

## 論文

## 두 대의 적외선 카메라를 이용한 헤드 트래커 시스템

홍석기\*, 박찬국\*\*

## Head Tracker System Using Two Infrared Cameras

Seok Ki Hong\* and Chan Gook Park\*\*

## ABSTRACT

In this paper, an experimental optical head tracker system is designed and constructed. The system is composed of the infrared LEDs and two infrared CCD cameras to filter out the interference of another light in the limited environment like the cockpit. Then the optical head tracker algorithm is designed by using the feature detection algorithm and the 3D motion estimation algorithm. The feature detection algorithm, used to obtain the 2D position coordinates of the features on the image plane, is implemented by using the thresholding and the masking techniques. The 3D motion estimation algorithm which estimates the motion of a pilot's head is implemented by using the extended Kalman filter (EKF). Also, we used the precise rate table to verify the performance of the experimental optical head tracker system and compared the rotational performance of this system with the inertial sensor.

## 초 록

본 논문에서는 전투기 조종석과 같은 제한된 공간에서 사용 가능한 광학 방식의 헤드 트래커 시스템을 설계하고 그 성능을 시험하였다. 이 시스템은 다른 빛의 간섭을 차단하기 위해 적외선 발광다이오드와 두 대의 적외선 CCD 카메라를 사용하였다. 그리고 광학 방식의 헤드 트래커 알고리즘은 특징점 추출 알고리즘과 3차원 움직임 추정 알고리즘으로 구성하였다. 카메라 이미지 평면 위에서 특징점의 2차원 위치 좌표를 획득하기 위한 특징점 추출 알고리즘은 디지털 영상 처리 기술인 문턱치 (thresholding)와 마스크링 (masking) 기법을 사용하였다. 특징점의 위치 변화로부터 조종사의 머리 움직임을 추정하는 3차원 움직임 추정 알고리즘은 확장 칼만 필터 (EKF)를 사용하였다. 또한, 정밀한 레이트 테이블을 사용하여 시스템 성능을 검증하고 회전 성능에 대해 관성 센서와 비교하였다.

**Key Words** : feature detection algorithm(특징점 추출 알고리즘), 3D motion estimation algorithm(3차원 움직임 추정 알고리즘), extended Kalman filter(확장 칼만 필터)

## 1. 서 론

헤드 트래커는 사용자의 머리 움직임을 포착하여 머리의 위치 및 자세에 대한 정보를 획득하는 장비로 시각 및 청각 등의 정보와 연계하여 군사, 의학, 게임 분야 등 다방면에 활용되고 있다[1,2]. 특히 차세대 전투기 개발에 있어서 헤드

† 2005년 12월 30일 접수 ~ 2006년 4월 18일 심사완료

\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail : chanpark@snu.ac.kr

서울특별시 관악구 신림 9동 산 56-1번지

트랙커는 조종사의 대항 능력 및 생존성 향상을 위한 중요한 항공전자 장비이다[3].

항공 분야에서 사용되는 대표적인 헤드 트랙커 방식에는 자기장 방식과 광학 방식이 있다. 자기장 방식은 무게가 가볍고 높은 해상도를 가지며 센서가 자유롭게 3차원 공간상을 이동할 수 있는 장점이 있으나 장비가 고가이며 자기장이 주변 전자 장비에 영향을 주는 단점을 가지고 있다. 광학 방식의 경우 자기장 방식에 비해 더 정확하고 자기장의 영향을 받지 않는 장점이 있지만 많은 데이터 처리량과 다른 광원에 민감한 단점이 있다. 최근에는 영상 장비의 발달과 컴퓨터가 발전함에 따라 정확도가 높고 실시간 처리가 가능한 광학 방식의 헤드 트랙커에 대한 연구가 집중되고 있다[3].

광학 방식의 헤드 트랙커 시스템을 설계하기 위해서는 사용되는 목적과 장소에 적합한 영상 장비의 선택과 시스템 구성에 맞는 알고리즘에 대한 연구가 수행되어야 한다. 비행기 조종석의 경우 한정된 공간에서 많은 전자 장비의 빛으로부터 영향을 많이 받기 때문에 가시광선 영역의 영상 장비를 사용할 경우 외란이 일어나는 문제점이 발생한다. 따라서 다른 광원으로부터 영향을 받지 않고 안정적인 빛을 공급할 수 있는 적외선 영역의 능동 표적 시스템 (active-target system)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[4].

광학 방식의 헤드 트랙커 알고리즘은 카메라 이미지 평면 위에서 특징점의 2차원 위치 좌표를 획득하기 위한 특징점 추출 알고리즘과 특징점의 변화로부터 조종사 머리의 3차원 움직임을 획득하는 3차원 움직임 추정 알고리즘으로 구성된다. 특징점 추출 알고리즘은 선택한 영상 장비의 영상 특징에 따라 적합한 영상 처리 기법을 사용한다. 일반적인 특징점 추출 기법에는 마스크(mask)를 이용한 마스크 기법과 픽셀의 레벨(level)값과 픽셀좌표(pixel coordinate)사이의 거리를 이용한 모멘트(moment) 기법이 많이 쓰인다. 마스크 기법은 연산량이 많지만 마스크의 가중치를 변경하여 정확한 중심좌표를 획득할 수 있다. 반면에 모멘트 기법은 마스크에 비해 연산량은 적지만 거리에 따라 가중치가 결정되므로 정확한 특징점의 중심좌표를 추출하기 어렵다. 3차원 움직임 추정 알고리즘의 경우 크게 자세 복구 알고리즘(pose recovery algorithm)과 반복 추정 알고리즘(recursive estimation algorithm)으로 나뉜다. 자세 복구 알고리즘은 3변 측량(trilateration)이나 삼각 측량(triangulation)방법을 사용하며 반복 추정 알고리즘은 칼만 필터(Kalman filter)와 같은 반복 필터(recursive filter)

를 사용한다. 전통적인 자세 복구 알고리즘은 이전의 자세 정보를 사용하지 않고 영상 데이터가 입력될 때마다 전체 자세를 다시 계산하기 때문에 최적이지 않지만 반복 추정 알고리즘은 최적화된 필터를 사용하여 과거의 정보, 현재의 측정치, 추측(priori) 모델을 함께 사용하므로 최적 특성을 나타내기 때문에 다중 센서 융합과 추정 기법에 많이 사용되고 있다[4].

현재 추정 기법을 사용한 광학 방식의 헤드 트랙커의 경우 두 대의 카메라를 사용하여 확장 칼만 필터를 적용한 inside-out 방식이 많이 연구되고 있지만 outside-in 방식의 헤드 트랙커에 대한 연구는 미진한 상태이다. Inside-out 방식의 경우 넓은 공간에서 머리의 3차원 움직임을 추정할 수 있지만 많은 특징점을 배치해야하고 카메라를 머리에 부착해야하므로 사용자의 머리에 많은 부담을 주는 단점이 있다. 특히 고속으로 움직이는 비행체의 경우 헬멧의 무게를 가중시켜 조종사 머리에 많은 힘이 가해진다. 반면에 outside-in 방식의 경우 동작 범위는 작지만 상대적으로 적은 수의 특징점 배치가 요구되며, 사용자 머리에 부담을 가하지 않는다.

본 논문에서는 적외선 발광 다이오드와 적외선 카메라를 이용하여 조종석과 같은 한정된 공간에서 조종사의 영향을 덜 주는 outside-in 방식의 헤드 트랙커 시스템을 구성하였다. 그리고 일반적인 문턱치와 마스크 영상 처리 기법을 사용하여 이 시스템에 적합한 특징점 추출 알고리즘을 구현하였으며, 확장 칼만 필터를 사용하여 두 대의 카메라 측정치 값을 사용할 수 있는 3차원 움직임 추정 알고리즘을 설계하였다. 또한, 정밀한 레이트 테이블을 사용하여 광학 방식 헤드 트랙커 시스템의 성능을 관성 방식과 비교하여 검증하였다.

## II. 헤드 트랙커 시스템 구성

본 논문에서 구성된 실험실 수준의 헤드 트랙커 시스템은 Fig. 1과 같이 두 대의 적외선 카메라, 적외선 발광 다이오드, IMU (Inertial Measurement Unit), 레이트 테이블로 구성된다.

### 2.1 카메라

본 논문에서는 특징점 추출이 쉽고 외부 빛의 간섭을 피하기 위해 일본 CIS사의 VCC-S70E21R 적외선 카메라를 사용한다. 일반 CCD 카메라의 경우 가시광선 영역의 감도는 높지만 적외선 영역의 감도는 매우 낮기 때문에 적외선 필터를 사

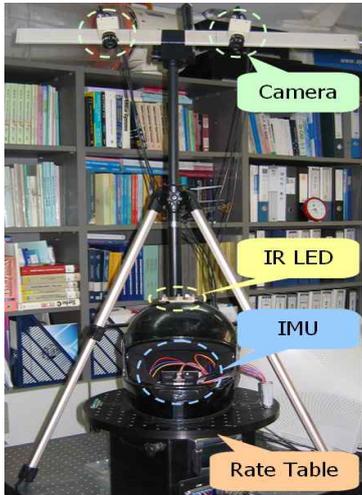


Fig. 1. Experimental head tracker system

용하더라도 파장이 880nm에서 950nm대의 적외선 발광 다이오드의 빛을 측정하기 어렵다. 그러나 VCC-S70E21R 카메라는 900nm의 적외선 영역에서 감도가 매우 우수하기 때문에 일반 조명하에서도 특징점 추출이 용이하다. 또한, 30frames/sec의 빠른 프레임 속도를 가지며, 640(H)×480(V)의 높은 해상도를 가지고 있다.

### 2.2 특징점

본 논문에서 구성한 광학 방식의 헤드 트래커 시스템은 적외선 발광 다이오드를 특징점으로 하는 능동 표적 시스템으로 설계한다. 적외선 발광 다이오드를 특징점으로 사용할 경우 선택된 카메라에서 감지할 수 있는 파장 영역에 적합하고 적절한 방사 형태를 갖는 적외선 발광 다이오드를 선택해야 한다. 본 논문에서 특징점으로 사용한 적외선 발광 다이오드는 AUK사의 SI5312-H로 950nm의 피크발광파장 (peak wavelength)과 ±8°의 반치각 (half angle)을 가지고 있다.

### 2.3 영상 편집 보드

아날로그 카메라에서 획득된 영상으로부터 디지털 영상 처리를 하기 위해서는 영상 편집 보드가 필요하다. 본 논문에서 구성한 실험실 수준의 헤드 트래커 시스템은 조종사 머리의 3차원 움직임과 위치를 정확히 측정하기 위해 두 대 아날로그 카메라를 사용한다. 따라서 2채널 이상 동시 획득이 가능하며, VCC-S70E21R 카메라의 최대 영상 데이터 속도 (640×480×30bytes/sec)를 두 배 이상으로 샘플링 할 수 있는 Matrox사의 Meteor2-MC/4 영상 편집 보드를 사용한다.

## III. 광학 방식의 헤드 트래커 알고리즘

광학 방식의 헤드 트래커 알고리즘은 영상 처리 기법을 사용한 특징점 추출 알고리즘과 확장 칼만 필터를 이용한 3차원 움직임 추정 알고리즘을 구성된다.

### 3.1 특징점 추출 알고리즘

광학 방식의 헤드 트래커 시스템은 획득된 영상으로부터 특징점의 정확한 위치를 추출하기에 적합한 특징점 추출 알고리즘이 필요하다. 적외선 카메라에서 획득된 적외선 발광 다이오드의 영상은 주변의 가시영역보다 더 높은 레벨값을 가지고 있기 때문에 일반적인 문턱치 기법을 사용하여 배경으로부터 발광 다이오드의 한 점인 시작점 (start point)을 추출한다. 그리고 발광 다이오드 영상은 여러 화소들로 구성되기 때문에 특징점의 중심 좌표를 획득하기 위해 마스킹 기법을 사용한다. 문턱치 기법의 임계값은 배경과 특징점을 구분할 수 있는 230~255범위의 레벨값으로 설정하며, 마스크는 중심좌표의 가중치가 높은 가우시안 마스크 (Gaussian mask)를 사용한다[5]. 마스킹 연산의 경우 마스킹 영역이 넓을수록 연산 시간이 증가하기 때문에 특징점 주위에 일정 크기의 영역 (window)을 지정하여 마스킹 연산 시간을 단축시킨다[6].

머리의 3차원 움직임을 추정하기 위해서는 적외선 발광 다이오드를 특징점으로 사용할 경우 두 카메라 영상 프레임 사이와 현재와 이전 영상 프레임 사이의 특징점을 정합시켜야 한다[7]. 두 카메라 영상 프레임 사이의 특징점을 정합시키기 위하여 특징점 추출을 수행한 후 특징점의 기하학적인 배치 구조를 이용한다. 현재와 이전 영상 프레임 사이의 특징점 정합의 경우 특징점 추출 알고리즘의 시작점에 이전 영상 프레임의 특징점 중심좌표를 대입함으로써 특징점 추출과 특징점 정합을 함께 수행한다. 왜냐하면 미소 시간 동안 영상 프레임 사이의 특징점 위치 변화는 특징점 추출 시 사용하는 윈도우 크기보다 작기 때문이다.

Fig. 2는 일반적인 영상처리기법들을 사용하여 본 논문에서 구현한 특징점 추출 알고리즘 흐름도를 나타낸다. 먼저 현재 입력된 영상이 첫 번째 영상일 경우 문턱치 기법을 사용하여 시작점을 추출하고 마스킹 기법을 사용하여 특징점의 중심좌표를 추출한 후 두 카메라 영상 프레임 사이의 특징점을 정합시킨다. 두 번째 영상부터는 이전 영상에서 추출된 특징점의 중심좌표를 시작점으로 설정한 후 마스킹 기법을 사용하여 현재 영상에서 특징점의 중심좌표를 추출한다.

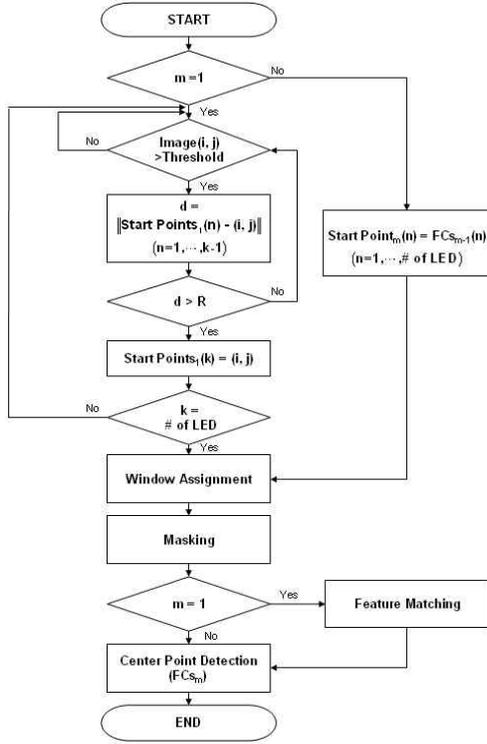


Fig. 2. Feature detection algorithm

### 3.2 3차원 움직임 추정 알고리즘

광학 방식의 헤드 트래커 시스템은 이산시간 비선형 시스템으로 3차원 움직임 추정 알고리즘을 설계하기 위해 확장 칼만 필터를 사용한다. 본 논문에서 구현한 확장 칼만 필터의 모델식은 다음과 같이 선형 시스템 모델식과 비선형 측정 모델식을 사용한다[8].

$$\begin{aligned} \underline{x}_k &= \mathbf{F}_k \underline{x}_{k-1} + \underline{w}_{k-1} \\ \underline{z}_k &= h_k(\underline{x}_k) + \underline{n}_k \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\underline{x}_k$ 는 상태 변수 벡터 (state vector),  $\underline{z}_k$ 는 측정 벡터 (measurement vector),  $\mathbf{F}_k$ 는 상태 천이 행렬 (state transition matrix)을 나타내며,  $h_k(\underline{x}_k)$ 는 측정 모델 (measurement model),  $\underline{w}_k$ 와  $\underline{n}_k$ 는 각각 공정 잡음 (process noise)과 측정 잡음 (measurement noise)를 나타낸다.

확장 칼만 필터의 상태 변수 벡터는 다음과 같이 기준 카메라 좌표계에 대한 머리 좌표계의 위치  $(t_X, t_Y, t_Z)$ , 속도  $(\dot{t}_X, \dot{t}_Y, \dot{t}_Z)$ , 증분각  $(\omega_X, \omega_Y, \omega_Z)$  각각 3개씩 9개의 움직임 변수로 구성한다.

$$\underline{x} = (t_X, t_Y, t_Z, \dot{t}_X, \dot{t}_Y, \dot{t}_Z, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z)^T \quad (2)$$

9개의 상태 변수를 테일러급수 전개를 이용하여 선형 시스템 모델식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} t_{X_k} \\ t_{Y_k} \\ t_{Z_k} \\ \dot{t}_{X_k} \\ \dot{t}_{Y_k} \\ \dot{t}_{Z_k} \\ \omega_{X_k} \\ \omega_{Y_k} \\ \omega_{Z_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{X_{k-1}} + \Delta T \dot{t}_{X_{k-1}} \\ t_{Y_{k-1}} + \Delta T \dot{t}_{Y_{k-1}} \\ t_{Z_{k-1}} + \Delta T \dot{t}_{Z_{k-1}} \\ \dot{t}_{X_{k-1}} \\ \dot{t}_{X_{k-1}} \\ \dot{t}_{X_{k-1}} \\ \omega_{X_{k-1}} \\ \omega_{Y_{k-1}} \\ \omega_{Z_{k-1}} \end{bmatrix} + \underline{w}_{k-1} \quad (3)$$

확장 칼만 필터의 측정치 모델식은 투시도법의 카메라 모델 (perspective camera model)과 3차원 운동 모델 (3D motion model)로 구성되며, 두 카메라 좌표계 (camera frame)사이의 관계식을 사용하여 획득된다. 투시도법의 카메라 모델은 Fig. 3과 같이 특징점이 머리 좌표계 (head frame)에 고정되어 있을 때, 카메라 이미지 평면 (image plane)에 맺힌 특징점의 2차원 좌표를 카메라 좌표계에 대한 3차원 좌표로 나타내기 위해 사용된다.

투시도법의 카메라 모델을 식으로 나타내면 다음과 같다[7].

$$\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_{C_k}} \begin{bmatrix} X_{C_k} \\ Y_{C_k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $f$ 는 초점 거리 (focal length),  $(X_{C_k}, Y_{C_k}, Z_{C_k})$ 는 기준 카메라 좌표계에서 특징점의 3차원 위치 좌표,  $(u_k, v_k)$ 는 카메라 이미지 평면의 X축과 Y축 픽셀좌표를 나타낸다. 실제

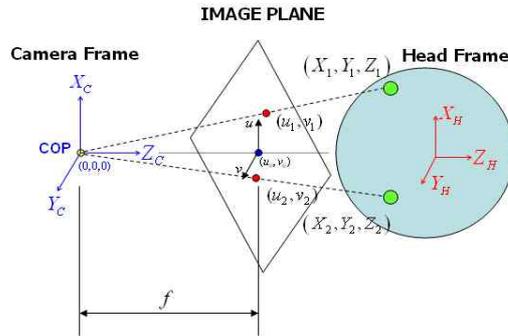


Fig. 3. Perspective camera model

이미지 평면의 좌표  $(u_k, v_k)$ 는 투시도법의 카메라 모델과 일치하지 않기 때문에 렌즈 왜곡을 보상하고 픽셀좌표를 카메라 좌표에 대한 투영좌표 (projected coordinate)로 보정하는 정규화 (normalization) 과정이 필요하다. 본 논문에서는 MATLAB의 Camera Calibration Toolbox를 사용하여 정규화 변수들을 획득하고 정규화 과정을 수행한다.

3차원 운동 모델은 특징점의 3차원 위치 변화로부터 병진 운동과 회전 운동을 추정하는 모델로 다음 식과 같다[7].

$$\begin{bmatrix} X_{C_k} \\ Y_{C_k} \\ Z_{C_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{X_k} \\ t_{Y_k} \\ t_{Z_k} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{q_k} \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $(X_H, Y_H, Z_H)$ 는 머리 좌표계에 대한 특징점의 3차원 위치 좌표,  $\mathbf{R}_{q_k}$ 는 카메라 좌표계에 대한 머리 좌표계의 회전행렬을 나타낸다. 회전행렬은 증분각을 얻기 위해 다음과 같은 증분 쿼터니언 (incremental quaternion)을 사용한다[9].

$$\delta q_k = \left( \sqrt{1 - \epsilon_k}, \frac{\omega_{X_k}}{2}, \frac{\omega_{Y_k}}{2}, \frac{\omega_{Z_k}}{2} \right) \quad (6)$$

여기서  $(\omega_{X_k}, \omega_{Y_k}, \omega_{Z_k})$ 는 머리 좌표계의 증분각을 나타내고  $\epsilon_k$ 는 다음식과 같이 정의된다.

$$\epsilon_k = (\omega_{X_k}^2 + \omega_{Y_k}^2 + \omega_{Z_k}^2) / 4 \quad (7)$$

증분 쿼터니언을 이용한 회전행렬 갱신은 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_{q_k} = \mathbf{R}_{\delta q_k} \mathbf{R}_{q_{k-1}} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{R}_{\delta q_k}$ 은 식(6)의 증분 쿼터니언을 회전행렬로 변환한 것이고  $\mathbf{R}_{q_{k-1}}$ 은 이전 시간의 카메라 좌표계에 대한 머리 좌표계의 회전행렬을 나타낸다.

두 대의 카메라 측정치를 사용하기 위해서는 다른 카메라에서 측정된 머리의 움직임을 기준 카메라 좌표계에 대하여 나타내야 하므로 다음 식과 같은 두 카메라 사이의 관계식을 사용한다[10].

$$\begin{bmatrix} X_{C_k} \\ Y_{C_k} \\ Z_{C_k} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_C \begin{bmatrix} X'_{C_k} \\ Y'_{C_k} \\ Z'_{C_k} \end{bmatrix} + \underline{T}_C \quad (9)$$

여기서  $(X'_{C_k}, Y'_{C_k}, Z'_{C_k})$ 는 다른 카메라 좌표계에

서 특징점의 3차원 위치 좌표를 나타내고  $\mathbf{R}_C$ 와  $\underline{T}_C$ 는 외부 변수 (extrinsic parameter)로 각각 두 카메라 좌표계사이의 회전과 거리를 나타낸다.

위의 식(5)와 식(8) 그리고 식(9)를 이용하여 기준 카메라 좌표계에 대한 머리 좌표계의 움직임 변수를 포함하도록 각각의 카메라 좌표계에 대한 특징점의 3차원 위치 좌표를 나타내면 다음 식(10), (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_{C_k} \\ Y_{C_k} \\ Z_{C_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{X_k} \\ t_{Y_k} \\ t_{Z_k} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{\delta q_k} \mathbf{R}_{q_{k-1}} \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X'_{C_k} \\ Y'_{C_k} \\ Z'_{C_k} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_C^{-1} \left( \begin{bmatrix} t_{X_k} \\ t_{Y_k} \\ t_{Z_k} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{\delta q_k} \mathbf{R}_{q_{k-1}} \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

$$- \mathbf{R}_C^{-1} \underline{T}_C$$

위의 식(10)과 식(11)을 이용하여 구현한 확장 칼만 필터의 비선형 측정치 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{X}_{C_k} \\ \widehat{Y}_{C_k} \\ \widehat{X}'_{C_k} \\ \widehat{Y}'_{C_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{C_k}}{Z_{C_k}} \\ \frac{Y_{C_k}}{Z_{C_k}} \\ \frac{X'_{C_k}}{Z'_{C_k}} \\ \frac{Y'_{C_k}}{Z'_{C_k}} \end{bmatrix} + \mathbf{n}_k \quad (12)$$

여기서  $(\widehat{X}_{C_k}, \widehat{Y}_{C_k})$ 는 정규화 과정을 통해 렌즈의 왜곡이 보상된 투영 좌표를 나타낸다. 측정 잡음은 카메라 보정을 통해 획득한 픽셀 오차 (pixel error)를 분산으로 하는 백색 잡음 (white noise)으로 설정한다[10].

#### IV. 헤드 트래커 시스템 실험 결과

실험실 수준의 헤드 트래커 시스템의 성능 검증을 위해 매우 정밀한 각속도 (0.000125°/s)와 위치 (0.0000625°) 입력을 줄 수 있는 The IDEAL Aerosmith사의 1291BR 레이트 테이블을 사용하였다. 그리고 관성 센서와 회전 성능을 비교하기 위해 Crossbow사의 H6X IMU를 사용하였다.

#### 4.1 자세 정확도 실험 결과

카메라에서 영상 데이터는 15frames/s의 속도로 저장하였으며, 이 데이터로부터 앞에서 설명한 특징점 추출 알고리즘과 3차원 움직임 추정 알고리즘을 통해 머리 좌표계의 각속도 값을 추정하였다. 추정된 머리 좌표계의 각속도 값을 운동이 시작되는 프레임부터 정지하는 프레임까지 적분함으로써 머리의 자세를 계산하였다. 그리고 자세 정확도 실험을 수행하기 위해 레이트 테이블의 각속도와 자세 입력을 달리하여 7가지 경우에 대해 5번씩 실험하였다. Table 1은 각 경우에 대한 광학 방식과 관성 방식의 RMS오차를 나타낸 것이다.

Table 1. Result of the rotational accuracy

Case			RMS Error[°]		
No.	Rate [°/s]	Angle [°]	Optical		Inertial
			One	Stereo	
1	5	5	0.0939	0.0934	0.0415
2	10	10	0.1990	0.1953	0.0955
3	20	20	0.6982	0.2318	0.3485
4	50	50	2.7445	0.1101	0.4566
5	50	100	0.2021	0.2556	0.9401
6	50	150	5.4541	0.1842	1.3783
7	50	200	0.3070	0.1049	2.1220

자세 정확도 실험 결과 광학 방식의 헤드 트랙커는 한 대의 카메라를 사용할 경우 5° 이상의 RMS오차를 가지며, 두 대의 카메라를 사용할 경우 0.3°보다 작은 RMS오차를 가지고 있었다. 이는 두 대의 카메라를 사용함으로써 측정치가 증가하고 두 카메라 사이의 제약 조건을 사용하였기 때문에 한 대의 카메라를 사용한 결과보다 더 좋은 성능을 나타냄을 볼 수 있었다. 또한, Table 1의 4번부터 7번의 경우와 같이 일정한 각속도(50°/s)로 시간을 늘려 회전각을 증가하였을 때 광학 방식의 헤드 트랙커는 일정한 성능을 나타내지만 관성 방식의 경우 회전각이 증가할수록 오차가 증가함을 알 수 있었다. 이는 일정한 각속도에서 운동 시간이 증가함에 따라 적분 시간이 증가하여 생기는 표류오차로 인해 관성 방식의 RMS오차가 증가하였기 때문이다.

#### 4.2 회전 운동 선형성

회전 운동에 대한 선형성 실험은 10초간 정지 후 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5°/s의 5가지 각속도를 일

정하게 입력하면서 50초 동안 수행하였다. 회전 구간 동안 저장된 데이터는 30초 동안 적분하여 자세로 변환되며 그 결과를 분석하여 선형성 오차(linearity error)와 환산계수오차(scale factor error)를 살펴보았다. Table 2는 광학 방식과 관성 방식의 선형성 오차와 환산계수오차를 나타낸 것이다.

Table 2. Linearity error & scale factor error

	Linearity Error	Scale Factor Error
Optical	< 8%	< 1%
Inertial	< 3%	< 3%

선형성 실험 결과 본 논문에서 설계한 광학 방식 헤드 트랙커는 8%이내의 선형성 오차와 1%이내의 환산 계수 오차를 가지고 있었다. Crossbow IMU H6X의 경우 3%이내의 선형성 오차와 환산 계수오차를 가지고 있었다. 관성 방식의 경우 직접 회전 각속도를 측정하기 때문에 선형성 오차가 광학 방식에 비해 우수하였지만 관성 센서의 비선형적인 특성 때문에 환산계수오차는 광학 방식이 더 우수하였다.

#### 4.3 병진 운동에 대한 정확도 실험 결과

정확한 병진 운동 실험을 위해 적외선 발광 다이오드 기관을 레이트 테이블 회전축에서 50, 100, 150mm 떨어진 지점에 고정 시킨 뒤 180° 회전하였다. 이때 광학 방식의 헤드 트랙커 알고리즘을 통해 추정된 운동 후의 위치와 초기 위치와의 차를 구한 뒤 초기 회전행렬 값을 곱하여 물체 좌표계의 위치 변화량을 계산하였다. Table 3은 X축 방향으로 100, 200, 300mm로 5번씩 병진 운동하였을 때 광학 방식의 RMS오차를 나타낸 것이다.

Table 3. Result of the translational accuracy

No.	Distance[mm]	RMS Error
1	100	0.7483
2	200	4.1937
3	300	5.5620

병진 운동 실험 결과 X축과 Y축 방향으로는 최대 7mm의 오차가 발생하고 Z축 방향으로는 최대 19mm의 오차가 발생하였다. 이는 Z축의 감도가 X축과 Y축의 감도보다 낮기 때문이다. 전체 병진 운동에 대한 RMS오차는 6mm이하의 결과를 나타냈다.

## V. 결 론

본 논문에서는 비행기 조종석에 적합한 outside-in 방식의 헤드 트래커 시스템 설계를 위해 구성 요소인 카메라, 특징점, 영상 편집 보드에 대한 설계 파라미터를 분석하고 이를 바탕으로 실험실 수준의 헤드 트래커 시스템을 구성하였다. 그리고 구성된 실험실 수준의 광학 방식 헤드 트래커 시스템에 적용하기 위하여 특징점 추출 알고리즘과 3차원 움직임 추정 알고리즘을 설계하고 이를 구현하였다. 특히 영상 프레임 사이의 특징점 위치 변화로부터 3차원 움직임을 추정하기 위해 투시 도법의 카메라 모델, 3차원 움직임 모델, 두 카메라 사이의 관계식을 이용하여 두 대의 카메라 측정치 값을 사용하는 확장 칼만 필터를 설계하였다.

또한, 설계된 실험실 수준의 광학 방식 헤드 트래커를 정밀한 자세와 각속도 입력을 줄 수 있는 레이저 테이블을 사용하여 관성 센서와 함께 성능 시험을 수행하였다. 그 결과 본 논문에서 설계한 실험실 수준의 광학 방식 헤드 트래커는 0.3°이하의 자세 RMS오차와 6mm이하의 위치 RMS오차를 나타냄으로써 저가의 장비를 사용하여 우수한 성능의 헤드 트래커 시스템을 설계할 수 있음을 보였다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대학교 비행체특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

## 참고문헌

1) Youngblut, C., Johnson, R. E., Nash, S. H., Wienclaw, R. A., and Will, C. A., "Review of Virtual Environment Interface Technology",

Institute for Defense Analysis, Final, March 1996, Paper P-3186

2) Azuma, R. T., "A Survey of Augmented Reality", *Teleoperators and Virtual Environments* 6, 4 (August 1997), pp. 355-385

3) Foxlin, E., Altshuler, Y., Naimark, L. and Harrington, M., InterSense, Inc., "FlightTracker: A Novel Optical/Inertial Tracker for Cockpit Enhanced Vision", *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*, November 2-5, 2004, Washington, D.C.

4) Foxlin, E., *Motion Tracking Requirements and Technologies*, ed. Stanney, Lawrence Erlbaum Associates, 2002.

5) Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., *Digital Image Processing*, Prentice Hall, c2002.

6) Madritsch, F. H. and Gervautz, M., "CCD-Camera Based Optical Beacon Tracking for Virtual and Augmented Reality", *Computer Graphics forum*, Vol. 15, No. 3, 207-216, 1996.

7) Faugeras, O. and Luong, Q. T., *The Geometry of Multiple Images*, The MIT Press, 2001.

8) Gelb, A., *Applied optimal estimation*, The MIT Press, 1992.

9) Azarbayejani, A. and Pentland, A. P., "Recursive Estimation of Motion, Structure, and Focal Length", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 6, June 1995.

10) Lin, C., William, A. H. and Tyrone, V., "3-D Motion and Structure Estimation Using Inertial Sensors and Computer Vision for Augmented Reality", *Teleoperators and Virtual Environments*, Volume 11, Issue 5, October 2002, pp. 474-492.