

# 이동형 태양 추적 시스템에 관한 연구

최익\* 최주엽\*\*

\*광운대학교 정보제어공학과(ickchoy@kw.ac.kr)

\*\*광운대학교 전기공학과(juyeop@kw.ac.kr)

## A Study on a Mobile Sun Tracking System

Choy, Ick\*, Choi, Ju-Yeop\*\*

\*Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University(ickchoy@kw.ac.kr),

\*\*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(juyeop@kw.ac.kr)

### Abstract

In this paper, a prototype of a mobile Sun tracking system is proposed. The proposed system uses 2-axis tilt sensor and 3-axis magnetic sensor to measure the orientation and the posture of the system according to the horizontal system of coordinates, which are used to compensate the slope effects. Then through astronomical calculation using the time and position informations obtained by GPS sensor, the azimuth and altitude of the Sun from that location is calculated. The position of the Sun is converted to that of the mobile Sun tracking system coordinates and used to control A-axis and C-axis of the system.

Keywords : 태양추적(Sun tracking), 경사면보정(Slope compensation), 천문학계산(Astronomical calculation), 대체에너지(Alternative energy)

### 1. 서 론

근래에 들어 태양광 발전시스템은 친환경적인 대체에너지원으로서 주목을 받고 있고 정부의 시범사업에 힘입어 가정이나 주요 건물의 소형시스템에서부터 전문발전사업에 사용되는 대형 시스템에 이르기까지 그 응용범위가 점차 확대되고 있는 추세에 있다. 태양광 발전시스템의 효율을 높이기 위해선 태

양전지와 전력변환기의 효율을 높이고 최대전력 추종제어를 하여야 하며 태양이 태양전지면에 항상 법선방향으로 향하도록 태양추적시스템의 도입이 필요하다.<sup>1)2)3)</sup> 태양전지나 전력변환기의 효율을 높이는 것은 현재의 기술로 꾸준히 향상되고 있는 추세에 있으나 태양광 발전시스템은 태양광이 태양전지에 입사되는 입사각도에 따라 시스템의 효율이 크게 좌우

투고일자 : 2008년 12월 15일, 심사일자 : 2008년 12월 28일, 게재확정일자 : 2009년 02월 18일  
교신저자 : 최익(ickchoy@kw.ac.kr)

된다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 해바라기 타입의 태양추적시스템은 고정식으로 설치장소의 지평좌표계와 정렬하여 설치되어 있으며 천문학 계산에 의하여 시간에 따른 그 지점에서의 태양의 방위각과 고도각이 주어지면 pan-tilt 구동의 2축 제어방식을 사용하여 태양을 추적한다. 이 경우 태양추적시스템이 지평좌표계와 정렬되어 있으므로 방위각에 해당하는 pan-구동과 고도각에 해당하는 tilt-구동만으로 단순제어가 가능하다.

한편, 향후 태양광발전시스템은 기존의 고정식뿐만 아니라 레저용이나 대형선박에 이르기 까지 이동식으로서의 응용 분야가 확대될 것으로 전망된다. 이동식의 경우 현재의 위치가 계속 변하고 태양추적시스템이 현재 위치의 지평좌표계와 정렬되지 않기 때문에 고정식처럼 단순한 방법으로 태양을 추적하기는 어렵다. 이동에 따라 태양추적시스템의 위치와 방향을 알아야하고 지평면과의 경사각을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 틸트(기울기) 센서를 사용하여 지평면과의 경사각을 측정하고 GPS센서와 지자기센서를 사용하여 현재의 위치와 시간 및 방향을 실시간으로 찾아 태양을 추적하는 이동형 태양추적시스템을 제안하고자 한다. 그림 1은 제안한 태양추적시스템이 태양을 추적하는 흐름도를 보인 것이다.



그림 1. 태양추적시스템의 흐름도

## 2. 태양추적시스템의 구조

태양추적시스템은 그림 2에서 보인 바와 같이

태양전지와 회전기구부 그리고 받침대로 구성된다. 받침대에는 틸트 센서와 GPS센서 그리고 지자기센서가 탑재되어 있으며 A축(x축 방향의 회전각:  $\alpha$ )과 C축(z축 방향의 회전각:  $\gamma$ )을 제어하여 태양전지면이 태양을 향하도록 추적한다.

### 2.1 Home position

그림 2는 태양추적시스템이 Home position에 있을 때의 그림을 보인 것이다. 태양전지와 받침대는 평행인 상태로 정렬되어 있고, A축 및 C축의 회전각인  $\alpha = \gamma = 0$ 이다.

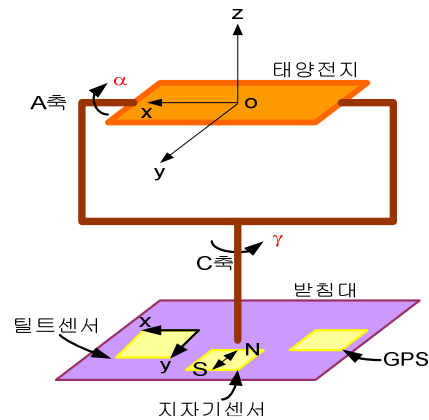


그림 2. 태양추적시스템의 구조

### 2.2 지평좌표계와 태양추적시스템 좌표계

그림 3은 태양추적시스템 좌표계와 지평좌표계를 보인 것이다.

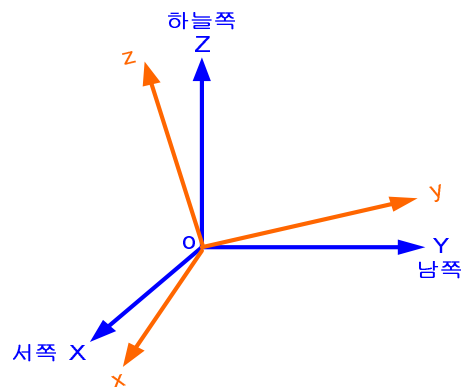


그림 3. 태양추적시스템좌표계와 지평 좌표계

XYZ축은 지평좌표계로서 현 위치의 지평면을 기준으로 천체의 위치를 나타내는 좌표계이다. 본 논문에서는 Y축, X축, Z축이 각각 남쪽, 서쪽, 하늘방향을 가리키는 것으로 정의한다. xyz축은 태양추적시스템 좌표계로서 XYZ축과의 상관관계는 좌표계 회전으로 표시할 수 있다. xyz축이 XYZ축과 정렬한 상태에서 xyz축을 Z축에 대하여  $\gamma$ 만큼 회전시키고, 다시 X축에 대하여  $\alpha$ 만큼 회전시킨 후 Y축에 대하여  $\beta$ 만큼 회전시켰다면 xyz좌표계의 한 점 P를 XYZ좌표계로 변환하는 관계식은 식(1)과 같으며, 변환매트릭스  ${}_{xyz}^{XYZ}T$ 는 식(2)와 같이 표현된다.<sup>4)</sup>

$$P(X, Y, Z) = {}_{xyz}^{XYZ}T P(x, y, z) \quad (1)$$

$${}_{xyz}^{XYZ}T = B(\beta)A(\alpha)C(\gamma) \quad (2)$$

여기서

$$A(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$C(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다.

### 3. 센서

본 절에서는 이동형 태양추적시스템에 사용되는 센서와 그 신호처리 방법에 대하여 기술한다.

#### 3.1 틸트센서

이동형 태양추적시스템이 어느 지점에 위치했을 때 받침대가 그 지점의 수평면에 대하여 어느 정도 기울어 졌는지를 측정한다. 그림 2에서 보인 듯이 태양추적시스템 좌표계의 x축 및 y축에 정렬되어 받침대에 설치

되어 있는 틸트센서의 출력  $\theta_x, \theta_y$ 는 각각 그림 4에서 보인 바와 같이, 지평좌표계의 Z축과 태양추적시스템 좌표계의 x축 및 y축 사이의 각도이다. 틸트센서의 출력  $\theta_x, \theta_y$ 는 식(4)에서 보인 바와 같이 지평좌표계 Z축의 단위벡터  $a_Z$ 와 지평좌표계 XYZ축에서 각각 바라본 x축의 단위벡터  $a_x$  및 y축의 단위벡터  $a_y$ 의 내적으로 표시된다. 그림 4에서 G는 중력방향을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \cos\theta_x &= a_Z \cdot {}^{XYZ}a_x \\ \cos\theta_y &= a_Z \cdot {}^{XYZ}a_y \end{aligned} \quad (4)$$

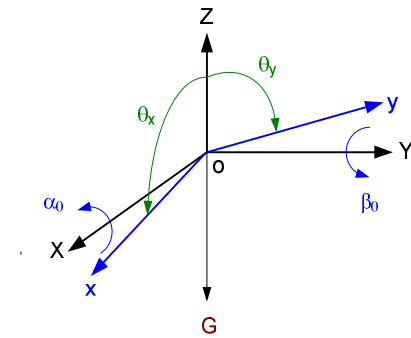


그림 4. 틸트 센서의 출력

한편, 그림 4에서 보는 바와 같이 지평좌표계의 XY평면에 정렬되어 있던 태양추적시스템 좌표계의 xy평면이 지평좌표계의 X축에 대하여  $\alpha_0$ 회전 후 Y축에 대하여  $\beta_0$ 회전하여 기울어진 것으로 회전 순서를 정의한다면 XYZ축에서 바라본  $a_x$  및  $a_y$ 는 식(5)와 같이 표현된다. 여기서 위첨자 T는 전치행렬을 의미한다.

$$\begin{aligned} {}^{XYZ}a_x &= B(\beta_0)A(\alpha_0)[1 \ 0 \ 0]^T \\ {}^{XYZ}a_y &= B(\beta_0)A(\alpha_0)[0 \ 1 \ 0]^T \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 식(3)-(5)를 정리하면 식(6)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos\theta_x &= -\sin\beta_0 \\ \cos\theta_y &= \cos\beta_0 \sin\alpha_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$\theta_x, \theta_y$ 는  $[0, \pi]$  범위의 값을 가지며 식(6)의 해를 구하면 식(8)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\beta_0 = \theta_x - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

$$\alpha_0 = \sin^{-1}\left(\frac{\cos\theta_y}{\cos\beta_0}\right)$$

여기서  $\alpha_0, \beta_0$ 는  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$  범위의 값을 갖는다. 식(8)에서 구한  $\alpha_0, \beta_0$ 는 태양추적시스템의 기울어짐 보정과 태양추적시스템 좌표계에 정렬되어 받침대에 설치되어 있는 지자기센서의 기울어짐에 대한 지자기센서의 출력보정에도 사용된다.

### 3.2 GPS 센서

GPS 센서는 위성의 신호를 받아 시간, 위도, 경도, 속도 등의 정보를 NMEA format으로 제공한다. 천문학 계산에 의하여 현재 위치 및 시간에서 태양의 방위각과 고도각을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 1950년에서 2050년까지 100년 사이에 0.01도의 정확도를 갖는 천문학계산법을 사용하였다.<sup>5)</sup>

### 3.3 지자기센서

GPS센서를 사용함으로써 현재 지점의 위도 경도 정보와 시간 정보를 얻을 수는 있지만 방향정보를 알 수가 없다. 본 논문에서는 3축 지자기센서를 사용하여 현 지점에서 태양추적시스템이 향하고 있는 방향정보를 얻고자 한다. 자자기센서는 측정 원리상 지구의 자북을 측정한다. 진북과 자북사이의 각도를 편각(Declination angle)이라고 하는데 현 지점의 편각을 알고 있으면 지자기센서에서 찾은 자북에 편각을 보정하여 진북방향을 알 수 있다. 편각은 지역마다 다르며 우리나라의 경우 자북이 진북에 대하여 서쪽으로 6-8도 범위에 있다.

태양추적시스템 좌표계에 정렬되어 설치되어 있는 지자기센서의 출력을 지평좌표계로 변환하면 식(9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} H_x & H_y & H_z \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$= B(\beta_0)A(\alpha_0) \begin{bmatrix} H_x & H_y & H_z \end{bmatrix}^T$$

그림 5는 지평좌표계에서 바라본 지자기센서 출력을 보인 것이다. 그림에서 보듯이 방향정보를 얻기 위해선  $H_x$ 와  $H_y$ 성분만 알면 되기 때문에 식(9)로부터  $H_x$ 와  $H_y$ 성분을 구해보면 식(10)과 같다.

$$H_x = H_x \cos\beta_0 + H_y \sin\beta_0 \sin\alpha_0 + H_z \sin\beta_0 \cos\alpha_0 \quad (10)$$

$$H_y = H_y \cos\alpha_0 - H_z \sin\alpha_0$$

따라서 태양추적시스템의 자북에 대한 회전각  $\delta_0$ 는 식(11)과 같이 되고 진북에 대한 회전각  $\gamma_0$ 는  $\delta_0$ 에 편각을 보정한 식(12)와 같다.

$$\delta_0 = \frac{3\pi}{2} - \text{atan2}(H_y, H_x) \quad (11)$$

$$\gamma_0 = \delta_0 + \text{편각} \quad (12)$$

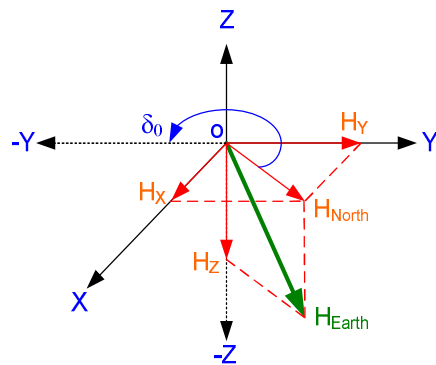


그림 5. 지자기센서 출력

3축 지자기센서를 사용하는 대신 2축 지자기센서를 사용할 수도 있으며 이 경우에는 지자기 지표면을 입사하는 각도인 북각(Inclination angle) 정보가 필요하다. 우리나라의 경우 북각은 48-55도의 분포를 보인다.

이상의 센서정보로부터 이동형 태양추적시스템이 임의의 위치에 놓여 졌을 때 현재의 자세가 지평좌표계의 Z축에 대하여  $\gamma_0$ 회전하고, X축에 대하여  $\alpha_0$ 회전한 후 Y축에 대하여  $\beta_0$ 회전한 것을 알 수 있다. 따라서 태양추적시스템 좌표계의 한 점을 지평좌표계로 변환하는 변환매트릭스는 식(2)에 의하여 식(13)으로 표현할 수 있다.

$${}^{XYZ}_{xyz}T = B(\beta_0)A(\alpha_0)C(\gamma_0) \quad (13)$$

#### 4. 태양 추적 제어

천문학 계산에 의해 산출된 태양의 고도각 및 방위각을 각각  $\theta$ ,  $\phi$ 라고 하면 그림 6에서 보인 바와 같이 지평좌표계에서 태양을 바라보는 단위 벡터  ${}^{XYZ}S$ 는 식(14)와 같이 표현된다.

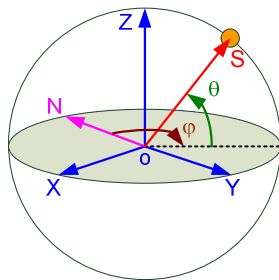


그림 6. 태양의 위치

$${}^{XYZ}S = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{3\pi}{2} - \phi)\cos\theta \\ \sin(\frac{3\pi}{2} - \phi)\cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(14)의 양변에 식(13)의 역변환매트릭스를 곱하면 태양추적시스템 좌표계에서 바라본  ${}^{xyz}S$ 는 식(15)와 같이 표현된다.

$${}^{xyz}S = {}^{XYZ}T^{-1}{}^{XYZ}S = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 역변환매트릭스는 그 특성상 변환매트릭스의 전치행렬과 같다.

$${}^{XYZ}T^{-1} = {}^{XYZ}T^T \quad (16)$$

이제 태양추적시스템의 태양전지가 태양을 바라보도록 하기 위해선, 태양추적시스템을 Home position 상태에서 C축을  $\gamma$ 만큼 회전시킨 후, A축을  $\alpha$ 만큼 회전시켰을 때 태양추적시스템 좌표계에서 본 태양전지면의 단위법선벡터가 식(15)와 일치하면 된다. Home position 상태에서의 태양전지면의 단위법선

벡터  $u_z$ 는 태양추적시스템 좌표계의 z축과 일치한다. 즉,

$$u_z = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (17)$$

이다.

이상의 내용을 수식으로 표현하면 식(18)와 같다.

$$C(\gamma)A(\alpha)u_z = {}^{xyz}S \quad (18)$$

그러므로 식(18)을 식(3), 식(15), 식(17)을 이용하여 정리하면 식(19)-식(21)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\sin\gamma\sin\alpha = s_x \quad (19)$$

$$-\cos\gamma\sin\alpha = s_y \quad (20)$$

$$\cos\alpha = s_z \quad (21)$$

식(19)-식(21)의 해를 구하면 식(22)와 같이 2가지 해가 존재한다.

$$\begin{cases} \gamma_1 = \eta - \frac{\pi}{2} \\ \alpha_1 = -\cos^{-1}s_z \end{cases} \quad \text{또는} \quad \begin{cases} \gamma_2 = \eta + \frac{\pi}{2} \\ \alpha_2 = \cos^{-1}s_z \end{cases} \quad (22)$$

여기서

$$\eta = \text{atan2}(s_y, s_x) \quad (23)$$

이다.

그림 7(a)는 태양추적시스템 좌표계의 z축에서  ${}^{xyz}S$ 를 바라 본 그림이다. xy평면에 투영된  $s_{xy}$ 는 x축과 식(22)에서 나타낸  $\eta$ 각을 이루고 있다. x축을 회전하여 태양을 바라보기 위해선 먼저 태양전지면을 z축에 대하여 회전하여 x축이  $s_{xy}$ 와 수직이 되도록 해야 하며 그림에서 보듯이 두 가지( $\gamma_1, \gamma_2$ )방법이 존재한다. 그림 7(b)와 7(c)는 각각  $\gamma_1$  또는  $\gamma_2$ 만큼 z축을 회전한 후 x축에서 바라본 그림이다. 각각에 대하여  $\alpha_1$  또는  $\alpha_2$ 만큼 x축을 회전하면 태양전지면이 태양을 바라볼 수 있음을 알 수 있다.

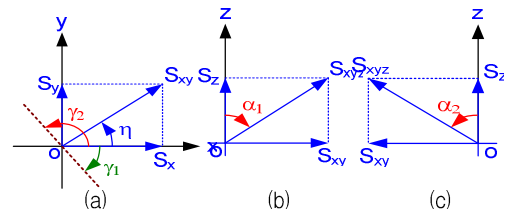


그림 7. 태양추적시스템 좌표계에서 바라본  ${}^{xyz}S$

두 가지 해 중 어느 것을 선택하느냐는 것은  $\alpha$ 와  $\gamma$ 의 제어범위에 해당하는 기구적인 구조상의 제한사항을 고려하면서 현재의 위치로부터 이동량이 작은 것을 선택하면 된다.

이상의 결과를 이용하여 태양 추적 제어를 하는 한 예를 제시한다. 표 1은 서울의 한 지점을 대상으로 GPS 센서 출력을 사용하여 천문학 계산을 한 예를 보인 것이다.

표 1 천문학 계산 결과 예

위도	126.9833°E
경도	37.5667°N
일시	2008.12.12.12:15:21
방위각	178.8235°
고도각	29.3286°

표 2는 표 1의 위치에 있는 이동형 태양추적시스템의 자세에 따라 센서 출력으로부터 계산한  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$ 와 태양추적을 위한 제어출력  $\alpha$ ,  $\gamma$ 를 계산한 예를 보인 것이다. case 1의 경우는 태양추적시스템이 지평좌표계와 정렬되어 있는 경우로  $\alpha_0=\beta_0=\gamma_0=0$  이며 표 1로부터 제어출력  $\gamma$ 는 1.18° 또는 -178.82°,  $\alpha$ 는 각각  $\pm 60.67^\circ$ 가 되어야 함을 예측할 수 있고 표 2의 계산결과와 일치함을 확인할 수 있다. case 2는  $\alpha_0=-5.08^\circ$ ,  $\beta_0=10^\circ$ ,  $\gamma_0=10.33^\circ$  인 경우로 제어 출력은  $\gamma$ 는 -3.24° 또는 -176.76°이고  $\alpha$ 는 각각  $\pm 56.32^\circ$ 의 결과를 얻었다.

표 2 태양 추적 제어 결과 예

case	$\alpha_0$	$\beta_0$	$\gamma_0$
	1	0°	0°
1	$\alpha$		$\gamma$
	-60.67°/60.67°		1.18°/-178.82°
case	$\alpha_0$	$\beta_0$	$\gamma_0$
	-5.08°	10.00°	10.33°
2	$\alpha$		$\gamma$
	-56.32°/56.32°		-3.24°/176.76°

## 5. 결 론

본 논문에서는 고정식이 아닌 이동형 태양광 발전시스템을 대상으로 실시간으로 태양을 추적하여 태양광 발전 효율을 향상할 수 있는 이동형 태양추적시스템을 제안하였다. 틸트센서와 지자기센서에 의해 지평좌표계에 대한 태양추적시스템의 자세를 좌표계의 회전을 이용하여 측정하고, GPS 센서로부터 현재의 위치 및 시간 정보를 획득하여 천문학계산에 의하여 지평좌표계에서의 태양의 방위각과 고도각을 계산한다. 이상의 결과를 바탕으로 태양전지면이 태양을 수직으로 바라볼 수 있도록 태양추적시스템의 2축을 제어하는 방법을 제안하였다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. R. Zogbi and D. Laplaze, "Design and construction of a sun tracker," Solar Energy, Vol.33, No.3/4, pp.369-372, 1984
2. P. Baltas, M. Tortoreli and P.E. Russell, "Evaluation of power output for the fixed and step tracking photovoltaic arrays," Solar Energy, Vol.37. No.2, pp. 147-163, 1986
3. D. M. Mosher, R. E. Boese and R. J. Soukup, "The advantage of sun tracking for planar silicon solar cells," Solar Energy, Vol.19, pp.91-97, 1977
4. John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1986
5. Keith Burnett, Position of the Sun, <http://www.stargazing.net/kepler/sun.html>