

# 비행로봇의 천장부착을 위한 호버링 제어

## Hovering Control of a Flying Robot for Attaching to the ceiling

\*김덕후<sup>1</sup>, 조국<sup>1</sup>, 강민성<sup>1</sup>, 신진옥<sup>1</sup>, 손웅희<sup>1</sup>, #박상덕<sup>1</sup>

\*Duk-Hoo Kim<sup>1</sup>, Kuk Cho<sup>1</sup>, Min-Sung Kang<sup>1</sup>, Jin-Ok Shin<sup>1</sup>, Woong-Hee Son<sup>1</sup>, #Sangdeok Park(sdpark@kitech.re.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 융복합기술연구본부 로봇기술연구부

Key words : Flying Robot, Hovering, Docking

### 1. 서론

비행로봇은 주로 감시, 정찰용으로 사용된다. 특정지역에 설치하지 않고 움직일 수 있어 넓은 지역을 감시, 정찰할 수 있다는 장점이 있지만, 사용시간이 충분하지 못하다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 천장에 도킹장치를 하고 비행로봇이 감시, 정찰을 하다 천장에 도킹장치와 도킹되면 충전이 되면서 카메라 등의 임무장비로 비행로봇을 계속적으로 사용할 수 있도록 하였다. 모바일과 결합된 비행로봇은 어느정도의 위치에 부착이 되면 이동이 가능하기 때문에 천장 부착시 제어가 정밀하지 않았다. 하지만 도킹장치와 결합되기 위해서는 특정 위치에 로봇이 부착되어야 하기 때문에 비행로봇의 호버링 제어가 필수적이다. 본 논문에서는 로봇의 구조와 동역학을 2장에서 설명하고, 3장에서 위치인식에 필요한 위치센서에 대해 설명하겠다. 그리고 4장에서 실험 결과 보여주겠다.

### 2. 동역학

본 논문에서 개발한 비행로봇(그림 1)은 회전익형 비행 플랫폼 중에 동축 로터 형태를 적용하였다. 동축로터 형태는 공중정지비행능력이 우수하고, 싱글로터 비행로봇과는 달리 보조회전의 필요 없으므로 로봇의 크기를 줄일 수 있다. 또 상/하 두 개의 로터가 서로 반대방향으로 회전함으로써 반토크를 상쇄하는 방식으로, 모든 동력이 추력을 발생시키는데 사용되기 때문에 유효하중(Payload)이 증가한다.[1]

그림 2는 비행 메커니즘에서의 좌표계를 나타낸다. 로터의 회전각( $\beta$ )에 의해 추력벡터가 발생된다. 상위로터( $T_U$ )와 하위로터( $T_L$ )의 추력벡터는 다음 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$T_U = T_U^X X_R + T_U^Y Y_R - T_U^Z Z_R = G(a,b) \cdot |T_U| \quad (1)$$

$$T_L = T_L^X X_R + T_L^Y Y_R - T_L^Z Z_R = G(a,b) \cdot |T_L| \quad (2)$$

각 추력 벡터는 그림 5와 같이 종방향과 횡방향으로 나누어 표현할 수 있고 이에 따라  $G(a,b)$ 는 다음 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$G(a,b) = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 a \cdot \cos^2 b}} \begin{pmatrix} -\sin a \cdot \cos b \\ \sin b \cdot \cos a \\ -\cos a \cdot \sin b \end{pmatrix} \quad (3)$$



그림. 2 Coaxial Rotor Type Flying Robot

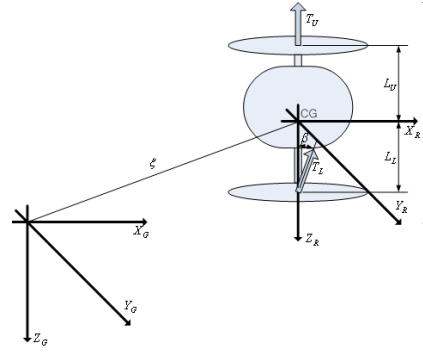


그림. 2 Coordinate

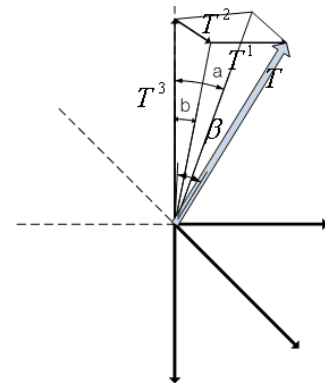


그림. 3 Thrust Vector

좌표 변환행렬  $R(\xi)$ 은 다음 식 (4)와 같으며 여기서  $\phi, \theta, \psi$ 는 각각 롤, 피치, 요의 각도이고, 각각  $C_\phi$ 와  $S_\phi$ 는  $\cos \phi$ 와  $\sin \phi$ 와 같이 표기했다. 따라서 병진운동의 힘은 식 (5)로 나타낸다.

$$R(\xi) = \begin{pmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi C_\phi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi - C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi + C_\psi C_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$F = RG(a,b)(|T_U| + |T_L|) + mgZ_E \quad (5)$$

롤과 피치에 대한 토크  $\tau_\phi, \tau_\theta$ 는 시스템의 무게 중심(CG)과 각 로터 사이 거리  $L_U, L_L$ 에 작용하는 추력벡터에 의해 발생되고 요에 대한 토크  $\tau_\psi$ 는 상·하위 로터의 회전속도 차에 의해 발생된다.

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (h_U |T_U| + h_L) |T_L| \cdot \frac{\sin b \cdot \cos a}{\sqrt{1 - \sin^2 a \cdot \cos^2 b}} \\ (h_U |T_U| + h_L) |T_L| \cdot \frac{-\sin a \cdot \cos b}{\sqrt{1 - \sin^2 a \cdot \cos^2 b}} \\ I_R^U \dot{\Omega}_R^U + b_R^L \dot{\Omega}_R^L - I_R^U \dot{\Omega}_R^U - b_R^U \dot{\Omega}_R^U \end{pmatrix} \quad (6)$$

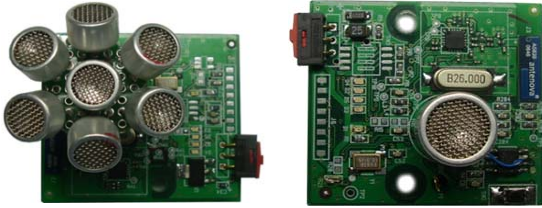


그림. 4 UPS(Tx Node, Rx Node)

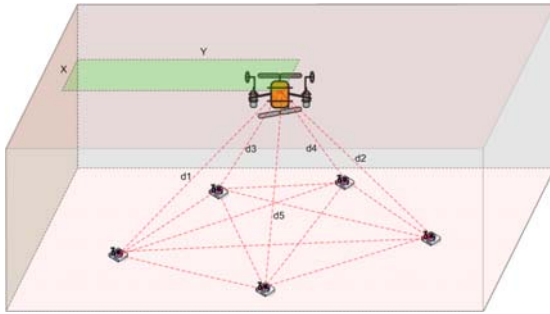


그림. 5 Localization using UPS

식 (6)에서  $I_R^U$ 와  $I_R^L$ 은 각 로터의 Z축에 대한 질량관성모멘트이고  $\Omega_R^U$ 와  $\Omega_R^L$ 은 각 로터의 회전 속도이다. 위의 식 (1)에서 (6)을 정리하면 다음과 같은 운동방정식 (7)을 얻을 수 있다. 여기서  $b\dot{\phi}$ 과  $b\dot{\theta}$ 의  $b$ 는 블레이드 및 안정화 장치의 기계적인 자이로 역할에 의한 감쇠계수이다.[3]

$$\begin{pmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ m\ddot{z} \\ I_X\ddot{\phi} + b\dot{\phi} \\ I_Y\ddot{\theta} + b\dot{\theta} \\ I_Z\ddot{\psi} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} G^X(a,b)(|T_U|+|T_L|) \\ G^Y(a,b)(|T_U|+|T_L|) \\ G^Z(a,b)(|T_U|+|T_L|) + mgZ_R \\ (h_U|T_U| + |h_L T_L|) \cdot G^Y(a,b) \\ (h_U|T_U| + |h_L T_L|) \cdot G^X(a,b) \\ I_R^L \Omega_R^L + b_R^L \Omega_R^L - I_R^U \Omega_R^U + b_R^U \Omega_R^U \end{pmatrix} \quad (7)$$

### 3. 위치인식

실내용 비행 로봇은 탐사 위치를 파악하고 로봇의 위치제어를 위해 위치인식 시스템이 필요하다. 최근 실외에서는 GPS를 이용하여 위치를 인식하는 방법이 많이 사용되고 있지만 다리 밑이나 터널 등지에서는 신호가 약하여 사용하기 좋지 않다. 비행로봇이 작업하는 공간은 실내이기 때문에 GPS를 사용하지 못하여 초음파를 이용한 위치인식 시스템(UPS)을 사용하였다. GPS와 다른 점은 그림. 5과 같이 다수의 수신노드가 위성역할을 하고, 한 개의 송신노드에서 위치를 추정하는 것이다. 먼저 송신노드에서 RF 신호와 함께 초음파 신호를 발사하면 신호 도달 범위 내에 있는 수신노드들은 이 신호를 받게 되며, RF가 초음파 신호보다 빠르기 때문에 신호 지연 시간이 발생하고 이 두 신호가 도착하는 시간차를 이용해서 송신노드까지의 거리를 계산할 수 있게 된다. 수신노드들은 송신노드로 자신의 위치 정보와 함께 계산된 거리 값을 전송하고, 송신노드에서는 수신노드들의 위치와 거리를 이용해서 삼변 측량에 의해 자신의 위치를 계산한다.

UPS는 실내공간에서 수신노드를 펼쳐놓은 범위에 따라 사용할 수 있는 공간을 확장 할 수 있다. 오차범위는 약 3cm이고, 응답시간은 20Hz이다.[4]

### 4. 실험결과 및 결론

실내용 비행 로봇은 dsPIC마이크로 컨트롤러를 사용하였고, 자세측정을 위한 관성측정장치(IMU, Inertia Measurement Unit)를 사용하였고, 앞서 설명한 UPS를 위치 정보를 인식하기 위해 사용하였다. 이들을 통해 얻어진 자세와 위치 정보를 이용하여

로봇을 제어하는데 사용하였고, Zigbee를 통해 외부로부터 조작 명령을 수신하기, 외부로 로봇의 자세 및 위치 정보를 송신할 수 있도록 하였다. 천장에 부착하기 전에 바닥에 지정된 착륙지점에 착륙할 수 있도록 하였다. 착륙지점 근처에서의 오차는 약 30cm의 오차를 가지고 있다.

본 논문에서는 관성측정장치와 초음파 센서를 이용한 위치인식 센서를 이용하여 로봇이 한 곳에 도킹 할 수 있도록 PD제어기를 이용하여 위치제어를 하였다. 위치제어시 적분기를 사용하면 UPS의 응답시간이 제어루프에 느려 응답시간 사이에 오차가 계속 누적되어 발산을 초래하기 때문이다. 향후 좀 더 정밀한 위치제어를 할 수 있도록, 강인한 제어기를 설계하고 로봇 자체의 안정성도 높일 수 있는 연구가 진행 되어야 한다.

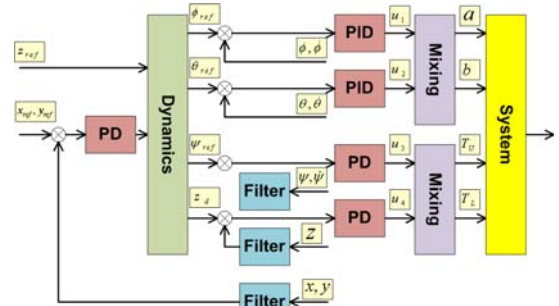


그림 6. Control Block

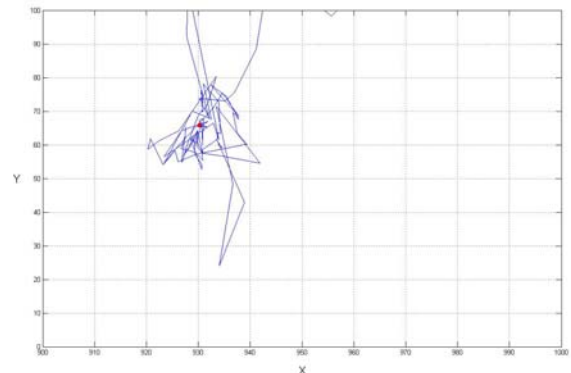


그림 7. Test Result

### 후기

본 연구는 지식경제부의 재난극복과제로 지원을 받아 연구하였습니다.

### 참고문헌

1. 지상기, 강민성, 신진옥, 박상덕, 황세희, 조국, 김덕후, “감시용 동축로터 비행로봇의 개발”, Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 13, No. 2. pp. 101~107, 2007.
2. P. Castollo, R. Lozano and A.E. Dzul, Modelling and Control of Mini-Flying Machines, Springer-Verlag, 2005.
3. 김덕후, 황세희, 강민성, 조국, 박상덕, 손웅희, 전방향 이동장치가 결합된 교량검사를 위한 비행로봇 개발, 소음진동공학회 지 제7권 제6호, pp. 11~15, 2007.
4. K. Cho, M.-S. Kang, S.-D. Park, and W.-H. Shon, Development of Indoor Localization System using Ultrasonic Sensors, International Symposium on Robotics, 2008.