

# 고분해능 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계

## Optimal Design of Overlapped Ultrasonic Sensor Ring for High Resolution Obstacle Detection

김성복\*, 김현빈  
(Sungbok Kim<sup>1</sup> and Hyunbin Kim<sup>1</sup>)  
<sup>1</sup>Hankuk University of Foreign Studies

**Abstract:** This paper presents the optimal design of an overlapped ultrasonic sensor ring for high resolution obstacle detection of an autonomous mobile robot. It is assumed that a set of low directivity ultrasonic sensors of the same type are arranged along a circle of nonzero radius at a regular spacing with their beams overlapped. First, taking into account the dead angle region, the entire range of obstacle detection is determined with reference to the center of an overlapped ultrasonic sensor ring. Second, the optimal design index of an overlapped ultrasonic sensor ring is defined as the area closeness of three sensing subzones resulting from beam overlap. Third, the lower and upper bounds on the number of ultrasonic sensors are derived, which can guarantee minimal beam overlap and also avoid excessive beam overlap among adjacent ultrasonic sensors. Fourth, employing a commercial low directivity ultrasonic sensor, an optimal design example of an overlapped ultrasonic sensor ring is given along with the ultrasonic sensor ring prototype mounted on top of a mobile robot. Finally, some experimental results using our prototype ultrasonic sensor ring are given to demonstrate the validity and performance of an optimally overlapped ultrasonic sensor ring for high resolution obstacle detection.

**Keywords:** ultrasonic sensor ring, obstacle detection, positional uncertainty, beam overlapping, optimal design

### I. 서론

자율 주행 이동로봇의 환경 지도 작성 및 장애물 탐지/회피를 위해서 주로 사용되는 센서 종류로는 카메라, 적외선 센서, 레이저 스캐너와 함께 초음파 센서를 들 수 있다 [1,2]. 이동로봇에 장착되는 초음파 센서는 통상 직접파 방식 보다는 반사 방식으로 동작하게 되며, 송신부에서 발사된 초음파가 장애물에 의해 반사되어 수신부에 의해 검출되기까지의 경과 시간을 측정하여 감지된 장애물까지의 거리를 산출한다. 그림 1에 보인 것과 같이, 초음파 센서는 빔 폭 내에 존재하는 장애물까지의 거리를 측정할 수 있으나, 반면 장애물의 정확한 위치는 모르는 상태로 남게 되며 이를 초음파 센서의 위치 불확실성이라 부른다[3-6].

초음파 센서는 다른 종류의 센서에 비해 데이터 처리를 위한 연산 간편성, 주변 조명에 대한 비민감성, 가격 대비 성능의 우수성 등의 장점을 지니고 있으나, 반면 장애물 탐지에 따른 위치 불확실성은 초음파 센서의 근본적인 한계로 지목되어 왔다. 위치 불확실성 문제 완화를 위해 대부분 상당히 많은 개수의 빔 폭이 협소한 고지향성 초음파 센서를 사용하여 왔으나[3-12], 이 경우 센서 장치 비용뿐 아니라 데이터 처리 비용이 증가하게 되는 문제에 직면하게 된

다. 이에 상대적으로 적은 개수의 저지향성 초음파 센서를 사용하되, 인접 초음파 센서간의 빔 폭 중첩을 활용하여 위치 불확실성을 감소시키는 방안이 제시되었다[13,14].

그림 2에 보인 것과 같이 3개의 인접 초음파 센서 ( $L_i, OR_i, i = N, 1, 2$ )를 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치하면, 중앙 초음파 센서의 빔 폭은 3개의 감지 소영역으로 나뉠 수 있게 된다. 그림 2(a)에서와 같이 굵은 점으로 표시된 장애물 P가 중앙 소영역에 위치하는 경우, 중앙 초음파 센서는 장애물을 감지하나 좌우측초음파 센서들은 감지하지 못한다. 반면, 장애물의 위치가 그림 2(b)와 같은 경우, 중앙 및 우측 초음파 센서와 달리 좌측 초음파 센서는 장애물을 감지하지 못하게 된다. 즉, 장애물의 위치에 따라 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합이 달라지므로, 역으로 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합으로부터 장애물이 속하는 영역을 세분화할 수 있으며 결과적으로 초음파 센서

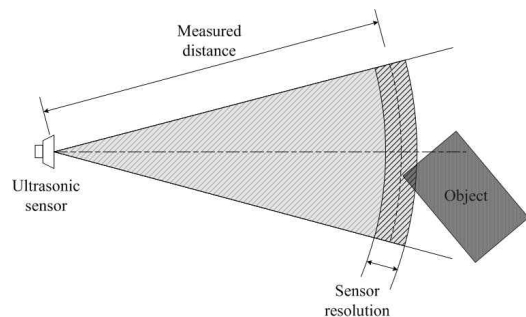


그림 1. 초음파 센서의 위치 불확실성.

Fig. 1. The positional uncertainty of an ultrasonic sensor.

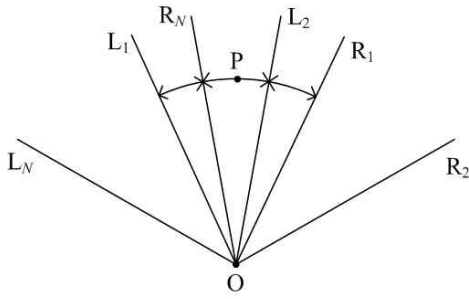
\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 15., 수정: 2010. 12. 5., 채택확정: 2010. 12. 20.

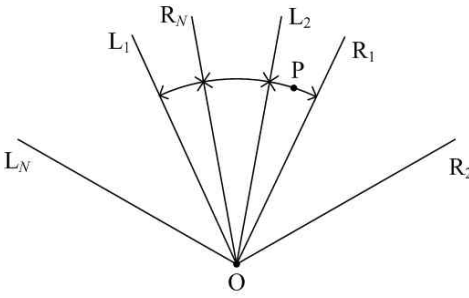
김성복, 김현빈: 한국외국어대학교 디지털정보공학과

(sbkim@hufs.ac.kr/rlagusqls@gmail.com)

※ 본 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(KRF-2007-521-D00163)과 2010학년도 한국외국어대학교 교내 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.



(a) The obstacle in the center sensing subzone.



(b) The obstacle in the right sensing subzone.

그림 2. 빔 폭 중첩으로 인한 위치 불확실성 감소.

Fig. 2. The reduction in positional uncertainty due to beam overlap.

고유의 위치 불확실성을 감소시킬 수 있게 된다[13,14]. 그림 2에서 보듯이 최적 설계된 중첩 초음파 센서 링은 단일 초음파 센서에 비해 장애물 탐지에 있어 최대 3배 높은 분해능을 보일 수 있다.

본 논문에서는 인접 초음파 센서간 효과적인 빔 폭 중첩을 통해 고분해능 장애물 탐지를 위한 초음파 센서 링의 최적 설계 방법에 대해 논의하고자 한다. 일군의 동일 유형의 초음파 센서가 원주 상에 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치되어 있다고 한다. II 장에서는 장애물 탐지 사각 지대를 고려하여 중첩 초음파 센서 링의 중심을 기준으로 한 장애물 감지 범위를 결정한다. III 장에서는 빔 폭 중첩의 결과인 3개 감지 소영역간의 넓이의 유사 정도를 중첩 초음파 센서 최적 설계 지수를 정의한다. IV 장에서는 최소한의 빔 폭 중첩 보장과 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위해 요구되는 초음파 센서 사용 개수에 대한 제한 조건을 유도한다. V 장에서는 상용 저지향성 초음파 센서를 사용하여 중첩 초음파 센서 링 최적 설계 사례를 자체 제작된 프로토타입과 함께 보인다. VI 장에서는 자체 제작된 중첩 초음파 센서 링을 이용한 실험을 통해 제안된 중첩 초음파 센서의 효용성을 입증한다. 마지막으로, VII 장에서는 결론을 내린다.

II. 장애물 감지 범위

그림 3은 반경이  $r$ 인 원주 상에  $N$ 개의 동종 초음파 센서가 일정 간격  $\beta (= \frac{360^\circ}{N})$ 로 배치된 중첩 초음파 센서 링 가운데 3개의 인접 초음파 센서를 보이고 있다. 초음파 센서의 빔 폭을  $\alpha$ 라 하고, 최대 감지 거리를  $\rho_{s,max}$ 라 하면,

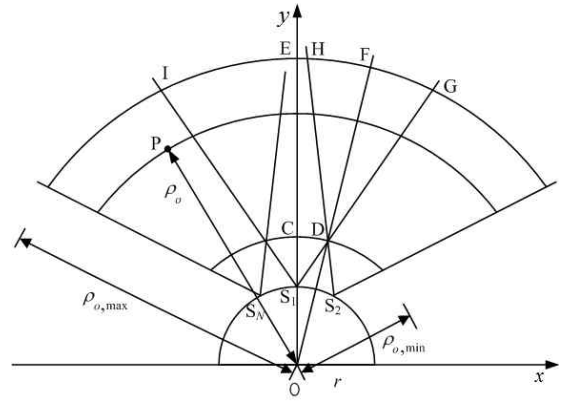


그림 3. 빔 폭이 중첩된 3개의 인접 초음파 센서.

Fig. 3. Three adjacent overlapped ultrasonic sensors.

그림 3에서  $\overline{OS_1} = r$ ,  $\angle CS_1D = \frac{\alpha}{2}$ , 그리고  $\angle S_1OD = \frac{\beta}{2}$ 가 된다.

실제 초음파 센서는 일정 크기를 가지므로 중첩 초음파 센서 링은 영이 아닌 유한 반경을 갖게 되며( $r > 0$ ), 그 결과 그림 3에 보인 것과 같이 초음파 센서에 의한 장애물 탐지가 불가능한 지역이 생기게 된다. 소위 장애물 탐지 사각 구역은 인접 초음파 센서의 빔 경계선들과 중첩 초음파 센서 링의 원호에 의해 구획되게 된다. 예를 들어, 초음파 센서  $S_1$  과  $S_2$  사이의 장애물 탐지 사각 구역은 점  $S_1$ , 점  $S_2$ , 그리고 점  $D$ 에 의해 정의될 수 있다. 그림 3초음파부터, 점  $S_1$ 과  $S_2$ 의 좌표는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{OS_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix}, \overline{OS_2} = \begin{bmatrix} r \times \sin \beta \\ r \times \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

다음, 점  $D$ 의 좌표를 구하여 보자. 그림 3의 부분 확대도인 그림 4에서,  $\triangle OS_1D$ 에 사인 법칙을 적용하면

$$\frac{\overline{OD}}{\sin(\angle OS_1D)} = \frac{\overline{OS_1}}{\sin(\angle OS_1D)} \quad (2)$$

즉

$$\frac{d}{\sin(\pi - \frac{\alpha}{2})} = \frac{r}{\sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2})} \quad (3)$$

여기서,  $\overline{OD} = d$ ,  $\angle OS_1D = \pi - \frac{\alpha}{2}$ , 그리고  $\angle OS_1D = \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}$ 이다. (3)으로부터,

$$d = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2})} \times r \quad (4)$$

로 구해지므로, 점  $D$ 의 좌표는

$$\overline{OD} = \begin{bmatrix} d \times \sin \frac{\beta}{2} \\ d \times \cos \frac{\beta}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

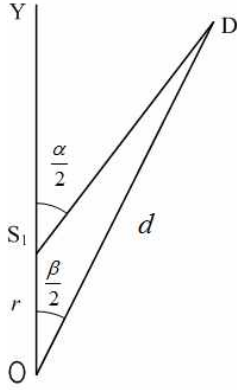


그림 4. 그림 3의 부분 확대도(I).

Fig. 4. The partial enlargement(I) of Fig. 3.

장애물 탐지 사각 구역을 감안하면, 그림 3에서 중첩 초음파 센서 링의 장애물 감지 범위는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\rho_{o,\min} \leq \rho_o \leq \rho_{o,\max} \quad (6)$$

여기서

$$\rho_{o,\min} = \overline{OD} = d \quad (7)$$

$$\rho_{o,\max} = \overline{OE} = r + \rho_{s,\max} \quad (8)$$

(7)의  $\rho_{o,\min}$ 는 중첩 초음파 센서 링의 중심으로부터 장애물 탐지 사각 구역의 꼭짓점까지의 거리이고, (8)의  $\rho_{o,\max}$ 는 초음파 센서의 최대 감지 거리  $\rho_{s,\max}$ 에 상응하는 중첩 초음파 센서 링의 중심을 기준으로 한 장애물 거리이다.

### III. 최적 설계 지수

본 논문에서는 동종의 초음파 센서들을 유한 반경의 원 주 상에 일정 간격으로 배치하는 기준으로서 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 고려한다. 구체적으로, 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계를 위해 빔 폭 중첩의 결과인 중앙과 측면의 감지 소영역의 넓이가 서로 같아지도록 한다. 여기서, 감지 소영역의 넓이를 구하는 것은 해당 지역의 평균 빔 폭을 고려하는 것에 상응하며, 또한, 3개 감지 소영역의 넓이가 같아지도록 하는 것은 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 최소화하는 노력에 상응한다.

먼저, 그림 3에서 점 G의 좌표를 구하여 보자. 그림 5(a)는 그림 3에서 해당 부분의 확대도로서

$$\overline{OG} = g = \rho_{o,\max} \quad (9)$$

$$\angle S_1OG = \gamma \quad (10)$$

그림 5(a)에서,  $\triangle S_1OG$ 에 사인 법칙을 적용하면

$$\frac{\rho_{o,\max}}{\sin(\pi - \frac{\alpha}{2})} = \frac{r}{\sin(\frac{\alpha}{2} - \gamma)} \quad (11)$$

(9)와 (10)을 (11)에 대입한 후, 삼각함수 차의 공식을 적용하고 그 결과를 정리하면,

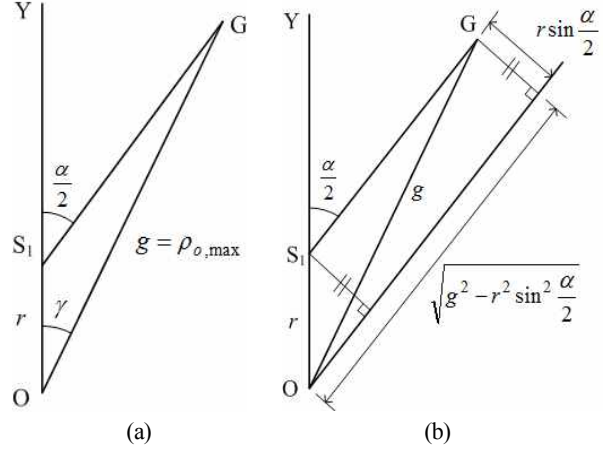


그림 5. 그림 3의 부분 확대도 (II).

Fig. 5. The partial enlargement(II) of Fig. 3.

$$A \times \cos \gamma - B \times \sin \gamma = R \quad (12)$$

여기서

$$A = \rho_{o,\max} \times \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$B = \rho_{o,\max} \times \cos \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

$$R = r \times \sin \frac{\alpha}{2}$$

(12)를 풀면,

$$\gamma = \text{atan2}(A, B) - \text{atan2}(R, \sqrt{\rho_{o,\max}^2 - R^2}) \quad (14)$$

즉

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} - \text{atan2}\left(r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,\max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}\right) \quad (15)$$

그림 5(b)는 기하학적으로 (15)의 해가 바르게 구해졌음을 보인다. (15)에 의해  $\gamma$ 가 정해지면, 점 G의 좌표는

$$\overrightarrow{OG} = \begin{bmatrix} \rho_{o,\max} \times \sin \gamma \\ \rho_{o,\max} \times \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (16)$$

다음, 점 G의 y축에 대한 대칭점을 점 I라 하면, 점 H의 좌표는 다음으로부터 구할 수 있다.

$$\overrightarrow{OH} = \begin{bmatrix} \cos(-\beta) & -\sin(-\beta) \\ \sin(-\beta) & \cos(-\beta) \end{bmatrix} \times \overrightarrow{OI} \quad (17)$$

여기서

$$\overrightarrow{OI} = \begin{bmatrix} -\rho_{o,\max} \times \sin \gamma \\ \rho_{o,\max} \times \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (18)$$

(17)은  $\overrightarrow{OH}$ 가  $\overrightarrow{OI}$ 를 시계 방향으로  $\beta$ 만큼 회전시킨 벡터임을 나타낸다. 다음, 그림 3에서,  $\triangle EOH$ 으로부터,

$$\cos(\angle EOH) = \frac{\overrightarrow{OE} \cdot \overrightarrow{OH}}{OE \times OH} \quad (19)$$

여기서

$$\vec{OE} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_{o,\max} \end{bmatrix} \quad (20)$$

(19)으로부터,  $\angle EOH$ 가 구해지면,

$$\angle HOF = \angle EOF - \angle EOH = \frac{\beta}{2} - \angle EOH \quad (21)$$

여기서  $\angle EOF = \frac{\beta}{2}$ 이다.

이제까지의 결과들을 이용하면, 초음파 센서의 중앙과 우측 감지 소영역의 면적을 표현해 보기로 하자. 먼저, 점 D, 점 H, 그리고, 점 F로 정의되는 구역의 면적은

$$S(\text{DHF}) = S(\text{OHF}) - S(\text{OHD}) \quad (22)$$

여기서

$$S(\text{OHF}) = \frac{1}{2} \rho_{o,\max}^2 \times \angle \text{HOF} \quad (23)$$

$$S(\text{OHD}) = \frac{1}{2} \rho_{o,\min} \times \rho_{o,\max} \times \sin(\angle \text{HOF}) \quad (24)$$

로서 각각 원뿔 OHF와 삼각형 OHD의 면적을 나타낸다. 한편, 점 C, 점 E, 점 F, 그리고 점 D로 정의되는 구역의 면적은

$$\begin{aligned} S(\text{CEFD}) &= \frac{1}{2} (\rho_{o,\max}^2 - \rho_{o,\min}^2) \times \angle \text{EOF} \\ &= \frac{1}{2} (\rho_{o,\max}^2 - \rho_{o,\min}^2) \times \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서,  $\frac{1}{2} \rho_{o,\max}^2 \times \frac{\beta}{2}$ 와  $\frac{1}{2} \rho_{o,\min}^2 \times \frac{\beta}{2}$ 는 원뿔 OEF와 원뿔 OCD의 면적을 나타낸다.

(25)로 주어진  $S(\text{CEFD})$ 는 중앙과 우측 감지 소영역의 면적 합계의 절반을 나타내고, (22)로 주어진  $S(\text{DHF})$ 는 우측 감지 소영역의 면적의 절반을 나타낸다. 최종적으로, 실제 중첩 초음파 센서 링의 설계를 위한 최적화 지수를 다음과 같이 정의한다.

$$\kappa = \left| \frac{S(\text{CEFD})}{S(\text{DHF})} - 2.0 \right| \quad (26)$$

중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 최소화시키기 위해서는 가능한  $S(\text{CEFD})$ 가  $S(\text{DHF})$ 의 2배에 근접해야 하므로, 최적 설계를 위해서는 (26)으로 주어지는 최적화 지수  $\kappa$ 가 최소화 되도록 하여야 한다.

#### IV. 초음파 센서 사용 개수 제한

일군의 동종 초음파 센서를 이용하여 중첩 초음파 센서 링을 설계하는데 있어, 인접 초음파 센서간 효율적인 빔 폭 중첩을 위해서는 초음파 센서의 사용 개수  $N$ 이 적정 범위로 제한되어야 하며, 그 제한 범위는 주어진 중첩 초음파 센서 링의 반경  $r$ 에 따라 달라지게 된다.

그림 6은 빔 폭이  $\alpha = 50^\circ$ 인 동종 초음파 센서  $N$  개를 동일한 반경의 원주 상에 배치된 예를 보이고 있다. 그림 6(a)와 6(b)의 비교에서 보듯, 인접 초음파 센서간의 최소한의 빔 폭 중첩을 보장하기 위해서는 초음파 센서 사용 개

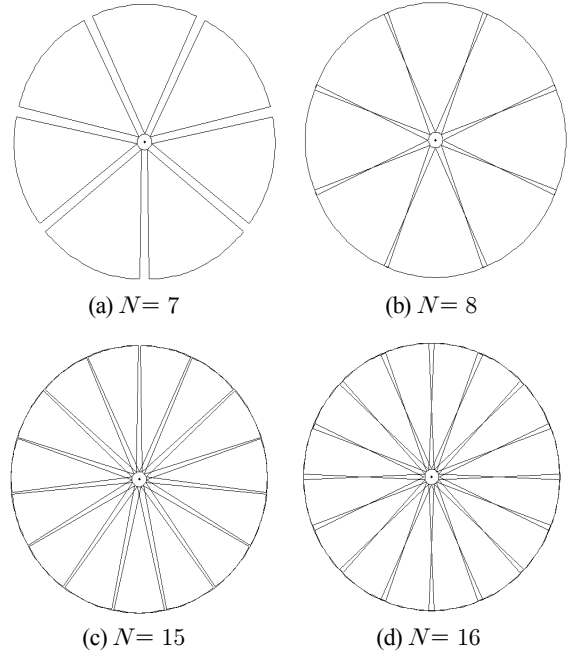


그림 6.  $N$ 개 초음파 센서의 원형 배치 예.

Fig. 6. The circular arrangements of  $N$  ultrasonic sensors.

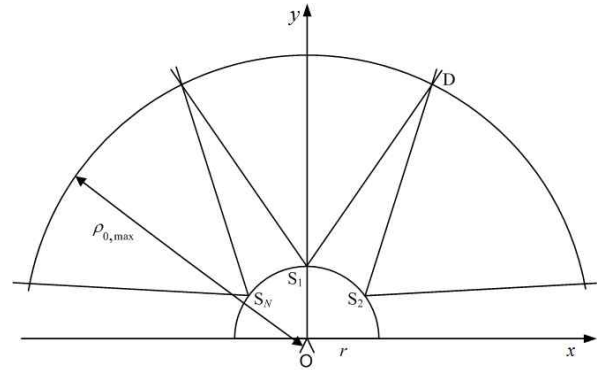


그림 7. 최소한의 빔 폭 중첩 보장을 위한 초음파 센서의 최소 사용 개수.

Fig. 7. The minimum number of ultrasonic sensors to guarantee minimal beam overlap.

수가 최소값  $N_{\min}$  이상이어야 하며, 이 경우  $N_{\min} = 8$ 임을 알 수 있다. 반면, 그림 6(c)와 6(d)의 비교에서 보듯, 인접 초음파 센서간의 과도한 빔 폭 중첩을 회피하기 위해서는 초음파 센서 사용 개수가 최댓값  $N_{\max}$  이하이어야 하며, 이 경우  $N_{\max} = 15$ 임을 알 수 있다. 결과적으로, 효율적인 빔 폭 중첩을 위해서는 초음파 센서 사용 개수  $N$ 의 범위가 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \quad (27)$$

그림 7은 최소한의 빔 폭 중첩이 보장되도록 초음파 센서 사용 개수가 최솟값  $N_{\min}$ 인 상황을 도시하고 있다. 만약 초음파 센서 사용 개수  $N$ 이 그 최솟값인  $N_{\min}$ 보다 적으면, 즉  $N < N_{\min}$ 이면,

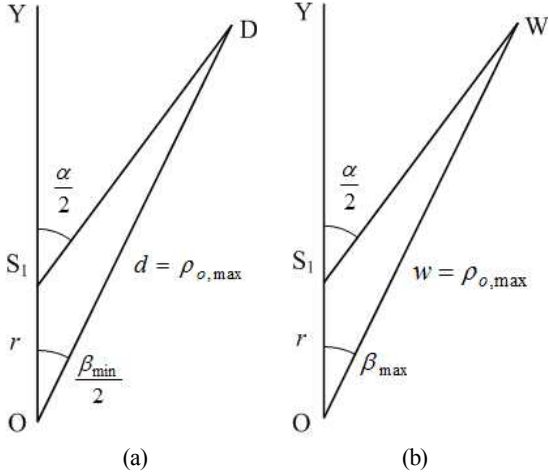


그림 8. 그림 3의 부분 확대도 (III).  
Fig. 8. The partial enlargement(III) of Fig. 3.

$$\overline{OD} > \rho_{o,max} \quad (28)$$

이 되게 되고, 그 결과 연속 배열된 2개 초음파 센서, 예컨대, 초음파 센서  $S_1$ 과  $S_2$ 간에 빔 폭 중첩이 발생하지 않게 된다.

그림 8(a)는 그림 7의 부분 확대도로서

$$\overline{OD} = d = \rho_{o,max} \quad (29)$$

$$\angle S_1OD = \frac{\beta_{min}}{2} \quad (30)$$

여기서  $\beta_{min}$ 은 초음파 센서 최소 개수  $N_{min}$ 에 상응하는 중첩 초음파 센서 링의 사이각을 나타낸다. 앞에서와 동일한 방법으로,

$$\frac{\beta_{min}}{2} = \frac{\alpha}{2} - \text{atan2}\left(r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}\right) \quad (31)$$

즉

$$\beta_{min} = \alpha - 2 \times \text{atan2}\left(r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}\right) \quad (32)$$

일단 (32)에 의해  $\beta_{min}$ 이 정해지면, 최소 빔 폭 중첩 보장을 위해 허용되는 초음파 센서의 최소 개수  $N_{min}$ 은 다음으로 얻어진다.

$$N_{min} = \lceil \frac{360^\circ}{\beta_{min}} \rceil \quad (33)$$

여기서,  $\lceil \cdot \rceil$ 는 올림 연산자를 나타낸다. (33)으로 주어지는  $N_{min}$ 은 실수인  $\frac{360^\circ}{\beta_{min}}$ 보다 크거나 같은 정수 가운데 가장 작은 값이다.

다음, 그림 9는 과도한 빔 폭 중첩이 회피되도록 초음파 센서 사용 개수가 최댓값  $N_{max}$ 인 상황을 도시하고 있다. 만약 초음파 센서 사용 개수  $N$ 이 그 최댓값인  $N_{max}$ 보다

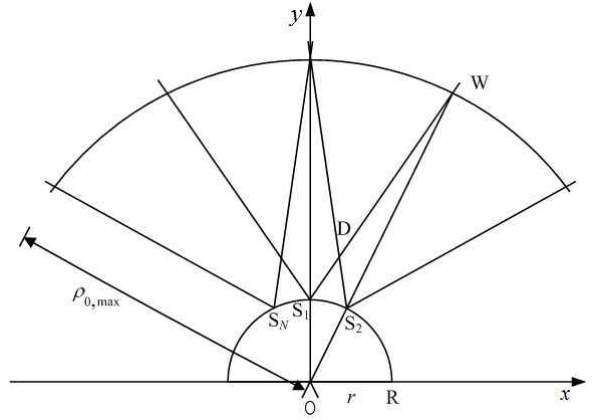


그림 9. 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위한 초음파 센서의 최대 사용 개수.  
Fig. 9. The maximum number of ultrasonic sensors to avoid excessive beam overlapping.

크게 되면, 즉  $N > N_{max}$ 이면,

$$\overline{OW} < \rho_{o,max} \quad (34)$$

이 되게 되고, 그 결과 비연속적으로 배열된 초음파 센서, 예컨대, 초음파 센서  $S_N$ 과  $S_2$ 간에 빔 폭 중첩이 발생하게 된다.

그림 8(b)는 그림 9의 부분 확대도로서

$$\overline{OW} = w = \rho_{o,max} \quad (35)$$

$$\angle S_1OW = \beta_{max} \quad (36)$$

여기서  $\beta_{max}$ 은 초음파 센서 최대 개수  $N_{max}$ 에 상응하는 중첩 초음파 센서 링의 사이각을 나타낸다. 앞에서와 동일한 방법으로,

$$\beta_{max} = \frac{\alpha}{2} - \text{atan2}\left(r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}\right) \quad (37)$$

(37)에 의해  $\beta_{max}$ 가 정해지면, 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위해 허용되는 초음파 센서의 최대 개수  $N_{max}$ 는 다음으로 얻어진다.

$$N_{max} = \lfloor \frac{360^\circ}{\beta_{max}} \rfloor \quad (38)$$

여기서,  $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 내림 연산자를 나타낸다. (38)로 주어지는  $N_{max}$ 는 실수인  $\frac{360^\circ}{\beta_{max}}$ 보다 작거나 같은 정수 가운데 가장 큰 값이다.

전술한 바와 같이 효과적인 빔 폭 중첩을 위해서는 허용되는 초음파 센서 사용 개수의 범위가 (33)과 (38)에 의해 각각 주어지는 최솟값  $N_{min}$ 와 최댓값  $N_{max}$  이내로 제한되어야 한다. 특정 초음파 센서가 지정되면 빔 폭  $\alpha$ 와 최대 감지 거리  $\rho_{s,max}$ 가 정해지므로, 상한과 하한인  $N_{max}$ 와  $N_{min}$  모두 중첩 초음파 센서 링의 반경  $r$ 의 함수가 됨에 주목하여야 한다.

### V. 최적 설계 사례

대표적인 저지향성 상용 초음파 센서인 Murata사의 MA40B8을 대상으로[15], 효과적인 빔 폭 중첩을 위해 사용 가능한 초음파 센서의 최소 개수  $N_{\min}$ 과 최대 개수  $N_{\max}$ 를 산출하여 보기로 하자. 표 1은 MA40B8의 주요 파라미터로서 빔 폭  $\alpha$ 와 최대 감지 거리  $\rho_{s,\max}$ 의 사양을 보인다. 표 1에서, 초음파 센서가 반사 방식으로 동작하므로 최대 감지 거리 300cm는 왕복 거리 기준 600cm에 해당한다.

먼저, 중첩 초음파 센서 링의 반경이  $r=19\text{cm}$ 로 주어졌다고 하고, 효과적인 빔 폭 중첩을 위해 요구되는 초음파 센서 사용 개수  $N$ 에 대한 제한 조건을 살펴보도록 한다. 먼저, (8)로부터, 중첩 초음파 센서 링 중심 기준 최대 장애물 감지 거리는

$$\rho_{o,\max} = r + \rho_{s,\max} = 19 + 300 = 319 \text{ cm} \quad (39)$$

이 된다. (32)로부터, 중첩 초음파 센서 링의 사이각을 구하면

$$\begin{aligned} \beta_{\min} &= \alpha - 2 \times \text{atan2} \left( r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,\max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \\ &= 50^\circ - 2 \times 1.4424^\circ \\ &= 47.1152^\circ \end{aligned} \quad (40)$$

따라서, (33)으로부터, 사용 가능한 초음파 센서 최소 개수는 다음으로 얻어진다.

$$N_{\min} = \lceil \frac{360^\circ}{\beta_{\min}} \rceil = \lceil 7.6408 \rceil = 8 \quad (41)$$

한편, (37)로부터, 중첩 초음파 센서 링의 사이각은

$$\begin{aligned} \beta_{\max} &= \frac{\alpha}{2} - \text{atan2} \left( r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,\max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \\ &= \frac{50^\circ}{2} - 1.4424^\circ \\ &= 23.5576^\circ \end{aligned} \quad (42)$$

로 구해지고, (38)로부터, 사용 가능한 초음파 센서 최대 개수는 다음으로 얻어진다.

$$N_{\max} = \lfloor \frac{360^\circ}{\beta_{\max}} \rfloor = \lfloor 15.2817 \rfloor = 15 \quad (43)$$

(41)과 (43)의 결과를 이용하면, (27)에 의거, 효과적인 빔 폭 중첩을 위해 허용되는 초음파 센서의 사용 개수의 범위는 다음과 같이 얻어진다.

$$8 \leq N \leq 15 \quad (44)$$

(44)로 주어진 초음파 센서 사용 개수 범위는 중첩 초음파 센서 링의 반경  $r=19\text{cm}$ 인 경우에 해당됨을 유의해야 한다.

표 1. MA40B8의 주요 파라미터 사양.

Table 1. The key parameter specifications of MA40B8.

파라미터	사양
빔 폭	$\alpha = 50^\circ$
최대 감지 거리	$\rho_{s,\max} = 300 \text{ cm}$

다음, 중첩 초음파 센서 링의 반경이 최소  $r=10\text{cm}$ 로부터 최대  $r=110\text{cm}$ 까지 변화한다고 하고 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 초음파 센서의 사용 개수에 대한 제한을 반복적으로 산출하여 보았다. 그림 10은 최소 개수  $N_{\min}$ 에 상응하는 (32)의 사이각  $\beta_{\min}$ 의 변화와 최대 개수  $N_{\max}$ 에 상응하는 (37)의 사이각  $\beta_{\max}$ 의 변화를 보인다. 그림 10에서 보듯이 반경  $r$ 이 증가함에 따라 사이각  $\beta_{\min}$ 과  $\beta_{\max}$  모두 감소되는 추세이나,  $\beta_{\min}$ 의 감소율이  $\beta_{\max}$ 의 감소율 보다 큼을 알 수 있다. 그림 11은 실수인  $\frac{360^\circ}{\beta_{\min}}$ 의 값과 함께 정수인 최소 개수  $N_{\min}$ 의 변화를 보이며, 또한 실수인  $\frac{360^\circ}{\beta_{\max}}$ 의 값과 함께 정수인 최대 개수  $N_{\max}$ 의 변화를 보인다. 그림 11에서 보듯이 반경  $r$ 의 증가에 따라  $N_{\min}$ 과  $N_{\max}$  모두 증가되는 추세임을 알 수 있다. 허용되는 초음파 센서 사용 개수 범위의 크기  $\Delta N (= N_{\max} - N_{\min})$ 이 반경  $r$ 의 증가에 따라 증가 추세를 알 수 있는데, 이는 그림 10에서의  $\beta_{\min}$ 과  $\beta_{\max}$ 간의 감소율 차이와 부합되는 결과라

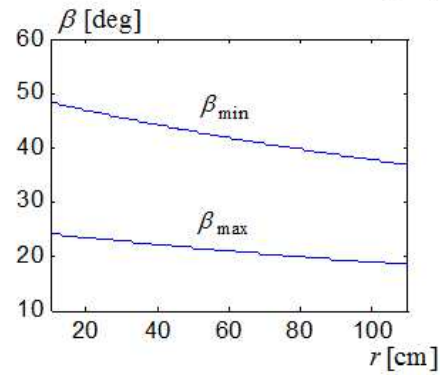


그림 10. 반경  $r$ 에 따른 사이각  $\beta_{\min}$ 과  $\beta_{\max}$ 의 변화.

Fig. 10. The changes of the spacings  $\beta_{\min}$  and  $\beta_{\max}$  depending on the radius  $r$ .

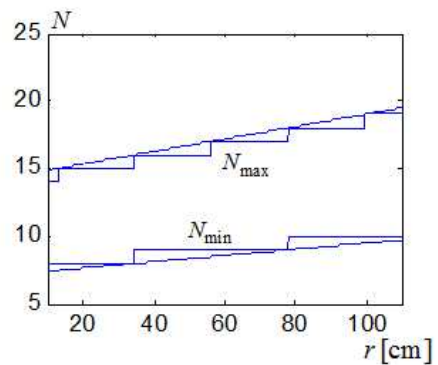


그림 11. 반경  $r$ 에 따른 초음파 센서의 최소 사용 개수  $N_{\min}$ 과 최대 사용 개수  $N_{\max}$ 의 변화.

Fig. 11. The changes of the minimum and maximum numbers,  $N_{\min}$  and  $N_{\max}$ , of ultrasonic sensors, depending on the radius  $r$ .

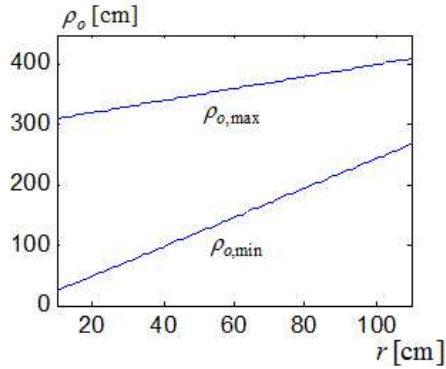


그림 12. 반경  $r$ 에 따른 장애물 감지 최소 거리  $\rho_{o,min}$  와 최대 거리  $\rho_{o,max}$ 의 변화.

Fig. 12. The changes of the minimum and maximum obstacle distances,  $\rho_{o,min}$  and  $\rho_{o,max}$ , depending on the radius  $r$ .

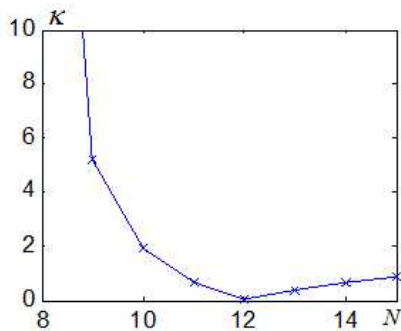


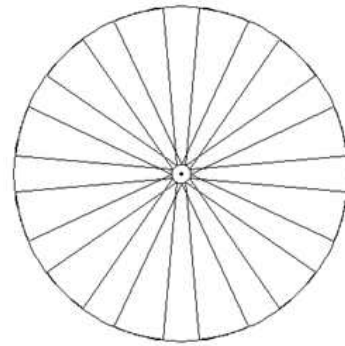
그림 13. 초음파 센서 사용 개수  $N$ 에 따른 설계 지수  $\kappa$ 의 변화.

Fig. 13. The change of the design index  $\kappa$  depending on the ultrasonic sensor number  $N$ .

할 수 있다. 참고로, 그림 12는 반경  $r$ 의 증가에 따른 최소와 최소 장애물 감지 거리  $\rho_{o,min}$ 과  $\rho_{o,max}$ 의 변화를 보이고 있으며, 반경  $r$ 의 증가에 따라 장애물 감지 범위  $\Delta\rho(=\rho_{o,max}-\rho_{o,min})$ 가 감소됨을 알 수 있다.

중첩 초음파 센서 링의 최적 설계의 예로, 중첩 초음파 센서 링의 반경이  $r=19\text{cm}$ 로 주어질 때, 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 최소화하기 위해 요구되는 초음파 센서의 최적 사용 개수  $N^*$ 를 정하는 문제를 고려하여 보았다. 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 초음파 센서의 사용 개수의 범위가 (44)로 주어짐에 유의하라. 그림 13은 초음파 센서 사용 개수  $N$ 이 8에서부터 15까지 증가됨에 따른 중첩 초음파 센서의 최적 설계 지수  $\kappa$ 의 변화를 보이고 있다. 그림 13에서 보듯  $N$ 의 증가에 따라  $\kappa$ 는 감소하다 증가하게 되며, 최솟값  $\kappa=0.0056$ 이 나타나는  $N=12$ 가 초음파 센서의 최적 사용 개수  $N^*$ 에 해당하게 된다.

그림 14(a)는 초음파 센서 링의 반경이  $r=19\text{cm}$ 인 경우의 최적 설계 결과로서, 초음파 센서  $N=12$ 개를 일정 간격  $\beta=30^\circ$ 로 배열한 상태를 보이고 있다. 또한, 그림 14(b)는 원통형 아크릴판 2장을 지지대로 삼아 초음파 센서 모듈을 배열한 후 제작된 중첩 초음파 센서 링을 이동로봇(상용 청소로봇)의 상단에 고정시킨 중첩 초음파 센서 링



(a) The schematic.



(b) The prototype.

그림 14. 최적 설계된 중첩 초음파 센서 링.

Fig. 14. The optimal design of an overlapped ultrasonic sensor ring.

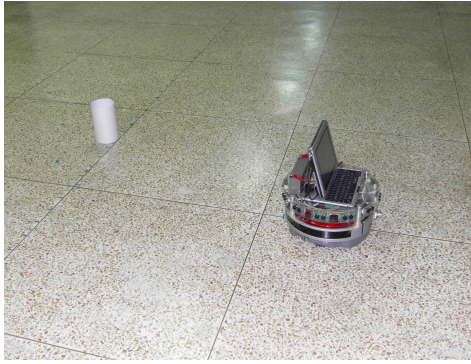
프로토타입을 보인다.

### VI. 장애물 탐지 실험

이 장에서는 자체 제작된 중첩 초음파 센서 링에 대한 장애물 탐지 실험 결과를 지면 제약상 간략히 소개하도록 한다. 보다 다양한 환경에서의 상세한 실험 결과는 참고문헌[13,14]에 수록되어 있다.

먼저, 그림 14(b)에 보인 이동로봇을 그림 15(a)에서와 같이 지름이 12.5 cm인 원통형 장애물을 100 cm 전방에 두고 좌측에서 우측으로 직선 이동하도록 하였다. 이동로봇의 속도 추정 오차, 모터 및 초음파 센서간의 간섭 등 외부 영향을 최소화하기 위해, 이동로봇은 정지 상태로 유지하고 대신 장애물을 직선을 따라 일정한 간격(10 cm)으로 이동하였다. 원통형 장애물을 바라보는 인접한 3개의 초음파 센서를 각각  $S_L, S_C, S_R$  이라 하자.

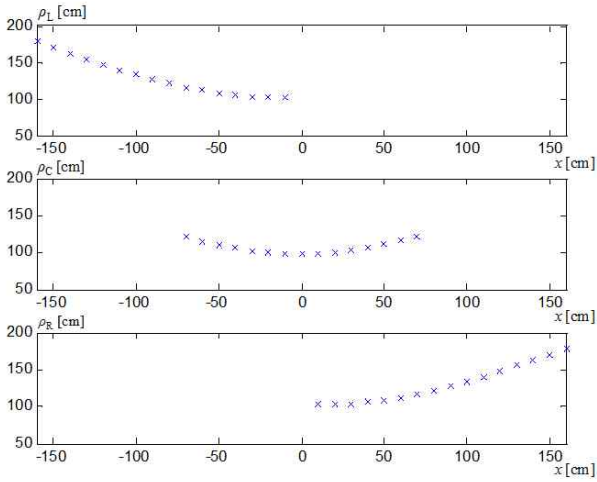
원통형 장애물이 직선을 따라 좌측(-150 cm)에서 중앙(0 cm)으로 이동함에 따라 장애물을 탐지하는 초음파 센서의 조합이 달라지게 된다. 그림 15(b)는 3개의 인접 초음파 센서  $S_L, S_C$  및  $S_R$ 에 의한 장애물 거리 측정값  $\rho_L, \rho_C$  및  $\rho_R$ 을 보이고 있다. 원통형 장애물이 -150 cm에서 -70 cm 사이에 위치하는 경우, 단지 좌측 초음파 센서  $S_L$ 만이 장애물을 감지하게 된다. 다음, 원통형 장애물이 -70 cm에서 -10 cm 사이에 위치하는 경우, 좌측 및 중앙 초음파 센서,



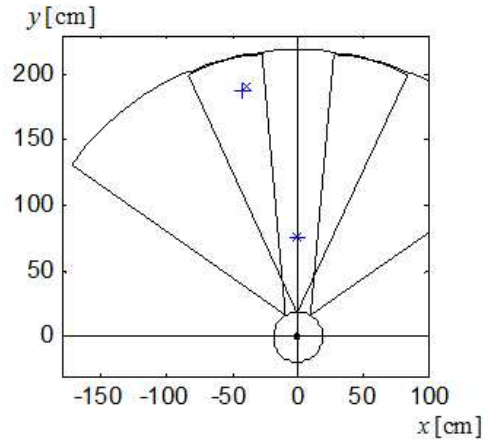
(a) Experimental setting.



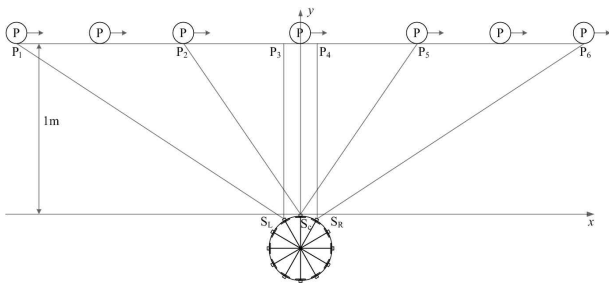
(a) Experimental setting.



(b) Experimental data.



(b) Experimental result.



(c) Experimental result.

그림 15. 단일 장애물 탐지.

Fig. 15. Single obstacle detection.

$S_L$  과  $S_C$  가 장애물을 감지하게 된다. 이어, 원통형 장애물이  $-10\text{ cm}$ 에서  $0\text{ cm}$  사이에 위치하는 경우, 단지 중앙 초음파 센서  $S_C$  만이 장애물을 감지하게 된다. 원통 장애물이 직선을 따라 중앙에서 우측( $150\text{ cm}$ )으로 이동하게 되면, 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합이 처음  $S_C$ 에서 다음  $S_C$ 와  $S_R$ , 마지막에는  $S_R$ 로 바뀌게 된다. 그림 15(c)는 장애물 탐지 초음파 센서 조합의 변화를 바탕으로 원통형 장애물 이동 직선 궤적을 소구간으로 분할한 결과를 보인다. 그림 15(c)를 보면, 중앙 초음파 센서  $S_C$ 의 빔 폭 내에 속하는  $P_2$ 로부터  $P_3$ 까지의 직선 구간이  $\overline{P_2P_3}=60\text{ cm}$ ,  $\overline{P_3P_4}=20\text{ cm}$ ,  $\overline{P_4P_5}=60\text{ cm}$  등 3개의 소구간으로 분할됨을 관찰할 수 있다. 여기서, 장애물 거리에 따라 소구간의 비율이

그림 16. 이중 장애물 탐지.

Fig. 16. Double obstacle detection.

달라짐에 유의할 필요가 있다. 실험 결과와 같이 빔 폭 중첩으로 인해 단일 초음파 센서의 전체 감지 영역이 3개의 감지 소영역으로 세분되게 되며, 그 만큼 장애물 탐지 시 분해능이 향상되게 효과가 생기게 된다.

다음, 그림 14(b)에 보인 이동로봇 전방에 2개의 원통형 장애물이 각각 원거리와 근 거리에 위치하도록 하였다. 그림 16(a)에서 보듯이 2개 장애물 모두 중앙 초음파 센서  $S_C$ 의 빔 폭 내에 있도록 하되, 근거리 장애물  $P_1$ 은 중앙 감지 소영역에 위치시키고, 원거리 장애물  $P_2$ 은 좌측 감지 소영역에 위치시켰다. 표 2는 3개 인접 초음파 센서에 의한 장애물 탐지 시 거리 측정값을 보이며, 이와 함께 중앙 초음파 센서만에 의한 장애물 탐지 시 거리 측정값을 함께 보이고 있다. 3개 인접 초음파 센서가 사용된 경우, 장애물 탐지 초음파 센서 조합으로부터 근거리 장애물  $P_1$ 은 중앙 감지 소영역에 존재하고, 원거리 장애물  $P_2$ 은 좌측 감지 소영역에 존재함을 알 수 있다. 반면, 중앙 초음파 센서만이 사용된 경우에는 근거리 장애물  $P_1$ 은 자신의 빔 폭 내에 존재함을 알 수 있을 뿐, 원거리 장애물  $P_2$ 의 존재 유무에 대해서는 전혀 알 수가 없게 된다. 그림 16(b)는 이중 장애물 탐지 실험 결과를 도시하고 있는데, 여기서 '+'는 각 장애물의 실제 위치 그리고 'x'는 초음파 센서 측정값을 이용한 장애물 추정 위치를 나타낸다[13]. 표 2와 그림 16



표 2. 이중 장애물 탐지 실험 데이터.

Table 2. The experimental data for double obstacle detection.

	$\rho_L$	$\rho_C$	$\rho_R$
중첩 초음파 링	176.4 cm	76.8 cm	$\infty$ cm
단일 초음파	NA	76.8 cm	NA

에서 보듯이 중첩 초음파 센서 링의 경우 단일 초음파 센서에 비해 장애물 탐지 분해능이 향상될 뿐 아니라, 단일 장애물 외에 이중 장애물을 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

**VII. 결론**

본 논문에서는 자율 주행 이동로봇의 고분해능 장애물 탐지를 위해 저지향성 초음파 센서로 구성되는 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 방법에 대해 논의하였다. 기본적으로, 동일 유형의 초음파 센서들이 영이 아닌 반경의 원주상에 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치되어 있다고 가정하였다. 본 논문의 구체적 기여로서는 1) 사각 구역을 감안한 장애물 감지 범위의 결정, 2) 위치 불확실성을 반영한 최적 설계 지수의 정의, 3) 효과적 빔 폭 중첩을 위한 초음파 사용 개수의 제한, 4) 상용 초음파 센서를 사용한 최적 설계 사례 제시 등을 들 수 있다. 현재 중첩 초음파 센서 링을 이용한 효율적인 환경 지도 작성에 관한 후속 연구가 진행 중이다.

**참고문헌**

[1] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng, "Where Am I?": *Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, The University of Michigan, 1996.

[2] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, 2005.

[3] H. Moravec and A. Elfes, "High resolution maps for wide angles sonar," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 116-121, 1985.

[4] A. Elfes, "Sonar-based real-world mapping and navigation," *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 3, pp. 249-265, 1987.

[5] J. L. Crowley, "World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 674-680, 1989.

[6] Y. Choi, W. Choi, and J. Song, "Obstacle avoidance of a mobile robot using low-cost ultrasonic sensors with wide beam angle," *J. Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 11, pp. 1102-1107, 2009.

[7] P. J. McKerrow, "Echolocation-from range to on-line segments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 205-211, 1993.

[8] O. Wijk and H. I. Christensen, "Triangulation-based

fusion of sonar data with application in robot pose tracking," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 740-752, 2000.

[9] H. Choset, K. Nagatani, and N. A. Lazar, "The arc-traversal median algorithm: a geometric approach to increasing ultrasonic azimuth accuracy," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 3, pp. 513-522, 2003.

[10] J. Borenstein and J. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.

[11] J. Borenstein and J. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.

[12] J. Borenstein and J. Koren, "Histogram in-motion planning for mobile robot obstacle avoidance," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 4, pp. 535-539, 1991.

[13] S. Kim and S. Lee, "Positional uncertainty reduction of overlapped ultrasonic sensor ring for efficient mobile robot obstacle detection," *J. Institute of Signal Processing and Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 198-206, 2009.

[14] S. Kim and S. Lee, "Design of overlapped ultrasonic sensor ring and its application to obstacle detection," *J. Institute of Signal Processing and Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 63-73, 2010.

[15] www.murata.com.



**김성복**

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1993년 미국 University of Southern California 전기공학과 박사. 1994년~현재 한국외국어대학교 디지털정보공학과 교수. 관심 분야는 지능형 로봇시스템의 분석, 설계 및 제어.



**김현빈**

2011년 2월 한국외국어대학교 디지털정보공학과 졸업 예정. 관심 분야는 임베디드 기반 자율 주행 이동로봇의 구현 및 제어.