

랜드마크 기반 비전항법의 오차특성을 고려한 INS/비전 통합 항법시스템

INS/Vision Integrated Navigation System Considering Error Characteristics of Landmark-Based Vision Navigation

김 영 선, 황 동 환*
(Youngsun Kim¹ and Dong-Hwan Hwang²)

¹Korea Aerospace Research Institute

²Chungnam National University

Abstract: The paper investigates the geometric effect of landmarks to the navigation error in the landmark based 3D vision navigation and introduces the INS/Vision integrated navigation system considering its effect. The integrated system uses the vision navigation results taking into account the dilution of precision for landmark geometry. Also, the integrated system helps the vision navigation to consider it. An indirect filter with feedback structure is designed, in which the position and the attitude errors are measurements of the filter. Performance of the integrated system is evaluated through the computer simulations. Simulation results show that the proposed algorithm works well and that better performance can be expected when the error characteristics of vision navigation are considered.

Keywords: landmark based vision navigation, INS (Inertial navigation system), integrated navigation system, dilution of precision

I. 서론

관성항법시스템(INS: Inertial Navigation System)은 센서에서 측정된 가속도와 각속도를 적분하여 항법해를 제공하는 장치로, 짧은 시간에는 정확한 항법해를 제공하지만 적분 과정에서 오차가 누적되어 시간이 지남에 따라 항법오차가 증가하는 특성이 있다. 따라서 최근에는 INS의 이러한 단점을 극복하기 위해 INS/GPS (Global Positioning System) 통합 시스템을 널리 사용한다[1]. 그러나 GPS 역시 전파 방해, 장애물과 같은 외부 간섭에 취약한 단점이 있어, 비전센서, 레이저, 초음파센서, 고도계 등을 이용하여 GPS를 대체하는 연구도 활발히 이루어지고 있다[2-4].

비전센서를 이용하는 항법시스템은 가볍고, 소모전력이 적으며 가격이 저렴한 장점 때문에 소형/무인 항공기, 차량, 이동 로봇 등에 많이 사용되고 있다[5-7]. 비전항법시스템은 크게 랜드마크 기반 방식과 맵(map) 기반 방식으로 구분할 수 있다[8]. 랜드마크 기반의 비전항법은 센서에서 촬영한 랜드마크를 이용하여 항체의 위치, 자세를 계산하는 방법으로 장시간 항법에도 오차의 누적 없이 일정수준의 항법 성능을 보인다.

현재까지 다양한 형태의 INS/비전 통합항법이 연구되어 왔으며 두 센서 통합을 위해 주로 칼만필터와 파티클필터 등을 이용하고, 통합필터의 측정값으로는 비전센서의 속도, 헤딩, 김블각 정보 등을 이용하였다[4,9-12]. 본 논문에서는

INS/GPS 통합 항법시스템 대체연구의 연장선으로 INS와 랜드마크 기반 비전항법이 상호보완하는 INS/비전 통합항법 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안한 통합항법은 랜드마크 기반의 비전항법에서 제공하는 위치, 자세 정보를 이용하여 칼만필터가 INS의 항법오차, 센서오차를 추정하고 보정한다. 또한 보정된 INS 항법결과를 비전항법 오차특성 계산의 입력으로 사용하여 비전항법의 성능을 개선하고 이 결과를 다시 통합필터에 제공함으로써 항법성능을 더욱 개선시킨다.

본 논문의 II 장에서 랜드마크 기반 비전항법에서 항법해를 결정하는 과정을 기술하고 랜드마크 배치에 대한 비전 항법 오차특성을 도출한다. III 장에서는 비전항법의 오차특성을 고려한 INS/비전 통합 항법시스템을 제안하고 IV 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 평가한 결과를 제시하고 V 장에서 논문의 결론을 맺는다.

II. 랜드마크 기반 비전항법의 오차특성

1. 랜드마크 기반 3D 비전항법

랜드마크 기반의 비전항법은 비전센서의 초점면에 투영된 랜드마크 영상으로부터 항체의 위치, 자세를 계산한다. 그림 1은 카메라 핀홀모델과 초점면에 투영된 랜드마크를 보여준다. 카메라좌표계에서 x 축은 카메라의 광축(optical axis)과 일치시키고 z 축은 초점면에 대하여 수직하강방향, y 축은 오른손 좌표계 법칙으로부터 정의한다. 초점면은 광축상에서 초점거리 f 만큼 떨어진 위치에서 축에 대하여 직각으로 정렬되어 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 3D 항법에서는 비전센서의 초점면에 투영된 랜드마크 측정값,

* 책임저자(Corresponding Author)

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

김영선: 한국항공우주연구원(yskim1203@kari.re.kr)

황동환: 충남대학교 전자공학과(dhhwang@cnu.ac.kr)

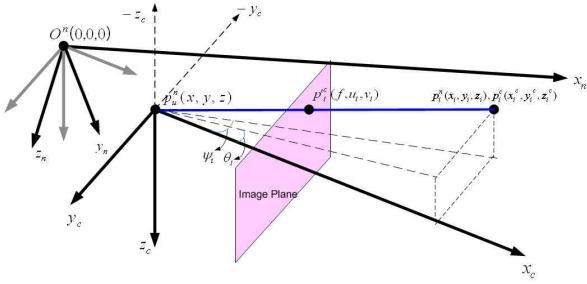


그림 1. 비전항법에서 랜드마크의 시선벡터 측정.

Fig. 1. Line-of-sight vector measurement in vision navigation.

즉, 카메라좌표계에서의 u_i, v_i 측정값을 항법해 계산에 이용한다.

랜드마크 측정값과 항법해의 관계는 미리 알고 있는 랜드마크 위치와 카메라좌표계에서 측정된 랜드마크 시선벡터의 관계로부터 구할 수 있다. 항체에 설치된 비전센서는 카메라좌표계에서 시선각을 측정하므로 카메라좌표계와 동체좌표계, 그리고 동체좌표계와 항법좌표계간의 좌표변환행렬이 필요하다. 카메라좌표계에서 측정된 랜드마크의 시선벡터를 이용한 3D 항법방정식은 식 (1)과 같다.

$$p_i^n - p_u^n = k_i C_b^m C_c^b p_i^c \quad (1)$$

여기서 첨자 n, b, c 는 각각 항법좌표계, 동체좌표계, 카메라좌표계를 의미하고, $p_u^n = [x \ y \ z]^T$ 는 구하고자 하는 항법좌표계에서의 항체의 위치이고, $p_i^n = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ 는 i 번째 랜드마크의 항법좌표계 위치이고, 이를 카메라좌표계에서 표현하면 $p_i^c = [x_i^c \ y_i^c \ z_i^c]^T$ 와 같다. $p_i^c = [f \ u_i \ v_i]^T$ 는 비전센서의 초점면에 투영된 랜드마크의 시선벡터를 카메라좌표계에서 표현한 값이다. 또한 k_i 는 센서에 투영된 랜드마크의 거리(r_i)와 실제 항체와 랜드마크의 거리(R_i)의 비를 의미하는 변수로 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$k_i = \frac{R_i}{r_i} = \frac{R_i}{\sqrt{f^2 + u_i^2 + v_i^2}} = \frac{R_i}{\sqrt{f^2 + (f \tan \psi_i)^2 + (f \tan \theta_i)^2}} \quad (2)$$

여기서 $[\psi_i \ \theta_i]^T = [\tan^{-1}(u_i/f) \ \tan^{-1}(v_i/f)]^T$ 는 센서에서 측정된 i 번째 랜드마크의 시선각을 의미한다.

C_b^m, C_c^b 은 각각 동체좌표계로부터 항법좌표계로, 카메라좌표계로부터 동체좌표계로의 좌표변환 행렬을 의미한다. 카메라좌표계와 동체좌표계의 관계, 즉, 항체에서 센서의 설치위치를 정확히 알고 있다면 C_c^b 는 직접 계산이 가능하다. 본 논문에서는 편의상 두 좌표계가 정확하게 일치한다고 가정하였다. 이 경우, 카메라좌표계로부터 항법좌표계로 변환하는 좌표변환 행렬은 다음 식 (3)과 같다.

$$C_c^m = C_b^m = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma & S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma & C_\alpha S_\beta C_\gamma + S_\alpha S_\gamma \\ C_\beta S_\gamma & S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma & C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma \\ -S_\beta & S_\alpha C_\beta & C_\alpha C_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $[\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 는 항체의 자세, 즉, 롤각, 피치각, 요각을

의미하고 S_x, C_x, T_x 는 각각 $\sin x, \cos x, \tan x$ 를 의미한다. 위 식에서 미지수는 3축에 대한 항체의 위치와 자세 총 6개의 변수이다. 식 (1) - 식 (3)을 살펴보면 항법해를 구하기 위해서 하나의 영상에서 적어도 세 쌍 이상의 랜드마크를 측정해야 함을 알 수 있다.

2. 랜드마크 배치에 따른 항법 오차특성

랜드마크 기반의 비전항법에서는 항체와 랜드마크의 기하학적 배치에 따라 항법성능이 달라진다. 이는 측정오차와 항법오차의 관계로부터 도출할 수 있다. 식 (1)의 항법방정식으로부터 섭동법을 이용하여 각 랜드마크의 시선벡터 측정오차와 항법오차의 관계를 유도한다. 식 (1)에서 $p_u^n = p_{u0}^n + \delta p_u^n$, $C_c^m = C_{c0}^m + \delta C_c^m$, $p_i^c = p_{i0}^c + \delta p_i^c$ 라 두고, 랜드마크 측정값, 항법해의 참값을 중심으로 섭동시킨 형태로 표현하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$p_i^n - (p_{u0}^n + \delta p_u^n) = k_i (C_{c0}^m + \delta C_c^m) (p_{i0}^c + \delta p_i^c) \quad (4)$$

여기서 $p_{u0}^n, C_{c0}^m, p_{i0}^c$ 는 섭동의 중심값을 나타낸다.

식 (4)를 정리하여 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$k_i C_{c0}^m \delta p_i^c = p_i^n - p_{u0}^n - k_i C_{c0}^m p_{i0}^c - \delta p_u^n - k_i \delta C_c^m p_{i0}^c \quad (5)$$

여기서 $\delta p_i^c = [\delta f \ \delta u_i \ \delta v_i]^T$ 는 각 랜드마크의 시선벡터 측정오차, $\delta p_u^n = [\delta x \ \delta y \ \delta z]^T$ 는 위치오차를 의미한다. δC_c^m 는 자세오차 행렬을 나타내고 식 (6)과 같이 정의하여 표현할 수 있다.

$$\delta C_c^m \equiv \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} a_1 \delta \alpha + a_2 \delta \beta + a_3 \delta \gamma & b_1 \delta \alpha + b_2 \delta \beta + b_3 \delta \gamma & c_1 \delta \alpha + c_2 \delta \beta + c_3 \delta \gamma \\ d_1 \delta \alpha + d_2 \delta \beta + d_3 \delta \gamma & e_1 \delta \alpha + e_2 \delta \beta + e_3 \delta \gamma & f_1 \delta \alpha + f_2 \delta \beta + f_3 \delta \gamma \\ g_1 \delta \alpha + g_2 \delta \beta + g_3 \delta \gamma & h_1 \delta \alpha + h_2 \delta \beta + h_3 \delta \gamma & i_1 \delta \alpha + i_2 \delta \beta + i_3 \delta \gamma \end{bmatrix}$$

식 (6)에서 $a_1, a_2, a_3, b_1, \dots, i_3$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_1 &= 0, & a_2 &= -S_\beta C_\gamma, & a_3 &= -C_\beta S_\gamma \\ b_1 &= S_\alpha S_\gamma + C_\alpha S_\beta C_\gamma, & b_2 &= S_\alpha C_\beta C_\gamma, & b_3 &= -C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma \\ c_1 &= -S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma, & c_2 &= C_\alpha C_\beta C_\gamma, & c_3 &= S_\alpha C_\gamma - C_\alpha S_\beta S_\gamma \\ d_1 &= 0, & d_2 &= -S_\beta S_\gamma, & d_3 &= C_\beta C_\gamma \\ e_1 &= C_\gamma S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma, & e_2 &= S_\alpha C_\beta S_\gamma, & e_3 &= S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma \\ f_1 &= -S_\alpha S_\beta S_\gamma - C_\alpha S_\gamma, & f_2 &= C_\alpha C_\beta S_\gamma, & f_3 &= C_\alpha S_\beta C_\gamma - S_\alpha C_\gamma \\ g_1 &= 0, & g_2 &= -C_\beta, & g_3 &= 0 \\ h_1 &= C_\alpha C_\beta, & h_2 &= -S_\alpha S_\beta, & h_3 &= 0 \\ i_1 &= -S_\alpha C_\beta, & i_2 &= -C_\alpha S_\beta, & i_3 &= 0 \end{aligned}$$

식 (5)를 정리하여 식 (7)과 같이 측정오차와 항법오차의 관계를 표현할 수 있다.

$$\delta p_i^c = - [C_{c0}^m]^T \left(\frac{1}{k_i} \delta p_u^n + \delta C_c^m p_{i0}^c \right) \quad (7)$$

랜드마크의 기하학적 위치와 항법오차의 관계를 살펴보기 위해 식 (7) 우변의 첫 번째 항을 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & - [C_{a0}^n]^T \frac{1}{k_i} \delta p_u^n \\
 & = - [C_{a0}^n]^T \frac{f \sqrt{1 + \tan^2 \psi_i + \tan^2 \theta_i}}{r_i} \delta p_u^n \quad (8) \\
 & \equiv H_{i1} \delta x_P
 \end{aligned}$$

여기서 $\delta x_P = [\delta x \ \delta y \ \delta z]^T$ 는 위치오차벡터를 의미한다. 또한 식 (7) 우변의 두 번째 항을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & - [C_{a0}^n]^T (\delta C_{P_{i0}}^n) = - [C_{a0}^n]^T \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ u_i \\ v_i \end{bmatrix} \\
 & = - f \cdot [C_{a0}^n]^T \begin{bmatrix} a_1 + b_1 T_{\psi_i} + c_1 T_{\theta_i} & a_2 + \dots & a_3 + \dots \\ d_1 + e_1 T_{\psi_i} + f_1 T_{\theta_i} & d_2 + \dots & d_3 + \dots \\ g_1 + h_1 T_{\psi_i} + i_1 T_{\theta_i} & g_2 + \dots & g_3 + \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \alpha \\ \delta \beta \\ \delta \gamma \end{bmatrix} \\
 & \equiv H_{i2} \delta x_A \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서 $\delta x_A = [\delta \alpha \ \delta \beta \ \delta \gamma]^T$ 는 자세오차벡터를 의미한다. 이들을 이용하여 식 (7)을 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta p_i^c = H_{i1} \delta x_P + H_{i2} \delta x_A \equiv H_i \delta x \quad (10)$$

여기서 $\delta x = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ \delta \alpha \ \delta \beta \ \delta \gamma]^T$ 는 3D 위치오차 및 자세오차벡터이다. 식 (7) - 식 (10)은 3D 항법오차가 랜드마크의 거리, 항체와 랜드마크의 각, 항체의 자세, 센서의 초점거리에 따라 항법오차가 달라질 수 있음을 보여준다.

비전항법에서 항법해를 계산하기 위해 적어도 3개 이상의 측정값이 필요하다. 따라서 n 개의 측정값에 대하여 측정오차와 항법오차의 관계를 행렬식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta p_1^c \\ \delta p_2^c \\ \vdots \\ \delta p_n^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_n \end{bmatrix} \delta x \equiv H \delta x \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여 DOP (Dilution-of-Precision)를 식 (12)와 같이 정의하여 표현할 수 있다.

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_\gamma^2} \equiv DOP \cdot \sigma_v \quad (12)$$

여기서 σ_v 는 시선벡터 측정오차의 표준편차, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 위치오차의 표준편차, $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma$ 는 자세오차의 표준편차를 의미한다. DOP는 각 랜드마크에 대한 측정오차가 서로 독립이고 그 표준편차가 같다고 가정할 때, 항법오차에 미치는 측정오차의 증폭도를 의미한다. 랜드마크 기반의 비전항법시 DOP는 식 (13)과 같다.

$$DOP = \sqrt{\text{trace}(H^T H)^{-1}} = \sqrt{\text{trace} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix}}$$

$$= \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44} + D_{55} + D_{66}} \quad (13)$$

식 (13)의 DOP를 PDOP(Position DOP)와 ADOP (Attitude DOP)로 나누어 표현할 수 있으며, 다음 식 (14)는 측정값 오차와 위치오차의 관계를 나타낸다.

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \equiv PDOP \cdot \sigma_v \quad (14)$$

여기서 PDOP는 $\sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$ 이다. 식 (15)는 시선각 측정값 오차와 자세오차의 관계를 나타낸다.

$$\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_\gamma^2} \equiv ADOP \cdot \sigma_\psi \quad (15)$$

여기서 ADOP는 $\sqrt{D_{44} + D_{55} + D_{66}}$ 이다.

위의 결과로부터 항체와 랜드마크의 상대적인 위치와 항체의 자세에 따른 PDOP와 ADOP의 변화를 볼 수 있다. 항체로부터 랜드마크가 멀어질수록 위치오차가 커지고 랜드마크간의 사이각이 작을수록 위치오차 및 자세오차가 커지며, 항체의 자세에 따라서도 항법성능이 달라진다. 이 결과는 항법해 계산시, PDOP와 ADOP를 고려한다면 더욱 정확한 항법해를 얻을 수 있음을 의미한다. 논문[13]에서는 랜드마크 기반의 2D 비전항법에서 랜드마크의 기하학적 배치에 대한 항법오차 연구를 수행하였으며, 항체와 랜드마크간의 거리, 그리고 랜드마크간의 시선각 등에 따라 2D 비전항법의 오차특성이 달라진다.

III. INS/비전 통합 항법시스템

1. INS/비전 통합시스템

INS는 시간이 지남에 따라 항법오차가 증가하는 특성이 있는 반면, 비전항법은 오차가 발산은 하지 않지만 비교적 오차가 크며, 랜드마크를 측정하지 못할 때는 항법해를 제공하지 못한다. 본 논문에서는 이러한 두 센서의 장단점을 보완하는 INS/비전 통합 항법시스템을 제안한다.

그림 2는 본 논문에서는 제시한 통합시스템의 구조를 보여준다. 통합항법에서는 비전항법에서 제공하는 위치, 자세 정보를 통합필터에 이용하여 INS 항법오차를 보정한다. 또한 보정된 INS의 항법결과를 이용하여 2절에서 기술한 DOP 계산한 후, 비전항법에 적용하여 항법성능을 더욱 개선시킨다. 논문에서는 두 센서의 통합을 위해 피드백 구조의 항법오차모델을 사용하는 간접 칼만필터를 구성한다. 칼만필터는 비전항법의 3D 자세정보와 위치 정보를 측정값으로 하

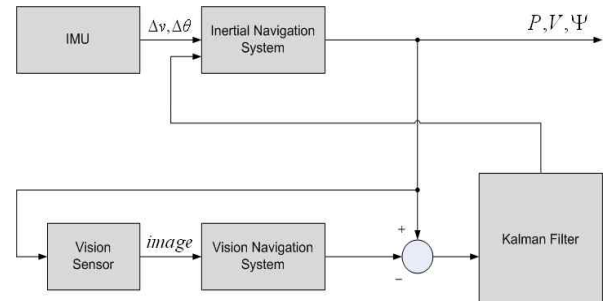


그림 2. INS/비전 통합 항법시스템.

Fig. 2. INS/Vision integrated navigation system.

여 INS의 오차를 추정하고 이는 INS로 피드백되어 항법오차와 센서오차를 보정한다. 또한 INS에서 제공하는 항법결과를 이용하여 랜드마크의 배치에 대한 비전항법의 오차특성을 고려하도록 한다. 비전항법에서 항법해를 제공할 수 없는 경우에는 필터에서 시간 갱신만 수행한다. 부가적으로 제안한 통합구조는 INS와 비전항법이 모두 독립적인 항법해를 제공하므로 센서의 고장을 감지하는데 용이하고, 보다 안정적인 항법해를 제공할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2. 프로세스 모델

INS의 위치, 속도, 자세에 대한 오차 모델과 센서 모델은 식 (16)과 같다[14].

$$\begin{aligned} \dot{\delta x}(t) &= F(t)\delta x(t) + w(t), \quad w(t) \sim N(0, Q(t)) \\ \begin{bmatrix} \dot{\delta x}_{nav} \\ \dot{\delta x}_{sen} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_{nav} \\ \delta x_{sen} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{nav} \\ w_{sen} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $w(t), Q(t)$ 는 각각 프로세스 잡음과 이의 공분산행렬을 나타내고, 상태변수 δx_{nav} 는 항법오차, δx_{sen} 은 센서오차를 나타내고 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta x_{nav}(t) &= [\delta R_N \delta R_E \delta R_D \delta V_N \delta V_E \delta V_D \delta \psi_N \delta \psi_E \delta \psi_D]^T \\ \delta x_{sen}(t) &= [\delta f_x \delta f_y \delta f_z \delta \omega_x \delta \omega_y \delta \omega_z]^T \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 δR 은 위치오차, δV 는 속도오차, $\delta \psi$ 는 자세오차, δf 는 가속도계 오차, $\delta \omega$ 는 자이로 오차를 의미한다. 또한, 식 (16)의 부행렬 F_{11}, F_{12} 는 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} F_{11} &= \begin{bmatrix} -\Omega_{en}^n & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_{ie}^n + \Omega_{in}^n & f^n \times_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -\Omega_{in}^n \end{bmatrix} \\ F_{12} &= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -C_b^n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $\Omega_{en}^n, \Omega_{ie}^n$ 및 Ω_{in}^n 은 각각 항체의 이동각속도, 지구 자전각속도, 관성좌표계에 대한 항법좌표계의 왜대칭 행렬을 의미하고 $f^n \times$ 은 항법좌표계에서 표현한 가속도 벡터에 대한 왜대칭 행렬이다. 각축의 센서오차는 랜덤 상수로 둔다.

3. 측정 모델

위치오차, 자세오차를 측정값으로 사용할 경우 측정방정식은 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta z(t) = H(t)\delta x(t) + v(t), \quad v(t) \sim N(0, R(t)) \quad (19)$$

여기서 $v(t), R(t)$ 는 각각 측정 잡음과 측정 잡음의 공분산행렬을 나타내고, 필터의 측정값 δz 는 비전항법과 INS의 위치, 자세 차이를 나타내며 식 (20)과 같다.

$$\delta z(t) = [\delta R_N \delta R_E \delta R_D \delta \alpha \delta \beta \delta \gamma]^T \quad (20)$$

자세오차변수의 경우에 식 (17)의 INS 오차모델에서는 좌표계 섭동에 의한 회전벡터 오차로 정의하였고, 식 (20)의 측정값은 오일러각 오차로 표현하였으므로 둘 사이의

관계를 고려하여 측정행렬을 구성하여야 한다[15]. 식 (19)의 측정행렬은 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & H_{23} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서 H_{23} 은 자세 측정값과 INS 오차모델의 자세 상태변수와의 관계를 나타내는 행렬로서, 식 (22)와 같다.

$$H_{23} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos \gamma}{\cos \beta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \beta} & 0 \\ \sin \gamma & -\cos \gamma & 0 \\ -\tan \beta \cos \gamma & -\tan \beta \sin \gamma & -1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

IV. 시뮬레이션

1. 관성센서 및 비전센서 사양

시뮬레이션에서는 관성센서(IMU: Inertial Measurement Unit)와 비전센서는 저가의 상용센서를 대상으로 하였다. 각 센서의 사양은 표 1, 표 2와 같다.

제안한 통합항법 알고리즘의 동작과 성능을 살피기 위해 그림 3과 같이 일정 고도에서 8자 운동을 하는 비행 궤적을 생성하고, 궤적에 따라 랜드마크를 불규칙하게 배치하였다. 그림 3은 항체의 궤적과 비전항법을 위해 배치한 랜드마크의 위치를 보여준다.

비전항법은 오차가 발산은 하지 않지만 INS에 비해 데이터 레이트가 낮고, 하나의 영상에서 3개 이상의 랜드마크를 측정하지 못하는 경우 항법정보를 제공하지 못한다. 그림 4는 랜드마크 측정값을 이용한 비전항법 결과를 보여준다. 결과에서처럼 비전항법은 랜드마크의 측정 유무에 따라 항법해를 제공하지 못하는 구간이 있다.

표 1. 관성센서 사양 및 초기정렬 오차.

Table 1. IMU specification and initial alignment error.

가속도계 바이어스		5 mg
가속도계 랜덤위크		0.1 m/s/sqrt(h)
자이로 바이어스		100 deg/hour
가속도계 랜덤위크		0.5 deg/sqrt(hour)
데이터 레이트		100 Hz
초기정렬오차	롤	0.1 deg
	피치	0.1 deg
	요	5 deg

표 2. 비전센서 사양.

Table 2. Specification of vision sensor.

초점거리	25 mm	데이터 레이트	10 Hz
수평픽셀수	4000	가시거리	500 m
수직픽셀수	3000	렌즈 왜곡	없음
FOV	90도	초점거리 오차	200 μ m
수평축 픽셀크기	8 μ m	가우시안 잡음 - 수직	200 μ m
수직축 픽셀크기	8 μ m	가우시안 잡음 - 수평	200 μ m

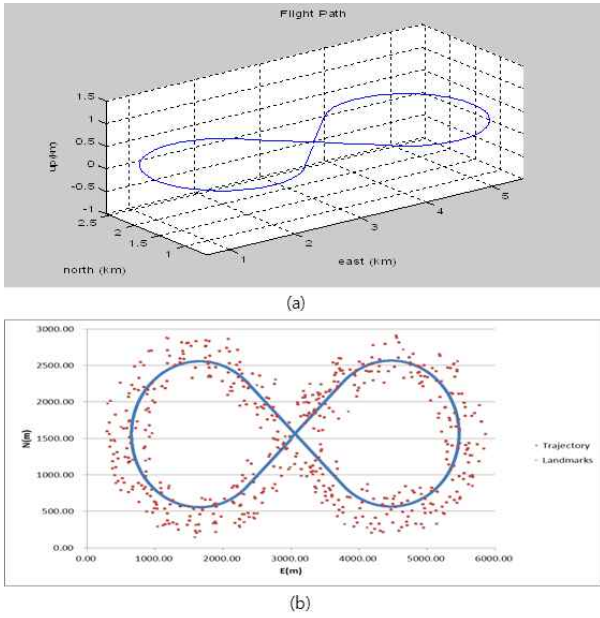


그림 3. (a) 시뮬레이션 항법궤적 (b) 랜드마크의 배치.
Fig. 3. (a) Trajectory for simulation (b) Placements of landmarks.

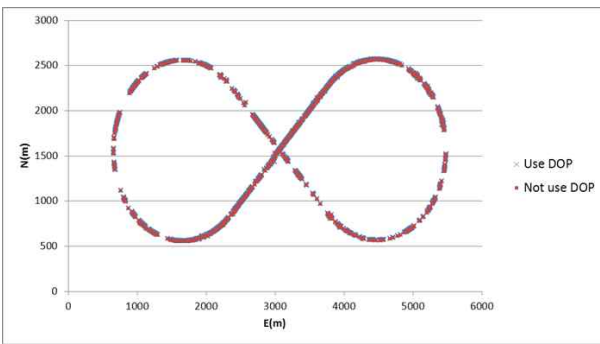


그림 4. 2D 맵에서의 비전항법 결과.
Fig. 4. Vision navigation results in 2 dimensional map.

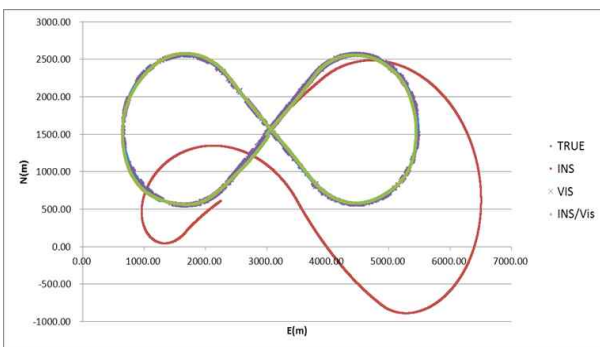


그림 5. 2D 맵에서의 궤적에 대한 항법 결과.
Fig. 5. Navigation results in 2 dimensional map.

그림 5는 True 궤적, 비전센서의 도움이 없는 INS 단독 항법, 비전모듈에서 계산한 항법해, 그리고 랜드마크 배치에 대한 DOP 계산을 적용한 INS/비전 통합항법 결과를 보여준다. 결과와 같이 INS는 오차가 누적되어 시간이 지남에 따라 오차가 발산한다. 반면, 통합항법은 두 센서의 단

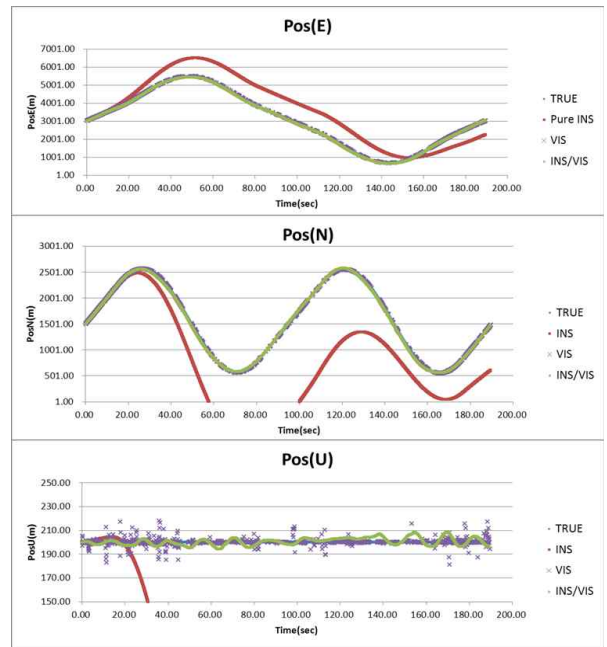


그림 6. 위치에 대한 항법 결과.
Fig. 6. Position computation results.

점을 보완하고 안정적인 항법해를 제공함을 볼 수 있다. INS/비전 통합항법은 DOP 계산을 적용하지 않은 경우에도 오차가 발산하지 않는다. 이 경우의 항법결과는 그림 5-7에서는 별도로 표기하지 않고, 표 3에 DOP를 적용한 결과와 비교하여 요약하였다.

그림 6은 위치에 대한 항법결과를 각 축에 대하여 자세하게 보여준다. INS/비전 통합시스템은 오차의 발산 없이 안정적으로 True 궤적을 추종함을 알 수 있다.

그림 7은 자세에 대한 항법결과를 각 축에 대하여 자세하게 보여준다.

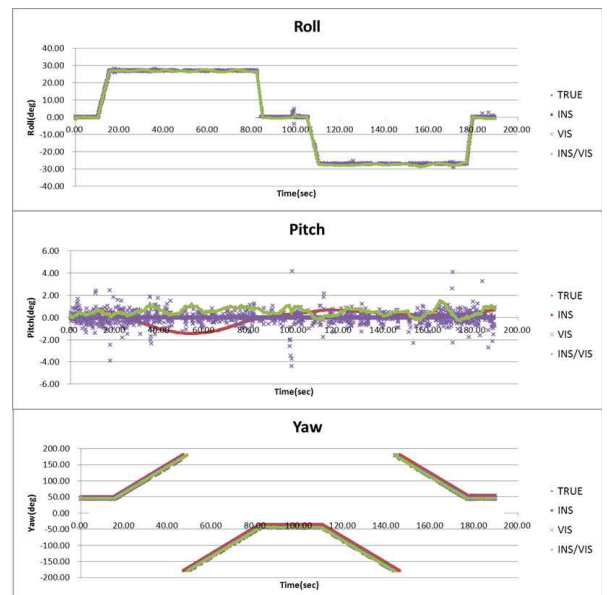


그림 7. 자세에 대한 항법 결과.
Fig. 7. Attitude computation results.

표 3. 항법결과.

Table 3. Navigation Results.

		위치오차(m)			자세오차(°)		
		N	E	D	롤	피치	요
INS Only	평균	-561.1	848.1	-1108.3	0.18	0.06	-0.54
	분산	632.4	578.9	806.2	0.66	0.65	52.3
INS/Vision	평균	0.68	0.53	0.63	0.40	-0.52	-0.02
-DOP고려 O	분산	21.81	18.94	3.06	0.44	0.34	6.92
INS/Vision	평균	0.74	0.10	1.22	0.36	-0.47	0.12
-DOP고려 X	분산	17.38	29.35	7.73	0.70	0.59	9.06

표 3에 INS 단독항법 결과와 INS/비전 통합항법 결과를 요약하였다. 통합항법의 경우에는 랜드마크의 배치에 대한 오차특성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하였다. 표의 결과가 보여주듯이, 통합항법은 INS 단독항법에 비해 항법성능을 월등히 향상시키며, 비전항법의 오차특성을 고려했을 때 더 좋은 성능을 제공함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 랜드마크 기반의 비전항법에서 랜드마크의 배치에 대한 항법 오차특성을 검토하고, 이를 고려한 INS/비전 통합 항법시스템을 제안하였다. 제안한 통합항법은 비전항법에서 제공하는 항법정보를 측정값으로 하여 INS 항법오차와 센서오차를 보정한다. 또한, 비전항법에서는 보정된 INS 항법결과를 입력으로 하여 랜드마크 배치에 대한 항법 오차특성을 고려함으로써 비전항법 자체의 성능을 개선하고 이 결과를 다시 통합항법에 이용하도록 한다. 두 센서의 통합을 위해 피드백 형태의 간접 칼만필터를 구성하였고, 측정값으로 위치오차, 자세오차를 사용한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 INS/비전 통합 알고리즘의 성능을 검증하였으며 비전항법의 오차특성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다. 그 결과 통합항법은 두 센서의 단점을 보완하고 안정적인 항법해를 제공함을 알 수 있었으며 비전항법의 오차특성을 고려할 때 더 좋은 통합 항법 성능을 보임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, 2008.
- [2] J. A. Hesch and F. M. Mirzaei, "A L-INS (Laser-Aided Inertial Navigation System) for human localization in unknown indoor environments," *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5376-5382, May 2010.
- [3] M. George and S. Sukkarieh, "Camera aided inertial navigation in poor GPS environments," *Aerospace Conference IEEE 2007*, pp. 1-12, Mar. 2007.
- [4] M. Kleinert and S. Schleith, "Inertial aided monocular SLAM for GPS-denied navigation," *2010 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 20-25, Sep. 2010.

- [5] U. Steinhoff, D. Omercevid, and R. Perko, "How computer vision can help in outdoor positioning," *AMI2007-LNCS 4794*, pp. 124-141, 2007.
- [6] G. B. Chatterji, P. K. Menon, and B. Sridhar, "GPS/machine vision navigation systems for aircraft," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 1012-1025, Jul. 1997.
- [7] M. Bryson and S. Sukkarieh, "Building a robust implementation of bearing-only inertial SLAM for a UAV," *Journal of Field Robotics*, vol. 24, no. 1-2, pp. 113-143, Feb. 2007.
- [8] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng, *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, The University of Michigan, 1996.
- [9] M. George and S. Sukkarieh, "Inertial navigation aided by monocular camera observations of unknown features," *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3558-3564, Apr. 2007.
- [10] D. X. Yue, X. S. Huang, and H. L. Tan, "INS/VNS fusion based on unscented particle filter," *Proc. of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, pp. 151-156, Nov. 2007.
- [11] W. Wang and D. Wang, "Land vehicle navigation using odometry/INS/vision integrated system," *007 IEEE International Conference on Cybernetics Intelligent Systems*, pp. 754-759, Sep. 2008.
- [12] S. J. Oh, W. H. Kim, J. G. Lee, H. K. Lee, and C. G. Park, "Design of INS/image sensor integrated navigation system," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 12, no. 10, pp. 982-988, Oct. 2006.
- [13] Y. S. Kim, H. Ji, and D.-H. Hwang, "Two-dimensional navigation error for geometry of landmark in line-of-sight measurement based vision navigation system," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, vol. 61, no. 3, pp. 479-484, Mar. 2012.
- [14] D. G. Meskin and Y. B. Itzhack, "A unified approach to inertial navigation system error modeling," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 15, no. 4, pp. 648-653, May-June 1992.
- [15] G. W. Song, C. B. Jeon, and M. Yu, "Relation of euler angle error and Rotation vector error," *Proc. of the 1997 Conference on Control and Instrumentation, Automation, and Robotics (in Korean)*, pp. 217-222, 1997.



김 영 선

1999년 충남대학교 전자공학과 졸업. 2001년 동 대학원 석사. 2001년~현재 한국항공우주연구원 선임연구원. 관심 분야는 비전항법, 통합항법, 위성전자 광학카메라 센서.



황 동 환

1985년 서울대학교 전기공학과 졸업.
1987년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사.
1991년 동 대학원 박사. 1996년~현재
충남대학교 전자공학과 교수. 관심 분야는 항법시스템, 통합항법시스템, GNSS 응용.