

碩士學位論文

초음파 센서를 이용한 형상기준지도
작성에 관한 연구



機械工學科

姜秉秀

2000年 12月

초음파 센서를 이용한 형상기준지도
작성에 관한 연구

指導教授 林 鐘 煥

姜 秉 秀

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



姜秉秀의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2000 年 12 月

A Study on the Feature Based Map Building
Method Using Sonar Data

Byung-Soo Kang

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER
OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2000 . 12 .

목 차

SUMMARY	1
I.서 론	3
II.이론해석	6
1. 초음파 센서	6
2. RCD 분류	9
3. 형상기준지도 작성 모델	11
3.1 RCD와 RCD의 매칭	11
3.2 형상과 RCD 매칭	14
3.3 지도작성 알고리즘	17
3.4 물체 재구성	19
III. 실험결과 및 고찰	21
1. 실험장치 및 방법	21
2. 실험결과	23
IV.결론	29
참고문헌	30



SUMMARY

The thesis presents a sonar based map building method which is one of the central issue for mobile robot navigation. The environment is a room or area inside a building, which is composed of four types of geometric primitives(corners, edges, cylinders, and walls). We assume the environment can be modeled into two dimensional map in terms of planes(walls), points(corners and edges), and circles(cylinders).

In a real world where most of the object surfaces are specular ones, a sonar sensor suffers from a multipath effect which results in a wrong interpretation of the location of an object. To reduce the effect and uncertainty, the method employs a simple thresholding technique for extracting circular arc features called regions of constant depth(RCD) from scanning sonar data.

Based on the RCDs, map building involves following two stages.

1. *Classification of new tentative targets via data-to-data association*

This is a process of clustering together unexpected RCDs that yield a mutually consistent target interpretation, e.g. corner, edge, wall or cylinder.

2. *Promotion of tentative target to confirmed status*

After classification, the objective of this process is to match new observations to tentative target to compute increasingly accurate target estimate. Match to tentative targets are obtained by matching RCDs predicted from the tentative targets to observed RCDs.

For each positions the method performs the two stage described above, and finally reconstruct an environmental map by merging and combing the targets into a complete plane, corner, edge, or cylinder. The usefulness of the approach is illustrated with the results produced by sets of experiments.



I. 서론

자율 이동 로봇은 주어진 환경에서 스스로 자신과 물체들의 위치를 파악하여 주위 환경에 대한 지도를 형성하고 이 지도를 바탕으로 목적지까지 주행할 수 있는 경로계획과 위치평가 기능을 갖추어야 한다(Lim, 1994a). 자율 이동 로봇이 미지환경을 탐사할 때 센서의 정보를 이용하여 지도를 형성하며, 이 지도로부터 로봇의 위치를 판단하기 위해서는 기본적으로 로봇주위 환경에 대한 신뢰성 있는 표현 수단이 필요하다. 이 수단은 주로 환경지도로 구체화되며 여러 가지 형태의 환경지도 형성 방법이 개발되어 있다.

지도 형성에는 비전 센서와 초음파 센서가 주로 쓰이는데 비전 시스템에서는 영상이미지로부터 물체의 윤곽을 추출하여, 두 영상을 매칭(Matching)하는 방법을 연구하고 있으나 시간이 많이 소요되어 실시간 적용이 어려워 아직은 단순한 형상이나 제한된 환경에서만 적용될 수 있는 단계이다. 반면에 초음파 센서는 값이 싸고, 사용이 간편하며, 거리정보가 직접적으로 이용가능하기 때문에 널리 쓰이는 센서중 하나이다.

초음파 센서는 대부분의 실제 물체에 대해서 거울 효과(Specular Reflection)가 발생하므로 센서 정면의 최근접 물체가 감지되지 못하고 여러 번 다른 물체에 반사되는 다중반사 경로 현상이 발생한다. 음파가 전파되는 방향이 센서의 중심각을 기준으로 전방향으로 퍼져나가는 특징을 가지고 있는데, 일반적으로 50° 정도를 유효 감지각으로 규정한다(Crowley 1987, Steer 1990, Cho 1990, Lim 1994a). 따라서 초음파 센서는 물체의 거리와 방향에 대해 큰 불확실성을 갖고 있어서 형성된 지도의 질이 낮아 충분한 위치 정보를 줄 수가 없었다.

이와 같은 초음파 센서의 문제점을 해결하는 방안으로 작업영역을 2차원의 그리드로 나누고 각 그리드에 물체가 존재할 확률을 계산하여 초음파 지도를 형성하는 방법이 Moravec(1985)등에 의해 제안되었다(Moravec, 1988). 최근 초음파

센서의 문제점인 거울효과를 해결하는 연구가 이루어져 초음파 지도를 이용한 자율항해의 가능성이 제시되었다(Lim 1992, Lim 1994a, 임 1994b). 초음파 센서의 한계성을 극복하는 다른 방법으로서, 서로 다른 종류의 센서를 동시에 이용하여 정보의 불완전성을 줄이는 연구도 진행되었다(Elfes 등 1987). 즉, 넓은 구경의 초음파 센서와 스테레오 비전 데이터를 결합하여 서로의 단점을 보완하며, 장점을 강조할 수 있도록 하는 시도가 있었다. 그러나 그리드 형태의 초음파 지도 형성의 단점은 그리드의 크기에 따라 지도의 해상도가 달라질 뿐만 아니라 필요한 메모리량도 크게 달라진다는 것이다.

형상기준지도는 물체의 구체적인 형상 즉, 평면, 모서리, 원형 등을 기준으로 한 지도로서 위치 및 방향에 대한 정보를 갖고 있으므로 로봇항해에 필수적인 위치 추적 및 위치 재평가에 효과적으로 적용될 수 있다. Lim등(2000)은 형상기준지도를 이용하여 정확한 위치 재평가가 가능함을 보였다. 그러나 전술한 바와 같이 초음파 센서의 거리 및 방향 불확실성이 크기 때문에 물체의 형상 추출이 어려워 이에 대한 연구가 미진했다. 최근 Leonard(1990, 1991)는 한 위치에서 얻은 여러 개의 초음파 거리 정보로부터 동일거리영역(Region of Constant Depth : RCD)를 분류하는 방법을 제안하였다. 이것은 초음파 센서의 거리 및 방향 불확실성을 최소화시킬 수 있는 것으로서 그리드 형태가 아닌 구체적인 물체의 형상을 기준으로 한 지도작성의 가능성을 제시하였다. 따라서 본 논문에서는 이 RCD를 이용하여 물체의 형상에 기준한 초음파 지도 작성 방법을 제안한다.

형상기준지도를 작성하기 위해서는 먼저 로봇이 이동하면서 주위 환경을 초음파 센서를 이용하여 거리정보를 수집하게 된다. 이때 초음파 센서로부터 들어오는 정보가 많을수록 정확한 형상지도를 작성할 수 있는데 정보를 얻는 방법은 로봇둘레에 일정 간격으로 초음파 센서를 고정하여 데이터를 얻는 방법과 로봇 중심에서 하나의 초음파 센서를 이용하여 360. 로 회전시키며 데이터를 얻는 방법이 있다. 전자의 경우는 한 위치에서 데이터를 얻는데 소요되는 시간이 짧지만 데이터 수가 적어 지도작성에 어려움이 많은 반면에 후자의 경우는 측정시간이

오래 걸리지만 지도의 질은 향상될 수 있으므로 본 연구에서는 후자를 택하였다.

수집된 거리정보는 거리와 방향 불확실성이 크기 때문에 이것을 줄이기 위해 동일 물체에서 들어온 정보를 하나의 데이터로 묶어 RCD를 형성한다. 이 RCD를 이용하여 형상지도를 형성하는 방법은 다음과 같다.

먼저 지금까지의 정보에 의해 분류된 동일 물체 형상에 대응되는 RCD 집단 내의 각 RCD와 현재 새로 형성된 RCD에 대응되는 물체의 형상을 예상하고 그 형상이 그 집단의 형상과 동일하면 현재의 RCD 집단에 소속시키고 그렇지 못하면 독립적인 또 다른 집단으로 분류한다. 다음으로 새로 추가된 RCD가 있는 RCD 집단은 새로운 RCD를 고려한 예상물체의 형상을 갱신하며 일정 수 이상의 RCD가 한 집단에 소속되면 그 예상물체를 확정물체로 분류하고 예상물체 RCD 집단에서 제외시킨다. 이와 같은 과정을 반복함으로써 전체 환경에 대한 형상기준지도를 형성하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 초음파 센서의 특성과 RCD 추출방법을 기술하고 형상기준지도 형성방법 및 물체 재구성 방법을 제시한다. 3장에서는 로봇을 이용한 실제 실험으로 그 유용성을 입증하고 마지막으로 4장에서는 결론을 도출한다.

II. 이론해석

1. 초음파 센서

초음파 센서를 이용한 물체 검출방법에는 직접형과 반사형이 있는데, 직접형 검출 방식은 송신기와 수신기를 대향시켜 배치하여 수신파의 유무에 따라 물체의 유무를 검출하는 방식으로서 물체까지의 거리는 알 수가 없다. 반사형 검출 방식은 송신된 음파가 물체 표면에서 반사된 것을 감지하는 것으로서 송신기와 수신기를 2개 사용하는 독립형과 하나의 송수신 겸용 초음파 센서를 사용하는 겸용형이 있다. Fig. 1은 겸용형 초음파 거리 측정 시스템의 예로 센서 하나로 해결할 수 있는 이점은 있으나 송수신 전환 회로가 필요하며, 아주 가까운 거리는 검출할 수 없다.

센서로부터 대상 물체까지의 거리를 센서로부터 초음파 펄스를 발사하여 그 초음파가 물체의 표면에서 반사, 산란하여 되돌아오기까지의 시간을 측정함으로써 그 물체의 거리를 파악할 수 있다. 즉, 공기 중에서 음파의 전달 속도(c)는 1기압에서는 다음과 같다.

$$c = 331.4\sqrt{T/273} \quad [m/sec] \quad (1)$$

여기서 T 는 절대온도이다. 음파의 왕복 전달시간이 t 초라 하면 그 사이의 거리 (L)은 다음과 같이 구해진다.

$$L = \frac{1}{2} \times c \times t \quad [m] \quad (2)$$

보통 공기 중에서 거리 측정에 사용되는 초음파 주파수는 25kHz~200kHz 정도이며, 이로동로봇용으로는 주로 40kHz~50kHz 정도를 사용한다.

그러나 반사형의 초음파 거리 센서를 이용하는 경우에 대상 물체의 반사 특성이 큰 문제가 된다. 측정 거리의 대상이 되는 물체의 위치나 형상, 재질이 대강 정해져 있는 경우는 별로 문제가 없으나, 로봇용의 환경 센서 등에서는 대상 물체의 성질이 일정하다고는 할 수 없으며 그 수신계는 넓은 범위의 반사 강도에 대응할 수 있어야 한다. 또 대상 물체의 표면이 비교적 매끈한 경우는 음파가 전부 정반사가 일어나므로 음파의 진행 방향에 대해 경사가 있는 면에서는 조사한 초음파가 전부 반사되어 수신센서의 방향으로 되돌아오지 않아 물체가 감지되지 못하는 경우가 있는데 이것을 거울효과라 한다(Lim, 1994a). 40kHz~50kHz 초음파 센서의 경우 표면 평균 거칠기가 0.0025m 이하인 경우 정반사가 발생하므로 일반적인 실내 환경의 물체들은 대부분 거울 효과가 발생한다.

또한 물체들의 형상과 위치에 따라서는 음파가 여러번 물체에 반사되어 수파기로 되돌아가는 경우도 있다. 이때는 실제 센서 전방의 최근접 물체가 감지되지 못할 뿐만 아니라 실제 물체가 없는 위치의 거리정보를 주게 되는데 이것을 다중반사경로 현상이라 한다(임, 1994b). 이와 같이 초음파 센서로 얻은 물체의 위치정보는 물체 표면에 대해 수직 방향에서 얻어진 값 이외에는 신용할 수 없다. 즉, 초음파 레인지 파인더에 의해 얻어지는 환경지도는 반드시 실제의 환경 형상과는 일치하지 않는다는 점에 주의할 필요가 있다.

한편 얻어진 반사파의 파형이 대상물에 따라 달라지는 것은 그 속에 대상 물체의 성질에 관한 정보가 포함되어 있음을 의미한다. 따라서 반사파형을 자세한 부분까지 해석하면 그 대상 물체의 종류와 형상도 인식할 수 있어 로봇의 대상 물체 인식에 이용될 가능성도 있다.

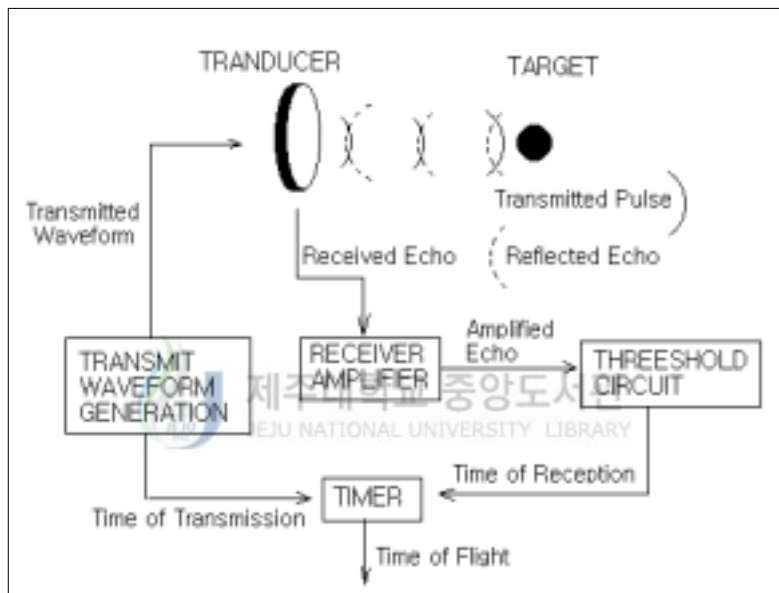


Fig. 1 The Polaroid ultrasonic ranging system

2. RCD 분류

Fig. 2는 초음파 센서로 주위 환경을 탐색한 예로서 그래프에서 보면 측정된 값이 연속적으로 수평한 부분들이 여러 곳에 나타남을 알 수 있다. 이 연속적인 수평한 부분들은 이 동일한 거리를 갖는 영역으로서 동일 물체에 의한 거리 데이터라 할 수 있는데 이것을 가리켜 RCD(Regions of Constant Depth)라 한다. 이 RCD는 한 개의 데이터가 RCD로 될 수도 있고, 여러 개를 모아 될 수도 있으나, 센서의 유효각내에서 얻은 데이터만 가능하다(Leonard등 1991).

Fig. 3은 유효 감지각이 β 인 5개의 초음파 거리 데이터가 형성하는 RCD를 나타낸 것이다. 거리 데이터중 우측에 해당하는 데이터의 각도를 θ_1 이라 하고 좌측에 해당하는 데이터의 각도를 θ_2 라 할 때 이 5개의 데이터로 형성된 RCD의 방향각을 다음과 같이 θ_1 과 θ_2 의 평균값(θ_m)으로 정의한다.

$$\theta_m = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (3)$$

이 경우 RCD의 실제 방향에 대한 조건은 초음파 센서의 유효각을 고려하면 다음과 같다.

$$\theta_u = \theta_1 + \frac{\beta_{\max}}{2} \quad (4)$$

$$\theta_l = \theta_2 - \frac{\beta_{\max}}{2} \quad (5)$$

즉, 실제 이 물체의 방향은 θ_u 와 θ_l 사이의 어느 각도일 것이라는 의미가 된다. 따라서 이 RCD는 거리 R과 θ_m , 그리고 각도 조건인 θ_l 과 θ_u 로 정의된다.

RCD를 분류하는 방법은 한 위치에서 360. 전방향에 대한 거리정보를 입수한 후 거리오차 상수 δ_{RCD} 를 정의하여 이웃하는 거리정보 중 오차가 δ_{RCD} 이내인 데이터 집단을 구성한 후 식(3)~(5)를 이용하여 각도 조건을 구하고 평균값을 R로 정의한다. 거리오차 상수 δ_{RCD} 는 polaroid 초음파 센서의 경우 0.05m 정도이다.

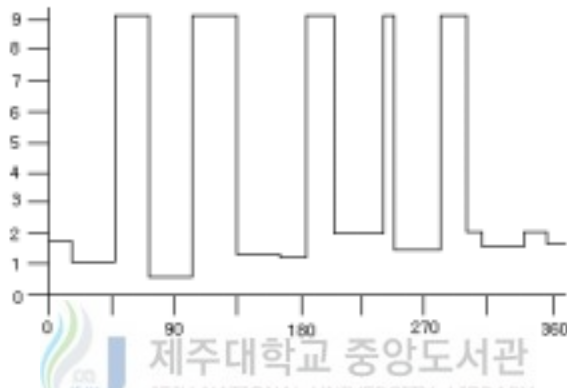


Fig. 2 A plot of range vs sonar scan data

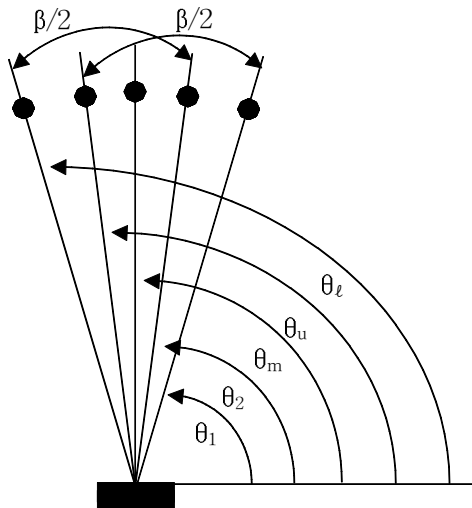


Fig. 3 Constraint angles for a five element RCD

3. 형상기준지도 작성 모델

지도 작성은 두 개의 서로 다른 단계에서 분류된 RCD들로부터 대응되는 물체형상(평면, 모퉁이, 모서리, 원통)을 추출하는 RCD와 RCD 매칭, 그리고 여러 RCD가 모여 하나의 물체 형상을 이룰 때 이 물체 형상과 새로 들어온 RCD를 매칭하는 형상과 RCD 매칭의 2단계를 거친다.

3.1 RCD와 RCD의 매칭

Fig. 4와 같이 거리가 d 인 두곳에서 얻어진 두 개의 RCD의 길이를 Z_1, Z_2 라 하고, 각각을 반지름으로 하는 원을 그렸을 때 이 원에 외접하는 반지름이 R 인 원의 중심좌표를 (x_c, y_c) 라고 하면, θ_1 은 다음과 같이 표현된다.

$$\cos(\theta_1) = \frac{x_c}{z_1 + R} \quad (6)$$

또한 기하학적인 관계에서 다음 식들이 성립한다.

$$(z_1 + R)^2 = y_c^2 + x_c^2 \quad (7)$$

$$(z_2 + R)^2 = y_c^2 + (d - x_c)^2 \quad (8)$$

식(8)에서 식(7)을 빼면 다음 식을 얻는다.

$$(z_1 + R)^2 - (z_2 + R)^2 + d^2 = 2dx_c \quad (9)$$

식(9)를 식(6)에 대하여 대입하면 다음과 같다.

$$\cos(\theta_1) = \frac{(z_1 + R)^2 - (z_2 + R)^2 + d^2}{2d(z_1 + R)} \quad (10)$$

또한 각 물체의 중심좌표는 다음과 같이 구해진다.

$$x_c = (z_1 + R) \cos(\theta_1) \quad (11)$$

$$y_c = (z_1 + R) \sin(\theta_1) \quad (12)$$

θ_1 과 같은 방법으로 θ_2 를 구하면

$$\cos(\theta_2) = \frac{(z_1 + R)^2 - (z_2 + R)^2 - d^2}{2d(z_2 + R)} \quad (13)$$

이 된다.



Leonard(1990)는 식(10)과 (13)을 이용하여 $R=\infty$ 또는 $R=0$ 을 가정하여 θ_1 과 θ_2 를 구하고 이 각들이 식(4)와 (5)로 정의되는 RCD 각도 조건을 만족하면 직선 또는 모서리나 모퉁이 형상으로 분류하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 $0 < R < \infty$ 인 경우에는 적용시킬 수 없는 것으로서 실린더 형상에 대한 해결책은 제시하지 못했다.

R 이 유한한 경우($0 < R < \infty$)에도 이 방법을 적용시키기 위해 식(10)을 R 에 대해 다시 쓰면 다음과 같다.

$$R = \frac{z_1^2 - z_2^2 - 2d \cos \theta_1 z_1}{2(d \cos \theta_1 + z_2 - z_1)} \quad (14)$$

Fig. 4에서 θ_1 과 θ_2 는 각각의 RCD에 대한 대표 각도로서 실제로 물체가 존재할 범위는 식(4)와 (5)에 정의된 바와 같으므로 식(14)에서 R 이 유일하게 결정되

지 못한다. 따라서 θ_1 에 대한 θ_l 과 θ_u 에 대해 식(14)를 적용하여 최소 R과 최대 R을 구한 다음 이것을 식(13)에 대입하여 각각에 대응되는 각도를 각각 t_l 과 t_u 를 구한다. 이 때 각(t_l, t_u)와 θ_2 에 대한 θ_l 과 θ_u 사이의 공통부분이 존재할 때만 두 RCD는 동일 형상에 대응된다고 할 수 있다. 이 공통부분의 각을 θ_s 와 θ_m 이라 하면 각각에 대해 다시 식(14)로부터 대응되는 R_s 와 R_m 구한다. R_s 와 R_m 이 구해지면 이것을 식(11)과 (12)에 대입하여 다음과 같은 물체 형상에 대한 두 경계 조건을 $(x_c, y_c, \theta, R)_s$ 와 $(x_c, y_c, \theta, R)_m$ 을 찾을 수 있다. 즉, 물체의 최소 반경과 그 중심좌표는 $(x_c, y_c, R)_s$ 이고 최대 반경과 그 중심좌표는 $(x_c, y_c, R)_m$ 임을 의미한다.

식(14)는 두가지의 극한값이 존재하는데 $R=0$ 일 때는 모서리나 모퉁이를 나타내며 θ 는 의미가 없다. 또한 $R=\infty$ 일때는 직선 형상(평면)을 나타내며 이때는 (x_c, y_c) 는 의미가 없고 θ 는 센서 위치로부터 평면의 방향, 그리고 R은 거리를 나타낸다.

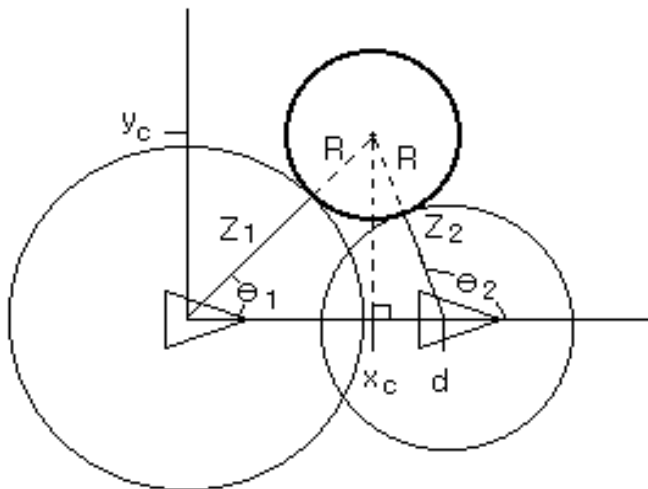


Fig. 4 Matching two observed RCDs

$0 < R < \infty$ 일 때는 원통 형상으로서 제 3의 RCD와 매칭은 각 RCD 조합이 형성하는 경계조건을 구하고 각각의 중심좌표를 연결하는 직선이 서로 교차하면 3쌍의 RCD가 동일물체에 대응되며 그 교차점이 실제 원의 중심이라고 볼 수 있다.

3.2 형상과 RCD 매칭

앞장에서와 같이 각 RCD를 서로 매칭하여 동일 물체 형상에 대응되는 RCD를 같은 클러스터로 정의하고 각 클러스터가 형성하는 물체 형상을 예상 물체로 정의한다. 이 예상물체는 매 단계마다 새로 들어오는 RCD 정보를 이용하여 업데이트를 하여 확정물체로 갱신한다. 이때 예상 물체와 RCD 사이의 매칭이 필요하다.

RCD와 예상 물체 사이의 매칭은 로봇의 현재 위치로부터 예상물체에 대해 가상의 RCD를 예측하여 수행한다. Fig. 5는 평면 물체에 대한 가상 RCD를 예측하기 위한 모델로서 예상 RCD의 길이와 각도를 각각 \hat{R} 와 $\hat{\theta}$ 라 할 때 다음과 같이 된다.

$$\hat{R} = P_v(P_R - x_s \cos(P_\theta) - y_s \sin(P_\theta)), \quad \hat{\theta} = P_\theta \quad (15)$$

여기서 P_R 은 센서에서 평면까지의 최소거리이고, P_θ 는 x축과 평면의 수직인 방향이 이루는 각, P_v 는 평면의 방향 매개변수로써 2차원 평면이 센서를 중심으로 좌측에 존재하면 -1 우측에 존재하면 1을 갖는 값이다.

Fig. 6은 원통형 물체에 대한 가상 RCD 예측 모델로서 다음과 같다.

$$\hat{R} = \sqrt{(p_x - x_s)^2 + (p_y - y_s)^2} - P_R,$$

$$\tan(\hat{\theta}) = \frac{P_y - y_s}{P_x - x_s}, \quad P_x \neq x_s \quad (16)$$

여기서 P_x 는 원형이 x축 중심 좌표값, P_y 는 y축 중심 좌표값이고, P_R 은 반지름을 나타낸다.

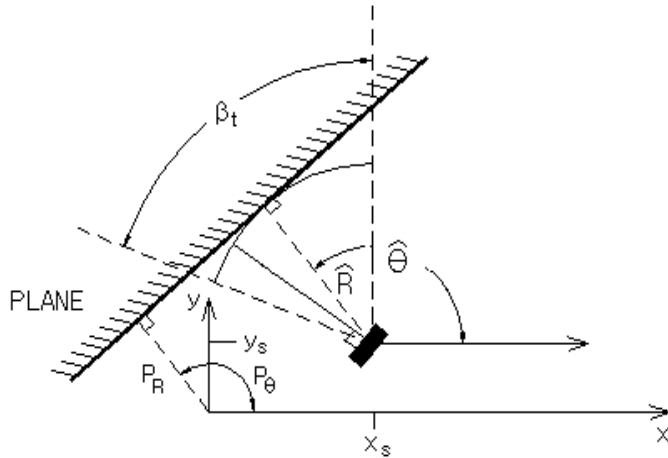


Fig. 5 Plane target model for target to data association

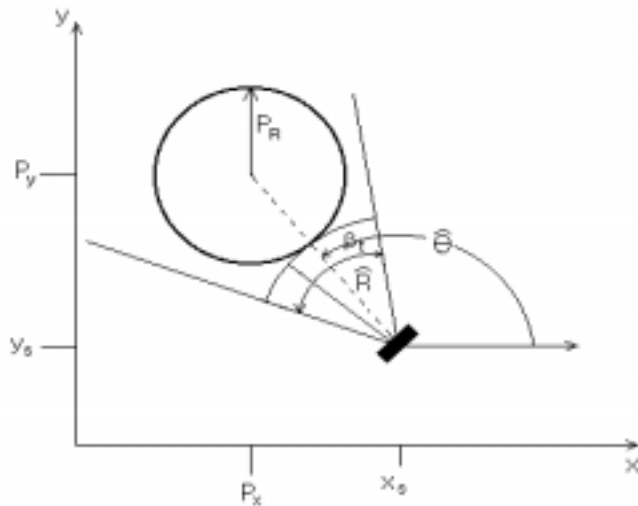


Fig. 6 Cylinder target model for target to data association

Fig. 7과 8은 각각 모퉁이와 모서리에 대한 모델로서 예상 RCD는 다음으로 표현된다.

$$\hat{R} = \sqrt{(P_x - x_s)^2 + (P_y - y_s)^2},$$

$$\tan(\hat{\theta}) = \frac{P_y - y_s}{P_x - x_s}, \quad P_x \neq x_s \quad (17)$$

여기서 P_x 는 모서리의 x축 좌표값, P_y 는 y축 좌표값이다.

이와 같이 예상물체로부터 가상 RCD를 구한 다음 실제 RCD와 비교하여 다음 조건을 만족하면 실제 RCD가 예상물체에 대응되는 것으로 정의한다.

$$|R - \hat{R}| = \delta_R, \quad \theta_u < \hat{\theta} < \theta_l \quad (18)$$

여기서 δ_R 은 센서의 특성과 로봇의 위치오차를 고려한 거리오차상수이며 θ_u 와 θ_l 은 실제 RCD의 각도조건이다.

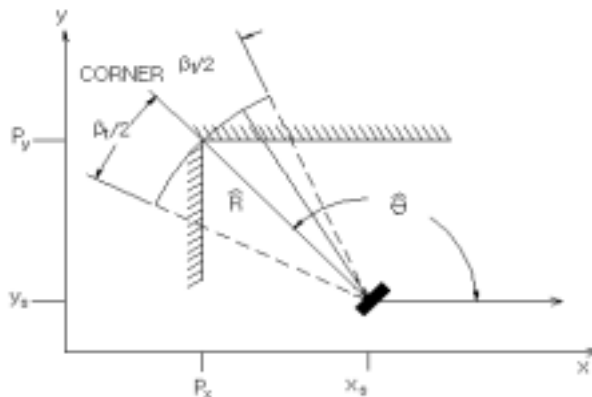


Fig. 7 Corner target model for target to data association

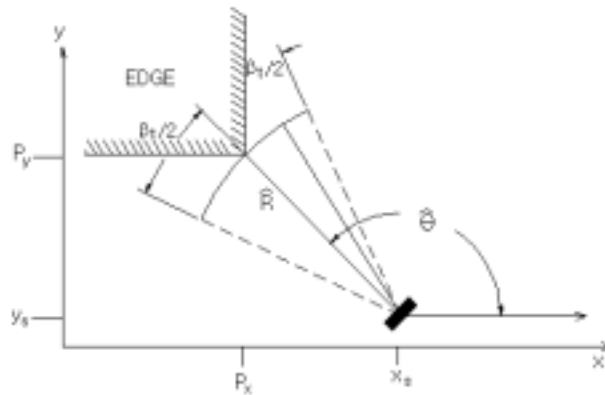


Fig. 8 Edge target model for target to data association

3.3 지도작성 알고리즘

Fig. 9는 한 위치에서의 지도작성 흐름도를 나타낸다. 로봇이 한 위치에서 거리정보를 획득하면 먼저 이것으로부터 RCD를 추출한다. RCD 추출은 이웃하는 거리정보의 차가 전술한 바와 같이 오차상수 δ_{RCD} 이내인 집단을 분류함으로써 이루어진다. 이와 같이 추출된 RCD를 같은 형상에 대응되는 RCD끼리 그룹을 지어 클러스터를 만든다.

지도형성초기에는 정의된 클러스터가 없으므로 모든 RCD가 각각 하나의 클러스터가 되며 다음 단계부터는 각 RCD와 정의된 클러스터와의 매칭이 수행된다. 새로운 RCD가 들어오면 각 RCD에 대해 각 클러스터와 매칭을 수행하는데 만약 대상 클러스터가 예상물체 클러스터이면 3.2절과 같이 형상과 RCD 매칭을 수행하고 그렇지 않으면 3.1절 이론에 의해 그 클러스터 구성요소인 RCD와 매칭시킨다. 각 클러스터를 구성하는 RCD는 여러 가지 형태의 물체 형상에 공통적으로 대응될 수 있으며 이 중에서 하나의 형상에 대응되는 RCD 수가 일정한 값 이상이면 그 클러스터를 그 형상의 예상물체 클러스터로 승격시킨다. 또한 예상물체 클러스터중 RCD가 일정 수 이상인 것은 확정물체로 승격시키고 클러스터에서 제외시킨다.

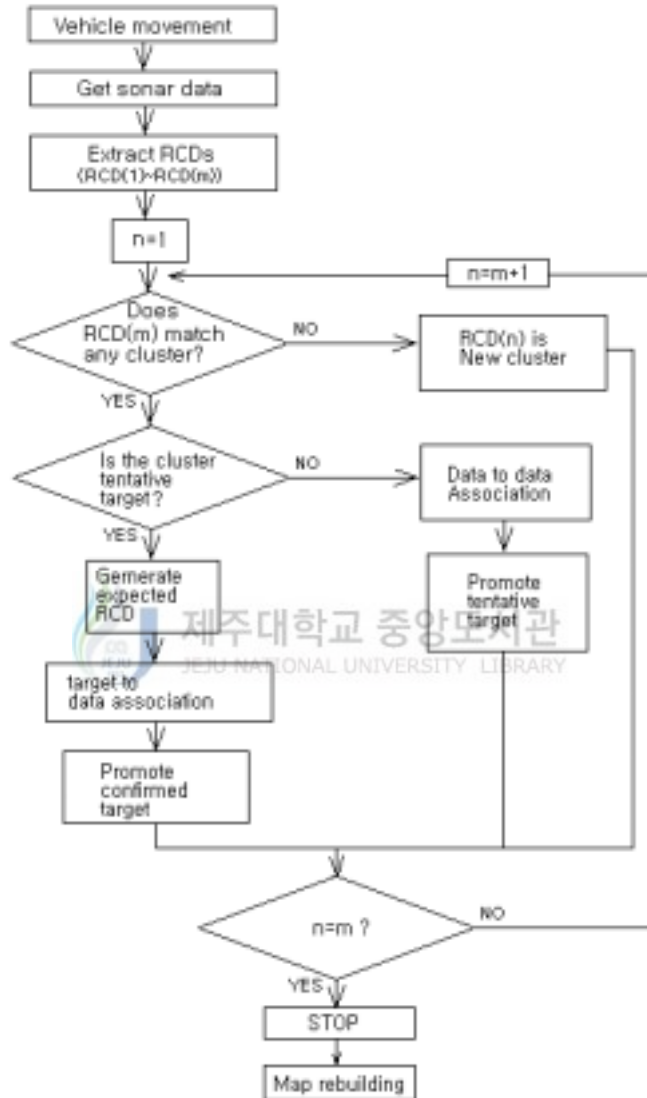


Fig. 9 Map building flow chart

3.4 물체 재구성

이상과 같은 지도형성 알고리즘을 실제로 적용해보면 실제 동일 평면이 여러 개의 선분으로 나뉘어 형성되는 경우가 많으며 모퉁이 부분은 제대로 감지되지 못하는 경우가 발생한다. 동일 평면이 여러 개의 선분으로 나타나는 것은 로봇의 위치오차 및 각도오차 그리고 RCD의 거리오차와 각도오차에 의해 동일 평면이지만 감지된 거리와 각도가 달라져 다른 선분으로 표현되기 때문이다. 또한 모퉁이 부분은 초음파 센서의 특성상 음파가 복잡하게 반사가 이루어져 RCD가 제대로 형성되지 못하며 형성된다해도 다중반사경로현상에 의해 실제보다 먼 거리가 되므로 감지가 잘 되지 못한다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 다음과 같은 방법으로 형성된 지도의 물체를 재구성한다.

Fig. 10과 같이 두 선분을 로봇이 감지한 방향벡터를 각각 \hat{n}_1, \hat{n}_2 라 하고 \hat{n}_1 과 평행한 방향을 x축으로 하는 좌표계에 대해 각 선분의 양단 좌표가 그림과 같다고 할 때 다음조건을 만족하면 이 두 선분을 하나의 평면을 나타낸 것으로 간주하여 통합한다.



$$(\hat{n}_1 \sim \hat{n}_2) \leq \delta_\theta \quad \text{and} \quad y_{21} - y_{12} = \delta_d \quad (19)$$

여기서 δ_θ 는 로봇의 각도오차와 RCD의 각도오차를 고려한 상수이며 δ_d 는 로봇이 통과할 수 있는 두 물체 사이의 최소거리이다.

δ_d 가 이와 같이 정의된 이유는 로봇의 항해에서 실제로 두 선분 사이에 물체가 존재하지 않더라도 로봇 입장에서는 그 사이를 통과 할 수 없으므로 물체가 존재하는 것과 같은 효과가 되기 때문이다. 만약 항해가 목적이 아니라 물체의 윤곽 재구성이 목적일때는 두 선분을 통합시킬 필요가 없으며 다만 $(y_{21} - y_{12})$ 가 음의 값일때는 두 선분이 겹쳐지므로 통합시킨다.

이와 같이 분리된 선분을 하나로 통합한 후 이것으로부터 모퉁이를 재구성

할 수 있다. 즉 Fig. 11과 같이 두 개의 선분 l_1 과 l_2 의 감지 방향을 \hat{n}_1, \hat{n}_2 라 할 때 A, B 그리고 C가 이루는 삼각형내의 임의의 점 F를 잡아 이 점에서 각 선분에서 이 점을 향하는 방향이 각각 \hat{n}_1 과 \hat{n}_2 가 일치하면 점 C를 구적으로 간주하고 l_1 과 l_2 를 연장한다. 이때 l_1 이나 l_2 가 C점을 통과하고 있거나 두 선분의 C에 가까운쪽 즉, D와 E 사이의 거리가 δ_d 이상이면 모퉁이가 될 수 없으므로 이와 같은 경우는 모퉁이 재구성에서 제외시킨다.

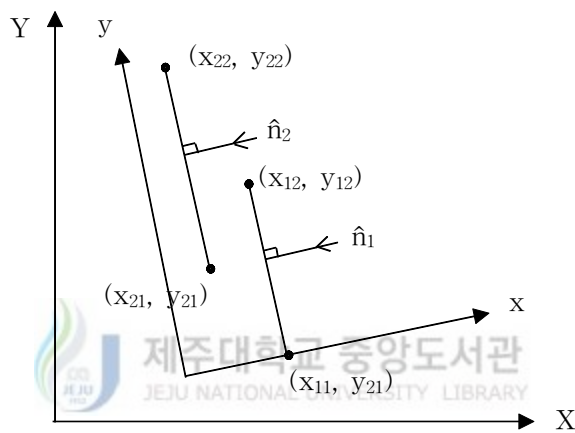


Fig. 10 Merging two line targets

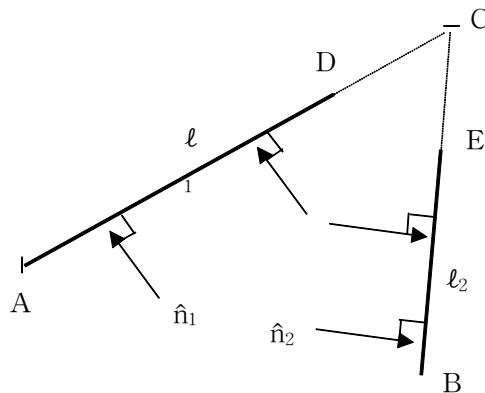


Fig. 11 Reconstruction of a corner

III. 실험방법 및 결과

1. 실험장치 및 방법

실험에 이용한 로봇에는 총 16개의 초음파 센서가 22.5°간격으로 장착되었으나 한 위치에서의 데이터수가 16개로 정확한 형상지도를 작성하기 위한 목적으로는 데이터 수가 부족하다. 따라서 로봇으로는 센서의 좌표와 각도만을 얻고 Fig. 12와 같이 초음파 센서와 이 센서를 회전시킬 수 있는 스텝모터를 로봇 상단 중앙부에 설치하여 초음파 센서를 1.8°씩 360°로 회전시켜 데이터를 수집하였다. 정확한 데이터 수집을 위해 스텝모터 1스텝 회전 후 250μsec의 여유 시간을 주었으며 실험에 사용한 초음파 센서의 유효감지 거리는 최소 15.24cm, 최대 10.66m이나 실제 실험환경을 고려하여 최소 30cm, 최대 8.91m로 조정하여 사용하였다. 초음파 센서와 스텝모터의 제어는 80C196KC 마이크로 프로세서를 이용하였고, 스텝모터를 회전시키기 위한 PWM(Pulse Width Modulation) 기능을 사용하였다.

실험환경은 Fig. 13과 같이 시멘트벽과 나무벽, 그리고 금속의 원통과 삼각기둥 등으로 구성되어 있으며 출발지점으로부터 점선경로를 따라 15cm씩 이동시키며 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 80C196의 RS-232C 시리얼 통신을 이용하여 9600bps의 전송속도로 PC에서 데이터를 전송 받았다. 거리오차상수 δ_R 과 각도오차상수 δ_θ 는 센서의 오차와 위치오차를 고려하여 각각 0.02m와 5°로 하였다. 또한 3개의 RCD가 하나의 물체에 대응되면 그 클러스터를 예상물체 클러스터로 분류하였고 확정물체로의 승격을 위한 RCD 수는 4개였다.

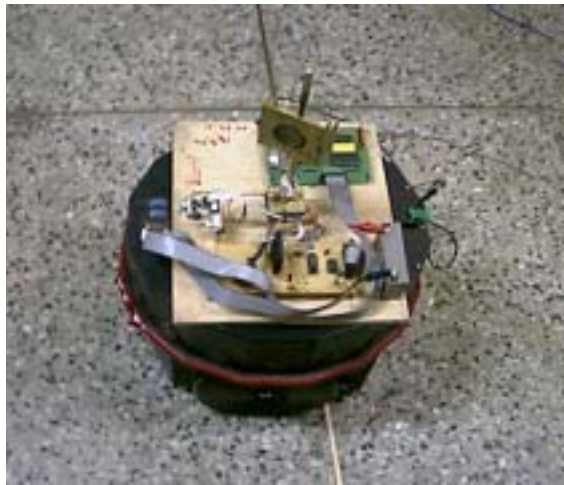


Fig. 12 Nomad robot and Polaroid ultra-sonic sensor unit

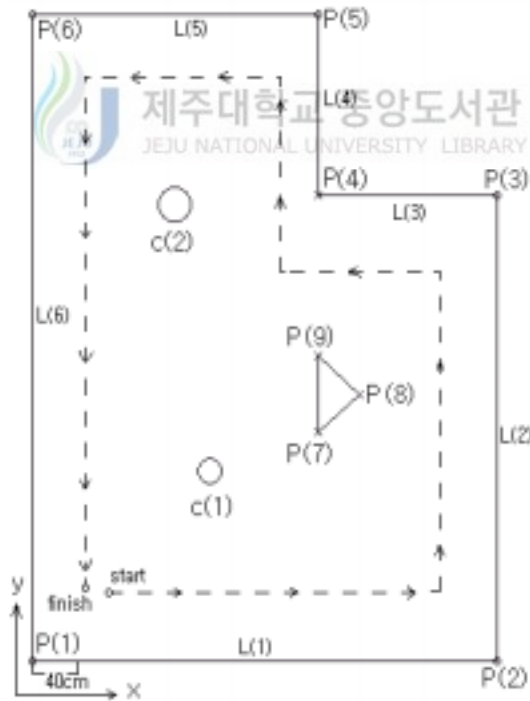


Fig. 13 Experimental environment

2. 실험결과

Fig. 14는 원통 물체를 검출한 결과로서 삼각형이 포함된 원은 로봇을, 점선으로 표현된 원들은 RCD를 나타내며 그림에서와 같이 이 물체는 4개의 RCD에 의해 재구성 되었음을 알 수 있다. 실제 이 원통의 위치는 (1.525m , 1.525m)이고, 반지름은 0.11m로서 위치 오차값은 (-0.009m , -0.021m)이고, 반지름 오차는 0.041m 이었다.

Fig. 15은 삼각형 모양을 가진 물체의 모서리를 검출한 결과이다. 검출된 실제 모서리의 좌표는 (2.44m , 1.83m)이고 RCD로 검출된 좌표값은 (2.436m , 1.821m)로서 오차는 (-0.004m , -0.009m)로 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

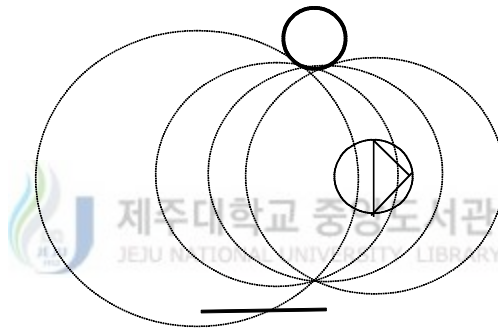


Fig. 14 Cylinder target and the RCDs

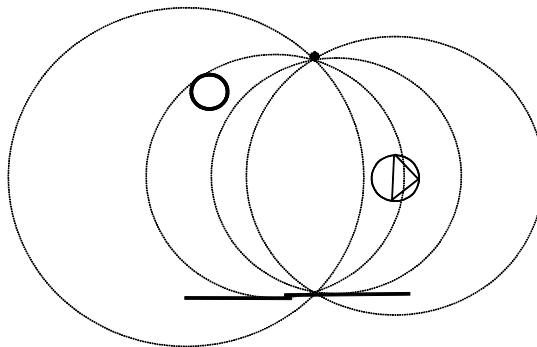


Fig. 15 Edge target and the RCDs

Fig. 16은 실험 환경의 상단에 위치한 원통 모양의 물체를 검출하는 것을 나

타낸 것으로 6개의 RCD에 의해 검출되었음을 나타낸다. 이것은 확정물체 승격 RCD 수가 4이지만 초기 2개의 RCD는 모서리 물체와 원통물체에 동시에 대응된 것이고 나중에 들어온 4개의 RCD가 일관되게 원통형 물체에 대응되었으며 원통을 재구성 할 때는 초기의 2개 RCD도 같이 고려한 결과이다. 위치 오차값은 (-0.006m , +0.017m)이고, 반지름 오차는 0.027m로서 위치는 실제와 거의 일치했으나 검출한 원의 반지름의 길이가 0.027m정도 더 길게 그려졌다. Fig. 14의 경우 반경오차가 0.04m 정도임을 고려하면 이 원통의 반경오차가 작은 편인데 그 이유는 RCD 수도 많을 뿐만 아니라 다양한 방향에서 형성되었기 때문으로 사료된다.

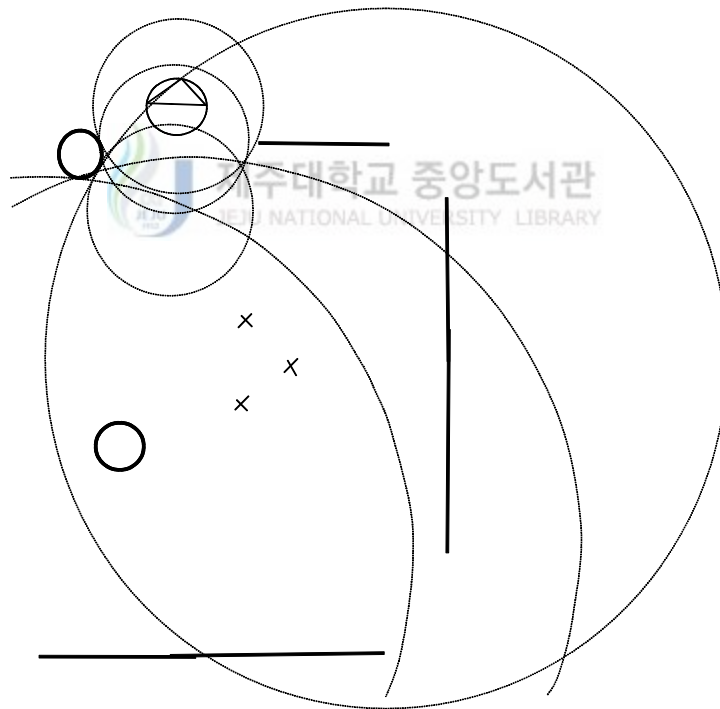


Fig. 16 Cylinder target and the RCDs (× Represents edge target)

Fig. 17은 평면을 검출하는 과정을 나타내고 있다. Fig. 15의 경우와 마찬가지로

로 초기 3개의 RCD는 모서리에 대응되었으며 이중 1개의 RCD는 평면형상에도 대응되었고 이후 3개의 RCD와 함께 평면을 구성하고 있음을 나타낸다.

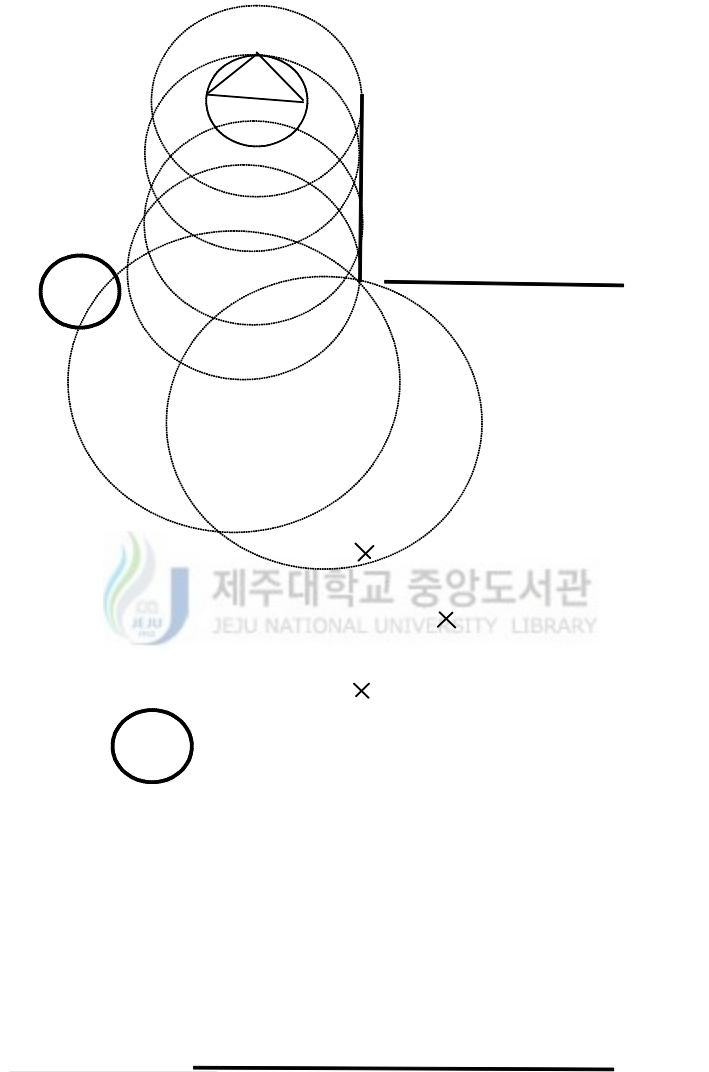


Fig. 17 Plane target and the RCDs

Fig. 18은 최종적으로 센서가 수집한 데이터를 이용하여 RCD를 추출하여 주

위 환경을 그린 것을 보여주고 있다. 그림에서 각 모퉁이들이 나오지를 았았는데 이것은 모퉁이 부근에서는 음파가 다중반사경로 현상을 일으켜 모퉁이를 일관되게 감지할 수 없었기 때문이다. 또한 동일 평면(벽)이 여러 개의 평면으로 분리되어 감지되었음을 알 수 있다. 따라서 3.4절과 같은 물체 재구성 방법을 통하여 지도를 재구성한 결과를 Fig. 19에 나타내었으며 실제 물체들과 비교한 결과를 Table 1과 2에 나타내었다.

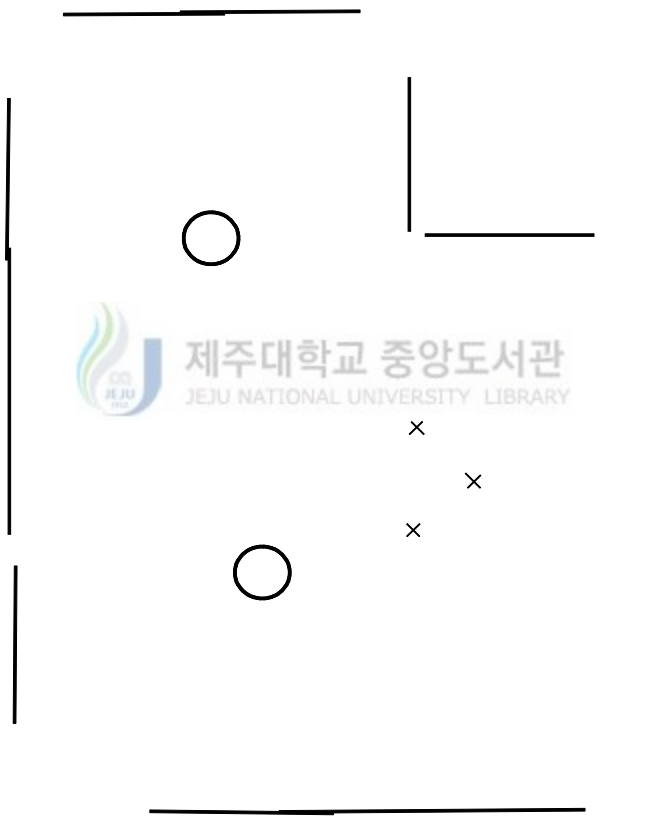


Fig. 18 Configurations of the confirmed targets

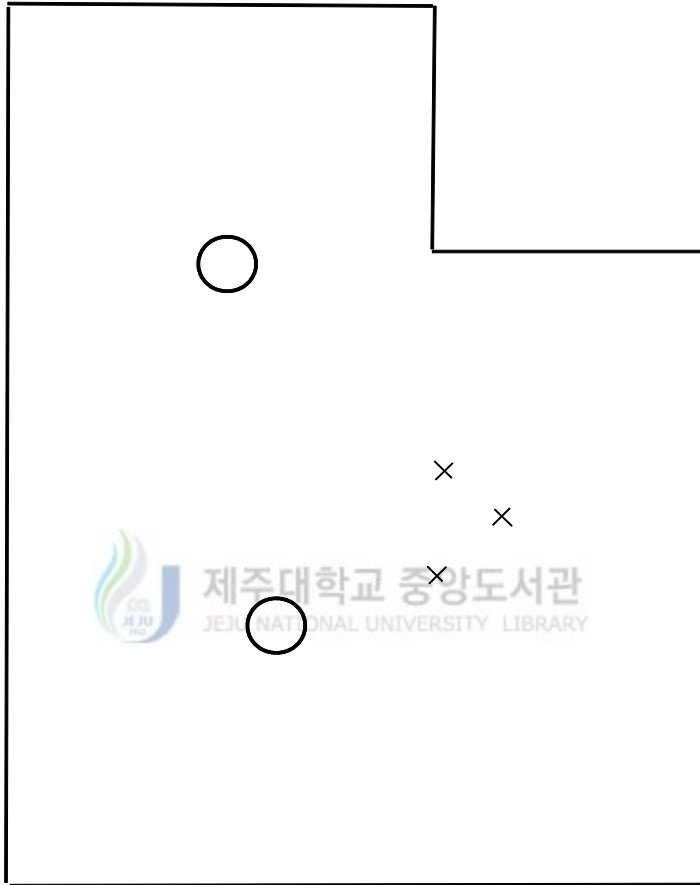


Fig. 19 Reconstructed map

Table 1 Results of the map building method (cylinders, corners, edges)

object	True position(m) (x, y)	Estimated position(m) (x, y)	True Radius (m)	Estimated Radius (m)	Position error(m) (x, y)	Radius error (m)
P(1)	0.000 , 0.000	0.001 , 0.007			0.001 , 0.007	
P(2)	3.965 , 0.000	3.962 , 0.015			0.003 , 0.015	
P(3)	3.965 , 3.730	3.967 , 3.732			0.002 , 0.002	
P(4)	2.440 , 3.730	2.438 , 3.739			0.002 , 0.009	
P(5)	2.440 , 5.185	2.455 , 5.162			0.015 , 0.023	
P(6)	0.000 , 5.185	0.008 , 5.181			0.008 , 0.004	
P(7)	2.440 , 1.830	2.436 , 1.821			0.004 , 0.009	
P(8)	2.790 , 2.135	2.791 , 2.133			0.001 , 0.002	
P(9)	2.440 , 2.440	2.453 , 2.453			0.013 , 0.013	
c(1)	1.525 , 1.525	1.516 , 1.546	0.11	0.151	0.009 , 0.021	0.04
c(2)	1.220 , 3.660	1.214 , 3.677	0.14	0.167	0.006 , 0.017	0.027



Table 2 Results of the map building method (planes)

	L(1)	L(2)	L(3)	L(4)	L(5)	L(6)
True angle(°)	0	90	180	90	180	270
Estimated angle(°)	0.116	89.923	179.737	89.316	179.556	269.922
Angle error(°)	0.116	0.077	0.263	0.684	0.444	0.078

※Angle represents normal direction of the plane

IV. 결론

본 논문에서는 거리와 방향 불확실성이 큰 초음파 센서를 이용하여 이동로봇의 항해를 위한 형상기준 초음파 환경지도를 작성하는 방법을 제안하고 실험으로 그 유용성을 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파 센서의 거리와 방향에 대한 불확실성을 RCD 개념을 도입함으로써 크게 줄일 수 있었다.
2. 제안된 RCD와 RCD 매칭, 그리고 RCD와 물체의 매칭방법을 이용함으로써 개별 거리정보로부터 효과적으로 물체 형상을 추출할 수 있었다.
3. 위치와 각도오차에 의해 동일 면이 여러 개의 직선으로 나타나거나 모퉁이 부분은 거의 감지되지 못하는 경우가 발생하였지만 제안된 물체 재구성 방법으로 어느 정도 이 문제를 해결할 수 있었다.
4. 면의 길이가 짧은 형상의 물체는 모서리 부분은 잘 추출이 되었으나 면부분의 형상이 잘 추출되지 못했으며 원통형의 경우 반경에 대한 오차가 비교적 큰편이었다. 이것은 기존의 그리드 형태의 지도 형성 방법과 병행함으로써 해결이 가능하리라 사료된다.

본 연구에서는 로봇의 위치오차를 고려하지 않았으며 위치오차가 개입될 경우 RCD 매칭 및 형상과 RCD 매칭에 있어서 이 오차를 통계학적으로 고려할 필요가 있다. 또한 작업 환경에 대한 부분적인 사전정보가 주어지는 경우는 지도형성과 동시에 위치추적을 병행함으로써 위치오차를 최소화할 수 있으므로 본 지도형성 방법이 직접적으로 실제 환경에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- Lim, J. H. and Cho, D. W., 1994a, "Specular Reflection Probability in the Certainty Grid Representation," ASME Journal, Vol. 116, pp. 512-520.
- Crowley, J. L., 1987, "World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging," In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 674-681.
- Steer, B., 1990, "Design for navigation," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. pp. 311-318
- Cho, D. W., 1990, "Certainty grid representation for robot navigation by a bayesian method," ROBOTICA, Vol.8, pp.159-165.
- Elfes, A and Moravec, H. P., 1985, "High Resolution Maps from Wide Angel Sonar," IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Lous, pp. 116-121.
- Moravec, H. P., 1988, "Sensor Fusion in Certainty Grids for Mobile Robots," AI Magazine, Vol. 9, No. 2, pp. 61-74.
- Elfes, A. and Matthies, L., 1987, "Sensor Integration for Robot Navigation : Combining Sensor and Stereo Range Data in a Grid-Based Representation," 26th IEEE Decision Control Conference, LA, CA, pp.9-11.
- Lim, J. H. and Cho, D. W., 1992, "Physically Based Sensor Modeling for a Sonar Map in a Specular Environment," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp. 1714-1719.

임중환, 1994b, “초음파 센서를 이용한 자율이동로봇의 지도형성, 탐사 및 위치평
가,” 포항공과대학 박사학위논문. 157 p.

Lim, J. H. and Leonard, J. J., 2000, “Mobile Robot Relocation from
Echolocation Constraints,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and
Machine Intelligence, Vol. 22, No. 9, pp. 1035-1041.

Leonard, J. J., 1990, “Direct Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation,”
Kluwer Academic, 183 p.

Leonard, J. J. and Durrant-Whyte, H., 1991, “Mobile Robot Localiation by
Tracking Geometric Beacons,” IEEE Transactons on Robotics and
Automation, Vol.7, No.3, pp. 367-382.

