

재귀 최소자승법을 이용한 천체 망원경의 추적 오차 보정법

Correction Method of Tracking Error for Astronomical Telescope Using Recursive Least Square Method

곽 동 훈, 김 태 한, 이 영 삼*
(Dong-Hoon Kwak¹, Tae-Han Kim¹, and Young-Sam Lee¹)
¹Inha University

Abstract: In this paper, we propose a correction method for astronomical telescope using recursive least square method. There are two ways to move a telescope : equatorial operation and altazimuth operation. We must align polar axis of a equatorial telescope with the north celestial pole and adjust the horizontal axis of a altazimuth telescope exactly to match the celestial coordinate system with the telescope coordinate system. This process needs time and expertise. We can skip existing process and correct a tracking error easily by deriving the relationship of the celestial coordinate system and the telescope coordinate system using the proposed correction method. We obtain the coordinate of a celestial body in the celestial coordinate system and the telescope coordinate system and derive a transformation matrix through the obtained coordinate. We use recursive least square method to estimate the unknown parameters of a transformation matrix. Finally, we implement a telescope control system using a microprocessor and verify the performance of the correction method. Through an experiment, we show the validity of the proposed correction method.

Keywords: astronomical telescope, correction method, recursive least square method

I. 서론

천체 망원경은 지구 외의 천체를 관측하는 장비로서 행성 관측, 항성 관측, 소행성 탐사 등에 이용된다. 대부분의 천체는 낮은 광도를 가지고 있기 때문에, 안시 관측으로는 천체의 변화를 관측하기 어렵다. 따라서, 천체의 관측은 장시간의 노출이 가능한 사진 촬영이 주를 이룬다. 모든 천체는 지구 자전축을 중심으로 24시간 동안 1회전 하므로, 사진 촬영 시 천체 망원경은 노출 시간 동안 관측 대상을 추적해야 한다.

천체 망원경을 구동하는 방식에는 적도의식과 경위대식이 있다. 적도의식 망원경은 적도 좌표계를 이용하며, 천구상의 각 천체의 적위와 적경을 따라 구동된다. 경위대식 망원경은 지평 좌표계를 이용하며, 관측자의 위치에 따른 각 천체의 고도와 방위각을 따라 구동된다[1]. 추적 정밀도를 높이기 위해서 두 가지 방식 모두, 관측을 시작하기 전에 관측 시의 천체 좌표계와 망원경 좌표계를 일치시켜야 하는 보정 작업을 수행해야 한다. 현재 시중에 판매되고 있는 천체 망원경은 보정을 위해 지자기 센서와 가속도 센서, 극축 망원경을 별도로 제공한다.

기존의 논문에서는 보정 과정이 정확하게 수행 되었다는 가정하에, 정밀한 천체 추적을 위한 모터 제어를 수행하였다 [2,3]. 또는, 천체 망원경의 모델링[4] 및 자동화[5-9]를 수행하여 추적 정밀도를 향상시켰다. 그러나 대중적으로 보급된 중소형 망원경의 경우, 구동을 위한 모터와 각도 정보를 얻기

위한 엔코더 정도만 부착되어 있을 뿐, 보정 작업을 수행하기 위한 장비는 별도로 구매해야 하거나 아예 제공되지 않는 경우가 많다. 따라서 중저가형 망원경에 기존의 논문에서 제시한 방법을 적용하는 것은 적합하지 않다.

본 논문에서는 기존의 보정 장비 없이, 초기 3번의 관측을 수행하여 천체 좌표계와 망원경 좌표계 사이의 관계를 나타내는 변환행렬을 유도하고 추적 도중 오차 발생 시, 재귀 최소자승법을 이용하여, 변환행렬을 갱신하는 보정법을 제안한다. 또한 마이크로 프로세서를 이용한 망원경 제어시스템을 구현하고, 천체 사진촬영을 수행하여 제안된 보정법의 성능을 검증한다. 제안된 보정법은 별도의 장비와 복잡한 정렬 과정이 생략된다. 따라서, 일반 중소형 망원경을 소유한 비숙련자 역시 쉽게 천체 관측을 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한, 제안된 보정법에서는 망원경 구동 방식에 관계없이, 망원경 초기 지향 위치에 좌표계를 설정하기 때문에, 적도의식 망원경 한 종류에 국한되지 않고, 경위대식 망원경, 포크식 망원경 등 다양한 천체 망원경 구동방식에 적용 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 추적오차의 원인을 정의하고 추적오차를 보정하기 위한 변환행렬을 소개한다. III 장에서는 재귀 최소자승법을 이용하여 변환행렬을 유도 및 갱신하는 보정법을 제안한다. IV 장에서는 시뮬레이션을 수행하여 1차적으로 제안된 보정법의 성능을 검증하고, 모터와 엔코더, 마이크로 프로세서를 이용하여 천체 망원경 제어 시스템을 구현 및 실험을 수행한다. 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 추적오차의 원인 및 보정

천체 망원경의 추적오차는 천체 좌표계와 망원경 좌표계가 서로 일치하지 않기 때문에 발생한다. 본 절에서는 이러한 추적오차의 발생 원인에 대하여 기술하고, 추적오차를 보

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 9., 수정: 2011. 12. 25., 채택확정: 2012. 1. 17.

곽동훈, 김태한, 이영삼: 인하대학교 로봇공학과

(souliar@naver.com/xogks0918@nate.com/lys@inha.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력 과정 지원사업과 로봇 특성화 대학원 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C6150-1102-0001, C7000-1001-0009).

정하기 위한 변환행렬을 제시한다.

1. 추적오차의 원인

천체는 그림 1과 같이 구면 좌표계로 나타낼 수 있다. z축은 지구 자전축과 일치하며, x, y면은 지구의 적도면과 일치한다. 현대 천문학에서 모든 천체의 좌표는 동일한 ρ 성분과 고유적 적경 ϕ, 적위 θ로 표시되며 본 논문에서는 이를 천체 좌표계로 명칭한다. 천체 좌표계에서 적경은 z축을 중심으로 시계방향으로 증가하며, 이것은 시간각 시, 분, 초로 측정한다. 1시는 15도, 1분은 15/60도, 1초는 15/3600도에 해당한다. 적위는 x, y평면을 기준으로 위쪽을 양의 방향으로 삼고 아래쪽을 음의 방향으로 삼으며, 단위는 도이다.

모든 천체의 적경, 적위는 미리 정의되어 있으며, 지구의 자전으로 인해, 그림 2와 같이 z축을 중심으로 반시계 방향으로 회전한다. 따라서 적경 ϕ는 관측 시작 시점을 기준으로 1시간에 15도씩 그 값이 감소하게 된다. 그림 2의 f(t)는 자전으로 인한 적경의 감소를 시간의 함수로 표현한 것으로 다음과 같이 나타내어진다.

$$f(t) = 15 \times \frac{1}{3600} \times t.$$

시간 t의 단위가 초이기 때문에, 15도를 1시간에 해당하는 3600초로 나누었다.

적경, 적위로 주어진 천체의 구면좌표를 직교좌표로 변환하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= \rho \cos \phi_{i,t} \cos \theta_{i,t} \\ y_i &= \rho \sin \phi_{i,t} \cos \theta_{i,t} \\ z_i &= \rho \sin \theta_{i,t}. \end{aligned} \tag{1}$$

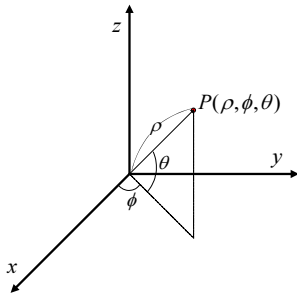


그림 1. 적위와 적경 개념도.

Fig. 1. Conceptual diagram for declination and right ascension.

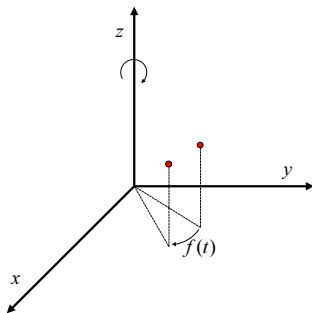
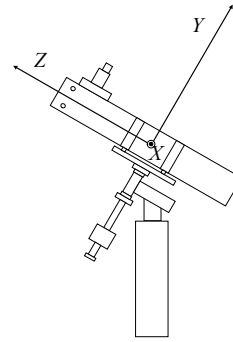
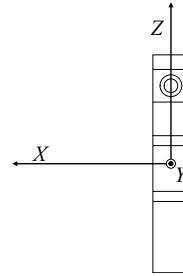


그림 2. 천체의 회전.

Fig. 2. Rotation of a celestial body.



(a) A side view of coordinate system of a telescope.



(b) A top view of coordinate system of a telescope.

그림 3. 망원경 좌표계.

Fig. 3. Coordinate system of a telescope.

여기서 i 는 i 번째 천체에 대한 것을 나타내는 첨자이며 $i=1,2,3,\dots$ 이고 t 는 관측 시작 시점을 기준으로 흐르는 시간을 나타내며 $t \geq 0$ 이다. ρ 는 임의의 상수로 정의하며 모든 천체에 대해 동일한 값을 적용한다. 관측 시작 시점을 기준으로 시간에 따른 천체의 적위 $\theta_{i,t}$ 는 지구 자전의 영향을 받지 않으므로 각 천체 고유의 적위 θ_i 에서 값의 변화가 없다. $\phi_{i,t}$ 는 시간각 시, 분, 초로 주어진 천체의 적경 ϕ 를 도 단위의 각도로 변환한 것으로 아래와 같이 표현되며

$$\phi_{i,t} = (\phi_{i,hour} \times 15) + (\phi_{i,min} \times \frac{15}{60}) + (\phi_{i,sec} \times \frac{15}{3600}) - f(t),$$

지구 자전의 영향으로 인해 시간의 함수 $f(t)$ 만큼 감소한다. $f(t)$ 는 관측 시작 시간을 시점으로 하여, 반시계 방향으로 회전하는 천체의 회전 각도를 구한 것이다.

그림 3은 망원경 좌표계를 나타낸 것이다. 망원경 좌표계는 망원경 기동 시, 망원경의 초기 지향 방향에 설정된다.

망원경의 부정확한 고도 조절과 지표면에 대한 수평축 기울어짐, 극축 미정렬 등의 이유로 천체 좌표계와 망원경 좌표계는 서로 일치하지 않는다. 두 좌표계의 일치하지 않음으로 인해, 천체 좌표계에서 정의된 임의의 천체의 좌표를 정확하게 지향 및 추적하여도, 망원경의 시야에 천체가 도입되지 않는 추적오차 문제가 발생하게 된다. 일치하지 않는 천체 좌표계와 망원경 좌표계 사이의 관계는 Yaw, Roll, Pitch의 회전 변환 관계로 표현 가능하다[14].

2. 보정: 변환행렬

천체의 좌표는 망원경 좌표계의 경우, (X_i, Y_i, Z_i) 로 표기하고 천체 좌표계에서는 (x_i, y_i, z_i) 로 표기한다. 동일한 천체

에 대하여, 천체 좌표계 상의 좌표 (x_i, y_i, z_i) 는 식 (1)을 이용하여 계산하고, 망원경 좌표계 상의 좌표 (X_i, Y_i, Z_i) 는 관측을 수행하여 측정하거나 식 (2)를 통해 계산한다.

천체 좌표계 상의 천체 좌표 (x_i, y_i, z_i) 를 망원경 좌표계 상의 좌표 (X_i, Y_i, Z_i) 로 변환할 수 있다면, 망원경의 해당 천체에 대한 지향 및 추적이 가능하므로 추적오차가 발생하지 않는다. 따라서, 보정은 천체의 천체 좌표계 상의 좌표 (x_i, y_i, z_i) 와 망원경 좌표계 상의 좌표 (X_i, Y_i, Z_i) 사이의 Yaw, Roll, Pitch 회전관계를 나타내는 변환행렬 H 를 구하고, 식 (2)와 같이 구한 변환행렬 H 를 이용하여 (x_i, y_i, z_i) 를 (X_i, Y_i, Z_i) 로 변환함으로써 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

추적오차는 식 (2)를 통해 구한 (X_i, Y_i, Z_i) 를 지향했을 때, (X_i, Y_i, Z_i) 와 실제 망원경에서 관측된 좌표 $(X_{m,i}, Y_{m,i}, Z_{m,i})$ 와의 차로 다음과 같이 표현된다.

$$E_i = \begin{bmatrix} X_{m,i} \\ Y_{m,i} \\ Z_{m,i} \end{bmatrix} - H \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}.$$

여기서 H 는

$$H = R_{z,\alpha} \cdot R_{y,\beta} \cdot R_{x,\psi} = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & -s_\alpha c_\beta + c_\alpha s_\beta s_\psi & s_\alpha s_\beta + c_\alpha s_\beta c_\psi \\ s_\alpha c_\beta & c_\alpha c_\beta + s_\alpha s_\beta s_\psi & -c_\alpha s_\beta + s_\alpha s_\beta c_\psi \\ -s_\beta & c_\beta s_\psi & c_\beta c_\psi \end{bmatrix},$$

이고, $R_{z,\alpha}$, $R_{y,\beta}$, $R_{x,\psi}$ 는 다음과 같다.

$$R_{z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$R_{x,\psi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}.$$

그리고 $c_\alpha = \cos \alpha$, $s_\alpha = \sin \alpha$ 를 의미한다.

식 (2)의 변환행렬 H 는 두 좌표계 사이의 Yaw, Roll, Pitch 회전관계를 나타내는 $R_{z,\alpha}$, $R_{y,\beta}$, $R_{x,\psi}$ 로 이루어져 있으며, α , β , ψ 는 Roll각, Pitch각, Yaw각을 의미한다. 변환행렬 H 를 참값에 가깝게 추정할 수 있다면, 추정된 변환행렬 H 와 식 (1)을 통해 계산된 천체 좌표계에서의 좌표 (x_i, y_i, z_i) 를 가지고, 식 (2)와 같이 망원경 좌표계에서의 좌표 (X_i, Y_i, Z_i) 를 계산할 수 있으므로, 추적오차를 보정 할 수 있다.

III. 보정법

본 절에서는 재귀 최소자승법을 이용하여, 변환행렬 H 의 미지계수를 유도 및 갱신하는 보정법을 제안한다. 변환행렬

H 는 다음과 같이 9개의 미지계수 $h_{l,m}$, $1 \leq l, m \leq 3$ 으로 이루어져 있다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}.$$

미지계수를 추정하기 위하여 임의의 천체에 대한 관측을 수행하면 식 (2)를 통하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$B = H \cdot A. \quad (3)$$

여기서 A 와 B 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & \cdots & Z_n \end{bmatrix},$$

$n \geq 3$

(x_i, y_i, z_i) 로 이루어진 행렬을 A 로 정의하고, (X_i, Y_i, Z_i) 로 이루어진 행렬을 B 로 정의한다. 변환행렬 H 를 추정하기 위해 식 (3)에 대하여 최소자승법을 다음과 같은 형태로 적용한다.

$$H = BA^T(AA^T)^{-1}. \quad (4)$$

하지만 식 (4)의 방법은 관측을 수행할 때마다 데이터를 저장해야 하기 때문에, 내부 리소스가 작은 임베디드 환경에서 처리하는 것은 부적합하다. 그러므로, 3 번의 관측을 통해 얻는 데이터 (x_i, y_i, z_i) , (X_i, Y_i, Z_i) $i=1,2,3$ 을 아래와 같이 정리 하고,

$$A_0 = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix}$$

최소자승법을 이용하여 다음과 같은 형태로 미지계수를 추정한다.

$$G_0 = A_0 A_0^T, \quad H_0 = B_0 A_0^T G_0^{-1}. \quad (5)$$

다음 관측 수행 시, 입력되는 새로운 데이터 (x_i, y_i, z_i) , (X_i, Y_i, Z_i) $i=4, 5, 6, \dots$ 에 대해서는 아래와 같이 정리한 뒤,

$$A_{k+1} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad B_{k+1} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

재귀 최소자승법[10]을 이용하여 다음과 같이 미지계수를 추정한다.

$$G_{k+1} = G_k + A_{k+1} A_{k+1}^T, \quad H_{k+1} = H_k + (B_{k+1} - H_k A_{k+1}) A_{k+1}^T G_{k+1}^{-1}. \quad (7)$$

$k=0,1,2, \dots \quad i=3,4,5, \dots$

식 (5)는 3번의 관측 후, 최소자승법을 이용하여 미지계수

를 추정할 것이다. 추정된 미지계수 $h_{i,m}$, $1 \leq i, m \leq 3$ 으로 구성된 변환행렬 H_0 를 이용하여 추적을 시작하고, 추적 도중 오차가 발생하면 4 번째 관측을 수행한 후, 식 (5)를 통해 계산된 G_0 와 변환행렬 H_0 를 식 (6)의 새로운 데이터와 함께 식 (7)의 재귀 최소자승법 알고리즘의 초기값으로 넘겨준다. 식 (7)에서는 재귀 최소자승법 알고리즘을 수행하여 미지계수 $h_{i,m}$, $1 \leq i, m \leq 3$ 를 갱신한다. $k=0,1,2,\dots$ 는 재귀 최소자승법을 이용하여 갱신한 횟수를 의미한다.

재귀 최소자승법을 이용하여 추정된 변환행렬 H 는 회전행렬 3개의 곱으로 이루어져 있으므로 직교성을 만족해야 한다. 하지만 측정값 (X_i, Y_i, Z_i) 에 노이즈가 추가되어 있기 때문에 추정된 변환행렬 H 는 직교성을 만족하지 않는다. 직교성을 보정하기 위해 Camera Calibration [12,13,15,16]에 사용되는 방법을 이용하여 H 를

$$H = USV^T,$$

로 특이치 분해한 뒤, 직교성이 보정된 행렬 \hat{H} 을 다음과 같이 구한다.

$$\hat{H} = UV^T.$$

천체 망원경의 추적오차 보정은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 먼저, 재귀 최소자승법을 이용하여 변환행렬 H 를 갱신하고, 갱신한 변환행렬 H 에 대하여 특이치 분해를 수행한다. 특이치 분해를 통해 직교성이 보정된 변환행렬 \hat{H} 를 식 (2)에 적용하여 추적오차를 보정한다.

IV. 실험 환경 구축 및 실험 결과

제안된 보정법의 성능을 검증하기 위해 실제 실험 환경을 구축 전, 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해, 제안된 보정법을 적용하여 추적오차가 보정되는 것을 확인한 후, 실험 환경을 구축하고 실험을 수행하였다.

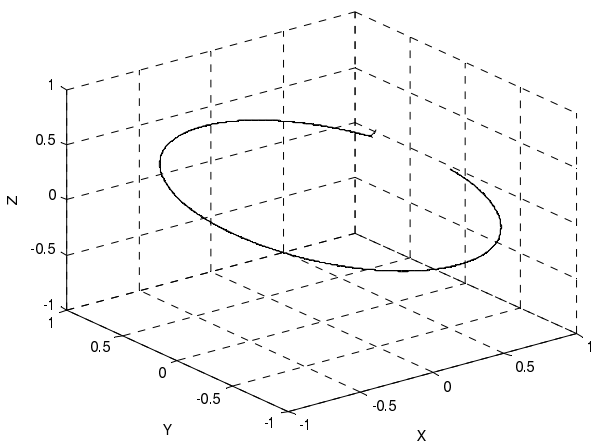


그림 4. 추적 오차 시뮬레이션 (점선: 변환행렬 \hat{H} 을 통해 찾아낸 천체의 좌표, 실선: 실제 천체의 좌표).

Fig. 4. Tracking error simulation (dotted line: coordinate of a celestial body using \hat{H} matrix, solid line: coordinate of a celestial body).

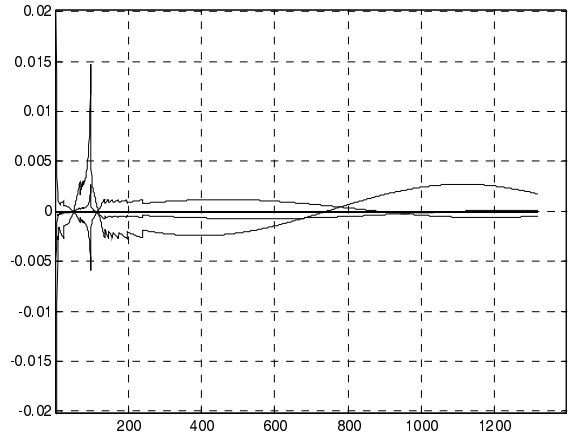


그림 5. 오차 그래프.

Fig. 5. Error graph.

1. 시뮬레이션

관측 시, 백색잡음 발생을 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 오차 범위를 ± 0.01 도로 주고, 범위를 벗어난 경우 보정을 수행하였다. 그림 4는 제안된 보정법을 통해 유도된 변환행렬 \hat{H} 을 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 변환행렬 \hat{H} 을 통해 찾아낸 천체의 좌표(점선)가 실제 천체의 좌표(실선)에 수렴해가는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 X, Y, Z 축 오차를 나타낸 것으로 오차 발생시 \hat{H} 을 갱신하여 오차가 보정됨을 알 수 있다.

시뮬레이션을 수행하며 사용된 실제 변환행렬 H_{true} 와 보정을 수행하여 최종적으로 구한 변환행렬 \hat{H} 은 다음과 같다.

$$H_{true} = \begin{bmatrix} 0.9695 & -0.1230 & 0.2118 \\ 0.1710 & 0.9591 & -0.2255 \\ -0.1754 & 0.2548 & 0.9510 \end{bmatrix},$$

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} 0.9700 & -0.1230 & 0.2098 \\ 0.1701 & 0.9597 & -0.2238 \\ -0.1738 & 0.2528 & 0.9518 \end{bmatrix}.$$

\hat{H} 은 총 9번의 보정을 수행하여 추정되었으며 $\hat{H} - H_{true}$ 의 Frobenius norm은 0.0039로 매우 작다. 따라서, 제안된 보정법이 유효함을 알 수 있다.

2. 하드웨어 구성

수동으로 조종하는 적도의식 천체 망원경을 개조하여 망원경 제어 시스템을 구현하였다. 하드웨어는 구동부와 제어부로 나누어 지며 각 구성은 다음과 같다.

- 구동부: 수동 적도의에 DC 모터와 엔코더를 장착하였다. 그림 6은 DC 모터와 엔코더를 장착하기 위해 설계한 기구물의 개념도와 사진이다. 개조한 적도의의 탑재 중량에 따른 모터 출력은 다음과 같다. 적경 모터의 경우, 출력은 약 7kg-cm이 요구되며, 적위 모터의 경우는 약 4kg-cm이 요구된다. 요구되는 토크를 기준으로 적절한 회전수를 가진 모터를 선정하였다. 엔코더의 경우 천체의 회전속도를 고려하여 선정하였다. 천체의 회전 속도는 초당 15초각(=15/3600도)이므로 추적 시, 적도의의 회전속도는 웜기어의 감속비 144를 곱하

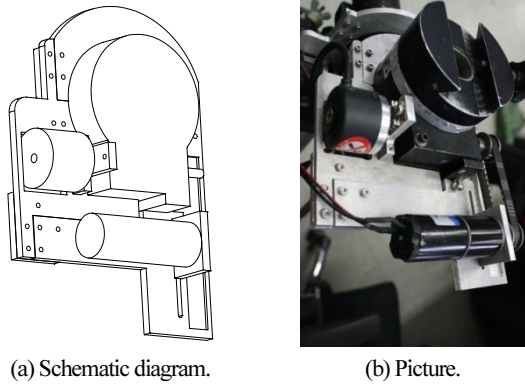


그림 6. 망원경 기구부.
Fig. 6. A telescope equipment.

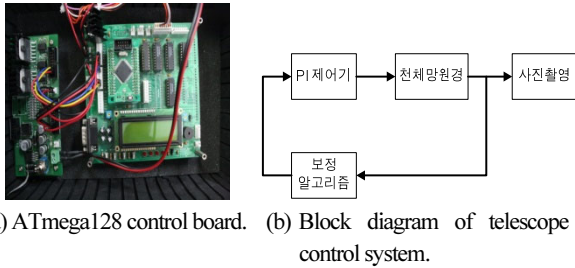


그림 7. 망원경 제어부.
Fig. 7. A telescope control part.

여 초당 0.6도가 된다. 따라서 필요한 엔코더 분해능은 $600(=360/0.6)\text{pulse/rev}$ 이다. 정밀한 추적을 위해, 1000pulse/rev 제품을 선정하였다.

- 제어부: AVR ATmega128(16Mhz-8bit) [11]을 사용하여 모터제어와 추적오차 보정을 수행하였다. 그림 7(a)는 사용된 ATmega128 제어보드이다. 제어보드에는 모터제어를 위한 PI 제어기와 보정법 알고리즘이 탑재되어 있고, 130개의 천체 위치 데이터가 저장되어 있다. 제어보드는 구동부와 결합되어 망원경 제어 시스템을 구성한다. 그림 7(b)는 전체적인 망원경 제어시스템 개념도이다. 관측 시작 후, 특정 천체를 지향하면 보정 알고리즘으로부터 대상 천체에 대한 현 시점의 천체 좌표계상의 좌표를 계산하고, 망원경 좌표계상의 좌표를 엔코더 정보를 통해 입력 받는다. 3번의 수동 지향 후, 변환행렬 \hat{H} 을 생성하고 자동 추적을 시작한다. 오차 발생 시, 재귀 최소자승법을 이용하여 추적오차를 보정한다.

3. 소프트웨어 구성

그림 8은 마이크로 프로세서에 탑재된 프로그램의 흐름도이다. 초기에 수동으로 3번의 관측을 수행한 뒤 제안된 보정법을 통해 변환행렬을 생성한다. 변환행렬을 이용하여 추적을 시작하고 가이드 스크프를 통해 추적 오차 발생여부를 확인한다. 관측 도중 가이드 스크프 중심에서 천체가 이탈하여 추적 오차가 발생하면, 추적중인 대상을 가이드 스크프 중심에 오도록 조작한 후, 새로운 데이터를 취득하여 변환행렬을 갱신하고 다시 추적한다. 또는 새로운 지시대상을 선택하여 데이터를 취득 후, 갱신된 변환행렬을 이용하여 추적을 수행한다.

4. 실험 결과

북쪽 지향과 고도 조절 및 수평 정렬, 극축 정렬 과정 없

이 실험을 수행하였다. 그림 9는 제안된 보정법을 이용한 추적 오차 보정 후, 10초 노출을 주고 직녀성을 촬영한 사진이다. 그림 9(a)는 3번 보정 후, 촬영한 사진이고 그림 9(b)는 5번 보정 후, 촬영한 사진이다. 별도의 장비 및 정렬 과정 없이 모두 5분각(1/12도) 이내로 자동 도입 및 추적이 가능하였다. 그림 10은 사진의 전체 픽셀 안에서 빛의 분포를 보여주는 그래프이다. 그림 10(a)와 그림 10(b)를 비교해 보면, 보정 횟수가 많아 질 수록 빛의 분포가 넓지 않고 한 곳에 집중됨을 볼 수 있다. 또 하나의 비교할 수 있는 지표로서 이심률을 적용하면 그림 10(a)의 이심률은 0.9539이고 그림 10(b)의 이심률은 0.3846으로 보정횟수가 많을수록 원에 가까움을 알 수 있다.

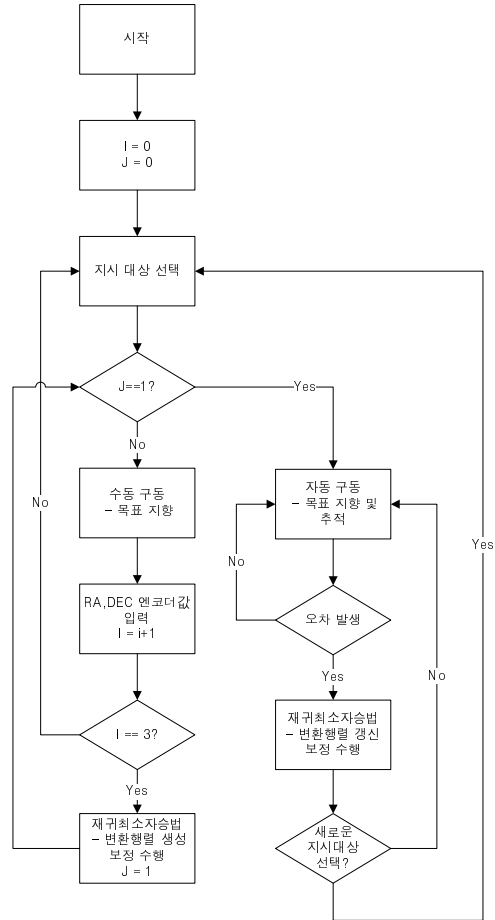
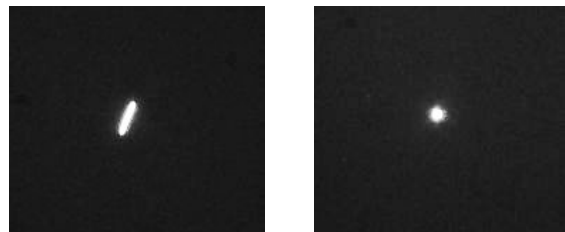


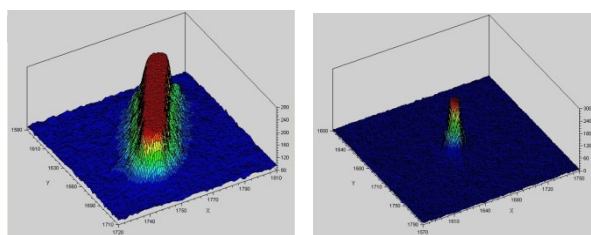
그림 8. 소프트웨어 흐름도.
Fig. 8. Flow chart of software.



(a) A picture taken after three (b) A picture taken after five times correct errors. times correct errors.

그림 9. 보정법을 이용해 촬영한 천체 사진.

Fig. 9. Pictures of celestial body using a correction method.



(a) A picture taken after three times correct errors. (b) A picture taken after five times correct errors.

그림 10. 천체사진의 빛의 분포 그래프.

Fig. 10. Light distribution graphs of celestial body pictures.

V. 결론

본 논문에서는 초기 정렬 과정과 별도의 장비 없이 관측 수행만으로 목표 천체를 지향 및 추적할 수 있는 보정법을 제안하였다. 먼저, 추적오차의 원인을 정의하였고 이를 보정하기 위한 변환행렬을 제시하였다. 변환행렬을 유도하기 위해, 재귀 최소자승법을 적용하였고, 시뮬레이션을 수행하여 제안된 보정법을 통한 추적오차의 개선 여부를 확인하였다. 실제 실험을 수행하기 위해, 천체 망원경 제어 시스템을 구현 하였고, 사진 촬영을 수행하여 제안된 보정법의 성능을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 추적 오차 보정법을 이용하면 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 관측 준비에 소요되는 시간이 단축된다. 실제 실험에서 보정을 마친 후, 사진 촬영 시작까지 소요된 시간은 5분 이내였다. 이는 기존의 관측 숙련자가 정렬과정을 수행하는 평균시간 10분의 절반 정도에 불과하다. 둘째, 별도의 장비가 필요하지 않기 때문에, 관측에 드는 비용을 낮출 수 있으며, 복잡한 정렬 과정이 생략되므로, 비숙련자의 원활한 천체 관측이 가능하다. 셋째, 망원경 구동 방식에 관계없이 망원경의 초기 지향 위치에 좌표계를 설정하고 천체의 위치를 계산하기 때문에 망원경 제어 시스템의 프로그램은 제안된 보정법이 적용된 망원경의 구동 방식에 맞게 계산된 천체의 좌표를 지향하면 된다. 그러므로 적도의식 망원경외에 경위대식 망원경, 포크식 망원경 등 다양한 망원경 구동 방식에 적용 가능하다.

참고문헌

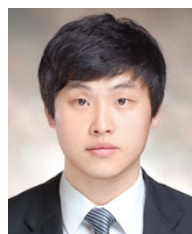
[1] D. Scott Birney, *Observational Astronomy*, Cambridge University Press, 1991.
 [2] Y. Yang, N. Rees, and T. Chuter, "Reduction of encoder measurement errors in UKIRT telescope control system using a Kalman filter," *IEEE Trans. of Control Systems Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 149-157, Jan. 2002.
 [3] W. S. Jeong, "Development of control softwares for improvement of tracking efficiency of the 16" telescope of seoul national university observatory," *Publications of The Korean Astronomical Society (in Korean)*, vol. 14, no. 1, pp. 47-56, Sep. 1999.
 [4] T. Erm and S. Sandrock, "Adaptive correction of periodic errors improves telescope performance," *Proc. 2005 American Control Conference*, vol. 6, pp. 3776-3777, Jun. 2005.
 [5] Y. W. Kang, "Automation of astronomical telescope:

development of techniques, equipments and softwares for remote control of telescope," *Publications of The Korean Astronomical Society (in Korean)*, vol. 11, no. 1, pp. 57-73, Jul. 1996.
 [6] H. S. Kim, "Development of remote control system for KNUO 16" reflector telescope," *Jour. Korean Earth Science Society (in Korean)*, vol. 24, no. 5, pp. 456-466, Aug. 2003.
 [7] I. W. Han, "Development of a telescope control system, MS-TCS," *Publications of The Korean Astronomical Society (in Korean)*, vol. 13, no. 1, pp. 85-98, Dec. 1998.
 [8] B. S. Mun, "Development of the software for 30inch telescope control system at KHAO," *Publications of The Korean Astronomical Society (in Korean)*, vol. 21, no. 2, pp. 81-86, Dec. 2006.
 [9] J. H. Lee, "Automatic control of equatorial mount using a CCD camera," *Journal of the Institute of Industrial technology (in Korean)*, vol. 13, pp. 97-102, 2005.
 [10] Edwin K. P. Chong, *An Introduction to Optimization 3rd Ed.*, Wiley-Interscience, 2008.
 [11] Atmel Corporation 2009, ATmega128A Datasheet
 [12] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 4, pp. 376-380, Apr. 1991.
 [13] S. Umeyama, "Least-square estimation of transformation parameters between two point patterns," *Microsoft Research Technical Report MSR-TR-98-71*, Dec. 1998.
 [14] M. D. Shuster and S. D. Oh, "Three-axis attitude determination from vector observations," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 4, no. 1, pp. 70-77, Jan. 1981.
 [15] H. Lim, "Indoor single camera SLAM using fiducial markers," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 4, pp. 353-364, Apr. 2009.
 [16] S. J. Lim, "Tip position control of a robot manipulator using visual markers," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 9, pp. 883-890, Sep. 2010.



곽 동 훈

2009년 인하대학교 전기공학부 졸업. 2010년~현재 인하대학교 대학원 로봇공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 비선형제어, SLAM.



김 태 한

2010년 인하대학교 전자공학부 졸업. 2010년~현재 인하대학교 대학원 로봇공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 비선형제어, SLAM, 모바일로봇.

이 영 삼

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제4호 참조.