

# 드론 비행제어 및 상태추정 기초

양현수, 이동준  
서울대학교

## 요약

본고에서는 최근 각광받고 있는 드론관련 기술 중 비행에 필수적인 비행제어 기술 및 이를 위한 드론 상태추정 기술의 기초에 대해 소개한다. 고정익, 회전익 등 다양한 드론 중 본고에서는 다양한 활용 가능성으로 인해 현재 민간 및 상업용으로 가장 널리 쓰이고 연구되고 있는 멀티로터 타입의 드론에 대해 서술한다. 비행제어를 위한 드론의 동역학에 따른 기초적인 비행제어 방법소개, 비행제어가 가능토록 드론에 탑재되는 일반적인 센서 종류와 이를 활용한 위치, 회전 추정 방법들에 대해 소개하며 현재 관련 기술 현황에 대해 소개한다.

## I. 서론

최근 10여년간 센서, 재료 및 제어 기술의 발달에 따라 UAV 혹은 드론으로 불리는 무인기 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 드론에 대한 관심을 입증하듯 Google, Amazon, DHL 등 우수 기업들과 EU연합의 우수 연구기관들이 앞다투어 관련 기술의 개발에 박차를 가하며, 드론을 활용한 서비스를 선보이며 다양한 활용에 대한 관심을 증대시키고 있다.

뿐만 아니라 최근에 들어서는 드론을 단순 비행 및 정찰의 목적이 아닌 시설물 유지 보수와 같이 공간의 제약 없이 물리적인 작업수행에 활용하는데 대한 연구 또한 진행되고 있으며, 이는 드론의 실제 생활에 도움이 되는 다양한 활용가능성을 보여주고 있는 예라고 할 수 있겠다.

드론은 다양한 형태의 무인기를 통칭하는 단어로 군사용, 상업용 등 목적에 따라 형태와 크기, 활용되는 분야가 다르며 필요로 하는 기술이 매우 다양하다. 드론은 그 종류에 따라 고정익, 헬리콥터, 멀티로터 타입으로 나뉠 수 있다. 고정익은 일반적인 항공기와 동일한 형태로 각 날개의 조종면을 움직여 제어하며, 구조적으로 높은 속도로 비행하는 것이 가능하고 적은 추력으로도 높은 양력을 얻을 수 있다는 장점이 있으나

정지비행이 불가능해 그 활용성 측면에서 제약이 있다. 반면 헬리콥터의 경우 높은 추력을 필요로 하지만 정지비행이 가능해 보다 다양한 지역에 접근 및 작업이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 swashplate 등 제어를 위한 로터 메커니즘이 복잡하고 제어 자체도 까다롭다는 단점이 있다. 반면 멀티로터 타입의 드론은 헬리콥터와 마찬가지로 로터에 의해 비행을 하나 단순히 각 로터의 속도를 변화시킴으로 제어가 가능하여 구조적으로 매우 단순하며 그로 인해 제작 및 제어가 용이하다는 장점이 있다.

이러한 멀티로터 타입의 드론은 다양한 분야 기술들의 최근 급격한 발전에 힘입어 가능하게 된 것으로, 관련 기술로는, 탄소섬유와 같은 재료/생산기술, 고효율 모터 및 배터리 기술, 비행을 위한 경량 MEMS기반 센서 기술, 고성능 온보드 컴퓨터 및 통신기술, 상태추정 및 제어 기술, SLAM 및 측위 기술 등으로, 상기한 장점과 이러한 다양한 기술과의 접점은 드론이 최근 상업용 및 방송, 통신 등 다양한 목적으로 매우 활발히 이용될 수 있는 밑바탕이 되었다. 이러한 배경으로부터 본고에서는 다양한 드론의 종류 중 멀티로터 형태의 드론에 대해 다루고자 하며 특히 비행제어 및 상태추정 기술에 대해 소개하고자 한다.

본 고의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 드론의 비행제어를 위한 기본기작과, 동역학 및 배경지식과 이를 바탕으로 개발된 몇 가지 기초적인 비행제어기법에 대해 소개하며, III장에서는 드론의 비행제어를 가능하게 하는 자세와 회전 상태 추정 기술에 대해 소개하며, IV장에서 본 고를 마무리한다.



그림 1. 다양한 종류의 드론, 고정익 (좌), 헬리콥터 (중), 멀티로터 (우)

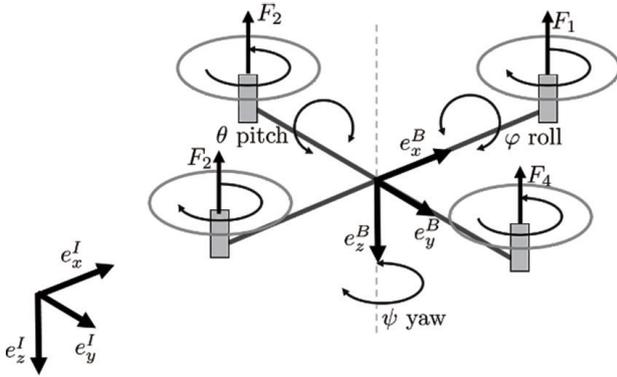


그림 2 쿼드콥터 타입 드론의 기본구조

## II. 드론 비행제어

본고에서는 다양한 드론 중 멀티로터 타입 드론 관련 기술을 소개하고자 한다. 그 중 <그림 2>와 같은 쿼드콥터는 멀티로터 타입 드론 중 프로펠러 수가 4개인 경우를 말하는데, 가장 보편적으로 이용되며 다른 멀티로터의 경우에도 프로펠러가 대칭으로 구성되어 있다는 특성으로부터 동일한 방법으로 활용 가능하므로 비행제어 기술에서는 쿼드콥터에 한정시켜 비행제어에 대한 소개를 하고자 한다.

쿼드콥터 또는 멀티로터 타입의 드론은 추력을 내는 프로펠러가 모두 한 방향으로 정렬되어 있어 정렬된 방향으로의 구동과 세 방향으로의 회전이 가능하여 총 4개의 입력을 갖는다. 이때 드론은 3차원 공간에서  $x, y, z$ 의 3축으로 이동과 회전이 가능하므로 총 6자유도를 가지는데, 제어입력은 로터 4개의 추력, 즉 4자유도 이므로, 시스템 자유도 대비 제어입력 자유도가 적은 구동부족 (under-actuation) 특성을 갖는다. 이 특성이 멀티로터 타입의 드론 제어문제를 어렵게 만드는 요소이다.

드론의 비행제어는 다음의 동역학 식으로부터 유도될 수 있다[1]:

$$m\ddot{x} = -\lambda R e_3 + m g e_3 + f_a \quad (1)$$

$$J\dot{w} + w \times Jw = \tau + \tau_a \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 드론의 질량,  $J$ 는 회전관성,  $\lambda$ 는 전체 프로펠러가 내는 추력,  $\tau$ 는 전체 프로펠러의 토크,  $x$ 는 드론의 위치벡터,  $w$ 는 드론 좌표계상에서의 각속도,  $R$ 은 드론 회전을 나타내는 회전행렬,  $g$ 는 중력,  $e_3 = (0,0,1)$ 은  $z$ 방향을 나타내는 단위벡터로 추력과 중력이 각각 드론의  $z$ 방향과 좌표계의  $z$ 방향으로 작용함을 나타낸다.

상기한 제어입력을 위한 각 프로펠러의 각속도와 추력 및 토크의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k & k & k & k \\ 0 & -L & 0 & L \\ L & 0 & -L & 0 \\ b & -b & b & -b \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $k, b$ 는 각각 프로펠러의 속도와 추력 및 회전모멘트의 관계를 결정하는 상수이며,  $L$ 은 프로펠러와 드론 중심간의 거리,  $\tau_i$ 는 각각 roll, pitch, yaw 방향의 토크,  $w_i$ 는 각 프로펠러의 회전속도이다. 프로펠러의 속도와 추력, 토크를 맵핑하는 위의 행렬은 항상 역행렬이 존재하므로 원하는 추력과 토크가 결정되면 (3)의 관계식을 통해 각각 모터를 제어하여 원하는 제어입력을 생성할 수 있다.

드론의 비행제어 문제를 단순화하기 위해 일반적으로 다음의 가정을 고려한다. 1) 드론의 움직임으로부터 발생하는 공기역학적 요소는 많은 경우 단순화 되거나 매우 작다고 가정하며 동역학 식 (1), (2)에서 표현되어 있는  $f_a, \tau_a$ 에 해당한다. 이는 드론의 속도에 의존하므로 빠르게 움직이는 경우 영향이 커지지만 정지비행과 같이 충분히 느리게 이동하는 경우 동역학에 크게 영향을 미치지 않으며, 실외비행과 같이 높은 정밀도를 필요로 하지 않는 경우 중요하게 다루지 않는다. 2) 추력  $\lambda$ 는 드론의 병진운동 대비 충분히 빠르게 변하며, 따라서 원하는 추력을 바로 낼 수 있다고 가정한다. 마지막으로 3) 드론의 회전동역학이 병진운동 동역학보다 빠르며 기구학적으로 제어하는 경우 원하는 각속도 제어가 가능하다고 가정한다. 동역학 식 (1), (2)에서 볼 수 있듯이 회전, 병진운동 동역학이 서로 분리되어 있고 추력  $\lambda R e_3$ 을 통해 회전이 병진운동에 영향을 미치는데, 가정 3)에 의해 회전운동 동역학을 고려하지 않고 기구학 수준에서 원하는 회전이 가능하다고 가정하는 방식과 동역학 수준에서 회전을 제어하는 방법 두 가지로 나뉘게 된다.

드론 비행제어에 있어 주로 다루어지는 문제는 앞서 설명된 구동부족문제이며, 이는 (1)에서 제어입력인  $\lambda R e_3$ 으로 표현된다. 즉, 물리적으로 병진운동을 위한 제어 입력은 주어진 시점에서  $R e_3$ 로 표현되는 드론 좌표계의  $z$ 방향으로만 가능하며 이를 원하는 방향으로 변화시키기 위해 적절한 회전제어가 필요하다. 적합한 회전제어와 관련하여 먼저 동역학 수준에서 제어하는 방법을 소개한다.

동역학 수준에서 제어하는 경우 원하는 추력의 방향 달성을 위해 원하는 회전으로 제어할 수 있는 제어가 선행되어야 한다. 원하는 회전각을 추종하는 토크입력은 다음과 같이 주어진다[3].

$$\tau = w \times Jw - J\Gamma^{-1}[b\dot{q} + k(q - q_d) + \dot{\Gamma}w] \quad (4)$$

여기서  $q = (\varphi, \theta, \psi)$ 로 롤, 피치, 요 각도이고,  $b, k$ 는 제어게인,  $\Gamma$ 는 다음의 식을 만족한다.

$$\Gamma = \frac{1}{c\theta} \begin{bmatrix} 0 & s\psi & c\psi \\ 0 & c\theta c\psi & -c\theta s\psi \\ c\theta & s\theta s\psi & s\theta c\psi \end{bmatrix}$$

위의 식(4)를 이용해 원하는 회전  $q_d$ 를 추종하는 움직임을 얻을 수 있다.

위의 회전제어를 바탕으로 원하는 병진운동의 거동은 위치제어, 힘제어 등 목적에 따라 다양하나 본고에서는 가장 기본적인 경로추종 제어에 대해 소개하고자 한다. 구동부족으로 인해 드론의 회전은 원하는 병진운동에 의해 결정되며 따라서 경로는 드론의 위치에 대해 주어지게 된다. 이를 위한 추력을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$-\lambda R e_3 = \ddot{x}_d + b(\dot{x}_d - \dot{x}) + k(x_d - x) - m g e_3 \quad (5)$$

여기서  $x_d$ 는 원하는 경로이며,  $b, k$ 는 각각 제어 게인이다.

위의 수식(5)에 따라 추력의 크기  $\lambda$ 와 방향이 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda_d = \frac{m}{\cos\varphi\cos\theta} [g - \ddot{x}_{3d}]$$

여기서  $\lambda_d$ 는 원하는 추력크기이며,  $\ddot{x}_{3d}$ 는 식(5) 우변 벡터의 중력을 제외한 세번째 항이다. 앞서 가정에 따라 원하는 추력을 생성할 수 있으며, 결정된 추력의 방향을 만족하기 위한 방향은 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{pmatrix} s\theta_d \\ s\varphi_d \end{pmatrix} = -\frac{m}{\lambda_d} \begin{bmatrix} c\varphi c\psi & s\psi \\ c\varphi s\psi & -c\psi \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ddot{x}_{1d} \\ \ddot{x}_{2d} \end{pmatrix}$$

여기서  $\theta_d, \varphi_d$ 는 원하는 추력 방향을 얻기 위한 각도이며,  $\ddot{x}_{1d}, \ddot{x}_{2d}$ 는 식(5) 우항 벡터의 두번째, 세번째 값이다. 앞서 구한 추력의 크기와 결정된 방향을 통해 제어입력으로부터 원하는 경로를 추종할 수 있다.

다음으로 드론의 회전을 기구학 수준에서 제어한다는 가정하의 제어기법을 소개하고자 한다. 이는 드론 플랫폼 내부 알고리즘에서 각속도 제어가 가능하다는 가정이 필요한데, 이는 드론의 회전 동역학이 충분히 빠르고 구동부족의 문제가 없으므로 달성하기 어렵지 않은 문제로, 많은 상용 드론 플랫폼에서 각도 제어, 각속도 제어 등 이러한 기구학적 회전제어기능을 제공한다. 각속도에 따른 회전행렬 기구학은 다음과 같다.

$$\dot{R} = S(w)R$$

여기서  $S(w)$ 는 벡터를 skew-symmetric 행렬로 변환시켜주는 맵핑이다[1].

식 (2)의 제어입력을 고려할 때, 실제로 주어진 자세에서 생성 가능한 제어입력은 다음과 같이 서술 가능하다.

$$\lambda R e_3 = -m\ddot{x}_d + m g e_3 + b\dot{e} + k e + v_e$$

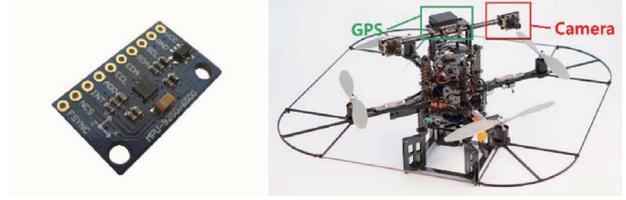


그림 3. 드론에 탑재되는 센서. IMU(좌), GPS 및 카메라(우)

여기서  $e$ 는 원하는 경로와 실제 위치의 차이를 나타내는 오차이며  $v_e$ 는 구동부족으로 인해 원하는 제어입력 (5)와 실제 주어진 회전에서 가능한 제어입력의 차이를 나타낸다. 위의 제어입력을 동역학 식에서 고려하면 동역학 식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + k e = -v_e$$

여기서  $v_e = 0$ 인 경우 원하는 경로의 추종이 가능하다. 이는 회전제어가 동역학 및 기구학 수준에서 제어되는 경우 모두 적용되는 것이며, 따라서  $v_e \rightarrow 0$ 을 만족하기 위한 방법으로 differential flatness[4]를 이용한 방법, back-stepping 방법 등이 가능하며 그 중 back-stepping 제어는 다음과 같이 주어진다[1].

$$\begin{pmatrix} \lambda w_2 \\ -\lambda w_1 \\ \dot{\lambda} + \alpha\lambda \end{pmatrix} = R^T [\dot{v} + \alpha v + \gamma(\dot{e} + \epsilon e)]$$

위의 식으로부터  $\lambda$ 와  $w_1, w_2$ 가 결정되며 가정에 의해 드론의 각속도는 충분히 빠르게 제어가 가능하므로 결정된 제어 입력에 의해 원하는 경로로 지수적 수렴이 보장된다[1].

이 외에도 다양한 환경 및 불확실한 동역학을 가지는 드론 비행제어를 위한 강건제어나, 적응제어 등의 결과들이[1] 있으며, 또한 드론의 빠른 비행제어를 위해 공기역학적 효과를 고려한 결과[5] 등 다양한 비행제어 결과가 있다. 이와 함께 최근에는 상기한 멀티로터 구동부족의 문제를 제어 측면이 아닌 디자인 측면에서 근본적으로 해결하여 완전구동된(fully-actuated) 시스템을 제안하거나[2][6] 강건한 비행 특성을 가지게 하여 제어 문제를 쉽게 달성하고 한계를 극복하고자 하는 다양한 시도 또한 이루어지고 있다.

### III. 드론 상태추정

앞서 소개한 비행제어를 위해서는 드론의 정확한 상태추정이 필요하다. 드론 상태추정은 비행의 유지를 위해 필수적인 회전 각 추정과 임무수행 및 원하는 지역으로의 이동을 위해 필요한

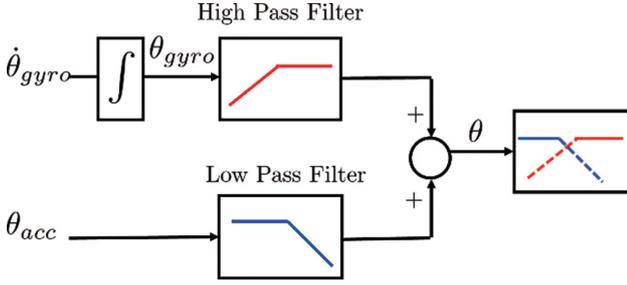


그림 4. Complementary Filter 개념도

위치추정으로 나눌 수 있으며 각각의 상태추정을 위해 기본적으로 드론은 <그림 4>와 같이 GPS 또는 카메라, IMU를 탑재하고 있으며, IMU는 선가속도를 측정하는 가속도계 (accelerometer), 각속도를 측정하는 자이로(gyro)센서, 지자계를 이용하여 자세를 측정하는 자력계(magnetometer)로 구성되어 기본적으로 회전추정에 이용되고 위치추정 성능 향상에 기여하는 역할을 한다.

먼저 IMU를 이용한 회전추정 기법 소개에 앞서 각 센서의 특징에 대해 소개하고자 한다. 각속도를 측정하는 자이로 센서는 다음과 같은 측정 모델로 표현된다.

$$w^m = w + b_w + n_w$$

여기서  $w^m$ 은 센서 측정값으로 센서 좌표계의 관성 좌표계에 대한 각속도를 센서 좌표계에서 측정된 값을 나타내며,  $w$ 는 실제 각속도,  $b_w$ 는 바이어스,  $n_w$ 는 노이즈이다.

다음으로 가속도계는 다음의 측정 모델로 표현된다.

$$a = R^T(\ddot{x} - g e_3) + b_a + n_a$$

여기서  $a$ 는 센서 좌표계의 가속도를 관성 좌표계에서 표현한 값이며,  $R$ 은 센서 좌표계에서 관성 좌표계로의 회전변환,  $\ddot{x}$ 는 센서의 실제가속도,  $g e_3$ 는 중력,  $b_a$ 는 센서 바이어스,  $n_a$ 는 센서 노이즈이다.

마지막으로 자력계의 측정 모델은 다음과 같다.

$$m = R^T m_o + b_m + n_m \quad (6)$$

여기서  $m$ 은 센서 측정값이며,  $m_o$ 은 지구자기장,  $b_m$ ,  $n_m$ 는 각각 바이어스와 노이즈이다.

가속도계와 자력계 만을 이용해 자세추정이 가능하나 이 경우 빠른 움직임에 대해서는 자세 추정이 어려워지는 단점이 있으며, 자이로 센서의 각속도 정보를 적분하여 추정하는 방법이 있으나 이는 빠른 자세의 변화를 측정할 수 있다는 장점이 존재하나 바이어스 또한 적분이 되어 오차가 누적되는 한계가 존재한다[7]. 따라서 드론의 정확한 자세추정을 위해서 센서의 정보를

융합하여 자세를 추정하는 방법이 필요하며 이는 크게 Complementary Filter 방법과 Kalman Filter 방법으로 나뉜다.

Complementary Filter는 <그림 5>와 같이 상대적으로 느리지만 바이어스의 누적오차 문제가 없는 가속도계와 자력계의 측정값을 혼합하여 사용하는 방법으로 각 센서 측정값의 특징을 반영하여 각 센서대비 높은 정확도를 얻을 수 있는 추정방법이며, 수식적으로 다음과 같이 표현된다[6].

$$\hat{R} = \hat{R}(S(w^m - \hat{b}) + k_p S(w_{mes}))$$

$$\dot{\hat{b}} = -k_I w_{mes}$$

$$w_{mes} := \sum_{i=1}^n k_i v_i \times \hat{v}_i$$

여기서  $\hat{R}$ ,  $\hat{b}$ 는 추정된 회전행렬과 바이어스이며,  $k_p$ ,  $k_I$ ,  $k_n$ 는 게인,  $v_i$ 와  $\hat{v}_i$ 는 각각 센서의 측정값과 추정값의 크기를 1로 정규화 시킨 값이다.  $k_n$ 는 각 센서의 값을 얼마나 신뢰할 수 있는지에 따라 결정되며, 가속도계와 자력계를 쓰는 경우 이차륙이나 가속도가 크면 가속도계의 측정값이 중력 방향과의 차이가 커지므로 자력계의 가중치를 더 높게 하며, 주변의 전류가 크거나 자력계의 측정값에 영향을 미칠 요소가 많은 경우 가속도계의 측정값에 높은 가중치를 주어야 한다.

Kalman Filter는 앞서 각 센서의 물리적인 특성에 따라 추정된 Complementary Filter와 달리 드론의 거동 및 센서 측정값의 확률적 특성에 기반하여 상태를 추정한다[8]. 드론의 경우 움직임을 나타내는 기구학 및 동역학이 비선형이기 때문에 이를 선형화시켜 이용하는 Extended Kalman Filter (EKF)를 이용한다. EKF는 주어진 시스템의 동역학에 의해 다음 시간의 상태변수를 계산하는 1) propagation 단계와 센서정보를 이용하여 주어진 상태변수의 값을 보정하는 2) correction 단계로 이루어지는데 드론 시스템에 대해 이를 표현하면 다음과 같다.

먼저 드론의 다음 순간의 상태추정을 위한 propagation 모델은 다음과 같이 표현된다[9].

$$\dot{q}(t) = \frac{1}{2} \Omega(w_m(t) - b_g(t))q(t)$$

$$\dot{p}(t) = v(t)$$

$$\dot{v}(t) = C(q(t))(a_m(t) - b_a(t)) + g$$

$$\dot{b}_g(t) = 0$$

$$\dot{b}_a(t) = 0$$

여기서  $q$ 는 quaternion이며,  $\Omega$ 는 각속도를 quaternion의 변화에 맵핑하는 행렬,  $v$ 는 선속도  $w_m$ ,  $a_m$ 는 자이로와 가속도계 측정값,  $C(q(t))$ 는 quaternion의 회전행렬로의 맵핑이다. 위의 식을 EKF에 적용하기 위해 이산화된 식으로 변환하여 매 순

간 상태변수의 propagation을 구한다.

다음으로 센서의 측정된 값을 통해 상태변수 값을 correction 하는 모델이 필요하며 이는 앞서 설명된 자력계의 측정모델 (6)과 동일하다. 앞서 설명된 propagation과 correction 모델을 EKF 적용을 위해 주어진 상태변수 값에 대해 선형화 및 이산화가 필요하며 이는 일반적인 EKF의 방법과 동일하다[8]. 단, 위의 모델은 드론의 위치추정을 엄두한 모델로 위치추정과 관련된 측정 모델을 포함하지 않을 경우 관련된 측정 값이 없으므로 단순히 가속도계의 값만을 이용하게 되어 바이어스로 인한 발산 값을 얻게 된다. 따라서 적절한 상태추정을 위해서는 아래에 소개하는 GPS 정보나, 카메라를 이용한 SLAM 등으로부터 측정 및 계산된 위치 값을 활용해야 한다.

위치추정을 위해서는 관성 좌표계나 별도로 설정한 기준 좌표계에 대한 절대 혹은 상대위치에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 가장 널리 이용되는 방법은 GPS를 이용한 위치 추정이다. GPS는 주변에 신호 수신에 방해되는 건물이나 나무와 같은 구조물이 없는 실외환경에서 사용 가능하다. 위치 추정은 GPS 자체적으로 약 1m 수준의 정확도를 가지나 신호의 갱신주기가 1~5Hz 수준으로 낮아 안정적인 비행을 위해 GPS 값을 별도로 쓰기보다 앞서 소개된 EKF 모델에 GPS 측정값을 융합하여 사용할 수 있다. 이 경우 가장 간단히 다음과 같은 모델을 이용할 수 있다.

$$p_m(t) = p(t) + n_{gps}(t)$$

여기서  $p_m$ 은 GPS측정 값이며,  $n_{gps}$ 는 노이즈이다. 위의 예는 가장 간단한 예로 random work와 같이 좀 더 정확한 GPS의 모델링을 통해 추정값의 정확도 향상이 가능하다.

앞서 고려된 GPS는 실외환경에서만 이용 가능하며, 실내환경이나 주변에 건물/구조물이 있는 경우 활용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 카메라, 레이저 센서 등 다양한 추가 센서를 활용할 수 있다. 그 중 드론에 가장 널리 쓰이는 센서로는 카메라를 고려할 수 있다. 카메라를 이용해 병진 운동을 추정하는 방법으로는 Optical Flow 방법과 지도를 작성하며 동시에 자신의 위치를 추정하는 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)기술이 가장 널리 이용되고 있으

며 이 밖에도 알고 있는 형상의 마커나 막대와 같은 물체를 활용하여 위치추정에 활용하는 방법들이 이용된다.

Optical flow는 화면상에 보이는 특징점(feature)들의 이전 시간과 현재와의 관계로부터 속도를 추정하는 방법으로 특징점들은 카메라 이미지 상에서 특징적인 지점을 추출하는 다양한 feature extraction 알고리즘에 의해 얻어질 수 있다. 이때 속도의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$\dot{X} = \left( S(w) + \frac{1}{d} v N^T \right) X = HX$$

여기서  $X$ 는 카메라 좌표계에서 바라본 특징점의 위치로 카메라 이미지상의 좌표  $x = \beta X$ 의 관계를 가지며  $\beta$ 는 스케일,  $w$ ,  $v$ 는 각각 각속도, 선속도,  $S(\cdot)$  연산자는 벡터의 skew-symmetric 행렬로의 맵핑,  $d$ 는 특징점이 있는 평면과 카메라의 거리이다. 카메라 상에서 측정되는 좌표는 이미지상의 좌표  $x$ 이므로 속도  $u$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u = Hx - \frac{\dot{\beta}}{\beta} x$$

이때 양변에 skew-symmetric행렬  $S(x)$ 를 곱하면 다음과 같이 정리되며

$$S(x)u = S(x)Hx$$

위의 관계식과 자이로센서로부터 얻은  $w$ 와 추가적으로 높이를 측정하는 barometer가 있다면  $d$  또한 측정할 수 있어 속도 추정이 가능하다. 이를 통해 위치추정의 정확도를 향상시키거나 장애물의 회피, 이착륙시에 추가적으로 패턴정보나 필요로 하는 움직임의 해석을 이용해 위치제어에 이용할 수 있다. 이러한 optical flow의 기본 방법을 활용하여 움직이는 평면에 이착륙하기 위해 카메라 이미지를 구체로 가정하는 등[11] 성능개선을 위한 다양한 시도가 이루어졌다.

SLAM은 GPS 없이도 맵을 작성하며, 작성된 좌표계 상에서 비행이 가능하므로 현재 매우 다양하게 활용 되고 있는데, 이는 단안 카메라로도 가능하여서, 상대적으로 LiDAR센서 대비 가벼우며, 비용적으로 저렴하게 이용할 수 있다는 장점이 존재한다. 두 대의 카메라를 이용하여 깊이 이미지 정보와 추가적으로 깊이 정보를 이용하는 방법도 있으나, 단안카메라를 이용한 알고리즘도 개발되어 이 경우 하나의 카메라만을 이용하면 된다는 장점으로 인해 널리 쓰이고 있다.

단안 카메라를 이용한 SLAM에서는 지도작성과 위치추정을 동시에 계산하므로 빠른 업데이트가 필요한 위치추정이 느리게 달성될 수 있다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 지도작성과 위치추정을 다른 속도로 병렬적으로 계산해 위치추정의 속도를

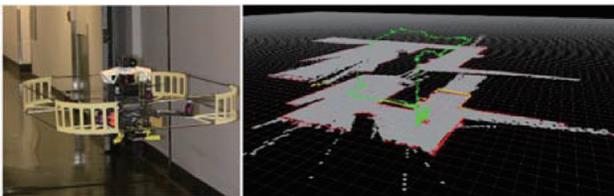


그림 5. Complementary Filter 개념도

높인 PTAM(Parallel Tracking and Mapping) 알고리즘이 다양하게 활용되고 있다. PTAM 알고리즘은 모델로부터 다음 상태를 추정된 후 서로 다른 이미지 상에서 공통된 특징점을 가지고 있을 때 epipolar geometry를 이용해 여러 개의 특징점으로부터 각 이미지 간의 변환을 계산하고 추정된 상태를 보정하여 위치를 추정하는데, 이는 상대적으로 빠른 속도로 계산되며, 지도작성은 선정된 keyframe들을 활용해 최적화를 수행하여 얻어지는데 상대적으로 느린 속도로 이루어진다[12][13].

드론의 위치추정을 위한 GPS 센서나 카메라를 활용한 알고리즘 등은 모두 IMU대비 상대적으로 느린 위치추정 결과를 제공한다. 따라서 대부분의 연구결과 및 실제 적용사례에서는 자세 추정과 위치추정을 독립적으로 수행하지 않고 Kalman Filter 등의 방법을 통해 느린 위치추정 결과를 보완하고 각 센서의 성능보다 정확한 위치/자세 추정 결과를 얻는다. 뿐만 아니라 더 나아가 앞서 소개된 센서 외에도 더 LiDAR나 깊이 정보를 제공하는 카메라, 초음파 센서 등 다양한 센서를 추가하여 다양한 상황 및 특정 센서 실패상황에서도 활용할 수 있도록 Unscented Kalman Filter (UKF)를 이용한 결과[14]나 기존 알고리즘을 개선하여 적용하고[13][15], 이외에도 공기역학적 힘을 상태추정에 고려하는[16] 등 현재에도 상태추정 성능 향상을 위한 많은 시도가 이루어지고 있다.

## IV. 결론

본고에서는 재료, 센서, 컴퓨팅, 제어 기술 등의 발달과 다양한 활용 가능성으로 인해 최근 각광 받고 있는 멀티로터 타입 드론의 비행과 관련된 기술 중 비행제어 및 상태추정 관련 기본 기술에 대해 소개하였다. 소개된 기본적인 비행제어 기술과 상태추정 기술로부터 좀 더 다양한 환경에서 다양한 임무를 수행할 수 있도록 하는 기술이 현재에도 개발되고 있으며, 이와 함께 드론을 활용해 구조물의 검사/정비나 외부 환경과의 물리적인 상호작용 등을 위한 연구도 활발히 진행되고 있다[2][17]. 이러한 연구를 통하여 현재 항공촬영이나 감시 등으로 활용되는 드론의 성능/안전성향상이나, 그 외에 새로운 응용영역에 드론의 활용 또한 점점 높아질 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] C. Ha, Z. Zuo, F. B. Choi and D. J. Lee, "Passivity-based adaptive backstepping control of quadrotor-type UAVs", *Robotics and Autonomous Systems*, 62(9), p. 1305-1315, 2014
- [2] H-N. Nguyen, S. Park and D. J. Lee, "Aerial Tool Operation System using Quadrotors as Rotating Thrust Generators", *Proc. Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots & Systems*, p. 1285-1291, 2015
- [3] D. J. Lee, A. Franchi, H. I. Son, C. Ha, H. H. Bulthoff and P. R. Giordano, "Semi-autonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicle", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(4), p. 1334-1345, 2013
- [4] I. D. Cowling, O. A. Yakimenko, J. F. Whidborne and A. K. Cooke, "A Prototype of an autonomous controller for a quadrotor UAV", *Proc. Control Conference*, p. 4001-4008, 2007
- [5] H. Huang, G. M. Hoffmann, S. L. Waslander and C. J. Tomlin, "Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering", *Proc. IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation*, p. 3277-3282, 2009
- [6] S. Rajappa, M. Ryll, H. H. Bulthoff and A. Franchi, "Modeling, control and design optimization for a fully-actuated hexarotor aerial vehicle with tilted propellers", *Proc. IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation*, p. 4006-4013, 2015
- [7] R. Mahony, T. Hamel and J. M. Pfimlin, "Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(5), p. 1203-1218, 2008
- [8] D. Simon, "Optimal state estimation: Kalman, H infinity and nonlinear approaches", Wiley, 2006
- [9] J. A. Hesch, D. G. Kottas, S. L. Bowman and S. I. Roumeliotis, "Camera-IMU-based localization: Observability analysis and consistency improvement", *International Journal of Robotics Research*, 33(1), p. 182-201, 2014
- [10] V. Grabe, H. H. Bulthoff and P. R. Giordano, "On-board velocity estimation and closed-loop control of

- quadrotor UAV based on optical flow”, Proc. IEEE Int’l Conference on Robotics and Automation, p. 491–497, 2012
- [11] B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, F-X and Russotto, “Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow”, IEEE Transactions on Robotics, 28(1), p. 77–89, 2012
- [12] G. Klein and D. Murray, “Parallel tracking and mapping for small AR workspaces”, Proc. IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, p. 225–234, 2007
- [13] S. Weiss, D. Scaramuzza and R. Siegwart, “Monocular-SLAM-based navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments”, Journal of Field Robotics, 28(6), p. 854–874, 2011
- [14] S. Shen, Y. Mulgaokar, N. Michael and V. Kumar, “Multi-sensor fusion for robust autonomous flight in indoor and outdoor environments with a rotorcraft MAV”, Proc. IEEE Int’l Conference on Robotics and Automation, p. 4974–4981, 2014
- [15] S. Shen, N. Michael and V. Kumar, “Autonomous multi-floor indoor navigation with computationally constrained MAV”, Proc. IEEE Int’l Conference on Robotics and Automation, p. 20–25, 2011
- [16] M. Nurri, M. Dawiler, M. W. Achtelik and R. Siegwart, “Robust state estimation for micro aerial vehicles based on system dynamics”, Proc. IEEE Int’l Conference on Robotics and Automation, p. 5278–5283, 2015
- [17] H. Yang and D. J. Lee, “Dynamics and control of quadrotor with robotic manipulator”, Proc. IEEE Int’l Conference on Robotics & Automation, p.5544–5549, 2014

## 약 력



양 현 수

2012년 서울대학교 공학사  
 2014년 서울대학교 공학석사  
 2014년~현재 서울대학교 박사과정  
 관심분야: aerial robotics, nonholonomic system, multirobot cooperative control



이 동 준

1995년 KAIST 공학사  
 1997년 KAIST 공학석사  
 1997년~1999년 기아자동차 중앙연구소 연구원  
 2004년 University of Minnesota 공학박사  
 2006년 University of Illinois, Urbana-Champaign 박사후연구원  
 2006년~2011년 University of Tennessee 기계공학과 조교수  
 2011년~현재 서울대학교 기계항공공학부 조,부교수  
 관심분야: telerobotics, haptics, aerial robotics, nonholonomic systems, multirobot cooperative control, human interactive robots, application of dynamics/control theory to innovative product design