

# 무선통신을 이용한 관성센서 및 수동센서 장착 무인기들의 협력 항법

## A Cooperative Navigation for UAVs with Inertial Sensors and Passive Sensor Using Wireless Communication

성 상 만\*  
(Sang Man Seong<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Korea University of Technology and Education

**Abstract:** A cooperative navigation method for cooperative flight of UAVs is proposed. The commonly used navigation method for UAVs is based on GNSS measurements. However, when it is not available by jamming or other causes, an alternative method is needed. In this paper, it is shown that UAVs equipped with inertial sensors, passive sensor and wireless communication link can perform accurate navigation through sharing information with each other. Firstly, the appropriate roles for sensors and wireless communication link are assigned. Secondly, a filter to perform navigation cooperative is constructed. Finally, the boundedness of estimation error of the filter under small initial estimation error is analyzed. The simulation results show that the proposed method can reduce navigation errors effectively.

**Keywords:** cooperative navigation, UAV, inertial sensor, passive sensor, wireless communication

### I. 서론

다수의 무인기(Unmanned Aeronautic Vehicle)가 편대를 이루어 이동하는 경우에 그 각각의 위치, 속도, 자세를 파악하는 항법 시스템은 매우 중요한 부분이다. 이를 위하여 가속도계 및 자이로스코프 등의 관성센서와 보조센서로서 흔히 GNSS를 이용하여 항법을 수행한다. 그런데 jamming 혹은 인위적인 위성신호 차단 등의 이유로 GNSS를 사용할 수 없는 경우에는 이를 대체하는 방법이 필요하다. 최근에 무선 통신의 발달로 신뢰성이 높고 데이터 처리 속도가 빠른 통신이 가능하게 되었다. 만약 무선 통신을 이용하여 각 무인기가 보유한 센서들의 측정값과 기타 항법정보를 공유한다면 이를 결합한 항법 즉, 협력 항법을 수행할 수 있다. 현재까지 각 개체에 대한 항법 시스템은 많이 연구된 바 있으나 각 개체의 센서 정보를 교환하고 이를 이용하는 협력 항법시스템에 대한 연구는 현재 초기 단계라고 볼 수 있다. 관련성이 있는 연구로서 센서 네트워크를 이용한 위치추정[1-5]을 들 수 있을 것이다.

본 논문에서는 2차원 평면 상에서 두 대의 무인기에 대하여 협력 항법 방법을 제시한다. 먼저 필요한 센서 및 장치 구성으로서 관성센서, 수동센서, 그리고 무선통신 링크를 채택하였다. 관성센서는 가속도계 및 자이로스코프를 의미한다. 수동센서는 카메라라고 볼 수 있으며 낮에는 가시광선을 밤에는 적외선을 탐지하는 기능을 갖추고 있다고 볼 수 있다. 무선통신 링크는 무인기간의 정보 공유와 상대거리 및 상대속도를 측정한다. 다음으로 센서의 측정값과 항법 정보를 결

합하고 항법을 수행하는 항법필터를 구성하였다. 마지막으로 초기 오차가 적은 경우에 필터 오차 한계성(boundedness)을 분석하였다. 본 논문은 참고문헌 [6,7]의 결과를 확장한 것이며 본 논문과 차이점은 첫째, 본 논문에서는 무인기 자세각을 모르고 있다고 가정하여 자세각 추정하는 부분을 추가하였으며, 둘째, 수동센서의 역할도 수동센서가 회전이 가능하다고 가정하고 다른 무인기와의 상대각도 측정값을 추가하였으며, 마지막으로 가장 중요한 차이점으로서 필터의 오차 한계성 분석을 추가하였다. 본 연구는 2차원 평면상에서 제시되었지만 3차원 공간 상에서는 수직면 수평면의 2차원 평면 2개로 분리하여 본 논문의 결과를 적용할 수 있을 것이다. 이 경우에는 수동센서의 측정값을 수직면 및 수평면으로 분리하여야 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 운동학(kinematics)을 고려하여 모델식을 유도한다. III 장에서 센서들의 역할을 규정하고 확장칼만필터를 이용한 위치 및 속도 추정 방법을 제시한다. IV 장에서 구성된 필터의 오차한계성을 분석한다. 끝으로 V 장에서 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증한다.

### II. 문제정의 및 센서 역할 규정

2차원 평면 상에서 두 대의 무인기가 편대 비행을 하는 상황은 그림 1과 같은 기하학적인 배치로 나타낼 수 있다.

그림에서 작은 원은 위치정보를 미리 알고 있는 기준표적(landmark)이며 작은 삼각형은 두 대의 무인기이다.  $p_{ix}$ ,  $p_{iy}$ ,  $p_{refx}$ ,  $p_{refy}$  는 무인기들과 기준표적의  $x$  및  $y$  좌표이다.  $\psi_i$  는 각 무인기의  $y$  축 방향에 대한 자세각이며,  $\theta_i$  는 각 무인기 위치에서의  $y$  축 방향과 기준표적이 이루는 각도, 그리고  $\alpha_i$  는 하나의 무인기를 기준으로 기준표적과 다른 무인기가

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 12. 3., 수정: 2012. 12. 26., 채택확정: 2012. 12. 31.

성상만: 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(ssman@kut.ac.kr)

※ 본 연구는 한국기술교육대학교 교육연구진흥비프로그램 및 교육과학기술부의 지원을 받아 연구되었음(331-2008-1-D00316).

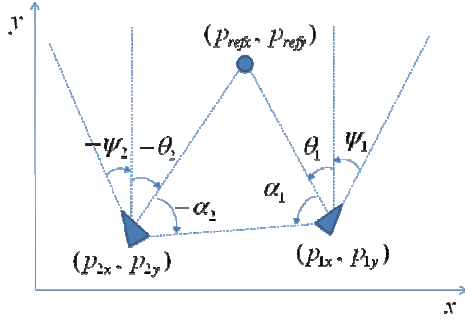


그림 1. 무인기 및 기준표적의 기하학적 배치.

Fig. 1. Kinematic of UAV's and landmark.

이루는 각도이다. 기준 표적은 자연적 혹은 인공적인 지형 지물이 될 수 있으며 움직임이 없는 대상이 일반적이다. 비록 기준 표적이 움직임이 있다고 하더라도 항법의 필터에서는 무인기가 상대적인 기동을 하고 있는 상황으로 이해할 수 있다.

위치, 속도, 자세 및 가속도의 관계를 이용한 한 대의 무인기에 대한 운동학은 다음과 같다.

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) = \begin{bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \\ f_{ix}^b \cos \psi_i - f_{iy}^b \sin \psi_i \\ f_{ix}^b \sin \psi_i + f_{iy}^b \cos \psi_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 상태변수는  $x_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ v_{ix} \ v_{iy} \ \psi_i]^T$  이며 입력은  $u_i = [f_{ix}^b \ f_{iy}^b \ \omega_i]^T$  이다.  $v_{ix}$  및  $v_{iy}$  는  $x$  축 및  $y$  축 방향 속도,  $f_{ix}^b$  및  $f_{iy}^b$  는 동체 좌표계(body axis)에서의 가속도, 그리고  $\omega_i$  는 회전 각속도이다.

관성센서인 가속도계 및 자이로스코프는  $f_{ix}^b$ ,  $f_{iy}^b$ , 그리고  $\omega_i$  값을 제공한다. 가속도계 및 자이로스코프는 바이어스 오차는 무인기 출발시에 초기 정렬(initial alignment)에서 추정되어 제거된다고 가정한다. 관성센서 측정값만으로 항법 계산을 하는 경우에는 초기오차에 의해 오차가 계속 누적되므로 보조센서를 사용하여 필터링 방법으로 보상을 해주어야 한다.

보조센서 중에서 수동센서는 무인기 전방 방향에 대한 기준표적과 다른 무인기와 이루는 각도를 각각 측정한다. 수동센서는 무인기의 머리 부분에 위치한다고 가정하고 회전하여 탐색하는 기능이 있다고 가정한다. 따라서 수동센서는  $\theta_i + \psi_i$  와  $\theta_i + \psi_i + \alpha_i$  값을 제공한다.  $\theta_i$  와 좌표와 관계는 다음과 같다.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{P_{refx} - P_{2x}}{P_{refy} - P_{2y}} \right) \quad (2)$$

무인기의 머리 부분에 위치한 수동센서가 회전 가능하다고 하더라도 전방에 있는 무인기는 자체 몸체 때문에 후방에 있는 무인기를 관측할 수 없는 상황이 발생한다. 따라서  $\alpha_i$  는 후방에 있는 무인기에서 측정할 값 하나일 경우가 있으며

로 이 경우  $\alpha_1$  혹은  $\alpha_2$  만 제공될 수 있다. 여기서는  $\alpha_1$  만 제공된다고 가정하며  $\alpha_2$  만 제공되는 경우는 이하 설명들에서 동일하게 대체할 수 있다.  $\alpha_1$  과 좌표와 관계는 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{P_{1x} - P_{2x}}{P_{2y} - P_{1y}} \right) - \theta_1 \quad (3)$$

보조센서로 사용할 수 있는 방법으로 무선 통신 장치가 있다. 무선 통신 장치는 하나의 무인기에서 전송한 무선 전파가 다른 무인기에 도달했다가 다시 전송되어 돌아오기까지 걸리는 왕복지연시간(round trip delay)을 측정할 수 있도록 구성한다. 왕복지연시간을 측정할 수 있다는 것은 두 무인기 사이의 상대 거리를 측정할 수 있다는 의미이다. 상대거리와 무인기의 좌표와의 관계는 다음과 같다.

$$d_{rel} = \sqrt{(p_{1x} - p_{2x})^2 + (p_{1y} - p_{2y})^2} \quad (4)$$

무선 통신을 이용하여 상대 속력을 측정할 수 있는데 이는 상대속력에 의한 전달 주파수(carrier frequency)의 도플러 이동(doppler shift)을 측정함으로써 가능하다. 상대 속도는 각 무인기의 속도로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{rel} = \sqrt{(v_{1x} - v_{2x})^2 + (v_{1y} - v_{2y})^2} \quad (5)$$

무인기 한 대가 단독으로 항법 계산을 하는 경우에는 수센서를 이용한 측정값 중 항법 필터에서 사용할 수 있는 의미 있는 값은 오직  $\theta_i + \psi_i$  이다. 이와는 달리 두 대의 무인기가 협력하여 서로의 위치 정보를 공유한다면 1번 무인기에서 측정된  $\theta_1 + \psi_1 + \alpha_1$  도 항법 필터에서 사용 가능한 측정값이다. 두 대의 무인기가 협력하면 무선 통신 장치에 의한 상대 위치 및 상대 속력 측정값을 항법 필터에서 추가적으로 사용할 수 있다.

### III. 항법 필터 구성

항법 계산을 위한 필터를 구성한다. 주어진 시스템은 식 (1)-(5)에서 알 수 있듯이 비선형 시스템이므로 비선형 필터를 사용한다. 본 논문에서는 널리 알려져 있는 EKF를 사용한다. 나중에 설명할 가관측성 해석의 편의를 위하여 주어진 연속 시스템을 이산화하여 필터를 구성한다. 오일러 근사방법으로 근사를 하면 시스템 식은 다음과 같이 주어진다.

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} + f_i(x_{i,k}, u_{i,k}) \Delta t \quad (6)$$

여기에서  $x_{i,k}$  및  $u_{i,k}$  는  $i$  무인기의  $k \Delta t$  시간에서의 상태 변수와 입력을 의미한다.  $\Delta t$  는 샘플링 시간으로 연속 시스템과 차이를 무시할 수 있을 정도로 충분히 작게 한다고 가정한다.

한 대의 무인기 단독으로 항법을 수행하는 경우를 고려하자. EKF에 의한 필터링을 위해서는 먼저 시스템을 선형화 해야 한다. 테일러 급수 전개 방법으로 선형화하여 구해진 일반적인 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{i,k+1} &= A_{i,k} x_{i,k} + B_{i,k} u_{i,k} + w_{i,k} \\ y_{i,k} &= C_{i,k} x_{i,k} + n_{i,k} \end{aligned} \quad (7)$$

상태 변수, 입력 및 측정값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{i,k} &= [p_{ix,k} \quad p_{iy,k} \quad v_{ix,k} \quad v_{iy,k} \quad \psi_{i,k}]^T \\ u_{i,k} &= [f_{ix,k}^b \quad f_{iy,k}^b \quad \omega_{i,k}]^T \\ y_{i,k} &= \theta_{i,k} + \psi_{i,k} \end{aligned} \quad (8)$$

시스템 행렬  $A_{i,k}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{i,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & f_{ix,k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & f_{iy,k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

행렬에서  $f_{ix,k}$  및  $f_{iy,k}$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{ix,k} &= (-f_{ix,k}^b \sin \psi_{i,k} - f_{iy,k}^b \cos \psi_{i,k}) \Delta t \\ f_{iy,k} &= (f_{ix,k}^b \cos \psi_{i,k} - f_{iy,k}^b \sin \psi_{i,k}) \Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

입력 행렬  $B_k$ 는 다음과 같다.

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sin \psi_i & -\cos \psi_i & 0 \\ \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$w_{i,k}$ 는 관성센서 잡음을 포함하는 공정 잡음(process noise) 이다.  $n_{i,k}$ 는 센서 측정 잡음으로 단독 항법의 경우 수동센서의 잡음을 의미한다. 여기서는 이러한 잡음들을 백색잡음으로 가정하고 분산 행렬을 다음과 같은 양의한정행렬(positive definite matrix)로 둔다.

$$\begin{aligned} E[w_{i,k} w_{i,k}^T] &= Q_{i,k} \quad (Q_{i,k} > 0) \\ E[n_{i,k} n_{i,k}^T] &= R_{i,k} \quad (R_{i,k} > 0) \end{aligned} \quad (12)$$

측정값을 상태변수에 대해 편미분 식으로 표현하면 측정 행렬을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_{i,k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_i}{\partial p_{ix}} & \frac{\partial \theta_i}{\partial p_{iy}} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

이제 두 대 협력으로 항법을 수행하는 경우를 고려한다. 시스템 식은 다음과 같다.

$$x_{k+1} = x_k + f(x_k, u_k) \Delta t \quad (14)$$

여기에서 상태 변수  $x_k$ , 입력  $u_k$ 는 각각 다음과 같다.

$$x_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \end{bmatrix}, \quad u_k = \begin{bmatrix} u_{1,k} \\ u_{2,k} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$f(x_k, u_k)$ 는 다음과 같이 확장된다.

$$f(x_k, u_k) = \begin{bmatrix} f_1(x_{1,k}, u_{1,k}) \\ f_2(x_{1,k}, u_{1,k}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

측정값은 다음과 같다.

$$y_{i,k} = g(x_k, u_k) = \begin{bmatrix} \theta_{1,k} + \psi_{1,k} \\ \theta_{2,k} + \psi_{2,k} \\ d_{rel} \\ v_{rel} \\ \theta_{1,k} + \psi_{1,k} + \alpha_{1,k} \end{bmatrix} \quad (17)$$

선형화된 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_k x_k + B_k u_k + w_k \\ y_k &= C_k x_k + n_k \end{aligned} \quad (18)$$

시스템 행렬은 무인기 두 대에 대한 운동학 식을 동시에 표현해야 한다. 이는 식 (9)에서 2배만큼 확장된 것으로 볼 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_k = \begin{bmatrix} A_{1,k} & 0_{5 \times 5} \\ 0_{5 \times 5} & A_{2,k} \end{bmatrix} \quad (19)$$

입력 행렬은 다음과 같이 확장된다.

$$B_k = \begin{bmatrix} B_{1,k} \\ B_{2,k} \end{bmatrix} \quad (20)$$

잡음  $w_k$ 는 공정잡음이며  $n_k$ 는 수동센서 측정 잡음과 무선통신에 의한 상대거리 및 상대속력 측정 잡음을 의미한다. 여기서도 잡음들을 백색잡음으로 가정하고 분산 행렬을 다음과 같은 양의한정행렬로 둔다.

$$\begin{aligned} E[w_k w_k^T] &= Q_k \quad (Q_k > 0) \\ E[n_k n_k^T] &= R_k \quad (R_k > 0) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (17)의 측정값을 상태 변수로 편미분 식으로 표현하면 식 (22)와 같은 측정 행렬을 얻을 수 있다. 유도과정에서 측정 행렬의 마지막 행은 식 (3)을 이용하여 구한 결과이다.

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial p_{1x}} & \frac{\partial \theta_1}{\partial p_{1y}} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial d_{rel}}{\partial p_{1x}} & \frac{\partial d_{rel}}{\partial p_{1y}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial v_{rel}}{\partial p_{1x}} & \frac{\partial v_{rel}}{\partial p_{1y}} & 0 \\ \frac{\partial(\theta_1 + \alpha_1)}{\partial p_{1x}} & \frac{\partial(\theta_1 + \alpha_1)}{\partial p_{1y}} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial p_{2y}} & \frac{\partial \theta_2}{\partial p_{2y}} & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\partial d_{rel}}{\partial p_{2x}} & \frac{\partial d_{rel}}{\partial p_{2y}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial v_{rel}}{\partial p_{2x}} & \frac{\partial v_{rel}}{\partial p_{2y}} & 0 \\ \frac{\partial(\theta_1 + \alpha_1)}{\partial p_{2x}} & \frac{\partial(\theta_1 + \alpha_1)}{\partial p_{2x}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

이상과 같이 필터식이 구성되었으므로 EKF에 의한 추정 절차에 따라 상태변수를 추정한다. EKF 식은 지면 관계상 생략한다.

#### IV. 필터 오차 한계성 분석

EKF로 추정하는 경우 항상 문제가 되는 것은 필터의 오차 한계성이다. EKF의 경우 오차한계성에 대해 많은 연구결과가 존재하지는 않으나 그 중에서 특정한 조건이 만족되면 추정 값이 참값에 가까울 때 즉, 국소적으로(locally) 오차한계성 보장에 관한 연구가 존재한다[8]. 먼저 오차 한계성에 대해 정의하자.

정의 1 [8]: 다음의 조건을 만족하는 실수  $\eta > 0$ ,  $\nu > 0$  그리고  $0 < \rho < 1$  이 존재하면 확률 프로세서  $\zeta_k$  는 제곱평균 (mean square) 의미에서 지수적으로(exponentially) 한계 되어있다고 한다.

$$E\|\zeta_k\|^2 < \eta \|\zeta_0\|^2 \rho^k + \nu \quad (23)$$

위와 같은 지수적 한계의 의미는 시간이 무한대로 갈 때 확률 프로세서가 지수적으로 어떤 한계 이내로 수렴한다는 의미이다.

협력항법의 경우에 구성된 EKF에 의한 추정오차의 지수적 한계성에 관해 살펴본다.

제안 2: 식 (14)의 시스템과 선형화된 식 (18)에 의하여 EKF를 구성하였을 때 초기 추정오차  $\zeta_0$  가 어떤 양수  $\varepsilon > 0$  에 대하여 식 (24)로 한계 된다고 가정하자.

$$\|\zeta_0\|^2 < \varepsilon \quad (24)$$

또한, 식 (18)의  $A_k(x_k)$ ,  $C_k(x_k)$  가 상태변수의 어떤 궤적  $x_k \in R^n$  및 이 궤적을 포함하고 이 궤적으로부터 거리  $\varepsilon_k > 0$  내부에 있는 집합  $K \subset R^n$  에서 다음과 같은 가관측성 조건을 만족한다고 가정한다.

$$U(x_k) = \begin{bmatrix} C_k \\ C_{k+1}A_k \\ C_{k+2}A_{k+1}A_k \\ \vdots \\ C_{k+n-1}A_{k+n-2} \cdots A_k \end{bmatrix}, \quad \text{rank}(U) = n \quad (25)$$

그러면 EKF에 의한 추정오차는 지수적으로 한정된다.

증명: 식 (21)의 조건에 의하여 잡음 분산 행렬은 다음을 만족하는  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  를 찾을 수 있다.

$$Q_k > \alpha I, \quad R_k > \beta I \quad (26)$$

또한 식 (16)과 식 (17)의  $f(x_k, u_k)$  및  $g(x_k, u_k)$  는 모두 두 번 미분가능하고  $\partial f(x_k, u_k) / \partial x_k = A_k$  는 명백히 0이 아니다. 따라서 식 (24) 및 식 (25)의 가정과 함께 참고문헌 [8]의 정리 4.1의 가정을 모두 만족하게 되므로 이 정리에 의하여 EKF에 의한 추정오차는 지수적으로 한계 된다.

이상의 오차 한계성 분석을 살펴보면 추정오차가 지수적으로 한계 되기 위한 핵심적인 조건은 식 (25)의 가관측성 조건임을 알 수 있다. 가관측성을 조사하기 위하여 몇 가지

표 1. 시나리오에 따른 가관측행렬 rank 비교.

Table 1. Comparison of observability matrix rank depending on scenario.

시나리오	협력항법 (full rank:10)	단독항법 (full rank:5)
등속 직선 운동	10	3-4
등가속도 운동	10	3-4
순수 회전 운동	10	3-5
등가속 및 회전 운동	10	4-5

시나리오에 대하여 수치적인 방법으로 단독항법과 협력항법의 가관측행렬  $U$  와 그 rank를 구하였다. 시나리오는 크게 등속 직선 운동, 등가속도 운동, 순수 회전 운동, 그리고 등가속 및 회전 운동으로 나누었다. 표 1에 그 결과를 나타내었다.

표에서 알 수 있듯이 단독항법의 경우에는 시나리오마다 편차는 있지만 가관측성이 확보되지 않으나 협력항법의 경우에는 제시된 시나리오의 모든 경우에 완전 가관측함을 알 수 있다. 따라서 EKF에 추정결과도 위에 주어진 시나리오에서는 단독항법의 경우에 추정 오차의 한계성을 보장하지 못하지만 협력항법의 경우에는 추정 오차가 일정한 한계 이내로 수렴할 것임을 예측할 수 있다.

#### V. 시뮬레이션

시뮬레이션으로 제안된 협력 항법 알고리즘의 성능을 검증한다. 시뮬레이션 조건으로 초기 상태의 위치(m), 속도(m/sec), 그리고 자세(deg)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (p_{1x}, p_{1y}) &= (1000, 0), & (v_{1x}, v_{1y}) &= (-1, 100), \\ (p_{2x}, p_{2y}) &= (0, 100), & (v_{2x}, v_{2y}) &= (1, 100), \\ (\psi_1, \psi_2) &= (-10, 10), \\ (p_{refx}, p_{refy}) &= (800, 3500) \end{aligned}$$

입력 가속도(m/sec<sup>2</sup>) 및 각속도(rad/sec)는 등가속도 및 회전이 동시에 일어나도록 다음과 같이 정하였다.

$$\begin{aligned} (f_{1x}^b, f_{1y}^b) &= (0.1, 0.1), & \omega_1 &= 0.001, \\ (f_{2x}^b, f_{2y}^b) &= (0.2, 0.1), & \omega_2 &= -0.001, \end{aligned}$$

초기오차는  $x, y$  축 위치 오차 각각 50 m, 속도 오차 각각 1 m/sec, 자세오차 1 deg를 가정하였다. 센서의 잡음은 가속도계 잡음 표준편차 100  $\mu g$ , 자이로스코프 잡음 표준편차 0.01 deg/sec, 수동센서 잡음 표준편차 1 deg, 상대 거리측정 표준편차 10 m, 상대속도측정 표준편차 0.1 m/sec를 사용하였다. 시뮬레이션 시간은 30초로 하였다.

그림 2와 3은 그 결과를 나타내었는데 세로축은 초단위 시간이며 세로 축은 그림 제목에 표시된 것과 같다. 그림 2는 단독으로 항법 계산을 하는 경우 수동센서 보유 무인기의 오차를 나타낸 것이다. 오차가 크게 나타나는 값들을 살펴보면  $y$  축 위치 오차는 증가하여 최대 200 m 정도의 큰 오차를 나타내었다가 25초 이후부터 감소함을 알 수 있다. 또한  $y$  축 속도는 참값에 수렴하지 못하고 오차가 큰 상태로 계속 변하고 있음을 알 수 있다.



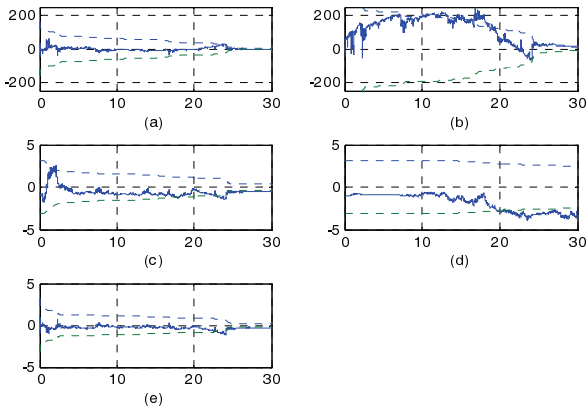


그림 2. 단독 항법시 수동센서 보유 무인기의 시간(sec)에 따른 오차 ((a) x 위치[m], (b) y 위치[m], (c) x 속도[m/sec], (d) y 속도[m/sec], (e) 자세[deg], 실선: 오차, 점선: 오차 공분산 제곱근).

Fig. 2. Estimation error versus time(sec) of independent navigation ((a) x pos. [m], (b) y pos. [m], (c) x vel. [m/sec], (d) y vel. [m/sec], (e) attitude[deg], real-line: error, dotted-line: square root of error covariance).

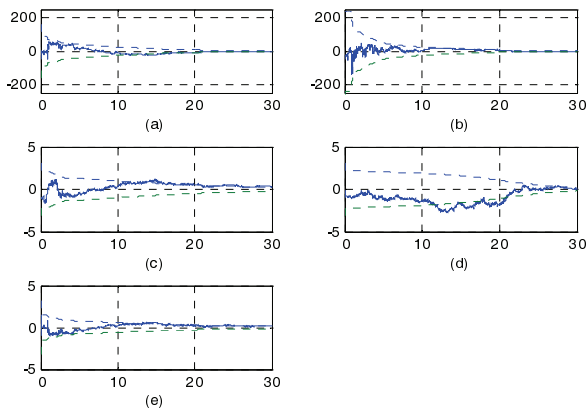


그림 3. 협력 항법시 수동센서 보유 무인기의 시간에 따른 오차 ((a) x 위치[m], (b) y 위치[m], (c) x 속도[m/sec], (d) y 속도[m/sec], (e) 자세[deg], 실선: 오차, 점선: 오차 공분산 제곱근).

Fig. 3. Estimation error versus time(sec) of cooperative navigation ((a) x pos. [m], (b) y pos. [m], (c) x vel. [m/sec], (d) y vel. [m/sec], (e) attitude[deg], real-line: error, dotted-line: square root of error covariance).

그림 3은 협력으로 항법 계산을 하는 경우 오차를 나타낸 것이다. 대부분의 오차가 초기부터 줄어들고 있으며 25초 이후에는 거의 0에 수렴함을 알 수 있다. 이는 IV 장의 추정 오차의 한계성 분석에도 언급한 바와 같이 협력 항법 시에는 가관측성이 확보되기 때문으로 볼 수 있다. 오차의 한계성 보장과 함께 그 오차의 크기도 중요한데 시뮬레이션에 사용한 시나리오에서는 추정 오차가 거의 0에 가까움을 알 수 있다.

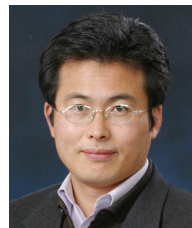
VI. 결론

본 논문에서는 GNSS를 사용할 수 없는 경우에 두 대의 무인기를 위한 항법시스템 구성 방법을 제안하였다. 제안한

방법은 무선통신을 통하여 각각의 무인기에서 측정한 센서 값 및 추정된 항법정보를 공유하는 협력항법 방법이다. 먼저 센서 및 장치 구성으로서 관성센서, 수동센서, 무선통신 링크를 채택하였다. 센서에 대한 역할 할당으로서 관성센서는 가속도 및 각속도 값을 측정하고, 수동센서는 기준표적과 이루는 각도 및 다른 무인기와 이루는 각도를 측정하도록 하였다. 무선통신은 서로의 정보를 교환하는 수단일 뿐만 아니라 왕복지연을 이용한 상대거리 및 상대속도 측정이 가능한 무선통신 장치라고 가정하였다. 이러한 센서 측정치에 대한 가정하에서 무인기의 위치, 속도 및 자세를 추정하는 항법 필터를 구성하였다. 구성된 필터에 대한 오차의 한계성 분석을 통하여 단독으로 항법을 하는 경우에 비하여 협력 항법을 하는 경우 가관측성 증대로 인하여 오차가 일정한 한계 내에 머물게 하는 장점이 있음 보였다. 시뮬레이션 결과는 제안된 협력항법 방법이 항법 오차를 효과적으로 줄일 수 있음을 보였다. 본 논문의 결과는 무인기 들의 협력비행 혹은 자율 로봇들의 협력 주행에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Y. T. Jo, "Distance measurement system between sensor in the wireless sensor network," *Proc. of the 25th Korea Information Processing Society Conference*, pp. 1263-1266, May 2006.
- [2] A. Krasnov, J. Xiao, and Z. Luo, "Minimum energy decentralized estimation in a wireless sensor network," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005:4, pp. 473-482, 2005.
- [3] J. N. Ash and R. L. Moses, "Acoustic time delay estimation and sensor network self-localization," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 118, no. 2, pp. 841-850, Aug. 2005.
- [4] C. Oliver and O. Dessoude, "Heterogeneous sensors cooperation for an advanced perception system," *Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Robotics*, vol. 2, pp. 1275-1280, June 1991.
- [5] A. D. Marrs, "Asynchronous multi sensor tracking using bayesian monte carlo," *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol. 5, pp. 2171-2178, 2001.
- [6] S. M. Seong et. al., "A cooperative navigation algorithm for UAVs using passive sensor and wireless communication," *Proc. of the 15th Conference on Guided Weapon*, pp. 15-18, Oct. 2009.
- [7] S. M. Seong, "A navigation algorithm for cooperative flight of multiple UAV," *Journal of Korea University of Technology and Education*, vol. 17, pp. 40-44, 2010.
- [8] K. Reif, S. Günther, E. Yaz, and R. Unbehauen, "Stochastic stability of the discrete time extended kalman filter," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 44, no. 4, pp. 714-728, Apr. 1999.



성 상 만

1992년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1995년 동 대학원 석사. 2000년 서울대학교 전기공학부 박사. 2000년-2004년 삼성전자 무선사업부. 2004년-현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수. 관심분야는 항법, 비선형필터, 시스템 식별 및 선형제어.