

## 랜드마크 시선각 측정값을 이용한 3D 비전항법해 결정

김영선\*, 지현민\*\*, 황동환\*\*\*

한국항공우주연구원\*, 충남대학교\*\*, 충남대학교\*\*\*

### Vision based 3D Position and Attitude Determination using Landmarks' Line-of-Sight Measurements

Youngsun Kim\*, Hyun-Min Ji\*\*, Dong-Hwan Hwang\*\*\*

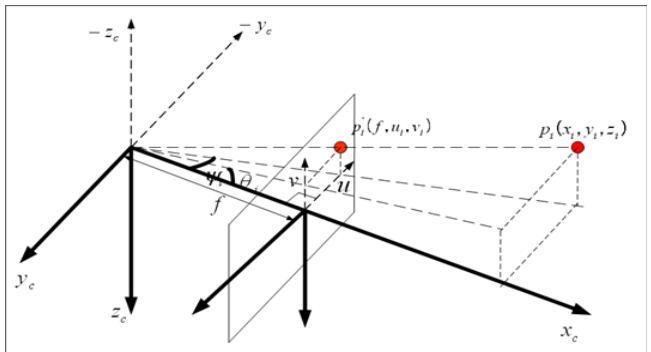
Korea Aerospace Research Institute\*, Chungnam National University\*\*, Chungnam National University\*\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 랜드마크의 시선각 측정값을 이용하여 3D 비전항법해를 계산하기 위한 항법방정식을 유도하고 항법해 결정 방법을 보여준다. 먼저, 카메라좌표계에서 측정된 시선각과 항법좌표계의 관계를 이용하여 3차원 항법방정식을 유도하였으며 항법해를 계산하기 위해서는 최소한 3개 이상의 랜드마크를 관측해야함을 보였다. 또한 논문에서는 항법방정식과 기하학을 이용하여 항체의 위치 및 자세를 계산하는 과정을 상세하게 기술한다.

여주는 바와 같이 랜드마크는 닳음비 원리에 의하여 초점면에 상이 맺힌다.

#### 1. 서론

비전센서는 통항항법의 보조센서로 DR(Dead Reckoning) 센서나 GPS(Global Positioning System) 등과 결합하여 사용할 수도 있지만[1] 단독으로도 항법정보를 제공할 수 있다[2]. 비전센서를 이용한 항법시스템은 영상처리에 계산량이 많고 조명환경에 영향을 받는 등의 단점이 있지만 저가이고, 무게, 전력소모, 신뢰성, 랜드마크의 인식 등에 장점이 있다. 또한 최근, 고해상도 카메라의 보급, 고속 데이터 인터페이스 등의 개발은 비전센서 측정값만을 가지고도 높은 정확도의 항법해를 계산할 수 있도록 한다[3,4].



〈그림 2〉 랜드마크 시선각 측정

랜드마크에 대한 시선각 측정값은 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} x_i &: f = y_i : u_i \\ x_i &: f = z_i : v_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $(x_i, y_i, z_i)^T$ 는 카메라좌표계에서 랜드마크의 좌표이며,  $u_i, v_i$ 는 카메라좌표계에서  $i$  랜드마크의 초점면 투영값,  $f$ 는 센서의 초점거리이다.

#### 2. 비전센서의 랜드마크 시선각 측정

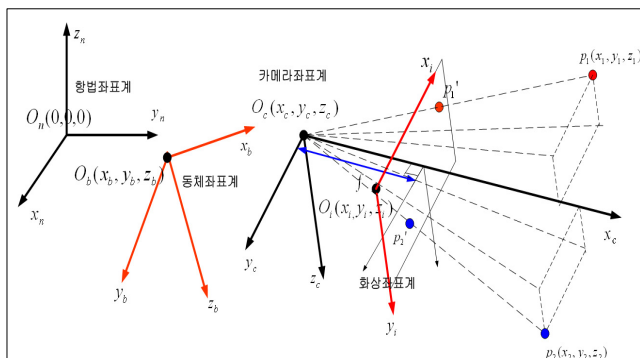
랜드마크 시선각 측정값을 이용하는 비전항법은 화상좌표계에서 초점면(Image plane)에 투영된 랜드마크를 측정하여 카메라좌표계, 동체좌표계로 변환한 후, 항법좌표계와의 관계를 계산한다. 그림 1은 비전항법에서 사용하는 좌표계, 즉, 항법좌표계, 동체좌표계, 카메라좌표계 및 화상좌표계를 도식적으로 보여준다.

#### 3. 랜드마크 시선각 측정값을 이용한 3차원 비전항법

2D 항법에서는 랜드마크 시선각 측정값을 이용하여 항체의 수평 위치 정보와 방위각을 계산할 수 있다[3,4]. 이때 초점면이 지면에 수직이라고 가정한다면 랜드마크의 수평측 측정값, 즉 그림2에서  $u_i$  측정값만 있으면 된다. 반면 3D 항법에서는 항법해 계산에  $u_i, v_i$  측정값을 모두 이용한다.

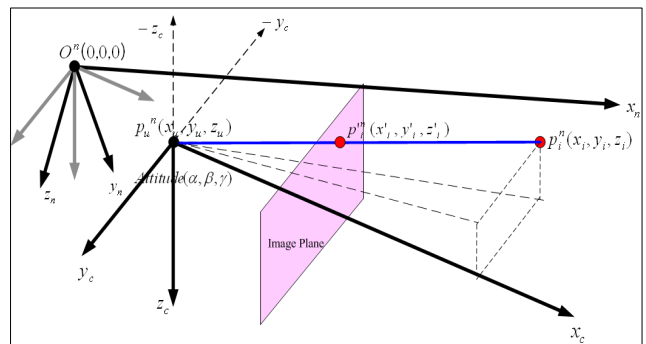
##### 3.1 3D 비전항법 방정식

비전항법 측정값과 항법해의 관계는 항법컴퓨터의 데이터베이스에 저장된 랜드마크 위치와 카메라좌표계에서 측정된 랜드마크 시선각 벡터의 관계를 살펴서 항법방정식을 유도할 수 있다.



〈그림 1〉 비전항법 좌표계

랜드마크의 비전센서 초점면에 투영과정은 핀홀 카메라 모델에 의하여 설명할 수 있다[1]. 그림2는 카메라 핀홀모델과 랜드마크의 초점면 투영과정을 보여준다. 카메라좌표계에서  $x$ 축은 카메라의 광축(Optical axis)과 정렬되고  $z$ 축은 초점면에 대하여 수직하강방향,  $y$ 축은 오른손 좌표계 법칙에 의하여 정의한다. 초점면은 광축에 대하여 초점거리  $f$  만큼 떨어진 위치에서 축에 대하여 직각으로 정렬되어 있다. 그림에서 보



〈그림 3〉 랜드마크 시선각 측정값을 이용한 3D 비전항법

항체의 동체의 설치된 비전센서는 카메라좌표계에서 시선각을 측정하므로 카메라좌표계와 동체좌표계, 그리고 동체좌표계와 항법좌표계간의 좌표변환행렬이 필요하다. 카메라좌표계에서 측정된 랜드마크의 시선각 벡터와 항법좌표계에서의 시선각 벡터는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\vec{p}_i^n - \vec{p}_u^n = k_i C_b^m C_c^b \vec{p}_i'^c \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x_i^n - x_u^n \\ y_i^n - y_u^n \\ y_i^n - z_u^n \end{pmatrix} = k_i C_b^m C_c^b \begin{pmatrix} f \\ u_i \\ v_i \end{pmatrix}$$

여기서  $\vec{p}_u^n = (x_u, y_u, z_u)^T$ 로 구하고자 하는 항체의 위치이고,  $\vec{p}_i'^c = (f, u_i, v_i)^T$ 는 비전센서에서 측정된 랜드마크의 시선각 벡터이다. 또한  $k_i$ 는 센서에서 측정된 랜드마크 시선각 측정값과 실제 항체와 랜드마크의 거리를 의미하는 변수이다.  $C_b^m, C_c^b$ 은 각각 동체좌표계로부터 항법좌표계로, 카메라좌표계로부터 동체좌표계로의 좌표변환 행렬을 의미한다. 카메라좌표계와 동체좌표계의 관계, 즉 센서의 설치위치를 정확히 알고 있다면  $C_c^b$ 은 이미 계산이 가능하며 논문에서는 편의상 두 좌표계가 정확하게 일치한다고 가정하였다. 이 때, 카메라좌표계로부터 항법좌표계로 변환하기 위한 좌표변환 행렬로 다음과 같다.

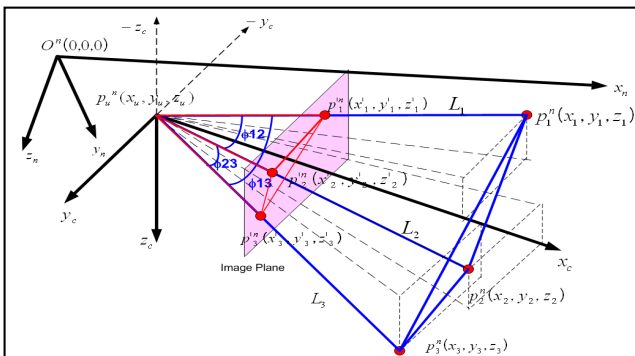
$$C_c^m = C_b^m = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma & \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma \\ \cos\beta \sin\gamma & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma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

여기서  $[\alpha, \beta, \gamma]^T$ 는 항체의 자세, 즉 물각, 피치각, 요각을 의미한다. 위 식에서 미지수는 3축에 대한 항체의 위치와 자세 총 6개의 변수를 갖는다. 식(2)와 식(3)은 항법해를 구하기 위해서 적어도 세 쌍 이상의 랜드마크를 측정해야 함을 보여준다.

항법해는 먼저 항체의 위치를 구하고 이를 이용해 항체의 자세를 구할 수 있다.

### 3.2 위치결정

랜드마크 시선각 측정값을 이용하여 항체의 위치를 구할 수 있다. 랜드마크간 사이각 계산, 각 랜드마크간 거리 계산하여 항체의 위치를 계산할 수 있다.



〈그림 5〉 랜드마크 시선각 측정값을 이용한 위치 결정

항체의 위치를 계산하기 위해서는 랜드마크간 사이각을 계산해야 한다. 랜드마크간 사이각은 센서에서 측정된 시선각 벡터를 이용하여 계산할 수 있다. 계산식은 식(5)와 같다.

$$\phi_{ij} = \cos^{-1} \left( \frac{f^2 + u_i u_j + v_i v_j}{\sqrt{(f^2 + u_i^2 + v_i^2)(f^2 + u_j^2 + v_j^2)}} \right) \quad (4)$$

위에서 구한  $\phi_{ij}$  값을 이용하여 항체와 랜드마크간 거리를 구할 수 있다. 그림에서  $L_1, L_2, L_3$ 는 아래와 같은 코사인 법칙을 이용하여 계산할 수 있다.

$$L_{ij}^2 = L_i^2 + L_j^2 - 2L_i L_j \cos \phi_{ij} \quad (5)$$

여기서  $L_{ij}$ 는 각 랜드마크간 거리로, 데이터베이스 정보를 이용하여

계산할 수 있다.  $L_i, L_j$ 는 항체로부터 각 랜드마크간 거리로 식(5)방정식에서 구하고자 하는 해이다. 가시 랜드마크가 3개 이상이면 해를 계산할 수 있으나 비선형방정식이므로 이를 풀기 위해서는 선형화 과정 등이 필요하다.

마지막으로 항체와 랜드마크간의 거리정보를 이용하여 항체의 위치를 계산할 수 있다.

$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2 = L_i^2 \quad (6)$$

식(6)에서 미지수는 항체의 위치, 즉 3개의 변수이고, 이미 세 개 이상의 랜드마크 시선각을 측정했으므로 방정식의 해를 찾을 수 있다.

### 3.3 자세결정

앞 절의 과정을 통해서 항체의 위치를 계산하였다면, 측정된 시선각 벡터를 이용하여 항체의 자세를 계산할 수 있다. 항체의 자세는 참고문헌[5]와 같이 쿼터니언 방법을 사용하여 계산할 수도 있고 식(7)과 같이 오일러각을 계산할 수 있다. 단위 시선각 벡터를 이용한 관계식은 다음과 같다.

$$\vec{u}_i^n = C_c^m \vec{u}_i'^c \quad (7)$$

여기서  $\vec{u}_i^n$ 는 알려진 랜드마크 좌표와 항체의 위치로부터 계산할 수 있고  $\vec{u}_i'^c$ 는 측정값으로부터 계산할 수 있다.

$$\vec{u}_i^n = \frac{\vec{p}_i^n - \vec{p}_u^n}{|\vec{p}_i^n - \vec{p}_u^n|} \quad (8)$$

$$\vec{u}_i'^c = \frac{\vec{p}_i'^c}{|\vec{p}_i'^c|}$$

식(3), 식(7), 식(8)은 하나의 랜드마크 시선각 측정값으로도 3개의 독립적인 방정식을 세울 수 있으므로 3개의 자세변수를 구할 수 있음을 보여준다. 그러나 이미 항체의 위치계산에 이용한 3개 이상의 랜드마크 측정값이 있으므로 이를 이용하여 쉽고, 정확하게 항체의 자세를 계산할 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 랜드마크의 시선각 측정값을 이용하여 3D 비전항법해를 계산하기 위한 항법방정식을 유도하고 항법해를 구하기 위한 구체적인 절차를 보여준다. 논문에서는 먼저, 카메라좌표계에서 측정된 시선각 벡터 측정값과 항법좌표계에서 항체와 랜드마크 벡터를 이용하여 3차원 항법방정식을 유도하였으며 최소한 3개 이상의 측정값이 있어야 항법해를 계산할 수 있음을 보여주었다. 항체의 위치 계산을 위하여 코사인 법칙 등을 이용할 수 있으며 비선형 방정식에 대한 선형화 과정 등이 필요하다. 또한 논문에서는 항체의 자세는 위치해를 계산한 후에 수행하며, 이 경우 하나의 랜드마크 측정값으로도 계산 가능하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] B. Chatterji, P. K. Menon and B. Sridhar, "GPS/Machine Vision Navigation Systems for Aircraft", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, no. 3, pp. 1012-25, July, 1997
- [2] U. Steinhoff, D. Omerevic and R. Perko, "How Computer Vision Can Help in Outdoor Positioning", AMI 2007-LNCS 4797, pp.124-141, 2007
- [3] C. Cohen and F. V. Koss, "A Comprehensive Study of Three Object Triangulation", Mobile Robotics VII. vol. 1831, pp. 1992
- [4] M. Betke and Leonid Gurvits, "Mobile Robot Localization Using Landmarks", IEEE Trans on Robotics and Automation, vol. 13, no. 2, pp. 251-263, April, 1997
- [5] V. Sazdovski, P. M. G. Silson, A. Tsourdos, "Attitude Determination from Single Camera Vector Observations", IEEE Intelligent Systems Conference, 2010