

**ระบบเซนเซอร์ตรวจจับและแยกแยะความผิดปกติของแพนหางบังคับ
สำหรับอากาศยานไร้คนบินขนาดเล็ก**
**Sensor System of Control Surface Fault Detection and Identification
for Small UAV**

ภณัฏฐพร พนิตศรีสิทธิ์* และ อรรณพ เรืองวิเศษ

*ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงทุ่งครุ เขตบางมด กรุงเทพมหานคร 10140

E-mail: erng_mce@hotmail.com Tel: 084 072 6323

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงทุ่งครุ เขตบางมด กรุงเทพมหานคร 10140

E-mail: annop.rua@kmutt.ac.th Tel: 02 470 9117

บทคัดย่อ

ในบทความฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบเซนเซอร์สำหรับตรวจสอบและแยกแยะความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบแพนหางบังคับแนวระดับสำหรับเครื่องบินไร้คนบินขนาดเล็กขณะบิน ความผิดปกติของระบบแพนหางบังคับแนวระดับถูกพิจารณาแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ (1) เซอร์โวมอเตอร์หมุนติดขัด (2) คันชักส่งถ่ายแรงเสียหาย และ (3) การสูญเสียแพนหาง ระบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยเซนเซอร์ขนาดเล็ก 3 ชนิด คือ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า เซนเซอร์วัดมุมดัด และเซนเซอร์วัดแรง จากนั้นจึงทำการทดสอบเซนเซอร์เหล่านี้ในสภาวะปกติและสภาวะที่จำลองการเกิดความผิดปกติที่ส่วนต่างๆ ในระบบแพนหางบังคับแนวระดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถที่พอเพียงในการพัฒนาเพื่อตรวจจับและแยกแยะความผิดปกติอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำหลัก: อากาศยานไร้คนบิน, การตรวจจับและแยกแยะความผิดปกติ, แพนหางบังคับ

Abstract

This paper is the approach to construct the sensor system for detecting and identifying the fault of control surface of small UAV during the flight. The fault of elevator is considered in 3 types that is (1) the actuator failure, (2) the linkage failure, and (3) the surface disappearance. Developed sensor system consists of 3 kinds of compact sensors, i.e. the current sensor, the bending angle sensor, and the force sensor. The outputs of these sensors in normal and abnormal condition of each type of elevator failure are studied. The verification results demonstrate the sufficient capacity for the development to detect and identify fault effectively.

Keywords: UAV, fault detection and identification, control surface.

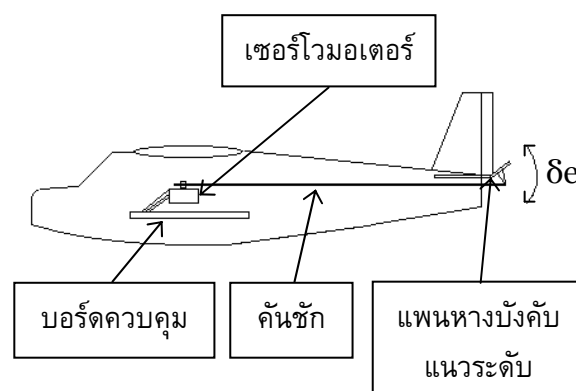
1. บทนำ

โดยทั่วไปอากาศยานไร้คนบิน(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) นิยมนำมาใช้ในงานสำรวจทางอากาศต่างๆ เพื่อลดภาระของคน หรือที่คนไม่สามารถเข้าไปสำรวจได้ ซึ่งในงานสำรวจต่างๆ อาจมีอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการรักษาความปลอดภัยในการบินให้กับอากาศยานไร้คนบิน เพราะในขณะที่บินอยู่อาจเกิดอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิดได้ เป็นเหตุให้อุปกรณ์ต่างๆ ทำงานผิดพลาดหรือส่วนประกอบของตัวอากาศยานเสียหาย ทำให้อากาศยานไร้คนบินไม่สามารถทำงานตามคำสั่งได้ ซึ่งจะส่งผลให้อากาศยานไร้คนบินเสียการทรงตัวในการบินจนตกได้ ดังนั้นหากสามารถรับรู้ได้ว่าอากาศยานไร้คนบินเกิดความผิดปกติ ก็จะสามารถแก้ไขเพื่อให้สามารถบินทำงานได้ต่อ [1] หรือถ้าหากไม่สามารถหลีกเลี่ยงการตกได้ก็จะลดแรงกระแทกจากการตกได้ ในอดีตระบบเซนเซอร์สำหรับตรวจจับความผิดพลาดในอากาศยานขนาดเล็กทำได้ยาก เนื่องจากปัญหาด้านน้ำหนัก และเนื้อที่ในการติดตั้งเซนเซอร์ [2] แต่ปัจจุบันเซนเซอร์ต่างๆ ได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะพิจารณาเลือกและทดสอบเซนเซอร์ต่างๆ เพื่อนำมาประกอบเป็นระบบตรวจจับและแยกแยะความผิดพลาด (FDI: Fault Detection and Identification system) ที่จะเพิ่มความปลอดภัยในการบินของอากาศยานไร้คนบิน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาด้านแบบเป็นอากาศยานไร้คนบินรูปแบบเครื่องบิน

งานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการพัฒนาระบบเซนเซอร์ FDI ของระบบแพนหางบังคับแนวนระดับ (elevator) ซึ่งใช้บังคับการก้มเงย (pitching) ของเครื่องบิน โดยบทความนี้จะนำเสนอเซนเซอร์ที่เลือกมาใช้ และผลการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์แต่ละชนิด เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาประกอบรวมกันเป็นระบบที่สามารถตรวจสอบการเกิดความผิดพลาด และแยกแยะระบุส่วนประกอบที่เกิดความผิดพลาดของระบบแพนหางบังคับแนวนระดับได้

2. การทำงานของแพนหางบังคับแนวนระดับ

การทำงานของแพนหางบังคับแนวนระดับดังรูปที่ 1 เริ่มจากเซอร์โวมอเตอร์ (servo motor) รับสัญญาณสั่งงานมุมการหมุนเป็นสัญญาณพัลส์ (PWM: Pulse Width Modulation) จากบอร์ดควบคุมให้หมุนตั้งหรือผลัkcันชัก (linkage) ที่ต่ออยู่กับแพนหางบังคับแนวนระดับ ทำให้แพนหางบังคับแนวนระดับบิดไปยังมุมที่ต้องการ



รูปที่ 1 ระบบแพนหางบังคับแนวนระดับ

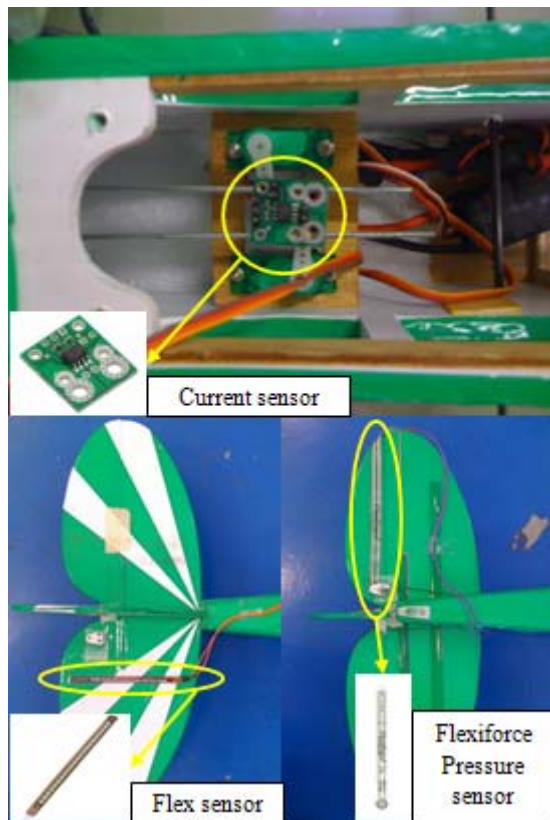
3. ระบบเซนเซอร์ FDI

แนวทางการตรวจจับความผิดพลาดด้วยเซนเซอร์คือการประมวลผลในบอร์ดควบคุมจะสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากเซนเซอร์ ถ้าหากมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ผิดไปจากสภาวะปกติแสดงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ จากนั้นจะแยกแยะว่าความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ส่วนใด โดยประมวลผลว่ามีเซนเซอร์ใดบ้างที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสัญญาณผิดปกติ

ในงานวิจัยนี้พิจารณาความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นที่ระบบแพนหางบังคับแนวนระดับออกเป็น 3 ชนิดตามส่วนประกอบของระบบ คือ (1) การติดขัดหรือเสียหายของเซอร์โวมอเตอร์ (2) การโก่งงอ หลุด หรือขาดของคั่นชัก และ (3) การหักสูญเสียแพนหางบังคับแนวนระดับ

ดังนั้นจึงเลือกใช้เซนเซอร์ 3 ชนิดคือ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า เซนเซอร์วัดมุมดัด และเซนเซอร์วัดแรง นำมาประกอบเป็นระบบ FDI ดังในรูปที่ 2 โดยการ

พิจารณาเลือกเซนเซอร์มาใช้ในการตรวจจับและ
แยกแยะความผิดพลาดมีแนวคิดดังนี้



รูปที่ 2 ระบบเซนเซอร์ FDI

3.1 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

เมื่อเซอร์โวมอเตอร์หมุนติดขัดจะเกิดการใช้
กระแสไฟฟ้าสูงกว่าปกติ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้
เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ารุ่น ACS 714 ซึ่งสามารถ
ตรวจจับกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง ± 5 A มีความผิดพลาด
ของสัญญาณน้อยกว่า 1.5% นำมาติดตั้งแบบอนุกรม
ในสายที่จ่ายไฟให้เซอร์โวมอเตอร์ เพื่อตรวจจับการใช้
กระแสไฟฟ้าที่ไม่ปกติของเซอร์โวมอเตอร์

3.2 เซนเซอร์วัดมุมดัด

เพื่อที่จะวัดว่าแพนหางบังคับแนวระดับบิดไปยัง
มุมที่ต้องการตามคำสั่ง จึงเลือกใช้เซนเซอร์วัดมุมดัด
รุ่น Flex Sensor [3] ขนาด 4.5" ซึ่งเป็นเซนเซอร์แบบ
piezoresistive ที่ความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไป
ตามมุมที่เซนเซอร์ถูกดัดงอ มีความน่าเชื่อถือและ
ความแม่นยำในการทำซ้ำสูง เซนเซอร์นี้ถูกติดตั้งจาก

กับแกนการหมุนของแพนหางบังคับแนวระดับ ให้
เซนเซอร์ถูกดัด ไปพร้อมกับการบิดเปลี่ยนมุมของ
แพนหางบังคับแนวระดับ

3.3 เซนเซอร์วัดแรง

เมื่อเซอร์โวมอเตอร์หมุนติ้วหรือผลักรันแรงจะ
ถูกส่งผ่านไปยังก้านโยก (horn) ที่แพนหางบังคับแนว
ระดับทำให้บิดไปยังมุมที่ต้องการ ดังนั้นถ้าหากคันชัก
หลุด หัก หรือโก่งงอแล้ว แรงที่ก้านโยกจะผิดไปจาก
สภาวะปกติ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เซนเซอร์วัดแรงรุ่น
Flexiforce Pressure Sensor - 1lb ซึ่งเป็นเซนเซอร์
แบบ piezoresistive ที่ความต้านทานจะเปลี่ยนแปลง
ไปตามแรงที่กดลงมาบนเซนเซอร์ สามารถวัดแรงได้
สูงสุด 1 lb (454.5 g) ความผิดพลาด $\pm 3\%$
ความคลาดเคลื่อนในการทำซ้ำ $\pm 2.5\%$ และใช้เวลา
น้อยกว่า 5 μsec ในการตอบสนองต่อแรงที่กระทำ
เซนเซอร์นี้ถูกนำมาติดตั้งใต้แผ่นฐานของก้านโยก
เพื่อวัดแรงที่ถูกส่งผ่านมามัดแพนหางบังคับแนวระดับ

3.4 บอร์ดควบคุม

เซนเซอร์ที่เลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ให้สัญญาณ
ออกแบบอนาล็อก (analog) สัญญาณจากเซนเซอร์
ทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) และ
ประมวลผลโดยบอร์ดควบคุม ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นเป็น
ต้นแบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 มี
ความละเอียดในการแปลงสัญญาณ A/D 10 bit

3.5 การแยกแยะความผิดพลาด

เมื่อส่วนประกอบในระบบแพนหางบังคับแนว
ระดับมีความผิดพลาดอย่างใดอย่างหนึ่งเกิดขึ้น แล้ว
การเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ผิดปกติจะทำให้สามารถ
ตรวจจับการเกิดความผิดพลาดได้ แต่ความผิดพลาด
ที่ส่วนประกอบหนึ่งจะทำให้เซนเซอร์มากกว่าหนึ่ง
ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ผิดปกติ ดังนั้น
การแยกแยะส่วนประกอบที่เกิดความผิดพลาดจึงจะใช้
การพิจารณารูปแบบของชนิดของเซนเซอร์ที่เกิดการ

เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ผิดปกติดังตารางที่ 1 ในการ
ระบุส่วนประกอบที่เกิดความผิดพลาด
ตารางที่ 1 รูปแบบในการแยกแยะความผิดพลาด

เซนเซอร์	ส่วนประกอบที่เกิดความผิดพลาด		
	เซอร์โวมอเตอร์	คันชัก	แพนหาง บังคับแนว ระดับ
กระแสไฟฟ้า	X	O	O
มุมดัด	X	X	O
แรง	X	X	X

X : ไม่ปกติ O : ปกติ

4. การทดสอบระบบเซนเซอร์ FDI

การทดสอบระบบ FDI จะต้องมีการจำลองความผิดพลาดต่างๆ ให้เกิดขึ้นระหว่างการบินทำให้อาจมีความเสี่ยงต่อการตก ดังนั้นในบทความนี้ซึ่งเป็นขั้นตอนเริ่มต้นการพัฒนาจึงได้เริ่มจากการทดสอบภาคพื้นดิน เพื่อสังเกตและรวบรวมข้อมูลลักษณะสัญญาณของเซนเซอร์แต่ละชนิด และทำการทดสอบในอุโมงค์ลมแทนการบินทดสอบก่อนที่จะนำไปบินทดสอบต่อไป

อุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอุโมงค์ลมแบบเปิด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 m และความเร็วลมสูงสุด 8 m/s เครื่องบินต้นแบบที่ใช้ทดลองจะถูกติดตั้งที่แท่นทดสอบให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของอุโมงค์ลมดังรูปที่ 3 โดยที่สามารถสั่งงานให้แพนหางบังคับแนวระดับบิดขึ้นและลงได้

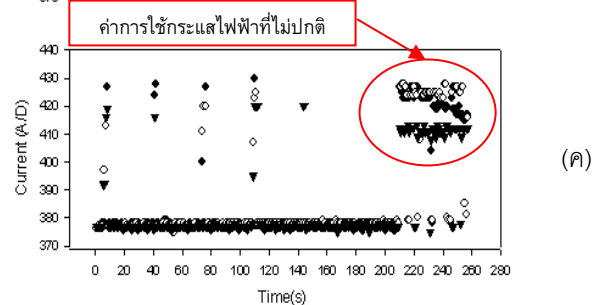
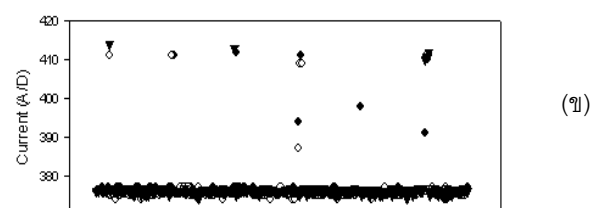
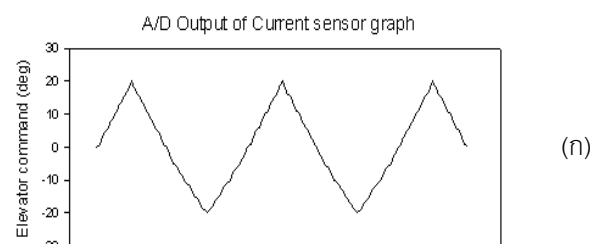


รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องบินต้นแบบในอุโมงค์ลม

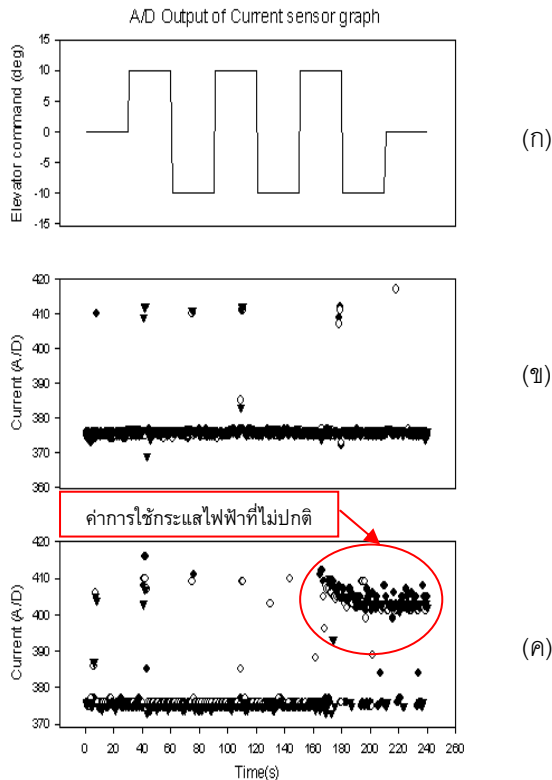
5. ผลการทดสอบ

5.1 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของเซอร์โวมอเตอร์ในสภาวะปกติและในสภาวะที่เซอร์โวมอเตอร์หมุนติดขัด ขณะสั่งงานมุมของแพนหางบังคับแนวระดับให้บิดเปลี่ยนมุมด้วยสัญญาณสั่งงานลักษณะแบบสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4 (ก) และแบบขึ้นดังรูปที่ 5 (ก) ลักษณะสัญญาณออกของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของเซอร์โวมอเตอร์ในสภาวะปกติจะมีลักษณะคงที่ดังรูปที่ 4 (ข) และ 5 (ข) อาจจะมีค่าที่แตกต่างบ้างบางขณะเนื่องจากสัญญาณรบกวน แต่เมื่อเซอร์โวมอเตอร์มีการหมุนติดขัดเกิดขึ้นจะมีการใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่าปกติทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงเวลายาวต่อเนื่องดังรูปที่ 4 (ค) และ 5 (ค)

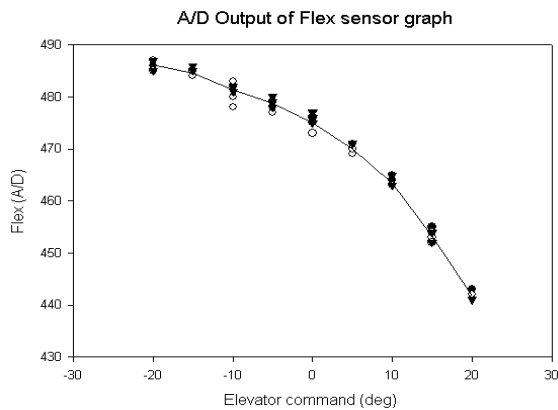


รูปที่ 4 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า
ด้วยสัญญาณสั่งงานแบบสามเหลี่ยม



รูปที่ 5 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า
ด้วยสัญญาณสั่งงานแบบขั้น

5.2 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดมุมดัด

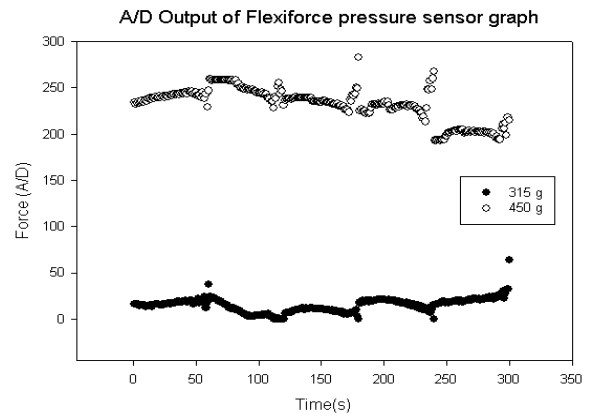


รูปที่ 6 ค่าของเซนเซอร์วัดมุมดัดสัมพันธ์กับ
มุมบิดต่างๆ ของแพนหางบังคับแนวระดับ

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบเซนเซอร์วัดมุมดัด
ขณะบังคับแพนหางบังคับแนวระดับไปที่มุมต่างๆ จะ
เห็นว่าค่าของเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับมุม
บิดของแพนหางโดยมีช่วงความเบี่ยงเบนที่ยอมรับได้
ในระบบ FDI หากค่าของเซนเซอร์ผิดจากค่าที่ควรจะเป็น
เป็นไปเกินกว่าช่วงความเบี่ยงเบนจะพิจารณาเป็นการ

ตรวจจับว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในการทำงานของ
ระบบแพนหางบังคับแนวระดับ

5.3 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรง

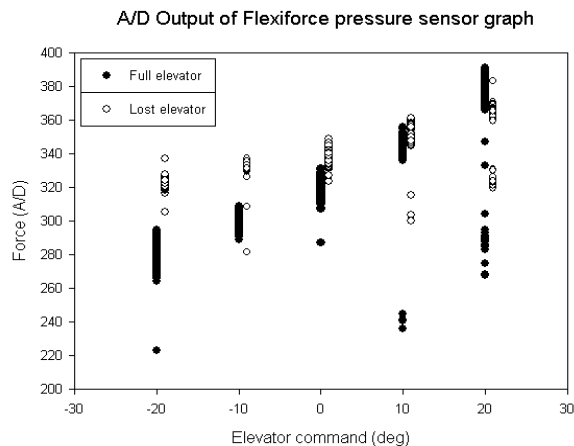


รูปที่ 7 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรง
ขณะมีภาระแรงกด 315 g และ 450 g

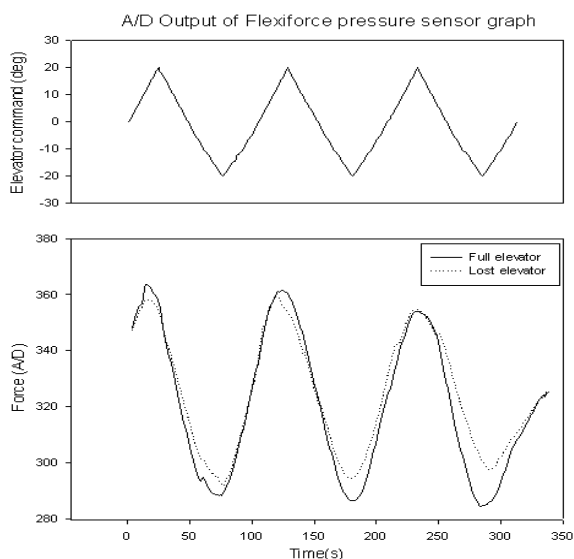
การทดสอบเซนเซอร์วัดแรงเริ่มจากการทดสอบ
การตอบสนองต่อภาระแรงกดคงที่ ทำให้ทราบว่า
เซนเซอร์จะเริ่มมีการตอบสนองเมื่อได้รับภาระแรงกด
315 g ขึ้นไปดังรูปที่ 7 และเนื่องจากเซนเซอร์รุ่น
Flexiforce Pressure Sensor - 1lb นี้สามารถรับแรง
กดสูงสุดได้ 1 lb (454.5 g) ดังนั้นจึงทำการเก็บค่า
ผลตอบสนองของเซนเซอร์เมื่อรับภาระแรง 450 g ซึ่ง
ค่าที่อ่านได้แสดงรวมไว้ในรูปที่ 7

จากที่พิจารณาการเกิดความเสียหายขณะบินที่
อาจก่อให้เกิดการสูญเสียส่วนหนึ่งของแพนหางบังคับ
แนวระดับ ซึ่งจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการบิดแพนหาง
บังคับแนวระดับเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติ
ดังนั้นการทดสอบขั้นต่อไปจึงได้ทำการทดลองสั่งงาน
แพนหางบังคับแนวระดับให้บิดไปยังมุมคงที่ค่าต่างๆ
ขณะที่มีลมที่สร้างจากอุโมงค์ลมเข้ามาปะทะเครื่องบิน
ด้วยความเร็วลม 8 m/s ในกรณีที่สภาวะแพนหาง
บังคับแนวระดับปกติไม่มีการเสียหายและสภาวะที่
สูญเสียไปเป็นพื้นที่ประมาณ 20 % ค่าผลตอบสนอง
ของเซนเซอร์วัดแรงขณะที่แพนหางบังคับแนวระดับ
บิดไปคงที่ที่มุมต่างๆ แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเห็นได้ว่า
ในช่วงที่บิดของแพนหางแนวระดับลงให้มุมบิดเป็นลบ

นั้น ค่าผลตอบแทนของเซนเซอร์วัดแรงกรณีที่มีการสูญเสียของแพนหางบังคับแนวระดับมีค่ามากขึ้นกว่าสภาวะปกติ และในช่วงที่บิดแพนหางบังคับแนวระดับขึ้นให้มุมบิดเป็นบวกนั้น ค่าผลตอบแทนของเซนเซอร์วัดแรงกรณีที่มีการสูญเสียของแพนหางบังคับแนวระดับมีค่าน้อยลงกว่าสภาวะปกติ



รูปที่ 8 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงที่มุมบิดคองที่ค่าต่างๆ ของแพนหางบังคับแนวระดับ



รูปที่ 9 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงด้วยสัญญาณสั่งงานแบบสามเหลี่ยม

ต่อจากนั้นทำการทดสอบสภาวะปกติและสภาวะที่มีการสูญเสียแพนหางบังคับแนวระดับจำลองการเกิดการสูญเสียระหว่างการบังคับ โดยใช้สัญญาณสั่งงานเปลี่ยนแปลงมุมบิดของแพนหางบังคับแนวระดับเป็น

สัญญาณลักษณะแบบสามเหลี่ยม ค่าผลตอบแทนของเซนเซอร์วัดแรงแสดงในรูปที่ 9 จะเห็นว่าค่าผลตอบแทนของเซนเซอร์วัดแรงในช่วงที่แพนหางบังคับแนวระดับมีมุมบิดประมาณ -20 deg ความแตกต่างของค่าในสภาวะปกติกับสภาวะที่มีความเสียหายจะเห็นได้ชัดเจน แต่จะมีความแตกต่างที่น้อยลงในช่วงมุมบิดประมาณ 20 deg

6. สรุป

เป้าหมายสุดท้ายของการวิจัยนี้คือการสร้างระบบเซนเซอร์สำหรับตรวจจับและแยกแยะความผิดพลาดของเครื่องบินไร้คนบังคับขนาดเล็ก ซึ่งบทความนี้ได้นำเสนอต้นแบบของระบบเซนเซอร์ขนาดเล็กสำหรับตรวจจับและแยกแยะความผิดพลาดในระบบแพนหางบังคับแนวระดับ โดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานของเซอร์โวมอเตอร์ วัดมุมบิดของแพนหาง และวัดแรงที่ใช้บิดแพนหาง จากการทดสอบการทำงานเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าระบบเซนเซอร์นี้มีความสามารถเพียงพอในการนำมาประกอบรวมกันพัฒนาเป็นระบบ FDI และการวิจัยต่อไปในอนาคตจะพิจารณาและทำการทดสอบความผิดพลาดที่ซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้ได้ระบบเซนเซอร์ FDI ที่มีประสิทธิภาพ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Zhang, M.M. Polycarpou, R. Xu and C. Kwan, "Actuator Fault Diagnosis and Accommodation for Improved Flight Safety", *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp.640-645, 2005.
- [2] B. Denis, Z. Ali, C. Jerome and G. Philippe, "Fault Detection and Isolation for Redundant Aircraft Sensors", *Conference on Control and Fault Tolerant Systems*, pp.137-142, 2010.
- [3] Flex and Flexiforce Web Site, "<http://www.tekscan.com/>"