

다면체 다중반사 특성의 초음파 센서를 이용한 전역 지도 생성

이왕헌* · 권인소**

World map generation using Sonic Polygonal Multiple reflection Range Sensor

Wangheon Lee, Inso Kweon

Key Words: Polygonal Reflector(다면체 반사판), Multiple reflections(다중반사), Ultrasonic Sensor(초음파 센서), SONAR(소나), World Map Generation(전역지도작성), Sensor Fusion(센서융합)

Abstract

This paper describes the sonic polygonal multiple reflection range sensor [SPMRS] using the multiple reflection properties usually ignored in ultrasonic sensor as disturbances or noises. Targets such as plane, corner, edge, and cylinder in indoor environments can be easily detected by the multiple reflection patterns obtained by a SPMRS system. Target classification as well as feature data extraction such as the distance and azimuth to the target are computed simultaneously by considering the geometrical relationships among the detected targets, and finally the world map is generated by refining the detected targets. At the same time the narrow field of view of SONAR range sensor is increased and the scanning time is reduced by the active motion of SPMRS stepping servomechanism

1. 서론

이동로봇에 있어서 초음파센서를 사용하는 이유는 다른 센서에 비해 사용이 쉽고 가격이 싸다는 이유 때문이다. 로봇분야에서 초음파의 비행시간(TOF)을 이용한 성공사례가 발표되기는 하지만 일반적으로 그 결과는 초음파가 지니는 본래 특성인 회절과 다중반사로 인하여 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있다.

특히 평면 표식과 코너 표식을 같은 거리에 놓고 센서를 일정 간격으로 회전시키면서 얻은 TOF 파형이 공이 원호형태를 띄게 되어 이를 TOF 정보만으로 물체를 분리하기는 어려운 문제로 대두되고 있다[6].

TOF 정보에 칼만필터를 적용하여 지도를 작성하는 방법이 제안되었으나 다중반사에 의한 인식 각도의 불확실성을 줄일 수 없고 TOF 를 얻어내는 데 상당히 많은 시간을 요한다[9].

인벡클함수로 표현된 초음파 소스와 실내공간의 표식에 따른 전달함수를 구한 다음 이들을 초음파 원과 중합 적분하여 표식을 인식하는 방법이 제안되었으나[5] 한번의 스캔으로 얻은 TOF 정보로부터 환경맵을 작성할 수 없고, 특히 코너 평면 및 모서리 표식이 동시에 존재하는 경우 이를 분리하는 것이 어렵다.

종래의 초음파 센서가 지니는 이러한 문제점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 초음파 센서가 부착된 7 개의 반사판을 원주 위에 30 도 등 간격으로 부착하여 다중반사가 잘 일어나도록 하였고, 특히, 제안된 SPMRS 시스템은 30 도 회전만으로 로봇 주위의 360 도 환경정보를 얻을 수 있도록 하였다.

2. SPMRS 시스템의 구성

2.1 SPMRS 시스템의 구성

2.1.1 다중반사 시스템의 특징

음향 콘을 음향 콘의 각도에 따라 다음의 식(1)에서와 같이 초음파 모의 실험 모델로 정의한다 [6].

$$\theta_0 = \sin\left(\frac{0.16\lambda}{a}\right), A(\theta) = e^{-\frac{4\theta^2}{\theta_0^2}} \quad (1)$$

* 한국과학기술원 전기전자공학과 BK21 연구원

E-mail : whlee@rcv.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-5465 FAX : 869-5465

** 한국과학기술원 전기전자공학과 교수

E-mail : iskweon@mail.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3465 FAX : 869-5465

여기서 θ_0 : 음향콘의 각도, λ : 파장, a : 초음파센서의 직경, $A(\theta)$ 는 음향의 강도를 나타낸다.

초음파의 시야각을 그림 1에 표시하였다. θ 는 초음파를 발사하여 초음파 센서가 표식을 감지할 수 있는 각도 이고 a 는 초음파 센서의 반경을 나타낸다[3].

만약 표식의 스캐닝 각도가 θ_0 보다 커지면 이때 반사파는 표식을 잃어버리게 되고 다중반사파형은 관측할 수 없게 된다.

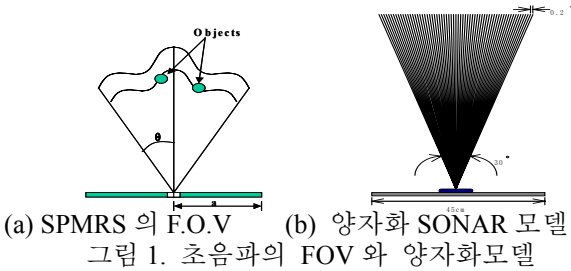


Figure 1. Field of view and quantized SONAR model

그림 2(a)의 초음파의 외관에서 볼 수 있는 바와 같이 반사판을 의도적으로 초음파 센서의 뒷면에 부착함으로써 그림 4와 같이 표식과 센서사이에서 다중반사가 쉽게 발생하도록 하였다.

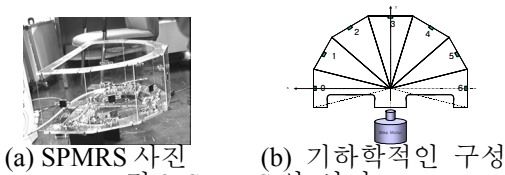


Figure 2. Photograph of SPMRS

본 연구에서는 다음의 그림 3에서 보여주는 바와 같이 실내에서 흔히 볼 수 있는 4 종류의 표식을 실험대상으로 하였다[4][5][6][9].

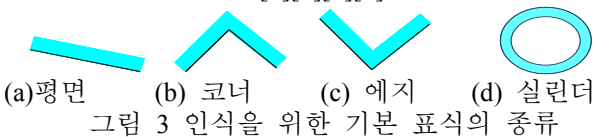


Figure 3. Basic Targets for the recognition test

초음파의 다중반사는 다음의 그림 4에 보여주는 바와 같이 반사와 회절의 두가지 성분으로 분리할 수 있다.

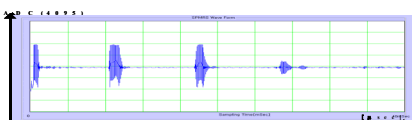


Figure 4. Multiple reflection waveform of the plane target 100cm apart from the reflector

이러한 다중반사는 다음의 그림 5(a)에서와 같이

가상의 거울모형을 이용하여 설명할 수 있으며, 회절은 발사된 초음파의 파장보다도 작은 표면에서 발생하는 것으로, 그림 6(c)와 같은 모서리 표식에서 발생하는 현상이다.

본 연구에서는 음향콘을 그림 1(b)에서와 같이 0.2°의 등 간격으로 양자화한 모델을 사용하고 초음파가 표식을 향하여 직선으로 발사되는 것으로 가정한다[8]. 이러한 과정을 통하여 초음파 센서로부터 초기 발사된 파형은 표식에 반사된 후 재차 초음파 음원으로 작용하게 되는 것으로 생각할 수 있다. 이후 초음파가 회절 없이 반사만이 존재한다는 조건 하에서 대기중을 이동하는 초음파를 해석하도록 한다.

그림 5는 코너와 평면의 가상 반사모형을 보여주며, 그림 6은 표식들이 반사판으로부터 같은 거리에 있을 경우 다중반사 스캐닝 모델을 보여준다.

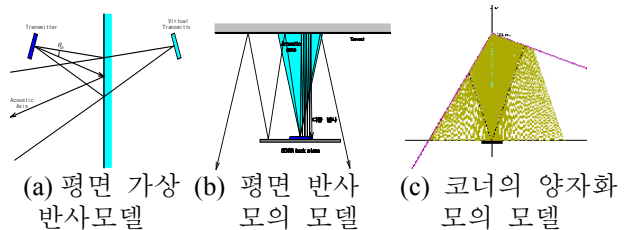


Figure 5. Virtual reflection pattern and its simulation model

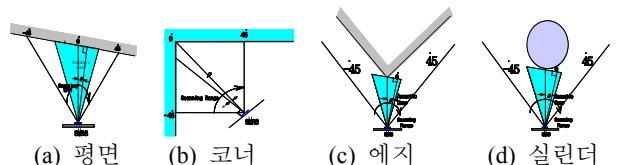


Figure 6. Multiple reflection scanning model between the target and the reflector

이러한 모의 모델로부터 초음파를 회전 시키면서 얻은 실내의 표식과 반사판사이의 수신된 초음파 사이에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6의 스캐닝 모델을 기반으로 한 모의 다중반사 파형을 보여준다.

여기서 스텝거리[SD]는 회전 각도 축을 따라서 연속적인 반사가 나타나는 다중반사의 처음과 마지막의 스텝각도 차이 스텝거리를 나타내며, 반사 에너지는 다중반사가 일어난 갯수[NMR]이다.

아래의 그림 7에는 평면과 실린더가 외견상 같은 형태를 띄고 있지만 평면 표식의 반사에너지가 실린더보다 크다는 것을 알 수 있고, 코너 표식의 경우 3개의 반사 에너지 그룹이 나타나며, 모서리 표식의 경우는 NMR 파형이 거리와는 관계없이 항상 1번만 발생한다는 것을 알 수 있다. 이러한 실내공간내의 표식과 다중반사판사이의 수신된 파형

의 특징으로부터 평면,코너,모서리,실린더 표식을 쉽게 분리할 수 있다.

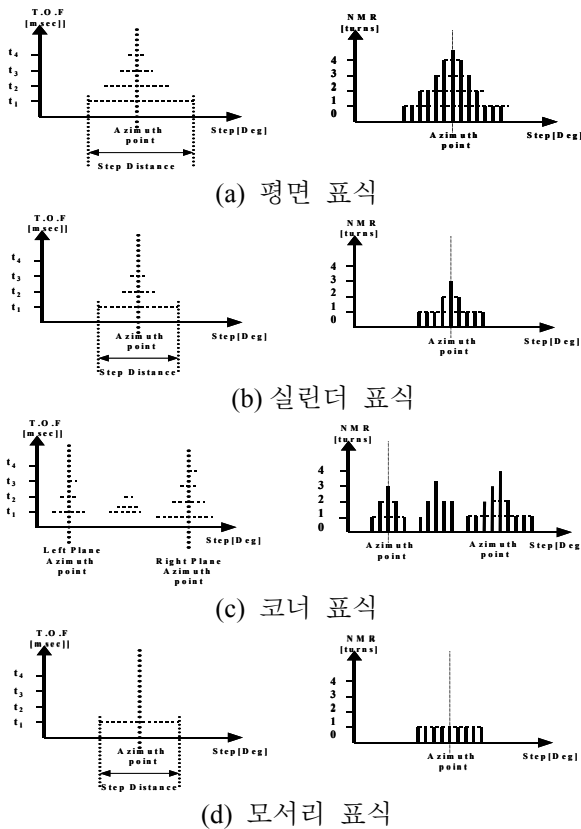


그림 7 모의 다중반사 파형 및 기호표시
Fig.7 Simulated multiple reflection pattern and its notation

2.2 7각형 다중반사 거리 센서의 구성

7 개의 반사판이 그림 2(b)에 보여주고 있는 바와 같이 30°의 등 간격으로 원주 위에 부착되어 있다. 스캐닝 동작은 번호 0 부터 번호 6 까지 순번에 따라 실행되며, 각 스텝에서 10[μsec]의 주기로 2000 개의 샘플을 얻는다. 그림으로 210 개의 스텝데이터가 30 스텝의 회전만으로 얻어지게 된다. 이렇게 얻어진 420kByte 의 데이터는 로봇주위의 한 프레임의 환경 정보로 저장되게 된다.

이 정보 내에는 환경 정보 뿐 만이 아니라 환경의 특징과는 관계없는 노이즈나 왜란등이 포함되어 있으므로 이치화 과정과 필터링 과정을 거쳐서 420kByte 의 데이터를 4.2kByte 이하의 데이터로 줄이게 되는데 이 과정을 다중반사 초음파 예비 필터(Polygonal Multiple Reflection Sonic Pre Filter)의 약어를 따서 “PMRSPF”라 부르며 흐름도를 그림 9에 보여주고 있다.

PMRSPF 후에 얻은 4.2kByte 데이터에 인식 과정을 적용하여, 최종적으로 환경지도를 작성 한다.

2.3 SPMRS 의 예비 실험

초음파 센서 유니트의 감도, 스텝핑 모터의 분해능.샘플링 주기,샘플의 개수, 이치화를 위한 기준 값의 설정이 예비 실험을 통하여 이루어진다.

만약 같은 조건 하에서 각 반사판의 데이터에 차이가 있다면 환경지도 작성을 위한 거리 센서 역할을 할 수 없게 된다.

잘못된 이치화 기준 값의 선정은 다중반사의 형태로 얻게 되는 환경정보의 손실을 초래하게 된다. 그림으로 이치화 기준 값은 실내의 특징정보가 다중반사의 형태로 최대, 최소 범위 내에 포함될 수 있도록 선택하여야 한다. 본 논문에서는 2715(BCD)를 이치화 기준치로 선정하였다.

스텝 서보의 분해능이 큰 경우에는 각도를 정교하게 얻기 어렵고 너무 분해능을 작게 하면 너무 많은 데이터를 얻게 되어 계산에 많은 시간이 걸리게 된다.본 연구에서는 1° 를 각도 분해능으로 선정하였다.

샘플링 주기는 초음파 센서의 주파수 49.7kHz 의 2 배인 10μsec 로 선정하여 에일리아싱 문제를 해결 하도록 하였다.

PMRSPF 필터링 알고리즘은 그림 9 에 보여주고 있다. 여기서 얻어낸 다중반사 데이터는 반사판 번호에 따라 그룹으로 나누어 필터링을 행한다. 각각의 반사판별로 필터된 데이터를 결합하여 로봇주위의 다중반사형태의 환경정보 데이터로서, 0 스텝에서 209 스텝까지 210 스텝의 필터링된 다중반사데이터가 얻어지게 된다. 이 데이터에 인식 알고리즘을 적용하여 환경지도를 얻는다.

2.4 SPMRS 의 예비 실험

이치화 후에 필터링된 데이터는 다음의 그림 8에 보여주는 바와 같이 특징치 주위에 그룹으로 뭉쳐지게 되며 이를 다중반사 초음파 데이터 그룹(Multiple Reflection Sonic Data Group) 의 약어인 “PMRSDG”라 부른다.

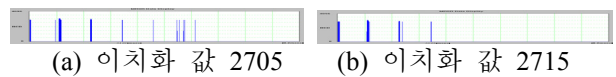


그림 8 이치화 후의 다중반사의 파형

Fig. 8 Multiple reflection waveform after binarization

아래의 그림 9 의 PMRSPF 필터링 과정 후에는 PMRSDG 중에서 첫번째 반사되어 돌아오는 데이터를 얻게 되며, 이를 다중반사 거리 센서의 특권데이터(Privileged Data of Multiple Reflection range Sensor)의 약어로 “PDMRS”라 부른다.

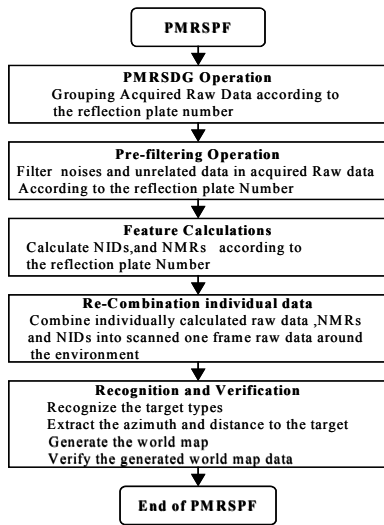


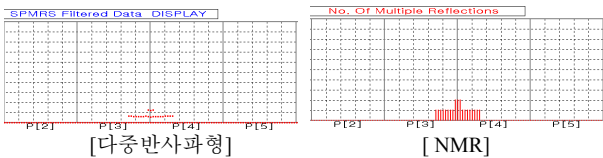
그림 9 PMRSPF 의 흐름도
Fig.9 Flow chart for PMRSPF

3. 특성곡선을 얻기 위한 SPMRS 실험

45cm 의 실린더, 평면, 코너 그리고 모서리 표식을 그림 3 에서 보여준 바와 같이 실내의 기하학 적인 특징으로 선정하였고 50cm 씩 이동하면서 50cm 부터 200cm 까지 실험을 행하여 특성곡선을 얻었다.

3.1 실린더 표식의 실험

그림 10 에는 직경 45cm 의 실린더 표식의 다중 반사 실험결과를 보여주고 있다.



(a) 다중반사 파형

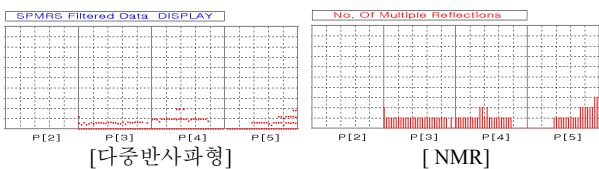
실 좌표.		측정데이터		절대 오차		NMR (turns)	SD (steps)
거리 (cm)	각도 (°)	거리 (cm)	각도 (°)	거리오차 (cm)	각도오차 (°)		
88	135	89	132	+1	-3	3	23
138	120	137	114	-1	-6	2	19
188	118	176	114	-12	-4	1	15
238	118	229	114	-9	-4	1	17

(b) 오차 분석

그림 10 직경 45cm 실린더 표식의 다중 반사 파형
Fig.10 Multiple reflection patterns of Dia. 45cm cylinder

3.2 모서리 표식의 실험

그림 11 에는 모서리 표식의 다중반사 실험결과와 거리 변화에 따른 반사파형을 보여주고 있다.



(a) 다중반사 파형

실 좌표.		측정데이터		절대 오차		NMR (turns)	SD (steps)
거리 (cm)	각도 (°)	거리 (cm)	각도 (°)	거리오차 (cm)	각도오차 (°)		
138	135	137	135	-1	0	3	-
188	135	179	138	-9	+3	2	-
238	135	235	135	-3	-3	1	-

(b) 오차 분석

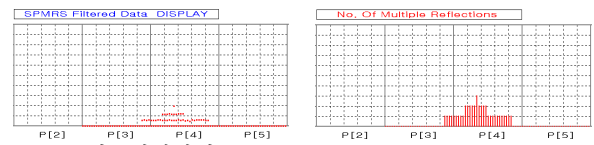
그림 11 코너 표식의 다중 반사 파형

Fig.11 Multiple reflection pattern of corner target

반사판과 코너를 이루는 2 개의 평면사이에 각각의 직접적인 다중 반사 뿐 아니라, 코너를 이루는 2 개의 평면사이에 다중반사가 일어남을 알 수 있으며, 위의 그림 11(a)의 평면[4]에 나타나 있다.

3.3 평면 표식의 실험

그림 12 에는 평면 표식의 다중반사 실험결과를 보여주고 있다.



(a) 반사판100cm전방의 평면표식의 다중반사파형

실 좌표.		측정데이터		절대 오차		NMR (turns)	SD (steps)
거리 (cm)	각도 (°)	거리 (cm)	각도 (°)	거리오차 (cm)	각도오차 (°)		
88	125	95	127	+7	+2	4	32
138	125	130	131	+6	+6	3	28
188	125	191	129	+3	+4	2	26
238	125	241	129	+3	+4	2	26

(a) 오차 분석

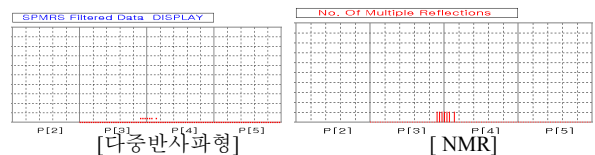
그림 12 평면 표식의 다중반사 파형

Fig.12 Multiple reflection waveform of plane target

평면 표식의 다중반사 파형은 삼각형을 띄므로, 삼각형의 정점 위치를 알아내면 표식의 방위각을 알 수 있고, 이 지점의 TOF 를 계산하면 표식 까지의 거리를 동시에 알 수 있다.

3.4 모서리 표식의 실험

그림 13 에는 모서리 표식의 50cm,90cm,100cm, 120cm 에서의 다중반사 실험결과를 보여주고 있다.



(a) 다중반사 파형

실 좌표.		측정데이터		절대 오차		NMR (turns)	SD [steps]
거리 (cm)	각도 (°)	거리 (cm)	각도 (°)	거리오차 (cm)	각도오차 (°)		
88	121	86	123	-2	+2	1	11
98	121	94	123	-4	+2	1	5
138	121	123	124	-15	+3	1	2
158	121	-	-	-	-	-	-

(b) 오차 분석

그림 13 코너 표식의 다중반사 파형

Fig.13. Multiple reflection of right angle edge

표식의 위치에 관계없이 한번의 다중반사만 일어나며, 반사판 으로부터 120cm 이후에 있는 표식

의 경우는 다중반사가 일어나지 않음을 알 수 있다. 이러한 특징은 에지 표식 에서만 일어나는 현상으로 SPMRS 인식과정에서 표식 인식의 단서로 사용한다.

3.5 예비실험의 요약

SPMRS 의 다중반사 특성을 지금까지의 실험결과를 기반으로 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1. 실린더 표식의 다중반사 파형은 평면 표식과 유사하지만 실린더 표식의 스텝 거리[SD]가 평면표식 보다 짧다.
2. 다중반사 그룹의 수가 코너 표식의 경우 3 개 이상이며 다음의 식(2) 관계를 만족한다.

$$X^2 + Y^2 = \rho^2, \quad \theta = \cos^{-1} \frac{X}{\rho} \quad (2)$$

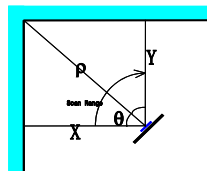


그림 14 코너 표식을 이루는 2 평면의 기하학적인 관계
Fig.14 Geometrical configuration of 2 planes in corner target

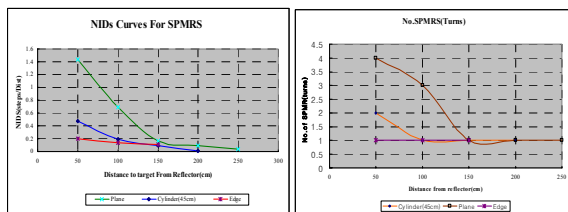
3. 모서리 표식에 있어서 다중반사는 반사판으로부터의 거리와는 관계 없이 발생하지 않는다.

다음으로는 정규화 역거리(이후 Normalized Inverse Distance 의 약어로 “NID”라 정의함)를 다음의 식(3)과 같이 정의 한다.

$$NID = SD / D_T * NMR \quad (3)$$

여기서 **NID**: 정규화 역거리[steps/cm*turns],
SD(cm):앞의 그림 7 에서 정의한 바와 같이 스텝거리이며, **NMR(turn)**:다중반사의 개수[turns] 을 나타낸다.

식(3)에서 정의한 NID 및 NMR 특성 곡선을 그림 15 에 보여준다.



(a) NID plots (b) NMR plots
그림 15 SPMRS 거리 센서의 특성곡선

Fig15. Characteristic curves of SPMRS range sensor

4. 특징 알고리즘과 실 환경적용 실험

4.1 특징 추출 알고리즘

SPMRS 의 기하학적인 구성을 그림 16 에 보여준다.

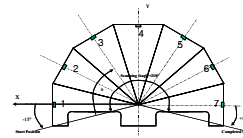


그림 16 SPMRS 의 기하학적인 구성
Fig.16. SPMRS coordinates

스캔 각도θ 는 시계방향으로 -15° 에서 195°까지 210°를 스캔한다. 특징치는 그림 16 의 좌표계와 식(4)에 정의된 행렬식을 이용하여 계산한다.

$$T^{c,i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad T(t_x, t_y, 1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 r 는 SPMRS 의 반경이고, θ_i 는 회전각도, t_x, t_y 는 회전축으로부터 SPMRS 의 변위를 나타낸다.

표 1 SPMRS 의 기하학적인 치수
Table 1 Geometrical dimensions of SPMRS

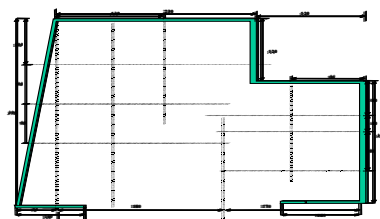
기호	설명	치수
R	반경	37.5[cm]
θ _i	회전각도	최대다중반사가 검지된지점의 각도 [°]
t _x , t _y	변위	최대다중반사가 검지된지점의 변위 [cm]

만약 PMRSDG 각 스캐닝 각도 축을 따라서 3 이상이고 식(3)을 만족하면 코너로 분류한다. 만약 NMR 이 거리와 관계없이 1 인 경우에는 모서리로 분류하고 그림 15(a)의 NID 곡선을 이용하여 모서리인가의 여부를 재차 확인 한다.

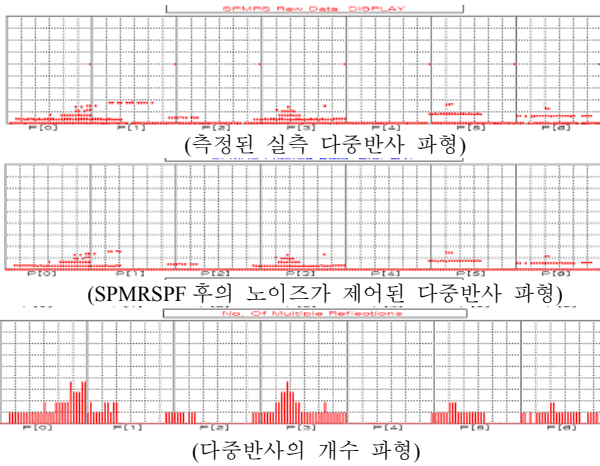
그 외의 경우는 그림 15(a)및 그림 15 (b)의 NID 와 NMR 곡선을 이용하여 탐색하여 실린더 및 평면의 여부를 판별한다. 이후 검출된 특징 표식 들의 기하학적인 상관관계를 고려하여 정정작업을 실행한다.

4.2 SPMRS 에 의한 환경 인식 실험

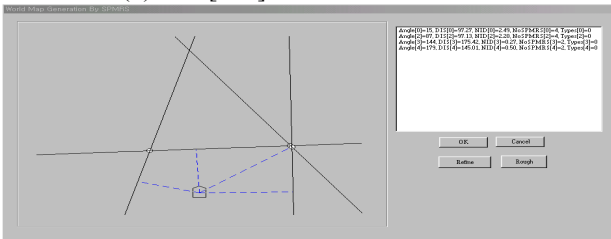
환경인식 실험을 위한 구성을 그림 17(a)에 보여주고 있으며, 대표적인 인식과정으로 POS[101]에서의 측정결과를 그림 17(b),그림 17(c) 와 그림 17(d)에 정리하였다. 이러한 과정을 다른 위치에서도 유사하게 적용하였고 그 결과를 그림 17(e)에 보여주고 있으며 여기서는 그림 17(a)의 원래의 환경과 SPMRS 센서가 인식한 환경지도를 비교하기 위해서 중첩하여 보여주고 있다. 그림 17(f)는 각 위치에서의 오차를 보여준다.



(a) 환경인식 실험을 위한 구성



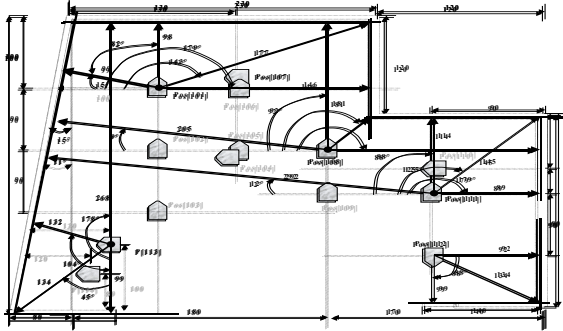
(b) POS[101]에서의 다중반사 파형



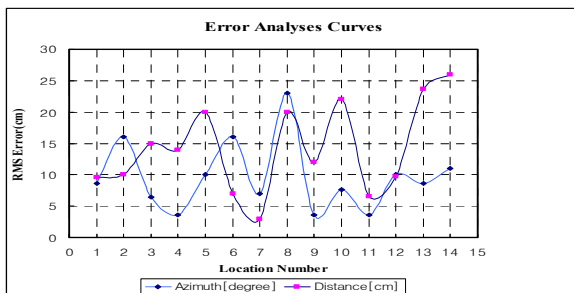
(b) POS[101]에서 인식된 결과

검출된 특징	각도 (°)	거리 (cm)	NIDs (steps•turns/cm)	NMRs (turns)	SDs (steps)	인식된 표식의 형태
feat 0	15	99	2.45	4	38	Plane
feat 1	45	138	0.126	1	11	Corner
feat 2	87	98	2.19	4	33	Plane
feat 3	144	177	0.273	2	19	Corner
feat 4	179	146	0.499	2	27	Plane

(d) POS[101] 에서 인식된 데이터



(e) 측정된 전역지도



(f) 각 위치에서의 RMS 오차곡선

그림 17. SPMRS를 이용한 전역지도

Fig.17. Map generation experiment by SPMRS

5. 결론

본 논문에서는 초음파의 다중반사특성을 이용한 다면체의 거리 센서를 제안하였고, 예비실험을 통하여 제안된 센서의 특성인 NID 및 NMR 특성 곡선을 실험을 통하여 구하였다.

또한 다중반사파형의 예비 필터링 및 표식인식 알고리즘을 제안하였고, 제안된 인식 알고리즘을 실내 환경에 적용하여 평균 각도오차 9.64(deg) 및 평균 거리 오차 14.2 (cm)의 결과를 얻었다. 이러한 결과 및 중첩 표시된 전역지도로부터 SPMRS 가 이동로봇이 이동하는 실내환경의 전역지도 작성을 위한 거리센서로 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] W.H.Lee and I.S.Kweon, "A new Ultrasonic Range Sensor using Multiple Reflections", 제어자동화시스템공학회 VOL.8, No.7, July, 2002
- [2] D.H.Ryu, S.K.Park and I.S.Kweon, "Target classification in indoor environments using Multiple reflections of a SONAR sensor", Proc. Of KACC, VOL, pp1938-1941, OCT.1997
- [3] Polaroid Corporation Technical Assistance, Ultrasonic Ranging System, 1992.
- [4] B.Bashan, B. Ayrulu, and S.W.Utete, Neural Network based Target Differentiation Using Sonar for Robotics Applications, IEEE Trans.R&A VO.16.NO.4, AUG.2000.
- [5] R.Kuc and M.W.Siegel, Physically based simulation model for acoustic sensor for robot navigation, IEEE Trans.on PAMI9, No.6, pp776-777. NOV.1987
- [6] B.Barshan, and R.KUC, Differentiating Sonar reflections from corners and plane by employing an intelligent Sensor, PAMI, VOL.12, NO.6, 560-569, JUNE 1990
- [7] J. J. Hugh and F.Durrant-Whyte, Mobile robot Localizatin by Tracking Geometri Beacons, IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol.7.No.3. JUN.1991
- [8] L.Kleeman and R. Kuc. An optimal SONAR array for target localization and classification in IEEE proc. ICRA, 1994. May. Sandiego USA
- [9] David Lee, The map-building and exploration strategis of a simple sonar-equipped robot, Cambridge Press, 1996, p59.