

# 꼬리날개 없는 곤충모방 날갯짓 비행로봇의 제어비행

## Controlled Flight of Tailless Insect-Like Flapping-Wing Flying-Robot

판 호앙 부<sup>1</sup>, 강 태 삼<sup>2</sup>, 박 훈 철<sup>+</sup>

Hoang Vu Phan<sup>1</sup>, Taesam Kang<sup>2</sup>, HoonCheol Park<sup>+</sup>

**Abstract** An insect-like flapping-wing flying-robot should be able to produce flight forces and control moments at the same time only by flapping wings, because there is no control surface at tail just like an insect. In this paper, design principles for the flapping mechanism and control moment generator are briefly explained, characteristics measured force and moment generations of the robot are presented, and finally controlled flight of the flying robot is demonstrated. The present insect-like robot comprises a lightweight flapping mechanism that can produce a flapping angle larger than  $180^\circ$  and a control moment generator that produces pitch, roll, and yaw moments by adjusting location of the trailing edges at the wing roots. The measured force and moment data show that the control input angles less than  $9^\circ$  would not significantly reduce the vertical force generation. It is also observed that the pitch, roll, and yaw control moments are produced only by the corresponding control input. The simple PID control theory is used for the controlled flight of the flying robot, controlling pitch, roll, and yaw motions. The flying robot successfully demonstrated controlled flight for about 40 seconds.

**Keywords** Insect-like, flapping-wing, control moment generation, PID control, controlled flight

### 1. 서 론

곤충의 비행원리는 여러 측면에서 새의 비행원리와 사뭇 다르다<sup>[1]</sup>. 곤충의 비행원리는 주로 생물학자들에 의하여 규명되어 왔다. Ellington은 곤충비행에서 앞전 와류(leading edge vortex)의 중요성을 발견하였고<sup>[2]</sup>, Dickinson 등은 로봇 파리 날개를 이용하여 세 가지 중요한 곤충 비행원리를 제시하였다<sup>[3]</sup>. 즉, 일반적인 곤충의 공기력 발생 원리는 크게, 곤충의 날갯짓에 의해 발생하는 앞전 와류가 큰 받음각

(angle of attack)에서도 날개 앞전에 부착되는 실속 지연(delayed stall), 날갯짓 중에 발생하는 날개 회전, 이전 날갯짓에서 분리된 앞전 와류가 다음 날갯짓에서도 영향을 주는 와류 포착(wake capture)의 세 가지로 설명된다. 이러한 원리가 가능한 것은, 곤충이 상대적으로 큰 날갯짓 각도를 발생하고, 날개 축을 중심으로 날개를 회전하여, 하향 날갯짓(downstroke)에서 날개 윗면이 상향 날갯짓(upstroke)에서는 아랫면이 되도록 하기 때문이다. 일부 새도 처음 이륙할 때, 어느 정도 날개를 회전하는 경우가 있지만, 곤충처럼 비행 중 항상 날개를 회전하지는 않는다. 곤충의 비행영역은 레이놀즈 수(Reynolds number)가  $10^3 \sim 10^4$  정도로 상대적으로 낮고, 비행속도에 비하여 날갯짓 속도가 빠르므로, 곤충의 공기력을 산출하기 위해서는 비정상 공기역학을 도입하여야 한다.

곤충은 공기력 발생원리 측면에서 새와 다를 뿐만 아니라,

Received : Aug. 13. 2016; Revised : Nov. 4. 2016; Accepted : Nov. 11. 2016

※This project was funded by the Basic Research Program (Grant No. 2013R1A2A2A01067315) and a grant to the Bio-Mimetic Robot Research Center (UD130070ID).

<sup>+</sup>Corresponding author: Division of Interdisciplinary Studies, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul, Korea (hcpark@konkuk.ac.kr)

<sup>1</sup>Advanced Tech. Fusion, Konkuk University (vphanhoang113@gmail.com)

<sup>2</sup>Aerospace Information Engineering, Konkuk University (tskang@konkuk.ac.kr)

제어모멘트 또는 제어력 발생 원리 측면에서도 다른 점이 있다. 곤충은 새와는 달리 꼬리날개가 없어서, 날갯짓만으로 비행에 필요한 공기력뿐만 아니라 제어력도 함께 발생한다. 이를 위해서는 날갯짓 중에 좌우 날개의 날갯짓 궤적(wing kinematics)을 대칭적 또는 비대칭적으로 변경하여야 한다. 다양한 곤충의 제어력 발생원리는 참고문헌<sup>[4]</sup>에 잘 정리되어 있으나, 이를 요약하면 몇 가지로 정리된다. 우선 곤충은 좌우 날개의 날갯짓 각도를 변경하여 비대칭적인 힘을 발생함으로써 제어모멘트를 발생한다. 즉, 양쪽 날갯짓 각도의 크기가 같은 경우에는 날갯짓 각도의 범위를 상하 방향으로 조절하거나, 양쪽 날개의 날갯짓 각도를 서로 다르게 하여 다양한 제어 모멘트를 발생한다. 제어모멘트를 발생하는 다른 방법으로서, 파리와 같은 곤충들은 한쪽 날개의 날갯짓 주파수를 변경하여 급격한 기동을 하기도 하고<sup>[4]</sup>, 장수풍뎠이의 경우에는 날갯짓 평면(stroke plane)의 각도를 변경하여 제어 모멘트를 발생하기도 한다<sup>[5]</sup>. 이러한 모든 원리는 한마디로 날갯짓 궤적을 변경하여, 좌우 날개에서 발생하는 평균 공기력의 방향과 크기에 변화를 주는 것이다.

이와 같은 곤충의 제어력 발생원리를 이해하는 것은 상대적으로 손쉬우나, 이를 공학적으로 구현하는 것은 매우 힘들다. 미국의 Aerovironment는 날갯짓하는 날개의 루트 끝 전 위치를 변경하여 날갯짓 궤적을 변경함으로써 제어모멘트를 발생하여, 모터로 발생하는 날갯짓만으로 제어비행을 성공한 날개길이 16 cm, 무게 20 gram 내외의 Nano-hummingbird를 발표하였다<sup>[6]</sup>. 이 비행로봇은 형상과 날갯짓 원리를 벌새(humming-bird)의 형상과 날갯짓 원리를 모방하였다고는 하나, 꼬리날개가 없으므로, 곤충모방 비행로봇이라 해도 무방하다. 미국 하버드 대학에서는 날개 길이 3.5 cm, 무게 80 mg의 매우 작은 크기의 Robobee의 제어 비행에 성공하였다. 이 비행로봇은 압전작동기를 구동하여 날갯짓을 발생하고, 이보다 작은 보조 압전작동기로 날갯짓 궤적을 바꾸어 제어모멘트를 발생한다<sup>[7]</sup>. 하지만, 크기가 매우 작아서 전원과 모든 전자제어장치를 외부의 장치와 연결하여 비행하였으므로, 독립된 비행로봇으로 보기는 어렵다. BionicOpter는 잡자리의 비행을 모방한 것으로 무게 175 gram으로 상대적으로 무겁고<sup>[8]</sup>, 메릴랜드 대학과 텍사스 주립대가 공동으로 개발한 날갯짓 비행체도 무게가 약 60 gram으로 Nano-hummingbird에 비하여 무거운 편이다<sup>[9]</sup>.

저자들은 최근 날갯짓 평면각도를 변경하는 방식<sup>[5]</sup>, 날갯짓 각도를 변경하는 방식<sup>[10]</sup>, 날개의 루트 끝 전 위치를 조절하여 날갯짓 궤적을 변경하는 방식<sup>[11]</sup>의 세가지 방식으로 제어모멘트를 발생하는 장치를 고안하고, 각각을 날갯짓 장치와 결합하여 날갯짓으로 발생하는 힘과 제어모멘트를 측정하였다. 본 논문에서는 이들 세가지 방식 중, 두 번째 방식인 끝전 조절장치(trailing edge change mechanism, TEC mechanism)의 원리와 모멘트 발생 특성을 설명하고, 이 장치를 이용하여 제어비행에 성공한 무게 약 20 gram의 곤충모방 날갯짓 비행체를 소개한다.

## 2. 날갯짓 장치와 끝전 조절 장치

저자들이 고안한 여러 가지의 날갯짓 장치(flapping mechanism)<sup>[5,11,12]</sup> 중에서, 날갯짓 비행로봇에는 무게가 가장 가벼운 날갯짓 장치를 적용하였다. Fig. 1에서와 같이, 모터의 회전 운동을 커플러를 통해서 중앙의 큰 풀리의 회전운동으로 변경하고, 이 회전운동을 벨트를 통하여 좌우의 작은 풀리로 전달하여, 180도 이상의 큰 날갯짓 각도를 발생하게 한다. 이의 설계에 대해서는 참고문헌<sup>[11]</sup>에 상세히

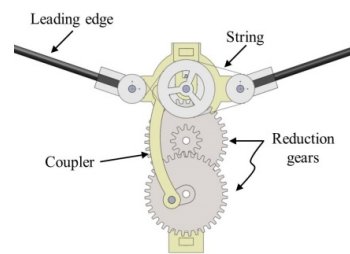


Fig. 1. Flapping mechanism

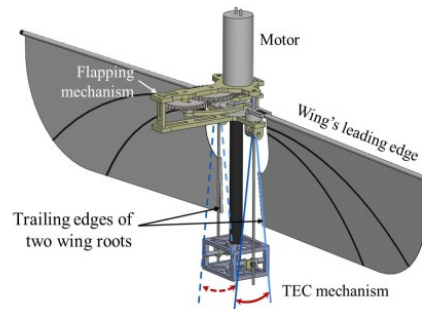


Fig. 2. Concept of the current flapping-wing robot (FW-robot) with the TEC mechanism

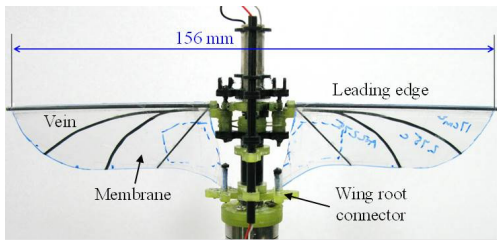


Fig. 3. Fabricated FW-robot for force/moment measurement

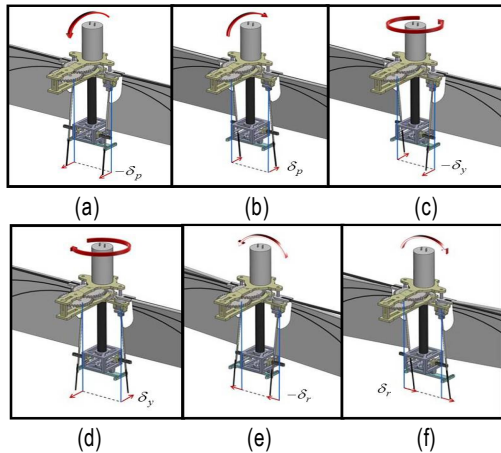


Fig. 4. Control of the TEC mechanism for various moment generation: (a) pitch down (b) pitch up (c) yaw left (d) yaw right (e) roll left (f) roll right

설명되어 있다.

끝단 조절 장치는 Fig. 2에서와 같이, 날개 루트의 끝단 위치를 변경함으로써 날갯짓 하는 날개의 궤적을 바꾸어 제어모멘트를 발생하는 장치로서, 날갯짓 장치와는 별도로 장착되므로 구현이 간편한 장점이 있다. Fig. 3은 날개가 부착된 날갯짓 장치의 사진으로서, 날개 길이는 156 mm 이고, 하단에 날개 루트의 끝단 위치를 변경하기 위한 기구를 장착하였다. 날개 루트 끝단 위치가 변경되기 전에는 각 축 방향의 모멘트가 거의 0에 가깝도록 날갯짓 비행체가 설계되었고, Fig. 4에 도시된 각 경우처럼 날개 끝단 위치가 변경되었을 때, 각각 양과 음의 피치, 롤, 요 모멘트를 발생한다. 더 상세한 끝단 조절 장치의 설계에 대한 설명은 참고 문헌<sup>[11]</sup>을 참고하기 바란다.

### 3. 힘과 모멘트의 측정

제작된 날갯짓 비행로봇이 발생하는 힘과 모멘트를 측정

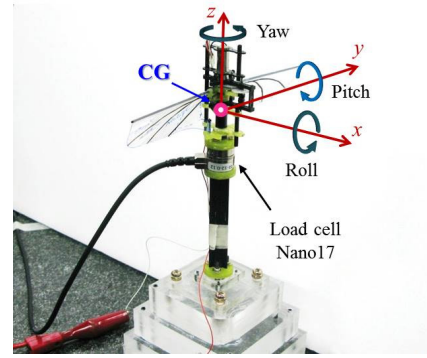


Fig. 5. Experimental setup for force/moment measurement

하기 위하여, 날갯짓 비행로봇을 Fig. 5에서와 같이 탄소 봉으로 연결하여 로드 셀 위에 장착하였다. 이 탄소 봉의 고유진동수는 날갯짓 주파수 20 Hz에 비하여 훨씬 높도록 충분한 강성을 가진다. 실제 날갯짓 비행로봇의 비행 날갯짓 주파수는 약 30 Hz 이상이나, 힘과 모멘트의 측정 실험에서는 이보다 낮은 주파수로 날개를 구동하여, 과도한 관성력이 발생하여 로드 셀에 잡음 신호가 많이 발생하는 것을 방지하였다. 측정에 사용한 로드 셀은 Nano 17 (ATI Industrial Automation, USA)로서, 3축방향의 힘과 각 축 중심의 모멘트를 측정할 수 있는 제품이고, force resolution 은 0.3 gram, moment resolution은 1.6 gram-mm이다.

Fig. 4에서 각 축 주위로의 양과 음의 모멘트를 발생하기 위하여 이동하는 날개 루트 끝단의 각도를 기호  $\delta$ 로 정의하였고, 여기에 아래 첨자  $p, r, y$ 를 이용하여 각각 피치, 롤, 요 모멘트를 발생하기 위한 입력각도로 표기하였다. Fig. 4(a)에서  $-\delta_p$  각은 양의 피치 모멘트, Fig. 4(c)에서  $-\delta_y$  각은 양의 요 모멘트, Fig. 4(e)에서  $-\delta_r$  각은 양의 롤 모멘트를 발생한다. 이와 같은 입력 각도에 대하여 발생하는 힘과 모멘트를 약 100 주기에 대하여 측정하여 저장하고, 평균을 내어 각각의 평균값을 산출하였다. 로드 셀로 측정된 모멘트는 로드 셀 축에 대한 값이므로, 이를 날갯짓 비행로봇의 무게 중심에 대한 값으로 변환하였다. 힘과 모멘트의 평균값 산출 및 모멘트의 변환에 대한 자세한 설명은 참고문헌<sup>[5]</sup>와<sup>[11]</sup>을 참조하기 바란다.

Fig. 6은 끝단 조절 장치의 각도를  $\pm 9$ 도까지 인가하면서 수직력과 모멘트를 측정 후, 이들을 한 주기의 평균 수직력과 모멘트를 계산하여 도시한 그림이다. Fig. 6(a)로부터,

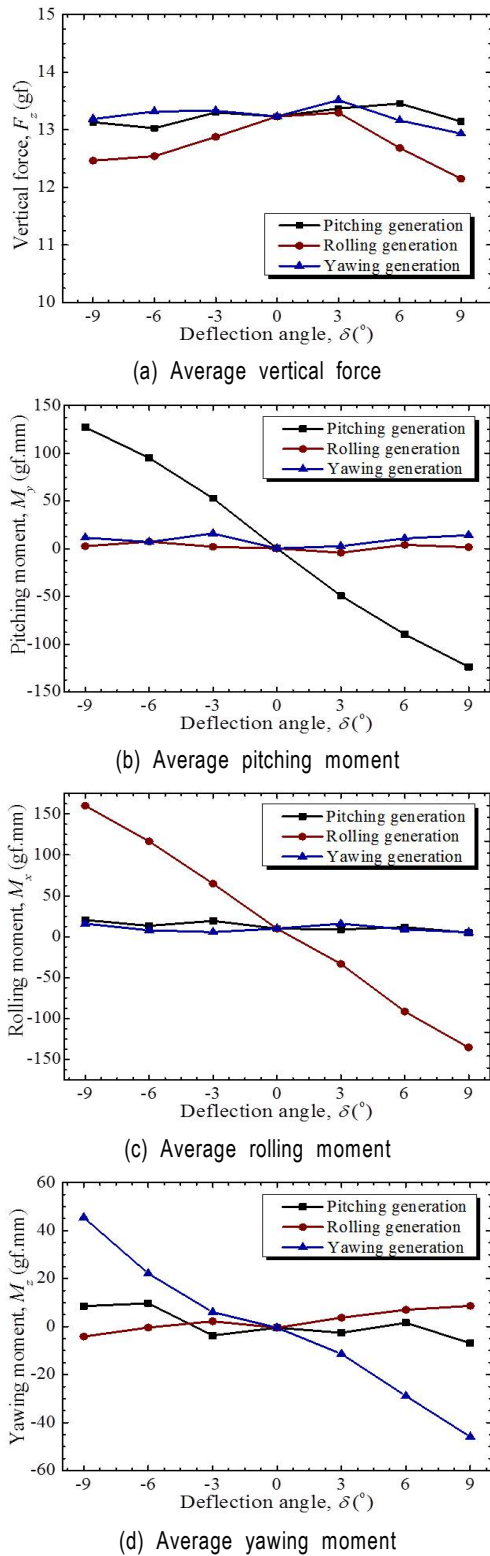


Fig. 6. Average measured force and moments produced by the flapping-wing robot

피치 및 요 모멘트 발생을 위한 입력각을  $\pm 9$ 도로 인가하는 경우, 입력각이 0도인 경우의 수직력(약 13 gram)에 비하여 평균 수직력은 크게 차이가 없으나, 롤 모멘트 발생을 위한 입력각에 대해서는 다소의 수직력 변동이 발생하고, 9도 일 때 최대 약 -1 gram (-8%) 변화함을 알 수 있다. 이는 롤 모멘트 발생을 위해서는 날갯짓 평면이 수평면에서 벗어나게 되어, 날갯짓 평면에 대한 수직 방향이 원래의 수직 방향에서 벗어나기 때문이다. 따라서 실제 비행시험에서도 롤 모멘트 발생 때에는 수직 방향의 힘이 다소 감소할 수 있음을 감안해야 한다. Fig. 6(b)는 피치 모멘트가 피치 입력각에 대해서만 발생하고, 다른 롤 및 요 입력각에 대해서는 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 피치 입력각이 0도 때에는 피치 모멘트 발생이 거의 없음을 알 수 있으며, 피치 모멘트의 크기는 피치 입력각이  $\pm 9$ 도 때 약  $\mp 125$  g-mm 임을 알 수 있다.

Fig. 6(c)로부터는 롤 모멘트가 롤 입력각에 대해서만 발생하고, 롤 입력각이 0도일 때 롤 모멘트가 거의 0에 가까우며, 롤 입력각  $\pm 9$ 도 때 롤 모멘트의 크기는 약  $\mp 150$  g-mm 임을 알 수 있다. Fig. 6(d)로부터 요 입력각이 0도 때 요 모멘트가 거의 0이며, 요 모멘트는 요 입력각에 대해서만 발생함을 알 수 있다. 한편, 동일한 입력각 크기에 대한 요 모멘트의 크기는 피치 및 롤 모멘트에 비해서 30% 수준임을 알 수 있다. 하지만, 이 요 모멘트의 크기는 날갯짓 비행로봇의 요 운동을 일으키기에 충분함을 짐발(gimbals) 시험으로 확인하였다.

#### 4. 제어 비행

비행로봇의 자세제어에는 Fig. 7에 도시한 PID 제어를 적용하였다. PID 제어는 명령한 자세와 측정된 실제 자세 사이의 오차를 최소화 하기 위하여 지속적으로 제어 변수를 조절하는 폐루프 제어이다. 여기서 사용한 되먹임 변수는 피치, 롤 및 요의 각속도( $p, q, r$ )이다. PID 제어를 기반으로 하는 코드를 작성하여 마이크로 컨트롤러에 탑재하여 제어 시스템을 구성하였다.

실제 되먹임 제어시스템은 저전력 ATmega 328P 8 비트 마이크로 컨트롤러, L3GD20H 3축 자이로, DT Rx36 DSM2 호환 수신기와 피치, 롤, 요를 운동을 제어하는 세 개의 상용



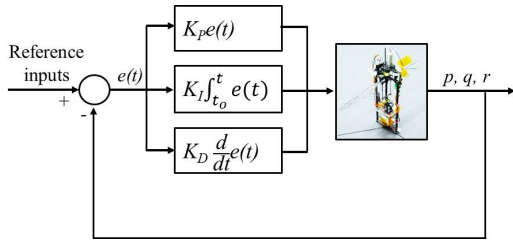


Fig. 7. PID diagram of feedback control

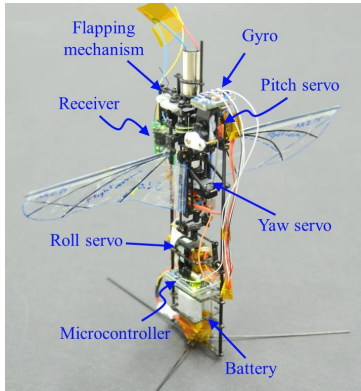
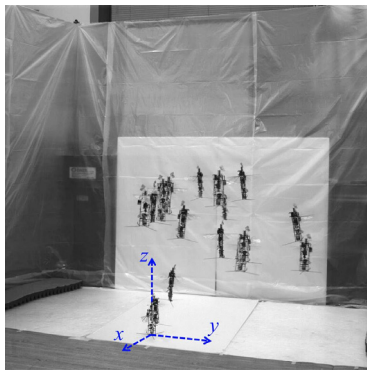
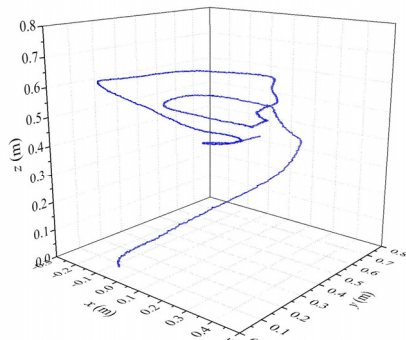


Fig. 8. FW-robot with the flight control system



(a) Composite image of the flying FW-robot



(b) Flight path of the FW-robot

Fig. 9. Flight data of the FW-robot

초소형 서보로 구성하였다. 3축 자이로는 롤, 피치, 요 각속도를 측정하기 위하여 사용하였고, 수신기는 2.4 GHz의 송신기 로를 통하여 전송되는 조종사의 모터 및 서보 제어명령을 수신 하기 위하여 적용하였다. 모터와 마이크로 컨트롤러는 2개의 7.4V 리튬-폴리머 배터리를 병렬로 연결하여 구동하였고, 서 보와 다른 전자회로에는 이 전압을 낮추어 5V를 인가하였다.

Fig. 8은 각 전자부품이 장착된 날갯짓 비행로봇을 도시 하고 있다. 비행로봇의 이륙중량은 약 21 gram이고, 전체 비행로봇을 구성하는 각 부품의 무게를 분석한 결과, 구동 모터, 서보모터와 배터리의 무게 합이 전체 무게의 약 60% 였고, 날갯짓 메커니즘은 전체 무게의 약 13%였다.

각 제어 이득은 짐발 시험을 통하여 얻었고, 이를 통하여 실제 비행에 적용할 제어 이득을 찾는 데 소요되는 시간을 줄일 수 있었다. 비행시험에서의 날갯짓 주파수는 32~35 Hz 사이였고, 장착한 배터리로 약 40초의 제어비행을 하였 다<sup>[13]</sup>.

Fig. 9(a)는 비행로봇이 이륙 후 여러 위치에 있는 모습을 촬영한 초고속 카메라 이미지를 겹쳐서 도시한 것으로서 비행 중 대체로 안정된 수직 자세를 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 무선 조종으로 비행로봇을 비행하게 하면서, 세 대의 초고속 카메라로 촬영한 비행로봇 무게 중심의 궤적을 분석한 자료이다. 고도 약 60 cm 주변에서 반경 약 30 cm 정도로 제자리 비행에 가까운 비행을 하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 날갯짓만으로 비행력과 제어력을 동시에 발생하는 곤충모방 비행로봇에서 제어모멘트 발생 원리를 설명하고, 제어모멘트 발생장치와 날갯짓 장치를 결합하여 날갯짓을 구동하면서 측정된 모멘트를 제시하여, 실제로 날 갯짓 비행로봇이 제어모멘트를 발생할 수 있음을 입증하였 다. 또한 PID 이론을 적용하여, 피치, 롤 및 요 운동을 제어 하는 날갯짓 비행로봇의 시스템 구현 과정을 설명하고, 제 어비행에 성공한 사례를 소개하였다. 향후에는 고급 제어기 법을 이용한 자율제어비행을 위한 연구를 지속적으로 수행 할 예정이다.

**References**

- [1] D.E. Alexander, Nature's Flyer, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 2002.
- [2] C.P. Ellington, "The novel aerodynamics of insect flight: Applications to micro air vehicles. The Journal of Experimental Biology," vol.202, pp.3439-3448, 1999.
- [3] M.H. Dickinson, F.O. Lehmann, and S.P. Sane, "Wing rotation and the aerodynamics basis of insect flight," Science, vol.284, pp.1954-1960, 1999.
- [4] G.K. Taylor, "Mechanics and aerodynamics of insect flight control," Biology Review. vol.76, pp.449-471, 2001.
- [5] H.V. Phan and H.C. Park, "Generation of control moments in insect-like tailless flapping-wing micro air vehicle by changing the stroke-plane angle," Journal of Bionic Engineering, vol.13, pp.449-457, 2016.
- [6] M. Keennon, K. Klingebiel, H. Won, A. Andriukov, "Development of Humming bird: a tailless flapping wing micro air vehicle," 50th AIAA Aerospace Scientist meeting, 9-12 January 2012, Nashville, Tennessee, USA.
- [7] N.O. Perez-Arancibia, K.Y. Ma, K.C. Galloway, J.D. Greenberg, and R.J. Wood, "First controlled vertical flight of a biologically inspired microrobot," Bioinspirations & Biomimimetics. vol.6, 036009, 2011.
- [8] BionicOpter inspired by dragonfly, FESTO, [www.festo.com/net/SupportPortal/Files/248133/Festo\\_BionicOpter\\_en.pdf](http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/248133/Festo_BionicOpter_en.pdf)
- [9] D. Coleman, M. Benedict, V. Hrishikeshavan, and I. Chopra, "Design, development and flight-testing of a robotic hummingbird," American Helicopter Society Forum, 2015.
- [10] T.Q. Truong, H.V. Phan, S.P. Sane, and H.C. Park, "Pitching moment generation in an insect-mimicking flapping-wing system," Journal of Bionic Engineering, vol. 11, pp.36-51, 2014.
- [11] H.V. Phan and H.C. Park, "Pitch, roll, and yaw moment generator for insect-like tailless flapping-wing MAV," in SPIE's Annual conference on smart structures and materials & nondestructive evaluation, 2016.
- [12] Q.V. Nguyen, H.C. Park, N.S. Goo, and D.Y. Byun, "Characteristics of a beetle's free flight and a flapping wing system that mimics beetle flight," Journal of Bionic Engineering, vol.7, pp.77-86, 2010.
- [13] KUBeetle-Flight test with full pitch, roll, yaw control mechanisms, [https://www.youtube.com/watch?v=geCd05KvP\\_Y&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=geCd05KvP_Y&feature=youtu.be)



**판 호앙 부**

2010 호치민 공과대학교(공학사)  
 2012 건국대학교 신기술융합학과(공학석사)  
 2014~현재 건국대학교 신기술융합학과 박사과정

관심분야: 곤충모방 비행로봇, 생체모방 로봇



**강 태 삼**

1986 서울대학교 제어계측공학과(공학사)  
 1988 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)  
 1992 서울대학교 제어계측공학과(공학박사)  
 1994~2001 호서대학교 제어계측공학과 교수  
 2001~현재 건국대학교 항공우주정보시스템 공학과 교수

관심분야: 비행로봇 제어, 항법유도제어시스템



**박 훈 철**

1985 서울대학교 항공우주공학과(공학사)  
 1987 서울대학교 항공우주공학과(공학석사)  
 1994 메릴랜드 주립대학교 항공우주공학과(공학박사)  
 1995~현재 건국대학교 신기술융합학과 교수

관심분야: 곤충모방 비행로봇, 생체모방 로봇