

중첩 초음파 센서 링의 성능 평가, 최적 설계 및 복합 장애물 탐지

Performance Evaluation, Optimal Design and Complex Obstacle Detection of an Overlapped Ultrasonic Sensor Ring

김성복*, 김현빈*
Sungbok Kim, Hyunbin Kim

요약

본 논문에서는 유효 빔 폭 개념을 새로이 도입하여 중첩 초음파 센서 링의 성능 평가, 최적 설계, 그리고 복합 장애물 탐지에 대해 기술하도록 한다. 일군의 동종 저지향성 초음파 센서들이 반경이 영이 아닌 원주 상에 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치된다고 가정한다. 첫째, 중첩 초음파 센서 링의 전역 위치 불확실성을 전체 장애물 탐지 범위 내에서의 국부적 위치 불확실성의 평균값으로 나타낸다. 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 동일한 전역 위치 불확실성을 갖는 단일 초음파 센서의 빔 폭으로 산정하고 이를 바탕으로 정규화된 장애물 탐지 성능 평가 지수를 정의한다. 둘째, 정의된 성능 평가 지수를 이용하여 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링의 설계 사양을 최적화한다. 주어진 초음파 센서의 사용 개수에 대한 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 그리고 주어진 중첩 초음파 센서 링의 반경에 대한 초음파 센서의 최적 사용 개수를 결정한다. 셋째, 3개의 인접 초음파 센서로부터의 장애물 거리 간의 대소 관계에 의거한 복수 장애물의 위치 불확실성 영역 판정 기준을 제시한다. 제시된 위치 불확실성 영역 판정 기준을 이용하여 다양한 형태의 장애물로 구성된 복합 장애물 환경에서의 장애물 윤곽 추출 결과를 보인다.

Abstract

This paper presents the performance evaluation, optimal design, and complex obstacle detection of an overlapped ultrasonic sensor ring by introducing a new concept of effective beam width. It is assumed that a set of ultrasonic sensors of the same type are arranged along a circle of nonzero radius at regular spacings with their beams overlapped. First, the global positional uncertainty of an overlapped ultrasonic sensor ring is expressed by the average value of local positional uncertainty over the entire obstacle detection range. The effective beam width of an overlapped ultrasonic sensor ring is assessed as the beam width of a single ultrasonic sensor having the same amount of global positional uncertainty, from which a normalized obstacle detection performance index is defined. Second, using the defined index, the design parameters of an overlapped ultrasonic sensor ring are optimized for minimal positional uncertainty in obstacle detection. For a given number of ultrasonic sensors, the optimal radius of an overlapped ultrasonic sensor ring is determined, and for a given radius of an overlapped ultrasonic sensor ring, the optimal number of ultrasonic sensors is determined. Third, the decision rules of positional uncertainty zone for multiple obstacle detection are provided based on the inequality relationships among obstacle distances by three adjacent ultrasonic sensors. Using the provided rules, the obstacle outline detection is performed in a rather complex environment consisting of several obstacles of different shapes.

Keywords : ultrasonic sensor ring, positional uncertainty, beam overlap, optimal design, complex obstacle detection

I. 서론

자율 주행 이동로봇의 장애물 탐지 및 환경 지도 작성을 위해

서, 초음파 센서는 카메라, 적외선 센서, 레이저 스캐너 등 여타 센서에 비해 널리 사용되어 왔다 [1, 2]. 초음파 센서는 자신의 빔 폭 내에 위치한 장애물까지의 거리를 측정할 수 있으나, 해당 원호 상에서의 정확한 장애물 위치는 모르는 상태로 남게 된다 [3-8]. 이러한 장애물 탐지 시 위치 불확실성 문제를 완화시키기 위해, 상대적으로 적은 개수의 저지향성 초음파 센서를 인접 초음파 센서 간 상호 빔 폭이 중첩되도록 배열하여 사용하는 방안이 제시된 바 있다 [9, 10]. 상당히 많은 개수의 고지향성 초음파 센서를 사용하는 기존 방식에 비하여 [3-8], 제안된 방식에 의하면

* 한국의국어대학교

투고 일자 : 2011. 8. 22 수정완료일자 : 2011. 10. 25

계재확정일자 : 2011. 11. 1

* 이 연구는 2011학년도 한국의국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

거의 장애물 탐지 성능 저하 없이 센서 장치 및 데이터 처리 비용을 현저히 감소시킬 수 있다.

그림 1은 반경이 영이 아닌 원주 상에 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치된 3개의 인접 초음파 센서, S_N, S_1 , 그리고 S_2 를 보이고 있다. 인접 초음파 센서 간 빔 폭 중첩으로 인해 중앙 초음파 센서 S_1 의 전체 감지 영역이 좌측, 중앙, 우측 등 3개의 감지 소영역으로 나뉘게 된다. 중앙 초음파 센서 빔 폭 내 장애물의 상대적 위치에 따라 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합이 달라지게 되며, 역으로 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합으로부터 장애물이 속하는 세부 영역을 알 수 있다 [9, 10]. 한편, 그림 1에서 보듯이, 중첩 초음파 센서 링을 구성하는 초음파 센서들은 자체 크기로 인해 반경이 영이 아닌 원주 상에 배치되게 된다. 초음파 센서들은 제각기 자신의 꼭지점을 기준으로 한 장애물 거리를 제공하지만, 장애물 탐지 및 회피 기능 구현을 위해서는 중첩 초음파 센서 링의 중심 O 를 기준으로 한 장애물 거리로 변환되어야 한다.

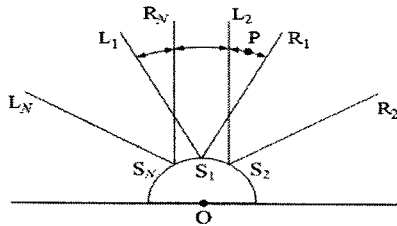


그림 1. 빔 폭 중첩으로 인한 위치 불확실성 감소.

Fig. 1. Positional uncertainty reduction due to beam overlap.

본 논문에서는 유효 빔 폭의 개념을 새로이 도입하여 중첩 초음파 센서 링의 성능 평가, 최적 설계, 그리고 복합 장애물 탐지에 대해 기술하도록 한다. II 장에서는 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 산정하고 장애물 탐지 성능 평가 지수를 정의한다. III 장에서는, 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링의 설계 사양을 최적화한다. IV 장에서는, 인접 장애물 거리 간의 대소 관계에 의거하여 복수 장애물 탐지 판정 기준을 제시한다. 마지막으로, V 장에서는 결론을 내린다. 기본적으로, 일군의 동종 저지향성 초음파 센서들이 반경이 영이 아닌 원주 상에 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 원형 배치된다고 가정한다.

II. 성능 평가 지수

그림 2는 빔 폭이 α 인 동종 초음파 센서 N 개가 영이 아닌 반경 $r(>0)$ 의 원주 상에 일정 간격 $\beta(=\frac{360^\circ}{N})$ 로 배치된 중첩 초음파 센서 링 중 일부분을 보이고 있다. 그림 1에서 보듯 중첩 초음파 센서 링의 반경이 영이 아닌 한, 인접 초음파 센서 사이에 장애물 탐지 사각 구역이 생기게 되는데, 이를 고려하여 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 범위를 정하면

$$\rho_{o,\min} \leq \rho_o \leq \rho_{o,\max} \quad (1)$$

여기서 [10]

$$\rho_{o,\min} = \overline{OD} = r \times \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2})} \quad (2)$$

$$\rho_{o,\max} = \overline{OE} = \sqrt{r^2 + \rho_{s,\max}^2 + 2r\rho_{s,\max}\cos\frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$

위에서, 초음파 센서의 최소 감지 거리 $\rho_{s,\min}$ 이 최대 감지 거리 $\rho_{s,\max}$ 보다 충분히 작아, 빔 폭 중첩 상태가 $\rho_{s,\min} < \overline{S_1D}$ 를 충족한다고 한다.

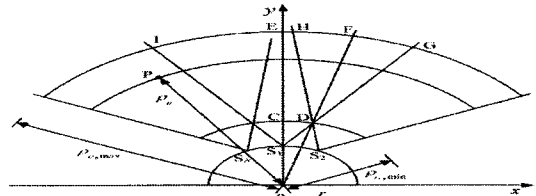


그림 2. 빔 폭이 중첩된 3개의 인접 초음파 센서.

Fig. 2. Three adjacent ultrasonic sensors with their beams overlapped.

그림 3에서와 같이 장애물 거리 ρ_o 가 주어진다고 할 때, 중심 O 를 기준으로 하여 중첩 초음파 센서 링의 극부적 위치 불확실성을 빔 폭 내 원호 길이로써 표현하면

$$l_{eff} = \max(\widehat{R_1F_1}, \widehat{F_1G_1}) \quad (4)$$

여기서

$$\widehat{R_1F_1} = \rho_o \times \angle R_1OF_1 \quad (5)$$

$$\widehat{F_1G_1} = \rho_o \times \angle F_1OG_1 \quad (6)$$

위에서, 주어진 장애물 거리 ρ_o 에 대해 $\widehat{R_1F_1} (= \widehat{L_1G_1})$ 은 우(좌)측 감지 소영역의 위치 불확실성 정도를 나타내고, $\widehat{F_1G_1}$ 은 중앙 감지 소영역의 위치 불확실성 정도를 나타낸다. 따라서, 장애물 탐지 및 회피를 위해 보수적으로 선정되어야 하는 중첩 초음파 센서 링의 극부적 위치 불확실성은 $\widehat{R_1F_1}$ 과 $\widehat{F_1G_1}$ 중 큰 값으로 나타낼 수 있다. 식 (5)에 보이는 $\angle R_1OF_1$ 은 그림 3으로부터 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\angle R_1OF_1 = 2 \times \angle R_1OD \quad (7)$$

여기서

$$\angle R_1OD = \angle R_1OE_1 - \angle DOE_1 = \angle R_1OE_1 - \frac{\beta}{2} \quad (8)$$

윗 식에서의 $\angle R_1OE_1$ 을 구해 보면,

$$\angle R_1OE_1 = \frac{\pi}{2} - \text{atan2}(r + \rho_1 \cos \frac{\alpha}{2}, \rho_1 \sin \frac{\alpha}{2}) \quad (9)$$

여기서 $\rho_1 (= \overline{S_1R_1})$ 는 주어진 장애물 거리 ρ_o 에 상응하는 중앙 초음파 센서 S_1 의 감지 거리이다.

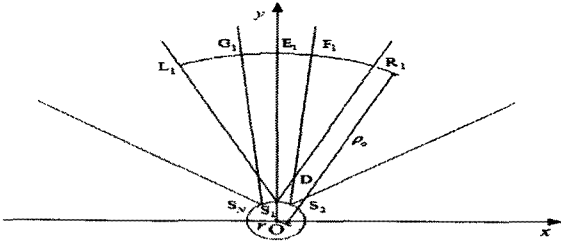


그림 3. 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 산정.

Fig. 3. Positional uncertainty assessment of an overlapped ultrasonic sensor ring.

식 (6)에 보이는 $\angle F_1OG_1$ 은 그림 3으로부터 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\angle F_1OG_1 = 2 \times \angle F_1OE_1 \quad (10)$$

여기서

$$\angle F_1OE_1 = \angle R_1OE_1 - \angle R_1OF_1 \quad (11)$$

식 (7), (8), 그리고 (11)을 식 (10)에 대입한 후 정리하면,

$$\angle F_1OG_1 = 2 \times (\beta - \angle R_1OE_1) \quad (12)$$

여기서 $\angle R_1OE_1$ 은 식 (9)로 주어진다.

식 (4)의 국부적 위치 불확실성을 토대로, 중첩 초음파 센서 링의 전역 위치 불확실성을 표현하면

$$\bar{l}_{eff} = \text{Mean} [\max(\widehat{R_1F_1}, \widehat{F_1G_1})] \quad (13)$$

이는 식 (1)로 주어진 장애물 탐지 범위 내에서의 국부적 위치 불확실성의 척도인 불확실성 원호 길이의 평균값을 나타낸다. 식 (13)의 결과를 이용하여, 중심 O를 기준으로 한 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭 A_{eff} 를 산정하여 보기로 하자.

$$\bar{l}_{eff} = \frac{1}{2} \rho_{s,max} \times A_{eff} \quad (14)$$

윗 식의 우측 편은 최대 감지 거리가 $\rho_{s,max}$ 이고 빔 폭이 A_{eff} 인 단일 초음파 센서에 대한 전체 감지 영역 내에서의 평균 불확실성 원호 길이로서, 해당 초음파 센서의 전역 위치 불확실성을 나타내고 있다. 식 (14)으로부터, 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭 A_{eff} 는

$$A_{eff} = \frac{2 \times \bar{l}_{eff}}{\rho_{s,max}} \quad (15)$$

동일한 방법으로, 중심 O를 기준으로 하여 빔 폭 중첩을 고려하지 않은 단일 초음파 센서의 유효 빔 폭 A_{ori} 를 구해 보면

$$A_{ori} = \frac{2 \times \bar{l}_{ori}}{\rho_{s,max}} \quad (16)$$

여기서

$$\bar{l}_{ori} = \text{Mean} [2 \times \widehat{R_1F_1} + \widehat{F_1G_1}] \quad (17)$$

윗 식에서 $(2 \times \widehat{R_1F_1} + \widehat{F_1G_1})$ 은 주어진 장애물 거리 ρ_0 에 대한 단일 초음파 센서의 불확실성 원호 길이를 나타낸다.

식 (15)와 (16)을 이용하여, 인접 초음파 센서 간 빔 폭 중첩으로 인한 유효 빔 폭 감소 비율을 표현하면 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{A_{eff}}{A_{ori}} = \frac{\bar{l}_{eff}}{\bar{l}_{ori}} \quad (18)$$

유효 빔 폭 감소 비율 ζ 는 인접 초음파 센서 간 빔 폭 중첩으로 인한 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 감소 정도를 나타낸다. 중첩 초음파 센서 링의 원주 상에 일련의 동종 초음파 센서가 일정 간격으로 배치되었다고 하면

$$\frac{1}{3} A_{ori} \leq A_{eff} \leq A_{ori} \quad (19)$$

식 (18)과 (19)로부터,

$$\frac{1}{3} \leq \zeta \leq 1 \quad (20)$$

유효 빔 폭 감소 비율 ζ 의 활용 예로는 고해상도 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계를 들 수 있는데, 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 최소화를 위해서는 ζ 의 값이 가능한 그 최소값인 $\frac{1}{3}$ 에 근접하도록 하여야 한다.

한편, 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계를 위한 또 다른 성능 평가 지수로서 중앙과 측면 감지 소영역간의 넓이의 비율을 고려할 수 있는데 [10], 이 경우 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 최소화를 위해서는 해당 비율이 1.0에 근접하도록 하여야 한다. 기존의 소영역간 넓이 비율로서의 평가 지수가 중첩 초음파 센서 링 관점이라 하면, 본 논문에서 제안된 유효 빔 폭 감소 비율로서의 평가 지수는 탐지 대상인 장애물 관점에서 빔 폭 중첩으로 인한 장애물 탐지 해상도 향상 정도를 정량적으로 나타내고 있다.

III. 최적 설계 사양

대표적인 상용 저지향성 초음파 센서인 Murata사의 MA40B8은 빔 폭이 $\alpha = 50^\circ$ 이고 최대 감지 거리가 $\rho_{s,max} = 300 \text{ cm}$ 이다 [11]. 초음파 센서가 반사 방식으로 동작하게 됨을 감안하면 최대 감지 거리 300 cm는 왕복 거리를 기준으로 하여 600 cm에 해당한다. 본 논문에서는 MA40B8을 사용한다는 전제 아래, 장애물 탐지 시 위치 불확실성 최소화를 위한 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 사양을 결정해 보도록 한다.

중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 사례로서, 초음파 센서의 사용 개수 N 이 주어질 때, 식 (18)로 주어진 설계 지수 ζ 가 최소화 되도록 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 r^* 를 결정하는 문제를 고려하여 보자. 중첩 초음파 센서 링의 효과적인 빔 폭 중첩을 위해서는 인접 초음파 센서 간 최소한의 빔 폭 중첩이 보장되어야 하고 또한 과도한 빔 폭 중첩이 회피되어야 하며, 이를 위해서는 중첩 초음파 센서 링에 구조적 제약이 따르게 된다. 초음파 센서의 사용 개수가 $N=12$ 로 주어진다고 할 때, 효과적인 빔 폭 중첩을 위해 허용되는 중첩 초음파 센서 링의 반경의 범위를 구하면 [10]

$$0 \leq r \leq 209.24 [\text{cm}] \quad (21)$$

주어진 초음파 센서의 사용 개수 $N=12$ 에 대해, 그림 4a), 4b)와 4c)는 중첩 초음파 센서 링의 반경이 최소값 $r=0$ 으로부터 최대값 $r=209.24 \text{ cm}$ 까지 증가되는 동안 빔 폭 중첩을 고려한 유효 빔 폭 A_{eff} , 빔 폭 중첩을 고려하지 않은 유효 빔 폭 A_{ori} , 그

리고 설계 지수(유효 빔 폭 감소 비율) ζ 의 변화를 보이고 있다. 중첩 초음파 센서 링 반경 r 의 증가에 따라 설계 지수 ζ 는 감소하다가 증가하게 되는데, 최소값 $\zeta=0.37$ 이 나타나는 지점인 $r^*=14.37$ cm가 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경임을 알 수 있다.

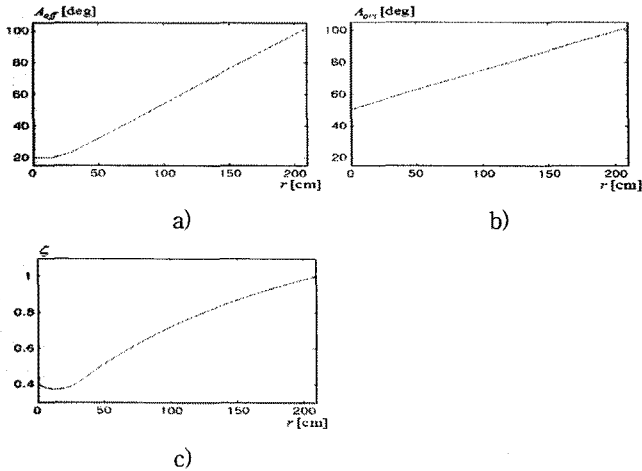


그림 4. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 a) 유효 빔 폭 A_{eff} , b) 유효 빔 폭 A_{ori} , 그리고 c) 설계 지수 ζ 의 변화.
 Fig. 4. The changes of a) the effective beam width A_{eff} , b) the effective beam width A_{ori} , and c) the design index ζ , depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

다음, 초음파 센서의 사용 개수를 $N=8$ 로부터 $N=20$ 까지 변화시키면서 위치 불확실성 최소화를 위한 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 r^* 를 반복적으로 구해 보았다. 그림 5a)는 초음파 센서의 사용 개수 N 의 증가에 따른(좌측에서부터 우측으로), 식 (21)로 주어진 중첩 초음파 센서 링의 허용 반경 r 범위 내에서의 설계 지수 ζ 의 도표를 중첩하여 보이고 있는데, 그림 4c)에서와 거의 유사한 양상임을 관찰할 수 있다. 그림 5b)는 초음파 센서의 사용 개수가 $N=5$ 로부터 $N=20$ 까지 증가되는 동안 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 r^* 의 변화를 보이는데, $5 \leq N \leq 10$ 인 경우에는 $r^*=0$ 인데 반면, $N \geq 11$ 에 대해서는 r^* 가 N 에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

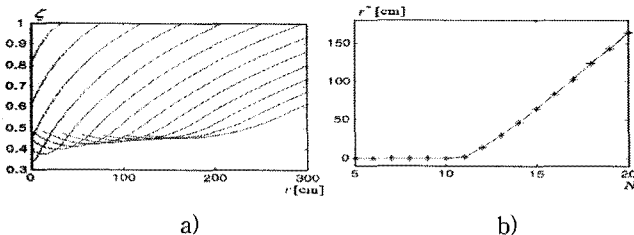


그림 5. 초음파 센서 사용 개수 N 에 따른 a) 설계 지수 ζ 의 도표와 b) 최적 반경 r^* 의 변화.
 Fig. 5. Depending on the number N of ultrasonic sensors, a) the plot of the design index ζ and b) the change of the optimal radius r^* .

중첩 초음파 센서 링의 최적 설계의 다른 예로, 중첩 초음파

센서 링의 반경 r 이 주어질 때, 식 (18)로 주어진 설계 지수 ζ 가 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링의 최적 센서 사용 개수 N^* 를 결정하는 문제를 고려하여 보자. 우선, 주어진 중첩 초음파 센서 링의 반경이 $r=19$ cm로 주어진다고 할 때, 효과적인 빔 폭 중첩을 위해 허용되는 초음파 센서의 사용 개수의 범위를 구하면 [10]

$$8 \leq N \leq 15 \quad (22)$$

주어진 중첩 초음파 센서 링의 반경 $r=19$ cm에 대해, 그림 6a), 6b)와 6c)는 초음파 센서의 사용 개수가 최소값 $N=8$ 로부터 최대값 $N=15$ 까지 증가되는 동안, 유효 빔 폭 A_{eff} , 유효 빔 폭 A_{ori} , 그리고 설계 지수 ζ 의 변화를 보이고 있다. 초음파 센서의 사용 개수 N 의 증가에 따라 설계 지수 ζ 는 빠르게 감소하다가 서서히 증가하게 되는데, 최소값 $\zeta=0.38$ 이 나타나는 지점인 $N^*=12$ 가 초음파 센서의 최적 사용 개수임을 알 수 있다.

다음, 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 을 변화시키면서 위치 불확실성 최소화를 위한 초음파 센서의 최적 사용 개수 N^* 를 반복적으로 구해 보았다. 그림 7a)는 중첩 초음파 센서 링의 반경을 $r=0$ cm에서부터 점점 증가시키며 최적 센서 개수 N^* 가 1씩 증가 순간에 해당하는 총 9개의 반경 r 값에 대해 (좌측부터 우측으로) 초음파 센서의 사용 개수 N 에 따른 설계 지수 ζ 의 도표를 중첩하여 보이고 있는데, 그림 6c)에서와 유사한 양상임을 관찰할 수 있다. 그림 7b)는 중첩 초음파 센서 링의 반경이 $r=0$ cm로부터 $r=150$ cm까지 증가되는 동안 초음파 센서의 최적 사용 개수 N^* 의 변화를 보이는데, r 이 증가됨에 따라 N^* 가 계단식 비연속적 증가 추세를 알 수 있다.

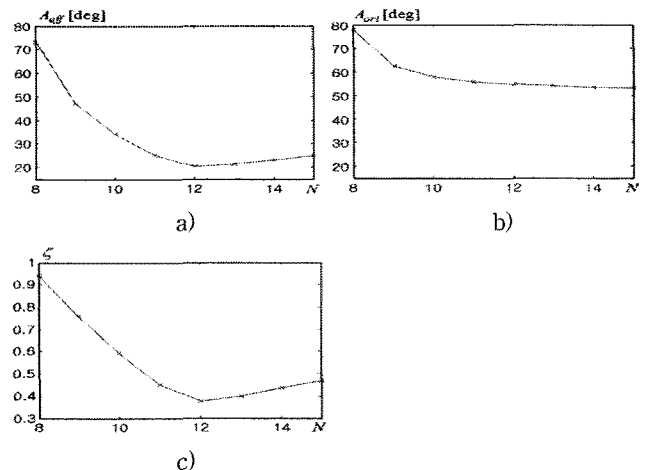


그림 6. 초음파 센서 사용 개수 N 에 따른 a) 유효 빔 폭 A_{eff} , b) 유효 빔 폭 A_{ori} , 그리고 c) 설계 지수 ζ 의 변화.
 Fig. 6. The changes of a) the effective beam width A_{eff} , b) the effective beam width A_{ori} , and c) the design index ζ , depending on the number N of ultrasonic sensors.

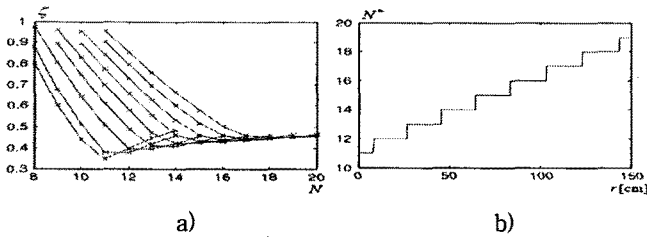


그림 7. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 a) 설계 지수 ζ 의 도표 와 b) 최적 개수 N^* 의 변화.

Fig. 7. Depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring, a) the plot of the design index ζ and b) the change of the optimal number N^* .

그림 8은 ED사의 상용 이동 로봇 ED-7273을 보이고 있는데 [12], 장애물 탐지를 위해 최적 설계된 중첩 초음파 센서 링을 장착하고 있다. 장착된 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 인자로는 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 $r^* = 19\text{ cm}$ 그리고 초음파 센서의 최적 사용 개수 $N^* = 12$ 가 선택되었다.

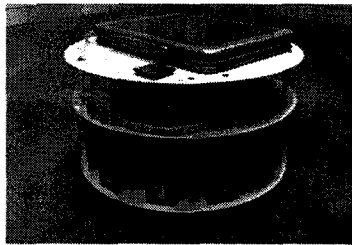


그림 8. 최적 설계 중첩 초음파 센서 링이 장착된 상용 이동 로봇.

Fig. 8. A commercial mobile robot equipped with an optimally overlapped ultrasonic sensor ring.

IV. 복합 장애물 탐지

그림 9는 3개의 연속 배열된 초음파 센서 S_N, S_1 , 그리고 S_2 가 복수 개수의 장애물을 탐지하는 다양한 상황을 보이고 있다. 여기서, P_N, P_1 , 그리고 P_2 은 각각 초음파 센서 S_N, S_1 , 그리고 S_2 의 빔 폭 내에 위치한 장애물을 나타낸다. 일반적으로, 복수 장애물 탐지 시, 초음파 센서 S_N, S_1 , 그리고 S_2 는 각각 자신의 폭지점으로 부터 최소 거리에 위치한 장애물을 탐지하게 되며, 한 쌍의 인접 초음파 센서 $S_N \& S_1$ 그리고 $S_1 \& S_2$ 에 의해 탐지 가능한 장애물의 최대 개수는 2가 된다. 한편, 두 쌍의 인접 장애물 $P_N \& P_1$ 그리고 $P_1 \& P_2$ 는 각각 동일 장애물 일 수 있으며, 이 때 해당 장애물은 한 쌍의 인접 초음파 센서의 전체 감지 영역 간 교차 구역에 위치하게 된다. 그러나 3개의 장애물 P_N, P_1 , 그리고 P_2 가 모두 동일한 장애물일 수는 없다.

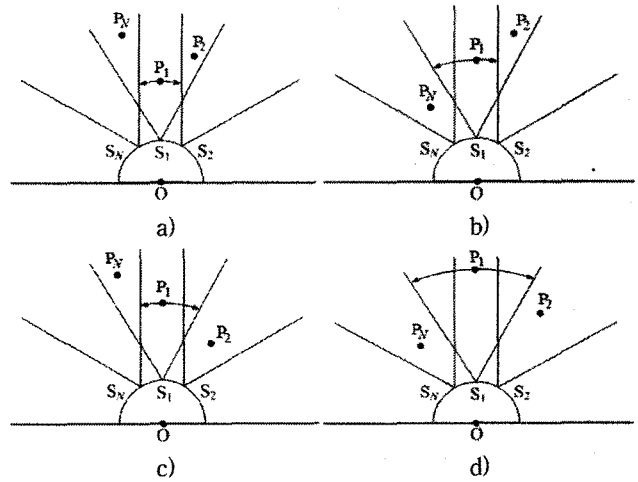


그림 9. 3개의 인접 초음파 센서에 의한 복수 장애물 탐지.
Fig. 9. Multiple obstacle detection by three adjacent ultrasonic sensors.

중첩 초음파 센서 링의 중심 O 를 기준으로 한 좌측 장애물 P_N , 중앙 장애물 P_1 , 그리고 우측 장애물 P_2 까지의 거리를 각각 $\rho_{0,N}, \rho_{0,1}$, 그리고 $\rho_{0,2}$ 라 하자. 또한, 인접 초음파 센서 간 빔 폭 중첩의 산물인 중앙 초음파 센서 S_1 의 좌측, 중앙, 그리고 우측 감지 소영역을 각각 'I', 'II', 그리고 'III'으로 표시하기로 하자. 중앙 장애물 거리 $\rho_{0,1}$ 을 좌우측 장애물 거리 $\rho_{0,N}$ 과 $\rho_{0,2}$ 와 비교함으로써, 중앙 초음파 센서 S_1 의 빔 폭 내 위치한 중앙 장애물 P_1 이 3개 감지 소영역 가운데 어디에 속하는지 판정할 수 있다.

만약, 중앙 장애물 거리 $\rho_{0,1}$ 가 좌우측 장애물 거리 $\rho_{0,N}$ 과 $\rho_{0,2}$ 의 최소값보다 적으면, 그림 9a)에 보인 것과 같이, 중앙 장애물 P_1 은 중앙 감지 소영역 II에 속하게 된다. 만약, 중앙 장애물 거리 $\rho_{0,1}$ 가 좌우측 장애물 거리 $\rho_{0,N}$ 과 $\rho_{0,2}$ 의 최소값보다 크거나 같고 또 그들의 최대값보다 적으면, 그림 9b)와 9c)에 보인 것과 같이, 중앙 장애물 P_1 은 좌측 또는 중앙 감지 소영역 I U II에 속하거나 우측 또는 중앙 감지 소영역 II U III에 속하게 된다. 마지막으로, 만약, 중앙 장애물 거리 $\rho_{0,1}$ 가 양측 장애물 거리 $\rho_{0,N}$ 과 $\rho_{0,2}$ 의 최대값보다 크거나 같으면, 그림 9d)에 보인 것과 같이, 중앙 장애물 P_1 은 좌측, 중앙 또는 우측 감지 소영역 I U II U III, 다시 말해 중앙 초음파 센서 S_1 의 전체 감지 영역에 속하게 된다.

표 1은 이상과 같은 3개의 인접 장애물 거리간의 대소 관계를 바탕으로 한 중앙의 장애물의 위치 불확실성 영역 판정 기준을 요약하여 보이고 있다. 표 1에서 2개 이상의 장애물 거리간의 등호 관계는 장애물 탐지 시 위치 불확실성 감소에 기여할 수 없다는 사실에 주목할 필요가 있다. 그림 9에서, 복수 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도를 불확실성 원호를 사용하여 표시하였다. 초음파 센서의 본래 불확실성 원호가 전체 감지 영역에 걸쳐진데 반해, 빔 폭 중첩 활용 시 불확실성 원호는 중앙 감지 소영역, 중앙 및 좌측 또는 우측 감지 소영역, 또는 전체 감지 영역에 걸쳐 짝에 유의하다.

표 1. 복수 장애물 탐지 시 위치 불확실성 영역 판정 기준.

Table 1. Decision rules for positional uncertainty zone in multiple obstacle detection.

	조건	위치 불확실성 영역	장애물 거리
그림 9a)	$\rho_{o,1} < \min(\rho_{o,N}, \rho_{o,2})$	II	$\rho_o = \rho_{o,1}$
그림 9b)	$\rho_{o,N} \leq \rho_{o,1} < \rho_{o,2}$	I ∪ II	
그림 9c)	$\rho_{o,N} > \rho_{o,1} \geq \rho_{o,2}$	II ∪ III	
그림 9d)	$\rho_{o,1} \geq \max(\rho_{o,N}, \rho_{o,2})$	I ∪ II ∪ III	

표 1로 주어진 위치 불확실성 영역 판정 기준을 토대로, 그림 8에 보인 중첩 초음파 센서 링을 이용하여 다소 복잡한 장애물 환경에서 장애물 윤곽을 추출하는 실험을 행하였다. 그림 10은 중첩 초음파 센서 링 주변에 평평한 벽면, 벽 귀퉁이, 벽 모서리, 반경이 큰 원통, 반경이 작은 원통 등의 다양한 형태의 장애물로 구성된 복합 장애물 탐지 실험 환경을 보이고 있다. 그림 10b)에서 중첩 초음파 센서 링의 12개 초음파 센서에 의해 감지된 장애물 위치를 'x'와 해당 순번을 함께 표시하였는데, 감지된 장애물 위치는 각 초음파 센서의 꼭지점으로부터 최단거리 지점에 해당함을 알 수 있다.

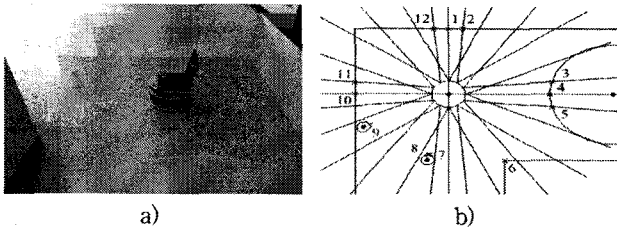


그림 10. 다양한 형태의 장애물로 구성된 복합 장애물 탐지 실험 환경: a) 사진과 b) 도면.

Fig. 10. A complex experimental environment consisting of diverse obstacles: a) the photo and b) the floor plan.

그림 11은 인접 초음파 센서 간 빔 폭 중첩 상태를 활용하지 않은 경우, 그림 10에 보인 복합 장애물 환경에 대한 장애물 윤곽 추출 상태를 보이고 있는데, 이는 12개 초음파 센서의 본래의 불확실성 원호, 각각 장애물 거리를 반경으로 하고 전체 감지 영역에 걸쳐진 원호들을 중첩하여 그린 결과이다. 그림 11로부터는 중첩 초음파 센서 링 주변의 복합 장애물의 윤곽 추출이 매우 어려움을 관찰 할 수 있다.

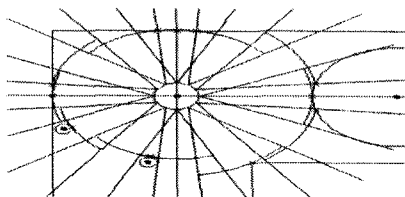


그림 11. 빔 폭 중첩 비활용 시 복합 장애물 윤곽 추출 결과.

Fig. 11. Outline extraction of complex obstacles without exploiting beam overlap.

그림 12는 표 1에 주어진 위치 불확실성 영역 판정 기준을 적용한 경우, 그림 10에 보인 복합 장애물 환경에 대한 장애물 윤곽 추출 상태를 보이고 있는데, 이는 12개 초음파 센서의 빔 폭 중첩 결과 본래 보다 좁아진 불확실성 원호들을 중첩하여 그린 결과이다. 빔 폭 중첩을 활용하지 않은 경우인 그림 11과 비교하여, 그림 12는 주변에 존재하는 장애물의 형태를 보다 자세하게 포착하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 해상도가 향상됨을 입증하는 실험 결과라 할 수 있다.

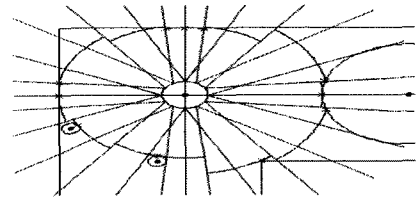


그림 12. 빔 폭 중첩 활용 시, 복합 장애물 윤곽 추출 결과.

Fig. 12. Outline extraction of complex obstacles with exploiting beam overlap.

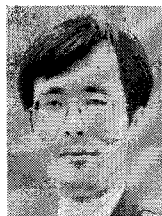
V. 결론

본 논문은 유효 빔 폭의 개념을 도입하여 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 줄이는 중첩 초음파 센서 링의 성능 평가, 최적 설계, 그리고 복합 장애물 탐지에 대해 논의하였다. 본 논문의 구체적 기여 내용으로는 1) 전역 위치 불확실성에 기반한 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭의 산정과 성능 평가 지수의 정의, 2) 정의된 지수를 이용한 위치 불확실성 최소화를 위한 중첩 초음파 센서 링의 설계 사양의 최적화, 3) 인접 장애물 거리의 대소 관계에 의거한 위치 불확실성 영역 판정과 복합 장애물 윤곽 추출에의 응용 등을 들 수 있다. 본 논문의 후속 연구로서, 최적 설계 중첩 초음파 센서 링을 이용한 효율적인 환경 지도 작성 기법에 대한 연구가 현재 진행되고 있다.

참고 문헌

- [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, 116-121, 1985.
- [4] 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.
- [5] P. J. McKerrow, "Echolocation—from Range to Outline Segments," Robotics and Autonomous Systems, vol. 11, no.

- 4, 205-211, 1993.
- [6] O. Wijk and H. I. Christensen, "Triangulation-Based Fusion of Sonar Data with Application in Robot Pose Tracking," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 740-752, 2000.
- [7] H. Choset, K. Nagatani, and N. A. Lazar, "The Arc-Traversal Median Algorithm: a Geometric Approach to Increase Ultrasonic Sensor Azimuth Accuracy," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 19, no. 3, 513-522, 2003.
- [8] J. Borenstein and J. Koren, "Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [9] 김성복, 이상협, "효율적인 이동로봇의 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 감소," *신호처리 시스템 학회 논문지*, 제10권, 제3호, pp. 198-206, 2009.
- [10] 김성복, 김현빈, "효과적인 빔 폭 중첩을 이용한 고성능 장애물 탐지용 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계," *신호처리 시스템 학회 논문지*, 제12권, 제1호, pp. 67-75, 2011.
- [11] www.murata.com.
- [12] www.ed.co.kr.



김성복(Sungbok Kim)

正會員

1980년 2월 서울대 전자공학과(학사)

1882년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과(석사)

1993년 5월 미국 University of Southern California
전기공학과(박사)

1994년 3월~ 현재 한국외국어대학교 디지털정보공학과 교수

※주관심분야 : 지능형 이동로봇의 설계, 분석 및 제어



김현빈(Hyunbin Kim)

2011년 2월 한국외국어대학교
디지털정보공학과(공학사)

2011년 3월~ 현재 한국외국어대학교
전자정보공학과 석사과정

※주관심분야 : 자율 주행 이동 로봇의 설계 및 제작