



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

ปริญญา

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์และการจำลองทางคอมพิวเตอร์การบินหมู่  
ของอากาศยานไร้คนขับ

The Study of Mathematical Modeling and Computational Formation Flight Simulation  
of UAVs

นามผู้วิจัย นายบัญชา อุปนนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( นาวาอากาศตรีสุคนธ์ พันธุ์ธร, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( อาจารย์ไชยวัฒน์ กล้าพล, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์และการจำลองทางคอมพิวเตอร์การบินหมู่ของ  
อากาศยานไร้คนขับ

The Study of Mathematical Modeling and Computational Formation Flight Simulation of UAVs

โดย

นายบัญชา อุปนนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บัญชา อุปนันท์ 2555: การศึกษาการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์และการจำลองทางคอมพิวเตอร์การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ) สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: นาวาอากาศตรีสุคนธ์ พันธุ์เนตร, Ph.D. 70 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ รวมถึงศึกษาการควบคุมอากาศยานไร้คนขับ และทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการบินหมู่ เพื่อนำมาออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับและนำไปพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งระบบควบคุมนี้ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรมภาษา C# จากนั้นแสดงการจำลองการควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยโปรแกรม Microsoft Flight Simulator X ซึ่งแบบจำลองของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้คือ General Atomic MQ-1 Predator UAVs จำนวน 3 ลำและทำการบินหมู่ในรูปแบบ Leader-Follower เป็นรูปทรงต่างๆ ได้แก่ รูปทรงตัววี รูปแถวหน้ากระดาน รูปแนวทะแยง รูปแถวตอนเรียงหนึ่ง และรูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง

สำหรับผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับซึ่งสร้างจากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบนั้นสามารถควบคุมอากาศยานไร้คนขับทั้งหมดโดยรักษารูปแบบการบินหมู่ที่ต้องการได้

---

ลายมือชื่อนิติ

---

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Bancha Upanan 2012: The Study of Mathematical Modeling and Computational Formation Flight Simulation of UAVs. Master of Engineering (Aerospace Engineering), Major Field: Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering. Thesis Advisor: Squadron Leader Sukon Puntunan, Ph.D. 70 pages.

The objectives of this research are to study UAVs formation flight including controlling of UAVs and mathematical theories related to the formation flight, to design the mathematical model of UAVs formation flight and to develop the automatic control system for UAVs formation flight using PID controllers, developed in C# programming language. Then simulate controlling of UAVs formation flight by Microsoft Flight Simulator X. The UAVs models used in the simulation are 3 General Atomic MQ-1 Predator UAVs which fly in a Leader-Follower formation with many shapes including V formation, Spread formation, Edge formation, Trail formation and Spread formation with different height.

The result shows that the automatic control system for UAVs formation flight created from the designed mathematic model can manipulate all UAVs while keeping the required formation flight.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณนาวาอากาศตรีสุคนธ์ พันธุ์เณร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ สมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่และเพื่อน ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศยาน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการศึกษาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่านตลอดจนบูรพาจารย์ ด้วย ความเคารพยิ่งที่คอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษา

บัญชา อุปนันท์  
กุมภาพันธ์ 2555

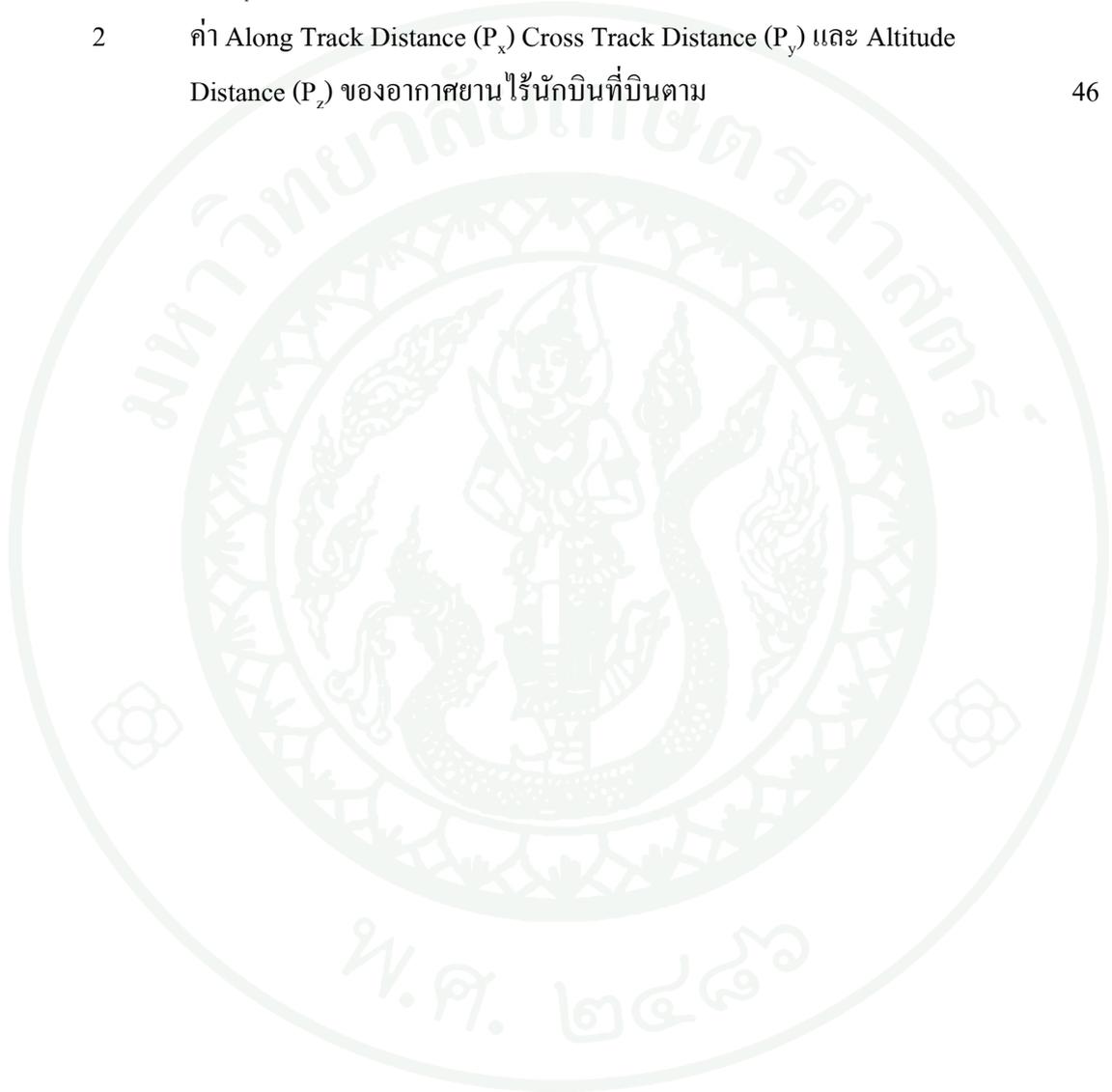
## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	49
ผล	49
วิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	70

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่า $K_p$ , $K_i$ และ $K_d$ เริ่มต้นของตัวควบคุมพีไอดีในระบบควบคุมการบินหมุน	44
2	ค่า Along Track Distance ( $P_x$ ) Cross Track Distance ( $P_y$ ) และ Altitude Distance ( $P_z$ ) ของอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	46



## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การบินหมู่ของนกในรูปแบบ V Formation	4
2	พื้นที่ของ Upwash และ Downwash ที่ถูกสร้างโดยกระแสมวนตามมา	5
3	การลด Induced Drag ของการบินหมู่	5
4	การบินหมู่ของอากาศยานในรูปแบบ VIC Formation	6
5	การบินหมู่ของอากาศยานในรูปแบบ Spread Formation	7
6	การบินหมู่ของอากาศยานในรูปแบบ Trail Formation	8
7	MQ-1 Predator	10
8	ระบบพิกัดภูมิศาสตร์	13
9	ระบบพิกัดกริด UTM	14
10	ค่า Scale Factor เทียบกับค่าลองจิจูด	20
11	Formation Geometry Center	24
12	Block Diagram of the Altitude Acquire and Hold Controller	25
13	Block Diagram of the Cross Track Error Minimisation Controller	26
14	Block Diagram of the Along Track Error Minimisation Controller	26
15	UAVs Control Layer	28
16	โปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ	30
17	โปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม	32
18	Cross Track Error และ Along Track Error	35
19	Block Diagram ของระบบควบคุมการบินหมู่	38
20	กระบวนการทำงานของ Along Track Controller	39
21	กระบวนการทำงานของ Airspeed Controller	40
22	Along Track Controller และ Airspeed Controller	40
23	กระบวนการทำงานของ Cross Track Controller	41
24	Cross Track Controller	41
25	กระบวนการทำงานของ Vertical Speed Controller	42
26	กระบวนการทำงานของ Angle of Attack Controller	43

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	Vertical Speed Controller และ Angle of Attack Controller	43
28	การจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ	45
29	การ Take-Off ของอากาศยานไร้คนขับทุกลำพร้อมกันไปยังระดับความสูง 300 เมตร	49
30	กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของอากาศยานไร้คนขับขณะทำการ Take-Off	50
31	การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยรูปทรงตัววี	51
32	การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยรูปแถวหน้ากระดาน	52
33	การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยรูปแนวทะแยง	53
34	การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยรูปแถวตอนเรียงหนึ่ง	54
35	การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยรูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง	55
36	กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	56
37	กราฟความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	56
38	กราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	57
39	กราฟความแตกต่างของความเร็วระหว่างอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	57
40	กราฟการเปลี่ยนแปลงทิศทางของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	58
41	กราฟความแตกต่างของทิศทางระหว่างอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม	59
42	การบินอย่างอิสระของอากาศยานไร้คนขับ	60
43	อากาศยานที่บินตามทุกลำกลับมาทำการบินหมู่เหมือนเดิม	60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Cross Track Error	61
45	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Along Track Error	62
ภาพผนวกที่		
1	โปรแกรม Microsoft Flight Simulator X ใน Mode Multiplayer	67
2	อากาศยานไร้คนขับขณะเริ่มต้นทำการ Take-Off	67
3	Cockpit View Mode ของอากาศยานไร้คนขับ General Atomic MQ-1 Predator	68
4	อากาศยานไร้คนขับขณะทำการเลี้ยว	68

การศึกษาการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์และการจำลองทางคอมพิวเตอร์การบิน  
หมู่ของอากาศยานไร้คนขับ

**The Study of Mathematical Modeling and Computational Formation Flight  
Simulation of UAVs**

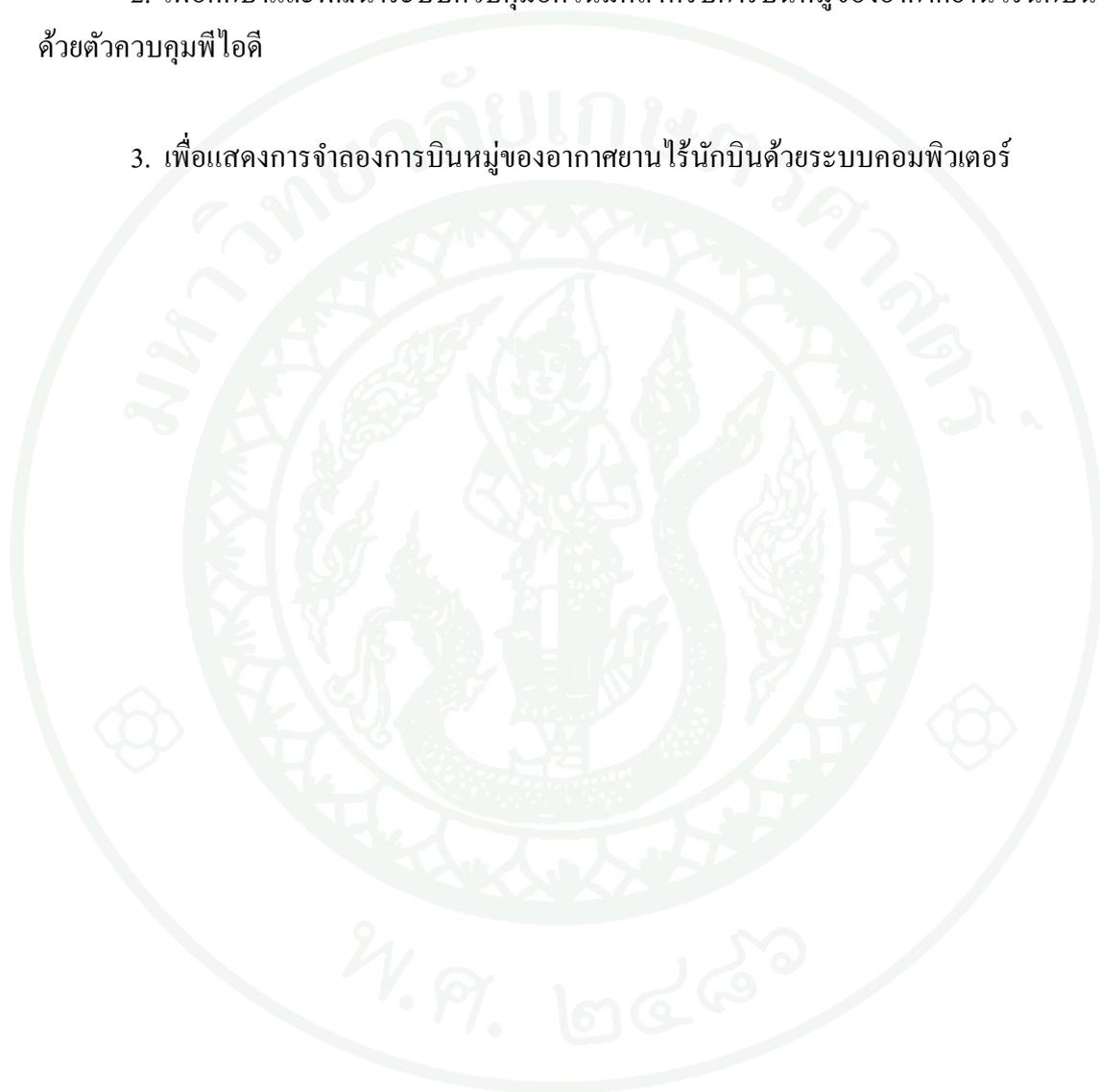
คำนำ

อากาศยานไร้คนขับ (UAV) คือ อากาศยานที่ควบคุมการบินและควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วยระบบการควบคุมระยะไกล โดยไม่ต้องมีนักบินนั่งไปกับอากาศยาน เมื่อไม่ต้องมีคนนั่งไปกับอากาศยาน จะเกิดผลดีในด้านต่าง ๆ หลายประการ ทั้งในด้านประสิทธิภาพการปฏิบัติงานและความปลอดภัยต่อกำลังพล ปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับจึงได้ถูกนำมาใช้งานในหลายภารกิจ เช่น การลาดตระเวน และการช่วยเหลือ ทั้งทางการทหารและพลเรือน หลายๆ ประเทศได้พยายามเร่งพัฒนาอากาศยานไร้คนขับของตน หนทางหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพและโอกาสสำเร็จในการปฏิบัติงานคือ การนำอากาศยานไร้คนขับมาบินใกล้กันตามรูปแบบที่กำหนดหรือการบินหมู่ (Formation Flight)

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาและการออกแบบระบบควบคุมการบินอัตโนมัติเพื่อใช้สำหรับการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ จากการศึกษา Guidance Approach แบบต่างๆ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Guidance Approach แบบ Leader-Follower Station Keeping ซึ่งอากาศยานไร้คนขับที่บินตามจะรักษาตำแหน่งให้สัมพันธ์กับอากาศยานไร้คนขับที่บินนำในฝูงบิน สำหรับแบบจำลองอากาศยานไร้คนขับที่ผู้วิจัยใช้คือ General Atomic MQ-1 Predator UAVs ซึ่งเป็นอากาศยานไร้คนขับที่มีขีดความสามารถสูงและถูกใช้ในภารกิจสำคัญต่างๆ ในปัจจุบัน

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบิน
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินด้วยตัวควบคุมพีไอดี
3. เพื่อแสดงการจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินด้วยระบบคอมพิวเตอร์



## การตรวจเอกสาร

### 1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อากาศยานไร้คนขับส่วนใหญ่ถูกใช้ในทางทหาร มีจำนวนน้อยที่ถูกใช้ในทางพลเรือน เช่น การดับเพลิง การสำรวจ เป็นต้น อากาศยานไร้คนขับนั้นมักจะทำหน้าที่ในภารกิจที่ยากและอันตรายเกินกว่าที่จะใช้เครื่องบินที่มีคนขับทำได้ ปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับจึงไม่ใช่เรื่องใหม่ในกิจการทางทหารแต่อย่างใด ในช่วงเวลาที่ผ่านมอากาศยานไร้คนขับได้แสดงบทบาทอย่างมากในฐานะของการเป็นหน่วยลาดตระเวนทางอากาศ เพื่อทำหน้าที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลข่าวสารเพื่อใช้ในการรบ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากการปฏิบัติการทางทหารในโคโซโวในปี ค.ศ.1999 ซึ่งในครั้งนั้นกองทัพสหรัฐทั้ง 3 เหล่าทัพ ต่างก็ใช้อากาศยานไร้คนขับในการบินลาดตระเวนทั้งสิ้น โดยกองทัพบกใช้อากาศยานไร้คนขับแบบ Hunter กองทัพเรือใช้อากาศยานไร้คนขับแบบ Pioneer และกองทัพอากาศใช้อากาศยานไร้คนขับแบบ Predator ซึ่งใช้ในการชี้เป้าให้การทิ้งระเบิดนำวิถีที่ปล่อยจากเครื่องบินรบ A-10 เป็นไปด้วยความแม่นยำ นอกจากนี้ในโคโซโวแล้วอากาศยานไร้คนขับยังถูกใช้ในอีกหลายๆ สมรภูมิ จะเห็นว่ามีการใช้งานอากาศยานไร้คนขับกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปฏิบัติการลาดตระเวนทางอากาศซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญของการปฏิบัติการรบที่จะต้องกระทำอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในยามสงบไปจนถึงยามสงคราม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลาดตระเวนหาข่าวโดยการถ่ายภาพทางอากาศ ซึ่งมีความมุ่งหมายที่จะรวบรวมข้อมูลข่าวสารหรือความเคลื่อนไหวต่างๆ ที่เกี่ยวกับฝ่ายตรงข้าม ตลอดจนที่ตั้งและลักษณะพื้นที่ปฏิบัติการ รวมทั้งยังมีส่วนช่วยเหลือผู้บังคับบัญชาหรือฝ่ายอำนวยการในการนำเอาข้อมูลเหล่านั้นมาคิดเปรียบเทียบขีดความสามารถของฝ่ายตรงข้ามกับฝ่ายเราได้

ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันประเทศต่างๆ จึงได้นำเอาอากาศยานไร้คนขับมาใช้งานในกองทัพของตนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับมีคุณสมบัติต่างๆ ที่ตรงกับความต้องการในการปฏิบัติการตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นได้เป็นอย่างดี ประกอบกับการวิจัยพัฒนาและความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้อากาศยานไร้คนขับมีขีดความสามารถในการลาดตระเวนตรวจการณ์ ค้นหาและติดตามเป้าได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการส่งภาพเหตุการณ์ที่ตรวจพบกลับมายังสถานีควบคุมภาคพื้นได้อย่างทันเวลาใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด จากข้อมูลข้างต้นจึงเป็นข้อพิสูจน์ว่าอากาศยานไร้คนขับนั้นสามารถปฏิบัติงานได้เช่นเดียวกับอากาศยานที่มีคนขับ

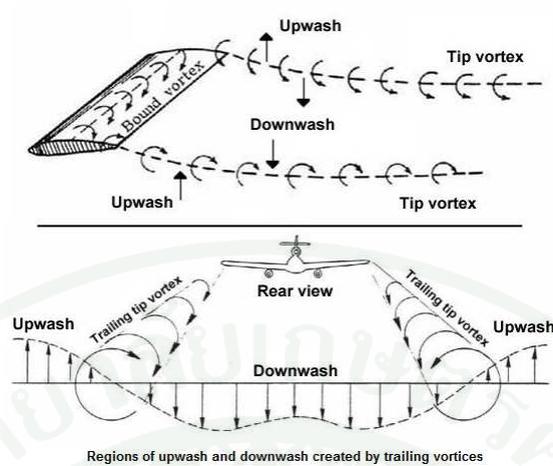
ด้วยศักยภาพของอากาศยานไร้คนบังคับดังกล่าว ปัจจุบันอากาศยานไร้คนบินจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาการบินหมู่เพื่อใช้ประโยชน์ทั้งในทางพลเรือนและทางทหาร การศึกษาการบินหมู่ในทางพลเรือนส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการบินหมู่ในรูปแบบ V Formation หรือ Diamond Formation ซึ่งเป็นการบินโดยเลียนแบบการบินหมู่ของนก ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การบินหมู่ของนกในรูปแบบ V Formation

ที่มา: Scott (2005)

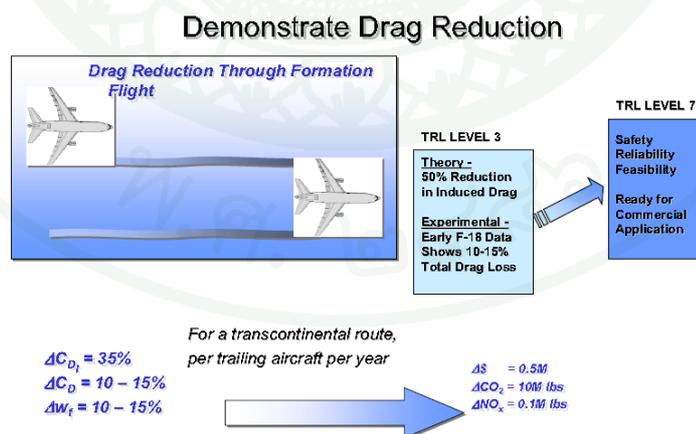
โดยทั่วไปเราจะพบเห็นนกอพยพบินเป็นฝูงและบินเป็นรูปตัว V นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาการบินหมู่ของนกและเชื่อว่าเหตุผลที่นกบินเป็นรูปตัว V ทำให้นกที่บินตามหลังอยู่ในพื้นที่ Upwash ตามหลัก Aerodynamic นกที่บินตามหลังจะได้รับแรงยกเพิ่มขึ้น ทำให้ใช้พลังงานในการบินน้อยลง ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 พื้นที่ของ Upwash และ Downwash ที่ถูกสร้างโดยกระแสลมวนตามมา

ที่มา: Scott (2005)

เช่นเดียวกับการบินหมู่ของนก สำหรับอากาศยานแล้วการบินหมู่ในรูปแบบ V Formation จะมีผลทำให้ลด Induced Drag ซึ่งส่งผลให้ใช้กำลังในการบินน้อยลง ประหยัดเชื้อเพลิง และการปฏิบัติภารกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 3



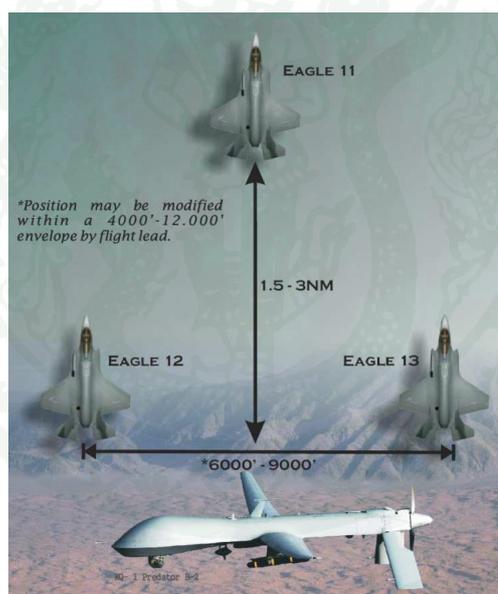
ภาพที่ 3 การลด Induced Drag ของการบินหมู่

ที่มา: Larson (2004)

สำหรับในทางทหารการบินหมู่ของอากาศยานนั้นมีประโยชน์อย่างมากทั้งทางด้านยุทธวิธี และประสิทธิภาพทางการรบ ดังประโยคที่ Major Thomas B. Tommy McGuire กล่าวว่า “Never break formation in less than two elements of aircraft. One man alone is a disadvantage, a team of two aircraft is an advantage. If you split up, add it immediately to other friendly aircraft” (Nunes, 2011)

รูปแบบการบินหมู่ของอากาศยานนั้นมีอยู่หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และภารกิจที่ได้รับ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับการบินหมู่ของอากาศยานจำนวน 3 ลำ มีรูปแบบการบินหมู่ ดังนี้

1. VIC Formation หรือ V Formation การบินหมู่ในรูปแบบนี้อากาศยานที่บินนำจะบินตามปกติ ส่วนอากาศยานที่บินตามจะบินโดยรักษาแนวแถวด้านข้าง



ภาพที่ 4 การบินหมู่ของอากาศยานในรูปแบบ VIC Formation

ที่มา: Nunes (2011)

### 1.1 ข้อดี

1.1.1 อากาศยานจะให้การสนับสนุนและเฝ้าระวังซึ่งกันและกันได้ดี

1.1.2 อากาศยานที่อยู่ในตำแหน่งส่วนหลังจะต่อสู้กับศัตรูโดยการสื่อสารกับอากาศยานที่บินนำ

1.1.3 ศัตรูจะมองเห็นทั้งฝูงบินได้ยาก

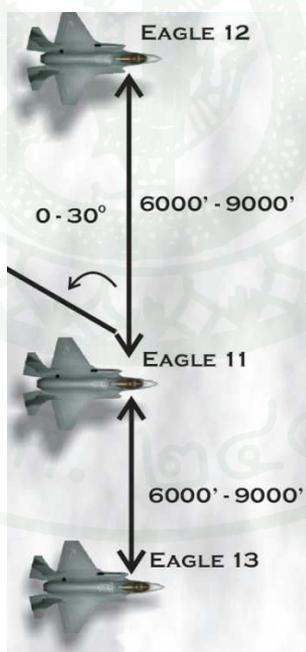
1.1.4 ระยะห่างระหว่างอากาศยานเป็นรูปแบบสำหรับการโจมตี

## 1.2 ข้อเสีย

1.2.1 รูปแบบนี้ยากต่อการบินในทัศนวิสัยที่แย่และภูมิประเทศที่ขรุขระ

1.2.2 อากาศยานที่บินตามอาจถูกเข้าใจผิดว่าเป็นศัตรู โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเกิดการบินไปข้างใดข้างหนึ่งมากเกินไป

2. Spread Formation การบินหมู่ในรูปแบบนี้อากาศยานที่บินนำจะรักษาระยะระหว่างอากาศยานที่บินตาม ระหว่าง 6,000 ถึง 9,000 ฟุต โดยอากาศยานที่บินตามจะมีตำแหน่งทำมุมระหว่าง 0 ถึง 30 องศา กับอากาศยานที่บินนำ



ภาพที่ 5 การบินหมู่ของอากาศยานในรูปแบบ Spread Formation

ที่มา: Nunes (2011)

## 2.1 ข้อดี

2.1.1 รูปแบบนี้จะทำให้ศัตรูจะมองเห็นทั้งฝูงบินได้ยาก

2.1.2 อำนาจการยิงสูงสุดสำหรับการใช้อาวุธประเภท Beyond-Visual-Range (BVR)

## 2.2 ข้อเสีย

2.2.1 การบินโดยรักษาแนวแถวด้านข้างจะทำได้ยาก

2.2.2 อากาศยานที่บินตามจะบินที่ระดับความสูงต่างๆ ได้ยาก

3. Trail Formation การบินหมู่ในรูปแบบนี้ถูกใช้สำหรับการโจมตีจากอากาศสู่พื้นดิน โดยเฉพาะ ปัญหาของการบินหมู่ในรูปแบบนี้ในการสถานการณ์การโจมตีจากอากาศสู่อากาศ คือ อากาศยานที่บินตามลำสุดท้ายจะไม่ได้รับการสนับสนุนจากอากาศยานลำอื่น ดังนั้นจึงถูกทำลายโดยอากาศยานของศัตรูได้ง่ายมาก



ภาพที่ 6 การบินหมู่ของอากาศยานในรูปแบบ Trail Formation

ที่มา: Nunes (2011)

ด้วยประโยชน์และความจำเป็นในการบินหมู่ของอากาศยานข้างต้น การนำอากาศยานไร้  
นักบินมาทำการบินหมู่แทนอากาศยานที่มีคนขับจึงมีข้อดี คือ

- 1) ลดความเสี่ยงและความสูญเสียจากการปฏิบัติการที่ยากและอันตราย โดยเฉพาะใน  
ภารกิจการบินหมู่ซึ่งมีความยากและอันตรายมากกว่า
- 2) ลดค่าใช้จ่ายในการวิจัยและพัฒนาการบินหมู่ของอากาศยาน
- 3) การออกแบบและจัดสร้างระบบต่างๆ สำหรับการบินหมู่มีความซับซ้อนน้อยกว่า
- 4) เพิ่มโอกาสสำเร็จในการปฏิบัติงาน เนื่องจากอากาศยานไร้นักบินมีขนาดเล็กจึงมีความ  
คล่องตัวมากกว่าและยากต่อการตรวจจับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำอากาศยานไร้นักบินมาทำการบินหมู่ในรูปแบบต่างๆ โดย  
ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ออกแบบระบบควบคุมการบินหมู่อัตโนมัติ และจำลองบนระบบคอมพิวเตอร์  
เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการบินหมู่ของอากาศยานไร้นักบินจริงต่อไป

## 2. เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

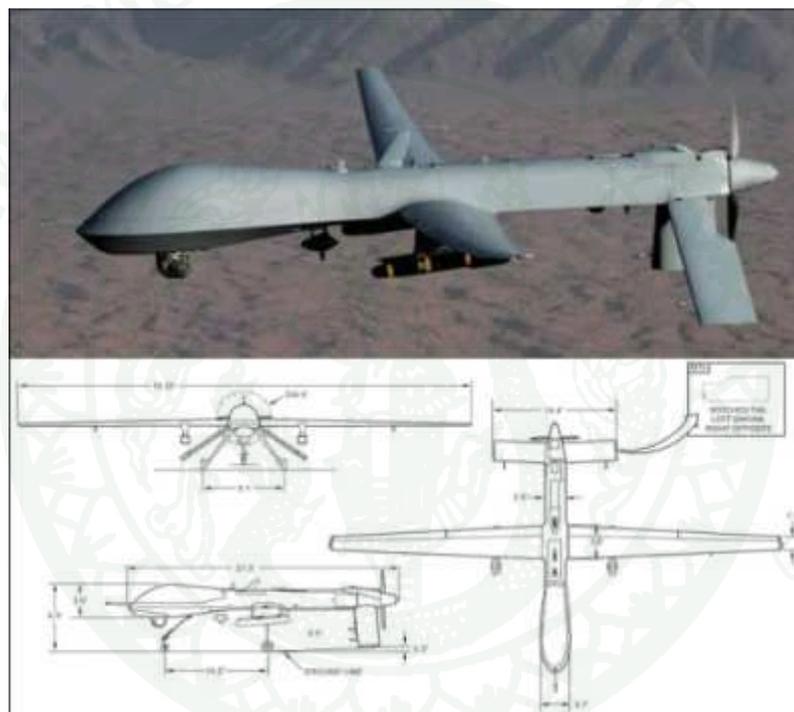
### 2.1 อากาศยานไร้นักบิน General Atomics MQ-1 Predator

General Atomics MQ-1 Predator (Fnlayson, 2011) เป็นอากาศยานไร้นักบินซึ่งถูกเริ่ม  
ใช้โดยกองทัพอากาศสหรัฐ (USAF) และหน่วยข่าวกรองกลางสหรัฐอเมริกา (CIA) แรกเริ่มถูกคิด  
ขึ้นในต้นทศวรรษที่ 1990 สำหรับการลาดตระเวนและสังเกตการณ์ ซึ่ง Predator ได้บรรทุกกล้อง  
และอุปกรณ์ตรวจจับอื่นๆ ไปด้วย แต่ภายหลังได้ถูกดัดแปลงและปรับปรุงให้สามารถบรรทุกและ  
ยิงมิสไซล์ AGM-114 Hellfire หรืออาวุธยุทธโธปกรณ์อื่นๆ ได้ อากาศยานนี้ถูกใช้มาตั้งแต่ปี 1995  
ในสงครามต่างๆ อาทิ อัฟกานิสถาน ปากีสถาน บอสเนีย เซอร์เบีย อิรัก เยเมน ลิเบีย และโซมาเลีย  
 เป็นต้น

กองทัพอากาศสหรัฐเรียก Predator ว่าเป็น "Tier II" MALE UAS (Medium-Altitude,  
Long-Endurance Unmanned Aircraft System) ซึ่งระบบอากาศยานไร้นักบิน (UAS) ประกอบด้วย

อากาศยานไร้คนบินที่มีอุปกรณ์ตรวจจับ สถานีควบคุมภาคพื้นดิน (GCS) และชุดการสื่อสาร เชื่อมต่อผ่านดาวเทียม ให้กำลังโดยเครื่องยนต์ Rotax และขับเคลื่อนด้วยใบพัด อากาศยานนี้ สามารถบินได้ถึง 400 ไมล์ทะเล (740 กิโลเมตร) ไปยังเป้าหมายโดยใช้เวลา 14 ชั่วโมง

ต่อมาในปี 2001 อากาศยานไร้คนบิน Predator RQ-1 กลายเป็นอากาศยานไร้คนบินที่สำคัญที่สุดซึ่งถูกใช้สำหรับปฏิบัติการโจมตีโดยกองทัพอากาศสหรัฐและหน่วยข่าวกรองกลาง สหรัฐอเมริกาในพื้นที่ อัฟกานิสถาน และ ปากีสถาน และในพื้นที่อื่นๆ



ภาพที่ 7 MQ-1 Predator

ที่มา: Fnlayson (2011)

Role	Remote controlled, UAV
Manufacturer	General Atomics Aeronautical Systems
First flight	July 1994
Introduction	July 1995

Status	Active
Primary user	United States Air Force
Produced	1995–Present
Number built	360 (285 RQ-1, 75 MQ-1)
Unit cost	~ \$4.5 million
Developed from	General Atomics GNAT
Variants	MQ-1C Grey Eagle
Developed into	MQ-9 Reaper

### 2.1.1 Specifications

#### a) General characteristics

Crew: none on-board

Length: 27 ft (8.22 m)

Wingspan: 48.7 ft (14.8 m); MQ-1B Block 10/15: 55.25 ft (16.84 m)

Height: 6.9 ft (2.1 m)

Wing area: 123.3 sq ft (11.5 m<sup>2</sup>)

Empty weight: 1,130 lb (512 kg)

Loaded weight: 2,250 lb (1,020 kg)

Max takeoff weight: 2,250 lb (1,020 kg)

Powerplant: 1 × Rotax 914F turbocharged four-cylinder engine, 115 hp

(86 kW)

#### b) Performance

Maximum speed: 135 mph (117 knots, 217 km/h)

Cruise speed: 81–103 mph (70–90 knots, 130–165 km/h)

Stall speed: 62 mph (54 knots, 100 km/h) (dependent on aircraft weight)

Range: >675 nmi (675 mi/1,100 km)

Endurance: 24 hours

Service ceiling: 25,000 ft (7,620 m)

## c) Armament

2 hardpoints

2 × AGM-114 Hellfire (MQ-1B)

4 × AIM-92 Stinger (MQ-1B)

6 × Griffin air-to-surface missiles

## d) Avionics

ASIP-1C

AN/AAS-52 Multi-Spectral Targeting System

AN/ZPQ-1 Synthetic Aperture Radar (early airframes only)

## 2.2 ระบบพิกัด

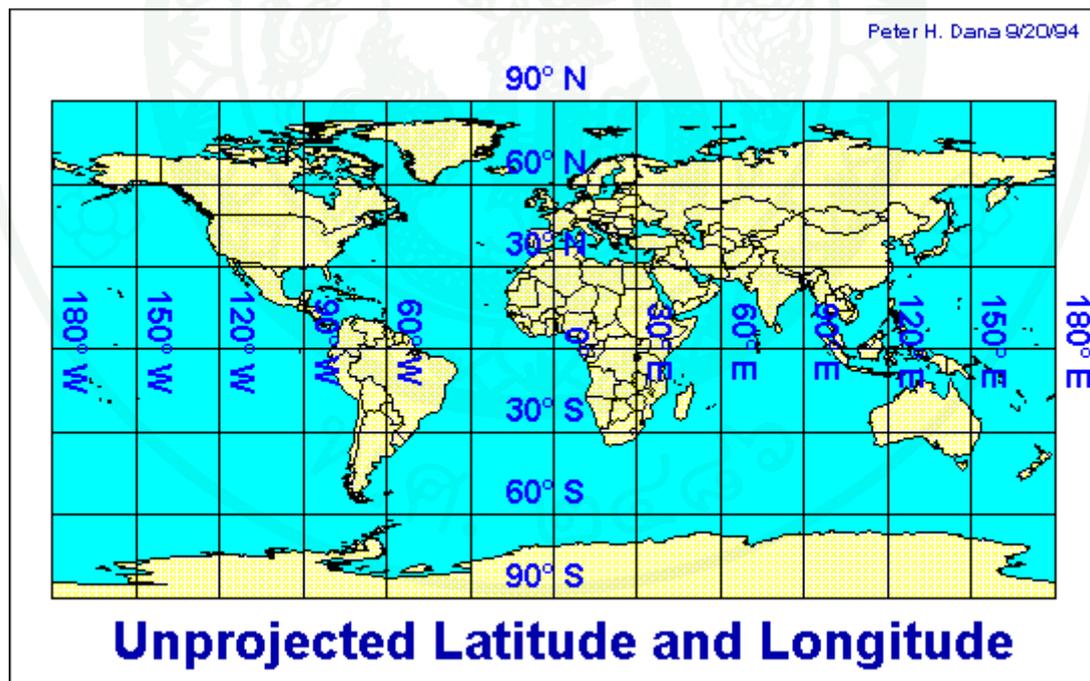
ระบบพิกัด (Coordinate System) (อานันต์, 2553) เป็นระบบที่สร้างขึ้นสำหรับใช้อ้างอิงในการกำหนดตำแหน่งหรือบอกตำแหน่งพื้นโลกจากแผนที่ที่มีลักษณะเป็นตารางโครงข่ายที่เกิดจากตัดกันของเส้นตรงสองชุดที่ถูกกำหนดให้วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก-ตะวันตก ตามแนวของจุดศูนย์กำเนิดที่กำหนดขึ้น ค่าพิกัดที่ใช้อ้างอิงในการบอกตำแหน่งต่างๆ จะใช้ค่าของหน่วยที่นับออกจากจุดศูนย์กำเนิดเป็นระยะเชิงมุม หรือเป็นระยะทาง ไปทางเหนือหรือใต้ และตะวันออกหรือตะวันตก ตามตำแหน่งของตำบลที่ต้องการหาค่าพิกัดที่กำหนด ตำแหน่งต่างๆ จะถูกเรียกอ้างอิงเป็นตัวเลขในแนวตั้งและแนวนอนตามหน่วยวัดระยะ

สำหรับระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงกำหนดตำแหน่งบนแผนที่ที่นิยมใช้กับแผนที่ในปัจจุบัน มีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ

2.2.1 ระบบพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic Coordinate) เป็นระบบพิกัดที่กำหนดตำแหน่งต่างๆ บนพื้นโลก ด้วยวิธีการอ้างอิงบอกตำแหน่งเป็นค่าระยะเชิงมุมของละติจูดและลองจิจูด ตามระยะเชิงมุมที่ห่างจากศูนย์กำเนิดของละติจูดและลองจิจูดที่กำหนดขึ้น สำหรับศูนย์กำเนิดของละติจูดนั้น กำหนดขึ้นจากแนวระดับที่ตัดผ่านศูนย์กลางของโลกและตั้งฉากกับแกนหมุน เรียกแนวระนาบศูนย์กำเนิดนั้นว่า เส้นศูนย์สูตร ซึ่งแบ่งโลกออกเป็นซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ ฉะนั้นค่าระยะเชิงมุมของละติจูด จะเป็นค่าเชิงมุมที่เกิดจากมุมที่ศูนย์กลางของโลก กับแนวระดับฐานกำเนิดมุมที่เส้นศูนย์สูตร ที่วัดค่าของมุมออกไปทั้งซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ ค่าของมุมจะสิ้นสุด

ที่ขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ มีค่าเชิงมุม 90 องศาพอดี ดังนั้นการใช้ค่าระยะเชิงมุมของละติจูดอ้างอิง บอกตำแหน่งต่างๆ นอกจากจะกำหนดเรียกค่าวัดเป็น องศา ลิปดา และฟิลิปดา แล้วจะบอกซีกโลกเหนือหรือใต้กำกับด้วยเสมอ เช่น ละติจูดที่ 30 องศา 00 ลิปดา 15 ฟิลิปดาเหนือ

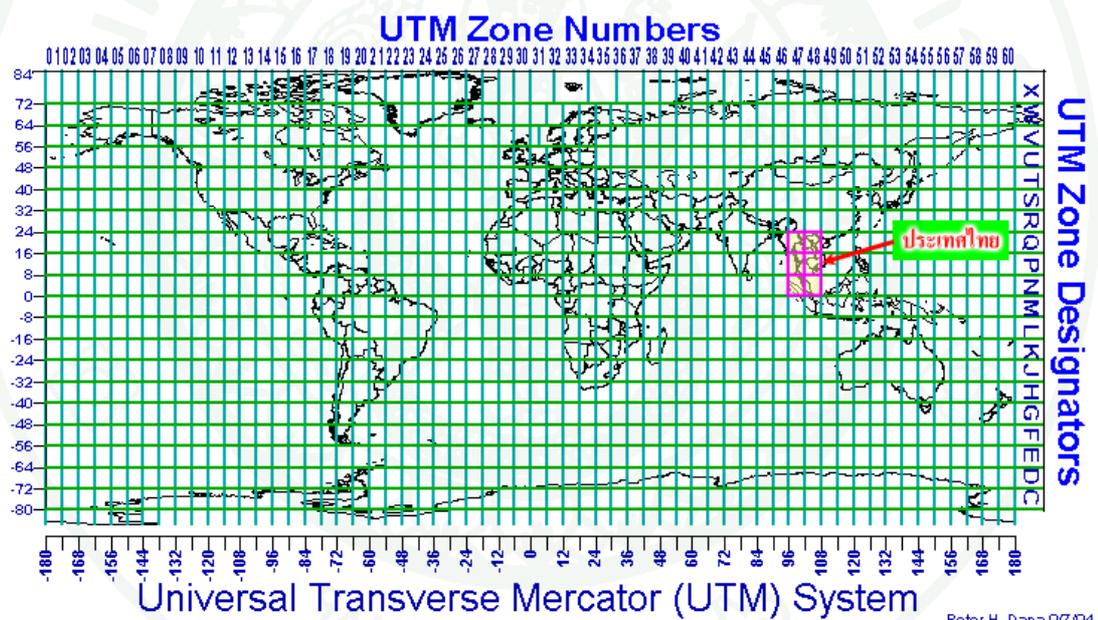
ส่วนศูนย์กำหนดของลองจิจูดนั้น ก็กำหนดขึ้นจากแนวระนาบทางตั้งที่ผ่านแกนหมุนของโลกตรงบริเวณตำแหน่งบนพื้นโลกที่ผ่านหอดูดาว เมืองกรีนิช (Greenwich) ประเทศอังกฤษ เรียกศูนย์กำเนิดนี้ว่า เส้นเมริเดียนเริ่มแรก (Prime Meridian) เป็นเส้นที่แบ่งโลกออกเป็นซีกโลกตะวันตกและซีกโลกตะวันออก ค่าระยะเชิงมุมของลองจิจูดเป็นค่าที่วัดมุมออกไปทางตะวันตกและตะวันออกของเส้นเมริเดียนเริ่มแรก วัดจากศูนย์กลางของโลกตามแนวระนาบที่มีเมริเดียนเริ่มแรกเป็นฐานกำเนิดมุม ค่าของมุมจะสิ้นสุดที่เส้นเมริเดียนตรงข้ามเส้นเมริเดียนเริ่มแรกมีค่าของมุมซีกโลกละ 180 องศา การใช้ค่าอ้างอิงบอกตำแหน่งก็เรียกกำหนดเช่นเดียวกับละติจูด แต่ต่างกันที่จะต้องบอกเป็นซีกโลกตะวันตก หรือตะวันออกแทน เช่น ลองจิจูดที่ 90 องศา 00 ลิปดา 00 ฟิลิปดาตะวันตก



ภาพที่ 8 ระบบพิกัดภูมิศาสตร์

ที่มา: อานันต์ (2553)

2.2.2 ระบบพิกัดกริด UTM (Universal Transverse Mercator Coordinate System) เป็นระบบตารางกริดที่ใช้ช่วยในการกำหนดตำแหน่งและใช้อ้างอิงในการบอกตำแหน่ง นิยมใช้กับแผนที่ในกิจการทหารของประเทศต่างๆ เกือบทั่วโลกในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบตารางกริดที่มีขนาดรูปร่างเท่ากันทุกตาราง และมีวิธีการกำหนดบอกค่าพิกัดที่ง่ายและถูกต้อง เป็นระบบกริดที่นำเอาเส้นโครงแผนที่แบบ Universal Transverse Mercator Projection ของ Gauss Krugger มาใช้ คัดแปลงการถ่ายทอดรายละเอียดของพื้นผิวโลกให้รูปทรงระบอบ Mercator Projection โดยแกนของรูปทรงระบอบจะทับกับแนวเส้นอิกเวเตอร์ และตั้งฉากกับแนวแกนของขั้วโลก ประเทศไทยเราได้นำเอาเส้นโครงแผนที่แบบ UTM นี้มาใช้ในการทำแผนที่กิจการทหารภายในประเทศจากรูปถ่ายทางอากาศในปี 1953 ร่วมกับสหรัฐอเมริกา เป็นแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ชุด 708 และปรับปรุงใหม่เป็นชุด L 7017 ที่ใช้ในปัจจุบัน



ภาพที่ 9 ระบบพิกัดกริด UTM

ที่มา: อานันต์ (2553)

ระบบพิกัด UTM ได้จากการฉายแผนที่แบบ UTM (Universal Transverse Mercator) (อิทธิ, 2542) โดยการฉายแผนที่แบบ UTM คือการฉายแบบ Transverse Mercator ที่มีข้อกำหนดนานาชาติเกี่ยวกับลักษณะของการฉาย เช่น การเลือกตำแหน่ง Central Meridian สำหรับ

แต่ละพื้นที่บนโลก การแบ่งพื้นที่บนโลกออกเป็นโซนต่างๆ การกำหนดขอบเขตของการฉายของแต่ละโซน เป็นต้น

ข้อกำหนดโดยทั่วไปของการฉายแผนที่แบบ Transverse Mercator ซึ่งเป็นพื้นฐานของ UTM มีดังนี้

- Datum : Local Datum
- Projection Surface : Cylinder
- Coincidence : Secant
- Position : Transverse
- Property : Conformal

สำหรับการฉายแบบ UTM มีข้อกำหนดที่เฉพาะเจาะจงเพิ่มเติมคือ

1) Local Datum ที่ใช้อ้างอิงกับ Ellipsoid ลูกต่างๆ ตามพื้นที่ดังนี้ Clarke 1880 สำหรับอเมริกาเหนือ Clarke 1866 สำหรับแอฟริกา Everest และ Bessel สำหรับเอเชียใต้และตะวันออกเฉียงใต้ และ International Spheroid สำหรับส่วนอื่นของโลก สำหรับประเทศไทยในอดีตใช้ Everest แต่ในปัจจุบันตั้งแต่ประมาณปี 2543 ใช้ WGS84 เช่นเดียวกับหลายๆ ประเทศในโลกที่เริ่มหันมาใช้ WGS84 เป็น Datum แทน Local Datum เดิม

2) การฉายแผนที่แบบ UTM แบ่งโลกออกเป็น 60 โซน แต่ละโซนครอบคลุมพื้นที่ดังนี้

- มีความยาวตามแนวเหนือ-ใต้ ตั้งแต่  $80^{\circ} \text{N} - 80^{\circ} \text{S}$  (ภายหลังได้เปลี่ยนเป็น  $84^{\circ} \text{N} - 80^{\circ} \text{S}$ )
- ความกว้างตามแนวตะวันออก-ตก ข้างละ 3 องศาLongitude จาก Central Meridian
- การให้หมายเลขโซน เริ่มต้นด้วยโซนที่ 1 มี Central Meridian อยู่  $177^{\circ} \text{W}$  โซนที่ 2 อยู่ถัดออกไปทางตะวันออกของโซนที่ 1 มี Central Meridian อยู่ที่  $171^{\circ} \text{W}$  เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทั้งโลก พื้นที่ประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ในโซนที่ 47 (Central Meridian  $99^{\circ} \text{E}$ ) และ

ทางตะวันออกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือรวมทั้งจังหวัดตราดและบางส่วนของจันทบุรีอยู่ใน  
โซนที่ 48 (Central Meridian 105° E)

3) Scale Factor ที่ Central Meridian กำหนดให้เป็น 0.9996 ทำให้ทรงกระบอก  
ตัด Datum ที่ระยะห่างออกไปประมาณ 180 กิโลเมตร จาก Central Meridian และที่ตำแหน่งนี้จะมี  
ค่า  $k = 1$  (ในที่นี้ Scale Factor จะใช้สัญลักษณ์  $k$  ตามความนิยมที่ใช้กันทั่วไปในกรณีของระบบ  
พิกัด UTM) ตัวเลข  $k_0 = 0.9996$  (2499/2500) ได้จากการกำหนดให้ Scale Error ที่ Central Meridian  
เป็น 1/2500 และโดยทั่วไปสำหรับพื้นที่ที่มีละติจูดกลางขึ้นไปในแต่ละโซน ค่า Scale Error ที่  
Central Meridian จะเป็นค่าที่ใหญ่ที่สุดในโซน ส่วนพื้นที่ที่อยู่ละติจูดต่ำลงมาถึงเส้นศูนย์สูตร  
Scale Error ที่ขอบโซนจะมากกว่า 1/2500 เล็กน้อย

4) เพื่อให้พิกัดในแต่ละโซนมีค่าเป็นบวกทั้งหมด การฉายแบบ UTM จึง  
กำหนดดังนี้ สำหรับซีกโลกเหนือให้บวก 500,000 เมตร เข้าไปกับค่า X ส่วนซีกโลกใต้ให้บวก  
500,000 เข้าไปกับค่า X และบวก 10,000,000 เมตร เข้าไปกับค่า Y พิกัดใหม่นี้มีชื่อเรียกว่า Easting  
และ Northing ดังนั้น พิกัด UTM จึงคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E &= X + 500,000 \\ N &= Y \end{aligned} \quad (1a)$$

และสำหรับซีกโลกใต้

$$\begin{aligned} E &= X + 500,000 \\ N &= Y + 10,000,000 \end{aligned} \quad (1b)$$

เมื่อ X Y คือค่าพิกัดฉากที่ได้จากสมการการฉายแผนที่ของ Transverse  
Mercator ตามสมการที่ (2a) ในหัวข้อถัดไป

สมการการฉายแผนที่ของ Transverse Mercator

ระบบพิกัด UTM ออกแบบมาสำหรับงานทำแผนที่ทางทหาร และแผนที่ภูมิศาสตร์ ซึ่งต้องการความถูกต้องเชิงตำแหน่งสูง จึงใช้พื้นฐานโลกที่เป็น Spheroid แทนทรงกลม สมการการฉายแผนที่ที่ได้จึงอยู่ในรูปของเทอมต่างๆ ของปริมาณบนผิว Spheroid

การหาสมการการฉายแผนที่ของการฉายแผนที่แบบ Transverse Mercator ทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่เป็นการพิสูจน์ตรงจากรูป Spheroid วิธี Double Projection หรือวิธีที่ปรับปรุงเทอมต่างๆ ในสมการการฉายแผนที่ของ Transverse Cylindrical แบบอื่น เช่น Cassini-Soldner Projection

สมการการฉายแผนที่ของ Transverse Mercator ที่มีผู้พิสูจน์ไว้ปรากฏอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอนุกรมกำลัง (Power Series) ที่ตัดเฉพาะเทอมต่างๆ ของอนุกรมที่มีผลต่อการคำนวณมาใช้ สำหรับสมการการฉายแผนที่ที่แสดงไว้ในสมการที่ (2) ข้างล่างนี้เรียกว่า Meade's Nested-form ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} X &= A_1 L (1 + L^2 (A_3 + L^2 (A_5 + A_7 L^2))) \\ Y &= k_0 m + A_2 L^2 (1 + L^2 (A_4 + A_6 L^2)) \end{aligned} \quad (2a)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} L &= \lambda \cos \phi \\ t &= \tan \phi \\ A_1 &= k_0 N \\ A_2 &= \frac{1}{2} k_0 N \cdot t \\ A_3 &= (1 - t^2 + \eta^2) / 6 \\ A_4 &= (5 - t^2 + \eta^2 (9 + 4\eta^2)) / 12 \\ A_5 &= (5 - t^2 (18 - t^2) + \eta^2 (14 - 58t^2)) / 120 \\ A_6 &= (61 - t^2 (58 - t^2) + \eta^2 (270 - 330t^2)) / 360 \\ A_7 &= (61 - t^2 (479 - 179t^2 + t^4)) / 5040 \end{aligned}$$

ค่า  $\lambda$  ในสมการข้างต้นหมายถึงค่าต่างลองจิจูดระหว่างตำแหน่งที่กำลังพิจารณา กับ Central Meridian ส่วนค่า  $k_0$  หมายถึง Scale Factor ที่ Central Meridian

สมการการฉายย้อนกลับของการฉายแผนที่แบบ UTM ซึ่งสามารถนำไปใช้  
คำนวณหาค่าพิกัดภูมิศาสตร์จากพิกัดฉาก X Y คือ

$$\begin{aligned}\phi &= \phi' + B_2 Q^2 (1 + Q^2 (B_4 + B_6 Q^2)) \\ \lambda &= Q (1 + Q^2 (B_3 + Q^2 (B_5 + B_7 Q^2))) / \cos \phi\end{aligned}\quad (2b)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}Q &= X / (k_0 \cdot N) \\ B_2 &= -t(1 + \eta^2) / 2 \\ B_3 &= -(1 + 2t^2 + \eta^2) / 6 \\ B_4 &= -(5 + 3t^2 + \eta^2(1 - 9t^2 + 4\eta^2)) / 12 \\ B_5 &= (5 + t^2(28 + 24t^2) + \eta^2(6 + 8t^2)) / 120 \\ B_6 &= (61 + t^2(90 + 45t^2) + \eta^2(46 - 252t^2 - 90t^4)) / 360 \\ B_7 &= -(61 + t^2(662 + 1320t^2 + 720t^4)) / 5040\end{aligned}$$

เทอมต่างๆ ตามสมการข้างต้นที่เป็นฟังก์ชันของค่า  $\phi$  เช่น  $t$   $\eta$   $N$  จะคำนวณได้  
โดยใช้ค่า Foot-Point Latitude  $\phi'$  แทนค่า Geodetic Latitude Foot-Point Latitude คำนวณได้จาก  
สูตร

$$\phi' = \tan^{-1} \left( \frac{a}{b} \tan u \right) \quad (3)$$

a, b คือกึ่งแกนยาวและกึ่งแกนสั้นของ Ellipsoid ส่วนค่า u คำนวณได้จาก

สมการ

$$u = P_1 \phi_0 + P_2 \sin 2\phi_0 + P_3 (5 \sin 2\phi_0 - 8 \phi_0) \cos^2 \phi_0$$

$$P_1 = 1 - \frac{1}{4} e'^2 + \frac{11}{64} e'^4$$

$$P_2 = \frac{1}{8} e'^2 - \frac{13}{128} e'^4$$

$$P_3 = e'^2 / 64$$

$$\phi_0 = Y / b$$

## การคำนวณ Scale Factor

ในกรณีที่ทราบพิกัดภูมิศาสตร์ ค่า Scale Factor ของตำแหน่งที่พิจารณา สามารถคำนวณได้จาก Meade's Nested Solution ตามสมการที่ (4a) ข้างล่าง

$$k = k_0(1 - F_2L^2(1 + F_4L^2)) \quad (4a)$$

โดยที่

$$F_2 = (1 + \eta^2)/2$$

$$F_4 = (5 - 4t^2 + \eta^2(9 - 24t^2))/12$$

ในกรณีที่ทราบพิกัดฉาก UTM ค่า Scale Factor คำนวณได้จากสมการที่ (4b)

$$k = k_0(1 - G_2Q^2(1 + G_4Q^4)) \quad (4b)$$

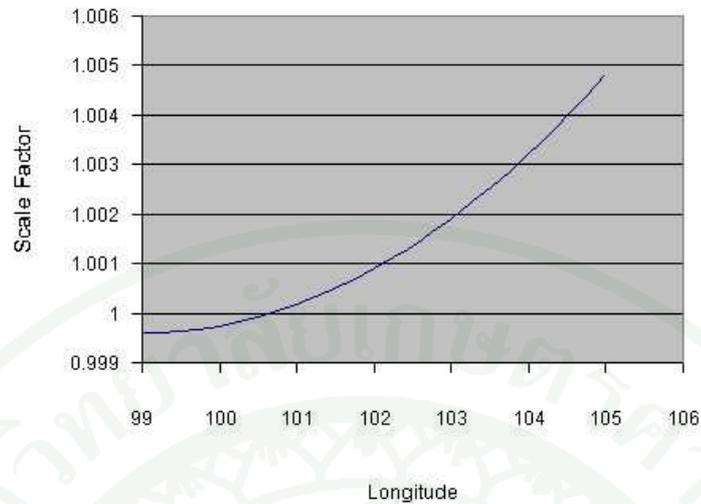
โดยที่

$$G_2 = (1 + \eta^2)/2$$

$$G_4 = (1 + 5\eta^2)/12$$

$\eta$  คำนวณโดยใช้ Foot-Point Latitude ตามสมการที่ (3)

โดยลักษณะการวางตัวของทรงกระบอกเมื่อเทียบกับ Datum ค่า Scale Factor จะมีลักษณะสมมาตรซึ่งหมายความว่าตำแหน่งบนละติจูดเดียวกันที่ห่างจาก Central Meridian เท่ากันจะมีค่าเท่ากัน ภาพที่ 10 แสดงให้เห็นถึงค่า Scale Factor ของการฉายแผนที่ UTM ในโซนที่ 47 ที่ละติจูด 14 องศา ตั้งแต่ Central Meridian 99° E ไปจนถึงขอบโซนที่ลองจิจูด 102° E และเลยออกไปจนถึงลองจิจูด 105° E



ภาพที่ 10 ค่า Scale Factor เทียบกับค่าลองจิจูด

ที่มา: อิทธี คริสสิริสัตยวงศ์ (2542)

Scale Factor จึงมีบทบาทสำคัญในการคำนวณงานรังวัดบนระนาบแผนที่ UTM (หรือที่เรียกกันว่าการคำนวณบนกริด UTM) เนื่องจากใช้ในการทอนค่าระยะทางบนผิว Ellipsoid มาเป็นระยะทางบนระนาบแผนที่

### 2.3 การแปลงสัมพรรค (Affine Transformation)

ในเรขาคณิต การแปลงสัมพรรค (Willer, 2011) ระหว่างสองเวกเตอร์ประกอบด้วย การแปลงเชิงเส้น (Linear Transformation) และการเลื่อนขนาน (Translation)

$$x \rightarrow Ax + b$$

ในกรณีที่มีติจำกัด การแปลงสัมพรรคซึ่งกำหนดโดยเมตริกซ์  $A$  และเวกเตอร์  $b$  มีคุณสมบัติ คือ

1. รักษาสภาพความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างจุด เช่น จุดที่อยู่บนเส้นยังคงสภาพความสัมพันธ์เชิงเส้นหลังจากการแปลง

2. รักษาอัตราส่วนของระยะทางตามเส้น เช่น จุดที่แตกต่างกันซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้น  $p_1$ ,  $p_2$  และ  $p_3$  อัตราส่วน  $|p_2-p_1|/|p_3-p_1|$  จะยังคงเดิม

โดยทั่วไปการแปลงสัมพรรคประกอบด้วย การแปลงเชิงเส้น ซึ่งได้แก่ การหมุน (Rotation) การเพิ่ม/ลดขนาด (Scaling) และการตัด (Shearing) และการเลื่อนขนาน (Translation, or Shift) ซึ่งในกรณีการแปลงหนึ่งมิติ  $A$  และ  $b$  ถูกเรียกว่า ความชัน และ จุดตัด ตามลำดับ

พีชคณิตเวกเตอร์ใช้การคูณเมทริกซ์เพื่อแสดงการแปลงเชิงเส้น และการบวกเวกเตอร์ เพื่อแสดงการเลื่อนขนาน การใช้เมทริกซ์และเวกเตอร์สามมิติที่แสดงโดยใช้การคูณเพียงเมทริกซ์เดียว เทคนิคนี้จำเป็นต้องให้เวกเตอร์ทั้งหมดเพิ่ม "1" ต่อท้าย และเมทริกซ์ทั้งหมดต้องเพิ่มแถวพิเศษของเลขศูนย์ด้านล่าง เพิ่มคอลัมน์พิเศษของเวกเตอร์การเลื่อนขนานทางด้านขวา และเพิ่ม "1" ที่มุมขวาล่าง ถ้า  $A$  เป็นเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} \vec{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vec{b} \\ 0, \dots, 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{x} \\ 1 \end{bmatrix}$$

จะเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$\vec{y} = A\vec{x} + \vec{b}$$

เมทริกซ์ที่เพิ่มขึ้นมาข้างต้นเรียกว่า เมทริกซ์การแปลงสัมพรรค (Affine Transformation Matrix หรือ Projective Transformation Matrix)

เพื่อแสดงการแปลงสัมพรรคด้วยเมทริกซ์ จำเป็นต้องใช้ Homogeneous Coordinates นั่นคือ การแสดงเวกเตอร์ 2 มิติ  $(x, y)$  เป็นเวกเตอร์ 3 มิติ  $(x, y, 1)$  การเลื่อนขนานสามารถแสดงด้วยการคูณเมทริกซ์ ดังนี้

รูปแบบ  $x' = x + t_x$  และ  $y' = y + t_y$  จะกลายเป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

การแปลงเชิงเส้นทั้งหมดนั้นรวมอยู่ในการแปลงสัมพรรค สามารถอธิบายได้ว่าการแปลงเชิงเส้นเป็นรูปอย่างง่ายของการแปลงสัมพรรค ดังนั้นการแปลงเชิงเส้นใดๆ จึงสามารถแสดงด้วยเมตริกซ์การแปลงทั่วไป ด้วยการขยายเมตริกซ์การแปลงเชิงเส้นหนึ่งแถวและหนึ่งคอลัมน์เพิ่มเติมที่ว่างที่เพิ่มเข้ามานี้ด้วยเลขศูนย์ ยกเว้นมุมขวาล่างให้เป็นเลขหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น เมตริกซ์การหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาจะกลายเป็น

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

การใช้เมตริกซ์การแปลงซึ่งประกอบด้วย Homogeneous Coordinates สามารถนำไปใช้ในการแปลงร่วมกันได้ โดยที่องค์ประกอบของเวกเตอร์ไม่ถูกเปลี่ยนแปลง

### 3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันประเทศไทยมีการศึกษาและวิจัยอากาศยานไร้คนขับอย่างแพร่หลาย อาทิ คณะวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีโครงการทำวิจัยอากาศยานไร้คนขับอยู่หลายโครงการ และทางกองทัพก็ได้สนับสนุนเงินวิจัยส่วนหนึ่งร่วมกับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อพัฒนาอากาศยานไร้คนขับขนาดครึ่งหนึ่งของขนาดจริง (Half Scale) ซึ่งงานวิจัยร่วมกันนี้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี จนถึงขั้นได้ผังแบบที่เป็นมาตรฐาน โดยมีต้นทุนเฉลี่ยตัวละประมาณ 5 แสนบาท นอกจากนี้ยังเกิดความร่วมมือขึ้นระหว่าง ฝ่ายอุตสาหกรรม สกว. สำนักงานวิจัยและพัฒนา กลาโหม (สวพ.กท.) และนักวิจัยจากสถาบันอุดมศึกษา 10 สถาบัน ในโครงการวิจัยและพัฒนา UAV โดยแบ่งการทำงานวิจัยในโครงการ UAV ออกเป็นกลุ่มวิจัยต่างๆ ได้แก่ การออกแบบและจัดสร้างโครงสร้างอากาศยาน UAV การออกแบบสร้างระบบควบคุมการบินอัตโนมัติ ระบบสื่อสารการบิน ระบบประมวลผลการสื่อสารและอุปกรณ์การภาพ และกลุ่มบริหารจัดการระบบ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบินหมู่ของอากาศยาน เรื่องการควบคุมและซอฟต์แวร์การบินอัตโนมัติ (Mitchell, 2004) ได้ทำการศึกษา Guidance Approach แบบต่างๆ ดังนี้

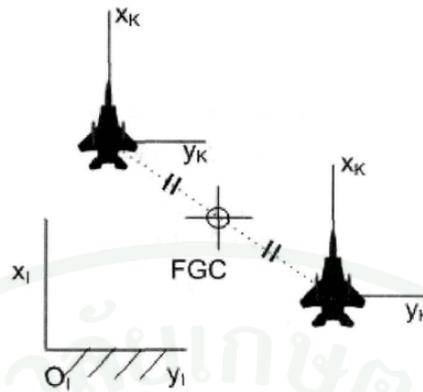
1. Leader-Follower Station Keeping เป็นวิธีนำทางมาตรฐาน ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Greg Larson มีงานตีพิมพ์จำนวนมากที่เขียนเกี่ยวกับวิธีนี้ อาทิ งานตีพิมพ์ของ Hummel ซึ่งถูก

ปรับปรุงต่อมาโดย Lavretsky และ Guilietti ตามโปรแกรม AFF ของ NASA วิธีนี้เป็นวิธีนำทางที่ ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถนำไปใช้ในการบินหมู่ได้จริง ด้วยวิธีนี้อัลกอริทึมการควบคุมจะ พยายามรักษาตำแหน่งคงที่ให้สัมพันธ์กับอากาศยานอีกลำหนึ่งในรูปขบวน ตำแหน่งคงที่นี้จะถูก กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้วโดยใช้ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์หรือข้อมูลทางการทดลอง การรักษา ตำแหน่งมี 2 ประเภท คือ "Leader Mode" อากาศยานแต่ละลำจะรักษาตำแหน่งให้สัมพันธ์กับ อากาศยานที่ถูกกำหนดให้บินนำ และ "Front Mode" อากาศยานแต่ละลำจะรักษาตำแหน่งให้ สัมพันธ์กับตำแหน่งในกระแสมวลของอากาศยานที่บินอยู่ด้านหน้า อากาศยานที่บินอยู่ด้านหน้านี้ อาจจะเป็นอากาศยานที่บินนำของรูปขบวน (Formation Leader) ในเวลาเดียวกัน แต่ก็ไม่จำเป็น เสมอไปถ้าอากาศยานมีจำนวนมากกว่า 3 ลำขึ้นไป เนื่องจากเรากำลังถึงกระแสมวลของอากาศ ยานลำหน้า "Front Mode" จึงมีข้อดีมากกว่า และมีปัญหาน้อยกว่า "Leader Mode" อีกด้วย

2. Trajectory Tracking นี่เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งถูกนำเสนอโดย Greg Larson วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และเหมาะสมถ้ามีชุดของเส้นทางการบินที่แน่นอน โดยเส้นทางการบินของอากาศยานแต่ละลำจะ ถูกกำหนดไว้ด้วยเวลาที่สัมพันธ์กัน และอัลกอริทึมการควบคุมจะพยายามรักษาเส้นทางการบิน เหล่านั้น วิธีนี้ง่ายในการควบคุมและไม่ต้องการการวัดตำแหน่งสัมพันธ์ที่ถูกต้อง แต่ก็เป็วิธีที่ไม่ ยืดหยุ่นมากที่สุด

3. Formation Geometry Center แนวความคิดนี้มีพื้นฐานมาจากการสังเกตพฤติกรรมการ บินตามธรรมชาติของนกซึ่งรักษารูปทรงเรขาคณิต ถ้ามีนกหนึ่งตัวหรือมากกว่าสูญเสียตำแหน่งใน รูปขบวน ฟุ่งนกจะรอให้นกเหล่านั้นกลับเข้าร่วมในรูปขบวนอีกครั้ง เส้นทางการบินเดิมก็จะถูก เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอัลกอริทึมนี้จะพยายามรักษารูปทรงเรขาคณิต ในขณะที่เดียวกันก็บิน ไปตาม เส้นทางการบินที่กำหนดสำหรับอากาศยานแต่ละลำ ถ้าอากาศยานลำหนึ่งสูญเสียตำแหน่ง ฟุ่งบินจะรับรู้ และทำการฟื้นฟูรูปทรงเรขาคณิต จากนั้นก็จะกลับไปเคลื่อนที่ตามเส้นทางการบินที่ถูกต้อง วิธีนี้จึง รวมการบินตามเส้นทางกับแนวความคิดการแปรผันของการรักษาตำแหน่ง

Formation Geometry Center (FGC) เป็นจุดสมมุติที่ขึ้นอยู่กับปริพันธ์ของค่าเฉลี่ยของ ความเร็วในการบินหมู่ ทิศทาง และมุมของเส้นทางการบิน แนวความคิดจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิต นี้สามารถนำไปใช้ได้จริง แต่จะได้ผลลัพธ์ที่ดีในกรณีของการจำลองด้วยอากาศยานเพียง 2 ลำใน รูปแบบตัว V เท่านั้น



ภาพที่ 11 Formation Geometry Center

ที่มา: Jieun Lee (2008)

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ Guidance Approach แบบ Leader-Follower Station Keeping เนื่องจากสามารถนำไปใช้กับการบินหมู่ได้จริง มีความไม่ซับซ้อน และเหมาะกับการบินหมู่ของอากาศยานตั้งแต่ 3 ลำขึ้นไป

สำหรับการบินหมู่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ ในงานวิจัยเรื่อง “Formation flight autopilot design for the GAF Jindivik Mk 4A UAV” (Lancaster, 2004) ได้อธิบายถึงการพัฒนาระบบควบคุมการบินอัตโนมัติสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบ GAF Jindivik Mk 4A ให้ทำการบินหมู่ในตำแหน่งที่กำหนดซึ่งมีความสัมพันธ์กับอากาศยานไร้คนขับที่บินนำ งานวิจัยนี้ครอบคลุมถึงกระบวนการออกแบบและการทดสอบของระบบในการจำลองแบบไม่เชิงเส้น (Full Non-Linear)

ขั้นตอนการออกแบบประกอบด้วย

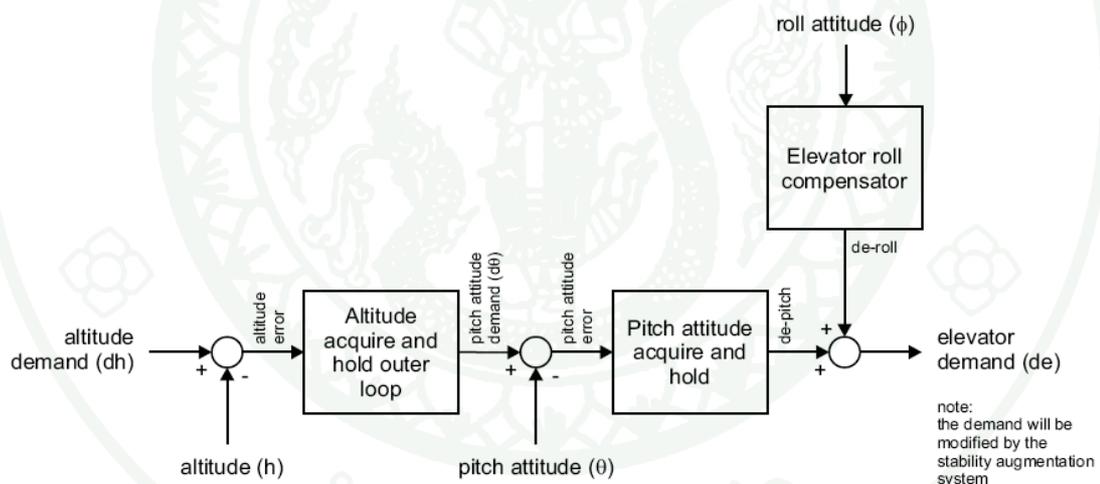
- 1) ปรับเปลี่ยนแบบจำลองของอากาศยานไร้คนขับให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิจัย โดยการหาที่ตั้งจุด Trim Point และการทำ Linearisation รอบจุดนั้น
- 2) ออกแบบลูปควบคุมระบบเพิ่มความเสถียร เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของลำตัวอากาศยาน
- 3) พัฒนาฟังก์ชันควบคุมการบินหมู่

4) นำรูปควบคุมภายนอกมาใช้

5) ทดสอบและประเมินผลในการจำลองแบบไม่เชิงเส้น

ฟังก์ชันควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ ได้แก่

1. Altitude Acquire and Hold Controller เป็นตัวควบคุมระดับความสูง ทำงานโดยใช้ลูปป้อนกลับคู่ (Dual Feedback Loop) และตัวป้อนเข้าล่วงหน้า (Single Feed Forward Path) ดังแสดงในภาพที่ 12 ในโครงสร้างนี้ ลูปป้อนกลับจะทำให้ค่าความผิดพลาดของระดับความสูงลดน้อยลง โดยการร้องขอค่ามุมยกที่เหมาะสมจากลูปป้อนกลับวงใน ซึ่งจะได้รับค่ามุมยกที่ต้องการผ่านการทำงานของ Elevator ส่วนตัวชดเชยการหมุนของ Elevator ซึ่งป้อนเข้าล่วงหน้าจะช่วยปรับปรุงความเร็วในการตอบสนองของตัวควบคุมเมื่ออากาศยานทำการเลี้ยว

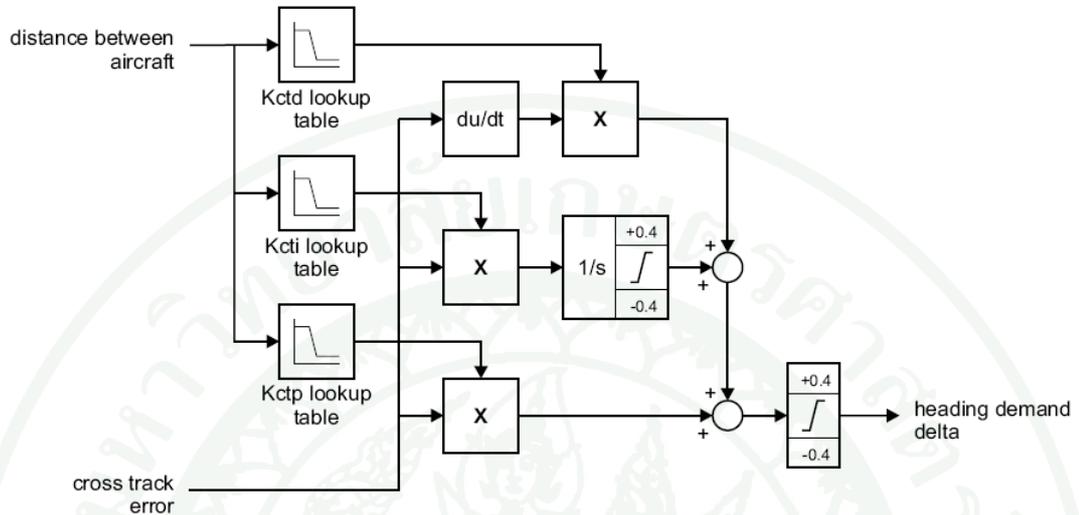


ภาพที่ 12 Block Diagram of the Altitude Acquire and Hold Controller

ที่มา: Lancaster (2004)

2. Cross Track Controller เป็นตัวควบคุมค่า Cross Track Error ให้มีค่าน้อยที่สุด ทำงานโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Root Locus การตอบสนองของระบบต่อตัวควบคุมสัดส่วนจะเกิดความไม่เสถียรสำหรับค่าเกน  $K_p$  น้อยๆ ดังนั้นเพื่อที่จะให้การ

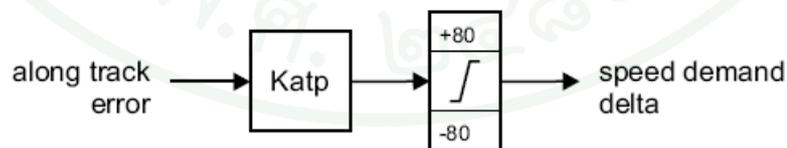
ตอบสนองดีที่สุดและเวลาเข้าที่เร็วที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ทั้งตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 Block Diagram of the Cross Track Error Minimisation Controller

ที่มา: Lancaster (2004)

3. Along Track Controller เป็นตัวควบคุมค่า Along Track Error ให้มีค่าน้อยที่สุด ทำงานโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ดังภาพที่ 14 ค่าความเร็วที่ตัวควบคุมสามารถเพิ่มให้กับอากาศยานถูกจำกัดไว้ที่ 80 ฟุตต่อวินาที ดังนั้นความเร็วสูงสุดระหว่างอากาศยานทั้งสองคือ 80 ฟุตต่อวินาที



ภาพที่ 14 Block Diagram of the Along Track Error Minimisation Controller

ที่มา: Lancaster (2004)

ระบบควบคุมถูกออกแบบและนำไปใช้ในการจำลองแบบไม่เชิงเส้นในสถานการณ์การบิน หมู่จริง ในแต่ละการจำลอง เส้นทางการบินของอากาศยานที่บินนำถูกสร้างขึ้นโดยใช้อากาศยานไร้ นักบินแบบ GAF Jindivik Mk 4A เป็นอากาศยานที่บินนำ เส้นทางการบินที่สร้างขึ้นนี้ถูกป้อน ให้กับระบบควบคุมการบินหมู่เพื่อดูว่าอากาศยานที่บินตามนั้นบินตามเส้นหรือไม่ และเมื่อปรับ ค่าปรับค่าแกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  และจำกัดค่าต่างๆ ของตัวควบคุมแล้ว อากาศยานทำการบินตามค่าที่ กำหนดหรือไม่

จากการออกแบบและการจำลองพบว่าระบบควบคุมสามารถบังคับอากาศยานไร้ นักบิน แบบ GAF Jindivik Mk 4A ให้บิน ไปยังจุดเป้าหมายการบินหมู่ซึ่งสัมพันธ์กับอากาศยานที่บินนำ แต่ยังมีข้อสังเกตบางประการ อาทิ

1. ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ตรวจจับและอุปกรณ์ขับเคลื่อนต้องไม่มีความล่าช้า (Zero Lag) แต่ในความเป็นจริงความล่าช้าของอุปกรณ์เหล่านี้ย่อมมีผลกับประสิทธิภาพในการบิน
2. สถานการณ์การบินหมู่ที่ได้รับการทดสอบและประเมินมีจำนวนที่จำกัด ซึ่งอาจจะมีส่วน สถานการณ์ที่ตัวควบคุมไม่สามารถจัดการได้ เช่น อากาศยาน 2 ลำบินตรงเข้าหากัน เป็นต้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. Router Modem Billion 4 ports จำนวน 1 ตัว
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook จำนวน 3 เครื่อง
3. โปรแกรม Microsoft Visual Studio 2008
4. โปรแกรม Microsoft Flight Simulator X
5. โปรแกรม Abacus UAV Predator for FSX
6. โปรแกรม FSUIPC 4.30
7. โปรแกรม Matlab R2008a

### วิธีการ

ปัจจุบันในอากาศยานไร้คนขับสมัยใหม่ รวมถึงอากาศยานไร้คนขับแบบ General Atomic MQ-1 Predator UAVs ดังกล่าวมีอุปกรณ์ช่วยการบินอัตโนมัติ ทำหน้าที่ควบคุมการบินให้มีเสถียรภาพทางการบิน ได้ทั้ง 3 แกน ได้แก่ Longitudinal Lateral และ Directional ทำให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอากาศยานไร้คนขับได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องทราบถึงค่าคุณลักษณะทั้งหมดและสมการการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับชนิดนั้นๆ ในการควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับผู้วิจัยจึงได้แบ่งระดับการควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ ดังนี้



ภาพที่ 15 UAVs Control Layer

1. User Interface Layer เป็นระดับของผู้ใช้งาน โดยผ่าน Graphic User Interface หรือ Application ต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นเพื่อความสะดวกในการบังคับควบคุมอากาศยานไร้คนขับ
2. Formation Flight Control Layer เป็นระดับของระบบควบคุมการบินหมู่ ในขั้นนี้จะมีการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณและประมวลผลคำสั่งจาก User Interface Layer เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับทุกลำบินตามรูปแบบการบินหมู่ที่กำหนด แล้วส่งผลลัพธ์ที่ได้เป็น Input ให้กับ Autopilot Layer ต่อไป
3. Autopilot Layer เป็นระดับของระบบช่วยการบินอัตโนมัติ ซึ่งถูกออกแบบตามค่าคุณลักษณะและสมการการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับชนิดนั้นๆ
4. Aircraft Control Surface Layer เป็นระดับของระบบและอุปกรณ์สำหรับบังคับควบคุมอากาศยานไร้คนขับ ได้แก่ Elevator Rudder Aileron Flap และ Actuator ต่างๆ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาในระดับ User Interface Layer และ Formation Flight Control Layer

## 1. User Interface Layer

1.1 คิดตั้งโปรแกรมสำหรับพัฒนาโปรแกรมควบคุมการบินหมู่และจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ ประกอบด้วยโปรแกรมต่อไปนี้

1.1.1 โปรแกรม Microsoft Visual Studio 2008 ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ด้วยภาษา C#

1.1.2 โปรแกรม Microsoft Flight Simulator X ใช้ในการจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ General Atomic MQ-1 Predator UAVs

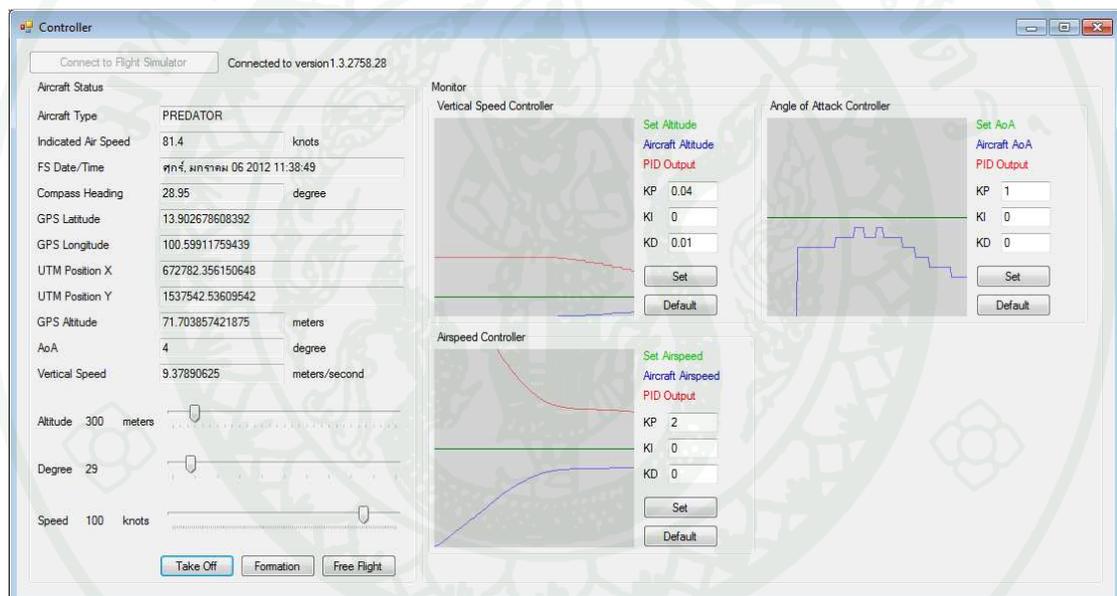
1.1.3 โปรแกรม Abacus UAV Predator for FSX ใช้ในการติดตั้งอากาศยานไร้คนขับ General Atomic MQ-1 Predator UAVs ลงบนโปรแกรม Microsoft Flight Simulator X

1.1.4 โปรแกรม FSUIPC 4.30 ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรม Microsoft Flight Simulator X

1.1.5 โปรแกรม Matlab R2008a ใช้ในการสร้างกราฟจากข้อมูลการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่ได้บันทึกไว้

1.2 พัฒนาโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ด้วยภาษา C# โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio 2008 โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโปรแกรมให้สามารถปรับค่าตัวแปรต่างๆ และคุณลักษณะแบบ Real-Time ในรูปของกราฟ

1.2.1 โปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 16 โปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ

1) ปุ่ม Connect to Flight Simulator ใช้สำหรับการเชื่อมต่อไปยังโปรแกรม Microsoft Flight Simulator

2) Aircraft Type แสดงประเภทของอากาศยานที่ทำการจำลองการบินหมู่

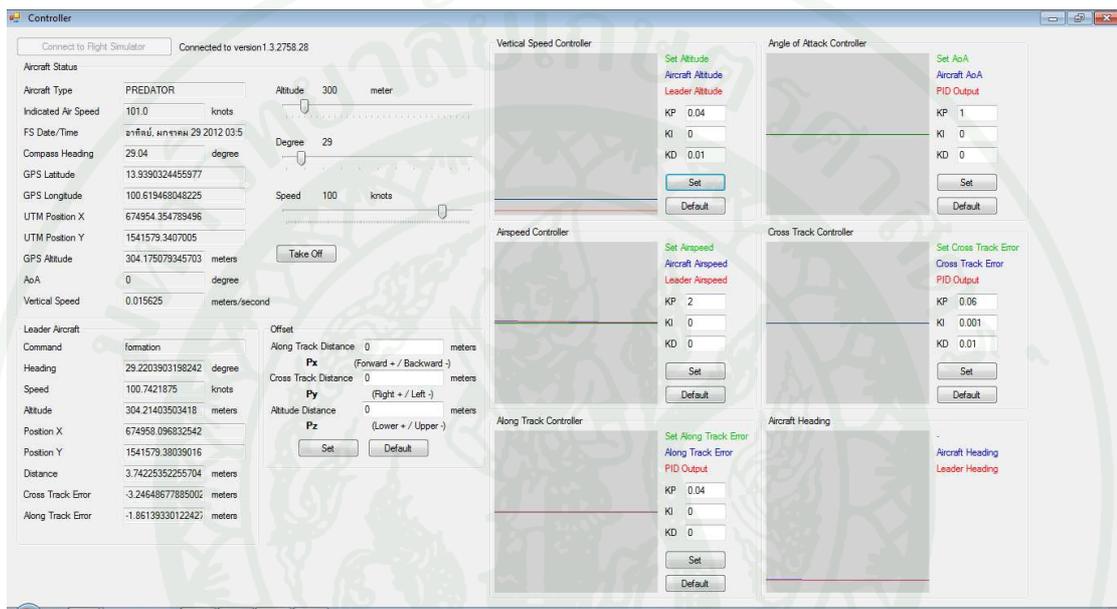
3) Indicated Air Speed แสดงความเร็วของอากาศยานมีหน่วยเป็น นอต

4) FS Date/Time แสดงวันและเวลาที่ทำการจำลองการบินหมู่

- 5) Compass Heading แสดงทิศทางของอากาศยานเทียบกับทิศเหนือของเข็มทิศ มีหน่วยเป็น องศา
- 6) GPS Latitude แสดงตำแหน่ง GPS Latitude ของอากาศยานบนระบบพิกัดภูมิศาสตร์ มีหน่วยเป็น ลิปดา
- 7) GPS Longitude แสดงตำแหน่ง GPS Longitude ของอากาศยานบนระบบพิกัดภูมิศาสตร์ มีหน่วยเป็น ลิปดา
- 8) UTM Position X แสดงตำแหน่ง X บนระบบพิกัดกริดแบบ UTM มีหน่วยเป็น เมตร
- 9) UTM Position Y แสดงตำแหน่ง Y บนระบบพิกัดกริดแบบ UTM มีหน่วยเป็น เมตร
- 10) GPS Altitude แสดงระดับความสูงของอากาศยาน มีหน่วยเป็น เมตร
- 11) AoA แสดงมุมปะทะของอากาศยาน มีหน่วยเป็น องศา
- 12) Vertical Speed แสดงอัตราเร็วในการไต่ของอากาศยาน มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที
- 13) แถบ Altitude ใช้สำหรับปรับระดับความสูงของอากาศยาน มีหน่วยเป็น เมตร
- 14) แถบ Degree ใช้สำหรับปรับทิศทางของอากาศยาน มีหน่วยเป็น องศา
- 15) แถบ Speed ใช้สำหรับปรับความเร็วของอากาศยาน หน่วยเป็น นอต
- 16) ปุ่ม Take-Off ใช้สำหรับสั่งให้อากาศยานทุกลำทำการ Take-Off
- 17) ปุ่ม Formation ใช้สำหรับสั่งให้อากาศยานทุกลำทำการบินหมู่ตามรูปแบบที่กำหนด
- 18) ปุ่ม Free Flight ใช้สำหรับสั่งให้อากาศยานทุกลำสามารถบินได้อย่างอิสระ (ยกเลิกคำสั่งการบินหมู่)
- 19) กราฟ Vertical Speed Controller แสดงค่าระดับความสูงที่ตั้งไว้เทียบกับระดับความสูงที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 20) กราฟ Angle of Attack Controller แสดงค่ามุมปะทะสูงสุดที่ตั้งไว้เทียบกับมุมปะทะที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 21) กราฟ Airspeed Controller แสดงค่าความเร็วที่ตั้งไว้เทียบกับความเร็วที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 22)  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ของแต่ละตัวควบคุมใช้สำหรับปรับค่าเกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ของแต่ละตัวควบคุม

- 23) ปุ่ม Set ใช้สำหรับตั้งค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ให้กับตัวควบคุมตามที่กำหนดไว้
- 24) ปุ่ม Default ใช้สำหรับตั้งค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ให้กลับมาเป็นค่าเริ่มต้น

1.2.2 โปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนบินที่บินตามประกอบด้วย ส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 17 โปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม

- 1) ปุ่ม Connect to Flight Simulator ใช้สำหรับการเชื่อมต่อไปยังโปรแกรม Microsoft Flight Simulator
- 2) Aircraft Type แสดงประเภทของอากาศยานที่ทำการจำลองการบินหมู่
- 3) Indicated Air Speed แสดงความเร็วของอากาศยาน มีหน่วยเป็น นอต
- 4) FS Date/Time แสดงวันและเวลาที่ทำการจำลองการบินหมู่
- 5) Compass Heading แสดงทิศทางของอากาศยานเทียบกับทิศเหนือของเข็มทิศ มีหน่วยเป็น องศา
- 6) GPS Latitude แสดงตำแหน่ง GPS Latitude ของอากาศยานบนระบบพิกัดภูมิศาสตร์ มีหน่วยเป็น ลิปดา

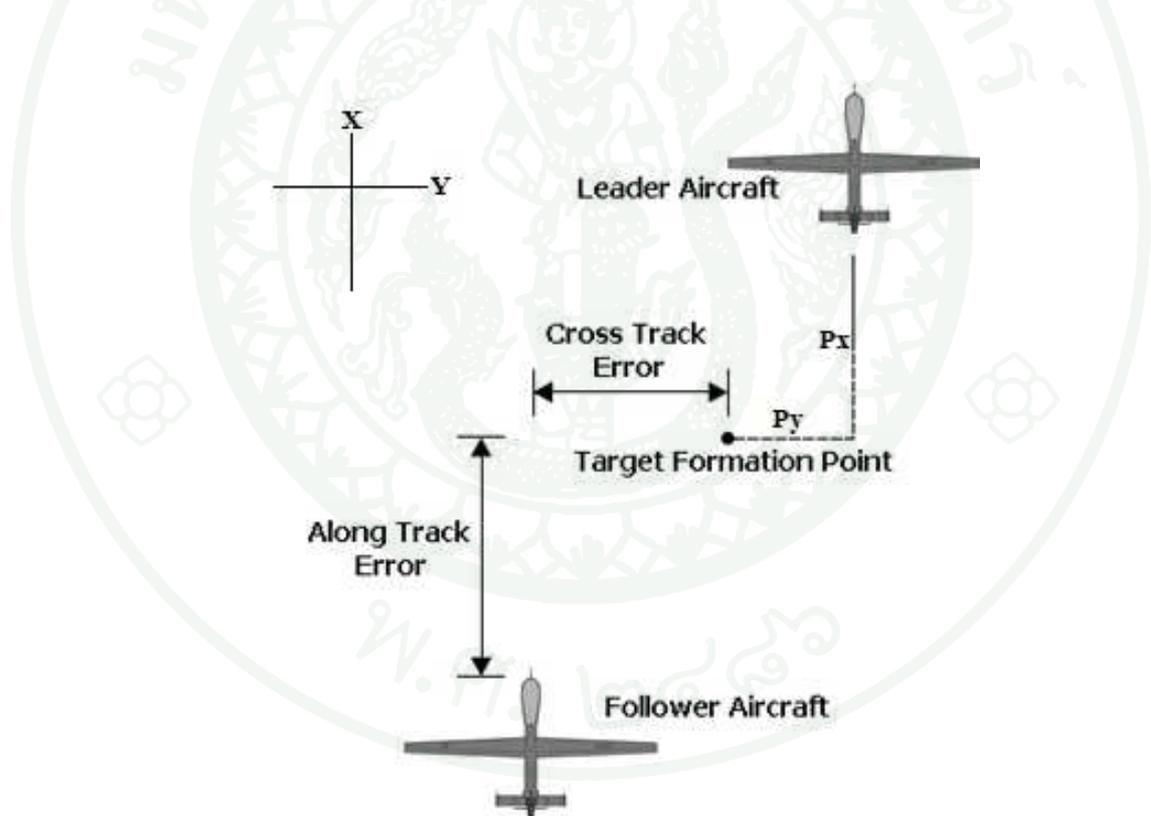
- 7) GPS Longitude แสดงตำแหน่ง GPS Longitude ของอากาศยานบนระบบพิกัดภูมิศาสตร์ มีหน่วยเป็น ลิปดา
- 8) UTM Position X แสดงตำแหน่ง X บนระบบพิกัดกริดแบบ UTM มีหน่วยเป็น เมตร
- 9) UTM Position Y แสดงตำแหน่ง Y บนระบบพิกัดกริดแบบ UTM มีหน่วยเป็น เมตร
- 10) GPS Altitude แสดงระดับความสูงของอากาศยาน มีหน่วยเป็น เมตร
- 11) AoA แสดงมุมปะทะของอากาศยาน มีหน่วยเป็น องศา
- 12) Vertical Speed แสดงอัตราเร็วในการไต่ของอากาศยาน มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที
- 13) Command แสดงคำสั่งที่ได้รับจากอากาศยานที่บินนำ
- 14) Heading แสดงทิศทางของอากาศยานที่บินนำ มีหน่วยเป็น องศา
- 15) Speed แสดงความเร็วของอากาศยานที่บินนำ มีหน่วยเป็น นอต
- 16) Altitude แสดงระดับความสูงของอากาศยานที่บินนำ มีหน่วยเป็น เมตร
- 17) Position X แสดงตำแหน่ง X ของอากาศยานที่บินนำบนระบบพิกัดกริดแบบ UTM มีหน่วยเป็น เมตร
- 18) Position Y แสดงตำแหน่ง Y ของอากาศยานที่บินนำบนระบบพิกัดกริดแบบ UTM มีหน่วยเป็น เมตร
- 19) Distance แสดงระยะห่างระหว่างอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น มีหน่วยเป็น เมตร
- 20) Cross Track Error แสดงค่า Cross Track Error ระหว่างอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น มีหน่วยเป็น เมตร
- 21) Along Track Error แสดงค่า Along Track Error ระหว่างอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น มีหน่วยเป็น เมตร
- 22) แถบ Altitude ใช้สำหรับปรับระดับความสูงของอากาศยาน มีหน่วยเป็น เมตร
- 23) แถบ Degree ใช้สำหรับปรับทิศทางของอากาศยาน มีหน่วยเป็น องศา
- 24) แถบ Speed ใช้สำหรับปรับความเร็วของอากาศยาน หน่วยเป็น นอต
- 25) ปุ่ม Take-Off ใช้สำหรับสั่งให้อากาศยานลำนั้นทำการ Take-Off
- 26) Along Track Distance ใช้สำหรับตั้งค่า Along Track Distance ระหว่างอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น มีหน่วยเป็น เมตร

- 27) Cross Track Distance ใช้สำหรับตั้งค่า Cross Track Distance ระหว่างอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น มีหน่วยเป็น เมตร
- 28) Altitude Distance ใช้สำหรับตั้งค่า Altitude Distance ระหว่างอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น มีหน่วยเป็น เมตร
- 29) ปุ่ม Set ใช้สำหรับตั้งค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ตามที่กำหนดไว้
- 30) ปุ่ม Default ใช้สำหรับตั้งค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ให้กลับเป็นค่าเริ่มต้น
- 31) กราฟ Vertical Speed Controller แสดงค่าระดับความสูงที่ตั้งไว้เทียบกับระดับความสูงที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 32) กราฟ Angle of Attack Controller แสดงค่ามุมปะทะสูงสุดที่ตั้งไว้เทียบกับมุมปะทะที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 33) กราฟ Airspeed Controller แสดงค่าความเร็วที่ตั้งไว้เทียบกับความเร็วที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 34) กราฟ Cross Track Controller แสดงค่า Cross Track Error ที่ตั้งไว้เทียบกับ Cross Track Error ที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 35) กราฟ Along Track Controller แสดงค่า Along Track Error ที่ตั้งไว้เทียบกับ Along Track Error ที่แท้จริงของอากาศยานและค่า PID Output
- 36) กราฟ Aircraft Heading แสดงค่าทิศทางของอากาศยานที่บินนำและอากาศยานที่บินตามลำนั้น
- 37)  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ของแต่ละตัวควบคุมใช้สำหรับปรับค่าเกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ของแต่ละตัวควบคุม
- 38) ปุ่ม Set ใช้สำหรับตั้งค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ให้กับตัวควบคุมตามที่กำหนดไว้
- 39) ปุ่ม Default ใช้สำหรับตั้งค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ให้กลับเป็นค่าเริ่มต้น

## 2. Formation Flight Control Layer

การควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การควบคุมทิศทาง การควบคุมระดับความสูง และการควบคุมความเร็ว โดยอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม (Follower Aircraft) ต้องสามารถรักษารูปแบบการบินหมู่ด้วยทิศทาง ระดับความสูง ความเร็ว และตำแหน่งให้สัมพันธ์กับอากาศยานไร้คนขับที่บินนำ (Leader Aircraft) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าว เรียกว่า จุดเป้าหมายการบินหมู่ (Target Formation Point)

ค่าความผิดพลาดระหว่างจุดเป้าหมายการบินหมู่และตำแหน่งที่แท้จริงของอากาศยานไร้คนขับที่บินตามสามารถแยกเป็น 2 องค์ประกอบ ได้แก่ ตามแนวแกน Lateral Axis เรียกว่า Cross Track Error และตามแนวแกน Longitudinal Axis เรียกว่า Along Track Error ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 Cross Track Error และ Along Track Error

ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับสามารถคำนวณได้จากพิกัดตำแหน่ง GPS Latitude และ GPS Longitude ของอากาศยานไร้คนขับแต่ละลำ แต่ค่าดังกล่าวไม่สามารถนำมาคำนวณค่า

Cross Track Error และ Along Track Error ได้ จึงจำเป็นต้องแปลงพิกัดตำแหน่งดังกล่าวให้อยู่ในระบบพิกัดกริดแบบ UTM ด้วยสมการการฉายแผนที่ของ Transverse Mercator ก่อน จากนั้นนำค่า X และ Y ที่ได้นี้มาคำนวณด้วยสมการการแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) เพื่อสร้างเป็นสมการ Cross Track Error และ Along Track Error ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & t_x \cos\theta - t_y \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & t_x \sin\theta + t_y \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cos\theta - Y \sin\theta + t_x \cos\theta - t_y \sin\theta \\ X \sin\theta + Y \cos\theta + t_x \sin\theta + t_y \cos\theta \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X + t_x) \cos\theta - (Y + t_y) \sin\theta \\ (X + t_x) \sin\theta + (Y + t_y) \cos\theta \\ 1 \end{bmatrix}$$

จะได้

$$X' = (X + t_x) \cos\theta - (Y + t_y) \sin\theta$$

$$Y' = (X + t_x) \sin\theta + (Y + t_y) \cos\theta$$

โดยที่

$t_x$  และ  $t_y$  คือการเลื่อนขนานของจุดศูนย์กลางมวลของโลก คำนวณได้จาก

$$t_x = O_x - O'_x$$

$$t_y = O_y - O'_y$$

X และ Y คือพิกัดตำแหน่ง X และ Y ในระบบพิกัดกริด UTM ของอากาศยานไร่นักบินที่บินตาม  $X'$  และ  $Y'$  คือพิกัดตำแหน่ง X และ Y ของอากาศยานไร่นักบินที่บินตาม อ้างอิงกับตำแหน่งของอากาศยานไร่นักบินที่บินนำ

๐ คือค่ามุมทิศทางของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำอ้างอิงจากทิศเหนือของเข็มทิศ มีหน่วยเป็น องศา

$O_x$  และ  $O_y$  คือพิกัดตำแหน่ง X และ Y ของจุดศูนย์กลางมวลของโลก ซึ่งทั้งสองค่ามีค่าเท่ากับ 0

$O'_x$  และ  $O'_y$  คือพิกัดตำแหน่ง X และ Y ในระบบพิกัดกริด UTM ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ จะได้

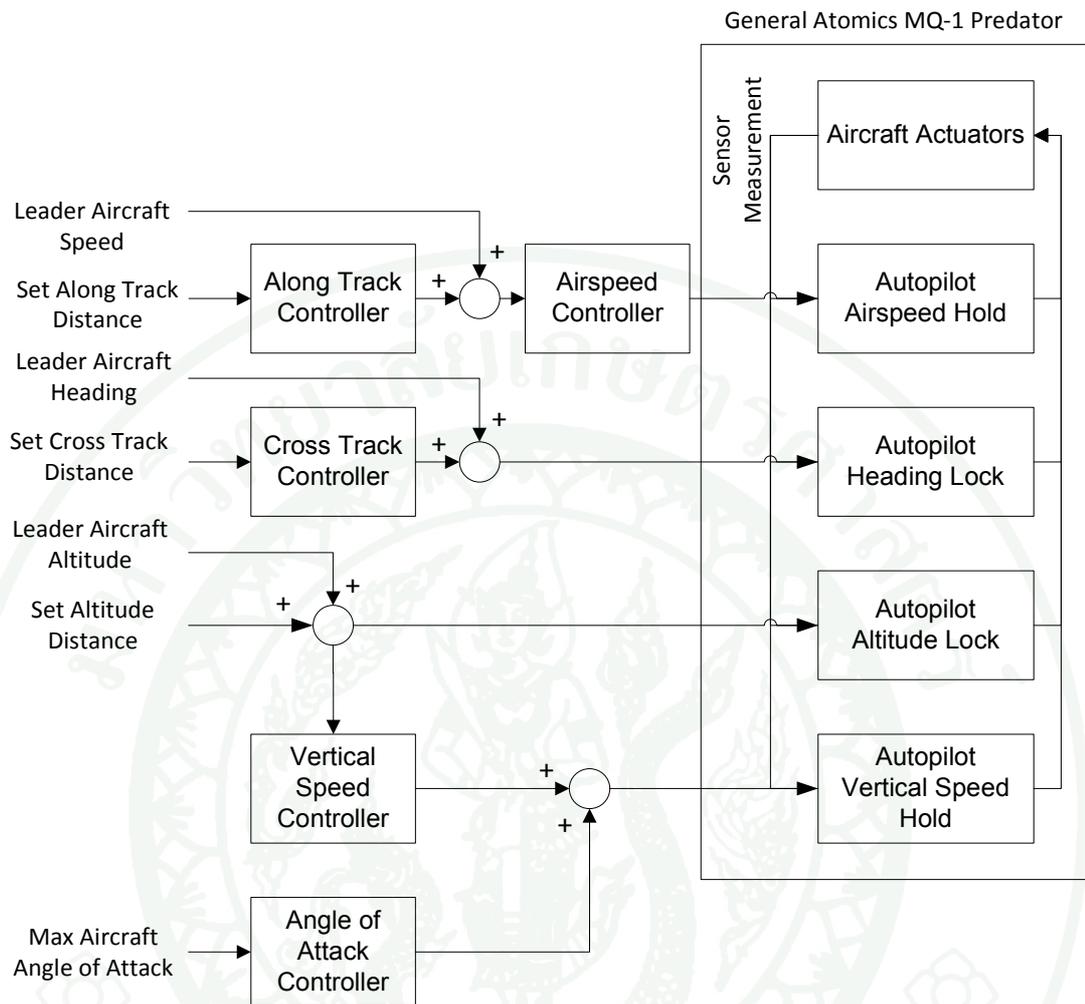
$$\begin{aligned} \text{Cross Track Error} &= X' - P_y \\ &= ((X + t_x)\cos\theta - (Y + t_y)\sin\theta) - P_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Along Track Error} &= Y' - P_x \\ &= ((X + t_x)\sin\theta + (Y + t_y)\cos\theta) - P_x \end{aligned}$$

โดยที่

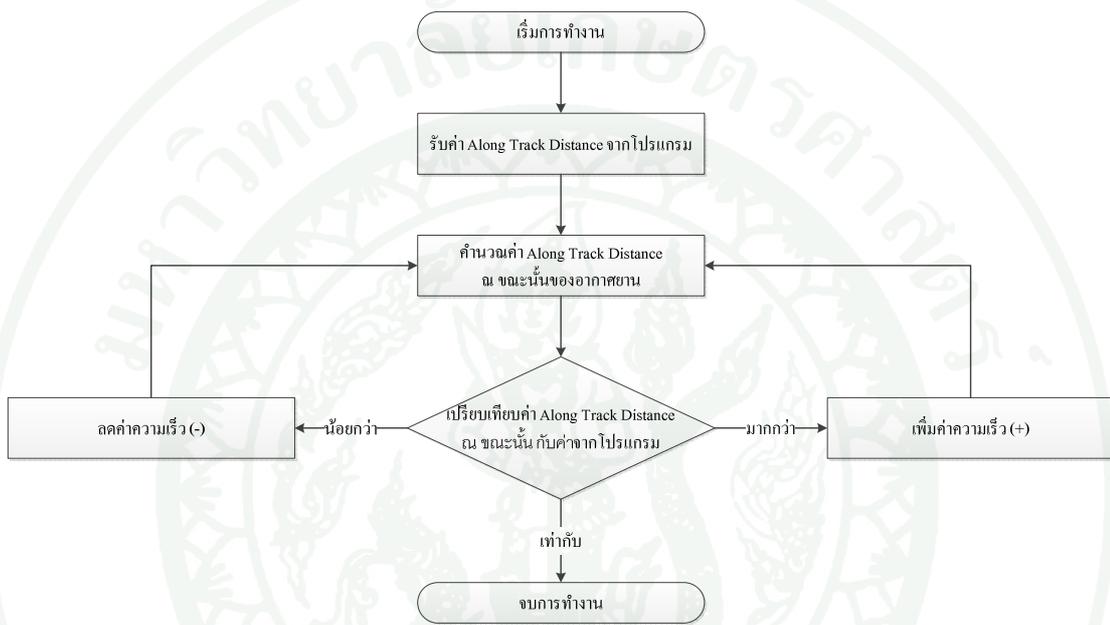
$P_x$  และ  $P_y$  คือพิกัดตำแหน่ง X และ Y ของ Target Formation Point อ้างอิงกับ Body-Fixed Frame ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ

เมื่ออากาศยานไร้คนบินที่บินตามสามารถหาค่า Cross Track Error และ Along Track Error ได้แล้ว จึงทำการออกแบบระบบควบคุมการบินหมู่เพื่อทำให้ค่า Cross Track Error และ Along Track Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังภาพที่ 19 ระบบควบคุมการบินหมู่จะประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอดี ดังนี้



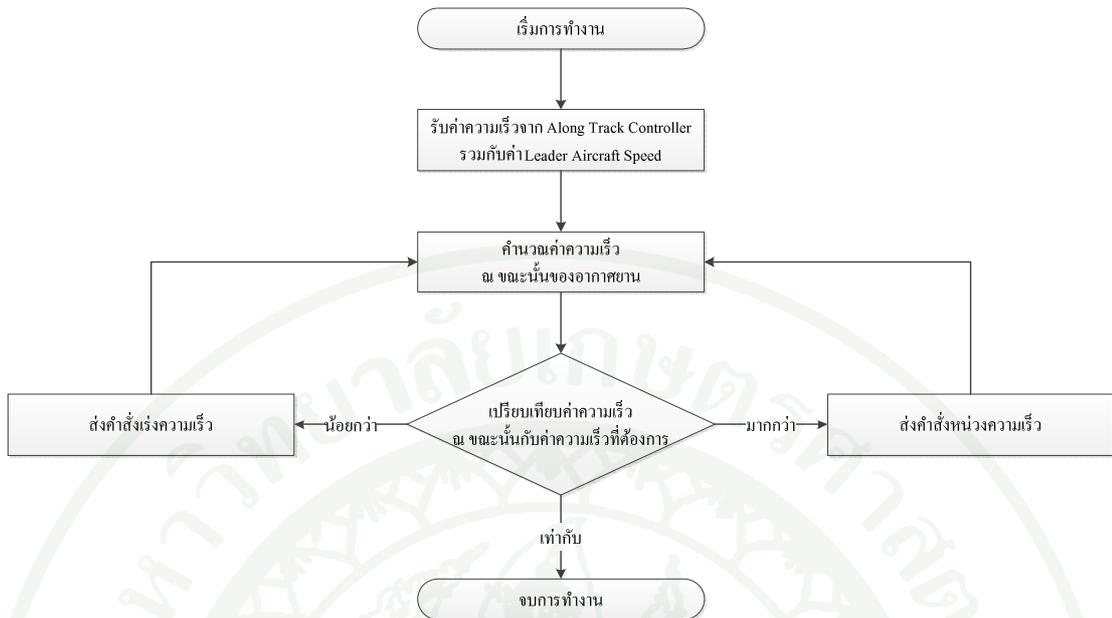
ภาพที่ 19 Block Diagram ของระบบควบคุมการบินหมู่

1. Along Track Controller มีหน้าที่ปรับค่า Along Track Error ให้เข้าใกล้ศูนย์ มี Input คือ ระยะห่างระหว่างจุดเป้าหมายการบินหมูกับอากาศยาน ไร่นักบินที่บินนำตามแนวแกน Longitudinal Axis หรือ Along Track Distance ที่ได้ตั้งค่าไว้ใน โปรแกรมควบคุมการบินหมูก มี Output คือ ค่าความเร็วซึ่งจะนำไปเพิ่มหรือลดจากค่าความเร็วของอากาศยาน ไร่นักบินที่บินนำ หรือ Leader Aircraft Speed มีกระบวนการทำงานดังนี้

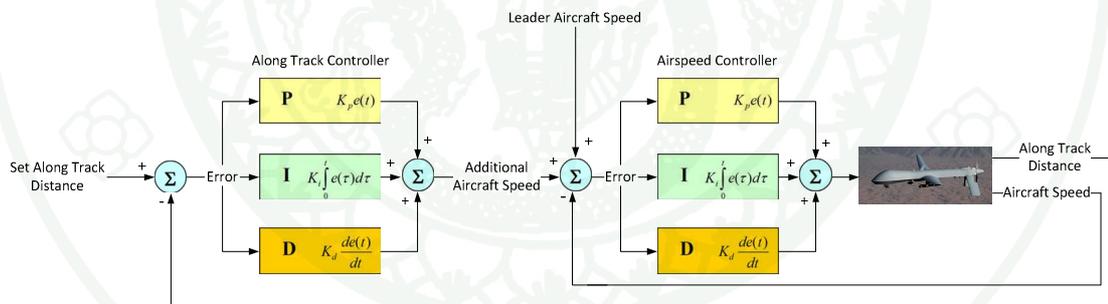


ภาพที่ 20 กระบวนการทำงานของ Along Track Controller

2. Airspeed Controller มีหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศยาน ไร่นักบินให้เท่ากับค่าความเร็วที่ต้องการ มี Input คือ ผลรวมของค่าความเร็วที่ได้จาก Along Track Controller และค่าความเร็วของอากาศยาน ไร่นักบินที่บินนำ หรือ Leader Aircraft Speed มี Output คือ ค่าตั้งซึ่งจะป้อนให้กับ Autopilot Airspeed Hold เพื่อให้อากาศยาน ไร่นักบินเร่งความเร็วตามที่ต้องการ มีกระบวนการทำงานดังนี้

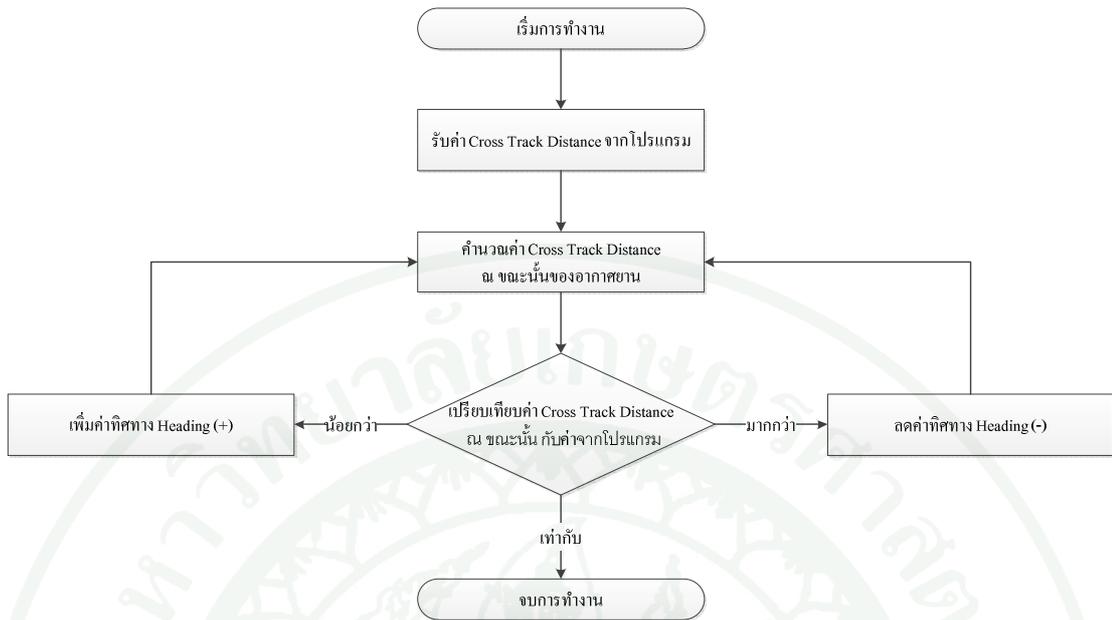


ภาพที่ 21 กระบวนการทำงานของ Airspeed Controller

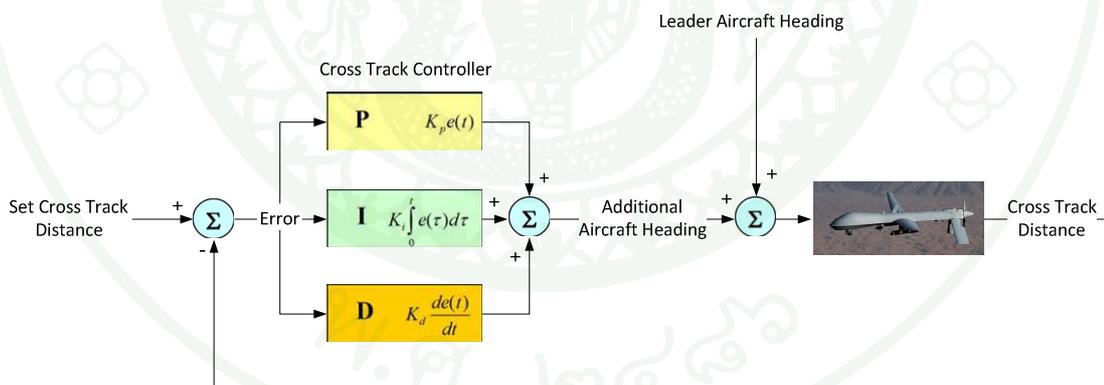


ภาพที่ 22 Along Track Controller และ Airspeed Controller

3. Cross Track Controller มีหน้าที่ปรับค่า Cross Track Error ให้เข้าใกล้ศูนย์ มี Input คือ ระยะห่างระหว่างจุดเป้าหมายการบินหมูกับอากาศยาน ไร่นักบินที่บินนำตามแนวแกน Lateral Axis หรือ Cross Track Distance ที่ได้ตั้งค่าไว้ใน โปรแกรมควบคุมการบินหมูก มี Output คือ ค่า ทิศทาง ซึ่งจะนำไปเพิ่มหรือลดจากค่าทิศทางของอากาศยาน ไร่นักบินที่บินนำ หรือ Leader Aircraft Heading เพื่อป้อนให้กับ Autopilot Heading Lock มีกระบวนการทำงานดังนี้



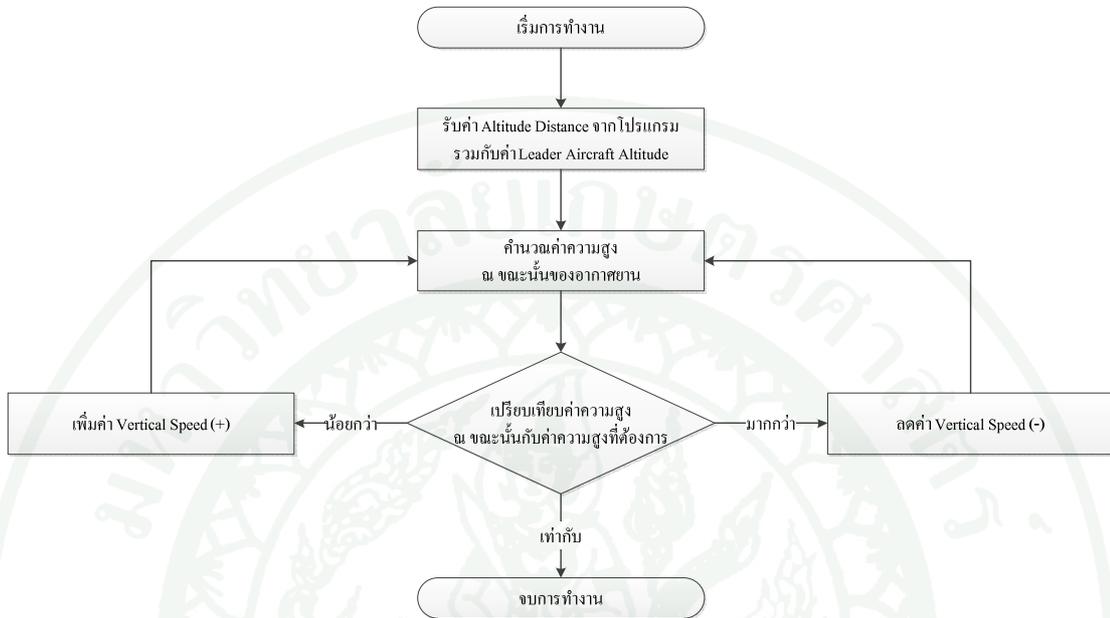
ภาพที่ 23 กระบวนการทำงานของ Cross Track Controller



ภาพที่ 24 Cross Track Controller

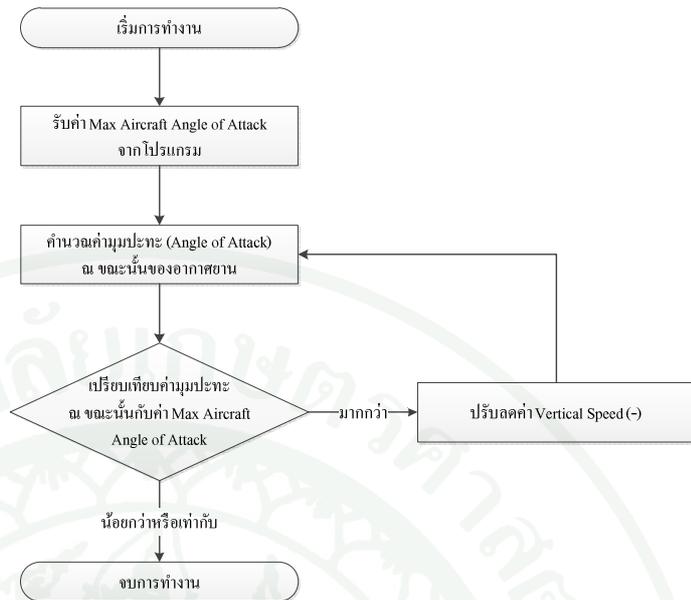
4. Vertical Speed Controller มีหน้าที่ปรับค่า Aircraft Vertical Speed ทำให้อากาศยาน ไร่นักบินสามารถบินไปยังระดับความสูงที่ต้องการได้เร็วขึ้น มี Input คือ ผลรวมของระยะห่างระหว่างจุดเป้าหมายการบินหมุ่กับอากาศยาน ไร่นักบินที่บินนำตามแนวแกน Vertical Axis หรือ Altitude Distance ที่ได้ตั้งค่าไว้ใน โปรแกรมควบคุมการบินหมุ่และค่าระดับความสูงของอากาศยาน

ไรรันนักบินที่บินนำ มี Output คือค่า Aircraft Vertical Speed เพื่อป้อนให้กับ Autopilot Vertical Speed Hold มีกระบวนการทำงานดังนี้

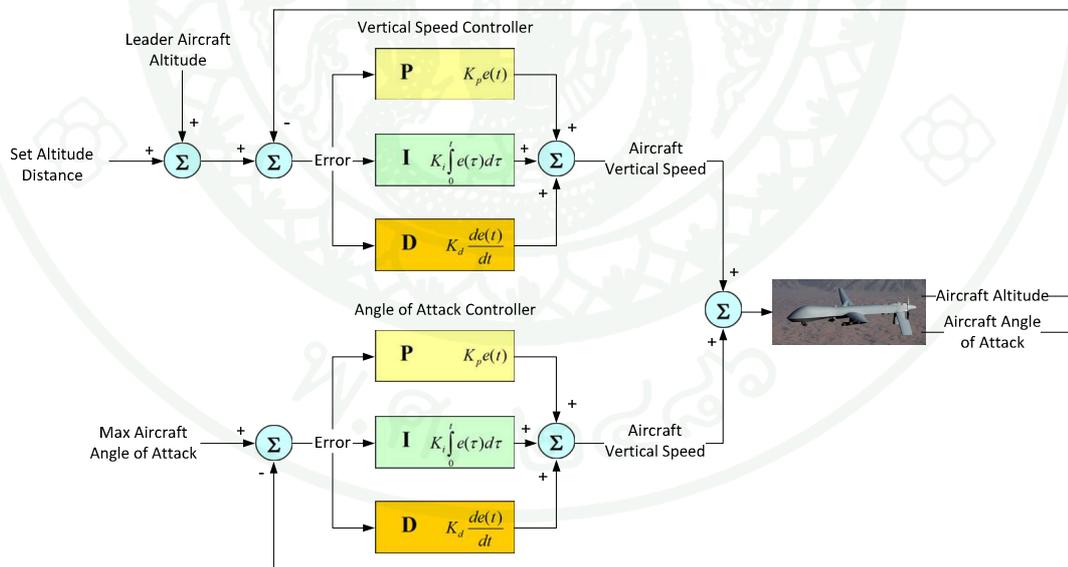


ภาพที่ 25 กระบวนการทำงานของ Vertical Speed Controller

5. Angle of Attack Controller มีหน้าที่ปรับค่า Aircraft Vertical Speed ให้เหมาะสม เนื่องจากค่า Aircraft Vertical Speed ที่ได้จาก Vertical Speed Controller อาจมีค่ามากเกินไปจนทำให้อากาศยานไรรันนักบินมีมุมปะทะสูงจนอากาศยานไรรันนักบินเกิดอาการร่วงหล่นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เพิ่มตัวควบคุมนี้เพื่อป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าว Angle of Attack Controller มี Input คือ ค่ามุมปะทะสูงสุดที่อากาศยานไรรันนักบินยังไม่เกิดอาการร่วงหล่น (Max Aircraft Angle of Attack) จากการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสม คือ 10 องศา มี Output คือ ค่า Aircraft Vertical Speed ซึ่งค่านี้จะไปปรับ Aircraft Vertical Speed ที่ได้จาก Vertical Speed Controller ให้เหมาะสมก่อนป้อนให้กับ Autopilot Vertical Speed Hold มีกระบวนการทำงานดังนี้



ภาพที่ 26 กระบวนการทำงานของ Angle of Attack Controller



ภาพที่ 27 Vertical Speed Controller และ Angle of Attack Controller

ในการควบคุมระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบิน Autopilot Vertical Speed Hold จะทำงานร่วมกับ Autopilot Altitude Lock ซึ่งได้รับ Input คือ ผลรวมของระยะห่างระหว่างจุดเป้าหมายการบินหมุ่กับอากาศยานไร้คนบินที่บินนำตามแนวแกน Vertical Axis หรือ Altitude Distance ที่ได้ตั้งค่าไว้ในโปรแกรมควบคุมการบินหมุ่และค่าระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ เช่นเดียวกับ Vertical Speed Controller เพื่อให้อากาศยานไร้คนบินสามารถบินไปยังระดับความสูงที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

หลังจากออกแบบระบบควบคุมการบินหมุ่ด้วยตัวควบคุมพีไอดีข้างต้นแล้ว เพื่อให้ตัวควบคุมพีไอดีสามารถทำงานได้และมีระยะเวลาในการตอบสนองตามที่ต้องการ ผู้วิจัยจึงทำการปรับจูนค่าเกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ของตัวควบคุมพีไอดีทุกตัวด้วยวิธี Trial-and-Error Method โดยขั้นแรกให้ตั้งค่า  $K_i$  และ  $K_d$  เป็นศูนย์ เพิ่มค่า  $K_p$  จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (Oscillate) แล้วตั้งค่า  $K_p$  ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด Quarter Amplitude Decay แล้วเพิ่ม  $K_i$  จนกระทั่งออฟเซตถูกต้องในเวลาเพียงพอของกระบวนการ แต่ถ้า  $K_i$  มากไปจะทำให้ไม่เสถียร สุดท้ายถ้าต้องการ ให้เพิ่มค่า  $K_d$  จนกระทั่งลู่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ถ้า  $K_d$  มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนองและโอเวอร์ชูตเกินยอมรับได้ ทำการปรับจูนเช่นนี้กับตัวควบคุมพีไอดีทุกตัวจนได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งค่าพื้นฐานที่ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมควบคุมการบินหมุ่ ดังนี้

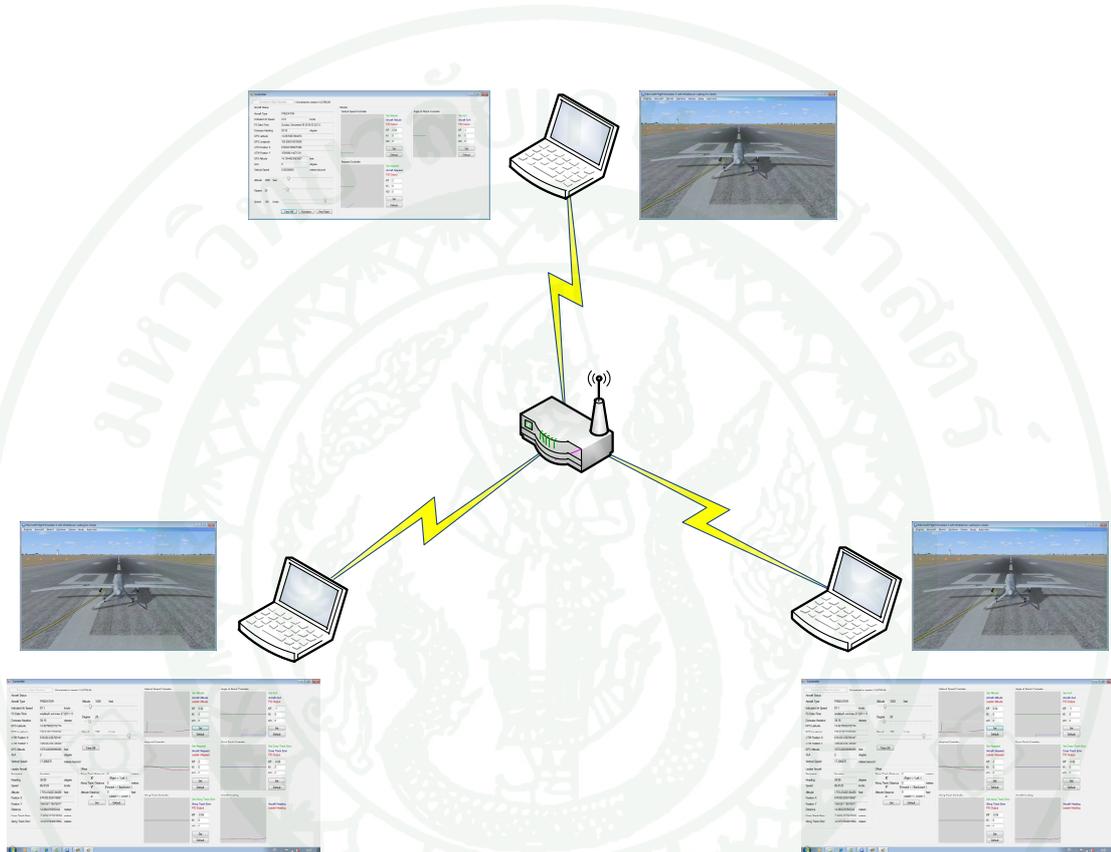
**ตารางที่ 1** ค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  เริ่มต้นของตัวควบคุมพีไอดีในระบบควบคุมการบินหมุ่

ตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Along Track Controller	0.04	0	0
Airspeed Controller	2	0	0
Cross Track Controller	0.06	0.001	0.01
Vertical Speed Controller	0.04	0	0.01
Angle of Attack Controller	1	0	0

### 3. การจำลองการบินหมุ่ของอากาศยานไร้คนบินด้วยคอมพิวเตอร์

ผู้วิจัยทำการจำลองการบินหมุ่ของอากาศยานไร้คนบินด้วยคอมพิวเตอร์จำนวน 3 เครื่อง ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสัญญาณเครือข่ายไร้สาย โดยคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะเปิดใช้งานโปรแกรม

Microsoft Flight Simulator X ในโหมด Multiplayer และเปิดใช้งานโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ที่พัฒนาขึ้น อากาศยานไร้คนบินที่บินนำจะส่งชุดคำสั่งด้วย UDP Protocol ไปยังอากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำ ดังภาพที่ 28 โปรแกรมควบคุมการบินหมู่จะทำการประมวลผลและส่งค่าให้กับตัวควบคุมพีไอดีข้างต้นเพื่อควบคุมให้อากาศยานไร้คนบินที่บินตามสามารถทำการบินหมู่โดยมีทิศทาง ระดับความสูง ความเร็ว และตำแหน่งให้สัมพันธ์กับอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ



ภาพที่ 28 การจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบิน

ผู้วิจัยได้จำลองการบินหมู่ในการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การทดลอง Take-Off ของอากาศยานไร้คนบินทุกลำพร้อมกัน โดยรับคำสั่งจากอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ ไปยังระดับความสูง 300 เมตร ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1.1 เปิดใช้งานโปรแกรม Microsoft Flight Simulator X ในโหมด Multiplayer โดยกำหนดให้อากาศยานไร้คนบินทุกลำจะอยู่ที่สนามบินและบนทางวิ่งเดียวกัน

- 1.2 เปิดใช้งานโปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนขับที่บินนำ
- 1.3 เปิดใช้งานโปรแกรมควบคุมการบินหมู่สำหรับอากาศยานไร้คนขับที่บินตามทุกลำ
- 1.4 ปรับแถบ Altitude บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำไปที่ 300 เมตร
- 1.5 กดปุ่ม Take-Off บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำ
- 1.6 สังเกตและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและอากาศยานไร้คนขับที่บินตามทุกลำ

2. การทดลองส่งคำสั่ง Formation และกำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ให้อากาศยานไร้คนขับทำการบินหมู่เป็นรูปทรงต่างๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

2.1 กำหนดค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ให้กับโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับทำการบินหมู่เป็นรูปทรงต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

**ตารางที่ 2** ค่า Along Track Distance ( $P_x$ ) Cross Track Distance ( $P_y$ ) และ Altitude Distance ( $P_z$ ) ของอากาศยานไร้คนขับที่บินตาม

รูปทรงการบินหมู่	Follower1			Follower2		
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$P_x$	$P_y$	$P_z$
รูปทรงตัววี	-30	-30	0	-30	30	0
รูปแถวหน้ากระดาน	0	-30	0	0	30	0
รูปแนวทะแยง	-30	-30	0	30	30	0
รูปแถวตอนเรียงหนึ่ง	-30	0	0	30	0	0
รูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง	0	-30	152.4	0	30	-152.4

2.2 กดปุ่ม Set เพื่อตั้งค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ตามที่กำหนดไว้

2.3 กดปุ่ม Formation บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำเพื่อส่งคำสั่งให้อากาศยานไร้คนขับที่บินตามทุกลำทำการบินหมู่ตามค่าที่ได้ตั้งไว้

2.4 สังเกตและบันทึกตำแหน่งของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำ

2.5 ปรับเปลี่ยนค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ให้กับโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม เพื่อให้อากาศยานไร้คนบินทำการบินหมู่เป็นรูปทรงต่างๆ

2.6 กดปุ่ม Set เพื่อตั้งค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ตามที่กำหนดไว้

2.7 กดปุ่ม Default ในกรณีที่ต้องการตั้งค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ให้กลับเป็นค่าเริ่มต้น

2.8 สังเกตและบันทึกตำแหน่งของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำ

3. การทดลองปรับเปลี่ยนระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบินจาก 300 เมตร เป็น 600 เมตร ตามขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 ปรับแถบ Altitude บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำจาก 300 เมตร เป็น 600 เมตร

3.2 สังเกตและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำ

4. การทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศยานไร้คนบินจาก 80 นอต เป็น 100 นอต ตามขั้นตอนต่อไปนี้

4.1 ปรับแถบ Speed บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำจาก 80 นอต เป็น 100 นอต

4.2 สังเกตและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำ

5. การทดลองปรับเปลี่ยนทิศทางของอากาศยานไร้คนบิน จาก 29 องศา เป็น 102 องศา ตามขั้นตอนต่อไปนี้

5.1 ปรับแถบ Degree บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินนำ จาก 29 องศา เป็น 102 องศา

5.2 สังเกตและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงทิศทางของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินนำและอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามทุกลำ

6. การทดลองส่งคำสั่งให้อากาศยาน ไร้คนบังคับที่กำลังทำการบินหมู่สามารถบินได้อย่างอิสระ และส่งคำสั่งให้อากาศยาน ไร้คนบังคับทุกลำกลับมาทำการบินหมู่เหมือนเดิม ตามขั้นตอนต่อไปนี้

6.1 กดปุ่ม Free Flight บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินนำ

6.2 ปรับแถบ Altitude Speed และ Degree บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินนำ

6.3 สังเกตและบันทึกผลค่า Cross Track Error และ Along Track Error กราฟของ Cross Track Controller และกราฟของ Along Track Controller ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามทุกลำ

6.4 กดปุ่ม Formation บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินนำ เพื่อส่งคำสั่งให้อากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามทุกลำกลับทำการบินหมู่เหมือนเดิม

6.5 สังเกตและบันทึกผลค่า Cross Track Error และ Along Track Error กราฟของ Cross Track Controller และกราฟของ Along Track Controller ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามทุกลำ

## ผลและวิจารณ์

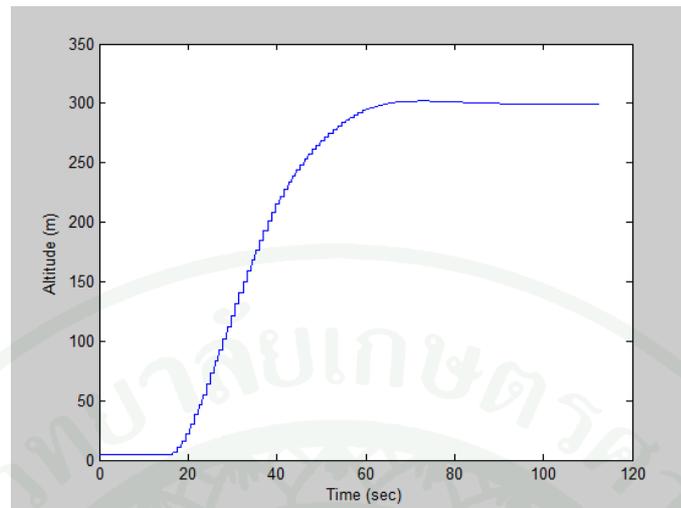
### ผล

การจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับแบบ General Atomic MQ-1 Predator UAVs ในรูปแบบต่างๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

1. ผลการทดลอง Take-Off ของอากาศยานไร้คนขับทุกลำพร้อมกัน โดยรับคำสั่งจากอากาศยานไร้คนขับที่บินนำ ไปยังระดับความสูง 300 เมตร คือ เมื่อกลุ่ม Take-Off บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับที่บินนำ ระบบควบคุมและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมให้อากาศยานไร้คนขับแต่ละลำทำการ Take-Off ไปยังระดับความสูง 300 เมตร พร้อมกันดังภาพที่ 29 โดยใช้เวลา 65 วินาที และมีค่า Overshoot เท่ากับ 6.8 เมตร โดยไม่เกิดการร่วงหล่น ดังกราฟในภาพที่ 30



ภาพที่ 29 การ Take-Off ของอากาศยานไร้คนขับทุกลำพร้อมกันไปยังระดับความสูง 300 เมตร



ภาพที่ 30 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบินขณะทำการ Take-Off

2. ผลการทดลองส่งคำสั่ง Formation และกำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ให้อากาศยานไร้คนบินทำการบินหมู่เป็นรูปทรงต่างๆ

2.1 กำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินตามให้ทำการบินหมู่ด้วยรูปทรงตัววี (V Formation) ด้วยค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ต่อไปนี้

2.1.1 อากาศยานไร้คนบินที่บินตามลำที่ 1 (Follower1)

Along Track Distance = -30 เมตร

Cross Track Distance = -30 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

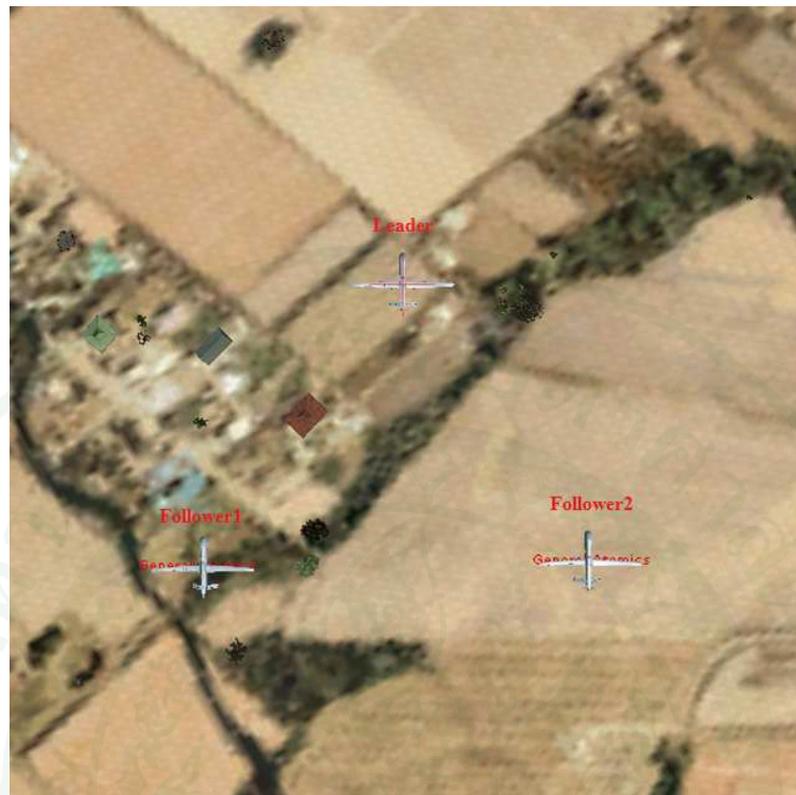
2.1.2 อากาศยานไร้คนบินที่บินตามลำที่ 2 (Follower2)

Along Track Distance = -30 เมตร

Cross Track Distance = 30 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

จะได้ผลการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับด้วยรูปทรงตัววี

2.2 กำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามให้ทำการบินหมู่ด้วยรูปแฉกหน้ากระดาน ด้วยค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ต่อไปนี้

2.2.1 อากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 1 (Follower1)

Along Track Distance = 0 เมตร

Cross Track Distance = -30 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

2.2.2 อากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 2 (Follower2)

Along Track Distance = 0 เมตร

Cross Track Distance = 30 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

จะได้ผลการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับด้วยรูปแถวหน้ากระดาน

2.3 กำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามให้ทำการบินหมู่ด้วยรูปแนวทะแยง ด้วยค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ต่อไปนี้

2.3.1 อากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 1 (Follower1)

Along Track Distance = -30 เมตร

Cross Track Distance = -30 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

2.3.2 อากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 2 (Follower2)

Along Track Distance = 30 เมตร

Cross Track Distance = 30 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

จะได้ผลการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับด้วยรูปแนวทะแยง

2.4 กำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามให้ทำการบินหมู่ด้วยรูปแถวตอนเรียงหนึ่ง ด้วยค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ต่อไปนี้

2.4.1 อากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 1 (Follower1)

Along Track Distance = -30 เมตร

Cross Track Distance = 0 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

2.4.2 อากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 2 (Follower2)

Along Track Distance = 30 เมตร

Cross Track Distance = 0 เมตร

Altitude Distance = 0 เมตร

จะได้ผลการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับด้วยรูปแถวตอนเรียงหนึ่ง

2.5 กำหนดจุดเป้าหมายการบินหมู่ของอากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามให้ทำการบินหมู่ด้วยรูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง ด้วยค่า Along Track Distance Cross Track Distance และ Altitude Distance ต่อไปนี้

2.5.1 อากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 1 (Follower1)

Along Track Distance = 0 เมตร

Cross Track Distance = -30 เมตร

Altitude Distance = 152.4 เมตร (500 ฟุต)

2.5.2 อากาศยาน ไร้คนบังคับที่บินตามลำที่ 2 (Follower2)

Along Track Distance = 0 เมตร

Cross Track Distance = 30 เมตร

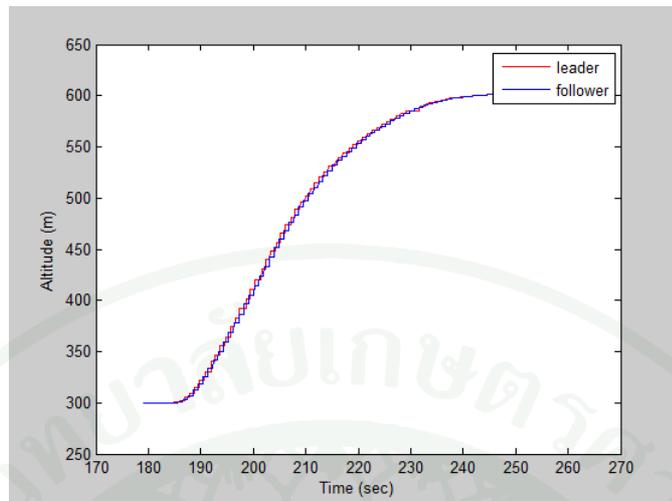
Altitude Distance = -152.4 เมตร (500 ฟุต)

จะได้ผลการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับภาพที่ 35

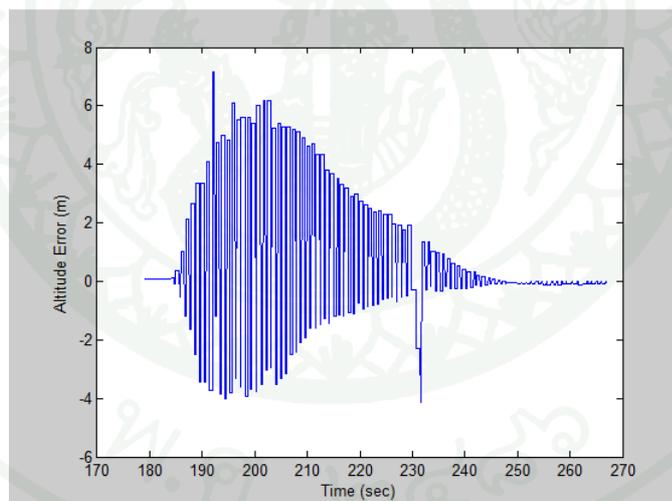


ภาพที่ 35 การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับด้วยรูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง

3. ผลการทดลองปรับเปลี่ยนระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบังคับจาก 300 เมตร เป็น 600 เมตร คือ เมื่อปรับแถบ Altitude บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับที่บินนำจาก 300 เมตร เป็น 600 เมตร แล้ว อากาศยานไร้คนบังคับที่บินตามก็มีการปรับระดับความสูงอัตโนมัติไปด้วย จากกราฟในภาพที่ 36 พบว่าการปรับเปลี่ยนระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบังคับจาก 300 เมตร เป็น 600 เมตร ใช้เวลา 57 วินาที และจากกราฟในภาพที่ 37 พบว่ามีความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างอากาศยานไร้คนบังคับที่บินนำและอากาศยานไร้คนบังคับที่บินตาม -4.27 ถึง 7.31 เมตร



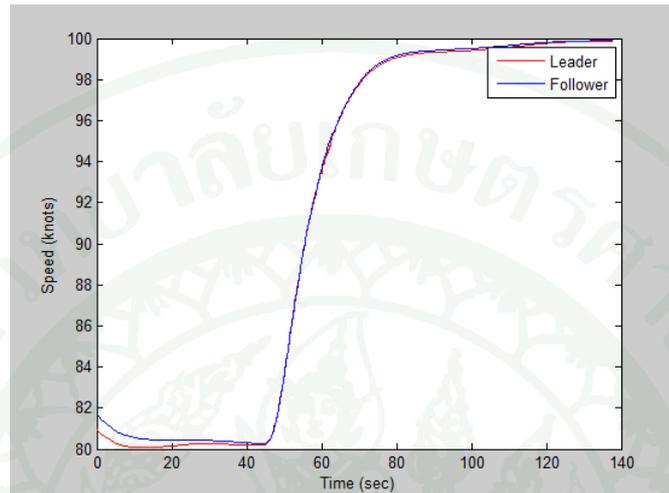
ภาพที่ 36 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม



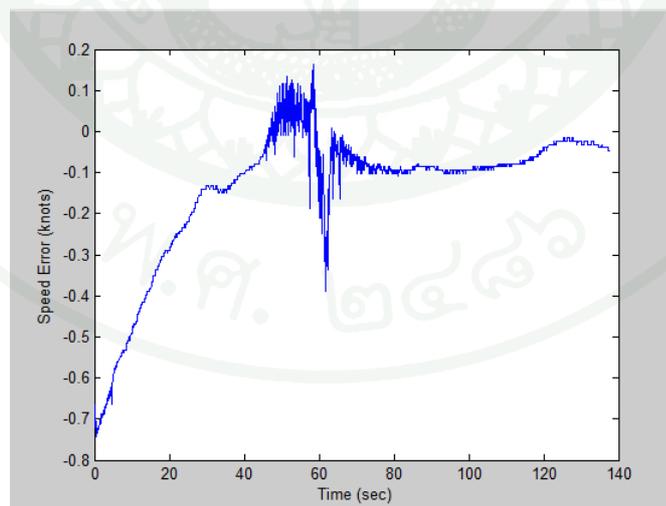
ภาพที่ 37 กราฟความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม

4. ผลการทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศยานไร้คนบินจาก 80 นอต เป็น 100 นอต คือ เมื่อปรับแถบ Speed บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำจาก 80 นอต เป็น 100 นอต อากาศยานไร้คนบินที่บินตามก็มีการปรับความเร็วอัตโนมัติไปด้วย จากกราฟ

ในภาพที่ 38 พบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศยานไร้คนบินจาก 80 นอต เป็น 100 นอต ใช้เวลา 35 วินาที และจากกราฟในภาพที่ 39 มีความแตกต่างของความเร็วระหว่างอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม  $-0.75$  ถึง  $0.15$  นอต

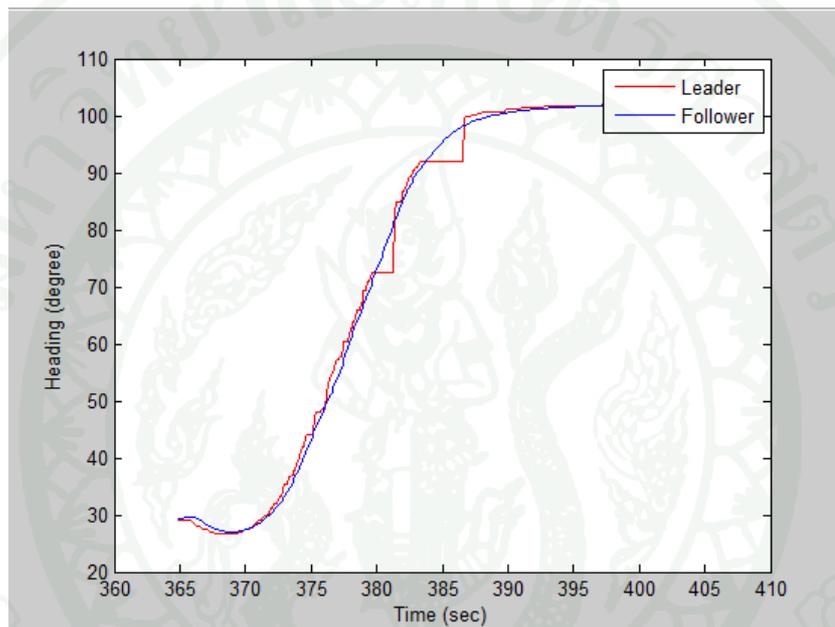


ภาพที่ 38 กราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม

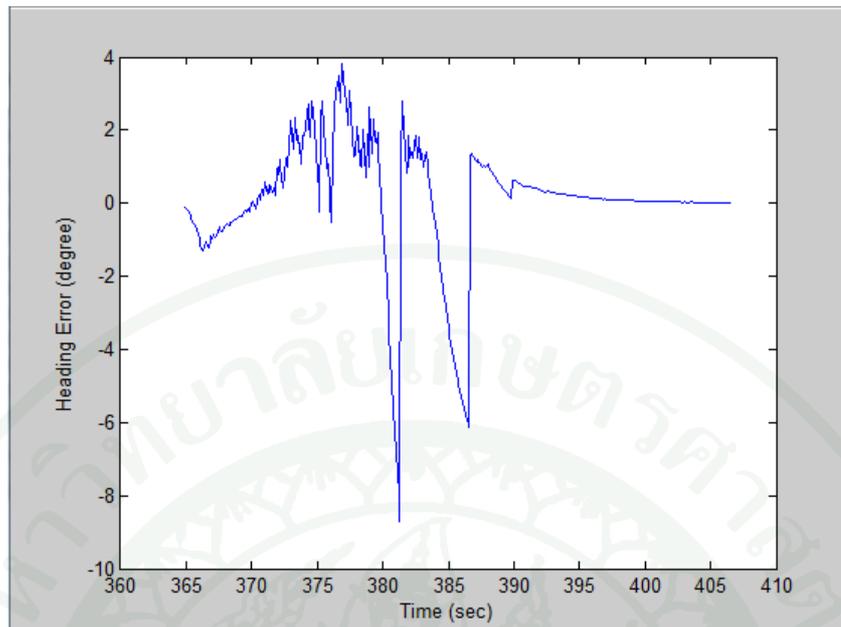


ภาพที่ 39 กราฟความแตกต่างของความเร็วระหว่างอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม

5. ผลการทดลองปรับเปลี่ยนทิศทางของอากาศยานไร้คนบิน จาก 29 องศาเป็น 102 องศา คือ เมื่อปรับแถบ Degree บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำจาก 29 องศาเป็น 102 องศา อากาศยานไร้คนบินที่บินตามก็มีการปรับทิศทางอัตโนมัติไปด้วย จากกราฟในภาพที่ 40 พบว่าการปรับเปลี่ยนทิศทางของอากาศยานไร้คนบิน จาก 29 องศาเป็น 102 องศา ใช้เวลา 28 วินาที และจากกราฟในภาพที่ 41 มีความแตกต่างของทิศทางระหว่างอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม -9 ถึง 4 องศา



ภาพที่ 40 กราฟการเปลี่ยนแปลงทิศทางของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม



**ภาพที่ 41** กราฟความแตกต่างของทิศทางระหว่างอากาศยานไร้คนบินที่บินนำและอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม

6. ผลการทดลองส่งคำสั่งให้อากาศยานไร้คนบินที่กำลังทำการบินหมู่สามารถบินได้อย่างอิสระ และส่งคำสั่งให้อากาศยานไร้คนบินทุกลำกลับมาทำการบินหมู่เหมือนเดิม ดังนี้

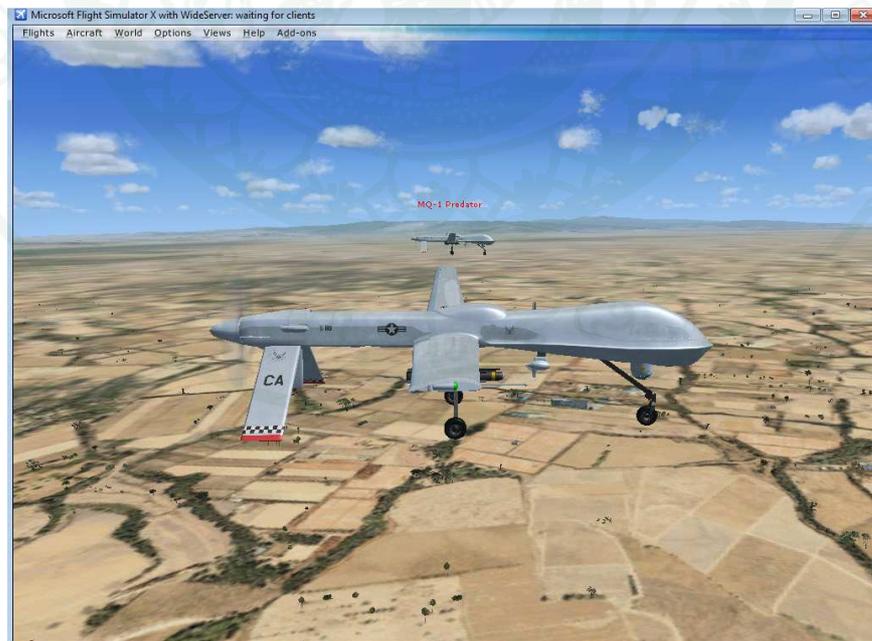
6.1 เมื่อกดปุ่ม Free Flight บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ อากาศยานไร้คนบินที่บินตามจะยังคงบินตามสถานะการบิน ณ ขณะนั้น

6.2 เมื่อปรับแถบ Altitude Speed และ Degree บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ อากาศยานไร้คนบินที่บินนำจะเปลี่ยนระดับความสูง ความเร็ว และทิศทาง ตามค่าที่ตั้งไว้ แต่อากาศยานไร้คนบินที่บินตามจะยังคงบินตามสถานะการบินเดิม ดังภาพที่ 42 ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับแถบ Altitude Speed และ Degree บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินตาม อากาศยานที่บินตามก็จะเปลี่ยนระดับความสูง ความเร็ว และทิศทาง ตามค่าที่ตั้งไว้เช่นเดียวกัน



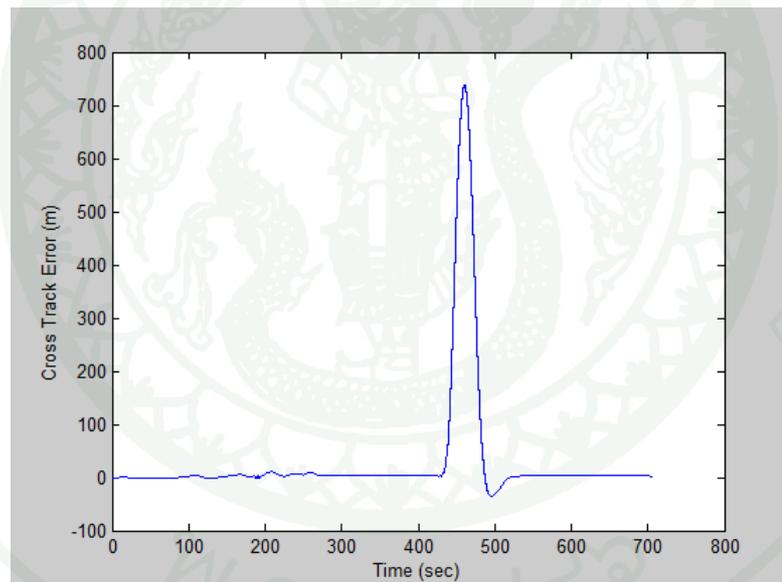
ภาพที่ 42 การบินอย่างอิสระของอากาศยานไร้คนบิน

6.3 เมื่อกลุ่ม Formation บนโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ อากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำจะกลับทำการบินหมู่เหมือนเดิม ดังภาพที่ 43

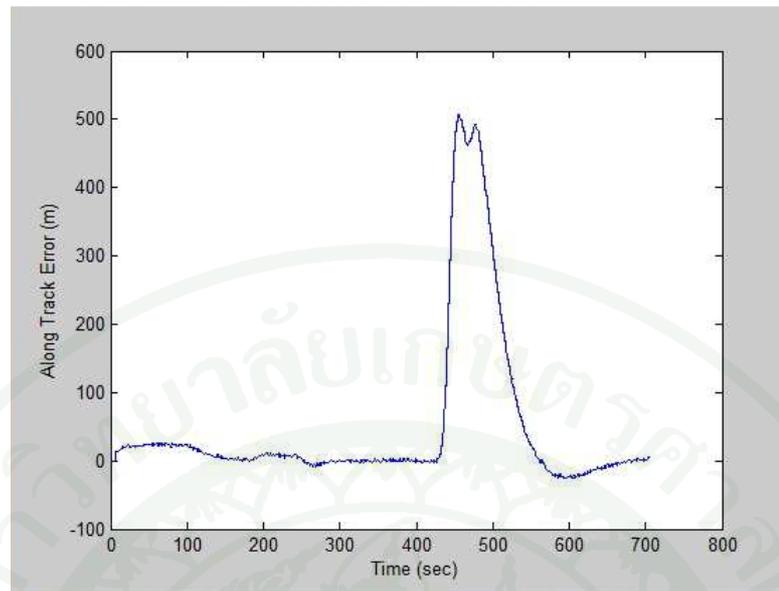


ภาพที่ 43 อากาศยานที่บินตามทุกลำกลับมาทำการบินหมู่เหมือนเดิม

6.4 เมื่อสั่งเกตและบันทึกผลค่า Cross Track Error และค่า Along Track Error ของอากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำ พบว่าก่อนที่จะทำการกดปุ่ม Free Flight บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ ค่า Cross Track Error และค่า Along Track Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แต่เมื่อทำการกดปุ่ม Free Flight และปรับแถบ Altitude Speed และ Degree บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ ค่า Cross Track Error และค่า Along Track Error จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเมื่อทำการกดปุ่ม Formation บน โปรแกรมควบคุมการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ ระบบควบคุมการบินหมู่จะบังคับให้อากาศยานไร้คนบินที่บินตามทุกลำทำการลดค่า Cross Track Error และค่า Along Track Error ให้เข้าใกล้ศูนย์อีกครั้ง ด้วยการควบคุมอากาศยานไร้คนบินที่บินตามให้บินไปยังจุดเป้าหมายการบินหมู่โดยมีทิศทางระดับความสูง ความเร็ว และตำแหน่งให้สัมพันธ์กับอากาศยานไร้คนบินที่บินนำ ดังกราฟในภาพที่ 44 และ 45



ภาพที่ 44 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Cross Track Error



ภาพที่ 45 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Along Track Error

### วิจารณ์

จากการจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับแบบ General Atomic MQ-1 Predator UAVs จำนวน 3 ลำ ด้วยโปรแกรมควบคุมการบินหมู่ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากสมการและระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการบินหมู่ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบไว้ข้างต้น พบว่าโปรแกรมควบคุมการบินหมู่สามารถควบคุมอากาศยานไร้คนขับที่ให้การบินโดยรักษารูปแบบของการบินหมู่ตามที่กำหนดได้แก่ การบินหมู่ในรูปทรงตัววี รูปแถวหน้ากระดาน รูปแนวทะแยง รูปแถวตอนเรียงหนึ่ง และรูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลอง Take-Off ของอากาศยานไร้คนขับทุกลำพร้อมกัน ปรับเปลี่ยนระดับความสูงของอากาศยานไร้คนขับ ปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศยานไร้คนขับ ปรับเปลี่ยนทิศทางของอากาศยานไร้คนขับ ส่งคำสั่งให้อากาศยานไร้คนขับที่กำลังทำการบินหมู่สามารถบินได้อย่างอิสระ และส่งคำสั่งให้อากาศยานไร้คนขับทุกลำกลับมาทำการบินหมู่เหมือนเดิม ซึ่งก็พบว่าโปรแกรมควบคุมการบินหมู่สามารถควบคุมให้อากาศยานไร้คนขับที่บินตามมีทิศทาง ระดับความสูง ความเร็ว และตำแหน่งให้สัมพันธ์กับอากาศยานไร้คนขับที่บินนำและมีการตอบสนองต่อค่าที่ต้องการอย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตามในการทดลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนบังคับข้างต้นยังมีความผิดพลาดเกิดขึ้นดังต่อไปนี้

1. ความแตกต่างของระดับความสูง ความเร็ว และทิศทางของอากาศยานไร้คนบังคับที่บินนำและบินตาม มีสาเหตุเกิดจากการออกแบบตัวควบคุม ด้วยเกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ที่กำหนด อาจจะไม่ใช่ว่าที่ดีที่สุด ทำให้ระบบยังมีความล่าช้าในการตอบสนองและมีค่าความแตกต่างเกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยปรับเปลี่ยนวิธีการปรับค่าเกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  และการเพิ่มตัวควบคุมให้กับระบบ นอกจากนี้ยังเกิดจากความล่าช้าในการรับส่งข้อมูลผ่านระบบระบบเครือข่ายไร้สาย ได้แก่ ข้อมูลตำแหน่ง ทิศทาง ความสูง และความเร็วของอากาศยานไร้คนบังคับที่บินนำ ซึ่งจะส่งไปให้กับอากาศยานไร้คนบังคับที่บินตาม แต่ในการทำการบินจริงข้อมูลเหล่านี้จะได้รับผ่านอุปกรณ์ตรวจจับและระบบสื่อสารของอากาศยาน สามารถแก้ไขได้โดยปรับเปลี่ยนตัวกลางและวิธีการในการติดต่อสื่อสารของอากาศยาน

2. ตำแหน่งของอากาศยานที่บินตามและจุดเป้าหมายการบินหมู่ยังมีความคลาดเคลื่อนกันในรูปทรงการบินหมู่รูปแถวหน้ากระดานต่างระดับความสูง เนื่องจากอากาศยานที่บินตามต้องใช้พลังงานในการบินในระดับเพื่อให้ไปถึงระดับความสูงที่ต้องการ ทำให้สูญเสียการรักษาตำแหน่งในการบินหมู่ สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มตัวควบคุมหรือปรับเปลี่ยนไปใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสม เช่น ตัวควบคุม IPD เป็นต้น

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์การบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับ พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับด้วยตัวควบคุมพีไอดี และจำลองการบินหมู่ของอากาศยานไร้คนขับแบบ General Atomic MQ-1 Predator จำนวน 3 ลำด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ในรูปแบบ Leader-Follower เป็นรูปทรงต่างๆ ซึ่งอากาศยานไร้คนขับทุกลำสามารถทำการบินหมู่โดยที่มีทิศทาง ระดับความสูง ความเร็ว และตำแหน่งสัมพันธ์กัน และตอบสนองต่อคำสั่งและค่าที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว

### ข้อเสนอแนะ

1. อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้มีจำนวนเพียง 3 ลำ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมให้มีขีดความสามารถเพิ่มขึ้นในการควบคุมอากาศยานไร้คนขับที่มีจำนวนมากขึ้นได้
2. ควรพัฒนาอัลกอริทึมในการบินหมู่ เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับสามารถปฏิบัติการกิจได้มากขึ้น ได้แก่ การหลีกเลี่ยงการชน การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง การเข้าหาเป้าหมาย และการบินหมู่ในรูปแบบอื่นๆ เป็นต้น
3. งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาความรู้ทางด้านวิศวกรรมการบิน การออกแบบระบบควบคุมสำหรับอากาศยาน การกำหนดค่าเกน  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  และการตอบสนองของระบบ การพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมอากาศยานและการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
4. ในการจำลองการบินหมู่ด้วย Microsoft Flight Simulator X เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับทำการบินด้วยท่าทางการบินที่เสมือนจริงมากยิ่งขึ้น เช่น การทำมุมเอียงปีกขณะเลี้ยว สามารถทำได้โดยปรับการตั้งค่าของ Microsoft Flight Simulator X และพัฒนาระบบควบคุมให้ดียิ่งขึ้น
5. ควรนำไปพัฒนาเป็นระบบควบคุมสำหรับอากาศยานไร้คนขับจริงต่อไป

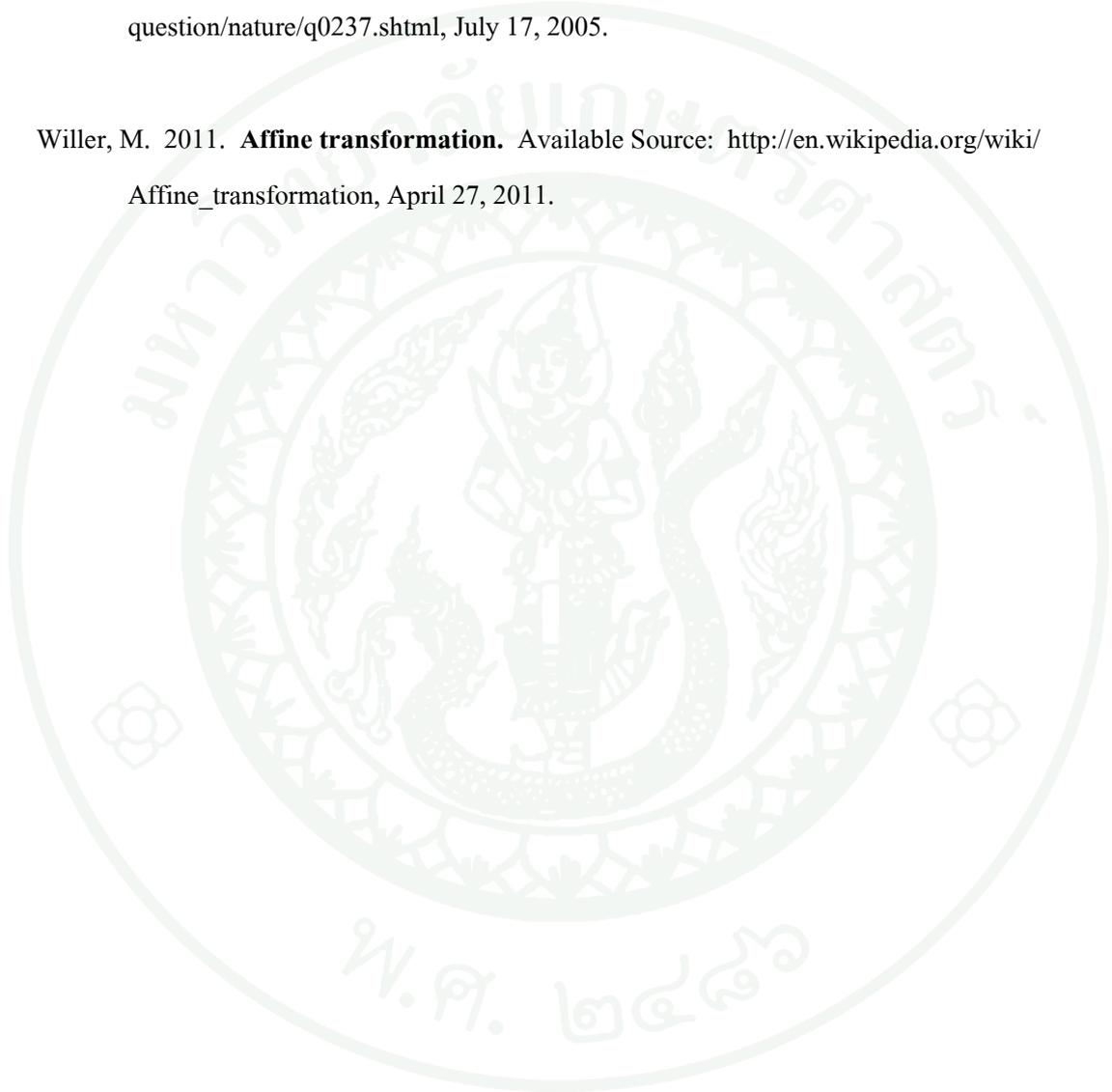
## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- อนันต์ คำภีระ. 2553. ความรู้เกี่ยวกับแผนที่เบื้องต้น. ศูนย์โอมิเทคเซชันและระบบสารสนเทศ ภูมิศาสตร์ภาคใต้, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. แหล่งที่มา: <http://www.rmutphysics.com/sciencefac/artic/map/map.htm>, 21 พฤษภาคม 2553.
- อิทธิ ตรีศิริสัตยวงศ์. 2542. ระบบพิกัด UTM และ UPS, น. 116 – 122. ใน เอกสารประกอบการ สอนวิชา 2108-341, **Mathematical Cartography**. สำนักงานแก้ไขปัญหาการบุกรุกที่ดิน ของรัฐ, สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. แหล่งที่มา: [http://landinfo.mnre.go.th/landinfo/Knowledge/data/Ch10\\_UPS\\_UTM.doc](http://landinfo.mnre.go.th/landinfo/Knowledge/data/Ch10_UPS_UTM.doc), 24 มิถุนายน 2542.
- Dowson, P. 2006. **FSUIPC4 Status of IPC Offsets for FSX**. FSUIPC for Programmers. Available Source: <http://www.schiratti.com/dowson.html>, April 29, 2006.
- Enlayson, J. 2011. **General Atomics MQ-1 Predator**. Available Source: [http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Atomics\\_MQ-1\\_Predator](http://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator), August 17, 2011.
- Lancaster, R. 2004. **Formation flight autopilot design for the GAF Jindivik Mk 4A UAV**. MSc thesis. Cranfield University, College of Aeronautics, UK.
- Larson, G. and G. Schkolnik. 2004. **Autonomous Formation Flight**. MIT Course 16.886. Air Transportation Systems Architecting. Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Lee, J., H. S. Kim and Y. Kim. 2008. Formation Geometry Center based Formation Controller Design using Lyapunov Stability Theorem. **KSAS Internation Journal** 9 (2): 71-78.
- Mitchell, P. 2004. **Autonomous Flight Control and Software**. MIT Course 16.886. Air Transportation Systems Architecting. Massachusetts Institute of Technology, USA.

Nunes, C. 2011. **Formation Flight Fighter Aviation**. Second Edition. Available Source: <http://www.scribd.com/doc/44104864/Air-Formation-Fighter-Fighter-Aviation> November 26, 2010.

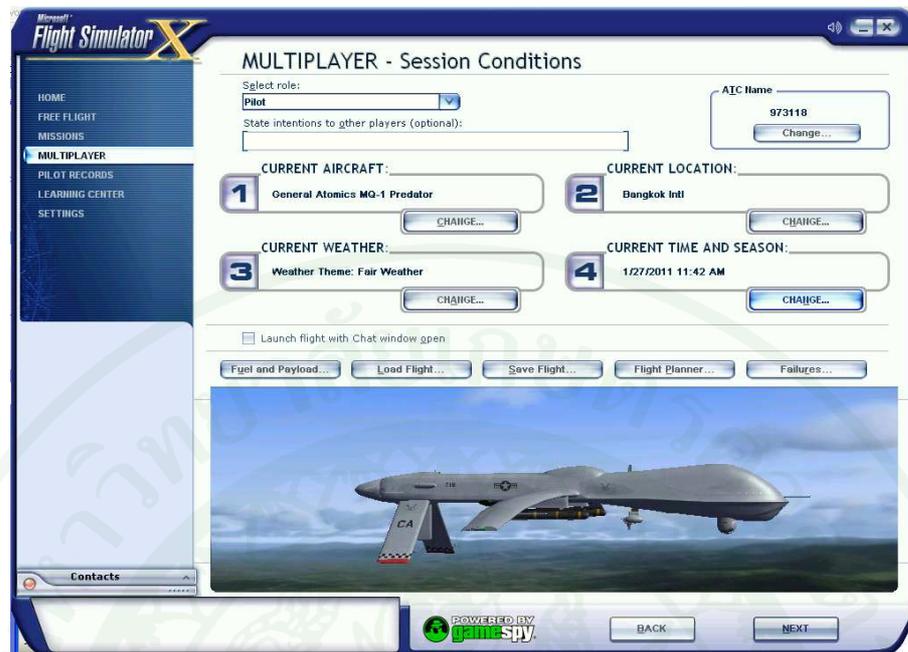
Scott, J. 2005. **V-Formation Flight of Birds**. Available Source: <http://www.aerospaceweb.org/question/nature/q0237.shtml>, July 17, 2005.

Willer, M. 2011. **Affine transformation**. Available Source: [http://en.wikipedia.org/wiki/Affine\\_transformation](http://en.wikipedia.org/wiki/Affine_transformation), April 27, 2011.





ภาคผนวก



ภาพผนวกที่ 1 โปรแกรม Microsoft Flight Simulator X ใน Mode Multiplayer



ภาพผนวกที่ 2 อากาศยานไร้คนขับขณะเริ่มต้นทำการบิน Take-Off



ภาพผนวกที่ 3 Cockpit View Mode ของอากาศยานไร้คนบิน General Atomic MQ-1 Predator



ภาพผนวกที่ 4 อากาศยานไร้คนบินขณะทำการเดี่ยว

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายบัญชา อุปนนท์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 3 มกราคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรคอมพิวเตอร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท วิद्यุการบิณแห่งประเทศไทย จำกัด
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-