

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME96-D-08)에 의하여 연구되었음

2-D 슬릿광 비전 센서를 이용한 물체의 자세 측정

김정관*, 한명철**

The Position Estimation of a Body Using 2-D Slit Light Vision Sensors

Jung-Kwan Kim*, Myung-Chul Han**

ABSTRACT

We introduce the algorithms of 2-D and 3-D position estimation using 2-D vision sensors. The sensors used in this research issue red laser slit light to the body. So, it is very convenient to obtain the coordinates of corner point or edge in sensor coordinate. Since the measured points are normally not fixed in the body coordinate, the additional conditions, that corner lines or edges are straight and fixed in the body coordinate, are used to find out the position and orientation of the body. In the case of 2-D motional body, we can find the solution analytically. But in the case of 3-D motional body, linearization technique and least mean squares method are used because of hard nonlinearity.

Key Words : Position Estimation (자세측정), Laser Slit Light (레이저 슬릿광), Vision Sensor (비전 센서), Transformation matrix (변환행렬), Sensor coordinate (센서좌표계), Reference coordinate (기준좌표계), Body coordinate (물체좌표계), Sensor Calibration (센서보정), Feature Point(특징점)

1. 서론

열악한 환경이나 인간이 직접 작업을 수행하기에 곤란한 일들의 자동화에 비전 센서가 많이 사용되고 있다. 이러한 비전 시스템은 제조 공정에 있어서 효율의 증대 및 특히 조립과 같은 공정에 큰 유연성을 제공한다. 예를 들어, 로봇-비전 시스템은 매우 높은 정밀도를 요구하거나 외관 요소가 많은 작업의 자동화에서 작업대상물의 정확한 위치 및 상태를 파악할 수 있게 한다. 이러한 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 작업경로에 대한 정확한 3-D 정보가 필요하며, 많은 경우에 있어서 다중 센서 시스템에서 얻은 데이터로부터 추출할 수 있다

⁽¹⁻⁴⁾ 로봇-비전 시스템에 대한 많은 연구에서 공통적인 부분은 센서 보정(Sensor Calibration)이다. 이것은 센서좌표계(Sensor coordinate)와 기준좌표계(Reference coordinate) 간의 변환관계를 구하는 것으로서 우리는 이러한 센서 보정을 통하여 센서좌표계에 대한 측정 데이터를 원하는 임의의 좌표계에 대한 값으로 변환할 수 있다. 센서좌표계가 공간상에 고정되어 있는 경우는 오프-라인 상에서 보정을 위한 매개물(Calibration Reference Object)에 대해 몇 회의 측정을 수행하여 두 좌표계간의 변환관계를 구한다. 이와는 달리 센서를 로봇의 말단부(End-Effector) 등에 부착하여 측정하기 힘든 부분을 이동하며 측정하기도 한다. 최근에는 이러한 경우,

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부

특별한 매개물 없이 자체 보정(Self-Calibration) 작업을 수행하도록 하는 연구도 활발하다⁽⁵⁾. 특히 이러한 기술은 보정을 위한 적절한 매개물을 찾기 힘든 원격 조정용 로봇의 경우에 매우 유용한 기술이라고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 센서는 2-D 비전 센서이며, 일반적인 비전 카메라와는 달리, 자체 광원으로서 'Red Laser Slit Light'을 사용한다. 이 센서는 슬릿광을 대상물에 비춰 반사된 이미지로부터 2차원 데이터를 얻는 방식으로서 특히 불체의 깎여진 부분(Corner)이나 선단(Edge)의 측정에 편리한 장점이 있다. 센서 내부에는 CCD Matrix가 내장되어 있으며, 측정 영역과 CCD Matrix 간의 보정이 되어 있다. 본 논문에서는 2-D 비전 센서를 나중으로 사용하여 공간상에 위치한 물체의 기준좌표계에 대한 자세를 측정하는 알고리즘을 소개한다⁽⁶⁾. 물체의 자세를 표현하기 위하여 공간상에 기준좌표계를 정하고 그에 대한 물체의 초기 위치 및 방위를 설정한다(정상상태의 정의). 물체가 기준좌표계에 대하여 운동하였을 때 비전 센서로부터 얻은 데이터를 이용하여 기준좌표계와 물체상에 고정된 물체좌표계 간의 변환행렬을 구한다. 먼저, 물체가 2-D 운동을 할 경우에 관하여 기술하고, 다음으로 물체의 3-D 운동에 대한 자세측정 알고리즘을 제시한다. 물체가 2차원 운동을 할 경우는 비교적 간단히 해결할 수 있으나, 3-D 운동의 경우는 조건식의 강한 비선형성으로 인해 해석적인 해를 구하기가 매우 어려우므로 선형화를 통해 해결한다. 선형화로 인한 오차는 사용하는 센서의 개수를 증가시켜 선형방정식의 최소자승법의 해를 구하므로써 줄일 수 있다⁽⁷⁾. 이러한 로봇-비전 시스템은 자동화 라인에서 로봇 좌표계에 대한 작업대상물 상의 정확한 작업 경로의 측정에 유용하게 응용될 수 있다.

2. 센서의 선정 및 보정(Calibration)

2.1 센서의 선정 및 측정부위의 선택

본 연구에서 사용한 센서는 2-D 비전 센서이며 일반적인 비전 카메라와는 달리 광원으로서 '레이저 슬릿광'을 사용한다. 따라서 대상물에서 반사된 빛으로부터 얻는 이미지는 선(line)의 형상이다. Fig. 1에서, 레이저 다이오드로부터 슬릿광이 주사되면 FOV(Field of View : 측정 가능 범위)내에 위치한 측정물에 비추지며 그로부터 반사된 선 모양

의 이미지는 센서 내부에 장착된 CCD Matrix에 보내진다. CCD Matrix 상의 임의의 위치는 FOV와 1 : 1 대응되어 있으며 이러한 보정(Calibration)은 센서 구입 시 소프트웨어로 제공된다. 따라서 우리는 이렇게 얻어진 이미지 데이터로부터 측정된 코너 또는 선단의 좌표값을 센서좌표계에 대해 산출할 수 있다. 센서좌표계의 정의는 슬릿광이 나아가는 방향을 z축, 센서의 긴 방향을 x축으로 정의하며 오른손 법칙에 의해 y축이 결정된다. 센서좌표계의 원점은 FOV의 중앙으로 설정되어 있다. 이 센서는 홀(hole)을 측정하거나 측정대상물에 마크(mark point)를 부착하여 측정할 수도 있지만, 광원이 레이저 슬릿광이라는 특성으로 인해, 코너점(Corner Point)이나 선단(Edge Point)을 쉽게 측정할 수 있는 특징이 있다. Fig 2의 a)와 같이 센서로부터 나온 레이저 슬릿광이 측정물의 코너 라인에 비추지면 측정물에 레이저 라인이 생기며, 그에 대응하는 CCD Matrix 상의 이미지가 Fig 2의 b)와 같이 모니터에 나타난다. Fig 2의 b)에서, 측정된 코너점의 위치는 표시된 두 직선이 만나는 곳이다. 모니터 상의 코너점은 CCD Matrix 상의 좌표값(pixel 단위)으로 표현되어진 후 다시 센서좌표계에 대한 좌표값(mm)으로 변환된다. 특히 이와 같은 구조의 센서에서는 측정점이 항상 센서로부터 주사되는 슬릿광의 평면 위에 존재하므로 측정된 점의 x축에 대한 좌표값은 항상 '0'으로 출력된다.

본 논문에서는 물체의 자세측정을 위하여 슬릿광 타입의 광원을 가지는 센서를 사용하며, 측정부위로서 Fig 2와 같은 코너 라인을 선택하였다. 그리고 코너점의 좌표를 계산하기 위한 알고리즘(코너 알고리즘)을 개발하였다.

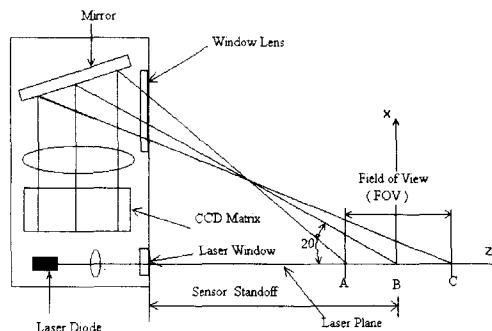
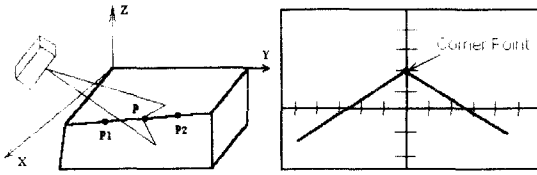


Fig. 1 Structure of Laser Sensor



a) Corner Measurement b) Image on CRT

Fig. 2 Corner Measurement

2.2 센서좌표계와 기준좌표계 사이의 보정

초기에 센서에 의해 측정된 점의 좌표값은 센서 좌표계 {s}에 대한 값이며, 우리는 이것을 기준좌표계 {r}에 대한 값으로 변환하여야 한다. 이를 위해 두 좌표계 간의 변환 관계를 나타내는 변환행렬을 구한다. 두 좌표계 간의 방위(Orientation) 관계의 규명은 'z-y-x 오일러 각'을 이용하며, 두 축 간의 회전량은 오른손 법칙에 따라 그 부호를 결정한다.

센서좌표계와 기준좌표계 간의 회전관계

일반적으로 두 좌표계간의 방위를 규정짓는 데는 서로 독립인 세 개의 각이 필요하다. 본 논문에서는 센서의 각 좌표축이 중력에 수직인 평면과 이루는 각도 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 와 센서 좌표축 중 임의의 한 축의 중력에 수직인 평면에 대한 정사영과 기준좌표계의 X축이 이루는 각 ϕ (스윙각)를 고려하며 (Fig. 3), 이 중 스윙각을 포함한 서로 독립인 세 개의 각을 선택한다. 이때 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 측정은 중력에 수직인 평면에 대해 위쪽을 양의 방향으로 아래쪽을 음의 방향으로 정의한다.

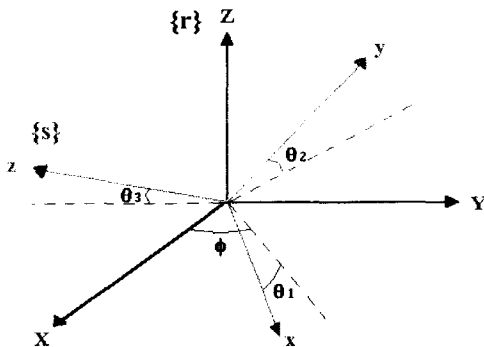


Fig. 3 Orientation between Sensor coordinate and Reference coordinate

스윙각을 포함한 서로 독립인 세 개의 각으로부터 z-y-x 오일러 각을 이용하여 기준좌표계와 센서좌표계 사이의 회전관계를 구한다. 기준좌표계의 Z축은 중력방향과 평행하게 설정하며, 공간 상에 설치된 센서에 대한 센서좌표계와 기준좌표계 간의 방위 관계는 고정된 기준좌표계에 대하여 센서좌표계가 회전하여 것으로 생각한다. 먼저, 센서좌표계의 z축을 ϕ 만큼, y축을 θ_1 만큼 돌린 후, 마지막으로 x축을 임의의 각 θ' 만큼 회전시키면 다음과 같이 기준좌표계와 센서좌표계 간의 회전행렬 sR 이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 {}^sR &= R_z(\phi) R_y(-\theta_1) R_x(\theta') \quad (1) \\
 &= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta' & -s\theta' \\ 0 & s\theta' & c\theta' \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\phi c\theta_1 & -c\phi s\theta_1 s\theta' - s\phi c\theta' & -c\phi s\theta_1 c\theta' + s\phi s\theta' \\ s\phi c\theta_1 & -s\phi s\theta_1 s\theta' + c\phi c\theta' & -s\phi s\theta_1 c\theta' - c\phi s\theta' \\ s\theta_1 & c\theta_1 s\theta' & c\theta_1 c\theta' \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

여기서, $\cos \theta = c\theta, \sin \theta = s\theta$ 이다. 위 식의 y축에 대한 회전량 θ_1 에 음의 부호는 전술한 바와 같이 θ_1 의 측정에 관한 부호의 정의에 따른 결과이다. 즉, 센서좌표계가 y축에 대해 양의 방향으로 회전하였다면 센서좌표계의 x축은 좌표계의 원점에 대해 아래로 내려가며 θ_1 을 음의 값으로 측정하게 된다. 따라서, θ_1 에 음(-)을 곱하여 y축의 실제 회전 방향인 양의 방향으로 수정한다. 식 (1)의 θ_1 과 ϕ 는 측정하는 값이며 θ' 은 구해야 할 미지수이다. θ' 을 구하기 위해 센서좌표계의 y축의 단위벡터를 이용한다. 센서의 y축 단위벡터를 센서좌표계에 대해 나타내면 ${}^s\hat{y}_s = (0, 1, 0)$ 이 된다. 이것을 회전행렬 sR 을 사용하여 기준좌표계에 대한 값으로 변환하면 ${}^rR {}^s\hat{y}_s (= {}^r\hat{y}_s)$ 가 된다. 센서의 좌표축을 수평면에 대하여 측정하므로 단위벡터의 기준좌표계에 대한 'Z'성분을 측정한 θ_2, θ_3 의 Sin 함수로 나타낼 수 있다. 즉,

$${}^rR \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c\phi s\theta_1 s\theta' - s\phi c\theta' \\ -s\phi s\theta_1 s\theta' + c\phi c\theta' \\ c\theta_1 s\theta' \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)의 Z축 성분을 구하면 다음과 같다.

$$c\theta_1 s\theta' = s\theta_2 \quad (3)$$

위의 식 (3)으로부터 다음과 같이 θ' 을 구한다.

$$\theta' = \sin^{-1}\left(\frac{s\theta_2}{c\theta_1}\right) \quad (4)$$

각도 ϕ 는 특별한 의미를 가지는 각도로서 스윙각이라 부른다고 하였다. 위의 내용은 기준좌표계의 X축과 센서좌표계의 'x축'이 이루는 각을 측정한 것이었다.(Fig. 3) 그러나 필요에 따라서는 센서좌표계의 다른 축을 선택할 수도 있다. 실제 응용에 있어서는 작업 환경상 측정하기 용이하며 정확한 각을 얻을 수 있는 축을 선정하는 것이 바람직하다. 그러나 언제나 기준좌표계의 X축이 스윙각 측정의 기준이 된다. y축과 z축에 관하여 스윙각을 측정한 경우의 결과식은 다음과 같다.

y축 기준일 경우:

$$\begin{aligned} {}^sR &= R_z(\phi - 90^\circ) R_x(\theta_2) R_y(\theta') \\ \theta' &= -\sin^{-1}\left(\frac{s\theta_1}{c\theta_2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

z축 기준일 경우 :

$$\begin{aligned} {}^sR &= R_y(90^\circ) R_z(90^\circ) R_y(\phi) R_x(\theta_3) R_z(\theta') \\ \theta' &= \sin^{-1}\left(\frac{s\theta_1}{c\theta_3}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

센서좌표계와 기준좌표계 간의 병진관계

다음은 기준좌표계와 센서좌표계간의 병진관계를 구한다. 기준좌표계에 대해 알고 있는 임의의 한 점 P를 센서로 측정한다. 그 점의 기준좌표계에 대한 좌표값을 rP , 센서좌표계에 대한 값을 sP 로 나타내면 두 좌표계간의 회전과 병진관계를 변환행렬 sT 로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & dx \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & dy \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 $[X, Y, Z]^T$ 는 기준좌표계에 대한 값으로서 이미 아는 값이며, $[x, y, z]^T$ 는 센서로 측정하여 얻을 값이다. 회전행렬은 앞에서 이미 구했으므로 병진변위 dx, dy, dz 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$dx = X - r_{11}x - r_{12}y - r_{13}z \quad (8)$$

$$dy = Y - r_{21}x - r_{22}y - r_{23}z \quad (9)$$

$$dz = Z - r_{31}x - r_{32}y - r_{33}z \quad (10)$$

이상과 같이 기준좌표계와 센서좌표계간의 회전행렬과 병진벡터를 구할 수 있으며, 식 (7)의 형태를 갖는 변환행렬 sT 가 구해진다.

3. 평면 운동하는 물체의 자세측정

여기서는 물체가 중력에 대해 수직인 평면에서 2차원 운동을 하는 경우의 자세측정 알고리즘을 기술한다. 공간상에 고정된 센서로 코너 라인 상의 코너점을 측정한다. 이 때 측정되는 코너점은 물체의 자세에 따라 다르다. 따라서 우리는 측정점에 대한 정보를 얻기 위하여 '측정부위가 라인 형상으로서 물체좌표계에 대한 직선의 방정식으로 표시될 수 있다'는 점을 이용한다. 즉, Fig. 2에서 코너라인 상의 측정점 P는 선분 $\overline{P_1P_2}$ 상에 존재하므로 측정점 P의 물체좌표계에 대한 좌표값은 물체좌표계에 대한 직선 $\overleftarrow{P_1P_2}$ 의 방정식을 만족한다. 우리는 P_1, P_2 를 특징점(Feature Points)이라고 부르며, 측정하고자 하는 모든 코너 라인에 대해 직선의 방

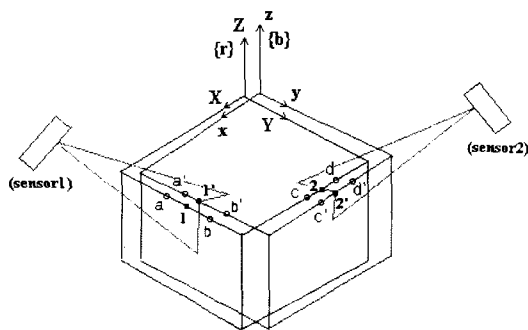


Fig. 4 Position Estimation of 2-D motional Body

정식으로 수식화 한다.

평면 운동은 중력 방향에 수직인 xy -평면상에서 물체가 운동하는 경우로서 물체가 자세측정을 위해 x 축 방향의 병진변위 dx , y 축 방향의 병진변위 dy , 그리고 z 축에 대한 회전변위 θ 로서 세 개의 미지수로 표현된다. Fig 4에서 {r}은 정상상태에서 물체에 고정된 물체좌표계로서 공간상에 고정시키며 물체의 자세 인식을 위한 기준좌표계로 사용한다. {b}는 물체의 운동에 따라 공간상을 움직이는 물체에 고정된 물체좌표계로 정의한다. 2-D 운동하는 물체에 대한 자세측정 알고리즘은 다음과 같다.

① Fig 4와 같이 두 개의 센서를 사용하여 두 곳의 코너점을 측정하며, 측정된 값을 기준좌표계에 대한 값으로 변환한다.

$${}^rP_1'(X_1, Y_1, Z_1), {}^rP_2'(X_2, Y_2, Z_2) \quad (11)$$

② 기준좌표계에 대한 좌표값을 물체좌표계에 대한 값으로 변환한다.

$${}^bP_1'(x_1, y_1, z_1), {}^bP_2'(x_2, y_2, z_2) \quad (12)$$

③ 이때 좌표값 ${}^bP_1', {}^bP_2'$ 은 물체좌표계에 대한 직선 $\vec{a'b'}$, $\vec{c'd'}$ 위에 있다. (아울러 기준좌표계에 대한 직선의 방정식 \vec{ab} , \vec{cd} 을 만족한다.) 따라서 다음 식이 성립한다.

$$\frac{x_1 - x_a}{x_b - x_a} = \frac{y_1 - y_a}{y_b - y_a} = \frac{z_1 - z_a}{z_b - z_a} \quad (13)$$

$$\frac{x_2 - x_c}{x_d - x_c} = \frac{y_2 - y_c}{y_d - y_c} = \frac{z_2 - z_c}{z_d - z_c} \quad (14)$$

식 (13)~(14)로부터 측정점의 물체좌표계에 대한 좌표값 중 x_1, y_1, x_2, y_2 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$x_1 - x_a = \frac{x_b - x_a}{y_b - y_a} (y_1 - y_a) \quad (15)$$

$$y_1 - y_a = \frac{y_b - y_a}{z_b - z_a} (z_1 - z_a) \quad (16)$$

$$y_2 - y_c = \frac{x_d - x_c}{y_d - y_c} (y_2 - y_c) \quad (17)$$

$$y_2 - y_c = \frac{y_d - y_c}{z_d - z_c} (z_2 - z_c) \quad (18)$$

위의 식 (16)과 식 (18)은 $z_a \neq z_b, z_c \neq z_d$ 로 가정한다. 이 가정은 Fig. 4의 코너 라인상의 특징점들에 의해 결정되는 두 직선 \vec{ab}, \vec{cd} 가 중력에 대하여 수직인 XY-평면에 포함되지 않고 세 개의 좌표축 X, Y, Z의 어떤 축과도 평행하지 않는 일반적인 경우임을 말한다. 만일 이 가정에 위배되는 특징점을 선택한다면 두 개의 센서로 물체의 자세측정을 하기에 모호함(ambiguity)이 나타나게 되므로 센서의 개수를 늘리거나 추가적인 정보를 이용하여 좀 더 복잡한 해석을 수행하여야 한다⁽⁶⁾. 그리고, 만일 $y_a = y_b$ 인 경우는,

$$y_1 = y_a \quad (19)$$

$$x_1 = x_a + \frac{(x_b - x_a)}{(z_b - z_a)} (Z_1 - z_a) \quad (20)$$

$y_c = y_d$ 인 경우는,

$$y_2 = y_c \quad (21)$$

$$x_2 = x_c + \frac{(x_d - x_c)}{(z_d - z_c)} (Z_2 - z_c) \quad (22)$$

으로 식을 대체한다.

④ 두 측정점에 대한 기준좌표계와 물체좌표계 간의 관계를 다음과 같이 쓴다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & dx \\ s\theta & c\theta & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & dx \\ s\theta & c\theta & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

식 (23)~(24)에서 미지수는 θ, dx, dy 의 세 개 뿐이므로, 우리가 구하고자 하는 기준좌표계와 물체좌표계 간의 변환행렬 요소들을 다음과 같이 계

산할 수 있다.

$$c\theta = \frac{(x_1 - x_2)(X_1 - X_2) + (y_1 - y_2)(Y_1 - Y_2)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (25)$$

$$s\theta = \frac{-(y_1 - y_2)(X_1 - X_2) + (x_1 - x_2)(Y_1 - Y_2)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (26)$$

$$dx = X_1 - c\theta x_1 + s\theta y_1 \quad (27)$$

$$dy = Y_1 - s\theta x_1 - c\theta y_1 \quad (28)$$

4. 3차원 운동하는 물체의 자세측정

본 절에서는 기준좌표계에 대한 물체좌표계의 운동 즉, 물체가 정상상태에 대해 3차원 운동을 하는 경우의 자세측정 알고리즘을 기술한다. 따라서 변환행렬 bT 에는 z, y, x 축 들에 대한 각 변위를 나타내는 α, β, γ 와 각 축 들에 대한 병진운동 dx, dy, dz 로서 여섯 개의 미지수가 존재한다. 회전행렬은 z-y-x 오일러 각으로 표현할 때 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} {}^bR &= R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (29) \end{aligned}$$

위의 회전행렬과 병진벡터를 포함한 변환행렬을 기준좌표계와 물체좌표계에 대하여 식 (30)과 같이 표현한다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & dx \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & dy \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

또는, ${}^bP = {}^bT {}^bP$ (30)

식 (30)을 전개하면 bT 의 요소들과 x, y, z 에 대한 3개의 방정식이 만들어진다. 이때 x, y, z 를 bT 의 함수로 표현할 수 있다. 즉, 물체좌표계에 대한 슬릿광의 평면방정식과 기준좌표계에 대한 직선의 방정식 \vec{ab} 의 교점이 ${}^bP(x, y, z)$ 가 되므로 x, y, z 의 값들은 bT 의 요소들의 함수로 표현

될 수 있다. Fig. 5와 같이 3개의 센서로 세 지점을 측정한다고 하자. 먼저, 센서 1에 대해 분석한 후 다른 두 센서에 대해서도 똑같이 적용하기로 한다.

센서 1의 슬릿광의 기준좌표계에 대한 평면방정식을 다음과 같이 둔다.

$$a_1X + b_1Y + c_1Z + d_1 = 0 \quad (31)$$

식 (31)을 물체좌표계에 대한 평면방정식으로 변환한다. 식 (30)에서

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & dx \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & dy \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$X = r_{11}x + r_{12}y + r_{13}z + dx \quad (33)$$

$$Y = r_{21}x + r_{22}y + r_{23}z + dy \quad (34)$$

$$Z = r_{31}x + r_{32}y + r_{33}z + dz \quad (35)$$

이므로 식 (33)~(35)를 식 (31)에 대입하면,

$$(a_1 r_{11} + b_1 r_{21} + c_1 r_{31})x + (a_1 r_{12} + b_1 r_{22} + c_1 r_{32})y + (a_1 r_{13} + b_1 r_{23} + c_1 r_{33})z + a_1 dx + b_1 dy + c_1 dz + d_1 = 0 \quad (36)$$

이 얻어진다. 위 식을 다음과 같이 간단히 쓴다.

$$a_1'x + b_1'y + c_1'z + d_1' = 0 \quad (37)$$

여기서,

$$a_1' = a_1 r_{11} + b_1 r_{21} + c_1 r_{31}$$

$$b_1' = a_1 r_{12} + b_1 r_{22} + c_1 r_{32}$$

$$c_1' = a_1 r_{13} + b_1 r_{23} + c_1 r_{33}$$

$$d_1' = a_1 dx + b_1 dy + c_1 dz + d_1$$

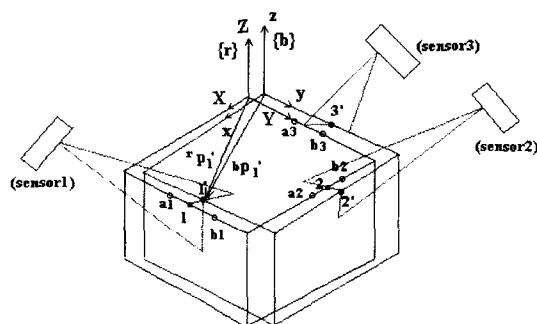


Fig. 5 Position Estimation of 3-D motional Body

다음으로, 물체가 운동하기 전의 물체좌표계(= 기준좌표계)에 대한 $\overrightarrow{a_1 b_1}$ 직선방정식을 다음과 같이 두자.

$$\frac{x-x_{a1}}{x_{b1}-x_{a1}} = \frac{y-y_{a1}}{y_{b1}-y_{a1}} = \frac{z-z_{a1}}{z_{b1}-z_{a1}} = k_1 \quad (38)$$

따라서,

$$x = (x_{b1} - x_{a1})k_1 + x_{a1} \quad (39)$$

$$y = (y_{b1} - y_{a1})k_1 + y_{a1} \quad (40)$$

$$z = (z_{b1} - z_{a1})k_1 + z_{a1} \quad (41)$$

Fig. 5에서 물체좌표계에 대한 점 P_1' 의 좌표값은 직선방정식 (38)과 평면방정식 (37)의 교점이므로 식 (39)~(41)를 식 (37)에 대입하면

$$\begin{aligned} & \{a_1'(x_{b1} - x_{a1}) + b_1'(y_{b1} - y_{a1}) + c_1'(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 \\ & = -d_1' - a_1'x_{a1} - b_1'y_{a1} - c_1'z_{a1} \end{aligned} \quad (42)$$

이 되며, 다음과 같이 k_1 을 구할 수 있다.

$$k_1 = \frac{-(a_1'x_{a1} + b_1'y_{a1} + c_1'z_{a1} + d_1')}{a_1'(x_{b1} - x_{a1}) + b_1'(y_{b1} - y_{a1}) + c_1'(z_{b1} - z_{a1})} \quad (43)$$

다음으로, 계산된 k_1 으로부터 ${}^b P_1'$ 의 좌표값인 x_1, y_1, z_1 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_1 = (x_{b1} - x_{a1})k_1 + x_{a1} \quad (44)$$

$$y_1 = (y_{b1} - y_{a1})k_1 + y_{a1} \quad (45)$$

$$z_1 = (z_{b1} - z_{a1})k_1 + z_{a1} \quad (46)$$

식 (43)의 k_1 은 $\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz$ 의 함수이므로 ${}^b P_1'$ 의 좌표값도 역시 ${}^b T$ 요소들의 함수이다. 위에서 구한 x_1, y_1, z_1 을 식 (33)~(35)에 대입하면 다음과 같은 센서 1에 대한 세 개의 방정식을 얻는다.

$$X_1 = \{r_{11}(x_{b1} - x_{a1}) + r_{12}(y_{b1} - y_{a1}) + r_{13}(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 + r_{11}x_{a1} + r_{12}y_{a1} + r_{13}z_{a1} + dx \quad (47)$$

$$Y_1 = \{r_{21}(x_{b1} - x_{a1}) + r_{22}(y_{b1} - y_{a1}) + r_{23}(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 + r_{21}x_{a1} + r_{22}y_{a1} + r_{23}z_{a1} + dy \quad (48)$$

$$\begin{aligned} Z_1 = & \{r_{31}(x_{b1} - x_{a1}) + r_{32}(y_{b1} - y_{a1}) + r_{33}(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 \\ & + r_{31}x_{a1} + r_{32}y_{a1} + r_{33}z_{a1} + dz \end{aligned} \quad (49)$$

위의 X_1, Y_1, Z_1 은 $'P_1'$ 이다. 식 (47)~(49)에

서 좌변의 X_1, Y_1, Z_1 은 모두 ${}^b T$ 의 요소들의 함수이다. 따라서, 세 개 이상의 센서에 대해 이와 같은 과정을 거치면 기준좌표계와 물체좌표계 간의 변환행렬 ${}^b T$ 의 미지수의 수보다 많은 관계식을 얻을 수 있다. 그러나, 이렇게 주어진 식들로는 복잡한 비선형성으로 인해 해석적인 해를 구하기가 매우 어렵다. 따라서 물체의 정상상태에 대한 미소운동을 가정하고 선형화한다. 우선 센서 1에 대하여, X_1, Y_1, Z_1 을 다음과 같이 정의한다.

$$X_1 = f_1(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz) \quad (50)$$

$$Y_1 = g_1(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz) \quad (51)$$

$$Z_1 = h_1(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz) \quad (52)$$

위 식을 선형화한 후 다음과 같이 쓴다.

$$X_1 = k_{110} + k_{111}\alpha + k_{112}\beta + k_{113}\gamma + k_{114}dx + k_{115}dy + k_{116}dz \quad (53)$$

$$Y_1 = k_{120} + k_{121}\alpha + k_{122}\beta + k_{123}\gamma + k_{124}dx + k_{125}dy + k_{126}dz \quad (54)$$

$$Z_1 = k_{130} + k_{131}\alpha + k_{132}\beta + k_{133}\gamma + k_{134}dx + k_{135}dy + k_{136}dz \quad (55)$$

센서 2와 센서 3에 대하여도 똑같이 전개하여 식 (56)~(61)을 얻는다.

$$X_2 = k_{210} + k_{211}\alpha + k_{212}\beta + k_{213}\gamma + k_{214}dx + k_{215}dy + k_{216}dz \quad (56)$$

$$Y_2 = k_{220} + k_{221}\alpha + k_{222}\beta + k_{223}\gamma + k_{224}dx + k_{225}dy + k_{226}dz \quad (57)$$

$$Z_2 = k_{230} + k_{231}\alpha + k_{232}\beta + k_{233}\gamma + k_{234}dx + k_{235}dy + k_{236}dz \quad (58)$$

$$X_3 = k_{310} + k_{311}\alpha + k_{312}\beta + k_{313}\gamma + k_{314}dx + k_{315}dy + k_{316}dz \quad (59)$$

$$Y_3 = k_{320} + k_{321}\alpha + k_{322}\beta + k_{323}\gamma + k_{324}dx + k_{325}dy + k_{326}dz \quad (60)$$

$$Z_3 = k_{330} + k_{331}\alpha + k_{332}\beta + k_{333}\gamma + k_{334}dx + k_{335}dy + k_{336}dz \quad (61)$$

식 (53)-(61)을 다음과 같이 행렬식으로 쓴다.

$$\begin{bmatrix} k_{111} & k_{112} & k_{113} & k_{114} & k_{115} & k_{116} \\ k_{121} & k_{122} & k_{123} & k_{124} & k_{125} & k_{126} \\ k_{131} & k_{132} & k_{133} & k_{134} & k_{135} & k_{136} \\ k_{211} & k_{212} & k_{213} & k_{214} & k_{215} & k_{216} \\ k_{221} & k_{222} & k_{223} & k_{224} & k_{225} & k_{226} \\ k_{231} & k_{232} & k_{233} & k_{234} & k_{235} & k_{236} \\ k_{311} & k_{312} & k_{313} & k_{314} & k_{315} & k_{316} \\ k_{321} & k_{322} & k_{323} & k_{324} & k_{325} & k_{326} \\ k_{331} & k_{332} & k_{333} & k_{334} & k_{335} & k_{336} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 - k_{110} \\ Y_1 - k_{120} \\ Z_1 - k_{130} \\ X_2 - k_{210} \\ Y_2 - k_{220} \\ Z_2 - k_{230} \\ X_3 - k_{310} \\ Y_3 - k_{320} \\ Z_3 - k_{330} \end{bmatrix}$$

$$\text{또는, } A\mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (62)$$

식 (62)는 주어진 방정식의 수가 미지수의 수보다 3개 더 많다. 그러나, 모든 방정식들이 선형 독립이지는 않다. 즉, 2-D 센서를 사용하므로 9개의 식들 중 6개만이 선형 독립이다. 우리는 식 (62)의 \mathbf{u} 를 선형방정식의 최소자승법 해법을 이용하여 구할 수 있다. 만일 $m \times n$ 행렬 A에 대하여 $m > n$ 이고, 행렬 A의 랭크가 n 이면 식 (62)의 \mathbf{u} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{u} = A^\# \mathbf{v} \quad (63)$$

여기서, $A^\# = (A^T A)^{-1} A^T$ 이다.

이 때 측정 대상물의 코너 라인을 측정함에 있어서, 선택된 코너 라인(특징점)에 따라서는 세 개의 센서를 사용하더라도 식 (62)의 행렬 A의 서로 독립인 행이 여섯 개보다 적어져서 세 개의 센서만으로는 \mathbf{u} 를 구할 수 없게 된다. 이것은 선정된 특징점들로 이루어지는 직선들이 서로 평행하거나 또는 일부 대칭성을 가지게 될 때 기하학적으로 세 개의 직선만으로 공간상의 물체의 자세를 유일하게 정의할 수 없게 됨을 말한다. 그러므로, 특징점을 선택할 때는 되도록 특징점에 의한 직선들이 서로 평행하지 않도록 그리고 측정대상물 상에서 대칭성이 나타나지 않도록 선정하여야 하며, 측정대상물이나 측정 환경의 특성상 이러한 경우를 피할 수 없을 때는 센서의 개수를 증가시켜 시스템을 구성해야 한다.

행렬 A는 초기 셋업시 설정되는 센서의 위치와 방향, 기준좌표계와의 보정 그리고 특징점에 의한 직선의 방정식 들에 의해 결정된다. 즉, A는 초기에 시스템을 구성하는 방법에 따라 달라지며, 따라서 $A^\#$ 은 오프-라인(Off-Line)에서 일 회에 한하여 계산된다. 초기에 시스템을 구성함에 따라 비록 $\text{rank}(A)$ 가 6이 되더라도 행렬 A가 "Singularity"에 가까우면 노이즈에 민감하게 되어 정확한 정보를 얻을 수 없게 된다. 그러므로 가능한 한 행렬 A가 "Singularity"와 멀리 있도록 센서의 위치 및 특징점을 선정하여야 한다.

식 (63)에서 벡터 \mathbf{u} 는 기준좌표계와 물체좌표계 간의 변환행렬을 제공한다. 기준좌표계와 물체

좌표계 사이의 변환행렬을 얻었으므로 정상상태에 대한 물체의 운동량을 파악할 수 있다. 이러한 결론의 응용으로서, 로봇에 의한 차체의 실링작업을 생각해 보자. 로봇과 기준좌표계 간의 변환관계 ${}^R T$ 은 초기 셋업시 주어지므로 정상상태의 기준좌표계에 대한 작업경로를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$${}^b P = {}^r P = {}^R T {}^R P \quad (64)$$

식 (64)의 ${}^R P$ 은 로봇좌표계에 대한 로봇의 작업경로를 의미한다. 작업 대상물이 초기 설정된 정상상태와 다른 자세로 놓여질 경우 로봇좌표계에 대한 수정된 작업 경로는 본 논문의 알고리즘에 의해 구한 기준좌표계와 물체좌표계 간의 변환행렬 ${}^b T$ 과 식 (64)의 ${}^b P$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^R P' = {}^R T {}^b T {}^b P \quad (65)$$

식 (65)를 통하여 로봇을 현재의 물체의 위치에 대한 올바른 작업경로로 제어할 수 있다.

5. 수치 예제

여기서는, 물체의 3-D 운동에 대한 수치 예제를 생각한다. 대부분의 공산품의 형상이 대칭성을 가지므로 Fig. 6과 같이 직육면체 형상의 측정대상물에 대하여 네 개의 코너점을 측정하며, 특징점들을 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} a_1(2, 1/2, 0), & \quad b_1(2, 3/2, 0) \\ a_2(1/2, 2, 0), & \quad b_2(3/2, 2, 0) \\ a_3(1/2, 0, 0), & \quad b_3(3/2, 0, 0) \\ a_4(2, 0, -3/2), & \quad b_4(2, 0, -1/2) \end{aligned}$$

기준좌표계에 대하여,

$$\begin{aligned} \text{센서 1의 slit 광의 평면 방정식} & : Y = 1 \\ \text{센서 2의 slit 광의 평면 방정식} & : X = 1 \\ \text{센서 3의 slit 광의 평면 방정식} & : X = 1 \\ \text{센서 4의 slit 광의 평면 방정식} & : Z = -1 \end{aligned}$$

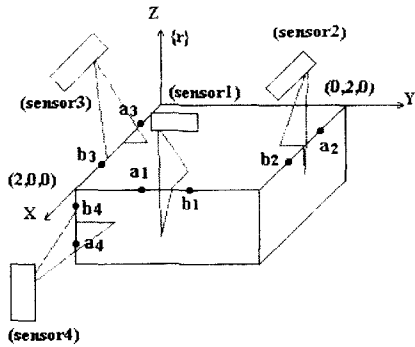


Fig. 6 Example of 3-D Positon Estimation

라고 두자. Fig. 6과 같이, 각 센서들의 슬릿광은 Z축에 대해 수직하거나 평행하다.

이상과 같이 셋업된 시스템에 대하여 선형화 된 식의 계수들을 구하고, 식 (62)의 행렬식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1-2 \\ Y_1-1 \\ Z_1-0 \\ X_2-1 \\ Y_2-2 \\ Z_2-0 \\ X_3-1 \\ Y_3-0 \\ Z_3-0 \\ X_4-2 \\ Y_4-0 \\ Z_4+1 \end{bmatrix} \quad (66)$$

또는, $Au = v$

행렬 A를 살펴보면, 각 센서마다 선형 독립인 행이 두 개씩만 존재한다. 이러한 사실은 본 센서가 2차원 센서로서 슬릿광의 평면상에 존재하는 수직한 두 좌표계에 대한 2차원 데이터를 준다는 점과 연관된다. 본 예제에 대한 행렬 A는 12×6이고, rank(A)가 6이므로 아래와 같이 행렬 A의 의사-역행렬(Pseudo-Inverse)을 구할 수 있다.

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$$

$$= \begin{bmatrix} -0.3636 & 0 & -0.3636 & 0 & -0.3182 & -0.1364 \\ 0.2727 & 0 & -0.7273 & 0 & -0.1364 & 0.2273 \\ 0.0909 & 0 & 0.0909 & 0 & -0.0455 & 0.4091 \\ 0.4545 & 0 & -0.5455 & 0 & -0.2273 & 0.0455 \\ 0.4545 & 0 & 0.4545 & 0 & 0.7727 & 0.0455 \\ 0.2727 & 0 & -0.7273 & 0 & -0.1364 & 0.2273 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -0.3182 & 0.500 & 0.3636 & 0.6364 & 0 \\ 0 & -0.1364 & 0.500 & -0.2727 & 0.2727 & 0 \\ 0 & -0.0455 & -0.500 & -0.0909 & 0.0909 & 0 \\ 0 & -0.2273 & 0.500 & 0.5455 & 0.4545 & 0 \\ 0 & 0.7727 & -0.500 & -0.4545 & -0.5455 & 0 \\ 0 & -0.1364 & 1.500 & -0.2727 & 0.2727 & 0 \end{bmatrix} \quad (67)$$

마지막으로, 구하고자 하는 변환행렬의 요소 u 는 식 (63)과 같이 A^+ 과 센서로 측정된 데이터 v 를 곱하여 얻을 수 있다. 일반적인 경우에는 세 개의 센서를 이용하여 3차원 운동을 규명하는 미지수 u 를 구할 수 있으나, Fig 6과 같이 Z축에 대해 수직이거나 X축 또는 Y축에 대해 평행인 직선, 또는 물체 상에서 서로 대칭성을 갖는 직선을 이루는 특징점을 선택하면 행렬 A의 랭크가 6보다 작은 5 이하의 값을 가지게 된다. 즉 세 개의 센서로는 선형 독립인 조건식 들을 충분히 얻을 수 없게 된다. 실제로, 위의 예제와 같이, 공산품의 형상은 대칭성을 갖는 경우가 많으며 대칭성이 적다 하더라도 원하는 위치에서 코너 라인을 발견할 수 없을 수도 있다. 이런 경우 부족한 조건식은 위의 수치 예제와 같이 센서를 추가함으로써 보충할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 2-D 비전 센서를 이용한 물체의 자세측정 알고리즘을 제시하였다. 사용한 센서는 자체 광원으로 레이저 슬릿광을 가지는 2차원 비전 센서로서 코너점이나 선단의 좌표값을 측정하기 편리한 특징을 가진다. 우리는 이 센서를 다중으로 사용하여 2차원 및 3차원 운동하는 물체의 자세측정을 수행할 수 있다. 이를 위해, 세 개의 좌표계가 정의되었고, 각 좌표계들 간의 변환관계를 유도하였으며, 측정된 값들로부터 기준좌표계에 대한 물체의 자세를 얻기 위한 변환행렬을 구할 수 있었다. 우리는 이 변환행렬을 이용하여 초기 작업 경로를 물체의 현재의 자세에 대한 올바른 경로로 수정할 수 있다.

직선 형상의 코너나 선단 부위를 측정하여 물체의 자세를 측정하는 본 알고리즘은 물체가 2차원 운동을 하는 경우 해석적인 방법으로 보정 데이터를 구할 수 있으며, 3차원 운동의 경우는 복잡한 비선형방정식을 선형화하여 선형방정식의 최소자승법에 의한 해법을 이용하였다.

일반적으로, 2차원 운동의 경우 두 개의 센서를

이용하며, 3차원의 경우에는 세 개의 센서로 불체의 자세측정을 수행할 수 있다. 그러나, 특이한 직선을 이루는 특징점을 선택하면 특징집에 의해 주어진 직선으로 물체의 자세를 유일하게 정의할 수 없게 된다. 또한, 행렬 A가 "Singularity"에 가까우면 노이즈에 민감하게 된다. 그러므로 시스템을 초기 구성할 때 되도록 이러한 경우를 피하도록 해야 한다. 만일 작업 환경 및 측정 대상물의 형상의 특성으로 인해 피할 수 없다면 2차원 운동의 경우 좀더 복잡한 해법을 사용하며, 3차원의 경우 센서의 개수를 증가시킴으로써 해결할 수 있다⁶⁾. 특히, 3차원의 경우 최소자승법에 의한 해법을 사용하므로 센서의 개수를 증가시킴으로써 오차를 줄일 수 있다. 실제로 현장에서는 대부분의 측정대상물이 대칭성을 가지고 있으며, 원하는 위치와 방향을 갖는 코너 라인을 충분히 발견할 수 없음에도 불구하고 높은 정도를 요구하는 경우가 많으므로 현재로서는 5장의 예와 같이 센서를 추가 배치하는 것을 권장하고 있다.

특이한 직선의 예는 직선들이 서로 평행하거나 물체 상에서 서로 대칭성을 갖는 경우를 들 수 있으며 이 외에도 아직 분석되지 않은 다양한 예가 있을 수 있다. 따라서, 필요한 센서의 최소 개수와 연관하여 이 부분에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

참고문헌

1. K. D. Gremban, C. E. Thorpe, T. Kanade, "Geometric camera calibration using system of linear equations," proc. of IEEE Int. Conf. Robot Automat., Vol. 1, pp. 562-567, 1988.
2. 여인재, 박희재, "Vision System for Precision Dimensional Inspection of Bicycle Frames," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.389-395, 1995.
3. Reimark K. and Rogery Y., "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology," IEEE Trans. on Pattern Analysis & Machine Intelligence Vol. 10, No. 5, pp. 713-720, September 1988.
4. Anders Nilsson and Per Hilberg, "Combining a Stable 2D Vision Camera and an Ultrasonic Range Detector for 3D Position Estimation," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, No. 2, April 1994.
5. Song De Ma, Senior Member, "A Self-Calibration Technique for Active Vision Systems," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 1, February 1996.
6. 김정관, "2D 비전 센서를 이용한 불체의 자세측정 알고리즘," 부산대학교 공학석사 학위논문, 1997.
7. K. J. Å ström and B. Wittenmark, "in Identification in Computer Controlled Systems, Theory and Design," Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, pp. 324-342, 1984.