

로봇 매니퓰레이터를 위한 광학식 근접센서의 설계

천희영* · 박귀태* · 임영철** · 이관호***

Design of the Optical Proximity Sensor for Robot Manipulators

Hee Young Chun*, Gwi Tae Park*, Young Cheol Lim** and Kwan Ho Lee***

Abstract

The proximity sensor is a kind of nontactile sensors and it can measure the spatial state of the object in the range of 0-100 mm to cover the sensing gap between the tactile sensor and the vision system

In this paper, a new optical proximity sensor which can separately measure the location and the orientation of the object surface in the working range is designed. The measuring principle of this sensor is based on the reflection law. Four LEDs for light sources and four lenses for converging the beam are symmetrically mounted at the sensor head. Two photo-transistors are mounted on the both sides of each converging lens to measure the reflex.

The sensing system is implemented by using 8086 microprocessor and interface circuits to pulse each LED sequentially and measure outputs of the photo-transistors. This sensing system calculates the inclination angles and gap distances by the use of curve fitting algorithms and then estimates the shape of the object surface using these results and the plane fitting algorithm. The experimental results show that this sensor works satisfactorily. This sensor can be applied to the robot manipulator in order to improve the robot performance.

1. 서 론

오늘날 생산성 향상을 위하여 공장 자동화에 대한 관심이 국내외적으로 크게 고조되고 있다. 공장 자동화에는 컴퓨터와 산업용 로봇이 필수적인 요소이며 이 산업용 로봇의 기능과 지능을 향상시키기 위해서는 여러 가지 기능을 가진 센서의 개발과 이 센서를 이용하는 데 필요한 소프트웨어의 연구가 필요하다.

로봇에 사용되고 있는 센서로서는 주로 시각센서, 근접센서 및 촉각 센서를 들 수 있다. 시각 센서를 이용하여 대상 물체까지의 거리를 정확히 검출할 수 있는 장치가 연구 개발되고 있다. 그러나 이것은 근접거리 즉 0-100 mm 정도의 범위내에 있는 물체까지의 거리, 물체 표면의 경사각(inclination angle), 방향각(orientation angle), 위치 등을 검출할 수 없다. 따라서 이와 같은

정보를 검출하므로써 로봇을 이용한 생산 시스템에서 위치결정, 형상인식, 충돌방지 등에 사용될 수 있는 근접센서의 개발이 요구된다.

근접센서는 거리측정 센서의 일종으로 아주 가까운 영역 내에 있는 대상물의 공간적 상태를 측정하는 비접촉 감지기이다[1]. 이 센서는 물체와 직접 접촉하는 접촉식 센서(tactile sensor)와 전체적인 영상을 나타내는 비전 시스템(vision system) 사이의 센싱 (sensing gap)을 메꾸어 주는 중요한 역할을 하므로 차세대 지능 로봇 시스템에 있어 가장 중요한 센서 중에 하나이다[2]. 이러한 근접센서는 기본 원리에 따라 광학식과 전자기식과 초음파식 등이 있으며 그 특성에 따라 선택적으로 사용되고 있으나 주로 광학식이 주종을 이루고 있다.

현재까지 개발된 대부분의 광학식 근접 센서는 반사되는 광신호를 측정하는 방법을 사용한다. 가장 간단한 형태로는 대상물의 유무에 따라 단순한 2진 신호를 나타내는 광 스위치가 있고 좀 더 발전된 형태로는 광감지기를 들 수 있다. 이것은 Johnson이 감지 체적 기술(sensitive volume technique)을 이용하여 근접센서를

(1991년 2월 8일)접수

*고려대학교 전기공학과 교수

**전남대학교 전기공학과 부교수

***삼성전자

개발하였는데[3], 이것의 큰 단점은 감지기의 출력 전압이 거리의 함수로서 종 모양의 곡선을 나타낸다는 것이다. 그러므로 한개의 출력이 서로 다른 두개의 거리로 해석되지므로 혼란이 생긴다. 또 대상물 평면의 경사각과 방향각에 대해서도 출력이 영향을 받게 되는 결점을 가지고 있다.

이러한 결점을 보완하기 위해 Okada는 여러개의 광원과 한개의 감지기를 가진 근접센서를 개발하였다[4]. 그러나 이 센서의 단점은 신뢰도가 광원의 기하학적인 배열에 영향을 받는다는 점이다.

보다 성능이 우수한 근접센서로는 Kanade의 것과 Masuda의 것이 있다[1]. Kanade가 개발한 근접센서는 출력이 거리에 대해 거의 선형적으로 변화되고 또 확도(accuracy)가 우수하며 동작속도가 빠르다는 장점이 있으나 광비임의 촛점이 모여있는 45 mm 부근에서 이상이 발생하여 측정값의 신뢰도가 떨어지는 단점이 있고 장치의 가격이 너무 비싸다.

Masuda의 근접센서는 광원으로 6개의 적외선 LED를 설치하여 측정하려는 모드에 따라 그 중 몇개를 선택하여 사용하며 반사광을 포토 트랜지스터로 수광한다. 이 센서는 측정이 번거롭고 대상물까지의 방향과 반지름을 결정하려면 대상물에 수광부를 부착하여야 하므로 실제 현장에서 적용되기에는 무리가 있다.

그러므로 본 연구에서는 이 단점들을 보완하기 위해 반사법칙을 이용하여 감지 영역내에서 균일한 확도를 가지며 또한 거리와 경사각을 각각의 변화에 무관하게 측정할 수 있는 저렴한 광학식 근접센서를 개발하고 이에 관련된 광학적 모델과 측정 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 센서의 구성

본 연구에서 설계한 센서헤드(sensor head)의 기하학적인 형태는 그림 1과 같다. af, bf, cf, df는 렌즈의 중심을 지나며 렌즈의 면과 수직인 축 즉, 주축을 나타내며 a, b, c, d는 렌즈내부의 주축상의 점으로 광점이라 한다. 대상 물체 표면에 대해 θ 의 각도로 광속을 조사하는 \angle 의 광원과 렌즈 및 반사광로에 설치된 8개의 포토 트랜지스터 (A, B, C, ..., H)가 주된 구성요소이다. 광원은 가격이 저렴한 적외선 발광 다이오드를 사용한다.

광원과 렌즈 사이의 거리를 M이라 하고, 센서헤드의 중앙에서 광이 집중되는 점까지의 거리를 L, 광점사이의 거리를 W, 렌즈의 경사도를 R이라고 할때 이 M, L, W, R을 적절히 변화시켜 동작범위를 조절할 수 있다.

3. 측정 알고리즘

그림 1에서 XZ 평면상의 센서모 (sensor module)과 YZ 평면상의 센서모 은 동형이며 동작특성이 아주 동일하다고 본다. 그러므로 여기서도 XZ 평면상의 센서모에 대해서 대상물의 경사각 α 와 센서헤드의 중앙에서 대상물까지의 거리 즉, 사잇거리(gap distance) β 를 측정하는 알고리즘에 대해서 알아본다.

그림 2는 광원LED1과 LED2의 반사광축과 반사광의 분포를 나타낸 것이다. 광원에서 내는 광속을 렌즈를 통해 집중하여 θ 의 각도로 물체표면에 조사한다. 물체의 반사광은 반사법칙에 따라 반대방향으로 θ 각도로 반사된다. 반사광로내에는 각각의 반사광축을 끼우도록 A, B, C, D 4개의 포토 트랜지스터가 배치되어 각각의 입사되는 반사광의 강도에 따라 전압을 발생하며 그 발생된 전압의 크기가 A/D 변환기를 통해 검출된다.

그림 3과 같이 사잇거리가 L인 대상 물체의 표면이

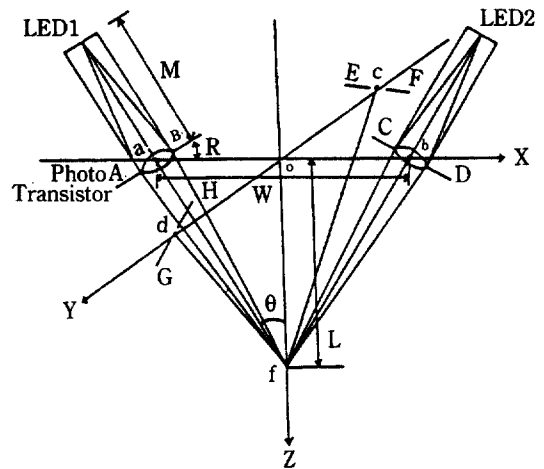


Fig. 1 Configuration of the sensor head

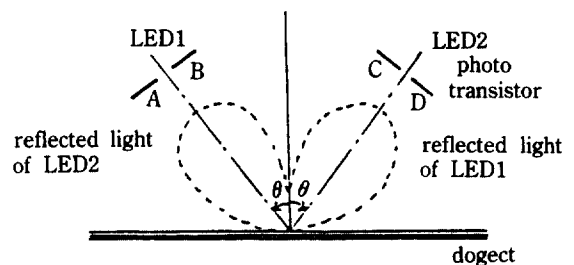


Fig. 2 Reflected light axis and distribution of reflected light

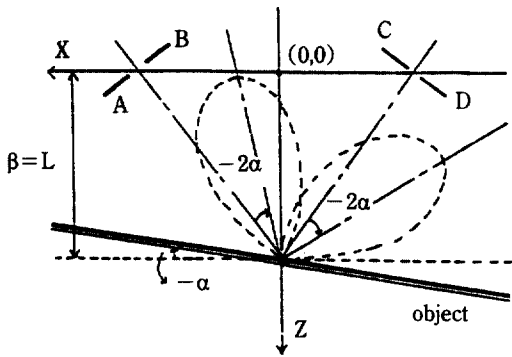


Fig. 3. Movement of reflected-light axis according to variation of inclined angle

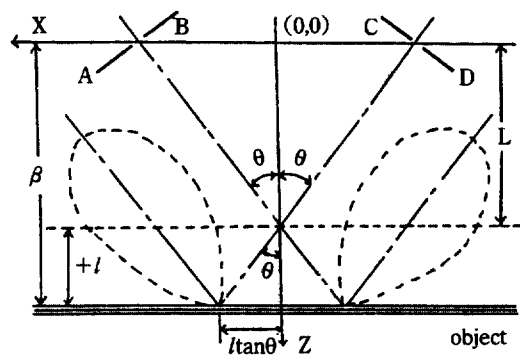


Fig. 5. Movement of reflected-light axis according to variation of gap distance

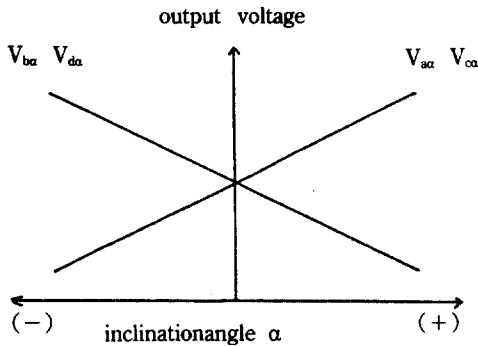


Fig. 4. Correlation of inclination angle with output of each photo transistor

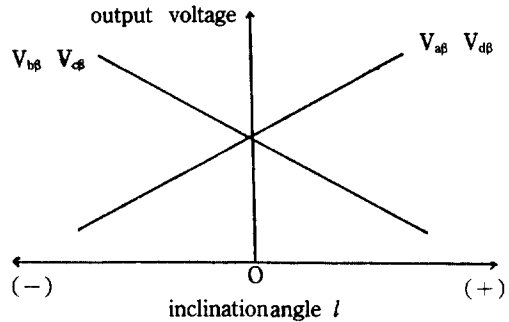


Fig. 6. Correlation of gap distance variation with output of each photo transistor

$\pm \alpha$ 만큼 경사된 경우에 각각의 반사광축은 $\pm 2\alpha$ 만큼 변한다. 이 결과로 4개의 포토 트랜지스터의 출력전압들은 그림 4와 같이 변한다.

물체 표면의 경사각이 일정하고 사잇거리 β 가 L에서 ± 1 만큼 변화하는 경우에는 그림 5와 같이 반사광 Z축이 좌우로 $\mp l \tan \theta$ 만큼 이동 하므로 포토 트랜지스터의 출력전압들은 그림 6과 같이 변화한다. 물체의 경사각과 사잇거리가 동시에 변하는 경우에는 위에서 언급한 변화가 동시에 일어나며 각 출력전압은 위 두변화를 모두 포함한 값을 나타내게 될 것이다.

이제 이들 출력전압의 측정치로부터 대상면의 경사각 α 과 사잇거리 β , 즉, 센서헤드 중앙에서 대상면까지의 거리를 계산해 낼 수 있는 측정 알고리즘을 유도한다.

3.1. 경사각 측정 알고리즘

경사각과 사잇거리가 동시에 변화하는 경우 포토 트랜지스터의 출력전압에는 이 두가지 영향이 동시에 나

타나게 된다. 즉

$$V_i = V_{in} + V_{ip}, \quad i = a, b, \dots, h \quad (1)$$

그림 4 및 6에서 보면 동일한 포토 트랜지스터 A와 C 및 B와 D는 X 축에 대경사각 변화에 대해서는 동일한 출력전압을 발생시키는 반면, 사잇거리의 변화에 대해서는 서로 다른 전압을 발생한다. 즉,

$$V_{ac} = V_{ca}, \quad V_{ba} = V_{da} \quad (2. a)$$

$$V_{ab} = V_{db}, \quad V_{bb} = V_{cb} \quad (2. b)$$

따라서 V_a 를 식 (3)과 같이 정의하면

$$V_a = (V_a + V_c) - (V_b + V_d) \quad (3)$$

이 V_a 는 경사각의 변화에만 의존하고 사잇거리의 변화

에는 무관한 값이 된다. 왜냐하면 식 (1), (2)로부터

$$V_a = (V_{aa} + V_{ca}) - (V_{ba} + V_{da}) \quad (4)$$

이기 때문이다. 또한 그림 4로부터 경사각 α 가 (+) 방향으로 변하면 V_a 는 양수값이 되면, 반대로 α 가 (-) 방향으로 변하면 V_a 는 음수값이 된다.

그러므로, 실험을 통해서 경사각 α_i 와 그에 상응하는 V_{ai} 값들의 집합(V_{ai}, α_i)를 구하여 이 두값 사이의 관계식을 구하면 이 관계식으로부터 측정된 V_a 에 대응하는 α 값을 계산 할 수 있다.

이 관계식을 구하는데는 곡선 맞춤 (curve fitting) 방법을 사용한다. 실험 데이터의 집합 (V_{ai}, α_i)에 대해서 관계식을 다음과 같이 직선식으로 정의한다.

$$\alpha^* = b V_a + a \quad (5)$$

여기서 α^* 는 관계식에 의해서 계산된 경사각을 나타낸다.

이제 이 직선의 식에서 파라미터 a 와 b 를 결정하기 위해서 n 개의 측정값들에 대해서 실제 측정값 α_i 와 그때의 계산값 α_i^* 와의 편차의 제곱합이 최소화 되도록 정한다. 즉,

$$\begin{aligned} S(a, b) &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i - bV_{ai} - a)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

라 하면 a, b 는 다음의 연립방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial a} = - \sum_{i=1}^n 2(\alpha_i - a - bV_{ai}) = 0 \quad (7. a)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = - \sum_{i=1}^n 2V_{ai}(\alpha_i - a - bV_{ai}) = 0 \quad (7. b)$$

이 식들을 정리하면 다음과 같다.

$$na + \left(\sum_{i=1}^n V_{ai} \right) b = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (8. a)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \right) a + \left(\sum_{i=1}^n V_{ai}^2 \right) b = \sum_{i=1}^n V_{ai} \alpha_i \quad (8. b)$$

이 두 식은 a 와 b 에 대한 2원 1차 방정식이므로 이 연립 방정식으로 구한 a, b 는 식 (6)의 $S(a, b)$ 가 최소가 되도록 한다. a, b 의 값이 결정되면 이제 식 (5)에 의해서

V_a 값으로부터 경사각 α 를 계산할 수 있다.

똑같은 방법으로 YZ 평면상의 센서 모 (EFGH)의 출력을 이용하여 Y 축상의 경사각도 측정할 수 있다.

3.2 사잇거리 측정 알고리즘

그림 4 및 6을 다시보면 출력 V_a 와 V_d 및 V_b 와 V_c 는 물체의 거리변화에 대해서 동일한 특성을 나타내는 반면 경사각 변화에 대해서는 반대의 특성을 나타내므로

$$V_\beta = (V_b + V_c) - (V_a + V_d) \quad (9)$$

라고 정의하면 이 V_β 는 사잇거리의 변화에만 관계하고 경사각 변화에는 영향을 받지 않게 된다. 즉, 식 (2)로부터

$$V_\beta = (V_{b\beta} + V_{c\beta}) - (V_{a\beta} + V_{d\beta}) \quad (10)$$

이다. 그림 6으로부터 β 가 L 보다 크면 즉, l 이 (+) 방향으로 변하면 V_β 는 음수값이 되며, 그 반대면 V_β 는 양수값이 된다.

경사각을 구할때와 마찬가지로 사잇거리 β 와 전압 V_β 사이의 관계식을 구할 수 있다. 사잇거리 β 는 항상 양수이므로 집합 ($V_{\beta i}, \beta_i$)에 대해서 다음과 같은 곡선 맞춤을 사용한다.

$$\beta^* = c \times d^{V_\beta} \quad (11)$$

여기서 β^* 는 관계식에 의해서 계산된 사잇거리를 나타낸다.

이제 이 지수 곡선식에서 파라미터 c 와 d 를 결정하기 위해서는 먼저 식 (11) 양변에 상용대수를 취하여 직선식으로 변환한다.

$$\beta' = c' + d' V_\beta \quad (12)$$

여기서

$$\beta' = \log \beta^*, \quad c' = \log c, \quad d' = \log d \quad (13)$$

이제 실험 데이터 집합 ($V_{\beta i}, \log \beta_i$)에 대해서 3.1절에서와 같은 방법으로 먼저 c' 와 d' 를 결정한 후 c 와 d 는 다음 식으로 구해진다.

$$c = 10^{c'}, \quad d = 10^{d'} \quad (14)$$

이렇게 해서 c 와 d 를 구했으면 이제 식 (11)에 의해서 V_0 값으로부터 사잇거리 β 를 계산할 수 있다.

3.3 평면 맞춤 알고리즘

그림 1과 같이 센서헤드를 중심으로 공간좌표를 설정하면 사잇거리 β 는 대상면이 Z 축과 만나는 점 즉, Z 축상의 절편 z_1 과 같게 된다. 또한 XZ 평면상 센서모에 의해 측정된 대상면의 X 축과의 경사각을 α_1 이라 하고 YZ 평면상의 센서모에 의해 측정된 대상면의 Y 축과의 경사각을 α_2 라고 하면 a_1, a_2 및 β 를 사용하여 센서헤드에 대한 대상면의 평면방정식을 구할 수 있는데 이것을 평면 맞춤 알고리즘(plane fitting algorithm)이라 한다.

α_1 과 α_2 가 모두 0이 아닌 경우에는 z_1 과 α_1, z_1 과 α_2 를 이용하여 X 축상의 절편 z_1 과 Y 축상의 절편 y_1 을 구할 수 있다. 세점 $P_1(x_1, 0, 0), P_2(0, y_1, 0), P_3(0, 0, z_1)$ 으로부터 평면의 단위 법선벡터 \vec{n} 을 구하면 다음과 같다.

$$\vec{n} = \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}}{|\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}|} = (a, b, c) \tag{15}$$

그러므로 대상면의 평면 방정식은 식 (16)과 같다.

$$ax + by + cz = d \tag{16}$$

여기서 a, b, c 는 평면의 법선벡터 \vec{n} 의 X, Y, Z 축상의 성분을 나타내며 d 는 평면상에 있는 세점 중 임의의 한점을 대입하여 결정한다.

만일 α_1 이나 α_2 중 어느 하나가 영인 경우에는 X 축 또는 Y 축 절편 중 어느 하나만 결정된다. 이때는 z_1 과 X 축 또는 Y 축의 절편을 잇는 직선의 방정식을 세우고 이에 직교하면서 원점을 통과하는 직선의 방향벡터(direction vector)를 구하여 평면의 법선벡터로 사용하면 된다. 또한 α_1 과 α_2 가 모두 영이면 평면은 z_1 을 지나며 Z 축에 수직인 평면이 대상면이 된다.

센서헤드에 대한 대상면의 공간적인 상태는 이 세가지 경우 중 어느 하나에 속한다. 이들 각각에 대한 평면 맞춤 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

3.3.1 α_1 과 α_2 가 모두 영이 아닌 경우

그림 7과 같이 XZ 평면에서 Z 축의 절편 z_1 과 경사각 α_1 과 α_2 가 주어지면 X 축 절편 x_1 과 Y 축 절편 y_1 은 다음과 같이 계산된다.

$$x_1 = z_1 \frac{\cos\alpha_1}{\sin\alpha_1} \tag{17. a}$$

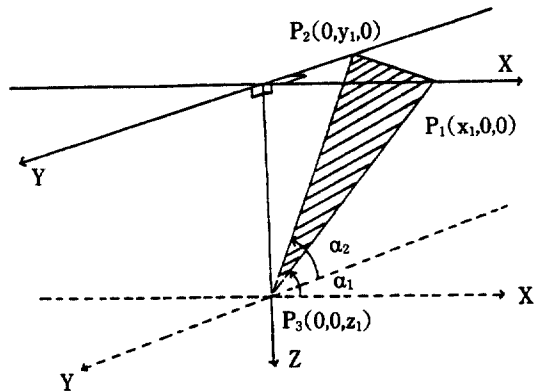


Fig. 7 Object surface with nonzero inclination angles α_1 and α_2

$$y_1 = z_1 \frac{\cos\alpha_2}{\sin\alpha_2} \tag{17. b}$$

이제 공간상의 세점 $P_1(x_1, 0, 0), P_2(0, y_1, 0), P_3(0, 0, z_1)$ 으로 구성되는 평면의 법선벡터 \vec{n} 을 식 (15)에 의해서 구하면 다음과 같다.

$$\vec{n} = \left(\frac{y_1 z_1}{\eta}, \frac{x_1 z_1}{\eta}, \frac{x_1 y_1}{\eta} \right) \tag{18. a}$$

$$\eta = (y_1 z_1)^2 + (x_1 z_1)^2 + (x_1 y_1)^2 \tag{18. b}$$

따라서 식 (16)로부터 대상면의 평면방정식은

$$\frac{1}{\eta} (y_1 z_1) x + \frac{1}{\eta} (x_1 z_1) y + \frac{1}{\eta} (x_1 y_1) z = d \tag{19}$$

이며 이 식에 평면상의 한점 $(0, 0, z_1)$ 을 대입하여 d 값을 구하여 정리하면 평면방정식은 다음과 같다.

$$y_1 z_1 x + x_1 z_1 y + x_1 y_1 z = x_1 y_1 z_1 \tag{20}$$

3.3.2 α_1 과 α_2 중 어느 하나가 영인 경우

그림 8과 같이 우선 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$ 인 경우를 먼저 고려한다. 두 점 $P_1(x_1, 0, 0)$ 과 $P_3(0, 0, z_1)$ 을 통과하는 직선의 식과 이 직선에 직교하면서 원점을 통과하는 직선의 식은 각각 다음과 같다.

$$z = -\frac{z_1}{x_1} x + z_1 \tag{21. a}$$

$$z = - \frac{x_1}{z_1} x \quad (21. b)$$

이 두직선의 교점 $Q(x_d, 0, z_d)$ 의 좌표를 구하면 다음과 같다.

$$x_d = \frac{x_1 z_1^2}{x_1^2 + z_1^2} \quad z_d = \frac{x_1^2 z_1}{x_1^2 + z_1^2} \quad (22)$$

대상면에 수직하면서 원점을 통과하는 직선식의 방향벡터가 곧 이 평면의 법선벡터가 되며 그것을 구하면 다음과 같다.

$$\vec{n} = (a, b, c) = \left(\frac{z_1}{x_1^2 + z_1^2}, 0, \frac{x_1}{x_1^2 + z_1^2} \right) \quad (23)$$

따라서 식 (16)로부터 이 대상면의 평면 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{z_1}{x_1^2 + z_1^2} x + \frac{x_1}{x_1^2 + z_1^2} z = d \quad (24)$$

d 의 값은 이 평면위의 한점 $(0, 0, z_1)$ 을 대입하여 구할 수 있으며 그 결과를 정리하면 평면 방정식은 식 (25)와 같다.

$$z_1 x + x_1 z = x_1 z_1 \quad (25)$$

$\alpha_1=0$ 이고 $\alpha_2=0$ 인 경우도 이와 동일한 방법으로 구할 수 있다. 대상면이 두 점 $P_2(0, y_1, 0)$ 과 $P_3(0, 0, z_1)$ 을 통과한 경우 이 대상면의 평면 방정식은 식 (26)과 같다.

$$z_1 y + y_1 z = y_1 z_1 \quad (26)$$

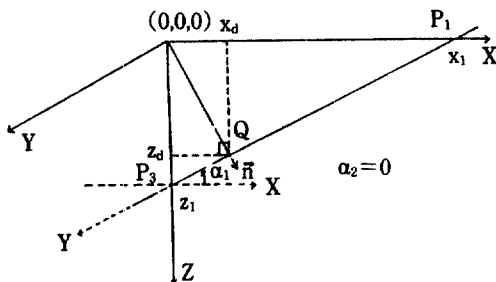


Fig. 8 Object surface with only nonzero inclination angle α_1

3.3.3 α_1 과 α_2 모두가 영인 경우

이 경우는 그림 9처럼 대상면이 XY평면에 평행인 경우, 즉 Z축에 수직한 경우에 해당된다. 따라서 법선 벡터 성분 중 $a=b=0$ 이므로 곧 바로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = z_1 \quad (27)$$

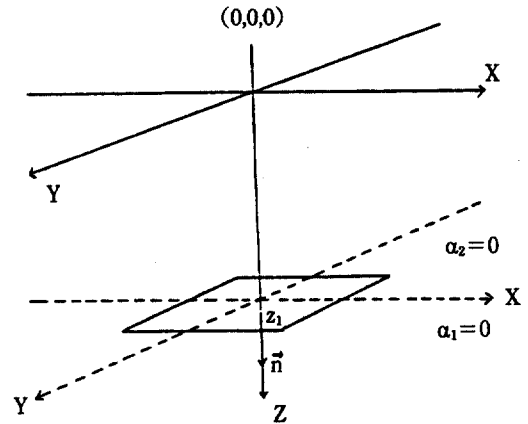


Fig. 9 Object surface in parallel with XY plane($\alpha_1=\alpha_2=0$)

4. 실험 장치의 구성

4.1 센서헤드의 제작

본 연구에서 설계 제작한 센서 헤드의 구성은 그림 1과 같으며 각 파라미터 값은 표 1과 같다.

Table 1. Parameters of the manufactured sensor head

Parameters	Value
Distance between light source and lens(M)	35 mm
Distance between lenses(W)	46 mm
Distance between center of sensor head and focus of lens(L)	35 mm
Inclined angle of lens(R)	30°

4.2 광학계의 구성

4.2.1 렌즈의 선정

렌즈는 광원과 렌즈사이의 거리 M과 광이 접속되는 거리 L이 결정되면 다음과 같은 공식에 의해서 적절한 렌즈를 선택할 수 있다.

$$\frac{1}{M} + \frac{1}{L} = \frac{1}{f} \quad (28)$$

여기서 f 는 렌즈의 초점 거리를 나타낸다. 본 실험에서는 $M=35(\text{mm})$, $L=35(\text{mm})$ 이므로 $f=17.5(\text{mm})$ 인 렌즈를 사용하였다.

4.2.2 발광부 및 수광부의 선정

발광부의 광원으로서의 외광부의 영향을 줄이기 위하여 적외선 발광다이오드를 사용하였고 수광부는 포토 트랜지스터를 사용하였다. 본 실험에 사용된 적외선 발광다이오드와 포토 트랜지스터의 특성은 표 2와 같다.

Table 2. Characteristics of LED and photo transistor

title	type	directional angle	luminous wave length
LED	EL-1 KL	$\pm 5^\circ$	940(nm)
Photo Tr.	ST1-1MLB	$\pm 70^\circ$	specto-sensitivity
			500-1050(nm)
native current	native voltage	luminous power	
100(mA)	1.7(mV)	200(mW)	
collector loss	maximum and minimum light current	peak sensitivity wave length	
100(mW)	5(mA) 0.5(mA)	880(nm)	

4.3 센싱 시스템의 구성

각 LED를 순차적으로 구동시키고 각 포토 트랜지스터 (A-H)의 출력을 측정하기 위해 8086마이크로 프로세서를 사용하여 센싱 계통을 구성하였으며 이 계통의 블록선도는 그림 10과 같다.

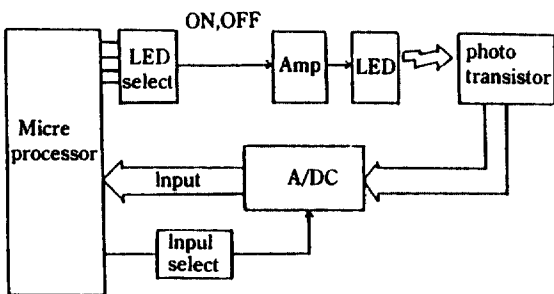


Fig. 10 Block diagram of the sensing system

4.4 소프트 웨어의 구성

센싱 계통을 구동시키고 대상물의 공간적인 상태를 측정하는 프로그램은 다음과 같은 순서로 구성되었다. 4개의 LED를 순차적으로 구동시키면서 포토 트랜지스터의 출력($V_a - V_b$)을 읽어들이며 각 센서모에 대해 식 (1)과 (9)에 의해 V_a 와 V_b 를 구한다. 이 값을 이용하여 3장의 측정 알고리즘에 의해 유도한 곡선 맞춤식을 사용하여 XZ평면의 센서모의 경사각과 사잇거리 α_1 과 β_1 을 구하고 또 YZ평면의 또 다른 센서모의 경사각과 사잇거리 α_2 와 β_2 를 구한다. 이때 β 는 각 모로부터 구해진 값들의 평균치로 한다. 이 세 개의 측정값을 이용하여 3.3절의 평면 맞춤 알고리즘에 의해 센서헤드에 대한 대상면의 공간적인 상태를 나타내는 평면 방정식을 구할 수 있다.

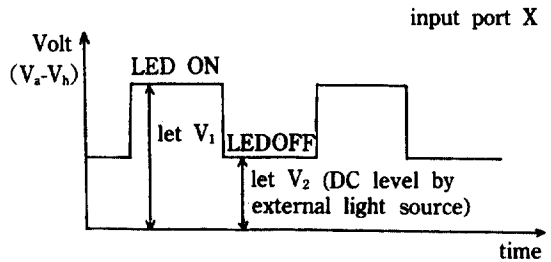


Fig. 11 The output signal of sensor

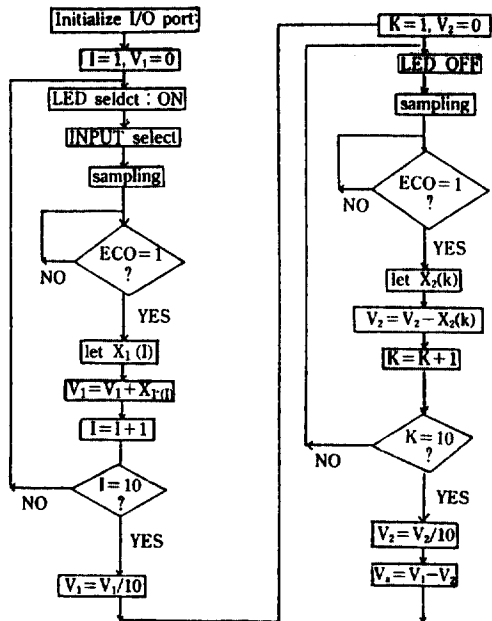


Fig. 12 Flow chart for measuring the output of each photo transistor

Go to initialize I/O port
in order to find $V_o - V_n$

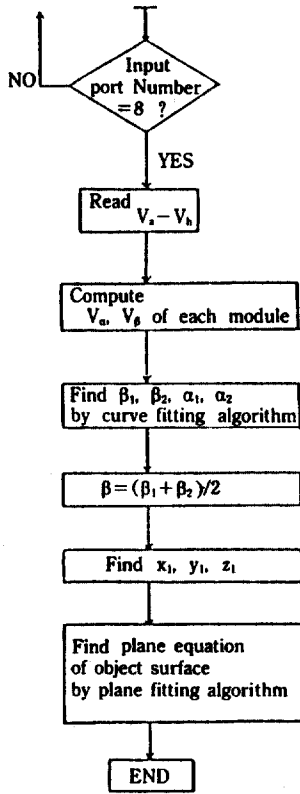


Fig. 13 Flow chart for curve fitting and plane fitting algorithm

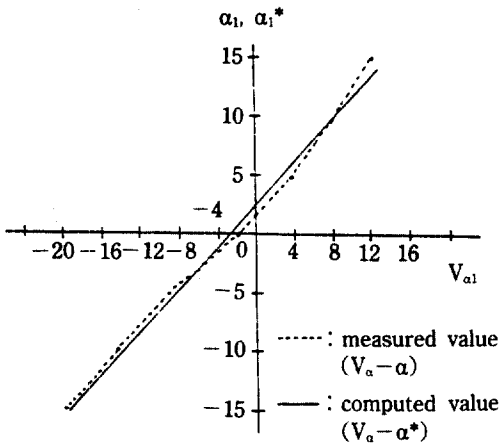


Fig. 14 Correlation of the V_{α_1} with the inclined angle α_1, α_1^* about X axis when gap distance $\beta=30(\text{mm})$

여기서 포토 트랜지스터의 출력($V_a - V_n$)은 노이즈로 인한 영향을 줄이기 위해 10번 측정하여 평균을 취하였다. 또 각 LED는 순차적으로 ON-OFF되므로 각 포토 트랜지스터에 수광된 신호도 똑같은 성분이어야 하나 외광부의 영향에 의해 DC레벨이 생긴다. 이러한 영향을 없애기 위해 그림 11과 같이 LED를 ON한 상태에서 입력 포트의 값을 읽어들이고 다시 OFF한 뒤 값을 읽어 들여 두 값 사이의 차를 구해 그 값을 신호값으로 사용하였다.

사잇거리 β 가 30(mm)일 때 X축상의 경사각 α_1 에 대한 출력 V_{α_1} 값을 그리면 그림 14의 점선과 같다. 여기서 V_{α_1} 은 각 입력 포트의 디지털 값을 기준전압(5V)에 대해 전압으로 환산하여 적절한 상수 k를 곱해 정수화하고 그 값들을 식 (3)에 대입하여 구한 값이다. 이 실험자료로부터 곡선 맞춤 알고리즘에 의한 보정식을 구하면 다음과 같다.

$$\alpha_1^* = 0.8783354 V_{\alpha_1} + 2.885959 \quad (29)$$

이 식에 의해 계산된 α_1^* 값을 그림으로 나타내면 그림 14의 실선과 같다.

5. 실험결과 및 고찰

본 실험에 사용하기 위해서 설계제작된 센서헤드는 4.1절에서 제시했다. 이 센서의 성능을 검토하기 위해서 경사각, 사잇거리 및 형상인식 등을 측정하였다. 이 값들의 실제 측정값과 3장의 측정 알고리즘에 의해서 계산값들을 비교함으로써 본 센서시스템의 성능을 검토한다. 이 실험에 사용된 대상물체는 하얀 종이를 입힌 아크릴 판이다.

5.1 경사각 측정

그림 15는 사잇거리 β 가 25(mm)일 때와 30(mm)일 때의 경사각 α_1 와 V_{α_1} 의 관계를 도시한 것이다. 이 그림을 통해서 3.1절에서 설명한 것처럼 경사 각은 사잇거리의 변화에 거의 무관함을 알 수 있다.

또한 각 포트(A-H)의 디지털 값을 전압으로 환산하고 적절한 상수를 k를 곱해 정수화하여 사용했기 때문에 V_{α_1} 는 측정 횟수와 입력 신호의 미소 변동에 대한 편차가 거의 없이 일정했다. 본 실험에서는 k값을 10으로 취했다. 또한 입력 신호들은 LED가 ON일 때와 OFF일 때의 전압차를 신호값으로 사용하였기 때문에 V_{α_1} 는 외부광의 영향도 거의 받지 않았다.

그림 15에서 V_{α_1} 와 α_1 의 관계가 실측치에서 비선형이고

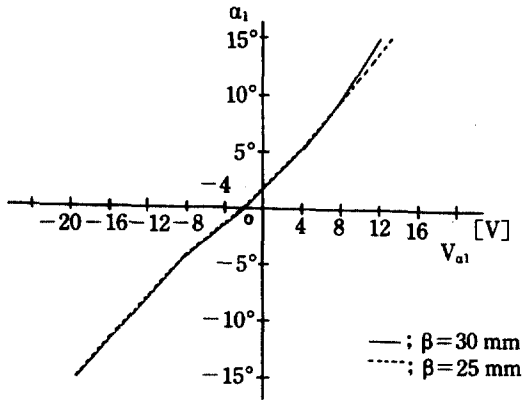


Fig. 15 Correlation of the V_{α_1} with the inclined angle α_1 about X axis according to variation of the distance

비대칭으로 나타난 것은 렌즈의 수차, 제작상 센서 헤드의 완전한 기하학적인 대칭성의 결여, 구성 소자들의 포화 특성 등에 기인한 것으로 추정된다.

5.2 사잇거리 측정

경사각들을 0°로 고정하고 센서헤드의 중심에서 대상면까지의 거리, 즉 사잇거리 β 값의 변화에 대한 출력 V_β 값을 정리하여 식 (11)의 보정식을 곡선 맞춤 알고리즘에 의해서 구하면 다음과 같다.

$$\beta^* = 3.440979 * (0.9914714)V_\beta \tag{30}$$

이 식을 이용하여 계산한 사잇거리 β^* 값과 실측한 β 를 그림으로 나타내면 그림 16과 같다. 이 그림으로부터 실측치와 계산치가 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 17은 X축상의 경사각 α_1 를 0°에서 10° 만큼 변화시킨 후 β 와 V_β 의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보듯이 사잇거리 β 는 경사각과 무관하게 측정할 수 있음을 보여 주고 있다.

V_β 와 β 의 관계를 이상적인 경우 β 가 30 mm일 때 그림 6에서 보면 V_β 는 0이 되어야 한다. 그러나 β 가 34 mm일 때 V_β 가 0이 되었다. 이것은 앞 절에서도 설명했듯이 렌즈가 정확히 동일하지 않고 또 센서헤드의 완전한 대칭성을 얻을 수 없기 때문에 나타난 것이다. 보다 완벽하게 센서를 구성한다면 이론치와 계산치가 일치할 것이다. 그러나, 사잇거리를 측정하는 데는 이것은 거의 문제가 되지 못한다. 왜냐하면 주어진 센서헤드에 대해서 고유한 보정식이 얻어지기 때문이다.

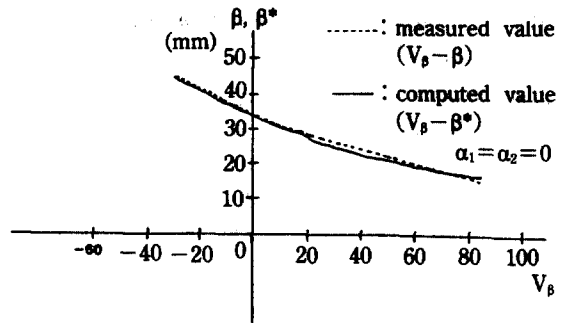


Fig. 16 Correlation of the V_β with the distance β when the inclined angles are 0°

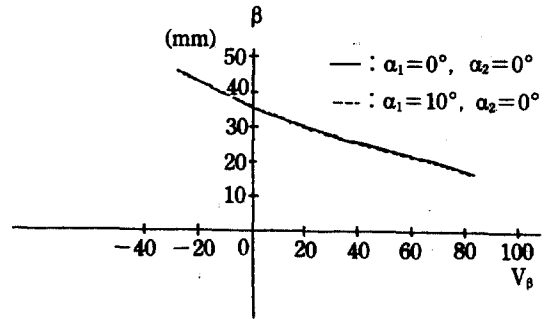


Fig. 17 Correlation of the V_β with the distance β according to variation of the inclined angles

5.3 형상인식과 평면맞춤

본 센서헤드를 기계적으로 스캔(scan)하여 대상물의 윤곽을 감지할 수 있다. 그림 18에서 그림 20까지는 평편한 표면을 가진 대상물을 여러 각도로 놓고 그것의 윤곽을 측정하는 것이다. 그림 18은 사잇거리가 23 mm이고 대상면의 X축상의 경사각 α_1 과 Y축상의 경사각 α_2 가 모두 0인 대상면을 좌에서 우로 1 mm 간격으로 스캔하면서 측정된 사잇거리를 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이 사잇거리의 측정값이 거의 일정하여 대상면의 윤곽이 평면임을 알 수 있다.

그림 19와 20은 Y축상의 경사각 α_2 는 0으로 하고 X축상의 경사각 α_1 을 +10°와 -7°로 한 경우 대상면을 좌에서 우로 1 mm 간격으로 스캔하면서 측정된 사잇거리를 나타낸 것이다.

표 3은 α_1 이 0°인 경우 α_2 가 0°, 5° 및 10°일 때 3.3 점의 평면 맞춤 알고리즘을 이용해서 구한 평면의 방정식을 나타낸 것이다.

끝으로, 그림 21은 원통형 물체의 윤곽을 측정하는 것

Table 3. Examples of plane fitting algorithm

$(\alpha_1=0)$	
The inclined angle about Y axis(α_2)	Plane equation
0°	$z=2.33$
5°	$2.33y+2.66z=62.0945$
10°	$2.33y+13.22z=30.803$

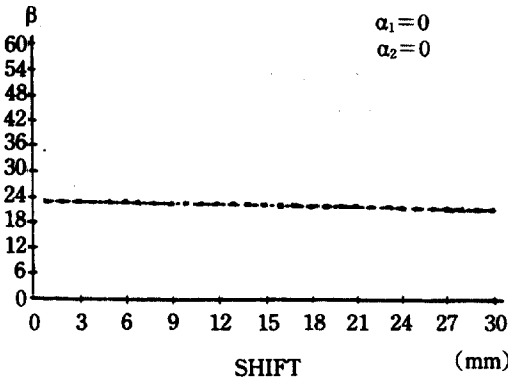


Fig. 18 Shape measurement of the plane whose gap distance is 23 mm and inclined angles are 0°

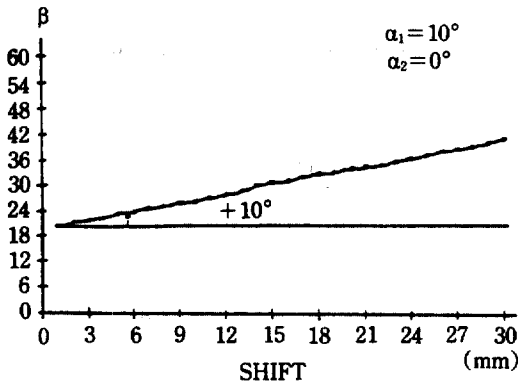


Fig. 19 Shape measurement of the plane whose inclined angle about X axis is $+10^\circ$

이다. 물체면상의 점선의 기울기가 20° 이하에서는 실물형태와 같은 결과를 구할 수 있었으며 점선의 기울기가 20° 이상인 부분의 윤곽은 측정하지 않았다.

6. 결 론

본 연구에서는 반사법칙을 이용하여 거리와 경사각을 각각의 변화에 무관하게 측정할 수 있는 저렴한 광학식

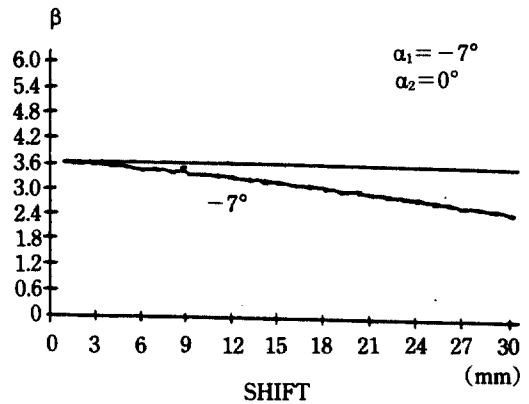


Fig. 20 Shape measurement of the plane whose inclined angle about X axis is -7°

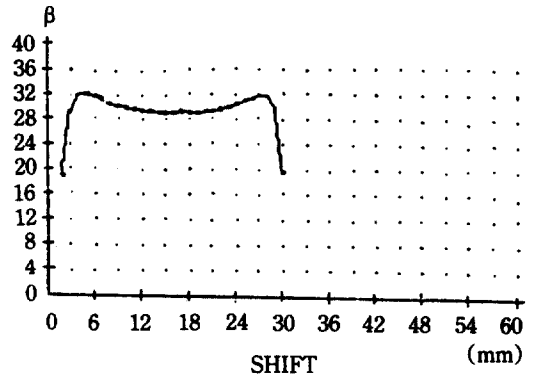


Fig. 21 Shape measurement of the cylindrical object

근접센서를 개발하고 이에 관련된 광학적 모델과 측정 알고리즘을 제안하였으며, 센싱계통을 구성하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 실제 제작된 광학식 근접센서를 사용하여 경사각과 사잇거리를 계산할 수 있는 보정식은 각각 다음과 같다.

$$\alpha = 0.8783354V_\alpha + 2.885959$$

$$\beta = 3.440979 \times (0.9914714)V_\beta$$

2) 경사각과 사잇거리를 각각의 변화에 무관하게 정확히 측정할 수 있다.

3) 경사각과 사잇거리를 사용하여 대상물체 평면의 공간적인 상태를 계산할 수 있으며 또 기계적으로 스캔함으로써 물체의 형상도 알 수 있다.

4) 본 실험에서 제작된 센서의 동작범위는 사잇거리 β 는 15(mm)에서 45(mm)까지이며, 경사각 α 는 -15° 에서 $+15^\circ$ 까지이다. 그러나 표 1에 나타난 센서헤드의

파라미터를 변화시켜 동작범위를 조절할 수 있다.

5) 저렴한 적외선 발광 다이오드와 포토 트랜지스터로 설계되어서 매우 경제적이다.

6) 본 연구에서 제작된 센서는 측정이 정확하며 안정되어 있으므로 로봇의 매니 레이터에 설치하여 이동 경로상에 존재하는 원치않는 물체와의 충돌을 방지하고, 대상물체 표면의 공간적인 상태에 따라 end effector의 자세를 결정하여 물체를 정확하게 파지하는데 이용될 수 있다.

7) 끝으로 대상면이 정반사를 하지 못한 경우에는 측정치가 정확하지 않으며 이 점에 관해서는 계속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Takeo Kanade and Tomas M. Sommer, "An optical proximity sensor for measuring surface position and orientation for Robot Manipulation", *Robotic Research*, pp. 301-307, 1984.
 2. Rysuke Masuda and Kensuke Hasegawa, "A design approach to total sensory robot control", *Sensor Review*, January, pp. 20-24, 1982.
 3. Ryosuke Masuda, "MULTI-FUNCTIONAL OPTICAL PROXIMITY SENSOR BY USING PHASE INFORMATION", 85 ICAR, pp. 169-176.
 4. R. S. Longhurst, "Geometrical and physical optics", 3rd. ed.
 5. Okata, T. "Development of an Optical Distance Sensor for Robots", *Robotics Research* 1(4) pp. 3-14, 1982.
 6. 센서 활용 사례집, 일본 정보조사회 센서 기술 편집부 편, "물체의 경사, 거리의 비접촉 검출", pp. 429-431.
1. Takeo Kanade and Tomas M. Sommer, "An optical