การใช้ Matlab เป็นเครื่องมือช่วยออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุม

น.ต.ดร. กฤษฎา แสงเพ็ชร์ส่อง
อาจารย์ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

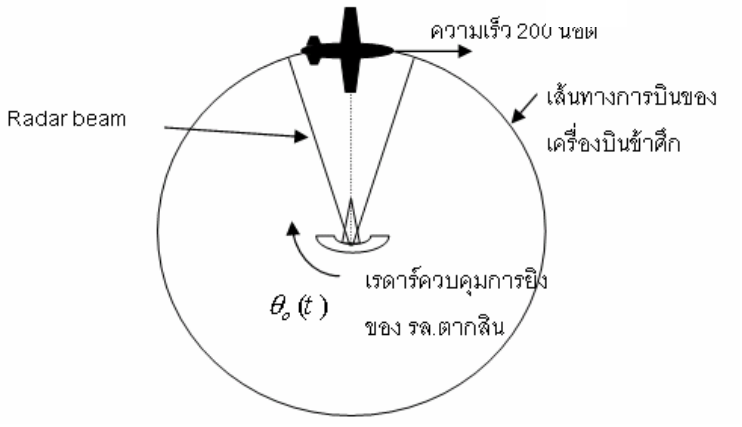
กล่าวนำ

ผู้เขียนได้นำเสนอเกี่ยวกับพื้นฐานทฤษฎีระบบควบคุม (Control Theory) ในวารสารฉบับที่ผ่านมา ในฉบับนี้จะได้ยกตัวอย่างของการนำทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมที่สำคัญบทความนี้ได้กล่าวถึงประสบการณ์และประโยชน์ของการใช้โปรแกรม Matlab ประกอบการเรียนวิชาระบบควบคุมภายในกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ

๑. ตัวอย่างการใช้ Control Theory ในการออกแบบระบบควบคุม

๑.๑ การออกแบบและวิเคราะห์ระบบเรดาร์ควบคุมการยิง

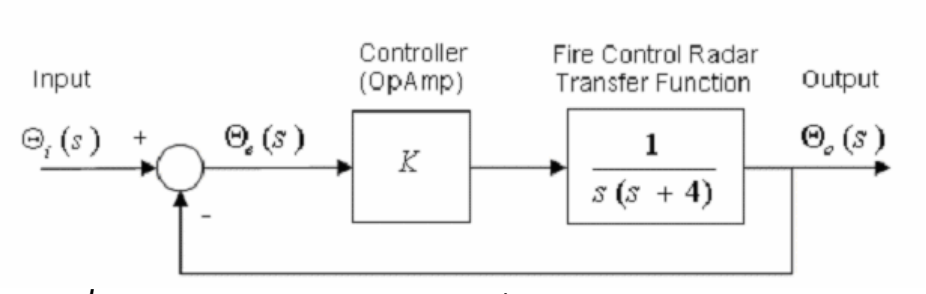
ต่อไปเป็นตัวอย่าง[๑] ของการนำ Control Theory มาใช้วิเคราะห์ Steady State Error ของระบบควบคุมการยิง สมมุติว่า ร.ล.ตากสิน สามารถตรวจจับเครื่องบินข้าศึกซึ่งกำลังบินลาดตระเวนรอบ ร.ล.ตากสิน ที่รัศมี ๕ ไมล์ทะเล ด้วยความเร็วคงที่ ๒๐๐ นอต และ ผบ. ร.ล.ตากสิน ได้สั่งการให้ติดตามเป้าด้วยเรดาร์ควบคุมการยิง ดังแสดงในภาพที่ ๑



ภาพที่ ๑ ภาพสถานการณ์เครื่องบินข้าศึกบินลาดตระเวนรอบ ร.ล.ตากสิน

---

[๑] ตัวอย่างนี้เป็นข้อสอบปลายภาควิชาระบบควบคุมในส่วนของกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือเมื่อเดือนกรกฎาคม ๒๕๔๗



ภาพที่ ๒ Block Diagram ของระบบเรดาร์ควบคุมการยิงของ ร.ล. ตากสิน

สมมุติว่าระบบเรดาร์ควบคุมการยิงเป็นระบบควบคุมแบบ Closed Loop ที่ไม่ซับซ้อน โดยใช้ Operational Amplifier (อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขยายสัญญาณ) เป็น Controller โดยที่กำลังของการขยายสัญญาณขึ้นอยู่กับค่า Gain K และระบบเรดาร์มี Model (Transfer Function) คือ $G(s)=\frac{1}{s(s+4)}$ (โดยปกติ Transfer Function สามารถหาได้จากการทดลองและในตัวอย่างนี้เป็นการสมมติขึ้น) ภาพที่ ๒ แสดง Block Diagram ของระบบควบคุมดังกล่าว คำถามคือจะต้องตั้งค่า Gain K ของ Controller ที่เท่าไร เพื่อที่จะสามารถล็อกเป้าให้อยู่ตรงกึ่งกลางของ Radar Beam โดยคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ๐.๑ องศา

ปัญหานี้เป็นการคำนวณหาค่า Gain K ที่จะทำให้ Steady State Error เท่ากับ ๐.๑ องศา ซึ่งสามารถใช้ Control Theory แก้ปัญหาได้ดังนี้

เนื่องจากเครื่องบินบินด้วยความเร็ว ๒๐๐ น็อต คงที่ จึงมีความเร็วเชิงมุม ω คงที่

$$\omega=\frac{v}{r}=\frac{200}{5\times 3600}\approx 0.011\,\text{rad/sec} \qquad \text{Eq. ๑}$$

Input และ Output ของระบบควบคุมการยิงคือมุม $\theta_i(t)=\omega\cdot t$ และ $\theta_o(t)$ ตามลำดับ เมื่อหา Laplace Transform จะได้ Input และ Output ของระบบใน s-domain (หรือ Frequency Domain) คือ

$$\Theta_i(s)=L[\theta_i(t)]=L[\omega\cdot t]=\frac{\omega}{s^2}=\frac{0.011}{s^2} \qquad \text{Eq. ๒}$$

และ Output คือ $\Theta_o(s)$ ตามลำดับ จาก Control Theory สามารถหาค่า Steady State Error ได้จาก

$$e(\infty)=\lim_{s\to 0}\left[\frac{s\Theta_i(s)}{1+G(s)}\right] \qquad \text{Eq. ๓}$$

โดยที่ $G(s)$ คือ Transfer Function ของ ระบบเรดาร์ควบคุมการยิง และมีค่า

$$G(s) = \frac{1}{s(s+4)} \qquad \text{Eq. ๔}$$

แทนค่า Eq.๒ และ Eq. ๔ ใน Eq. ๓ และแก้สมการได้ Steady State Error

$$\theta_e(\infty) = \lim_{s\to 0}\left[s \cdot \frac{\omega}{s^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{K}{s(s+4)}\right)}\right] = \frac{4\omega}{K} \qquad \text{Eq. ๕}$$

จะเห็นได้ว่า ค่า Steady State Error ขึ้นอยู่กับ ω กับ Gain K และสำหรับ Steady State Error ๐.๑ องศา $\theta_e(\infty) = \frac{0.1\pi}{180}$ ดังนั้นสามารถหาค่า Gain K ได้จาก

$$\frac{4\omega}{K} = \frac{0.1\pi}{180} \qquad \text{Eq. ๖}$$

แก้สมการ Eq. ๖ จะได้ค่า Gain K ที่ทำให้ Steady State Error ไม่เกิน ๐.๑ องศาคือ

$$K = \frac{720 \times 0.011}{0.1\pi} = 25.21 \qquad \text{Eq. ๗}$$

หลังจากที่หาค่า Gain K ได้แล้วจำเป็นต้องตรวจสอบว่าระบบมีความเสถียรหรือไม่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากค่า Poles ของ Closed loop transfer function $G_{CL} = \left.\frac{K}{s^2 + 4s + K}\right|_{K=25.21}$ เนื่องจาก Closed Loop poles มีค่าเท่ากับ -2$\pm$4.6054i ดังนั้นระบบจึงมีความเสถียร (เพราะจำนวนจริงของ Pole มีค่าเป็นลบ)

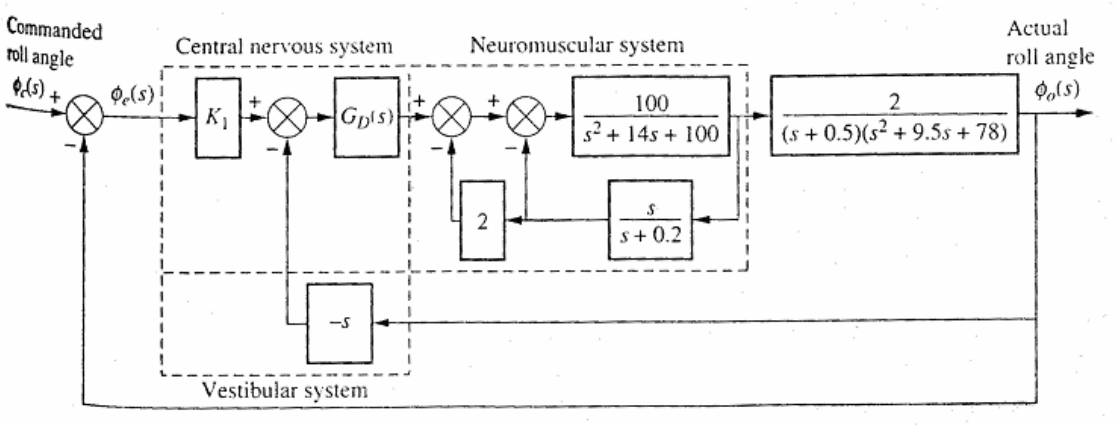
๑.๒ ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

จากตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่า Steady State Error และ Gain K ข้างต้น จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีเพียงอย่างเดียว ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการซึ่งพอสรุปที่สำคัญได้ดังนี้

๑. เนื่องจากค่า Gain K เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ในทางปฏิบัติวิศวกรควรทำการจำลอง (Simulation) ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันความถูกต้องของการคำนวณ ก่อนนำไปสร้าง Controller และทดลองกับระบบจริง

๒. นักเรียนนายเรือที่เรียนวิชาระบบควบคุมอาจยังไม่เห็นภาพอย่างชัดเจนว่าค่า Gain *K* มีผลต่อการตอบสนองของระบบอย่างไร นอกจากนี้ถ้าผู้เรียนสามารถเปลี่ยนค่าตัวแปร (parameters) ต่าง ๆ (ในกรณีนี้คือ Gain *K*) และสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองของระบบได้โดยง่าย ก็จะสามารถช่วยให้ผู้เรียนเห็นภาพและทำความเข้าใจกับสิ่งที่เรียนได้ดียิ่งขึ้น

๓. ระบบที่ใช้เป็นตัวอย่างข้างต้นเป็นระบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ระบบที่พบในชีวิตจริงอาจมีความซับซ้อนมากกว่านี้มาก ซึ่งหากจะใช้การคำนวณด้วยมือ อาจทำให้ช้าและมีโอกาสผิดพลาดสูง (ภาพที่ ๓ แสดงตัวอย่าง Simplified Block Diagram ของระบบควบคุม Roll Attitude แบบ Pilot in the loop ของ US Army UH-60A Black Hawk helicopter [๑]) ทำให้มีความจำเป็นต้องมีเครื่องช่วยคำนวณที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ ๓ ระบบควบคุม Roll Attitude แบบ Pilot in the loop ของ US Army UH-๖๐A Black Hawk helicopter

๒. Matlab

๒.๑ Matlab คืออะไร

Matlab [๓] คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกโปรแกรมหนึ่งที่ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการคำนวณแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์โดยเฉพาะ (มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่น ๆ สำหรับการประยุกต์ใช้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ เช่น Mathematica, Maple, และ Matcad) Matlab มีคุณลักษณะพิเศษต่างจากโปรแกรมทางวิทยาศาสตร์อื่น ๆ ที่สำคัญคือ

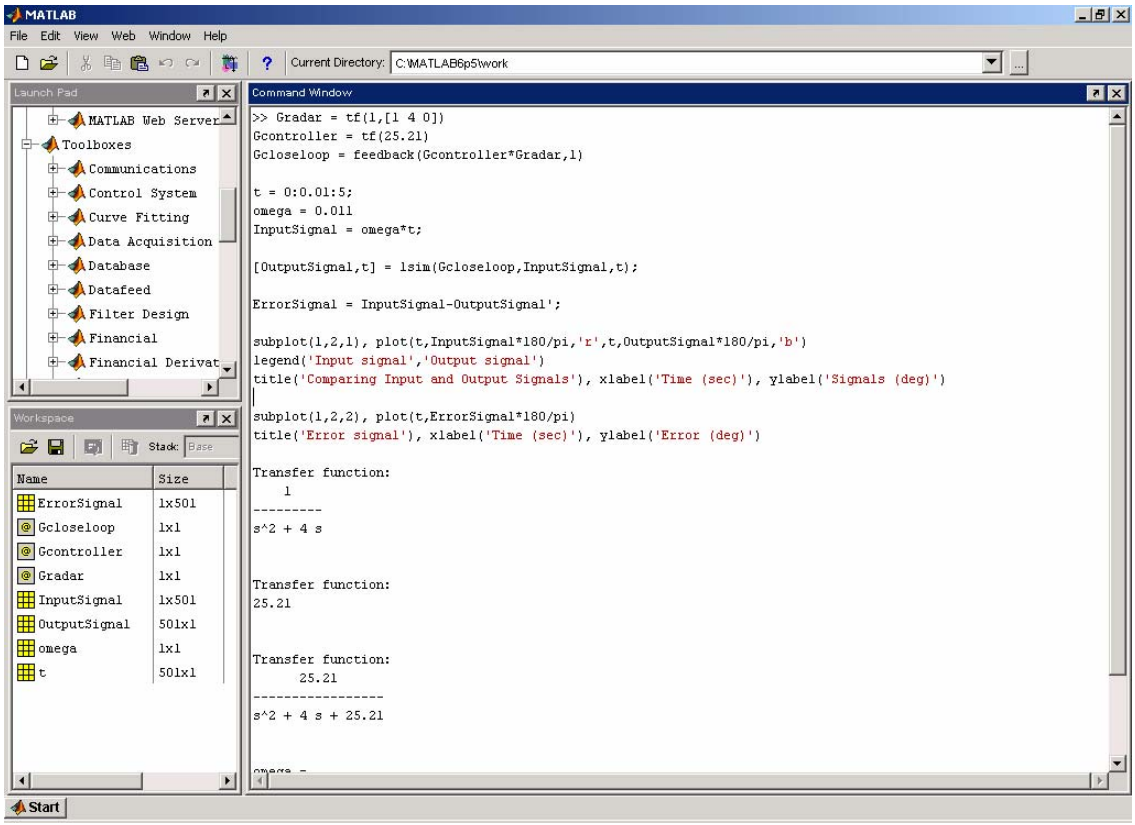
๑. ถูกออกแบบเพื่อใช้คำนวณแก้ปัญหาเกี่ยวกับ Matrices ได้ง่าย

๒. มี Toolboxes เพิ่มเติมที่สามารถใช้แก้ปัญหาในหลากหลายสาขาวิชา เช่น Control Toolbox สำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุม Digital Signal Processing Toolbox สำหรับวิเคราะห์ปัญหา

ด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล Communication Toolbox สำหรับการวิเคราะห์ระบบสื่อสาร หรือ Symbolic Toolbox สำหรับแก้โจทย์ทางคณิตศาสตร์แบบ Analytical (ลักษณะคล้ายโปรแกรม Maple) ในปัจจุบัน Matlab มี Toolboxes กว่า 31 Toolboxes ทำให้มีความอ่อนตัวและสามารถใช้งานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมได้เกือบทุกสาขา (รวมทั้ง Financial Analysis)

๓. ผู้ใช้สามารถเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาเฉพาะของ Matlab ทำให้มีความอ่อนตัวในการใช้งานและช่วยให้ผู้ใช้สามารถเพิ่มเติมขีดความสามารถที่อาจไม่มีในโปรแกรม

จากคุณสมบัติข้างต้นทำให้ในปัจจุบัน Matlab เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรทั่วโลก รวมทั้งในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุม ภาพที่ ๔ แสดง Screenshot ของโปรแกรม Matlab ผู้อ่านสามารถศึกษาตัวอย่างการใช้โปรแกรม Matlab เพิ่มเติมได้จากบทความ *โปรแกรมประยุกต์ Matlab* โดย นาวาตรี สิทธิรักษ์ พรมณีย์ [๔]



ภาพที่ ๔ *Screenshot* ***ของโปรแกรม*** *Matlab*

๒.๒ การใช้ Matlab ออกแบบและวิเคราะห์ระบบเรดาร์ควบคุมการยิง

จากตัวอย่างการออกแบบและวิเคราะห์ระบบเรดาร์ควบคุมการยิงข้างต้น สามารถใช้ Matlab ช่วยในการวิเคราะห์โดยป้อนคำสั่ง ดังแสดงใน ภาพที่ ๕ ซึ่งจะได้ผลของการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ ๖ ในภาพ Fig.A เป็นการเปรียบเทียบ Input และ Output และ ภาพ Fig.B เป็นการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าคงที่เมื่อระบบเข้าสู่จุดสมดุล (Steady State Error) คือ ๐.๑ องศา ดังนั้นจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของระบบด้วย Matlab กับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งมีค่าเท่ากัน จึงสรุปได้ว่าการคำนวณทางทฤษฎีถูกต้อง

ความหมายของโปรแกรมใน ภาพที่ ๔ สามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

๑. ผู้ใช้ป้อน System Model (Transfer Function) ให้กับ Matlab คือ Gradar และ Gcontroller ในบรรทัดที่ ๑-๒ โดยใช้คำสั่ง “tf” ซึ่งหมายถึง Transfer Function

๒. ผู้ใช้สั่งให้ Matlab คำนวณหา Closed Loop Transfer Function โดยอัตโนมัติด้วยคำสั่ง feedback และเก็บผลลัพธ์ที่ได้ใน Gcloseloop ในบรรทัดที่ ๓

๓. ผู้ใช้กำหนดเวลาสำหรับจำลองการทำงานของระบบ ในบรรทัดที่ ๔ (t = ๐:๐.๐๑:๕) ในที่นี้คือ เป็นเวลา ๕ วินาที โดยมีความละเอียดของ Step เวลาคือ ๐.๐๑ วินาที

๔. ผู้ใช้กำหนดค่า ω และ คำนวณหาสัญญาณเข้า (InputSignal) ตามสูตร $\theta_i(t) = \omega \cdot t$ ในบรรทัดที่ ๕-๖

๕. ในบรรทัดที่ ๗ ผู้ใช้สั่งให้ Matlab ทำการจำลองการทำงานของระบบ Gcloseloop ต่อสัญญาณเข้าคือ InputSignalโดยใช้คำสั่ง “lsim” และบันทึกผลลัพธ์ที่ได้ในตัวแปร OutputSignal

๖. ผู้ใช้คำนวณหา Steady State Error (จาก Error = Input – Output) ในบรรทัดที่ ๙

๗. ตั้งแต่บรรทัดที่ ๑๐-๑๗ เป็นการสั่งให้ Matlab พล็อตผลของการจำลองการทำงานของระบบและรายละเอียดต่าง ๆ

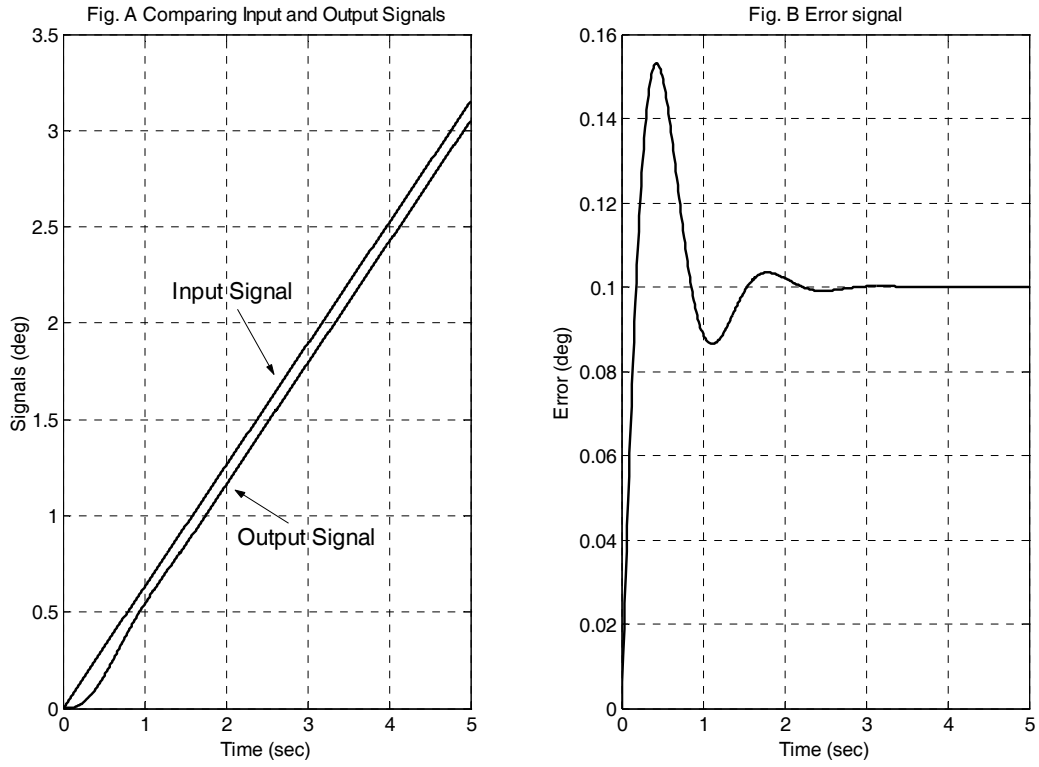
C:\MATLAB6p5\work\testsse.m*

File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help

Stack: Base

```
1  Gradar = tf(1,[1 4 0]) % สร้าง System Model ของระบบเรดาร์ควบคุมการยิง ในรูปของ Transfer Function
2  Gcontroller = tf(25.21) % สร้าง System Model ของ Controller ในรูปของ Transfer Function
3  Gcloseloop = feedback(Gcontroller*Gradar,1) % คำนวณ Closed Loop Transfer Function
4  t = 0:0.01:5; % กำหนดเวลาสำหรับ Simulation
5  omega = 0.011 % กำหนด
6  InputSignal = omega*t; % กำหนด Input ใน Time Domain
7  [OutputSignal,t] = lsim(Gcloseloop,InputSignal,t); % ทำการ Simulation
8  ErrorSignal = InputSignal - OutputSignal'; % คำนวณหา Steady State Error
9
10 % Plot Input/Output Signals
11 subplot(1,2,1), plot(t,InputSignal*180/pi,'r',t,OutputSignal*180/pi,'b')
12 legend('Input signal','Output signal')
13 title('Comparing Input and Output Signals'), xlabel('Time (sec)'), ylabel('Signals (deg)')
14
15 % Plot Error Signal
16 subplot(1,2,2), plot(t,ErrorSignal*180/pi)
17 title('Error signal'), xlabel('Time (sec)'), ylabel('Error (deg)')
```

ภาพที่ ๔ คำสั่งในโปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์ Steady State Error ของระบบควบคุมการยิง



ภาพที่ ๕ ผลการวิเคราะห์ Steady State Error ของระบบควบคุมการยิงด้วยโปรแกรม Matlab

๒.๓ ประโยชน์ของการใช้โปรแกรม Matlab เป็นเครื่องช่วยสอนวิชาระบบควบคุม

ในการเรียนการสอนวิชาระบบควบคุมของกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือในช่วงเดือนเมษายนถึงกรกฎาคม ๒๕๔๗ ได้ทดลองให้นักเรียนนายเรือใช้งานโปรแกรม Matlab เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมควบคู่ไปกับการศึกษาในภาคทฤษฎี (รวมทั้งการวิเคราะห์ Steady State Error ตามตัวอย่างข้างต้น) พบว่าแนวทางดังกล่าวมีประโยชน์สรุปได้ ดังนี้

๑. การใช้โปรแกรม Matlab ประกอบการเรียนของนักเรียนนายเรือช่วยให้นักเรียนเข้าใจบทเรียนได้ดีขึ้น เนื่องจาก

ก. การที่นักเรียนนายเรือจะสามารถใช้งานโปรแกรม Matlab ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมได้ นักเรียนจะต้องเข้าใจพื้นฐานของวิชาระบบควบคุมเป็นอย่างดี เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้คำสั่งและป้อนคำสั่งได้อย่างถูกต้อง ทำให้นักเรียนนายเรือต้องศึกษาบทเรียนให้เข้าใจอย่างถ่องแท้

ข. สิ่งที่มีส่วนช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียนนายเรือเป็นอย่างมากอีกอย่างหนึ่ง คือ หลังจากที่นักเรียนได้ทำการทดลองไปแล้ว และได้ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้ (ซึ่งนักเรียนส่วนมากจะได้ผลลัพธ์ไม่ตรงตามที่คำนวณไว้) นักเรียนจะเริ่มตั้งคำถามว่า "*ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น*" ซึ่งการตั้งคำถามในลักษณะนี้ เป็นการกระตุ้นการเรียนรู้ของนักเรียนได้เป็นอย่างดี เพราะจะนำไปสู่การวิเคราะห์และทำความเข้าใจทฤษฎีมากยิ่งขึ้น

ค. การใช้โปรแกรม Matlab ช่วยให้นักเรียนสามารถจำลองการทำงานของระบบและสามารถเปลี่ยนค่าตัวแปร (Parameters) ต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองได้โดยง่าย ทำให้นักเรียนเห็นภาพและช่วยเสริมความเข้าใจได้เป็นอย่างดี

๒. การใช้โปรแกรม Matlab (ควบคู่กับการเลือกปัญหาตัวอย่างที่เจอในชีวิตจริงและใกล้ตัวนักเรียนนายเรือมาเป็นโจทย์) ทำให้นักเรียนนายเรือมีความสนใจเรียนมากขึ้น (นักเรียนที่เข้าเรียนบอกว่า "*เคยใช้โปรแกรม Matlab คำนวณเลขทั่วไปและพล็อตกราฟ แต่ไม่ทราบมาก่อนสามารถนำมาใช้งานวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมหรือในสาขาอื่น ๆ ได้อย่างอ่อนตัวและหลากหลายเช่นนี้*")

๓. เนื่องจาก Matlab เป็นซอฟต์แวร์ที่เป็นที่ยอมรับอย่างสูงในปัจจุบันทั้งในภาควิชาการและในภาคอุตสาหกรรม และ เป็นโปรแกรมที่มีความอ่อนตัวสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย การแนะนำให้นักเรียนนายเรือสามารถใช้ Matlab ได้จึงมีประโยชน์คือ

ก. นักเรียนสามารถนำความรู้เกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม Matlab ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์หรืออื่น ๆ ได้ในอนาคต

ข. นักเรียนนายเรือได้เรียนรู้การใช้ซอฟต์แวร์ที่ทันสมัย และเทคนิคของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม (Computer Aided Design) จึงถือได้ว่าเป็นการยกระดับมาตรฐานการศึกษาของนักเรียนนายเรือ อีกทางหนึ่ง

แม้ว่าการใช้โปรแกรม Matlab ในการเรียนการสอนจะมีข้อดีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ก็มีข้อจำกัดที่สำคัญคือมีราคาสูง ทำให้ในปัจจุบัน โรงเรียนนายเรือยังไม่สามารถจัดหาโปรแกรมดังกล่าวไว้ใช้สำหรับการเรียนการสอนได้

ข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งสำหรับการเรียนการสอนวิชาระบบควบคุมในปัจจุบัน ซึ่งควรจัดให้มีขึ้นนอกเหนือจากการเรียนภาคทฤษฎีและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์แล้ว คือการทดลองกับอุปกรณ์จริง เพราะแม้ว่าผู้เรียนจะสามารถจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ได้ แต่ระบบทางกายภาพที่พบในชีวิตจริงมีความซับซ้อนมากกว่าที่จะสามารถสร้าง Model ที่มีความถูกต้องแม่นยำ ๑๐๐ เปอร์เซ็นต์ และการทดลองกับอุปกรณ์จริงย่อมให้ประสบการณ์ที่แตกต่างและจำเป็นอันจะเป็นประโยชน์กับนักเรียนนายเรือด้วย นอกจากนี้ ด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าไปมากในปัจจุบัน ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะสร้างอุปกรณ์ทดลองขึ้นใช้เองภายในโรงเรียนนายเรือด้วยงบประมาณไม่สูงมากนัก (ไม่กี่หมื่นบาท) เพื่อเป็นเครื่องช่วยสอนวิชาระบบควบคุมได้อีกอย่างหนึ่ง หากจะได้รับการสนับสนุนต่อไป

๔. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอภาพรวมเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Matlab เป็นเครื่องมือช่วยออกแบบวิเคราะห์ระบบควบคุม และการนำ Matlab ไปใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชาระบบควบคุม ในกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ในช่วงเดือนเมษายนถึงกรกฎาคม ๒๕๔๗ ได้นำเสนอตัวอย่างการวิเคราะห์ทั้งด้วยวิธี Analytical และวิธีการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องช่วยในการออกแบบ

จะเห็นได้ว่าการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น Matlab เป็นเครื่องช่วยสอนวิชาระบบควบคุมนั้น มีส่วนช่วยให้นักเรียนนายเรือเข้าใจบทเรียนและเห็นภาพได้ดียิ่งขึ้น แต่การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ไม่ได้หมายความว่านักเรียนนายเรือไม่จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน ในทางกลับกันครูผู้สอนควรตั้งวัตถุประสงค์ของการเรียนคือ นักเรียนจะต้องเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานอย่างถ่องแท้ ในขณะเดียวกัน นักเรียนควรได้รับการสอนให้สามารถใช้เครื่องมือต่าง ๆ ที่ทันสมัย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานได้จริง

เอกสารอ้างอิง

๑. การออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมเครื่องจักรกล ***วารสารโรงเรียนนายเรือ*** ปีที่ ๔ ฉบับที่ ๒

๒. Hess,R.A.; Malsbury, T.; and Atencio, A., Jr. *Flight Simulator Fidelity Assessment in a Rotorcraft Lateral Translation Maneuver*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 16, no. 1, January-February 1993, pp.79 - 85

๓. Matlab Homepage www.mathworks.com

๔. น.ต. สิทธิรักษ์ พรมณีย์ *โปรแกรมประยุกต์ Matlab* วารสารโรงเรียนนายเรือ ปีที่ ๒ ฉบับที่ ๒