

# การปรับปรุงตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

สมหวัง อริสริยวงศ์<sup>1</sup> สยาม เจริญเสียง<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## บทคัดย่อ

ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในลักษณะของงานที่มีความไม่แน่นอน และ/หรือ ไม่เที่ยงตรงของตัวแปรต่างๆในการควบคุม และเนื่องจากพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของหุ่นยนต์มีความซับซ้อนและไม่แน่นอนของตัวแปรเกิดขึ้นขณะที่หุ่นยนต์ทำงาน ดังนั้นจึงมีการนำตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกมาใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบดั้งเดิมนั้นไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ณ สภาวะคงตัว ลงได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ เพื่อลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ณ สภาวะคงตัว และ ไม่ทำให้ผลการตอบสนองแบบชั่วคราวของระบบเปลี่ยนไป อีกทั้งยังประหยัดหน่วยความจำที่ใช้ โดยการเพิ่มอินพุตให้กับตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมอีกหนึ่งอินพุต คือ ผลรวมค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง และ สร้างกฎพื้นฐานทางฟัซซีเพิ่มเติมอีกสองกฎ จากผลการทดลองพบว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ปรับปรุงแล้วสามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ณ สภาวะคงตัวลงได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ – ฟัซซีเซต ตัวควบคุมแบบฟัซซี กฎพื้นฐานทางฟัซซี

## ABSTRACT

Fuzzy logic control has been widely applied for handling the systems which consist of uncertainty and/or imprecise control factors. Since the dynamic behaviors of the systems also contain complexity and uncertainty in its parameters, several fuzzy logic controllers have been used in the field of robotic control to deal with such problems. However, a conventional fuzzy logic controller cannot significantly reduce position errors at the steady state. In this research, we have developed a fuzzy logic controller for robotic manipulators in order to reduce position errors at the steady state, to eliminate the effect of the transient response, and to save memory and computation time. The improved fuzzy logic controller also includes the sum of position error as its input and adds two more fuzzy rule bases. From the experiment, the improved fuzzy logic controller can reduce the position errors at the steady state more than 80 percent compared with the conventional fuzzy logic controller.

**KEY WORDS** – Fuzzy set Fuzzy logic controller Fuzzy rule base

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรมกันอย่างมากมาย [1] ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบในการควบคุมหุ่นยนต์คือพลศาสตร์ของหุ่นยนต์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และ มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขณะที่หุ่นยนต์มีการทำงาน ทำให้การควบคุมหุ่นยนต์ให้มีความถูกต้องและแม่นยำเป็นไปได้ยาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการคิดค้นทฤษฎีการควบคุมต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม เช่น ตัวควบคุมแบบปรับค่าได้ (Adaptive Controller) [2] แต่การควบคุมดังกล่าวผู้ออกแบบจะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบและลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในระบบ ซึ่งเป็นการยากในทางปฏิบัติที่จะรู้ค่าเหล่านี้ ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยที่ผู้ออกแบบ

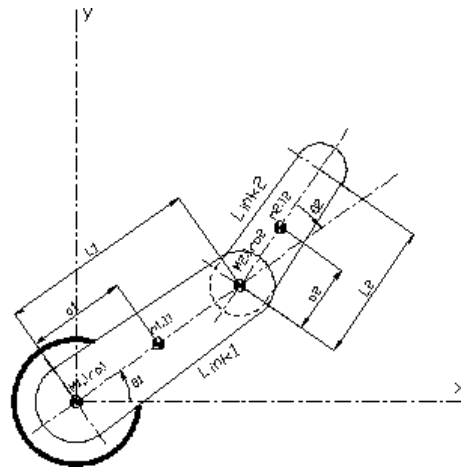
ตัวควบคุมไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่จะพิจารณาการควบคุมบนพื้นฐานพฤติกรรมของระบบที่จะควบคุม ทำให้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเข้าใจได้ง่าย ปรับเปลี่ยนได้ไม่ยาก และมีความคล้ายคลึงกับการตัดสินใจของมนุษย์ [2]

ทฤษฎีฟัซซีเซตถูกนำเสนอโดย Zadeh ในปีค.ศ. 1965 [3] ซึ่งกล่าวถึงความไม่แน่นอนและไม่ชัดเจนของการนิยามสิ่งของหนึ่งๆ เนื่องจากความไม่ชัดเจนดังกล่าว Zadeh จึงนิยามสิ่งของเหล่านั้นในรูปของฟัซซีเซต โดยฟัซซีเซตก็จะขึ้นกับฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งจะทำการแบ่งระดับความเป็นสมาชิกให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 จากนั้นฟัซซีเซตต่างๆก็จะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์และแปรความหมายออกมาอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากฟัซซีเซตนั้นกล่าวถึงความไม่แน่นอนและไม่ชัดเจน จึงมีการนำทฤษฎีฟัซซีมาใช้ในการควบคุมต่างๆแทนตัวควบคุมแบบดั้งเดิมซึ่งสามารถควบคุมได้ดีเฉพาะในกรณีที่มีค่าพารามิเตอร์ของระบบอย่างถูกต้อง และ พารามิเตอร์ต่างๆไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำงาน [4]

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้น ของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก โดยจะกล่าวถึงตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกแบบดั้งเดิมต่อการปรับปรุงตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกให้สามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ณ สภาวะคงตัว โดยไม่ทำให้ผลการตอบสนองแบบชั่วคราวของระบบเปลี่ยนไป อีกทั้งยังประหยัดหน่วยความจำที่ใช้ โดยในการทดสอบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกทั้งแบบดั้งเดิม และ ที่ปรับปรุงแล้ว จะทำการทดสอบกับหุ่นยนต์สองแกนแบบสกาล่า ที่ใช้การขับเคลื่อนโดยตรง (Two-Axis Direct Drive SCARA Robot)

## 2. ระบบหุ่นยนต์สองแกนแบบสกาล่า

แบบจำลองพลวัตของหุ่นยนต์จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของข้อต่อของแขนกล ซึ่งเป็นระบบสมการหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต ภาพจำลองพลวัตของหุ่นยนต์สองแกนแบบสกาล่าที่เคลื่อนที่ในแนวระนาบ x-y จะแสดงดังรูปที่ 1 [5]



รูปที่ 1. แสดงภาพจำลองแขนกลในระนาบ x-y

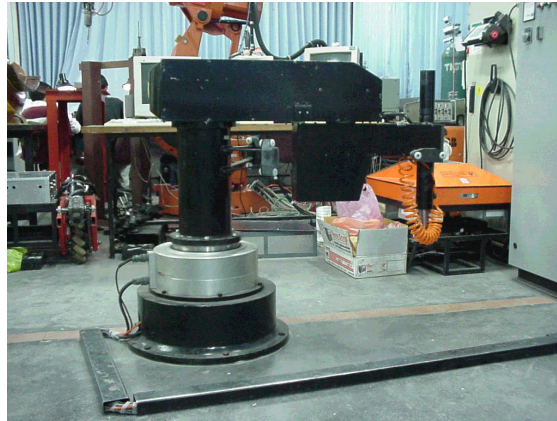
สมการพลวัตของหุ่นยนต์คือ

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + F \tag{1}$$

โดย

- $\tau$  คือ เวกเตอร์ของแรงบิด ขนาด 2x1
- $M(\theta)$  คือ เมตริกซ์ของความเฉื่อย ขนาด 2x2
- $h(\theta, \dot{\theta})$  คือ เวกเตอร์ของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) และ แรงโคลิโอลิส (Coriolis Force) ขนาด 2x1
- $F$  คือ เวกเตอร์ของเทอมที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอน เช่น แรงเสียดทานเป็นต้น ขนาด 2x1

หุ่นยนต์สองแกนแบบสกาล่าที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 2 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหุ่นยนต์แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2. แสดงหุ่นยนต์สองแกนแบบสกาล่าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1. แสดงค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	มวล (Kg)	ความยาว (m)	ความเฉื่อย (Kg/m <sup>2</sup> )
ข้อต่อที่ 1	54.213	0.499	1.828
ข้อต่อที่ 2	3.988	0.350	1.325
มอเตอร์ข้อต่อที่ 1	73.0	-	1.070
มอเตอร์ข้อต่อที่ 2	14.0	-	0.031

จากตารางที่ 1 เราสามารถหาเมตริกซ์  $M(\theta)$  และ  $h(\theta, \dot{\theta})$  ได้ดังนี้

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} P_1 + 2P_2 \cos(\theta_2) & -P_3 - P_2 \cos(\theta_2) \\ -P_3 - P_2 \cos(\theta_2) & P_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$h(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} P_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) - 2P_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) \\ P_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่

$$P_1 = 10.1493$$

$$P_2 = 0.5224$$

$$P_3 = 1.6143$$

### 3. การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

#### 3.1 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตคือเซตของสิ่งใดๆ ที่มีค่าของความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 กับ 1 คุณสมบัติที่ทำให้ฟัซซีเซตแตกต่างจากเซตในระบบเดิม (Crisp Set) คือตรงที่สมาชิกของฟัซซีเซตจะมีค่าของความเป็นสมาชิกแตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 1 ในขณะที่ในระบบเดิมจะมีค่าความเป็นสมาชิกเพียง 0 หรือ 1 คือเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกเท่านั้น ฟัซซีเซตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$A = \int_U \mu_A(y) / y \quad (4)$$

โดย

A คือฟัซซีเซตและเครื่องหมายอินทิเกรตหมายถึงการยูเนียน

#### 3.2 ตัวดำเนินการเบื้องต้น

ตัวดำเนินการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีด้วยกันมากมาย เช่น max-min และ min-max ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$A \text{ and } B = \int_U \min(\mu_A(y), \mu_B(y)) / y \quad (5)$$

$$A \text{ or } B = \int_U \max(\mu_A(y), \mu_B(y)) / y \quad (6)$$

โดยที่ A และ B คือฟัซซีเซต ส่วนตัวดำเนินการอื่นๆสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข[6]

#### 3.3 ขบวนการฟัซซีรีชันนิง (Fuzzy Reasoning)

ฟัซซีลอจิกสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 7 เรียกว่ากฎฟัซซีซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton Rule) [2] โดย  $x_i$  เป็นตัวแปรอินพุต ( $i$  คือ จำนวนอินพุต ;  $i = 1, \dots, m$ ) ส่วน  $y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุต

$$\text{Rule } l : \text{if } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots, \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ then } y \text{ is } y^{-l} \quad (7)$$

โดยที่  $l$  เป็นลำดับที่ของกฎพื้นฐานควบคุมฟัซซี (Fuzzy Rule Base) มีค่า  $1, \dots, M$  ส่วน  $F_1^l, \dots, F_n^l$  เป็นลึงกวิตติคของส่วน antecedence โดย  $\mu_{F_i^l}(x_i)$  เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และ  $y^{-l}$  เป็นจำนวนจริงของส่วน consequence เอาท์พุตของฟัซซี  $f(x)$  ซึ่งใช้ในการควบคุมระบบโดยมีอินพุตเวกเตอร์  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  สามารถแสดงให้อยู่ในรูปสมการที่ 8 [6]

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M y^{-i} \mu_i}{\sum_{i=1}^M \mu_i} \quad (8)$$

โดยที่  $\mu_i$  เป็นผลที่ได้จากการอินเฟอเรนซ์ของค่าที่ได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจากส่วน antecedence

ตัวอย่างของขบวนการฟัซซีรีชันนิง (Fuzzy Reasoning) จะแสดงได้ดังต่อไปนี้ กำหนดให้กฎฟัซซีซิงเกิลตันมี 2 กฎ ดังนี้

Rule 1: If  $x_1$  is  $A_{11}$  and  $x_2$  is  $A_{12}$  then  $y$  is  $B_1$

Rule 2: If  $x_1$  is  $A_{21}$  or  $x_2$  is  $A_{22}$  then  $y$  is  $B_2$

ผลของการอินเฟอเรนซ์ให้เป็น  $w_1$  และ  $w_2$  กำหนดให้เป็น

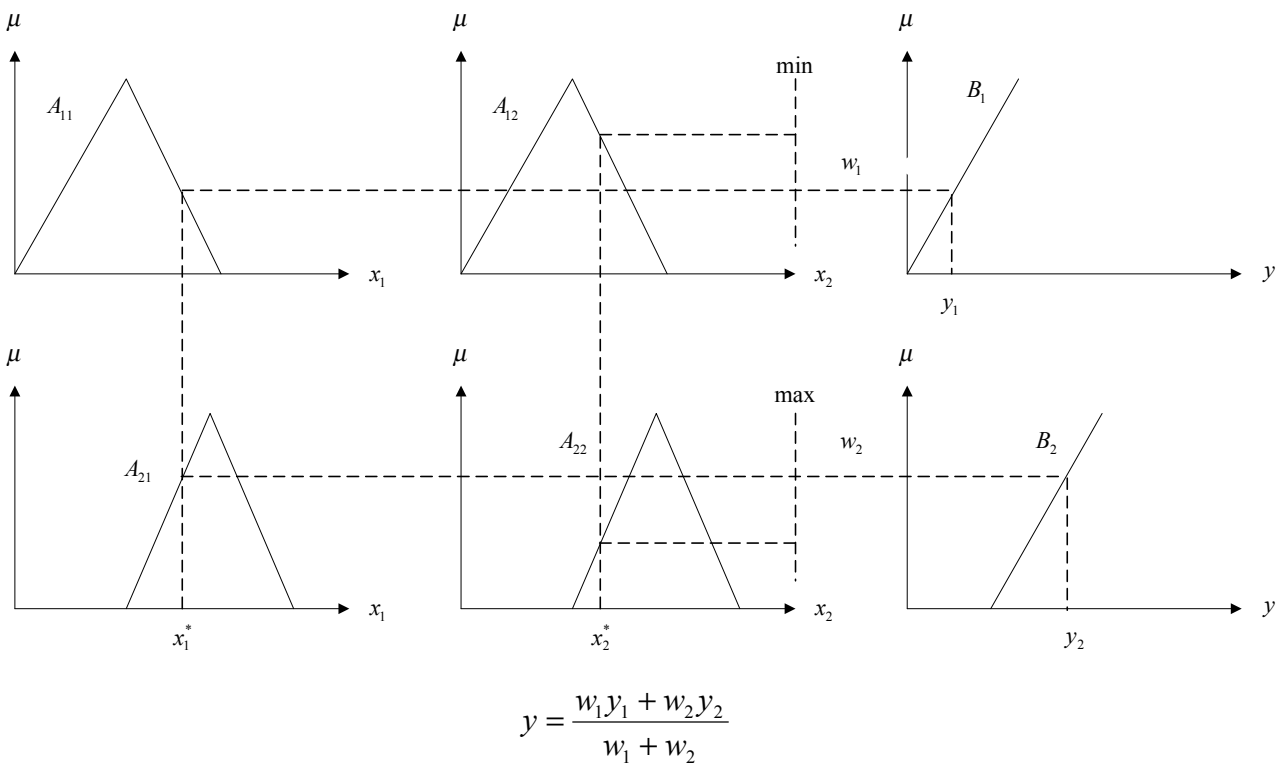
$$w_1 = \min(\mu_{A_{11}}(x_1), \mu_{A_{12}}(x_2)) \tag{9}$$

$$w_2 = \max(\mu_{A_{21}}(x_1), \mu_{A_{22}}(x_2)) \tag{10}$$

เอาท์พุทของฟัซซีหาได้จาก

$$y = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i y_i}{\sum_{i=1}^2 w_i} \tag{11}$$

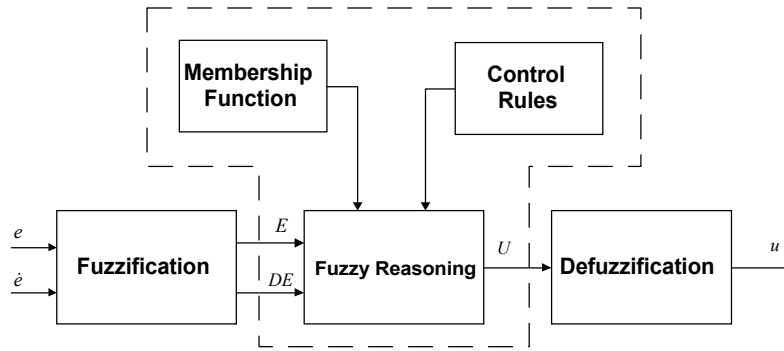
ขบวนการฟัซซีรีซันนิ่ง (Fuzzy Reasoning) ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. แสดงขบวนการฟัซซีรีซันนิ่ง (Fuzzy Reasoning)

### 3.4 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิม

โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมจะแสดงในรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นได้ว่าในระบบควบคุมจะเริ่มที่ขบวนการฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) ซึ่งเป็นการนำค่าที่รับเข้ามาในระบบแปลงเป็นฟัซซีเซต จากนั้นจะเข้าสู่ขบวนการฟัซซีรีซันนิ่ง (Fuzzy Reasoning) ก็จะทำการประมวลผลการควบคุม และส่งต่อไปที่ขบวนการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) ซึ่งเป็นขบวนการแปลงค่าจากฟัซซีเซตให้เป็นค่าที่ใช้ควบคุมจริง (Crisp)



รูปที่ 4. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่เป็นอินพุตให้ตัวควบคุมคือ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง  $e$  (rad) และ ค่าความผิดพลาดของความเร็วเชิงมุม  $\dot{e}$  (rad/s) ส่วนตัวแปรที่เป็นเอาต์พุตคือตัวแปรที่เป็นสัญญาณควบคุม  $u$  (N.m) ที่ส่งไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่าของ  $e$  และ  $\dot{e}$  หาได้จาก

$$e = \text{ตำแหน่งที่ต้องการ} - \text{ตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริง} \quad (12)$$

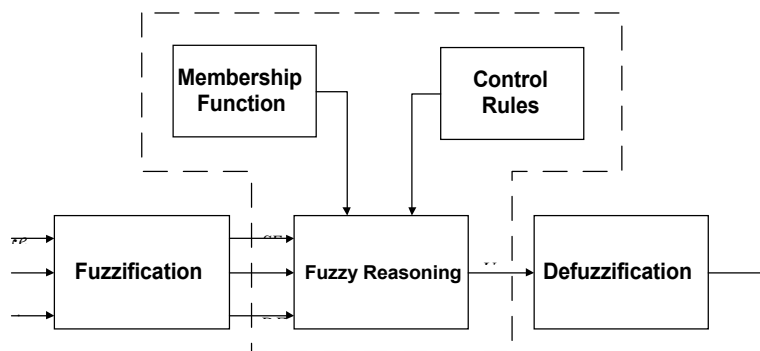
$$\dot{e} = \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \quad (13)$$

โดยที่  $T$  คือ คาบเวลาในการสุ่ม

จากโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมนั้นจะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับตัวควบคุมแบบพีดี แต่ต่างกันตรงที่ตัวควบคุมฟัซซีจะมีลักษณะการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นผลที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิม จะมีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถลดค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัว ลงได้ โดยจะแสดงให้เห็นในหัวข้อของการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

### 3.5 การปรับปรุงตัวควบคุมแบบฟัซซี

จากปัญหาของตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมที่กล่าวมาแล้วนั้น จึงได้มีการปรับปรุงตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมที่ใช้อยู่ให้มีความสามารถในการกำจัดค่าผิดพลาด ณ จุดสถานะคงตัวให้หมดไป โดยจะทำการเพิ่มอินพุตให้กับตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมอีกหนึ่งตัว คือ ผลรวมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง และเพื่อไม่ให้อินพุตที่เพิ่มเข้าไปมีผลทำให้ผลการตอบสนองแบบชั่วคราวของระบบเปลี่ยนไปดังนั้นจะให้อินพุตที่เพิ่มเข้าไปมีค่าเฉพาะในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัวเท่านั้น โดยตรวจสอบจากเงื่อนไขที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในช่วงหนึ่งคาบเวลาจะต้องน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้และ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะต้องต่ำกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่สภาวะคงตัวที่กำหนดไว้ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิมเปลี่ยนเป็นดังรูปที่ 5 [7]



รูปที่ 5. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ปรับปรุงใหม่

โดยที่ ผลรวมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง หาได้จากสมการที่ 14

$$\int e = \sum_{i=j}^k e(iT)T \tag{14}$$

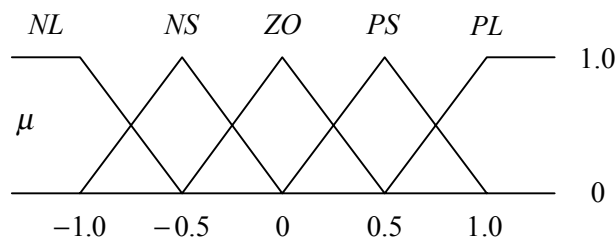
โดย  $T$  คือ คาบเวลาในการสุ่ม

ในที่นี้ค่าของตัวแปรที่เป็นอินพุต และ เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบฟuzzyจะถูกสเกลให้อยู่ในช่วง  $[-1,1]$  ค่าของการสเกลนี้เราจะใช้การสเกลแบบเชิงเส้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 2

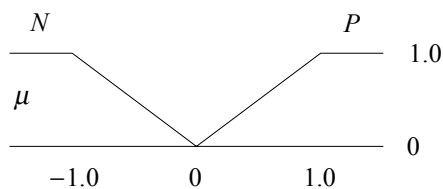
ตารางที่ 2. แสดงการสเกลค่าอินพุทของตัวควบคุมแบบฟuzzy

ค่ามาตรฐาน	$e_1$ (rad)	$e_2$ (rad)	$\int e_1$ (rad.s)	$\int e_2$ (rad.s)	$\dot{e}_1, \dot{e}_2$ (rad/s)	$u_1$ (rad/s)	$u_2$ (rad/s)
-1.0	-0.1	-0.1	-0.0008	-0.0005	-1.0	-250.0	-40.0
-0.5	-0.05	-0.05	-0.0004	-0.00025	-0.5	-125.0	-20.0
0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.05	0.05	0.0004	0.00025	0.5	125.0	20.0
1.0	0.1	0.1	0.0008	0.0005	1.0	250.0	40.0

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และ ตัวแปรฟuzzyต่างๆของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ค่าความผิดพลาดของความเร็ว และ สัญญาณควบคุม จะใช้ดังรูปที่ 6 ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลรวมค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6. แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $e, \dot{e}$  และ  $u$



รูปที่ 7. แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $\int e$

โดยที่

- N = Negative
- NL = Negative Large
- NS = Negative Small
- ZO = Zero
- PS = Positive Small
- PL = Positive Large
- P = Positive

กฎพื้นฐานทางฟัซซี (Fuzzy Rule Base) เป็นขบวนการในการเชื่อมโยงฟัซซีเซตของตัวแปรเข้า (Input Fuzzy Set) ที่ได้มาจากขบวนการฟัซซีฟายเออร์ (Fuzzifier) ไปสู่ฟัซซีเซตของตัวแปรออก (Output Fuzzy Set) เช่น

R1: If E is ZO and DE is NL then U is NL

R2: If E is PS and DE is NS then U is ZO

โดยที่

- E คือ ฟัซซีเซตของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง
- DE คือ ฟัซซีเซตของค่าความผิดพลาดของความเร็ว
- U คือ ฟัซซีเซตของค่าสัญญาณควบคุม

ในที่นี้เราจะใช้ฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ตามกฎของ Mamdani min ในการกำหนดกฎพื้นฐานของฟัซซีนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถสร้างกฎได้สูงสุดเท่ากับ  $5 \times 5 \times 2 = 50$  กฎ ซึ่งค่อนข้างมากและไม่จำเป็น อีกทั้งยังอาจทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมด้อยลงไปด้วย ดังนั้นเราจึงจะพิจารณาให้ฟัซซีเซตของผลรวมค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (SE) มีผล เฉพาะในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่านั้น เราจึงออกแบบกฎพื้นฐานทางฟัซซีดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3. แสดงกฎพื้นฐานทางฟัซซี

E / DE	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	NL	NL	NL	NS	ZO
NS	NL	NL	NS	ZO	PS
ZO	NL	NS	ZO	PS	PL
PS	NS	ZO	PS	PL	PL
PL	ZO	PS	PL	PL	PL

If E = ZO , DE = ZO and SE = P then U = PS

If E = ZO , DE = ZO and SE = N then U = NS

จากตารางที่ 3 จะพบว่ากฎเพิ่มขึ้นจากเดิม 25 กฎ เป็น 27 กฎ เท่านั้น จะเห็นได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ประหยัดหน่วยความจำที่จำเป็นต้องใช้

การทำดีฟัซซีฟิเคชัน เป็นขบวนการในการแปลงค่าที่ฟัซซีเซตของตัวแปรออกที่รวมแล้ว ให้เป็นค่าตัวเลขที่จะส่งไปควบคุมหุ่นยนต์จริงๆ ในการวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีหลักค่าศูนย์กลาง (Center of Area) ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ให้ผลค่อนข้างดี เพราะจุดศูนย์กลางของพื้นที่น่าจะเป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของเซตนั้น และในกรณีที่ต้องกระทำพร้อมกันหลายๆกฎในการกระทำจะทำให้เกิดพื้นที่ของเซตหลายๆเซตมาซ้อนทับกันการซ้อนทับกันนี้ทำให้เกิดความต่อเนื่องในเอาท์พุทที่ส่งออก สมการที่ใช้ในการคำนวณตัวแปรออกที่ส่งไปควบคุมจะใช้ตามสมการที่ 8

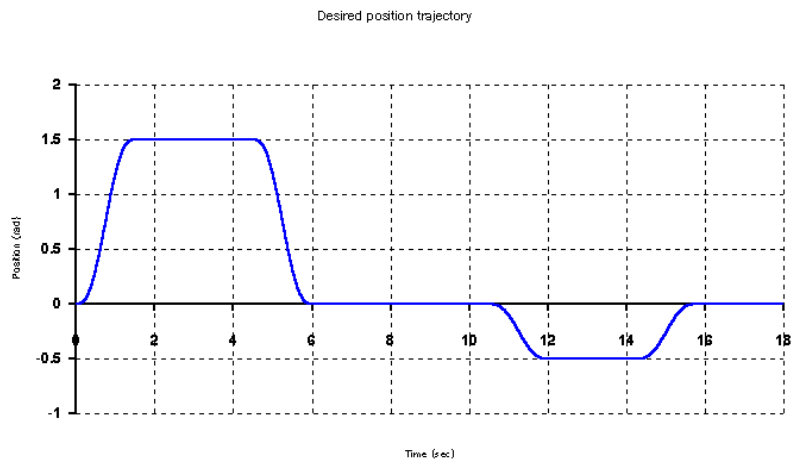


#### 4. ผลการทดลอง

ในการทดลองนั้น จะกำหนดให้ตัวควบคุมแบบฟuzzyทำการควบคุมเส้นทางเดินของหุ่นยนต์สองแกนแบบสกาล่า ที่มีการขับเคลื่อนโดยตรง แนวทางเดิน (Trajectory) ของหุ่นยนต์ที่ใช้นั้นจะมาจากสมการ โพลีโนเมียลอันดับที่ 5 ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

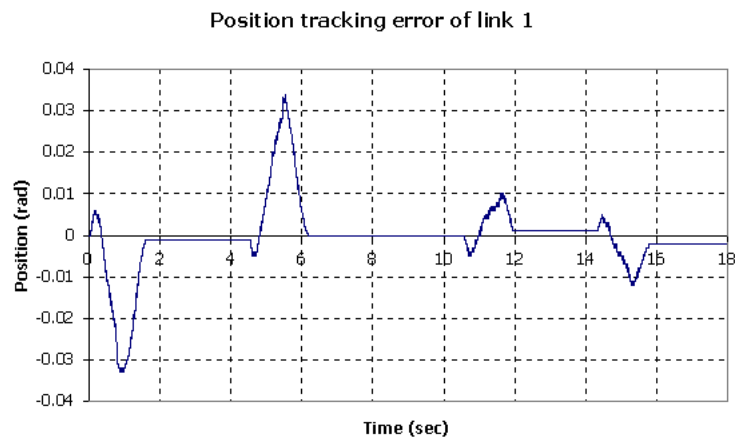
$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (15)$$

และมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของทั้งสองแกนเป็นดังรูปที่ 8

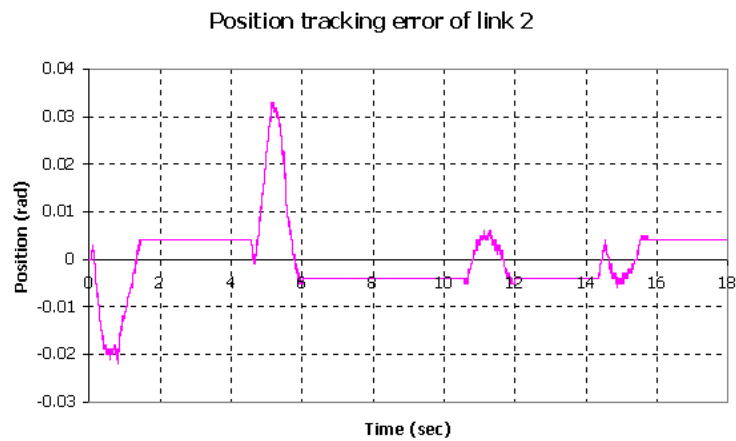


รูปที่ 8. แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ต้องการของทั้งสองแกน

รูปที่ 9 และ รูปที่ 10 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกนที่หนึ่ง และ แกนที่สอง ตามลำดับ โดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyแบบดั้งเดิม

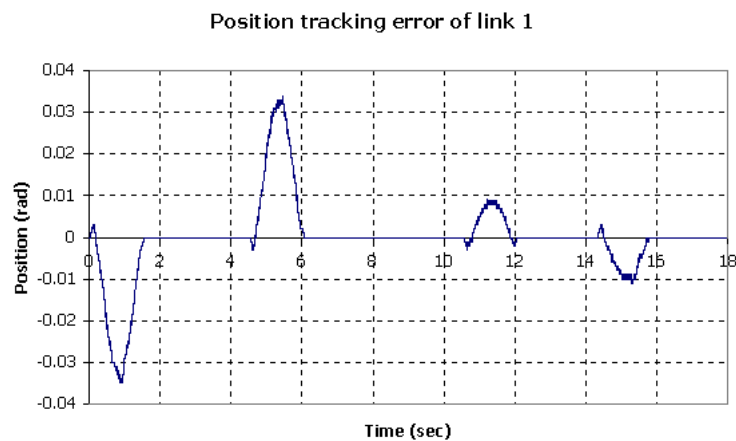


รูปที่ 9. แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกนที่หนึ่ง (ตัวควบคุมฟuzzyแบบดั้งเดิม)

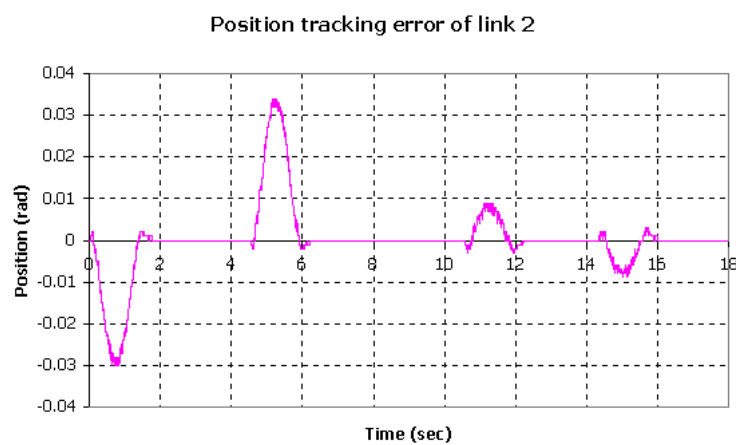


รูปที่ 10. แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกนที่สอง (ตัวควบคุมฟuzzyแบบดั้งเดิม)

รูปที่ 11 และ รูปที่ 12 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกนที่หนึ่ง และ แกนที่สอง ตามลำดับ โดยใช้ตัวควบคุมฟuzzyที่ปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 11. แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกนที่หนึ่ง(ตัวควบคุมฟuzzyที่ปรับปรุงแล้ว)



รูปที่ 12. แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในแกนที่สอง(ตัวควบคุมฟuzzyที่ปรับปรุงแล้ว)

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะพบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบดั้งเดิม ที่มีอินพุทให้ตัวควบคุมฟัซซี 2 ตัว คือค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง และ ค่าความผิดพลาดของความเร็ว ไม่สามารถลดค่าความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัว ลงได้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความเสียดทานที่มีอยู่ ส่วนตัวควบคุมฟัซซีที่ปรับปรุงแล้ว โดยเพิ่มอินพุทให้ตัวควบคุมอีกหนึ่งตัวคือ ผลรวมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง นั้นสามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ณ สภาวะคงตัว ลงได้อย่างเห็น ได้ชัด และ อัลกอริทึมที่ใช้ก็ยังประหยัดหน่วยความจำที่จำเป็นต้องใช้ลงได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, "Control of Robot Manipulators", Macmilan Publishing Co., 1993.
- [2] L-X Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis", Prentice-Hall, 1994.
- [3] L. A. Zadeh, "Fuzzy Set", Inform. Contr., Vol. 8, no. 3, pp.338-353, June 1965.
- [4] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I,II," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404-435, 1990.
- [5] J. J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", MA: Addison-Wesley, 1989.
- [6] Lefteri H. Tsoukalas and Robert E. Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", Addison-Wesley, 1997.
- [7] Chul-Goo Kang and Hee-Sung Kwak, "A Fuzzy Control Algorithm Reducing Steady-State Position Errors of Robotic Manipulators", AMC'96 Inter. Workshop on Advance Motion Control, 1996.
- [8] Liang-Jong Huang and Masayoshi Tomizuka, "A Self-Paced Fuzzy Tracking Controller for Two-Dimensional Motion Control", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no.5, pp.1155-1124, 1990.



นายสมหวัง อริสริยวงศ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปี พ.ศ. 2539 จบปริญญาโทสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2542 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล และ ผู้ช่วยวิจัย ณ ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



ดร.สยาม เจริญเสียง จบการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อปี พ.ศ. 2535 จบปริญญาโทและเอกสาขา Electrical and Computer Engineering จาก Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี พ.ศ. 2538 และ พ.ศ. 2542 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นนักวิจัยและผู้อำนวยการหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขา Robotics and Automation ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี