ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น

Fuzzy Logic Controllers for Nonlinear Systems

Suwat Kuntanapreeda

Research and Development Center for Intelligent Systems
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Bangkok, 10800 THAILAND

บทคัดย่อ

บทความนี้เกี่ยวกับการใช้ fuzzy logics ในระบบควบคุมอัตโนมัติ จากที่ผ่านมา fuzzy associative memory (FAM) ของ Kosko ประสบผลความสำเร็จอย่างมากมายในการใช้งานในด้านระบบควบคุม ระบบ FAM เป็นการนำประสบการณ์ความรู้ของมนุษย์สร้างขึ้นเป็นกฎการทำงานเรียกว่า fuzzy rules ซึ่งทำให้ถ้าไม่มีประสบการณ์ความรู้ที่เพียงพอแล้ว ระบบ FAM ค่อนข้างจะไม่ง่ายในการสร้างขึ้นมา Trainable fuzzy logics คือ fuzzy logic ที่เพิ่มความสามารถในการเรียนรู้ลักษณะเดียวกันกับ neural networks เข้าไปใน ทำให้ trainable fuzzy logics เป็นระบบที่น่าสนใจอย่างมาก ส่วนแรกของบทความนี้จะแสดงการใช้ FAM เป็นตัวควบคุมระบบด้วยการใส่ประสบการณ์ความรู้ที่เหมาะสมเข้าไปใน fuzzy rules ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในขั้นที่น่าพอใจ จากนั้นบทความกล่าวถึง trainable fuzzy logics ด้วยการสอนแบบวิธี Backpropagation เราทดสอบความสามารถเบื้องต้นของระบบ trainable fuzzy logic ด้วยปัญหา XOR จากนั้นเป็นการ train ตัวควบคุมแบบ trainable fuzzy logic สำหรับระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ดีมาก และจากการเปรียบเทียบกับการใช้ feedforward neural network พบว่า trainable fuzzy logic และ neural network จะใช้เวลาการคำนวณต่อ iteration ใกล้เคียงกันมาก ส่วน convergence rate ของ trainable fuzzy logic จะดีกว่าของ neural network

Abstract

Uses of fuzzy logics in control systems are presented in this paper. Kosko's fuzzy associative memory (FAM) which is a human-knowledge-base system has been shown many great successes in the area of control systems. However, without proper human knowledge, FAM does not ease to be used. Trainable fuzzy logics impose the ability of learning like of neural networks into fuzzy logic systems. This leads the trainable fuzzy logics being more interesting. This paper first showed a use of the FAM as a controller. By imposing proper human knowledge in to its fuzzy rule, good results of the control system are obtained. Next, trainable fuzzy logic systems using Backpropagation training rule is presented. We first tested performances of a trainable fuzzy logic with the 'XOR' problem. Then a fuzzy controller was trained to control a nonlinear plant. Good results were obtained. Furthermore, we observed that the computation-time per iteration for training a fuzzy logic controller and a neural network controller is approximately the same. However, the convergence rate of the trainable fuzzy logics is better than of the neural network.

1. บทนำ

บทความนี้กล่าวถึงระบบควบคุมที่ใช้ fuzzy logics เป็นตัวควบคุม งานวิจัยด้าน fuzzy logics เป็นงานหลักส่วนหนึ่งตามจุดประสงค์ของการก่อตั้งศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัจฉริยะ (Research and Development Center for Intelligent Systems, RCIS) โดยที่ศูนย์มีสองจุดประสงค์หลักดังนี้ จุดประสงค์แรก คือ เพื่อการวิจัยระบบควบคุมแบบอัจฉริยะ โดยเฉพาะ neural network control systems [1,2] และ fuzzy logic control systems [3,4] ประการที่สอง คือ เพื่อเป็นแหล่งความรู้และเทคโนโลยีโดยเฉพาะด้านระบบควบคุมและการผลิตอัตโนมัติสำหรับภาคอุตสาหกรรม

ระบบควบคุมมีบทบาทมากขึ้นทั้งในชีวิตประจำวันและวงการอุตสาหกรรม เป็นที่ยอมรับกันว่าระบบควบคุมแบบเชิงเส้นมีข้อจำกัด ในเรื่องที่ว่าไม่มีระบบจริงใดๆที่เป็นระบบเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้การวิจัยด้านระบบควบคุมหันมาเน้นด้านระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น โดยเฉพาะ neural network control systems และ fuzzy logic control systems ตัวควบคุมแบบ fuzzy logics ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เพราะการใช้งานที่ง่ายและเป็นการนำความรู้ความชำนาญของมนุษย์รวมเข้ากับระบบได้อย่างเหมาะสม

Fuzzy logics คือ soft logics ที่สามารถให้ค่าได้แบบต่อเนื่องระหว่าง 0 และ 1 โดยค่าผลลัพธ์นี้เรียกว่าค่า membership ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าขบวนการความคิดของมนุษย์ค่อนข้างจะเป็นในลักษณะของ fuzzy logics เช่น ถ้าถามว่าคนที่มาหาเมื่อสักครู่นั้นสูงหรือเตี้ย คนทั่วไปจะตอบในลักษณะว่า "ค่อนข้างจะสูง" หรือ "เตี้ยแต่ไม่เตี้ยมาก" เป็นต้น ในระบบควบคุมก็เช่นเดียวกัน เช่น "ถ้าระดับน้ำต่ำไปนิด ก็ให้เปิดวาล์วเพิ่มอีกหน่อย" หรือ "ถ้าระดับน้ำสูงมากๆเกินไป ก็ให้ปิดวาล์วเต็มที่เลย" เป็นต้น จะเห็นได้ว่ากฎการควบคุมในลักษณะนี้ยากที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้ นอกเสียจากใช้คนเป็นตัวควบคุม อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของ fuzzy logics ทำให้เราสามารถนำกฎการควบคุมลักษณะนี้มาสร้างเป็น fuzzy rule เพื่อใช้ในการควบคุมได้อย่างไม่ยากนัก

2. FUZZY LOGICS

ปัจจุบันคำว่า "fuzzy logic" กลายเป็นคำที่คุ้นเคยและติดปากมากขึ้นสำหรับบุคคลทั่วๆไป สาเหตุเนื่องมาจากการที่ประเทศญี่ปุ่นได้นำ fuzzy logics เข้ามาประยุกต์ใช้กับเครื่องมือเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันอย่างมากมาย เช่น เครื่องซักผ้า และ กล้องถ่ายรูป เป็นต้น ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่าง fuzzy logic และ traditional crisp logic ก็คือ fuzzy logic จะให้ค่าผลลัพธ์เป็นแบบต่อเนื่องระหว่าง 0 กับ 1 ซึ่งเรียกกันว่า ค่า membership ส่วน crisp logic จะให้ค่าผลลัพธ์เป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น อย่างไรก็ตาม fuzzy logic ก็มี operations ต่างๆ เช่น Union, Intersection, และ Compliment เช่นเดียวกันกับของ crisp logic แต่รายละเอียดปลีกย่อยจะแตกต่างกันไป [3,4]

Fuzzy logics จัดว่าเป็น intelligent systems เช่นเดียวกันกับ neural networks โดยมีพื้นฐานและหลักการที่แตกต่างกัน แต่ละระบบมีข้อดีที่ไม่เหมือนกัน ตัวอย่างเปรียบเทียบความสามารถระหว่างสองระบบแสดงใน[5] โดยทั่วไป fuzzy logics กล่าวได้ว่าเป็น knowledge-based systems โดยมีมนุษย์ผู้ชำนาญงานเป็นผู้ให้ linguistic information เพื่อสร้างเป็น fuzzy rule ขึ้นมา Linguistic information จะอยู่ในลักษณะคำพื้นๆ เช่น small, large, และ very large เป็นต้น ซึ่งทำให้การนำความรู้ความชำนาญของบุคคลมาประยุกต์ใช้ได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ถ้าระบบมีความซับซ้อนมากหรือไม่มี linguistic information ที่เหมาะสม การสร้าง fuzzy logic

ค่อนข้างจะลำบาก ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ Backpropagation training algorithm [2] ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายใน การสอน neural networks ขึ้นสำหรับสอน fuzzy logics และเรียกว่า trainable fuzzy logics [6]

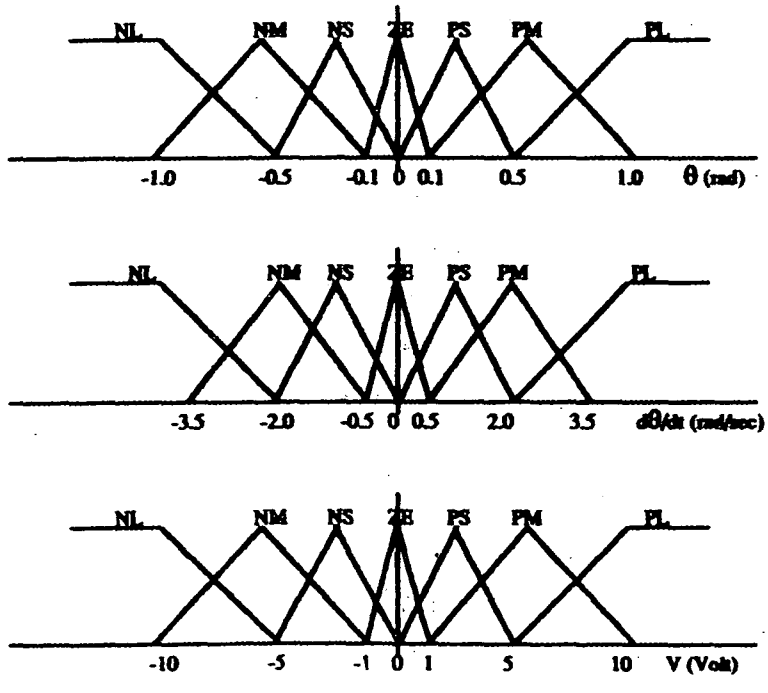
3. CONTROL SYSTEMS USING KOSKO'S FAM

ในส่วนนี้เราออกแบบระบบควบคุมที่ใช้ fuzzy logic เป็นตัวควบคุม โดย fuzzy logic ที่ใช้เป็นรูปแบบ ของ Kosko's fuzzy associative memory (FAM)[3] จุดประสงค์ของการควบคุมเพื่อ stabilize ระบบ inverted pendulum ที่ต่อกับแหล่า DC มอเตอร์ ซึ่งมี Mathematical model ของระบบดังนี้

$$(J_m + m l^2)\, d^2\theta/dt^2 = (-k_t k_e / R)\, d\theta/dt + mgl \sin(\theta) + (G k_t / R)\, V$$

โดยที่ θ คือ มุมของ inverted pendulum วัดจากแนวตั้งตรงขึ้นขึ้น, V คือ control command, และในส่วนของค่า คงที่อื่นๆ แสดงใน appendix ท้ายบทความ

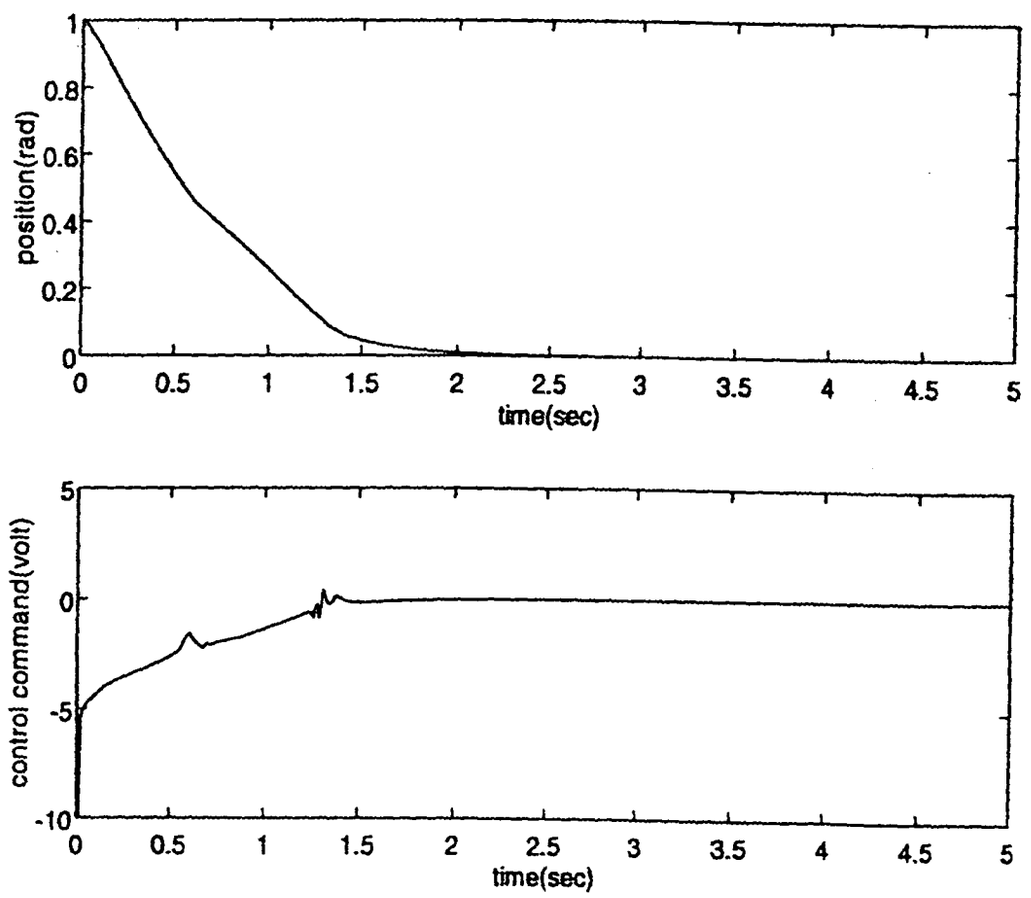
Linguistic variables ของ FAM ประกอบด้วย θ, $d\theta/dt$ และ V ซึ่งมีค่าเป็น NL(Negative Large), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZE(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PL (Positive Large) โดยมีการ fuzzification ดังแสดงในรูปที่ 1 และ fuzzy rules สำหรับตัวควบคุมแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้ correlation-product [3] ในการ defuzzification ผลลัพธ์กลับมาในรูปที่ใช้งานได้ รูปที่ 3 แสดงผล ตอบสนองของระบบควบคุม ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 1. รายละเอียดของการ fuzzification

dθ/dt \ θ	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	ZE
NM	PL	PL	PL	PM	PS	ZE	NS
NS	PL	PL	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NL	NL
PM	PS	ZE	NS	NM	NL	NL	NL
PL	ZE	NS	NM	NL	NL	NL	NL

รูปที่ 2. Fuzzy rule ของ V

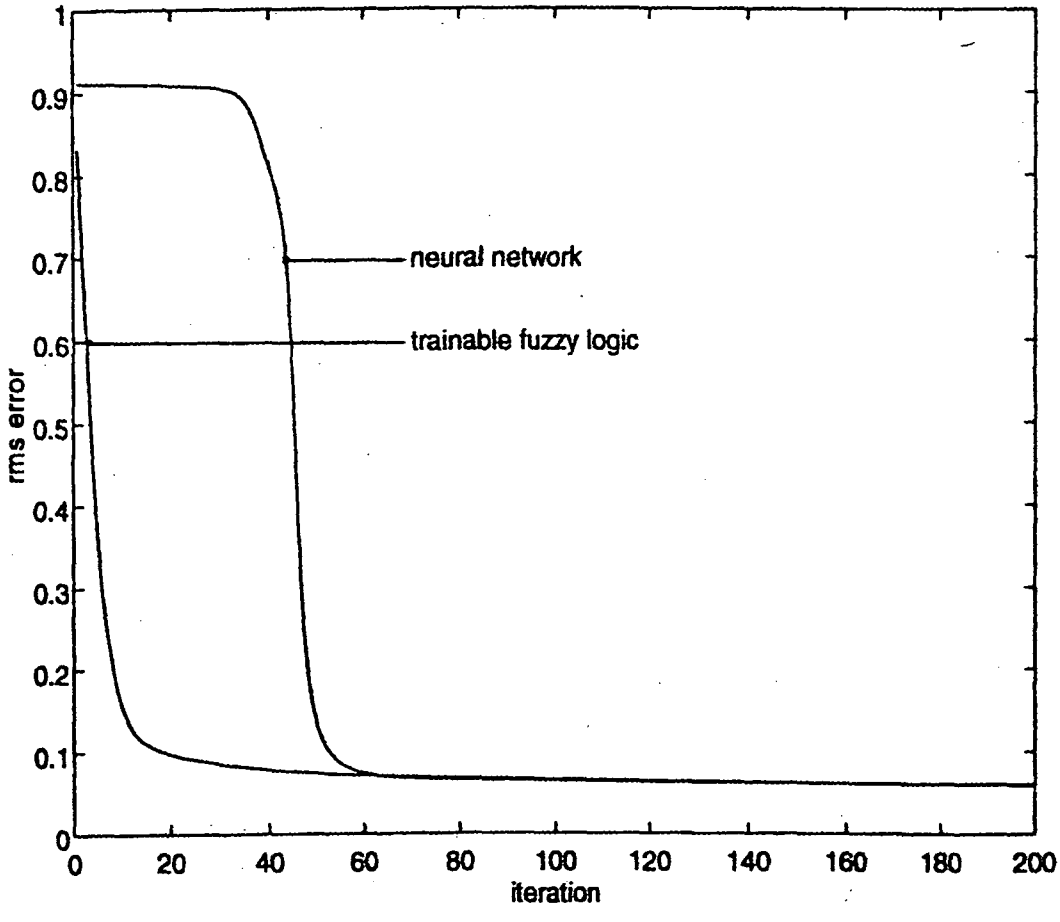


รูปที่ 3. ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ใช้ FAM

4. CONTROL SYSTEMS USING TRAINABLE FUZZY LOGICS

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง trainable fuzzy logics โดยใช้ Backpropagation algorithm ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย center, variance, และ weight ของแต่ละ fuzzy rule รายละเอียดของ training rule และ derivation แสดงใน [6]

ส่วนแรกจะทำการ test ระบบกับ XOR problem โดยใช้ทั้งหมด 49 fuzzy rules ผลจากการ test ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง และจากการเปรียบเทียบ convergent rate กับของ feedforward neural network ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย 2 hidden layers โดยที่แต่ละ layer มี 10 nodes การ train ใช้ training rate เท่ากับ 0.1 จำนวน training data 25 ชุด พบว่า convergent rate ของ fuzzy logic จะเร็วกว่าของ neural network ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่า final RMS error หลังจากการ train 200 iterations สำหรับ fuzzy logic และ neural network เท่ากับ 0.059115 และ 0.062424 ตามลำดับ



รูปที่ 4. Convergent rate ของ trainable fuzzy logics สำหรับ XOR problem

จากนั้นเป็นการ train ตัว fuzzy logic controller สำหรับระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งใช้ในบทความของ Narendra [8] โดยมี mathematical model ของระบบดังนี้

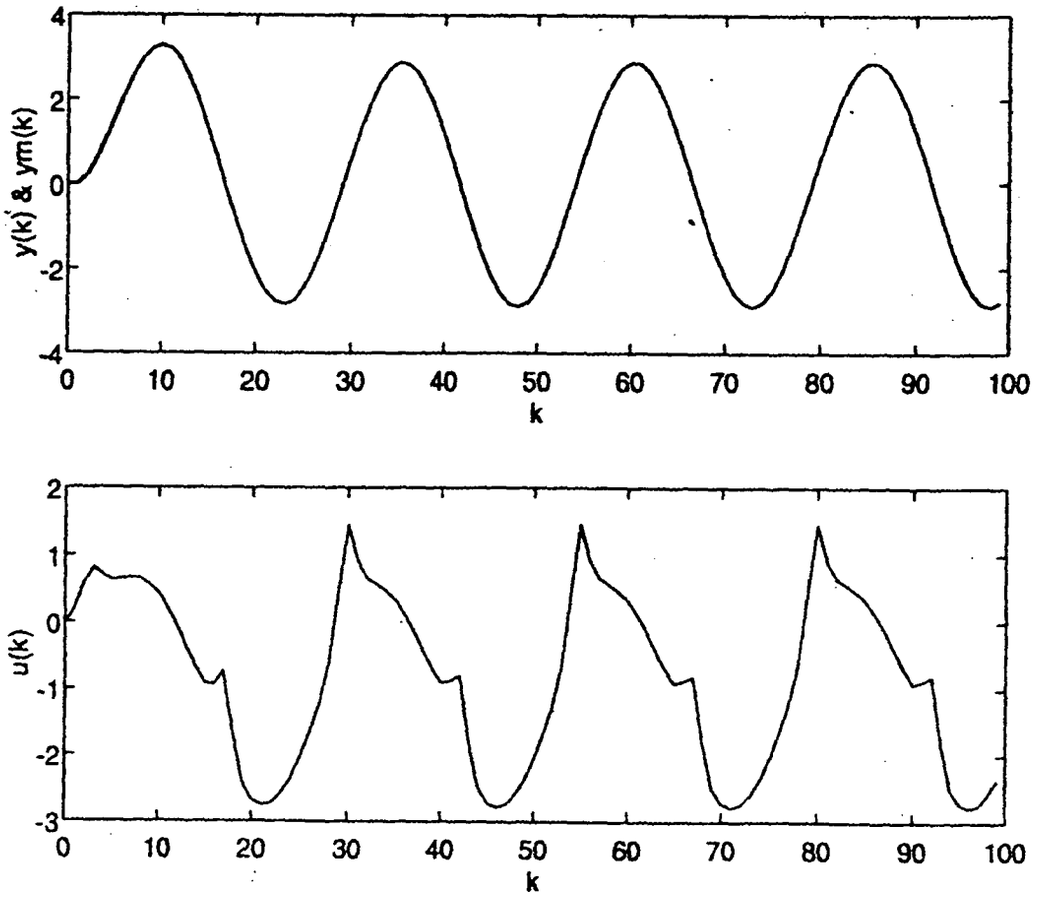
$$y_p(k+1) = f[y_p(k), y_p(k-1)] + u(k)$$

$$f[y_p(k), y_p(k-1)] = (y_p(k)y_p(k-1)[y_p(k) + 2.5])/(1 + y_p^2(k) + y_p^2(k-1))$$

โดยใช้ reference model $y_m(k+1) = 0.6\ y_m(k) + 0.2\ y_m(k-1) + r(k)$ วิธีการ training ใช้เหมือนกันกับ [8] คือ ใช้ concept ของ feedback linearization โดยที่ fuzzy logic (แทนด้วยสัญญาลักษณ์ F[.]) จะทำการเรียนรู้ส่วนที่เป็น nonlinear f[.] ของระบบ (ซึ่งสมมุติว่าไม่รู้) จาก training data จากนั้นก็ทำการ feedback เพื่อหักล้างส่วน nonlinear นี้ทิ้งไป ซึ่งจะได้ control law ในรูป

$$u(k) = -F[y_p(k), y_p(k-1)] + 0.6\ y_p(k) + 0.2\ y_p(k-1) + r(k)$$

จำนวน fuzzy rule ที่ใช้ทั้งหมด 49 rules การ train ใช้ training data ทั้งหมด 500 ชุด โดยใช้ training rate เท่ากับ 0.5 การ train ยุติที่ 500 iterations ซึ่งมีค่า final RMS error เท่ากับ 0.000860 จากการ test ตัวควบคุมโดยใช้ reference input $r(k) = \sin(2\pi k/25)$ พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมอยู่ในระดับที่ดีมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมและ reference model ยากที่จะแยกความแตกต่างกันได้



รูปที่ 5. ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ใช้ trainable fuzzy logic

5. สรุป

บทความนี้แสดงการใช้ fuzzy logics ในระบบควบคุม ในส่วนแรกของบทความ ใช้ Kosko's FAM เป็นตัวควบคุมสำหรับ inverted pendulum ซึ่งผลตอบสนองของการควบคุมที่ได้อยู่ในระดับที่น่าพอใจ จากนั้นก็เป็นการนำ trainable fuzzy logic มาใช้ในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในบทความของ Narendra ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในระดับที่น่าพอใจมาก นอกจากนี้แล้ว จากการเปรียบเทียบระหว่าง trainable fuzzy logic กับ neural network โดยใช้ปัญหา XOR พบว่า convergent rate ของ fuzzy logic ดีกว่าของ neural network และ computation time ของทั้งสองระบบใกล้เคียงกันมาก

เอกสารอ้างอิง

[1] สุวัฒน์ กุลธนปรีดา, "ระบบควบคุมที่ใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ค: บทความสำรวจ", การสัมมนาวิชาการเครือข่ายเครื่องกล ครั้งที่ 9, 9-11 พ.ย. 2538, เชียงใหม่

[2] Hecht-Nielsen, R., Neuralcomputing, Addison-Wesley Pub., Reading Massachusetts, 1990

[3] Kosko, Bart, Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, Prentic Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992

[4] Trano, Toshiro, Kiyoji Asai, and Michio Sugeno, Applied Fuzzy Systems, AP Professional, New York, 1989

[5] Kong, Seong-Gon and Bart Kosko, "Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer", IEEE Trasn. on Neural Networks, Vol.3, No.2, March 1992.

[6] Wang, Li-Xin, Adaptive Fuzzy Systems and Control, Prentic Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994

[7] Narendra, K.S. and K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks", IEEE Trans. on neural networks. Vol. 1, No.1, March 1990.

Appendix

The equation of nonlinear model of an inverted pendulum is

$$(J_m + m l^2)\, d^2\theta/dt^2 = (-k_t k_e / R)\, d\theta/dt + mgl \sin(\theta) + (G k_t / R)\, V.$$

The parameters are

k_t = 0.076 Nm/A	k_e = 0.078 Volt.sec
R = 1.6 ohm.	m = 0.25 kg.
g = 9.81 m/sec2	l = 0.3 m
J_m = 2.6e-5 kg.m2 and	G = 3 volt/volt.