

การอนวัตตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริงด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor Implementation for a Real Time PID Controller)

เดชา พวงดาวเรือง*

สรายุณี สุจิตจร**

โยธิน เปรมปราณีรัตน์***

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิทัลชนิดเวลาจริงที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีของ Z180CPU กล่าวถึงเทคนิคการอนวัตโปรแกรมให้การควบคุมที่มีลักษณะการทำงานเป็นเวลาจริงโดยอาศัยเทคนิคการอินเทอร์รัพท์ มีการใช้กลไก anti-windup กับอินทิกรัลเทอม และกล่าวถึงขนาดและเวลาในการเอกซิคิวทีโปรแกรมให้การควบคุม พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริง

Summary

This article describes the implementation of a real-time PID controller using Z180CPU and the assembly language of which. Efficient interrupts have been used throughout. Anti-windup is embedded for the integral term. Size and execution time of the control software as well as experimental results are presented.

1. บทนำ

ตัวควบคุมชนิดเวลาจริง ต่างจากตัวควบคุมแบบทั่วไปตรงที่มีเวลาเป็นปัจจัยวิกฤต เวลาดังกล่าวคือเวลาที่อัลกอริทึมของตัวควบคุมรวมทั้งกลไกต่างๆ ภายในตัวควบคุมดำเนินการจนแล้วเสร็จต่อหนึ่งรอบการทำงาน ซึ่งถูกกำหนดให้เสร็จสิ้นภายในช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มสัญญาณ (sampling interval) โดยที่ช่วงเวลานี้จะสัมพันธ์กับค่าเวลาในการไต่ระดับ (rise time)

ของผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบ แนวปฏิบัติโดยทั่วไปให้ใช้การสุ่มสัญญาณ 4-10 ครั้ง ภายในช่วงเวลาไต่ระดับ [1]

ช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณและอัตราการสุ่มสัญญาณจะเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อการพิจารณาเลือกฮาร์ดแวร์ให้การควบคุม ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับอาการตอบสนองทางเวลาของระบบพลวัตที่พิจารณากล่าวคือหากระบบพลวัตเป็นชนิดที่ให้ผลตอบสนองช้าเช่นพวกโพรเซสคอนโทรล อาจเลือกใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ร่วมกับภาษาโปรแกรมระดับสูงในการอนวัตตัวควบคุม แต่ถ้าระบบพลวัตเป็นชนิดที่ให้ผลตอบสนองเร็วเช่นพวกเซอร์โวคอนโทรลอาจพิจารณาเลือกใช้ไมโครโพรเซสเซอร์บอร์ดเดี่ยวร่วมกับภาษาโปรแกรมระดับต่ำในการอนวัต ซึ่งประการหลังนี้ยังต้องคำนึงถึงจำนวนบิตของซีพียู ความแยกชัด (resolution) อัตราสัญญาณนาฬิกา (clock rate) ที่ไมโครโพรเซสเซอร์ทำงาน, จำนวนบิต (ความแยกชัด) ของ เอ/ดี และ ดี/เอ คอนเวอร์เตอร์, คอนเวอร์ชันโทม, ชนิดของ แชนเปลอร์ ฯลฯ

งานวิจัยพัฒนานี้ได้พิจารณาเลือกใช้ไมโครโพรเซสเซอร์บอร์ดเดี่ยว CP-AT180 [2] สำหรับอนวัตตัวควบคุมพีไอดี เพื่อประโยชน์ที่กว้างขวางในการประยุกต์ใช้งานต่อไป บนบอร์ดควบคุม CP-AT180 มีไมโครโพรเซสเซอร์ Z80180 เป็นซีพียูขนาดความแยกชัด 8 บิต ทำงานบนอัตราสัญญาณนาฬิกา 10 MHz ทำการอนวัตตัวควบคุมร่วมกับโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีเพื่อให้มีความรวดเร็วในการประมวลผลสอดคล้องกับ real-time clock ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ 1 มิลลิวินาที คงที่

* สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

** สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*** ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. อัลกอริทึมของตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดี มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชันในโดเมน s เป็นดังสมการที่ (1) ซึ่งในบางครั้งตัวควบคุมพีไอดีถูกเรียกขานว่าตัวควบคุมสามพจน์ (Three-term controller) ในการอนุวัตตัวควบคุมแบบดิจิทัลจะต้องทำการแปลง s โดเมนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันไปอยู่ในรูป z โดเมนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันก่อน จากนั้นจึงทำการแปลง z โดเมนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันให้ไปอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลอีกต่อหนึ่ง ดังนั้นจากสมการที่ (1)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ $G_c(s)$ คือฟังก์ชันของตัวควบคุมพีไอดี, $U(s)$ คือสัญญาณควบคุม, $E(s)$ คือสัญญาณคลาดเคลื่อน, K_p คืออัตราขยายของพรีอพอซันนัลเทอม, K_i คืออัตราขยายของอินทิกรัลเทอม และ K_d คืออัตราขยายเดริเวทีฟเทอม

ทำการแปลงให้อยู่ในรูป z โดเมนได้ดังสมการที่ (2)(3)

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_i T}{2} \frac{(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})} + \frac{K_d}{T} (1-z^{-1}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ T คือช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ และเทอม z^{-1} คือดีเลย์หนึ่งหน่วยเวลาในการสุ่มสัญญาณ

อินทิกรัลเทอมได้รับการแปลงด้วยวิธีการประมาณของทูลสตินและในเดริเวทีฟเทอมได้รับการแปลงด้วยวิธีแบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีจะได้รับการแปลง z โดเมนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันในสมการที่ (2) ไปอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลดังแสดงในสมการที่ (3)

$$u(i) = u_c(i-1) + K_p e(i) + \frac{K_i T}{2} \{e(i) + e(i-1)\} + \frac{K_d}{T} \{e(i) - e(i-1)\} \quad \dots(3)$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียลในสมการที่ (3) จะได้รับการอนุวัตเป็นซอฟต์แวร์ให้การควบคุมที่มีคุณสมบัติเป็นตัวควบคุมเวลาจริงต่อไป

3. การอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริง

ในการอนุวัตตัวควบคุมชนิดเวลาจริงนั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคการอินเตอร์รัพท์เข้าช่วยกล่าวคือจะใช้ประโยชน์จากโปรแกรมเมเบิลเคาท์เตอร์ไทมเมอร์ Z80CTC บนบอร์ดควบคุม CP-AT180 ทำงานเป็นตัวตั้งเวลา (timer) เพื่อผลิตและส่งสัญญาณอินเตอร์รัพท์ทุกๆ ช่วงเวลาที่ต้องการ (ในกรณีนี้กำหนดให้เท่ากับ 1

มิลลิวินาที) ให้กับซีพียู จากนั้นเมื่อซีพียูได้รับสัญญาณอินเตอร์รัพท์และให้การตอบรับการอินเตอร์รัพท์แล้ว ซีพียูจะหยุดการทำงานจากโปรแกรมหลักไปทำงานโปรแกรมให้บริการอินเตอร์รัพท์ ซึ่งก็คือโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีนั่นเอง และเมื่อโปรแกรมให้บริการอินเตอร์รัพท์หรือโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีทำงานเสร็จก็จะกลับไปสู่อินเตอร์รัพท์และรอคอยการอินเตอร์รัพท์ครั้งต่อไป การทำงานของโปรแกรมหลัก (ผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์) และโปรแกรมให้บริการอินเตอร์รัพท์ (ตัวควบคุมพีไอดี) อาจอธิบายได้ด้วยแผนภูมิการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ในรูปที่ 3 แสดงบางส่วนของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลีของ Z180CPU ทั้งนี้ในการประดิษฐ์โปรแกรมได้ใช้ซอฟต์แวร์ช่วยดังนี้

- Z180ASM [4] เป็นแอสเซมเบลอร์ ทำหน้าที่แปลงแอสเซมบลีไฟล์มาเป็นเฮกซ์ไฟล์ (hex file)

- ET-Debugger AT180 [5] เป็นดีบักเกอร์ทำหน้าที่ดาวน์โหลดและอัปโหลดเฮกซ์ไฟล์ให้กับ RAM บนบอร์ดควบคุม

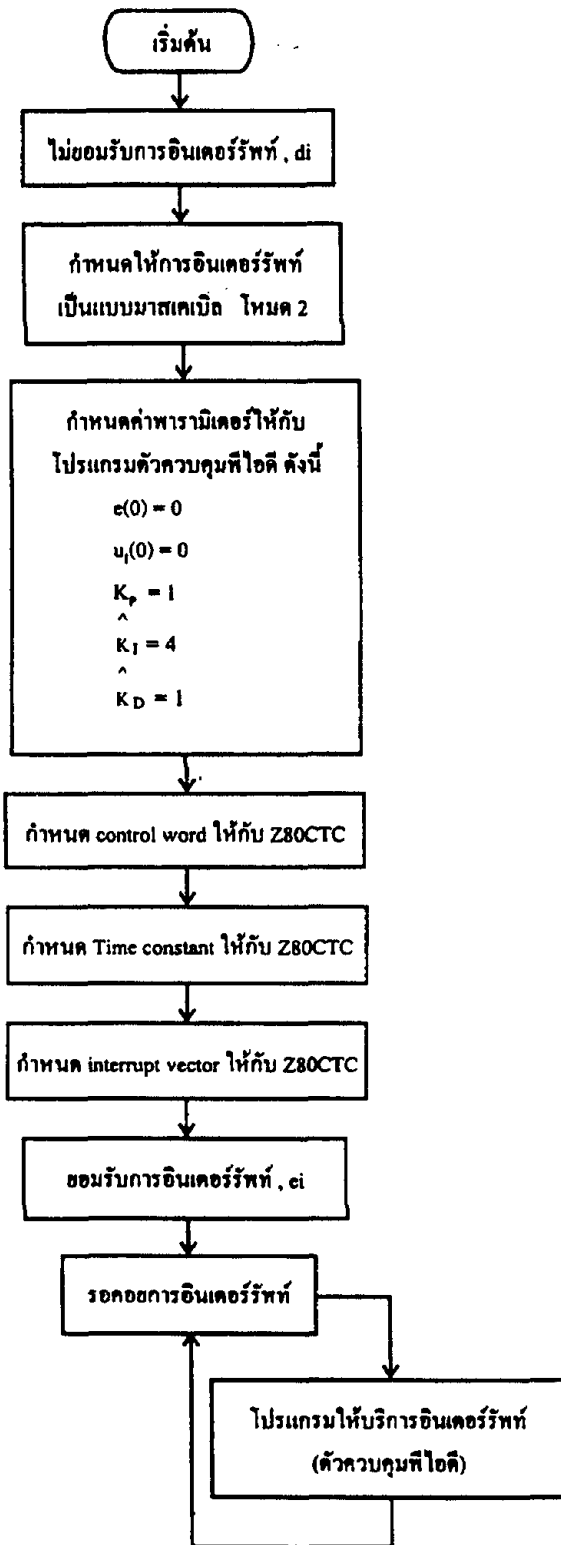
ซอฟต์แวร์ทั้งสองทำงานบน DOS ผู้สนใจสามารถศึกษารายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิง [4,5] จากแผนภูมิการทำงานในรูปที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ $e(0)$ และ $u(0)$ คือค่า $e(i-1)$ และ $u(i-1)$ ที่ปรากฏในสมการที่ (3) ตามลำดับ

ค่า K_i มีความสัมพันธ์กับสมการที่ (3) คือ $\hat{K}_i = \frac{K_i T}{128}$ เมื่อค่า T คงที่ (1 มิลลิวินาที) สามารถเขียน $\hat{K}_i = 64 \times 10^{-3} K_i$ การกำหนด \hat{K}_i เริ่มต้นเท่ากับ 4 มีความหมายทางอ้อมว่าได้กำหนดค่า $K_i = 62.5$ นั่นเอง การหาร \hat{K}_i ด้วย 128 ใช้วิธีเลื่อนขวา (shift right) 7 ครั้ง ในส่วนของโปรแกรมให้การอินทิเกรตสัญญาณ

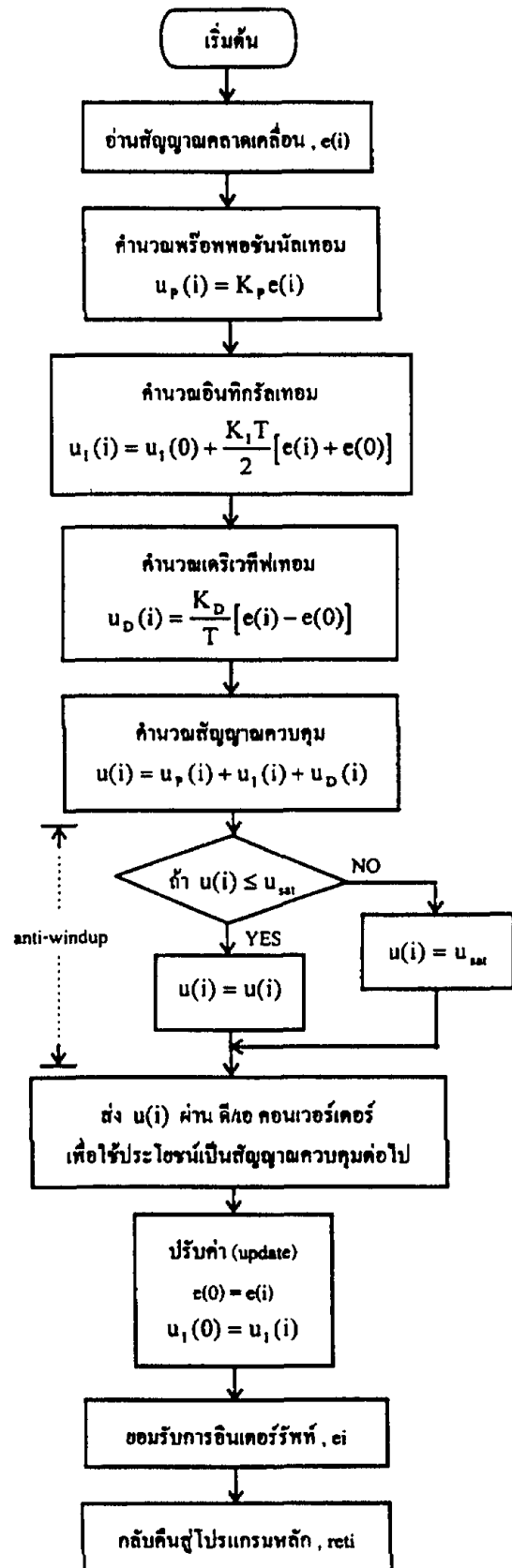
ค่า K_d มีความสัมพันธ์กับสมการที่ (3) คือ $\hat{K}_d = \frac{K_d}{T}$ เมื่อ T คงที่ การกำหนด \hat{K}_d เริ่มต้นเท่ากับ 1 มีความหมายว่าได้กำหนดค่า $K_d = 0.001$ นั่นเอง

pro : ld a, (8090h)	: โหลดค่าความคลาดเคลื่อน, e(i)
ld d, a	: เก็บ e(i) ไว้ในรีจิสเตอร์ d
ld a, (8083h)	: โหลดค่า K_p
ld e, a	: เก็บค่า K_p ไว้ในรีจิสเตอร์ e
mit de	: $K_p e(i)$ ผลที่ได้จะอยู่ในรีจิสเตอร์ e
ld a, e	: เก็บผล $K_p e(i)$ หรือ $u_p(i)$ มาไว้ในรีจิสเตอร์ a
ld (80a0h), a	: เก็บ $u_p(i)$ ไว้ในตำแหน่ง 80a0h ของหน่วยความจำ

รูปที่ 3 แสดงบางส่วนของโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 1 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมหลัก (ผลิตสัญญาณอินเทอร์รัพท์)

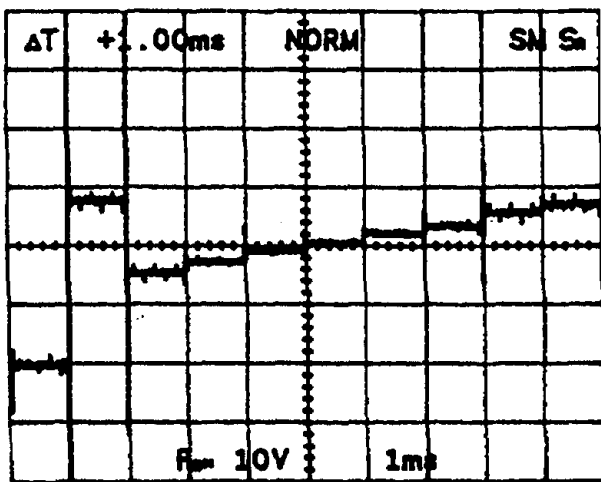


รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรม ให้บริการอินเทอร์รัพท์ (ตัวควบคุมพีไอดี)

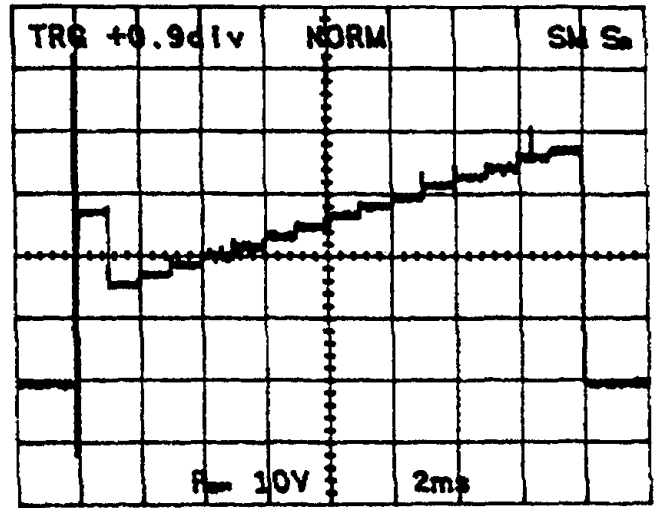
จากรูปที่ 2 ในส่วนของ "anti-windup" เป็นการจำกัดค่าสัญญาณควบคุม $u(i)$, ไม่ให้ล้นเกินความแยกชัดของซีพียูจากผลของการอินทิเกรตสัญญาณของอินทิกรัลเทอม ลักษณะของการอินทิเกรตจนล้นเกินนั้นเราเรียกว่า "integral windup" [1] การแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยโปรแกรมนั้น กระทำได้โดยการกำหนดเงื่อนไขขึ้นมาทดสอบ $u(i)$ กล่าวคือเราจะกำหนดค่า u_{sat} ขึ้นมาและใช้ค่านี้เป็นขีดจำกัดสูงสุดของค่า $u(i)$ จากนั้นเราจะเขียนโปรแกรมทดสอบ $u(i)$ ว่าถ้า $u(i) \leq u_{sat}$ ให้ $u(i)$ มีค่าเท่ากับ $u(i)$ และถ้า $u(i) > u_{sat}$ ให้ $u(i)$ มีค่าเท่ากับ u_{sat} ซึ่งในการนี้ได้กำหนด u_{sat} ให้มีค่าเท่ากับ 4 โวลต์

4. การทดสอบตัวควบคุมพีไอดี

ในการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริงได้ประยุกต์ใช้สัญญาณจตุรัสจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นสัญญาณคลาดเคลื่อนป้อนให้กับตัวควบคุม การทดสอบได้ทำการปรับแปรค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี เพื่อตรวจสอบพิกัดและขีดจำกัดการใช้งานของตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง 8 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 4 สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดี

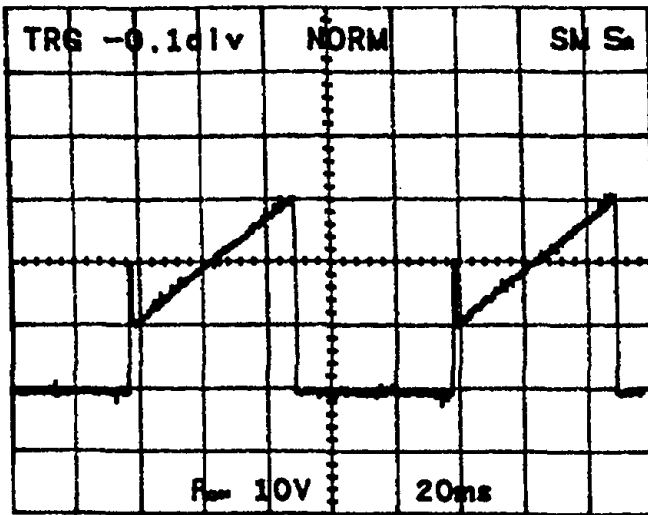


รูปที่ 5 สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดี

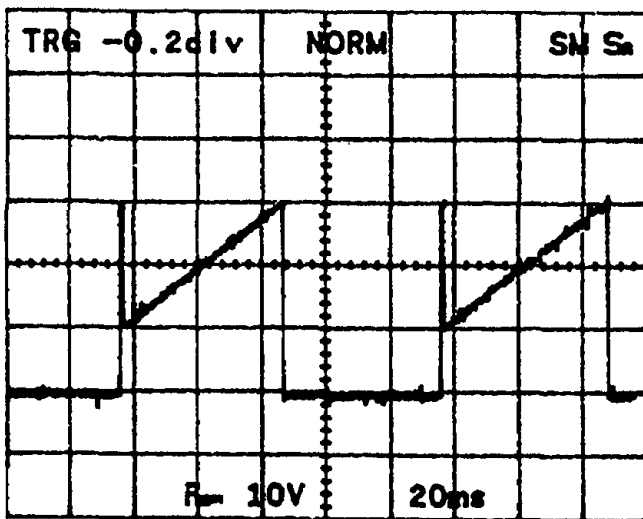
รูปที่ 4 และ 5 เป็นผลการทดสอบเพื่อหา ลักษณะสมบัติความเป็นตัวควบคุมเวลาจริง การทดสอบได้ใช้สัญญาณจตุรัสขนาด 1.5 โวลต์ 30 เฮิร์ต เป็นอินพุต $e(t)$ ให้กับตัวควบคุม ผลการทดสอบจะเห็นว่าแต่ละขั้นของการไต่ระดับของสัญญาณควบคุมมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิวินาที ซึ่งเท่ากับช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ แสดงว่าในการสุ่มสัญญาณอินพุตแต่ละครั้งตัวควบคุมได้ดำเนินการกับสัญญาณดังกล่าวตามอัลกอริทึมและกลไกต่างๆ ในโปรแกรมแล้วเสร็จภายในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งนั่นคือคุณสมบัติของตัวควบคุมชนิดเวลาจริงดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

รูปที่ 6 ถึง 8 เป็นการทดสอบเพื่อหาพิกัดและขีดจำกัดการใช้งานของตัวควบคุม การทดสอบได้ใช้สัญญาณจตุรัสขนาด 1 โวลต์ 10 เฮิร์ต เป็นอินพุต $e(t)$ ให้กับตัวควบคุม ผลการทดสอบในภาพรวมอาจสรุปโดยพิจารณาร่วมกับรูปที่ 9 ได้ดังนี้

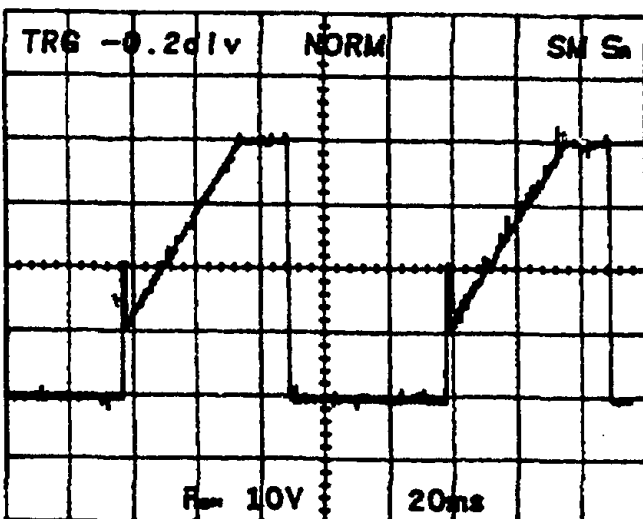
- การปรับค่า K_p มากขึ้นจะส่งผลทำให้ส่วน a ในรูปที่ 9 เพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนตรงต่อกัน และในทางกลับกันจะเป็นจริงด้วย
- การปรับค่า K_i มากขึ้นจะทำให้ความชัน c ในรูปที่ 9 เพิ่มขึ้นและในทางกลับกันก็เป็นจริง
- การปรับค่า K_d มากขึ้นจะทำให้ส่วน b ในรูปที่ 9 เพิ่มขึ้น และในทางกลับกันก็เป็นจริงเช่นกัน



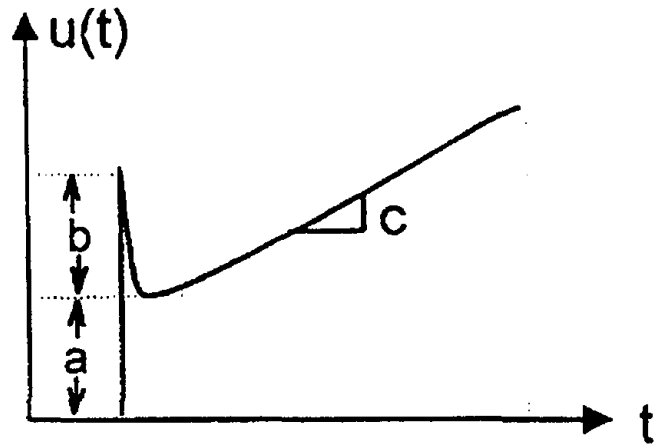
รูปที่ 6 สัญญาควบคุมเมื่อ $K_p=1, K_i=31.25, K_D=0.001$



รูปที่ 7 สัญญาควบคุมเมื่อ $K_p=1, K_i=31.25, K_D=0.002$



รูปที่ 6 สัญญาควบคุมเมื่อ $K_p=1, K_i=62.5, K_D=0.001$



รูปที่ 9 สัญญาควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันได

จากการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริงที่ผ่านมา ทำให้ทราบถึงพิกัดและขีดจำกัดในการใช้งานดังนี้

- โปรแกรมตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น ใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดความแยกชัด 8 บิต เท่านั้น

- โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จะใช้ในงานควบคุมระบบที่มีช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณคงที่ที่ 1 มิลลิวินาที ถ้าต้องการใช้งานโปรแกรมตัวควบคุมดังกล่าวกับระบบที่มีค่าเวลาในการได้ระดับไม่สัมพันธ์กับค่าช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณที่กำหนด บางส่วนของโปรแกรมจำเป็นต้องได้รับการดัดแปลงเสียใหม่

- โปรแกรมตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นนี้ จะให้ค่าสัญญาณควบคุมอิมพัลส์ที่ 4 โวลท์

- โปรแกรมตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นมีขนาด 212 ไบต์ และใช้เวลาในการเอกซิคิวท์ประมาณ 0.26 มิลลิวินาที [6]

5. บทสรุป

บทความนี้กล่าวถึงการอนุวัตโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีชนิดเวลาจริง ด้วยภาษาแอสเซมบลีของ Z180CPU โดยอาศัยเทคนิค การอินเตอร์รัพท์เข้าช่วย โปรแกรมถูกประดิษฐ์ขึ้นเป็นสองส่วนด้วยกันกล่าวคือ ส่วนแรกเป็นโปรแกรมหลัก ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณอินเตอร์รัพท์และเก็บตัวแปรต้นที่เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีรวมทั้งค่าเริ่มต้นอื่นที่จำเป็นสำหรับโปรแกรมในส่วนที่สองให้บริการอินเตอร์รัพท์ซึ่งก็คือโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีนั่นเอง

สัญญาณอินเตอร์รัพท์ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ sampling interval ของระบบ (1 มิลลิวินาที) โปรแกรมให้บริการอินเตอร์รัพท์ (ตัวควบคุมพีไอดี) ใช้เวลาในการเอกซิทิวท์ประมาณ 0.26 มิลลิวินาที ซิดจำกัดของโปรแกรมตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นคือใช้ได้กับไมโครเซลเลอร์ที่มีความแยกชัด 8 บิต ใช้ควบคุมระบบที่มีค่าเวลาในการไต่ระดับสัมพันธ์กับ sampling interval ที่ถูกกำหนดไว้คงที่ 1 มิลลิวินาที, สัญญาณควบคุมอิมพัลส์ที่ 4 โวลท์ และขนาดของโปรแกรมเท่ากับ 212 ไบต์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ประพันธ์ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เชื้อเพื่อ สถานที่ปฏิบัติการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวัดและพิมพ์ภาพสัญญาณ, คุณอัญชุลี รักด่านกลาง แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้จัดพิมพ์ต้นฉบับบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Astrom, K.J. and Wittenmark, B. Computer Controlled System Theory and Design : Prentice-Hall, 1990.
- [2] Manual of CP-AT180 Control Board, ETT Co, Ltd.
- [3] เดชา พวงดาวเรือง, สราวุฒิ สุจิตจร, โยธิน เปรมปราณีรัชต์, "ตัวควบคุมพีไอดีแบบดิจิทัลอล" วารสารร่วมโทรทอง : มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์, ปีที่ 7, ฉบับที่ 5, ก.พ.-มี.ค., น. 17-20,2541
- [4] Manual of Z180ASM Cross-Assembler, ETT Co, Ltd.
- [5] Manual of ET-Debugger AT180, ETT Co, Ltd.
- [6] เดชา พวงดาวเรือง, การควบคุมความเร็ว ดิจิตอลโดยใช้เทคนิคพีซีไอเทลเบิร์ก, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540

