

# การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว

สุดารัตน์ ขวัญอ่อน<sup>1</sup> ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์<sup>2</sup> และ สรวุฒิ สุจิตจร<sup>3</sup>

## Abstract

Khwanon, S., Kulworawanichpong, T. and Sujitjorn, S.  
**Stabilization of an inverted pendulum system via  
an SIRM neuro-fuzzy controller**  
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2005, 27(1) : 101-121

This article presents a new neuro-fuzzy controller to stabilize an inverted pendulum system. The proposed controller consists of the Single Input Rule Modules (SIRMs), the artificial neural network (ANN) and the dynamic importance degrees (DIDs). It simultaneously controls both the angle of the pendulum and the position of the cart. The learning of the ANN results in the DIDs. The proposed controller has a simple structure that can decrease the number of fuzzy rules. The simulation results show that the proposed neuro-fuzzy controller has an ability to stabilize a wide range of the inverted pendulum system within a short period of time. Moreover, the comparisons of the simulation results between the proposed neuro-fuzzy controller and the SIRMs fuzzy controller are revealed in this article.

**Key words :** Single Input Rule Module (SIRM), Dynamic Importance Degree (DID),  
Artificial Neural Network (ANN), Fuzzy Logic

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า <sup>2</sup>Ph.D.(EE), <sup>3</sup>Ph.D.(EE), รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Corresponding e-mail: nam\_sudarat@hotmail.com

รับต้นฉบับ 8 เมษายน 2547      รับลงพิมพ์ 30 กรกฎาคม 2547

## บทคัดย่อ

สุดาร์ตน์ ขวัญอ่อน ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ และ สรวุฒิ สุจิตจร  
 การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว  
 ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(1) : 101-121

บทความนี้นำเสนอตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่แบบใหม่ เพื่อสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผัน ตัวควบคุมดังกล่าวประกอบด้วยมอดูลกฎฟัซซี่แบบอินพุตเดียว โครงข่ายประสาทเทียม และค่าระดับความสำคัญพลวัต ตัวควบคุมนี้ให้การควบคุมทั้งมุมของลูกตุ้มและตำแหน่งของตัวรถไปพร้อม ๆ กัน โดยที่ค่าระดับความสำคัญพลวัตได้มาจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมที่นำเสนอมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและช่วยลดจำนวนกฎฟัซซี่ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวที่นำเสนอนี้มีความสามารถในการสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันในขอบเขตที่กว้างได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวกับตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวไว้ในบทความนี้ด้วย

ในปัจจุบันวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม (conventional control) มีข้อจำกัดในการประยุกต์สำหรับงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ซึ่งมีความซับซ้อนสูง ต้องการความอ่อนตัวในการผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีสม่ำเสมอ รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม จากข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้เกิดการพัฒนาวิธีการควบคุมแบบใหม่ขึ้น เพื่อควบคุมระบบที่มีความซับซ้อน ความไม่แน่นอน ความไม่เชิงเส้น และไม่เสถียร ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาวิธีการทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ รวมถึงงานทางด้านระบบควบคุม ทำให้ระบบควบคุมแบบชาญฉลาด (intelligent control) ได้รับการพัฒนาขึ้น (King, 1999) ซึ่งวิธีการนี้จะอาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม ตัวอย่างเช่น การควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic control) และโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) เป็นต้น เนื่องจากระบบลูกตุ้มผกผันเป็นระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น ขาดเสถียรภาพ และควบคุมได้ยาก จึงเป็นระบบตัวอย่างที่นิยมนำมาทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของตัวควบคุมอย่างแพร่หลาย การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันโดยวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องดังงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีด้วยตัวควบคุมนิวโร (neuro-PID controller) (Omatu

et al., 2000) การใช้ตัวควบคุมแบบลำดับชั้น (hierachical controller) เพื่อสร้างฐานความรู้ฟัซซี่โดยอัตโนมัติ (Kanadai et al., 1996) การใช้ตัวควบคุมฟัซซี่โดยฐานกฎได้มาจากโครงข่ายประสาทเทียม (Kyung et al., 1993) การใช้วิธีการไม่เชิงเส้นแบบเหมาะที่สุดสำหรับฝึกสอนตัวควบคุมฟัซซี่ (Sakai et al., 1997) รวมทั้งการใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว (Yi et al., 2000) หรือเรียกโดยย่อว่า SIRM (Single Input Rule Module) วิธีการ SIRM นี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงสร้างของตัวควบคุมแบบใหม่ที่นำเสนอโดยบทความนี้ SIRM สามารถลดจำนวนกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ ตลอดจนช่วยให้การกำหนดกฎฟัซซี่ทำได้ง่ายขึ้น (Cavalcaneta et al., 1998) .

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดเพื่อสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียว โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่แบบกฎอินพุตเดียวผสมผสานกับโครงข่ายประสาทเทียมเรียกว่า ตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ (neuro-fuzzy controller) ซึ่งค่าระดับความสำคัญพลวัตที่ใช้บ่งชี้ความสำคัญของอินพุตแต่ละตัวได้มาจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้เป็นแบบแพร่กลับ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบลูกตุ้มผกผันสามารถเข้าสู่เสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว โดยดำเนินการทดสอบวิธีการควบคุมที่นำเสนอด้วยการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียว (single inverted pendulum) รวมทั้งทำการเปรียบเทียบ

เทียบผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว (Yi *et al.*, 2000)

**แบบจำลองของระบบลูกตุ้มผกผัน (Model of the inverted pendulum system)**

ระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดี่ยวแทนได้ด้วย Figure 1 ระบบดังกล่าวประกอบด้วยรางเลื่อน ตัวรถ ลูกตุ้ม โดยที่ตัวรถสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวาบนรางเลื่อนอย่างอิสระตามทิศทางของแรงกระทำ กำหนดให้ไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นกับระบบในขณะที่ทำการควบคุม พลวัตของระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดี่ยวแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้ (Yi *et al.*, 2000)

$$\alpha = \frac{(m_c + m_p)g \sin \theta - \{F + m_p l_p \omega^2 \sin \theta\} \cos \theta}{\left\{ \frac{4}{3}(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2 \right\} l_p} \quad (1)$$

$$a = \frac{4}{3} \frac{\{F + m_p l_p \omega^2 \sin \theta\} - m_p g \sin \theta \cos \theta}{\left\{ \frac{4}{3}(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2 \right\}} \quad (2)$$

โดยที่  $m_c$  เป็นมวลของตัวรถ (kg)  
 $m_p$  เป็นมวลของลูกตุ้ม (kg)

- $g$  เป็นค่าแรงโน้มถ่วงมีค่า  $9.8 \text{ m/s}^2$
- $l_p$  เป็นความยาวครึ่งหนึ่งของก้านลูกตุ้ม (m)
- $F$  เป็นแรงขับเคลื่อนที่ให้กับตัวรถ (N)
- $\theta$  เป็นมุมของลูกตุ้ม (rad)
- $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้ม (rad/s)
- $\alpha$  เป็นความเร่งเชิงมุมของลูกตุ้ม (rad/s<sup>2</sup>)
- $x$  เป็นตำแหน่งของตัวรถ (m)
- $v$  เป็นความเร็วของตัวรถ (m/s)
- $a$  เป็นความเร่งของตัวรถ (m/s<sup>2</sup>)

**ตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว (Single input rule neuro-fuzzy controller)**

เนื่องจากการอนุมานฟัซซี่แบบดั้งเดิมจะนำตัวแปรอินพุตทุกตัวมาจัดไว้ในส่วนของเงื่อนไข (antecedent) ของกฎฟัซซี่แต่ละกฎ ทำให้จำนวนกฎฟัซซี่เพิ่มขึ้นเป็นแบบเอ็กโพเนนเชียลตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น (Yi *et al.*, 2000) รวมทั้งการกำหนดกฎฟัซซี่แต่ละกฎให้ได้เหมาะสมทำได้ยาก การแก้ปัญหากฎฟัซซี่ที่มีจำนวนมากอาจใช้การอนุมานฟัซซี่แบบกฎอินพุตเดี่ยว หรือ SIRM ซึ่งจะพิจารณาตัวแปรอินพุตเพียงตัวเดียวเท่านั้นสำหรับกฎหนึ่งกฎใด ทำให้จำนวนกฎและพารามิเตอร์ต่างๆ ลดลงรวมทั้งง่ายต่อการกำหนดกฎฟัซซี่ โดยใช้ค่าระดับความสำคัญพลวัต (Dynamic Importance Degree; DID) เป็น

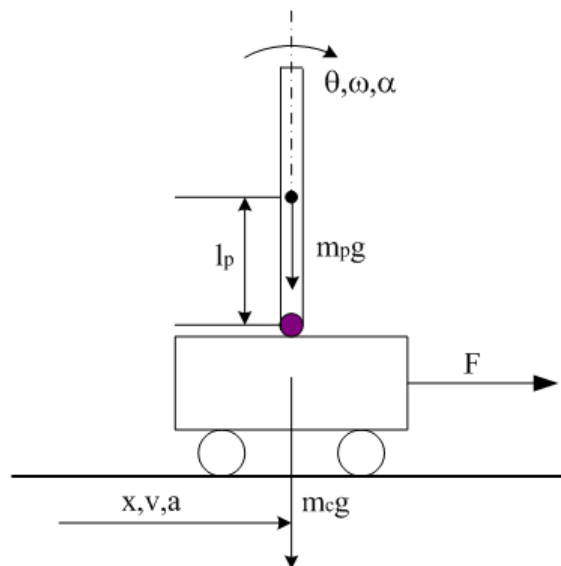


Figure 1. Configuration of the inverted pendulum system.

ตัวบ่งชี้ความสำคัญของอินพุตแต่ละตัว ซึ่งค่าระดับความสำคัญพลวัตเหล่านี้ได้มาจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งรูปแบบของ SIRM แต่ละอินพุตคือ

$$SIRM - i: \{R_i^j: \text{if } x_i = A_i^j \text{ then } f_i = C_i^j\}_{j=1}^{m_i} \quad (3)$$

โดยที่ SIRM-*i* เป็น SIRM ของอินพุตตัวที่ *i*

- $R_i^j$  เป็นกฎที่ *j* ใน SIRM-*i*
- $x_i$  เป็นอินพุตตัวที่ *i*
- $f_i$  เป็นเอาต์พุต ของอินพุตตัวที่ *i*
- $A_i^j$  เป็นฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของ  $x_i$  ในกฎที่ *j* ของ SIRM-*i*
- $C_i^j$  เป็นฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของ  $f_i$  ในกฎที่ *j* ของ SIRM-*i*
- i* เป็นอินพุตของ SIRM
- j* เป็นจำนวนของกฎใน SIRM-*i*

ผลการอนุมาน  $f_i^0$  ของตัวแปรในส่วนผลลัพธ์  $f_i$  สามารถคำนวณโดยใช้วิธี simplified fuzzy reasoning method (Mizumoto, 1996) โดยมีฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ  $C_i^j$  เป็นจำนวนจริง ดังนั้นผลการอนุมาน  $f_i^0$  จาก  $f_i$  ของ SIRM-*i* สำหรับอินพุต  $x_i$  คือ

$$f_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} A_i^j(x_i) C_i^j}{\sum_{j=1}^{m_i} A_i^j(x_i)} \quad (4)$$

เนื่องจากอินพุตแต่ละตัวส่งผลไม่เท่ากันต่อสมรรถนะของระบบ อินพุตบางตัวอาจมีความสำคัญมากกว่าอินพุตตัวอื่น ในขณะที่อินพุตบางตัวอาจจะปรับปรุงสมรรถนะได้มากกว่าถ้ามีการเพิ่มความสำคัญให้มากขึ้น แต่อินพุตบางตัวอาจจะไม่เป็นผลดีกับสมรรถนะของระบบถ้ามีระดับความสำคัญมากเกินไป อาจกล่าวได้ว่าระดับความสำคัญที่แตกต่างกันในแต่ละอินพุตส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ

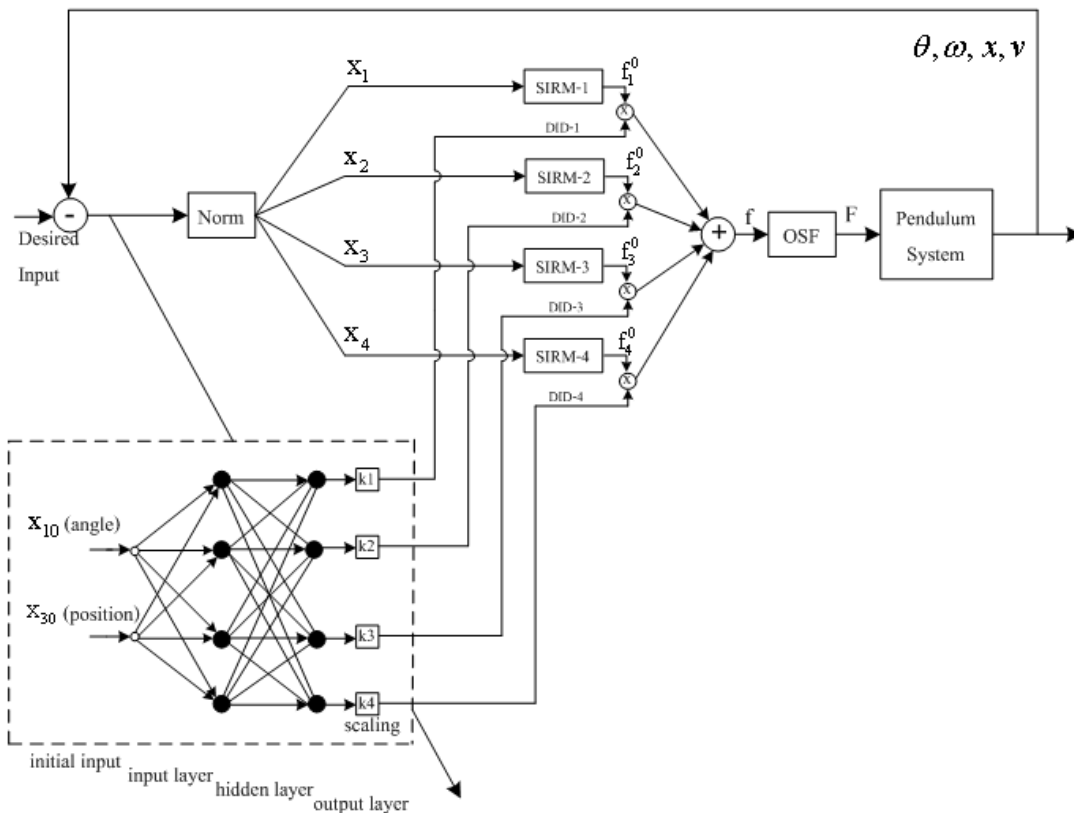


Figure 2. Neuro-fuzzy control structure.

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการกำหนดค่าระดับความสำคัญพลวัตให้กับผลการอนุมาน  $f_i^0$  ของอินพุตแต่ละตัว โดยที่ค่าระดับความสำคัญพลวัตแต่ละตัว ( $DID_i$ ) ได้มาจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ดังแสดงใน Figure 2 ดังนั้นสามารถหาเอาต์พุตของ SIRM ได้ดังนี้คือ

$$f = \sum_{i=1}^n DID_i * f_i^0 \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จะเห็นได้ว่า ค่าเอาต์พุต  $f$  เกิดจากการรวมกันของผลคูณระหว่างผลลัพธ์การอนุมานฟัซซี่และค่าระดับความสำคัญพลวัตของอินพุตแต่ละตัว

### วิธีการออกแบบตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่

การสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันคือ การทำให้ลูกตุ้มมีสมดุลโดยสามารถตั้งตรงขึ้นได้ และตัวรถต้องเคลื่อนที่ที่กลับมาอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดบนรางเส้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น นั่นคือค่าตัวแปรสถานะที่พิจารณาทุกตัวจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ซึ่งตัวแปรสถานะทั้งหมดที่พิจารณาได้แก่ มุมของลูกตุ้ม ( $\theta$ ) ความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้ม ( $\omega$ ) ตำแหน่งของตัวรถ ( $x$ ) และความเร็วของตัวรถ ( $v$ ) โดยตัวแปรสถานะทั้ง 4 ตัวนี้จะใช้เป็นอินพุตให้กับ SIRM

### 1. การกำหนดค่า SIRMs สำหรับตัวควบคุมฟัซซี่แบบกฎอินพุตเดียว

การกำหนดฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพสำหรับตัวแปรอินพุตแต่ละตัวกำหนดให้มีรูปแบบเหมือนกันคือประกอบด้วยรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยแทนด้วยตัวแปรภาษา NB (Negative Big), ZO (Zero) และ PB (Positive Big) ดังแสดงใน Figure 3 ส่วนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุตกำหนดเป็นจำนวนจริงเดี่ยว (singleton) นอกจากนี้การกำหนดกฎฟัซซี่สำหรับอินพุต

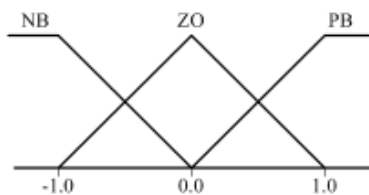


Figure 3. Membership function for each SIRM.

แต่ละตัวจะอาศัยประสบการณ์และธรรมชาติของระบบลูกตุ้มผกผันในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตกับแรงเอาต์พุตที่ให้ระบบ เพื่อทำให้ก้านลูกตุ้มผกผันตั้งตรง และตัวรถเคลื่อนที่มายังจุดที่กำหนด ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มุมของลูกตุ้มผกผันมีค่ามากในทิศทางบวก แรงขับเคลื่อนที่ให้ระบบต้องมีทิศทางบวกด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อทำให้ตัวรถเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา ก้านลูกตุ้มจะหมุนกลับในทิศทางบวกมากขึ้น ทำให้มุมเป็นบวกน้อยลงจนกระทั่งมีทิศทางลบ ดังนั้นแรงที่ให้กับระบบต้องทำให้รถเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายของรางเส้นเพื่อทำให้ก้านลูกตุ้มหมุนกลับในทิศทางบวกจนสามารถตั้งตรงได้ รวมทั้งตัวรถเคลื่อนที่มายังตำแหน่งที่กำหนด จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถกำหนดกฎฟัซซี่ได้ดัง Table 1

### 2. การปรับค่าระดับความสำคัญพลวัตโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

กลไกที่สำคัญในการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันคือการควบคุมแรงที่ให้กับตัวรถ นั่นคือ ถ้าแรงมีค่ามากหรือน้อยเกินไปจะไม่สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบได้ ดังนั้นหลังจากที่ได้ผลการอนุมานฟัซซี่ของอินพุตแต่ละตัวแล้ว จำเป็นต้องบ่งชี้ความสำคัญของอินพุตเหล่านั้นด้วยค่า  $DID$  เพื่อให้ได้แรงที่สามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบต่อไปได้ เมื่อสถานการณ์ในการควบคุมเปลี่ยนแปลงไป ค่า  $DID$  เหล่านี้ต้องสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ วิธีการนี้จะอาศัยการเรียนรู้จากโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อปรับค่า  $DID$  แต่ละตัว โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้เป็นแบบแพร่กลับ (backpropagation algorithm) ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย (Jin *et al.*, 2000) แผนภาพการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแสดงใน Figure 4 ซึ่ง

Table 1. SIRM for each input item.

Antecedent variable $x_i (i = 1, 2, 3, 4)$	Consequent variable $f_i (i = 1, 2, 3, 4)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	+1.0

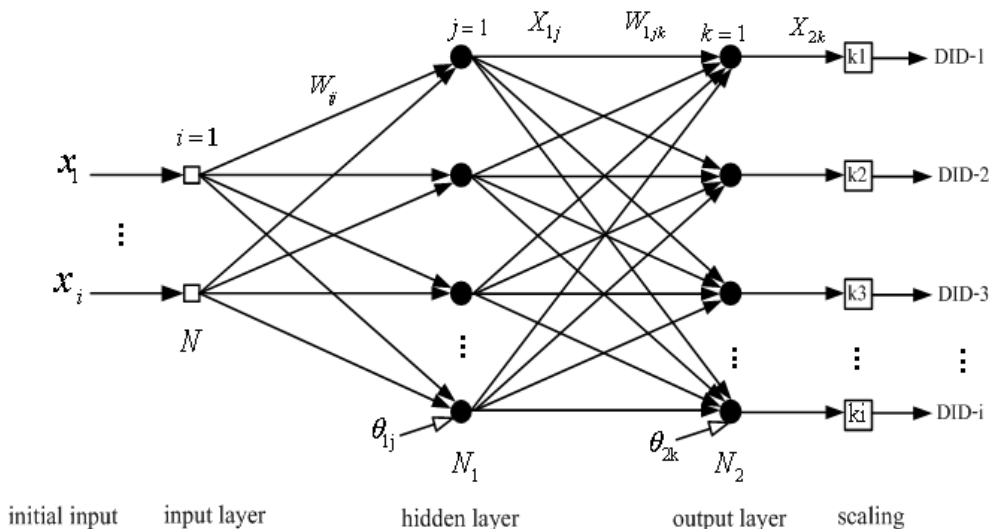


Figure 4. Structure of Neural Network.

เป็นโครงข่ายหลายชั้นแบบไปข้างหน้า (multilayer feed-forward network) โดยมีชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) หนึ่งชั้นประกอบด้วยสี่นิวรอน ที่ชั้นอินพุตมีสองนิวรอน สำหรับค่ามุมและตำแหน่งรถเริ่มต้น และที่ชั้นเอาต์พุต (output layer) ประกอบด้วยสี่นิวรอน สำหรับ DID ทั้งสี่ค่า โดยฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ที่ใช้เป็นแบบซิกมอยด์ (sigmoid function) เนื่องจากในขณะที่ยังสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันไม่สามารถระบุ DID ที่ต้องการได้ ดังนั้นจะพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่แปรกลับจากเอาต์พุตของระบบ (Cui et al., 1993) การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 สุ่มค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบแอส โดยกำหนดให้มีค่าน้อยๆ อยู่ในช่วง [-1, 1]

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณเอาต์พุตจากฟังก์ชันกระตุ้น สำหรับชั้นซ่อนเร้นและชั้นเอาต์พุตดังนี้คือ

- เอาต์พุตของชั้นซ่อนเร้น;  $X_{1j}$

$$X_{1j}(t) = \frac{1}{1 + \exp(-O_{1j} - \theta_{1j})}$$

โดยที่  $O_{1j} = \sum_{i=1}^N W_{ij} X_i, j = 1, 2, \dots, N_1$

- เอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต;  $X_{2k}$

$$X_{2k}(t) = \frac{1}{1 + \exp(-O_{2k} - \theta_{2k})}$$

โดยที่  $O_{2k} = \sum_{j=1}^{N_1} W_{1jk} X_{1j}(t), k = 1, 2, \dots, N_2$

ขั้นตอนที่ 3 ปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบแอส ดังนี้คือ

- ค่าน้ำหนักจากชั้นซ่อนเร้นไปชั้นเอาต์พุต;  $W_{1jk}$

$$W_{1jk}(t + \Delta t) = W_{1jk}(t) + \Delta W_{1jk}$$

โดยที่  $\Delta W_{1jk} = \eta \delta_{1k} X_{1j}(t)$  และ

$$\delta_{1k} = (X_{2kd}(t) - X_{2k}(t)) X_{2k}(t) (1 - X_{2k}(t)) \quad (6)$$

- ค่าน้ำหนักจากชั้นอินพุตไปชั้นซ่อนเร้น;  $W_{ij}$

$$W_{ij}(t + \Delta t) = W_{ij}(t) + \Delta W_{ij}$$

โดยที่  $\Delta W_{ij} = \eta \delta_j X_i$  และ

$$\delta_j = \left[ \sum_{k=1}^{N_2} \delta_{1k} W_{1jk}(t + \Delta t) \right] X_{1j}(t) (1 - X_{1j}(t))$$

- ค่าไบแอส;  $\theta_{2k}, \theta_{1j}$

$$\theta_{2k}(t + \Delta t) = \theta_{2k}(t) + \eta \delta_{1k}$$

$$\theta_{1j}(t + \Delta t) = \theta_{1j}(t) + \eta \delta_j$$

ขั้นตอนที่ 4 วนรอบซ้ำไปขั้นที่ 2 ในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้หรือยังไม่ครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้

โดยที่  $\eta$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_0$  และ  $\eta_{10}$  เป็นค่าอัตราการเรียนรู้อัตราที่กำหนดให้มีค่าเท่ากันคือ 0.05 เมื่อพิจารณาใน Figure 4 พบว่าเอาต์พุตที่ออกจากโครงข่ายประสาทเทียมคือ  $X_{2k}$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $[0, 1]$  ดังนั้นจะต้องคูณค่านี้ด้วยตัวคูณปรับค่า (scaling factor) กำหนดให้ตัวคูณปรับค่าทุกตัวมีค่าเป็น 10 เพื่อให้ได้ค่า DID ที่สามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันได้อยู่ในช่วง  $[0, 10]$  เมื่อพิจารณาสมการที่ (6) จะพบว่าค่า  $X_{2kd}$  ซึ่งเป็นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการไม่สามารถทราบค่าได้  $X_{2kd}$  ในสมการต้องถูกแทนที่ด้วยตัวแปรอื่นที่ทราบค่าและสามารถทดแทนกันได้ ในบทความได้นำเสนอตัวแปรเอาต์พุตของระบบมาใช้งานดังกล่าวความสัมพันธ์ในสมการที่ (7) ซึ่งปรับปรุงมาจากแนวทางของ (Cui *et al.*, 1993)

$$(X_{2kd}(t) - X_{2k}(t)) = (y_{kd}(t) - y_k(t)) \cdot D \quad (7)$$

เมื่อแทนค่า  $(X_{2kd}(t) - X_{2k}(t))$  ในสมการที่ (7) ลงในสมการที่ (6) จะได้ว่า

$$\delta_{ik} = (y_{kd}(t) - y_k(t)) \cdot D \cdot X_{2k}(t)(1 - X_{2k}(t)) \quad (8)$$

โดยที่  $D = \text{sign}\left(\frac{\partial y_k(t)}{\partial X_{2k}(t)}\right)$

เมื่อ  $y_{kd}$  เป็นค่าเอาต์พุตที่ต้องการของระบบ

### 3. การทำงานของตัวควบคุมนิโร-พีซซี

การสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวด้วยตัวควบคุมพีซซีแบบกฎอินพุตเดี่ยวผสมผสานกับโครงข่ายประสาทเทียมแสดงใน Figure 2 ตัวแปรสถานะ  $\theta$ ,  $\omega$ ,  $x$ ,  $v$  ของระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวจะถูกป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นศูนย์ทั้งหมด โดยค่าตัวแปรสถานะเหล่านี้จะเป็นอินพุตป้อนเข้าสู่บล็อกนอร์ม (Norm block) เพื่อทำการปรับค่าตัวแปรสถานะด้วยค่าตัวคูณปรับค่า (input scaling factor) ของอินพุตแต่ละตัวคือ 30 องศา 100 องศา/วินาที 2.4 เมตร และ 1 เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรสถานะเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นอินพุต  $x_i$  ( $i = 1, 2,$

3, 4) ต่อไป อินพุต  $x_i$  นี้จะป้อนเข้าสู่ส่วนของ SIRM- $i$  หลังจากทำการอนุมานกฎพีซซีแล้วจะได้  $f_i^0$  เพื่อคูณกับค่า DID- $i$  ซึ่งค่าระดับความสำคัญพลวัตแต่ละตัวได้มาจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมคือค่ามุมเริ่มต้นและตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถ โครงข่ายประสาทเทียมจะเรียนรู้โดยการปรับค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบแอสจากค่าความคลาดเคลื่อนเอาต์พุตของระบบ จนกระทั่งสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเอาต์พุต  $f$  เกิดจากผลรวมของผลคูณระหว่าง SIRM และ DID ของอินพุตแต่ละตัว แต่ก่อนจะเป็นแรงจริงที่ให้กับระบบลูกตุ้มผกผันต้องทำการปรับค่าด้วยตัวคูณปรับค่าของเอาต์พุต (OSF) ซึ่งกำหนดให้เป็นสิบเท่าของผลรวมระหว่างมวลของตัวรถและมวลของก้านลูกตุ้มผกผัน

### ผลการจำลองสถานการณ์

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมนิโร-พีซซีชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียว โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวที่ปรากฏตามสมการที่ (1) และ (2) กำหนดให้มวลของลูกตุ้ม  $m_p = 0.1$  kg มวลของตัวรถ  $m_c = 1$  kg และความยาวครึ่งหนึ่งของก้านลูกตุ้ม  $l_p = 0.5$  เมตร และตำแหน่งของตัวรถกำหนดให้อยู่ในช่วง  $[-2.4, 2.4]$  เมตร ถ้าตำแหน่งของรถเกินขอบเขตที่กำหนดก็จะทำให้ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของลูกตุ้มผกผันไว้ได้ นอกจากนี้ระบบลูกตุ้มผกผันจะได้รับการพิจารณาว่าเข้าสู่เสถียรภาพแล้วเมื่อตัวแปรสถานะต่างๆ เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้คือ มุมของลูกตุ้มเข้าสู่  $\pm 0.1$  องศา ความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้มเข้าสู่  $\pm 0.1$  องศา/วินาที ตำแหน่งของตัวรถเข้าสู่  $\pm 0.01$  เมตร และความเร็วของตัวรถเข้าสู่  $\pm 0.01$  เมตร/วินาที

Figure 5 เป็นผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมุมเริ่มต้นของลูกตุ้มเป็น 30 องศา โดยที่ตัวแปรอินพุตอื่นมีค่าเป็นศูนย์ โดยค่าตัวเลขที่ปรากฏใน Plant (0.1, 0.5, 1.0, 0.01) หมายถึง มวลของลูกตุ้ม ความยาวครึ่งหนึ่งของก้านลูกตุ้ม มวลของรถ และช่วงเวลาแซมปลิง ตามลำดับ และค่าตัวเลขใน State (30.0, 0, 0, 0) หมายถึงค่ามุมเริ่มต้น

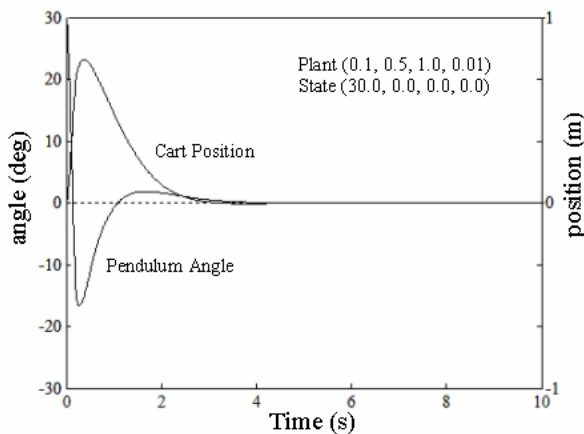


Figure 5. Simulation results (pendulum length of 1.0 m, initial pendulum angle of 30°)

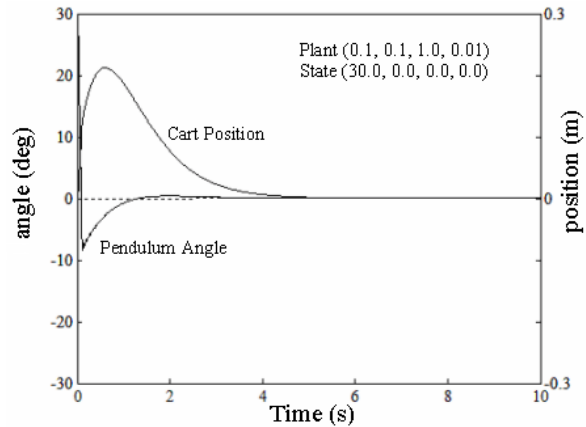


Figure 6. Simulation results (pendulum length of 0.2 m, initial pendulum angle of 30°)

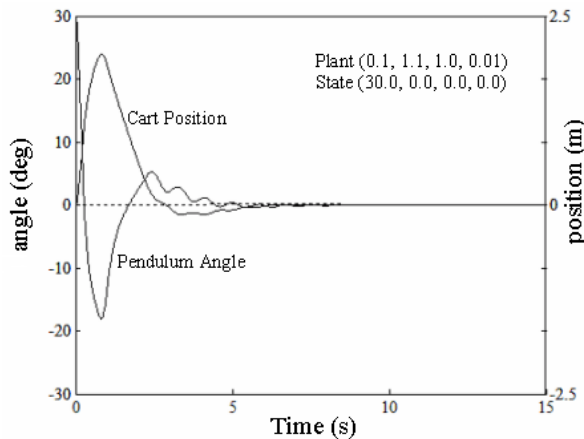


Figure 7. Simulation results (pendulum length of 2.2 m, initial pendulum angle of 30°)

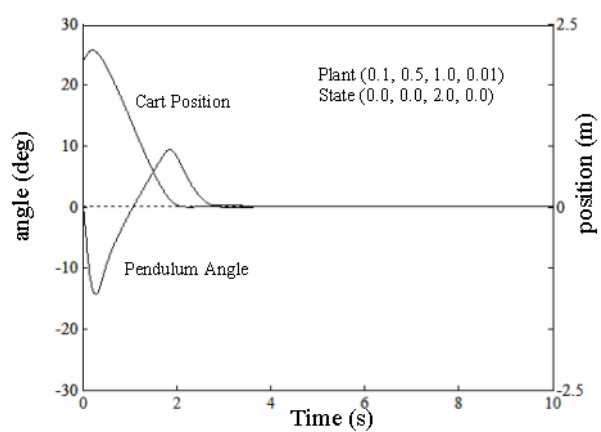


Figure 8. Simulation results (pendulum length of 1.0 m, initial cart position of 2.0 m)

ความเร็วเชิงมุม ตำแหน่งของตัวรถ และความเร็วของตัวรถตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้พบว่ามุมเริ่มต้นมีค่ามากในทิศทางบวก ตัวรถจะเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นของรางลื่นไปทางด้านขวา ทำให้ก้านลูกตุ้มหมุนกลับในทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นผลให้มุมเป็นบวกลดลงจนกระทั่งมุมมีทิศทางลบ จากนั้นตัวรถจะเคลื่อนที่กลับมาทางด้านซ้ายเพื่อทำให้ก้านลูกตุ้มหมุนกลับในทิศตามเข็มนาฬิกาจนกระทั่งลูกตุ้มและตัวรถเข้าสู่เสถียรภาพ ซึ่งใช้เวลาทั้งสิ้น 4.24 วินาที โดยแรงขับเคลื่อนสูงสุดมีค่าประมาณ 80 นิวตัน

Figure 6 และ Figure 7 เป็นผลการจำลองสถานการณ์เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความยาวของก้านลูกตุ้ม

ผกผันให้สั้นและยาวขึ้นกว่าเดิมคือ 0.2 เมตร และ 2.2 เมตร โดยที่มุมเริ่มต้นยังคงเป็น 30 องศา และตัวรถอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางลื่นซึ่งใช้เวลาในการสร้างเสถียรภาพประมาณ 3.86 วินาที และ 8.80 วินาที ตามลำดับ

Figure 8 ถึง Figure 10 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อตัวรถไม่อยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของรางลื่น กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถเป็น 2 เมตร โดยที่มุมเริ่มต้นของลูกตุ้มผกผันเป็นศูนย์องศานั้นคือลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งสมดุล จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนความยาวของก้านลูกตุ้มเป็น 1.0 เมตร 0.2 เมตร และ 2.2 เมตร ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าตัวรถจะเคลื่อนที่



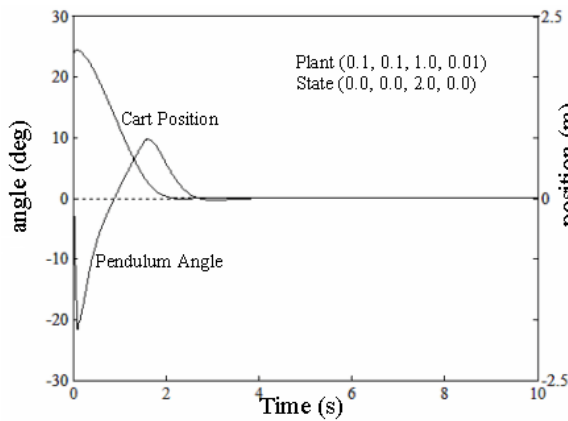


Figure 9. Simulation results (pendulum length of 0.2 m, initial cart position of 2.0 m)

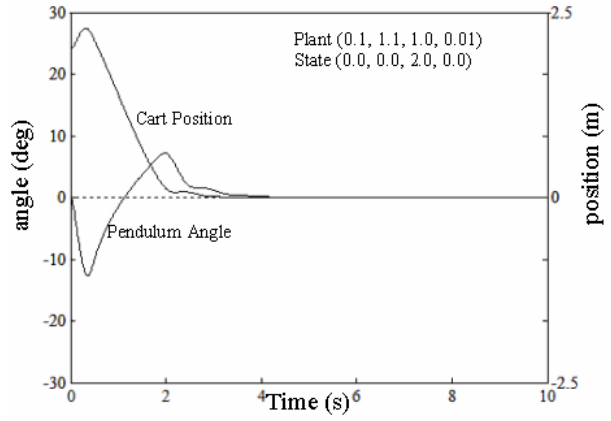


Figure 10. Simulation results (pendulum length of 2.2 m, initial cart position of 2.0 m)

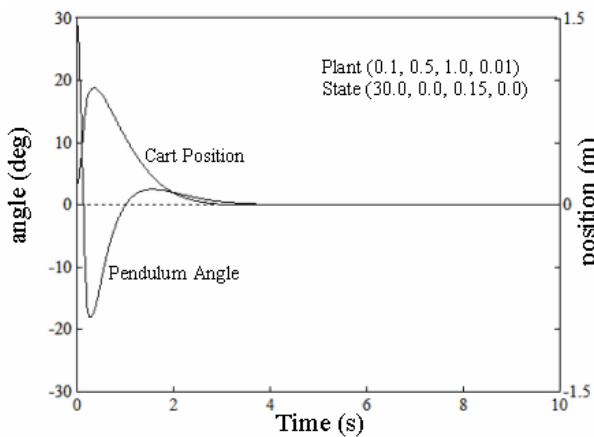


Figure 11. Simulation results (initial pendulum angle of 30°, initial cart position of 0.15 m)

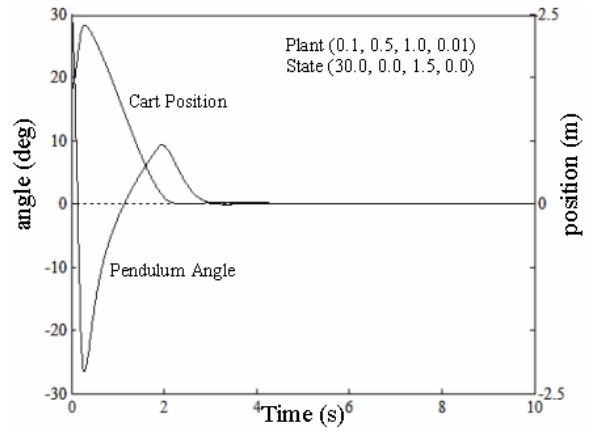


Figure 12. Simulation results (initial pendulum angle of 30°, initial cart position of 1.5 m)

ไปทางด้านขวาเล็กน้อย เพื่อให้ก้านลูกตุ้มเสียสมดุลหมุนกลับมาในทิศทางลบ จากนั้นตัวรถจะเคลื่อนที่กลับทางด้านซ้ายมายังตำแหน่งที่ต้องการคือที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางลื่น พร้อมทั้งทำให้ก้านลูกตุ้มหมุนกลับในทิศทางตามเข็มนาฬิกาสามารถตั้งตรงได้อีกครั้ง ซึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพประมาณ 3.93 วินาที 4.02 วินาที และ 4.70 วินาที ตามลำดับ

Figure 11 และ Figure 12 เป็นผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่มีมุมของลูกตุ้มผกผันไม่อยู่ที่ตำแหน่งสมดุลและตัวรถไม่อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางลื่น กำหนดให้มุมของลูกตุ้มเป็น 30 องศา ก้านลูกตุ้มยาว 1.0 เมตร โดยที่

Figure 11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถอยู่ทางด้านขวาเป็นระยะทาง 0.15 เมตร ในขณะที่ Figure 12 เป็นผลการจำลองสถานการณ์กรณีตัวรถอยู่ที่ตำแหน่ง 1.5 เมตร จากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้พบว่าในขณะที่ตัวรถจะเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา ก้านลูกตุ้มผกผันจะหมุนจากตำแหน่ง 30 องศาในทิศทางตามเข็มนาฬิกาผ่านตำแหน่งสมดุล จนกระทั่งมุมของลูกตุ้มอยู่ในทิศทางลบ จากนั้นตัวรถจะเคลื่อนที่กลับทางด้านซ้ายมายังตำแหน่งกึ่งกลางของรางลื่น ขณะเดียวกันลูกตุ้มผกผันจะหมุนกลับในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อตั้งตรงที่ตำแหน่งสมดุล โดยใช้เวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพทั้งสิ้น 4.18 วินาที

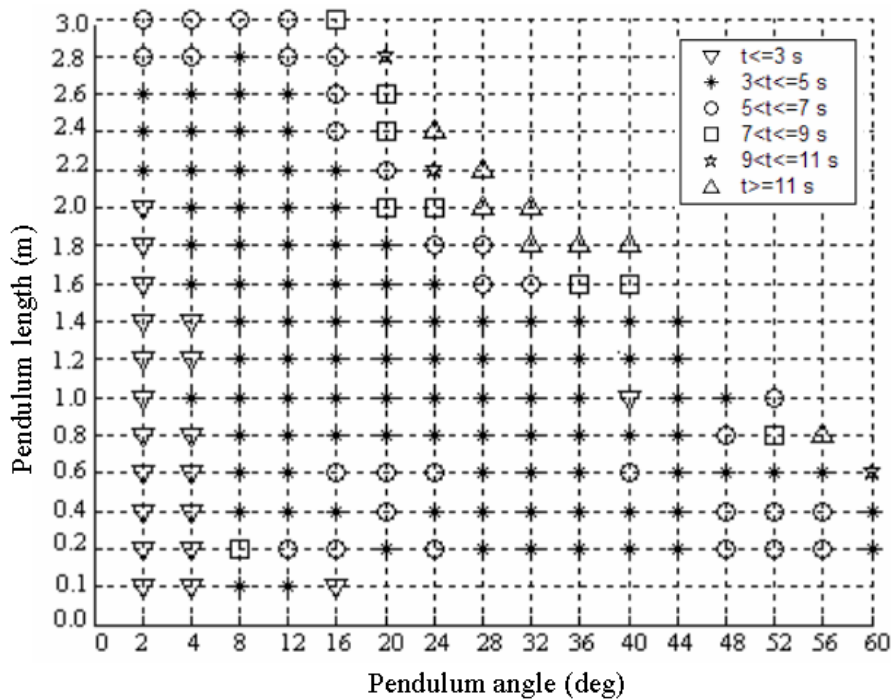


Figure 13. Pendulums with various lengths and initial angles that can be stabilized within finite settling times.

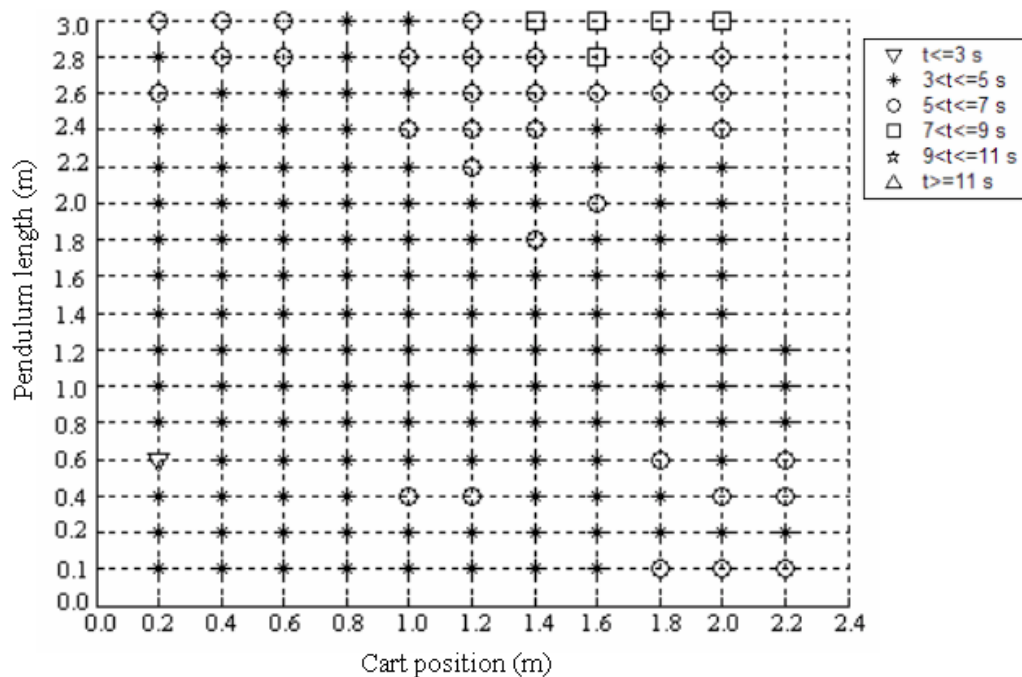


Figure 14. Pendulums with various lengths and initial cart positions that can be stabilized within finite settling times.

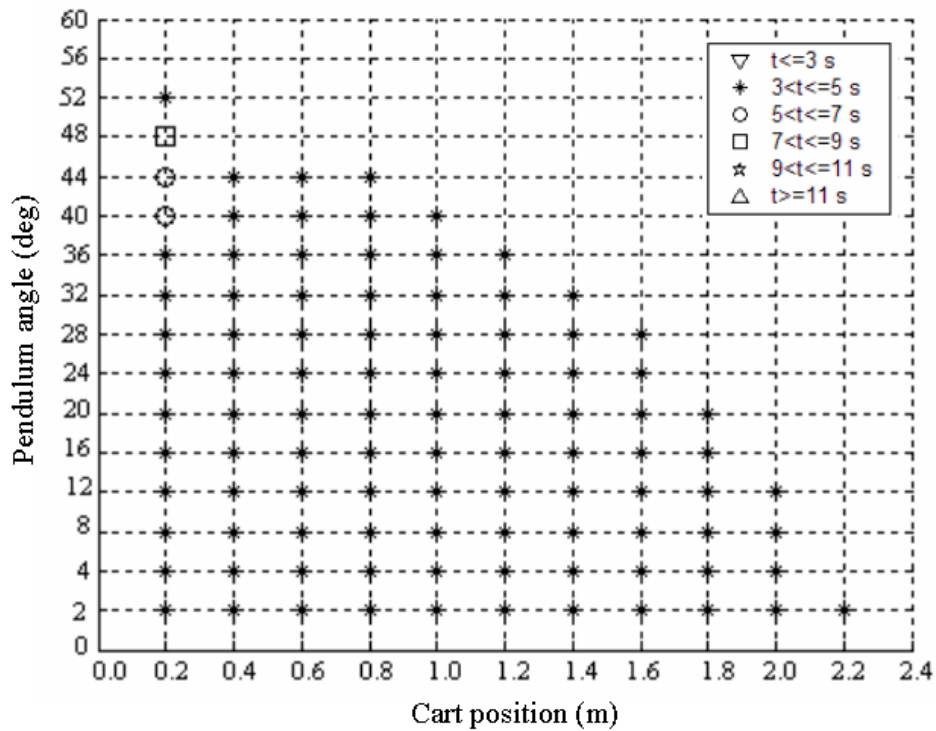


Figure 15. Pendulums with various initial angles and initial cart positions that can be stabilized within finite settling times

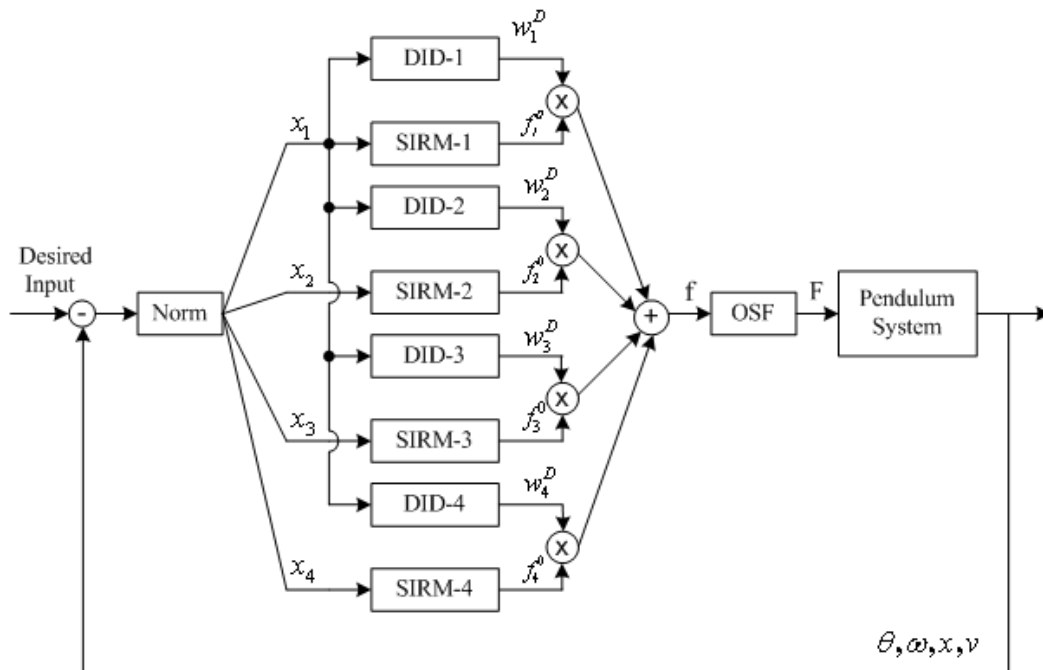


Figure 16. SIRMs fuzzy control structure (Yi *et al.*, 2000)

และ 4.04 วินาที ตามลำดับ

Figure 13 เป็นการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว เมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งมุมเริ่มต้นและความยาวของก้านลูกตุ้มดังนี้คือ ปรับเพิ่มมุมครั้งละ 4 องศา โดยเริ่มจาก 2 องศาจนกระทั่งถึง 60 องศา และที่ทุกตำแหน่งมุมเริ่มต้นทำการปรับเพิ่มความยาวของก้านลูกตุ้มครั้งละ 0.2 เมตร โดยเริ่มจาก 0.1 เมตร จนถึง 3.0 เมตร จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าโดยส่วนใหญ่ใช้เวลาน้อยกว่า 5 วินาที และยังคงสามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้ในช่วงกว้างแม้ว่ามุมและความยาวของก้านลูกตุ้มจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

Figure 14 เป็นผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว ในกรณีปรับเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถ และความยาวของก้านลูกตุ้มดังนี้คือ ทำการปรับตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถครั้งละ 0.2 เมตร โดยเริ่มจาก 0.2 เมตร จนกระทั่งถึง 2.4 เมตร ซึ่งเป็นความยาวปลายสุดของรางลื่น และที่ทุกตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถทำการปรับเพิ่มความยาวของก้านลูกตุ้มครั้งละ 0.2 เมตร โดยเริ่มจาก 0.1 เมตร จนถึง 3.0 เมตร จากผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวยังคงสามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้ในขอบเขตที่กว้างภายในเวลาอันรวดเร็ว กล่าวคือ โดยส่วนใหญ่ใช้เวลาน้อยกว่า 5 วินาที ถึงแม้ว่าตำแหน่งเริ่มต้นและความยาวของก้านลูกตุ้มจะเปลี่ยนแปลงไป แต่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถเป็น 2.4 เมตร ไม่สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้ เนื่องจากตัวรถอยู่ที่ตำแหน่งปลายของรางลื่นพอดี ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาได้อีก จึงไม่สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้

Figure 15 แสดงผลการทดสอบในกรณีปรับเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถและมุมของลูกตุ้มผกผันเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว จากผลการทดสอบพบว่าที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถไม่มากนักสามารถปรับเพิ่มมุมของลูกตุ้มได้ในช่วงกว้าง โดยที่ตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้ แต่เมื่อตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถมากขึ้น สามารถปรับเพิ่มมุมของก้านลูกตุ้มได้ในช่วงที่แคบลง เนื่องจากเมื่อมุมของลูกตุ้มเพิ่มขึ้นประกอบกับตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถมีค่ามาก ทำให้ตัวรถต้อง

เคลื่อนที่ไปทางด้านขวามากเพื่อทำให้ก้านลูกตุ้มหมุนกลับในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ตัวรถเคลื่อนที่เกินความยาวของรางลื่นตามที่ได้กำหนดไว้

### ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว (SIRMs fuzzy controller)

เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวที่นำเสนอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวกับเทคนิคการควบคุมวิธีอื่น โดยได้ทำการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันที่สถานการณ์ต่างๆ กัน ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบสมรรถนะโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว (Yi et al., 2000) ซึ่งยังคงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกตุ้มผกผันตามสมการที่ (1) และสมการที่ (2) สำหรับการจำลองสถานการณ์ โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวแสดงใน Figure 16 ซึ่งการกำหนดค่า SIRMs สำหรับตัวควบคุมดังกล่าวสามารถกำหนดได้เช่นเดียวกับกรณีใช้ตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว แต่ส่วนที่แตกต่างกันคือค่าระดับความสำคัญพลวัต (DID) ของตัวแปรอินพุตแต่ละตัว โดยพิจารณาได้จากผลรวมของค่าฐานและค่าพลวัตของอินพุตแต่ละตัวดังนี้คือ

$$w_i^D = w_i + B_i \cdot \Delta w_i^0 \quad (9)$$

โดยที่  $w_i^D$  เป็นค่าระดับความสำคัญพลวัต

$w_i$  เป็นค่าคงที่เรียกว่า ค่าฐาน (base value)

$B_i$  เป็นค่าคงที่เรียกว่า ค่าขยาย (breadth value)

$\Delta w_i^0$  เป็นผลการอนุมานกฎฟัซซี่ที่ได้จากตัวแปรพลวัต  $\Delta w_i$

จากสมการที่ (9) ค่าฐานและค่าขยายของตัวแปรอินพุตแต่ละตัวได้จากการสุ่มค่าลองผิดลองถูก (Yi et al., 2000) ดังแสดงใน Table 2 เมื่อพิจารณาโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวใน Figure 16 พบว่าในส่วน of ค่าระดับความสำคัญพลวัต (DID-i) ของอินพุตทุกตัวจะมีเพียงตัวแปรเดียวคือมุมของก้านลูกตุ้มผกผัน ดังนั้นการกำหนดกฎฟัซซี่สำหรับตัวแปรพลวัต จะพิจารณาเฉพาะขนาดมุมของก้านลูกตุ้มเท่านั้น ดังได้แสดงใน Table

**Table 2. Base and breadth values of the input items.**

Input item	Base value	Breadth
pendulum angle	2.00	2.50
angular velocity	1.50	1.00
cart position	0.15	0.20
cart velocity	0.15	0.20

**Table 3. Fuzzy rules for the two dynamic variables of the pendulum.**

Antecedent variable $ x_i $	Consequent variable $w_i (i = 1, 2)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

**Table 4. Fuzzy rules for the two dynamic variables of the cart.**

Antecedent variable $ x_i $	Consequent variable $w_i (i = 3, 4)$
DS	1.0
DM	0.5
DB	0.0

3 และ Table 4 โดยกำหนดให้ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพสำหรับตัวแปรอินพุตทุกตัวมีเฉพาะค่าบวก ดังแสดงใน Figure 17 ซึ่งแทนด้วยตัวแปรภาษา DS (Degree Small), DM (Degree Medium) และ DB (Degree Big) ส่วนฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของเอาต์พุตกำหนดเป็นจำนวนจริงเดี่ยว (singleton) ดังนั้นแรงเอาต์พุตที่กระทำกับระบบลูกตุ้มผกผันพิจารณาได้ดังนี้คือ

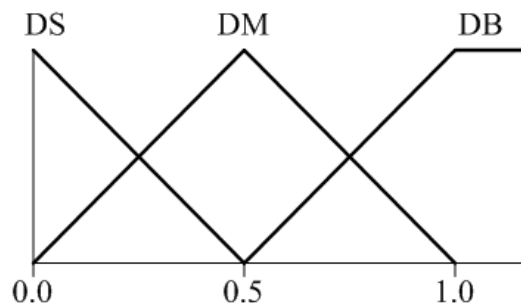
$$f = \sum_{i=1}^4 w_i^D * f_i^0 \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) จะเห็นได้ว่า เอาต์พุตเกิดจากผลรวมของผลคูณระหว่างผลลัพธ์การอนุมานกฎฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวกับค่าระดับความสำคัญพลวัตของอินพุตทั้ง

4 ตัว

เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวได้กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบลูกตุ้มผกผันและข้อกำหนดในการเข้าสู่เสถียรภาพ รวมทั้งสถานการณ์ต่างๆ มีค่าเช่นเดียวกับกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว

Figure 18 ถึง Figure 20 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมุมเริ่มต้นของก้านลูกตุ้มอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศา ตัวรถอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางลื่น โดยปรับเปลี่ยนความยาวของก้านลูกตุ้มเป็น 1.0 เมตร 0.2 เมตร และ 2.2 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เสถียร-



**Figure 17. Membership function for each dynamic variable**

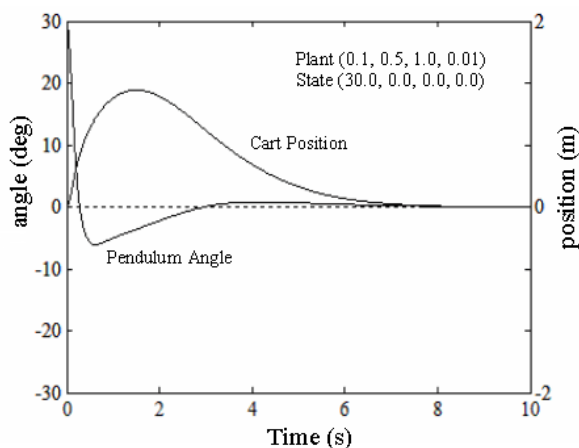


Figure 18. Simulation results (pendulum length of 1.0 m, initial pendulum angle of 30°)

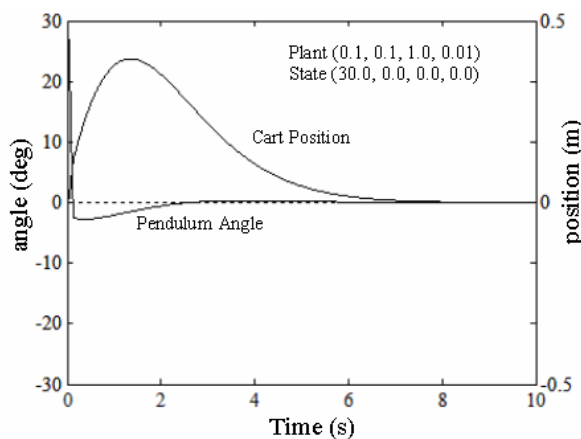


Figure 19. Simulation results (pendulum length of 0.2 m, initial pendulum angle of 30°)

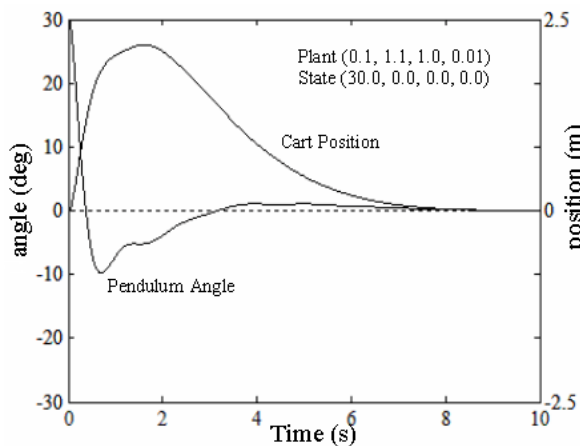


Figure 20. Simulation results (pendulum length of 2.2 m, initial pendulum angle of 30°)

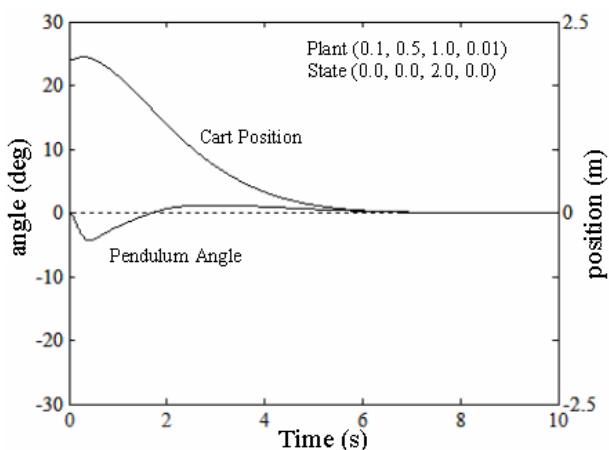


Figure 21. Simulation results (pendulum length of 1.0 m, initial cart position of 2.0 m)

ภาพคือ 8.24 วินาที 6.59 วินาที และ 9.09 วินาที ตามลำดับ Figure 21 เป็นผลการจำลองสถานการณ์เมื่อตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถอยู่ที่ 2.0 เมตร ก้านลูกตุ้มตั้งตรงอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์องศา และก้านลูกตุ้มยาว 1.0 เมตร เวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพคือ 7.19 วินาที เมื่อพิจารณาเวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพของทั้ง 4 สถานการณ์ พบว่าใกล้เคียงมากกับผลงานวิจัยที่อ้างถึง (Yi et al., 2000) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการในการจำลองสถานการณ์ถูกต้อง

Figure 22 และ Figure 23 เป็นผลการจำลอง

สถานการณ์เมื่อปรับเปลี่ยนความยาวก้านลูกตุ้มเป็น 0.2 เมตร และ 2.2 เมตร ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่งเริ่มต้นของรถยังคงเป็น 2.0 เมตร ซึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพ 7.13 วินาที และ 7.83 วินาที ตามลำดับ Figure 24 และ Figure 25 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้มุมเริ่มต้นเป็น 30 องศา ก้านลูกตุ้มยาว 1.0 เมตร โดยทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถให้อยู่ที่ตำแหน่ง 0.15 เมตร และ 1.5 เมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงใน Figure 24 พบว่าใช้เวลา

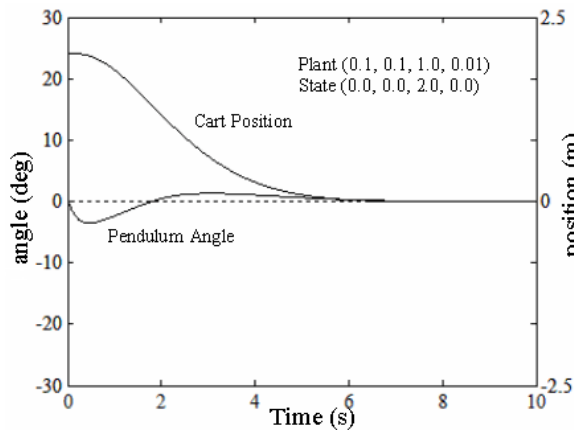


Figure 22. Simulation results (pendulum length of 0.2 m, initial cart position of 2.0 m)

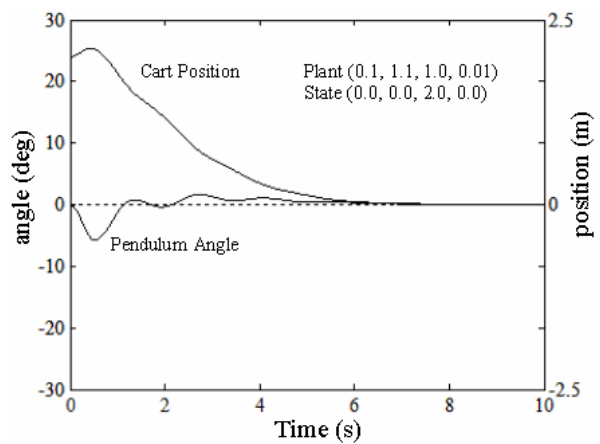


Figure 23. Simulation results (pendulum length of 2.2 m, initial cart position of 2.0 m)

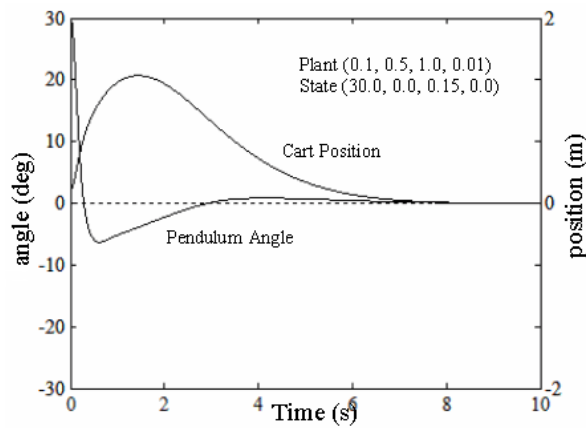


Figure 24. Simulation results (initial pendulum angle of 30°, initial cart position of 0.15 m)

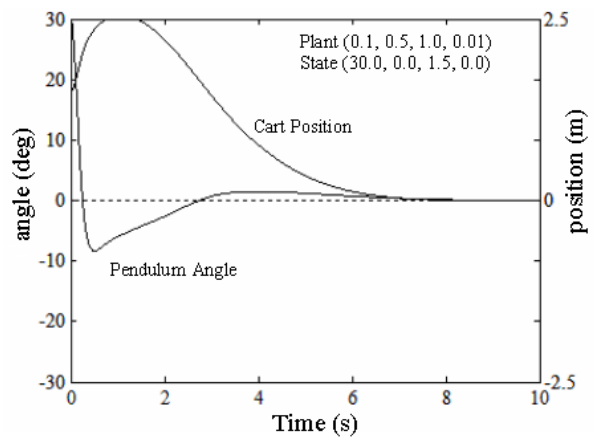


Figure 25. Simulation results (initial pendulum angle of 30°, initial cart position of 1.5 m)

ในการเข้าสู่เสถียรภาพทั้งสิ้น 8.25 วินาที ในขณะที่กรณีตำแหน่งเริ่มต้นของรถอยู่ที่ 1.5 เมตร ตัวควบคุมพีซีซีชนิดกฎอินพุตเดียวไม่สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้ เนื่องจากตัวรถจะเคลื่อนที่เกินขอบเขตความยาวของรางลื่นที่กำหนดไว้คือ 2.4 เมตร ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงใน Figure 25

Figure 26 ถึง Figure 28 เป็นการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีซีซีชนิดกฎอินพุตเดียว โดย Figure 26 ทดสอบด้วยการปรับเปลี่ยนความยาวก้านและมุมเริ่มต้นของลูกตุ้มผกผัน โดยกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถ

อยู่ที่กึ่งกลางของรางลื่น ในขณะที่ Figure 27 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าวเมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถกับความยาวของก้านลูกตุ้ม โดยกำหนดให้ตำแหน่งของก้านลูกตุ้มตั้งตรงอยู่ที่ศูนย์องศา Figure 28 เป็นผลการทดสอบเมื่อกำหนดให้ก้านลูกตุ้มยาว 1.0 เมตร โดยทำการปรับเปลี่ยนมุมและตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถ จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีซีซีชนิดกฎอินพุตเดียวแสดงให้เห็นว่าเวลาโดยส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสร้างเสถียรภาพประมาณ 9 วินาที

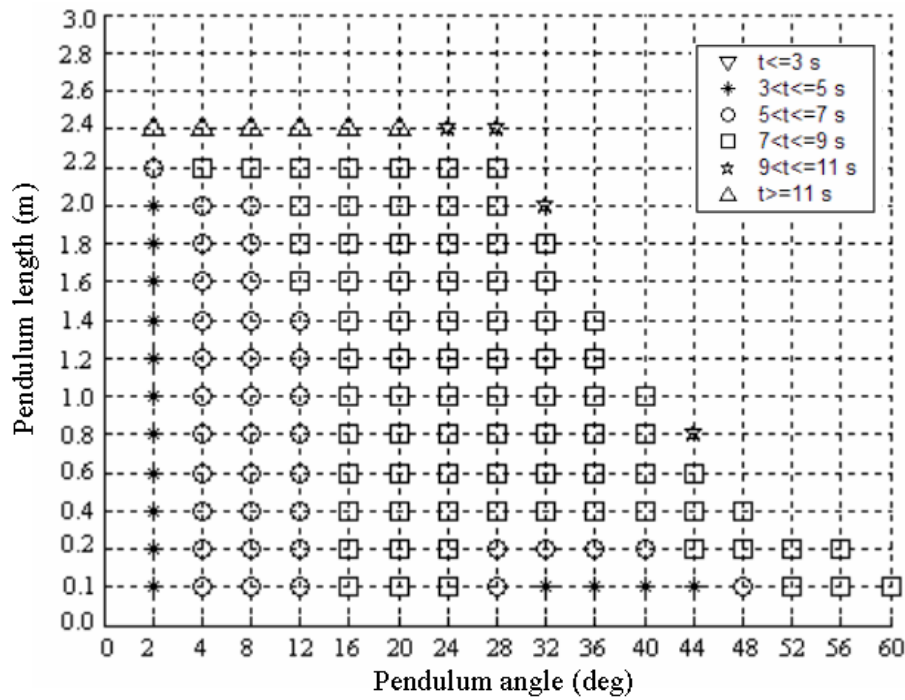


Figure 26. Pendulums with various lengths and initial angles that can be stabilized within finite settling times (SIRMs fuzzy controller)

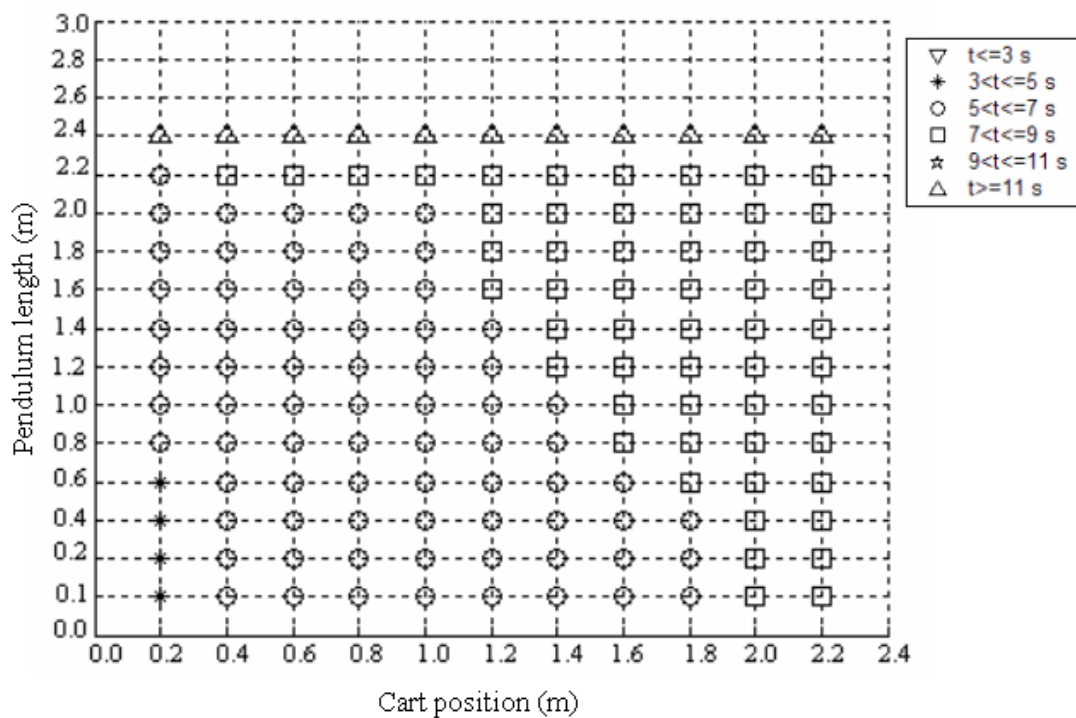


Figure 27. Pendulums with various lengths and initial cart positions that can be stabilized within finite settling times (SIRMs fuzzy controller)



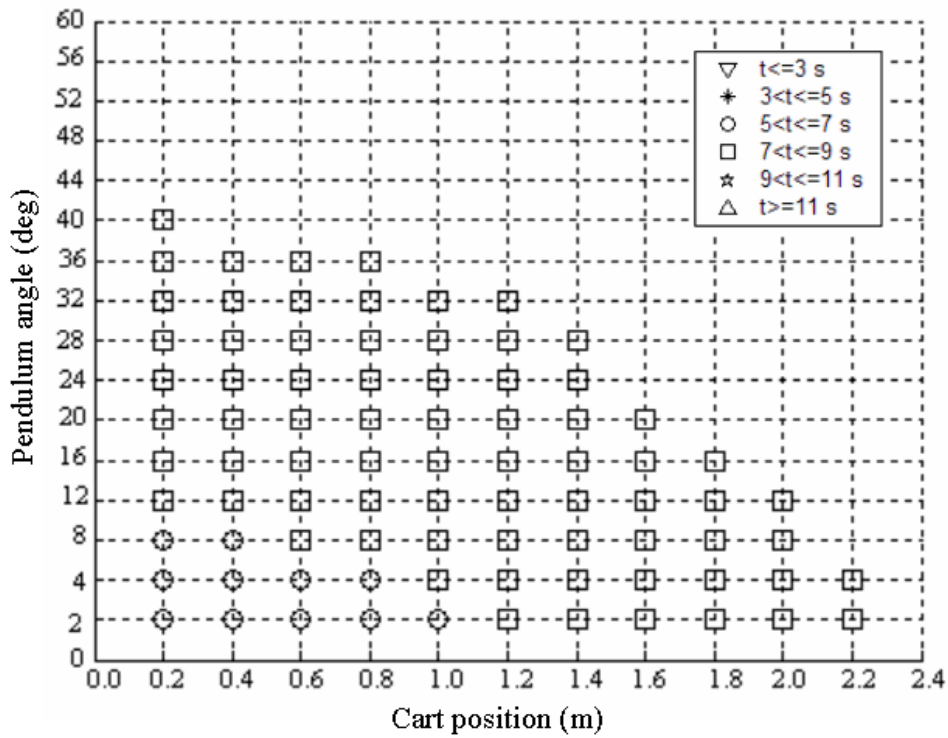


Figure 28. Pendulums with various initial angles and initial cart positions that can be stabilized within finite settling times (SIRMs fuzzy controller)

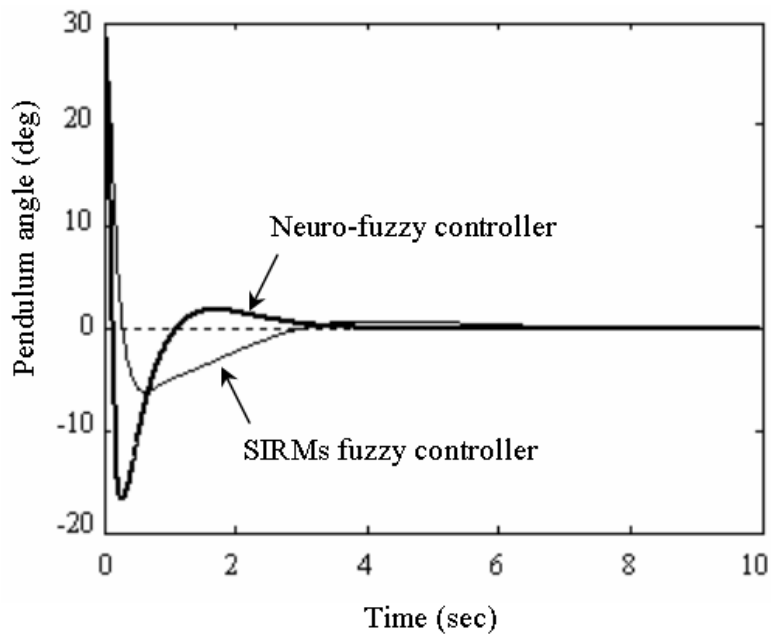


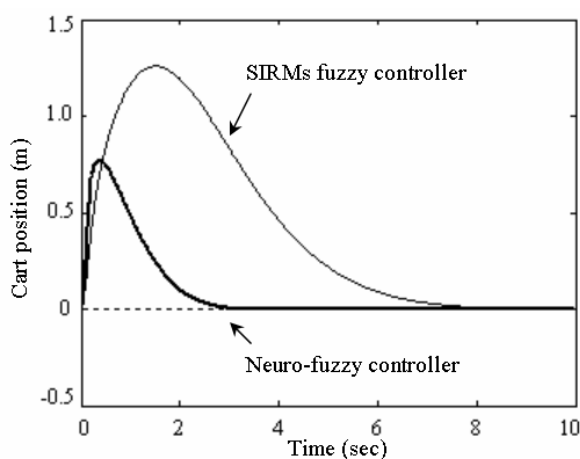
Figure 29. Comparison of stabilized pendulum angles.

**อภิปรายผล**

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวกับเทคนิคการควบคุมแบบอื่น ซึ่งได้แก่ ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวพบว่าที่สถานการณ์การควบคุมเดียวกันตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวสามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว ตัวอย่างเช่น ในกรณีมุมเริ่มต้นของก้านลูกตุ้มเป็น 30 องศา ก้านลูกตุ้มยาว 1.0 เมตร โดยที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถอยู่ที่กึ่งกลางของรางเส้น ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการควบคุมทั้งสองวิธีพิจารณาได้จาก Figure 29 และ Figure 30 ซึ่งแสดงมุมของก้านลูกตุ้มผกผันและตำแหน่งของตัวรถ ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าในกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว การเคลื่อนตัวของก้านลูกตุ้มรวดเร็วและรุนแรงกว่ากรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว กล่าวคือ ก้านลูกตุ้มจะหมุนจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ 30 องศาทางด้านบวกมายังด้านลบอย่างรวดเร็ว ทำให้ตำแหน่งมุมทางด้านลบมีค่าประมาณ -17 องศา จากนั้นก้านลูกตุ้มจะหมุนกลับไปตั้งตรงที่ตำแหน่งศูนย์องศาอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การเคลื่อนตัวของก้านลูกตุ้มที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว

เป็นไปอย่างช้าๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของตัวรถซึ่งแสดงใน Figure 30 พบว่าในกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว ตัวรถจะเคลื่อนห่างไปจากตำแหน่งกึ่งกลางของรางเส้นค่อนข้างมากประมาณ 1.26 เมตร จากนั้นจึงเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้ง โดยใช้เวลาในการเข้าสู่เสถียรภาพทั้งสิ้นประมาณ 8.24 วินาที แต่ถ้าควบคุมด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวตัวรถจะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเริ่มต้นประมาณ 0.78 เมตร แล้วจึงเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางเส้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4.24 วินาที นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบเวลาในการสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันที่สถานการณ์ต่างๆ กันโดยใช้เทคนิคการควบคุมทั้ง 2 วิธี ได้แสดงใน Table 5 พบว่าตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวที่นำเสนอสามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยว

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแต่ละวิธีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความยาวของก้านลูกตุ้ม ตำแหน่งเริ่มต้นของมุมและตัวรถ พบว่าในกรณีของตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวโดยส่วนใหญ่ใช้เวลาในการสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันน้อยกว่า 5 วินาที ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดี่ยวใช้เวลาประมาณ 9 วินาที Figure 31 ถึง Figure 33 แสดงขอบเขตสมรรถนะของเทคนิคการควบคุมแต่ละวิธีที่



**Figure 30. Comparison of stabilized cart positions**

**Table 5. Comparison of stabilization times between the proposed neuro-fuzzy controller and the SIRMs fuzzy controller.**

Case	Situations for simulation	Stabilization time (sec)	
		Neuro-fuzzy controller	SIRMs fuzzy controller
1	initial angle = 30 degree initial position = 0.0 m length of pendulum = 1.0 m	4.24	8.24
2	initial angle = 30 degree initial position = 0.0 m length of pendulum = 0.2 m	3.86	6.59
3	initial angle = 30 degree initial position = 0.0 m length of pendulum = 2.2 m	8.80	9.09
4	initial angle = 0 degree initial position = 2.0 m length of pendulum = 1.0 m	3.93	7.19
5	initial angle = 0 degree initial position = 2.0 m length of pendulum = 0.2 m	4.02	7.13
6	initial angle = 0 degree initial position = 2.0 m length of pendulum = 2.2 m	4.70	7.83
7	initial angle = 30 degree initial position = 0.15 m length of pendulum = 1.0 m	4.18	8.25
8	initial angle = 30 degree initial position = 1.5 m length of pendulum = 1.0 m	4.04	unstable

สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผัน โดย Figure 31 เป็นขอบเขตสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความยาวของก้านลูกตุ้มและมุมเริ่มต้นของลูกตุ้ม Figure 32 แสดงขอบเขตสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความยาวของก้านลูกตุ้มและตำแหน่งเริ่มต้นของตัวรถ ในขณะที่ Figure 33 แสดงขอบเขตสมรรถนะเมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นของมุมและตัวรถ ผลการทดสอบสมรรถนะแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวสามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้ในขอบเขตที่กว้างขวางกว่าตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว

### สรุป

วิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่นำเสนอเพื่อสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวเป็นการผสมผสานระหว่างตัวควบคุมฟัซซี่แบบกฎอินพุตเดียวร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมหรือตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว ประกอบด้วยกฎฟัซซี่แบบอินพุตเดียว (SIRM) และค่าระดับความสำคัญพลวัต (DID) ซึ่งได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้แบบแพร่กลับ ตัวควบคุมที่นำเสนอไม่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และช่วยลดจำนวนกฎฟัซซี่โดยใช้เพียง 12 กฎในการสร้างเสถียรภาพ

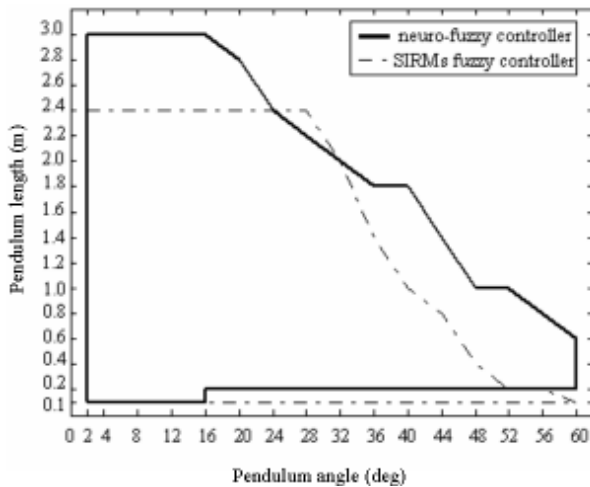


Figure 31. Comparison of stability various (I)

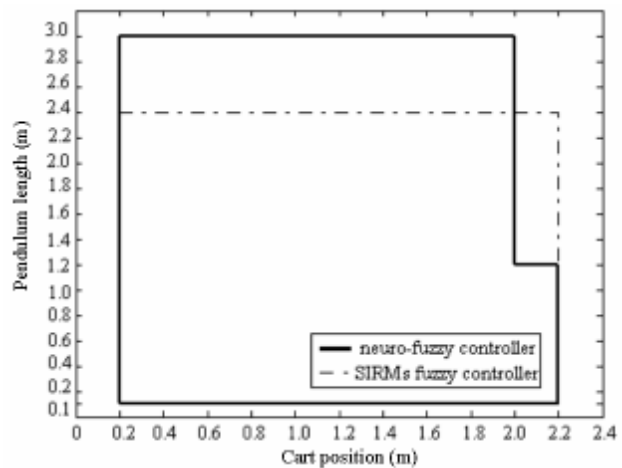


Figure 32. Comparison of stability various (II)

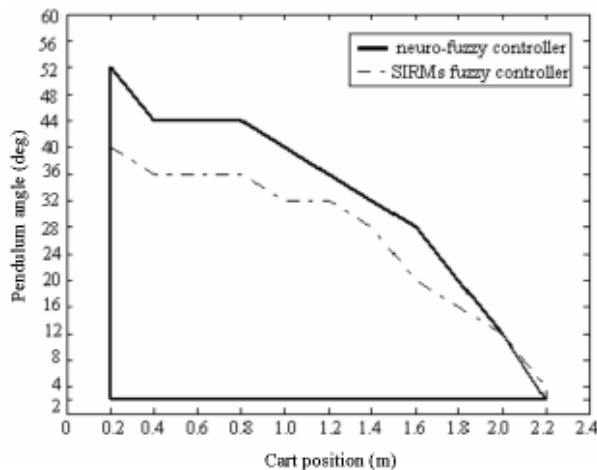


Figure 33. Comparison of stability various (III)

ให้ระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวเมื่อทำการควบคุมทั้งมุมลูกตุ้มและตำแหน่งของตัวรถ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมรรถนะและประสิทธิภาพของตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแสดงให้เห็นว่าเมื่อพารามิเตอร์ของระบบและสถานการณ์ที่ควบคุมเปลี่ยนแปลงไปวิธีการควบคุมที่นำเสนอนี้ยังคงสามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันแบบข้อต่อเดียวในขอบเขตที่กว้างขวางได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียว กับเทคนิค

การควบคุมวิธีอื่น ซึ่งได้แก่ ตัวควบคุมพีซีชนิดกฎอินพุตเดียว ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแต่ละวิธีแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎอินพุตเดียวที่นำเสนอ สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้รวดเร็วและมีขอบเขตสมรรถนะที่กว้างขวางกว่าตัวควบคุมพีซีชนิดกฎอินพุตเดียว

**ข้อเสนอแนะ**

ในการการจำลองสถานการณ์การสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันด้วยตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี่ชนิดกฎ

อินพุตเดียว กำหนดให้ค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) ที่ใช้สำหรับการเรียนรู้แบบแพร่กลับเป็นค่าคงที่ ซึ่งอาจต้องใช้จำนวนรอบในการเรียนรู้มาก ดังนั้นเพื่อให้การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมรวดเร็วขึ้น อาจปรับปรุงให้ค่าอัตราการเรียนรู้สามารถปรับค่า (adaptive) ได้ตามสถานการณ์ที่ทำการควบคุม นอกจากนี้เนื่องจากการปรับค่าระดับความสำคัญพลวัตใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับโดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมได้แก่ค่าน้ำหนักประสาท และค่าไบแอส ได้มาจากการสุ่มค่า ซึ่งอาจมีโอกาสนี้ไม่สามารถสร้างเสถียรภาพให้ระบบลูกตุ้มผกผันได้ ดังนั้นอาจหลีกเลี่ยงปัญหานี้ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นเหล่านี้ให้เหมาะสมด้วยเทคนิคการค้นหาต่างๆ เช่น จีแนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search) เป็นต้น

#### เอกสารอ้างอิง

- Cavalcanete, C. and Hirota, K. 1998. SIRMs connected fuzzy inference model tuning using genetic algorithm. Proc. IEEE Int. Conf. Fuzz. Syst.: 1277-1280.
- Cui, X. and Shin, K.G. 1993. Direct control and coordination using neural networks. IEEE Trans. SMC. 23(3): 686-697.
- Jin, W., Li, Z.J., Wei, L.S. and Zhen, H. 2000. The improvements of bp neural network learning algorithm. Proc. ICSP2000: 1647-1649.
- Kandadai, R.M. and Tien, J.M. 1996. On a fuzzy-neural hierachical controller with a self-generating knowledge base. Proc. SMC'96, vol.4: 2625-2630.
- King, R.E. 1999. Computational intelligence in control engineering. New York: Marcel Dekker Inc.
- Kyung, K.H. and Lee, B.H. 1993. Fuzzy rule base derivation using neural network based fuzzy logic controller by self-learning. Proc. IECON' 93: 435-440.
- Mizumoto, M. 1996. Product-sum-gravity method = fuzzy singleton-type reasoning method = simplified fuzzy reasoning method. Proc. FUZZ-IEEE'96, vol.3: 2098-2102.
- Omatu, S., Fujinaka, T. and Yoshioka, M. 2000. Neuro-PID control for inverted single and double pendulums. Proc. IEEE Int. Conf. SMC.: 2685-2690.
- Sakai, S. and Takahama, T. 1997. Learning fuzzy control rules for inverted pendulum by simplex method. Proc. 13<sup>th</sup> Fuzz. Syst. Symp.: 61-64.
- Yi, J. and Yubazaki, N. 2000. Stabilization fuzzy control of inverted pendulum systems. AI in Eng.14(2): 153-163.