



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การศึกษาเปรียบเทียบตัวควบคุมฟัซซี่ นิวรอลเน็ตเวิร์ค
และพีไอดี ควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน

Comparison of Fuzzy Neural and PID Controller
with Ball on Beam Balancer

โดย

นายปรีชา สาคะรังค์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

รายงานการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

2544

(ก)

ชื่อเรื่อง : การศึกษาเปรียบเทียบตัวควบคุมพืชชี่ นีวรอลเน็ตเวิร์ค และพีไอดี ควบคุมชุดทดลอง
ลูกบอลบนคาน

ผู้วิจัย : นายปรีชา สาकरังค์

สถาบัน : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ปีที่พิมพ์ : 2544

สถานที่พิมพ์ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

แหล่งที่เก็บรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

จำนวนหน้างานวิจัย : 22 หน้า

: ศูนย์วิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

คำสำคัญ : ตัวควบคุมพืชชี่ ตัวควบคุมนีวรอล ตัวควบคุมพีไอดี ชุดทดลองลูกบอลบนคาน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพืชชี่ ตัวควบคุมนีวรอลเน็ตเวิร์ค และตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพโดยธรรมชาติ ขั้นตอนการวิจัยเริ่มต้นจากการปรับปรุงโครงสร้างทางกลของชุดทดลอง ออกแบบตัวควบคุมแต่ละชนิด ทดสอบควบคุมกับชุดทดลองและปรับแต่งค่าตัวแปรจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ตัวควบคุมแต่ละแบบมีความสามารถในการควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคานได้อย่างดีและมีเสถียรภาพ ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวและ โอเวอร์ชูทที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

Title : Comparison of Fuzzy Neural and PID Controller with Ball on Beam Balancer

Researcher : Mr. Preecha Sakarung

Institution : Dhurakijpundit University

Year of Publication : 2001

Publisher : Dhurakijpundit University

Source

No. of page 22 page

: Research Center, Dhurakijpundit University

Keyword : Fuzzy, Neural, PID, Ball on Beam Balancer

Abstract

The aims of this research is to conduct a comparative study on the control performances of three controllers, namely the fuzzy controller, neural network controller and PID controller, with the application to a Ball-on-Beam balancer which is an open loop unstable plant.

The research begins by improving the mechanical structure of the Ball-on-Beam balancer. Next, the three controllers are designed with a suitable adjusting of tuning parameter and, applied to the balancer. Finally, the control performances of the controllers are studied and compared. The study shows that each controller is able to stabilize the Ball-on-Beam balancer very well. The control performance, in term of steady state error and overshoot of the response, resulting from each controller is not much different.

(ค)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยเรื่องการสร้างและพัฒนาชุดทดลองลูกบอลบนคาน การทำงานต่อเนื่องมีผลดีหลายประการ เช่นความรู้ในเชิงลึกและการขยายผลของงานที่ทำให้ดียิ่งขึ้น แนวคิดนี้ได้รับมาจาก ร.ศ. ดร. สรชัย พิศาลบุตร รองอธิการฯ ฝ่ายวิจัยเมื่อครั้งขอทุนทำวิจัย และท่านยังช่วยซักถามถึงความก้าวหน้าของงานตลอด การผลักดันให้มีงานวิจัยได้รับการสนับสนุนจาก ผ.ศ. จุมพล พรหมพิทักษ์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับรูปแบบและแนวคิดที่ทำให้มีกำลังใจในการทำงานวิจัย ได้รับเป็นอย่างดีและต่อเนื่องจากอาจารย์ สนิธระวา ความดิษฐ์ เลขฯ ศูนย์วิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาทุกคนที่ได้ร่วมทำโครงการวิศวกรรม ซึ่งช่วยเป็นมือเป็นไม้ในการสร้างชุดทดลองลูกบอลบนคานให้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ที่ให้ทุนอุดหนุน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1	
บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
ตัวควบคุมพีไอดี	4
ตัวควบคุมพีซีซี	4
ตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์ค	8
บทที่ 3	
ระเบียบวิธีวิจัย	10
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	10
รายละเอียดเกี่ยวกับชุดทดลองลูกบอลบนคาน	11
บทที่ 4	
ผลการวิจัย	13
ตัวควบคุมพีไอดี	13
ตัวควบคุมพีซีซี	14
ตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์ค	15
บทที่ 5	
สรุปและข้อเสนอแนะ	19
สรุปผลการวิจัย	19
ข้อเสนอแนะ	20

ก. รูปแสดงการทำงานของชุดทดลองลูกบอลบนคาน



(จ)

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กฎที่ใช้สำหรับพืชชนิดพืช	7



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุม	4
2.2 ระบบควบคุมพีซีซี	5
2.3 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีตัวควบคุมพีซีซีชนิดพีดีเป็นตัวควบคุม	5
2.4 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุททั้งสอง	6
2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุท	7
2.6 โครงสร้างฟีดฟอร์เวิร์ดมัลติเพลเยอร์นิรอลเน็ตเวิร์ค	8
2.7 แผนผังการสอนตัวอิมูเลเตอร์	8
2.8 แผนผังการสอนตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค	9
3.1 ชุดทดลองลูกบอลบนคานปี พ.ศ. 2541	10
3.2 ชุดทดลองลูกบอลบนคานปี พ.ศ. 2544	11
3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน	12
3.4 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และชุดฮาร์ดแวร์	12
4.1 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมพีดี	13
4.2 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุททั้งสอง	14
4.3 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซีซี	14
4.4 ข้อมูลการสอนอิมูเลเตอร์	15
4.5 ข้อมูลการสอนตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค	15
4.6 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค	16
4.7 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล	16
4.8 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล	17
4.9 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล	17
4.10 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล	18

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบควบคุมแบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) ได้รับความนิยมนในการวิจัยอย่างแพร่หลาย เหตุผลประการหนึ่งคือความสามารถในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Plant) ได้ดี และออกแบบตัวควบคุมโดยไม่จำเป็นต้องทราบสมการคณิตศาสตร์ที่แทนระบบที่ต้องการควบคุมอย่างละเอียด นอกจากนี้ยังสามารถนำเอาระบบปัญญาประดิษฐ์สนับสนุนหรือเสริมเข้าไปกับระบบควบคุมแบบเดิม (Classical Controller) เพื่อให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ระบบปัญญาประดิษฐ์ที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้คือระบบฟัซซี่ (Fuzzy) และระบบนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural Network)

ชุดทดลองลูกบอลบนคาน (Ball on Beam Balancing) เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพโดยธรรมชาติ (Unstable Plant) เหมาะสมกับการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม ว่าสามารถควบคุมระบบที่ไม่มีเสถียรภาพได้หรือไม่และผลตอบสนองของระบบเร็วหรือช้าเพียงไร เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าชุดทดลองลูกบอลบนคานเป็นระบบทดสอบมาตรฐานระบบหนึ่งที่ห้องปฏิบัติการระบบควบคุมป้อนกลับควรมี

เป็นการยอมรับโดยทั่วไปว่าการศึกษาด้านระบบควบคุมป้อนกลับ จะต้องประกอบไปด้วย การศึกษาทางด้านทฤษฎี และการลงปฏิบัติกับระบบที่ทำงานได้จริง ทั้งนี้เพื่อทดสอบทฤษฎีซึ่งส่วนประกอบทั้งสอง จะทำให้การศึกษามีผลสำเร็จ และทำให้นักศึกษามีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอในแนวทางที่สอดคล้องกับคำกล่าวข้างต้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบควบคุมซึ่งเสนอไว้สามแบบคือระบบควบคุมฟัซซี่ระบบควบคุมนิวรอลเน็ตเวิร์ค และระบบควบคุมพีไอดี เพื่อใช้ในควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน โดยในส่วนแรกทำการปรับปรุงชุดทดลองลูกบอลบนคานให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เช่นลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับสัญญาณที่วัดได้ ระบบส่งกำลังที่คล่องตัว เป็นต้น ถัดมาเป็นการออกแบบตัวควบคุมซึ่งแต่ละแบบจะทำการทดสอบกับชุดทดลอง และปรับแต่งตัวแปรจนได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ส่วนสุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อใช้ควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประยุกต์ใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะกับชุดทดลองลูกบอลบนคาน
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีชชี ตัวควบคุมนิรโรลเน็ตเวิร์ค และตัวควบคุมพีไอดี

ขอบเขตของการวิจัย

สร้างชุดทดลองลูกบอลบนคานและตัวควบคุม ทดสอบตัวควบคุมกับชุดทดลองลูกบอลบนคาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประยุกต์ใช้ตัวควบคุมอัจฉริยะควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคานได้ และสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแต่ละแบบในแง่ของลักษณะเด่นและลักษณะด้อย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2538 Kim C. Ng and Mohan M. Trivedi [1] ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคานโดยยกข้อดีของฟัซซี่ในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี ออกแบบใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบน้อยกว่า ผลตอบสนองเมื่อควบคุมปรากฏว่าลูกบอลอยู่ตรงกลางได้โดยมีคาบการแกว่งด้านซ้าย 20 cm และด้านขวา 30 cm และในปีเดียวกันกับผู้เขียนชุดเดิมได้ใช้ตัวควบคุมผสมระหว่างฟัซซี่และนิรอลเน็ตเวิร์คทำการควบคุม ผลตอบสนองเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมปรากฏว่าลูกบอลอยู่ใกล้จุดหมุนโดยมีคาบการแกว่งอยู่ในช่วง 40 cm [2]

ปี พ.ศ. 2539 M.A. Marra, B.E. Boling and B.L. Walcott [3] ประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) กับชุดทดลองลูกบอลบนคาน ได้ผลตอบสนองที่ดีจากการจำลอง Li-Xin Wang [4] ออกแบบระบบฟัซซี่โดยใช้หลักการของระบบควบคุมออปติ멈 (Optimal Control) ด้วยวิธีการ Pontryagin Minimum Principle ผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองเป็นที่น่าพอใจ ในปีถัดมา J. Glower and J. Munighan [5] ได้ประยุกต์ใช้ Variable Structure ควบคู่กับระบบฟัซซี่ควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน ได้ผลตอบสนองที่ดีจากการจำลอง

ปี พ.ศ. 2542 M.G. Joo and Jin S. Lee [6] ใช้โครงสร้างระบบฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno ทำการควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน จากการจำลองได้ผลตอบสนองที่ดี นอกจากนี้ยังมีบทความที่ดีพิมพ์เกี่ยวกับการควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคานอีกมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพโดยธรรมชาติซึ่งจำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุมเท่านั้นจึงจะมีเสถียรภาพได้ และเป็นระบบที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

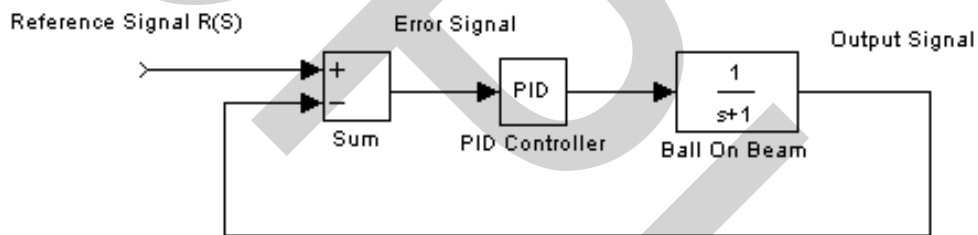
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของตัวควบคุมที่นำมาใช้โดยจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ 1. ตัวควบคุมพีไอดี 2. ตัวควบคุมฟัซซี่และ 3. ตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค โดยทั้งสามแบบจะกล่าวเฉพาะที่ใช้ในการวิจัยเท่านั้น

ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่มีมานาน เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย และใช้งานได้ดีในงานควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะใช้งานง่าย และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมของโรงงาน ตัวควบคุมชนิดนี้เหมาะกับการควบคุมระบบที่ไม่ซับซ้อน ตัวควบคุมพีไอดีจะควบคุมผ่านแกนแสดงได้ดังสมการ 2.1

$$u = e * \left(K_P + \frac{K_I}{S} + K_D S \right) \quad (2.1)$$

สัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) และค่าสัญญาณเอาต์พุต (Output Signal) ส่งผ่านมาที่อินพุตของตัวควบคุมพีไอดีและคูณกับแกน K_P ของตัวควบคุมพรีออปอร์ชันแนล (Proportional) คูณกับตัวควบคุมอินทิกรัล (Integral) ด้วยแกน K_I เพื่อลดค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-State Error) และคูณกับตัวควบคุมอนุพันธ์ (Derivative) K_D เพื่อลดโอเวอร์ชูท (Overshoot) และเวลาขาขึ้น (Rise Time) ดังรูปที่ 2.1



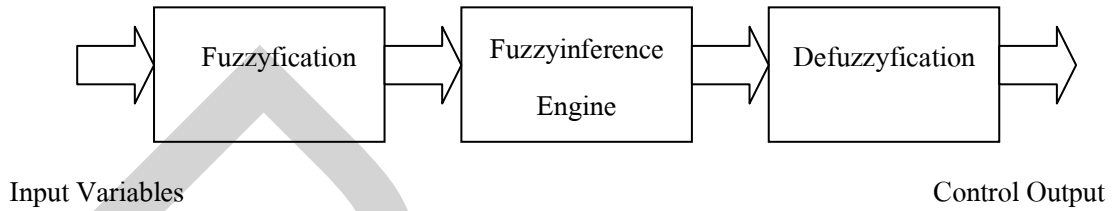
รูป 2.1 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุม

วิธีการปรับค่าตัวเกนของตัวควบคุมพีไอดี งานวิจัยใช้วิธีของ Ziegler-Nicols โดยจะหาค่าเกน K_{max} และคาบออสซิลเลท T จากนั้นจะนำค่าที่ได้มาหาค่าเกนของตัวควบคุม โดยเริ่มแรกจะปรับค่า K_D และ K_I ให้มีค่าเป็นศูนย์ก่อน ต่อจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มค่าเกน K_P จนกระทั่งระบบแกว่ง (Oscillate) โดยวัดจากสัญญาณเอาต์พุต วัดคาบของการแกว่ง T และสามารถหาค่าเกนของตัวควบคุมพีดีได้ตามสมการ $K_P = 0.6k_{max}$ และ $K_D > 0.125k_{max}T$ นำค่าเกนที่ได้ไปทดสอบควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคานและทำการปรับด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อหาผลตอบสนองที่ดีที่สุด

ตัวควบคุมฟัซซี่

ตัวควบคุมฟัซซี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ 1. ฟัซซี่ฟิเคชัน (Fuzzyfication) คือ ส่วนรับสัญญาณอินพุตจากภายนอกและแปลงให้อยู่ในรูปแบบฟัซซี่เซต 2. ฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์

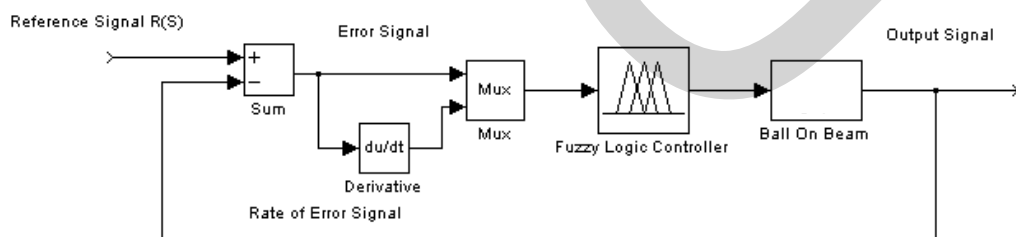
เอนจิน (Fuzzy Inference Engine) คือส่วนตัดสินใจเพื่อส่งคำสั่งควบคุมออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับกฎที่เขียนขึ้น ฟัซซี่เซตของอินพุตและเอาต์พุต 3. ดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) ในส่วนนี้ จะนำเอาคำสั่งควบคุมที่ได้แปลงกลับไปอยู่ในรูปแบบที่ใช้งานได้จริง บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมฟัซซี่แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมฟัซซี่

มีวิธีการออกแบบระบบควบคุมฟัซซี่มากมายเช่น การออกแบบโดยอาศัยความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมระบบควบคุมหรือการออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับกระบวนการนั้นๆ โดยเฉพาะ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบควบคุมฟัซซี่ไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอนตายตัว โดยทั่วไปจะทำการปรับฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต หลังจากการสร้างกฎควบคุมและทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแล้ว วิธีที่มีประสิทธิภาพและง่ายซึ่งสามารถทำได้กับการปรับระบบฟัซซี่คือใช้หลักการของตัวควบคุมพีดี

ฟัซซี่ชนิดพีดีมีชื่อมาจากการใช้อินพุตคือสัญญาณค่าความผิดพลาด และอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด เพื่อสร้างคำสั่งควบคุมซึ่งคล้ายกับตัวควบคุมแบบพีดี แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดพีดีเป็นตัวควบคุม

ตัวแปรที่ใช้คือค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (e) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (Δe) และคำสั่งควบคุม (u) ในขั้นตอนการแปลงฟัซซีฟิเคชันจะใช้ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) ของทั้งสองตัวแปรอินพุต 5 ระดับคือ

PB : Positive Big

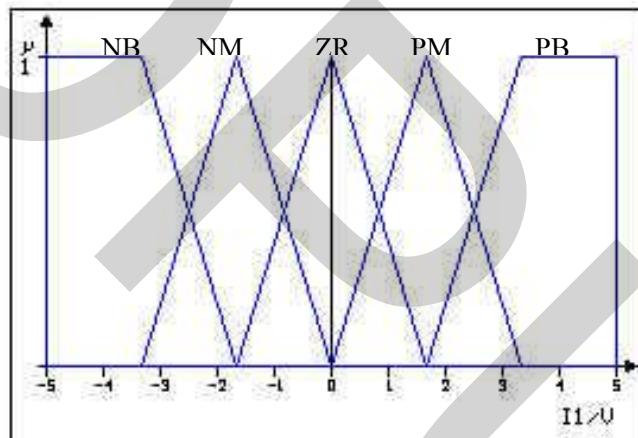
PM : Positive Medium

ZR : Zero

NB : Negative Big

NM : Negative Medium

ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ใช้คือรูปสามเหลี่ยม โดยมี ความเป็นสมาชิก อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (Degree of Grade of Membership [0,1]) ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุตทั้งสอง

ฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์อนินจะทำงานตามกฎควบคุม (Control Rule) ที่เขียนขึ้น กฎควบคุมของฟัซซีมีรูปแบบของฟังก์ชันเงื่อนไข ถ้าและดังนั้น (IF-THEN) กฎแต่ละกฎจะบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต จากบทความของ S. Kawaji, T. Maeda and N Matsunaga [7] ได้เสนอกฎที่ใช้สำหรับฟัซซีชนิดพีดีแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กฎที่ใช้สำหรับฟuzzyชนิดพีดี

$\Delta e \setminus e$	NB	NM	ZR	PM	PB
PB	ZR	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZR	PS	PM	PB
ZR	NM	NS	ZR	PS	PM
NM	NB	NM	NS	ZR	PS
NB	NB	NB	NM	NS	ZR

ดีฟuzzyพีเคชั่น เป็นการตัดสินใจเพื่อให้เกิดคำสั่งควบคุม กฎทุกข้อจะทำงานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าสัญญาณอินพุท ซึ่งแน่นอนคำสั่งเอาต์พุทจะเปลี่ยนแปลงตามกฎที่มีอิทธิพลมากที่สุด ค่าที่ได้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้งานได้จริงโดยใช้ฟังก์ชัน MAX-MIN และแทนตัวแปรเอาต์พุทด้วยฟังก์ชันสมาชิก 7 ระดับคือ

PB : Positive Big

PM : Positive Medium

PS : Positive Small

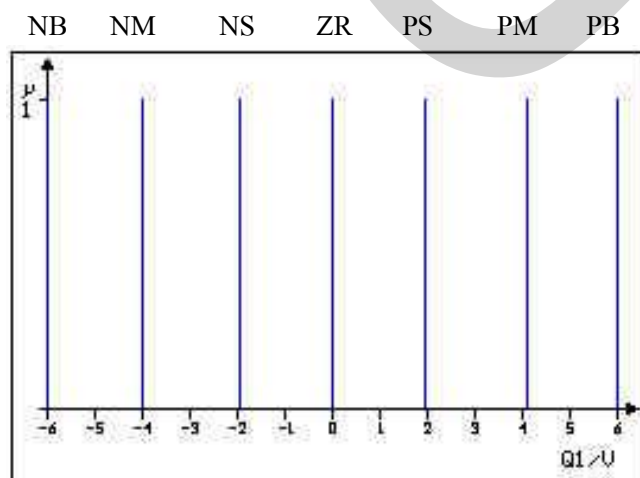
ZR : Zero

NB : Negative Big

NM : Negative Medium

NS : Negative Small

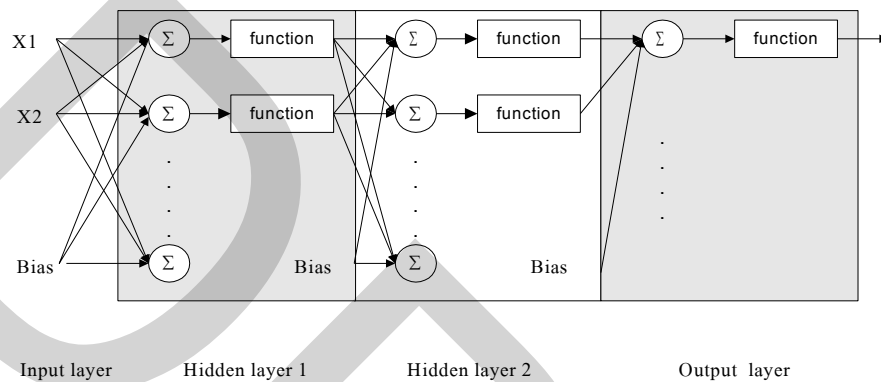
ใช้ค่าเดี่ยว (Singleton) สำหรับตัวแปรเอาต์พุทและมีความเป็นสมาชิก อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุท

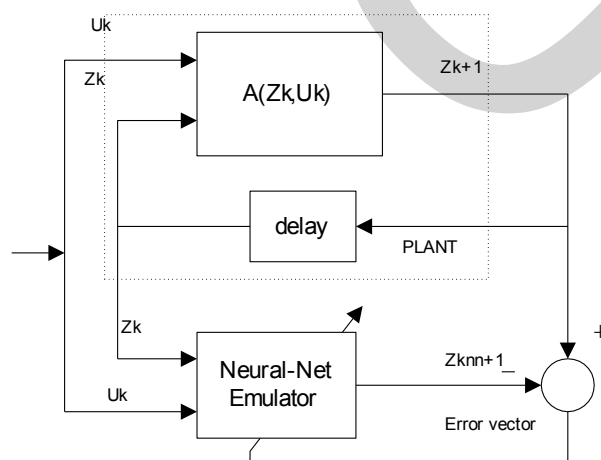
ตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์ค

ความสามารถของนิวโรลเน็ตเวิร์คในการทำเลียนแบบระบบต่างๆได้เหมือนกับต้นฉบับโดยการสร้างระบบอีกระบบที่มีโครงสร้างภายในแบบนิวโรลเน็ตเวิร์ค แต่มีความสามารถเหมือนกับระบบที่เป็นต้นแบบ และยังสามารถเรียนรู้เพื่อปรับตัวแปรภายในตัวเองได้ จึงทำให้ตัวควบคุมแบบนี้เป็นที่น่าสนใจและนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างมากมาย ในการวิจัยนี้ได้ใช้โครงสร้างแบบฟีดฟอร์เวิร์ดมัลติเลเยอร์นิวโรลเน็ตเวิร์ค (Feedforward Multilayer Neural) ดังรูปที่ 2.6



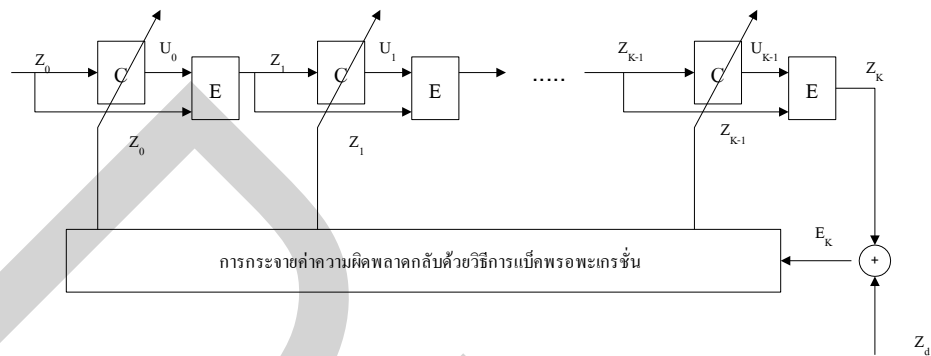
รูปที่ 2.6 โครงสร้างฟีดฟอร์เวิร์ดมัลติเลเยอร์นิวโรลเน็ตเวิร์ค

และใช้วิธีการสอนแบบเรียนรู้เอง (Self Learning) ของ D,H Nguyen และ B. Widrow [8] วิธีการนี้จะสอนนิวโรลเน็ตเวิร์คทั้งหมดสองตัว คือเริ่มต้นด้วยการสอนนิวโรลเน็ตเวิร์คตัวแรก เรียกว่า อีมูเลเตอร์ (Emulator) ด้วยกฎการปรับแต่งค่าตัวแปรน้ำหนักแบบ Standard Backpropagation [9] ให้เลียนแบบพฤติกรรมของระบบที่จะถูกควบคุม แผนผังการสอนตัวนิวโรลเน็ตเวิร์คอีมูเลเตอร์แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังการสอนตัวอีมูเลเตอร์

หลังจากการสอนตัวอีมีเลเตอร์ ได้ผลเป็นที่ต้องการแล้ว ก็ทำการสอนตัวนิวรอลเน็ตเวิร์คอีกตัวหนึ่ง เรียกว่าตัวควบคุมนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural Network Controller) แผนผังการสอนแสดงในรูปที่ 2.8 หลังจากการสอนเสร็จสิ้นแล้วนิวรอลเน็ตเวิร์คอีมีเลเตอร์จะไม่ถูกใช้อีกต่อไป เฉพาะตัวควบคุมนิวรอลเน็ตเวิร์คเท่านั้นที่ใช้ในระบบควบคุม



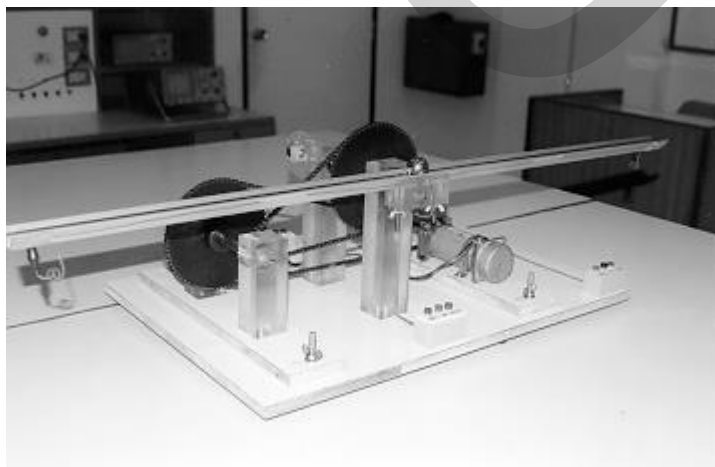
รูปที่ 2.8 แผนผังการสอนตัวควบคุมนิวรอลเน็ตเวิร์ค

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงพัฒนาการของชุดทดลองลูกบอลบนคานที่สร้างขึ้น ที่ห้องปฏิบัติการระบบควบคุมและการวัด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ วิธีพัฒนาได้มาจาก ปัญหาและข้อเสนอแนะของโครงการวิศวกรรมของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 [10], [11] ชุดทดลองลูกบอลบนคานได้ทำเปลี่ยนแปลงทั้งโครงสร้างทางกล (Mechanical Design) และไฟฟ้า (Electrical Design) การออกแบบทางกลหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับชุดการขับเคลื่อน การส่งกำลังงานจากมอเตอร์ไปที่จุดหมุนของราง การติดตั้งระบบตรวจจับตำแหน่งลูกบอลบนคานแบบต่างๆ เป็นต้น ส่วนการออกแบบทางไฟฟ้าจะหมายถึงการ ปรับปรุงวงจรตรวจจับตำแหน่งลูกบอลบนคาน วงจรกรองสัญญาณรบกวน วงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

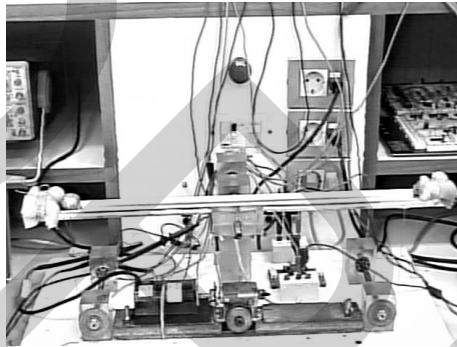
ปี พ.ศ. 2541 ได้มีการสร้างชุดทดลองลูกบอลบนคานขึ้น [10] โครงสร้างทางกลสร้างโดยอ้างอิงต้นแบบจาก B. Shahian and M. Hassul [12] แต่ปรับโครงสร้างทางกลให้สามารถจัดหาอุปกรณ์ได้ภายในประเทศซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์กระแสไฟตรง ส่งกำลังผ่านเฟืองและโซ่ ดังรูป 3.1 ระบบตรวจวัดตำแหน่งลูกบอลบนคานใช้ลวดนิโครมติดตั้งบนรางอลูมิเนียม ระบบตรวจจับมุมเอียงของคานใช้โพเทนชิโอมิเตอร์หมุนได้ 10 รอบมีค่าความต้านทาน $5\text{ k}\Omega$ วงจรตรวจจับตำแหน่งลูกบอลบนคานใช้ความแตกต่างของค่าความต้านทานทางซ้าย และทางขวาของตำแหน่งที่ลูกบอลลัดวงจร วงจรจับมอเตอร์กระแสไฟตรงใช้ IC เบอร์ 165 สองตัวช่วยจับกระแส



รูป 3.1 ชุดทดลองลูกบอลบนคานปี พ.ศ. 2541

ชุดทดลองลูกบอลบนคานได้รับการพัฒนาในหนึ่งปีถัดมา [11] ระบบส่งกำลังยังคงใช้ระบบเฟืองและโซ่แต่ได้ลดมวลของเฟืองลงเหลือ 1 ใน 4 โดยการเจาะรูที่เฟือง เปลี่ยนโพเทนชิโอมิเตอร์ที่ใช้วัดมุมเอียงของรางเป็น 1 รอบ มีค่าความต้านทาน $5\text{ k}\Omega$ เปลี่ยนมอเตอร์กระแสตรงเป็นกระแสไฟสลับพร้อมชุดขับของ YASAWA SERVOPACK Model SGDA 01BS 100 Watt 2.2A

ระบบลูกบอลบนคานยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนระบบส่งกำลังจากเดิมเป็นระบบโซ่และเฟืองมาเป็นระบบส่งกำลังแบบเชือกแทน แก้ปัญหาเรื่องอัตราทดรอบของระบบเฟืองซึ่งมีค่าต่ำ โดยใช้อุปกรณ์เกียร์ทดซึ่งมีอัตราทดรอบสูง และมีขนาดเล็กกว่ามากทำให้มอเตอร์ไม่ต้องใช้ทอร์คค่าสูงตอนเริ่มออกตัวหมุน ปรับปรุงระบบการวัดตำแหน่งลูกบอลบนคานโดยทำให้หน้าสัมผัสระหว่างลูกเหล็กและลวดนิโครมแนบชิดมากขึ้น ดังรูป 3.2

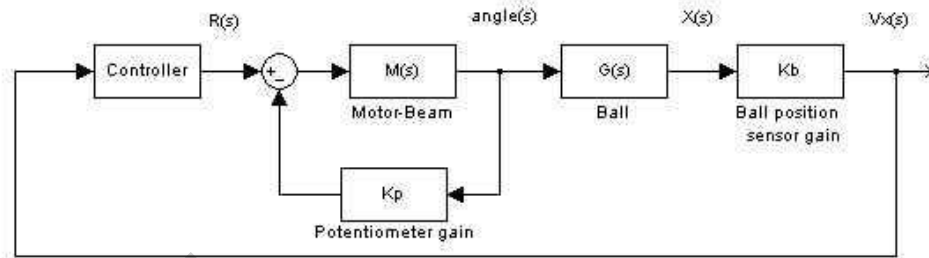


รูป 3.2 ชุดทดลองลูกบอลบนคานปี พ.ศ. 2544

รายละเอียดเกี่ยวกับชุดทดลองลูกบอลบนคาน

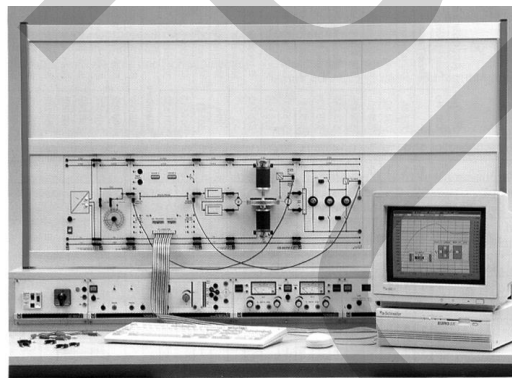
ชุดทดลองลูกบอลบนคานใช้รางซึ่งมีความยาว 50 cm. และจ่ายแรงดันมีค่าเท่ากับ $\pm 15\text{ V}$ เพื่อตรวจจับตำแหน่งลูกบอลบนคาน โดยวัดตำแหน่งลูกบอลจากด้านซ้ายสุดไปยังด้านขวาสุดได้เท่ากับ 3.43 V ถึง -3.85 V การเคลื่อนที่ของคานสามารถวัดได้จากโพเทนชิโอมิเตอร์วัดมุม คานสามารถเอียงได้ประมาณ ± 45 องศา เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงโพเทนชิโอมิเตอร์วัดมุม $\pm 15\text{ V}$ สามารถวัดแรงดันจากการเอียงของคานทางด้านซ้ายสุดไปทางด้านขวาสุดเท่ากับ $+12.40\text{ V}$ ถึง -11.38 V ตามลำดับ อัตราทดรอบของเกียร์ทดเท่ากับ 70 ต่อ 1 มอเตอร์กระแสสลับมีความเร็ว 3000 r/min แรงบิดเท่ากับ $0.318\text{ N}\cdot\text{M}$ กินกระแสไฟสูงสุดเท่ากับ 2.2 A

การทดลองควบคุมจะเริ่มจากการติดตั้งชุดทดลองลูกบอลบนคานให้เสร็จเรียบร้อย ดังรูป 3.3 ตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตทุกตัวว่าปกติ และสามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้อง ต่อจากนั้นจะนำตัวควบคุมแต่ละแบบมาทดลองควบคุมโดยเรียงดังจาก ตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมพีซซี และตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์ค



รูป 3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน

ในงานวิจัยหลังจากได้ออกแบบตัวควบคุมพีดีและตัวควบคุมพีซซีเรียบร้อยแล้วจะนำค่าที่ได้ไปใช้ควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน โดยการใส่ค่าที่จำเป็นสำหรับตัวควบคุมพีดีและตัวควบคุมพีซซีลงไปในชุดฮาร์ดแวร์ของบริษัท Leybold Didactic GmbH ซึ่งประกอบด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซ CASSY (A/D Interface) โปรแกรมตัวควบคุมพีดี และโปรแกรมตัวควบคุมพีซซี การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และชุดฮาร์ดแวร์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และชุดฮาร์ดแวร์

ตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์คออกแบบโดยใช้โปรแกรมภาษา C ที่เขียนขึ้นเป็นโปรแกรมสำหรับการสอนตัวอิมูเลเตอร์และตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค หลังจากได้ค่าตัวแปรที่ต้องการแล้วจะนำไปใส่ในโปรแกรม LABVIEW เพื่อทำการควบคุมกับชุดทดลองลูกบอลบนคาน โดยผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น Lab-PC+ ของบริษัท NATIONAL INSTRUMENTS

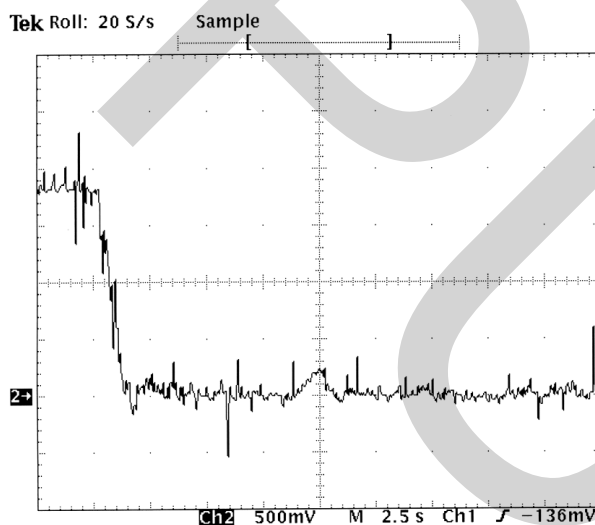
บทที่ 4

ผลการวิจัย

การทดลองควบคุมเริ่มจากการติดตั้งชุดทดลองลูกบอลบนคาน ตรวจสอบความปกติของสัญญาณเอาต์พุตทุกตัวที่ได้ และทดลองควบคุมโดยเรียงจาก ตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมพีซี และตัวควบคุมนิวโรเน็ตเวิร์ค ผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียดดังนี้

ตัวควบคุมพีดี

หลังจากนำค่าเกนเริ่มต้นไปทดสอบควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคาน และทำการปรับด้วยวิธีลองผิดลองถูกเพื่อหาผลตอบสนองที่ดีที่สุดจะได้ค่าเกนของตัวควบคุมพีดี คือ $K_P = 3.5$ และ $K_D = 2$

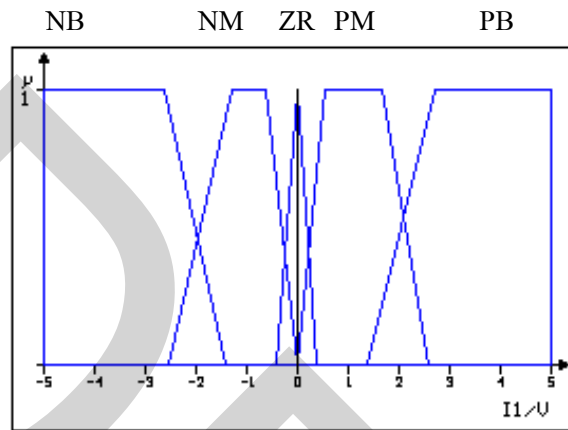


รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมพีดี

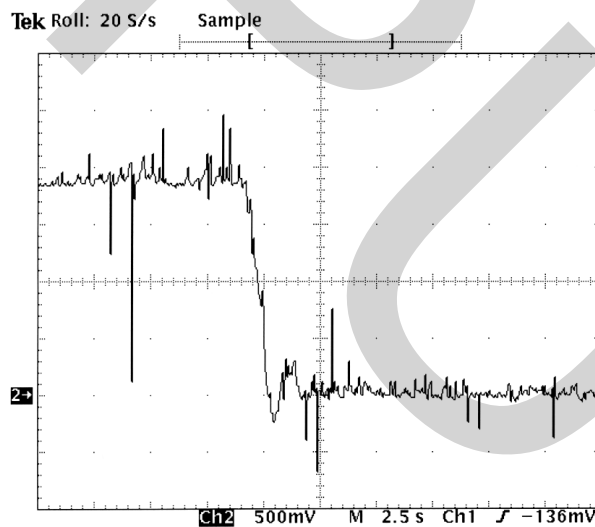
ตำแหน่งเริ่มต้นของลูกบอลประมาณ 7 cm. ห่างจากจุดหมุน ระบบควบคุมพีดีสามารถควบคุมให้ลูกบอลเคลื่อนที่มากลึงวนรอบจุดหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีโอเวอร์ชูตเล็กน้อย การทำงานของชุดทดลองมีเสียงดังพอสมควร เนื่องมาจากการทำงานของมอเตอร์ที่ต้องกลับทางหมุนตลอดเวลา ตำแหน่งลูกบอลกลึงวนรอบจุดหมุนอยู่ในรัศมี 1.5 cm.

ตัวควบคุมพีซีซี

การปรับแต่งค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีซีซีจะใช้วิธีการลองผิดลองถูก โดยการพิจารณาจากค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว โอเวอร์ชูทและเสถียรภาพ ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุทจะมีการซ้อนทับกันมากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้จุดหมุน ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุททั้งสอง

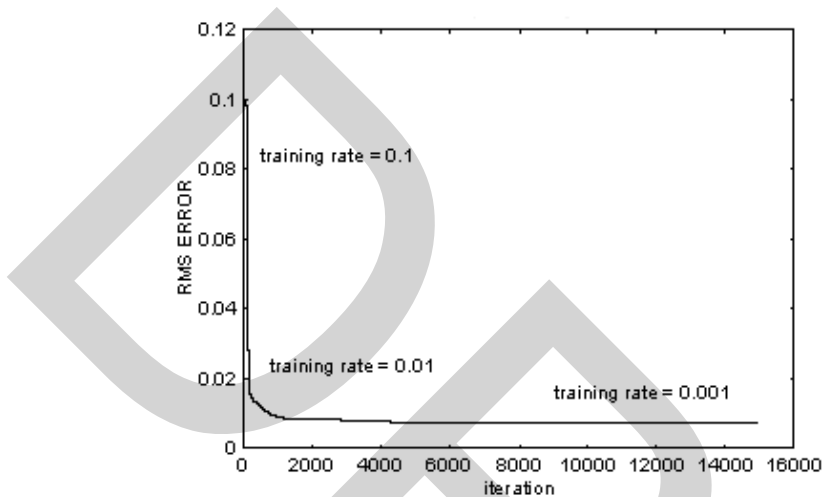


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซีซี

ตำแหน่งเริ่มต้นของลูกบอลประมาณ 7 cm. ห่างจากจุดหมุน ระบบควบคุมพีซีซีสามารถควบคุมให้ลูกบอลเคลื่อนที่มากลื่นวนอยู่รอบจุดหมุนได้ โดยมีโอเวอร์ชูทสูงกว่าตัวควบคุมพีดี เสถียรภาพของระบบอยู่ในเกณฑ์ดีซึ่งสังเกตได้จากค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลูกบอลลื่นวนรอบจุดศูนย์กลางในรัศมี 1 cm.

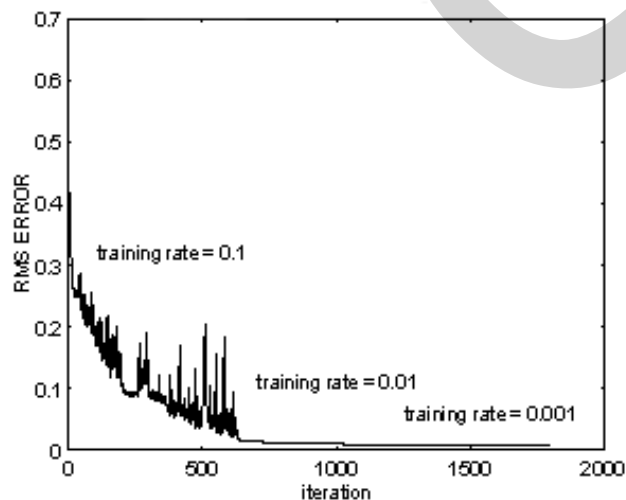
ตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค

โครงสร้างของตัวอิมูเลเตอร์จะเป็นนิรอลเน็ตเวิร์คแบบ 2 ฮิดเดนเลเยอร์ (hidden layers) โดยฮิดเดนเลเยอร์แรกมีจำนวน 16 จุดรวมและฮิดเดนเลเยอร์ที่สองมีจุดรวม 6 จุดรวม จุดรวมของชั้นอินพุทและชั้นเอาต์พุทคือ 1 และ 2 จุดรวมตามลำดับ สอนตัวอิมูเลเตอร์จนได้ค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (RMS ERROR) สุดท้ายเท่ากับ 0.007 ดังรูปที่ 4.4

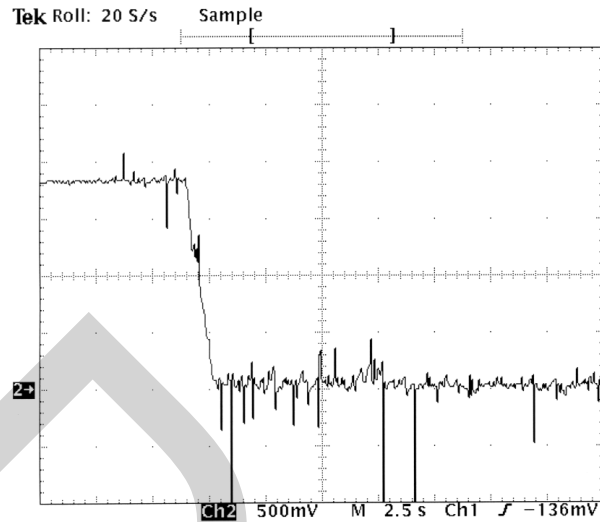


รูปที่ 4.4 ข้อมูลการสอนอิมูเลเตอร์

โครงสร้างของตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์คจะเป็นนิรอลเน็ตเวิร์คแบบ 1 ฮิดเดนเลเยอร์ โดยฮิดเดนเลเยอร์มีจำนวน 8 จุดรวม จุดรวมของชั้นอินพุทและชั้นเอาต์พุทคือ 2 จุดรวม และ 1 จุดรวมตามลำดับ สอนตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์คจนได้ค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (RMS ERROR) สุดท้ายเท่ากับ 0.007303 ดังรูปที่ 4.5



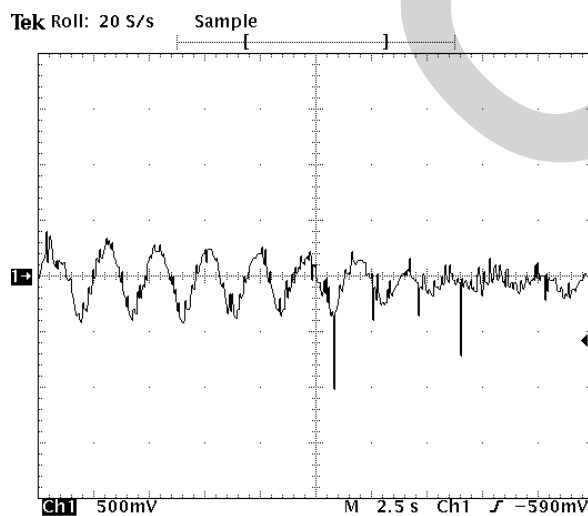
รูปที่ 4.5 ข้อมูลการสอนตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอลเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์ค

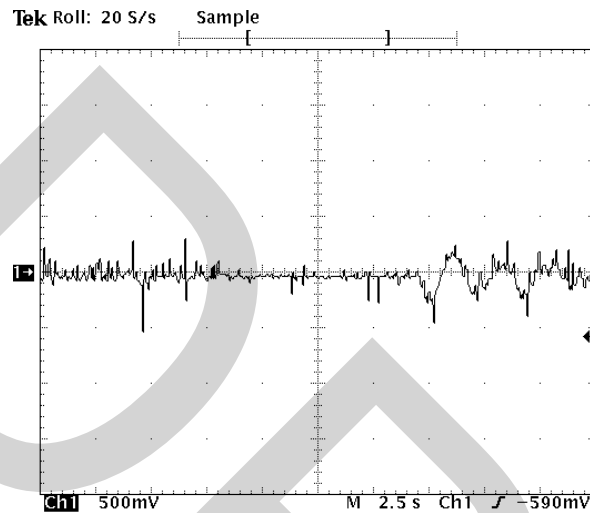
ระบบควบคุมนิรอลเน็ตเวิร์คสามารถควบคุมให้ลูกบอลเคลื่อนที่มากถึงวงรอบจุดหมุนได้ จากรูปที่ 4.6 ลูกบอลมีตำแหน่งเริ่มต้นห่างจากจุดหมุนประมาณ 7 cm. เคลื่อนที่เข้ามาใกล้จุดหมุน โดยไม่มีโอเวอร์ชูทเกิดขึ้น การทำงานของมอเตอร์ราบเรียบขึ้น เสียงดังน้อยลง ลูกบอลกลิ้งวงรอบจุดหมุนอยู่ในรัศมีน้อยกว่า 1 cm.

จากผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมทั้งสามแบบเมื่อระบบควบคุมสามารถควบคุมชุดทดลอง ลูกบอลบนคานเข้าใกล้จุดหมุนได้แล้ว พฤติกรรมของชุดทดลองจะมีลักษณะคล้ายกันดังนี้



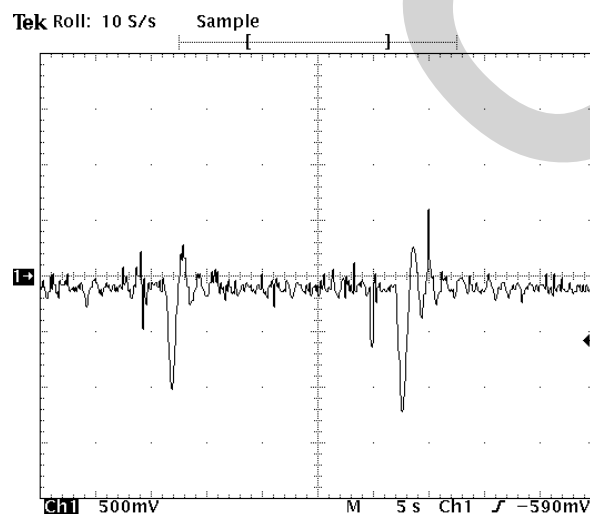
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล

เมื่อวางลูกบอลห่างจากจุดหมุนระยะหนึ่ง ตัวควบคุมจะพยายามเคลื่อนลูกบอลให้เข้าสู่จุดหมุน โดยสังเกตจากสัญญาณที่วัดระยะทางที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เส้นตรงที่เกิดขึ้นบนค่าสัญญาณที่วัดได้มาจากความสัมพันธ์หลายประการ เช่น ชุดคัปปี้งระหว่างมอเตอร์และเกียร์ทดรอบ ความฝืดของราง หน้าสัมผัสของเส้นลวดนิโครม เป็นต้น



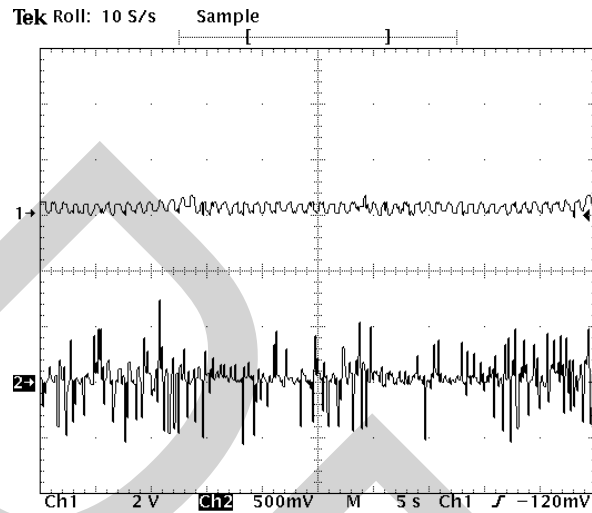
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล

จากรูปที่ 4.8 จะสังเกตการหยุดนิ่งของลูกบอลได้จากบริเวณตรงกลางของรูป ทั้งนี้อาจเกิดจากความฝืดบริเวณจุดศูนย์กลาง แต่การหยุดนิ่งใช้เวลาไม่นานมากนัก ตำแหน่งลูกบอลก็จะกลิ้งวนรอบจุดหมุนต่อไป



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล

จากรูปที่ 4.9 หลังจากระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน เมื่อมีสัญญาณรบกวนระบบต้องสามารถกำจัดไปได้ซึ่งสังเกตได้เมื่อทดสอบด้วยสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองตำแหน่งลูกบอล

จากรูปที่ 4.10 สัญญาณเส้นบนแสดงมุมเอียงของคานซึ่งหมุนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของการรักษาสมดุล สัญญาณเส้นล่างแสดงตำแหน่งลูกบอลบนคานที่เคลื่อนที่สอดคล้องกับการเอียงของคาน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การทดลองควบคุมชุดทดลองลูกบอลบนคันด้วยตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมพีซซี และตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์ค ผลการทดลองที่ได้แสดงรายละเอียดในบทที่ 4 ในบทนี้จะสรุปเปรียบเทียบตัวควบคุมทั้งสามแบบในแง่ลักษณะเด่นและด้อย

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. ตัวควบคุมพีดีมีตัวแปรที่ต้องปรับคือ K_P และ K_D สองตัวแปรเท่านั้น เมื่อปรับค่าเกณฑ์ทั้งสองด้วยค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลตอบสนองของระบบเป็นที่น่าพอใจ ความยากง่ายในการปรับขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบที่ต้องการควบคุมและประสิทธิภาพของระบบที่ต้องการ สามารถใช้หลักการลองผิดลองถูกควบคู่กับตารางแสดงพฤติกรรมของตัวควบคุมแต่ละชนิด [10] ซึ่งส่วนมากจะใช้เวลาไม่นานนัก และสามารถปรับค่าเกณฑ์ในขณะปฏิบัติงานได้ (On Line) ตัวควบคุมพีดีไม่เหมาะสมกับระบบที่มีความซับซ้อนมาก
2. ตัวควบคุมพีซซีมีตัวแปรหลายตัวที่ต้องปรับ ฟังก์ชันสมาชิกและกฎการควบคุมเป็นตัวแปรหลักที่มีผลอย่างมากต่อผลตอบสนองที่ได้ ความรู้ของผู้ปฏิบัติงานโดยตรงกับระบบที่ต้องการควบคุมมีความสำคัญและใช้ในการปรับกฎควบคุม กฎควบคุมที่ได้ต้องครบตามสภาพการทำงานที่เกิดขึ้นจริงถ้าไม่ครบอาจเกิดความเสียหายต่อระบบที่ต้องการควบคุมได้ การจำลองการทำงานของตัวควบคุมก่อนการควบคุมมีความสำคัญ เพราะโดยทั่วไปต้องทำการปรับละเอียดอีกครั้งหรือหลายครั้ง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ สามารถใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากๆได้โดยไม่ต้องทราบสมการคณิตศาสตร์ของระบบ
3. ตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์คมีตัวแปรหลายตัวที่ต้องปรับ ใช้วิธีการปรับที่แตกต่างออกไปโดยจะเรียกว่าการสอน โครงสร้างของนิวโรลเน็ตเวิร์คและวิธีการสอนจะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่ได้ การเลือกโครงสร้างนิวโรลเน็ตเวิร์คมีความสำคัญอย่างมากทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับปัญหาไม่เหมือนกัน วิธีการสอนแต่ละเทคนิคจะเลือกใช้ต้องเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการทำงานและตัวแปรที่ทราบ ความยากลำบากในการเลือกวิธีการสอน

และทำการสอนถือเป็นจุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่อระบบที่มีความซับซ้อนมากๆ

4. เวลาที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแต่ละแบบจะใช้แตกต่างกันโดยตัวควบคุมพีดีจะใช้เวลาน้อยที่สุดเพราะมีสมการคณิตศาสตร์น้อยที่สุด ส่วนตัวควบคุมพีซีและตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์คจะใช้เวลามากหรือน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ใช้เป็นหลัก (ไม่รวมเวลาที่ตัวควบคุมนิวโรลเน็ตเวิร์คใช้สำหรับการสอน)

ข้อเสนอแนะ

1. โครงสร้างของชุดทดลองลูกบอลบนคานสามารถปรับปรุงให้มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ โดยการใช้ตัวตรวจจับแบบภาพ (Image Processing)
2. การพัฒนาตัวควบคุมลูกผสมระหว่างตัวควบคุมแต่ละแบบ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมเมื่อทำงานอิสระต่อกันได้ โดยนำจุดเด่นของตัวควบคุมแบบหนึ่งมาเพิ่มให้กับตัวควบคุมอีกแบบหนึ่ง

บรรณานุกรม

- [1] Kim C. Ng and Mohan M. Trivedi (1995). "Fuzzy Logic Controller and real-time Implementation of a Ball Balancing Beam," Proceedings of SPIE: Applications of fuzzy logic technology II ,Orlando, Florida.
- [2] Kim C. Ng and Mohan M. Trivedi (1995). "Neural-Fuzzy Logic Controller and real-time Implementation of a Ball Balancing Beam", Proceedings of SPIE: Applications of fuzzy logic technology II ,Orlando, Florida.
- [3] M.A. Marra, B. E. Boling and B.K.Walcott (1996). "Genetic Control of a Ball-Beam System," :Proceedings of IEEE Conference on Control Applications Dearborn:MI
- [4] Li-Xin Wang (1996). "Stable and Optimal Fuzzy Control of Linear Systems," [online] . Available :(IEEE Publication) Item : 0-7803-3645-3/96
- [5] J. Glower and J. Munighan (1996). "Fuzzy Saturating Control of a Ball & Beam System," [online] . Available :(IEEE Publication) Item : 0-7803-3636-4/97
- [6] Moon G. Joo and Jin S. Lee (1999). "Hierarchical Fuzzy Control Scheme Using Structured Takagi-Sugeno Type Fuzzy Inference," IEEE Fuzzy System Conference Seoul : Korea
- [7] S. Kawaji, T. Maeda and N Matsunaga (1991). "Fuzzy Control Using Knowledge Acquired From PD Control", [online] . Available :(IEEE Publication) Item : ch2976-9/91/0000-1549
- [8] D. H. Nguyen and B. Widrow (1990). "Neural Networks for Self-Learning Control Systems," IEEE Control Systems Magazine
- [9] Limin Fu (1994). NEURAL NETWORKS IN COMPUTER INTELLIGENCE . McGRAW-HILL.
- [10] คมกฤษ พันธุ์ประภา และเฉลิมพล ณ วงศ์ (2541) การสร้างชุดทดลองลูกบอลบนคานสมดุล. ปรินูญานิพนธ์ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.
- [11] อนุชิต โขชัยเจริญสินและปรีชา คมขำ (2542) พัฒนาชุดทดลองลูกบอลบนคานสมดุลควบคุมด้วยพีซีที่ลอจิก. ปรินูญานิพนธ์ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.
- [12] Bahram Shahian And Michael Hassul (1993).Control System Design Using Matlab:Prentics Hall International Edition:465-476
- [13] Leybold Didactic GmbH (1994). User's Instructions CASSypack-P

[14] Leybold Didactic GmbH (1992). Software for CASSY Closed-loop control

[15] Leybold Didactic GmbH (1995). Software for CASSY Fuzzy control

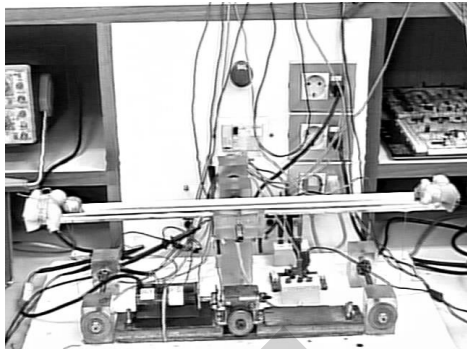
[16] National Instruments Corporation (1996) Lab-PC+ User Manual

[17] National Instruments Corporation (1996) LabVIEW User Manual

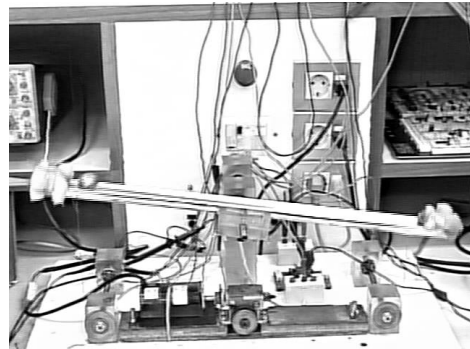
PCU

กรม
พาณิชย์
และ
อุตสาหกรรม

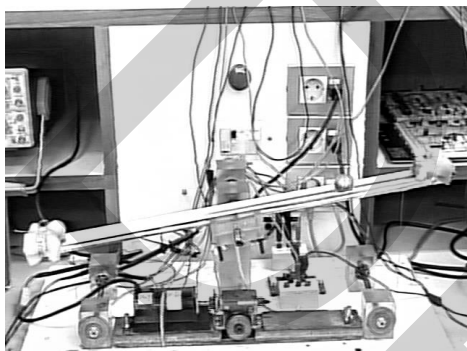
ภาคผนวก



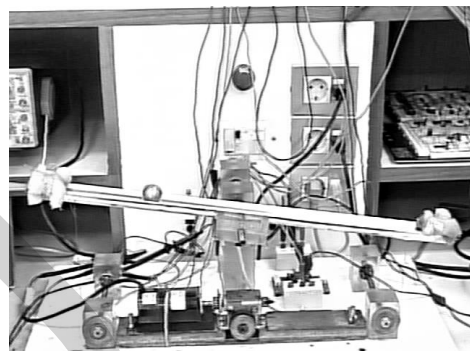
ที่เวลา 0 วินาที



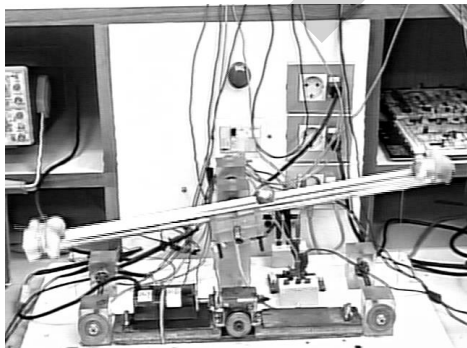
ที่เวลา 1.084 วินาที



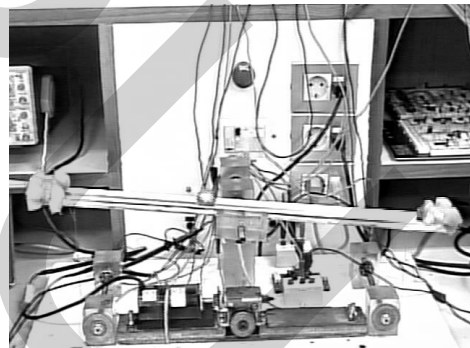
ที่เวลา 1.501 วินาที



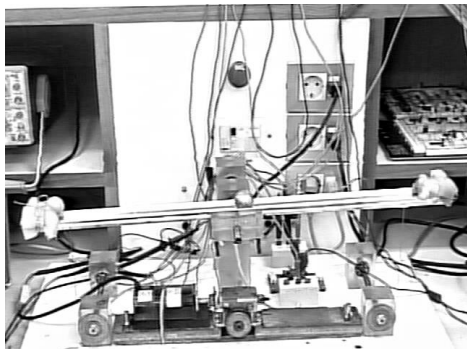
ที่เวลา 1.918 วินาที



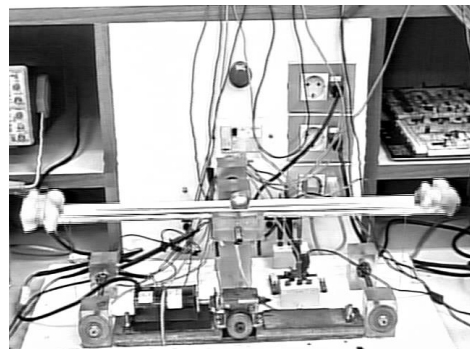
ที่เวลา 2.2518 วินาที



ที่เวลา 2.585 วินาที



ที่เวลา 2.8356 วินาที



ที่เวลา 3.336 วินาที

รูปแสดงการทำงานของชุดทดลองลูกบอลบนคาน