

## 슬릿광 투영법을 이용한 곡면과 평면의 식별에 의한 대상물체의 계측

### Measurement of Target Objects Based on Recognition of Curvature and Plane Surfaces using a Single Slit Beam Projection

최 용 운, 김 영 북

(Yong-Woon Choi, and Young-Bok Kim)

**Abstract** : Using a laser sheet beam projector combined with a CCD-Camera, an efficient technique to recognize complex surface of curvature and plane has been demonstrated for the purpose of mobile robot navigation. In general, obstacles of indoor environments in the field of slit-ray plane are captured as segments of an elliptical arc and a line in the camera image. The robot has been capable of moving along around the obstacle in front of it, by recognizing the original shape of each segment with the differential coefficient by means of least squares method. In this technique, the imaged pixels of each segment, particularly elliptical arc, have been converted into a corresponding circular arc in the real-world coordinates so as to make more feasible the image processing for the position and radius measurement than conventional way based on direct elliptical arc analyses. Advantages over direct elliptical cases include i) higher measurement accuracy and shorter processing time because the circular arc process can reduce the shape-specifying parameters, ii) no complicated factor such as the tilt of elliptical arc axis in the image plane, which produces the capability to find column position and radius regardless of the camera location. These are essentially required for a mobile robot application. This technique yields an accuracy less than 2cm for a 28.5cm radius column located in the range of 70-250cm distance from the robot. The accuracy obtained in this study is sufficient enough to navigate a cleaning robot which operates in indoor environments.

**Keywords** : cleaning robot, slit beam projection, image processing, column, pillar

#### I. 서론

최근 역이나 공항 등 넓은 장소를 청소하거나 왁스 도포작업 등의 가혹한 작업환경을 개선하기 위한 로봇의 연구개발이 행해지고 있다. 실용성을 증시한 로봇 개발의 경우 어떠한 방법을 통하여 전체적인 구도가 확립되어져 있다고 하더라도 로봇이 작업을 행할 환경구조의 인식이 중요할 뿐 만 아니라 그러한 환경구조에 대한 정보를 기초로 하여 행동계획이나 운동의 제어방법이 확립되지 않으면 안 된다. 이와 같이 로봇이 넓은 평면공간을 주행해야 할 필요가 있는 환경에서는 벽이나 기둥(각기둥 및 원기둥)이 공존하는 경우가 일반적이다. 특히 사람의 통행이 빈번한 장소에서는 쓰레기 등의 이물질들은 벽면의 구석진 부분이나 기둥주위에 쌓이기 쉽다. 따라서 로봇이 모퉁이 등의 형상을 정확하게 인식하고 그 정보에 따라 정확하게 주행하도록 하는 것이 로봇의 실용화를 위한 과제라고 할 수 있다.

일반적으로 청소용 로봇을 필요로 하는 주행환경에서는 평면으로만 구성되어진 벽이나 각기둥 뿐 만 아니라 원 기둥이 다 수 존재한다. 최근에는 미관상 등의 이유에서 원기둥만이, 혹은 원기둥 및 각기둥이 혼존하는 경우가 많아지고 원기둥의 일부가 벽에 묻혀 있는 경우도 흔하다. 이러한 경우에는 평면의 벽과 원기둥을 분리해

서 대상물체를 계측해야 할 필요가 있게 된다. 청소용 로봇의 실용화를 목적으로 한 종래의 연구에 있어서는 평면의 벽과 각기둥을 대상으로 한 주행환경에서 초음파 거리 센서를 탑재하여 로봇의 주행실험을 행하는 등의 연구가 다수 보고되어 있다[1] [3] 그러나, 로봇이 원기둥과 각기둥을 인식하고 그 대상물을 따라 정확하게 주행하는데 필요한 위치나 자세 및 기둥의 반경을 측정하는 방법에 대한 연구보고는 전무하다. Tomas Lozano-Perez[4]는 지면상의 원통을 다른 각도에서 투사된 복수의 슬릿광을 이용하여 그 축의 방향과 축까지의 거리를 측정하고 있다. 이 방법은 복수 슬릿광의 기하학적 성질을 이용하고 있지만 원통의 크기는 측정할 수 없다. 또한 원통의 외경을 측정하는 계측기는 이미 실용화되어진 것도 있으나 이것은 레이저 주사형의 정적 계측기이고 이동 로봇과 같은 동적인 환경에서는 전혀 사용할 수 없다. 이와 같이 하나의 슬릿광으로 원기둥의 크기나 위치를 계측하는 것이 곤란한 이유는 원기둥에 투사되는 슬릿광을 카메라로 촬영했을 때, 투영상이 타원의 일부이기 때문에 그 장축, 단축을 구하여 중심을 결정하기까지의 처리 시간과 정도에 문제가 있기 때문이다. 한편 도면 인식 분야에 있어서 입력된 타원이나 타원의 일부 혹은 원 및 원호의 화상을 hough 변환[5][6] 및 기하학적 성질[7][8]을 이용하여 그 중심과 직경을 구하는 연구가 보고되어 있다. 그러나 hough 변환의 경우 파라미터 공간의 차수 증가에 따른 과도한 계산 코스트의 문제가 발

접수일자 : 1998. 8. 25., 수정완료 : 1999. 4. 20

최용운 · 일본 Soka 대학 공학부

김영북 · 부경대학교 산학연센터

생하며 기하학적 성질을 이용한 경우에는 거의 완전한 형태의 원 혹은 타원의 입력화상을 대상으로 한 것이 대부분이다. 또한 타원의 일부분으로써 그 중심을 구하는 연구[9]는 짧은 타원호에 대해서는 측정정도에 문제가 발생하는 정적 계측 방식이다. 이러한 방법은 시시각각 변하는 원기둥의 일부분인 타원호의 화상으로부터 그 위치나 반경을 실시간으로 고정도로 측정하는 것은 곤란하므로 로봇에 탑재하여 실용화하는 것은 사실상 무리이다. 그래서 본 논문에서는 이동용 로봇에 탑재한 단일 슬릿광과 TV 카메라에 의한 비교적 단순한 장치로 로봇의 주행 제어에 필요한 계측정도와 제약조건을 만족하고 대상물을 따라 주행하는데 필요한 대상물의 위치나 반경을 구하는 새로운 방법을 제안한다. 본 방식에서는 기둥이나 벽에 투사되는 슬릿광을 TV 카메라로 촬상한 투영상의 타원과 선분상(狀)의 각 화소를 지면의 좌표계로 연산 처리함으로써 원호와 선분상의 좌표로 사상한다. 이렇게 변환된 지면상의 데이터(열)를 복수의 구간으로 분할하고 이들 각 구간에 대해서 직선 근사화를 행한다. 이때 각 구간의 직선의 기울기를 조사함으로써 로봇 전방의 국소적인 기하학적 구조에 관한 정보를 얻는 것이 가능하다.

본 논문에서는 슬릿광 거리 센서를 탑재한 로봇이 기둥이 있는 주행 환경에서 평면과 곡면을 각각 분리 계측함으로써 대상물을 따라 주행하는데 필요한 대상물의 위치나 자세 및 반경을 계측하는 새로운 방법을 제안하고 로봇에 의한 실험결과를 제시한다. 본 방식은 복수 원기둥의 동시 계측 또는 은폐에 의해 원기둥이 분할되거나 원기둥의 일부가 벽면에 묻혀 있는 경우에도 정도 높은 계측이 가능하다.

**II. 슬릿광 거리 센서**

본 연구에서 이용하는 슬릿광 센서의 설명도를 그림 1에 나타낸다. 광원은 파장 830nm의 적외선 반도체 레이저를 이용하고 원통형의 렌즈로 슬릿상을 만든다. TV 카메라는 시판중인 CCD 카메라이고 적외선 투과용 필터를 부착하여 슬릿광의 검출을 용이하게 하고 있다. 카메라 렌즈의 중심 O를 원점으로 하는 XY평면을 기준으로 하고 이것에 수직인 Z축에 TV카메라의 광축을 일치시킨다. 슬릿광 평면은 투광각도  $\alpha$ 로 TV카메라의 위쪽 방향 Q에 위치하도록 한다. 이렇게 구성된 경우, 예를 들어 대상물체가 원기둥이라면 슬릿광에 의해 대상물체 위에 타원형의 상이 만들어진다 이 상을 TV카메라로 읽어들이므로써 주행제어에 필요한 정보를 얻을 수 있게 된다. 본 논문에서는 측정대상으로 실내환경에 존재하는 벽이나 기둥을 고려하고 있기 때문에 대상물체가 지면에 대해 수직이라고 가정한다. TV카메라 상은 임의의 크기로 되나 해석을 간단하게 하기 위해 그 화상면을 가상적으로 그림 1과 같은 위치에 있다고 가정한다 즉, 카메라의 초점거리를  $f$ 라하고 원점 O로부터 Z축상의 거리  $f$ 인 곳에 기준평면과 평행하게 TV 화상면이 있다고 한다(그 좌표계를  $U, V$ 라 한다). 이와 같이 하면 화

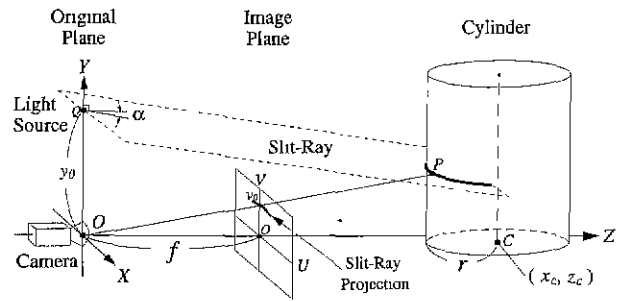


그림 1. 슬릿광 투영법.

Fig. 1. Slit-ray projection method.

상면이 대상물체의 투영면이 되고, 예를 들어 화상면상에서 슬릿광이 종축과 교차하는 점을  $v_0$ 라 하면  $Ov_0$ 의 연장선이 대상물체와 만나는 점 P는 슬릿광 위에 있게 된다.

1. 측정 원리

그림 1에서 광원의 위치를  $Q(0, y_0, 0)$ 로 하고 슬릿광으로부터 만들어지는 평면이 수평면과 이루는 각을  $\alpha$ 라 한다. 단 각도는 시계방향으로 증가할 때 양으로 한다. 이렇게 하면 슬릿광으로부터 만들어지는 평면의 방정식은 다음과 같다

$$y = -z \tan \alpha + y_0 \tag{1}$$

또한 중심  $(x_c, z_c)$ 의 원주 방정식은

$$x = r \cos \phi + x_c, \quad z = r \sin \phi + z_c \tag{2}$$

여기서  $\phi$ 는 매개변수이다. (1), (2)의 연립으로 기둥면과 슬릿광 면과의 교선은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} x &= r \cos \phi + x_c \\ y &= -\tan \alpha (r \sin \phi + z_c) + y_0 \\ z &= r \sin \phi + z_c \end{aligned} \tag{3}$$

한편  $f$ 를 카메라 렌즈의 초점거리라 하면 3차원 공간  $(X, Y, Z)$ 와 화상면  $(U, V)$ 의 관계식은

$$u = f \frac{x}{z}, \quad v = f \frac{y}{z} \tag{4}$$

로 된다. 따라서 교선 방정식 (3)을 (4)에 대입하면, 원기둥에 투사된 슬릿광은 투시 변환되어 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u &= f \frac{r \cos \phi + x_c}{r \sin \phi + z_c} \\ v &= f \frac{-\tan \alpha (r \sin \phi + z_c) + y_0}{r \sin \phi + z_c} \end{aligned} \tag{5}$$

(5)로부터 매개변수를 소거하면 화상면  $(U, V)$ 에 입력되는 투영상 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_0^2 u^2 + 2\phi f x_c y_0 u - 2x_c y_0 - 2f(\phi r + y_0 z_c) v \\ + \tau v^2 + f^2(\phi r + 2\phi y_0 z_c + y_0^2) = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

단,  $\varphi = -\tan \alpha$ ,  $r = x_c^2 + z_c^2 - r^2$ 이다 그런데 주행하는 로봇에 센서가 탑재되어 있다는 것을 고려할 때 원기둥의 중심이 Z축의 중심으로부터 벗어나는 경우가 많으므로 화상에 입력된 슬릿광 투영상의 타원호가 왜곡되어 보인다거나 일부가 카메라의 시야로부터 멀어져서 보이지 않는 경우가 생기게 된다. 따라서 화상 투영상의 일부 타원호로부터 장·단축 및 그 축의 기울기를 구하여 타원의 중심을 정확하게 측정하는 것은 곤란하기 때문에 (3)으로부터 원기둥의 위치와 반경을 구하는 것이 그렇게 간단하지 않다. 그래서 본 연구에서는 화상상의 타원호를 이용하지 않고 다음과 같은 방법으로 측정한다 즉, (1), (4)를  $x, z$ 에 대해 풀면 다음과 같이 표현된다.

$$x = \frac{uy_0}{v + f \tan \alpha}, \quad z = \frac{fy_0}{v + f \tan \alpha} \quad (7)$$

이것은 화상면 (U, V)상의 점(화소)을 기준평면 (X, Z)로 변환하는 식이 되고 대상물체위에 투사된 슬릿광의 XZ평면으로의 사상이 된다 이것은 대상물체를 바로 위에서 본 것과 같으며 원기둥의 경우는 원호상의 점의 집합으로, 벽의 모서리나 각기둥의 경우는 선분상의 점의 집합으로 나타난다(이하, 이러한 점의 집합을 각각 원호성분, 선분성분이라 부른다). 따라서 원기둥의 경우에도 화상상의 타원호의 상태와는 관계없이 XZ평면으로 변환된 원호의 파라미터로서 중심과 반경이 구해지기 때문에 촬상위치의 변화에 의한 타원호의 기울기를 고려할 필요가 없다.

2 처리 순서

슬릿광 거리센서에 의해 기둥(원·각)이 존재하는 실내공간에 투사되는 슬릿광의 투영상은 타원호 및 선분으로 나타난다. (7)에 의해 화상면의 투영상은 타원성분과 선분성분으로서 기준평면으로 변환된다. 이러한 성분에 대해 로봇의 주행제어에 필요한 정보를 측정하기 위해서는 각각의 성분을 분리할 필요가 있다. 실제 화상면의 투영상은 양자화 되어 수 화소에 이르는 폭을 갖는다 그렇기 때문에 이하의 순서에 따라 대상으로 하는 기둥과 벽에 대해 필요한 데이터를 얻는다

1) 촬상: 대상물체로부터 반사되는 슬릿광을 TV 카메라로 취득

2) 선의 세선화(細線化): 선의 추적을 쉽게 하기 위해 화상면의 투영상을 한 화소에 의한 세선화

3) 선의 추적: 선이 세선화된 화상면의 곡선 및 선분을 추적하고 화상면의 좌표(화소)를 (7)을 이용하여 변환하여 데이터 열로 보존한다. 이때 잡음 등에 의해 끊어진 선은 과거의 추적방향을 고려해서 동일 선으로 간주하여 끊어진 부분을 연결한다. 또한 어떤 일정한 값보다 짧은 선은 노이즈로 간주하여 제거한다.

4) 원호성분(원기둥)의 분리. 추적하는 데이터 열의 구간별 기울기의 변화를 이용하여 원호성분을 분리한다. 그 데이터 열의 나머지는 모두 단일 혹은 복수의 선분성분으로 처리한다

5) 선분성분(평면)으로의 분할: 4)에서 선분성분으로

남은 데이터 열은 단일 혹은 복수의 선분성분이므로 복수의 선분성분을 단일성분으로 분할한다

6) 평면의 계측: 5)에서 분할된 선분성분을 최소자승법을 이용하여 평면까지의 거리 및 자세의 계측을 행한다.

7) 원기둥의 계측: 4)에서 분할된 원호상의 좌표로부터 최소자승법을 이용하여 복수의 법선을 구한다. 이 법선군은 양자화에 의한 오차 때문에 중심의 한 점에서는 만나지 않는다. 따라서 최소자승법을 이용하여 복수 법선에 의한 연립방정식의 최적해를 구하고 이 것을 원호성분의 중심으로 한다 이 중심과 원호상(狀)의 각 점까지의 평균거리를 반경으로 한다. 즉, 여기에서는 주행에 필요한 원기둥까지의 거리와 반경을 계측한다.

III. 원기둥과 평면의 식별 방법

실내의 기둥이나 벽 등이 입력된 슬릿광 거리센서의 화상으로부터 원기둥과 평면을 분리하는 하나의 방법은 실제 평면과 원기둥을 측정하고 그 곡률로부터의 평가치 [10]를 이용하여 분리를 행하는 방법을 들 수 있다. 그러나 로봇에 있어서 화상면의 투영상은 대상물의 크기나 로봇의 위치, 방향 등에 의해 변하기 때문에 그 평가치의 일반화가 대단히 곤란하다. 그래서 본 논문에서는 원기둥과 평면의 식별에 의한 분리를 위해 측정실험에 의한 평가치를 이용하지 않고 원기둥과 평면의 기하학적 성질을 이용한다. (7)에서 XZ평면으로 변환된 좌표는 물체를 바로 위에서 본 것과 같으며 원기둥과 평면은 각각 원호성분과 선분성분으로 나타난다. 이 좌표 데이터 열의 미소 구간(여기서는 30점)에 대해 최소자승법을 이용하여 직선 근사화를 행하고 이 직선의 기울기를 평균 변화율이라 부른다. 이 평균 변화율은 원호성분과 선분성분의 국소적인 기하학적 성질에 관한 정보를 갖고 있다 따라서 여기에서는 원호성분과 선분성분을 평균 변화율로 나타낸 것을 1차 평균 변화율이라 부른다. 또한 1차의 값을 평균 변화율로 표현한 것을 2차 평균 변화율이라 하고 이것을 다시 평균 변화율로 나타낸 것을 3차 평균 변화율이라 한다. 결국 표에 나타난 각각의 평균 변화율의 특징을 이용하면 그림 2의 순서에 따라 원호성분과 선분성분의 분리가 가능하게 된다

1. 원호성분(원기둥)의 분리

그림 2에 나타난 것과 같이 선분성분과 원호성분의 식별은 선분성분 혹은 원호성분이 단독으로 존재하는 경우와 이것들이 복합적으로 존재하는 경우는 크게 다르다. 원호성분과 선분성분이 각각 별도로 존재하는 경우는 표에 나타난 것과 같이 2차 평균 변화율만을 조사함으로써 식별이 가능하다 그러나 원호성분과 선분성분이

표 1. 평균 변화율.

Table 1. Mean variation.

Variation	Line Parts	Arc Parts
First	constant	linear function
Second	neighbor of 0	constant
Third	neighbor of 0	neighbor of 0

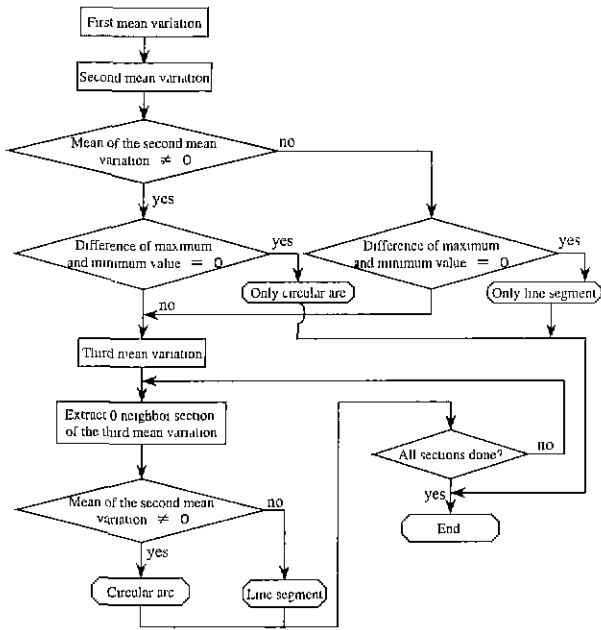


그림 2. 원호성분 분리의 흐름.  
Fig. 2. The flow chart for separating circular arc part.

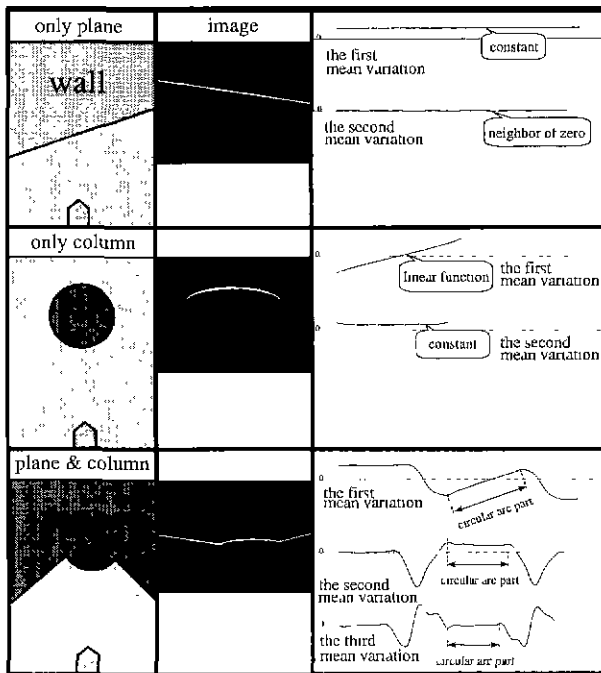


그림 3. 각각의 입력화상과 평균 변화율  
Fig. 3. Input image and the mean variation for each case.

복합된 경우에는 3차 평균 변화율의 값이 0 근방인 구간을 추출하고 그 구간의 2차 평균 변화율의 값이 0 근방이 아니면 그것을 원호성분으로서 분리한다. 이때 원호 성분 외에는 모두 단일 혹은 복수의 선분성분이 된다. 예로서 평면이나 원기둥만인 경우, 평면과 원기둥이 복합된 경우 등 각각의 경우에 대한 입력화상과 평균 변화율을 그림 3에 나타낸다.

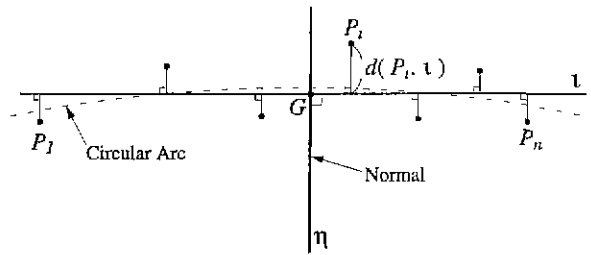


그림 4. 근사 접선과 법선.  
Fig. 4. An approximate tangent and normal line.

2. 선분성분(평면)의 분할

원호성분을 분리한 후 연속한 선분성분이 존재하는 경우에는 그것을 단일의 선분성분으로 분할하지 않으면 안 된다. 여기에 그 분할방법을 기술한다.

- 1) 연속한 선분성분의 단점(端点)을 연결한다.
- 2) 단점을 연결한 선과 연속한 선분성분간의 면적을 구하고 그 값을 단점을 연결한 선의 길이로 나누어 단위 길이 당 면적을 구한다. 이것을 선분성분으로 분할하기 위한 평가치로 한다.
- 3) 평가치는 동일선분을 이루고 있는 점의 집합과 구분 될 수 있도록 설정하고 그 평가치 이하인 경우에는 단일성분이라 간주하고 분할을 완료한다. 그 이외의 경우는 선분성분으로의 분할을 행한다.
- 4) 단점을 연결한 선에 연속한 선분성분과의 거리가 최대가 되는 점을 구해 그 점을 분할점으로 해서 단일의 선분성분으로 분할하고 2)로 간다.

IV. 원기둥과 평면의 계측 방법

원호성분과 선분성분으로 분할된 각 좌표의 데이터 열은 양자화 등에 의한 오차 때문에 원호 및 직선 상에 있다고 믿을 수 없다. 따라서 최소자승법을 이용하여 직선 근사화를 다음과 같이 행한다.

우선, 그림 4에 나타낸 것과 같이 XZ평면으로 변환된 데이터 열중의 좌표가  $p_i(x_i, z_i)$ ,  $(i=1, 2, \dots, n)$ 라고 한다. 그리고 근사화를 해야 할 직선  $l$ 의 거리를  $d(p_i, l)$ 라 두고

$$S = \sum_{i=1}^n \{d(p_i, l)\}^2 \rightarrow \min$$

로 되는 직선  $l$ 를 구한다. 근사화 해야 할 직선  $l$ 의 방정식을  $l: x \cos \theta + z \sin \theta = h, h \geq 0$ 라 하면

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i \cos \theta + z_i \sin \theta - h)^2 \tag{8}$$

로 표현된다. S를 최소로 하는  $h$ 와  $\theta$ 는 다음과 같이 구해진다.  $\frac{\partial S}{\partial h} = 0$ 로부터

$$h = \frac{1}{n} (\cos \theta \sum_{i=1}^n x_i + \sin \theta \sum_{i=1}^n z_i) \tag{9}$$

로 되고 이것을 (8)에 대입하여  $\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0$ 를  $\theta$ 에 대해 풀면 다음과 같이 그 해를 구할 수 있다.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2 \left( \sum_{i=1}^m x_i z_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m z_i \right)}{\sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m z_i^2 - \frac{1}{n} \left( \left( \sum_{i=1}^m x_i \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^m z_i \right)^2 \right)} + \frac{q}{2} \pi \quad (10)$$

(10)에서  $q$ 를 임의의 정수라 두면  $0 \leq \theta < 2\pi$ 의 범위에서 서로 직교하는 4방향의 해가 구해진다. 서로 반대 방향일 때 얻어지는 하나의 해의 조합에서 (8)의  $S$ 가 최소로 되고 다른 하나의 조합에서는 최대가 된다[11]. 즉 여기에서  $S$ 를 최소로 하는 해의 조합이 근사화 시켜야 할 직선  $l$ 가 되고, 최대가 되도록 하는 조합이 그 법선을 나타내고 있음을 알 수 있다.

1. 원호성분(원기둥)의 계측

원호성분으로 분할된 좌표 데이터 열의 복수의 구간에 대해 최소자승법으로 각각의 법선을 구하고 그 법선군으로부터 원호성분의 중심과 반경을 산출한다. 우선, 중심을 구하기 위해서는 법선을 나타내는 (8)의  $S$ 가 최대가 되는 해의 조합을 선택할 필요가 있다. 이를 위해 (8)의  $S$ 를  $\theta$ 로 2차 편미분하여 다음과 같이 둔다.

$$\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} < 0 \quad (11)$$

또한 이것을 (10)과 연립하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{W}{\sin 2\theta} > 0 \quad (12)$$

단,  $W = \sum_{i=1}^m x_i z_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m z_i$ 이다 (12)와 (10)을 정리하면 법선이 될 조건은

$W > 0$ 일 때

$$0 < \theta < \frac{\pi}{2}, \pi < \theta < \frac{3}{2}\pi \text{ 및 } h \geq 0$$

$W < 0$ 일 때

$$\frac{\pi}{2} < \theta < \pi, \frac{3}{2}\pi < \theta < 2\pi \text{ 및 } h \geq 0$$

$W = 0$ 일 때

$$\theta = 0, \pi \text{ 및 } h \geq 0$$

로 된다. 이것들의 일련의 처리를 데이터 열의 복수의 구간에서 반복해서 원호성분의 법선군을 생성한다. 다음으로 법선군의 연립방정식의 최적해를 구하고 이것을 원호성분의 중심으로 한다.

1.1 중심 산출에 의한 반경의 검출

일반적으로 진원의 일부인 원호의 법선군은 그 중심의 한 점과 만난다. 그러나 양자화 된 화상면의 화소로부터 얻어진 법선군은 오차가 포함되어 있기 때문에 단일점에서 교차하지는 않는다. 그래서 최소자승법을 이용하여 각 법선으로부터의 거리가 최소가 되는 점을 원호성분 각 점의 중심으로 생각하고 그것을 구하도록 한다.

그림 5에 나타낸 것과 같이  $m$ 개의 법선  $\eta_i$ 의 방정식을  $\eta_i: x \cos \theta_i + z_i \sin \theta_i = h_i, h_i \geq 0, (i=2, 3, \dots, m)$ 라 두고,  $XZ$ 평면상의 점  $C$ 와 법선  $\eta_i$ 와의 거리를 각각  $d(C, \eta_i)$ 라고 하면

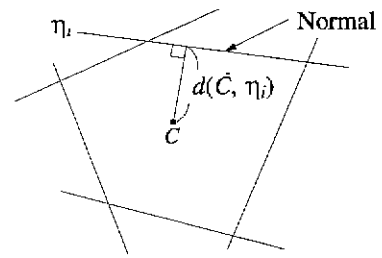


그림 5. 법선으로부터의 중심의 검출.

Fig. 5. Detection of the center coming from a normal set.

$$J = \sum_{i=1}^m \{d(C, \eta_i)\}^2 \rightarrow \min$$

로 되는  $C(x_c, z_c)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J = \sum_{i=1}^m (x_c \cos \theta_i + z_c \sin \theta_i - h_i)^2 \quad (13)$$

와 같이 표현되고, 이때  $J$ 를 최소로 하는  $x_c, z_c$ 는

$$\frac{\partial J}{\partial x_c} = 0, \frac{\partial J}{\partial z_c} = 0 \text{로부터}$$

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^m h_i \cos \theta_i \sum_{i=1}^m h_i \sin^2 \theta_i - \sum_{i=1}^m h_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^m \cos \theta_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^m \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^m \sin^2 \theta_i - \left( \sum_{i=1}^m \cos \theta_i \sin \theta_i \right)^2} \quad (14)$$

$$z_c = \frac{\sum_{i=1}^m h_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^m h_i \cos^2 \theta_i - \sum_{i=1}^m h_i \cos \theta_i \sum_{i=1}^m \cos \theta_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^m \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^m \sin^2 \theta_i - \left( \sum_{i=1}^m \cos \theta_i \sin \theta_i \right)^2}$$

가 된다. 이 계산처리를 분할된 원호성분 각각에 대해 행함으로써  $XZ$ 평면에서 원호상으로 되어있는 각 점의 중심이 결정된다. 이렇게 계산된 중심  $C(x_c, z_c)$ 로부터 원호성분 각 점까지의 평균거리를 대상 원기둥의 반경으로 결정한다.

1.2 동일 원호성분의 판단

원기둥의 일부가 다른 물체에 의해 은폐되어 있을 경우에는 복수의 타원호로 끊어진 슬릿광 투영상이 얻어진다. 이때에는 끊어진 원호성분 각각에 대해 중심을 구하여야 하지만 원호성분의 길이가 짧기 때문에 각각의 중심이 모두 하나의 점에 일치하지 않으며 각 원호성분의 반경의 오차 또한 커지게 된다. 그래서 일부가 끊어진 복수의 원호성분으로부터 구한 중심과 반경이 아래의 조건을 만족하면 동일한 원호성분으로 간주한다.

$$\epsilon(r_i + r_j) - d(C_i, C_j) > 0 \quad (15)$$

단,

$\epsilon$  : 계수 ( $\epsilon < 1$ )

$d(C_i, C_j)$  원호  $i, j$ 로부터 구한 중심  $C_i, C_j$  간의 거리

$r_i, r_j$  : 원호  $i, j$ 의 반경

이다. 이 조건을 만족한다면 각 원호성분에 대한 법선을 이용하여 다시 중심과 반경을 구하고, 복수의 원호성분을 동일한 것으로 판단하여 그것들을 연결시킴으로써 원

호성분이 점점 길어지게 되므로 보다 정도 높은 반경의 계측이 가능해진다.

2 선분성분(평면)의 검출

단일 선분성분으로 분할된 XZ 평면의 좌표 데이터 열을 최소자승법을 이용하여 직선 근사화를 행한다. 그 기울기를 로봇에 대한 평면의 자세라 한다. 또한 좌표 데이터 열의 단점과 근사화된 직선과의 거리가 가장 짧게 되는 직선상의 점을 선분성분의 단점이라 한다.

우선, 선분성분의 좌표 데이터 열로부터 근사화 해야 할 직선을 선택하기 위해 (8)의 S를  $\theta$ 로 2차 미분하여 그 값을 양으로 두고 (10)과 연립시키면 (12)는

$$\frac{W}{\sin 2\theta} < 0 \quad (16)$$

가 된다. (16)과 (10)을 합하면 근사화 직선이 되기 위한 조건은

$W > 0$ 일 때

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta < \pi, \frac{3}{2}\pi \leq \theta < 2\pi \text{ 및 } h \geq 0,$$

$W < 0$ 일 때

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}, \pi \leq \theta < \frac{3}{2}\pi \text{ 및 } h \geq 0,$$

$W = 0$ 일 때

$$\theta = 0, \pi \text{ 및 } h \geq 0$$

가 된다.

그리고 구해진 직선의 기울기  $\theta$ 로부터 선분성분의 단점은 다음과 같이 산출된다. 그 단점을  $(p_{st}, q_{st})$ ,  $(p_{en}, q_{en})$ 로 두고 데이터 열의 단점좌표를  $(x_{st}, z_{st})$ ,  $(x_{en}, z_{en})$ 라 하면 그것은 다음과 같이 구해진다.

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{4}, \frac{3}{4}\pi \leq \theta < \frac{5}{4}\pi, \frac{7}{4}\pi \leq \theta < 2\pi \text{ 일 때}$$

$$p_{st} = \frac{(h - z_{st} \sin \theta)}{\cos \theta}, q_{st} = z_{st},$$

$$p_{en} = \frac{(h - z_{en} \sin \theta)}{\cos \theta}, q_{en} = z_{en},$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta < \frac{3}{4}\pi, \frac{5}{4}\pi \leq \theta < \frac{7}{4}\pi \text{ 일 때},$$

$$p_{st} = x_{st}, q_{st} = \frac{(h - x_{st} \cos \theta)}{\sin \theta},$$

$$p_{en} = x_{en}, q_{en} = \frac{(h - x_{en} \cos \theta)}{\sin \theta}$$

V. 실험

그림 6은 이번 실험에서 이용한 이동 로봇을 나타내고 있다. 로봇의 길이는 40cm, 폭 31cm, 높이 61cm이고 2륜 구동형이다. 2.2절에서 기술한 슬릿광 센서는 로봇의 중앙 상부에 부착되어 있다. 로봇의 측정위치에 따라서 변하는 회상 투영상을 이용하여 원기둥과 평면을 분리하기 위한 식별실험을 하였다. 식별된 원호성분과 선분성분을 분할하고 원기둥의 위치와 그 반경의 측정 및 평면의 자세측정을 행하였다 이때, 그림 1에 있어서  $\alpha =$

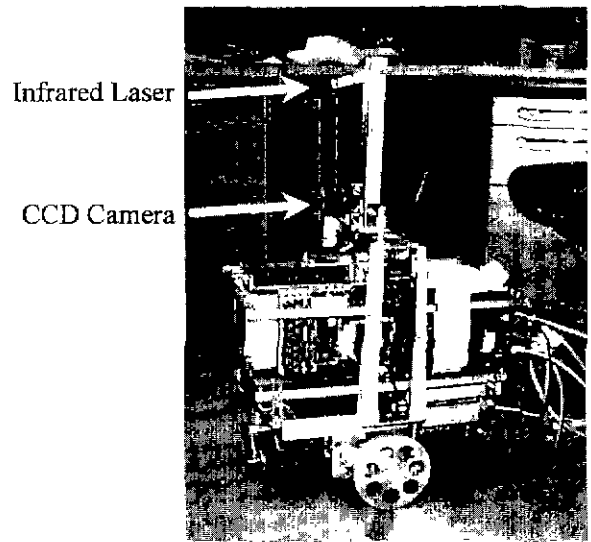


그림 6. 이동 로봇의 외관.  
Fig. 6. Overview of a mobile robot.

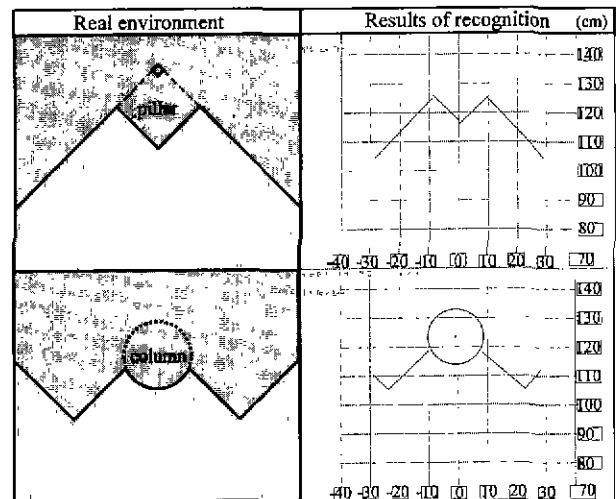


그림 7. 평면과 원기둥 각각의 인식 결과.  
Fig. 7. The result of the recognition for plane and column.

14.8°,  $f = 8.45\text{mm}$ ,  $y_0 = 172.0\text{mm}$ 이고 화상면의 크기는  $640 \times 480\text{pixel}$ , 각 투영상의 측정정도는 세선화(細線化)로 1화소로 하였다. 또한 이하에 기술하는 측정오차는 각 위치에서 각각 10회씩 측정하여 그 결과로부터 최대 오차의 절대치를 나타내고 있다.

1. 원기둥과 평면의 식별

슬릿광 거리센서는 단일의 원기둥과 평면의 계측뿐만 아니라, 그것들이 동시에 존재하는 환경에 있어서도 그것들의 식별 분리 및 계측이 가능하다. 그림 7의 좌측은 벽의 모서리에 각기둥과 원기둥이 서있는 경우를 상징하여 측정대상물을 바로 위에서 보았을 경우를 나타내고 있다. 이것은 실내 환경에서 흔히 볼 수 있는 비교적 복잡한 벽이나 모서리 부분을 재현한 것이고 이러한 환경에서 원기둥과 평면의 식별 실험을 행하였다. 그 실험 결과를 그림 7의 우측에 나타낸다 이것은 로봇을 기준

으로 10cm 간격의 평면상에서 계측된 위치와 그 자세를 나타내고 있다 이 그림의 오른쪽 상부는 복수의 평면을 단일 평면으로 분할 측정된 후 각각을 연결하여 합쳐 놓은 것이다 또한 오른쪽 아래 부분은 원기둥의 곡면과 평면이 동시에 존재하는 경우에 있어서 각각의 식별에 의한 분리 측정의 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 분할된 요소의 연결부분에서 측정오차가 생김을 알 수 있다. 그러나 이것은 약 2cm 이하이고 로봇의 주행 제어에는 문제가 되지 않는 정도이다.

2. 원기둥의 위치와 그 반경의 측정

넓은 실내의 평면공간을 이동하는 로봇이 절하게 되는 원기둥의 크기는 다양하기 때문에 로봇의 위치나 방향에 의해서 화상의 투영상은 다양하게 얻어진다. 또한 원기둥의 주위에 재떨이 등이 놓여 있으면 카메라의 시야 내에는 단 하나 혹은 다수의 원기둥이 존재하거나 그것들이 은폐되어 있는 경우를 생각할 수 있을 것이다. 여기에서는 실제의 환경을 고려하여 반경  $\gamma = 28.5, 14.2$  cm인 원기둥을 대상으로 하여 각각 원기둥의 위치와 반경을 측정하였다. 우선, 반경  $\gamma = 28.5$ cm인 원기둥을 대상으로 하여 Z축 방향으로 70.0-250.0cm의 범위에서 30.0cm씩 변화시켜 가면서 원기둥까지의 거리와 그 반경을 측정하였다. 그 측정오차를 그림 8에 나타낸다. z가 100-190cm 범위에서는 오차가 수 mm 정도임을 알 수

있다. z = 70cm 근방에서 오차가 커지는 것은 산란광이 강하므로 입력화상에 잡음이 많아지기 때문이다. 또한 z = 250cm와 같이 멀어지는 경우는 입력화상의 타원호가 짧아져 곡율이 작아짐으로써 생기는 결과이다. 이 그림에서 실험에 이용한 로봇이 원기둥의 측면을 통과하기 위해서는 원기둥의 중심으로부터 X 방향으로 45.0cm되는 지점에서 원기둥을 인식할 필요가 있다. 그래서 카메라의 시야 각을 고려하여 거리 z = 150cm에서 원기둥의 중심을 x = 0.0에 맞추고 X 방향으로 0.0-60.0cm 범위에서 5.0cm씩 변화시켜 타원호의 길이 변화에 의한 원기둥의 위치와 그 반경을 측정하였다. 그 측정오차를 그림 10에 나타낸다. 이 그림에서 카메라의 위치가 원기둥의 중심으로부터 멀어짐에 따라 슬릿광 투영상의 길이는 짧아지고, r = 50.0cm 위치로부터 측정오차가 커짐을 알 수 있다. 이때 x = 0.0, 10.0, 50.0cm의 위치에서 입력된 일련의 화상을 그림 9의 각 그림 우측 상단에 나타낸다. 또한 그림 9에서는 투영상의 각 화소를 XZ 평면으로 변환한 원호상의 좌표로부터 구한 변선군의 최적해인 중심을 검출하고 있는 모습을 나타내고 있다.

다음으로 화상에 복수의 원기둥이 동시에 존재하는 경우를 상징하여 실험을 행하였다. 거리 z = 150.0cm에서 X축 방향으로 5.0cm씩 변화시켜 가면서 2개의 원기둥이 나열되어 있는 경우와 은폐되어 있을 때 각각의 반경을 측정하였다. 이때, 카메라의 방향은 Z축과 평행하게 고정하고 X 방향으로 5.0cm 단위로 촬영하였다. 이렇게 촬영한 화상 중 타원호의 길이에 의해 측정오차가 급변하는 위치에서 촬영한 입력화상의 예를 그림 11에 나타낸다. 그림 12는 반경  $\gamma = 28.5$ cm와  $\gamma = 14.2$ cm의 원기둥이 나열하여 있는 경우의 측정오차를 나타내고 있다. 이 그림에서는 화상의 타원호가 짧아지고 x = 50, 50.0cm를 경계로 하여 오차가 커짐을 알 수 있다(그림 11(a) 참조). 또한 반경  $\gamma = 28.5$ cm의 원기둥이  $\gamma = 14.2$ cm의 물체에 은폐되어 있는 경우의 측정오차를 그림 13에 나타낸다 타원이 다른 물체에 의해 분할될 경우 화상의 타원호가 짧아지기 때문에(그림 11(b) x = 10.0) 분할된 원기둥의 측정오차는 커지게 되고, 그림 11(b)(x = 40.0)의 좌측 타원과 같이 너무 짧게 되면 측정이 불가능하다 그러나, 그림 11(b) (x = 0.0)와 같이 타원호가 은폐물

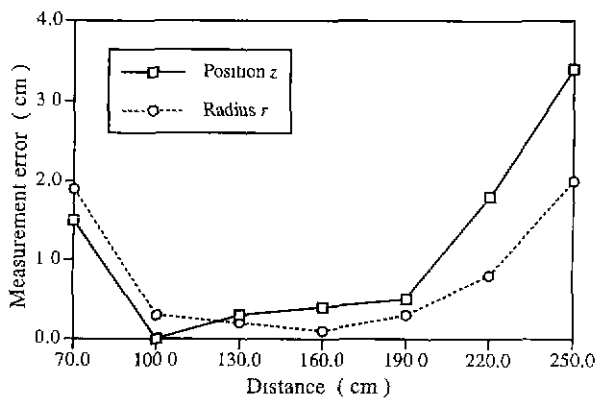


그림 8. 거리와 반경의 측정 오차.  
Fig. 8 Measurement errors for radius r and position z.

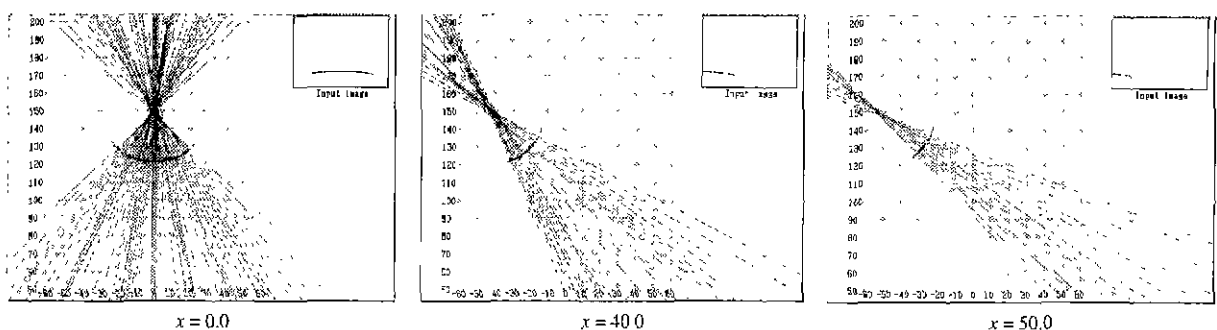


그림 9 일련의 입력화상과 중심의 검출과정.  
Fig. 9. The sequence of input image and process of the center detection

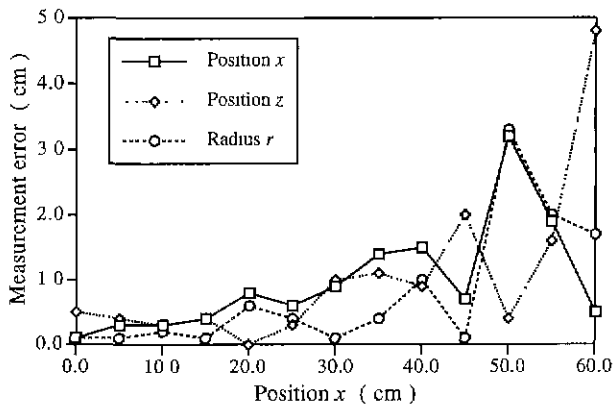


그림 10. 타원호의 길이에 있어서의 위치와 반경의 측정 오차.

Fig. 10. Measurement errors for the position and radius vs. length of elliptical arc in the image.

제에 의해 양측으로 분할된 경우에는 (15)의 동일 원기둥으로 판단하는 조건에 의해 원기둥의 반경이 양호한 정도로 구해짐을 알 수 있다.

3. 평면의 자세 측정

청소를 목적으로 하는 로봇의 장애물 회피 행동은 그 크기, 주행속도, 주변 환경에 의하지만 적어도 장애물의 100.0cm 전방에서 장애물을 확인하여 회피 준비에 들어갈 필요가 있다. 본 연구에서는 인간의 보행속도(4.0km/h) 정도를 상정하여 거리 120.0cm에서 평면(벽)을 계측하기로 한다. 그래서, 로봇의 정지위치에서 거리 120.0cm되는 곳에 평면 물체를 두고, 그것을 30°에서 -30°까지 5°씩 변화시켜 갈 때의 대상물의 자세를 측정하였다. 그 측정오차는  $\pm 3.5^\circ$  이하였다[12].

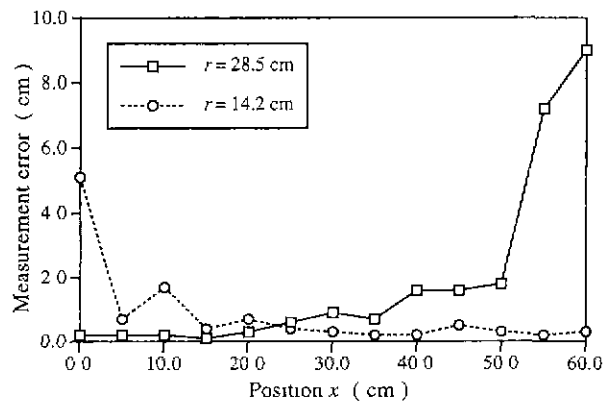


그림 12. 원기둥이 나열되어 있는 경우의 측정 오차.  
Fig. 12. Measurement errors for the case of standing in a row

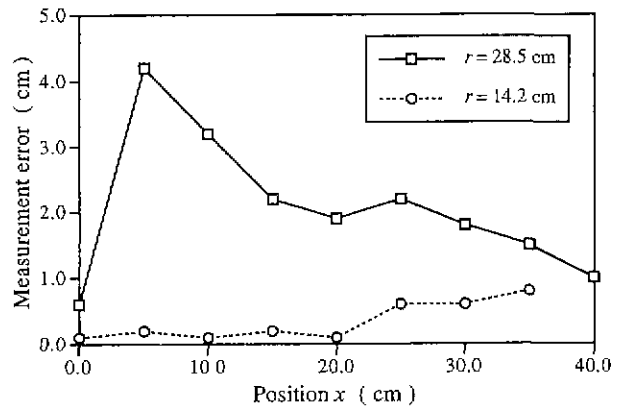


그림 13 원기둥이 은폐되어 있는 경우의 측정 오차.  
Fig. 13. Measurement errors for the occlusion case.

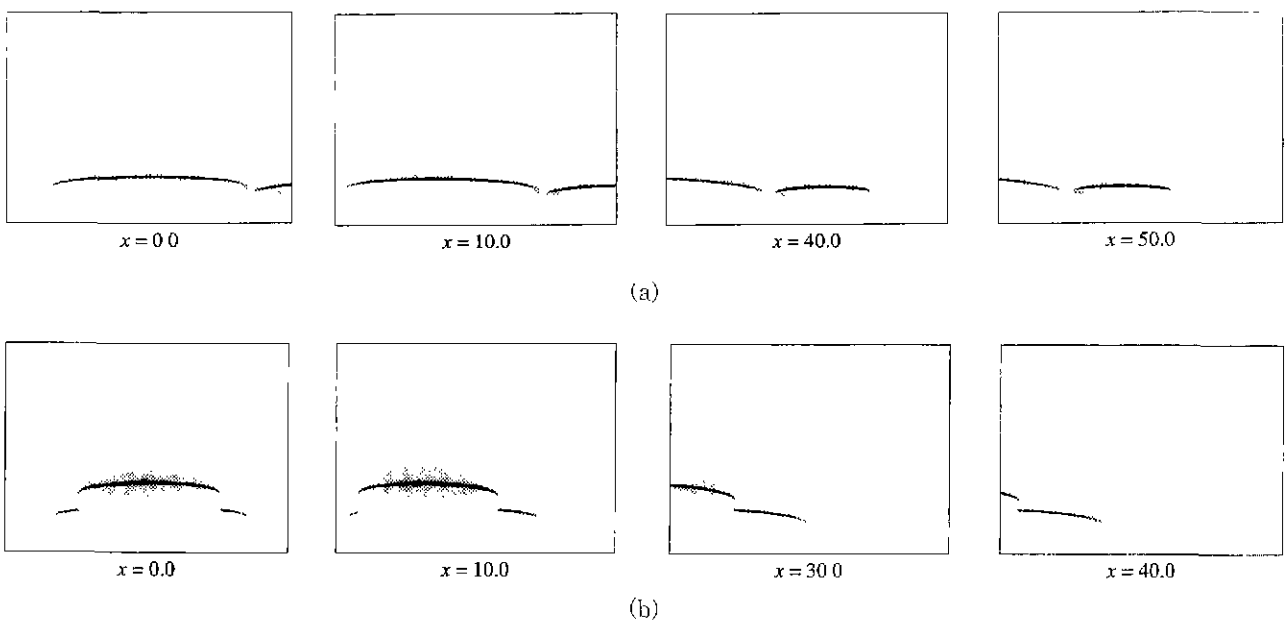


그림 11. 2개의 원기둥의 입력화상. (a) 원기둥이 나열되어 있는 경우, (b) 은폐되어 있는 경우

Fig. 11 An input image of two columns. (a) The case of two columns standing an a row, (b) The case of occlusion.



## VI. 결론

단일의 슬릿광 투영법에 의한 거리센서를 청소용 로봇에 탑재하고 평면과 곡면의 식별에 의해 대상물체의 위치와 그 자세 및 반경을 측정하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 방법을 이용하여 로봇에 의한 계측실험 결과에 대해 고찰하였다.

원기둥에 투사되는 슬릿광 투영상은 카메라의 위치나 방향에 의해 여러 가지 패턴의 상이 얻어지나 어느 경우에서나 원기둥의 일부인 비교적 짧은 타원호의 영상이 얻어진다. 이 화상면의 투영상으로부터 직접 원기둥의 반경을 얻는 것은 곤란하다는 것을 확인하였다. 또한 본 방법에서는 화상면 ( $U, V$ )위에 타원호를 형성하고 있는 점(화소)을 기준면 ( $XZ$  평면)으로 사상한 타원상의 데이터 열로부터 원호의 중심을 구하였다. 이것은 원기둥의 위치와 반경의 측정에 있어서 정도가 양호할 뿐만 아니라 타원호의 장·단축으로부터 중심을 결정하는 방법보다 원호로부터 중심을 결정하는 것이 효율이 뛰어난 것을 확인하였다.

실험에서는 원기둥이 단독으로 존재할 경우 뿐만 아니라 복수 또는 벽면에 원기둥의 일부가 은폐되어 있는 경우에 대해서도 식별과 분리에 의해 대상물의 위치와 그 반경을 측정하였다. 화상의 투영상 길이에 있어서의 측정오차는 타원호가 어떤 일정의 길이보다 짧아지면 그

오차는 커지게 되나 카메라의 시야 각과 로봇의 폭을 고려할 때 로봇의 주행에는 지장이 없는 정도임을 확인하였다. 또한, 은폐에 의해 복수로 분할된 원호의 경우는 동일 원주의 판단 조건에 의해 정도 높은 측정결과를 얻었다. 본 실험에서, 거리 70.0-250.0cm의 범위에서 원기둥의 위치와 반경의 측정오차가 각각  $\pm 3.5$ ,  $\pm 2.0$ cm 이하이고 그 처리시간은 2.0초 이내(Pentium 120MHz)였다. 이 결과는 청소작업을 목적으로 하는 로봇에 있어서 실용상 전혀 문제가 없는 충분한 정도와 처리시간이다.

## 참고문헌

[1] 青山, 田島, 横田, 尾崎, 山本, "自律歩行式麻面清掃

ロボットの開発", 日本ロボット學會誌, vol. 16, no. 1, pp. 57-64, 1998

- [2] A. M. Flynn, "Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation", *International Journal of Robotics Research*, vol. 7, no. 6, pp. 5-14, 1988.
- [3] タキダ, 背戸, 肥田, "自律歩行ロボットに関する研究", 日本ロボット學會誌, vol. 10, no. 3, pp. 411-417, 1992
- [4] T. L. P. W. Eric L. Grimson, Steven J. White, "Finding cylinders in range data", *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 202-207, 1987.
- [5] R. O. Duda and C. E. Hart, "Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures", *Commun. ACM*, vol. 15, no. 1, pp. 11-15, 1972.
- [6] C. Kierkegard, "A method for detection of circular arcs based on the hough transformation", *Machine Vision and Applications*, vol. 5, no. 4, pp. 249-263, 1972
- [7] 大和, 入澤, 石井, 牧野, "重み付け中点圖面を用いた円抽出 アルゴリズム", 信學論(D-II), J72-D-II, 7, pp. 1009-1016, 1989.
- [8] 佐藤, 袖山, "共役直徑の性質を用いた橢圓パターンの抽出法", テレビジョン學會誌, vol. 46, no. 11, pp. 1495-1504, 1992.
- [9] 森克, 池上, "幾何學的性質に基づく橢圓弧の中心抽出", 信學論(D-II), J77-D-II, 7, pp. 1236-1244, 1994
- [10] 羅, 安田, 鳥脇, "濃淡畫像中の圓弧狀輪郭線の検出の一手法とその應用", 信學記報, IE88-47, pp. 79-86, 1988.
- [11] 金谷, "畫像理解-3次元認識の數理", 森北出版, 1990.
- [12] 嵯, 高橋, 前川, "三角錐スリット光による對象平面の距離とその姿勢計測", 計測自動制御學會論文集, vol. 32, no. 4, pp. 445-450, 1996.



최용운

1983년 중앙대학교 전자계산학과 졸업. 일본 Kobe 대학 석사(1990), 동대학 박사(1995). 1995년-현재 일본 Soka대학 공학부 정보시스템학과 助手, 관심분야는 화상계측 및 Mobile Robot Control.



김영복

1989년 부산수산대학교 기관학과 졸업. 동대학원 석사(1991). 일본 Kobe 대학 박사(1996). 1996년-현재 부경대학교 산학연센터 연구원, 관심분야는 제어계 설계 및 해석, 동시최적 제어, 해양 구조물의 진동제어, 선박 및 해양관련 시스템의 제어 및 자동화.