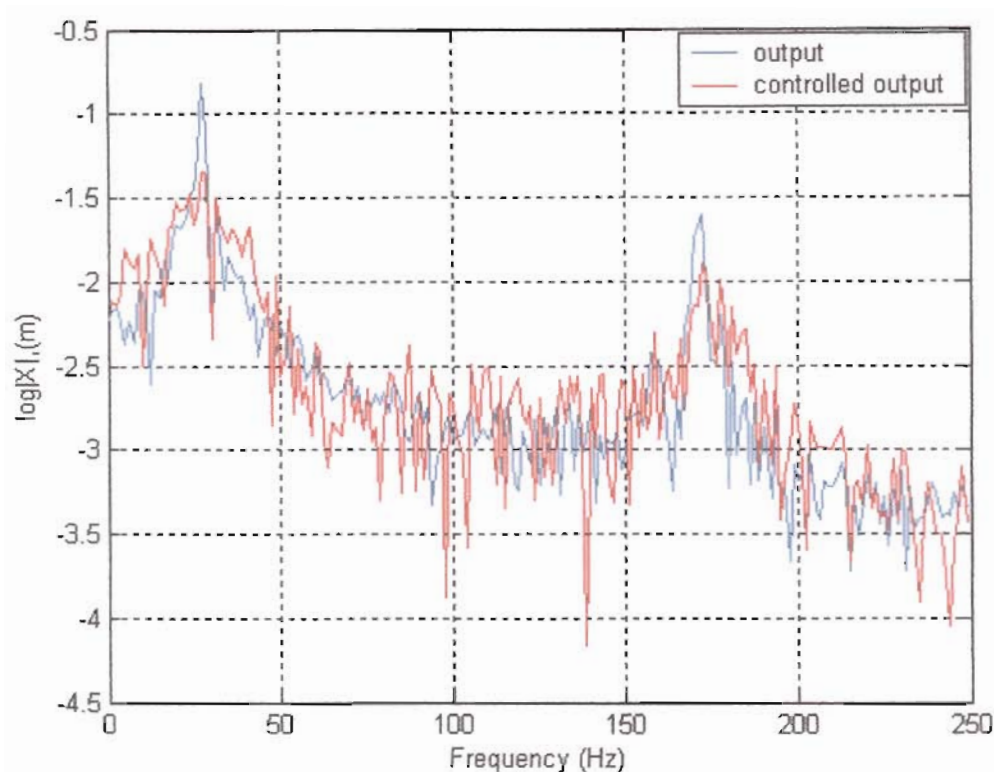
ภาพที่ 4-11 แสดงข้อมูลอินพุต สัญญาณอินพุตรบกวนและเอาต์พุตจากการคำนวณเชิงตัวเลข

ภาพที่ 4-11 กราฟเส้นสีเขียวแสดงถึงข้อมูลอินพุตจำนวนแรนดอม (Random Number) ช่วง ± 2 Newton ที่ใช้ในการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 กราฟเส้นสีดำแสดงสัญญาณอินพุตรบกวนจำนวนแรนดอม (Random Number) ช่วง ± 1 Newton ที่กระทำกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 2 และกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงเอาต์พุตระยะขจัดที่โหนด 9 ซึ่งเกิดจากอินพุตกระตุ้นและอินพุตรบกวนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ที่อัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 2000 จุดข้อมูล ในช่วงเวลา 0.8 วินาที เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) และนำมาออกแบบการควบคุมแบบทำนายเดดบิทเพื่อลดการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียมปลายอิสระกรณีมีสัญญาณอินพุตรบกวนกระทำกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



ภาพที่ 4-12 แสดงการควบคุมเชิงตัวเลขเมื่อระบบมีสัญญาณอินพุทรบกวน $p=20$ และ $q=60$

ภาพที่ 4-12 กราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณอินพุทที่กระตุ้นระบบในช่วงเวลา 0.04 วินาที และกราฟเส้นสีดำคือสัญญาณรบกวนอินพุทที่กระทำกับระบบในช่วงเวลา 0.04 วินาที สัญญาณทั้งคู่ก่อให้เกิดสัญญาณเอาต์พุทในช่วงเวลา 0.04 วินาที หลังจากเวลา 0.04 วินาทีนำเอาสัญญาณกระตุ้นระบบออกและยังคงสัญญาณอินพุทรบกวนไว้จึงทำให้เกิดสัญญาณเอาต์พุทเนื่องจากสัญญาณอินพุทรบกวนดังกราฟเส้นสีน้ำเงินในรูปด้านล่าง กราฟเส้นสีแดงในรูปด้านบนคือสัญญาณอินพุทควบคุมที่ได้จากการทำนายของข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวน และเอาต์พุทร่วมกับค่าอัตราขยายการควบคุมที่คำนวณจากข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวน และเอาต์พุทในภาพที่ 4-11 ด้วยค่าแบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) เมื่อป้อนสัญญาณควบคุมให้ระบบที่เวลา 0.04 วินาที จำนวนข้อมูล 100 จุดข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกับการกระตุ้นด้วยสัญญาณอินพุทในตอนต้น เพื่อให้สัญญาณการสั่นสะเทือนกราฟเส้นสีน้ำเงินในรูปด้านล่างหลังจากเวลา 0.04 วินาที มีขนาดลดลงดังกราฟเส้นสีแดง ซึ่งยังคงมีการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระค้างอยู่

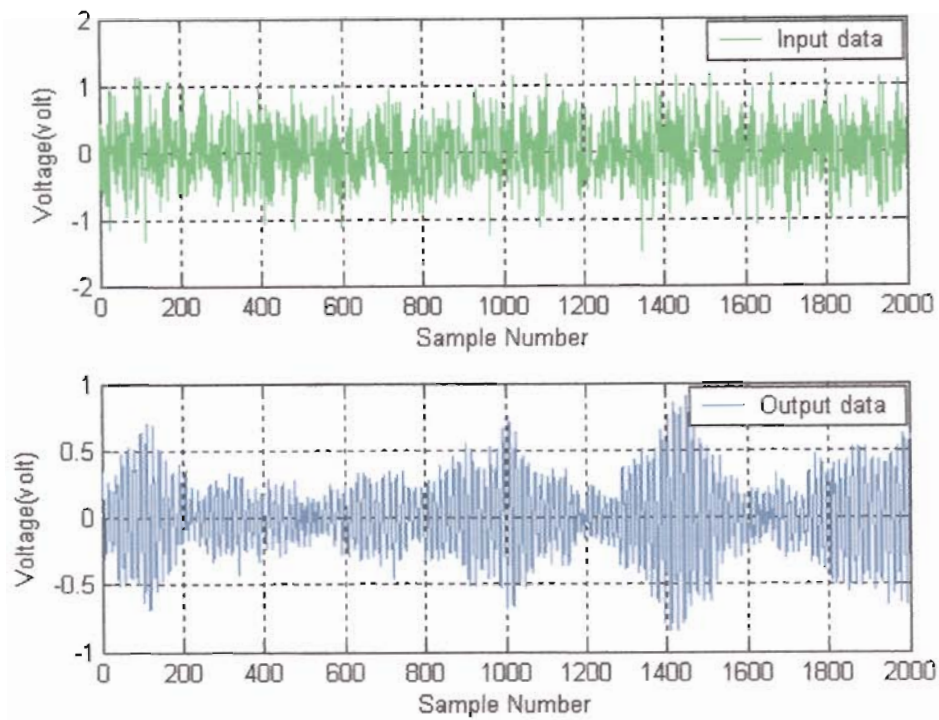


ภาพที่ 4-13 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมเชิงตัวเลขเมื่อระบบมี สัญญาณอินพุทรบกวน $p=20$ และ $q=60$

ภาพที่ 4-13 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่เพื่อดูสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมด้วยการควบคุมแบบทำนายเดคบิทเชิงตัวเลขกรณีระบบมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ที่อแดกเตอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ผลการควบคุมทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนลดลงโดยโหมดแรกลดลงขนาด 0.53 และโหมดที่สองลดลงขนาด 0.29

4.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดคบิทในการลดการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระ

4.4.1 ผลการทดสอบการหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จากข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทที่วัดได้จากคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



ภาพที่ 4-14 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้

ภาพที่ 4-14 แสดงสัญญาณข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้ ที่อัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ด้วยจำนวนข้อมูล 2000 จุดข้อมูล ซึ่งกราฟเส้นสีเขียวแสดงข้อมูลอินพุตสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) ช่วงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2Vpk และความถี่ 0-500 Hz ส่วนกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้จากตัวหยังสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) เมื่อนำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตในภาพที่ 4-14 ไปสร้างเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) ด้วยความสัมพันธ์ของจำนวนข้อมูล (N) ออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) คำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมด้วยเทคนิคเรีเคอร์ซีลรีสแควร์เพื่อนำไปทำนายสัญญาณการควบคุมแบบทำนายเดดปีทต่อไป

$$u_c(k) = -0.040y(k-4) - 0.365u(k-4) - 0.110y(k-3) + 0.900u(k-3) + 0.039y(k-2) - 1.422u(k-2) + 0.270y(k-1) + 1.410u(k-1) \quad (4-1)$$

สมการที่ (4-1) แสดงความสัมพันธ์การหาค่าสัญญาณควบคุมที่ลำดับขั้นเวลา k ถึง k+q-1 ด้วยค่าอัตราขยายการควบคุมที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX (p=4) และขอบเขตการควบคุม (q=20) กับข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตที่ผ่านมาในอดีตจำนวนเท่ากับออเดอร์แบบจำลอง ARX (p=4)

$$\begin{aligned}
u_c(k) = & -0.048y(k-8) - 0.051u(k-8) - 0.070y(k-7) + 0.204u(k-7) \\
& + 0.016y(k-6) - 0.449u(k-6) + 0.011y(k-5) + 0.859u(k-5) \\
& - 0.117y(k-4) - 1.360u(k-4) + 0.003y(k-3) + 1.783u(k-3) \\
& - 0.001y(k-2) - 1.988u(k-2) + 0.043y(k-1) + 1.637u(k-1)
\end{aligned} \tag{4-2}$$

สมการที่ (4-2) แสดงความสัมพันธ์การหาค่าสัญญาณควบคุมที่ลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+q-1$ ด้วยค่าอัตราขยายการควบคุมที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=8$) และขอบเขตการควบคุม ($q=40$) กับข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตที่ผ่านมาในอดีตจำนวนเท่ากับออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=8$)

$$\begin{aligned}
u_c(k) = & 0.004y(k-20) + 0.046u(k-20) + 0.093y(k-19) - 0.054u(k-19) \\
& - 0.073y(k-18) + 0.014u(k-18) + 0.077y(k-17) - 0.004u(k-17) \\
& + 0.104y(k-16) - 0.033u(k-16) + 0.152y(k-15) - 0.034u(k-15) \\
& - 0.088y(k-14) + 0.097u(k-14) - 0.074y(k-13) - 0.148u(k-13) \\
& + 0.093y(k-12) + 0.226u(k-12) + 0.079y(k-11) - 0.278u(k-11) \\
& + 0.168y(k-10) + 0.292u(k-10) - 0.156y(k-9) - 0.217u(k-9) \\
& + 0.022y(k-8) + 0.094u(k-8) + 0.258y(k-7) + 0.119u(k-7) \\
& - 0.201y(k-6) - 0.434u(k-6) - 0.078y(k-5) + 0.882u(k-5) \\
& + 0.107y(k-4) - 1.377u(k-4) + 0.152y(k-3) + 1.771u(k-3) \\
& - 0.203y(k-2) - 1.966u(k-2) + 0.057y(k-1) + 1.623u(k-1)
\end{aligned} \tag{4-3}$$

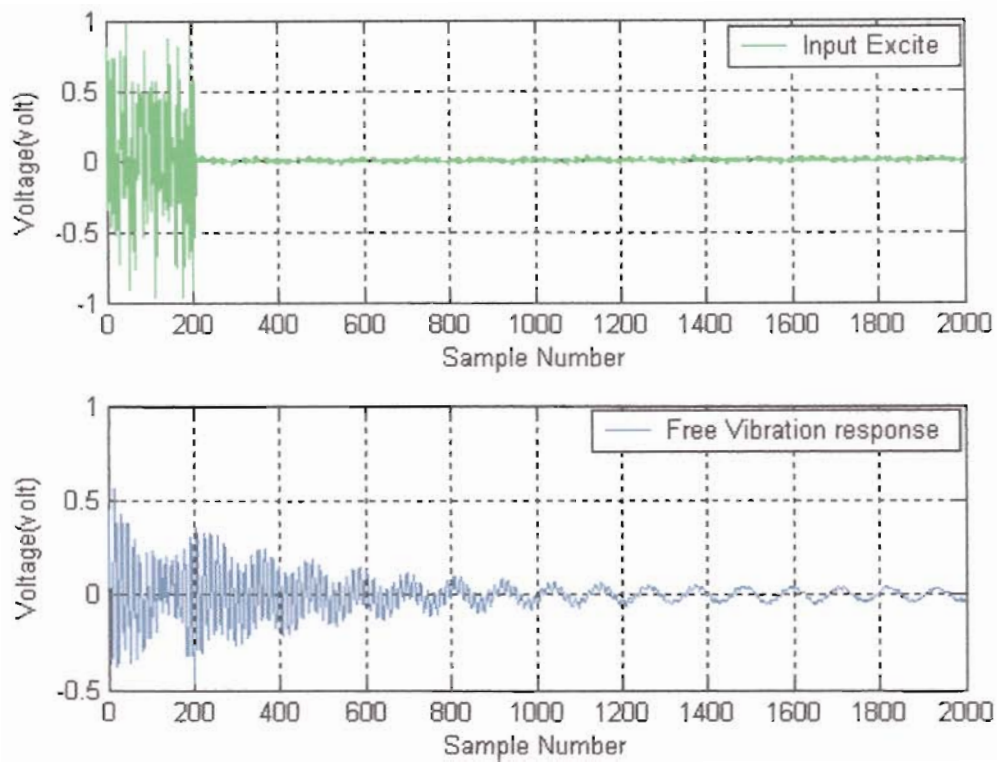
สมการที่ (4-3) แสดงความสัมพันธ์การหาค่าสัญญาณควบคุมที่ลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+q-1$ ด้วยค่าอัตราขยายการควบคุมที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) กับข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตที่ผ่านมาในอดีตจำนวนเท่ากับออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$)

$$\begin{aligned}
u_c(k) = & 0.084y(k-35) + 0.001u(k-35) + 0.020y(k-34) - 0.029u(k-34) \\
& - 0.033y(k-33) + 0.029u(k-33) + 0.007y(k-32) - 0.009u(k-32) \\
& + 0.233y(k-31) - 0.006u(k-31) - 0.239y(k-30) - 0.038u(k-30) \\
& + 0.097y(k-29) + 0.087u(k-29) - 0.059y(k-28) - 0.107u(k-28) \\
& + 0.073y(k-27) + 0.110u(k-27) + 0.183y(k-26) - 0.089u(k-26) \\
& + 0.074y(k-25) + 0.023u(k-25) + 0.116y(k-24) + 0.006u(k-24) \\
& - 0.243y(k-23) - 0.082u(k-23) + 0.102y(k-22) + 0.144u(k-22) \\
& + 0.012y(k-21) - 0.151u(k-21) + 0.218y(k-20) + 0.085u(k-20) \\
& - 0.246y(k-19) - 0.030u(k-19) + 0.017y(k-18) - 0.006u(k-18) \\
& + 0.215y(k-17) + 0.043u(k-17) + 0.004y(k-16) - 0.074u(k-16) \\
& - 0.494y(k-15) + 0.081u(k-15) + 0.381y(k-14) - 0.078u(k-14) \\
& + 0.196y(k-13) + 0.074u(k-13) - 0.153y(k-12) - 0.044u(k-12) \\
& - 0.383y(k-11) + 0.035u(k-11) + 0.266y(k-10) + 0.008u(k-10) \\
& - 0.076y(k-9) - 0.018u(k-9) - 0.400y(k-8) + 0.054u(k-8) \\
& + 0.197y(k-7) + 0.062u(k-7) + 0.285y(k-6) - 0.321u(k-6) \\
& - 0.137y(k-5) + 0.731u(k-5) - 0.285y(k-4) - 1.303u(k-4) \\
& + 0.006y(k-3) + 1.757u(k-3) + 0.080y(k-2) - 1.985u(k-2) \\
& - 0.051y(k-1) + 1.642u(k-1)
\end{aligned} \tag{4-4}$$

สมการที่ (4-4) แสดงความสัมพันธ์การหาค่าสัญญาณควบคุมที่ลำดับชั้นเวลา k ถึง $k+q-1$ ด้วยค่าอัตราขยายการควบคุมที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=35$) และขอบเขตการควบคุม ($q=100$) กับข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตที่ผ่านมาในอดีตจำนวนเท่ากับออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=35$)

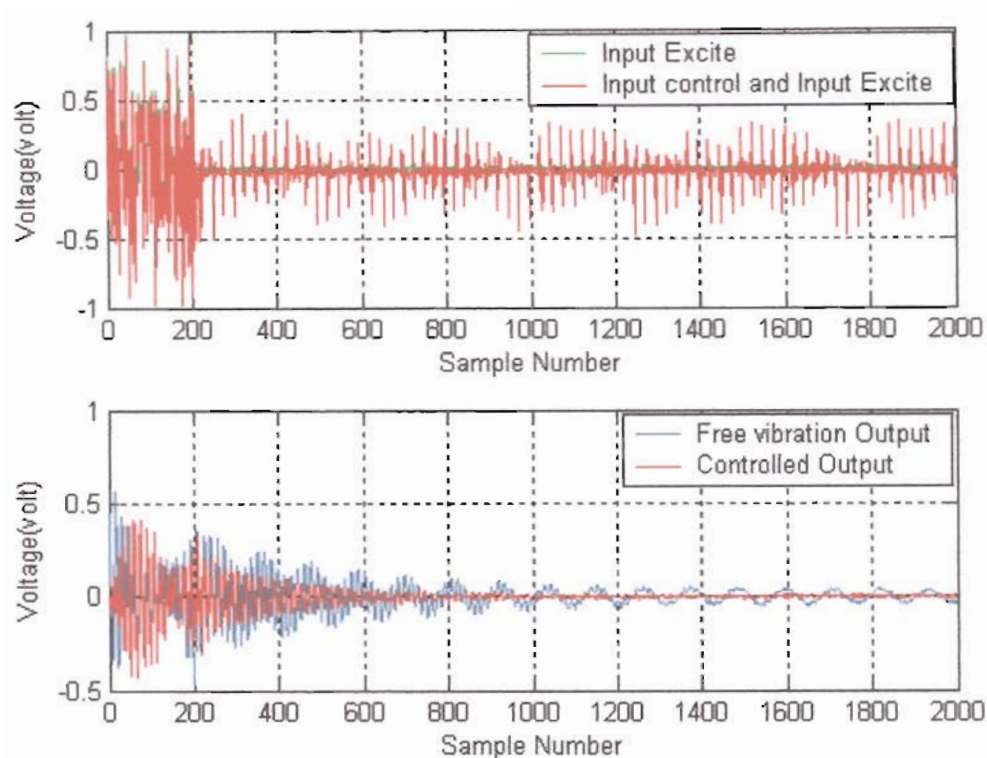
4.4.2 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดคิมิในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ

เริ่มต้นทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดคิมิกับการสั่นสะเทือนแบบอิสระด้วยการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ด้วยสัญญาณรบกวนแบบแรนดอม (Random Noise) จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) ช่วงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2Vpk และความถี่ 0-500 Hz และหยุดกระตุ้นเพื่อดูสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ลดต่ำลงด้วยค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเอง ซึ่งวัดได้จากตัวหึงสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) หลังจากนั้นก็ควบคุมการลดการสั่นสะเทือนในช่วงการสั่นสะเทือนแบบอิสระให้ลดต่ำลงก่อนการหยุดสั้นด้วยค่าความหน่วงของคานอลูมิเนียมปลายอิสระเองโดยป้อนสัญญาณควบคุมแบบทำนายเดคิมิให้กับคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่ตำแหน่งเดียวกับการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



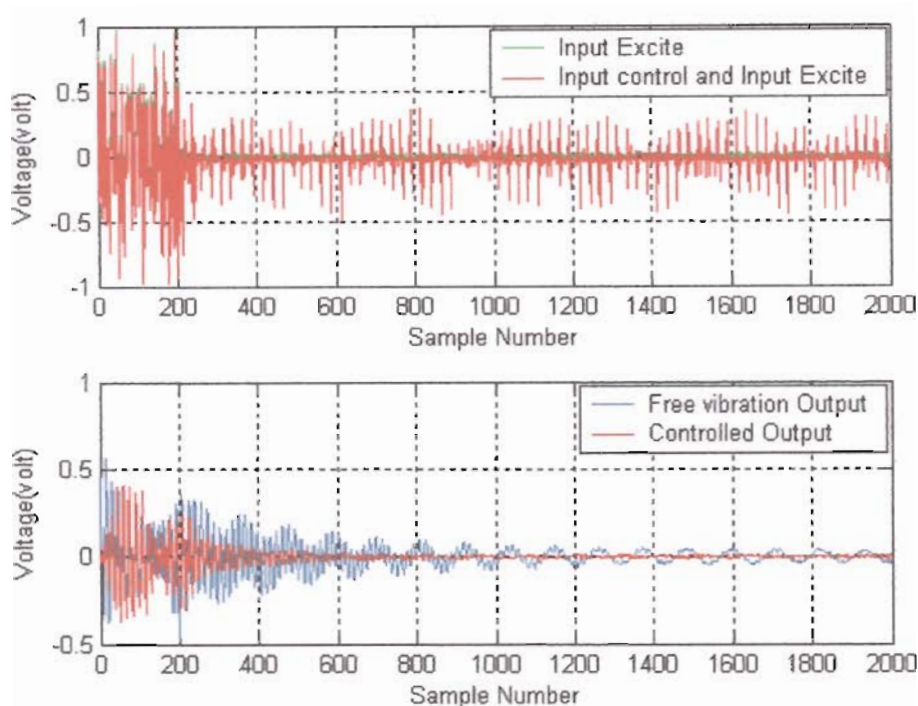
ภาพที่ 4-15 แสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

ภาพที่ 4-15 กราฟเส้นสีเขียวคือการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบอิสระด้วยการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระด้วยข้อมูลรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) ช่วง 208 จุดข้อมูลแรกที่โหนด 5 ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่โหนด 9 ดังกราฟเส้นสีน้ำเงินในช่วง 208 จุดข้อมูลแรกเป็นผลตอบสนองเนื่องจากการกระตุ้นเมื่อนำสัญญาณกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระออกหลังจาก 208 จุดข้อมูล กราฟเส้นสีเขียวจะกลายเป็นศูนย์แต่กราฟเส้นสีน้ำเงินจะค่อยๆ ลดลงในช่วงเวลาหนึ่งจนเป็นศูนย์ด้วยความหน่วงของคานเองในที่นี้จะเห็นว่าช่วงการลดเข้าสู่ศูนย์จะเร็วเนื่องจากคานอลูมิเนียมปลายอิสระมีค่าความหน่วงต่ำและมีความความแข็งแกร่งสูง ฉะนั้นเราจึงต้องการควบคุมการลดการสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระนี้ให้ลดต่ำลงเร็วกว่าการหน่วงด้วยตัวเองโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายเดบิตที่ที่มีการปรับตัวแปรควบคุมสองตัวแปรได้แก่ ออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม ซึ่งในที่นี้มีการปรับตัวแปรควบคุมออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ดังต่อไปนี้



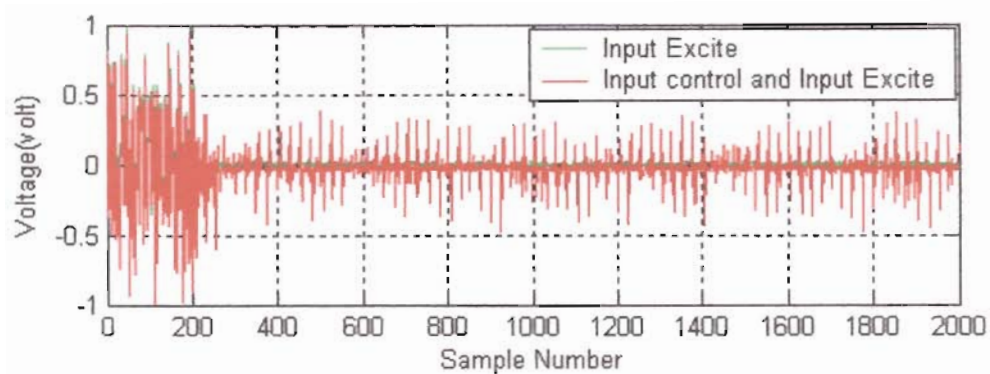
ภาพที่ 4-16 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=4$ และ $q=20$

ภาพที่ 4-16 แสดงการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเดคบีทที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=4$) และขอบเขตการควบคุม ($q=20$) โดยมีการเปรียบเทียบสัญญาณที่กระตุ้นระบบด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) กับสัญญาณกระตุ้นและควบคุมระบบที่ส่งจากตัวควบคุม ดังกราฟเส้นสีแดงในช่วง 208 จุดข้อมูลแรกทำให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนในช่วง 208 จุดข้อมูลแรก และกราฟเส้นสีแดงหลังจาก 208 จุดข้อมูลแรกเป็นสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้จากสมการ (4-1) ด้วยข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตในช่วง 208 จุดข้อมูลแรกภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่ 20 จุดข้อมูล ทำให้กราฟเส้นสีน้ำเงินหลัง 208 จุดข้อมูลมีขนาดลดต่ำลงได้เร็วกว่าการหน่วงด้วยค่าความหน่วงของคานอลูมิเนียมปลายอิสระเองดังกราฟเส้นสีแดงส่วนกราฟเส้นสีแดงในรูปบนหลังจาก 268 จุดข้อมูลเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากระบบควบคุม ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้ไม่มีผลกระทบต่อการควบคุมการลดการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียมปลายอิสระเพราะเป็นสัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่ำทำให้เครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (HVPT Piezo Amplifier) ไม่สามารถขับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ให้ทำงานได้ จึงทำให้คานอลูมิเนียมปลายอิสระไม่เกิดการสั่นสะเทือนด้วยสัญญาณรบกวนนี้

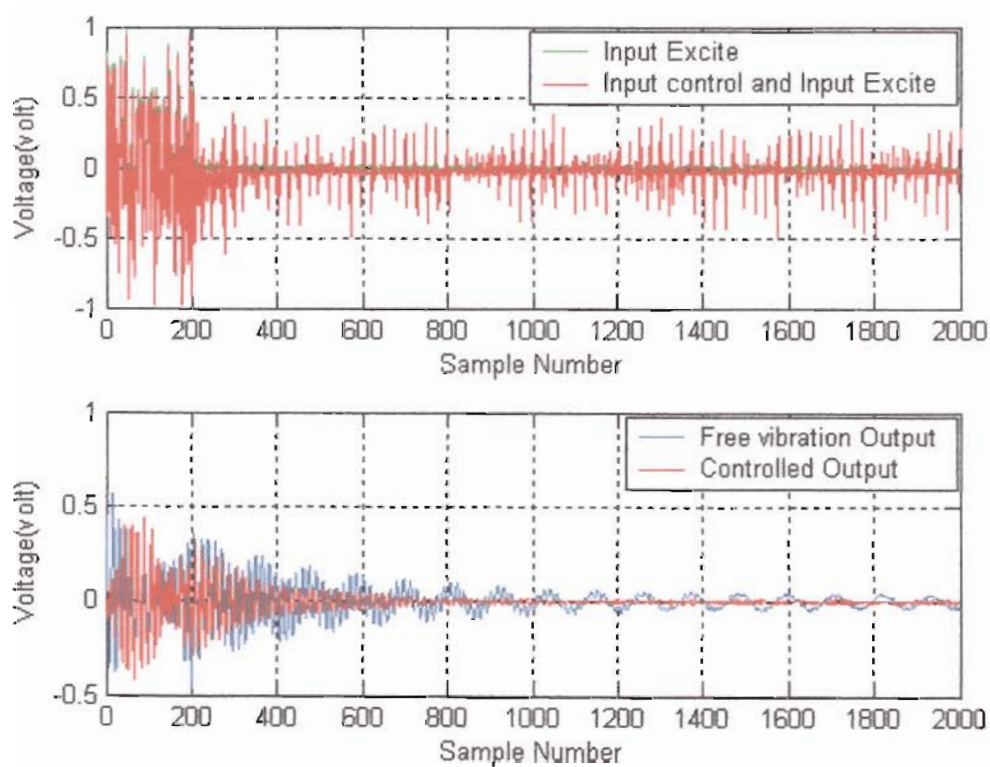


ภาพที่ 4-17 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=8$ และ $q=40$

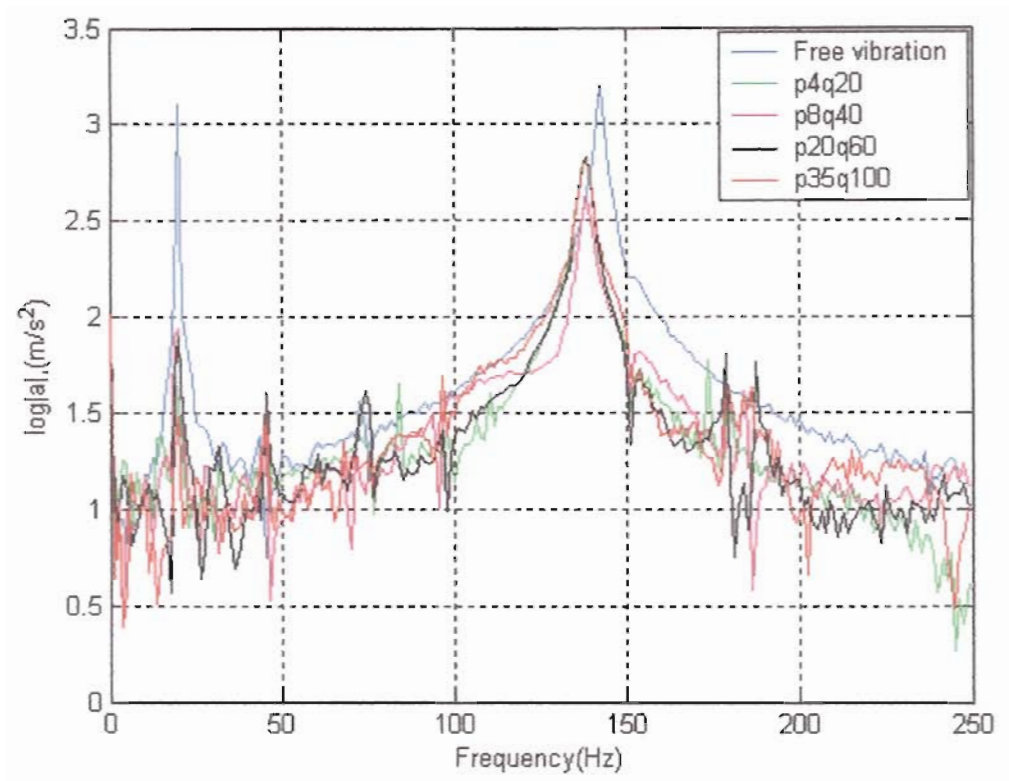
ภาพที่ 4-17 แสดงการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเดคบิท โดยการเพิ่มค่าอเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=8$) และขอบเขตการควบคุม ($q=40$) กราฟเส้นสีแดงแสดงสัญญาณที่กระตุ้นระบบด้วยตัวควบคุมในช่วง 208 จุดข้อมูลแรกพร้อมกับสัญญาณควบคุมหลังจาก 208 จุดข้อมูลภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่ 40 จุดข้อมูลที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-2) ทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบอิสระในกราฟเส้นสีน้ำเงินลดลงต่ำกว่าค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเองดังกราฟเส้นสีแดงหลัง 208 จุดข้อมูล ส่วนกราฟเส้นสีแดงในรูปด้านบนหลังจาก 248 จุดข้อมูลเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวควบคุมซึ่งไม่มีผลกระทบต่อารควบคุมเนื่องจากเป็นสัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่ำไม่สามารถทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ทำงานได้หลังจากนั้นก็เพิ่มอเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ระบบยังสามารถควบคุมการลดการสั่นสะเทือนแบบอิสระด้วยสัญญาณควบคุมที่คำนวณจากสมการที่ (4-3) ภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่ 60 จุดข้อมูล ทำให้กราฟเส้นสีน้ำเงินลดลงได้เร็วกว่าการลดด้วยค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเอง ดังแสดงในภาพที่ 4-18 ส่วนภาพที่ 4-19 เป็นการเพิ่มค่าอเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=35$) และ ขอบเขตการควบคุม ($q=100$) ระบบยังสามารถควบคุมได้ภายใต้ขอบเขตการควบคุมที่ 100 จุดข้อมูลด้วยสัญญาณควบคุมที่คำนวณจากสมการที่ (4-4) และทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบอิสระกราฟเส้นสีน้ำเงินลดลงเร็วกว่าค่าความหน่วงของคานปลายอิสระเองหลังข้อมูล 208 จุดข้อมูลดังแสดงด้วยกราฟเส้นสีแดงในรูปด้านล่าง



ภาพที่ 4-18 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=20$ และ $q=60$



ภาพที่ 4-19 แสดงสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมที่ $p=35$ และ $q=100$



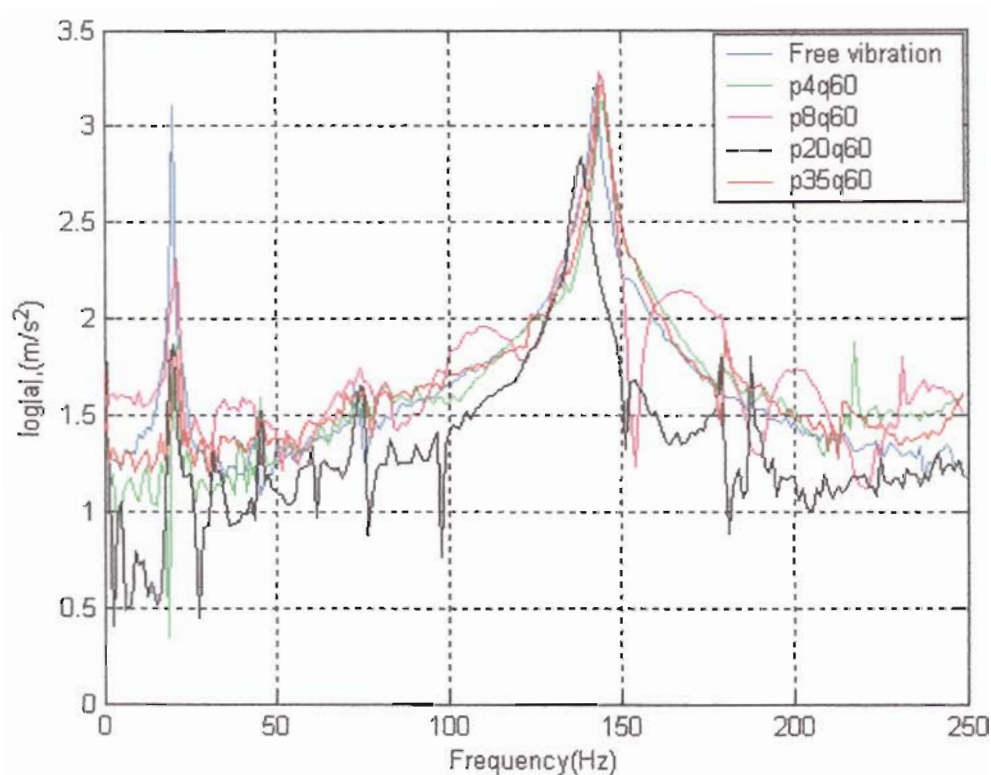
ภาพที่ 4-20 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 4-20 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่เพื่อคู่สัญญาณก่อนและหลังการควบคุมในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่แตกต่างกัน ซึ่งสรุปการลดขนาดการสั่นสะเทือนแบบอิสระจากการทดลองด้วยการควบคุมแบบทำนายเดบิตที่แสดงในตารางที่ 4-5 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบตัวควบคุมการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่ต่างกัน

p and q	Amplitude โหมด 1			Amplitude โหมด 2		
	Free Vibrate	Control Vibrate	Difference Amplitude	Free Vibrate	Control Vibrate	Difference Amplitude
p=4,q=20	3.10	1.68	1.42	3.20	2.82	0.38
p=8,q=40	3.10	1.94	1.16	3.20	2.62	0.58
p=20,q=60	3.10	1.90	1.20	3.20	2.83	0.37
p=35,q=100	3.10	1.48	1.62	3.20	2.81	0.39

ตารางที่ 4-5 แสดงการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระด้วยตัวควบคุมแบบทำนาย เดคบีทสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ในแต่ละออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) ซึ่งมีขนาดการลดลงที่แตกต่างกันด้วยการกำหนดค่าขอบเขตการควบคุม (q) ถ้ากำหนดค่าขอบเขตการควบคุมน้อยจะสามารถลดการสั่นสะเทือนได้มากกว่าการกำหนดค่าขอบเขตการควบคุมมาก ซึ่งค่าขอบเขตการควบคุมที่เหมาะสมควรมากกว่าหรือเท่ากับออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) และในทางปฏิบัติการเลือกค่าขอบเขตการควบคุมไม่ควรทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) เกิดความเสียหายจากการรับค่าแรงดันไฟฟ้าเกินขีดจำกัด ซึ่งในการทดลองนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ไม่เกิน 1000 โวลต์



ภาพที่ 4-21 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่การควบคุมแต่ละออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม (q=60)

ภาพที่ 4-21 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบการควบคุมในแต่ละออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) โดยกำหนดให้ขอบเขตการควบคุมคงที่ (q=60) ซึ่งคล้ายกับการคำนวณเชิงตัวเลขที่แสดงใน ภาพที่ 4-9 เพื่อหาออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่เหมาะสมกับระบบด้วยการทดลองโดยพิจารณาการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ลดลงในแต่ละออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) ทั้งสองโหมดความถี่และมีการสรุปขนาดการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่ลดลงทั้งสองโหมดในแต่ละออร์เดอร์แบบจำลอง ARX (p) ดังตารางที่ 4-6 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบตัวควบคุมในการลดการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม (q=60)

ARX model Order(p)	Amplitude โหมด 1			Amplitude โหมด 2		
	Free Vibration	Control Vibration	Difference Amplitude	Free Vibration	Control Vibration	Difference Amplitude
4	3.10	1.85	1.25	3.20	3.12	0.08
8	3.10	2.30	0.8	3.20	3.28	-0.08
20	3.10	1.86	1.24	3.20	2.84	0.36
35	3.10	1.81	1.29	3.20	3.21	-0.01

ผลการเปรียบเทียบขนาดการสั่นสะเทือนที่ลดลงในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX จะเห็นได้ว่าออเดอร์แบบจำลอง ARX (p=35) ที่โหมดหนึ่งสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระลดลงได้มากที่สุดคือขนาด 1.29 ส่วนโหมดสองออเดอร์แบบจำลอง ARX (p=20) มีขนาดการลดการสั่นสะเทือนมากที่สุดคือขนาด 0.36 เมื่อดูการลดการสั่นสะเทือนพร้อมกันทั้งสองโหมดความถี่จะเห็นว่าออเดอร์แบบจำลอง ARX (p=20) สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ในปริมาณมากกว่าออเดอร์อื่น ทำให้สรุปได้ว่าออเดอร์ของแบบจำลอง ARX ที่เหมาะสมจะใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบทำนายเดคปีทของคานอลูมิเนียมปลายอิสระมีค่าเป็น 20 ออเดอร์ซึ่งผลจากการทดลองในตารางที่ 4-6 มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบค่าความถี่ธรรมชาติก่อนและหลังการควบคุมการสั่นสะเทือนในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่ขอบเขตการควบคุม (q=60)

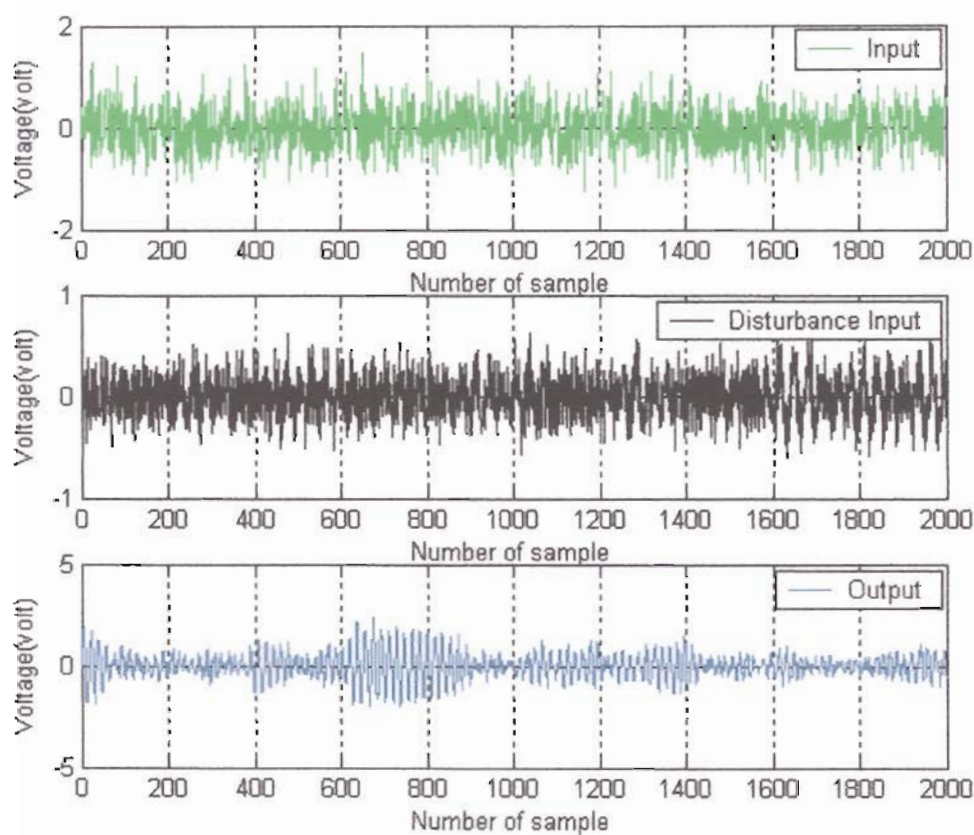
ARX model Order(p)	Frequency (Hz) โหมด 1			Frequency (Hz) โหมด 2		
	Free Vibration	Control Vibration	Difference Frequency	Free Vibration	Control Vibration	Difference Frequency
4	20	21.26	1.26	142.57	143.82	1.25
8	20	21.26	1.26	142.57	143.82	1.25
20	20	20.01	0.01	142.57	138.82	3.75
35	20	21.26	1.26	142.57	143.82	1.25

ตารางที่ 4-7 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองในโหมดที่หนึ่งแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) มีค่าเปลี่ยนแปลงภายหลังการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเดคปีท ส่วนโหมดที่สองค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) มีค่าเปลี่ยนแปลงภายหลังการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายเดคปีทเช่นเดียวกับโหมดความถี่แรก

4.5 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดคบิทเมื่อมีสัญญาณอินพุทรบกวนกระทำกับระบบในการลดการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระ

การทดสอบในที่นี้พิจารณาเป็นระบบควบคุมแบบออฟไลน์มีการแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ เริ่มจากหาค่าอัตราขยายการควบคุมจากข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวนและเอาต์พุท ส่วนที่สองเป็นการนำค่าอัตราขยายการควบคุมที่ได้ไปป้อนให้กับตัวควบคุมดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.1 ผลการทดสอบการหาค่าอัตราขยายการควบคุม (Control Gain) จากข้อมูลอินพุท อินพุทรบกวนและเอาต์พุทที่วัดได้จากคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



ภาพที่ 4-22 แสดงข้อมูลอินพุท ข้อมูลอินพุทรบกวนและเอาต์พุทที่วัดได้

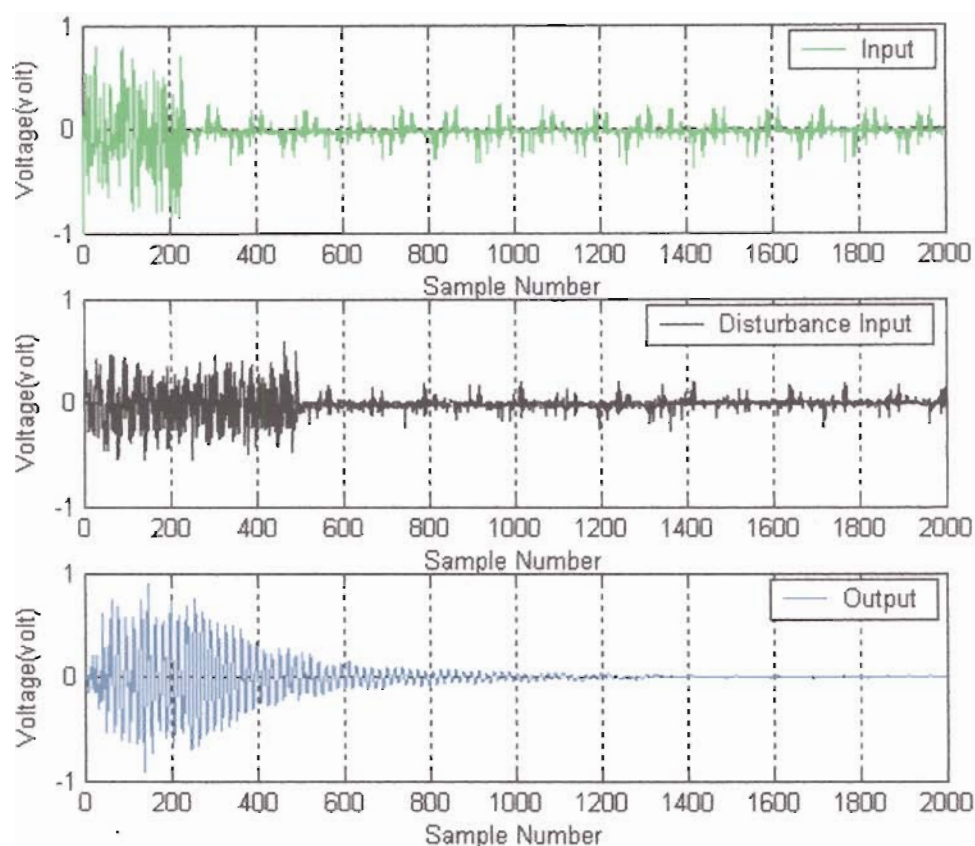
ภาพที่ 4-22 แสดงสัญญาณอินพุท อินพุทรบกวนและเอาต์พุทที่อัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ด้วยข้อมูล 2000 จุดข้อมูล กราฟเส้นสีเขียวแสดงข้อมูลอินพุทสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2Vpk และความถี่ 0-500 Hz เพื่อนำไปใช้กระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหมด 5 กราฟเส้นสีดำคือข้อมูลอินพุทรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) ที่ได้จากฮาร์ดการ์ดคอมพิวเตอร์ด้วยแรงดันไฟฟ้า 1Vpk อัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz กระทำกับระบบที่ตำแหน่งต่างกันโดยกระตุ้นคานอลูมิเนียมที่โหมด 2 ส่วนกราฟเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณเอาต์พุทที่วัดได้

จากตัวห้อยสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่โหนด 9 ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้งสองตำแหน่งดังที่กล่าวในข้างต้น หลังจากนั้นนำข้อมูลอินพุต อินพุทรบกวน และเอาต์พุตไปใช้สร้างเมทริกซ์ข้อมูลด้วยค่าออเดอร์แบบจำลอง ARX (20) และขอบเขตการควบคุม (60) เพื่อคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมด้วยเทคนิครีเคอร์ซีฟลีส์แควร์ด้วยคอมพิวเตอร์และนำไปใช้ในการควบคุมแบบทำนายเดคปีทต่อไป

$$\begin{aligned}
 u_c(k) = & -0.013y(k-20) + 0.005u_c(k-20) - 0.035u_d(k-20) \\
 & 0.003y(k-19) - 0.005u_c(k-19) + 0.019u_d(k-19) \\
 & 0.069y(k-18) - 0.014u_c(k-18) - 0.007u_d(k-18) \\
 & -0.0300y(k-17) + 0.026u_c(k-17) - 0.017u_d(k-17) \\
 & 0.026y(k-16) - 0.052u_c(k-16) - 0.032u_d(k-16) \\
 & 0.002y(k-15) + 0.094u_c(k-15) - 0.029u_d(k-15) \\
 & -0.023y(k-14) - 0.117u_c(k-14) - 0.034u_d(k-14) \\
 & 0.048y(k-13) + 0.091u_c(k-13) - 0.032u_d(k-13) \\
 & -0.105y(k-12) + 0.027u_c(k-12) - 0.018u_d(k-12) \\
 & 0.062y(k-11) - 0.181u_c(k-11) + 0.017u_d(k-11) \\
 & 0.000y(k-10) + 0.329u_c(k-10) - 0.044u_d(k-10) \\
 & 0.022y(k-9) - 0.403u_c(k-9) - 0.038u_d(k-9) \\
 & 0.041y(k-8) + 0.366u_c(k-8) - 0.008u_d(k-8) \\
 & -0.052y(k-7) - 0.134u_c(k-7) + 0.032u_d(k-7) \\
 & 0.012y(k-6) - 0.281u_c(k-6) - 0.006u_d(k-6) \\
 & -0.013y(k-5) + 0.836u_c(k-5) - 0.039u_d(k-5) \\
 & -0.011y(k-4) - 1.479u_c(k-4) - 0.025u_d(k-4) \\
 & -0.006y(k-3) + 1.961u_c(k-3) - 0.043u_d(k-3) \\
 & 0.020y(k-2) - 2.133u_c(k-2) - 0.027u_d(k-2) \\
 & 0.002y(k-1) + 1.698u_c(k-1) - 0.014u_d(k-1)
 \end{aligned} \tag{4-5}$$

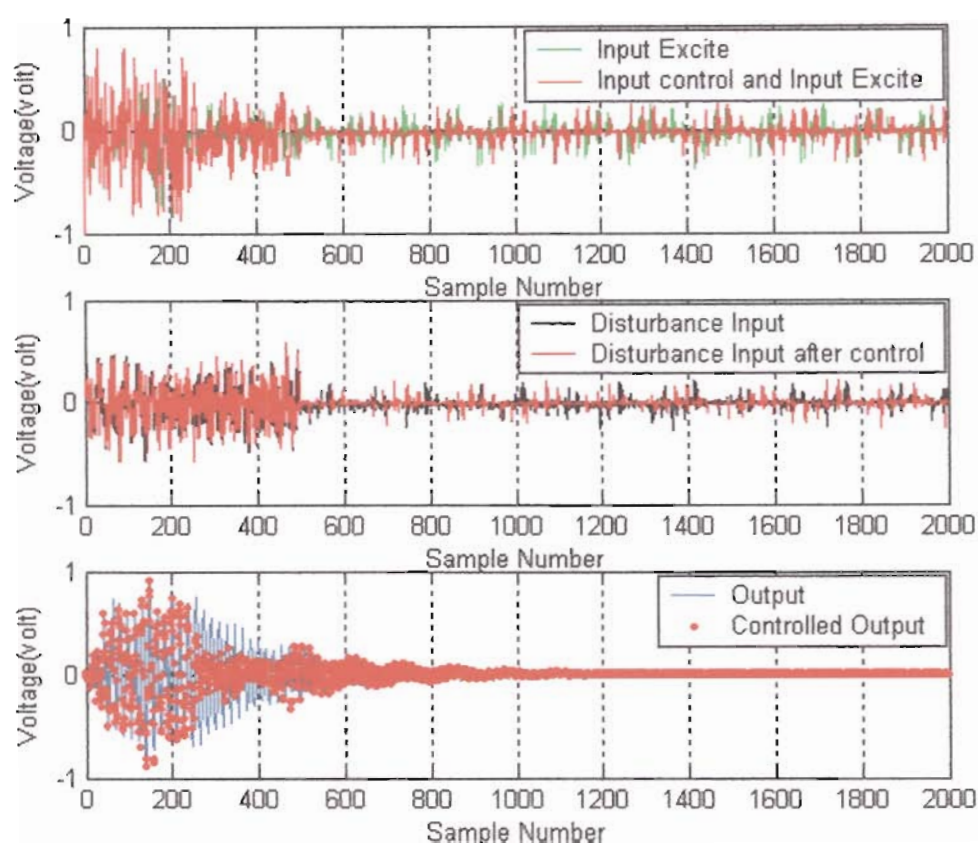
สมการที่ (4-5) แสดงความสัมพันธ์การหาค่าสัญญาณควบคุมที่ลำดับขั้นเวลา k ถึง $k+q-1$ ด้วยค่าอัตราขยายการควบคุมที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) กับข้อมูลอินพุต อินพุทรบกวนและเอาต์พุตที่ผ่านมาในอดีตจำนวนเท่ากับออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) เมื่อได้ค่าอัตราขยายการควบคุมจากการคำนวณของคอมพิวเตอร์แล้วเราก็นำค่านั้นไปป้อนให้กับตัวควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมด้วยสมการที่ (4-5) แล้วส่งออกจากตัวควบคุมทางช่อง D/A ด้วยอัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ไปสั่งให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ทำงานในการกระตุ้นคานอลูมิเนียมปลายอิสระให้สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบบังคับที่เกิดจากการกระตุ้นอย่างต่อเนื่องเดิมให้ลดต่ำลงตามต้องการ

4.5.2 ผลการทดสอบตัวควบคุมกรณีระบบมีสัญญาณอินพุทรบกวนในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ



ภาพที่ 4-23 แสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนแบบบังคับ

ภาพที่ 4-23 แสดงผลตอบสนองการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระแบบบังคับกรณีมีสัญญาณรบกวนอินพุทกระตุ้นระบบในช่วง 500 จุดข้อมูล กราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณอินพุทที่กระตุ้นระบบในช่วง 236 จุดข้อมูล ช่วงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2Vpk ที่ส่งด้วยตัวควบคุมในอัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz ส่วนกราฟเส้นสีดำคือสัญญาณอินพุทรบกวนที่กระทำกับระบบในช่วง 500 จุดข้อมูล ช่วงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1 Vpk ที่ส่งด้วยตัวควบคุมในอัตราการสุ่มข้อมูล 2.5 kHz สัญญาณทั้งคู่ในช่วง 236 จุดข้อมูลก่อให้เกิดสัญญาณเอ้าท์พุทในช่วง 236 จุดข้อมูล ส่วนสัญญาณเอ้าท์พุทหลังจาก 236 จุดข้อมูล เกิดจากสัญญาณอินพุทรบกวนในช่วง 236 ถึง 500 จุดข้อมูล ดังกราฟสีน้ำเงินในรูปด้านล่าง ส่วนเอ้าท์พุทหลังจาก 500 จุดข้อมูล เป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระเนื่องจากสัญญาณอินพุทรบกวน



ภาพที่ 4-24 แสดงการควบคุมเมื่อระบบมีสัญญาณรบกวนอินพุต $p=20$ และ $q=60$

ภาพที่ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณก่อนและหลังการควบคุมแบบทำนายเดคบีท กราฟเส้นสีแดงในรูปด้านบนคือสัญญาณอินพุตกระตุ้นในช่วง 236 จุดข้อมูลและสัญญาณอินพุตควบคุมแบบทำนายเดคบีทที่ขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ที่ได้จากการทำนายของข้อมูลอินพุต อินพุตรบกวน และเออร์พูท ที่ผ่านมาในอดีตกับค่าอัตราขยายการควบคุมด้วยจำนวนออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ซึ่งแสดงในสมการที่ (4-5) สัญญาณควบคุมที่ได้จะอยู่ในช่วงข้อมูลที่ 236 ถึง 500 จุดข้อมูล เมื่อป้อนสัญญาณควบคุมแบบทำนายเดคบีทให้คานอลูมิเนียมปลายอิสระที่โหนด 5 และคงสัญญาณอินพุตรบกวนไว้ที่โหนด 2 ทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนกราฟสีน้ำเงินในรูปด้านล่างหลังจาก 236 จุดข้อมูลที่โหนด 9 มีขนาดลดลงดังกราฟเส้นสีแดง ถึงข้อมูลที่ 500 เนื่องจากสัญญาณรบกวนอินพุตสิ้นสุดที่ 500 จุดข้อมูล สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบอิสระหลังจาก 500 จุดข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณอินพุตรบกวนจะไม่ลดลงเนื่องจากการเปิดตัวควบคุมสิ้นสุดที่ 500 จุดข้อมูล กราฟเส้นสีแดงในสองรูปด้านบน หลังจาก 500 จุดข้อมูลเป็นสัญญาณรบกวนเนื่องจากตัวควบคุมจะไม่มีผลกระทบกับการควบคุม เนื่องจากมีขนาดสัญญาณที่ต่ำไม่สามารถทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งที่โหนดสองและโหนดห้าบนคานอลูมิเนียมอิสระทำงานได้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการคำนวณเชิงตัวเลข

วิธีการควบคุมแบบทำนายเดดบิทในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการรวมการหาเอกลักษณ์ระบบเข้ากับระบบควบคุมแบบทำนาย ซึ่งแตกต่างจากวิธีการออกแบบระบบควบคุมโดยทั่วไปที่มีสองขั้นตอน ได้แก่การหาเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุม การคำนวณการควบคุมแบบทำนายเดดบิทเชิงตัวเลขเริ่มจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ของคานอลูมิเนียมอิสระด้วยการแบ่งคานออกเป็น 10 เอเลเมนต์ เพื่อหาความถี่และรูปร่างการสั่นสะเทือนในแต่ละโหมดความถี่ และคำนวณหาค่าอัตราขยายการควบคุมแบบทำนายเดดบิทจากเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) โดยใช้เทคนิครีเคอร์ซีฟสแควร์ มีตัวแปรควบคุมระบบสองตัวแปร ได้แก่ ออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) เพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนคานปลายอิสระที่โหนด 9 ให้ลดต่ำลงที่ออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) เท่ากับ 4, 8, 20 และ 35 ภายใต้ขอบเขตการควบคุม (q) ที่กำหนดคือ 20, 40, 60 และ 100 ในแต่ละออเดอร์ ตามลำดับ ซึ่งมีการพิจารณาการควบคุมการสั่นสะเทือนเป็นสองแบบคือการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระและการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับ ผลการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระสามารถควบคุมสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ให้ลดต่ำลงภายใต้ขอบเขตการควบคุม (q) ที่กำหนดและหลังขอบเขตการควบคุมสัญญาณการสั่นสะเทือนจะเป็นศูนย์ ต่อจากนั้นหาออเดอร์ของระบบจากออเดอร์แบบจำลอง ARX ในแต่ละค่าที่กล่าวมาในช่วงต้นโดยกำหนดค่าขอบเขตการควบคุมให้คงที่ ($q=100$) ผลการคำนวณเชิงตัวเลขสามารถสรุปได้ว่าออเดอร์แบบจำลอง ARX ที่เหมาะสมกับออเดอร์ระบบคือออเดอร์แบบจำลอง ARX ที่ 20 ออเดอร์ ส่วนผลการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนในออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) ให้ลดต่ำลงจากเดิมได้ ตัวควบคุมชนิดนี้มีข้อดีคือไม่ต้องรู้พฤติกรรมทางกายภาพของระบบเพียงแค่ว่าข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่กระทำกับระบบก็สามารถควบคุมระบบได้ โดยการกระตุ้นระบบในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อหาแบบจำลองของระบบต่อจากนั้นก็ยังสามารถออกแบบสัญญาณควบคุมจากสัญญาณกระตุ้นระบบไปควบคุมให้ระบบหยุดนิ่งได้ตามเวลาที่ต้องการ และตัวควบคุมชนิดนี้ยังเหมาะกับระบบที่เปลี่ยนไปตามเวลาเนื่องจากค่าอัตราขยายการควบคุมที่คำนวณได้มีการอัปเดตทุกๆข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ส่งมาได้ แต่ก็มีข้อเสียคือสัญญาณควบคุมระบบต้องป้อนให้กับระบบที่ตำแหน่งเดียวกับสัญญาณกระตุ้นระบบและก่อนจะทำนายสัญญาณควบคุมได้ก็ต้องรู้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตในอดีต ส่วนกรณีที่พิจารณาการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบ

บังคับให้สัญญาณที่ทำให้ระบบสั่นสะเทือนคืออินพุทระบบในกรณีนี้จะออกแบบระบบควบคุมได้ก็ต่อเมื่อต้องรู้และวัดสัญญาณอินพุทระบบนั้นได้ ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิทนี้เหมาะสมกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และมีความเสถียรภาพ (Stable)

5.2 สรุปผลการทดลอง

การทดสอบตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิทเพื่อลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือการทดลองการควบคุมการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียมปลายอิสระแบบอิสระ ซึ่งมีการควบคุมแบบออฟไลน์โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือการหาค่าอัตราขยายการควบคุมจากเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) และการควบคุมระบบ ด้วยออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) คือ $p=4, p=8, p=20$ และ $p=35$ และขอบเขตการควบคุม (q) คือ $q=20, q=40, q=60$ และ $q=100$ ตามลำดับ การควบคุมการสั่นสะเทือนแบบอิสระคือกระตุ้นคานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) ในช่วงเวลาสั้นๆ และปล่อยให้คานหยุดสั่นด้วยค่าความหน่วงของคานเอง ซึ่งการหยุดสั่นด้วยค่าความหน่วงของคานเองนั้นจะใช้เวลานาน ฉะนั้นเราต้องการควบคุมให้คานหยุดสั่นได้เร็วขึ้นโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิท (Deadbeat Predictive Control) ควบคุมช่วงการสั่นสะเทือนแบบอิสระ โดยการนำค่าอัตราขยายการควบคุมมาออกแบบตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมป้อนให้คานอลูมิเนียมปลายอิสระในการลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ผลการทดลองตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิทสามารถลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระได้ภายใต้ขอบเขตการควบคุมในแต่ละออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) และขอบเขตการควบคุม (q) ที่กล่าวมาข้างต้นต่อจากนั้นก็ทดลองหาออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) ที่เหมาะสมกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระโดยให้ค่าขอบเขตการควบคุม (q) คงที่ ($q=60$) ผลการทดลองสรุปได้ว่าออเดอร์แบบจำลอง ARX ที่ 20 ออเดอร์เหมาะสมกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระเนื่องจากตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิทสามารถลดการสั่นสะเทือนคานอลูมิเนียมปลายอิสระทั้งสองโหมดได้มากกว่าออเดอร์แบบจำลอง ARX (p) อื่นๆ ส่วนที่สองคือการทดลองการควบคุมการสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียมปลายอิสระแบบบังคับ ซึ่งมีการควบคุมแบบออฟไลน์โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือการหาค่าอัตราขยายการควบคุมจากเมทริกซ์ข้อมูล (Information Matrix) และการควบคุมระบบ ด้วยออเดอร์แบบจำลอง ARX ($p=20$) และขอบเขตการควบคุม ($q=60$) การควบคุมการสั่นสะเทือนแบบบังคับคือใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) สองตัวโดยตัวที่หนึ่งให้สัญญาณอินพุทระบบกับคานในช่วงเวลาหนึ่ง ตัวที่สองใช้เป็นตัวกระตุ้นช่วงเวลาสั้นๆ และเปลี่ยนสถานะตัวกระตุ้นเป็นตัวควบคุม ตัวควบคุมแบบทำนายเดดบิทชนิดนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อต้องรู้สัญญาณรบกวนอินพุทหรือวัดได้ ผลการทดลองสามารถควบคุมให้การสั่นสะเทือนลดต่ำลงได้ในช่วงที่มีสัญญาณรบกวนกระทำกับคานอลูมิเนียมปลายอิสระ ในการทดลองทั้งสองส่วนจะต้องทดลอง

ส่วนละสองขั้นตอนซึ่งประกอบด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ PC เพื่อหาค่าอัตราขยายการควบคุม และใช้คอมพิวเตอร์ PC อีกเครื่องหนึ่งสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนคาน อลูมิเนียมปลายอิสระให้ลดต่ำลง

5.3 ข้อเสนอแนะ

วิธีการควบคุมแบบทำนายเดดบีทในข้างต้นที่กล่าวมาในความเป็นจริงเป็นวิธีควบคุมที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้โดยการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์และนำไปออกแบบการควบคุมแบบทำนายเดดบีทแต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการทดลองการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์ได้ เนื่องจากอุปกรณ์การทดลองไม่พร้อม ถ้าต้องการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์ควรใช้ DSP เป็นตัวทำการหาเอกลักษณ์ระบบแบบออนไลน์และควบคุมระบบด้วยคอมพิวเตอร์ PC นอกจากนี้ยังสามารถนำหลักการควบคุมแบบทำนายเดดบีทนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมแบบ MIMO และโครงสร้างการสั่นสะเทือนของแผ่นเรียบได้

เอกสารอ้างอิง

1. Rao, Singiresu S. Mechanical Vibrations. 2nd ed. USA : Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
2. Juang, J.-N. and Phan, M.G. "Deadbeat Predictive Controller." NASA Technical Memorandum. TM-112862 (May 1997).
3. Juang, J.-N., and Phan, M.G., "Recursive Deadbeat Controller Design." NASA Technical Memorandum. TM-112863 (May 1997).
4. Chinvorarat, S. and Schoen, M. "Disturbance Rejection in deadbeat Predictive Control." CIRCUITS SIGNAL AND SYSTEMS. (May 2003) : 19-21.
5. Kenneth, W. Eure. Adaptive Predictive Feedback Techniques for Vibration Control. Ph.D.Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
6. จักร จันทลักษณ์. "การปรับปรุงเสถียรภาพของตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบเพื่อลดการสั่นสะเทือนของคาน." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 14 (ต.ค.-ธ.ค. 2547) : 31-37.
7. Juang, J.-N. Applied System Identification. New Jersey : PRT Prentice-Hall Inc Englewood Cliffs, 1994.
8. Soeterboek, R. Predictive Control : A Unified Approach. New York : Prentice-Hall International Series, 1992.
9. Mosca, E. Optimal Predictive and Adaptive Control. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall Information and System Sciences Series, 1995.
10. Clarke, D.W., et al. "Generalized Predictive Control: Part I and II." Automatica. 23 (1987) : 137-160.
11. มนัส สัจจวิเศษ และวรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี : อินโฟเพรส, 2543.
12. Dawe, D. J. Matrix and Finite Element Displacement Analysis of Structures. New York : Oxford University Press, 1984.

ภาคผนวก ก

ไฟไนต์เอเลเมนต์ของคาน

ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานาในแนวคดตัว (Bending)

จากทฤษฎีเมทริกซ์ความแข็งดิ่งและเมทริกซ์มวลของคานาในแนวการคดตัวเป็นดังนี้

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

และ

$$\{d_b\} = \{W_1 \quad \theta_1 \quad W_2 \quad \theta_2\}^T$$

โดยที่ $\{d_b\}$ คือ ระยะขจัดในแนวการคดตัวที่จุดโหนด (Nodal Displacement) (m)

W_1, W_2 คือ ระยะการโก่งที่โหนด 1 และ 2 ของเอลิเมนต์ตามลำดับ (m)

θ_1, θ_2 คือ มุมบิดที่โหนด 1 และ 2 ของเอลิเมนต์ตามลำดับ (rad)

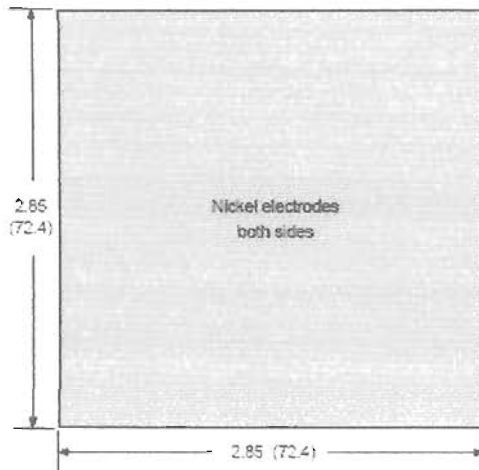
ภาคผนวก ข

รายละเอียดของแผนเพียโซอิเล็กทริก

PIEZO SYSTEMS, INC.

166 Massachusetts Avenue Cambridge, MA 02139 • Tel: (617) 547-1777 • Fax: (617) 354-2200 • Web: www.piezo.com • E-mail: sales@piezo.com

PSI-5A4E PIEZOELECTRIC SINGLE SHEETS



PART NUMBER	THICKNESS	CAPACITANCE
	mm	nF (±10%)
T105-A4E-602	.127	650
T107-A4E-602	.191	430
T110-A4E-602	.267	315
T120-A4E-602	.508	162
T140-A4E-602	1.02	80
T180-A4E-602	2.03	40

.005 ± .0005	(.127 ± .013)
.0075 ± .0005	(.191 ± .013)
.0105 ± .0005	(.267 ± .013)
.020 ± .0005	(.508 ± .013)
.040 ± .0010	(1.016 ± .025)
.080 ± .0020	(2.032 ± .050)

PIEZOELECTRIC & MATERIAL PROPERTIES OF PSI-5A4E SINGLE SHEETS

PIEZOELECTRIC

Composition	Lead Zirconate Titanate	
Piezo Systems Material Designation	Type 5A4E (Industry Type 5A, Navy Type II)	
Relative Dielectric Constant (@1KHz)	KT ₃	1800
Piezoelectric Strain Coefficient	d ₃₃	390 x 10 ⁻¹² meters/Volt
	d ₃₁	-190 x 10 ⁻¹² meters/Volt
Piezoelectric Voltage Coefficient	g ₃₃	24.0 x 10 ⁻³ Volt meters/Newton
	g ₃₁	-11.6 x 10 ⁻³ Volt meters/Newton
Coupling Coefficient	k ₃₃	0.72
	k ₃₁	0.35
Polarization Field	E _p	2 x 10 ⁶ Volts/meter
Initial Depolarization Field	E _c	5 x 10 ⁵ Volts/meter

MECHANICAL

Density	ρ	7800 Kg/meter ³
Mechanical Q	Q _m	80
Elastic Modulus	Y _E ₃	5.2 x 10 ¹⁰ Newtons/meter ²
	Y _E ₁	6.6 x 10 ¹⁰ Newtons/meter ²

THERMAL

Thermal Expansion Coefficient	α	~4 x 10 ⁻⁶ meters/meter °C
Curie Temperature	T _c	350 °C

ROHS

Compliant / Piezoceramic exempted from requirements of Article 4(1)

ORDERING INFORMATION	PART NO.	1 pc.	5 pc.	25 pc.	100 pc.
PSI-5A4E (2.85" Square x .005"T)	T105-A4E-602	\$100	\$70	\$50	\$35
PSI-5A4E (2.85" Square x .0075"T)	T107-A4E-602	\$100	\$60	\$40	\$30
PSI-5A4E (2.85" Square x .0105"T)	T110-A4E-602	\$100	\$70	\$50	\$35
PSI-5A4E (2.85" Square x .020"T)	T120-A4E-602	\$125	\$90	\$70	\$60
PSI-5A4E (2.85" Square x .040"T)	T140-A4E-602	\$150	\$120	\$90	\$80
PSI-5A4E (2.85" Square x .080"T)	T180-A4E-602	\$250	\$200	\$175	\$150

ภาพที่ ข-1 รายละเอียดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

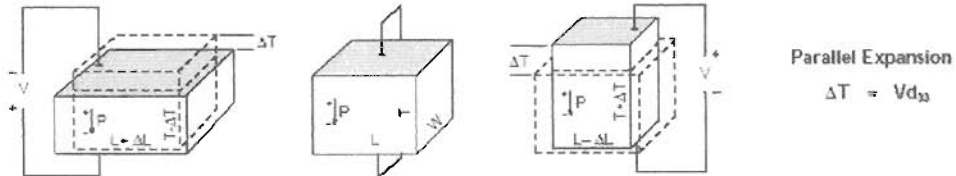
PIEZO KANIC
APPL. & TECH. CO., LTD.

PIEZO SYSTEMS, INC.

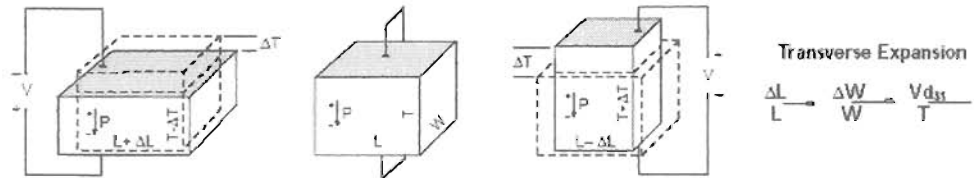
186 Massachusetts Avenue Cambridge, MA 02139 • Tel: (617) 547-1777 • Fax: (617) 354-2200 • Web: www.piezo.com • E-mail: sales@piezo.com

MOTOR TRANSDUCER RELATIONSHIPS

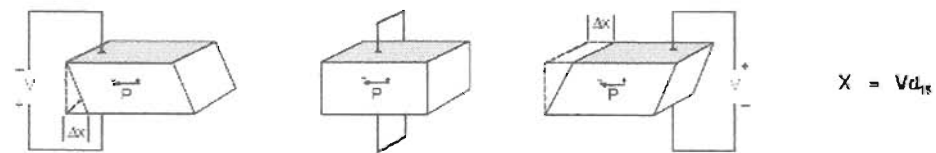
PARALLEL EXPANSION & CONTRACTION MOTOR



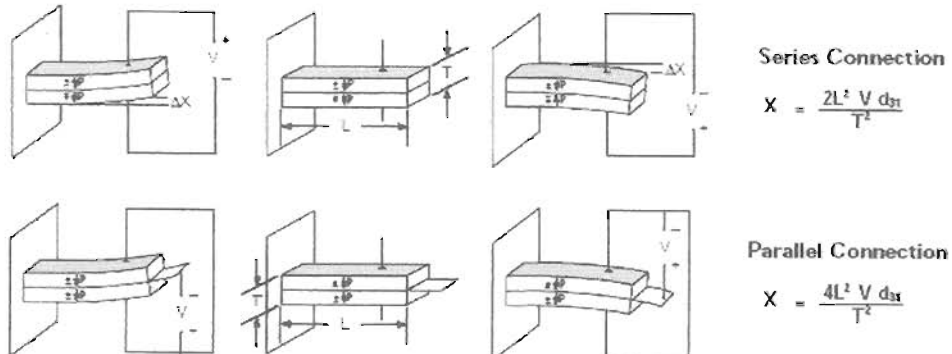
TRANSVERSE EXPANSION & CONTRACTION MOTOR



PARALLEL SHEAR MOTOR



BENDING MOTOR



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายอำนาจ อิ่มเจริญ
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การลดความสั่นสะเทือนของคานปลายอิสระโดยวิธีควบคุมแบบทำนาย
 เดดบีท
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2522 เป็นบุตรของนายเลิศ อิ่มเจริญ และนางมานิตย์ อิ่มเจริญ อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 40 หมู่ 7 ตำบลศรีสะเกษบือ อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก รหัสไปรษณีย์ 26120

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2540 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายปีที่ 6 โรงเรียนองครักษ์ จังหวัดนครนายก พ.ศ. 2544 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

ประวัติการทำงาน มี.ย. 46-ต.ค. 46 ทำงานเป็นผู้ช่วยสอนวิชาไดนามิคในระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ