

중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 지표 비교 분석

Comparative Analysis on Performance Indices of Obstacle Detection for an Overlapped Ultrasonic Sensor Ring

김성복*, 김현빈
(Sungbok Kim¹ and Hyunbin Kim¹)
¹Hankuk University of Foreign Studies

Abstract: This paper presents a comparative analysis on three different types of performance indices of obstacle detection for an overlapped ultrasonic sensor ring. Due to beam overlap, the entire sensing zone of each ultrasonic sensor can be divided into three smaller sensing subzones, which leads to significant reduction of positional uncertainty in obstacle detection. First, the positional uncertainty in obstacle detection is expressed in terms of the area of a sensing subzone, and type 1 performance index is then defined as the area ratio of side and center sensing subzones. Second, based on the area of a sensing subzone, type 2 performance index is defined taking into account the size of the entire range of obstacle detection as well as the degree of the positional uncertainty in obstacle detection. Third, the positional uncertainty in obstacle detection is now expressed in terms of the length of the uncertainty arc spanning a sensing subzone, and type 3 performance index is then defined as the average value of the uncertainty arc lengths over the entire range of obstacle detection. Fourth, using a commercial low directivity ultrasonic sensor, the changes of three different performance indices depending on the parameter of an overlapped ultrasonic sensor ring are examined and compared.

Keywords: ultrasonic sensor ring, obstacle detection, positional uncertainty, beam overlap, performance index

I. 서론

자율 주행 이동로봇의 장애물 탐지 및 환경 지도 작성을 위해 초음파 센서는 카메라, 적외선 센서, 레이저 스캐너 등 여타 센서에 비해 널리 사용되어 왔다[1-4]. 초음파 센서는 자신의 빔 폭 내에 위치한 장애물까지의 거리를 측정할 수 있지만 빔 폭 내에서의 장애물의 정확한 위치는 모르는 상태로 남아 있게 된다. 즉, 탐지된 장애물은 장애물 거리를 반경으로 하고 초음파 센서 빔 폭 내에 걸쳐진 소위 불확실성 원호 상의 어느 한 지점에 위치하게 된다. 이러한 장애물 탐지 시 위치 불확실성 문제를 완화시키기 위해 종래에는 빔 폭이 적은 고지향성 초음파 센서를 사용하여 왔다[5-10]. 그러나 이 경우 초음파 센서의 사용 개수가 많아지고 그 결과 센서 데이터 처리량이 커지는 문제가 생기게 된다.

장애물 탐지 시 위치 불확실성 문제를 완화시키기 위해, 상대적으로 적은 개수의 빔 폭이 큰 저지향성 초음파 센서를 선택하되, 인접 초음파 센서 간의 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치하여 사용하는 방안이 제시된 바 있다[11-14]. 그림 1에서 보듯이, 좌우측 초음파 센서와의 빔 폭 중첩으로 인해 중앙 초음파 센서의 전체 감지 영역이 3개의 작은 감지 소영역으로 나뉘게 되며, 장애물이 속하는 감지 소영역

에 따라 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합이 달라지게 된다. 역으로 장애물 탐지 초음파 센서 조합으로부터 장애물이 속하는 영역을 세분화할 수 있게 되며 그 결과 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 감소되게 된다. 많은 개수의 고지향성 초음파 센서를 사용하는 기존 방식에 비하여, 제안된 방식을 채택하면 장애물 탐지 성능 저하 없이 센서 장치 및 데이터 처리 비용을 현저히 감소시킬 수 있다.

그림 1에서와 같이 중첩 초음파 센서 링에 의해 장애물 P가 감지되었다고 할 때, 장애물 탐지 시 위치 불확실성에 대한 표현은 센서의 관점이나 또는 장애물의 관점이나에 따라 달라지게 된다. 먼저, 중첩 초음파 센서 링의 관점에서 보면 감지된 장애물이 세분된 3개 감지 소영역 중 어느 한 곳에 나타난 셈이므로, 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도는 감지 소영역의 넓이 가운데 최댓값으로 나타낼 수

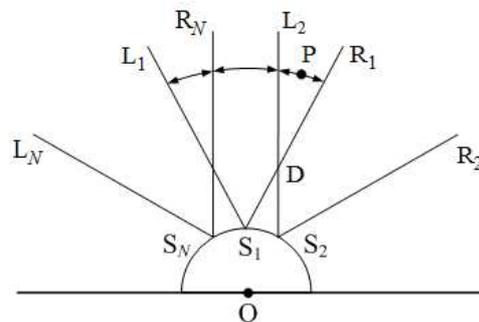


그림 1. 빔 폭 중첩으로 인한 위치 불확실성 감소.
Fig. 1. Positional uncertainty reduction due to beam overlap.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 9. 26., 수정: 2012. 2. 9., 채택확정: 2012. 2. 13.

김성복, 김현빈: 한국외국어대학교 디지털정보공학과

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

※ 이 연구는 2012학년도 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

있을 것이다. 여기서 장애물 탐지 및 회피를 전제로 한 중첩 초음파와 센서의 위치 불확실성은 가능한 보수적으로 산정되어야 한다는 점에 유의할 필요가 있다. 반면, 감지된 장애물 관점에서 보면, 분할된 3개 불확실성 원호 중 어느 곳에 위치한 셈이므로, 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도는 분할된 불확실성 원호 길이 가운데 최댓값으로 나타낼 수 있을 것이다.

중첩 초음파와 센서 링을 구성하는 초음파와 센서들은 자체 크기로 인해 반경이 영이 아닌 원주 상에 배치되게 된다. 초음파와 센서는 제각기 자신의 꼭지점으로부터 감지된 장애물까지의 측정 거리를 제공하지만, 장애물 탐지 및 회피 기능의 구현을 위해서는 중첩 초음파와 센서 링의 중심 O를 기준으로 한 장애물까지의 거리로 변환되어야 한다[12]. 한편, 그림 1에서 보듯 중첩 초음파와 센서 링의 반경이 영이 아닌 한, 인접 초음파와 센서 사이에 장애물 감지 사각 구역이 생기게 된다. 장애물 감지 사각 구역을 고려하여 중심 O를 기준으로 한 중첩 초음파와 센서 링의 장애물 탐지 범위를 정하면, 최소 장애물 거리는 장애물 감지 사각 구역의 꼭지점 D까지의 거리이고, 최대 장애물 거리는 초음파와 센서의 최대 감지 거리 $\rho_{s,max}$ 에 상응하는 거리가 된다[13].

본 논문에서는 중첩 초음파와 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위해 서로 다른 3가지 유형의 성능 지표를 제시하고 특성을 비교 분석해 보도록 한다. II 장에서는 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 감지 소영역의 넓이로 나타내고, 측면과 중앙 감지 소영역간 넓이의 근접도로써 제1형 성능 지표를 정의한다. III 장에서는 감지 소영역의 넓이에 기초하되 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도와 장애물 탐지 범위의 크기를 함께 고려하여 제2형 성능 지표를 정의한다. IV 장에서는 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 감지 소영역에 걸쳐진 불확실성 원호 길이로 나타내고, 장애물 탐지 범위 내에서의 불확실성 원호 길이의 평균값으로써 제3형 성능 지표를 정의한다. V 장에서는 상용 저지향성 초음파와 센서 사용을 전제로 하여 중첩 초음파와 센서 링의 사양에 따른 제안된 3가지 유형의 성능 지표 값의 변화 양상을 비교 검토한다. 마지막으로, VI 장에서는 결론을 내린다.

기본적으로, 일군의 동일 유형의 저지향성 초음파와 센서들이 반경이 영이 아닌 원주 상에 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치되어 있다고 가정한다.

II. 제1형 성능 평가 지표

중첩 초음파와 센서 링에 의해 감지된 장애물은 빔 폭 중첩으로 인해 세분된 3개 감지 소영역 중 어느 한 곳에 속하게 되므로, 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 나타내기 위한 기준으로서 감지 소영역의 넓이를 고려할 수 있다[13]. 또한, 중첩 초음파와 센서 링의 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 최소화하기 위해서는 3개 감지 소영역의 넓이가 가능한 서로 같아지도록 하는 것이 바람직하다. 그림 2는 영이 아닌 반경 $r(>0)$ 의 원주 상에 N 개의 동종 초음파와 센서가 일정 간격 $\beta(= \frac{360^\circ}{N})$ 로 배치된 중첩 초음파와 센서 링 가운데 3개의 인접 초음파와 센서를 보이고 있다. 주어진 초음

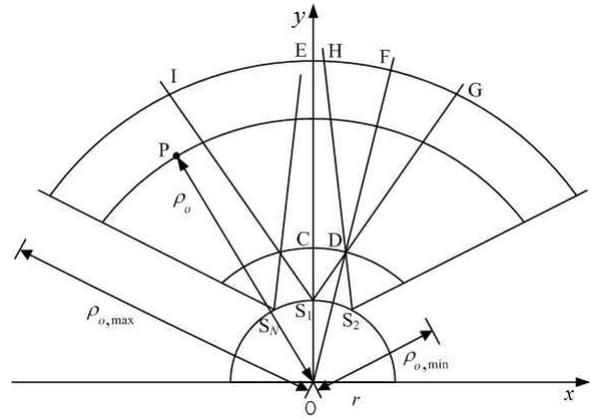


그림 2. 빔 폭이 중첩된 3개의 인접 초음파와 센서.
Fig. 2. Three adjacent ultrasonic sensors with their beams overlapped.

파와 센서의 빔 폭을 α 라 하고, 최대 장애물 감지 거리를 $\rho_{o,max}$ 라 하면, 그림 2에서 $\overline{OS_1} = r$, $\angle CS_1D = \frac{\alpha}{2}$, 그리고 $\angle S_1OD = \frac{\beta}{2}$ 가 된다.

측면과 중앙 감지 소영역간 넓이의 비율을 토대로 중첩 초음파와 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위한 제1형 성능 지표를 정의하면 다음과 같다.

$$\kappa_I = \left| \frac{S(DHF)}{S(CEHD)} - 1.0 \right| \tag{1}$$

위에서 $S(DHF)$ 는 점 D, H, 그리고 F로 정의되는 구역의 면적으로 우측 감지 소영역 넓이의 절반을 나타내고, $S(CEHD)$ 는 점 C, E, H, 그리고 D로 정의되는 구역의 면적으로 중앙 감지 소영역 넓이의 절반을 나타낸다. 중첩 초음파와 센서 링의 위치 불확실성을 최소화하기 위해서는 $S(CEHD)$ 와 $S(DHF)$ 를 가능한 서로 근접시켜야 하므로, (1)로 주어진 성능 지표 κ_I 의 값이 최소가 되도록 하여야 한다. 한편, (1)을 약간 변형하여 중첩 초음파와 센서 링의 장애물 탐지 성능 지표를 재정의해 보면[13]

$$\kappa'_I = \left| \frac{S(CEHD)}{S(DHF)} - 1.0 \right| \tag{2}$$

(1)에 포함되어 있는 $S(DHF)$ 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$S(DHF) = S(OHF) - S(OHD) \tag{3}$$

여기서

$$S(OHF) = \frac{1}{2} \rho_{o,max}^2 \times \angle HOF \tag{4}$$

$$S(OHD) = \frac{1}{2} \rho_{o,min} \times \rho_{o,max} \times \sin(\angle HOF) \tag{5}$$

위 식의 $\angle HOF$ 를 구하기 위해서는 점 E와 점 H를 알아야 하는데, 점 E는 좌표값이 $\rho_{o,max}$ 인 y 축 상의 점이고, 점 H는 점 O를 중심으로 반경이 $\rho_{o,max}$ 인 원과 초음파 센

서 S_2 의 좌측 경계선과의 교점으로 얻어질 수 있다. 다음, ΔEOH 으로부터,

$$\cos(\angle EOH) = \frac{\overrightarrow{OE} \cdot \overrightarrow{OH}}{\overrightarrow{OE} \times \overrightarrow{OH}} \quad (6)$$

위 식으로부터 $\angle EOH$ 가 구해지면, $\angle HOF$ 는

$$\angle HOF = \angle EOF - \angle EOH = \frac{\beta}{2} - \angle EOH \quad (7)$$

다음, (1)에 포함되어 있는 $S(CEHD)$ 에 대한 계산식은

$$S(CEHD) = S(CEFD) - S(DHF) \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} S(CEFD) &= \frac{1}{2}(\rho_{o,max}^2 - \rho_{o,min}^2) \times \angle EOF \\ &= \frac{1}{2}(\rho_{o,max}^2 - \rho_{o,min}^2) \times \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

이고 $S(DHF)$ 는 (3)으로 주어진다.

III. 제2형 성능 평가 지표

중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위한 두 번째 성능 지표의 정의를 위해 다음 세 가지 사항을 고려하도록 한다. 첫째, 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도를 3개 감지 소영역의 넓이 중 최댓값으로 나타내어 고려한다. 둘째, 장애물 탐지 범위의 크기를 3개 감지 소영역의 넓이의 합으로 나타내어 고려한다. 마지막으로, 성능 지수 정의 시 적절한 정규화를 도입함으로써 중첩 초음파 센서 링의 상대적 스케일 차이로 인한 영향이 배제될 수 있도록 한다.

중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도와 장애물 감지 영역 크기를 각각 표현하면

$$\zeta_1 = \max(S_C, S_R) \quad (10)$$

$$\zeta_2 = S_C + 2 \times S_R \quad (11)$$

여기서

$$S_C = \frac{2 \times S(CEHD)}{S(S_1IG)} \quad (12)$$

$$S_R = \frac{2 \times S(DHF)}{S(S_1IG)} \quad (13)$$

위에서 $S(S_1IG)$ 는 점 S_1 , I, 그리고 G로 정의되는 구역의 면적으로 주어진 단일 초음파 센서의 전체 장애물 감지 영역의 넓이로서

$$S(S_1IG) = \frac{1}{2} \rho_{s,max}^2 \times \alpha \quad (14)$$

$S(S_1IG)$ 가 일정한 값인데 반해 $S(CEHD)$ 와 $S(DHF)$ 는 모두 빔 폭 중첩 상태에 그 값이 달라짐에 주목하라.

중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 관점에서 위치 불확실성 정도는 가능한 적을수록 바람직하고 반면 장애물 감지 영역 크기는 가능한 클수록 바람직하다. (10)과 (11)을

이용하여, 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위한 제2형 성능 지표 다음과 같이 정의하도록 한다.

$$\kappa_{II} = \sqrt{\zeta_1^2 + (\zeta_2 - 1)^2} \quad (15)$$

기하학적으로 위의 성능 평가 지표 κ_{II} 는 $\zeta_1 \zeta_2$ 평면상의 단위 정다각형 내의 주어진 한 점 (ζ_1, ζ_2) 으로부터 고정된 점 (0,1)까지의 길이를 나타내고 있다. 여기서, (ζ_1, ζ_2) 는 주어진 중첩 초음파 센서 링의 현재 성능 상태를 나타내며, (0,1)은 장애물 탐지 시 위치 불확실성 정도가 전무하고 장애물 감지 영역 크기가 최대인 가장 이상적인 성능 상태를 나타낸다. 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 최소화하기 위해서는 주어진 한 점 (ζ_1, ζ_2) 과 고정 점 (0,1) 간의 길이가 가능한 짧아야 하므로, (15)로 주어진 성능 지표 κ_{II} 의 값을 최소가 되도록 하여야 한다.

그림 2로부터,

$$S(S_1IG) \geq 2 \times S(CEGD) \quad (16)$$

여기서

$$S(CEGD) = S(CEHD) + 2 \times S(DHF) \quad (17)$$

(12), (13), (16), 그리고 (17)로부터,

$$0 \leq S_C, S_R, (S_C + 2 \times S_R) \leq 1.0 \quad (18)$$

위 결과를 이용하면, (10)과 (11)로부터,

$$0 \leq \zeta_1, \zeta_2 \leq 1.0 \quad (19)$$

(15)로 주어진 성능 지표 κ_{II} 의 값은 중첩 초음파 센서 링의 상대적 스케일 차이로 인한 영향을 받지 않게 됨을 알 수 있다.

IV. 제3형 성능 평가 지표

앞에서 정의된 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위한 제1형과 제2형 성능 지표는 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 척도로서 3개 감지 소영역의 넓이를 고려하고 있는 바, 양자 모두 중첩 초음파 센서 링의 관점에서 정의된 성능 지표라 할 수 있다. 이와 달리, 감지되는 장애물 관점에서 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 지표를 정의할 수 있는데, 이를 위해서는 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 척도로서 감지 소영역에 걸쳐진 불확실성 원호 길이를 고려할 수 있다.

그림 3에서와 중심 O를 기준으로 한 장애물 거리 ρ_o 가 주어진다고 할 때, 중첩 초음파 센서 링의 국부적 위치 불확실성을 표현하면

$$l_{eff} = \max(\widehat{R_1 F_1}, \widehat{F_1 G_1}) \quad (20)$$

여기서

$$\widehat{R_1 F_1} = \rho_o \times \angle R_1 O F_1 \quad (21)$$

$$\widehat{F_1 G_1} = \rho_o \times \angle F_1 O G_1 \quad (22)$$

동중 초음파 센서가 일정 간격으로 배치되었다고 하면

$$\frac{1}{3}A_{ori} \leq A_{eff} \leq A_{ori} \quad (37)$$

(36)과 (37)로부터,

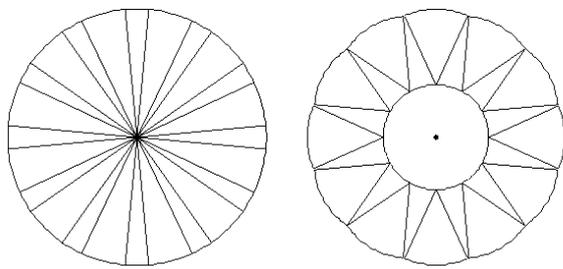
$$\frac{1}{3} \leq \kappa_{III} \leq 1 \quad (38)$$

중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 최소화를 위해서는 (36)으로 주어진 성능 지표 κ_{III} 의 값이 가능한 그 최솟값인 $\frac{1}{3}$ 에 근접하도록 하여야 한다. 또한, (38)에서 보듯이, 성능 지표 κ_{III} 의 값은 중첩 초음파 센서 링의 상대적 스케일 차이로 인한 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

V. 성능 지표 변화 양상 비교

대표적인 상용 저지향성 초음파 센서인 Murata사의 MA40B8을[15] 사용한다는 전제 아래, 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위해 이제까지 제시된 3가지 유형의 성능 지표의 변화 양상을 비교 검토하도록 한다. 초음파 센서의 사용 개수가 $N=12$ 로 주어진다 하고, 중첩 초음파 센서 링의 반경을 $r=0$ cm로부터 $r=209.24$ cm까지 증가시킬 때, 중첩 초음파 센서의 성능 지표 값의 변화를 살펴보기로 한다. 그림 4에 보인 바와 같이, $r=0$ cm와 $r=209.24$ cm는 각각 인접 초음파 센서간의 최소한의 빔 폭 중첩이 보장되기 위한 최소 반경과 과도한 빔 폭 중첩이 회피되기 위한 최대 반경을 나타낸다[14]. MA40B8의 주요 파라미터인 초음파 센서 빔 폭은 $\alpha=50^\circ$ 이고 최대 감지 거리는 $\rho_{s,max}=300$ cm로서 왕복 거리기준 600 cm에 해당한다.

그림 5는 중첩 초음파 센서 링의 반경이 최솟값인 $r=0$ cm에서 시작하여 최댓값인 $r=209.24$ cm까지 증가 되는 동안, (1)로 정의되는 제1형 성능 평가 지표 κ_I 의 변화 양상을 보이고 있다. 그림 5(a)와 5(b)에서 보듯이, 중앙 감지 소영역의 넓이 S_C 의 값은 0.2에서 시작하여 포물선 형태로 증가하다 감소하여 0.0으로 마감하는데 반해, 우측 감지 소영역의 넓이 S_R 의 값은 0.4에서 시작하여 계속 감



(a) The minimum radius, $r_{min} = 0$ cm. (b) The maximum radius, $r_{max} = 209.24$ cm.

그림 4. $N=12$ 개의 초음파 센서의 원형 배치.
Fig. 4. Two circular arrangements of $N=12$ ultrasonic sensors.

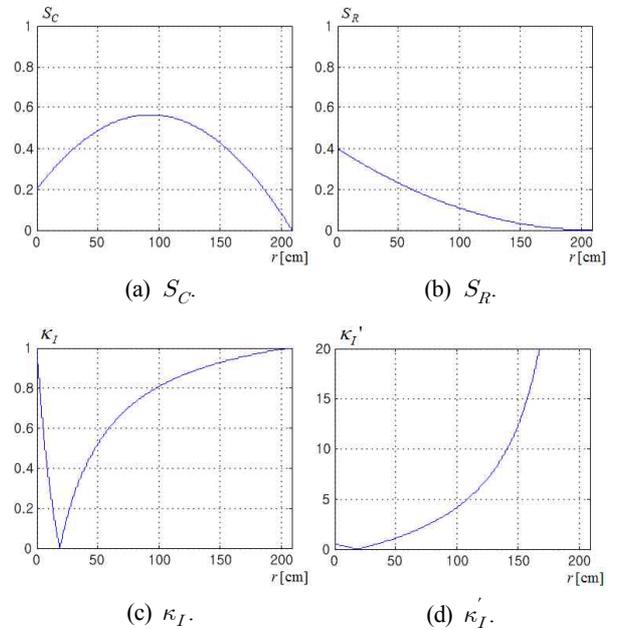


그림 5. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 제1형 성능 평가 지표 κ_I 의 변화 양상.

Fig. 5. The change of type I performance index κ_I depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

소하여 0.0으로 마감된다. 그림 5(c)에서 보듯이, (1)로 주어진 제1형 성능 지표 κ_I 의 값은 1.0에서 시작하여 감소하여 $r=18.81$ cm에서 최솟값 0.0에 이르고 이후 계속 증가하여 1.0으로 마감됨을 관찰할 수 있다. 여기서, S_C 와 S_R 모두 영이 아닌 값을 갖는 최소 반경 $r=0$ cm의 경우 그리고 S_C 와 S_R 의 값이 모두 영인 최대 반경 $r=209.24$ cm의 경우를 구별되지 못하는 점은 제1형 성능 지표 κ_I 의 단점이라 할 수 있다. 한편, 그림 5(d)는 (2)로 정의되는 변형 성능 지표 κ_I' 의 변화 양상을 보이고 있는데, 제1형 성능 지표 κ_I 에 비해 최소 반경의 경우와 최대 반경이 구별된다는 장점이 있는 반면 성능 지표 κ_I' 값의 범위가 0.0에서 무한대로 유한하지 않다는 점은 성능 평가 지표로서의 단점이라 할 수 있다.

그림 6은 중첩 초음파 센서 링의 반경이 최솟값인 $r=0$ cm에서 시작하여 최댓값인 $r=209.24$ cm까지 증가 되는 동안, (15)로 정의되는 제2형 성능 평가 지표 κ_{II} 의 변화 양상을 보이고 있다. 그림 6(a)에서 보듯이, 위치 불확실성 정도를 나타내는 지표인 ζ_1 의 값은 0.4에서 시작하여 감소하여 $r=18.81$ cm에서 최솟값 0.33에 이르고, 이후 포물선 형태로 증가하다 감소하여 0.0으로 마감한다. 반면, 그림 6(b)에서 보듯이, 감지 영역 크기를 나타내는 지표인 ζ_2 의 값은 1.0에서 시작하여 계속 감소하여 0.0으로 마감된다. 그림 6(c)는 $\zeta_1\zeta_2$ 평면상의 변화를 보이고 있는데, (0.4,1.0)에서 시작하여 (0.33,0.995)를 경유한 후 포물선 형태의 궤적을 거쳐 (0.0,0.0)에서 마감한다. 마지막으로, 그림 6(d)에서 보듯이, (15)로 주어진 제2형 성능 지표 κ_{II} 의 값은 0.4에서

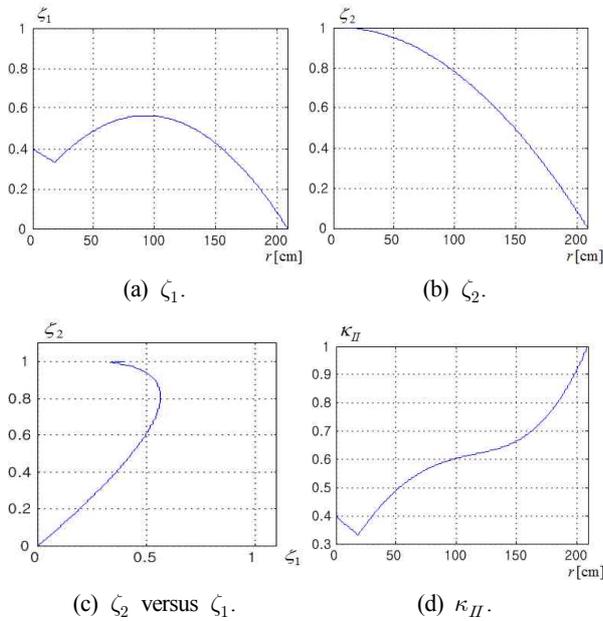


그림 6. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 제2형 성능 평가 지표 κ_{II} 의 변화 양상.

Fig. 6. The change of type II performance index κ_{II} depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

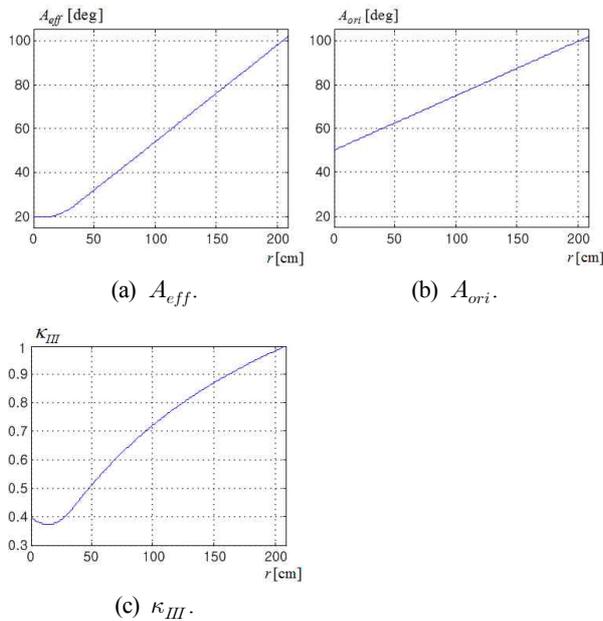


그림 7. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 제3형 성능 평가 지표 κ_{III} 의 변화 양상.

Fig. 7. The change of type III performance index κ_{III} depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

시작하여 감소하여 $r = 18.81$ cm에서 최솟값 0.33에 이르고 이후 계속 증가하여 1.0으로 마감됨을 관찰할 수 있다. 최소 반경 $r = 0$ cm의 경우와 최대 반경 $r = 209.24$ cm의 경우가 구별되고, 또한 성능 지표 값의 범위가 0.0 에서 최대 $\sqrt{2}$ 로 유한하다는 점은 제2형 성능 지표 κ_{II} 의 장점이라

할 수 있다.

그림 7은 중첩 초음파 센서 링의 반경이 최솟값인 $r = 0$ cm에서 시작하여 최댓값인 $r = 209.24$ cm까지 증가 되는 동안, (36)으로 정의되는 제3형 성능 평가 지표 κ_{III} 의 변화 양상을 보이고 있다. 그림 7(a)와 그림 7(b)에서 보듯이, 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭 A_{eff} 의 값은 20.0° 에서 시작하여 $r = 20$ cm 부근까지는 거의 변화가 없다가 그 이후는 계속 증가하여 101.84° 로 마감하는 반면, 단일 초음파 센서의 유효 빔 폭 A_{ori} 의 값은 50.0° 에서 시작하여 계속 거의 선형적으로 증가하다 101.84° 로 마감한다. 그림 7(c)에서 보듯이, (36)으로 주어진 제3형 성능 지표 κ_{III} 의 값은 0.4에서 시작하여 감소하여 $r = 14.37$ cm에서 최솟값 0.33에 이르고 이후 계속 증가하여 1.0으로 마감됨을 관찰할 수 있다. 제2형 성능 지표 κ_{II} 에서와 같이 최소 반경의 경우와 최대 반경의 경우가 구별되고, 또한 성능 지표 값의 범위가 유한하다는 점은 제3형 성능 지표 κ_{III} 의 장점이라 할 수 있다.

VI. 결론

본 논문은 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능 평가를 위한 상이한 3가지 유형의 성능 지표를 제시하고 특성을 상호 비교 분석하였다. 먼저, 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 감지 소영역의 넓이로 나타내고, 측면과 중앙 감지 소영역간 넓이의 근접 정도으로써 제1형 성능 지표를 정의하였다. 다음, 감지 소영역의 넓이를 이용하되 장애물 탐지 시 위치 불확실성의 정도와 장애물 탐지 범위의 크기를 함께 고려하여 제2형 성능 지표를 정의하였다. 다음, 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 감지 소영역에 걸쳐진 불확실성 원호 길이로 나타내고, 장애물 탐지 범위 내에서의 불확실성 원호 길이의 평균값으로써 제3형 성능 지표를 정의하였다. 마지막으로, 상용 저지향성 초음파 센서 사용을 전제로 중첩 초음파 센서 링의 사양에 따른 제안된 3개 성능 지표의 값의 변화 양상을 비교 검토하였다. 서로 관점을 달리하여 정의된 3가지 성능 지표들은 개별적으로 또는 결합된 형태로 기존 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 성능을 평가하거나 새로운 중첩 초음파 센서를 최적 설계하는데 있어 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

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] R. R. Murphy, *Introduction to AI Robotics*, The MIT Press, 2000.
 [3] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, 2005.
 [4] B. Choi, S. Kim, C. Kim, Y. Lee, and S. Lee, "Application technology of ultrasonic sensors for autonomous mobile robots," *ICASE Magazine (in Korean)*, vol. 8, no. 5, pp. 31-42, 2002.

- [5] H. Moravec and A. Elfes, "High resolution maps for wide angles sonar," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 116-121, 1985.
- [6] 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.
- [7] P. J. McKerrow, "Echolocation-from range to on-line segments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 11, no. 4, 205-211, 1993.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Y. Choi, W. Choi, and J. Song, "Obstacle avoidance of a mobile robot using low-cost ultrasonic sensors with wide beam angle," *Journal Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 11, pp. 1102-1107, 2009.
- [12] S. Kim and S. Lee, "Positional uncertainty reduction of overlapped ultrasonic sensor ring for efficient mobile robot obstacle detection," *Journal Institute of Signal Processing and Systems (in Korean)*, vol. 10, no. 3, pp. 198-206, 2009.
- [13] S. Kim and H. Kim, "Optimally overlapped ultrasonic sensor ring design for minimal positional uncertainty in obstacle detection," *International Journal Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 1280-1287, 2010.
- [14] S. Kim and H. Kim, "Optimal design of overlapped ultrasonic sensor ring for high resolution obstacle detection," *Journal Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 79-87, 2011.
- [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 한국외국어대학교 디지털정보공학과 졸업. 2011년~현재 한국외국어대학교 대학원 전자정보공학과 석사과정 재학중. 관심 분야는 임베디드 기반 자율 주행 이동로봇의 구현 및 제어.