

컴퓨터 비전을 이용한 원기둥형 물체의 3차원 측정

장택준,* 주기세,* 한민홍*

3-Dimensional Measurement of the Cylindrical Object Using Computer Vision

TaekJun Jang,* Kisee Joo,* Min-Hong Han*

ABSTRACT

This paper presents a method to measure the position and orientation of a *Cylindrical Object* (unknown the diameter and length) lying on a floor, using a camera. The two extreme cross sections of the cylinder will be viewed as distorted ellipse or circular arc, while its limb edge will be shown as two straight lines. The diameter of the cylinder is determined from the geometric properties of the two straight lines, which in turn provides information regarding the length of the cylinder. From the 3-dimensional measurement, the 3D coordinates of the center points of the two extreme cross sections are determined to give the position and orientation of the cylinder. This method is used for automated pick-and-place operations of cylinder, such as sheet coils, or drums in warehouses.

Key Words : 3-dimensional measurement (3차원 측정), cylindrical object (원기둥형 물체), computer vision (컴퓨터 비전), geometric property (기하학적 특성), warehouse (창고)

1. 서론

물류자동화는 공장내의 물류의 흐름을 자동 제어함으로써 효과적인 생산시스템을 구축할 수 있도록 해주는 것을 말한다. 이를 구현하기 위한 핵심기술로는 부품이나 반제품을 자동 운반해주는 물류기기의 제어기술을

들 수 있다. 그러나 현재까지는 로봇이나 크레인을 이용하여 대상 물체가 정해진 위치에 놓여져 있을 경우에만 한하여 수동적인 운반 작업(Pick-and-Place) 정도이다. 만일 대상 물체가 정해진 위치에 놓이지 않으면 전체 물류 흐름의 지연이나 부품 및 기계의 손상이 발생하게 된다. 또한 정위치에 있지 않은 부품을 운반하기

* 고려대학교 산업공학과

위하여 사람이 자동기계의 작업역에 들어가서 작업할 경우 작업자의 사소한 실수나 기계의 오동작으로 인하여 안전사고가 발생할 위험성이 매우 크다. 물체를 정해진 위치에 놓이도록 하기 위해서 진동이나 회전장치를 사용하는 방법도 있지만, 부품의 크기, 모양, 재질에 따라 각기 달리 고안해야 하며, 설사 개발되더라도 제품 생산여건이 변경될 때마다 다시 설계하는 고충이 따른다. 이처럼 물류 흐름의 제어는 많은 문제점이 지니고 있기 때문에 자동화의 병목현상이 되고 있다. 따라서 앞으로의 물류자동화는 임의로 놓여진 부품의 위치와 자세를 실시간으로 로봇이나 크레인이 판단하여 스스로 운반작업을 수행할 수 있는 지능형 물류기계의 개발이 절실하다.

이와 같은 목적을 위하여 본 논문에서는 컴퓨터비전을 이용하여 코일이나 드럼과 같은 원기둥형 물체의 위치와 자세를 판단할 수 있는 3차원 측정 방법을 개발하였다. 원기둥은 양쪽 단면의 위치를 측정하면 크레인을 사용하여 이동시킬 수 있다. 일반적으로 3차원 측정을 위해서는 두 대의 카메라를 사용하는 스테레오 비전(Stereo vision)을 사용하여 왔는데, 이는 계산과정이 매우 복잡하며 경우에 따라서 잘못된 해를 구하거나 전혀 구하지 못할 수도 있다. 그러나 원기둥의 기하학적인 특성을 고려하면 단지 한대의 카메라만 사용하여도 간단한 수식으로 3차원 측정이 가능하다.

2. 기존연구

카메라로 획득한 영상은 2차원인데 반하여 대상물체는 3차원 영역에 존재하기 때문에 한대의 카메라만 사용하여 물체의 3차원 위치를 복원하는 것은 매우 어렵다. 그러나 대상물체의 모양을 미리 알고 있을 경우에는 기하학적인 특성을 이용하여 화면상에 나타나는 영상의 외곽선(Contour)으로부터 그 물체의 위치를 측정할 수 있다. 단일 영상만을 이용하여 3차원 모양을 복원하는 기법은 1971년 Binford⁽¹⁾에 의해 처음 일반 원통(Generalized cylinders) 모델이 제안된 후, Shafer⁽²⁾에 의해 더욱 체계화되었다. 이들이 제시한 모델은 아래와 같이 두 가지 모델⁽¹²⁾로 구분된다.

1) 중심축(Axis)이 곧고 단면(Cross section)의 모양이 일정한 일반 원통 (Straight Homogeneous Generalized Cylinder: SHGC).

2) 중심축이 2차원 평면상의 곡선이고 단면의 크기

가 일정한 일반 원통 (Planar, Right Constant cross section Generalized Cylinder: PRCGC).

1970년대에서 80년대 초기까지는 다면체(Polyhedrons)의 직선 외곽선에서 3차원 위치를 복원하는 연구^(9,10,11)가 많이 수행되었으며, 1980년대 이후에는 비다면체(Non-polyhedrons)의 곡선 외곽선을 분석하는 기술들이 개발되어졌다^(3,4,5,6). 또한 몇몇 연구에서는 도너스 모양의 PRCGC 모델을 대상으로 3차원 복원에 성공하였다고 보고한다^(9,13). 그러나 대부분의 연구들이 아직 완전한 3차원 복원을 하지 못하고 있다. 이는 실제로는 존재하지도 않는 매우 복잡한 모양의 비다면체에만 집착하여 기하학적 특성 나열에만 급급하였기 때문이다. 또한 가변상황이 많은 실제 영상에서 노이즈로 인하여 외곽선이 일부 손상되었을 때의 대안을 제시하지 못한다.

본 논문에서는 1)SHGC 모델 중 원기둥 모양의 물체에 대하여만 고찰하였다. 원기둥 모양은 실제 공장 내에 가장 흔하게 찾아볼 수 있어서 그 적용범위가 매우 넓으며, 다른 일반 원통에 비해 모양이 비교적 단순하기 때문에 정확한 3차원 복원이 가능하다. 또한 본 논문에서 제시한 알고리즘은 한번에 모든 외곽선을 검출하지 않고 찾기 쉬운 부분을 먼저 찾은 후에 이를 토대로 모양이 복잡한 외곽선을 검지함으로써 영상의 질이 떨어질 경우라도 비교적 오차없이 3차원 측정이 가능하다.

3. 원기둥과 카메라의 위치관계

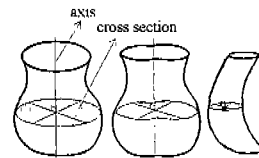


Fig. 1 Examples of SHGC

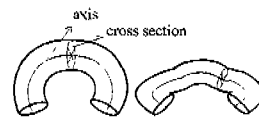


Fig. 2 Examples of PRCGC

Fig. 3에서와 같이 카메라는 극좌표(D, θ, ϕ)에 설치하며 원점을 투사한다. xy 평면 위에 누어져 있는 원기둥의 위치를 쉽게 나타내기 위해서 xy 평면과 원기둥과의 접선 방향을 u 축, 원점에서 u 축에 수직 방향을 v 축, u, v 축의 교점에서 z 축과 평행한 방향을 w 라 정의하여 uvw 좌표계를 설정한다. 이렇게 좌표계를 설정하면 원기둥은 u 축과 중심축 방향이 평행하며 그 단면은 항상 u 축과 접하므로 x 축과 v 축사이의 각도(β)와 원점에서 u 축까지의 거리(d)를 계산하면 uvw 좌표계를 정립할 수 있다. 다음은 본 논문에서 사용된 용어이다.

- $C(D, \theta, \phi)$: 카메라의 극좌표.
- S : 원점(O)에서 원기둥과 xy 평면과의 접선에 내린 수직선과의 접점.
- v 축 : S점에서 \overrightarrow{OS} 방향.
- u 축 : S점에서 원기둥의 중심축 방향 (v 축에서 3시 방향).
- w 축 : S점에서 $u \times v$ 방향.
- uvw 좌표계 : u, v, w 축으로 이루어진 좌표계.
- xyz 좌표계 : x, y, z 축으로 이루어진 실좌표계.
- 시각좌표계 : 카메라를 중심으로 이루어진 왼손좌표계.
- Q : 카메라에서 v 축에 내린 수직선과의 접점.
- β : x 축과 v 축이 이루는 각도.
- d : 원점과, S점 사이의 거리.
- H : 카메라의 높이(z 좌표).
- f : 카메라의 초점거리.
- R : 원기둥의 반경.
- L : 원기둥의 길이.

4. 원기둥의 위치 및 자세 측정

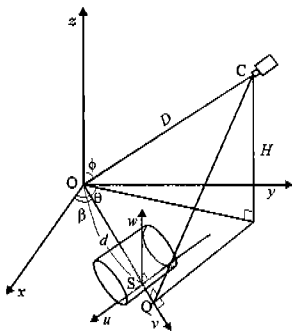


Fig. 3 Geometric Relation with Cylinder and Camera

카메라에서 본 원기둥의 외곽선은 Fig. 4와 같이 양쪽 단면은 굴곡된 타원이나 호로 나타난다. 또한 두 단면 사이의 외곽선(Limb edge)은 두 직선으로 나타난다.

이 직선들을 각각 l, m 이라 정의하자. 실제 공장내의 환경은 매우 유동적이기 때문에 노이즈(Noise)나 조도의 변화에 따라 획득 영상의 질이 떨어질 수 있다. 이러한 경우일지라도 l, m 의 방정식은 직선이기 때문에 비교적 검출하기 쉬운 반면, 양쪽 단면의 외곽선은 곡선형이기 때문에 검출하기 어렵다. 그래서 본 논문에서는 먼저 검출하기 쉬운 l, m 직선을 찾은 후 기하학적인 관계를 이용하여 원기둥의 반경을 구하였다. 이제 양쪽 단면으로 이루어지는 외곽선은 두 직선 l, m 사이에 존재하며, 앞서 반경을 계산하였기 때문에 그 위치에 따라 화면에 나타나는 외곽선의 모양을 예측할 수 있다. 이 예측된 외곽선 모양과 실제 화면과 비교해 가면서 가장 일치가 잘될 때까지 반복함으로써 원기둥의 양쪽 단면의 위치를 계산할 수 있다. 이렇게 2단계 외곽선 검출 알고리즘을 개발함으로써 보다 정확히 원기둥의 위치를 검출할 수 있다.

4.1절에서는 두 직선 l, m 으로부터 원기둥의 자세를 알 수 있는 β 를 측정하고, 4.2절에서는 카메라와 원기둥과의 기하학적인 특성을 이용하여 반경(R)과 원점과 u 축과의 거리(d)를 계산한다. 끝으로 4.3절에서는 원기둥의 양쪽 단면의 중심점 위치를 계산함으로써 원기둥의 위치를 알 수 있다.

4.1 원기둥의 자세(β) 측정

원기둥의 자세는 x 축과 v 축의 사이각(β)을 측정함으로써 알 수 있다. 중심축 방향은 Fig. 5와 같이 카메라

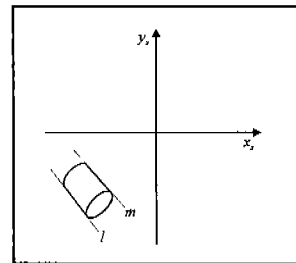


Fig. 4 Contour of Cylinder

에서 원기둥의 옆면과 접하는 두 접평면 A, B 및 xy평면과 평행하며 v축과 수직관계이다. 평면 A, B와 xy평면과의 교선을 각각 l', m'라 정의하면 마찬가지로 이들 직선과 중심축 방향이 평행관계를 이룬다. 따라서 v축은 직선 l', m'과 수직관계를 이루게 되며 이로부터 β를 계산할 수 있다.

xyz좌표계, 시각좌표계 그리고 화면좌표계사이의 변환식은 수식(1)(2)와 같다.⁽⁷⁾

$$P(h) = (x_c, y_c, z_c, 1) = (x, y, z, 1) V$$

$$V = \begin{pmatrix} -\sin \theta & -\cos \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 \end{pmatrix}$$

$$(tx_s, ty_s, t, 1) = (x_c, y_c, z_c, 1) S$$

$$S = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

(단 t는 매개 변수)

그러므로 화면좌표계에서 기울기가 a이고 y절편이 b인 직선은 수식(3)에 의해 xyz좌표계상의 평면으로 변환된다.

$$(x, y, z, 1) = (tx', t(ax' + b), t, 1)S^{-1}V^{-1} \quad (3)$$

매개변수 t, x'를 소거하여 평면의 일반방정식을 계산하면 수식(4)와 같다⁽⁸⁾.

$$A_1(a, b)x + A_2(a, b)y + A_3(a, b)z + A_4(a, b) = 0$$

$$A_1(a, b) = -\left\{ \left(\frac{b}{f} \sin \phi - \cos \phi \right) \cos \theta + a \sin \theta \right\} \sin \phi$$

$$A_2(a, b) = \left\{ \left(\frac{b}{f} \sin \phi + \cos \phi \right) \sin \theta - a \cos \theta \right\} \sin \phi$$

$$A_3(a, b) = \left\{ \frac{b}{f} \sin \phi \cos \phi + \cos^2 \phi - 1 \right\}$$

$$A_4(a, b) = \left\{ \frac{b}{f} \sin \phi - \cos \phi + 1 \right\} \quad (4)$$

이 평면과 xy평면과의 교선의 방정식은 z좌표가 0이므로 z항을 소거하여 구할 수 있다.

$$A_1(a, b)x + A_2(a, b)y + A_4(a, b) = 0 \quad (5)$$

그러므로 Fig. 4의 화면좌표계에서 두 직선 l, m의 기울기가 각각 a₁, a₂이고, y절편이 각각 b₁, b₂라면 Fig. 5의 l', m'의 방정식은 다음과 같다.

$$l' : A_1(a_1, b_1)x + A_2(a_1, b_1)y + A_4(a_1, b_1) = 0$$

$$m' : A_1(a_2, b_2)x + A_2(a_2, b_2)y + A_4(a_2, b_2) = 0 \quad (6)$$

v축은 l', m'과 수직관계이기 때문에 β는 다음과 같이 계산된다.

$$\tan \beta = \frac{A_2(a_1, b_1)}{A_1(a_1, b_1)} = \frac{A_2(a_2, b_2)}{A_1(a_2, b_2)}$$

$$= \frac{b_1 \sin \theta \sin \phi - f \sin \theta \cos \phi - a_1 f \cos \theta}{b_1 \cos \theta \sin \phi + f \cos \theta \cos \phi + a_1 f \sin \theta} \quad (7)$$

$$= \frac{b_2 \sin \theta \sin \phi - f \sin \theta \cos \phi - a_2 f \cos \theta}{b_2 \cos \theta \sin \phi + f \cos \theta \cos \phi + a_2 f \sin \theta}$$

4.2 원기둥의 반경(R)과 원점과 u축과의 거리(d) 측정

Fig. 5의 평면 A, B와 v축과의 교점을 각각 P₁, P₂라고 정의하면, 원기둥과 평면 A, B는 vz평면과 수직관계에 있기 때문에 vz평면에 사영(Projection)시키면 Fig. 6과 같이, 평면 A, B는 각각 P₁과 P₂를 지나는 직선으로 사영된다. 또한 평면 A, B는 카메라에서 원기둥에 내린 접평면이므로 두 직선의 교점의 z좌표는 카메라의 높이(H)와 같다. 한편 원기둥은 반경이 R인 원으로 사영된다. 이때 사영된 원을 I, 원과 두 직선과의 접점을 각각 D₀, D_n이라고 정의한다.

vz평면에서 P₁, P₂의 v좌표는 각각 원점에서 직선 l', m'과의 거리로부터 구할 수 있다. 수식(6)에서 l', m'의 방정식을 구하였기 때문에 vz평면에서 각각의 좌표는 아래와 같다.

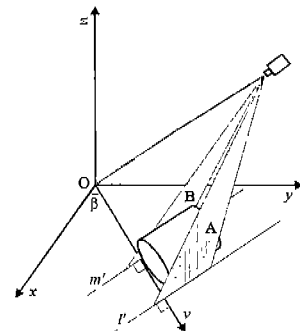


Fig. 5 Tangent Planes of Cylinder from Camera

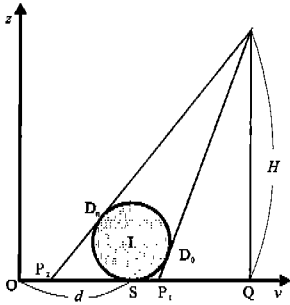


Fig. 6 Projected Cylinder to vz-plane

$$P_1 : \left\{ -\frac{A_1(a_1, b_1)}{A_1(a_1, b_1)} \cos \beta, 0 \right\}$$

$$P_2 : \left\{ -\frac{A_1(a_2, b_2)}{A_1(a_2, b_2)} \cos \beta, 0 \right\} \quad (8)$$

또한 Q는 카메라에서 v축에 내린 수선과의 교점이므로 수식(9)과 같이 좌표를 구한다.

$$Q : (D \cos(\theta - \beta) \sin \phi, 0) \quad (9)$$

P₁, P₂, Q의 좌표를 구하였기 때문에 Fig. 6의 외접삼각형의 3변의 길이를 각각 계산할 수 있다. 삼각형의 3변의 길이를 알면 내접원의 반경이 결정되므로 원기둥의 반경(R)은 수식(10)과 같이 계산된다

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(a+b-c)(b+c-a)(c+a-b)}{(a+b+c)}}$$

단

$$\begin{cases} a = \sqrt{H^2 + P_1Q^2} \\ b = \sqrt{H^2 + P_2Q^2} \\ c = P_1P_2 \end{cases} \quad (10)$$

또한 Fig. 3에서 원점(O)과 S점과의 거리(d)는 수식(11)과 같은 기하학적인 관계를 가진다.

$$d = \overline{OQ} - \frac{\overline{OP_1}(H-R) + R\sqrt{H^2 + \overline{OP_1}^2}}{H} \quad (11)$$

4.3 원기둥의 양쪽 단면의 중심점 위치

원기둥의 양쪽 단면들은 Fig. 7에서와 같이 vz평면

으로부터 평행이동거리 (λ_1, λ_2)를 알면 그 위치를 계산할 수 있으며, 이 두 단면 사이의 거리가 원기둥의 길이가 된다.

앞서 β 와 d 를 계산하였고 xyz좌표계와 uvw좌표계 사이의 변환식을 수식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(u, v, w, 1) = (x, y, z, 1) T \quad (12)$$

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\beta - \pi/2) & \sin(\beta - \pi/2) & 0 & 0 \\ -\sin(\beta - \pi/2) & \cos(\beta - \pi/2) & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & d & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

원 I의 중심좌표는 uvw좌표계상에서 (0, 0, R)이 되며 수식(12)를 이용하여 xyz좌표계로 변환할 수 있다. 그러므로 원 I를 u축 방향으로 일정 거리만큼 평행 이동시켰을 때 카메라에 보여지는 모양을 좌표변환식에 의해 이용하여 예측할 수 있다. 원기둥의 단면의 위치는 예측된 경계선과 실제 영상의 경계선 모양이 가장 잘 일치할 때의 구할 수 있다. 실제 영상의 외곽선과 추측한 모양이 일치하는지 검사하기 위해서 Fig. 8과 같이 원 I의 호를 n등분하여 n-1개의 점들을 설정한다. 이 점들을 D₁, D₂, D₃, ..., D_{n-2}, D_{n-1}라 정의하고

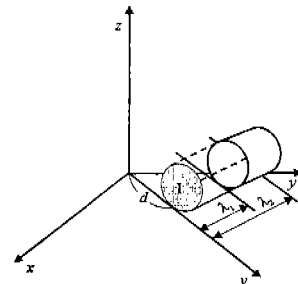


Fig. 7 Geometric Relation with Cylinder and Circle I

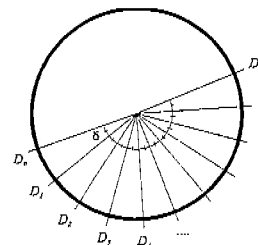


Fig. 8 Sample points of Circle I

그 등분각을 δ 라 한다. δ 는 수식(13)과 같이 계산된다.

$$\delta = \frac{\pi - |\gamma_1 - \gamma_2|}{n} \quad (13)$$

$$\text{단 } \left\{ \begin{array}{l} \gamma_1 = \tan^{-1} \frac{QP_1}{H} \\ \gamma_2 = \tan^{-1} \frac{QP_2}{H} \end{array} \right\}$$

원 I의 중심점과 등분각 δ 를 구하였기 때문에 uvw좌표계에서 D_i 의 좌표들은 수식(14)와 같다.

$$D_i = (0, -R \cos \phi_i, R + R \sin \phi_i) \quad (14)$$

$$\text{단 } \left\{ \begin{array}{l} \phi_i = \delta \times i - \tan^{-1} \frac{QP_1}{H} \\ i = 1, 2, 3, \dots, n-2, n-1 \end{array} \right.$$

좌표 D_i 를 u 축 방향으로 ϵ 만큼 k step 평행이동시킨 좌표를 D_{ik} 라 정의하면, 수식(15)과 같이 나타낼 수 있다. (단 ϵ 는 단위 평행이동거리)

$$D_{ik} : (k\epsilon, -R \cos \phi_i, R + R \sin \phi_i) \quad (15)$$

이제 원기둥좌표 D_{ik} 를 앞서 구한 좌표변환식을 이용하여 수식(16)과 같이 화면좌표로 변환시킬 수 있다.

$$(tx, ty, t, 1) = (D_{ik}, 1) T^{-1}VS \quad (16)$$

k 값을 변화시켜가면서 위에서 구한 D_{ik} 의 화면좌표들과 양쪽 단면의 실제 외곽선과 비교하여 일치하는지 평가한다. 가장 많은 점들이 화면상의 외곽선과 일치할 때 그 k 값을 채택하여 원기둥의 양쪽 단면의 위치를 계산한다. 두 단면이 원 I로부터 각각 k_1, k_2 step 떨어져 있을 때 오차율이 최소라면 두 단면의 평행이동거리 (λ_1, λ_2) 는 각각 $k_1\epsilon, k_2\epsilon$ 가 되며, 앞서 정의된 변환행렬 T 를 사용하여 xyz 좌표계상에서 원기둥의 양쪽 단면의 중심좌표를 구할 수 있다.

$$(x_1, y_1, z_1, 1) = (\lambda_1, 0, R, 1)T^{-1} \quad (17)$$

$$(x_2, y_2, z_2, 1) = (\lambda_2, 0, R, 1)T^{-1}$$

또한 원기둥의 길이(L)는 $|\lambda_1 - \lambda_2|$ 이 된다.

5. 실험결과

본 알고리즘은 Fig. 9와 같이 대차 위에 적재된 냉연코일을 대상으로 검증하였다. 냉연코일의 직경과 길이는 대략 100cm 내외이고 카메라는 지상으로부터 1380cm위에 설치하였다. 사용된 이미지 검지기의 해상

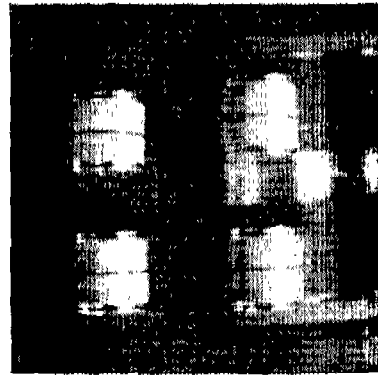


Fig. 9 Sheet Coils filed on Palette

Table 1 Experimental Results

(단위 cm)			
	평균오차	표준편차	신뢰구간(99.9%)
절 이	0.22	1.07	-2.99 ~ 3.43
외 경	-1.28	0.61	-3.11 ~ 0.56
x 좌표	1.20	0.93	-1.59 ~ 3.99
y 좌표	0.63	0.73	-1.56 ~ 2.82

도는 512×512이다. 대차 위에 적재된 50개의 냉연코일을 실험하였으며, 원기둥의 길이를 계산할 때 원 I에서 호를 20개의 점들을 분할하여 화면상의 원형표면으로 도시하였다. 본 논문에서 개발한 알고리즘을 사용하여 계산된 냉연코일의 위치와 실제위치를 측정하여 비교한 결과는 Table. 1과 같다. 99.97%로 신뢰구간을 설정하였을 때 x 축 방향으로 4cm이내, y 축 방향으로 3cm이내였다. 코일을 운반하는 크레인이 작업 가능한 최대허용오차는 x, y 축 각각 5cm, 10cm이기 때문에 충분히 운반작업을 할 수 있었다.

6. 고 찰

실제 공장 내에 CCD카메라를 설치하였음에도 불구하고 실험결과 오차율이 비교적 적었다. 이와 같은 결과는 본 논문에서 제시한 2단계 외곽선 검출 알고리즘의 효용성이 높음을 증명한다. 이는 전체 외곽선을 한꺼번에 검출하지 않고 외곽선의 모양에 따라 직선성분과 곡선성분으로 구분함으로써 가능하였다. 검출하기 쉬운 직선 외곽선을 먼저 찾아 이로부터 기하학적인 관계식을 유도하여 외곽선의 모양이 복잡한 부분을 예측

하여 검출함으로써 오차를 최소화하였기 때문이다.

7. 결 론

본 논문에서는 일반 원통모델 중 원기둥형 물체의 기하학적 특성과 3차원 측정을 위한 기본 방법을 제시하였다. 원기둥의 반경과 길이를 모르는 경우일지라도 바닥에 대상물체가 누어져 있다는 제약을 두었기 때문에 3차원 측정이 가능하였다. 만일 원기둥이 임의의 위치에 존재한다면 본 논문에서 제시한 방법으로는 원기둥의 자세밖에 알 수 없다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로는 레이저와 한대의 카메라를 사용하는 방법을 들 수 있다. 레이저를 사용하면 물체의 높이를 알 수 있기 때문이다.

참고문헌

1. T.O. Binford, "Visual perception by computer", IEEE Conf. on Systems and Controls, Miami, Fla., Dec. 1971.
2. Steven A. Shafer, Takeo Kanade and John Kender, "Gradient Space under orthography and perspective.", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol.24, pp.182-199, 1983.
3. Faith Ulupinar and Ramakant Nevatia, "Shape from Contour: Straight Homogeneous Generalized Cylinders and Constant Cross Section Generalized Cylinders.", IEEE Transaction on Pattern analysis and machine Intelligence, vol.17, pp.120-135, 1995.
4. Jean Ponce, David Chelberg and Wallace B. Mann, "Invariant Properties of Straight Homogeneous Generalized Cylinders and Their Contour.", IEEE Transaction on Pattern analysis and machine Intelligence, vol.11, pp.951-966, 1989.
5. Michael Brady and Alan Yuille, "An Extremum Principle for Shape form Contour.", IEEE Transaction on Pattern analysis and machine Intelligence, vol.6, pp.288-301, 1984.
6. Kent A Stevens, "The Visual Interpretation of Surface Contours.", Artificial Intelligence, vol.17, pp.47-73, 1981.
7. Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro, Computer and Robot Vision, Addison Wesley, pp.43-124, 1993.
8. Anil K. Jain and Patrick J. Flynn, Three Dimensional Object Recognition Systems, Elsevier, pp.181-199, 1993.
9. M.B. Clowes, "On seeing things.", Artificial Intelligence, vol.2, No.1, pp.79-116, 1971.
10. T. Kanade, "Recovery of the three-dimensional shape of an object from a single view.", Artificial Intelligence, vol.17, pp.409-460, 1981.
11. A.K. Mackworth, "Interpreting pictures of polyhedral scenes.", Artificial Intelligence, vol.4, pp.121-137, 1973.
12. Tzay. Young, Recovery of Three-Dimensional Shape of Curved Objects from a Single Image, Handbook of Pattern Recognition and Image Processing: Computer Vision, Academic Press, pp.101-129, 1994.
13. Weiss, "3D Shape Representation by Contour.", Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol.41, pp.80-100, 1988.