



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการควบคุมแบบพีซีพีไอดีด้วยวิธีพันธุศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์

โดย ผศ. ดร. ปิติเชต สู้รักษาและคณะ

มิถุนายน 2545



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการควบคุมแบบพรีซีพิดิตด้วยวิธีพันธุศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์

โดย ผศ. ดร. ปิติเขต สุรักษาและคณะ

มิถุนายน 2545

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการควบคุมแบบพีซีพีไอดีด้วยวิธีพันธุศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ผศ. ดร. ปิติเขต สุรักษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. Prof. Dr. Guanrong R. Chen

University of Houston, Texas, USA

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract

Project Code: PDF/95/44

Project Title: A Geno-fuzzy Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller
for Robots

Investigator: (1) Asst. Prof. Dr. Pitikhate Sooraksa
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
(2) Prof. Dr. Guanrong R. Chen
University of Houston, Texas, USA

E-mail Address: kspitikh@kmitl.ac.th

Project Period: 1 years (July 2001 – June 2002)

In this research, a geno-fuzzy proportional-integral-derivative (PID) controller for robots is designed and implemented. The term "geno" comes from the "genetic algorithms or GA" employing to optimize the fuzzy-based controller. Utilizing GA, the optimal set of the controller gains is obtained. Simulation and experimental results yield a promising future for the findings in robotic application.

Keywords: PID control, GA, robot

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: PDF/95/44

ชื่อโครงการ: ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอดีด้วยวิธีพันธุศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์

ชื่อนักวิจัย: (1) ผศ. ดร. ปิติเขต สุรักษา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
(3) ศาสตราจารย์ ดร. กวนรง อาริ เซน
มหาวิทยาลัยฮูสตัน, รัฐเทกซัส, สหรัฐอเมริกา

E-mail Address: kspitikh@kmitl.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 1 ปี (กรกฎาคม 2544 – มิถุนายน 2545)

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอดีด้วยวิธีพันธุศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์ โดยอาศัยวิธีทางพันธุศาสตร์ซึ่งเป็นการหาค่าที่ดีที่สุดไปปรับค่าเกณฑ์ต่าง ๆ ของระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอดี ผลการจำลองและการทดลองมีนัยสำคัญแห่งความสำเร็จในการประยุกต์ใช้กับการควบคุมหุ่นยนต์

คำหลัก: ระบบควบคุมพีไอดี, วิธีพันธุศาสตร์, หุ่นยนต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้ให้โอกาสและสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

หากปราศจาก "แรงทุนส่งเสริม" สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยหลักคง "หลุดไปจากวงโคจร" ของการทำวิจัยในประเทศไทย

ปิติเขต สุรักษา และคณะ

บทที่ 1

บทนำ

ระบบควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative หรือ PID) เป็นระบบควบคุมที่ใช้กันแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม มีรายงานว่ามากกว่า 90% ของการควบคุมกระบวนการในประเทศญี่ปุ่นใช้ระบบควบคุมแบบนี้ และน่าจะเป็นในทำนองเดียวกันในประเทศอื่น ๆ ทั่วทุกมุมโลก [1] งานวิจัยในการปรับแต่งพารามิเตอร์ในการควบคุมระบบพีไอดีนี้ ยังคงเป็นหัวข้อที่สนใจของนักวิจัยต่าง ๆ ในปัจจุบัน [1-4]

หนึ่งในวิธีการปรับปรุงการทำงานของระบบควบคุมแบบพีไอดีแบบดั้งเดิม (conventional PID) ให้ดีขึ้น คือ การนำเอาตรรกศาสตร์ฟัซซี (fuzzy logic) เข้ามาประยุกต์ใช้โดยอาจใช้ในระบบผู้เชี่ยวชาญ หรือในรูปทำงานร่วมกับระบบพีไอดีแบบดั้งเดิม ตัวอย่างของงานวิจัยเหล่านี้ได้แก่ [1, 5, 6, 8-12] เนื่องจากในยุคปัจจุบันนี้ การสืบค้นข้อมูลเป็นไปได้โดยง่ายโดยอาศัยฐานข้อมูลต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับรายงานฉบับนี้ จะไม่ขออ้างถึง ผู้ที่สนใจสามารถสืบค้นจากฐานข้อมูล [29] ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งเป็นฐานข้อมูลทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้รับความเชื่อถือจากนักวิจัยในวงการวิศวกรรมไฟฟ้า

ในบรรดาระบบฟัซซีพีไอดีในรูปแบบต่าง ๆ [6-9] ระบบควบคุมที่ออกแบบโดยทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยฮุสตัน (University of Houston, Texas, USA) ที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังปรากฏใน [5] เป็นระบบควบคุมแบบไม่ต้องอาศัยการอ่านค่าจากตารางเก็บปฏิบัติงาน (look-up table) ผลการจำลองและประยุกต์ใช้ระบบควบคุมนี้พบว่า ได้ผลสัมฤทธิ์เลิศ (superior performance) กว่าระบบควบคุมแบบพีไอดีแบบดั้งเดิม [5, 8-11] แม้ว่าการควบคุมแบบฟัซซีพีไอดีที่ออกแบบใน [5] จะสามารถจัดการกระบวนการทางการควบคุมแบบฟัซซีมาตรฐานให้ลดทอนอยู่ในรูปแบบง่าย ๆ ประหยัดเวลาดำเนินการของคอมพิวเตอร์อันเป็นจุดเด่นของระบบนี้ ถึงกระนั้นก็ตาม การจะหาค่าที่ดีที่สุดในการควบคุม ยังต้องใช้การลองผิดลองถูกแม้ว่าระบบจะฉลาดในเรื่องความทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอกและ/หรือสัญญาณรบกวนด้านอินพุต

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้ จึงเป็นการขยายผลการศึกษาในส่วนของภาคควบคุมแบบ Fuzzy PID ที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมแบบอัจฉริยะ (Intelligent control) ที่ผู้วิจัยและนักวิจัยที่เล็งได้ออกแบบและสร้างจริงสำเร็จมาแล้วในอดีต โดยงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithms, GA) มาปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมดังกล่าวให้

ได้ค่าอัตโนมัติที่ดีที่สุดเพื่อใช้สำหรับหุ่นยนต์ นับแต่นี้จะเรียกวิธีการนี้ว่า “จีโน ฟัชซี พีไอดี” ที่จะออกแบบและสร้างต้นแบบจริงโดยผู้วิจัย งานวิจัยนี้ ออกแบบและสร้างตัวควบคุมจีโน ฟัชซีพีไอดี (Geno-fuzzy PID controller) หรือ GFPID สำหรับหุ่นยนต์

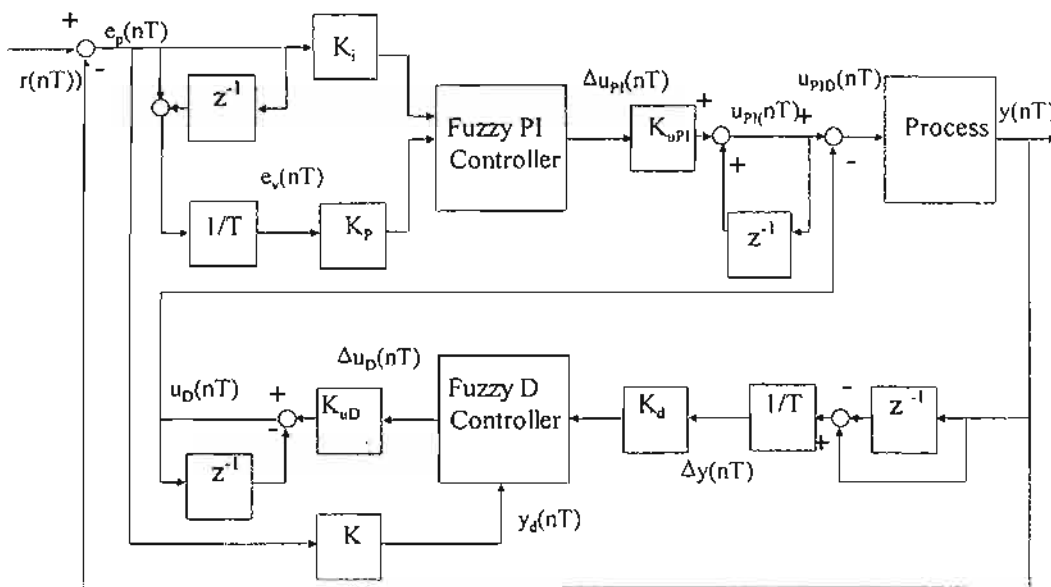
รายงานการวิจัย ฉบับนี้ เรียงลำดับการนำเสนอ ดังนี้ บทที่ 2 กล่าวถึง ระบบควบคุมแบบฟัชซีพีไอดีโดยย่อ บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบจีโนฟัชซี บทที่ 4 นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ (Parameter Identification) ในที่นี้ใช้วิธีการแบบ Least Square Method เพื่อหาค่าพารามิเตอร์จากมอเตอร์มือสองที่ไม่มีข้อมูลที่ใช้นำมาสร้างหุ่นยนต์ และนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการจำลองผลในบทที่ 5 บทที่ 6 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่ได้ กับหุ่นยนต์ข้อต่ออ่อนตัว (flexible joint robot arm) บทสรุปและข้อเสนอแนะนำเสนอในบทที่ 7

บทที่ 2

ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอดี

ในบทนี้กล่าวถึงระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอดี (fuzzy PI+D or fuzzy Proportional-Integral plus Derivative) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นโดยทีมงานของนักวิจัย University of Houston โดย Chen และ คณะ [5] ซึ่งมีลักษณะเด่นที่แตกต่างกว่าระบบควบคุมแบบฟัซซีของงานวิจัยอื่น ๆ ดังนี้ คือ

1. รูปของความเป็นสมาชิกเป็นรูปง่าย ๆ
2. ขั้นตอนของการทำฟัซซีฟิเคชัน (fuzzification) การอนุมานฟัซซี (fuzzy inference) และการตัดฟัซซีฟิเคชัน (defuzzification) ทำโดยการวิเคราะห์แบบโยงเหตุผล (analytic) โดยผู้ออกแบบ โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์
3. ผลของการปรับค่าเกณฑ์การควบคุมจะออกมาเป็นสูตรสำหรับควบคุมง่ายเพียง 18 สูตร โดยครอบคลุมถึงทุกสถานะการณ์ ไม่เป็นตารางแสดงค่า
4. การออกแบบระบบฟัซซี ไม่ต้องไปออกแบบระบบพีไอดีแบบกระแทกกระเทือนโครงสร้าง (redesign) เพียงเพิ่มหน่วยควบคุมฟัซซี (fuzzy control block) อีกหนึ่งหน่วย ไปต่ออนุกรมกับผลที่ได้จากหน่วยพีไอดีกับหน่วยดีเพื่อช่วยในการตัดสินใจเท่านั้น (ดูรูป 2.1)



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอดี แบบดิจิทัล

2.1 หลักการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอดี

(2.1- ก) การออกแบบหน่วยควบคุมฟัซซีพีไอ

จากรูปที่ 2.1 จะได้

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_p e_v(nT) + K_i e_p(nT), \quad (1)$$

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{uPI} \Delta u_{PI}(nT), \quad (2)$$

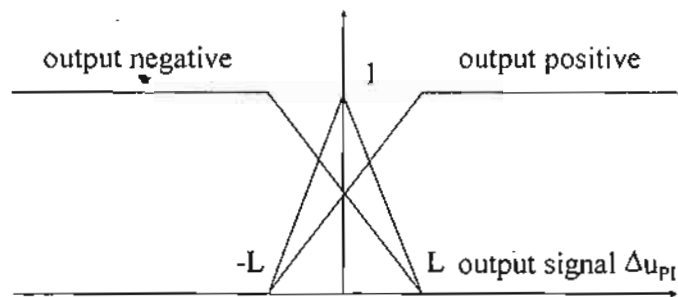
โดยที่ $\Delta u_{PI}(nT)$ เป็นการเพิ่มค่าในแต่ละรอบการควบคุมจากหน่วยฟัซซีพีไอ (the fuzzy control action of the PI controller), $e_p(nT)$ เป็นสัญญาณความผิดพลาดของสัญญาณ (the error signal), $e_v(nT)$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความผิดพลาด (the rate of change of the error signal), and K_p , K_{uPI} and K_i เป็นค่าเกณฑ์การควบคุมหาได้จากการออกแบบ การออกแบบการควบคุมแบบฟัซซีพีไอทำโดยอาศัยกระบวนการออกแบบระบบควบคุมฟัซซีตามวิธีมาตรฐาน กล่าวคือ ใช้การทำฟัซซีฟิเคชัน การอนุมานทางฟัซซีและการทำดีฟัซซีฟิเคชัน

(2.1- ข) การทำฟัซซีฟิเคชันของฟัซซีพีไอ

ดังจะเห็นได้จากรูป 2.1 ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอมีการเพิ่มค่าสัญญาณในรอบควบคุมนั้นเป็น, $\Delta u_{PI}(nT)$ และมีสัญญาณอินพุตสองสัญญาณ คือ $e_p(nT)$ สัญญาณความผิดพลาด และสัญญาณอัตราเปลี่ยนสัญญาณความผิดพลาด $e_v(nT)$ อินพุตและเอาต์พุตบอกระดับความเป็นสมาชิกแสดงดังรูป 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ โดยค่าคงที่ที่ปรับค่าได้ $L > 0$ สามารถเลือกค่าจากการออกแบบ



รูปที่ 2.2 ระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตของฟัซซีพีไอ



รูปที่ 2.3 ระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของฟัซซี่พีไอ

(2.1- ค) กฎการอนุมานแบบฟัซซี่สำหรับหน่วยฟัซซี่พีไอ

โดยอาศัยระดับความเป็นสมาชิกในรูปที่ 2.2 และ 2.3 เราสามารถสร้างกฎการควบคุมสำหรับฟัซซี่พีไอ จากการวิเคราะห์กระบวนการติดตามเป้าหมายจากสมรรถนะ (a natural tracking control performance analysis) [8] โดยสามารถสรุปได้ดังตาราง 2.1 นี้

ตารางที่ 2.1 กฎการควบคุมของฟัซซี่พีไอ

กฎข้อที่	สถานการณ์	คำแนะนำ สำหรับการติดตามเป้าหมาย ในการควบคุม	ถ้า e_p	และ e_v	แล้ว PI-Output
1	เอาต์พุตอยู่เหนือ จุดตั้งค่าในทิศทาง ออกจากเป้าหมาย	นำเอาต์พุต กลับสู่เป้าหมาย	negative	negative	Negative
2	เอาต์พุตอยู่เหนือ จุดตั้งค่าในทิศลงสู่ เป้าหมาย	ปล่อยให้เอาต์ พุตกลับลงมา เอง	negative	positive	Zero
3	เอาต์พุตอยู่ต่ำกว่า จุดตั้งค่าในทิศมุ่งสู่ เป้าหมาย	ปล่อยให้ตามธรรมชาติ	positive	negative	Zero
4	เอาต์พุตอยู่ต่ำกว่า จุดตั้งค่าในทิศทาง ออกไปจากเป้าหมาย	กลับทิศเอาต์ พุตสู่เป้าหมาย	positive	positive	Negative

หมายเหตุ ในกฎข้างต้นนั้น $e_p := r - y$ เป็นสัญญาณความผิดพลาด (จุดตั้งค่าลบด้วยเอาต์พุต) และ $e_v = \dot{e}_p = 0 - \dot{y} = -\dot{y}$ เป็นอัตราเปลี่ยนแปลงสัญญาณผิดพลาด

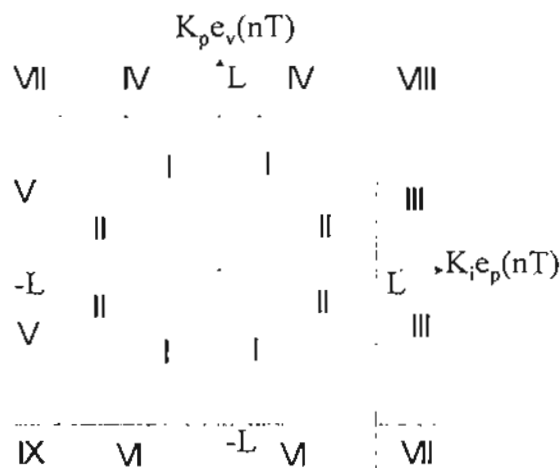
(2.1- ง). การดีฟัซซิฟิเคชันสำหรับฟัซซิฟิไ

จากกฎควบคุมข้างต้น เราจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของอินพุตในการควบคุมได้โดยอาศัยการทำดีฟัซซิฟิเคชัน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้วิธีการหา "จุดศูนย์กลางมวล" โดย

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\sum_i \mu_i u_i}{\sum_i \mu_i}, \quad i=1,2,3,4, \quad (3)$$

โดยที่ μ_i เป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกที่ "i" และ u_i เป็นเอาต์พุตที่สอดคล้องกับค่าระดับความเป็นสมาชิกดังกล่าว

จากกระบวนการทั้งหมดในข้างต้น เราจะสามารถจำแนกการควบคุมการเปลี่ยนอินพุตได้ตามอาณาเขตต่าง ๆ ออกเป็น 9 มณฑลด้วยกัน โดยอาศัยการพิจารณาตามการจัดหมู่ของสเกลความผิดพลาดทางตำแหน่งและสเกลความผิดพลาดเชิงอัตราเร็ว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแบ่งมณฑลการจัดหมู่อินพุตของฟัซซิฟิไ

จะได้ การเปลี่ยนหรือเพิ่มค่าอินพุตควบคุม เป็นสูตรสำเร็จดังต่อไปนี้ คือ

$$\begin{aligned}
 \Delta u_{PI}(nT) &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)|]} && \text{มณฑลที่ I,} \\
 &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_v(nT)|]} && \text{มณฑลที่ II,} \\
 &= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) + L] && \text{มณฑลที่ III,} \\
 &= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) + L] && \text{มณฑลที่ IV,} \\
 &= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) - L] && \text{มณฑลที่ V,} \\
 &= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) - L] && \text{มณฑลที่ VI,} \\
 &= 0 && \text{มณฑลที่ VII,} \\
 &= L && \text{มณฑลที่ VIII,} \\
 &= -L && \text{มณฑลที่ IX.}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

2.2 ตัวควบคุมฟัซซีดี

จากรูปที่ 2.1 จะได้

$$\Delta u_D(nT) = K_d \Delta y(nT) + K y_d(nT) \tag{5}$$

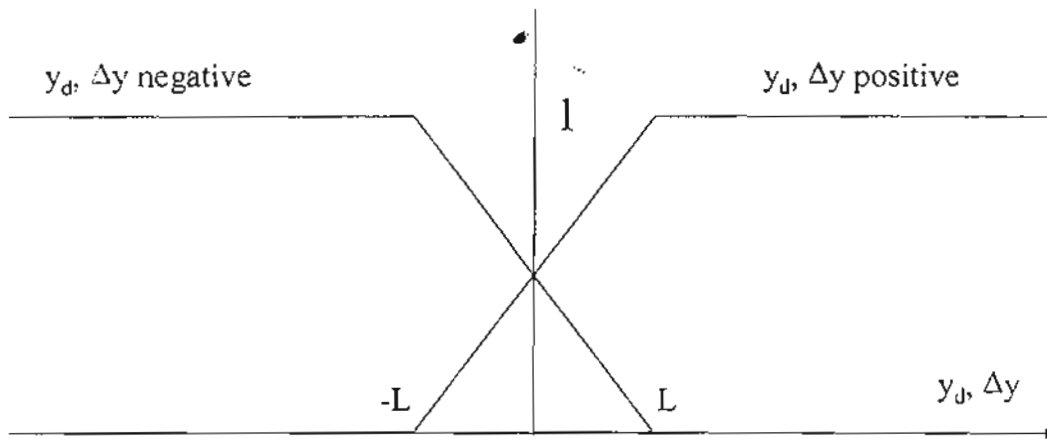
$$u_D(nT) = -u_D(nT - T) + K_{uD} \Delta u_D(nT), \tag{6}$$

โดยที่ $\Delta u_D(nT)$ เป็นอัตราการเปลี่ยนสัญญาณควบคุมฟัซซีดี (the fuzzy control action of the D controller), $y_d(nT)$ เป็นค่าลบของสัญญาณผิดพลาด (the negative error signal), $\Delta y(nT)$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุต (the rate of change of the output), K_D , K_{uD} และ K เป็นค่าเกนคงที่ ที่หาได้จากการออกแบบ

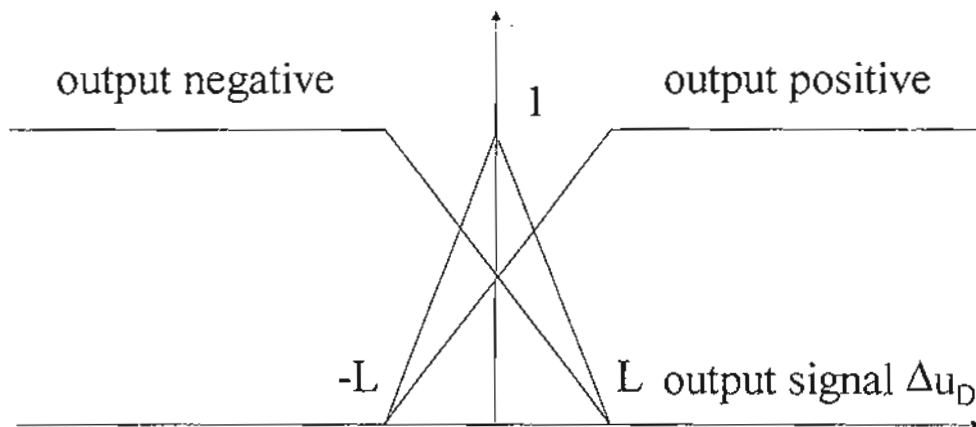
อนึ่ง การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีดีนั้น ทำเหมือนกับการออกแบบฟัซซีพีไอในข้างต้น คือ ใช้วิธีมาตรฐานโดยมีกระบวนการเป็น ฟัซซีฟิเคชัน การอนุมานฟัซซี และดีฟัซซีฟิเคชัน ตามลำดับ

(2.2 - ก) การทำฟัซซีฟิเคชันสำหรับหน่วยฟัซซีดี

จากรูป 2.1 จะเห็นได้ว่าบล็อกนี้มีหนึ่งเอาต์พุต คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอินพุตดี $\Delta u_D(nT)$ และสองอินพุตคือ ค่าสัญญาณผิดพลาดที่กลับเครื่องหมาย (negative error signal), $y_d(nT) = -e(nT)$, และค่าอัตราการเปลี่ยนไปของเอาต์พุตของระบบ $\Delta y(nT)$ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซีดีแสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ โดยที่ค่าคงที่ $L > 0$ เป็นค่าเดียวกับที่หาได้จากกรณีฟัซซีพีโอ



รูปที่ 2.5 ระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตฟัซซีดี



รูปที่ 2.6 ระดับความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตฟัซซีดี

(2.2 - ข) การอนุมานฟัซซีดี

ในการอนุมานฟัซซีดีใช้ระดับความเป็นสมาชิกของหน่วยฟัซซีดี ในรูปที่ 2.5 และ 2.6 กฎการอนุมานฟัซซีดีหาได้จากการวิเคราะห์แบบเดียวกับกรณีของฟัซซีพีไอ โดยแสดงได้ตามตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 กฎการควบคุมของฟัซซีพีไอ

กฎข้อที่	สถานการณ์	คำแนะนำ สำหรับการตัดสินใจ ตามเป้าหมาย ในการควบคุม	ถ้า y_d	และ Δy	แล้ว PI-Output
5	เอาร์ทพุทอยู่เหนือ จุดตั้งค่าในทิศทาง ออกจากเป้าหมาย	นำเอาร์ทพุท กลับสู่เป้า หมาย	negative	negative	Zero
6	เอาร์ทพุทอยู่เหนือ จุดตั้งค่าในทิศลงสู่ เป้าหมาย	ปล่อยให้เอาร์ท พุทกลับลงมา เอง	negative	positive	Negative
7	เอาร์ทพุทอยู่ต่ำกว่า จุดตั้งค่าในทิศมุ่งสู่ เป้าหมาย	ปล่อยให้ตามธรรมชาติ	positive	negative	Positive
8	เอาร์ทพุทอยู่ต่ำกว่า จุดตั้งค่าในทิศห่าง ออกไปจากเป้า หมาย	กลับทิศเอาร์ท พุทสู่เป้าหมาย	positive	positive	Zero

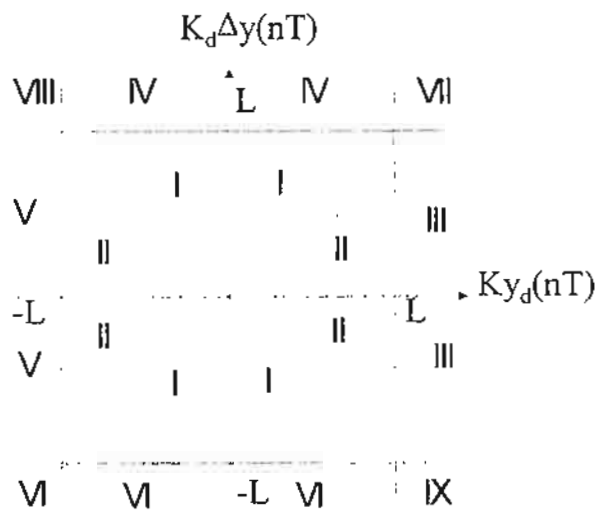
หมายเหตุ จากกฎดังกล่าวข้างต้น $y_d(nT) := y(nT) - r(nT) = -e(nT)$ ซึ่งก็คือ สัญญาณความผิดพลาดที่กลับเครื่องหมาย และ $\Delta y(nT) = \frac{y(nT) - y(nT - T)}{T}$ ก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาร์ทพุท y จากตารางดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าเราออกแบบกฎให้การทำงานของฟัซซีดีและฟัซซีพีไอ ไม่ซ้ำซ้อนกันแต่จะทำงานช่วยเสริมกันในแต่ละช่วง

(2.2 - ค) การตีฟิชชี่ฟิเคชันสำหรับฟิชชี่ดี

การตีฟิชชี่ฟิเคชันฟิชชี่ดีก็ใช้วิธีเช่นเดียวกันกับของฟิชชี่พีโอ โดยการเปลี่ยนค่าอินพุทของฟิชชี่ดี $\Delta u_D(nT)$ ที่สอดคล้องกับอินพุท การเปลี่ยนอินพุทได้ตามอาณาเขตต่าง ๆ ออกเป็น 9 มณฑลด้วยกัน โดยอาศัยการพิจารณาตามการจัดหมู่ของสเกลความผิดพลาดทางตำแหน่งและสเกลความผิดพลาดเชิงอัตราเร็ว ดังรูปที่ 2.7 โดยได้สูตรการเปลี่ยนค่าอินพุทดังกล่าวดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta u_D(nT) &= \frac{L[Ky_d(nT) + K_d\Delta y(nT)]}{2[2L - K|y_d(nT)|]} && \text{มณฑลที่ I,} \\ &= \frac{L[Ky_d(nT) + K_d\Delta y(nT)]}{2[2L - K|\Delta y(nT)|]} && \text{มณฑลที่ II,} \\ &= \frac{1}{2}[-K_d\Delta y(nT) + L] && \text{มณฑลที่ III,} \\ &= \frac{1}{2}[Ky_d(nT) - L] && \text{มณฑลที่ IV,} \\ &= \frac{1}{2}[-K_d\Delta y(nT) - L] && \text{มณฑลที่ V,} \\ &= \frac{1}{2}[Ky_d(nT) + L] && \text{มณฑลที่ VI,} \\ &= 0 && \text{มณฑลที่ VII,} \\ &= -L && \text{มณฑลที่ VIII,} \\ &= L && \text{มณฑลที่ IX.}\end{aligned}$$

(7)



รูปที่ 2.7 การแบ่งมณฑลการจัดหมู่อินพุทของฟิชชี่ดี

2.3 ตัวควบคุมพีซีพีโอพลัสดี

จากตัวควบคุมแบบพีซีพีโอและพีซีดี ในช่วงต้น เมื่อเรานำทั้งสองสัญญาณควบคุมมารวมกันแบบพีชคณิต จะได้กฎการควบคุมแบบพีซีพีโอพลัสดี ในรูป

$$u_{PID}(nT) = u_{PI}(nT) - u_D(nT) \quad (8)$$

แม้ว่าระบบควบคุมที่ได้ออกแบบในบทนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ผลดีใน [8, 10, 17] และแสดงถึงความสามารถในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบหน่วงเวลา และระบบที่มีความซับซ้อนได้ผลสัมฤทธิ์ทางการควบคุมที่ดีก็ตาม แต่ค่าเกนหรือพารามิเตอร์ในการควบคุมที่ได้จากการลองผิดลองถูกไม่อาจจะบ่งบอกได้ว่า เป็นค่าที่ดีที่สุด ดังนั้น เพื่อเป็นการขยายสมรรถนะของระบบควบคุมนี้ จึงต้องขยายผล โดยการนำเอาวิธีทางการคำนวณหรือประมวลผลแบบพันธุศาสตร์ (GA) มาใช้ ดังแสดงแนวคิดดังกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบจีโนฟิซซีฟิไอดี

ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.1 ในบทที่ 2 ว่า ค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมสำหรับระบบฟิซซีฟิไอนั้น ประกอบด้วย $K_p, K_i, K_d, K, K_{uPI}, K_{uPD}$, และ L ดังนั้น พารามิเตอร์เหล่านี้จะใช้เป็นส่วนประกอบของโครโมโซม (Chromosome) ในวิธี GA ซึ่งขณะนี้เป็นการหาปรับค่าที่ดีที่สุด (the optimal values) สุดอันเป็นวิธีมาตรฐานวิธีหนึ่ง ที่ได้เขียนไว้อย่างละเอียดในเอกสารอ้างอิงหมายเลข [25-28, 30-32] ในบทนี้จะกล่าวเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น

ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์จาก [31, 32] เรานิยามโครโมโซม χ ในรูป

$$\chi = \{K_p, K_i, K_d, K, K_{uPI}, K_{uPD}, L\} \quad (9)$$

จากนั้น เราจะใช้ค่าโครโมโซมเหล่านี้โดยอาศัยวิธีการดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 เริ่ม โดยกำหนด เวลาตั้งต้น (initial time) $t:=0$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นในการสุ่มประชากร (Population) $P(t)$

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลความลงตัว (fitness) สำหรับแต่ละกลุ่มประชากรในแต่ละตอนที่ t

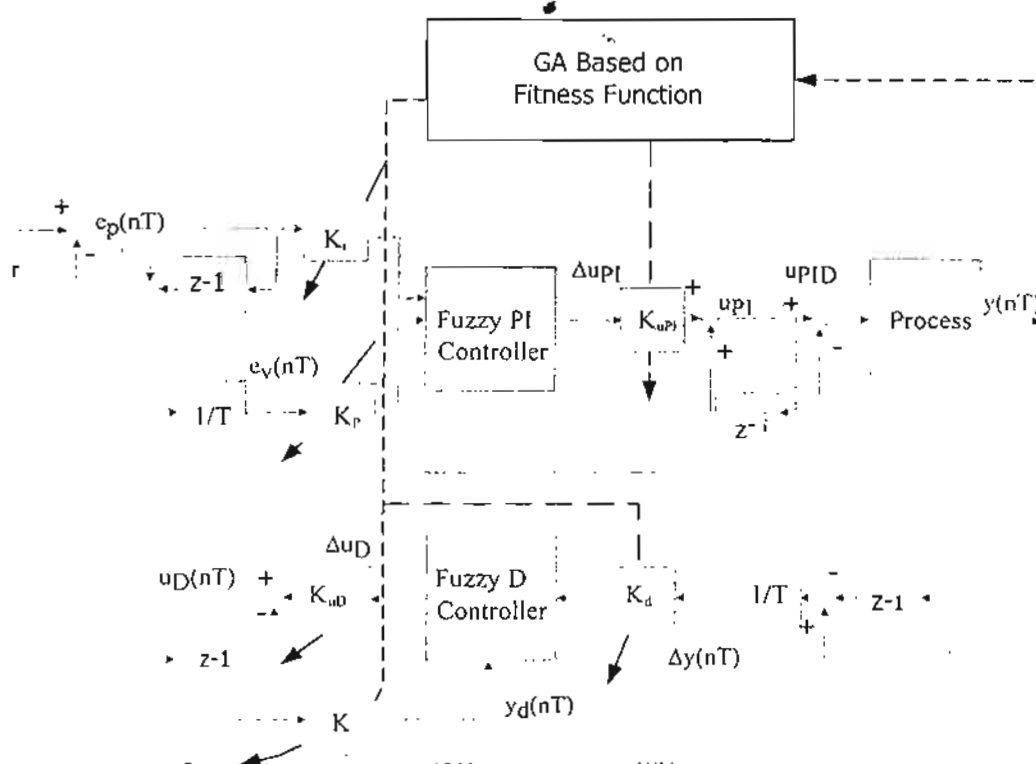
ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบเกณฑ์ประเมิน (test for termination criterion) เช่น เวลา หรือ ความลงตัว เป็นต้น

หากทั้ง 4 ขั้นตอนนี้ยังไม่ให้ผลสัมฤทธิ์ตามที่ต้องการ ให้ทำกระบวนการต่อไปนี้

- เพิ่มเวลาของตัวนับ (increase the time counter)
 $t := t + 1$
- เลือกกลุ่มย่อยของประชากร สำหรับเป็นต้นแบบการสร้างรุ่นลูก (offspring production)
 $P' = \text{Select_parents } P(t)$
- จับคู่ "ยีนส์ (genes)" ใหม่จากพ่อแม่ที่เลือกมาได้
Recombine $P'(t)$
- กลายพันธุ์ (mutate) คู่ที่ได้ของประชากรที่คัดสรรไว้ ด้วยวิธีแบบสุ่ม
Mutate $P'(t)$
- ประเมินความลงตัว อีกครั้ง
Evaluate $P'(t)$

- $$P := \text{Survive } P, P'(t)$$

ในงานวิจัยนี้ กระบวนการข้างต้นนี้ จะนำมาใช้กับระบบควบคุมฟัชชีฟิไอดี ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 2 โดยผลที่ได้จะเป็นระบบควบคุมแบบจีโนฟัชชีฟิไอดี ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมแบบจูนพัชชีฟีดแบ็ค

โดยมีหน่วยปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมโดยอาศัยวิธีการแบบ GA ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งกระบวนการคำนวณที่ใช้ จะอาศัยซอฟต์แวร์พาณิชย์ (commercial software) MATLAB ในการคำนวณ และใช้ขั้นตอนที่สำคัญดังนี้คือ

จะเห็นได้ว่าการให้ได้ค่าความลงตัว Ξ มากที่สุด ก็คือ การทำให้ Ψ มีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง เนื่องจากว่าในระบบหุ่นยนต์ที่เราต้องการนำเอาตัวควบคุมแบบจิ้นพัชชีไปใช้นั้น โดยระบบหุ่นยนต์นั้น โดยทั่วไปเป็นหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้น ระบบชนิดนี้อาศัยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน การใช้กำหนดตรรกะนี้สมรรถนะโดยอาศัยค่าต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น จัดได้ว่าเป็นที่สามารถชี้ผลสัมฤทธิ์ได้ดีดัชนีหนึ่งและสามารถตรวจวัดค่าดัชนีเหล่านี้ได้โดยไม่ยากนัก

อาศัยหลักการ และรหัสเทียม (Pseudo code) ในบทนี้ เราสามารถนำไปจำลองผล (simulation) และทดลอง (experiment) กับระบบหุ่นยนต์ในบทที่ 5 และ 6 ต่อไป และสำหรับในบทที่ 4 ซึ่งเป็นบทถัดไปนั้นเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มือสองที่ไม่ทราบค่ามาใช้หาแบบจำลองคณิตศาสตร์ ไว้สำหรับการจำลองผลโดยคอมพิวเตอร์ในบทที่ 5

3.1 ปฏิบัติการทางพันธุศาสตร์ (Genetic operations)

อาศัยวิธีการตาม [31] โดยกำหนดให้โครโมโซมแทนด้วยเลขจำนวนจริง เราจะได้ว่าค่าโครโมโซมที่ ζ สำหรับลูกหลานรุ่น χ' สามารถหาได้จากสมการ

$$\chi'_\zeta = \Phi \chi_\zeta^{(\alpha)} + (1 - \Phi) \chi_\zeta^{(\beta)} \quad (10)$$

โดยที่ $\Phi \in [0, 1]$ และเป็นค่าที่มีการกระจายแบบเอกพันธ์ (uniformly distributed random number) ส่วน $\chi^{(\alpha)}$ และ $\chi^{(\beta)}$ เป็น คู่โครโมโซมของพ่อแม่

3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective functions)

การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้ ก็เพื่อให้ได้ ค่าเหมาะสมที่สุดตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ การที่จะกำหนดรู้ได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้บรรลุถึงวัตถุประสงค์แล้วหรือยัง สามารถตรวจดูได้จากเป้าหมายอ้างอิง $r(t)$ และ เอาท์พุท $y(t)$ สำหรับในงานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์ที่ต้องการคือ

- (ก) ลดค่าพุ่งเกินสูงสุดของเอาท์พุท, OS, (Overshoot) ให้ได้ค่าน้อยที่สุด
- (ข) ลดค่าเวลาได้ขึ้นของเอาท์พุท, t_r , (rise time) ให้ได้ค่าน้อยที่สุด
- (ค) ลดค่าเวลาเข้าสู่ภาวะเข้าที่, t_s , (setting time) ให้ได้ค่าน้อยที่สุด
- (ง) ลดค่าผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด (Integrated Square Error, ISE) ให้ได้ค่าน้อยที่สุด

3.3 การกำหนดค่าความลงตัว (Fitness assignment)

ค่าฟังก์ชันความลงตัว Ξ (Fitness function) นิยามโดย

$$\Xi = \frac{1}{1 + \Psi} \quad (11)$$

โดย ดัชนีสมรรถนะ (performance index)

$$\Psi = OS + t_r + t_s + ISE \quad (12)$$

บทที่ 4

การระบุค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ในบทนี้จะเป็นวิธีการระบุค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ (parameter identification) เพื่อนำไปใช้กับมอเตอร์มือสองที่นำมาใช้ในการทดลองในบทที่ 6 โดยที่ แบบจำลองที่ได้จากวิธีการที่กล่าวถึงในบทนี้ จะนำมาใช้ในบทที่ 5 วิธีการการระบุค่าพารามิเตอร์นั้นมีอยู่หลากหลายวิธีการด้วยกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในที่นี้เท่านั้นคือ การประมาณแบบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนอื่นเจือปน เนื่องจากวิธีการควบคุมที่ใช้ เป็นวิธีการแบบฟัซซี่ตรรกศาสตร์ฟัซซี่ (fuzzy logic based method) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องให้ได้ค่าการประมาณที่แม่นยำสูงมากและใช้วิธีการที่มีความซับซ้อนมาก

1.1 กระบวนการระบุค่าพารามิเตอร์แบบออฟไลน์ (off-line Identification) โดยไม่มีสัญญาณรบกวน

ในส่วนนี้เราจะกล่าวถึง การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) จากข้อมูลอินพุต-เอาต์พุต ซึ่งเป็นพื้นฐานของวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดที่จะกล่าวถึงต่อไป วิธีนี้เป็นการสมมติลำดับของแบบจำลอง จากข้อมูลจากอินพุต-เอาต์พุตที่มีอยู่ ในส่วนแรกเราจะพิจารณาถึงวิธีการที่แตกต่างกันไป ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete time) ในส่วนของปัญหาของการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับเวลาที่ต่อเนื่อง (continuous time) จะได้กล่าวถึงต่อไป

พิจารณาระบบอินพุต-เอาต์พุตจะแสดงอยู่ในรูป 4.1 โดยใช้วิธีการแปลงแบบซี (Z-transform) โดยที่อินพุต-เอาต์พุต จะมีความสัมพันธ์กันโดย

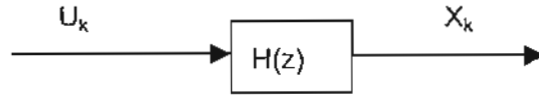
$$\frac{X(z)}{U(z)} = H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}}{1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}} \quad (13)$$

โดย $z = e^{st}$ และ T จะเป็นช่วงเวลาของการสุ่ม (sampling time)

สมการที่ (13) อาจจะเขียนได้อีกแบบดังสมการข้างล่างนี้

$$x_k = \sum_{i=0}^m a_i u_{k-i} - \sum_{i=1}^n b_i x_{k-i} \quad (14)$$

โดยที่ $x_l \equiv x(lT)$
 $u_l \equiv x(lT)^*$ $l = 1, 2, \dots$



รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการอย่างง่าย

ดังนั้นอีกปัญหาจะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ $a_0, a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_n$ จากข้อมูลของ อินพุต-เอาต์พุต จะเป็นการนำค่าของ x_l และ u_l ที่ต่างกันนำมา รวมเข้าไว้ด้วยกันสมการที่ 2 นั้นอาจจะนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix}
 u_k & u_{k-1} & \dots u_{k-m} & -x_{k-1} & -x_{k-2} & \dots -x_{k-n} \\
 u_{k+1} & u_k & \dots u_{k-m+1} & -x_k & -x_{k-1} & \dots -x_{k-n+1} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 u_{k+p-1} & u_{k+p-2} & \dots u_{k+p-m-1} & -x_{k+p-2} & -x_{k+p-3} & \dots -x_{k+p-n-1}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_0 \\
 a_1 \\
 \vdots \\
 a_m \\
 b_1 \\
 b_2 \\
 \vdots \\
 b_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 x_k \\
 x_{k+1} \\
 \vdots \\
 x_{k+p-1}
 \end{bmatrix}
 \quad (15)$$

หรือ

$$A'_k \underline{\theta} = \underline{x}_k \quad (16)$$

ซึ่ง

$$A'_k = \begin{bmatrix}
 u_k & u_{k-1} & \dots u_{k-m} & -x_{k-1} & -x_{k-2} & \dots -x_{k-n} \\
 u_{k+1} & u_k & \dots u_{k-m+1} & -x_k & -x_{k-1} & \dots -x_{k-n+1} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 u_{k+p-1} & u_{k+p-2} & \dots u_{k+p-m-1} & -x_{k+p-2} & -x_{k+p-3} & \dots -x_{k+p-n-1}
 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\underline{\theta} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \equiv \text{พารามิเตอร์เวกเตอร์} \quad (18)$$

$$\underline{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k+1} \\ \vdots \\ x_{k+p-1} \end{bmatrix} \equiv \text{เอาต์พุตเวกเตอร์} \quad (19)$$

ถ้า A'_k เป็นเมทริกซ์ไม่เป็นเอกฐาน (nonsingular) ($p=m+n+1$) และ $\det$ ของ $A'_k \neq 0$ อาจหาพารามิเตอร์เวกเตอร์ได้จาก

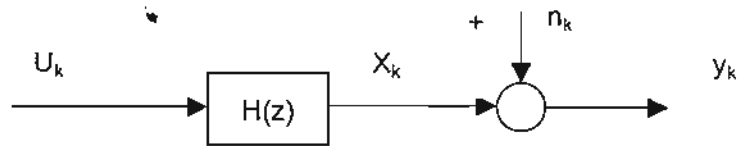
$$\underline{\theta} = (A'_k)^{-1} \underline{x}_k \quad (20)$$

4.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Weighted least-squares) โดยมีการปนมาของสัญญาณรบกวน (noise-contaminated)

ผลที่ได้จากในหัวข้อ 4.1 ที่ผ่านมาจะเป็นไปได้ในทางทฤษฎีเท่านั้น เนื่องจากการวัดนั้น จะมีสัญญาณรบกวนปนมาด้วยเสมอ ดังนั้นในสถานการณ์ที่เหมาะสมนั้น เราอาจจะใช้แบบจำลองของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งการวัดที่เอาต์พุตนั้นจะแสดงตามสมการที่ (21)

$$y_i = x_i + n_i \quad (21)$$

โดยที่ n_i จะแทนสัญญาณรบกวนที่วัดได้ที่เอาต์พุต



รูปที่ 4.2 ระบบที่มีสัญญาณรบกวน

เราอาจจะทราบหรือไม่ทราบถึงลำดับของสัญญาณรบกวน (n_i) เราอาจจะสมมติให้ n_i เป็น สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (white Gaussian noise sequence) ถ้าการวัดสัญญาณรบกวน นั้นไม่บริสุทธิ์ บ่อยครั้งที่เราอาจจะพิจารณาที่ เอาท์พุทของการกรองแบบเชิงเส้นด้วยอินพุทของ สัญญาณรบกวนแบบความแปรปรวนหนึ่งหน่วย (unit-variance white Gaussian noise) แทน สมการที่ (21) ในสมการที่ (14) จะได้

$$y_k = \sum_{i=0}^m a_i u_{k-i} - \sum_{i=1}^n b_i y_{k-i} + v_k = \underline{\phi}_k^T \underline{\theta} + v_k \quad (22)$$

ซึ่ง

$$\underline{\phi}_k^T = [u_k u_{k-1} \dots u_{k-m} - y_{k-1} - y_{k-2} \dots - y_{k-n}] \quad (23)$$

และ

$$v_k = n_k + \sum_{i=1}^n b_i n_{k-i} \quad (24)$$

เราจะเรียกว่าเอาท์พุท หรือ สมการความผิดพลาด (equation errors)

สมการที่ (23) อาจจะรวมให้อยู่ในสมการเดียวกันโดยให้

$$A_p \underline{\theta} = \underline{y}_p - \underline{v}_p \quad (25)$$

โดยที่

$$A_p = \begin{bmatrix} u_k & u_{k-1} & \dots u_{k-m} & -y_{k-1} & -y_{k-2} & \dots -y_{k-n} \\ u_{k+1} & u_k & \dots u_{k-m+1} & -y_k & -y_{k-1} & \dots -y_{k-n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{k+p-1} & u_{k+p-2} & \dots u_{k+p-m-1} & -y_{k+p-2} & -y_{k+p-3} & \dots -y_{k+p-n-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

≡ เมตริกซ์สังเกตการณ์ (observation matrix)

และ

$$y_p = \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k+1} \\ \vdots \\ y_{k+p-1} \end{bmatrix} \equiv \text{เวกเตอร์ที่ได้จากการวัด} \quad (27)$$

เพราะการที่มีสัญญาณรบกวนอยู่นั้น เราต้องการมากกว่า $(n+m+1)$ สมการกับการประมาณค่าพารามิเตอร์เวกเตอร์ จากสมการที่ (25) จะได้เงื่อนไขบังคับเป็น

$$p > m + n + 1 \quad (28)$$

ในการแสดงถึงการประมาณค่าของ $\underline{\theta}$ จะอยู่บนพื้นฐานของ เซต p คือเซตของอินพุต-เอาต์พุต เช่นเดียวกับ $\underline{\theta}_p$ ถ้าเราสมมติให้ $\underline{\theta}_p$ เป็นการประมาณค่าของพารามิเตอร์เวกเตอร์ที่เหมาะสม ต่อจากนั้นการประมาณค่าทางเอาต์พุตเวกเตอร์ (y_p) จะแสดงโดย

$$\underline{y}_p = A_p \underline{\theta}_p \quad (29)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อน (error vector)

$$\tilde{\underline{\theta}}_p = \underline{\theta} - \underline{\theta}_p \quad (30)$$

และเอาต์พุตของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อน

$$\tilde{\underline{y}}_p = \underline{y}_p - \underline{y}_p \quad (31)$$

แทนสมการที่ (25) และ (29) ในสมการที่ (31) จะได้

$$\tilde{\underline{y}}_p = A_p \tilde{\underline{\theta}}_p + \underline{v}_p \quad (32)$$

$\tilde{\underline{y}}_p$ เรียกว่า สมการเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อน (vector equation error)

พิจารณาโดยให้ $\underline{\theta}_p$ เป็นการวัดของ สมการเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อน ตัวอย่างของกรณีนี้เราจะทำให้น้อยลงโดยใช้วิธีของค่ากำลังสองของนอร์ม (norm-squared) ของ $\tilde{\underline{y}}_p$

$$J = \tilde{\underline{y}}_p^T \tilde{\underline{y}}_p \quad (33)$$

$$\tilde{\underline{y}}_p = \underline{y}_p - \underline{\hat{y}}_p = \underline{y}_p - A_p \underline{\hat{\theta}}_p \quad (34)$$

ดังนั้น

$$J = \tilde{\underline{y}}_p^T \tilde{\underline{y}}_p = \tilde{\underline{y}}_p^T A_p \underline{\hat{\theta}}_p - \underline{\hat{\theta}}_p^T A_p^T \underline{y}_p + \underline{\hat{\theta}}_p^T A_p^T A_p \underline{\hat{\theta}}_p \quad (35)$$

ทำการเลือกค่า $\underline{\hat{\theta}}_p$ ที่ทำให้ J น้อยที่สุด ต่อจากนั้นทำการหาอนุพันธ์ของ J เทียบกับ $\underline{\hat{\theta}}_p$ และได้เท่ากับ 0 ดังนั้น จะได้

$$\underline{\hat{\theta}}_p = (A_p^T A_p)^{-1} A_p^T \underline{y}_p \quad (36)$$

สมการที่ (36) จะได้มาจากการหาอนุพันธ์ สมการที่ (35) เทียบกับ $\underline{\hat{\theta}}_p$

$$\frac{dJ}{d\underline{\hat{\theta}}_p} = 0 - \underline{y}_p^T A_p - [A_p^T \underline{y}_p]^T + 2\underline{\hat{\theta}}_p^T A_p^T A_p = 0$$

หรือ

$$2A_p^T \underline{y}_p = 2A_p^T A_p \underline{\hat{\theta}}_p$$

ให้

$$\underline{\hat{\theta}}_p = (A_p^T A_p)^{-1} A_p^T \underline{y}_p$$

ดังนั้น

$$\frac{d^2 J}{d\underline{\hat{\theta}}_p^2} = 2A_p^T A_p$$

ซึ่งจะสมมาตรและเป็นนิยามเชิงบวก (positive definite) ถ้า A_p มีพีสัยเต็ม (full rank)

หรือ

$$\underline{\theta}_p = A_p^+ \cdot y_p \quad (37)$$

ซึ่ง A_p^+ นั้นจะแทน $(A_p^T A_p)^{-1} A_p^T$ เป็น อินเวอร์สเทียม (pseudoinverse) ของ A_p เมื่อ A_p มีจำนวนแถวมากกว่าจำนวนหลัก และจะเป็นเอกลักษณ์ถ้า A_p มีพิสัยเต็มและมีความเป็นอิสระเชิงเส้น

การคำนวณจะใช้สมการที่ (36) ซึ่งเป็นการประมาณค่าโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด square วิธีนี้จะมีขนาดเล็ก โดยผลบวกกำลังสองขององค์ประกอบในสมการเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อน $\underline{\tilde{y}}_p$

หลักเกณฑ์ของความผิดพลาด โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเมื่อผลบวกกำลังสองขององค์ประกอบของ $\underline{\tilde{y}}_p$ จะมีขนาดเล็กคือ

$$J = \underline{\tilde{y}}_p^T w \underline{\tilde{y}}_p \quad (38)$$

ซึ่ง w จะเป็น เมตริกซ์สมมาตรนิยามบวก (positive definite symmetric matrix) และตัวอย่างในกรณีนี้จะเป็นเมตริกซ์ทะแยงมุม (diagonal matrix) คือ

$$w = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_p) \quad (39)$$

ในกรณีนี้จะเขียนแบบง่ายได้ดังนี้

$$J = \underline{y}_p^T w \underline{y}_p - \underline{y}_p^T w A_p \underline{\theta} - \underline{\theta}^T A_p^T w \underline{y}_p + \underline{\theta}^T A_p^T w A_p \underline{\theta} \quad (40)$$

และก่อนหน้านั้นถ้า J มีค่าน้อยจะได้

$$\underline{\theta}_p = (A_p^T w A_p)^{-1} A_p^T w \underline{y}_p \quad (41)$$

โดย w สมมติให้มีนิยามบวก (positive definite) และสมมาตร โดย A_p เป็นเมตริกซ์ที่มีพิสัยเต็ม (full rank)

หมายเหตุ นำ $w = 1$ จากสมการที่ (41) ไปใส่ในสมการที่ (39) ทำให้วิธีของวิธีแบบกำลังสองน้อยที่สุดนี้ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ผลเฉลยโดยวิธีการถ่วงน้ำหนักกำลังสองน้อยที่สุด (weighted least-square solution) ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงคำถามสำหรับใช้กับสมการที่ (41) ในบทต่อไป จะนำวิธีการที่บรรยายในบทนี้ ไปหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการสร้างหุ่นยนต์ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำไปใช้ได้ในการจำลองผลในบทที่ 5

บทที่ 5

การจำลองผลการควบคุม

โดยอาศัยองค์ความรู้ในบทที่ 2 – 4 บทนี้แสดงผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลที่ได้จากการจำลองเท่านั้น ส่วนต้นรหัสของซอฟต์แวร์ (Source code) เป็นลิขสิทธิ์ในส่วนของนักวิจัยที่เลี้ยงที่สร้างกล่องเครื่องมือ (tool box) สำหรับวิธีทางพันธุศาสตร์ ณ ที่นี้ จึงแสดงเฉพาะผลการวิจัยเท่านั้น

มอเตอร์ที่นำมาทดลองเป็นมอเตอร์มือสองที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ เพื่อเป็นการจำลองผลที่ได้ จึงนำเอาค่าอินพุตและเอาต์พุตที่ได้มาทำการระบุค่าพารามิเตอร์ตามวิธีดังกล่าวข้างต้น ในบทที่ 4 ได้ค่าพารามิเตอร์ตามแบบจำลอง ฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนซี้ $H(z)$ และแปลงกลับโดยอาศัย การแปลงอินเวอร์สซี้ เป็นโดเมนความถี่เอส $H(s)$ (Transfer function in continuos domain) ได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับ AC motor ที่ใช้เป็น

$$H(s) = \frac{0.6347}{1.03851s + 0.1541} \quad (42)$$

หรือ ในรูปสมการปริภูมิสถานะในโดเมนเวลาแบบไม่ต่อเนื่องเป็น

$$x(k+1) = G * x(k) + H * u(k) \quad (43)$$

$$y(k) = C * x(k) \quad (44)$$

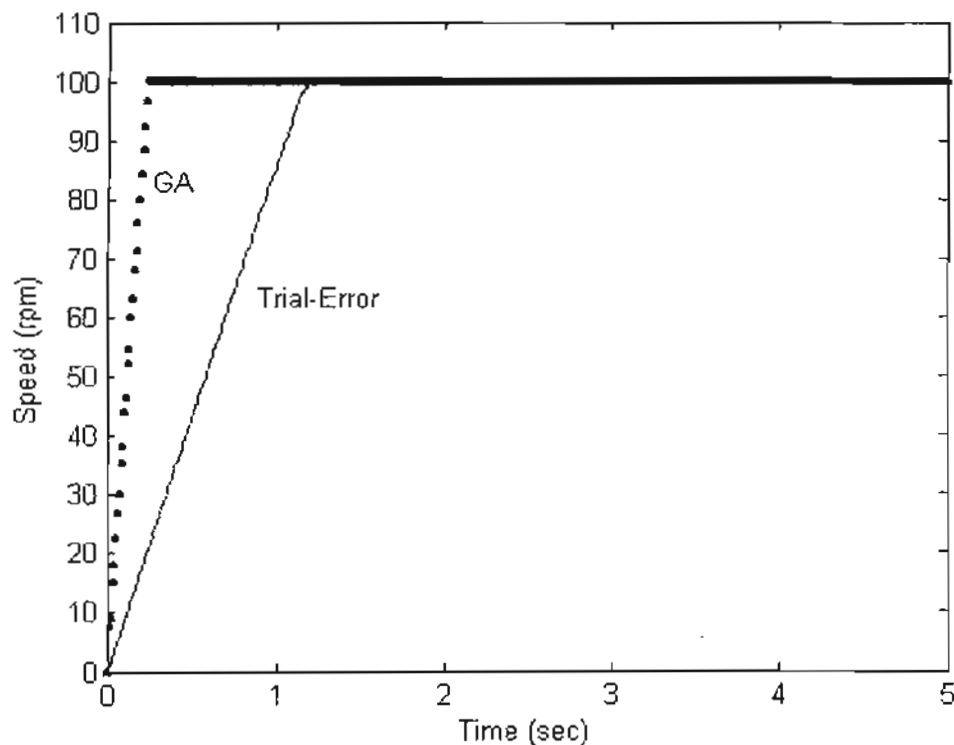
โดยที่

เมตริกซ์ระบบ $G = 0.99846018673084$

เวกเตอร์อินพุต $H = 0.00999229895628$

เมตริกเอาต์พุต $C = 15.31070475970381$

อนึ่ง ค่าพารามิเตอร์ที่ระบุได้นี้ เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากนำอินพุตเป็นแรงดัน (V) กับ ค่าเอาต์พุตเป็นรอบของมอเตอร์วัดโดยใช้เอนโคเดอร์ เมื่อนำค่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ไปใช้ เพื่อจำลองผลตรวจสอบการออกแบบในบทที่ 2 และ 3 โดยปรับค่าพารามิเตอร์โดยการลองผิดลองถูก และวิธีของ GFPID โดยกำหนดให้เงื่อนไขการหยุดจับคู่ยีนส์หรือหยุดการกลายพันธุ์ที่ ฟังก์ชันความลงตัว $E > 0.001$ ได้ผลตามรูป 5.1 ในรูปนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็ว รอบของมอเตอร์เปลี่ยนจาก 1000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1,100 รอบต่อนาที ตาราง 5.1 แสดง สมรรถนะของการติดตามเป้าหมายในรูปที่ 5.1 โดยเปรียบเทียบการวิธีกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ ใช้ในการควบคุมด้วยการลองผิดลองถูกโดยพยายามปรับค่าให้ได้ OS น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย กับแบบ GFPID จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากวิธี GFPID ดีกว่ามาก



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการจำลองระบบควบคุมแบบฟัซซีฟัซซีไอดีโดยวิธีลองผิดลองถูกกับวิธีทางพันธุศาสตร์

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบผลการจำลองระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอดีโดยวิธีลองผิดลองถูกกับ
วิธีทางพันธุศาสตร์

	โดยวิธีลองผิดลองถูก	โดยวิธีการทางพันธุศาสตร์
$K_p, K_b, K_D, K,$ K_{uph}, K_{wd}, L	2, 0.6, 1, 1.6 1.5, 0.2, 350	1.26, 1.015, 0.885, 0.989 2.06, 0.12, 1145.63
$t_r(s)$	1.12	0.19
$t_s(s)$	0.93	0.24
$OS(\%)$	0	0.14281
ISE	3997.89071	916.70472
Ψ	3999.94071	917.27753
Ξ	0.00025	0.00109

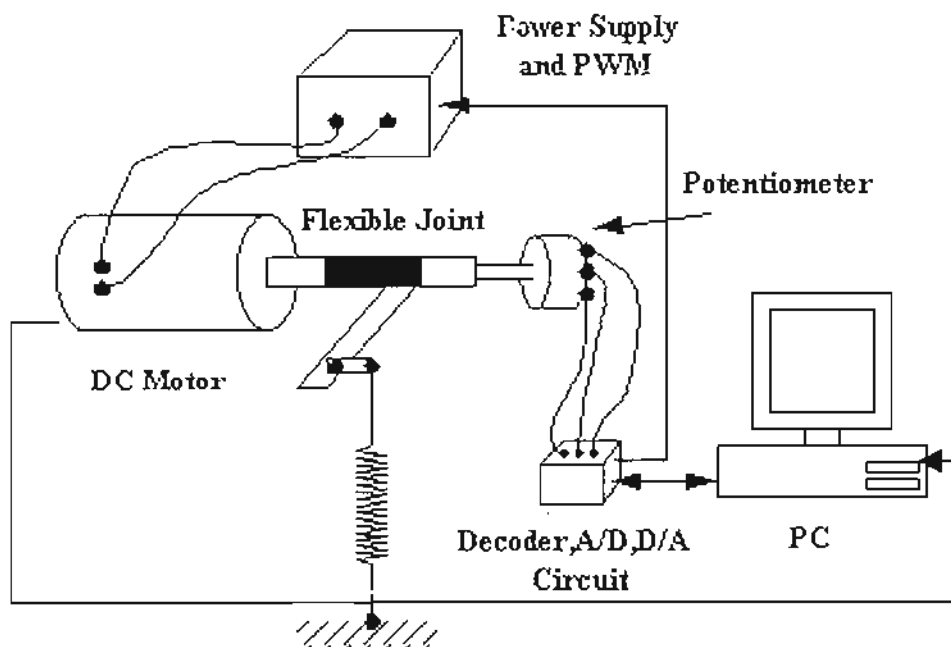
แม้ว่าผลที่ได้ในรูปที่ 5.1 จะแสดงให้เห็นว่า วิธีการปรับค่าแบบ GA ให้ผลที่ดีกว่าการปรับค่าแบบลองผิดลองถูก อย่างไรก็ตาม ในด้านของฮาร์ดแวร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของค่าเวลาได้ขึ้นนั้น ในทางปฏิบัติแม้จะใช้เกนขยายเพียงใดก็ตาม แต่ขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์ทำให้ไม่สามารถที่จะเร่งค่าเวลาได้ขึ้นให้สูงกว่าขีดจำกัดสูงสุดได้ การทำปรับค่าทางวิธีการทางพันธุศาสตร์จึงควรกำหนดเงื่อนไขรวมเข้าไปในวิธีการประเมินผลด้วย ในกรณีที่ค่าพุ่งเกินหรือพารามิเตอร์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการประเมินผลใด ๆ มีผลต่อการประยุกต์ใช้งาน ผู้ออกแบบควรใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักมากกว่าให้ค่าเท่ากันดังที่ผ่านมา

ในบทที่ 6 จะเป็นการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมแบบจีโนฟัซซีพีไอดี

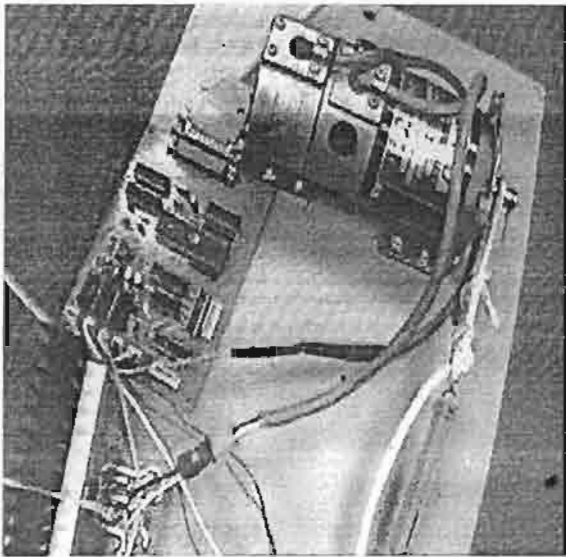
บทที่ 6

การประยุกต์ระบบควบคุมกับระบบหุ่นยนต์

ในบทนี้ เป็นการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในข้างต้นกับระบบหุ่นยนต์ โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบของแขนกลข้อต่ออ่อนตัว (Flexible joint robot arm) [13, 14] โดยมีสภาวะรบกวนจากภาระที่เปลี่ยนไปตลอดเวลา ในการทดลองนี้ใช้สปริงที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์เชิงรบกวน โดยในการทดลองดังกล่าวนี้เป็นการทดลองที่ขนานกับการจำลองผล กล่าวคือ ใช้วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และเพื่อตรวจสอบถึงความครอบคลุมของการออกแบบในการทดลองนี้จึงลองเปลี่ยนจากมอเตอร์กระแสสลับ เป็นมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ เพื่อที่จะทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมที่สามารถควบคุมได้แม้เปลี่ยนชนิดของมอเตอร์ และไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเลย อย่างไรก็ตาม หากทราบค่าพารามิเตอร์โดยหาได้จากวิธีการระบุค่าพารามิเตอร์ดังแสดงไว้ในบทที่ 4 ก็จะทำให้การออกแบบระบบได้ค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นใกล้เคียงกับค่าจริงผลมากขึ้นอีกด้วย การติดตั้งการทดลองแสดงในรูป 6.1 ในรูปที่ 6.2 เป็นภาพถ่ายอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 6.2 อุปกรณ์การทดลองก่อนติดตั้งแขนระยางจากท่อ พีวีซี ที่ปลายมอเตอร์กับภาระ

สัญญาณป้อนกลับผ่าน ISA Slot [15] บันทึกทุก 0.4 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 รูปที่ 6.3 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะ ระหว่างการควบคุมแบบ GFPID ที่นำเสนอและอีกสองวิธีการควบคุมความเร็วมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป คือการควบคุมแบบ เฟสล็อกกลูป (Phase-locked loop, pll) และวิธีแบบพีไอดีดั้งเดิม (PID) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในที่นี้คือ

สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

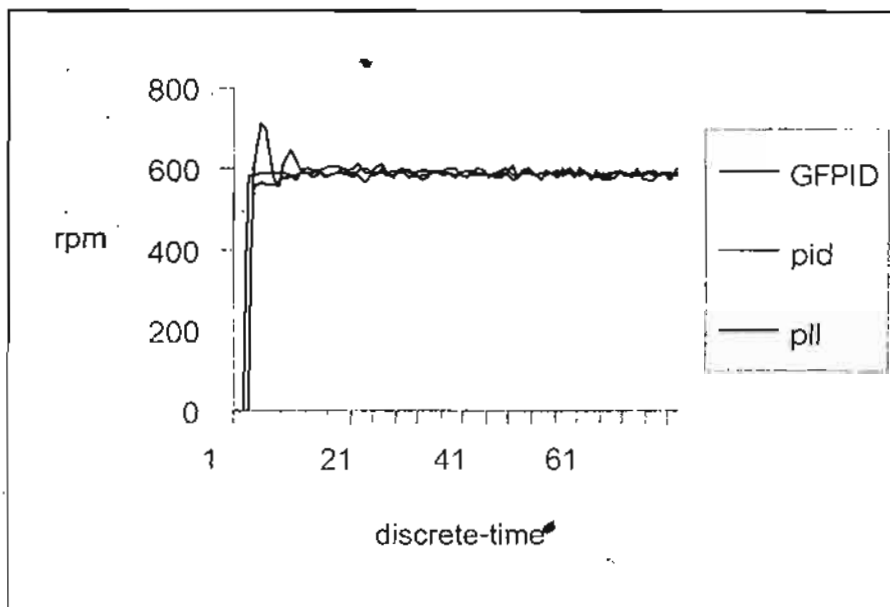
$$K_p = 0.5, K_i = 0.1, K_d = 0.1, T = 0.01 \text{ sec}$$

สำหรับ GFPID

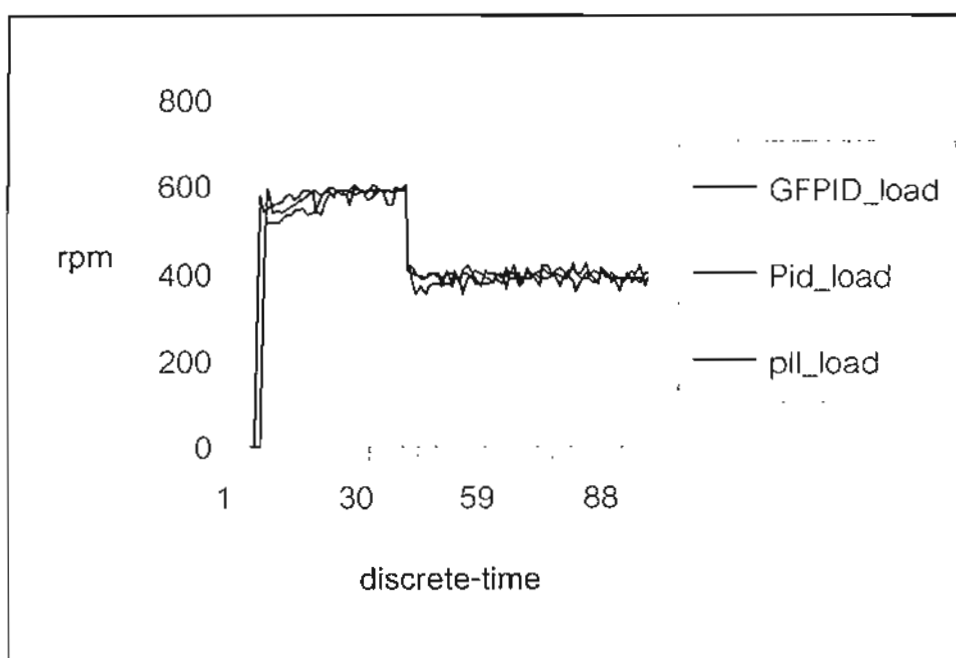
$$K_p = 0.1, K_i = 0.1, K_d = 0.1, K = 1, K_{uPI} = 0.1, K_{uPD} = 0.2, L = 5, T = 0.01 \text{ sec}$$

สำหรับวงจรเฟสล็อกกลูป (เป็นวงจรอนาล็อก)

$K_\phi = 0.111 \text{ V/rad}$ (gain constant for the MC4044 phase detector), $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 1.5 \text{ M}\Omega$, $C = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$ (parameter for passive loop filter), $K_1 = 1.2 \text{ V/V}$ (motor drive gain), $K_2 = 159.236 \text{ (pulse/rad)}$, $K_3 = 0.1$ (the counter modulus 100)



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบวิธีการแบบ GFPID กับวิธีมาตรฐาน PID และ PLL ที่ใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 6.4 เป็นการเพิ่มภาระ 2 kg เข้าไปในระบบ ในขณะที่ยังคงการรบกวนจากสปริงที่ไม่ทราบค่า

จากผลการทดลองทั้งสองรูปจะเห็นได้ว่า GFPID ไม่มีค่าพุ่งเกินเหมือนกับวิธี PID ในขณะเดียวกันให้ผลตอบสนองดีกว่าวิธีแบบ PLL ซึ่งวิธีแบบ PLL นี้เป็นวิธีที่ให้ผลตอบสนองที่ดีในช่วงสภาวะ steady state อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการรบกวนของสปริงซึ่งเป็นภาระแปรผันตามเวลา ทำให้เกิดการสั่นรบกวน ในกรณีนี้เป็นการรบกวนอย่างมากจึงทำให้ในช่วงสภาวะคงตัวเกิดการกระเพื่อมของสัญญาณ แม้ว่า GFPID จะให้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบ แต่ในกรณีที่เกิดการรบกวนอย่างรุนแรง (strong disturbance, not perturbation) พารามิเตอร์ในการควบคุมเหล่านี้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนตัวเองได้ (self-tuning) เนื่องจากวิธีการแบบ GA ที่ใช้เป็นวิธีการแบบ “off-line” optimization ไม่ใช่ แบบ “on-line” ข้อเสนอแนะ เพื่อแก้ปัญหาต่อไปจากการทดลองนี้เสนอไว้ในบทที่ 7

บทที่ 7

บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ การปรับปรุงการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การควบคุมสามารถทำได้ด้วยวิธีการพันธุศาสตร์ การจำลองผลและการทดลองซึ่งให้เห็นผลสัมฤทธิ์ของการประยุกต์ใช้งานทางด้านการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ข้อต่ออ่อนตัว บ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานกับการขับเคลื่อนหุ่นยนต์เคลื่อนที่อื่น ๆ โดยใช้ควบคุมความเร็วทั้งในระบบที่ใช้ตัวขับเคลื่อน (actuator) ด้วยกำลังไฟฟ้าได้ทั้งแบบกระแสสลับและกระแสตรง

สำหรับการควบคุมตำแหน่งนั้น ไม่ได้แสดงให้เห็นในการจำลองผลและการทดลองนี้ เนื่องจากว่า [8, 10, 17, 22] ได้แสดงความสามารถในการควบคุมตำแหน่งของระบบควบคุมแบบ FPID นี้แล้วแม้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมดังกล่าวจะใช้วิธีแบบลองผิดลองถูกก็ตาม แต่วิธีการปรับค่าเกณฑ์ทำได้ในทำนองเดียวกันโดยไม่ยาก

จากการจำลองผลจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้ GA ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมดีกว่าวิธีลองผิดลองถูก แต่อย่างไรก็ตาม จากบทที่ 6 ในการประยุกต์ใช้งานเราจะเห็นได้ว่า ค่าเวลาได้ขึ้นของวิธีการแบบ GA และ แบบลองผิดลองถูกในการทดลองนั้นจะใกล้เคียงกันเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ ดังนั้น ในการใช้งานจริงค่าที่ควรถ่วงน้ำหนักให้มากในการใช้งานจริงก็คือ ค่าของความคงทนต่อสัญญาณรบกวนและภาระที่เปลี่ยนแปลง (loads)

จากการที่การปรับค่าพารามิเตอร์แบบ GA เป็นการปรับแบบ "off-line" ดังนั้น เมื่อมีสัญญาณรบกวนหรืออินพุตรบกวนที่รุนแรง ระบบไม่อาจที่จะควบคุมโดยการปรับพารามิเตอร์เอง (self-tune) ให้มีภาวะคงตัว (steady state) ที่ราบเรียบ ซึ่งหากการรบกวนรุนแรงเกินกว่าสภาวะคงทน ระบบอาจเกิดสภาวะไร้เสถียรภาพ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ควรได้รับการออกแบบให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพ [5, 8, 9, 11, 16] เพื่อเป็นการปรับปรุงให้ระบบมีความสามารถในการปรับตัวแบบ "on-line" วิธีการใน [18-20] อาจสามารถนำมาดัดแปลงประยุกต์ใช้กับ FPID ให้มีความสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมได้ทันทีทันใด

อนึ่ง วิธีการหาอนุमानแบบเลือกค่าน้อย (MIN) ในการออกแบบ FPID อาจสามารถใช้วิธีอื่นได้ ดังแสดงใน [22] นอกจากนี้ตัวตรวจวัด (sensor) ที่ใช้ ควรได้รับการปรับปรุงให้มีขีดความสามารถเชิงปัญญา [23-24] ซึ่งจะเป็นหัวข้อและทิศทางการวิจัย อันมีแนวโน้มควรค่าต่อการติดตามเพื่อดำรงไว้ซึ่งภูมิปัญญาไทยในการพัฒนางานวิจัยทางด้านวิศวกรรมต่อไป หรืออย่างน้อยก็เพื่อที่จะเป็น "ผู้ฉลาดซื้อ" ณ ภาวะปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

1. G. Chen, "Conventional and fuzzy PID controller: an overview", *Int. J. Intelligent Control System*, pp. 235-246, 1996.
2. G. J. Silva, A. Datta, and S. P. Bhattacharyya, "New results on the synthesis of PID controllers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.47, iss. 2, pp.241-252, 2002.
3. A. Visioli, "Tuning of PID controllers with fuzzy logic," *IEE Proc. Control Theory and Applications*, vol. 148, iss 1, pp. 1-8, 2001.
4. A. Isaksson, and T. Hagglund, "Editorial - pid control," *IEE Proc. Control Theory and Applications*, vol. 149, iss 1, pp. 1-2, 2002.
5. D. Misir, H. A. Malki, and G. Chen, "Design and Analysis a Fuzzy Proportional Derivative Controller", *Fuzzy Set and System*, pp.297-314, 1996.
6. G.K.I. Mann, Bao-Gang Hu; and R. G. Gosine, "Two-level tuning of fuzzy PID controllers," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, vol.31, iss. 2, pp. 263 –269, 2001.
7. M. Uragami, M. Mizumoto, K. Tanaka, "Fuzzy robot controls", *J. Cybernet.*, pp. 39-64, 1976.
8. P. Sooraksa, and G. Chen, "Mathematical modeling and fuzzy control for flexible-link robots," *Journal of Mathematical Computing and Modeling*, vol. 27, no. 6, pp. 73-93, 1998.
9. G. Chen and H. Ying, "BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control systems," *J. Intel. Fuzzy Syst.*, vol. 5, pp. 3-21, 1997.
10. H. A. Malki, D. Feigenspan, D. Misir, and G. Chen, "Fuzzy PID control of a flexible joint robot arm with uncertainties for time-varying load", *IEEE Trans. Control System Technology*, pp. 371-378, 1997.
11. H. A. Malki, H. Li, and G. Chen, "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control system", *IEEE Trans. Fuzzy System*, pp.245-254, 1994.
12. T. Brehm, and K. S. Rattan, "Hybrid fuzzy logic PID controller," *Proc. of the IEEE* 1993
National Aerospace and Electronics Conference, vol.2, pp. 807 – 813, 1993.
13. M. Spong, "Modeling and control of elastic joint robot", *ASME J. Dyn. System, Meas. Control* 109, pp. 146-155, 1987.

14. M. C. Readman, "Flexible joint robots", CRC Press, 1994.
15. M. A. Mazadi, J. G. Mazadi, "The 80x86 IBM PC & Compatible Computer Volume II: Design and Interfacing of the IBM PC, PS and Compatible", Prentice-Hall. 1995.
16. H. Ying, W. Siler, J.J. Buckley, Fuzzy control theory: a nonlinear case, Automatica, pp. 513-520, 1990.
17. W. Tang, G. Chen, and R. Lu, "A modified fuzzy PI controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties," Fuzzy Sets and Systems, vol. 118, pp. 109-119, 2000.
18. Implementation of self-tuning controllers, Edited by K. Warwick, Peter Peregrinus Ltd., IEE., 1988.
19. D. Popovic, "Intelligent control with neural network," in Soft Computing & Intelligent Systems: Theory & Applications, Edited by N. K. Sinha, and M. M. Gupta, Academic Press: 1999.
20. C-C Lee, Intelligent control based on fuzzy logic and neural network theory, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1990.
21. B. M. Mohan, and A. V. Patel, "Analytical structures and analysis of the simplest fuzzy PD controllers," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol. 32, no. 2, pp. 239-248, 2002.
22. T. Pattaradej, P. Chandang, M. Lertwatechakul, P. Sooraksa, and G. Chen, "A speed evaluation for conventional PID and fuzzy controllers," Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Technologies, pp. 91-96, 2001.
23. J. V. Spiegel, "Computational Sensors: The basis for truly intelligent machines," in "Handbook of Sensors and Actuators," edited by H. Yamasaki, Vol 3., Elsevier, Amsterdam, pp. 19-37, 1996.
24. H. Yamasaki, "What are the intelligent sensors," "____", pp. 1-17, 1996.
25. Practical Handbook of Genetic Algorithms: *Applications*, Edited by Lance Chamberts, Vol 1., CRC Press., New York, 1995.
26. Practical Handbook of Genetic Algorithms: *New Frontiers*, Edited by Lance Chamberts, Vol 2., CRC Press., New York, 1995.
27. Practical Handbook of Genetic Algorithms: *Complex Coding Systems*, Edited by Lance Chamberts, Vol 3., CRC Press., New York, 1995.
28. B. Soucek, and the IRIS Group, Dynamics, Genetic, and Chaotic Programming: The Sixth Generation, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
29. <http://ieeexplore.ieee.org/Xref/DynWel.jsp>

30. J. H. Holland, "Adaptation in Natural and artificial Systems," MIT Press, Cambridge, MA, 1975.
31. Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Program," 3rd., Springer-Verlag, New York, 1996.
32. K. F. Man, K. S. Tang, and S. Kwong, Genetic Algorithms: Concepts and Designs, Springer-Verlag, London, 1999.