การวัดแรงยกและการจำลองการเคลื่อนที่แนวดิ่งแบบเบื้องต้นของหุ่นกระพือปีก

Lift Measurement and Basic Vertical Motion Simulation of Flapping Wing Robot

อรรณพ เรืองวิเศษ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-2470-9117 โทรสาร 0-2470-9111 E-mail: annop.rua@kmutt.ac.th

Annop RUANGWISET
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Pracha-u-tid Rd. Bangmod Tungkru Bangkok 10140 Thailand
Tel 0-2470-9117 Fax 0-2470-9111 E-mail: annop.rua@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาอากาศยานไร้นักบินขนาดเล็กแบบกระพือปีก แต่การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนทางกลขนาดเล็กทำได้ยากและมีราคาแพง ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการศึกษาโดยใช้หุ่นต้นแบบที่เคลื่อนที่ในน้ำด้วยการกระพือปีกแทน เนื่องจากแรงลอยตัวของน้ำจะช่วยพยุงน้ำหนักของหุ่น ทำให้สามารถสร้างหุ่นต้นแบบโดยใช้อุปกรณ์ทั่วไปได้ ในบทความนี้จะแสดงผลการวัดแรงยกจากการกระพือปีกในน้ำเพื่อเก็บข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหุ่นต้นแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระพือปีกขึ้นด้วยความถี่ที่เร็วกว่าการกระพือลงจะทำให้เกิดแรงยกเฉลี่ยในทิศที่จะพยุงน้ำหนักหุ่นได้ นอกจากนี้ยังได้แสดงวิธีการนำผลการวัดแรงยกที่ได้มาใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของหุ่นต้นแบบ เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นกระพือปีก

Abstract

This research is a part of flapping wing micro air vehicle development project. But the fabrication of small electronic and mechanical part is difficult and expensive. So we decided to use a prototype of flapping robot which move in water. Because the buoyancy force of water will aid in supporting the weight of robot, thereby the prototype robot can be built with off-the-shelf items. In this paper, the results of the experimental measurement of the lift produced from a wing flapped in water are presented. The results show that the averaged lift for counteracting the weight can be produced by flapping up with higher frequency than flapping down. Moreover, the application of these results in vertical motion simulation is presented as the basic of flapping robot simulator development.

1. บทนำ

งานวิจัยด้านอากาศยานไร้นักบิน (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) ในปัจจุบันได้พัฒนาไปสู่การสร้างอากาศยานไร้นักบินที่มีขนาดเล็กมาก (Micro Air Vehicle : MAV) ซึ่งอากาศยานชนิดนี้จะมีขนาดทุกด้านเล็กกว่า 15 cm ดังนั้นการบินของ MAV จึงอยู่ในช่วงที่เลขเรย์โนลด์ (Renolds Number) ต่ำมาก ถึงแม้ว่าอากาศยานที่ชื่อ Black Widow [1] จะเป็น MAV รูปแบบเครื่องบินปีกยึด (fixed wing airplane) ที่ได้รับการยอมรับมากก็ตาม แต่หลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ในช่วงที่เลขเรย์โนลด์ต่ำมากนั้นยังพัฒนาไปไม่สมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยด้าน MAV จึงมีอีกแนวทางหนึ่งที่จะเลียนแบบการบินแบบกระพือปีก (flapping wing) ของนกหรือแมลงขนาดเล็ก ที่ผ่านมามีการวิจัยเพื่ออธิบายอากาศพลศาสตร์ในการกระพือปีก [2] แต่การสร้างอากาศยานกระพือปีกขนาดเล็กจะต้องมีการพัฒนาในด้านการสร้างอุปกรณ์ทางกลและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กไปควบคู่กัน [3, 4] ทำให้ต้องใช้เวลาและทุนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องประยุกต์และปรับเปลี่ยนวิธีการในการวิจัยเกี่ยวกับอากาศยานกระพือปีกให้เหมาะสมกับระดับความเป็นไปได้ในห้องปฏิบัติการของเรา การใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นวิธีที่ช่วยประหยัดเวลาในการพัฒนา [5] แต่ก็จะต้องมีการคำนวณหรือเก็บข้อมูลแรงที่เกิดจากการกระพือปีกเพื่อนำไปใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ [6]

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาของเราที่เกี่ยวกับการกระพือปีกได้ทดลองออกแบบหุ่นกระพือปีกต้นแบบ และใช้โปรแกรม CFX ในการวิเคราะห์แรงและโมเมนต์ที่เกิดจากการกระพือปีกในแบบต่างๆ [7] แต่ก็มีข้อจำกัดของโปรแกรมในการคำนวณแรงและโมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์ของปีกที่มีการขยับอยู่ตลอดเวลา และไม่สามารถนำผลมาใช้ร่วมกับการคำนวณการเคลื่อนที่ได้ในทันที

งานวิจัยในขั้นต่อไปมีจุดมุ่งหมายที่จะสร้างหุ่นต้นแบบที่เคลื่อนที่ด้วยการกระพือปีก แต่เนื่องจากแรงที่เกิดจากการกระพือปีกในอากาศมี

ขนาดน้อยมาก ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างหุ่นต้นแบบต้องเบาและมีขนาดเล็กกว่าปกติซึ่งจะมีราคาแพงมาก ดังนั้นเราจึงได้ปรับแนวทางการวิจัยหันมาใช้ของไหลเป็นน้ำแทนอากาศ เนื่องจากน้ำมีความหนาแน่นและความหนืดมากกว่าอากาศอีกทั้งยังมีแรงลอยตัวของน้ำทำให้ช่วยลดภาระด้านน้ำหนักของหุ่นต้นแบบ และแรงที่เกิดจากการกระพือปีกในน้ำมีขนาดมากพอที่จะวัดได้ง่ายกว่า นอกจากนี้หากสามารถสร้างหุ่นต้นแบบที่เคลื่อนที่ด้วยการกระพือปีกในน้ำได้จะยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำงานใต้น้ำได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างต้นแบบปีกกระพือในน้ำหนึ่งปีกขึ้นมาเป็นอุปกรณ์ทดลองเพื่อเก็บข้อมูลแรงจากการกระพือปีกแทนการคำนวณ บทความนี้จะแสดงผลการทดลองเก็บข้อมูลแรงจากการกระพือในลักษณะที่ความถี่ในการกระพือขึ้นและลงเท่ากัน และการกระพือในลักษณะที่ความถี่ในการกระพือขึ้นและลงไม่เท่ากัน โดยที่มีการปรับเปลี่ยนมุมบิด (feathering angle) ของปีกในระหว่างกระพือ จากนั้นจะแสดงการนำผลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นต้นแบบ แต่เนื่องจากการวัดแรงได้ทำไปเฉพาะการวัดแรงยกเท่านั้น ขอบเขตของงานวิจัยนี้จึงยังเป็นการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวดิ่งเท่านั้น

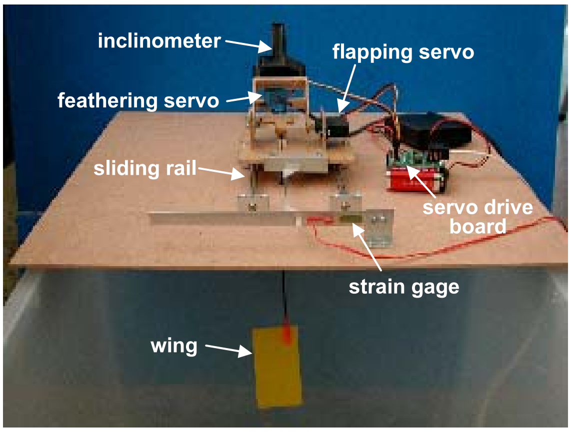
2. การวัดแรงที่เกิดจากการกระพือปีก

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

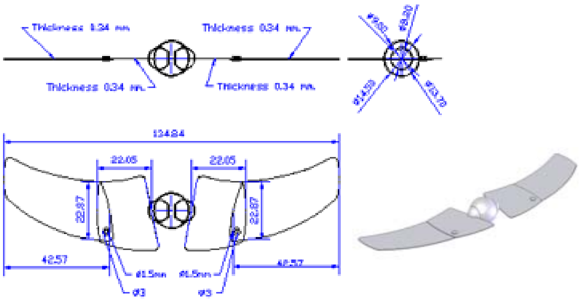
จากลักษณะโครงสร้างของปีกและการบินของนก การกระพือปีกจะประกอบด้วย 4 องศาอิสระ คือ

1) การกระพือ (flapping) เป็นการขยับปีกขึ้นและลงในแนวดิ่ง
2) การบิด (feathering) เป็นการหมุนปีกรอบแกนตามแนวความยาวของปีกเพื่อเปลี่ยนแปลงมุมปะทะ (angle of attack)
3) การขยับหน้าหลัง (leading or lagging) เป็นการหมุนปีกไปทางด้านหน้าหรือหลัง
4) การยืด (spanning) เป็นการยืดหรือหุบปีกเพื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของปีก

งานวิจัยในครั้งนี้เน้นการศึกษาขนาดของแรงยกเพื่อพยุงน้ำหนักของหุ่น ดังนั้นปีกต้นแบบที่ใช้ในการทดลองจึงกำหนดให้มีองศาอิสระเพียงการกระพือและการบิด อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดแรงยกจะมีลักษณะเป็นปีกหนึ่งปีกดังแสดงในรูปที่ 1 ปีกนี้ขยับได้ด้วยเซอร์โวมอเตอร์สองตัวทำให้สามารถบังคับการกระพือและการบิดได้อย่างอิสระต่อกัน ขนาดของปีกอ้างอิงตามขนาดของหุ่นต้นแบบในรูปที่ 2 ซึ่งออกแบบไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ปรับให้มีรูปร่างง่ายขึ้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 4 cm ยาว 7 cm ทำจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 1 mm ขณะทดลองปีกจะจมอยู่ในน้ำที่ไม่มีการไหล คำสั่งมุมกระพือและมุมบิดของปีกจะถูกส่งมาจากคอมพิวเตอร์ มุมกระพือของปีกตรวจสอบโดยเก็บข้อมูลจาก inclinometer เพื่อนำผลมาพิจารณาว่าช่วงใดเป็นการกระพือขึ้นหรือการกระพือลง แต่ยังไม่มีการป้อนกลับควบคุมมุมกระพือและมุมบิด ดังนั้นเมื่อมีแรงจากน้ำกระทำที่ปีกแล้วมุมกระพือและมุมบิดที่เกิดขึ้นจริงอาจคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งยังเป็นข้อด้อยของอุปกรณ์ทดลองที่สร้างขึ้น แรงยกที่เกิดขึ้นระหว่างการกระพือวัดได้โดยประยุกต์ใช้ strain gage สัญญาณจะถูกส่งมาประมวลผลและบันทึกในคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูล



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลองวัดแรงยกจากการกระพือปีก



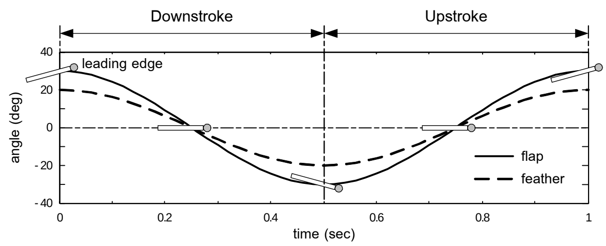
รูปที่ 2 หุ่นกระพือปีกต้นแบบ [7]

3.1 ผลการทดลองวัดแรงยก

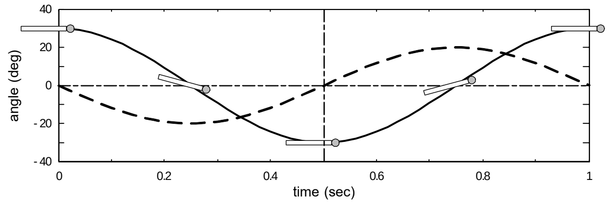
การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาลักษณะการกระพือปีกเพื่อให้เกิดแรงยกในการพยุงน้ำหนักตัว ดังนั้นจึงทำการทดลองวัดแรงยกที่เกิดจากการกระพือใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะการกระพือขึ้นและลงด้วยความถี่เท่ากัน และลักษณะการกระพือขึ้นและลงด้วยความถี่ต่างกัน

<u>3.1.1 แรงยกจากการกระพือขึ้นและกระพือลงด้วยความถี่เท่ากัน</u>

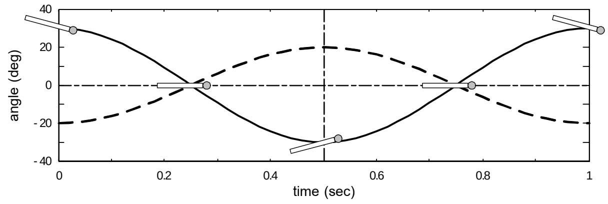
ตัวอย่างการกระพือและการบิดปีกในลักษณะนี้แสดงดังรูปที่ 3 สี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูปแสดงการบิดของปีกโดยวงกลมคือขอบหน้าของปีก ความถี่ของการกระพือที่ใช้ในการทดลองมี 3 ค่าคือ 1.0 Hz 1.5 Hz และ 2.0 Hz โดยที่แอมปลิจูดของมุมกระพือเป็น 30 deg สำหรับทุกความถี่ที่ทำการทดลอง ส่วนการบิดปีกทำด้วยความถี่เท่ากับการกระพือ โดยที่แอมปลิจูดของมุมบิดเป็น 20 deg แต่ทำการทดลองเปลี่ยนเฟสของการบิดให้ต่างกับเฟสของการกระพือ 4 กรณีคือ 0 deg 90 deg 180 deg และ 270 deg



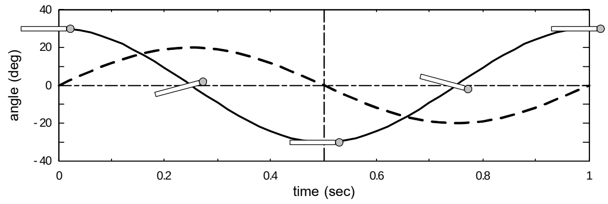
(a) เฟสแตกต่าง 0 deg



(b) เฟสแตกต่าง 90 deg



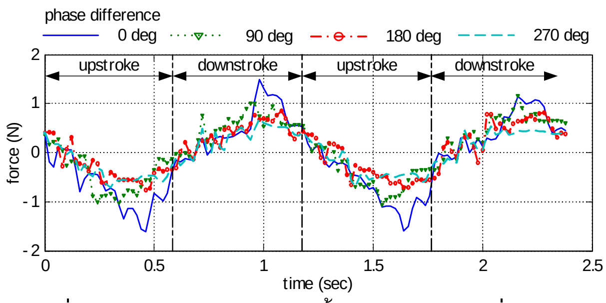
(c) เฟสแตกต่าง 180 deg



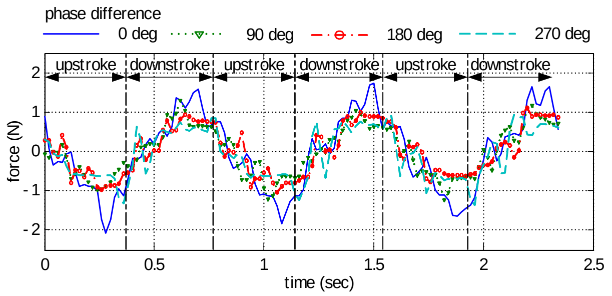
(d) เฟสแตกต่าง 270 deg

รูปที่ 3 ตัวอย่างการกระพือและบิดปีกขึ้นและลงด้วยความถี่เท่ากัน

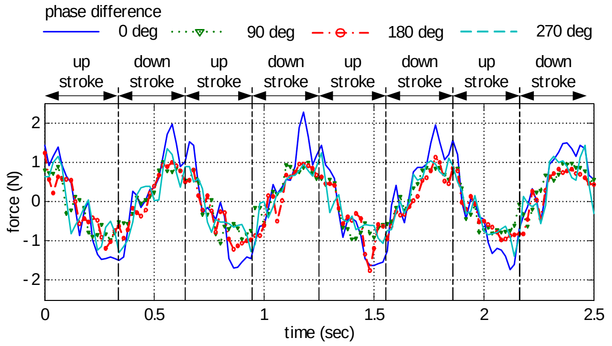
ผลการทดลองวัดแรงยกจากการกระพือปีกในลักษณะนี้แสดงใน รูปที่ 4 – 6 และเมื่อคำนวณแรงยกเฉลี่ยในการกระพือปีก 1 คาบได้ผลดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 แรงยกจากการกระพือปีกขึ้นและลงด้วยความถี่ 1.0 Hz



รูปที่ 5 แรงยกจากการกระพือปีกขึ้นและลงด้วยความถี่ 1.5 Hz



รูปที่ 6 แรงยกจากการกระพือปีกขึ้นและลงด้วยความถี่ 2.0 Hz

ตารางที่ 1 แรงเฉลี่ยใน 1 คาบเมื่อกระพือปีกขึ้นลงด้วยความถี่เท่ากัน

เฟส (deg)	แรงเฉลี่ยในการกระพือปีก 1 คาบ (N)		
	1.0 Hz	2.0 Hz	3.0 Hz
0	-0.0828	-0.0197	0.0417
90	0.0561	0.0083	0.0148
180	0.0426	0.0264	-0.0571
270	-0.0196	-0.0417	0.0063

จากผลการทดลองกระพือปีกในน้ำนิ่งโดยที่ความถี่ในการกระพือขึ้นและลงเท่ากันในรูปที่ 4 – 6 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างการกระพือและการบิด แรงยกที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันนัก โดยแรงยกในกรณีที่เฟสแตกต่าง 0 deg จะมีแรงยกเกิดขึ้นมากที่สุดสำหรับทุกความถี่ของการกระพือที่ทำการทดลอง ลักษณะกราฟของแรงยกที่เกิดขึ้นจะสมมาตรกันโดยประมาณทางด้านบวกและลบ ดังผลการคำนวณแรงยกเฉลี่ยในการกระพือปีก 1 คาบที่แสดงในตารางที่ 1 แรงยกเฉลี่ยจะมีค่าประมาณศูนย์ในทุกกรณี ซึ่งแสดงว่าการกระพือปีกขึ้นและลงด้วยความถี่เท่ากันจะไม่เกิดแรงยกที่จะพยุงน้ำหนักไว้ได้

เมื่อพิจารณากราฟของแรงยกจะเห็นว่าแรงยกจะค่อย ๆเพิ่มขึ้นเมื่อปีกกระพือลง ตรงกันข้ามกันแรงยกจะค่อย ๆลดลงเมื่อปีกกระพือขึ้น ซึ่งแรงยกที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากแรงต้านที่ของไหลกระทำกับปีกขณะกระพือ ดังนั้นการที่จะเพิ่มแรงยกเพื่อพยุงน้ำหนักจึงควรกระพือปีกลงในช่วงเวลานาน และกระพือขึ้นอย่างเร็วให้ช่วงเวลาในการกระพือขึ้นสั้นกว่าช่วงเวลาในการกระพือลง นอกจากนั้นในขณะที่กระพือขึ้นควรจะบิดปีกให้อยู่ในมุมที่เกิดแรงกระทำต่อปีกน้อยที่สุด การทดลองต่อไปจึงใช้ลักษณะการกระพือที่ความถี่ในการกระพือขึ้นมากกว่าความถี่ใน

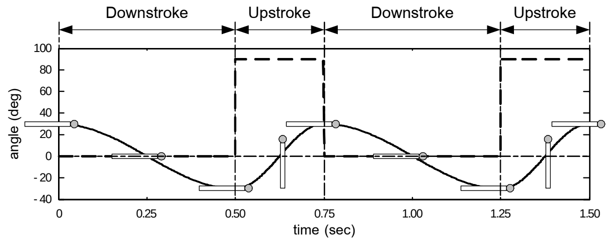
การกระพือลง และบิดปีกให้ตั้งขึ้นขณะกระพือขึ้นเพื่อให้เกิดแรงต้านน้อยที่สุด

<u>3.1.2 แรงยกจากการกระพือขึ้นด้วยความถี่มากกว่ากระพือลง</u>

ตัวอย่างการกระพือและการบิดปีกในลักษณะนี้แสดงดังรูปที่ 4 ความถี่ของการกระพือที่ใช้ในการทดลองมี 6 กรณีดังนี้

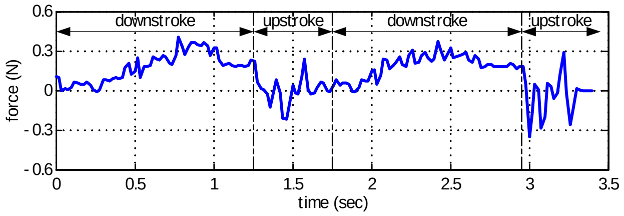
- กระพือลงด้วยความถี่ 0.5 Hz กระพือขึ้นด้วยความถี่ต่างกัน 3 กรณีคือ 1.0 Hz 1.5 Hz และ 2.0 Hz
- กระพือลงด้วยความถี่ 1.0 Hz กระพือขึ้นด้วยความถี่ต่างกัน 2 กรณีคือ 1.5 Hz และ 2.0 Hz
- กระพือลงด้วยความถี่ 1.5 Hz กระพือขึ้นด้วยความถี่ 2.0 Hz

ส่วนการบิดปีกกำหนดให้มุมบิดขณะกระพือลงคงที่เป็น 0 deg และมุมบิดขณะกระพือขึ้นคงที่เป็น 90 deg

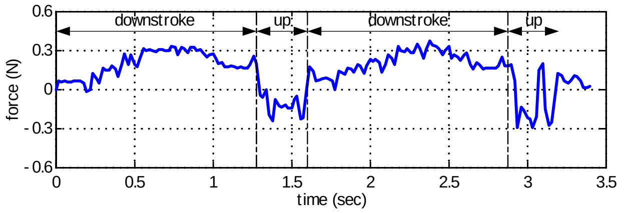


รูปที่ 8 ตัวอย่างการกระพือปีกขึ้นและลงด้วยความถี่ต่างกัน

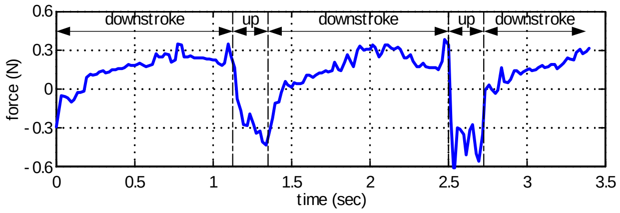
ผลการทดลองวัดแรงยกจากการกระพือปีกในลักษณะนี้แสดงในรูปที่ 9 – 14 และเมื่อคำนวณแรงยกเฉลี่ยในการกระพือปีก 1 คาบ ได้ผลดังตารางที่ 2



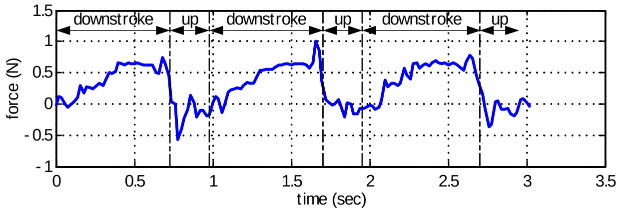
รูปที่ 9 แรงยกจากการกระพือลง 0.5 Hz กระพือขึ้น 1.0 Hz



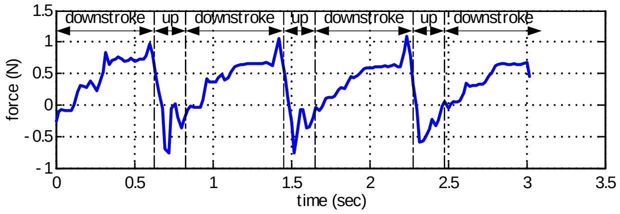
รูปที่ 10 แรงยกจากการกระพือลง 0.5 Hz กระพือขึ้น 1.5 Hz



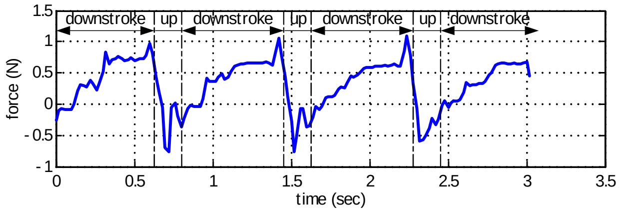
รูปที่ 11 แรงยกจากการกระพือลง 0.5 Hz กระพือขึ้น 2.0 Hz



รูปที่ 12 แรงยกจากการกระพือลง 1.0 Hz กระพือขึ้น 1.5 Hz



รูปที่ 13 แรงยกจากการกระพือลง 1.0 Hz กระพือขึ้น 2.0 Hz



รูปที่ 14 แรงยกจากการกระพือลง 1.5 Hz กระพือขึ้น 2.0 Hz

ตารางที่ 2 แรงเฉลี่ยใน 1 คาบเมื่อกระพือปีกขึ้นลงด้วยความถี่ต่างกัน

ความถี่ในการกระพือ		แรงเฉลี่ย
ลง (Hz)	ขึ้น (Hz)	ในการกระพือปีก 1 คาบ (N)
0.5	1.0	0.1426
	1.5	0.1413
	2.0	0.0964
1.0	1.5	0.2835
	2.0	0.2625
1.5	2.0	0.5118

จากผลการทดลองกระพือปีกในน้ำนิ่งโดยที่ความถี่ในการกระพือขึ้นและลงไม่เท่ากันในรูปที่ 9 – 14 จะเห็นว่ากราฟของแรงในช่วงกระพือปีกขึ้นจะประมาณศูนย์ เนื่องจากขณะกระพือขึ้นนั้นปีกจะตั้งขึ้นมีมุมบิดเป็น 90 deg แรงที่น้ำกระทำกับปีกในขณะกระพือขึ้นจึงมีขนาดน้อยมาก ส่วนแรงในช่วงกระพือปีกลงจะเป็นบวกเนื่องมาจากแรงต้านที่น้ำกระทำกับปีก ดังนั้นเมื่อคำนวณแรงเฉลี่ยใน 1 คาบแล้วจะได้แรงยก

เฉลี่ยเป็นบวกดังในตารางที่ 2 โดยที่ขนาดของแรงยกเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่ในการกระพือลงมากขึ้น ต่างจากกรณีที่ใช้ความถี่ในการกระพือลงเท่ากันนั้นความถี่ในการกระพือขึ้นจะไม่มีผลต่อขนาดของแรงยกเฉลี่ย แต่ในกรณีที่ 3 ซึ่งกระพือลงด้วยความถี่ 0.5 Hz และกระพือขึ้นด้วยความถี่ 2.0 Hz แรงเฉลี่ยมีค่าลดลงมาก คาดว่าเป็นเหตุมาจากความถี่ในการกระพือขึ้นและลงต่างกันมาก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลบริเวณปีกขณะที่เปลี่ยนทิศการกระพือรุนแรงกว่ากรณีอื่น ส่งผลให้แรงในขณะเปลี่ยนทิศการกระพือจากกระพือลงเป็นกระพือขึ้นมีค่าติดลบมากดังรูปที่ 11 แรงเฉลี่ยใน 1 คาบจึงมีค่าลดลง

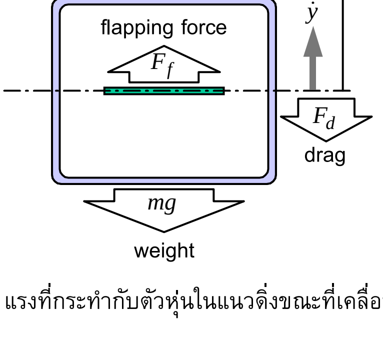
4. การคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นต้นแบบ

4.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่

จากผลการทดลองวัดแรงยกที่เกิดจากการกระพือปีกซึ่งทำในสภาวะที่ไม่มีการไหลของน้ำ การคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นต้นแบบในขั้นนี้จึงจำกัดขอบเขตไว้เพียงการพิจารณาแรงลัพธ์ในแนวดิ่งที่จะทำให้หุ่นเกิดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่งผลการคำนวณนี้จะใช้เป็นพื้นฐานในการกำหนดน้ำหนักของหุ่น และใช้ในการวิเคราะห์การบินลอยตัวอยู่กับที่ (hovering)

หุ่นต้นแบบในเบื้องต้นเน้นวัตถุประสงค์ที่จะศึกษากลไกการกระพือปีกและความสามารถในการเคลื่อนที่ การออกแบบจึงจะยังไม่คำนึงถึงลักษณะทางกลศาสตร์ของไหล แต่จะพยายามทำให้มีรูปร่างที่สามารถสร้างได้ง่าย อีกทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนปีกจะต้องสามารถหาได้ทั่วไปเพื่อประหยัดต้นทุนและเวลา ดังนั้นจึงได้ออกแบบให้ตัวหุ่นมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม การขับเคลื่อนปีกใช้เซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัวต่อ 1 ปีกสำหรับบังคับการกระพือและการบิดอย่างละตัว จากการประเมินขนาดของเซอร์โวมอเตอร์ แบตเตอรี่ บอร์ดควบคุมและชิ้นส่วนในการติดตั้งแล้วตัวหุ่นต้นแบบจะมีขนาดประมาณกว้าง 11 cm ยาว 15 cm สูง 12.5 cm น้ำหนักอุปกรณ์โดยรวมประมาณ 1 kg

เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำกับตัวหุ่นในแนวดิ่งขณะที่เคลื่อนที่ในน้ำจะประกอบด้วยน้ำหนักของหุ่น (mg) แรงลอยตัวของน้ำ (F_b) แรงต้าน (F_d) และแรงยกจากการกระพือปีก (F_f) ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 แรงที่กระทำกับตัวหุ่นในแนวดิ่งขณะที่เคลื่อนที่ในน้ำ

เมื่อให้แกน y เป็นแกนอ้างอิงในแนวดิ่งที่มีทิศชี้ขึ้นดังในรูปที่ 16 จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นในแกน y ได้เป็น

$$\begin{aligned} F_f + F_b - F_d - mg &= m\ddot{y} \\ F_f + \rho_w V_{body} g - F_d - mg &= m\ddot{y} \end{aligned} \qquad (1)$$

โดยที่ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ V_{body} คือปริมาตรของตัวหุ่น

สมมติให้แรงต้านที่กระทำกับหุ่นขณะเคลื่อนที่มีอิทธิพลส่วนใหญ่มาจากความดันของของไหล (pressure drag) และสามารถคำนวณอ้างอิงได้จากการไหลผ่านแผ่นสี่เหลี่ยม จะสามารถเขียนสมการที่ (1) ใหม่ได้เป็น

$$F_f + \rho_w V_{body} g - \mathrm{sgn}(\dot{y}) \cdot \tfrac{1}{2} \rho_w (\dot{y})^2 S C_d - mg = m\ddot{y} \qquad (2)$$

โดยที่ S คือพื้นที่หน้าตัดของตัวหุ่น C_d คือสัมประสิทธิ์แรงต้าน $\mathrm{sgn}(\dot{y})$ คือเครื่องหมายของความเร็วในการเคลื่อนที่ เนื่องจากหุ่นจะเคลื่อนที่ขึ้นลงและแรงต้านจะกระทำในทิศตรงกันข้ามกับความเร็วแต่พจน์ของความเร็ว ($\dot{y}$) ในสมการเป็นพจน์กำลังสองจึงต้องใส่พจน์แสดงเครื่องหมายต่างหาก

แรงยกจากการกระพือปีก (F_f) สามารถแทนค่าในสมการได้โดยใช้ผลการทดลองวัดแรง

4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

อากาศยานที่เคลื่อนที่ในอากาศด้วยการกระพือปีกจะเป็นอากาศยานประเภทหนักกว่าอากาศ (heavier-than-air craft) ซึ่งจะไม่สามารถบินได้โดยปราศจากแรงยก เพื่อที่จะจำลองสภาวะนี้การทดลองหุ่นต้นแบบที่เคลื่อนที่ในน้ำโดยการกระพือปีกจึงกำหนดแนวทางไว้ว่าน้ำหนักของหุ่นจะต้องมากกว่าแรงลอยตัว คือหุ่นจะต้องกระพือปีกสร้างแรงยกจึงสามารถบินอยู่ในน้ำได้

จากขนาดของหุ่นต้นแบบที่ประเมินไว้จะมีแรงลอยตัวของน้ำ 20.23 N ซึ่งจะมากกว่าน้ำหนักอุปกรณ์ที่ประมาณไว้ ในการทดลองจึงจะต้องปรับเพิ่มน้ำหนักให้แก่ตัวหุ่น ดังนั้นน้ำหนักรวมของหุ่นที่ใช้คำนวณจำลองการเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ปรับน้ำหนักจนมีขนาดเท่ากับแรงลอยตัวของน้ำบวกกับอีกสองเท่าของแรงเฉลี่ยใน 1 คาบการกระพือแต่ละลักษณะ น้ำหนักของหุ่นจึงแสดงได้ดังสมการ

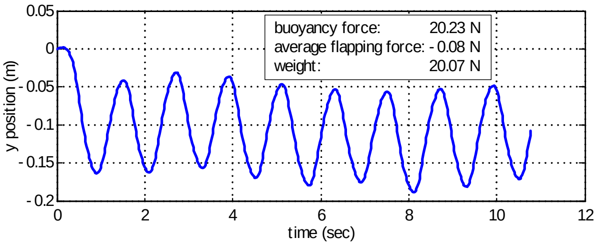
$$mg = F_b + 2 \cdot average(F_f) \qquad (3)$$

ในบทความนี้จะแสดงตัวอย่างผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหุ่นในแนวดิ่งเมื่อใช้การกระพือปีกที่ต่างกัน 2 กรณี คือ

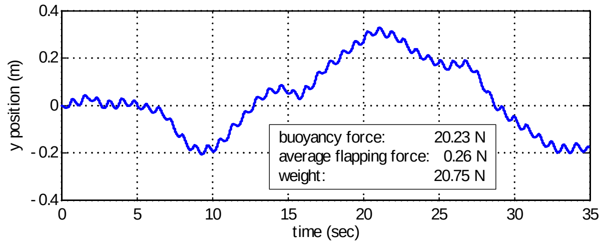
<u>กรณีที่ 1</u> กระพือปีกขึ้นและลงด้วยความถี่เท่ากัน 1.0 Hz การกระพือและการบิดมีเฟสแตกต่าง 0 deg ใช้ผลการวัดแรงยกที่แสดงในรูปที่ 4

<u>กรณีที่ 2</u> กระพือปีกลงด้วยความถี่ 1.0 Hz กระพือปีกขึ้นด้วยความถี่ 2.0 Hz ใช้ผลการวัดแรงยกที่แสดงในรูปที่ 13

การคำนวณทั้งสองกรณีกำหนดให้เริ่มจากสภาวะเริ่มต้นที่หุ่นอยู่นิ่งในน้ำ ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแสดงในรูปที่ 17 และ 18 ตามลำดับ



รูปที่ 17 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกรณีที่ 1 (กระพือขึ้นและลง 1.0 Hz)



รูปที่ 18 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกรณีที่ 2 (กระพือลง 1.0 Hz กระพือขึ้น 2.0 Hz)

จากผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทั้งสองกรณีจะเห็นว่าหุ่นสามารถพยุงตัวไว้ได้ที่ตำแหน่งหนึ่งโดยไม่จมน้ำ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตลอดเวลา เนื่องจากแรงยกที่เกิดจากการกระพือจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในกรณีที่ 1 เมื่อกระพือขึ้นและลงด้วยความถี่เท่ากันแรงยกเฉลี่ยจะเป็นศูนย์ ดังนั้นถ้าน้ำหนักหุ่นสมดุลกับแรงลอยตัวจะทำให้หุ่นเคลื่อนที่ในลักษณะคล้ายคลื่นรูป sine แต่ถ้าน้ำหนักหุ่นเพิ่มขึ้นแล้วแรงยกจากการกระพือจะไม่พอที่จะพยุงน้ำหนักของหุ่นและจะทำให้หุ่นจมลง ส่วนในกรณีที่ 2 ซึ่งกระพือขึ้นและลงด้วยความถี่ต่างกันจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งมากกว่าเนื่องจากขนาดของแรงยกที่เกิดขึ้นมากกว่ากรณีที่ 1 นอกจากนี้แรงยกนี้ยังเป็นผลให้สามารถพยุงน้ำหนักของหุ่นได้มากกว่า ดังนั้นการกระพือปีกในลักษณะที่ความถี่ในการกระพือขึ้นและลงต่างกันจึงน่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบินลอยตัวอยู่กับที่และการบินขึ้นได้

อย่างไรก็ตามแรงยกที่วัดได้จากการทดลองในครั้งนี้เป็นการวัดในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีการไหลของน้ำ แต่ในความเป็นจริงเมื่อหุ่นเคลื่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างน้ำกับปีกที่กระพือ ทำให้แรงที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการเคลื่อนที่ไม่ตรงกับผลการทดลองในครั้งนี้ ซึ่งเป็นจุดที่จะต้องพิจารณาปรับปรุงอุปกรณ์การทดลองวัดแรงต่อไปในอนาคต

5. บทสรุปและงานในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาอากาศยานไร้นักบินขนาดเล็ก MAV ที่เคลื่อนที่ด้วยการกระพือปีก ในบทความได้นำเสนอการวัดแรงยกที่เกิดจากการกระพือปีกโดยการประยุกต์ใช้ของไหลเป็นน้ำแทนอากาศ เพื่อให้สามารถวัดแรงได้ง่ายขึ้น ลักษณะการกระพือที่ทำการทดลองในครั้งนี้มี 2 ลักษณะใหญ่คือ (1) กระพือขึ้นและลงด้วยความถี่เท่ากัน และ (2) กระพือขึ้นด้วยความถี่ที่เร็วกว่ากระพือลง ผลการทดลองวัดแรงยกแสดงให้เห็นว่าการกระพือในลักษณะที่ 2 จะมีแรงยกเฉลี่ยใน 1 คาบเกิดขึ้นในทิศที่สามารถนำไปใช้พยุงน้ำหนักของหุ่นได้

จากนั้นได้เสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยการกระพือปีกในน้ำ และได้แสดงตัวอย่างการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งขณะกระพือปีก โปรแกรมการคำนวณที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบกำหนดน้ำหนักของหุ่นต้นแบบและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นต้นแบบได้

สำหรับงานในขั้นต่อไปได้แก่การเก็บข้อมูลแรงจากการกระพือเพิ่มเติมทำเป็นฐานข้อมูลและสร้างโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ให้สมบูรณ์ นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยสร้างหุ่นต้นแบบที่เคลื่อนที่ในน้ำด้วยการกระพือปีก และทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลที่ทำมา

เอกสารอ้างอิง

[1] Grasmeyer, J.M., and Keennon, M.T., "Development of the Black Widow Micro Air Vehicle," AIAA-2001-0127.

[2] Ellington, C.P., "The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles," The Journal of Experimental Biology 202, 1999, pp. 3439 – 3448.

[3] Michelson, R., Helmick, D., Reece, S., and Amarena, C., "A Reciprocating Chemical Muscle (RCM) for Micro Air Vehicle "Entomopher" Flight," Proceedings of the Association for Unmanned Vehicle Systems, International, 1997, pp. 429 – 435.

[4] Pornsin-sirirak, T.N., Lee, S.W., Nassef, H., Grasmeyer, J., Tai, Y.C., Ho, C.M., and Keennon, M., "Mems Wing Technology for A Battery-Powered Ornithopter," Proceedings of International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2000, pp. 799 – 804.

[5] Schenato, L., Deng, X., Wu, W.C., and Sastry, S., "Virtual Insect Flight Simulator (VIFS): A Software Testbed for Insect Flight," IEEE International Conference Robotics and Automation, 2001.

[6] Yan, J., and Fearing, R.S., "Wing Force Map Characterization and Simulation for the Micromechanical Flying Insect," Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003.

[7] สุวิทย์ ธรรมาวุฒิกุล, "การวิเคราะห์แรงทางอากาศพลศาสตร์ของหุ่นยนต์กระพือปีก," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ. 2546.