

효과적인 빔 폭 중첩을 이용한 고성능 장애물 탐지용 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계

Optimal Design of Overlapped Ultrasonic Sensor Ring for High Performance Obstacle Detection Using Effective Beam Overlap

김성복*, 김현빈*

Sung-bok Kim*, Hyun-bin Kim*

요약

본 논문에서는 인접 초음파 센서간 효과적인 빔 폭 중첩을 이용하여 고성능 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링을 최적 설계하는 방법에 대해 체계적으로 기술하도록 한다. 기본적으로 일군의 동종 저지향성 초음파 센서들이 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 원형 배치된다고 가정한다. 첫째, 초음파 센서의 실제와 단순화된 빔 패턴 그리고 빔 폭 내의 장애물 위치 추정을 위한 여러 센서 모델에 대해 소개한다. 둘째, 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 범위와 장애물 위치 추정을 위한 간단한 센서 모델에 대해 기술한다. 셋째, 타원과 비타원 형태의 빔 패턴에 대해 각각, 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링을 설계하기 위한 지수를 정의한다. 넷째, 최소한의 빔 폭 중첩 보장과 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위해 요구되는 중첩 초음파 센서 링의 구조적 사양에 대한 제한 조건을 유도한다. 다섯째, 주어진 중첩 초음파 센서 링의 반경에 대한 초음파 센서의 최적 사용 개수와 주어진 초음파 센서의 사용 개수에 대한 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경을 결정한다. 본 논문 전반에 걸쳐, 대표적인 상용 저지향성 초음파 센서로서 Murata사의 MA40B8이 채택되었다.

Abstract

This paper presents the systematic optimal design of an overlapped ultrasonic sensor ring for high performance obstacle detection using effective beam overlap. Basically, a set of low directivity ultrasonic sensors of the same type are arranged in a circle at regular intervals with their beams overlapped. First, both real and simplified beam patterns of an ultrasonic sensor and several sensor models for obstacle position estimation within its beam pattern are introduced. Second, the obstacle detection range of an overlapped ultrasonic sensor ring and its simple sensor model for obstacle position estimation are described. Third, for both conic and non-conic shaped beam pattern, the design indices of an overlapped ultrasonic sensor ring for minimal positional uncertainty in obstacle detection are defined. Fourth, the constraints imposed on the structural parameters of an overlapped ultrasonic sensor ring to guarantee non empty beam overlap and to avoid excessive beam overlap are derived. Fifth, the optimal number of ultrasonic sensors for a given radius of an overlapped ultrasonic sensor ring and the optimal radius of an overlapped ultrasonic sensor ring are determined. Throughout this paper, the MA40B8 from Murata Inc. is taken as a representative commercial low directivity ultrasonic sensor.

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

I. 서 론

자율 주행 이동로봇의 장애물 탐지 및 환경 지도 작성에 있어 초음파 센서는 카메라, 적외선 센서, 레이저 스캐너 등 여타 센서들과 비교하여 데이터 처리를 위한 연산이 간편하고, 주변 조명에 대해 민감하지 않으며, 가격 대비 성능우수하다는 장점을

지니고 있다 [1-3]. 반사 방식으로 동작하는 초음파 센서는 송신부에서 초음파를 발사한 후 반사된 초음파를 수신부에서 검출하여 장애물을 감지하므로 자신으로부터 가장 가까운 거리에 위치하는 장애물을 탐지하게 된다. 또한, 초음파 센서는 감지된 장애물이 빔 폭 내 장애물 거리를 반경으로 하는 원주 상에 존재함을 알 수 있을 뿐 그 원주 상의 정확한 장애물 위치는 모르는 상태로 남게 된다. 이를 초음파 센서의 장애물 탐지 시 위치 불확실성이라 부르며, 장애물 탐지 용도로서 초음파 센서의 근본적인 한계라 할 수 있다.

초음파 센서가 갖는 장애물 탐지 위치 불확실성 문제를 완화시

* 한국의국어대학교

투고 일자 : 2010. 9. 28 수정완료일자 : 2011. 2. 1

게재확정일자 : 2011. 2. 2

* 이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(KRF-2007-521-D00163)과 2010학년도 한국의국어대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

키기 위해 종래에는 상당히 많은 개수의 빔 폭이 협소한 고지향성 초음파 센서를 사용하여 왔다 [4-9]. 대표적인 고지향성 초음파 센서로는 빔 폭이 15°인 SensComp사(이전의 Polaroid사)의 600 Series를 들 수 있는데 [10], 360° 전방향 장애물 탐지를 위해 통상 24개의 초음파 센서가 사용된다. 고지향성 초음파 센서를 사용하면 장애물 탐지 분해능이 높다는 이점이 있는 반면, 초음파 센서의 사용 개수가 많게 되므로 센서 장치 비용과 함께 데이터 처리 비용이 상승하게 되는 문제에 직면하게 된다. 이에 상대적으로 적은 개수의 빔 폭이 넓은 저지향성 초음파 센서를 사용하되, 인접 초음파 센서간 빔 폭이 중첩되도록 배치함으로써 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 효과적으로 감소시키는 방안이 제시되었다 [11, 12]. 대표적인 저지향성 초음파 센서로는 빔 폭이 50°인 Murata사의 MA40B8을 들 수 있는데 [13], 통상 12개 정도의 초음파 센서를 상호 빔 폭이 중첩이 되도록 배치하여 사용하게 된다.

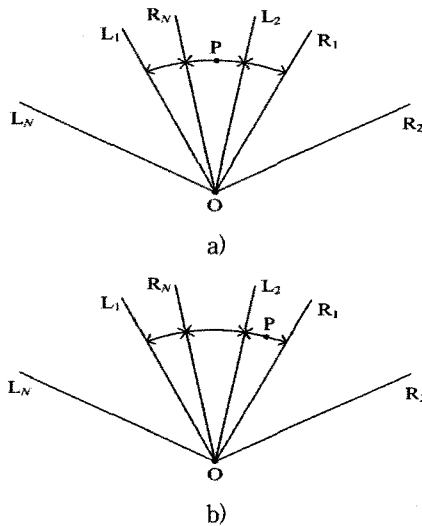


그림 1. 빔 폭 중첩으로 인한 위치 불확실성 감소: a) 중앙 소영역 내 장애물과 b) 우측 소영역 내 장애물.

Fig. 1. The reduction in positional uncertainty due to beam overlapping: a) the obstacle in the center subzone and b) the obstacle in the right subzone.

그림 1에 보인 것과 같이 3개의 인접 초음파 센서 ($L_iOR_i, i = N, 1, 2$)를 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치하면, 중앙 초음파 센서의 장애물 감지 영역인 L_1OR_1 은 $L_1OR_N, R_NOL_2, L_2OR_1$ 등 3개의 감지 소영역으로 나뉘게 된다. 그림 1a)에서와 같이 굵은 점으로 표시된 장애물 P가 중앙 소영역에 위치하는 경우, 중앙 초음파 센서는 장애물을 감지하나 좌측 및 우측 초음파 센서는 감지하지 못한다. 반면, 장애물의 위치가 그림 1b)과 같이 우측 감지 소영역에 위치하는 경우, 중앙 및 우측 초음파 센서만이 장애물을 감지하게 된다. 즉, 중앙 초음파 센서 빔 폭 내 장애

물의 상대적 위치에 따라 장애물 감지하는 초음파 센서 조합이 달라지며, 역으로 장애물 감지 초음파 센서 조합으로부터 장애물이 속하는 영역을 세분화할 수 있음을 의미하며 결과적으로 초음파 센서 고유의 위치 불확실성이 감소되게 된다 [10-12]. 그림 1에서 알 수 있듯이 인접 초음파 센서간 빔 폭 중첩을 통해 이론적으로는 장애물 탐지 분해능을 최대 3배까지 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 저지향성 초음파 센서간 효과적인 빔 폭 중첩을 통해 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링을 최적 설계하는 방안에 대해 논하기로 한다. II 장에서는 초음파 센서의 실제와 단순화된 빔 패턴 그리고 탐지 장애물의 위치 추정을 위한 여러 센서 모델에 대해 소개한다. III 장에서는 장애물 감지 사각 구역을 감안한 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 범위와 장애물 위치 추정을 위한 간단한 센서 모델에 대해 기술한다. IV 장에서는 빔 폭이 원뿔과 비원뿔 형태인 경우 대해 각각 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 최소화되도록 중첩 초음파 센서 링을 설계하기 위한 지수를 정의한다. V 장에서는 인접 초음파 센서간 최소한의 빔 폭 중첩 보장과 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위해 요구되는 중첩 초음파 센서 링의 구조 변수에 대한 기하학적 제한 조건을 유도한다. VI 장에서는 주어진 중첩 초음파 센서 링의 반경에 대한 초음파 센서의 최적 사용 개수 그리고 주어진 초음파 센서의 사용 개수에 대한 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경을 결정한다. 마지막으로, VII 장에서는 결론을 내린다.

II. 초음파 센서의 빔 패턴 및 센서 모델

초음파 센서는 송신부에서 발사된 초음파가 장애물에 의해 반사되어 수신부에 의해 검출되기까지의 경과 시간으로부터 장애물 거리를 산출한다. 초음파 센서의 감지 특성 자세히 살펴보면, 감도가 우수한 중앙선 방향으로 메인 로브가 존재하고, 감도가 현저히 저하되는 양 측면으로 일련의 사이드 로브들이 존재함을 알 수 있다 [14]. 초음파 센서는 수신된 반사파의 세기가 일정한 한계값 이상일 때 장애물을 감지하게 되므로, 초음파에 의해 감지된 장애물은 그림 2a)에 보인 것과 같이 메인 로브 내에 위치한다고 가정할 수 있다. 자율 주행 이동로봇의 실시간 요구에 부응하기 위해 부분 풍선 모양인 메인 로브의 형태를 더욱 단순화 시켜 그림 2b)에 보인 것과 같이 원뿔 형태라고 가정하기도 한다 [9].

초음파 센서는 빔 폭 내의 장애물까지의 거리를 측정하나 장애물의 정확한 위치는 모르는 상태로 남게 되므로(장애물 탐지 시 위치 불확실성), 장애물 위치를 확률적으로 추정하기 위해서는 소위 초음파 센서 모델이 필요하게 된다. 초음파 센서 모델은 탐지된 장애물에 대한 추정 위치를 초음파 센서의 감지 각도(빔 폭) 및 감지 거리(장애물 거리)의 함수로서 확률적으로 표현한다. 대표적인 초음파 센서 모델로는 정규 분포 [4], 포물선 분포 [5], 균일 분포 [6-8], 임펄스 모델 [9] 등을 들 수 있다. 가장 단순한 형태인 임펄스 모델에서는 그림 2에 보인 것과 같이 장애물의 추정

위치가 초음파 센서의 빔 폭 중앙선 상에 감지 거리만큼 떨어진 지점이라고 가정하고 있다. 다른 모델에 비해 임펄스 모델은 장애물 탐지 분해능이 떨어지는 단점이 있으나, 소요 연산이 매우 간단하여 실시간 적용에 적합하다는 장점이 따른다.

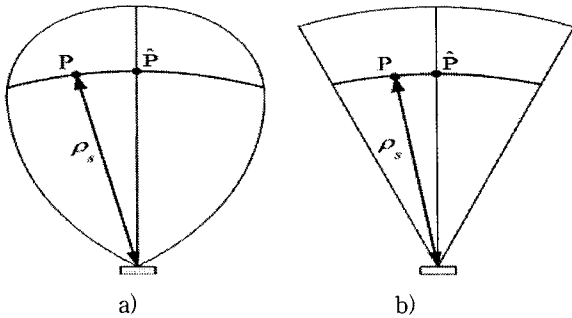


그림 2. 초음파 센서의 빔 패턴: a) 비원뿔과 b) 원뿔.
Fig. 2. The beam pattern of an ultrasonic sensor: a) non-conic shape and b) conic shape.

III. 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 범위 및 간단한 센서 모델

일군의 초음파 센서들이 360° 전방위 장애물을 탐지할 수 있도록 원형으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치되어 있는 상태를 중첩 초음파 센서 링이라 부른다. 그림 3a)에 보인 것과 같이 초음파 센서들의 꼭지점이 한 점에 일치되어 있다면, 중첩 초음파 센서 링이 탐지할 수 있는 장애물의 거리 ρ_o 의 범위는 다음으로 표현된다.

$$0 \leq \rho_o \leq \rho_{s,max} \quad (1)$$

여기서 $\rho_{s,max}$ 는 초음파 센서의 최대 감지 거리이다. 실제 초음파 센서는 일정 크기를 가지므로 중첩 초음파 센서 링은 그림 3b)에 보인 것과 같이 영이 아닌 유한 반경을 갖게 된다. 그 결과 중첩 초음파 센서 링의 주위에 초음파 센서에 의한 장애물 탐지가 불가능한 지역, 소위 장애물 감지 사각 구역이 생기게 된다. 장애물 감지 사각 구역은 인접 초음파 센서들의 빔 경계선과 중첩 초음파 센서 링의 원호에 의해 구획되며, 예를 들어, 초음파 센서 S_1 과 S_2 사이의 장애물 감지 사각 구역은 점 S_1, S_2 , 그리고 D에 의해 구획된다.

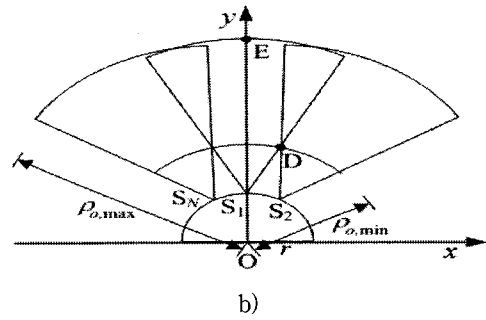
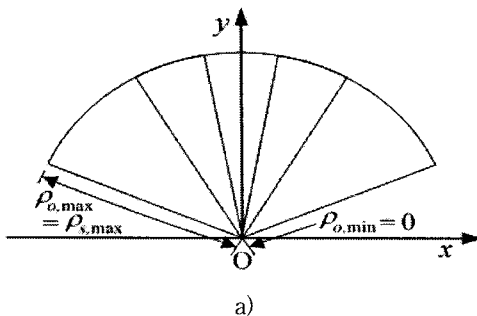


그림 3. 중첩 초음파 센서 링의 원형 배치: a) 반경 영인 원주와 b) 반경이 영이 아닌 원주.

Fig. 3. The circular arrangement of ultrasonic sensors: a) zero radius and b) nonzero radius.

장애물 감지 사각 구역을 감안하면, 그림 3에서 보듯, 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 범위는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_{o,min} \leq \rho_o \leq \rho_{o,max} \quad (2)$$

여기서

$$\rho_{o,min} = \overline{OD} \quad (3)$$

$$\rho_{o,max} = \overline{OE} = r + \rho_{s,max} \quad (4)$$

위에서 $\rho_{o,min}$ 는 중첩 초음파 센서 링의 중심 O로부터 장애물 감지 사각 구역의 꼭지점 D까지의 최소 장애물 거리이고, $\rho_{o,max}$ 는 초음파 센서의 최대 감지 거리 $\rho_{s,max}$ 에 상응하는 중첩 초음파 센서 링의 중심 O를 기준으로 한 최대 장애물 거리이다. 초음파 센서의 빔 폭을 α 라 하고 중첩 초음파 센서 링의 반경을 r , 그리고 사이각을 $\beta (= \frac{360^\circ}{N})$ 라 하면,

$$\rho_{o,min} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2})} \times r \quad (5)$$

중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 확률적으로 표현하기 위해서는 그에 대한 센서 모델의 수립이 요구된다. 중첩 초음파 센서 링에 대한 센서 모델은 앞에서 기술한 단일 초음파 센서의 센서 모델을 확장하는 방식으로 수립될 수 있으며, 하지만 여기서는 임펄스 모델을 기반으로 센서 모델링에 대해서만 살펴보기로 한다. 장애물 P가 중앙 감지 소영역에 속하는 경우, 장애물의 추정 위치 \hat{P} 은 그림 4a)에 보인 것과 같이 중앙 초음파 센서의 중앙선 상에 장애물 거리 ρ_o 만큼 떨어진 지점이라고 가정한다. 한편, 장애물 P가 측면 감지 소영역에 속하는 경우, 장애물의 추정 위치 \hat{P} 은 그림 4b)에 보인 것과 같이 해당 감지 소영역의 중앙선 상에 장애물 거리 ρ_o 만큼 떨어진 지점이라고

가정한다. 빔 폭 중첩 결과 장애물 탐지 시 위치 불확실성이 그림 4a)의 경우 $\angle L_1OR_1$ 로부터 $\angle R_NOL_2$ 로 감소되고, 그림 4b)의 경우 $\angle L_1OR_1$ 로부터 $\angle L_2OR_1$ 로 감소됨에 주목해야 한다.

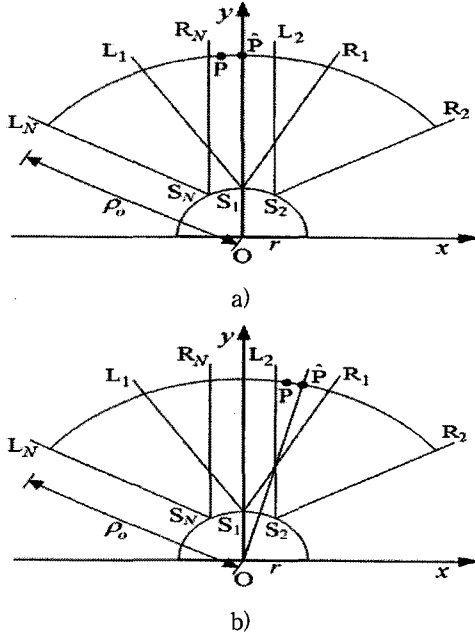


그림 4. 중첩 초음파 센서 링의 임펄스 기반 센서 모델 a) 장애물이 중앙 감지 소영역에 속한 경우와 b) 장애물이 우측 감지 소영역에 속한 경우.

Fig. 4. The impulse based sensor model of a overlapped ultrasonic sensor ring: a) in the case of an obstacle within the center sensing subzone and b) in the case of an obstacle within the right sensing subzone.

IV. 중첩 초음파 센서 링의 설계 지수

동종의 초음파 센서들을 영이 아닌 반경의 원주 상에 일정 간격으로 최적 배치하기 위한 기준으로 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 고려하기로 한다. 그림 5에서 보듯이 중첩 초음파 센서 링의 장애물 탐지 위치 불확실성은 장애물이 속한 감지 소영역 내에 속하는 반경이 장애물 거리 ρ_o 인 원호의 길이로 나타낼 수 있다. 따라서 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 최소화하기 위해서는 식 (2)의 장애물 탐지 범위 내에서 중앙과 측면 감지 소영역의 넓이가 서로 같아지도록 하여야 한다. 여기서, 각 소영역에 대한 넓이 계산은 해당 소영역을 일정 간격으로 분할하여 생기는 원호들의 평균 길이에 대해 고려하는 것과 대등하다.

그림 5로부터, 중첩 초음파 센서 링의 설계 지수를 다음과 같이 정의한다.

$$\kappa = \left| \frac{S(CEHD)}{S(DHF)} - 1.0 \right| \quad (6)$$

식 (6)에서 $S(CEHD)$ 는 점 C, E, H, 그리고 D로 정의되

는 구역의 면적으로 중앙 감지 소영역 넓이의 절반이고, $S(DHF)$ 는 점 D, H, 그리고 F로 정의되는 구역의 면적으로 우측 감지 소영역 넓이의 절반이다. 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 최소화하기 위해서는 $S(CEHD)$ 와 $S(DHF)$ 가 서로 가능한 근접시켜야 하므로, 최적 설계를 위해서는 식 (6)으로 주어지는 설계 지수 κ 의 값이 최소화 되도록 하여야 한다.

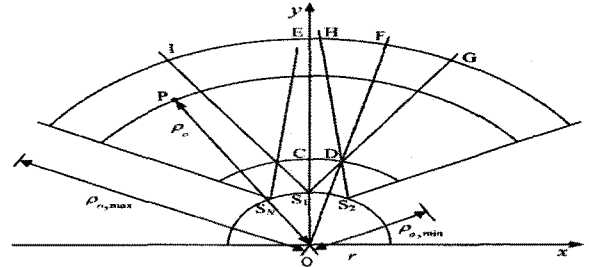


그림 5. 원뿔 형태 빔 폭을 갖는 초음파 센서간 상호 빔 폭 중첩.

Fig. 5. The beam overlap among adjacent ultrasonic sensors having conic beam pattern.

식 (6)에 포함되어 있는 $S(DHF)$ 의 계산은

$$S(DHF) = S(OHF) - S(OHD) \quad (7)$$

여기서

$$S(OHF) = \frac{1}{2} \rho_{o,max}^2 \times \angle HOF \quad (8)$$

$$S(OHD) = \frac{1}{2} \rho_{o,min} \times \rho_{o,max} \times \sin(\angle HOF) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)에 포함된 $\angle HOF$ 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 센서 S_2 의 좌측 경계선과의 교점으로 얻어질 수 있다. 다음, 식(6)에 포함되어 있는 $S(CEHD)$ 의 계산은

$$S(CEHD) = S(CEFD) - S(DHF) \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} S(CEFD) &= \frac{1}{2} (\rho_{o,max}^2 - \rho_{o,min}^2) \times \angle EOF \\ &= \frac{1}{2} (\rho_{o,max}^2 - \rho_{o,min}^2) \times \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

초음파 센서의 빔 폭이 그림 6에 보인 것과 같이 비원뿔 형태라고 하면 그림 5의 원뿔 형태인 경우와 달리 감지 소영역의 넓이 계산이 용이하지 못하다. 빔 폭이 비원뿔 형태인 경우, 그림 6으로부터 중첩 초음파 센서 링의 설계 지수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\kappa = \left| \frac{\sum_{i=1}^M \widehat{TW}(i)}{\sum_{i=1}^M \widehat{WU}(i)} - 1.0 \right| \quad (12)$$

여기서, $\widehat{TW}(i)$ 와 $\widehat{WU}(i), i=1, \dots, M$ 은 장애물 탐지 범위를 M 등분하여 생기는 중앙과 우측 감지 소영역 내 i 번째 원호 길이의 절반이다. 식 (12)에서 분자는 중앙 감지 소영역 내의 원호 길이가 합계의 절반을 나타내고, 분모는 우측 감지 소영역 내의 원호 길이가 합계의 절반을 나타낸다. 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성을 최소화시키기 위해서는 식 (12)로 주어지는 최적화 지수 κ 가 가능한 영에 근접하도록, 즉 $\kappa \rightarrow 0$ 이 되도록 하여야 한다.

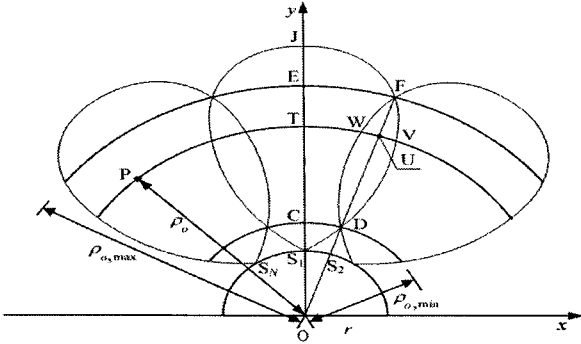


그림 6. 비원뿔 형태 빔 폭을 갖는 인접 초음파 센서간 빔 폭 중첩.

Fig. 6. The beam overlap among adjacent ultrasonic sensors having non-conic beam pattern.

V. 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 구조적 제약

특정 유형의 초음파 센서를 이용하여 중첩 초음파 센서 링을 설계하는데 있어, 인접 초음파 센서간 효율적인 빔 폭 중첩을 위해서는 중첩 초음파 센서 링의 구조에 기하학적 제약이 가해져야 한다.

1. 초음파 센서 사용 개수에 대한 제한 조건

그림 7은 반경 r 인 원주 상에 인접 초음파 센서간 최소한의 빔 폭 중첩이 보장되도록 최소 개수 N_{min} 의 초음파 센서가 일정 간격으로 배치된 상황을 도시하고 있다. 그림 7에서 보듯이, 최소한의 빔 폭 중첩 보장을 위해서는 연속적으로 배열된 초음파 센서간의 빔 폭의 교점인 점 D가 식 (2)로 주어지는 장애물 탐지 범위 내에 존재해야 한다.

$$\overline{OD} \leq \rho_{o,max} \tag{13}$$

최소한의 빔 폭 중첩 보장을 위한 초음파 센서의 최소 사용 개수 N_{min} 에 상응하는 중첩 초음파 센서 링의 사이각을 β_{min} 라 하자. 그림 7로부터,

$$\beta_{min} = \alpha - 2 \times \text{atan2} \left(r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \tag{14}$$

식 (14)에 의해 사이각 β_{min} 이 정해지면, 최소 빔 폭 중첩 보장을 위해 허용되는 초음파 센서의 사용 개수의 최소값은 다음으로 얻어진다.

$$N_{min} = \lceil \frac{2\pi}{\beta_{min}} \rceil \tag{15}$$

여기서, $\lceil \cdot \rceil$ 는 올림 연산자를 나타낸다.

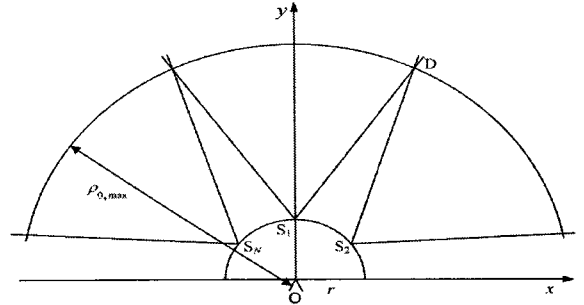


그림 7. 최소한의 빔 폭 중첩 보장을 위한 기하학적 제약.
Fig. 7. The geometric constraint required to guarantee minimal beam overlap.

다음, 그림 8은 인접 초음파 센서간 과도한 빔 폭 중첩이 회피 되도록 최대 개수 N_{max} 의 초음파 센서가 일정 간격으로 배치된 상황을 도시하고 있다. 그림 8에서 보듯이, 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위해서는 하나 건너 뛴 초음파 센서간 빔 폭의 교점인 점 W가 식 (2)의 장애물 탐지 범위 밖에 존재해야 한다.

$$\overline{OW} > \rho_{o,max} \tag{16}$$

초음파 센서의 최대 사용 개수 N_{max} 에 상응하는 중첩 초음파 센서 링의 사이각을 β_{max} 라 하면, 그림 8로부터,

$$\beta_{max} = \frac{\alpha}{2} - \text{atan2} \left(r \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{\rho_{o,max}^2 - r^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \tag{17}$$

식 (17)에 의해 β_{max} 가 정해지면, 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위해 허용되는 초음파 센서의 사용 개수의 최대값 N_{max} 는

$$N_{max} = \lfloor \frac{2\pi}{\beta_{max}} \rfloor \tag{18}$$

여기서, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 내림 연산자를 나타낸다.

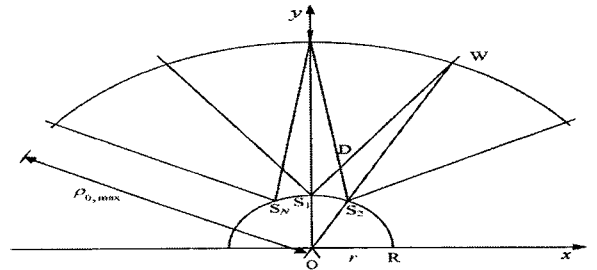


그림 8. 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위한 기하학적 제약.
Fig. 8. The geometric constraints required to avoid excessive beam overlapping.

앞의 논의의 결과를 바탕으로 효율적인 빔 폭 중첩을 위해 요구되는 초음파 센서 사용 개수 N 에 대한 제한 조건을 표현하면 다음과 같다.

$$N_{min} \leq N \leq N_{max} \tag{19}$$

여기서, 최소 개수 N_{min} 과 최대 개수 N_{max} 는 각각 식 (15)와

(18)로 주어진다. 특정 초음파 센서가 지정되면 빔 폭 α 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.

2. 중첩 초음파 센서 링 반경에 대한 제한 조건

식 (15)로 주어지는 초음파 센서의 최소 사용 개수 N_{min} 은 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따라 증가하게 되며, 그 최소값 N_{min}^o 은 반경이 $r=0$ 일 때 얻어진다.

$$N_{min}^o = \lceil \frac{2\pi}{\alpha} \rceil \tag{20}$$

식 (20)은 빔 폭이 α 인 초음파 센서들이 꼭지점을 일치시킨 상태에서 전방향을 감지하도록 하되 인접 초음파 센서간 최소한의 빔 폭 중첩이 보장되도록 하기 위해 필요한 초음파 센서의 사용 개수를 나타낸다. 초음파 센서 사용 개수 N 이 주어질 때, 최소한의 빔 폭 중첩 보장을 위해서는 중첩 초음파 센서 링 반경이 일정 크기 이하여야 한다. 최소한의 빔 폭 중첩 보장을 위한 중첩 초음파 센서 링 반경의 최대값 r_{max} 을 그림 7로부터 구하면,

$$r_{max} = \max(r', 0) \tag{21}$$

여기서

$$r' = \frac{\sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{\pi}{N})}{\sin\frac{\alpha}{2} - \sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{\pi}{N})} \times \rho_{s,max} \tag{22}$$

위에서 $N < N_{min}^o$ 인 경우 r' 값이 음으로 얻어지며, 이 때 최대 반경은 $r_{max} = 0$ 로 정해져야 한다.

식 (18)로 주어지는 초음파 센서의 최대 사용 개수 N_{max} 는 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따라 증가하게 되며, 그 최소값 N_{max}^o 은 반경이 $r=0$ 일 때 얻어진다.

$$N_{max}^o = \lfloor \frac{4\pi}{\alpha} \rfloor \tag{23}$$

식 (23)은 빔 폭이 α 인 초음파 센서들이 꼭지점을 일치시킨 채 전방향을 감지하도록 하되 인접 초음파 센서간 과도한 빔 폭 중첩이 회피되도록 하기 위해 필요한 초음파 센서 사용 개수를 나타낸다. 여기서, 과도한 빔 폭 중첩이 회피되도록 빔 폭이 $\frac{\alpha}{2}$ 인 초음파 센서들을 인접 센서간 빔 폭 중첩이 생기지 않도록 배치시키는 것과 등가적임에 주목할 필요가 있다. 주어진 초음파 센서 사용 개수 N 에 대해, 과도한 빔 폭 중첩 회피를 위한 중첩 초음파 센서 링의 최소 반경 r_{min} 을 그림 8로부터 구하면,

$$r_{min} = \max(r'', 0) \tag{24}$$

여기서

$$r'' = \frac{\sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{2\pi}{N})}{\sin\frac{\alpha}{2} - \sin(\frac{\alpha}{2} - \frac{2\pi}{N})} \times \rho_{s,max} \tag{25}$$

위에서 $N < N_{max}^o$ 인 경우 r'' 의 값이 음으로 얻어지며, 이 때 최소 반경은 $r_{min} = 0$ 로 정해져야 한다.

앞의 논의 결과를 바탕으로 효과적인 빔 폭 중첩을 위해 요구되는 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 대한 제한 조건을 표현하면

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \tag{26}$$

여기서, 최대 반경 r_{max} 와 최소 반경 r_{min} 은 각각 식 (21)과 (24)로 주어진다. 특정 초음파 센서가 지정되면 빔 폭 α 와 최대 감지 거리 $\rho_{s,max}$ 가 정해지므로, 상한과 하한인 r_{max} 와 r_{min} 모두 초음파 센서의 사용 개수 N 의 함수가 됨에 주목하여야 한다. 식 (26)을 초음파 센서의 사용 개수 N 의 크기에 따라 풀어쓰면

$$\begin{aligned} r'' \leq r \leq r' & \quad N > N_{max}^o \\ 0 \leq r \leq r' & \quad N_{min}^o \leq N \leq N_{max}^o \\ r = 0, & \quad N < N_{min}^o \end{aligned} \tag{27}$$

여기서, 초음파 센서 사용 개수의 최소 최소값 N_{min}^o 과 최소 최대값 N_{max}^o 는 각각 식 (15)와 (18)로 주어지며, 중첩 초음파 센서 링 반경 r 의 최대 기준값 r' 와 최소 기준값 r'' 는 각각 식 (22)와 (25)로 주어진다.

VI. 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계

본 논문에서는 대표적인 상용 저지향성 초음파 센서로서 Murata사의 MA40B8을 [13] 선택하였다. 표 1은 MA40B8의 주요 파라미터인 초음파 센서의 빔 폭 α 와 최대 감지 거리 $\rho_{s,max}$ 의 사양을 보이고 있다. 초음파 센서가 반사 방식으로 동작한다고 상정하고 있으므로 표 1에서 최대 감지 거리 300 cm는 왕복 거리를 기준으로 하여 600 cm에 해당한다.

표 1. MA40B8의 주요 파라미터 사양.

Table 1. The key parameter specifications of MA40B8.

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

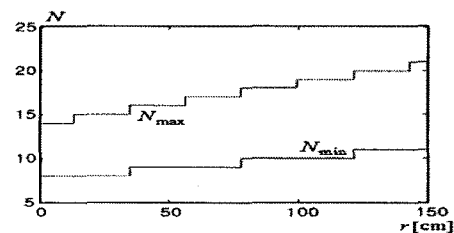


그림 9. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 초음파 센서의 최소 사용 개수 N_{min} 과 최대 사용 개수 N_{max} 의 변화.

Fig. 9. The changes of the minimum and maximum numbers, N_{min} and N_{max} , of ultrasonic sensors, depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

표 1의 사양을 이용하여, 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 중첩 초음파 센서 링의 구조적 제한 조건을 얻어 보도록 하자. 먼저, 중첩 초음파 센서 링의 반경을 $r=0$ cm로부터 $r=150$ cm까지 증가시키면서 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 초음파 센서의 사용 개수에 대한 제한 조건을 반복적으로 산출하였다. 그림 9는 식 (15)에서의 정수인 최소 개수 N_{min} 의 변화, 그리고 식 (18)에서의 정수인 최대 개수 N_{max} 의 변화를 보인다. 그림 9에서 보듯이 반경 r 이 증가됨에 따라 최소값 N_{min} 과 최대값 N_{max} 모두 증가하는 추세를 알 수 있다. 다음, 초음파 센서의 사용 개수를 $N=5$ 로부터 $N=20$ 까지 증가시키면서 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 중첩 초음파 센서 링의 반경에 대한 제한 조건을 반복적으로 산출하였다. 그림 10은 식 (21)에서의 음이 아닌 실수인 최대 반경 r_{max} 의 변화, 그리고 식 (24)에서의 음이 아닌 실수인 최소 반경 r_{min} 의 변화를 보인다. 그림 10에서 보듯이 초음파 센서의 사용 개수 N 이 증가됨에 따라 최대값 r_{max} 과 최소값 r_{min} 모두 증가하는 추세를 알 수 있다.

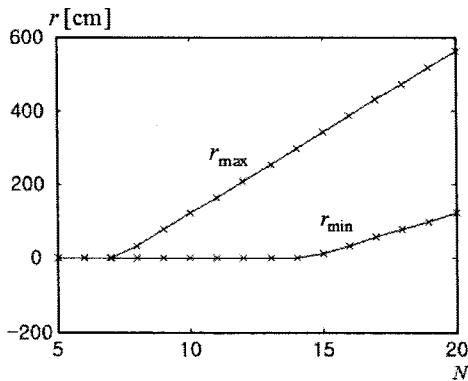


그림 10. 초음파 센서 사용 개수 N 에 따른 중첩 초음파 센서 링의 최대 반경 r_{max} 과 최소 반경 r_{min} 의 변화.

Fig. 10. The changes of the minimum and maximum radii, r_{max} and r_{min} , of an overlapped ultrasonic sensor ring, depending on the number N of ultrasonic sensors.

위에서 산출된 구조적 제한 조건을 토대로 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 사양을 도출하여 보도록 한다. 식 (6)-(11)에서 알 수 있듯이, 설계 지수 κ 는 초음파 센서의 빔 폭 α , 사용 개수 N (인접 초음파 센서간 사이각 β), 그리고 최소 및 최대 장애물 거리, $\rho_{o,min}$ 과 $\rho_{o,max}$, 등의 함수이다. 먼저, 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 을 변화시키면서 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 최소화를 위한 초음파 센서의 최적 사용 개수 N^* 를 반복적으로 구해 보았다. 그림 11은 반경을 $r=0$ cm로부터 $r=150$ cm까지 증가시킬 때, 최적 사용 개수 N^* 의 변화를 보인다. 그림 11에서 보듯이 반경 r 이 증가됨에 따라 최적 사용 개수 N^* 가 계단식으

로 비연속적 증가 추세를 알 수 있다. 그림 12는 반경 $r=0$ cm에서 시작한 후 반경의 증가에 따라 최적 사용 개수 N^* 가 1씩 증가 순간인 $r=0.0, 9.7, 26.4, 44.5, 63.4, 82.9, 102.8, 123.2$, 그리고 143.7 cm에 대해, 좌측에서부터 우측으로, 초음파 센서의 사용 개수 N 의 함수로서 중첩 초음파 센서의 설계 지수 κ 의 변화를 보이고 있는데, 서로 변화가 거의 유사함을 관찰할 수 있다.

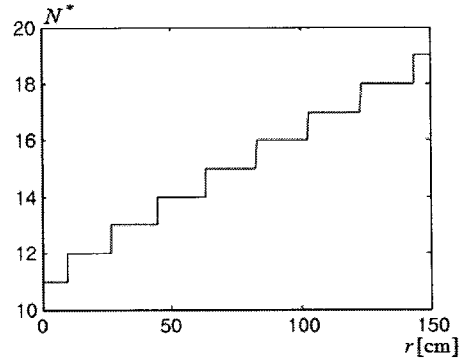


그림 11. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 초음파 센서의 최적 사용 개수 N^* 의 변화.

Fig. 11. The change of the optimal number N^* of ultrasonic sensors depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

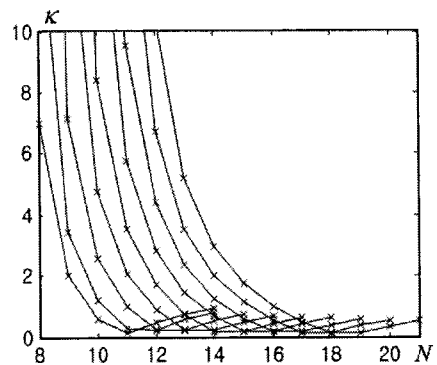


그림 12. 초음파 센서의 사용 개수 N 의 함수로서 중첩 초음파 센서 링의 설계 지수 κ 의 도표.

Fig. 12. The plots of the design index κ of an overlapped ultrasonic sensor ring as a function of the number N of ultrasonic sensors.

다음, 초음파 센서의 사용 개수 N 을 변화시키면서 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 최소화를 위한 중첩 초음파 센서 링의 최적 반경 r^* 를 반복적으로 구해 보았다. 그림 13은 초음파 센서의 사용 개수를 $N=5$ 로부터 $N=20$ 까지 증가시킬 때, 최적 반경 r^* 의 변화를 보인다. 그림 13에서 보듯이 사용 개수 N 이 5에서 10에 이르기 까지 최적 반경이 영인 상태로($r^*=0.0$ cm) 남아 있다가 그 이후로는($N \geq 11$) 사용 개수 N 의 증가분에 거의 비례하여 최적 반경 r^* 가 증가하는 양상을 보임을 알 수 있다. 그림 14는 사용 개수를 $N=8$ 로부터 $N=20$ 에 이르기까지, 좌측에서부

터 우측 방향으로, 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 의 함수로서 중첩 초음파 센서의 설계 지수 κ 의 변화를 보이고 있는데, 변화가 거의 유사함을 관찰할 수 있다.

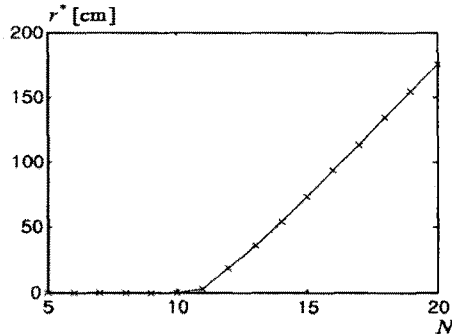


그림 13. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 에 따른 초음파 센서의 최적 사용 개수 N^* 의 변화.

Fig. 13. The change of the optimal number N^* of ultrasonic sensors depending on the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

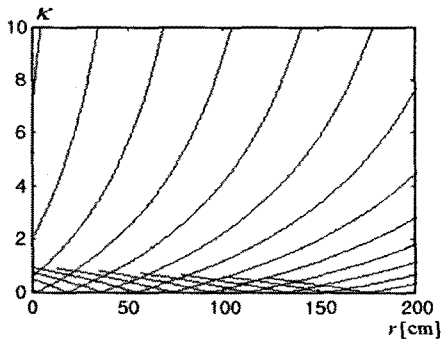


그림 14. 중첩 초음파 센서 링의 반경 r 의 함수로서 중첩 초음파 센서 링의 설계 지수 κ 의 도표.

Fig. 14. The plots of the design index κ of an overlapped ultrasonic sensor ring as a function of the radius r of an overlapped ultrasonic sensor ring.

VII. 결 론

본 논문에서는 인접 초음파 센서간 빔 폭 중첩 상태의 최적화를 통해 장애물 탐지 시 위치 불확실성을 최소화하도록 하는 중첩 초음파 센서 링의 체계적 설계 기법에 대해 논의하였다. 많은 개수의 고지향성 센서 대신 적은 개수의 저지향성 센서를 상호 빔 폭이 중첩 되도록 배치함으로써, 센서 장치 비용 및 데이터 처리 비용을 절감하면서도 장애물 탐지 성능을 그대로 유지하는데 그 목적이 있다. 본 논문의 구체적 기여 내용으로는 1) 탐지 장애물 위치 추정을 위한 간단한 센서 모델 제시, 2) 장애물 탐지 위치 불확실성을 고려한 설계 지수 정의, 3) 효과적인 빔 폭 중첩을 위한 기하학적 제약 조건 유도, 4) 중첩 초음파 센서 링의 최적 설계 사양 결정 등을 들 수 있다. 상대적으로 적은 개수의 저지향성 초음파 센서로 구성된 중첩 초음파 센서 링을 사용하면, 장애물 탐지 성능 저하 없이 센서 장치 및 처리 비용을 절감시킬 수

있으므로 특히 중저가의 개인용 이동로봇 개발에 유용할 것으로 기대된다.

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] R. R. Murphy, Introduction to AI Robotics, The MIT Press, 2000.
- [4] H. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps for Wide Angles Sonar," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 116-121, 1985.
- [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] P. J. McKerrow, "Echolocation—from Range to Outline Segments," Robotics and Autonomous Systems, vol. 11, no. 4, pp. 205-211, 1993.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] www.senscomp.com.
- [11] 김성복, 이상협, "효율적인 이동로봇의 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 감소," 신호처리 시스템 학회 논문지, 제10권, 제3호, pp. 198-206, 2009.
- [12] 김성복, 이상협, "중첩 초음파 센서 링의 설계 및 장애물 탐지에의 응용," 신호처리 시스템 학회 논문지, 제11권, 제1호, pp. 63-73, 2010.
- [13] www.murata.com.
- [14] L. Kleeman and R. Kuc, "Sonar Sensing," pp. 491-519, Handbook of Robotics, Springer, 2008.



김 성복(Sung-bok Kim)

1980년 2월 서울대 전자공학과(학사)
1882년 2월 한국 과학기술원 전기및전자공학과 (석사)
1993년 5월 미국 University of Southern California
전기공학과(박사)

1994년 3월~ 현재 한국외국어대학교 디지털정보공학과 교수
※ 주관심분야 : 지능형 이동로봇의 설계, 분석 및 제어



김 현빈(Hyun-bin Kim)

2011년 2월 한국 외국어 대학교 디지털 정보공학과
(공학사)
2011년 3월~ 현재 한국 외국어 대학교 전자정보공
학과 석사과정
※ 주관심분야 : 자율 주행 이동 로봇의 설계 및 제작