

세가지 형태로 변신이 가능한 비대칭 X8 무인비행로봇의 제작

Manufacture of Asymmetric Drone X8 having 3-type Modification Capability

정진혁, 하성우, 윤병모, 김경호, 허경무*
(Jin-Hyuk Jeong¹, Seong-Woo Ha¹, Byeung-Mo Yun¹, Kyung-Ho Kim¹, and Kyung-Moo Huh^{1,*})

¹Department of Electronics Engineering, Dankook University

Abstract: Unmanned flying robots have been used recently in many difficult situations. One of the major issues in this area is the problem of how long these unmanned flying robots can perform a given task successfully. For this, the development of a light body and high-efficiency power supply has been executed widely, but we do not as yet have the complete solution. In this paper, we propose a form of Multi-Copter X8, which can transform into other types to further improve these problems. The proposed robot has a 3-type modification capability, which can produce a more enhanced energy saving effect by reducing power consumption.

Keywords: drone, multi-copter, transform, X8, asymmetry, unmanned flying robot

I. 서론

과학기술의 발전함에 따라 인간이 수행하기 힘든 일에는 기계와 로봇에 의존하고 있다. 그 중 무인 비행로봇의 기술은 원격 조종의 이점을 살려 분야를 넓히고 있다. 농업분야에서는 무인비행로봇을 이용하여 물을 공급하는 것뿐 아니라 로봇에 센서를 부착하여 농작물의 상태를 실시간으로 모니터링을 하여 작물의 각 상황을 체크하고 있다[1]. 특히나 무인비행로봇의 기술은 군사적 목적에서부터 발달해 왔다. 특히 무인비행체에 GPS를 장착 하여 위성과의 직접적인 통신을 통해서 지형을 정찰하는 기술은 이전부터 발달을 해왔다[2]. 이와 같이 다양한 분야에서 접목되고 있는 무인비행로봇분야에서 개선이 되어야 할 점은 얼마나 오랫동안 임무를 수행할 수 있느냐에 관한 것이다. 그러기 위해서는 최대한 경량화 된 몸체에 높은 효율의 동력공급원이 필요하다. 하지만 앞서 말한 부분은 이미 상향 평준화가 되어 있다. 그래서 우리는 기존의 무인비행로봇의 최대한 길고 다양한 임무수행을 위한 비대칭 형태의 3단변신 무인비행로봇, Quad-Copter가 2개 겹쳐진 X8 형태의 Multi-Copter를 통한 활용방안을 제안한다. 본 논문의 본문에서는 먼저, 제작한 무인비행로봇의 비행을 위해 필요한 센서와 구조변형의 구현을 위한 모델링 수행 결과, 그리고 가장 중요한 비행에 있어서 무인비행로봇의 자세제어방법에 대해서 서술하였다. 또한 무인비행로봇의 공간활용을 위한 비대칭형태에 따른 공간 활용에 대한 고려와 낮은 배터리 효율의 무인비행로봇과의 개선하기 위해서 자동차 및 Hovercraft로

변형 가능한 모델을 설계했다. 결론으로 비행결과 및 각 변신 형태에 따른 전력의 소모효율에 관해서 비교를 해보았다. 그 결과 기존의 한 가지 형태의 무인비행로봇의 형태보다 환경 상황에 맞게 변신하여 소모되는 전력을 줄임으로써 무인비행로봇의 에너지 효율을 개선했다.

II. 본론

1. 센서 병합(Sensor Fusing)

무인비행로봇을 비행하기 위해서는 기본적으로 자세제어를 해야 한다. 그에 따른 선행조건으로 Multi-Copter 자세 각을 구해야 한다. 센서의 각도 값을 구할 때 Gyroscope 센서와 Accelerometer 센서의 각 값을 받아서 계산을 한다. 아래에서는 두 센서를 이용해서 각도를 구하는 방법을 설명한다.

1.1 자이로 센서를 이용해 각도를 구하는 방법[3-5]

각속도 값(p q r)은 자이로센서 자체의 좌표계에서의 각속도이다. 센서가 어떤 자세로 있던 그 센서면에 수직인 방향이 Z방향이라 할 수 있다. 따라서 수평면과 수직인 전체 좌표계 Z축과 맞춰주기 위하여 각속도 값을 오일러 각의 변화율()로 변환해주어야 한다. 오일러 각의 변화율과 각속도의 관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식을 통해 오일러 변화율을 도출하고 적분하면 지면을 수평으로 한 기울기 값을 구할 수 있다. 하지만 적분하여 얻은 값이기 때문에 장시간 이용할 경우 드리프트(Drift) 현상에 의하여 센서 값이 발산 한다.

1.2 Accelerometer를 이용해 각도를 구하는 방법

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} \sin \\ -\sin\phi \cos\theta \\ -\cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

* Corresponding Author

Manuscript received August 30, 2014 / revised September 15, 2014 / accepted September 29, 2014

정진혁, 하성우, 윤병모, 김경호, 허경무: 단국대학교 전자공학과 (jjhos3421@gmail.com/hsw3211@gmail.com/qudahlemd@gmail.com/dkuhealth@dankook.ac.kr/huhkm@dku.edu)

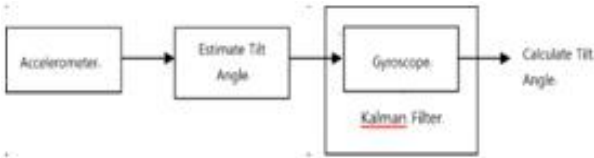


그림 1. 센서 퓨징 블록 다이어그램.
Fig. 1. Sensor Fusing Block Diagram.

위 식은 가속도 센서로 측정되는 가속도 값(을) 식으로 나타낸 것이다. 중력가속도(g), 이동속도(u, v, w)와 회전 각속도(p, q, r)같은 다양한 종류의 가속도가 포함되어 있다. 롤 각(φ)과 피치 각(θ)을 구하기 위해서 이동속도(u, v, w) 값은 정지해 있거나 일정한 속도로 직진하는 조건이라고 가정하면 $\dot{u}=\dot{v}=\dot{w}=0$, $u=v=w=0$ 이 되고 위 가정을 통해 회전 각속도 값(p, q, r)또한 0이 된다. 기체가 등속으로 움직인다는 가정하에 식이 다음처럼 간단해 진다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin \Phi \\ -\sin \Phi \cos \Theta \\ -\cos \Phi \cos \Theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Phi = \sin^{-1}\left(\frac{-f_y}{g \cos \Theta}\right) \quad (4)$$

$$\Theta = \sin^{-1}\left(\frac{f_x}{g}\right) \quad (5)$$

(4)와 (5)의 식을 이용하여 기체가 급격하게 움직이지 않을 때 기체의 롤 각(φ)과 피치 각(θ)을 구할 수 있다. 그러나 빠른 속도로 회전하거나 속도 변화가 심하면 오차가 커진다. 가속도 센서는 기울기 값을 얻어내는데 있어서 적분을 사용하지 않기 때문에 오차가 발산하지 않고 일정범위 안에 머무른다. 하지만 위에 식이 근사값으로 유도된 것이기 때문에 가속도 센서 단독으로 쓰기에는 오차가 큰 편이다. 자이로 센서와 가속도 센서 모두 위에 제시된 공식을 이용해 기울어진 각도를 구할 수 있으나, 하나의 센서만으로 측정하기에는 오차의 문제가 있다. 자이로 센서는 적분 누적오차 때문에 단기적 쓰임에 좋고 가속도 센서는 장기적 쓰임에 용이하나 병진운동성분이 있는 경우 측정에 어려움이 있으므로 두 센서의 결합을 통해 단점을 보완한다 [4,5].

2. 모델링

다수의 Rotor(동력원)을 갖는 무인비행로봇에는 Rotor의 개수에 따라서 2개의 Rotor를 갖는 BI-Copter부터 가장 일반적으로 제작되는 4개의 Rotor를 갖는 Quad-Copter, 8개의 Rotor를 갖는 Octo-Copter, 그 이상의 Rotor를 갖는 다양한 로봇들이 있다. 프레임의 형태에 따라서 Y-Copter, X-Copter, P-Copter, Rim-Copter 등이 있다. 이러한 형태의 로봇들은 그림 2와 같은 모양으로 제어 부를 중심으로 동력원의 원형배치 형태를 가지고 있다.

그림 2의 형태와 같은 로봇들은 Rotor의 아랫부분에만 부가기능 수행을 위한 장치를 장착할 수 있기 때문에 사용분야 확장이나 다기능 수행에 어려움이 있다. 이러한 구조적 한계를 극복하고 활용분야의 확장을 시도해 보기 위하

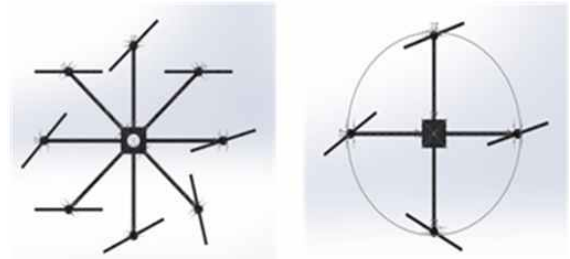


그림 2. 원형의 동력원배치를 가진 기존의 비행로봇 3D 모델.
Fig. 2. Conventional Flying Robot 3D Model of Circular-type Actuator Placement.

여 본 연구에서는 기존 제어 부를 중심으로 동력원의 원형 배치를 벗어나, 직사각형태의 비대칭 Rotor배열을 가지고 있는 새로운 형태의 X8 무인비행로봇을 설계하고 제작하였다. 이러한 결과로 비행체의 무게중심과 같은 선상에 장비를 장착하거나 적재 할 수 있는 공간을 확보하였다. 동력원이 정지하지 않은 상태에서 비행로봇, 자동차, 수륙양용 Hovercraft로 변형이 가능한 대형비행로봇이다.

2.1 자동차 변신

본 연구에서 자동차의 형태로 비행로봇을 변신하기 위해 리니어 액츄에이터를 사용하였다. 리니어 액츄에이터는 지렛대의 원리를 이용하여 로봇을 이루고 있는 직사각형 프레임의 긴 변을 회전시킨다. 자동차 변신은 비행로봇 형태에서 진행되며, 상단에 위치한 4개의 Rotor를 회전하여 양력을 발생시킴으로써 Actuator에 가해지는 부하를 줄이고 Actuator 동작속도 차이에 따른 쓰러짐을 보정한다. 자동차 형태에서 바퀴 부는 하단 모터와 프로펠러를 감싸고 있는 바퀴형태의

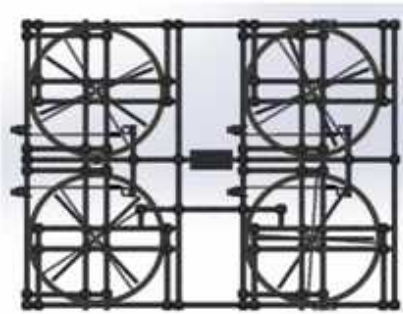


그림 3. 직사각형태의 비대칭 동력원 배열을 가지는 X8 로봇의 3D 모델.
Fig. 3. X8 Robot 3D Model of Rectangular-type Asymmetric Actuator Placement.

표 1. 실험 표본의 개요.

Table 1. Overview of the experimental sample.

품명	사양
모터	390kV
배터리	6S2P 5000mAh
가로*세로	1000mm * 1500mm
전비중량	15.5 Kg

구조물을 제작함으로써 양력발생을 위한 BLDC모터와 자동차의 이동을 위한 DC모터의 동력원을 분리 시켰다.

2.2 Hovercraft 변신

비행로봇에서 Hovercraft의 변신은 상단에 위치한 4개의 모터 중 진행방향을 기준으로 뒤쪽에 위치한 2개의 모터를 수직으로 세움으로써 추력의 발생방향을 전방으로 향하게



그림 4. 자동차 형태 3D 시뮬레이션.

Fig. 4. Car-type 3D Simulation.

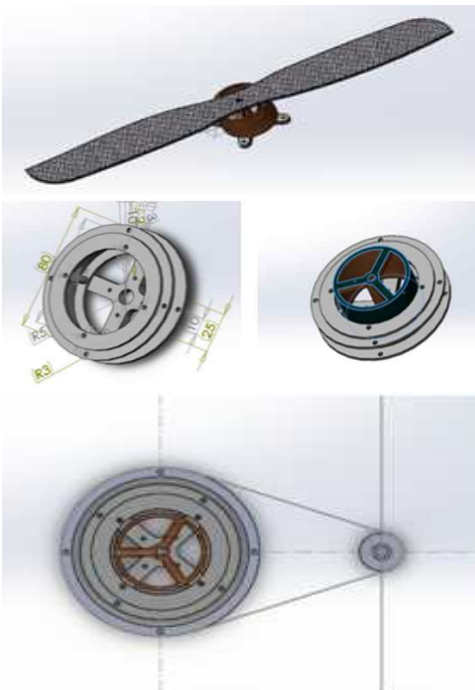


그림 5. 동력원 분리를 위한 HUB.

Fig. 5. HUB for Actuator Separation.

하여 앞으로 향하는 추진력을 얻는다. 이때에 나머지 6개의 모터는 지면에서 2~3cm정도 뜰 수 있는 양력을 발생시키고, 방향의 전환은 세워진 모터 두 개의 속도 차를 이용하여 제어하고, 비행체의 YAW축에 대한 전환은 나머지 전체 모터의 작용반작용을 이용하여 제어한다.

3. 제어방식

본 연구에서 제작한 비행체는 가속도센서와 자이로 센서의 결합을 통해 추정된 자세 값을 가지고 8개의 BLDC모터를 구동해 회전속도의 차이로 호버링과 이동방향을 제어한다. 이때 Processor에서는 PWM(Pulse Width Modulation)을 이용하여 각 8개 모터의 속도를 제어하는 ESC(Electric Speed Controller)로 신호를 전달하게 되고, ESC는 3상 BLDC Motor를 제어하게 된다. 자세 값은 각각 YAW, ROLL, PITCH 축에 대한 값으로 추정되는데, 이 값은 PID 제어를 거쳐 최종적인 각 축의 값으로 출력된다. 본 비행체는 비대칭 구조를 가진 직사각형태의 비행체로써 ROLL 축과 PITCH축 PID제어의 GAIN값이 다르게 적용되며 이렇게 적용된 값들은 각 모터의 위치에 따라 ROLL, PITCH 축과의 관계를 연관시켜 최종적인 값을 PWM으로 출력하게 되고, YAW축의 경우엔 자이로 센서의 Z값으로만 측정되어 모터의 회전방향에 따라 작용반작용의 법칙을 이용하여 반 토크를 이용해 제어된다[4-7]. 본 시스템은 실시간 제어를 추구하며, 소프트웨어적으로 PID제어를 설계하였고, 반복루프는 비행체의 특성상 안정성을 위하여 200Hz 이상의 제어속도를 갖도록 노력하였다.



그림 6. Hovercraft 형태 3D 시뮬레이션.

Fig. 6. Hovercraft-type 3D Simulation.

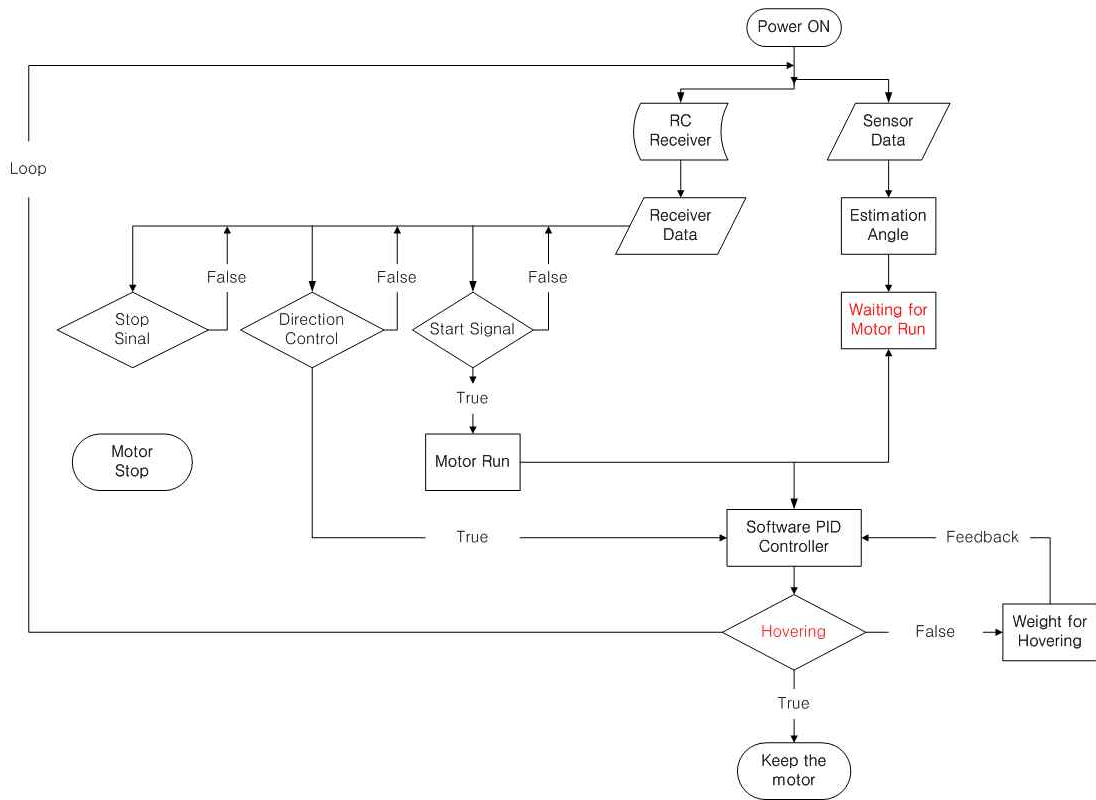


그림 7. 소프트웨어 아키텍처.
Fig. 7. Software Architecture.

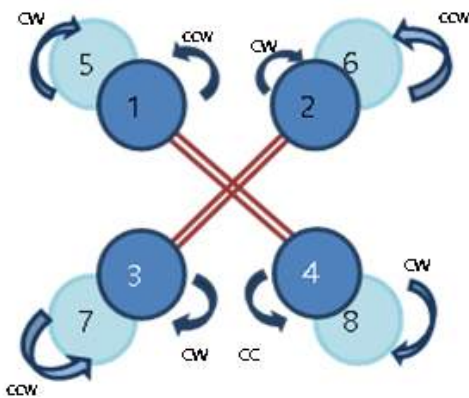


그림 8. X8-Copter의 Motor Number.
Fig. 8. Motor Number of X8-Copter.

센서에서 얻은 추정된 YAW, ROLL, PITCH 데이터는 각각 식 (6)과같이 P, I, D제어기를 거치게 된다.

$$PData[axis] = \text{추정된 } axis \text{ 각도값} * axis \text{ 의 } P \text{ GAIN}$$

$$IData[axis] = \text{추정된 } axis \text{ 각도값} * axis \text{ 의 } I \text{ GAIN}$$

$$DData[axis] = \text{추정된 } axis \text{ 각도값} * axis \text{ 의 } D \text{ GAIN} \quad (6)$$

$$\text{outPID}[axis] = PData[axis] + IData[axis] - DData[axis]$$

제어기를 통해 YAW, ROLL, PITCH 축의 값들은 따로 출력되며, YAW축의 경우 P제어기만을 사용한다.

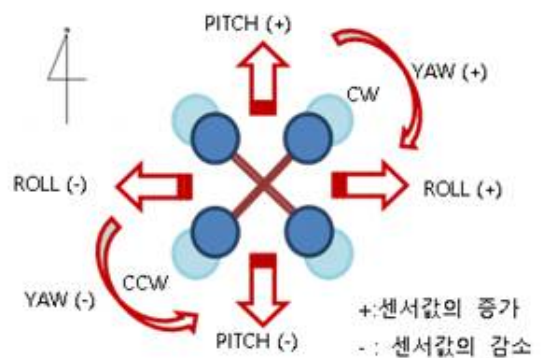


그림 9. 센서 축.
Fig. 9. Sensor Axis.

비행체에서 사용한 센서 값은 축의 중점으로부터 표 2와 같이 출력되는데, 제어기에서 출력된 값이 각 모터의 속도 값으로 계산될 때 해당축의 기울어짐과 모터의 위치에 따른 증감의 관계여부를 판별하고 동작 할 수 있게 해준다.

$$\text{Matchmotor}(X, Y, Z) = \text{Throttle} + \text{outPID}[\text{ROLL}] * X + \text{outPID}[\text{PITCH}] * Y + \text{outPID}[\text{YAW}] * Z \quad (7)$$

표 2을 이용하여 식 (7)에 대입하면 각 모터의 출력을 구할 수 있다. 모터의 동작을 예로 들어 설명하면 만일 기체가 ROLL축으로 (-), PITCH 축으로 (+)의 값을 가지고 있다면 1번 모터는 $\text{outPID}[\text{ROLL}] * (-1) + \text{outPID}[\text{PITCH}] * (+1)$

표 2. 각 모터와 3축의 관계.

Table 2. Relationship of each motor and 3-axis.

모터번호	X	Y	Z
Motor1	+1	-1	-1
Motor2	-1	-1	+1
Motor3	+1	+1	+1
Motor4	-1	+1	-1
Motor5	+1	-1	+1
Motor6	-1	-1	-1
Motor7	+1	+1	-1
Motor8	-1	+1	+1

로 반대쪽에 위치한 4번모터 $outPID[ROLL]*(1) + outPID[PITCH]*(1)$ 보다 큰 값을 가지므로 회전속도의 차이에 따라 기체는 다시 제자리를 찾게 된다. 이처럼 최종적으로 각 모터에는 조종사가 보내온 Throttle 및 방향에 대한 가중치 값과 계산된 값의 합이 입력되고, 이를 통해 비행체는 호버링이나 방향의 전환 및 이동을 하게 된다.

III. 실험 및 고찰

본 논문에서는 Multi-copter 형태의 무인비행로봇을 구동하기 위한 Sensor Fusing, 비대칭형태 그리고 형태변형을 통한 배터리의 효율적인 사용에 대해 설명하였다. 각 과정을 통해 무인비행로봇을 제작하였고 기본 비행시 X8의 형태에서는 Full Throttle 기준으로 60%의 파워로 이륙이 가능하였고 그 이상의 Throttle로 올릴 시 기체의 상승과 하강을 조절할 수 있었다.

또한 자동차 형태 및 Hovercraft 형태로의 변형은 기존의 무인비행로봇과는 달리 이동방식을 공중만으로 제한하지 않고 상황에 맞게 변형이 가능하고 이것이 실현가능하다는 것을 보였다. 환경에 따른 각 형태로의 변형 과정을 아

래에 나타냈다.

실험환경에 맞추어 각 형태에 따른 구동 시간을 계산해 보았다. 본 기체에 사용한 배터리는 6S2P(6Sell 2Pack)으로 22.2V에 5000mAh * 2 = 10Ah이다. 최대출력은 50C로써, 여기서 C는 Capacity의 약자로50C로 방전할 때 1시간 사용할 수 있는 양이란 의미이다. 본 연구에서 사용한 배터리는 1P당 약 24V 5A로 1시간동안 공급할 수 있고, 5000mAh에 50배의 달하는 250A의 전류를 방전할 수 있다. 사용된 모터는 Burst Current 54A이고, 비행체의 호버링 쓰로틀은 약 60%라고 계산하였을 때 32.4A가 필요하므로 모터 1개를 약 9.26분 운용 가능하다. 2P을 이용하여 8개의 모터를 구동하였으므로 이론상 비행가능시간은 2.31분으로 약 2분 30초 내외이다. Hover-Craft의 경우 30~35% 쓰로틀에서 모든 운용이 가능하였다. 이를 통하여 가용시간을 계산하면, 모터 당 16.2A의 전류가 필요하고 1P으로 18.52분 운용 가능하다. 2P으로 8개의 모터를 가용했을 때 이론상 4.63분, 약 4분 45초 운용 가능하다. 자동차형태는 DC-Motor 2개가 3km/h의 속도로 주행 시 약 4A를 소모하였다. 따라서 약 150분 주행이 가능하다.

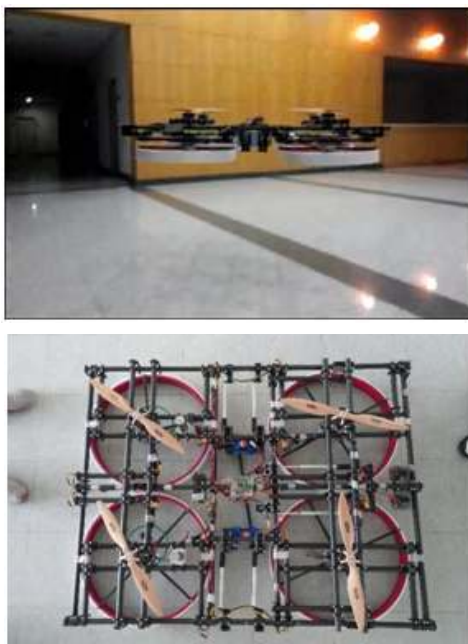


그림 10. 무인비행기체와 호버링 모습.
Fig. 10. X8 Copter and Hovering Figure.



그림 11. X8 Copter에서 자동차 변신 과정.
Fig. 11. X8 Copter-to-Car Transform Process.

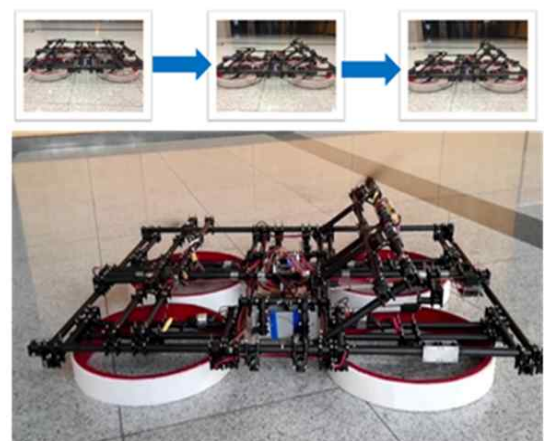


그림 12. X8 Copter에서 Hover-craft 변신 과정.
Fig. 12. X8 Copter-to-Hovercraft Transform Process.

표 3. 형태에 따른 비행시간.

Table 3. Flying Time of Each Type.

형태	시간
X8 Copter	2분 30초
자동차	150분
Hover-craft	4분 45초

표 4. 실제 실험한 운용 가능시간.

Table 4. The experimental operation time.

형태	시간
X8 Copter	약 3분 10초
Hover-craft	약 6분 20초

위와 같은 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 세가지 형태의 변화를 통해 기존의 비효율적이던 Multi-Copter의 에너지 효율을 2~50배 증가시켰다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존의 무인비행로봇의 최대한 길고 다양한 임무수행을 위한 비대칭 형태의 3단변신 무인비행로봇, Quad-Copter가 2개 겹쳐진 X8 형태의 Multi-Copter를 통한 활용 방법을 제시하였다. 이를 위해, 제작한 무인비행로봇의 비행을 위해 필요한 센서와 제작에 앞서서 만든 모델링 그리고 가장 중요한 비행에 있어서 무인비행로봇의 자세제어방법에 대해서 기술하였다. 또한 무인비행로봇의 공간활용을 위한 비대칭형태에 따른 공간 활용에 관한 고찰과 낮은 배터리 효율의 무인비행로봇 문제를 개선하기 위해서 자동차 및 Hovercraft로 변형 가능한 모델을 설계하였다. 제작 및 실험을 통해, 그리고 실제 비행결과 및 각 변신 형태에 따른 전력의 소모효율에 관해서 비교를 해보았다. 그 결과 기존의 한 가지 형태의 무인비행로봇의 형태보다 환경 상황에 맞게 변신하여 소모되는 전력을 줄임으로써 무인비행로봇의 에너지 효율을 개선했다.

REFERENCES

[1] E. A. George, G. Tiwari, R. N. Yadav, E. Peters, and S. Sadana, "UAV systems for parameter identification in agriculture," *Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)*, pp. 270-273, Aug. 2013.

[2] J. Zhang, "Analysis of unmanned aerial vehicle navigation and height control system based on GPS," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 643-649, Aug. 2010.

[3] S. Kim, "Understanding the Kalman filter: MATLAB Utilization," *Ajin*, 2010.

[4] J. Wang, S. Lee, S. Yang, S. Lee, and S. Joo, "Attitude control of a modified quad-rotor with a PID controller," *Korea Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, pp. 1800-1801, Jul. 2011.

[5] S. Joo, S. Lim, T. Kim, G. Lee, S. Back, and G. Jeong,

"Quad-Rotor controller design for a stable position control and simulation," *CICS 2011 Journal of Information and Control Conference*, pp. 205-206, Oct. 2011.

[6] G. Lee, Y. Yoon, U. Chang, J. Park, and Y. Choei, "Quad-rotor unmanned aircraft modeling and controller design," *Korea Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, pp. 1922-1923, Jul. 2011.

[7] J. Whang, S. Whang, S. Hong, and M. Yoo, "Research for improved stabilization of the quad-rotor-type flying robot controller performance," *Proc. of 2014 29th ICROS Annual Conference (ICROS 2014) (in Korean)*, Korea, pp. 7-9, Apr. 2012.



정진혁

2014년 현재 단국대학교 전자공학과 재학중. 관심분야는 로보틱스, 시스템 제어.



하성우

2014년 현재 단국대학교 전자공학과 재학중. 관심분야는 로보틱스, 시스템 제어.



윤병모

2014년 현재 단국대학교 전자공학과 재학중. 관심분야는 로보틱스, 시스템 제어.



김경호

1996년 日本 Keio Univ. (공학석사) 졸업. 1999년 日本 Keio Univ. (공학박사) 졸업. 2000년~2006년 삼성종합기술원(수석연구원). 2006년~현재 단국대학교 전자공학과 부교수. 관심분야는 Ubiquitous Health, Human & System, Medical Device.

허경무

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제20권 제6호 참고.