

# 착륙선의 정밀 착륙을 위한 지형 보조 관성 항법 연구

## Terrain Aided Inertial Navigation of Lander for Precise Landing

정보영\*, 최윤혁, 방효충 (KAIST)

### 1. 서론

최근 세계 각국은 달, 화성, 심지어 목성으로의 행성 탐사를 재개하였다. 행성 탐사는 미지의 행성에 대한 과학적 탐구, 우주 기술의 개발 및 우주 산업으로부터 파생되는 잠재적 경제 성장을 목표로 한다. 일본, 중국, 인도 등 아시아 국가들도 잇달아 달 탐사선인 Kaguya, Chang'e 1, Chandrayaan-1을 성공적으로 발사하였고 정부는 달 탐사 궤도선, 달 탐사 착륙선 개발을 위한 우주개발 계획서를 발표하였다. 최근의 행성 탐사 임무는 원하는 지점에 착륙하여 과학적으로 관심 있는 지역을 탐사하는 데 중점을 두고 있다. 특히 임무 완수에 필수적인 착륙선의 정확하고 안전한 착륙을 위하여 정밀한 항법 정보가 요구된다. 착륙선의 항법 정보는 위치, 속도, 자세 각 등을 포함하며 이를 통해 착륙선이 원래의 경로로부터 얼마나 벗어나 있는가를 알 수 있다. 대표적인 항법 장치인 관성 항법 시스템(Inertial Navigation System)은 내장된 관성 측정 장치(Inertial Measurement Unit)로부터 얻은 가속도, 각속도를 적분해 위치, 속도, 자세 각을 구한다. 관성 측정 장치는 외부 신호 없이 자체적으로 항법 정보를 얻을 수 있다. 하지만 시간이 지남에 따라 적분 오차가 누적되어 정확한 항법 정보를 제공하지 못한다. 과거 아폴로 임무는 관성 측정 장치, 전파 고도계, 속도계를 이용해 달 표면에 착륙하였지만 초기에 설정했던 착륙 지점으로부터 100km 이상 벗어난 지점에 착륙하였다. 정확하고 안전한 착륙을 보장하기 위해서는 높은 정확도의 항법을 수행할 수 있는 탑재 센서가 필요하다. 그 중 지형 보조 관성 항법(Terrain Aided

Inertial Navigation)은 미리 탑재하고 있는 지형 데이터와 측정된 지형 데이터를 이용해 기존의 관성 항법 장치의 오차를 보정하려는 방법이다. 사용 가능한 센서로는 카메라, LIDAR 등이 있다.

본 연구에서는 카메라를 통해 관성 항법 장치의 항법 오차를 보정하는 지형 보조 관성 항법 시스템을 구현하고자 한다. 이는 단일 관성 항법 시스템에 비해 정밀한 항법 정보를 제공한다. 또한 향후 착륙선의 유도 및 제어 법칙과 결합하여 정밀 행성 착륙을 위한 시스템 구현에 응용이 가능하다.

### 2. 문제 정의

#### 2.1 운동 방정식

착륙 좌표계의 중심은 달의 북극으로 가정한다. 달의 자전을 고려한 착륙선의 운동 방정식은 식 (1)과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}\ddot{x}^l - 2\omega_a \dot{y}^l - \omega_a^2 x^l &= U_{lx} + F_{lx} \\ \ddot{y}^l + 2\omega_a \dot{x}^l - \omega_a^2 y^l &= U_{ly} + F_{ly} \\ \ddot{z}^l &= U_{lz} + F_{lz}\end{aligned}\quad (1)$$

식 (1)의  $F$ 는 제어 입력,  $U$ 는 달의 중력 가속도 성분,  $\omega_a$ 는 달의 자전 속도이다.

#### 2.2 IMU 모델

IMU는 가속도계와 자이로스코프를 이용하여 3축 가속도, 3축 각속도를 측정하고 이를 적분하여 속도와 위치 정보를 얻는다. 이 때 측정된 가속도  $\tilde{a}$ 와 각속도  $\tilde{\omega}$ 에는 각각 바이어스  $b_a$ 와  $b_\omega$ , 백색 잡음  $\eta_a$ 와  $\eta_\omega$ 이 섞여 있

고 관계식은 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{a}} &= \mathbf{a} + \mathbf{b}_a + \boldsymbol{\eta}_a \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}} &= \boldsymbol{\omega} + \mathbf{b}_\omega + \boldsymbol{\eta}_\omega\end{aligned}\quad (2)$$

### 2.3 카메라 모델

지형 보조 관성 항법을 위한 센서로 카메라를 사용하였다. 카메라 모델은 이상적인 광학 센서의 모델링인 핀 홀 모델을 사용하였다. 핀 홀 모델은 3 차원 좌표를 2 차원 이미지 평면에 사영(projection)하여 표현할 수 있으며 관계식은 식 (3)과 같다.

$$u = f \frac{X_c}{Z_c}, v = f \frac{Y_c}{Z_c}\quad (3)$$

여기서  $f$  는 카메라의 초점 거리(focal length)이다.

### 2.3 기하학적 모델

지형 보조 관성 항법은 달 표면의 지형물을 이용해 항법을 수행하므로 지형물과 착륙선의 기하학적 관계가 중요하다. 기하학적 관계를 나타내기 위해서 좌표계와 좌표계간의 좌표변환을 정의해야 한다.

착륙선의 상태는 착륙 좌표계에서 표현되며 동체 좌표계의 중심은 착륙선의 질량 중심에 있고 카메라 좌표계의 중심은 카메라의 중심축에 있다.

착륙 좌표계에서 동체 좌표계로의 좌표 변환은 쿼터니안으로부터 얻어진다.

동체 좌표계에서 카메라 좌표계로의 변환은 식 (4)와 같으며 이 때  $\theta_c$  와  $\varphi_c$  는 카메라의 자세를 나타낸다.

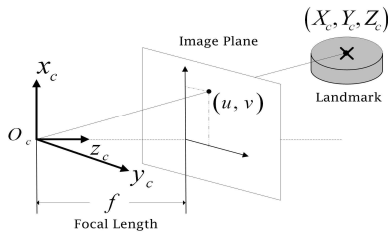


그림 1. 핀 홀 카메라 모델

$$C_b^c = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & 0 & -\sin\theta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_c & 0 & \cos\theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi_c & \sin\varphi_c & 0 \\ -\sin\varphi_c & \cos\varphi_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (4)$$

착륙 좌표계에서 카메라 좌표계로의 변환은 식 (5)으로 표현된다.

$$C_i^c = C_b^c C_i^b\quad (5)$$

지형물과 착륙선의 거리 벡터를 착륙 좌표계에서 정의하면 식 (6)과 같으며 이는 그림 2에 나타난다.

$$\mathbf{R}_i^l = \mathbf{t}_i^l - \mathbf{r}^l\quad (6)$$

이를 카메라 좌표계에서 정의하면 식 (7)로 변환된다.

$$\mathbf{R}_i^c = C_b^c C_i^b (\mathbf{t}_i^l - \mathbf{r}^l) - C_b^c \mathbf{r}^b\quad (7)$$

카메라 좌표계와 동체 좌표계의 중심이 같고 카메라는 동체에 부착되었다고 가정하면 식 (7)은 식 (8)로 정리된다.

$$\mathbf{R}_i^c = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} C_i^b (\mathbf{t}_i^l - \mathbf{r}^l)\quad (8)$$

## 3. 필터 구현

지형 보조 관성 항법 시스템을 구현하기 위한 필터로 확장형 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 사용하였다.

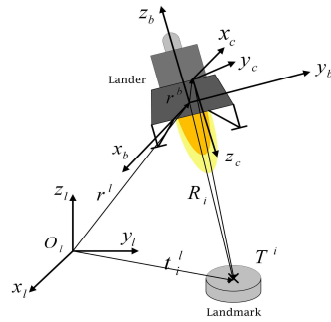


그림 2. 기하학적 모델

### 3.1 기구학 방정식 (Kinematics equation)

상태 변수는 기구학 방정식 (9)로부터 얻어지며 IMU 의 가속도, 각속도 입력이 포함된다.

$$\dot{\mathbf{x}}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \boldsymbol{\omega}_{k-1}) = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ C_l^{b-1}(\mathbf{q}) (\tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{b}_a - \boldsymbol{\eta}_a) + \mathbf{g} \\ \frac{1}{2} \Omega(\tilde{\boldsymbol{\omega}} - \mathbf{b}_\omega - \boldsymbol{\eta}_\omega) \mathbf{q} \\ \mathbf{v}_a \\ \mathbf{v}_\omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 때  $\mathbf{g}$  는 달의 중력 가속도,  $\mathbf{v}_a$  는 가속도계의 바이어스 백색 잡음,  $\mathbf{v}_\omega$  는 자이로스코프의 바이어스 백색 잡음, 행렬식  $\Omega(\boldsymbol{\omega})$  는

$$\begin{bmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 & \omega_1 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 & \omega_2 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 & \omega_3 \\ -\omega_1 & -\omega_2 & -\omega_3 & 0 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

### 3.2 측정 방정식 (Measurement equation)

카메라를 측정센서로 사용하며 카메라 이미지의 평면 위의 픽셀 값을 측정값으로 사용한다.  $i$  번째 지형물에 대한 측정 방정식은 아래와 같다.

$$z_i = m_i(\mathbf{x}) + v_k = \begin{bmatrix} f \frac{X_i}{Z_i} \\ f \frac{Y_i}{Z_i} \end{bmatrix} + v_k \quad (10)$$

### 3.3 확장형 칼만 필터 (Extended Kalman Filter)

확장형 칼만 필터는 propagation 과 update 를 통해 구현되며 관계식은 식 (11a), (11b), (11c)와 같다.

#### 3.3.1 Propagation

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} &= f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, 0) \\ P_{k/k-1} &= \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + Q_{k-1} \end{aligned} \quad (11a)$$

#### 3.3.2 Kalman gain

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T [H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (11b)$$

#### 3.3.3 Update

$$\begin{aligned} P_k &= (I - K_k H_k) P_{k/k-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k/k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + K_k [y(t_k) - m(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})] \end{aligned} \quad (11c)$$

민감 행렬(Sensitivity matrix)  $H_k$  는 식 (12a), (12b)로 구할 수 있다.

$$H_k = \left. \frac{\partial m(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \quad (12a)$$

$$h_i = \frac{\partial m_i}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial m_i}{\partial \mathbf{r}^T} \mathbf{0}_{2 \times 3} & \frac{\partial m_i}{\partial \mathbf{q}^T} \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \end{bmatrix} \quad (12b)$$

체인 법칙을 이용하여  $\frac{\partial m_i}{\partial \mathbf{r}^T}$  는  $\frac{\partial m_i}{\partial R_i^c} \frac{\partial R_i^c}{\partial \mathbf{r}^T}$ ,

$\frac{\partial m_i}{\partial \mathbf{q}^T}$  는  $\frac{\partial m_i}{\partial R_i^c} C_b^c \frac{\partial R_i^c}{\partial \mathbf{q}^T}$  로부터 얻어진다.

## 4. 결과 및 분석

착륙선의 동력 강하는 고도 15km 근월점에서 부터 시작되며 지형물의 좌표는 영상처리를 통해 얻어졌다고 가정한다. 지형 보조 관성 항법 시스템에는 고성능 IMU 와 높은 정밀도의 카메라를 사용하였다. 그림 3 과 그림 4 는 EKF 를 이용해 구현한 지형 보조 관성 항법 시스템과 단일 관성 항법 시스템의 속도 오차, 위치 오차를 나타낸다. 단일 관성 항법 시스템은 초기 오차로 인해 시간이 지남에 따라 오차가 발산하지만 지형 보조 관성 항법 시스템은 오차가 0 으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 고도에 따른 가시 가능한 지형물의 개수는 그림 와 같다. 저고도에서 카메라의 시야범위 내에 지형물이 없는 경우에도 지형 보조 관성 항법 시스템이 발산하지 않음을 확인하였다.

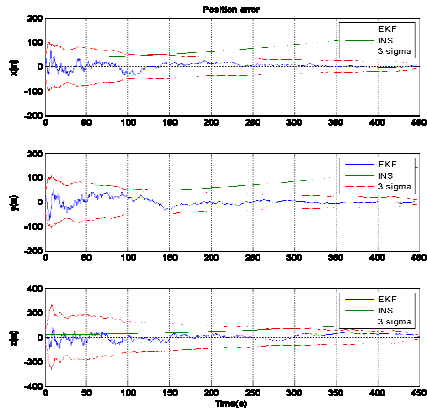


그림 3. 위치 오차와 3σ 경계

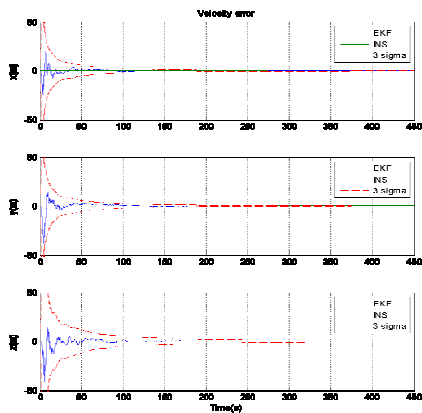


그림 4. 속도 오차와 3σ 경계

### 5. 결론

본 연구에서는 카메라를 이용하여 지형물의 좌표를 얻고 이를 통해 지형 보조 관성 항법 시스템을 구현하였다. 단일 관성 항법 시스템과 비교해 보았을 때 지형 보조 관성 항법은 수 m 내 오차를 가지며 이는 착륙선의 정밀한 착륙을 위한 정밀한 항법 정보를 제공한다. 향후 착륙선의 유도 및 제어를 통해 정밀 행성 착륙 임무 수행이 가능하다.

### 6. 후기

본 연구는 한국과학재단을 통해 교육

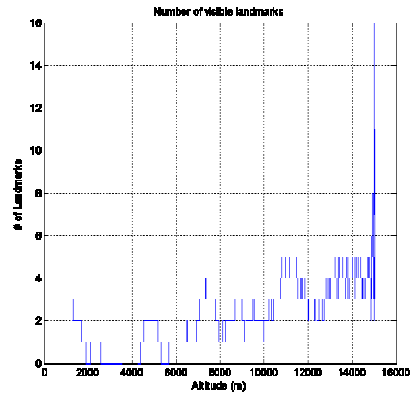


그림 5. 고도에 따른 가시 가능한 지형물 개수

과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업 (NSL) 으로부터 지원받아 수행되었습니다. (S10801000123-08A0100-12310)

### 7. Reference

- [1] Chul Park, "A Road Map To The Moon," 한국항공우주학회 2008 년 추계 학술발표회, 2008
- [2] S.C. Paschall, T. Brady, B.E. Cohanin, and R. Sostaric, "A Self Contained Method for Safe & Precise Lunar Landing," IEEE Aerospace Conference, 2008
- [3] D. Simon, "Optimal State Estimation: Kalman, H-Infinity, and Nonlinear Approaches," 1st ed., Wiley & Sons, 2006
- [4] Y. Cheng, A. Ansar, "Landmark Based Position Estimation for Pinpoint Landing on Mars," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, 2005
- [5] S. Li, P. Cui, and H. Cui, "Vision-aided inertial navigation for pinpoint planetary landing," Aerospace Science and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 499-506, 2007