
오류신호 보정기능을 갖춘 정밀 태양추적제어기

현 응 근*

An accurate sun tracking controller with reconstructing facility for fault sensor

Hyun-Woong keun*

요 약

본 논문에서는 오류센서 보정 기능을 갖춘 태양광 조명용 정밀 태양 추적제어기 개발에 대하여 기술하였다. 태양 위치에 대한 광역범위 추적과 미소범위에서의 정밀추적 제어를 위하여 대범위 센서군과 소범위 센서군으로 나뉜 센서모듈을 개발하였다. 태양위치의 정밀 추적을 위하여 소범위 센서군의 응답특성을 분석하여 퍼지 제어엔진을 개발하였으며, 주축성분 분석법((Principal Component Analysis)을 적용하여 오류센서의 감별 및 복원을 하였다. 개발된 시스템의 실외 태양추적 실험을 통하여 본 연구의 유용성을 입증하였다.

ABSTRACT

An intelligent accurate sun tracking controller for solar lighting system was developed. This controller can detect the faulty sensor and correct the error signal based on Principle Component Analysis theory. A fuzzy controller was developed to control the tracker by using the collected sensor signal for precise position control. Also a multiple range searching sensor module for sun tracking was designed. To show the validity of the developed system, some experiments in the field were illustrated

키워드

Sun tracking, Fault recovering, Principle Component Analysis, Fuzzy controller

I. 서 론

태양광 조명장치는 태양광을 렌즈나 포물경면 등으로 집적한 후, 광섬유로 집적된 태양광을 실내까지 전송하고, 그 전송된 태양광을 산란시켜 조명효과를 내는 시스템이다. 이러한 시스템의 태양 추적 장치는 태양광을 렌즈 등으로 집광하여 좁은 광섬유에 조사하여 하므로 허용오차가 $\pm 5^\circ$ 이내인 태양광 발전용 추적기와 달리 $\pm 1.5^\circ$ 이내에서 태양의 위치를 추적해야하는 매우 정밀한 추적 장치를 요구한다[1].

태양 추적 방법은 크게 태양의 궤도를 예측한 계산식에 의한 오프라인(off-line) 제어방식[4]과 태양광 센서를 이용한 온라인(on-line) 제어방식이 있다.

오프라인 제어방식은 태양의 움직임 예측하는 천체수식을 이용하여 이를 추적시스템에 적용하는 방식으로, 센서를 사용하지 않으므로 센서의 오류 등에 의한 영향은 받지 않으나 전원이 꺼졌다가 다시 들어오는 경우에 의해 시스템의 시간오차 및 계산오차가 발생하거나, 태양 추적 장치를 지지하는 기반이 변형되고 강풍과 같은 자연재해 등에 의해 추적기기가 변형되면 태양추적에 문제가 발생하게 되며, 더욱이 오차 $\pm 1.5^\circ$ 이하의 정밀추적일 경우 그 문제가 더욱 빈번하고 자주 발생하게 된다.

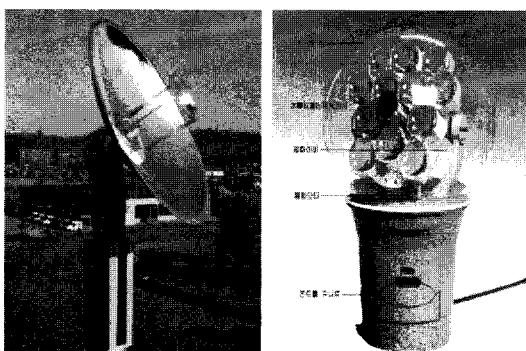
이를 보정하기 위하여 센서기반 추적을 하게 되는 바, 센서 기반 온라인 제어방식은 정밀한 시스템 구성을 통해 추적오차를 최소화 할 수 있으나 센서 값이 구름이나 바람, 먼지나, 비, 눈 등 기상요소에 민감할 뿐 아니라 외부 자연환경에 노출되어 센서의 리드선이 파괴 및 신호선의 불량으로 인한 오류신호가 발생하게 된다. 이러한 이유로 온라인 방식의 경우 태양추적센서의 오류감지 및 오류신호 복원과 이를 활용한 태양정밀추적 제어방법이 중요하게 된다.

본 연구에서는 오류센서 보정기능을 갖춘 광역 및 정밀 태양 위치 추적제어기를 개발하였다. 센서 기반 태양위치 추적장치의 경우 센서부위가 일정 시간동안 구름에 가려지거나 비가 온 후 한참 있다가 날씨가 개는 경우 상당히 큰 범위의 각도 내에서 태양의 위치를 잃어버리게 되는데, 이 경우 태양의 위치를 찾기 위하여 많은 부분을 탐색하게 는 바, 이러한 경우를 대비하여 넓은 범위에서 신속하게 태양의 개략적인 위치를 찾아내는 센서군과 1.5° 이내에서 태양의 위치를 추적하는 센서군 등을 구분하여 제어할수 있는 센서모듈도 설계되었다. 태양위치의 정밀 추적을 위하여 퍼지제어기를 개발하였으며, 주축성분 분석법 ((Principal Component Analysis)[2,3,6]을 적용하여 오류 센서의 감별 및 복원을 하였다. 개발된 시스템은 실의 태양추적 실험을 통하여 본 연구의 유용성을 입증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 태양 위치의 광역범위 탐색과 소범위에서의 정밀추적을 위한 센서모듈의 설계에 대하여 기술하였고, 3장에서는 오류신호의 감지 및 오류보정방법에 대하여, 4장에서는 태양추적제어기에 대하여 기술하였으며, 5장에서는 실험 및 결과를 기술하였다.

II. 태양 센서모듈 설계

그림2는 제안된 태양 추적센서 모듈이다. 제안된 모듈의 설계 개념은 태양 위치추적에 있어서 탐색범위를 $\pm 90^\circ$ 에서 $\pm 7^\circ$ 까지 감지하는 대범위 센서군과, $\pm 7^\circ$ 에서 $\pm 1.5^\circ$ 이내를 추적하는 정밀 센서군 두 그룹으로 나누어 감지한다는 것이다.



(a) (b)

그림 1. 태양광 조명장치용 태양추적기

(a) 포물면경 형 (b) 렌즈 형

Fig.1 sun tracking controller of solar lighting system

(a) parabolic mirror type (b)lense type

태양광 발전용 추적장치는 태양과의 수직각 허용 오차가 $\pm 5^\circ$ 이내로 제어하면 최대 에너지 변환이 보장된다. 따라서 광센서 4개로 이루어지는 단일 센서모듈을 사용하여도 허용오차를 충족시킬 수 있다. 하지만 태양광 조명 추적기는 허용오차가 $\pm 1.5^\circ$ 이내 이므로 정교한 센서의 배치가 필요하게 된다. 본 연구에서는 이를 위하여 그림2(b)와 그림2(c)에서와 같이 4개의 광센서를 긴 대롱속에 배치하여 태양과의 수직각(δ)이 $\pm 7^\circ$ 이내에 들어오면 대롱내에 태양광이 조사되기 시작하고 $\pm 1.5^\circ$ 이내가 되면 4개의 광센서가 최대로 반응하도록 구성하였다. 이 센서군을 소범위 센서(SRS: Small Range Sensors)라고 명한다. 또한 태양이 구름에 가려졌다가 다시 날씨가 개는 경우와 같이 일정시간 태양의 위치를 잃어버리고 다시 태양을 추적하게 되었을 경우 태양광 조명 추적기제어기는 빠른 시간내에 태양위치를 정밀 추적해야 하는 바, 이 경우 태양과의 오차각도가 크므로 그림2(a)와 그림2(d)에서 보여주는 바와 같이 S5, S6, S7 그리고 S8로 이루어지는 대범위 센서(LRS: Large Range Sensors)로 태양의 위치를 추적하여 $\pm 7^\circ$ 이내가 되면 그림2(a)의 차양 A에 의해 대범의 센서가 가려져 S5부터 S8까지의 센서값의 합이 최저가 되고, 소범위 센서 S1부터 S4까지의 센서가 반응하기 시작한다. 이때부터는 S1부터 S4까지의 센서값의 합이 최대가 되도록 제어해주면 정밀제어가 가능해지는 것이다. 센서설계를 파라미터는 다음과 같이 구한다.

LRS의 추적각을 위한 수식은

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{2c}{b}\right) \quad (1)$$

SRS의 추적각을 위한 수식은

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (2)$$

로 하였으며, 여기서 $a : b : c = 1 : 10 : 5$ 로 할 경우 $\alpha = \pm 60^\circ$, $\delta = \pm 7.0^\circ$ 이다.

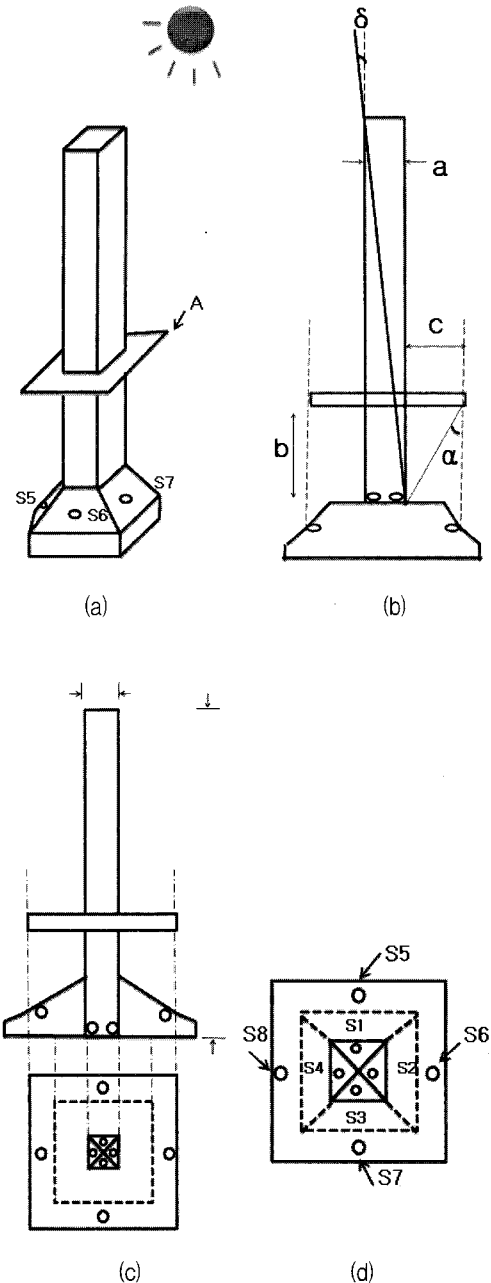


그림 2. 제안한 태양추적 센서모듈 구조
Fig.2 Structure of the proposed sun tracking sensor module

III. 오류센서 신호 결정 및 수정

센서가 외부 환경에 노출될 시에 햇빛 또는 빗물에 의한 센서 리드선의 고장에 기인하여 잡음 형태의 오차가 발생하게 되며, 또한 센서 부위의 먼지 등의 증착으로 인한 신호 외곡 현상이 나타나게 된다. 이에 본 연구에서는 PCA(Principal Component Analysis)기법[2,3,6]을 이용하여 고장난센서의 감지 및 신호의 복원을 하였고, 이를 퍼지제어기에 적용하여 정밀 추적하는 시스템을 연구하였다.

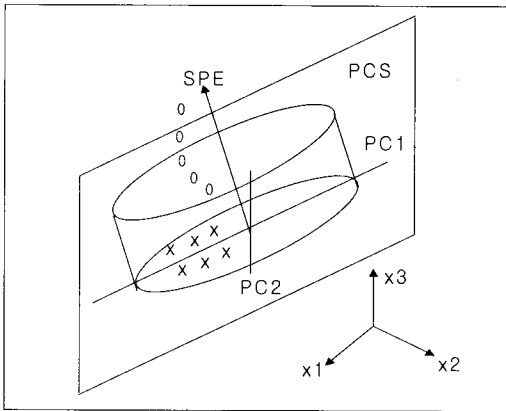


그림 3. 3변수를 갖는 PCA의 예
Fig.3 Sample data represented by 3 axis PCA

그림3은 센서 데이터들의 PCA에서 도식적 특성을 보여준다. 'x'로 표시된 정상적인 샘플들은 PC(Principle Component)들이 이루는 PCS(principal component space)에 존재하며 'o'로 표시되어 있는 비정상적인 데이터는 정상적인 데이터에 비해 PCS에서 수직으로 상대적으로 많이 떨어져 있다. PC가 갖는 통계학적 의미는 확률적으로 데이터들이 주로 발생하는 주 성분 성분분을 의미하며 로딩벡터(Loading Vector)라 한다. X 는 m 개의 샘플 수와 n 개의 변수로 이루어진 샘플데이터 행렬이며, V, R 을 각각 X 의 공분산행렬(Covariance Matrix), 관계행렬(Correlation Matrix)이라 하면, 여기서 X, V, R 은 각각 $m \times n, n \times n$ 그리고 $n \times n$ 행렬이라 할 때, 로딩벡터 P 는 V 또는 R 의 고유벡터를 구함으로 얻어진다. 따라서 데이터 행렬 X 가 있을 때, n 개의 PC를 얻을 수 있으며 그 중 변수들 간의 관계를 가장 잘 설명할 수 있는

주성분을 사용해야 한다[6].

행렬 P 가 주어졌을때, 주어진 입력벡터 x 는 주축 요소 공간(PCS:principal component sub-space) 성분 \hat{x} 와 리지드 공간(RS:residual sub-space) 성분 \tilde{x} 로 나뉜다.

$$\hat{x} = PP^T x \tag{3}$$

$$\tilde{x} = (I - PP^T)x \tag{4}$$

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \tag{5}$$

여기서, \hat{x} 는 x 의 PCS의 투영성분(projection vector)이며, \tilde{x} 는 x 의 PCS와 수직성분이다.

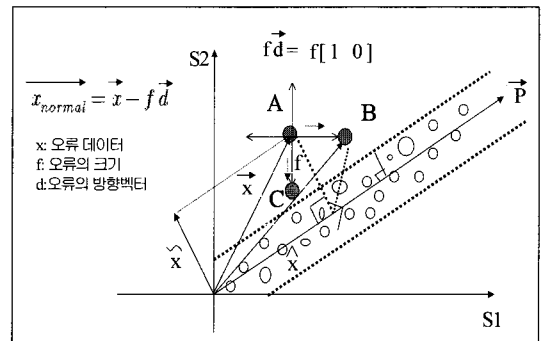


그림 4. 오류데이터의 복원
Fig. 4 Reconstruction of faulty data

그림4는 S1과 S2 두 센서에서 측정된 데이터 군인 바, 그림 4의 A지점에 있는 입력벡터 x 는 다른 데이터들에 비하여 특이하게 튀어나와 있는 위치에 존재하며, 그러한 오류 데이터의 판별은 주축 P 를 중심축으로 일정 거리내에서 형성된 데이터들보다 P 축의 수직방향으로 먼 거리에서 형성된 데이터를 찾음으로써 가능하다. 오류 센서 데이터의 수정은 이러한 데이터를 P 축에 가까이로 근접하게 함으로써 가능하게 된다. 우선 어떤 센서 값 x 가 오류인지 아닌지를 판별하는 방법은 그 데이터가 주축(Principle axis) P 에 얼마나 수직성향으로 많은 값을 포함하고 있는지를 판별하면 되므로 식(4)의 놈(norm) 값의 크기로 알 수 있다. 따라서 센서 데이터 x 에 대한 수직방향 오차성분(residual subspace error)을 다음과 같이 정의한다면,

$$SPE(x) = \|\tilde{x}\|^2 \quad (6)$$

$SPE(x) \leq 8$ 일 때(여기서 8은 신뢰한계) 정상으로 간주할 수 있다. 정상적인 조건에서 \tilde{x} , $SPE(x)$ 는 아주 작을 것이다. 따라서 식(6)을 만족하지 않는 데이터 x 를 오류 데이터로 간주할 수 있다. 이러한 오류 센서의 복원은 어떠한 센서가 오작동을 일으키는가에 따라 복원 결과가 달라진다. 그림 4에서 만일 오류 데이터 x 가 A점에 있을 경우 S1센서의 오류에 의한 결과라면 B방향으로 이동하여 오류를 보정하여야 하며, S2 센서의 오류라면 C위치로 이동해야 올바른 복원이 가능해 질것이다.

오류센서의 복원 방법은 다음과 같다.

정상 조건의 샘플벡터 또는 예측 값으로 볼 수 있는 벡터를 x_{normal} 라 하고, 실제 오류로 측정된 샘플벡터를 x , f 는 오류신호의 크기 그리고 d 는 오류신호의 방향 벡터라고 가정한다면, 다음 식으로 모델링 된다.

$$x_{normal} = x - fd \quad (7)$$

여기서, d 는 예를 들어 4개의 센서 중 네번째 센서가 오류가 날 때, $d = (0001)^T$ 로써 오류가 있는 센서번호의 정보를 가지고 있으며 d 의 방향으로 $SPE(x_{normal})$ 을 최소화하기 위한 f 는

$$\frac{dSPE(x_{normal})}{df} = 2\tilde{d}^{oT}(\tilde{x} - \tilde{f}\tilde{d}^o) = 0 \quad (8)$$

$$f = \frac{\tilde{f}}{\|\tilde{d}\|} = \frac{\tilde{d}^{oT}x}{\|\tilde{d}\|} \quad (9)$$

여기서 $\tilde{f} = \tilde{d}^{oT}x = \tilde{d}^{oT}x$ 이다.

따라서 주어진 오류 신호로부터 복원값은

$$x_{normal} = (I - \frac{\tilde{d}\tilde{d}^{oT}}{\|\tilde{d}\|^2})x \quad (10)$$

이다. 여기서 \tilde{d} 는 d 의 리저드 공간(residual subspace)성분을 의미한다.

IV. 태양추적 제어기

제안된 추적기는 그림 2에서와 같이 태양과의 수직 각도 오차의 $\pm 60^\circ$ 에서 $\pm 7^\circ$ 까지 감지하는 대범위 센서군(LRS) 그리고 $\pm 7^\circ$ 에서 $\pm 1.5^\circ$ 이내까지 추적하는 소범위 센서군(SRS)으로 나뉘어 있다. 그림 9는 LRS군의 센서와 SRS 센서군에 있는 센서를 이용한 태양추적 제어장치의 블록도를 보인다. 태양은 $0.00417^\circ/\text{sec}$ 의 속도로 매우 느리게 이동하므로 고도의 제어법칙을 사용할 필요는 없다. LRS에서는 P-D 제어를 사용하였으며, 고도각 제어는 S5-S7, 방위각 제어는 S6-S8의 신호를 제어입력으로 사용하였다. 그림 5는 태양과의 위도각 오차 $\pm 5^\circ$ 범위 내에서 고도각을 $\pm 60^\circ$ 를 이동하였을 경우의 결과이다. 그림에서 y축은 S5-S7이며 수치는 ADC값의 차이이며, x축은 $\pm 60^\circ$ 를 이동했을 때 센서를 스캔한 샘플링 번호이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 태양과의 대범위 부분에서의 $S_5 - S_7$ 가 0이면서 $\pm 7^\circ$ 이내 범위에 들어오게 되므로 이 값을 0이 되게 PD 되먹임(feedback)제어를 하는 것으로 대범위 센서군에서의 제어가 가능하다.

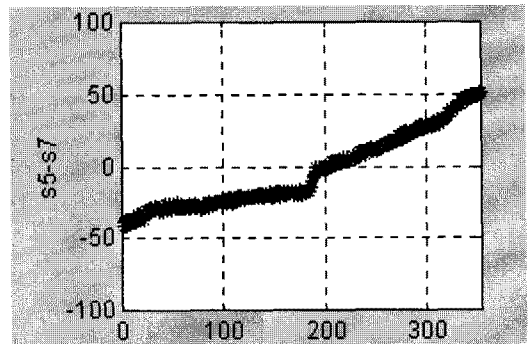


그림 5. $S_5 - S_7$ 응답 신호
Fig. 5 response signal of S5-S7

소범위 센서군인 SRS 제어부에서는 정밀제어가 필요하므로 피지제어기를 사용하였는 바, 다음과 같은 관찰에 의하여 피지제어 규칙을 생성하였다.

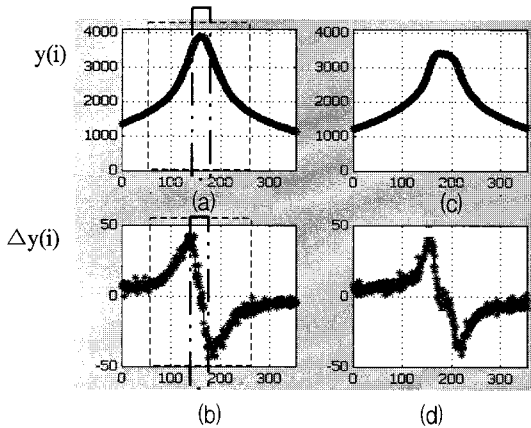


그림 6. 소범위 센서군의 응답

- (a) 위도오차 0°근처에서의 $y(i) = S1+S2+S3+S4$ 의 값
- (b) 위도오차 0°근처에서의 $y(i)$ 의 미분값
- (c) 위도오차 5°근처에서의 $y(i)$
- (d) 위도오차 5°근처에서의 $y(i)$ 의 미분값

Fig. 6 response signal of SRS

Fig.6(a) thru Fig.6(d) are $y(i)$ and differential value of $y(i)$ when 0° and 5° latitude error occurred, respectively.

그림6(a),(c)는 각각 태양과의 위도오차 0°근처와 위도오차 ±5°근처에서의 SRS 모듈의 센서 S1부터 S4의 합 ($S1+S2+S3+S4$)의 값이며, 그림 6(b)와 5(d)는 각각 그림 6(a)와 그림6(c)의 값을 미분한 값이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서의 점선의 블록으로 표시된 부분은 고도각 오차가 소범위 센서군의 감지영역내에 들어온 경우이며, 2점쇄선 블록으로 부분은 거의태양의 수직각도와 일치하는 부분이다. 그림 6(a)와(c)에서 알 수 있듯이 정밀제어군인 $S1+S2+ S3+S4$ 는 태양과의 고도각의 오차가 0에 가까울수록 최고값이 되며, 그 미분값은 0에 가까워진다. 그림 6(a)와 6(b)를 관찰하여 다음과 같은 퍼지 제어엔진을 만들기위한 규칙을 만들 수 있다.

$y(i)$ 를 i 번째 샘플링 때의 SRS센서 모듈의 합, $y(i) = S1+S2+S3+S4$ 라고 하고, $\Delta y(i)=y(i) - y(i-1)$ 이라고 하면, 그림6(a),(c)는 $y(i)$ 에 대한 응답을, 그림6(b),(d)는 $\Delta y(i)$ 에 대한 응답을 보이고 있다. $\Delta y(i)'=\Delta y(i)-\Delta y(i-1)$ 이라 하면, $\Delta y(i)'$ 는 $\Delta y(i)$ 의 미분값이므로 그 도식적 그림은 그림 7과 같이 나타난다.

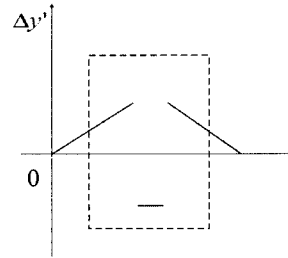


그림 7. 신호에 대한 미분값($\Delta y(i)'$)의 도식도
Fig. 7 Simplified graphic of $\Delta y(i)'$ for figure 6(c)

그림 6(a), (b), 그림 7의 관찰로부터 SRS 범위내에 신호가 들어오면 다음과 같은 제어규칙을 적용할 수 있다.

- (1) $y(i)$ 가 봉우리에 있으면, 즉, $\Delta y(i)$ 가 0이면 정지한다.
- (2) $\Delta y(i)'$ 가 0보다 크고, $\Delta y(i)$ 가 0보다 크면 $\Delta y(i)$ 의 크기에 따라 반대방향으로 추적기를 움직여주면 태양과의 고도각오차를 줄일 수 있다.
- (3) $\Delta y(i)'$ 가 0보다 작으면 추적기가 태양과의 수직각도오차가 작은 봉우리 부분에 있는 것이므로 미세 조종해야한다.

이러한 관찰에 의해 표1과 같은 퍼지 제어규칙을 만들 수 있다. 그림 8은 퍼지멤버쉽 함수를 나타낸다. 퍼지 제어기의 추론 방법은 만다니(Mamdani)의 최대최소방법을 사용하였다.[5]

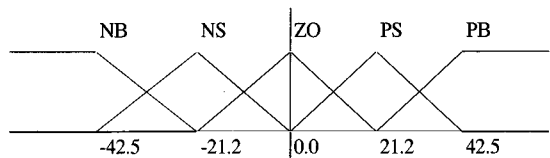


그림 8. 적용한 퍼지 멤버쉽 함수의 형태
Fig. 8 Membership value of fuzzy fuction

표 1. SRS 퍼지 제어 규칙
Table 1. Rule table of proposed fuzzy controller

		$\Delta y(i)^*$	
		N	P
$\Delta y(i)$	NB	PS	PS
	NM	PVS	PM
	NS	PVS	PB
	ZO	Z	Z
	PS	NVS	NB
	PM	NVS	NM
	PB	NS	NS

그림 9는 정밀 태양추적기 전체 블록도이다. 태양과의 수직각도 오차가 $\pm 60^\circ$ 에서 $\pm 7^\circ$ 까지의 오차범위가 큰 부분에서는 LRS에 속하는 센서가 이를 감지하여 PD제어를 하며, $S_5 - S_7$ 혹은 $S_6 - S_8$ 이 0에 가까우면 LRS에 의한 제어를 멈추고 정밀 제어인 SRS 센서로써 퍼지제어를 시작한다. SRS의 제어는 소범위 센서의 합인 $y = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$ 가 0에 가까우면 제어를 멈춘다.

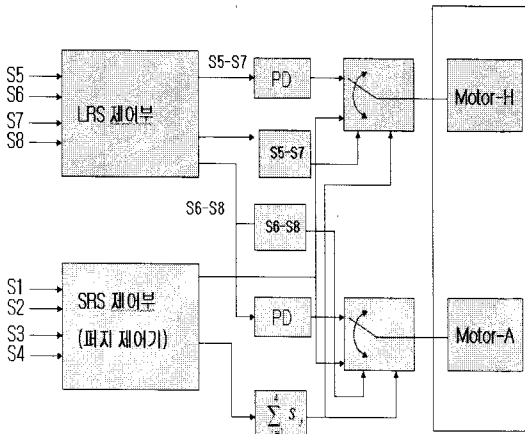


그림 9. 정밀태양추적기 제어구조 블록도
Fig. 9 Block diagram of the proposed controller

V. 실험결과

그림 10은 태양과의 위도각 오차가 $0^\circ, \pm 5^\circ$ 그리고 $\pm 10^\circ$ 부근에서의 고도각 추적에 대한 퍼지제어기 적용 결과이다. 그림 11은 센서 진단 및 복원 실험결과를 보여준다. 오류신호는 그림 11(a)에서와 같이 SRS s4에 10번째 샘플링 시간부터 16번째 샘플링 시간동안의 6샘플링 시간동안 빛을 투입하였고, 29번째 샘플링 시간부터 11샘플링 시간동안 동일한 빛을 비추었으며, 48샘플링 시간부터 9샘플링 시간동안 센서를 반투명 종이로 가림으로써 만든 신호이다. 그림 11(b)는 s4에 센서오류가 발생하였을 때 SPE 변화를 보여주며, 그림 11(c)는 오류센서에 대한 복원된 신호모습을 보여준다.

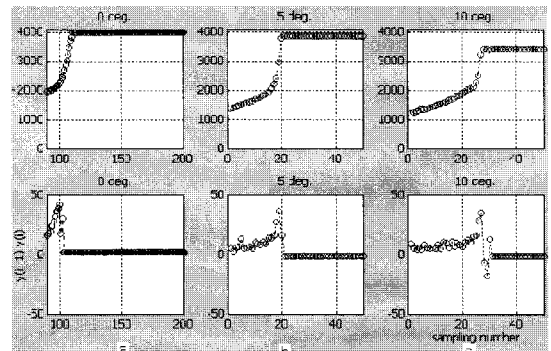


그림 10. 재건된 SRS 신호의 퍼지제어 응답
(위)y값과 (아래) Δy
Fig.10 Resultant signal of y and Δy controller by proposed fuzzy controller

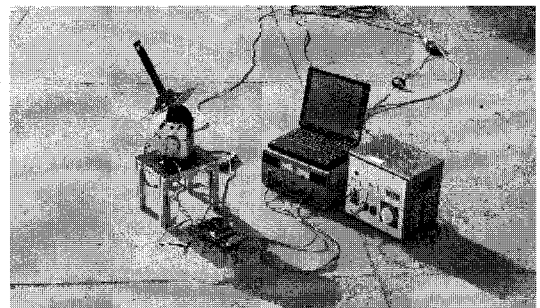


그림 11. 제안한 태양 정밀 추적장치 실험장면
(2008.10.12, PM3:30~PM4:30)
Fig.11 Configuration of the proposed tracker operating at DEC 12th, 2008.

그림 12는 구현된 전체 시스템의 옥외에서의 실험 장면 모습이다.

참고문헌

[1] D. L. Beshears, G. J. Capps, D. D. Earl, J. K. Jordan, L. C. Maxey, and J. D. Muhs, "Tracking system evaluation for the Hybrid lighting system", *Proc. of ISEC 2003*, Vol.1, No.2, pp234-243.

[2] Qin, S. J., Yue, H., & Dunia, R. "Self-validating inferential sensors with application to air emission monitoring.", *Industrial Engineering and Chemical Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 1675-1685, (1997)

[3] Ricardo Dunia and S. J. Qin, "Joint diagnosis of process and sensor faults using principal components analysis", *Control Engineering Practice* 6, pp. 457-469, (1998)

[4] J.J. Michalsky, "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)", *Solar Energy*, Vol. 40, No. 3, pp. 227-235, (1988)

[5] Bart Kosko, *Neural networks and fuzzy systems*, Prentice-Hall, (1992)

[6] Gilbert Strang, *Linear Algebra and its applications* 2d ed, Academic Press, 1980.

저자소개

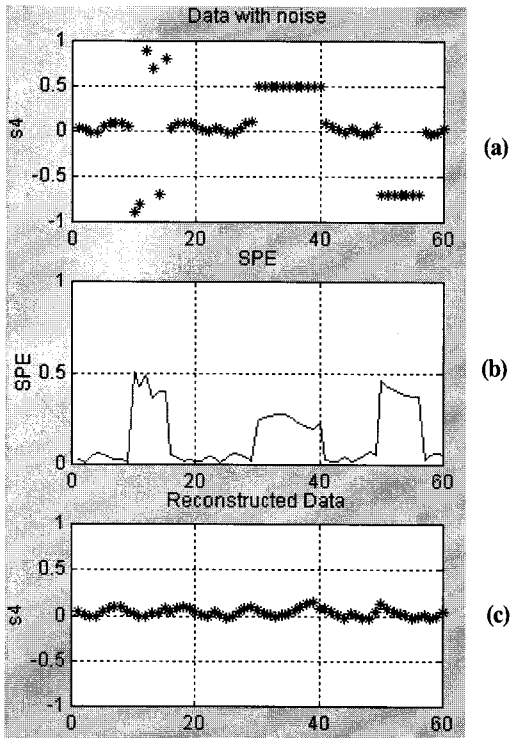


그림 12. 센서신호의 SPE, 및 재건신호
Fig. 12 SPE and reconstructed signal for S4

VI. 결론

본 연구에서는 태양광 조명용 정밀추적 제어기에 대하여 기술하였다. 광역 범위에서 정밀하고 빠른 태양의 추적을 위하여 넓은 범위에서 태양의 위치를 감지하는 대범위 센서군과 좁은 범위의 태양위치를 감지하는 소범위 센서군으로 나뉘어지는 센서모듈을 개발하였다. 태양의 정밀 추적을 위하여 퍼지제어기를 적용하였으며, 오류 센서의 감지 및 복원을 위하여 주축성분 분석법 ((Principal Component Analysis)[2,3,6]을 적용하였다. 실외 환경에서의 태양추적 실험을 통하여 개발된 태양추적기가 정밀한 태양추적이 가능함을 보였으며, 오류가 있는 센서에 대한 보정능력을 갖고 있음을 보여본 연구의 효용성을 입증할 수 있었다.



현웅근(Hyun woong keun)

한양대학교 학사, 석사, 박사.
호남대학교 전자광공학과 교수

※관심분야: 지능센서, 그린IT