

중첩 초음파 센서 링의 설계 및 장애물 탐지에의 응용

Design of Overlapped Ultrasonic Sensor Ring and Its Application to Obstacle Detection

김성복, 이상협

Sung-Bok Kim, Sang-Hyup Lee

요약

본 논문에서는 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링을 최적 설계하는 방법과 이를 향상된 해상도의 장애물 탐지에 응용하는 방안에 대해 기술하도록 한다. 기본적으로 일군의 초음파 센서들이 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 원형으로 배치된다고 가정한다. 첫째, 빔 폭 중첩 상태를 활용함으로써 초음파 센서 고유의 위치 불확실성을 현저히 감소시킬 수 있음을 보인다. 둘째, 반경이 영인 이상적인 중첩 초음파 센서 링에 대해, 위치 불확실성을 나타낼 수 있도록 유효 빔 폭의 개념을 도입하고, 유효 빔 폭을 최소화하기 위해 필요한 초음파 센서의 최적 개수를 구한다. 셋째, 일정 반경의 실제 중첩 초음파 센서 링을 대상으로, 위치 불확실성 정도를 표현하는 설계 지수를 정의하고, 상용 저지향성 초음파 센서를 구성되는 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 예를 제시한다. 넷째, 초음파 센서의 측정 거리로부터 이동로봇 중심 기준 장애물의 위치를 산정하기 위한 기하학적 방법을 기술한다. 마지막으로, 한 쪽이 열린 평면 장애물 탐지 실험을 통해, 자체 제작된 초음파 센서 링의 장애물 탐지 해상도가 향상됨을 입증한다.

Abstract

This paper presents the optimal design method of an overlapped ultrasonic sensor ring for reduced positional uncertainty, and its application to the obstacle detection with improved resolution. Basically, it is assumed that a set of ultrasonic sensors are installed to form a circle at regular intervals with their beams overlapped. First, exploiting the overlapped beam pattern, the positional uncertainty inherent to an ultrasonic sensor is shown to be significantly reduced. Second, for an ideal ultrasonic sensor ring of zero radius, the effective beam width is defined to represent the positional uncertainty, and the optimal number of ultrasonic sensors required for minimal effective beam width is obtained. Third, for an actual ultrasonic sensor ring of nonzero radius, the design index is defined to represent the degree of positional uncertainty, and an optimal design of an overlapped ultrasonic sensor ring consisting of commercial ultrasonic sensors with low directivity is given. Fourth, given measured distances from ultrasonic sensors, the geometric method is described to compute the obstacle position with reference to the center of a mobile robot. Finally, through experiments using our overlapped ultrasonic sensor ring prototype, the validity and performance of the proposed method is demonstrated.

Keywords : ultrasonic sensor, overlapped beam pattern, positional uncertainty, optimal design, obstacle detection

1. 서론

지능형 이동로봇의 핵심 기술로는 자기 위치 추정 기술, 환경 지도 작성 기술, 장애물 탐지 및 회피 기술 등을 들 수 있다 [1]. 1980년대 중반 미국에서 환경 지도 작성 및 장애물 탐지를 위해 기존의 카메라 대신 초음파 센서를 사용하는 시도가 이루어졌다 [2, 3]. 이러한 시도는 기대 이상의 성과를 거두었으며, 이를 계기로 초음파 센서의 사용이 전 세계로 확산되었다. 초음파 센서의 경우와 비교하여, 카

메라는 데이터 처리 소요 연산이 복잡하여 실시간 적용에 한계가 따르고, 적외선 센서는 주변 빛에 민감하여 장애물 존재 유무 판정에 보다 적합하며, 한편 레이저 스캐너는 거리 측정 성능이 우수한 반면 고가여서 보급형 이동로봇에 적용이 어렵다는 문제를 안고 있다.

초음파 센서는 거리 측정 방식에 따라 직접파 방식과 반사 방식으로 분류되며, 직접파 방식의 경우 송수신이 분리되는 반면, 반사 방식의 경우에는 송수신 분리형과 송수신 일체형이 있다 [4, 5]. 이동로봇의 장애물 탐지 용도로는 주로 송수신 분리형 반사 방식이 사용되며, 송신부에서 발사된 초음파가 장애물에 의해 반사되어 수신부에 의해 검출되기까지의 경과 시간으로부터 장애물 거리를 산출한다. 초음파 센서는 원뿔 형태의 초음파 빔을 이용하여 장애물 탐지하는 장치로서 빔 폭 내에 위치한 장애물까지의 거리 정보를 제공하나 장애물의 정확한 위치는 모르는 상태로

*한국의국어대학교 디지털정보공학과

투고 일자 : 2009. 12. 31 수정완료일자 : 2010. 1. 21

계재확정일자 : 2009. 1. 29

*이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(KRF-2007-521-D00163)과 2009학년도 한국의국어대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

남게 되는데, 이를 초음파 센서의 위치 불확실성이라 부른다.

초음파 센서의 위치 불확실성을 확률적으로 표현하기 위한 여러 가지의 초음파 센서 모델이 제안되었다. 통상 초음파 센서의 모델은 장애물 점유 구역과 비점유 구역에 대해 달리 정의되나, 여기서는 장애물 점유 구역의 모델만 살펴 보도록 한다. 먼저, 정규 분포 모델에서는 장애물이 확률적으로 원뿔의 중심축 가까이 그리고 원호 가까이 위치할 가능성이 높아진다고 가정한다 [3, 6]. 다음, 균일 분포 모델에서는 장애물이 원호 상에 존재하되 원호 내 임의의 지점에 위치할 확률이 균일하다고 가정한다 [7-9]. 마지막으로, 임펄스 모델에서는 장애물이 원뿔의 중심축과 원호의 교점에 위치한다고 가정하고 있다 [10-12]. 위와 같은 위치 불확실성에 대한 초음파 센서 모델은 환경 지도 작성을 위해서는 상당한 효과를 나타내는 반면, 최악의 경우를 상정해야 하는 장애물 탐지 및 회피에서는 근본적 한계를 지니고 있다고 할 수 있다.

대부분의 자율 주행 이동로봇의 경우 일련의 초음파 센서를 이동로봇의 측면에 일정 간격을 두고 링 형태로 배열하여 전방향의 장애물을 탐지할 수 있도록 하고 있다 [13]. 빔 폭의 크기에 따라 초음파 센서는 빔 폭 12°인 Polaroid사의 600 Series와 [14] 같은 고가의 고지향성 센서 그리고 빔 폭 50°인 Murata사의 MA40B8과 [8] 같은 중저가의 저지향성 센서로 구분된다. 고지향성은 중저가의 저지향성면 전방향 Murata사의 MA필요한 센서의 개수가 많아지는] 같Mura위치에 대한 불확실성 문제가 완화되게 된다. 반면, 저지향성은 중저가의 저지향성면 요구되는 센서의 개수가 적어지는] 같Mura위치 불확실성 문제가 심화되게 된다. 본 논문에서는 보급형 이동로봇에의 적용을 염두에 두어 저지향성 초음파 센서를 사용한다고 전제하고 있다.

통상 연구용 이동로봇에서와 같이 다수의 고가 고지향성 초음파 센서를 사용하는 대신, 본 논문의 저자들은 적은 개수의 중저가 저지향성 초음파 센서를 상호 빔 폭이 중첩되도록 배열하여 사용하는 방안에 대해 연구한 바 있다 [15]. 구체적으로, 빔 폭 중첩 상태를 이용하여 초음파 센서 본래의 위치 불확실성을 감소시킬 수 있음을 보이고, 인접한 초음파 센서들의 장애물 거리 데이터로부터 이동로봇 중심의 장애물 위치를 산정하는 방법을 제시하고, 또한 이동로봇의 장애물 탐지에 적합하도록 중첩 초음파 센서 링의 센서 모델을 수립하였다. 적은 개수의 저렴한 초음파 센서를 중첩 배치함으로써, 다수의 고가 초음파 센서를 사용한 경우에 비해 장애물 탐지 성능 저하 없이도 센서 장치 비용 및 데이터 처리 비용을 줄일 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 중첩 초음파 센서 링을 최적 설계하는 방법과 효율적인 장애물 탐지에의 응용을 다룬다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는, 빔 폭 중첩으로 인해 초음파 센서 고유의 위치 불확실성이 감소됨을 보인다. III장에서는, 반경이 영인 이상적인 중첩 초음파 센서 링에 대해 위치 불확실성을 나타내도록 유효 빔 폭을 정의하고, 이를

최소로 하는 초음파 센서의 수를 구한다. IV장에서는, 일정 반경의 실제 중첩 초음파 센서 링에 대해 위치 불확실성 정도를 표현하는 설계 지수를 정의하고, 상용 저지향성 초음파 센서를 이용한 최적 설계 예를 제시한다. V장에서는, 초음파 센서의 측정 거리로부터 이동로봇 중심 기준 장애물 위치의 산정을 기술한다. VI장에서는, 평면 장애물 탐지 실험을 통해, 제작된 중첩 초음파 센서 링의 효용성과 성능을 입증한다. 마지막으로, VII장에서 결론을 맺는다.

II. 중첩 초음파 센서의 위치 불확실성 감소

그림 1은 원뿔 빔의 꼭지점을 공유하며 상호 빔 폭이 중첩된 인접 초음파 센서를 보이고 있다. 그림 1에서 좌측 초음파 센서 S_1 의 빔 폭은 $L_1S_1R_1$, 우측 초음파 센서 S_2 의 빔 폭은 $L_2S_2R_2$ 로 표시하고, 그리고 초음파 센서에 의해 탐지된 장애물 P의 실제 위치는 굵은 점으로 표시하고 있다. 점 P는 초음파 센서의 꼭지점으로부터 실제 전방 장애물까지의 최단 지점에 해당한다. 그림 1a)에서 보듯, 빔 폭 중첩으로 인해 2개 초음파 센서의 전체 감지 영역이 I 영역, II 영역, III 영역 등 3개의 감지 소영역으로 나뉘어 질 수 있음 알 수 있다.

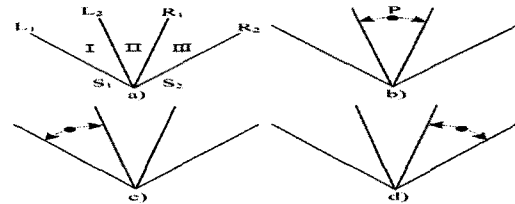


그림 1. 중첩 초음파 센서에 의한 단일 장애물 탐지.
Fig. 1. Single obstacle detection using overlapped ultrasonic sensors.

1. 단일 장애물의 경우

단일 장애물의 경우 중첩 초음파 센서에 의한 장애물 탐지에 대해 고려하여 보자. 단일 장애물은 그림 1b), 1c) 그리고 1d)에 보인 것과 같이 3개의 감지 소영역(I, II, III) 중 한 지역에 존재하게 된다. 표 1은 단일 장애물 P의 상대적 위치에 따른 중첩 초음파 센서 S_1 과 S_2 에 의한 거리 측정 결과를 보이고 있다. 표 1에서 'ρ'는 장애물을 탐지한 초음파 센서의 측정 거리를 나타내고, 반면 '∞'는 초음파 센서가 장애물을 탐지하지 못한 상태를 나타낸다.

표 1. 단일 장애물의 상대적 위치에 따른 중첩 초음파 센서의 거리 측정.

Table 1. Ultrasonic sensor distance measurements depending on the position of a single obstacle.

	2b)	2c)	2d)
P	II	I	III
S_1	ρ	ρ	∞
S_2	ρ	∞	ρ

표 1에 보인 것과 같이 장애물이 위치하고 있는 감지 소영역에 따라 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합이 달라진다. 이를 역으로 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합으로부터 장애물이 속하는 감지 소영역을 구분할 수 있음을 의미한다. 표 1을 참조하면, 좌측과 우측 초음파 센서가 모두 유효 측정 거리 데이터를 제공하는 경우('2b'), 감지된 장애물은 세부 영역 II에 존재하고, 반면 좌측 혹은 우측 초음파 센서 하나만이 유효 측정 거리 데이터를 제공하는 경우('2c') 혹은 '2d'), 감지된 장애물은 세부 영역 I 혹은 III에 존재함을 알 수 있다. 그림 1에 중첩 초음파 센서에 의해 감지된 단일 장애물에 대한 위치 불확실성을 원호의 각도로써 나타내었다. 인접 초음파 센서간의 빔 폭 중첩 상태를 이용함으로써 초음파 센서 고유의 위치 불확실성을 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

2. 이중 장애물의 경우

이중(2개) 장애물의 경우 중첩 초음파 센서에 의한 장애물 탐지에 대해 고려하여 보자. 여기서, 주변에 존재하는 장애물의 개수와 무관하게 인접 초음파 센서에 의해 탐지되는 장애물의 개수는 최대 2입에 유의해야 한다. 탐지된 2개 장애물 중 하나는 원거리에, 다른 하나는 근거리에 위치하고 있다고 하자(2개 장애물이 동일 거리에 있다면 단일 장애물의 경우로 귀착됨). 원거리 장애물이 초음파 센서 S₁의 감지 영역(I 혹은 II)에 존재하고, 단거리 장애물이 초음파 센서 S₂에 의해 감지 영역(III 혹은 II)에 존재한다고 하면, 가능한 경우는 그림 2a)-2d)에 보인 것과 같다. 4가지 가능성 중 그림 2b)와 2d)는 단일 장애물의 경우로 귀착되므로, 그림 2a)와 2c)만이 이중 장애물의 경우로 간주될 수 있다. 한편, 그림 2e)-2g)는 각각 그림 2a)-2c)와 좌우 대칭인 상태를 보이고 있으며, 따라서 이중 장애물이 3개의 소감지 영역(I, II, III)에 존재할 가능성은 총 7가지가 된다.

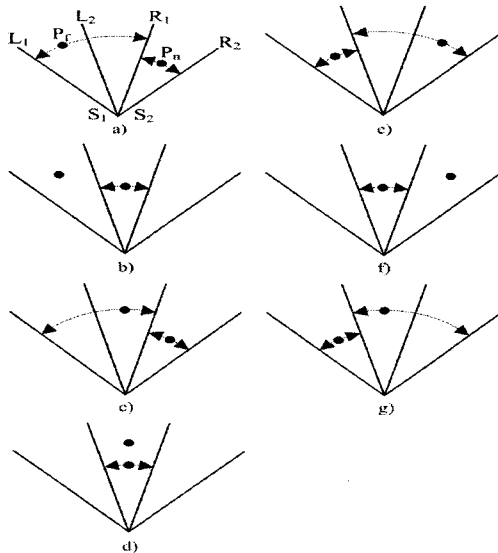


그림 2. 중첩 초음파 센서에 의한 이중 장애물 탐지.
Fig. 2. Double obstacle detection using overlapped ultrasonic sensors.

원거리 장애물과 근거리 장애물을 각각 P_f와 P_n이라고 하고, 그리고 초음파 센서의 측정 거리를 각각 ρ_f와 ρ_n(<ρ_f)이라 하자. 표 2는 그림 2a)-2d)에 보인 이중 장애물 P_f와 P_n의 상대적 위치에 따른 중첩 초음파 센서 S₁과 S₂에 의한 거리 측정 결과를 보이고 있다.

표 2를 참조하면, 좌측 초음파 센서의 측정 거리가 우측 초음파 센서의 측정 거리 보다 큰 경우('2a')와 '2c'), 근거리 장애물은 감지 소영역 III에 존재하는 반면 원거리 장애물은 좌측 초음파 센서 감지 영역(I 혹은 II)에 존재함을 알 수 있다. 한편, 좌측과 우측 초음파 센서의 측정 거리가 동일한 경우('2b') 혹은 '2d'), 감지된 장애물은 세부 영역 II에 존재함을 알 수 있다. 그림 2에 중첩 초음파 센서에 의해 감지된 이중 장애물에 대한 위치 불확실성을 원호의 각도로써 나타내었다. 단일 장애물의 경우에서와 같이 이중 장애물의 경우에도 빔 폭 중첩 상태를 이용하여 장애물에 대한 위치 불확실성을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 이중 장애물의 상대적 위치에 따른 중첩 초음파 센서의 거리 측정.

Table 2. Ultrasonic sensor distance measurements depending on the positions of double obstacles.

	3a)	3b)	3c)	3d)
P _f	I	I	II	II
P _n	III	II	III	II
S ₁	ρ _f	ρ _n	ρ _f	ρ _n
S ₂	ρ _n	ρ _n	ρ _n	ρ _n

III. 이상적 중첩 초음파 센서의 유효 빔 폭

그림 3은 전반향 시계 확보를 위해 빔 폭이 α [deg]인 초음파 센서 N개가 점 O를 중심으로 꼭지점을 공유하며 일정 간격으로 배열된 이상적인 초음파 센서 링을 보이고 있다. 그림 3에서 보듯 인접 초음파 센서간 빔 폭 중첩 상태로 인해 각 초음파 센서의 전체 감지 영역은 3개의 감지 소영역으로 나뉘게 된다. 중앙의 감지 소영역을 β [deg] 그리고 좌측과 우측의 감지 소영역을 q [deg]라고 하면,

$$\beta + 2q = \alpha \tag{1}$$

$$(\beta + q) \times N = 360 \tag{2}$$

여기서 인접한 2개 초음파 센서간의 중첩되는 빔 폭의 크기가 q에 유의해야 한다. 식 (1)과 (2)로부터, 주어진 초음파 센서의 빔 폭 α와 사용 개수 N에 대해, 감지 소영역 β와 q를 표현하면 다음과 같다.

$$\beta = 2 \times \frac{360}{N} - \alpha \tag{3}$$

$$q = \alpha - \frac{360}{N} \tag{4}$$

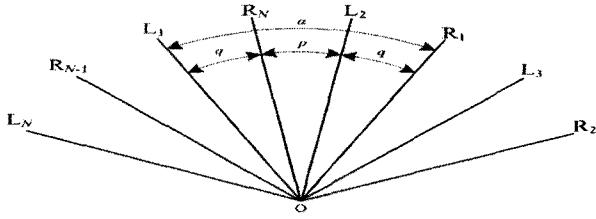


그림 3. 이상적 배열의 중첩 초음파 센서 링.
Fig. 3. Ideally overlapped ultrasonic sensor ring.

장애물 감지 영역 p 와 q 는 0 혹은 그 보다 커야 하므로 ($p, q \geq 0$), 이 조건을 충족하기 위한 초음파 센서의 개수 N 가 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$\frac{360}{\alpha} \leq N \leq 2 \times \frac{360}{\alpha} \quad (5)$$

또한, N 은 양의 정수여야 하므로 그 최소값과 최대값은 각각 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$N_{\min} = \lceil \frac{360}{\alpha} \rceil \quad (6)$$

$$N_{\max} = \lfloor 2 \times \frac{360}{\alpha} \rfloor \quad (7)$$

여기서 $\lceil \cdot \rceil$ 와 $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 각각 올림 연산자와 내림 연산자를 나타낸다.

그림 3에서와 같이 빔 폭 α [deg]인 초음파 센서들을 상호 빔 폭이 중첩되도록 일정 간격으로 배열하게 되면, 장애물 탐지 측면에 있어서는 빔 폭이 p [deg]인 초음파 센서와 빔 폭이 q [deg]인 초음파 센서를 빔 폭 중첩 없이 교대로 배열한 것과 동일한 효과를 나타내게 된다. 한편, 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 목적이 이동로봇의 자율 주행을 위한 장애물 회피에 있다고 전제하면, 이상적인 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성은 최악의 경우를 상정하여 다음과 같이 표현하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

$$\alpha_e = \max(p, q) \quad (8)$$

식 (8)로 주어지는 α_e 를 본 논문에서는 이상적인 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭이라 부른다.

식 (3)과 (4)에서 보듯이, 초음파 센서의 개수 N 이 증가함에 따라 장애물 감지 영역 p 가 감소되면 반면, 장애물 감지 영역 q 는 증가되게 된다. 결과적으로, 통상 식 (8)로 주어지는 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭 α_e 는 초음파 센서 개수가 최소값 N_{\min} 과 최대값 N_{\max} 의 사이일 때 최소화되게 된다. 한편, 가장 이상적인 중첩 초음파 센서 링의 배열 상태는 장애물 감지 영역 p 와 q 가 서로 같도록 ($p=q$)하는 것이라 할 수 있다. 즉,

$$2 \times \frac{360}{N} - \alpha = \alpha - \frac{360}{N} \quad (9)$$

따라서, 주어진 초음파 센서의 빔 폭 α 에 대해, 위치 불확실성을 최소화 하는 초음파 센서의 최적 개수는 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$N^* = \lceil \frac{3}{2} \times \frac{360}{\alpha} \rceil \quad (10)$$

저지항성 상용 초음파 센서인 Murata사의 MA40B8 (빔 폭 $\alpha=50^\circ$)를 예로 들어 살펴보기로 하자. 먼저, 전방향 시계 확보를 위해 필요한 초음파 센서의 최소 및 최대 개수를 구해 보면,

$$N_{\min} = \lceil \frac{360}{50} \rceil = 8 \quad (11)$$

$$N_{\max} = \lfloor 2 \times \frac{360}{50} \rfloor = 14 \quad (12)$$

그림 4는 초음파 센서 개수 N 의 증가에 따른 장애물 감지 소영역 p ('x'로 표시)와 q ('o'로 표시) 그리고 유효 빔 폭 α_e ('o'로 표시)의 변화를 보이고 있다.

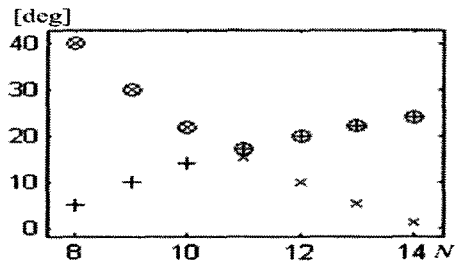


그림 4. 초음파 센서 개수에 따른 이상적 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭의 변화.

Fig. 4. The change of the effective beam width of the ideally overlapped ultrasonic sensor ring according to the number of ultrasonic sensors.

그림 4로부터 위치 불확실성을 최소화 하는 초음파 센서의 개수가 $N=11$ 임을 관찰할 수 있는데, 이는 식 (10)에 의한 결과와 일치하고 있다.

$$N^* = \lceil \frac{3}{2} \times \frac{360}{50} \rceil \approx 11 \quad (13)$$

또한, $N=11$ 일 때 중첩 초음파 센서의 유효 빔 폭이 최소화됨을 관찰 할 수 있으며, 그 값이 식 (3), (4), 그리고 (8)을 이용하여 구해 보면 다음과 같다.

$$\alpha_e^* = 50 - \frac{360}{11} \approx 17.3^\circ \quad (14)$$

비교를 위해, 전방향 시계 확보를 위한 최소 초음파 개수인 $N=8$ 의 경우에 대해, 유효 빔 폭을 구하여 보면,

$$\alpha_e = 2 \times \frac{360}{8} - 50 = 40^\circ \quad (15)$$

적정 개수의 초음파 센서를 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치 함으로써, 초음파 센서 고유의 위치 불확실성을 현저히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 실제 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계

이제까지는 일련의 초음파 센서들이 한 점을 중심으로 꼭지점을 공유하며 이상적으로 배열되어 있다고 가정하였

으나, 실제 자율 주행 이동로봇의 전방향 장애물 탐지를 위해서는 초음파 센서들을 일정 반경의 원주 상에 배치하게 된다. 그림 5는 9개의 초음파 센서들을 센서간의 일정 간격을 유지하되 한 점을 중심으로 배치한 예와 원주 상에 배치한 예를 함께 보이고 있다.

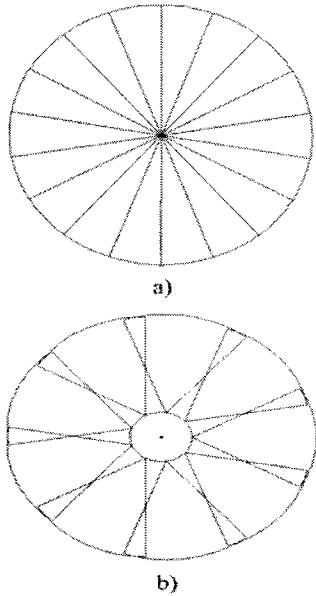


그림 5. 중첩 초음파 센서 링의 예: a) 이상적 배치와 b) 실제 배치.

Fig. 5. An overlapped ultrasonic sensor ring: a) ideal arrangement and b) actual arrangement.

1. 실제 중첩 초음파 센서 링의 특징

일련의 초음파 센서들이 일정 반경의 원주 상에 배치되면, 그림 5b)에 보인 것과 같이 이동로봇에 근접 위치한 장애물을 탐지할 수 없는 상황이 발생한다. 여기서는, 인접 초음파 센서 사이의 장애물 탐지가 불가능한 지역을 장애물 탐지 사각 구역이라 부른다. 한편, 그림 5a)에서와 같이 모든 초음파 센서들의 꼭지점을 일치시키지 않는 한 장애물 탐지 사각 구역의 생성은 불가피하게 된다. 통상 상용 자율 주행 이동로봇에서는 인접 초음파 센서 사이에 적외선 센서를 추가 설치하여 사각 구역에서도 장애물 탐지가 가능하도록 하고 있다.

실제 중첩 초음파 센서 링을 구성하는 초음파 센서들은 제각기 탐지된 장애물에 대해 자신의 꼭지점을 기준으로 한 장애물까지의 측정 거리를 제공하여 준다. 반면, 자율 주행 이동로봇의 장애물 탐지 및 회피 기능의 구현을 위해서는 실제 이동 주체 인 이동로봇의 중심을 기준으로 한 장애물에 대한 위치 정보가 요구되게 된다. 따라서, 중첩 초음파 센서 링을 이동로봇 자율 주행에 적용하기 위해서는 인접 초음파 센서들의 장애물 측정 거리로부터 이동로봇 중심 기준 장애물 위치를 산정할 수 있어야 한다 [15].

이상적인 중첩 초음파 센서 링에서는 그림 5a)에서 보듯이 빔 폭 중첩으로 인해 분할된 각 초음파 센서의 3개의 감지 소영역의 빔 폭이 모두 장애물 거리와 무관하게 일정

하다. 결과적으로, 식 (8)과 같이 감지 소영역의 빔 폭 중 최대값으로 정의되는 이상적인 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭 또한 장애물 거리와 관계없이 일정하게 된다. 반면, 실제 중첩 초음파 센서 링의 경우, 그림 5b)에서 보듯이 장애물 거리에 따라 초음파 센서의 3개 감지 소영역의 빔 폭이 달라지므로, 결과적으로 감지 소영역의 빔 폭 중 최대값 또한 장애물 거리의 함수이게 된다. 따라서, 실제 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭은 초음파 센서의 전체 장애물 감지 범위를 고려하여 정의하여야 할 필요가 있다.

2. 실제 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계

본 논문에서는 일련의 초음파 센서들의 일정 반경의 원주 상에 최적 배치하는 기준으로서 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 고려하기로 한다. 앞서 기술한 바와 같이 중첩 초음파 센서 링의 감지 소영역의 빔 폭이 장애물 거리와 함수인 점을 감안하면, 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 방안으로 초음파 센서의 3개 감지 소영역의 넓이가 모두 같아지도록 할 수 있다. 개념적으로 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 유효 빔 폭을 최소화하는 노력에 상응하게 된다. 본 논문에서는 감지 소영역의 넓이 대신에 소영역내의 일정 간격의 원호 길이 합계를 고려함으로써 최적화에 수반되는 계산 복잡성을 줄이고자 한다.

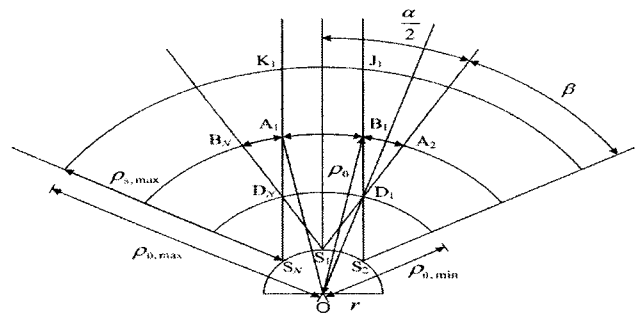


그림 6. 대칭적으로 빔 폭이 중첩된 3개의 인접 초음파 센서.

Fig. 6. Three symmetrically overlapped adjacent ultrasonic sensors.

그림 6은 원주 상에 N개의 초음파 센서가 일정 간격 $\beta (= \frac{360}{N})$ [deg]로 배치된 중첩 초음파 센서 링의 일부 분인 3개의 인접 초음파 센서를 보이고 있다. 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계의 입력으로서 1) 초음파 센서의 빔 폭 α 와 최대 장애물 거리 $\rho_{s,max}$ 그리고 중첩 초음파 센서 링의 반경(이동로봇 중심에서 초음파 센서 꼭지점까지의 거리) r 이 주어진다고 하자.

그림 6에서 보인 것과 같이 장애물 탐지 사각 구역은 인접 초음파 센서의 빔 경계선들과 이동로봇 중심을 중심으로 하는 원에 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_1 으로 정의될 수 있는데, 점 S_1 과 S_2 의 좌표는 주어진 반경 $r(= \overline{OS_1} = \overline{OS_2})$ 과 간격 $\beta(= \angle S_1OS_2)$ 로부터 바로 구할 수 있다. 다음, 점 D_1 의 좌표는 초음파 센서 S_1 의 빔 우측 경계선과 초음파 센서 S_2 의 빔 좌측 경계선의 교점으로부터 구할 수 있으며, 이 두 직선의 식은 이미 알려진 점 S_1 과 S_2 의 좌표와 주어진 빔 폭 α 을 이용하여 표현할 수 있다.

그림 6에서 보듯 초음파 센서의 3개 감지 소영역 가운데 좌측과 우측 감지 소영역이 서로 대칭이므로, 소영역별 원호 길이 합계의 비교는 중앙과 우측 감지 소영역만으로 충분하다. 그림 6에 이동로봇 중심 기준 장애물 거리가 $\rho_o(= \overline{OB_1})$ 일 때, 중앙과 우측 감지 소영역의 빔 폭을 각각 원호 $\widehat{A_1B_1}$ 과 $\widehat{B_1A_2}$ 로써 표시하고 있다. 뒤에서 사용하게 되는 점 B_1 의 좌표는 점 O 를 중심으로 반경이 ρ_o 인 원과 초음파 센서 S_2 의 빔 좌측 경계선과의 교점으로부터 구할 수 있다. 본 논문에서는 감지 소영역별 원호 길이 합계의 비교를 위해 실제 중첩 초음파 센서 링의 장애물 감지 범위를 다음과 같이 정의하도록 한다.

$$\rho_{o, \min} \leq \rho_o \leq \rho_{o, \max} \quad (16)$$

여기서

$$\rho_{o, \min} = \overline{OD_1} \quad (17)$$

$$\rho_{o, \max} = \overline{OJ_1} \quad (18)$$

식 (17)의 $\rho_{o, \min}$ 는 이동로봇 중심으로부터 장애물 탐지 사각 구역의 꼭지점까지의 거리로 점 D_1 의 좌표가 이미 알려져 있으므로 바로 정해지게 된다. 한편, 식 (18)의 $\rho_{o, \max}$ 는 초음파 센서 최대 감지 거리 $\rho_{s, \max}$ 에 상응하는 이동로봇 중심 기준 장애물 거리로서 정하는데 이를 위해서는 점 J_1 의 좌표를 알아야 한다. 그림 7에 보인 것과 같이 점 J_1 의 좌표는 점 S_1 을 중심으로 반경이 $\rho_{s, \max}$ 인 원과 초음파 센서 S_2 의 빔 좌측 경계선과의 교점으로부터 구할 수 있다.

식 (16)으로 주어지는 실제 중첩 초음파 센서 링의 장애물 감지 범위를 M 등분한다고 하면, 그 범위내의 이동로봇 중심 기준 장애물 거리는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\rho_o = \rho_{o, \min} + k\delta\rho_o, \quad k=1, \dots, M \quad (19)$$

여기서

$$\delta\rho_o = \frac{\rho_{o, \max} - \rho_{o, \min}}{M} \quad (20)$$

이미 점 B_1 과 D_1 의 좌표가 알려진 상태이므로, $\triangle B_1OD_1$ 으로부터,

$$\cos(\angle B_1OD_1) = \frac{\overline{OB_1} \cdot \overline{OD_1}}{\overline{OB_1} \times \overline{OD_1}} \quad (21)$$

여기서 ‘ \cdot ’은 벡터 내적을 나타낸다. 식 (21)으로부터 $\angle B_1OD_1$ 가 구해지면,

$$\angle S_1OB_1 = \angle S_1OD_1 - \angle B_1OD_1 \quad (22)$$

여기서 $\angle S_1OD_1$ 은 이미 알려진 점 B_1 과 D_1 의 좌표로부터 바로 정해진다. 이제까지의 결과들을 이용하면, 초음파 센서의 중앙과 우측 감지 소영역의 원호 길이는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\widehat{A_1B_1} = 2 \times \overline{OB_1} \times \angle S_1OB_1 = \widehat{A_1B_1}(k) \quad (23)$$

$$\widehat{B_1A_2} = 2 \times \overline{OB_1} \times \angle B_1OD_1 = \widehat{B_1A_2}(k) \quad (24)$$

여기서 $\angle S_1OB_1$ 과 $\angle B_1OD_1$ 는 모두 라디안으로 표현한 각도이다. 식 (23)과 (24)는 식 (19)로 주어진 장애물 거리에 대한 감지 소영역의 빔 폭을 나타내며 구간 k 의 함수이다.

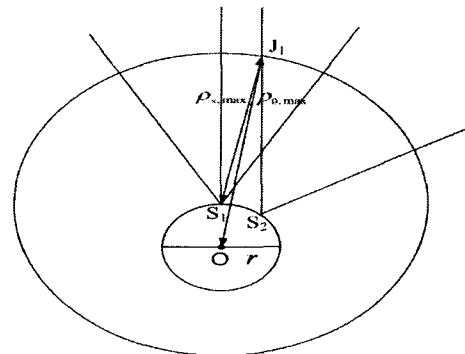


그림 7. 이동로봇 중심 기준 최대 장애물 거리.

Fig. 7. The maximum obstacle distance with respect to the center of a mobile robot.

최종적으로, 실제 중첩 초음파 센서 링의 설계를 위한 최적화 지수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\kappa = \frac{\sum_{k=1}^M \widehat{A_1B_1}(k)}{\sum_{k=1}^M \widehat{B_1A_2}(k)} \quad (25)$$

식 (25)에서 분자는 우측 감지 소영역의 원호 길이 합계를 나타내고, 분모는 중앙 감지 소영역의 원호 길이 합계를 나타낸다. 앞서 기술한 바와 같이 소영역의 원호 길이 합계는 해당 지역의 평균 빔 폭에 상응하므로, 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 최소화시키기 위해서는 식 (25)로 주어지는 최적화 지수 κ 가 가능한 1에 근접하도록 ($\kappa \rightarrow 1.0$), 즉 중앙과 우측 감지 소영역의 평균 빔 폭이 같아지도록 하여야 한다.

실제 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계의 예로는, 특정 초음파 센서(빔 폭 α 와 최대 감지 거리 $\rho_{s, \max}$)와 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 이 주어질 때, 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 최소화하기 위해 요구되는 초음파 센서의 최적 사용 개수 N^* 를 정하는 문제를 상정할 수 있다. 또, 다른 최적 설계의 예로는 특정 초음파 센서(빔 폭 α 와 최

대 감지 거리 $\rho_{s,max}$ 와 초음파 센서의 사용 개수 N 이 주어질 때, 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭을 최소화하기 위한 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 r^* 를 결정하는 문제를 들 수 있다.

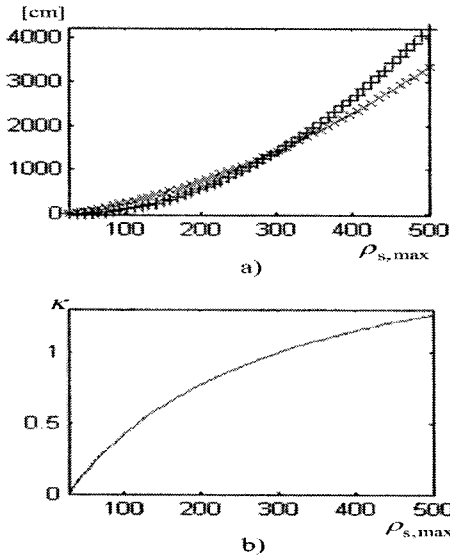


그림 8. 최대 감지 거리에 따른 최적화 지수의 변화.
Fig. 8. The change of the optimization index according to the maximum sensing distance.

Murata사의 MA40B8이 내장된 초음파 센서 모듈 $N=12$ 개를 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=30^\circ$) 반경 $r=19$ cm의 원주 상에 일정 간격으로 배열한($\rho_{o,min}=46.2$ cm) 중첩 초음파 센서 링을 대상으로 구체적으로 살펴보기로 하자. 그림 8a)는 초음파 센서 최대 감지 거리 $\rho_{s,max}(=\rho_{o,max}-r)$ 의 함수로서 식 (25)의 분자('+'로 표시)와 분모('x'로 표시)의 변화를 보이고 있으며, 그림 8b)는 분자 대 분모의 비, 즉 최적화 지수 κ 의 변화를 보이고 있다. 그림 8b)에서 보듯, $\rho_{s,max}$ 가 증가함에 따라 κ 의 값은 $0(\rho_{s,max}=0$ cm)에서 출발하여 최적치인 $1(\rho_{s,max}=301.4$ cm)에 도달한 이후 다시 점차 1에서 멀어짐을 관찰 할 수 있다. 송수신 분리형 반사 방식으로 사용 시 Murata사의 MA40B8의 최대 감지 거리가 $\rho_{s,max}=300$ cm로 주어지므로(왕복 거리 기준 600 cm에 해당), 위와 같이 MA40B8 모듈 12개를 반경 19 cm인 원주 상에 배치한 중첩 초음파 센서 링은 유효 빔 폭을 최소화하는 최적 설계에 속한다는 사실을 알 수 있다.

V. 이동로봇 중심 기준 장애물 위치 산정

자율 주행 이동로봇의 장애물 탐지 및 회피 기능을 구현하기 위해서는 중첩 초음파 센서 링에 의해 제공되는 초음파 센서 꼭지점 기준 장애물 거리로부터 이동로봇의 중심을 기준으로 한 장애물 위치를 산정할 수 있어야 한다.

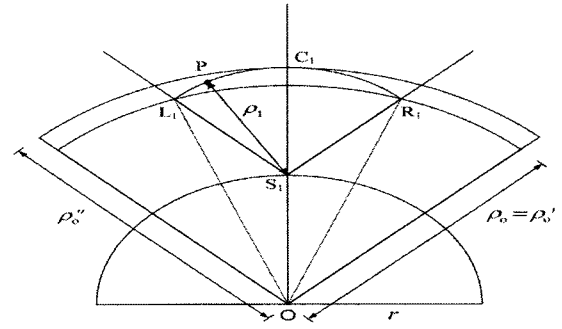


그림 9. 단일 초음파 센서에 의한 탐지된 장애물의 이동로봇 중심 기준 장애물 위치.
Fig. 9. The mobile robot referenced position of an obstacle sensed by a single ultrasonic sensor.

1. 단일 초음파 센서의 경우

단일 초음파 센서의 경우($N=1$)의 이동로봇 중심 기준 장애물 위치 산정에 대해 고려해 보기로 한다. 그림 9에 보인 것과 같이 점 S_1 에 설치된 초음파 센서에 의해 탐지된 장애물 P 까지의 거리를 $\rho_1(=\overline{S_1P})$ 이라 하자. 또, 점 S_1 을 중심으로 반경이 ρ_1 인 원과 초음파 센서 빔의 좌측 경계선, 중앙선, 그리고 우측 경계선과의 교점을 각각 L_1 , C_1 , 그리고 R_1 이라 하자. 탐지된 장애물 P 는 초음파 센서의 위치 불확실성으로 인해 그림 9에 보인 것과 같이 점 S_1 을 중심으로 반경이 ρ_1 인 원호 $\widehat{L_1C_1R_1}$ 상에 존재하게 된다. 즉,

$$\rho_1 = \overline{S_1C_1} = \overline{S_1R_1} \tag{26}$$

초음파 센서 꼭지점 기준 장애물 거리에 상응하는 이동로봇 중심 기준 장애물 거리를 ρ_o 라 하면, 탐지된 장애물 P 는 그림 9에 보인 것과 같이 다음의 범위에 있게 된다.

$$\rho_o' \leq \rho_o \leq \rho_o'' \tag{27}$$

여기서

$$\rho_o' = \overline{OR_1} \tag{28}$$

$$\rho_o'' = \overline{OC_1} \tag{29}$$

장애물 탐지의 궁극적 목적이 이동로봇 자율 주행 시 장애물과의 충돌을 방지하는데 있음을 감안하면, 이동로봇 중심을 기준으로 한 장애물 거리는 최악의 경우를 상정하여 그 최소값인 $\overline{OR_1}$ 으로 정하는 것이 타당하다. 이를 자율 주행 이동로봇 입장에서 표현하면, 이동로봇 중심으로부터 반경 $\overline{OR_1}$ 이내에는 장애물이 전혀 없는, 즉 장애물로부터 완전히 자유로운 상태가 됨을 의미한다. 앞의 이동로봇 중심의 기준 장애물 거리에 대한 논의를 이동로봇 중심을 기준으로 한 장애물 존재 가능 각도에 대해 확장시킬 수 있으며, 그 결과 장애물로부터 자유로운 이동로봇의 시계는 초음파 센서의 중앙선을 기준으로 하여 다음과 같이 정해지게 된다.

$$\angle L_1OR_1 = 2 \times \angle C_1OR_1 \quad (30)$$

결과적으로, 이동로봇 자율 주행 시 장애물로부터 완전히 자유로운 지역은 이동로봇의 중심으로부터 반경이 $\overline{OR_1}$ 이 내이고 초음파 센서 중앙선 기준 좌우 전방 시계 각도가 $\angle C_1OR_1$ 이내인 구역이라고 할 수 있다.

2. 중첩 초음파 센서 링의 경우

실제 중첩 초음파 센서 링의 경우 이동로봇 중심 기준 장애물 위치 산정에 대해 고려해 보기로 한다. 먼저, 그림 10에 보인 것과 같이 중앙에 위치한 초음파 센서 S_1 은 장애물 P 을 탐지하고(장애물 측정 거리 ρ_1) 나머지 좌, 우측의 초음파 센서 S_N 과 S_2 는 장애물을 탐지하지 못하였다고(장애물이 비중첩 빔 영역에 속함) 하자. 점 S_1 을 중심으로 반경이 ρ_1 인 원과 초음파 센서 S_N 의 빔 폭 우측 경계선 그리고 초음파 센서 S_2 의 빔 폭 좌측 경계선의 교점을 각각 G_1 과 F_1 이라 하자. 초음파 센서 S_1 에 의해서만 탐지된 장애물 P 는 그림 10에서 보듯 점 S_1 을 중심으로 반경이 ρ_1 인 원호 $\widehat{G_1C_1F_1}$ (중앙 감지 소 영역의 빔 폭) 상에 존재하게 된다. 이는 앞서 취급한 단일 초음파 센서의 경우와 비교할 때, 단지 장애물 P 가 존재할 수 있는 구역이 $\widehat{L_1C_1R_1}$ 에서 $\widehat{G_1C_1F_1}$ 으로 축소되었을 뿐 동일한 상황이다. 단일 초음파 센서의 경우와 동일한 논의 과정을 거치면, 그 결과 자율 주행 이동로봇이 장애물로부터의 완전히 자유로운 지역은 이동로봇 중심으로부터 반경이 $\overline{OF_1}$ ($> \overline{OR_1}$) 이 내이고 초음파 센서 중앙선 기준 좌우 전방 시계 각도가 $\angle C_1OF_1$ ($< \angle C_1OR_1$) 이내인 구역이라고 할 수 있다. 인접 초음파 센서간 빔 폭 중첩 결과 장애물 자유 구역의 반경이 증가한 반면, 시계 각도는 감소되었음에 주목하여야 한다. 전자는 장애물 회피 자율 주행 시 이동로봇의 운신의 폭을 넓히는 효과가 있으며, 후자는 장애물 위치 추정에 따른 해상도 향상으로 특히 협소한 입구/출구 통과에 도움이 될 수 있을 것이다.

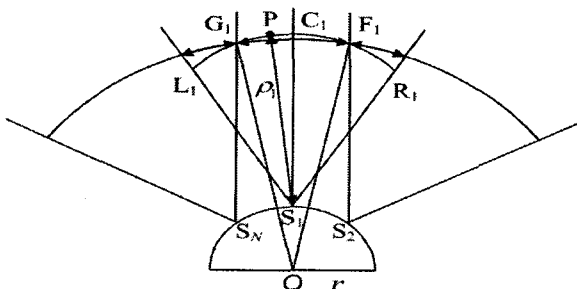


그림 10. 비중첩 빔 영역에 속하는 장애물의 이동로봇 중심 기준 장애물 위치.

Fig. 10. The mobile robot referenced position of an obstacle outside the overlapped beam zone.

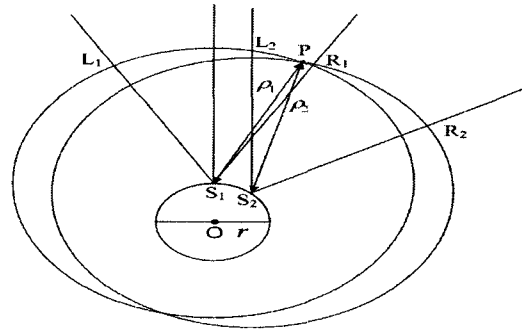
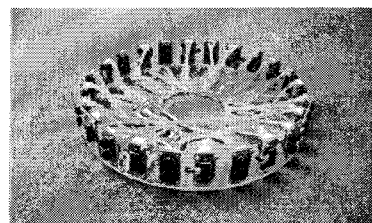


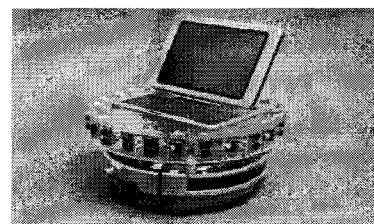
그림 11. 중첩 빔 영역에 속하는 장애물의 이동로봇 중심 기준 장애물 위치.

Fig. 11. The mobile robot referenced position of an obstacle within the overlapped beam zone.

초음파 센서 S_1 과 S_2 가 동시에 장애물을 탐지하였다고(장애물이 중첩 빔 영역에 속함) 하자. 초음파 센서 S_1 에 의한 장애물 측정 거리를 ρ_1 이라 하면, 탐지된 장애물 P 는 초음파 센서의 위치 불확실성에 따라 점 S_1 을 중심으로 반경이 ρ_1 인 원호 $\widehat{L_1R_1}$ 상에 존재하게 된다. 마찬가지로, 두 번째 초음파 센서에 의한 장애물 측정 거리를 ρ_2 라 하면, 탐지된 장애물 P 는 점 S_2 을 중심으로 반경이 ρ_2 인 원호 $\widehat{L_2R_2}$ 상에 존재하게 된다. 두 초음파 센서에 의해 동시에 탐지된 장애물의 위치는 그림 11에 보인 것과 같이 위의 두 원의 교점으로써 구해질 수 있다. 통상 두 원의 교점은 2개로 얻어지지만 두 센서의 상대적 위치를 고려하면 그 중 하나를 장애물 위치로 용이하게 결정할 수 있다. 장애물이 중첩 빔 영역에 있는 경우에는, 앞의 비중첩 영역에서의 장애물 위치 불확실성 문제가 더 이상 제기되지 않으며, 단지 초음파 센서의 장애물 거리 측정 오차만이 장애물 위치 산정의 오차로 나타나게 된다.



a)



b)

그림 12. 제작된 중첩 초음파 센서 링.

Fig. 12. Our ultrasonic sensor ring prototype.

VI. 실험 결과

1. 중첩 초음파 센서 링의 제작

앞에서 검토한 최적 설계 사양에 따라, 빔 폭 $\alpha=50^\circ$ 인 Murata사의 MA40B8이 내장된 송수신 분리형 반사 방식의 초음파 센서 모듈 12개를 사용하여 반경 $r=19\text{ cm}$ 인 원주 상에 $\beta=30^\circ$ 의 간격으로 배열하여 전방향 시계를 갖는 중첩 초음파 센서 링을 제작하였다. 장애물 탐지 사각 구역의 문제를 해소하기 위해 초음파 센서 사이에 Sharp사의 적외선 센서 GP2D12가[16] 내장된 적외선 센서 모듈 12개를 추가 설치하였다. 그림 12에 보인 것과 같이, 먼저 반경이 19 cm인 원통형 아크릴판 2장을 지지대로 삼아 각각 12개의 초음파 센서와 적외선 센서 모듈을 15° 간격으로 교대로 배치하여 중첩 초음파 센서 링을 제작한 다음, 이를 이동로봇의 상단에 고정시켰다.

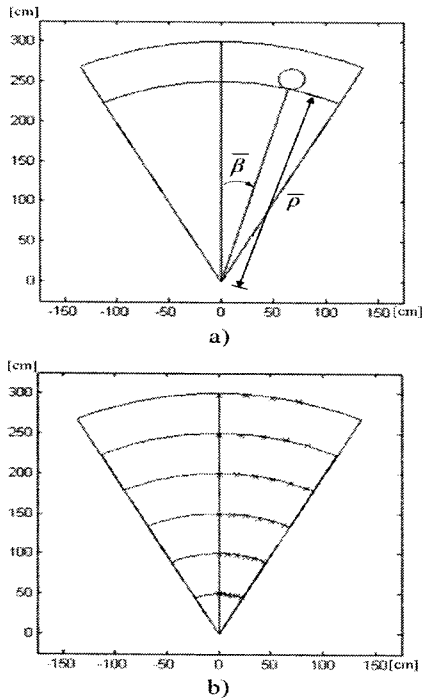


그림 13. 단일 초음파 센서의 장애물 감지 특성.

Fig. 13. The obstacle detection characteristics of a single ultrasonic sensor.

단일 초음파 센서 모듈을 정면을 향해 고정시켜 놓고 그림 13a)에 보인 것과 같이 지름이 25 cm인 원통 물체를 초음파 센서로부터 일정한 거리를 유지한 채 빔 폭 내 각도를 변화시켜 가며 장애물까지의 거리를 측정하였다. 장애물까지의 실제 거리(ρ)는 50 cm에서 300 cm 까지 50 cm 씩 증가시켰으며, 매 장애물 거리에 대해 초음파 센서의 중앙선으로부터의 실제 각도(β)를 0° 에서 25° 까지 5° 씩 증가시키며 초음파 센서에 의한 측정 거리(ρ)의 값을 기록하였다. 그림 13b)는 상기 실험을 20회 반복한 후 각 지점에서

의 측정 거리의 평균값을 나타낸 것이다. 그림 13으로부터 장애물까지의 거리가 200 cm 이상이면 초음파 센서의 장애물 감지 각도가 점차 줄어드는 것을 관찰할 수 있다.

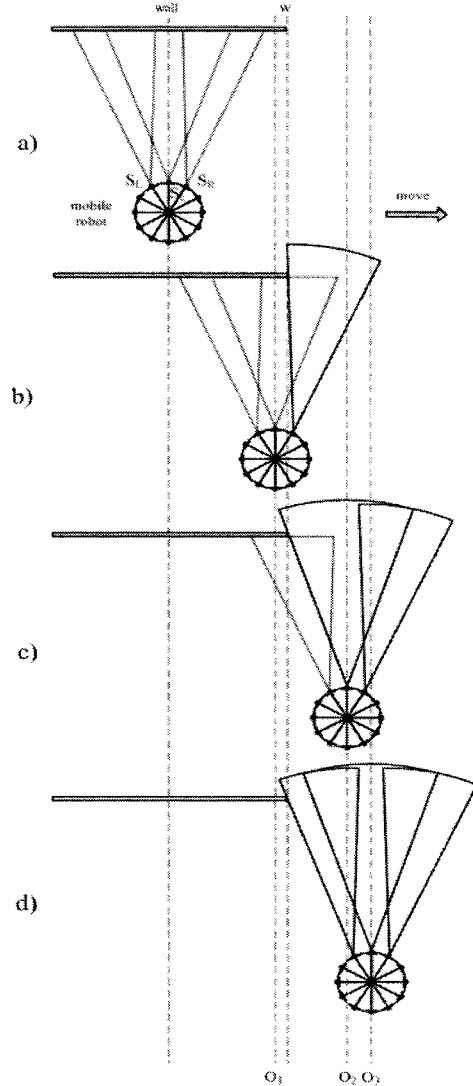


그림 14. 평면 장애물 전방의 제작된 중첩 초음파 센서 링에 대한 실험 설정.

Fig. 14. The experimental setting for our ultrasonic sensor ring prototype in front of a plane obstacle.

2. 중첩 초음파 센서 링의 장애물 감지 특성

제작된 중첩 초음파 센서 링의 장애물 감지 특성을 알아보기 위해 이동로봇이 그림 14에 보인 것과 같이 한쪽이 열린 평면 장애물(벽면) 앞을 중앙 초음파 센서 감지 거리 기준으로 100 cm 간격을 유지하며 직선 주행하도록 하였다. 장애물을 바라보는 3개의 인접 초음파 센서 중 좌측, 중앙, 그리고 우측 초음파 센서를 각각 S_L , S_C , 그리고 S_R 이라 한다. 참고로, 일반 원형 장애물에 대한 다양한 실험 결과들은 참고문헌 [15]에 이미 수록되어 있다.

그림 14는 이동로봇이 좌에서 우측 방향으로 이동함에 따라 평면 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합이 달라지

는 순간의 이동로봇의 위치를 보이고 있다. 처음 한동안 S_L , S_C 와 S_R 3개 초음파 센서 모두 장애물을 탐지하다가 (그림 14a)), 다음 S_L 과 S_C 2개 초음파 센서만이 장애물을 탐지하게 되고(그림 14b)), 다음 S_L 만이 장애물을 탐지하게 되다가(그림 14c)), 마지막에는 모든 초음파 센서가 장애물을 탐지하지 못하게 된다(그림 14d)). 그림 15에서 점 W 는 평면 장애물의 우측 종단 위치를 표시하며, 점 O_1 , O_2 , 그리고 O_3 는 각각 그림 14b), 14c), 그리고 14d) 시점에서 이동로봇의 중심 위치를 표시하고 있다. 실험 결과 $\overline{WO_1} = 7.5 \text{ cm}$, $\overline{O_1O_2} = 42 \text{ cm}$, 그리고 $\overline{O_2O_3} = 17 \text{ cm}$ 를 얻었다.

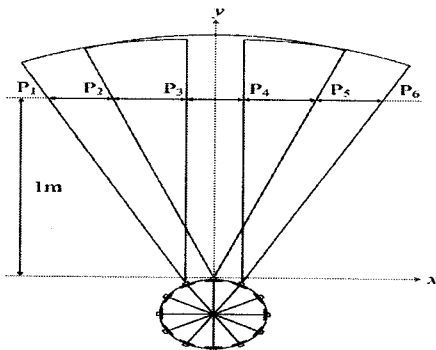


그림 15. 평면 장애물에 대한 장애물 탐지 실험.
Fig. 15. The obstacle detection experiment for a plane obstacle.

위 실험 결과를 이용하여 제작된 중첩 초음파 센서 링의 평면 장애물에 대한 장애물 감지 특성을 나타내면 그림 15와 같으며, 여기서 $\overline{P_1P_2} = 17 \text{ cm}$, $\overline{P_2P_3} = 27 \text{ cm}$, 그리고 $\overline{P_2P_3} = 15 \text{ cm}$ 이다. 그림 15로부터, 평면 장애물에 대한 3개 초음파 센서의 유효 빔 폭을 계산하여 보면, 중앙에 위치한 S_C 의 경우 70° 정도인데 반해 측면에 위치한 S_L 과 S_R 의 경우 60° 정도로 얻어지는데, 이는 중첩 초음파 센서 링의 거울 반사 효과에 기인한다고 판단된다 [17, 18].

그림 16은 그림 15의 결과를 토대로 제작된 중첩 초음파 센서 사용함으로써 평면 장애물 탐지 시 분해능이 향상될 수 있음을 보이고 있다. 그림 16a)에 단일 초음파 센서의 경우를 보이고 있는데, 평면 장애물의 실제 종단이 P_2 지점이라고 해도, 초음파 센서 고유의 위치 불확실성으로 인해 장애물 충돌 방지가 보장되는 종단은 최악의 상황인 P_5 지점이 되게 된다. 반면, 그림 16b)에 보인 제작된 중첩 초음파 센서 링의 경우에는 중앙 초음파 센서 S_C 는 장애물을 감지하지만 우측 초음파 센서 S_R 은 장애물을 감지하지 못하는 상황이므로 장애물 충돌 방지 보장을 위한 종단의 위치는 P_4 지점이 되게 된다. 위 두 경우를 비교하여 보면, 제작된 중첩 초음파 센서를 사용함으로써 평면 장

애물에 대한 장애물 탐지 분해능이 $\overline{P_4P_5} = 27 \text{ cm}$ 만큼 향상됨을 알 수 있다. 이와 같이 향상된 장애물 탐지 분해능은 자율 주행 이동로봇이 협소한 입구/출구를 통과하는데 결정적인 도움이 될 수 있을 것이다.

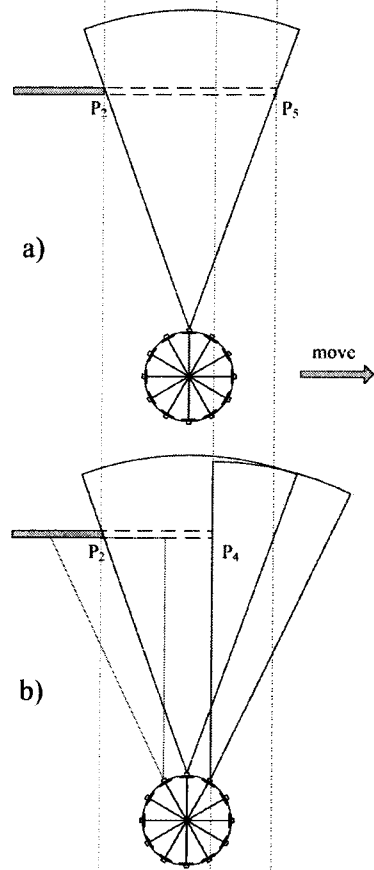


그림 16. 평면 바에 대한 장애물 탐지 실험.
Fig. 16. The obstacle detection experiment for a plane bar.

VII. 결 론

본 논문에서는 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링을 설계하는 방법과 향상된 해상도의 장애물 탐지에 응용하는 방안을 다루었다. 본 논문의 구체적 기여를 요약하면 1) 빔 폭 중첩으로 인한 위치 불확실성 감소 규명, 2) 중첩 초음파 센서 링의 유효 빔 폭 개념 도입, 3) 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 방법 수립, 4) 이동로봇 기준 장애물 탐지 해상도 향상 분석 등을 들 수 있다. 기존의 고성능 고급형 이동로봇에서와 같이 다수의 고가의 고지향성 초음파 센서를 사용하는 대신, 본 논문에서 제안한 바와 같이 중저가대의 저지향성 센서를 중첩 배열하여 사용하게 되면 장애물 탐지 성능 저하 없이도 필요한 센서 개수 뿐만 아니라 데이터 처리량도 크게 감소하게 된다. 본 논문에서는 2차원 평면상의 장애물 탐지 문제만을 취급하였으나, 향후 이를 3차원으로 효과적으로 확장하기 위한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

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] H. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps for Wide Angles Sonar," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 116-121, 1985.

[3] A. Elfes, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE J. Robotics and Automation, vol. RA-3, no. 3, pp. 249-265, 1987.

[4] 이종락, 초음파와 그 사용법, 세화출판사, 1997.

[5] 최병준, 김수일, 김춘승, 이연정, 이상룡, "자율이동로봇을 위한 초음파 센서 응용기술," 제어자동화시스템공학회지, 제8권, 제5호, pp. 31-42, 2002.

[6] S. A. Walter, "The Sonar Ring: Obstacle Detection for a Mobile Robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1574-1579, 1987.

[7] P. J. McKerrow, "Echolocation—from Range to Outline 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. 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, pp. 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] J. Borenstein and J. Koren, "The Vector Field Histogram—Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Trans. 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. Robotics and Automation, vol. 7, no. 4, pp. 535-539, 1991.

[13] www.polaroid.com.

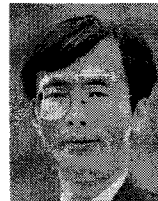
[14] www.murata.com.

[15] 김성복, 이상협, "효율적인 이동로봇의 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 감소," 신호처리 시스템 학회 논문지, 제10권, 제3호, pp. 198-206, 2009.

[16] sharp-world.com.

[17] J. H. Lim and D. W. Cho, "Specular Reflection Probability in the Certainty Grid Representation," Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 116, no. 3, pp. 512-520, 1994.

[18] Z. Yi, H. Y. Khing, C. C. Seng, and Z. X. Wei, "Multi-Ultrasonic Sensor Fusion for Mobile Robots," Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 387-391, 2000.



김성복(Sung-bok Kim)

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



이상협(Sang-hyup Lee)

2007년 2월 한국외국어대학교
디지털정보공학과(공학사)

2007년~ 현재 한국외국어대학교
디지털정보공학과 석사과정

※주관심분야 : 지능형 로봇시스템의 설계 및 제어