

잘못된 초음파 센서 데이터를 여과하기 위한 음압 비교법

Comparison of Sound Pressure for Detecting Incorrect Sonar Measurements

이 경 민, 정 완 균*

(Kyoungmin Lee and Wan Kyun Chung)

Abstract : In this paper, we address the problem of detecting incorrect sonar measurements. We use ideas from the inconsistency of information among sonar measurements together with the sound pressure of the wave from the sonar sensor to develop a new method, called the comparison of the sound pressure (CSP), to detect incorrect sonar readings. The inconsistency of information in cells can be a clue that indicates candidates for incorrect measurements, and the sound pressure of the wave from the sonar sensor determines incorrect readings among the candidates. From various experiments, the proposed method is confirmed that it is better than existing method at deciding the state of sonar measurements.

Keywords : conflict cell, incorrect measurement, sonar sensor, sound pressure

I. 서론

모바일 로봇 응용 분야에서는 다양한 거리 측정 센서가 사용된다(레이저 센서, 카메라 센서, 초음파 센서 등). 레이저 센서는 정확도 면에서 장점을 갖지만, 유리로 된 물체를 투과하고, 먼지와 같은 물질에 의해 산란되어 잘못된 거리 값을 도출한다[1]. 또한 카메라 센서는 조도에 민감하다[2]. 하지만, Beamwidth 내에서 가장 가까운 장애물까지의 거리를 도출하도록 고안된 초음파 센서는 투과, 산란, 조도에 대한 민감함과 같은 단점으로부터 자유롭다. 더불어 초음파 센서의 가격은 레이저 센서 보다 훨씬 저렴하기 때문에 실내 환경에서의 서비스 로봇 분야에 널리 사용되고 있다.

위와 같은 장점에도 불구하고 초음파 센서는 빈번하게 장애물까지의 거리를 도출하는데 실패한다. 그 이유중에 하나는 오반사(false reflection)이다(그림 1). 오반사는 초음파 센서로부터 발사된 음파가 잘못된 방향으로 반사되는 경우에 발생하며, 센서에 잘못된 음파가 도달하거나 혹은 아무 음파도 도달하지 않게 된다.

본 논문에서는 잘못된 거리값을 도출하는 센서 데이터를 찾아내는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 음압 비교법이라 명명한다. 기본적으로 센서 데이터들 간의 모순된 정보를 근간으로 잘못된 데이터의 후보군을 수립한다. 수립된 후보군 내에서 초음파 센서로부터 발사된 음파의 압력(이하, 음압)을 비교하여 잘못된 데이터를 선별한다. 실험을 통하여, 음압 비교법이 지금까지 제안되었던 초음파 센서

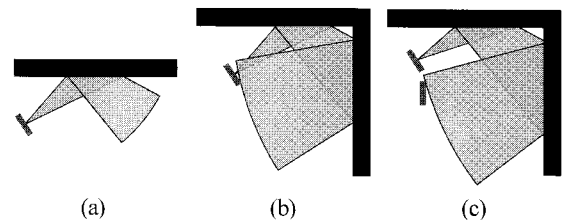


그림 1. 오반사의 예: (a) 전반사는 초음파 센서로부터 발사된 음파의 전부가 센서로 되돌아오지 않는 경우이다[3]. (b) Multi-pass echo는 음파가 복수의 물체에 부딪힌 후에 센서로 되돌아오는 경우이다[4]. (c) Cross-talk는 음파가 다른 센서로 되돌아가는 경우이다[5].

Fig. 1. Examples of false reflection. (a) Specular reflection occurs when the emitted wave does not return to the sensor [3]. (b) A multi-pass echo occurs when the wave returns after striking multiple obstacles [4]. (c) Cross-talk occurs when the wave returns to a different sensor [5].

데이터 여과 방법들 중에서 가장 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

II 장에서는 잘못된 초음파 센서 데이터를 선별하는 방법과 관련된 연구를 소개하며, III 장에서는 잘못된 센서 데이터의 후보군을 수립함에 있어서, 실마리가 되는 상충 격자를 설명한다. 상충 격자가 발생하는 경우에 음압을 비교하여 잘못된 데이터를 선별하는 음압 비교법을 IV 장에서 설명한다. V 장에서는 제안된 방법을 사용한 실험 결과를 소개하며, VI 장에서 결론으로 마무리한다.

II. 관련 연구

잘못된 초음파 센서 데이터를 선별하기 위한 기존의 연구는 그 특성에 따라 크게 3가지 그룹으로 분류할 수 있다. 첫 번째 그룹은 선이나 점과 같은 기본적인 기하학적 구

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 8. 23., 채택확정 : 2008. 11. 18.

이경민, 정완균 : 포항공과대학교 기계공학과

(lekomin@postech.ac.kr/wkchung@postech.ac.kr)

* 본 논문은 한국 보건 복지부의 한국건강 21 연구 개발과제 (A020603), 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소, 교육과학기술부와 한국과학재단의 도약 연구 지원 프로그램에서 지원하여 연구하였음.

성요소를 사용한다. RCD (Region of Constant Depth) matching 방법[6]은 원의 반지름을 사용하여, 선과 점을 형성하는 데이터들을 구분한다. 구분된 데이터는 올바른 데이터로 간주하게 된다. 이 방법은 불룩한 코너나 평면을 찾아내는데 많이 사용된다. FP (Feature Prediction) 방법[7]은 각 데이터의 올바른 정도를 정량화한다. 정량화 기준은 가상의 장애물의 위치와 방향이 된다.

두 번째 그룹은 데이터의 최대 거리를 조절하는 방법이다. NVD (Navigable Voronoi Diagram) 방법[9]는 초음파 센서 데이터와 로봇의 위치를 사용하여 voronoi diagram을 생성한다. 이 diagram을 생성할 때, 사용되지 않은 데이터를 잘못된 센서 데이터로 간주한다. BB (Bounding Box) 방법[8]은 로봇의 전·후·좌·우 데이터를 사용하여 사각형을 생성한다. 이 사각형 밖으로 벗어나는 데이터의 거리값을 사각형 내부까지 줄여서 사용한다.

세 번째 그룹은 센서 데이터들이 갖는 정보의 모순을 사용한다. spAC (Sonar probabilistic Analysis of Conflicts) 방법[10]은 상충 격자가 발생하는 경우를 바탕으로, 각 데이터의 올바른 정도를 확률적으로 결정한다. CE (Conflict Evaluation) 방법[11]은 상충 격자가 발생하는 경우에 잘못된 센서 데이터를 논리 과정을 통해 추정한다.

III. 정보의 모순

기본적으로 하나의 초음파 센서 데이터는 2가지 영역으로 나눌 수 있다. 점유(occupied) 영역, 비점유(empty). 점유 영역은 거리 정보의 끝부분에 해당하며, 장애물이 존재할 것으로 예상되는 영역이다. 비점유 영역은 beamwidth내에서 점유 영역을 제외한 모든 영역이며, 장애물이 없을 것으로 예상되는 영역이다. 두 영역은 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 그림 2에서 하나의 초음파 센서 데이터의 전체 영역은 적색 실선으로 표현하였다. 이산화 공간(discretized field)에

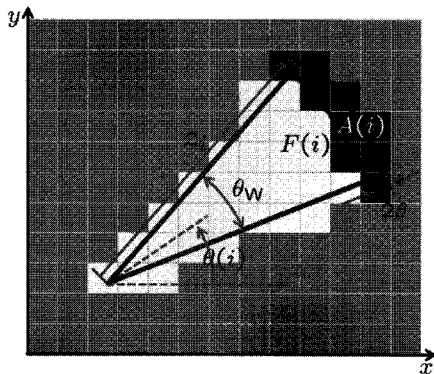


그림 2. 초음파 센서 데이터(i)의 영역: $\theta(i)$ -센서의 방향, θ_w -beamwidth, z_i -거리값, $F(i)$ -비점유 영역, $A(i)$ -점유 영역, 2β -거리값의 불확실성에 대한 범위.

Fig. 2. Region of sonar reading i where $\theta(i)$ is the direction of the reading, θ_w is the beam-width, z_i is the range, $F(i)$ is the free region (white cells), $A(i)$ is the arc region (black cells), and 2β is the interval corresponding to range uncertainty.

서 비점유 영역($F(i)$)은 백색 격자로, 점유 영역($A(i)$)은 흑색 격자로 표현하였다.

복수의 센서 데이터가 겹쳐지는 경우에는 정보의 모순이 발생한다. 이 모순에 따라 격자는 2가지 종류로 구분 지을 수 있다. 일관 격자(C_c), 모순 격자(I_c). 센서 데이터의 i 의 점유 영역에 존재하는 모순 격자($I_c(i)$)는 식 (1)과 같이 정의하며, 센서 데이터 i 의 점유 영역($A(i)$)과 다른 데이터들의 비점유 영역($F(k)$)이 교차하는 영역을 나타낸다.

$$I_c(i) = \bigcup_{k=S(i)} (A(i) \cap F(k)) \tag{1}$$

식 (1)에서 $S(i)$ 는 센서 데이터 i 의 점유 영역과 비점유 영역을 공유하는 센서 데이터들의 인덱스이며, 다음과 같이 정의 한다.

$$S(i) = \{k | A(i) \cap F(k) \neq \emptyset \text{ for } 1 \leq k \leq n(k \neq i)\} \tag{2}$$

식 (2)에서 n 은 총 센서 데이터의 개수를 나타낸다. 모순 격자와 달리, 일관 격자는 오직 하나의 일관된 정보만을 포함하는 격자를 말한다.

모순 격자는 또 다시 2개의 그룹으로 나눌 수 있다. 불확실 격자(U_c)와 상충 격자(F_c). 하나의 센서 데이터를 기준으로, 일부 점유 격자가 모순 격자일 경우에 그 모순 격자는 불확실 격자(그림 3(a))가 되며, 모든 점유 격자가 모순 격자가 되는 경우는 상충 격자(그림 3(b))가 된다. 각각의 정의는 식 (3), (4)와 같다.

$$U_c(i) = \{I_c(i) \text{ for } A(i) \neq I_c(i)\} \tag{3}$$

$$F_c(i) = \{I_c(i) \text{ for } A(i) = I_c(i)\} \tag{4}$$

결과적으로, 모든 격자는 일관 격자(C_c), 불확실 격자(U_c), 상충 격자(F_c) 중의 하나에 속하게 된다. 이는 그림 4와 같이 요약할 수 있다.

일관 격자(C_c)와 불확실 격자(U_c)는 올바른 혹은 잘못된 센서 데이터에 의해서 발생한다. 여기서 잘못된 센서 데이터는, 점유 영역에 장애물이 없거나 비점유 영역에 장애물

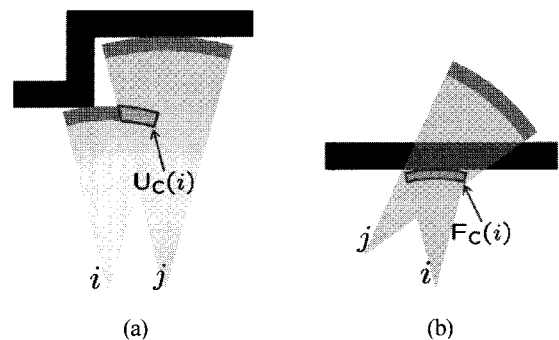


그림 3. 모순 격자: (a) 불확실 격자($U_c(i)$), (b) 상충 격자($F_c(i)$).

Fig. 3. Different types of inconsistent cell: (a) Uncertain cells $U_c(i)$. (b) Conflict cells $F_c(i)$

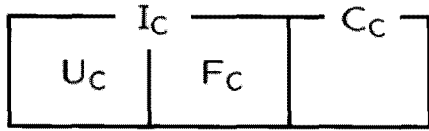


그림 4. 모든 격자는 위의 그룹중의 하나에 속한다.

Fig. 4. A cell is in one of above groups.

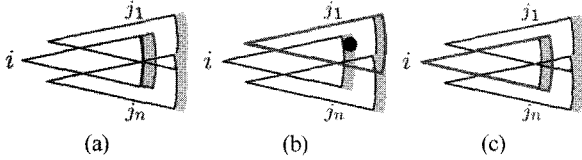


그림 5. (a) 상충 격자의 예, (b) 상충 격자내에 장애물이 존재하는 것으로 가정하게 되면, 센서 데이터 j_1 은 잘못된 센서 데이터가 된다, (c) 상충 격자내에 장애물이 존재하지 않는 것으로 가정하면, 센서 데이터 i 는 잘못된 센서 데이터가 된다.

Fig. 5. (a) Conflict cells. (b) If we assume that an obstacle is located in the conflict cells, some sonar readings among $j_1 \dots j_n$ will be incorrect. (c) Sonar reading i will be incorrect if we assume that there are no obstacles in the conflict cell area.

이 존재하는 데이터를 말한다. 하지만, 상충 격자(F_c)는 항상 잘못된 센서 데이터에 의해서만 발생한다. 이는 다음의 정리에 의하여 확인할 수 있다.

정리 1: 상충 격자(F_c)는 항상 잘못된 데이터에 의해서만 발생한다.

증명: 그림 5(a)와 같이 상충 격자가 발생하는 경우를 가정한다. 일반성을 위하여, 센서 데이터 i 와 복수의 센서 데이터 $j_1 \dots j_n$ 에 의하여 상충 격자가 발생하였다고 가정한다. 즉, $\# [S(i)] \geq 1$ 이다. 그림 5(b)와 같이, 상충 격자가 발생한 영역에 장애물이 존재한다고 가정하면, 센서 데이터 $j_1 \dots j_n$ 중에서 잘못된 센서 데이터가 존재하게 된다. 그림 5(b)의 경우에는 센서 데이터 j_1 이 비점유 영역에 장애물을 포함하게 되므로, 잘못된 센서 데이터가 된다. 반대로, 그림 5(c)와 같이, 상충 격자가 존재하는 영역에 장애물이 없다고 가정하면, 센서 데이터 i 는 점유 영역에 장애물이 존재하지 않기 때문에, 잘못된 센서 데이터가 된다. 결국 상충 격자는 항상 잘못된 센서 데이터에 의하여 발생한다. ■

정리 1은 상충 격자의 근원은 항상 잘못된 센서 데이터임을 나타낸다. 따라서 상충 격자 발생할 때, 잘못된 센서 데이터의 후보군을 수립할 수 있게 된다. 그림 5(a)의 경우에는 i, j_1, j_n 이 된다.

IV. 음압 비교법

상충 격자로부터 도출된 잘못된 센서 데이터의 후보군에서 잘못된 센서 데이터를 선별하기 위하여, 초음파 센서로부터 발사된 음파의 압력(sound pressure)을 사용한다.

1. 음압(sound pressure)

초음파 센서로부터 발사된 음파의 압력은 $SP_T(r, \theta)$ 로 표기한다. 여기서 r 은 센서에서 장애물까지의 거리를 나타내며, θ 는 센서의 방향으로부터 장애물까지의 각도를 나타낸다. $\theta = 0$ 일 때, $SP_T(r, 0)$ 은 다음과 같이 근사화 된다.

$$SP_T(r, 0) = 2\rho c U \left| \sin \left\{ \frac{1}{2} kr \left[\sqrt{1 + (a/r)^2} - 1 \right] \right\} \right| \quad (5)$$

$$\approx \frac{1}{2} \frac{\rho c U a^2 k}{r} \quad (6)$$

$$= \frac{c_1}{r} \quad (7)$$

위의 수식에서 ρ 는 공기의 밀도, c 는 공기중에서 음파의 속도, U 는 초음파 센서 내부의 원형 피스톤의 진동속도, k 는 wave number, a 는 원형 피스톤의 반지름이다. 식 (5)는 초음파 센서를 평판의 원형 피스톤으로 모델링하면 확보된다[3,12]. Far-field approximation ($r/a \gg 1$) [6]에 의하여 식 (6)을 확보할 수 있으며, 상수항을 처리하여 식 (7)을 확보할 수 있다. 결국, $\theta = 0$ 일 때, 음파는 거리에 반비례하게 된다.

$\theta \neq 0$ 때는 transmitting directivity(D_T) [3]을 고려해야 하며, 이는 다음과 같이 정의 된다.

$$D_T(\theta) = 20 \log \left(\frac{SP_T(r, \theta)}{SP_T(r, 0)} \right) \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터, $\theta \neq 0$ 때의 음압은 다음과 같이 표현된다.

$$SP_T(r, \theta) = SP_T(r, 0) 10^{\frac{D_T(\theta)}{20}} \quad (9)$$

음파가 센서로부터 (r, θ) 에 위치한 장애물에 부딪혀 되돌아오면, 최종적으로 $2r$ 을 이동하게 되므로, 초음파 센서에서 인식하기 직전의 음파는 $SP_R(r, \theta)$ 로 표기하며, 다음과 같이 정의 된다.

$$SP_R(r, \theta) = SP_T(2r, 0) 10^{\frac{D_T(\theta)}{20}} \quad (10)$$

여기서 장애물에 부딪히는 순간에 발생하는 음압의 감소를 고려해야만 한다. 이 감소는 반사 계수(reflection coefficient)에 비례하며, 반사 계수는 장애물의 재질에 따라서 고정되는 상수값이다[12]. 이를 c_2 로 설정하면, 식 (10)은 다음과 같이 정리된다.

$$SP_R(r, \theta) = c_2 SP_T(r, 0) 10^{\frac{D_T(\theta)}{20}} \quad (11)$$

되돌아온 음파도 역시 $\theta \neq 0$ 이므로, 최종적으로 센서에서 인식되는 음파를 계산하기 위해서는 receiving directivity (D_R)[3]을 고려해야 하며, 최종적으로 센서에서 인식하게 되는 음압은 다음과 같이 정리된다.

$$SP_R(r, \theta) = c_2 SP_T(r, 0) 10^{\frac{D_T(\theta)}{20}} 10^{\frac{D_R(\theta)}{20}} \quad (12)$$

$$= \frac{c_3}{r} 10^{\frac{D_T(\theta) + D_R(\theta)}{20}} \quad (13)$$

식 (13)에서 c_3 는 미지의 상수항이지만, 최종적으로 상대적인 음압을 비교할 때는 서로 상쇄되어 소거된다. 따라서, 최종적으로 센서에서 인식하는 음압을 알기 위해서는 $D_T(\theta)$ 와 $D_R(\theta)$ 가 필요하다.

본 논문에서는 저가의 MA40B8 센서[13]의 directivity를 고찰할 것이다.

MA40B8은 독립적인 transmitter와 receiver를 갖는다. 각각의 directivity는 그림 6(a)와 6(c)에 나타내었다. Half power beamwidth가 약 45° 이므로, 이 영역에서의 directivity를 2차 함수로 근사화하면, 그림 6(b)와 6(d)가 된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} D_T(\theta) &\approx -0.0103\theta^2 + 0.0053|\theta| \\ D_R(\theta) &\approx -0.0102\theta^2 + 0.0241|\theta| \end{aligned} \right\} \text{for } |\theta| \leq 22.5^\circ \quad (14)$$

식 (14)를 식 (13)에 대입하면, 최종적으로 다음과 같은 음압 공식을 확보할 수 있다.

$$SP_R(r, \theta) = \frac{c_3}{r} 10^{(-0.001025\theta^2 + 0.00147|\theta|)} \quad (15)$$

식 (15)를 그림으로 나타내면, 그림 7과 같다. 결과적으로 식 (15)는 센서로부터 (r, θ) 에 장애물이 위치할 때, 초

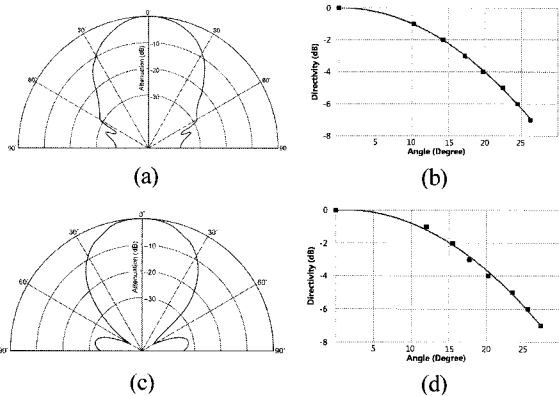


그림 6. (a) MA40B8 Transmitter의 directivity, (b) Beamwidth 내에서의 근사화 된 directivity, (c) MA40B8 Receiver의 directivity, (d) Beamwidth 내에서의 근사화 된 directivity. (b)와 (d)에서 검정색 점은 (a)와 (c)에서 각각 샘플링하여 확보된 데이터이며, 붉은색 선은 샘플링된 점들을 2차 함수로 근사화한 것이다.

Fig. 6. (a) MA40B8 transmitter directivity. (b) Approximate transmitter directivity in the region of interest. (c) MA50B8 receiver directivity. (d) Approximate receiver directivity in the region of interest. In (b) and (d), black squares were obtained from sampling the curves in (a) and (c), respectively. The red lines in (b) and (d) indicate the approximated 2nd-order polynomials.

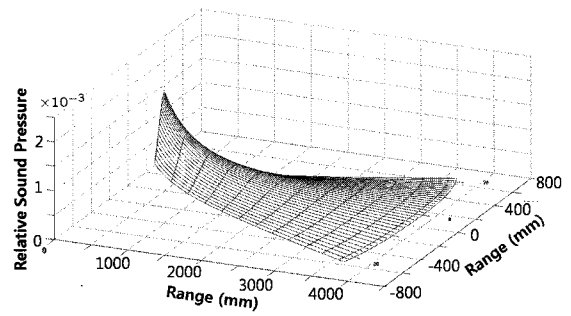


그림 7. MA40B8의 음압. 식 (15)에서 $c_3 = 1$ 로 설정하였기 때문에, 이 음압은 절대값이 아니다. 하지만, 음압을 비교할 때 c_3 는 상쇄될 것이다.

Fig. 7. Sound pressure of MA50B8 Transducer. These sound pressures are not absolute values as the unknown constants are set to 1. However, this is not important as the constant will be canceled when comparing sound pressure levels.

음과 센서가 인식하게 되는 음압의 크기를 나타낸다. 식 (15)를 유도할 때, 초음파 센서의 동작 주파수 f 를 40 KHz로 고정하였다. 만약 다른 주파수로 초음파 센서를 동작시키는 경우에는 directivity가 변하게 되며, 식 (14)와 (15)를 그에 맞게 수정해야 한다.

2. 음압 비교

그림 8(a)는 일반적인 벽을 따라 이동하면서 수집된 실제 초음파 센서 데이터들 가운데서 상충 격자를 발생시키는 예이다. 센서 데이터 j_1 와 j_2 는 오반사에 의하여 잘못된 거리값을 나타내고 있으며, 센서 데이터 i 는 정확하게 벽까지의 거리값을 나타내고 있다. 이 센서 데이터들(i, j_1, j_2)은 그림 8(b)와 같이 7개의 상충 격자를 발생시키고 있기 때문에, 정리 1에 의거하여 잘못된 센서 데이터가 반드시 포함

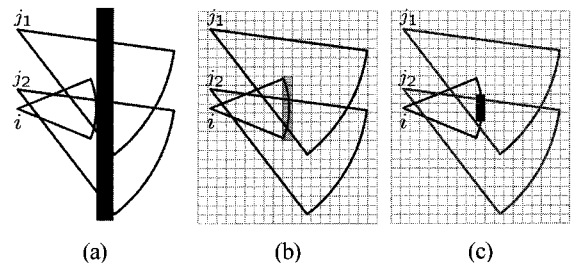


그림 8. 상충 격자: (a)는 3개의 센서 데이터의 예를 나타낸다. 이들은 (b)와 같이 7개의 상충 격자가 일으킨다. 7개의 상충 격자 각각에 대하여 음압을 비교하게 되면, (c)와 같이 3개의 격자(검정색 격자)에만 장애물이 존재할 수 있는 것으로 판별된다. 따라서 센서 데이터 j_1 와 j_2 는 비점유 영역에 장애물을 포함하게 되므로, 잘못된 센서 데이터가 된다.

Fig. 8. Conflict cells. (a) The case of three sonar measurements that cause seven conflict cells as shown in (b). After comparison of the sound pressure, it is concluded that only three cells, indicated as the black box in (c), can contain an obstacle. Thus, j_1 and j_2 are incorrect.

되어 있다. 잘못된 센서 데이터를 선별해내기 위하여 다음과 같은 음압 비교를 수행하게 된다.

그림 8(b)에서, 센서 데이터 i 는 상층 격자내에 장애물이 존재한다고 나타내며, 센서 데이터 j_1 과 j_2 는 장애물이 존재하지 않는다고 나타내고 있다. 간략하게 전자(i)를 ‘긍정 데이터’라고 명명하며, 후자(j_1, j_2)를 ‘부정 데이터’라고 명명한다. 상층 격자내에 장애물이 있다고 가정한 상황에서 긍정 데이터로 계산된 음압을 SP_P 라고 하며, 부정 데이터로부터 계산된 음압을 SP_N 이라 한다. SP_P 와 SP_N 을 비교하면, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- $SP_P \geq SP_N$: 장애물이 존재한다고 가정하면, 긍정 데이터에 의한 음압이 부정 데이터에 음압 보다 높기 때문에 부정 데이터는 장애물을 놓칠 수 있다. 따라서 보수적인 관점에서 장애물이 존재한다는 가정은 타당하다.
- $SP_P < SP_N$: 장애물이 존재한다고 가정하더라도, 부정 데이터의 음압이 긍정 데이터에 의한 음압 보다 높기 때문에, 부정 데이터는 장애물을 놓칠 수 없다. 따라서 장애물이 존재한다는 가정은 타당하지 않다.

음압을 비교할 때 식 (15)에서 장애물의 종류에 관계하는 변수인 c_3 는 서로 상쇄되게 된다. 이는 하나의 격자에 하나의 동일한 장애물을 가정함으로써 가능하다. 따라서 절대적인 음압의 크기는 알 수 없지만 상대적인 크기 비교는 가능하게 된다.

그림 8(b)의 7개의 상층 격자에 대하여 앞서 언급한 음압 비교를 수행하게 되면, 그림 8(c)에 표현된 바와 같이 3개의 격자에만 장애물이 존재할 수 있다는 결론에 이르게 된다. 이 3개의 격자에 장애물이 존재할 수 있기 때문에, 센서 데이터 j_1 과 j_2 는 비점유 영역에 장애물을 포함하게 된다. 따라서 서론에서 언급한 오반사와 같은 이유로 비점유 영역에 위치한 장애물을 놓친 잘못된 센서 데이터로 결론지어 진다.

위의 과정을 요약하면 다음과 같다. 상층 격자가 발생할 때, 음압 비교를 통하여 상층 격자내의 장애물 존재여부를 추정할 수 있게 된다. 추정된 존재여부를 통해 잘못된 센서 데이터를 선별 할 수 있게 된다.

V. 실험 결과

1. 실험 준비

제안된 음압 비교법의 성능을 검증하기 위하여, 다양한 실내 환경에서 초음파 센서 데이터를 수집하였다. 초음파 센서의 배치는 그림 9와 같으며, 7개의 서로 다른 실험환경은 C#1~2, H#1~5로 표기한다. C#1~2는 복도 환경이며, H#1~5는 일반적인 가정환경으로서 가정에 포함되는 테이블, 의자, 쇼파, 가전 제품들이 비치되어 있다.

초음파 센서의 샘플링 주기는 4Hz로 설정하였고, 로봇의 주행속도는 150mm/s, 회전속도는 25°/s로 설정하였다. 초음파 센서의 최대 거리값은 4m로 설정하였다. 본 논문에서 로봇의 위치 인식 문제는 다루지 않기 때문에, 데이터를 수집하는 동안 로봇의 위치는 EKF (Extended Kalman

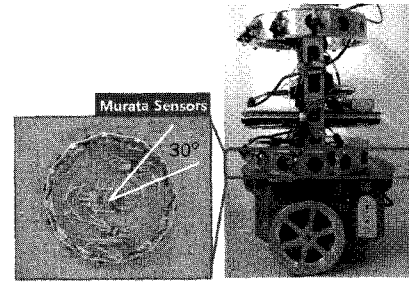


그림 9. 실험에 사용된 12개의 MA40B8 초음파 센서의 배치.

Fig. 9. Configuration of the sonar sensors used in the experiments.

Filter)를 사용하는 SLAM 방법[14]으로부터 확보하였다는 사실만을 언급한다.

2. 실험 결과

II 장에서는, 잘못된 초음파 센서 데이터를 제거하는 기존의 연구를 3가지 그룹으로 나누었다. 본 논문에서 제안된 음압 비교법 (CSP : Comparison of Sound Pressure)과의 성능을 비교하기 위하여, 각 그룹에서 대표적인 방법을 선택하였다 : RCD[6], NVD[9], spAC[10].

각 방법들의 성능을 비교하기 위하여, 모든 초음파 센서 데이터의 실제 타당성 여부가 필요하다. 이를 위하여, 정확한 레이저 센서와 환경의 청사진으로부터 기준 지도를 작성하였다. 레이저 센서가 종종 장애물을 놓치는 경우가 발생하기 때문에, 청사진을 사용하여 부족한 부분을 보충하였다(그림 10).

작성된 기준 지도를 바탕으로, 수집된 초음파 센서 데이터 각각의 타당성 여부를 확인하였다. 초음파 센서 데이터의 beamwidth 내에서 가장 가까운 장애물(N_i)까지의 거리($d(N_i)$)와 센서가 도출한 거리값(z_i)의 차이가 정해진 기준값 이내일 때, 그 센서 데이터는 올바르다고 결정한다. 기준값을 벗어난 경우에 해당 센서 데이터는 올바르지 않은 것으로 결정한다.

요약하면, $|z_i - d(N_i)| \leq 150mm$ 일 경우만, 올바른 센서 데이터로 간주된다. 기준값은 초음파 센서 데이터가 도출하는 거리값 자체의 오차범위($\pm 10mm$ [13])와 로봇 위치 추정에서 발생하는 오차를 고려하여 설정하였다.

모든 센서 데이터의 실제 타당성을 결정한 후에, 각 방법들의 성능을 비교하였다. 비교는 올바르게 판별한 비율 (CDR : Correct Decision Ratio)을 통해 이루어졌다. CDR은 다음과 같이 정의 된다.

$$CDR = \frac{\text{올바르게 판별한 모든 데이터의 개수}}{\text{전체 데이터의 개수}} \times 100 \quad (16)$$

RCD, NVD, spAC와 음압 비교법의 CDR의 값은 그림 11과 같이 정리되었다. 그림 11에서 보는 바와 같이, 음압 비교법은 센서 데이터의 상태를 결정함에 있어서 가장 좋은 성능(88%)을 보였다. 반면에 RCD는 52%, NVD는 75%, spAC는 77%의 성능을 보였다.

음압 비교법을 제외하고, spAC 방법도 상대적으로 좋은 성능을 보여주고 있다. spAC 방법과 음압 비교법이 상층 격자를 근간으로 하고 있다는 점에 비춰볼 때, 상층 격자를

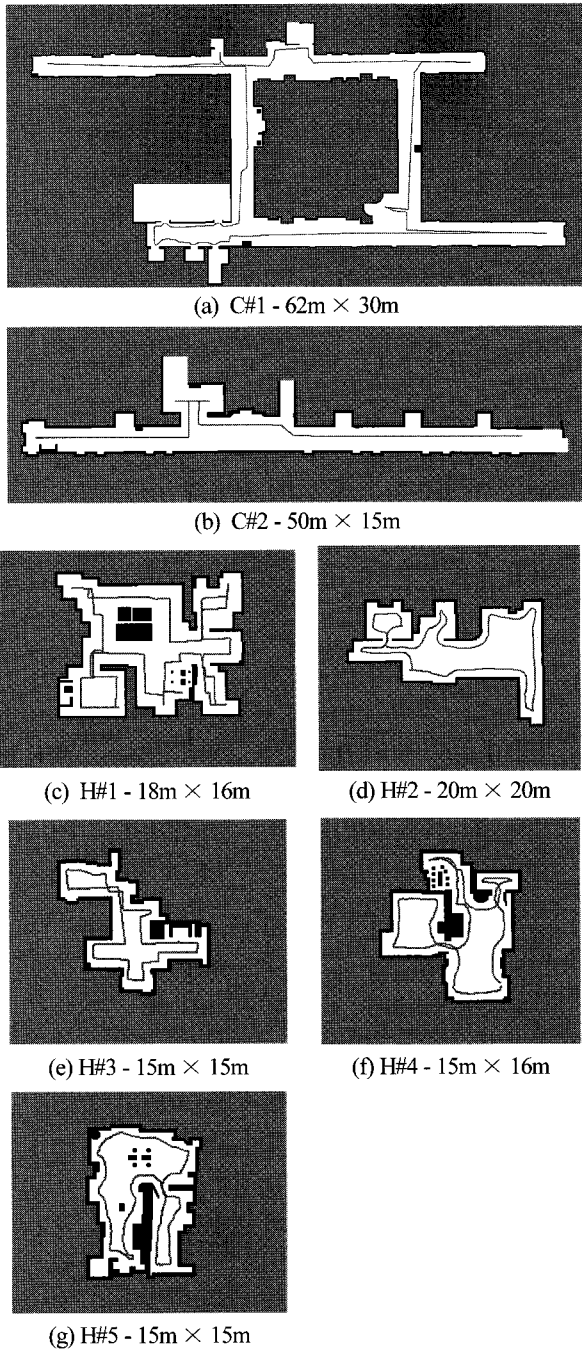


그림 10. 7개의 환경에 대한 기준 지도 (붉은색 선은 데이터를 수집하는 동안의 로봇 이동 경로를 나타낸다).
 Fig. 10. Reference Maps (The red line indicates the trajectory of the robot).

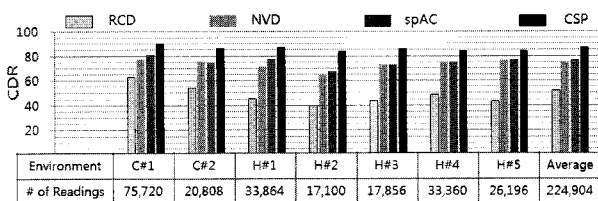


그림 11. 서로 다른 방법들에 의한 CDR 값의 비교.
 Fig. 11. Correct decision ratio (CDR) for the different approaches.

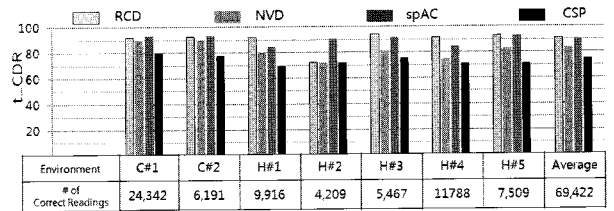


그림 12. 서로 다른 방법들에 의한 t_CDR 값의 비교.
 Fig. 12. t_CDR for the different approaches.

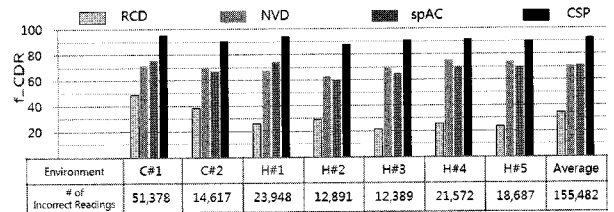


그림 13. 서로 다른 방법들에 의한 f_CDR 값의 비교.
 Fig. 13. f_CDR for the different approaches.

통한 잘못된 센서 데이터의 선별이 좋은 접근 방법임을 확인할 수 있다.

보다 세부적인 각 방법들의 특성을 비교하기 위하여, t-CDR과 f-CDR을 정의하고 그 값들을 비교한다.

$$t_CDR = \frac{\text{올바르게 판별한 True 데이터의 개수}}{\text{전체 True 데이터의 개수}} \times 100 \quad (17)$$

$$f_CDR = \frac{\text{올바르게 판별한 False 데이터의 개수}}{\text{전체 False 데이터의 개수}} \times 100 \quad (18)$$

식 (17)에서 t_CDR은 올바른 전체 데이터 중에서 올바르게 판단된 데이터의 비율을 나타내며, f_CDR은 잘못된 전체 데이터 중에서 잘못되었다고 올바르게 판단한 데이터의 비율을 나타낸다.

그림 12에서 보여주는 t_CDR은, 평균적으로 RCD (91%) > spAC (90%) > NVD (83%) > 음압 비교법 (75%)의 성능을 보였다. 즉, 본 논문에서 제안한 음압 비교법이 올바른 센서 데이터를 구분해내는데 가장 저조한 성능을 보이고 있다. 하지만, 그림 13에서 보여주는 f_CDR은, 평균적으로 음압 비교법 (93%) > spAC (71%) > NVD (71%) > RCD (34%)의 순서로 성능의 우위를 나타내고 있다.

결과적으로 음압 비교법은 잘못된 센서 데이터를 선별함에 있어서 상대적으로 우수한 성능을 보이는 장점을 갖지만, 올바른 센서 데이터를 선별하는 성능은 상대적으로 저조하다는 단점을 갖는다.

하지만 음압 비교법은 다른 방법들이 갖는 단점으로부터 자유롭다. RCD는 데이터 수집 구간이나 기하학적 구성요소를 취사선택하기 위한 임계값(threshold)을 상황에 따라 조절해 주어야하며, NVD는 초음파 센서가 원형으로 배치되지 않았을 때 사용할 수 없다[9]. spAC는 점진적으로 수행할 수 없고 전체 데이터를 수집한 후에 후처리 과정에서

잘못된 데이터를 찾아낼 수 있다[10]. 따라서 센서 데이터의 타당성을 선별하는 성능과 앞서 언급한 단점들을 고려할 때, 음압 비교법은 잘못된 초음파 센서 데이터를 선별하는 좋은 대안이라 생각된다.

VI. 결론

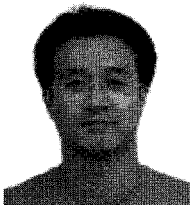
본 논문에서는 잘못된 초음파 센서 데이터를 선별하기 위하여 음압 비교법 (CSP : Comparison of Sound Pressure)을 제안하였다. 제안된 방법은 상층 격자를 기본으로, 잘못된 센서 데이터의 후보군을 수립한다. 수립된 후보군들 중에서, 음압의 비교를 통하여 잘못된 데이터를 선별한다. 다양한 7개의 실내 환경 실험을 통하여, 제안된 방법이 기존에 제안된 다른 방법들과 비교하여 보다 우월한 성능을 도출함을 확인하였다. 음압 비교법은 간결하면서도 효과적이기 때문에, 초음파를 사용하는 다른 응용분야(위치 인식, 장애물 회피 등)에서 사용되어 질 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] D. Silver, D. Morales, L. Rekleitis, B. Lisien, and H. Choset, "Arc Carving : Obtaining Accurate, Low Latency Maps from Ultrasonic Range Sensors," *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1554-1561, 2004.
- [2] M. Hebert, "Active and Passive Range Sensing for Robotic," *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 102-110, 2000.
- [3] B. Siciliano, O. Khatib et al., *Handbook of Robotics*, Springer, 2008.
- [4] P. J. McKerrow and S. min Zhu. "Modelling multiple reflection paths in ultrasonic sensing," *In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 284-291, 1996.
- [5] D. Bank and T. Kampke, "High-Resolution Ultrasonic Environment Imaging," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 2, pp. 370-381, 2007.
- [6] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [7] S. O'Sullivan, J. J. Collins, M. Mansfield, D. Haskett, and M. Eaton, "Linear feature prediction for confidence estimation of sonar readings in map building," *In Proceedings of the International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB)*, Japan, 2004.
- [8] E. Ivanjko, I. Petrovic, and K. Macek, "Improvements of occupancy grid maps by sonar data corrections," *In Proceedings of FIRA Robot Soccer World Congress*, Vienna, Austria, 2003.
- [9] K. Lee and W. K. Chung, "Navigable voronoi diagram : a local path planner for mobile robots using sonar sensors," *In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2813-2818, 2007.
- [10] A. Burguera, Y. Gonzalez and G. Oliver, "Probabilistic sonar filtering in scan matching localization," *In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp 4158-4163.
- [11] K. Lee, I. H. Suh, S. Oh, and W. K. Chung, "Conflict Evaluation Method for Grid Maps using Sonar Sensors," *In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2908-2914, 2008
- [12] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, (Wiley, New York), 2000.
- [13] MURATA Manufacturing Co. Ltd. <http://www.murata.com/sensor/index.html>
- [14] S. H. Ahn, J. W. Choi, N. L. Doh, and W. K. Chung, "A Practical Approach for EKF-SLAM in an Indoor Environment: Fusing Ultrasonic Sensors and Stereo Camera," *Autonomous Robots*, vol. 24, no.3, pp. 315-335, 2008.

이 경 민

2003년 포항공대 기계공학과 졸업.
2005년 동 대학원 석사. 2005년~현재
동 대학원 박사 과정 재학중. 관심분야는 이동 로봇의 주행 및 지도 작성 등.



정 완 균



1981년 서울대학교 기계설계학과 졸업.
1983년 한국과학기술원 기계공학(석사).
1987년 한국과학기술원 생산공학(박사).
1987년~현재 포항공대 기계공학과 교수.
2008년 4월~현재 IEEE TR. On Robotics Editor.
관심분야는 이동로봇의 지능형 이동기술, 수중 로봇의 설계 및 제어, 여유자 유도 로봇의 제어, 기계 시스템의 강인 제어 등.