

Article

바람 효과를 고려한 동력 램에어 파라포일 자동비행 시스템 연구

김태욱*, 송용규**, 정동호*, 권오성*

A Study on the Autonomous Powered Ram Air Parafoil System
Considering Wind Effect

Tae-Wook Kim*, Yongkyu Song*, Dongho Jeong*, Oseong Gwon**

ABSTRACT

In this work a guidance and control system for an a powered ram air parafoil under wind disturbance is considered. After analyzing a 6 Dof and 9 Dof nonlinear dynamic models of the parafoil, wind effect is added to them. In order to actively respond to the wind acting on the transverse direction of the vehicle a new guidance algorithm is proposed. After a Hardware-In-the-Loop Simulation (HILS) study, flight tests are performed to demonstrate its potential under wind disturbances.

Key Words : Powered Ram Air Parafoil system (동력 램에어 파라포일 시스템), HILS(Hardware In the Loop Simulation), Wind disturbance (바람 외란), Guidance (유도)

1. 서 론

동력 램에어 파라포일 시스템은 기존의 고정익이나 회전익 항공기에 비해 기체 중량 대비 큰 Payload를 탑재할 수 있다는 장점으로 인해 대량의 물자수송이나 공수에 많이 사용되고 있다.

이러한 장점에도 불구하고 바람과 같은 외란의 영향을 많이 받아 동력 램에어 파라포일의 자동비행을 구현함에 있어 어려움이 있다.

본 연구에서는 동력 램에어 파라포일을 제어함에 있어 대기의 풍향과 풍속 정보를 비행체가 비행 중 획득하고 이 정보를 이용하여 외란에 강한 동력 램에어 파라포일 유도제어시스템을 설계하고 비행시험을 통하여 검증해보았다.

2. 본 론

2.1 바람효과를 고려한 모델링

램에어 파라포일의 효율적인 유도제어를 위한 시스템 모델링이 필요한데 참고문헌 [1]의 연구를 바탕으로 6자유도 9자유도 모델링을 구현하였으며 본 연구에서는 바람의 영향을 고려한 모델링을 구현하였다.

아래 식(1)과 식(2)는 6자유도와 9자유도 모델링을 표현하고 있다.

6자유도 운동방정식 (1)

$$\begin{bmatrix} M+M_F & 0 \\ R_{yp}M_F & I+I_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{cm}^b \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} W^b + F_A^p + F_A^b + F_T^b - \Omega M_F V_p - (M+M_F)\Omega V_{cm}^b \\ M_A^b - \Xi_p M_F V_p + R_{yp} F_A^p - R_{yp} \Omega M_F V_p + R_{yb} F_A^b + R_{yb} F_A^b + R_{yb} F_T^b - \Omega(I+I_F)\omega \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} S_{F_T} \\ S_{M_C} + R_{yp} S_{F_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_\alpha \\ \delta_\sigma \end{bmatrix}$$

Received : 21. Mar. 2016. Revised : 23. Mar. 2016.

Accepted : 26. Mar. 2016

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

김태욱, E-mail : ktw-32@hanmail.net

경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

9자유도 운동방정식

$$\begin{bmatrix} (M_b + M_F)T_p & -(M_b + M_F)R_{cp} & 0 & -T_p \\ 0 & I_p + I_F & 0 & R_{cp}T_p \\ M_b T_b & 0 & -M_b R_{cb} & T_b \\ 0 & 0 & I_b & -R_{cb}T_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_c \\ \omega_p \\ \omega_b \\ F_{Rc} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} F_A^p + W_p - (M_p + M_F)\Omega_p \Omega_p X_{cp} - \Omega_p M_F (T_p V_c + \Omega_p X_{cp}) \\ M_A^p - T_p T_b^T M_c - \Omega_p (I_p + I_F)\omega_p - \Xi_p M_F V_p \\ F_A^b + W_b - M_b \Omega_b \Omega_b X_{cb} \\ M_c - \Omega_b I_b \omega_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{F_p} \\ S_{M_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Fig 1과 Fig 2는 6자유도와 9자유도에 대한 비교 분석결과이다. 9자유도의 경우 Canopy와 Payload 간의 약간의 각도 및 각속도 차이가 나타나나 그 값의 영향이 미비하고 구해야하는 공력계수가 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서는 GPS 정보만으로 바람 정보를 획득하고 자동비행을 구현하는 것이 목표이므로 6자유도와 9자유도의 3D 비행 경로를 비교해 본 결과(Fig 2) 동일한 궤적을 나타냄을 고려하여 보다 간단하고 모델링의 신뢰성이 높은 6자유도를 선택하여 바람의 영향을 고려한 램에어 파라포일 모델링을 구성하였다.

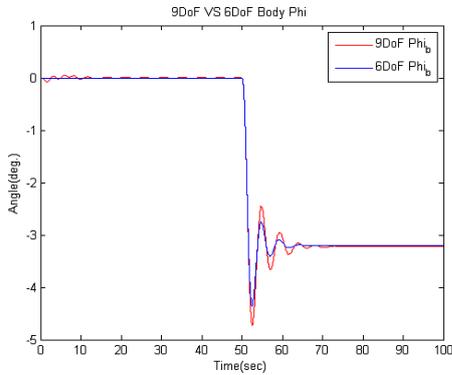


Fig. 1 6자유도 9자유도 자세각 비교

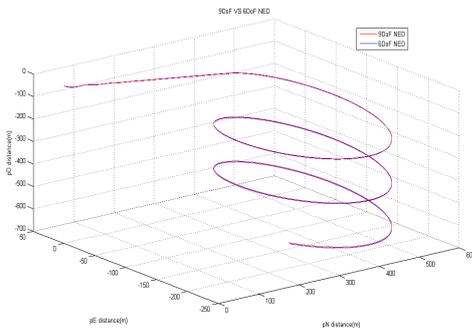


Fig. 2 6자유도 9자유도 3D 비행경로 비교

Fig 3은 바람효과를 고려한 모델링을 나타내는데 바람효과는 공력계수와 대지속도에 반영하였으며 Simulink의 S-function을 사용하여 구현하였다.

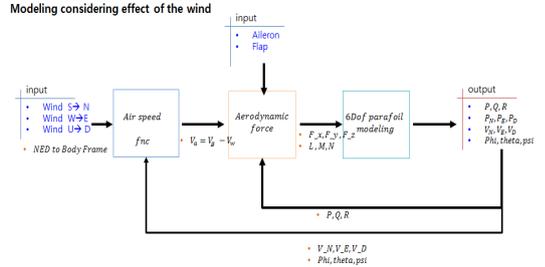


Fig. 3 바람효과를 고려한 모델링 개념도

위에서 구현한 모델링을 가지고 바람효과를 살펴 보기 위해 바람이 없는 경우(0m/s)와 3m/s, 7m/s 등변화를 주고 바람의 방향은 북동쪽으로 들어가게 설정하여 시뮬레이션한 결과이다. 20초 후 왼쪽 조종면을 25° 입력을 준 상태이며 바람이 없는 경우와 비교해 볼 때 타원형상의 궤적을 나타내며 실제 비행체의 비행과 유사한 경향을 나타낸다.

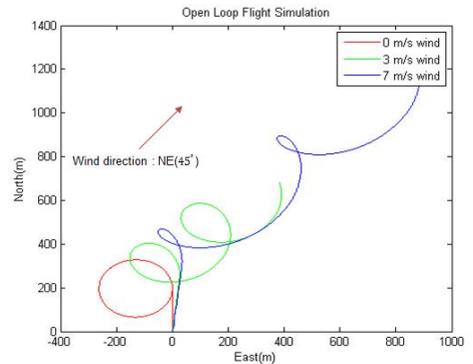


Fig. 4 바람효과를 고려한 좌선회 기동 (Wind 0, 3, and 7m/s)

2.2 HILS 구성

비행시험에 앞서 지상에서 자동비행 제어 시스템의 검증 및 SW개발을 위해서 Hardware In the Loop Simulation(HILS)를 구현하였다. Simulink 모델링과 HILS 인터페이스 컨트롤러 사이에 통신 속도와 안정성을 높이기 위해 UDP 통신으로 구현하였다.(Fig 5)

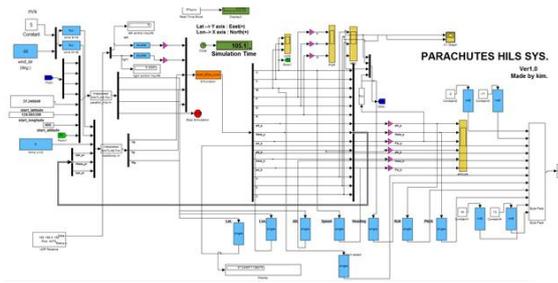


Fig. 5 Matlab Simulink 구현

HILS 인터페이스 컨트롤러는 모델링에서 계산되어 나오는 위치, 속도 정보와 자세정보를 비행 제어 컴퓨터에 시리얼 통신으로 전송하고 Wire Sensor로부터 구동기의 변위량을 계산하여 Simulink 모델링으로 UDP 통신으로 전송하게 된다. 아래 Fig 6은 HILS 구현을 나타내고 있다.

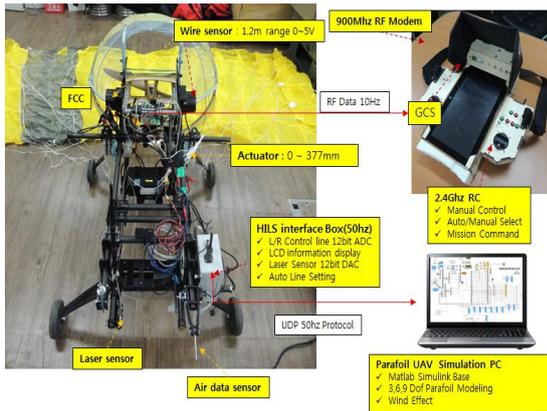


Fig. 6 HILS 구현

2.3 램에어 파라포일 설계 및 비행체 구성

램에어 파라포일을 설계하기 위해 Canopy 형상은 MC-4형상의 램에어 파라슈트의 변형된 형상을 사용하였으며 파라포일 전용 설계 SW인 FW Design을 사용하여 XFLR5와 AVL에서 사용할 수 있는 격자를 생성하였고 와류격자법 (Vortex Lattice Method, VLM)과 링와류격자법 (Ring Vortex Lattice Method, RVLM)을 사용하여 3차원 효과를 고려한 공력해석을 수행하였다. $-3^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 까지의 받음각에 따른 공력계수 C_L, C_D, C_m 의 변화를 AVL 및 XFLR5의 결과를 토대로 Curve Fitting하여 그래프로 나타내었다. (Fig 7)

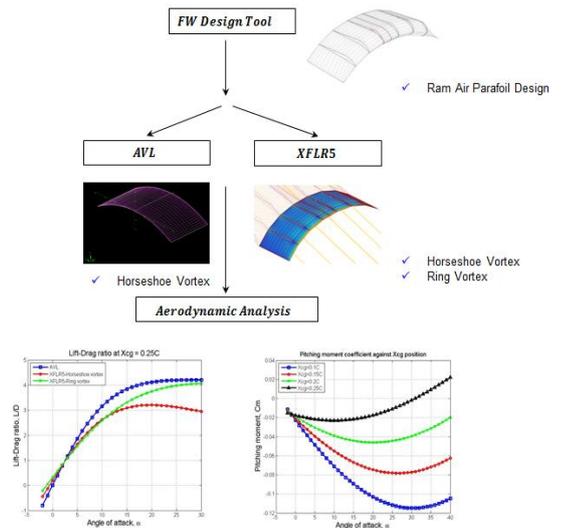


Fig. 7 램에어 파라포일 설계 및 성능분석

AVL 및 XFLR5 공력 해석은 점성효과를 고려하지 않았기에 본 연구에서 사용할 변형된 MC-4형상의 Canopy가 양항 비 3:1 정도를 확보하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

추진동력은 5.3Kw BLDC 모터를 사용하였으며 최대 추력 14Kgf와 60% 수평비행 추력 시 15분간 비행을 유지할 수 있는 것을 추력 테스트 실험으로 확인할 수 있었다.

Fig 8은 추력 테스트 실험 구성을 나타내고 있으며 Fig 9는 변속기 입력 명령에 대한 소비 전류와 전압상태, 추력을 나타내고 있다.

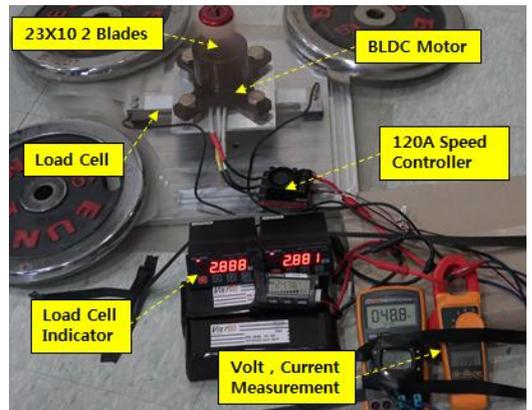


Fig. 8 추력 시스템 구성 및 성능분석

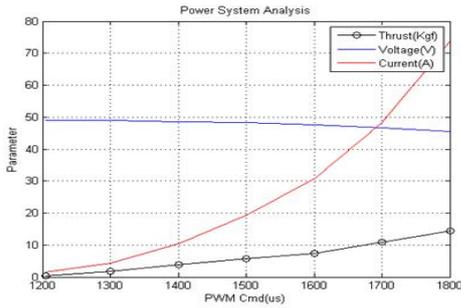


Fig. 9 추력 시스템 성능

조종면을 당기는 구동기는 보통 ARM방식이나 Winch방식을 사용하는데 ARM방식을 사용한 결과 반응성이 빠른 반면 구동토크가 부족하고 구동기 부피가 커지는 단점이 있어 최종적으로 Winch 방식을 채택하였다. Table 1은 구동기의 방식에 따른 장·단점이다.

Table 1. 구동기 방식에 따른 성능비교

ARM 방식	Winch 방식
<p>Parachute control line UAV frame front point Total Control line Disp: 115mm X 2 = 230mm Max: 5.1kg / 2.0 = 2.55kg Arm: 210mm Displacement: 155mm</p>	<p>Parachute control line Total Control line Disp: 120mm X PI = 377mm Max: 31.6kg Pulley Guide Motor R: 60mm</p>
필요 공간 증가 토크 부족 현상 빠른 반응성	필요 공간 감소 토크 증가 느린 반응성

Table 2는 동력 램에어 파라포일 시스템의 최종 구성을 나타내고 있다.

Table 2. Ram Air Parafoil UAV Specifications

Specifications	Ram Air Parafoil
Canopy	
Model	Modified MC-4
Chord(m)	1.27
Span(m)	3.22
Aspect Ratio	2.54
Inlet height(m)	0.153
Airframe	
Power	5.3KW BLDC
Weight	1.2 Kgf
Actuator Type	Winch Type

2.4 바람효과를 고려한 유도 알고리즘

동력 파라포일의 유도제어를 위해서 먼저 경로점간 기준궤적으로부터 횡축거리오차 (X-track) 을 줄이는 방식을 시도하여보았다. (Fig 10)

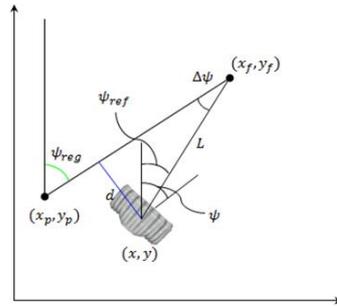


Fig. 10 횡축거리(X-track, d) 계산

여기서 바람효과를 고려하지 않는 경우에는 Fig 11처럼 바람에 밀릴 수밖에 없으며 실제 비행시험(Fig 12)도 그런 경향을 보여준다.

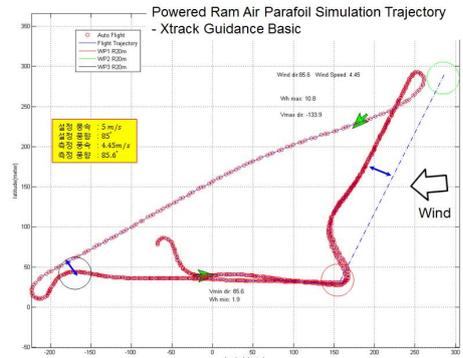


Fig. 11 Xtrack 항법 HILS 시뮬레이션

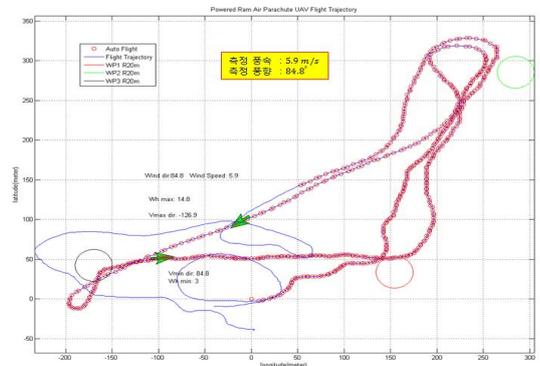


Fig. 12 동력 램에어 파라포일 자동비행 시험 결과 (바람정보를 이용하지 않은 경우)

따라서 본 연구에서는 바람정보를 유도제어 알고리즘에 반영하기 위해 참고문헌 [2]의 연구 결과에 따라 비행 중 바람정보를 추정하고(Fig 13) 유도명령에 이를 보상하고자 하였으며 Fig 14 같이 기존의 X-track 항법알고리즘에 비행체의 측방향에 작용되는 풍속영향을 보상해 주는 방식을 적용하였다.

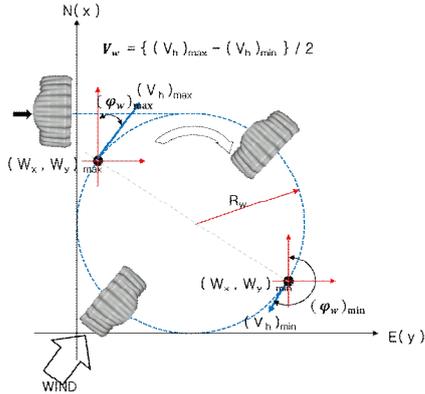


Fig. 13 참고문헌 [2]의 바람 추정개념도

참고문헌 [2]에서 제안한 바람추정 기법은 일정한 선회 반경을 가지지 않아도 폐구간의 경로 점을 비행하고 나면 풍향과 풍속을 정확히 추정할 수 있기에 경로점을 통과할수록 바람 정보가 정확해지고 본 논문에서 제안한 새로운 유도 알고리즘은 외부 환경에 바람정보를 바탕으로 더욱 능동적으로 대응한다.

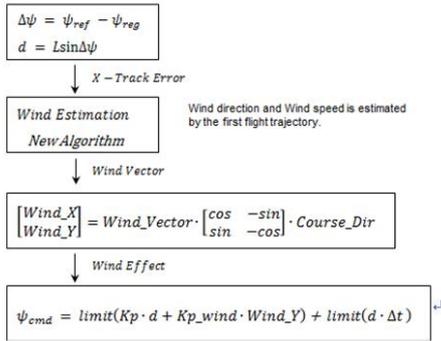


Fig. 14 바람정보를 보상한 유도알고리즘

바람정보를 고려한 유도알고리즘을 검증하기 위해서 기본적인 X-Track 항법알고리즘을 적용한 HILS 시뮬레이션과 (Fig 15), 비행 중 바람정보를 획득하여 보상하는 알고리즘을 적용한 HILS

시뮬레이션을 (Fig 16) 수행하였는데 그 결과 바람이 정풍 혹은 배풍으로 부는 경우는 별 차이가 없으나 측방향으로 맞는 구간에서 횡거리오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

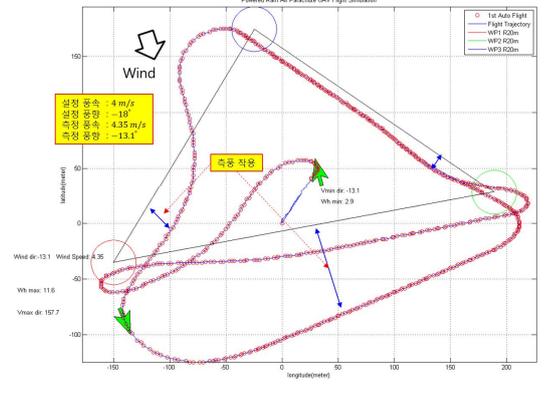


Fig. 15 X-track 항법 HILS 시뮬레이션 (바람정보 보상하지 않은 경우)

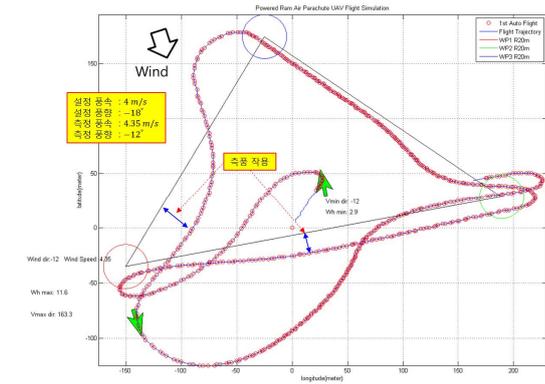


Fig. 16 바람정보를 보상한 HILS 시뮬레이션

위에서 언급한 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 풍향은 북쪽기준 -18° , 풍속은 $4m/s$ 로 본 논문에서 사용된 동력 램에어 파라포일 비행체에는 상대적으로 큰 외란 환경을 HILS에 설정하였으며 비행제어 컴퓨터의 FDR(Flight Data Recorder)에 기록된 정보이다.

2.5 바람 정보를 보상한 비행시험

시뮬레이션 결과를 바탕으로 비행시험을 진행하였으며 산출 조절을 위한 수동비행을 통해 조종면이 정상 작동하는 것을 확인한 후 자동 비행을 실시하였다.

비행시험 시 풍속은 $4\sim 5\text{m/s}$ 이었고 순간 돌풍도 간헐적으로 관측되었다. Fig 17은 램에어 파라포일 자동 비행시험 모습이며 비행 궤적은 Fig 18에 나타내고 있다. 비행 궤적을 살펴보면 기본적으로 경로점 비행을 유지하나 1차 경로점 기동에서는 바람에 밀리는 현상이 발생하고 기준궤적에 대해 좌우 편차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 1차 경로점 기동을 하며 바람정보를 추정 한 후 연속적으로 이어진 2차 경로점 기동에서는 목표 궤적을 보다 충실히 따라가며 좌우 편차도 줄어들어 안정적으로 비행함을 볼 수 있다. 다만 측풍을 계속 맞고 있는 부분에서 (경로점 1에서 경로점 2로 가는 부분) X-track을 빨리 줄이지는 못하고 있는데 이는 본 기체의 제어성능이 다른 비행체의 (예,고정의 항공기) 제어성능 보다는 상당히 약한 데서 기인하는 것으로 판단된다. 하지만 이 부분도 상당한 안정성을 가지면 방향을 유지하고 비행하는 것을 볼 수 있다.



Fig. 17 동력 램에어 파라포일 비행시험

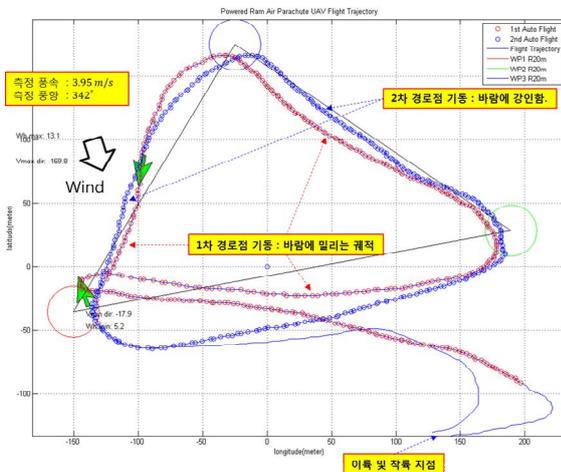


Fig. 18 동력 램에어 파라포일 자동비행시험 궤적

3. 결 론

본 논문에서는 동력 램에어 파라포일 자동비행 시스템에 적용 가능한 바람효과를 고려한 새로운 유도제어 알고리즘을 제안하고 검증하여 보았다. 파라포일의 6자유도와 9자유도 모델링을 비교 분석하여 바람 효과를 고려한 모델링을 구성하였으며 이를 바탕으로 HILS를 구현하여 바람효과를 고려한 유도 알고리즘을 시뮬레이션 하였다. 참고문헌 [2]에서 제안한 바람추정 알고리즘을 자동비행에 적용하여 비행체의 횡방향으로 작용하는 바람 효과에 능동적으로 대응하는 알고리즘을 구현하였고 이를 검증하기 위해 동력 램에어 파라포일을 설계 제작하여 비행시험을 실시하였으며 풍속 $4\sim 5\text{m/s}$ 로 바람이 부는 환경에서 자동비행을 실시하였으며 바람효과를 고려한 새로운 유도 알고리즘이 경로점 비행 궤적을 다소 개선시키고 안정적으로 비행하는 것이 확인되었다.

본 연구는 한국연구재단에서 지원하는 일반연구를 통해 연구한 결과의 일부입니다.

Reference

1. N. Slegers, "Effects of Canopy-Payload Relative Motion on Control of Autonomous Parafoils," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol 33, No 1, pp 116-125, 2010.
2. 김태욱, 송용규, "무인 파라포일 시스템을 위한 바람 추정 기법 연구" 한국항공운항학회지, v.23, no.1, 2015년, pp.8-13
3. Gideon van der kolf, "Flight Control System for an Autonomous Parafoil", Master's thesis, Stellenbosch University
4. Michael Ward, "Adaptive Glide Slope Control for Parafoil and Payload Aircraft", Master's thesis, Georgia Institute of Technology
5. Damian Toolhey, "Development of a Small Parafoil Vehicle for Precision Delivery, Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology

Technology, June 2005

6. Joshua E. Benton , “Miniaturization, Integration, Flight Testing, and Performance Analysis of a Scalable Autonomous GPS-Guided Parafoil System for Targeted Payload Return”, Master’s thesis, San Jose State University, May 2012
7. Masahito Watanabe and Yoshimasa Ochi, “Modeling and Simulation of Nonlinear Dynamics of a Powered Paraglider”, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit 18 - 21 August 2008.
8. Jack Umenberger , “Guidance, Navigation and Control of a Small-Scale Paramotor”, Australasian Conference on Robotics and Automation, University of Sydney , Dec 2012