

뉴턴 보간법을 이용한 초음파센서 기반의 맵빌딩 개선

An Enhancement of Ultrasonic Based Map-building Using Newton Interpolation

최경식¹, 최정원², 이석규^{1,✉}

Kyung Sik Choi¹, Jung Won Choi² and Suk Gyu Lee^{1,✉}

¹ 영남대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Yeungnam Univ.)

² 영남이공대학 전기자동차과 (Department of automatic Electric Engineering, Yeungnam College of Science and Technology)

✉ Corresponding author: sglee@ynu.ac.kr, Tel: 053-810-3923

Manuscript received: 2008.10.29 / Revised: 2009.3.4 / Accepted: 2009.3.20

In mobile robotics, ultrasonic sensors became one of the most popular devices for collision avoidance and navigation primarily due to data robustness, the easy availability of low-cost systems, their compact size, simple circuits, and their ease in interfacing with computers. However, ultrasonic sonic sensors are subject to noise which results in inaccuracy of mapping and localization of the robot. This paper introduces a new approach to enhance environmental maps based on ultrasonic range data using linear interpolation and Newton interpolation. The simulation and experimental results show that the proposed method improves the accuracy of the map through better distance estimation between the mobile robot and obstacles.

Key Words: Map-building (맵 생성), Mobile Robot (이동 로봇), Newton Interpolation (뉴턴보간법), Ultrasonic Sensor (초음파 센서)

기호설명

c = light velocity

t_0 = flight time of an ultrasonic sensor

d_n = distance between a robot and an obstacle

x_n = horizontal distance between a robot and an obstacle

y_n = vertical distance between a robot and an obstacle

α = angle between d_n and x_n (or y_n)

θ = half angle between an edge of a robot and the center of an ultrasonic sensor

O = a center of the robot

E_d = difference between a measurement value and a compensator value on the linear interpolation

1. 서론

최근 로봇 주행 기술은 고기능의 장비와 다양한 센서기술을 활용하여 팔목할 만한 발전을 하고 있다. 특히 이동 로봇에 레이저 센서나 비전 시스템과 같은 정밀한 시스템을 구축하여 주행시 장애물을 감지하고 회피하고 있다. 로봇이 이동할 때 장애물을 인지하고 회피하는 알고리즘에 대한 연구는 지속적으로 발전하고 있으나, 정밀한 주위 환경 측정을 위하여 사용되는 고가의 장비로 인하여 로봇 제작비용이 급속히 증가하고 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 가격대비 성능이 우수한 초음파 센서를 활용한 연구는 로봇의 장애물 회피뿐만 아니라, 슬램(SLAM, Simultaneous Localization And mapping) 등의 분야에서 지속적으로 다양하게 이루어지고 있다.¹⁻¹⁰ 그러나 초음파 센서를 이용할 경우, 신호 방향의 부정확성, 왜란의 민감성, 반사각의 민감성, 신호 감쇄 등의 문제점으로 인해 측

정결과의 정확성이 떨어진다.¹¹ 이러한 점은 로봇의 이동에 있어서 장애물 정보에 대한 신뢰성이 하락하여, 주행경로나 로봇의 위치추정 등에 문제점이 된다. 일반적으로 초음파 센서를 이용한 선행 연구에서도 지적하고 있듯이 이러한 문제점에 대한 보정은 매우 중요한 사안이다. 로봇의 이동이나 위치추정, 장애물 회피, 주행경로 설정 등의 작업에 있어서 여러 종류의 시스템 오차가 발생기 때문에 발생 가능한 오차에 대해서는 최대한 제거 또는 최소화할 수 있어야 한다. 특히 초음파 센서로부터 입력되는 많은 양의 데이터와 반사율에 따른 오차 보정을 위해 선행 보간법을 적용한 결과, 맵 빌딩에 필요한 데이터량을 줄일 수 있고 정보군집 내 오차를 보정할 수 있다.¹² 본 연구에서는 직사각형의 공간에서 로봇이 초음파 센서를 이용하여 환경을 얼마나 정확하게 인식하는가에 대한 문제로 접근하기로 한다. 로봇에 장착된 16 개의 초음파 센서로부터 얻어진 데이터를 거리값으로 변환하여 이를 로봇에서부터 직선으로 표시한 다음, 끝점을 연결한 형태가 주어진 환경과 어느 정도 유사한 가를 찾아냄으로써 보간법에 의한 초음파 센서의 환경 인식을 개선하고자 한다. 또한 도출된 결과값을 이용하여 로봇의 맵 생성에 대한 정확도를 높이고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서는 연구에 사용될 초음파 센서 특성과 로봇의 기구학에 대하여 설명하고, 3 장에서는 보간법을 이용한 수학적 모델링을 완성하여 맵 생성을 위한 기초 데이터를 정한다. 4 장과 5 장에서는 시뮬레이션을 통한 보간법 적용 결과와 실험을 통한 보간법 적용 결과를 측정결과를 확인하며, 마지막으로 6 장에서는 연구결과, 추후 개선 사항에 대하여 서술하였다.

2. 로봇의 기구학적 특성

2.1 초음파센서의 특성

초음파 센서는 진동자를 20[kHz]에서 수 [GHz] 대역으로 진동시켜 초음파 신호를 발생시키고 이 신호를 수신하는 구조를 가지고 있다. 일반적으로 초음파 센서는 압전 진동자형이나 정전형이 주를 이루고 있으며, 본 연구에서는 정전형 초음파 센서(SRF04)를 시뮬레이션 및 실험용으로 사용하기로 한다. 본 연구에서 사용하는 초음파 센서의 기본 특성은 표 1 과 같다.

Table 1 Characteristics of Ultrasonic sensor (SRF04)

Item	specifications
voltage	5V
Measurement range	3cm - 3m
Frequency	40kHz
sensitivity	3cm/2m
Wave length	8.5mm
Activation	Trigger pulse (10us)

본 연구에서는 초음파 센서를 이용하여 이동 로봇과 장애물과의 거리를 측정하고, 이 거리 값들을 조합하여 장애물의 모양, 즉 환경을 분석함으로써 지도 작성을 위한 기본 정보로 활용하였다. 이동 로봇과 장애물과의 거리를 D_n 이라고 하면, 식 (1)과 같이 거리를 구할 수 있다.

$$D_n = c \frac{t_0}{2} \tag{1}$$

2.2 이동 로봇의 특성

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 16 개의 초음파 센서를 로봇의 중심축을 기준으로 22.5°간격으로 배치하여 2 차원 공간의 전 방향에서 장애물과의 거리를 측정할 수 있게 하였다. 특히 16 개의 초음파가 동시 전파될 경우, 원형 배열로 인한 초음파의 간섭 및 측정오차를 줄이기 위하여 전(Front) 방향의 센서부터 차례대로 초음파를 전파하여 거리를 측정하였다. 이동 로봇은 초음파 센서 배열판의 직경이 0.27[m]이고, 16 개의 초음파센서 모두가 1 회 사용되는데 걸리는 시간은 0.3[sec]이다. 또한, Fig. 2 와 같이 돌출된 초음파 센서의 송수신단을 센서 배열판의 내부에 위치한 것으로 가정하여 센서 배열판의 부착면을 0 점 기준으로 놓은 다음, 이동 로봇과 장애물의 거리를 측정한다.

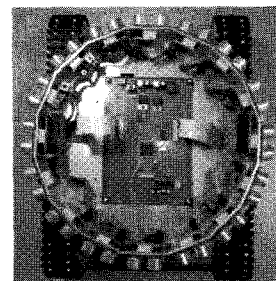


Fig. 1 Ultrasonic sensors mounted on a robot

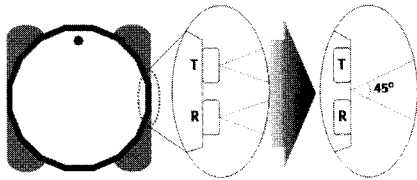


Fig. 2 Approximation of an ultrasonic sensor system

$$a = \frac{m(\sum_{i=1}^m x_i y_i) - (\sum_{i=1}^m x_i)(\sum_{i=1}^m y_i)}{m(\sum_{i=1}^m x_i^2) - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{m(\sum_{i=1}^m x_i^2)(\sum_{i=1}^m y_i) - (\sum_{i=1}^m x_i y_i)(\sum_{i=1}^m x_i)}{m(\sum_{i=1}^m x_i^2) - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (4)$$

3. 보간법 적용을 위한 수학적 모델링

3.1 보간법의 개념과 종류

군집 내의 모든 점에 대한 오차를 최소화하는 근사함수를 통해 군집 내 임의의 점 x 에 대한 함수값을 찾는 보간법은 측정된 데이터가 불규칙한 군집형태일 때 유용하다.^{13,14} 선형 보간법은 가장 간단한 형태의 보간법으로서 두 개의 점을 직선으로 연결하는 방법이고, 뉴턴 보간법은 서로 다른 $n+1$ 개의 점 $x_i (i=0,1,\dots,n)$ 개에서 x_i, y_i 를 지나 는 n 차 다항식을 구하는 방법으로서 다른 점이 추가되어도 마지막 계수만 다시 추가하여 계산하면 되므로 본 연구에서 코너와 벽 등 장애물의 형태에 따라 실효값을 갖는 초음파 센서의 가용 개수가 달라질 경우의 지도 작성에 유용한 방법이다. 실제로는 센서 배열이 360° 인 점에서 코너의 경우 최대 9 개 정도의 센서가 실효값을 가질 수 있으나 신뢰성을 가질 수 있는 값은 바깥쪽을 제외한 7 개의 측정값을 이용하여 보간하는 것이 적당하다. 벽의 경우에는 벽과 마주하고 있는 5 개의 센서를 이용하여 보간을 할 수 있으나 코너와 마찬가지로 바깥쪽을 제외한 3 개의 센서가 높은 신뢰성을 갖는 값이다. 그러나 보간법을 적용하기 위해서 장애물의 형태별로 바깥쪽에 위치한 센서들의 측정값을 이용한다.

본 연구에서는 선형 보간법과 분할 차분 방정식을 이용하는 뉴턴 보간법을 이용하기로 한다.

3.2 보간법의 수학적 모델링

3.2.1 선형 보간법의 수학적 모델링

Fig. 3 에서 y_i 와 $ax_i + b$ 는 각각 i 번째 초음파 센서에 의해 측정된 값과 그에 대한 근사화식이다. 측정값과 근사화식의 차이를 E_d 라 가정하면, 이 값을 최소화하기 위한 a, b 는 최소자승법을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_d(a, b) = \max\{ |y_i - (ax_i + b)| \} \quad (2)$$

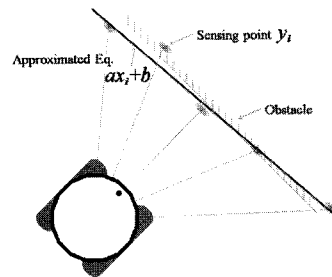


Fig. 3 Measurement values and approximate equation

3.2.2 뉴턴 보간법의 수학적 모델링

뉴턴 보간법은 식(5)와 같이 $p_n(x)$ 를 정의한다.

$$p_n(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + a_2(x-x_0)(x-x_1) + a_3(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2) + \dots + a_n(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p(x_0) &= a_0 & &= f(x_0) \\ p(x_1) &= a_0 + a_1(x_1 - x_0) & &= f(x_1) \\ p(x_2) &= a_0 + a_1(x_2 - x_0) + a_2(x_2 - x_0)(x_2 - x_1) & &= f(x_2) \\ &\dots & &\dots \\ p(x_n) &= a_0 + a_1(x_n - x_0) + a_2(x_n - x_0)(x_n - x_1) + \dots + a_n(x_n - x_0)(x_n - x_1)\dots(x_n - x_{n-1}) & &= f(x_n) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & (x_1 - x_0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & (x_2 - x_0) & (x_2 - x_0)(x_2 - x_1) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (x_n - x_0) & (x_n - x_0)(x_n - x_1) & \dots & (x_n - x_0)(x_n - x_1)\dots(x_n - x_{n-1}) & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_0) \\ f(x_1) \\ f(x_2) \\ \dots \\ f(x_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(6)과 같이 $n+1$ 개의 점을 각각 대입하여 계수를 구하며, 식(7)과 같은 행렬로 계산할 수 있다.

3.3 맵 생성

이동 로봇의 주행에 있어서 장애물 회피는 매우 중요한 문제이며, 이를 위해서는 각종 장애물에 관한 정보를 보다 정확한 지도 정보로 가지고 있어야 한다. 초음파 센서를 이용하면 로봇과 장애물과의 거리(또는 시간) 및 개략적인 모양(환경 유형)을 파악할 수 있다.^{12,13} 이와 같이 이동 로봇이 주변의 환경을 인식하여 정보화하는 것을 맵 생성이라 하며, 본 연구에서는 다음의 알고리즘에 의해 장애물에 대한 맵을 생성한다.

Table 2 Algorithm for Map Building

Step 1. Distance measurement between sensor and obstacle
Step 2. Grouping 2 measured data measured by the front(0), rear(8), left(12), right(4) side sensors of the robot
Step 3. Applying interpolation based on the minimum and maximum distances for each group
Step 4. Map building after interpolation
Step 5. Robot move and repeat Step 1-4

4. 보간법 적용을 위한 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 적용을 위한 모델 정의

비주얼베이직 6.0 으로 프로그램된 시뮬레이션 프로그램에서, 로봇과 장애물과의 거리는 다음과 같이 계산하였고, 가로, 세로의 길이가 각각 6[m], 4.5[m]인 직사각형의 구조물 내에서 로봇과 장애물과의 거리를 측정하였다. 본 연구에서 사용한 초음파센서인 SRF04 의 최대 측정범위가 3[m]라는 점에서 시뮬레이션 환경을 제한하였다. 전방의 센서부터 배열번호를 'S00' 에서 'S15'까지 지정하고, 'S00' 센서의 방향이 장애물의 위치와 직교한다는 전제하에 임의의 장애물과의 측정거리의 x, y 축

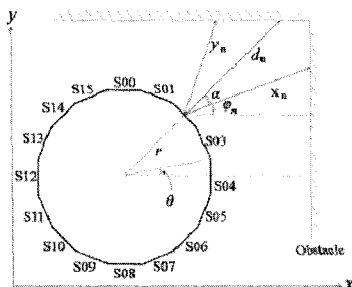


Fig. 4 Distance between the robot and an obstacle

성분을 각각 d_{xn}, d_{yn} 으로 두고, x, y 축 방향으로의 최소 추정거리 x_n, y_n 을 구하면 식(8)과 같다. 여기서 n 은 0 에서 15 까지의 정수로서, 초음파센서를 시뮬레이션 프로그램에 적용하기 위하여 시계방향으로 부여한 번호이다.

$$x_0 = x_8 = 0, x_{12} = d_{12}, x_4 = d_4$$

$$x_n = d_{xn} \frac{\cos(\alpha + \phi_n)}{\cos \phi_n} = \begin{cases} d_{xn} \frac{\cos 2(4-n)\theta}{\cos 2(3-n)\theta} & (0 \leq n < 4) \\ d_{xn} \frac{\cos 2(n-4)\theta}{\cos 2(n-5)\theta} & (5 \leq n < 8) \\ d_{xn} \frac{\cos 2(12-n)\theta}{\cos 2(11-n)\theta} & (9 \leq n < 12) \\ d_{xn} \frac{\cos 2(n-12)\theta}{\cos 2(n-13)\theta} & (13 \leq n < 16) \end{cases} \quad (8)$$

$$y_4 = y_{12} = 0, y_0 = d_0, y_8 = d_8$$

$$y_n = d_{yn} \frac{\cos(90 - \alpha - \phi_n)}{\cos(90 - 2\alpha - \phi_n)} = \begin{cases} d_{yn} \frac{\cos 2n\theta}{\cos 2(n-1)\theta} & (0 \leq n < 4) \\ d_{yn} \frac{\cos 2(8-n)\theta}{\cos 2(7-n)\theta} & (5 \leq n < 8) \\ d_{yn} \frac{\cos 2(n-8)\theta}{\cos 2(n-9)\theta} & (9 \leq n < 12) \\ d_{yn} \frac{\cos 2(16-n)\theta}{\cos 2(15-n)\theta} & (13 \leq n < 16) \end{cases}$$

시뮬레이션 프로그램은 Fig. 5 와 같이 주행 블록과 컨트롤 블록으로 구성하였다. 우측하단의 메뉴는 로봇의 수동 및 자동 조작, 외부 데이터 호출 등의 기능을 넣었고, 맵 생성 결과 및 보간법 적용 전후의 데이터는 별도의 폼으로 출력될 수 있게 프로그래밍하였다. 좌표는 로봇에서 측정된 원 좌표와 선형 보간법 및 뉴턴 보간법이 적용된 경우 좌표의 3 가지를 나타내고 있다. 하단의 'Area' 는 기본 측정값, 선형 보간법 적용 값, 뉴턴 보간법 적용 값에 의해 생성된 맵의 면적이고, 'Ratio' 는 로봇을 중심으로 상하좌우(0°, 90°, 180°, -90°방향)에서 측정된 값에 의해 사각형 면적을 구

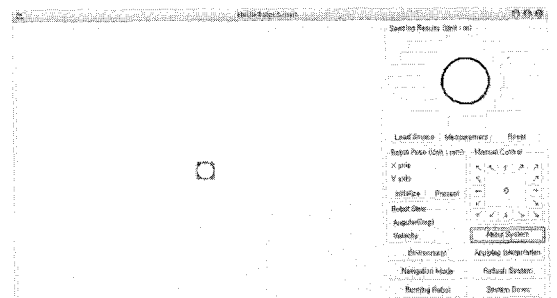


Fig. 5 Main Frame of Simulation

하고 이 값에 대한 맵의 면적 비율이다. 기준 값을 원형 면적으로 하지 않은 것은 로봇이 코너나 벽면에 가까이 있을 때 원형 면적을 구하기 어렵기 때문에 전체 환경에서 전반적인 맵 생성 면적을 비교하기 위함이다.

Fig. 6 은 16 개의 초음파 센서로부터 로봇과 장애물 사이의 거리를 메인 폼과 맵 빌딩 폼에서 표시한 것이다. 여기서 중앙 16 각형은 이동 로봇에 장착된 16 개의 초음파센서를 의미하고, x 축을 기준으로 -45° 방향에 표시된 점은 로봇의 이동방향이 다. 16 각형 외각에 표시된 값들은 로봇이 -45° 방향으로 놓여진 상태에서 각각의 초음파센서의 방향에서 측정한 로봇과 장애물 사이의 거리이다. Fig. 6 에서 1 점 쇄선은 로봇과 장애물 사이의 거리를 직선으로 도시한 것이고, 선의 바깥쪽의 숫자는 측정된 거리이다.

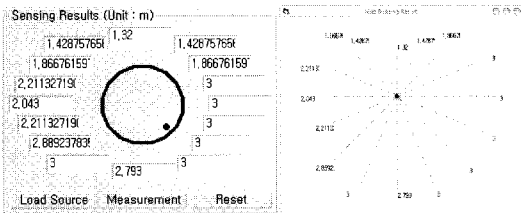


Fig. 6 Distance between a robot and an obstacle

4.2 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 다음의 세 가지 환경에 대하여 거리를 측정하고 선형 보간법과 뉴턴 보간법을 적용하여 맵을 작성하였다. (1)로봇이 코너에서 정지하여 맵을 작성한 경우, (2)사면으로 둘러 쌓인 장애물 중심에서 전방의 장애물로 로봇이 이동한 경우, (3)장애물인 벽면을 따라 코너 쪽으로 이동한 경우이다. 첫 번째의 실험환경은 코너에서 측정값과 보간법에 의해 개선된 값을 알기 위한 것이고, 나머지 두 가지의 환경은 로봇이 가장 기본적인 환경에서 이동하면서 보간법에 의해 초음파 센서의 오차를 어느 정도 개선할 수 있는가를 알기 위한 것이다. Fig. 7 은 로봇이 코너에 놓인 경우이며, 대시선은 거리 측정 결과로 작성된 맵, 점선은 선형 보간법을 적용하여 작성된 맵, 실선은 뉴턴 보간법을 적용하여 작성된 맵이다. 단지 정량적인 부분만을 고려하여 본다면, Table 3 에서 볼 수 있듯이 보간법을 적용하지 않은 경우가 코너에서 훨씬 넓은 영역의 맵을 작성할 수 있다고 볼 수 있으나, Fig. 7 의 맵 생성 결과를 볼 때, 코너에서 발생하

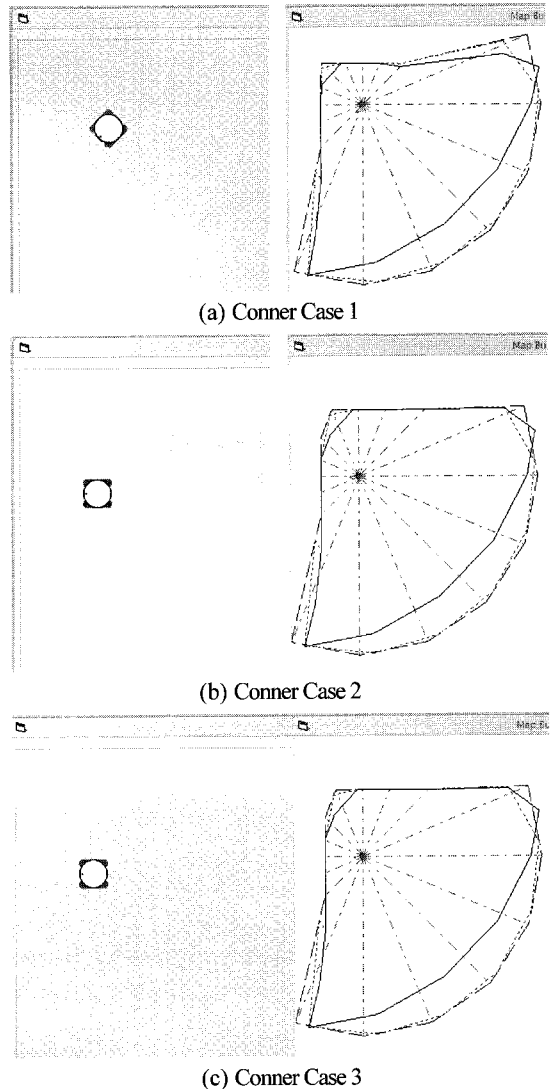


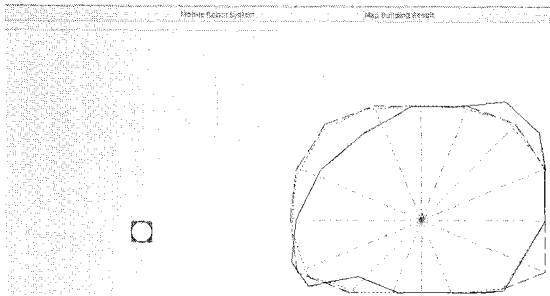
Fig. 7 Simulation results for each corner case

Table 3 Simulation result of Map Area and Ratio in Conner Case

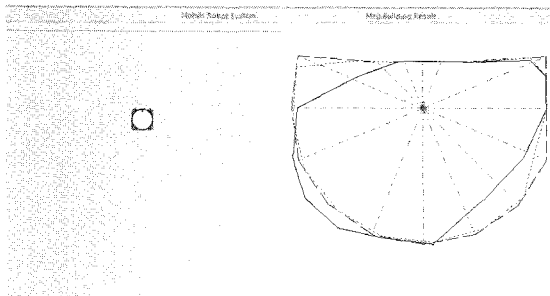
Section		Area(m ²)	Ratio(%)
Case 1	Measurement	13.231	88.524
	Linear	12.215	81.723
	Newton	11.541	77.212
Case 2	Measurement	13.231	88.524
	Linear	12.215	81.723
	Newton	11.541	77.212
Case 3	Measurement	14.047	86.829
	Linear	13.102	80.989
	Newton	12.376	76.500

는 초음파의 반사를 최소화하면서 코너의 맵을 보여주는 것은 뉴턴 보간법을 적용한 경우이다.

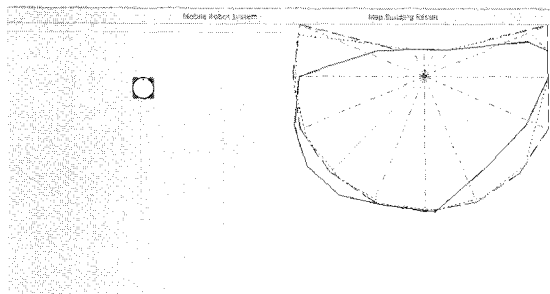
두 번째 환경을 적용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 8 과 Table 4 에 나타나 있다. Fig. 8(a)와 같이 시뮬레이션 영역의 중심에 있는 경우 거리 측정 결과나 선형 보간법이 적용된 맵의 경우 일그러짐이 적게 나타나고 있으나 앞선 코너의 경우와 마찬가지로 장애물이 벽으로 가까이 갈수록 장애물과 마주하는 영역의 맵이 보간법 적용후에 안정화되고 있다. 또한 장애물과 마주하지 않은 영역에서는 뉴턴 보간법의 적용으로 인해 맵의 영역이 더 작아졌다.



(a) Moving Case 1 : Starting from Center Area



(b) Moving Case 2 : Moving to Obstacle



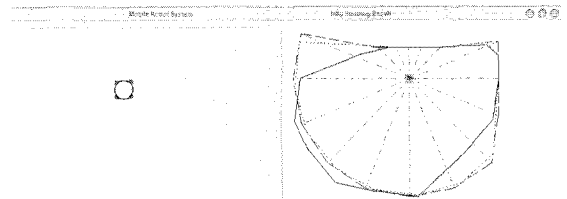
(c) Moving Case 3 : Approaching to Obstacle

Fig. 8 Simulation results for moving case(from center to obstacle)

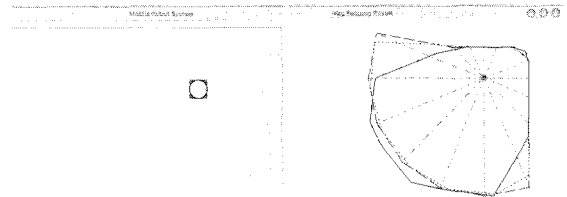
Table 4 Simulation results of Map Area and Ratio in Moving Cases : from Center to Obstacle

Section		Area(m^2)	Ratio(%)
Case 1	Measurement	20.862	88.891
	Linear	21.003	89.491
	Newton	20.540	87.521
Case 2	Measurement	19.562	85.281
	Linear	18.811	82.006
	Newton	18.333	79.228
Case 3	Measurement	18.201	88.604
	Linear	17.321	84.323
	Newton	16.905	82.297

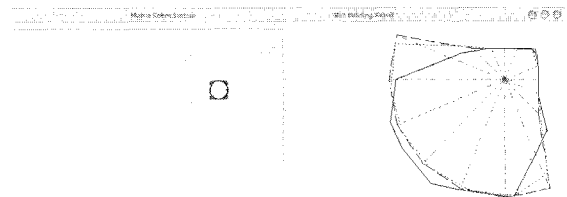
마지막 실험환경은 환경을 적용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9 와 Table 5 와 같다. 마지막 실험에서는 0.8[m] 가량 떨어진 상태에서 장애물을 따라 코너로 진행하여 전방의 장애물과 0.8[m] 떨어진 곳까지 주행하였다. Fig. 9 로봇이 장애물로부터 일정한 거리가 유지된 상태에서는 뉴턴 보간법보다는 선형 보간법이 더 나은 맵을 생성해주고 있으며, 맵의 면적은 근소한 차이만 보였다.



(a) Moving Case 1 : Starting from Center Area



(b) Moving Case 2 : Moving beside Obstacle



(c) Moving Case 3 : Approaching to Corner

Fig. 9 Simulation results for each corner case(along obstacle)

Table 5 Simulation results of Map Area and Ratio on Moving Case : along Obstacle

Section		Area(m ²)	Ratio(%)
Case 1	Measurement	17.527	86.866
	Linear	16.844	83.483
	Newton	16.284	80.708
Case 2	Measurement	13.809	87.177
	Linear	13.425	84.757
	Newton	13.303	83.981
Case 3	Measurement	13.064	88.880
	Linear	12.861	87.497
	Newton	12.764	86.636

5. 보간법 적용 실험

5.1 실험 환경

시뮬레이션과 동일한 환경에서 실험이 필요하였으나, 실제 환경에서는 Fig. 10 과 같이 가로, 세로 길이가 각각 1[m]인 정사각형 공간을 측정 환경으로 구성하였다. 이동 로봇의 크기가 직경 0.27[m]인 것을 감안할 때 다소 좁은 공간이지만, 시뮬레이션과 같이 정지된 상태의 측정과 짧은 거리를 주행하여 거리를 측정하는 데에는 큰 문제가 없었다.

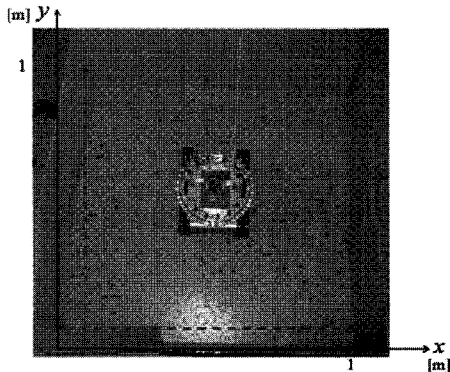


Fig. 10 Experimental Environment

Table 6 에서 ‘No’는 측정 순서이고, ‘S00’부터 ‘S15’는 Fig. 4 에서 설명한 바와 같이 전방의 초음파 센서를 ‘S00’로 한 초음파 센서들의 식별 번호이다. 이동 로봇이 Fig. 10 의 위치에서 측정한 데이터의 일부로서 텍스트 파일로 저장된 값을 엑셀에서 호출한 결과로서, 좌측부터 우측방향으로

‘S00’ 센서에서 ‘S15’ 센서까지 측정된 값이다. 16 개의 초음파 센서를 이용하여 10 초간 측정하여 대략 40 개 정도의 측정을 통해 로봇의 기구적 오류를 확인하고자 하였으며, Table 6 과 같이 큰 오류는 나타나지 않아 실험조건으로는 충분하였다.

Table 6 Measured Distance using 16 Ultrasonic Sensors

No	S00	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14	S15
1	28	29	40	39	36	37	44	48	46	47	48	40	37	39	50	30
2	28	29	40	39	36	37	47	47	46	47	49	39	37	40	51	30
3	28	29	40	38	36	37	45	47	46	48	47	39	37	38	51	30
4	28	29	41	39	36	37	44	47	46	48	48	39	38	40	51	31
5	28	29	40	39	36	37	45	47	46	48	47	40	37	40	50	30
6	28	29	39	38	36	37	43	47	46	48	47	39	36	39	52	30
7	28	29	40	38	37	39	44	47	46	47	44	39	38	39	52	30
8	28	29	40	38	36	37	43	47	46	47	46	39	41	39	53	30
9	28	29	40	38	37	39	45	47	46	48	47	40	41	39	52	30
10	28	29	40	38	36	37	46	47	46	45	47	40	42	39	53	30
11	28	29	40	38	37	38	45	48	46	47	45	39	38	40	52	30
12	28	29	40	38	37	37	46	47	46	48	47	40	42	39	51	30
13	28	29	40	39	36	37	46	47	46	40	47	39	38	39	53	30
14	28	29	40	39	36	37	47	48	48	47	40	37	39	51	30	
15	28	29	40	39	36	38	45	46	46	47	47	39	37	40	51	30
16	28	29	51	39	36	38	48	47	46	48	47	40	37	40	52	31
17	28	29	50	38	36	38	48	48	46	46	47	40	37	40	52	30
18	28	29	50	36	36	38	44	46	46	47	47	39	38	39	52	31
19	28	29	40	38	36	38	44	46	46	47	47	40	37	39	52	31
20	28	29	40	38	36	39	41	46	46	48	46	39	38	39	52	30
21	28	29	41	38	36	38	41	47	46	47	46	37	40	51	30	

Fig. 11 은 Fig. 10 의 환경에서 실제 측정된 값을 시뮬레이션에서 입력하고, 이 값을 이용하여 장애물과의 거리를 도시하였다. Fig. 6 과 마찬가지로 로봇과 장애물 사이의 거리를 1 점 채선으로 도시하고, 측정된 거리를 선의 끝 단에 표시하였다. 본 측정 실험에서는 측정 결과를 [cm]단위로 정수화된 값이 출력되도록 프로그램을 구성하였고, 단지 확인을 위한 화면에서는 [m]로 환산하여 표시하게 하였다.

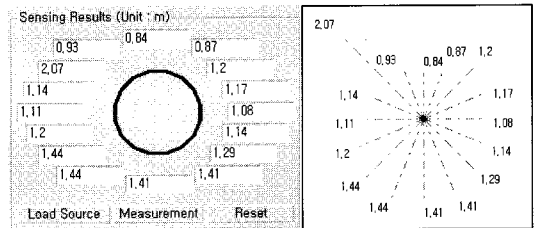


Fig. 11 Measured Distance to obstacle on Main Form

5.2 실험 결과

실제 실험에서도 시뮬레이션에서 실시했던 세 가지 환경을 적용하였다. 우선, 로봇을 코너에 정지시켜 맵을 작성하였다. 코너 부근에서 Fig. 12 에서는 로봇이 장애물과 나란히 놓여진 경우와 방향 전환을 위해 회전하는 경우, 장애물과의 거리가 다른 경우에 대하여 맵의 특성을 확인할 수 있다.

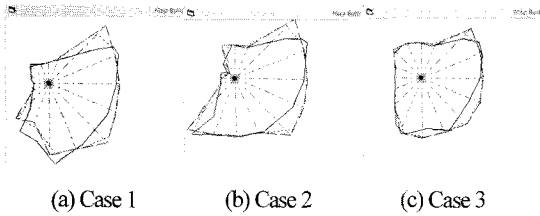


Fig. 12 Experimental results of corner cases as in Fig. 7

Table 7 Experimental results of Map Area and Ratio to Ideal Map on Conner Cases

Section		Area(m^2)	Ratio(%)
Case 1	Measurement	5.103	58.879
	Linear	5.495	63.397
	Newton	5.245	60.511
Case 2	Measurement	5.514	110.435
	Linear	5.430	108.753
	Newton	5.429	108.724
Case 3	Measurement	4.657	90.876
	Linear	4.621	90.174
	Newton	4.622	90.200

전자의 경우, 로봇이 회전하는 경우 Fig. 12(a)와 Table 7의 ‘Case 1’에서 볼 수 있듯이 뉴턴 보간법이 적용된 경우가 가장 우수한 결과 보였고, 로봇이 장애물과 나란히 놓여진 경우는 Fig. 12(b), (c)에서 보여지듯이 로봇이 장애물과 0.06[m] 이상 떨어지지 못한 경우 보간법을 사용하는 것이 맵 생성에 유용하였다.

두 번째로 사면으로 둘러 쌓인 장애물 중심에서 전방의 장애물을 향해 로봇이 이동하는 환경에 대한 실험 결과이다. 로봇이 장애물 벽 사이에서 중앙부근에 놓여졌을 때, Fig. 13(a)와 같이 코너에 대한 측정 오차가 큰 경우, 뉴턴 보간법에 의해 1.3% 정도의 맵 개선도가 나타났다. 그러나 Fig. 13(b), (c)와 같이 로봇이 전방으로 전진하면서 장애물 반대쪽의 맵은 뉴턴 보간법을 적용했을 때, 일그러짐이 나타났다.

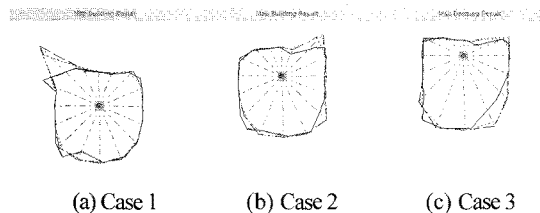


Fig. 13 Experimental results of moving cases as in Fig. 8

Table 8 Experimental results of Map Area and Ratio to Ideal Map on Moving Case: from Center to Obstacle

Section		Area(m^2)	Ratio(%)
Case 1	Measurement	4.678	94.930
	Linear	4.777	96.937
	Newton	4.714	95.670
Case 2	Measurement	4.420	90.850
	Linear	4.314	88.739
	Newton	4.344	89.343
Case 3	Measurement	4.515	92.862
	Linear	4.226	86.915
	Newton	4.160	85.572

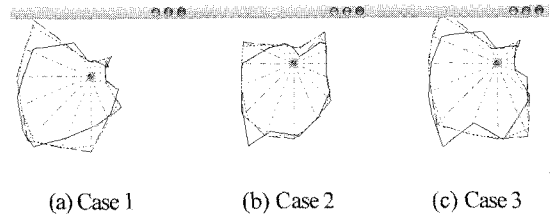


Fig. 14 Experimental results of moving cases(1) as in Fig. 9

마지막 실험환경은 환경을 적용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 14와 Table 9와 같다. 마지막 실험에서는 0.08[m] 가량 떨어진 상태에서 장애물을 따라 코너로 진행하여 전방의 장애물과 0.08[m] 떨어진 곳까지 주행하였다.

Table 9 Experimental results of Map Area and Ratio to Ideal Map on Moving Case : around Obstacle

Section		Area(m^2)	Ratio(%)
Case 1	Measurement	5.298	108.964
	Linear	5.550	114.147
	Newton	5.145	105.833
Case 2	Measurement	4.458	93.026
	Linear	4.357	90.913
	Newton	4.660	97.241
Case 3	Measurement	5.554	117.445
	Linear	5.652	119.569
	Newton	5.465	115.569

Fig. 14(b)와 Table 9의 ‘Case 2’와 같이 로봇이 장애물로부터 일정한 거리가 유지된 상태에서 측정 결과에 의한 맵이 더 우수하지만, 코너로 다가갈수록 Fig. 14(c)와 Table 9의 ‘Case 3’과 같이 뉴

턴 보간법을 적용한 경우의 맵이 로봇의 윗쪽 부분에서 초음파 센서의 반영으로 인한 오차값이 보정되어진 것으로 판단되며, 2.12% 개선을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 초음파 센서를 이용하여 측정된 데이터의 정확성을 높여 장애물에 대한 인식률을 높이기 위한 방법으로서 선형 보간법과 뉴턴 보간법을 이용하였고, 실험을 위해 이동 로봇 상단에 16 개의 초음파 센서를 원형 배열하여 360° 방향으로 장애물과의 거리를 측정할 수 있게 하였다. 시뮬레이션에서는 가로, 세로 길이 6[m], 4.5[m]의 직사각형 환경을 이용하였고, 실제 실험에서는 공간의 제한을 두어 가로, 세로 길이 1[m], 1[m]의 정사각형으로 환경을 구성하였다. 다소 제한적인 장애물을 구성하여 일반화에는 부족한 부분이 있겠지만, 코너에서 정지한 상태에서의 맵 생성과 로봇이 이동하면서 생성하는 맵의 변화를 확인함으로써 보간법을 이용한 초음파 센서의 측정 데이터 보정에는 실질적인 효과가 있었다.

벽으로 구성된 장애물에서는 장애물과의 거리가 0.06[m]를 기점으로 더 가까워지는 경우에 뉴턴 보간법의 효과가 높게 나타났고, 장애물과의 거리가 멀어질수록 보간법의 효과는 낮게 나타났다. 코너부분에서는 뉴턴 보간법에 의한 개선 효과가 충분히 나타났던 시뮬레이션 및 실험 결과였다. 물론 장애물이 없거나 다소 먼 거리에 위치한 경우에는 보간법을 적용하지 않는 것이 더 좋은 결과를 보여주었다. 이는 장애물이 코너나 벽으로 되어 있는 경우 초음파 센서만으로 생성된 맵의 신뢰성이 높다는 것을 시사하고 있다. 또한 장애물이 거의 없는 경우에는 보간법을 적용하지 않는 것이 좋은 결과를 도출할 수 있지만, 장애물이 많거나 복잡한 환경에서는 보간법에 의한 맵의 신뢰성을 높일 수 있다고 판단된다. 전체적인 결과를 비추어볼 때, 모양이 복잡하거나 코너의 형태를 가질 경우에는 선형 보간법보다는 뉴턴 보간법을 적용하는 것이 맵 생성에 훨씬 효과적이라는 결론을 내릴 수 있다.

참고문헌

- Kim, G. S., "Perception of small-obstacle using ultrasonic sensors for a mobile robot," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 97-100, 2004.
- Lee, S. J., Lim, J. H. and Cho, D. W., "Effective Recognition of Environment Using Sonar Ring Data for Localization of a Mobile Robot," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1-2, 2008.
- Lim, M. S., Lim, J. H., Oh, S. R. and Yun, I. S., "Implementation of Hybrid System Controller for High-Speed Indoor Navigation of Mobile Robot System Using the Ultra-Sonic Sensors," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 7, No. 9, pp. 774-782, 2001.
- Ko, J., Stewart, B., Fox, D., Konolige, K. and Limketkai, B., "A Practical, Decision-theoretic Approach to Multi-robot Mapping and Exploration," Intelligent Robots and Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 3232-3238, 2003.
- Yi, S. Y. and Jin, J. H., "Self-localization of a Mobile Robot Using Global Ultrasonic Sensor System," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 145-151, 2003.
- Jeon, H. S., Woo, S. H., Lee, H. E., Ryu, I. S., Yoon, S. K. and Park, H. J., "A Study on Algorithm for Efficient Location Tracking in Indoor Environment," Journal of Information Technology Applications & Management, Vol. 13, No. 3, pp. 59-73, 2006.
- Hwang, B. H. and Yi, S. Y., "Autonomous Navigation of Mobile Robot Using Global Ultrasonic System," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 529-536, 2004.
- Kim, S. Y., Lee, J. M., Lee, D. H. and Lee, M. H., "Unmanned Navigation of Vehicle Using the Ultrasonic Satellite System," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 875-882, 2007.
- Coraluppi, S., "Multistatic sonar localization", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 964-974, 2006.
- Lee, P. J., "A Study on Elements Recognition Using Ultrasonic Sensors," Electric Engineering, M.S These, Kwangwoon University, 2003.
- Lyu, J. G., "The Map Building based on Ultrasonic Sensors for a mobile robot," Mechanical and Intelligent Systems Engineering, M.S These, Pusan National University, 2004.
- Bandera, A., Urdiales, C. and Sandoval, F.,

“Autonomous global localisation using markov chains and optimised sonar landmarks,” IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, pp. 288-293, 2000.

13. Lee, G. B., “Mathematical analysis,” Park-moon Sa, pp. 199-253, 2003.

14. Choi, H. J., “Mathematical analysis 2005,” A-jin Press, pp. 499-509, 2005.