

이동 로봇을 위한 초음파 센서의 완성도 높은 형상지도 작성법

A Complete Feature Map Building Method of Sonar Sensors for Mobile Robots

이세진^{1,2,✉}, 임종환³, 조동우^{1,4}
Se-Jin Lee^{1,2,✉}, Jong-Hwan Lim³ and Dong-Woo Cho^{1,4}

1 포항공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

2 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)

3 제주대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics, Cheju Natl. Univ.)

4 포항공과대학교 융합생명공학과 (Department of Integrative Bioscience and Bioengineering, POSTECH)

✉ Corresponding author: sejin3@postech.ac.kr, Tel: 02-929-8501

Manuscript received: 2009.8.6 / Accepted: 2009.9.28

This study introduces a complete feature map building method of sonar sensors for mobile robots. This method enhances the reality of feature maps by extracting even circle features as well as line and point features from sonar data. Edge features are, moreover, generated by combining line features close to circle features extracted around corner sites. The uncertainties of the specular reflection phenomenon and wide beam width of sonar data can be, therefore, reduced through this map building method. The experimental results demonstrate a practical validity of the proposed method in those environments.

Key Words: Sonar Sensor (초음파 센서), Feature Extraction (형상 추출), Circle Feature (원 형상), Complete Mapping (완성도 높은 지도작성), Mobile Robot (이동 로봇)

1. 서론

이동 로봇이 주위의 환경을 인지하는 것은 장애물을 회피한다든지 주위 환경 지도를 작성하거나 자기 위치를 추정하는데 뿐만 아니라 자율 주행을 하기 위해 필요한 모든 기능에 근간이 된다.^{1,2} 따라서, 주어진 센서로 주위 환경을 강인하고 올바르게 인지하는 것은 매우 중요하다.

1.1 초음파 센서

지금까지 보편적으로 레이저 스캐너,^{3,4} 적외선 센서, 비전 카메라^{5,6} 또는 초음파 센서가 환경 형상을 인지하기 위해 사용되었다. 그 중에서도 초음파 센서는 가격이 저렴하고 장비의 운용이 간단할 뿐만 아니라 물체까지의 거리 정보를 간편하게

제공하기 때문에 널리 사용되어 왔다. 하지만 초음파 센서 특유의 넓은 빔 폭과 거울 반사 현상은 물체의 위치를 정확하게 판단함에 있어 큰 장애가 된다. 그럼에도 불구하고 저가형의 초음파 센서를 사용하는 것은 이동 로봇의 상용화 측면에서 볼 때 연구적 가치가 충분히 있다.

Moravec 과 Cho⁷ 는 초음파 센서 데이터를 위한 확률적 모델을 제안하여 확률 격자 지도를 작성하였다. Leonard 와 Durrant-Whyte⁸ 는 환경 형상 지도를 미리 설정한 후 하나의 회전하는 초음파 센서와 6 개의 센서를 장착한 고정형 링을 사용하여 각각의 경우에 대한 로봇의 위치를 추정하였다. Lim 과 Leonard⁹ 는 초음파 데이터를 이용한 이동 로봇의 재배치(relocation) 알고리즘을 개발하였다. Ip 연구팀¹⁰ 은 초음파 센서에 의해 추출된 선 형

상 조각들을 퍼지 알고리즘으로 결합시키는 알고리즘을 개발하였다. Carelli 와 Freire¹¹ 는 초음파 센서를 이용한 복도 주행과 벽 추적(wall following) 알고리즘을 개발하였다. Gao 와 Hinders¹² 는 후방 산란된 초음파 신호를 분석하여 여러 물체의 타입을 구분하는 알고리즘을 개발하였다.

1.2 환경 모델링

환경 지도를 작성하기 위한 모델의 종류는 크게 형상(geometrical) 모델, 위상(topological) 모델 그리고 의미(semantic) 모델로 나눌 수 있다.² 특히 환경 지도를 작성함에 있어 초음파 링과 같은 거리 센서를 사용하여 환경 형상을 추출해내는 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. Crowley¹³ 는 요소 지역(composite local) 모델의 개념을 소개함으로써 초음파 센서를 사용한 형상 기반의 접근을 처음 시도하였다. Leonard 와 Durrant-Whyte¹⁴ 는 하나의 초음파 센서를 회전시켜 데이터를 조밀하게 측정함으로써 비교적 정확한 RCDs(Regions of Constant Depth)라는 데이터 단위를 형성하여 실험 환경에 대한 선과 점 형상을 추출하였다. Heale 와 Kleeman¹⁵ 은 스캐너 타입의 실시간 DSP 초음파 에코(echo) 프로세서로 직접 개발하여 초음파 데이터를 조밀하게 측정하고 분석함으로써 선과 점 형상을 추출하여 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)을 수행하였다.

Wijk 과 Christensen¹⁶ 은 초음파 데이터를 이용한 TBF (Triangulation based Fusion)이라는 개념을 개발하여 점 형상을 추출하고 로봇의 위치를 추정하는데 사용하였다. Tardos 연구팀¹⁷ 은 Hough Transform 을 이용하여 고정형 초음파 센서 링으로부터 측정된 데이터를 이산화된 파라미터 영역에 교합시킴으로써 동일 파라미터 영역에 있는 초음파 데이터를 분류하였다. 이 연구에서는 선과 점 형상의 2 차원 파라미터 영역에 초음파 데이터를 교합하여 선택 회수가 가장 많은 파라미터에 대한 형상을 추출하였다. Bank 와 Kampke¹⁸ 는 고정형 초음파 센서 링에 초음파의 지향각이 서로 겹치도록 다수의 센서를 배열하여 송신 센서에 의해 측정된 반사파뿐만 아니라 인근 센서에 의해 측정된 반사파까지 측정하고 분석하여 선 형상을 추출하였다. Fazli 와 Kleeman¹⁹ 역시 다수의 센서가 장착된 초음파 센서 링을 사용하여 초음파 데이터를 측정하고 분석함으로써 선과 점 형상을 추출하였다.

위 연구 사례들 중 일부는 초음파 센서의 회전

형 측정 시스템을 사용하여 몇 개의 센서만으로도 고밀도의 데이터를 측정함으로써 효율성을 극대화하기 위해 노력하였다. 하지만 이러한 방법은 초음파 센서의 비교적 긴 측정 시간때문에 로봇이 원활한 주행을 하기에 장애가 될 뿐만 아니라 장치의 운용이 상용화적 측면에서 실용적이지 못하다. 또한 대부분의 연구가 초음파 데이터로부터 선이나 점 형상을 추출함으로써 환경 형상을 단순화시켜 사용하고 있다. 그러나 이동 로봇이 적용될 수 있는 실내 환경에서는 부정확한 초음파 데이터에 의한 선과 점 형상만으로 표현하기에 힘든 곡면의 형상이 존재할 수 있다. 또한 모서리와 같은 곳은 초음파 센서의 거울반사현상으로 인해 환경 형상이 거의 추출되지 못하는 경향이 있다. 결국 간단한 고정형 초음파 링 시스템을 이용하면서 완성도 높은 환경 형상 지도를 효과적으로 작성할 수 있는 방법이 필요하게 된다.

본 논문에서는 이동 로봇을 위한 초음파 센서 링의 새로운 환경 형상 지도 작성법에 대해 소개한다. 이 방법은 기존에 사용되었던 선이나 점 형상뿐만 아니라 원 형상까지 추출해냄으로써 형상 지도의 현실성을 더욱 높인다. 특히 모서리 부근에서 추출된 원 형상은 인접한 선 형상들을 단일 에지(edge) 형상으로 결합시킴으로써 형상 지도의 완성도를 높이게 된다. 결국 새로운 환경 지도 작성법을 통해 넓은 빔 폭이나 거울 반사 현상에 따른 초음파 센서의 부정확성이 보완된다. 실제 환경에 대한 실험 결과를 통해 제안되는 형상 지도 작성법의 효용성을 검증한다.

2. 데이터 교합 필터 모델

2.1 초음파 센서의 특성

초음파 센서에서 발사되는 음파는 레이저 센서의 빔과는 달리 폭이 넓다. 따라서 물체까지의 거리는 반사파의 신호로부터 계산할 수 있다 할지라도 정확한 물체의 위치를 알 수는 없다. 이는 그림 1(a)와 같이 사람이 우산을 가지고 물체를 더듬어 주위 상황을 예측하는 것과 같다. 따라서 물체의 모양이 복잡한 경우에는 우산을 이용하여 물체의 정확한 모양을 파악하기 어렵다. 반면에 그림 1(b)와 같이 막대기를 이용하여 물체를 감지한다면 훨씬 정확하게 물체의 모양을 인지할 수 있다. 레이저 스캐너와 같은 센서가 이와 같은 경우라 할 수 있다.

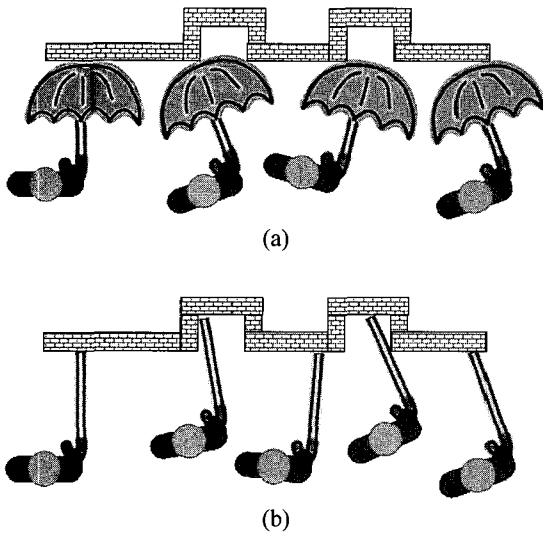


Fig. 1 Top views of wall recognizing situations with (a) the umbrella and (b) the stick

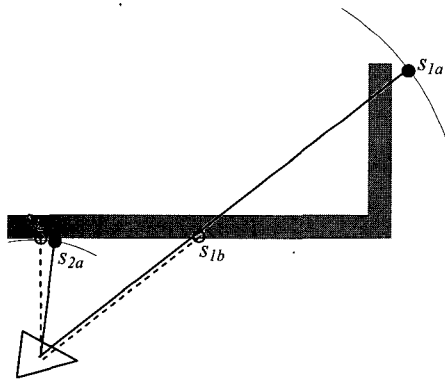


Fig. 2 Examples of sonar measurement uncertainties such as the wide beam width and specularly

한편 초음파 빔은 거울 반사 현상에 의해 물체까지의 정확한 거리마저도 제공하지 못하는 경우가 많다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 초음파 센서는 넓은 빔 폭과 거울 반사현상에 의해 부정확한 정보를 빈번히 제공한다. 점선으로 표시된 s_{1b} 데이터와 같이 측정 입사각에 상관없이 실제 벽면까지의 거리가 측정되는 것이 이상적이지만 초음파 센서는 물체 표면에 대한 입사각이 클 경우 실선으로 표시된 s_{1a} 데이터와 같이 거울반사현상에 의해 잘못된 거리를 측정한다. 또한 데이터 s_{2a} 의 경우는 실제 벽면까지의 거리를 정확하게 감지하고 있으나 빔 폭이 넓어서 물체의 정확한 방위에 해

당하는 위치인 s_{2b} 는 알 수 없다. 따라서 고정형 초음파 링을 사용하여 환경 형상 지도를 작성하기 위해서는 잘못된 데이터를 필터링하고 물체의 위치를 예측해낼 수 있는 모델이 필요하다.

2.2 초음파 데이터 필터링

본 논문에서는 기본적으로 서로 다른 위치에서 측정된 두 개의 단일 초음파 데이터가 형상학적으로 동일한 가상 원 형상으로부터 측정된 것인지를 판단해 주는 초음파 데이터 교합 필터를 소개한다. 이 필터를 FPA(Footprint Association) 모델이라 명명한다. Leonard 와 Durrant-Whyte^{8,14}는 회전하는 하나의 초음파 센서를 사용하여 한 위치에서 조밀하게 측정된 데이터로부터 추출한 RCDs 를 서로 비교 및 분석하였다. 또한 가상 원 형상의 반경이 매우 크거나 또는 매우 작은 특이한 경우 만을 가정하여 선 또는 점 형상만 추출하였다.

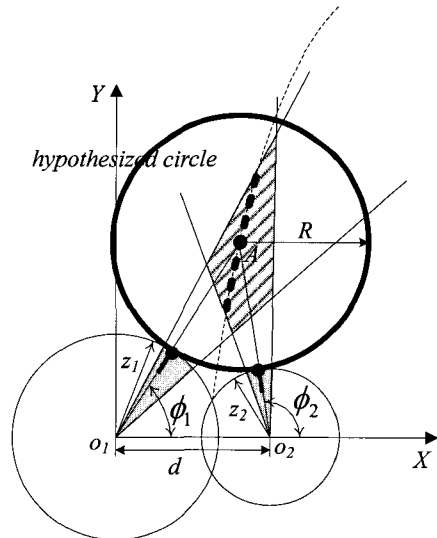


Fig. 3 The geometrical relationship between the hypothesized circle and two circles of sonar data. The bold dashed line segment on the dashed line is defined as the trace of centers that represents possible locations of the centers of the hypothesized circle feature

본 연구에서 소개하는 FPA 모델은 고정형 초음파 링으로부터 측정된 단일 초음파 데이터를 직접 비교하여 가상 원 형상을 예측하는 범용 모델을 제시함으로써 선 또는 점 형상뿐만 아니라 원

형상까지 추출해 낸다. 또한 가상 원 형상과 접하는 교점을 찾아내어 신뢰도 높은 물체 위치를 예측한다.

그림 3 은 거리가 d 만큼 떨어진 서로 다른 위치 (o_1 과 o_2)에서 측정된 두 거리 데이터 (z_1, z_2) 중 o_1 을 원점으로 하고 o_1 과 o_2 를 x 축으로 하여 나타낸 예이다. 그림에서 가는 실선 원은 각 데이터의 거리 (z_1, z_2)를 반경으로 하는 원이고 굵은 실선 원은 거기에 외접하는 임의의 가상 원이다. 각 초음파 데이터에 의해 형성되는 원 영역 중에서 빔 폭에 의한 유효 감지각 내에 포함되는 부분을 회색의 부채꼴로 나타내었다. 그리고 빗금 그어진 회색 사각형 영역은 두 초음파 데이터의 빔 폭을 고려한 공통 가시 영역이 된다. 굵은 점선은 존재 가능한 외접원의 중심의 궤적 중 두 초음파 데이터의 공통 가시 영역 안에 포함된 궤적을 나타낸다. 두 데이터가 중점이 A 인 원 형상을 감지한 것이라 가정할 경우 각 원의 원점에서 외접원 중점까지의 방향각은 각각 ϕ_1 과 ϕ_2 가 된다.

그림에서와 같이 두 초음파 데이터가 반지름이 R 인 임의의 원 형상을 감지한 것이라 가정하면 ϕ_1 과 ϕ_2 는 코사인 제 2 법칙에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left(\frac{(z_1 + R)^2 - (z_2 + R)^2 + d^2}{2d(z_1 + R)} \right) \quad (1)$$

$$\phi_2 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{(z_2 + R)^2 - (z_1 + R)^2 + d^2}{2d(z_2 + R)} \right)$$

if $\theta_i^l \leq \phi_i \leq \theta_u^l$ and $\theta_i^r \leq \phi_i \leq \theta_u^r$,
then they are associated with a circle.

식 (1)에서 i 번째 초음파의 지향각(센서의 중심 방향)을 θ_m^i , 유효 감지각 범위를 ω 라 할 때 θ_i^l 과 θ_u^i 는 다음과 같다.

$$\theta_i^l = \theta_m^i - \frac{\omega}{2}, \quad \theta_u^i = \theta_m^i + \frac{\omega}{2} \quad (2)$$

식 (1)에서 θ_i^l 과 θ_u^i 의 범위를 통해 가상 원 형상의 반지름, R 의 존재 가능 범위를 예측할 수 있다. 따라서 존재 가능한 가상 원 형상은 수없이 많이 존재할 수 있다. 그러므로 가상 원 형상의

유일 해를 구하기 위해 그림 4 에서와 같이 3 개의 데이터를 이용한 두 쌍의 데이터 교합을 통해 가상 원의 중점 및 반경, 그리고 가상 원과의 접점 및 접점에 대한 가시각을 구하게 된다.

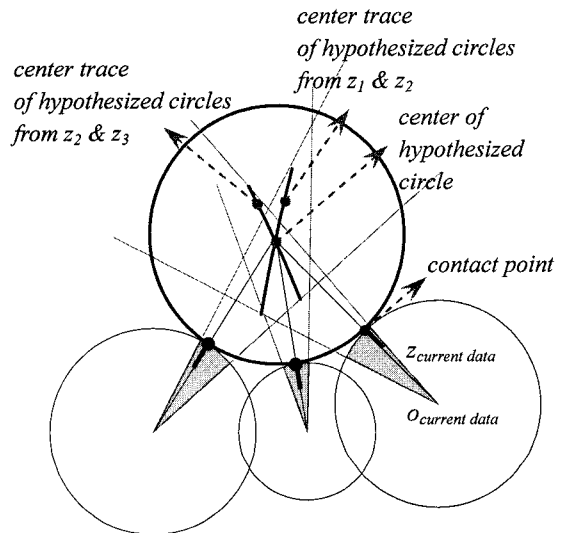


Fig. 4 The geometrical relationship between the hypothesized circle and three circles of sonar data for determining the singular hypothesized circle

만약 그림 3 에서 두 초음파 데이터가 선 형상으로부터 비롯되었을 경우에는 형상학적으로 선 형상에 해당하는 외접원의 반지름은 무한대라 할 수 있다. 따라서 식 (1)에서 외접원의 반지름 R 을 무한대라 가정하면 선 형상에 대한 ϕ_1 과 ϕ_2 , 그리고 접점 및 가시각을 쉽게 구할 수 있다. 또한 두 초음파 데이터가 점 형상으로부터 비롯되었을 경우에는 형상학적으로 두 초음파 데이터의 유효 감지각 범위 안에서 교차하는 점은 반드시 존재하게 되고 이 교차점에 해당되는 외접원의 반지름은 0 이라 할 수 있다. 따라서 식 (1)에서 외접원의 반지름 R 을 0 이라 가정하면 점 형상에 대한 ϕ_1 과 ϕ_2 , 그리고 접점 및 가시각을 쉽게 구할 수 있다.

그림 5 는 FPA 모델에 의해 추출된 각 가상 형상에 의한 접점들을 나타내고 있다. 또한 각 접점들이 가지고 있는 방향 표시는 검출될 당시의 가시 방향 정보를 나타낸다. 따라서 접점 데이터의 좌표는 (x, y, θ) 가 된다. 모든 접점 데이터는 식 (3) 과 같이 형상 별로 구분되어 저장된다.

$$\begin{aligned}
 D_{LINE} &= \left\{ d_l \left| \begin{array}{l} d_l \text{ is the contact point} \\ \text{with the hypothesized line feature} \end{array} \right. \right\} \quad (3) \\
 D_{POINT} &= \left\{ d_p \left| \begin{array}{l} d_p \text{ is the contact point} \\ \text{with the hypothesized point feature} \end{array} \right. \right\} \\
 D_{CIRCLE} &= \left\{ d_c \left| \begin{array}{l} d_c \text{ is the contact point} \\ \text{with the hypothesized circle feature} \end{array} \right. \right\}
 \end{aligned}$$

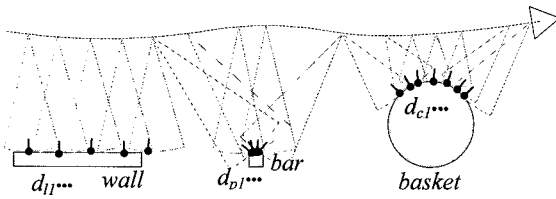


Fig. 5 Contact points estimated on each object by the FPA model

초음파 데이터는 빔 폭이 넓어 물체의 정확한 위치를 알 수 없기 때문에 많은 연구자들은 물체의 위치를 센서의 측정 중심 방향으로 가정하는 중심축 모델(Centerline Model)을 사용해 왔다. 그러나 FPA 모델은 그림 5 에서 보는 바와 같이 존재 가능한 가상 물체의 위치를 예측해 낼 수 있기 때문에 더욱 정확한 형상을 추출할 수 있다. 이렇게 계산된 접점들은 각 형상 별로 분류된 뒤 최적의 형상 파라미터를 찾기 위한 최소자승법에 적용된다.

3. 데이터 분류

그림 5 와 같이 FPA 모델에 의해 잘못된 데이터가 필터링되고 가상 형상에 대한 접점 데이터들이 잘 추출되었다 할지라도 지도 작성을 위한 형상을 추출하기 위해서는 접점 데이터들의 분류 작업이 필요하다. 임의의 단일 형상과 연관성이 있는 접점 데이터들을 하나의 그룹으로 분류해내기 위해서 각 형상 별 접점 데이터 D_{LINE} , D_{POINT} 그리고 D_{CIRCLE} 의 성분 데이터를 다음과 같은 조건에 적용시킨다.

먼저 선 형상의 경우를 살펴보면, 그림 6 에서 보는 바와 같이 D_{LINE} 중 임의의 d_l^f 을 지나는 직선의 방정식이 다음과 같을 때,

$$\tan\left(d_{l\theta}^f + \frac{\pi}{2}\right)x - y + d_{ly}^f - \tan\left(d_{l\theta}^f + \frac{\pi}{2}\right)d_{lx}^f = 0 \quad (4)$$

d_l^f 을 제외한 다른 데이터 d_l^i 로부터 식 (4)의 직선까지의 수직 거리를 r_l^i 라 하면 r_l^i 는 다음과 같다.

$$r_l^i = \frac{\left| \tan\left(d_{l\theta} + \frac{\pi}{2}\right)d_{lx}^i - d_{ly}^i + d_{ly} - \tan\left(d_{l\theta} + \frac{\pi}{2}\right)d_{lx} \right|}{\sqrt{\tan^2\left(d_{l\theta} + \frac{\pi}{2}\right) + 1}} \quad (5)$$

따라서 임의의 선 형상과 연관성이 있는 접점 데이터 그룹을 G_{LINE} 라고 할 때 G_{LINE} 의 성분이 되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 G_{LINE}^j &= \left\{ d_l^i \left| r_l^i < \delta_l \ \& \ \left| d_{l\theta}^f - d_{l\theta}^i \right| < \gamma_l \right. \right\} \quad (6) \\
 & , d_l^i \in D_{LINE}, d_l^i \neq d_l^f, j = 1, 2, \dots
 \end{aligned}$$

그림 6 에서 보는 바와 같이 식 (6)의 δ_l 과 γ_l 는 각각 제한 거리와 각도에 해당하는 디자인 파라미터가 된다. 회색으로 표시된 접점들은 식 (6)의 조건을 만족하여 그룹화 된 데이터를 나타내고 흰색으로 표시된 접점들은 조건을 만족하지 못한 데이터를 나타낸다.

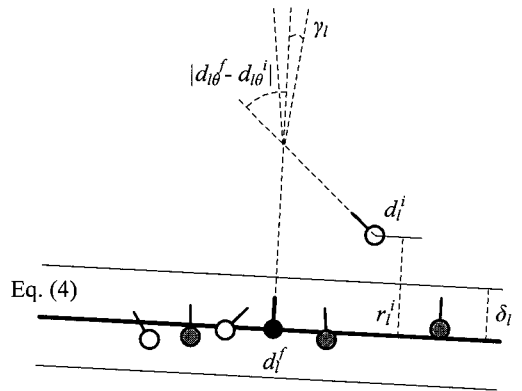


Fig. 6 Data classification for extracting line features

점 형상의 경우는 다음과 같이 간단하게 접점들간의 거리를 계산하여 그룹을 분류하였다. δ_p 역시 제한 거리에 해당하는 디자인 파라미터가 된다.

$$G_{POINT}^j = \left\{ d_p^i \left| \sqrt{(d_{px}^f - d_{px}^i)^2 + (d_{py}^f - d_{py}^i)^2} < \delta_p \right. \right\} \quad (7)$$

$, d_p^i \in D_{POINT}, d_p^i \neq d_p^f, j = 1, 2, \dots$

원 형상의 경우는 그림 4 에서 보는 바와 같이 점점 데이터를 얻기 위해 예측하였던 가상 원 형상을 사용하여 그룹을 분류한다. 그림 7 에서 보는 바와 같이 임의의 가상 원 형상의 방정식이 다음과 같을 때,

$$(x - x_c^f)^2 + (y - y_c^f)^2 = (r_c^f)^2 \quad (8)$$

D_{CIRCLE} 의 d_c^i 로부터 가상 원 형상의 중심까지의 거리와 가상 원 형상의 반지름과의 차를 r_c^i 라 하면 r_c^i 는 다음과 같다.

$$r_c^i = \left| \sqrt{(d_{cx}^i - x_c^f)^2 + (d_{cy}^i - y_c^f)^2} - r_c^f \right| \quad (9)$$

따라서 임의의 원 형상과 연관성이 있는 점점 데이터 그룹을 G_{CIRCLE} 라고 할 때 G_{CIRCLE} 의 성분이 되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$G_{CIRCLE}^j = \left\{ d_c^i \left| r_c^i < \delta_c \ \& \ \left| d_{c\theta}^f - d_{c\theta}^i \right| < \gamma_c \right. \right\} \quad (10)$$

$, d_c^i \in D_{CIRCLE}, j = 1, 2, \dots$

그림 7 에서 보는 바와 같이 식 (10)의 δ_c 와 γ_c 는 각각 제한 거리와 각도에 해당하는 디자인 파라미터가 된다. 또한 $d_{c\theta}^f$ 는 가상 원 형상의 중심으로부터 d_c^i 까지의 방향이 된다. 회색으로 표시된 점점들은 식 (10)의 조건을 만족하여 그룹화 된 데이터를 나타내고 흰색으로 표시된 점점들은 조건을 만족하지 못한 데이터를 나타낸다.

4. 형상지도작성

4.1 형상추출

각 형상 별 조건으로 분류된 그룹, G_{LINE}^j , G_{POINT}^j , G_{CIRCLE}^j 의 성분 데이터들이 엄격한 조

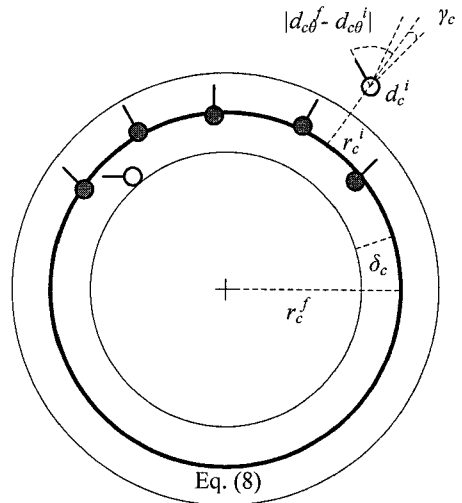


Fig. 7 Data classification for extracting circle features

건에 의한 FPA 모델에 의해 추출되었다 할지라도 실제 실험 시 발생할 수 있는 미량의 로봇 위치 오차 및 센서 측정 오차는 내포되기 마련이다. 따라서 최적화된 형상 파라미터를 추출해내기 위해 최소 자승법(Least Squares Optimization)을 사용한다.

각 형상에 대한 모델 파라미터를 \hat{x} 라 하면 이를 구하기 위한 선형 방정식은 다음과 같다.

$$A\hat{x} \approx \bar{b} \quad (11)$$

방정식의 개수, 즉 분류된 그룹의 점점 데이터 개수가 m 이고 구하고자 하는 해의 개수, 즉 형상에 대한 모델 파라미터의 개수가 n 이면, 위 식 (11)에서 A 는 $m \times n$ 차원의 기지 행렬이 되고, \hat{x} 는 n 차원의 미지 벡터가 된다. 그리고 \bar{b} 는 m 차원의 기지 벡터가 된다. 본 연구에서 사용하는 각 형상의 종류에 대한 형상 모델과 선형 방정식의 A 행렬과 \bar{b} 는 표 1 과 같다.

식 (11)에 대한 오차 자승을 최소화시키는 해는 최소 자승법을 통해 다음 식 (12)와 같이 표현되고, 이 식 (12)의 해는 Singular Value Decomposition 을 사용하여 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A^T A \hat{x} = A^T \bar{b} \quad (12)$$

$$\hat{x} = V \Sigma^+ U^T \bar{b} \quad (13)$$

Table 1 Feature model equations and given matrix and vector of the linear equation

	feature model	A	\bar{b}
LINE	$\alpha x + \beta = y$	$\begin{bmatrix} d_{lx1} & 1 \\ d_{lx2} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ d_{lxm} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} d_{ly1} \\ d_{ly2} \\ \vdots \\ d_{lym} \end{bmatrix}$
POINT	$\alpha = x$ $\beta = y$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{m \times 1}$	$\begin{bmatrix} d_{px1} \\ d_{px2} \\ \vdots \\ d_{pxm} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} d_{py1} \\ d_{py2} \\ \vdots \\ d_{pym} \end{bmatrix}$
CIRCLE	$\alpha(x^2 + y^2)$ $+ \beta x + \gamma y = 1$	$\begin{bmatrix} d_{cx1}^2 + d_{cy1}^2 & d_{cx1} & d_{cy1} \\ d_{cx2}^2 + d_{cy2}^2 & d_{cx2} & d_{cy2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{cxm}^2 + d_{cym}^2 & d_{cxm} & d_{cym} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{m \times 1}$

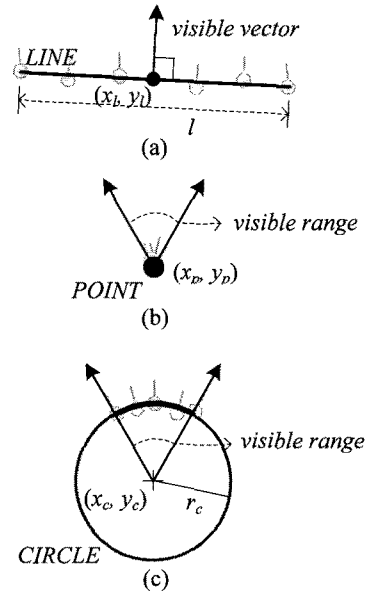


Fig. 8 (a) line feature, (b) point feature and (c) circle feature extracted through least squares optimization of grouped data

4.2 에지 형성

초음파 센서에 의해 작성되는 형상 지도의 가장 두드러지는 특징은 다른 센서에 의해 작성된 지도에 비해 완성도가 높지 못하다라는 것이다. 특히 벽면의 모서리와 같은 경우 초음파 데이터의 거울반사현상으로 인해 그 에지(edge) 형상을 사실적으로 표현하기가 매우 어렵다. 따라서 이러한 환경 형상 지도를 사용하여 목적지를 향한 최적의 로봇 경로를 계획하기엔 무리가 있다. 또한 초음파 센서를 장착한 서비스 로봇이 환경 형상 지도를 작성하였을 경우 일반 사용자들에게 완성도가

식 (13)에서 V 와 U 는 $n \times n$ 과 $m \times m$ 차원의 orthogonal 행렬이고 Σ 는 $m \times n$ 차원의 diagonal 행렬이다. 그리고 Σ^+ 는 Σ 의 non-zero entries 역행렬이 된다.

그림 8 은 최소자승법을 통해 추출된 형상들을 이용하여 환경 지도를 구성하기 위한 각 형상 별 형태를 나타내고 있다. 선 형상은 중점, 길이 그리고 가시 방향을 나타내는 벡터로 표현된다. 선 형상의 중점, 길이는 그룹화된 점점 데이터들을 이용하여 예측한다. 선 형상의 가시 방향은 최소 자승법으로 정해진 선 형상 기울기의 법선 벡터로 점점 데이터의 가시 방향 정보를 이용하여 로봇이 위치했던 방향으로 향하도록 한다. 점 형상은 점의 위치 그리고 가시 영역으로 나타내며 최소자승법으로 정해진 점의 위치와 더불어 가시 영역은 점점 데이터의 가시 방향 정보를 이용하여 정한다. 원 형상은 원점, 반지름 그리고 가시 영역으로 나타내며 원점과 반지름은 최소자승법을 통해 최적화된다. 그리고 원 형상의 가시 영역 또한 점 형상과 마찬가지로 사용된 점점 데이터의 가시 방향 정보를 이용하여 정한다.

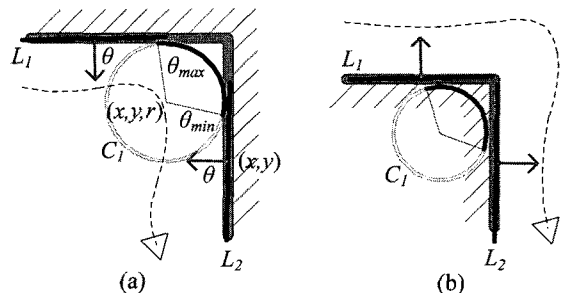


Fig. 9 Circle and line features extracted around (a) the concave and (b) the convex corners

높지 못한 환경 형상 지도를 제공할 수 밖에 없다. 결국 초음파 센서를 이용하여 지도를 작성할 경우 완성도 높은 형상 지도를 재구성하기 위한 노력은 필요하다. 본 연구에서는 에지 주위에 원 형상이 추출되는 현상을 이용하여 형상 지도의 완성도를 높이고자 한다.

그림 9 는 오목한(concave) 또는 볼록한(convex) 형태의 모서리 부근에서 추출된 선 형상들과 원 형상을 보여주고 있다. 각각의 독립된 선 형상을 $L_1(x,y,\theta,l)$ 과 $L_2(x,y,\theta,l)$, 그리고 원 형상을 $C_1(x,y,\theta_{min},\theta_{max},r)$ 이라 할 때 단일 에지 형상, E_1 으로 결합시키기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\left|C_{1r} - r_{C_{1-L_1}}\right| < \delta_e \quad \& \quad \left|C_{1r} - r_{C_{1-L_2}}\right| < \delta_e, \quad (14)$$

$$C_{1\theta_{min}} \leq \theta_{C_{1-L_2}} \leq C_{1\theta_{max}}$$

식 (14)에서 $r_{C_{1-L_1}}$ 과 $r_{C_{1-L_2}}$ 는 원의 중심에서 각 선 형상까지의 수선의 길이이고 $\theta_{C_{1-L_2}}$ 는 그림 10 에서 보는 바와 같이 원의 중심에서 두 선 형상의 교점을 향한 방향각이다. 즉, 선 형상들은 디자인 파라미터, δ_e 의 범위 내로 원 형상과 접해야 하며 원 형상의 중심에서 두 선 형상의 교점을 향한 방향각이 원 형상의 가시 영역 내에 포함되어야 단일 에지 형상으로 결합될 수 있는 조건을 만족하게 된다. 결합된 단일 에지 형상의 좌표는 그림 10 에서 보는 바와 같이 시작점인 E_{1S} , 중간점인 E_{1M} , 끝점인 E_{1E} , 그리고 가시 방향인 $E_{1\theta}$ 로 나타낼 수 있다. 에지 형상의 가시 방향은 두 선형상의 가시 방향의 평균으로 한다. 결국 에지 형상의 가시 방향을 통해 오목한 형태의 모서리인지 볼록한 형태의 모서리인지 판단할 수 있다. 선 형상의 결합에 사용된 원 형상은 에지 형상 추출 후 제거된다.

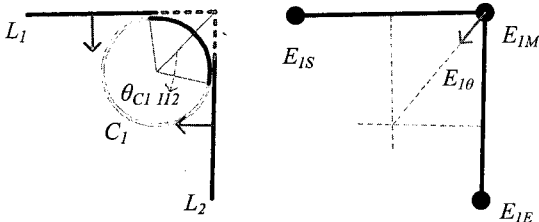
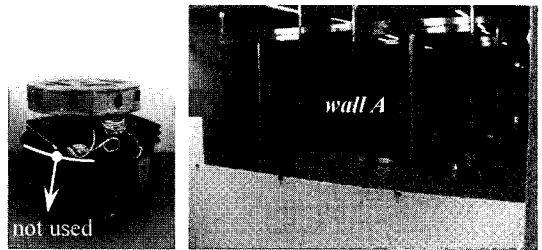


Fig. 10 Edge feature merged from two line features

5. 실험결과

실험은 그림 11(a)와 같이 약 45 도의 빔 폭을 갖는 8 개의 Murata 초음파 고정형 센서 링을 장착한 Pioneer-3DX 이동 로봇을 사용하여 수행되었다. 8 개의 초음파 센서들은 45 도의 간격으로 균일하게 센서 링에 배치되어 장착되었다. 센서 링의 반지름은 16cm 이고 지면에서부터 센서 링까지의 높이는 37cm 이다. Pioneer-3DX 생산 시 원래 장착되어 있던 Polaroid 초음파 센서들은 본 실험에서 사용되지 않았다. 그림 11(c)에서 보는 바와 같이 실험은 약 7m×4m 크기의 공간에서 수행되었다. 특히 wall A 로 표시된 벽면은 그림 11(b)에서 보는 바와 같이 문 틀이 일정한 간격으로 존재하는 유리문으로 이루어져 있다. 또한 두 개의 둥근 바스켓들을 실험 공간에 배치함으로써 선이나 점 형상 뿐만 아니라 원 형상의 추출 성능 또한 검증해 보고자 하였다. N_{1-6} 은 주어진 환경 형상에서 모서리에 해당되는 곳을 의미하며 각각의 좌표는 표 2 와 같다.



(a) (b)

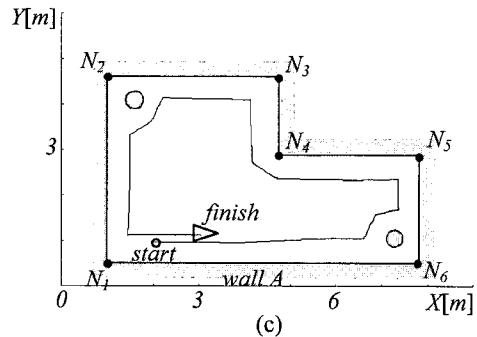


Fig. 11 (a) Pioneer-3DX mobile robot with a fixed sensor ring equipped with eight Murata sonar sensors, each with a beam directivity of roughly 45°, (b) Picture of the experimental environment, (c) Diagram of the experimental environment and guided robot path

Table 2 True positions of each corner

Index	X-axis [m]	Y-axis [m]
N_1	1.00	0.50
N_2	1.00	4.62
N_3	4.75	4.62
N_4	4.75	2.88
N_5	7.82	2.88
N_6	7.82	0.50

이동 로봇이 평균 0.2m/s 의 속력으로 실험 환경을 한 바퀴 주행하는 동안 초음파 거리 데이터는 5Hz 의 빈도수로 측정되었다. 그림 12 에서는 로봇의 주행 전 구간에서 측정된 초음파 데이터에 해당되는 원호를 나타내고 있다. 예상되는 바와 같이 측정된 초음파 데이터는 빔 폭이 넓기 때문에 물체의 정확한 위치를 제공해주지 못하고 있다. 또한 거울 반사 현상으로 인해 잘못된 거리 데이터가 종종 측정되는 현상도 확인할 수 있다. 하지만 그림 13 에서 보는 바와 같이 FPA 모델을 통해 추출된 형상 별 데이터 그룹 D_{LINE} , D_{POINT} 그리고 D_{CIRCLE} 의 점점 데이터들은 가시 방향 정보와 함께 주위 환경 형상을 잘 나타내주고 있음을 확인할 수 있다.

그림 13(a)는 가상 선 형상으로부터 추출된 점점 데이터를 나타낸다. 이 데이터들은 각각의 독립된 선 형상을 추출해내기 위해 식 (6)을 통해 그룹으로 분류된다. 선 형상을 추출해내기 위한 데이터 그룹으로 분류되지 못한 소수의 데이터들은 더 이상 지도를 작성하기 위해 사용되지 않는다. 선 형상 추출을 위한 디자인 파라미터, δ_l 과 γ_l 는 각각 20cm, 15° 이다. 그림 13(b)는 가상 점 형

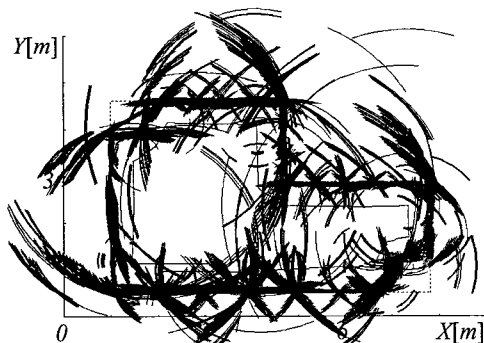


Fig. 12 Plot of all sonar returns based on the robot path

상으로부터 추출된 점점 데이터들을 나타내고 있다. 앞에서 언급한 대로 wall A 로 표시된 벽면은 문 틀이 일정한 간격으로 존재하는 유리문으로 이루어진 벽면이기 때문에 각각의 문 틀에 해당되는 위치에서 유추된 가상 점 형상들에 해당되는 점점 데이터들이 군집해 추출되어 있는 모습을 확인할 수 있다. 이 데이터들 또한 각각의 독립된 점 형상을 추출해내기 위해 식 (7)의 조건을 통해 각각의 그룹으로 분류된다. 점 형상 추출을 위한 디자인 파라미터 δ_p 는 20cm 이다.

그림 13(c)는 가상 원 형상으로부터 추출된 점

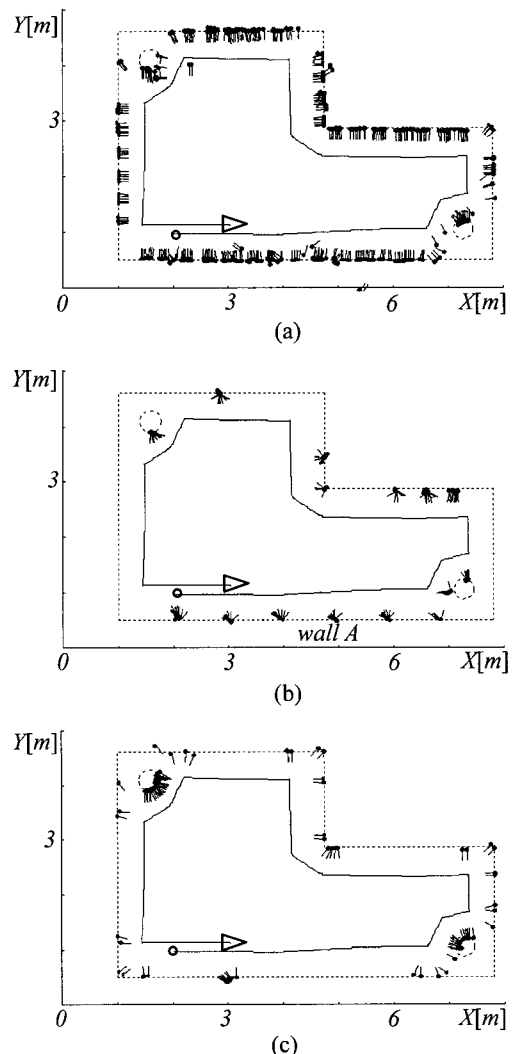


Fig. 13 Contact points estimated for (a) line, (b) point, and (c) circle features respectively from all sonar returns by the FPA model

점 데이터들을 나타내고 있다. 예상할 수 있듯이 원 형상 추출 성능을 평가하기 위해 배치해 놓은 두 개의 바스켓에서만뿐만 아니라 각각의 모서리 지역에서도 가상의 원 형상이 유추된 것을 확인할 수 있다. 이 데이터들 또한 각각의 독립된 원 형상을 추출해내기 위해 식 (10)의 조건을 통해 각각의 그룹으로 분류된다. 원 형상 추출을 위한 디자인 파라미터, δ_c 와 γ_c 는 각각 20cm, 15° 이다. 결과

적으로 평가해볼 때 그림 12 와 같이 불확실성이 높은 초음파 데이터로부터 그림 13 과 같이 FPA 모델을 통해 신뢰도 높은 각각의 형상 별 점점 데이터를 추출해냄으로써 초음파 센서를 이용한 완성도 높은 형상 지도 작성의 가능성을 확인할 수 있다.

그림 14 는 형상 별로 데이터를 분류한 후 최소 자승법을 통해 추출된 형상들의 결과를 보여주고 있다. 그림 14(a)에서 보듯이 추출된 모든 선 형상은 실제 존재하는 벽면의 윤곽을 잘 나타내주고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 초음파 데이터의 거울반사현상으로 인해 모서리 부분에서는 벽면의 모양이 완벽하게 재현되지 못했음을 볼 수 있다. 그림 14(b)에서는 추출된 모든 점 형상들을 나타내고 있다. 추출된 점 형상들은 문 틈이나 모서리와 같이 실험 환경에서 실제로 추출될 가능성이 높은 위치에서 추출되었다. 유리 문 틀로 구성된 wall A 위에 추출된 점 형상들 뿐만 아니라 다른 벽면 위에 존재하는 틈에서도 점 형상들이 다수 추출되었다. 그림 14(c)는 추출된 모든 원 형상들을 나타낸다. 실험 환경에 배치해 둔 두 개의 바스켓 위에서 원 형상이 추출되었다. 또한 실제로는 원 형상의 물체는 아니지만 모서리와 같은 곳에서도 원 형상이 추출되었다. 이러한 현상은 넓은 빔 폭을 가진 초음파 센서 입장에서 볼 때 자연스러운 현상이며 실제로 선 형상들을 단일 에지 형상으로 결합시키기에 유용한 정보가 된다.

그림 15 는 선, 점, 원 및 에지 형상을 이용하여 재구성된 최종 환경 형상 지도를 나타내고 있다. 대부분의 환경 형상이 완성도 높게 구성되었음을 확인할 수 있고 초음파 센서의 단점을 극복하였음을 확인할 수 있다. 추출된 에지 형상의 위치와 오차는 다음의 표 3 과 같다.

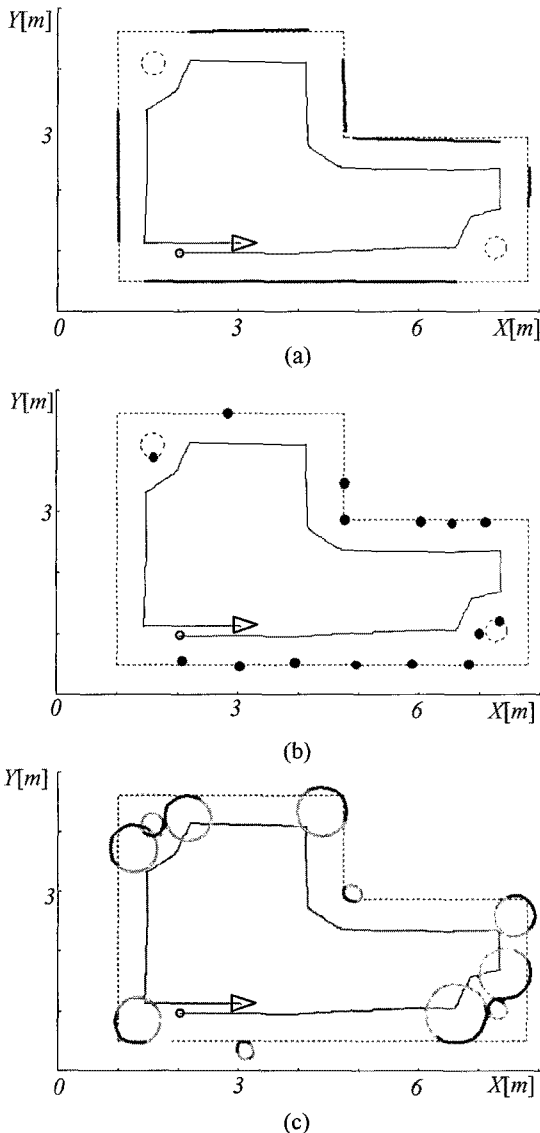


Fig. 14 (a) line, (b) point and (c) circle features extracted through the least squares optimization of each grouped data

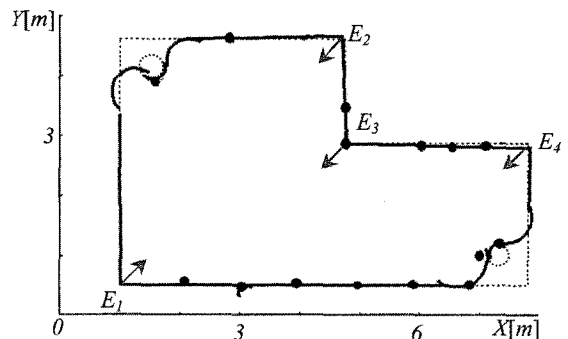


Fig. 15 Finalized feature map result

Table 3 Estimated edge positions and errors

Index	Edge(type)	X-axis [m]	Y-axis [m]	Error distance[m]
N_1	$E_1(Concave)$	1.002	0.499	0.002
N_2	-	-	-	-
N_3	$E_2(Concave)$	4.708	4.666	0.046
N_4	$E_3(Convex)$	4.751	2.881	0.001
N_5	$E_4(Concave)$	7.852	2.952	0.078
N_6	-	-	-	-

6. 결론

본 논문에서는 이동 로봇을 위한 초음파 센서의 새로운 환경 형상 지도 작성법에 대해 소개하였다. 이 방법은 기존에 사용되었던 선이나 점 형상뿐만 아니라 원 형상까지 추출해냄으로써 형상 지도의 현실성을 더욱 높였다. 특히 모서리 부근에서 추출된 원 형상은 인접한 선 형상들을 단일 에지 형상으로 결합시킴으로써 형상 지도의 완성도를 높였다. 실제 환경의 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 형상 지도 작성법은 넓은 빔 폭과 거울 반사 현상에 의한 부정확성을 가진 초음파 센서를 이용하여 복잡한 환경에 대한 완성도 높은 지도를 작성함에 있어 효과적임을 확인할 수 있었다.

후 기

This work was supported by the Korea Research Foundation Grant funded by the Korean Government (MOEHRD, Basic Research Promotion Fund) (KRF-2008-521-D00032).

참고문헌

1. Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D., "Probabilistic Robotics," The MIT Press, 2005.
2. Chatila, R. and Laumond, J.-P., "Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 138-145, 1985.
3. Arras, K. O., Castellanos, J. A., Schilt, M. and Siegwart, R., "Feature-based multi-hypothesis

localization and tracking using geometric constraints," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 44, No. 1, pp. 41-53, 2003.

4. Cole, D. M., Harrison, A. R. and Newman, P. M., "Using Naturally Salient Regions for SLAM with 3D Laser Data," IEEE International Conference on Robotics and Automation, SLAM Workshop, 2005.
5. Davison, A. J., "Real-time simultaneous localization and mapping with a single camera," IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 2, pp. 1403-1410, 2003.
6. Lee, K. H., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., "Mobility improvement of an Internet-based robot system using the position prediction simulator," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 6, No. 3, pp. 29-36, 2005.
7. Cho, D.-W. and Moravec, H. P., "A Bayesian Method for Certainty Grids," AAAI Spring Symposium on Mobile Robots, pp. 57-60, 1989.
8. Leonard, J. J. and Durrant-Whyte, H. F., "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 376-382, 1991.
9. Lim, J.-H. and Leonard, J. J., "Mobile Robot Relocation from Echolocation Constraints," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 9, pp. 1035-1041, 2000.
10. Ip, Y. L., Rad, A. B., Chow, K. M. and Wong, Y. K., "Segment-Based Map Building Using Enhanced Adaptive Fuzzy Clustering Algorithm for Mobile Robot Applications," Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 35, No. 3, pp. 221-245, 2002.
11. Carelli, R. and Freire, O., "Corridor Navigation and Wall-following Stable control for Sonar-based Mobile Robots," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 45, No. 3, pp. 235-247, 2003.
12. Gao, W. and Hinders, M., "Mobile Robot Sonar Backscatter Algorithm for Automatically Distinguishing Walls, Fences, and Hedges," The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, No. 2, pp. 135-145, 2006.
13. Crowley, J. L., "Navigation for an intelligent mobile robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 1, pp. 31-41, 1985.
14. Leonard, J. and Durrant-Whyte, H., "Directed Sonar

- Sensing for Mobile Robot Navigation,” Kluwer Academic Publishers, 1992.
15. Heale, A. and Kleeman, L., “A real time DSP sonar echo processor,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 1261-1266, 2000.
 16. Wijk, O. and Christensen, H. I., “Triangulation-Based Fusion of Sonar Data with Application in Robot Pose Tracking,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 6, pp. 740-752, 2000.
 17. Tardos, J. D., Neira, J., Newman, P. M. and Leonard, J. J., “Robust Mapping and Localization in Indoor Environments Using Sonar Data,” The International Journal of Robotics Research, Vol. 21, No. 4, pp. 311-330, 2002.
 18. Bank, D. and Kampke, T., “High-Resolution Ultrasonic Environment Image,” IEEE Transactions on Robotics, Vol. 23, No. 2, pp. 370-381, 2007.
 19. Fazli, S. and Kleeman, L., “Simultaneous landmark classification, localization and map building for an advanced sonar ring,” Robotica, Vol. 25, No. 3, pp. 283-296, 2007.