

การบินทดสอบประเมินผลการลำเลียงสัมภาระทางอากาศด้วยอากาศยานหลายใบพัด
โดยการลากโยงห้องบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก
Flight Test Evaluation of Multirotor Aerial Delivery
with Suspended Wing-Shaped Load Container

อรรณพ เรืองวิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
ติดต่อ: E-mail: annop.rua@kmutt.ac.th, Tel 02-470-9123, Fax 02-470-9111

บทคัดย่อ

การลำเลียงทางอากาศด้วยอากาศยานหลายใบพัดเป็นวิธีการที่มีความเป็นไปได้สำหรับการลำเลียงพัสดุไปยังพื้นที่ที่เข้าถึงยาก แต่นอกจากน้ำหนักแล้วขนาดของพัสดุก็เป็นข้อจำกัด เพราะแรงขับของใบพัดจะลดลงถ้าหากพัสดุไปกีดขวางการไหลของอากาศเข้าหรือออกของใบพัด วิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งคือการลากโยงพัสดุด้วยสายเคเบิล แต่การแกว่งมากๆ ของสัมภาระที่ลากโยงจะเหวี่ยงให้อากาศยานหลายใบพัดหลุดออกนอกเส้นทางการบินที่ต้องการและอาจจะทำให้ตกได้ การศึกษาครั้งนี้เสนอแนวคิดการใช้ห้องบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีกเพื่อให้สร้างแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่จะช่วยลดการแกว่งของสัมภาระ บทความนี้แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำในการบินลำเลียงสัมภาระด้วยการลากโยงระหว่างกรณีก่อนมวลกับกรณีห้องบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ห้องบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีกสามารถลดความคลาดเคลื่อนของเส้นทางการบินและความคลาดเคลื่อนของความสูงได้ประมาณครึ่งหนึ่งของกรณีการลากโยงก่อนมวล

คำหลัก: อากาศยานหลายใบพัด การลำเลียงทางอากาศ การลากโยงสัมภาระ

Abstract

A multirotor based aerial delivery has been a possible way for delivering package to an urban area. But not only the weight but also the size of the package is limited. Because the thrust of the rotor will decrease if the package interrupt the airflow in or out of the rotor. A solution to this problem is to suspend the package through a cable. But the large swing of the suspended load will throw the multirotor far away from the desired flight path and may cause a crash. This study proposes a concept of using a wing-shaped container to produce aerodynamic forces that will damp the swing of the suspended load. This paper shows the comparison of the results of the accuracy of suspended load delivery between the mass load and the wing-shaped container. The results of the flight tests show that by using wing-shaped container the cross track error and the altitude error decreases about a half of that of the mass load suspension case.

Keywords: multirotor, aerial delivery, suspended load

1. บทนำ

ช่วง 2 – 3 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการขนส่งพัสดุทางอากาศด้วยอากาศยานหลายใบพัด เช่น Prime Air ของบริษัท amazon [1] parcelcopter ของบริษัท

DHL [2] ถึงแม้จะเป็นโครงการเหล่านี้ยังอยู่ระหว่างการพัฒนา แต่ก็มีความเป็นได้ที่จะนำมาใช้ขนส่งลำเลียงสัมภาระไปยังพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก ปัญหาหลักทางด้านการบินอยู่ที่การสิ้นเปลืองพลังงานของชุดขับใบพัด ทำให้

ไม่สามารถบินได้ไกล โดยทั่วไปวิธีการลำเลียงสัมภาระใช้การติดตั้งห้องบรรจุสัมภาระไว้ที่ตัวลำอากาศยานหลายใบพัด ซึ่งนอกจากน้ำหนักของสัมภาระที่จะเป็นข้อจำกัดแล้ว ถ้าสัมภาระมีขนาดใหญ่ทำให้ห้องบรรจุทุกมีส่วนที่ไปกีดขวางการไหลของอากาศที่ชุดใบพัด จะทำให้แรงขับลดลง ดังนั้นการห้อยแขวนสัมภาระให้ห่างออกมาจากตัวอากาศยานหลายใบพัดจึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะลดข้อจำกัดด้านขนาดได้

การลำเลียงสัมภาระทางอากาศด้วยอากาศยานหลายใบพัดโดยการลากโยงจะมีการแกว่งของสัมภาระซึ่งจะทำให้อากาศยานเสียการทรงตัวได้ โดยเฉพาะกรณีที่สัมภาระมีน้ำหนักใกล้เคียงกับอากาศยานหลายใบพัด [3] จึงได้มีงานวิจัยที่พัฒนาระบบควบคุมการบินสำหรับการลากโยงสัมภาระซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดการแกว่งของสัมภาระและการรักษาเสถียรภาพการบิน [4-7] นอกจากนี้ยังมียานวิจัยที่ปรับปรุงระบบควบคุมการบินขึ้นให้มีความราบรื่น เนื่องจากช่วงการบินขึ้นจะมีการเปลี่ยนสถานะจากที่เชือกห้อยยังไม่มีความกระตือรือร้นไปเป็นสถานะที่เชือกตึงมีแรงดึงเชือกกระทำต่ออากาศยานหลายใบพัด [8]

ส่วนการศึกษานี้พิจารณาที่รูปร่างของห้องบรรจุสัมภาระที่ลากโยง โดยมีแนวคิดนำรูปร่างของปีกมาใช้ทำห้องบรรจุทุกสัมภาระ เพื่อให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ที่ช่วยลดการแกว่งของห้องบรรจุทุกสัมภาระ และบทความนี้แสดงผลการทดลองบินเปรียบเทียบความแม่นยำในการบินลากโยงห้องบรรจุทุกสัมภาระรูปร่างปีกกับการบินลากโยงก้อนมวล

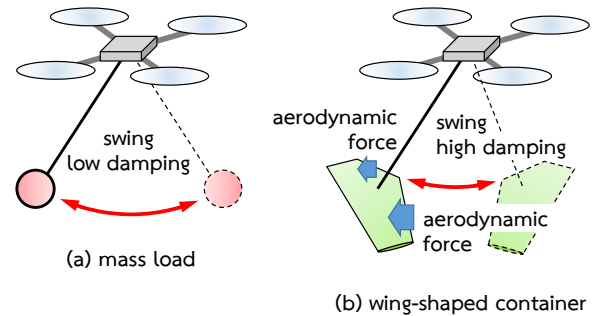
2. การใช้อากาศยานหลายใบพัดลำเลียงสัมภาระแบบลากโยงห้องบรรจุรูปร่างปีก

2.1 แนวคิด

การใช้อากาศยานหลายใบพัดลำเลียงสัมภาระด้วยการลากโยงนั้น เมื่อสัมภาระแกว่งจะเกิดแรงเหวี่ยงทำให้อากาศยานหลายใบพัดหลุดออกจากเส้นทางการบิน และแรงเหวี่ยงนั้นอาจจะทำให้อากาศยานหลายใบพัดเสียการทรงตัวจนถึงตกได้

การแกว่งของวัตถุที่ถูกแขวนห้อยไว้ ถ้าวัตถุเป็นก้อนมวลจะเป็นการแกว่งโดยไม่มี ความหน่วง (damping) ที่ช่วยลดการแกว่งนั้น ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีแนวคิดที่จะลดการแกว่งของสัมภาระโดยใช้ห้องบรรจุสัมภาระที่มีลักษณะเป็นระนาบเพื่อให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์

ด้านให้การแกว่งลดลงดั่งเค้าโครงในรูปที่ 1 และเลือกใช้ระนาบที่มีหน้าตัดเป็นรูปปีก (airfoil) ทำเป็นห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีก (wing) เหมือนอากาศยานแบบปีกบิน (flying wing) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการทรงตัวให้อยู่นิ่ง



รูปที่ 1 เค้าโครงแนวคิดลดการแกว่งของสัมภาระ

2.2 อากาศยานที่ใช้ทดลอง

2.2.1 อากาศยานหลายใบพัด

อากาศยานหลายใบพัดที่ใช้เป็นอากาศยานลำเลียงสัมภาระในการศึกษาครั้งนี้เป็นอากาศยานแบบ 4 ใบพัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่ลากผ่านแกนใบพัดทั้ง 4 ใบพัด (frame wheel) 450 mm วัสดุโครงสร้างเป็นพลาสติกเสริมเส้นใย ดังรูปที่ 2 และมีข้อมูลจำเพาะพื้นฐานดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 อากาศยาน 4 ใบพัดที่ใช้ทดลอง

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะพื้นฐาน

ของอากาศยาน 4 ใบพัดที่ใช้ทดลอง

specification	
number of rotors	4
frame wheel	450 mm
propeller	10" x 4.5"
brushless motor	935 rpm/V
battery (Li-Po)	14.8 V 2200 mAh
total weight	1.2 kg (excepted payload)
autopilot module	Arduipilot Mega 2.5

2.2.2 ห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีก

เพื่อความสะดวกในการสร้างห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีกสำหรับทดลอง การศึกษาครั้งนี้จึงใช้อากาศยานแบบปีกบินดังรูปที่ 3 แทนห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีก โดยเลือกใช้อากาศยานแบบปีกบินที่ทำจากโฟม เนื่องจากทนทานและซ่อมแซมได้ง่าย แต่ไม่ติดตั้งชุดมอเตอร์และใบพัดสำหรับขับเคลื่อน เพราะห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีกจะถูกห้อยไว้กับอากาศยาน 4 ใบพัดด้วยเชือก และเคลื่อนที่ไปตามการลากโยงของอากาศยาน 4 ใบพัด โดยไม่สร้างแรงขับเคลื่อน ข้อมูลจำเพาะพื้นฐานของอากาศยานแบบปีกบินที่ใช้แทนห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีกนี้แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ก้อนมวล และอากาศยานแบบปีกบินที่ใช้ทดลองแทนห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีก

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะพื้นฐาน

ของอากาศยานแบบปีกบินที่ใช้ทดลอง	
specification	
wing span	1.20 m
mean chord length	0.24 m
fuselage length	0.48 m
empty weight	0.42 kg
total weight for test	0.60 kg

2.3 การทดลองเปรียบเทียบการบินตามเส้นทาง

การทดลองนี้ใช้อากาศยาน 4 ใบพัดที่ปรับแต่งระบบควบคุมการบินอัตโนมัติสำหรับการบินขึ้นและการบินไปยังจุดที่กำหนดด้วยตามเส้นทางบินเป็นเส้นตรง โดยไม่มีสัมภาระให้สามารถบินอัตโนมัติได้ตามต้องการ นำมาทำการทดลองบินลำเลียงสัมภาระที่มีมวลเท่ากัน 2 กรณี คือ การลากโยงก้อนมวลและการลากโยงห้องบรรจุสัมภาระรูปร่างปีก การลากโยงใช้เชือกแขวนสัมภาระจากบริเวณกึ่งกลางของอากาศยาน 4 ใบพัดให้ห้อยลงมาทางด้านล่าง

ห่างจากระนาบของใบพัดเป็นระยะทาง 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด เพื่อลดผลกระทบจากลมจากใบพัด ซึ่งการผูกห้อยจริงห่างลงมาประมาณ 2.6 m

การบินทดลองใช้การบินอัตโนมัติทำการบินขึ้น แล้วบินไปและกลับยังจุดที่กำหนดห่างออกไปเป็นระยะทางประมาณ 40 m ด้วยการบินเป็นเส้นตรง จากนั้นเมื่อกลับถึงจุดที่ต้องการแล้วให้ผู้บังคับทำการบังคับลงจอดเพื่อป้องกันอากาศยาน 4 ใบพัดเคลื่อนที่ลงมาซ้อนทับกับสัมภาระ

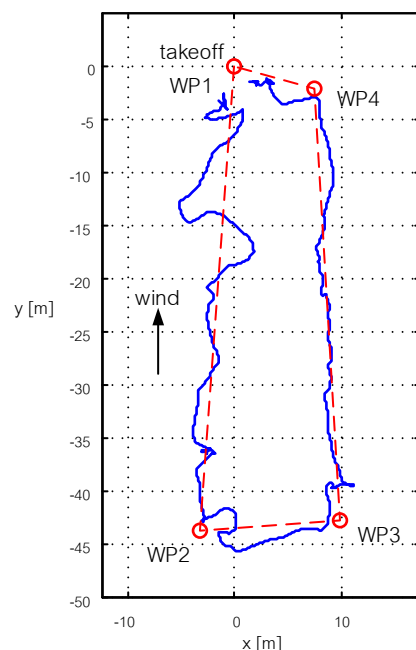
การพิจารณาความแม่นยำในการบินตามเส้นทางทำโดยนำผลเส้นทางการบินไปยังจุดที่กำหนดหาไปและหาค่ากลับของแต่ละกรณีมาคำนวณค่าระยะทางที่คลาดเคลื่อนไปจากเส้นตรงระหว่างจุดที่กำหนดให้บินไป

3. ผลการทดลอง

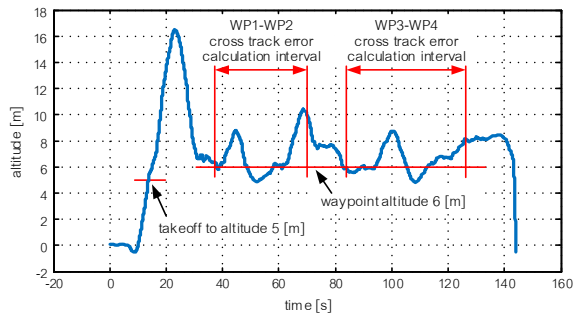
หัวข้อ 3.1 และ 3.2 แสดงผลเส้นทางการบินและความสูงของแต่ละกรณี จากนั้นจะอภิปรายเปรียบเทียบในหัวข้อ 3.3

3.1 กรณีการลากโยงก้อนมวล

ผลเส้นทางการบินแสดงในรูปที่ 4 และความสูงระหว่างการบินทดลองแสดงในรูปที่ 5



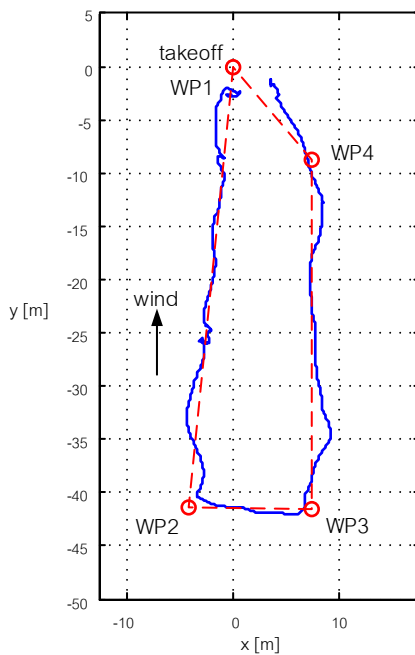
รูปที่ 4 ผลเส้นทางการบินกรณีการลากโยงก้อนมวล



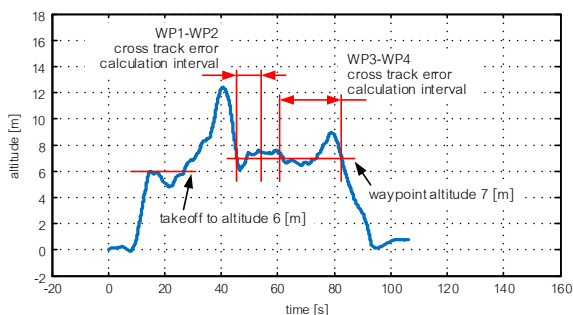
รูปที่ 5 ความสูงระหว่างการบินทดลอง
กรณีการลากโย่งก้อนมวล

3.2 กรณีการลากโย่งห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก

ผลเส้นทางการบินแสดงในรูปที่ 6 และความสูงระหว่างการบินทดลองแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ผลเส้นทางการบิน
กรณีการลากโย่งห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก



รูปที่ 7 ความสูงระหว่างการบินทดลอง
กรณีการลากโย่งห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก

3.3 การเปรียบเทียบความแม่นยำในการบิน

ค่าความคลาดเคลื่อนที่นำมาพิจารณาความแม่นยำในการบิน คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงในการบินขึ้น ค่าคลาดเคลื่อนของเส้นทางการบินซึ่งคำนวณจากระยะทางที่ผลเส้นทางการบินคลาดเคลื่อนไปจากเส้นตรงระหว่างจุดที่กำหนดให้บินไป (cross track error) และค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงระหว่างการบินระหว่างจุดที่กำหนด แสดงในตารางที่ 3 โดยแบ่งเป็นช่วงการบินขาไป (WP1-WP2) และช่วงการบินขากลับ (WP3-WP4)

ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนในการบินทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อน [m]	max	min	mean	
การลากโย่งก้อนมวล				
ความสูงในการบินขึ้น	11.45	-	-	
เส้นทางการบิน	ขาไป: WP1-WP2	4.23	0.00	1.04
	ขากลับ: WP3-WP4	1.61	0.00	0.55
ความสูง	ขาไป: WP1-WP2	4.41	0.00	1.23
	ขากลับ: WP3-WP4	2.77	0.00	0.78
การลากโย่งห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก				
ความสูงในการบินขึ้น	6.41	-	-	
เส้นทางการบิน	ขาไป: WP1-WP2	1.25	0.00	0.39
	ขากลับ: WP3-WP4	1.66	0.00	0.63
ความสูง	ขาไป: WP1-WP2	0.88	0.01	0.44
	ขากลับ: WP3-WP4	1.96	0.00	0.63

ในการบินขึ้นอย่างอัตโนมัติตอนเริ่มต้นเชือกยังหย่อนอยู่ที่พื้น อากาศยาน 4 ใบพัดจึงใช้แรงขับในการบินขึ้นเหมือนตามปกติที่ไม่มีสัมภาระ แต่เชือกผูกห้อยสัมภาระซึ่งยาว 2.6 m จะตึงก่อนจะถึงความสูงที่กำหนดสำหรับการบินขึ้น แล้วทันทีที่เชือกตึง แรงดึงเชือกจะกระทำในทิศลงดึงอากาศยาน 4 ใบพัดไว้ ทำให้อากาศยาน 4 ใบพัดต้องเร่งความเร็วรอบของใบพัดขึ้นอีกเพื่อสร้างแรงขับเพิ่มขึ้นให้เพียงพอต่อการยกสัมภาระ อากาศยาน 4 ใบพัดจึงบินขึ้นด้วยแรงขับที่มากกว่าการบินขึ้นโดยไม่มีสัมภาระ แต่เนื่องจากระบบควบคุมการบินอัตโนมัติได้ปรับแต่งไว้ไม่ให้ลดความเร็วรอบของใบพัดเร็วเกินไปเพื่อป้องกันการเสียการทรงตัว ดังนั้นความสูงในการบินขึ้นจึงเกินจากค่าความสูงที่กำหนดไว้มาก และค่าความคลาดเคลื่อนของความสูงในการบินขึ้นของกรณีการลากโย่งก้อนมวลมากกว่ากรณีการลากโย่งห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก เนื่องจากในระหว่างที่บินขึ้น แรงต้านจากอากาศจะกระทำต่อพื้นที่ผิวบนของปีกเป็นแรงที่ช่วยหน่วงลดความเร็วในการบินขึ้น ทำให้หยุดการบินขึ้นหลังจากที่เกิน

จากความสูงที่กำหนดไปแล้วได้เร็วกว่ากรณีการลากโยง
ก่อนมวลซึ่งแรงต้านจากอากาศจะเกิดขึ้นน้อย

การบินไปยังจุดที่กำหนดด้วยการบินเป็นเส้นตรง
เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นทางการบิน
จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นทางการบินขาไป
ของกรณีการลากโยงก่อนมวลมีค่ามากกว่ากรณีการลาก
โยงห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีกอย่างมาก ซึ่งเมื่อ
พิจารณาผลเส้นทางการบินรูปที่ 4 จะเห็นว่าอากาศยาน
4 ใบพัดเคลื่อนที่ห่างออกจากเส้นทางที่ต้องการไปมาก
และบินเป็นเส้นทางสายไปมาในช่วงแรกจากนั้นจึงค่อยๆ
ลู่เข้า ทั้งนี้เนื่องจากการยกก่อนมวลในการบินขึ้นเกิดการ
แกว่ง และมีแรงต้านจากอากาศน้อยในการช่วยลดการ
แกว่งนี้ อากาศยาน 4 ใบพัดจึงโดนเหวี่ยงให้ออกไปไกล
จากเส้นทางที่ต้องการด้วยแอมพลิจูดการแกว่งที่สูงของ
ก่อนมวล แต่กรณีการลากโยงห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่าง
ปีกมีแรงต้านจากอากาศมากกว่าทำให้การแกว่งลดลงเร็ว
กว่าและแอมพลิจูดการแกว่งต่ำกว่า เป็นผลให้กรณีนี้
อากาศยาน 4 ใบพัดไม่ถูกเหวี่ยงออกไปไกล

ส่วนการบินขากลับนั้น การแกว่งของสัมภาระลดลง
แล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นทางการบินขากลับของ
ทั้งสองกรณีจึงไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน

แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมความสูงระหว่างเส้นทาง
การบินไปยังจุดที่กำหนดของกรณีการลากโยงก่อนมวลมี
ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่ากรณีการลากโยงห้อย
บรรทุกสัมภาระรูปร่างปีกทั้งขาไปและขากลับ เนื่องจาก
แรงต้านจากอากาศที่กระทำต่อห้อยบรรทุกสัมภาระ
รูปร่างปีกมีทิศสวนทางกับการเปลี่ยนแปลงความสูง จึง
เป็นแรงที่ช่วยหน่วงการเพิ่มหรือลดความสูงของห้อย
บรรทุกสัมภาระรูปร่างปีกอยู่ตลอดเวลา ส่งผลทำให้
อากาศยาน 4 ใบพัดสามารถรักษาความสูงได้ดีกว่ากรณี
การลากโยงก่อนมวล

4. บทสรุป

การศึกษานี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความ
แม่นยำในการบินของอากาศยานหลายใบพัดที่ใช้ลำเลียง
สัมภาระด้วยการลากโยง ซึ่งมีแนวคิดในการลดความ
คลาดเคลื่อนของการควบคุมการบินอัตโนมัติโดยการใช้
ห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีก เพื่อให้มีแรงทางอากาศ
พลศาสตร์มากขึ้นที่จะช่วยลดการแกว่งของสัมภาระซึ่ง
เป็นสาเหตุให้อากาศยานหลายใบพัดถูกเหวี่ยงออกนอก
เส้นทางการบินที่ต้องการ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลากโยงห้อยบรรทุก
สัมภาระรูปร่างปีกจะลดความคลาดเคลื่อนในการบินลง
จากกรณีการลากโยงก่อนมวล ซึ่งทั้งค่าความคลาดเคลื่อน
ของความสูงในการบินขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนของ
เส้นทางการบิน และค่าความคลาดเคลื่อนของความสูง
ระหว่างเส้นทางการบินลดลงโดยรวมประมาณครึ่งหนึ่ง

อย่างไรก็ตามอากาศยานหลายใบพัดโดยทั่วไปมี
ความเร็วในการบินไปข้างหน้า แรงยกทางอากาศ
พลศาสตร์ที่เกิดจากห้อยบรรทุกสัมภาระรูปร่างปีกจึงน้อย
แรงส่วนใหญ่ที่มีผลช่วยลดการแกว่งของสัมภาระจึงเป็น
แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อระนาบพื้นที่ผิว
ของห้อยบรรทุกสัมภาระ ดังนั้นการพัฒนาต่อเพื่อใช้งาน
จึงอาจจะใช้ห้อยสัมภาระที่มีส่วนที่เป็นระนาบแบน เช่น
กล่องแบน หรือติดตั้งแผ่นกระดานที่สัมภาระ ซึ่งสร้างได้
ง่ายและน้ำหนักโครงสร้างน้อยกว่าการทำให้เป็นรูปร่างปีก
แต่ยังคงทำให้เกิดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ในทิศทาง
ที่ช่วยลดการแกว่งของสัมภาระที่ลากโยง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Amazon, Prime Air, USA (2013), URL:
<http://www.amazon.com/b?node=8037720011>,
access on 11/04/2016.
- [2] DHL, Parcelcopter, USA (2014), URL:
http://www.dhl.com/en/press/releases/releases_2014/group/dhl_parcelcopter_launches_initial_operations_for_research_purposes.html, access
on 11/04/2016.
- [3] Trachte, J., Gonzalez, F. and McFadyen, A.
(2014). Nonlinear Model Predictive Control for a
multi-rotor with heavy slung load, paper
presented in *2014 International Conference on
Unmanned Aircraft Systems*, FL, USA.
- [4] Byung-Yoon, L., et al. (2015). Study on
Payload Stabilization Method with the Slung-
load Transportation System Using a Quad-rotor,
paper presented in *2015 European Control
Conference*, Linz, Austria.
- [5] Nicotra, M.M., et al. (2014). Nested Saturation
Control of an UAV Carrying a Suspended Load,
paper presented in *2014 American Control
Conference*, Oregon, USA.

- [6] Sreenath, K., Lee, T. and Kumar, V. (2013). Geometric Control and Differential Flatness of a Quadrotor UAV with a Cable-Suspended Load, paper presented in *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Florence, Italy.
- [7] Palunko, I., Fierro, R. and Cruz, P. (2012). Trajectory Generation for Swing-Free Maneuvers of a Quadrotor with Suspended Payload: A Dynamic Programming Approach, paper presented in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minnesota, USA.
- [8] Cruz, P. and Fierro, R. (2014). Autonomous Lift of a Cable-suspended Load by an Unmanned Aerial Robot, paper presented in *2014 IEEE Conference on Control Applications*, Antibes, France.