

효율적인 이동로봇의 장애물 탐지를 위한 중첩 초음파 센서 링의 위치 불확실성 감소

Positional Uncertainty Reduction of Overlapped Ultrasonic Sensor Ring for Efficient Mobile Robot Obstacle Detection

김성복, 이상협

Sungbok Kim, Sanghyup Lee

요약

본 논문에서는 빔 폭이 중첩된 초음파 센서 링을 이용하여 초음파 센서의 위치 불확실성을 감소시키고 이를 토대로 이동로봇이 효율적으로 장애물을 탐지하도록 하는 방안에 대해 기술하도록 한다. 기본적으로, 원형 이동로봇 측면에 상대적으로 적은 개수의 중저가의 저지향성 초음파 센서들이 일정 간격으로 상호 빔 폭이 중첩되도록 배치되어 있다고 가정한다. 첫째, 단일 및 이중 장애물에 대해 빔 폭 중첩 상태를 이용하여 초음파 센서 고유의 위치 불확실성을 감소시킬 수 있음을 보이고 또한 그 향상 정도를 정량적으로 제시한다. 둘째, 2개 또는 1개의 초음파 센서로부터 장애물 측정 거리 데이터가 주어질 때, 이동로봇의 중심을 기준으로 하여 장애물의 위치를 산정하는 기하학적 방법을 고안한다. 셋째, 정규 분포, 포물선 분포, 균일 분포, 임펄스 등 기존의 단일 초음파 센서 모델을 비교 검토한 후, 위치 불확실성 및 소요 연산량 측면에서 장애물 탐지에 적합한 중첩 초음파 센서 모델을 수립한다. 마지막으로, 자체 제작된 초음파 센서 링을 이용한 단일 장애물 및 복수 장애물 탐지 실험을 통해 제안된 중첩 초음파 센서의 효용성을 입증한다.

Abstract

This paper presents the reduction of the positional uncertainty of an ultrasonic sensor ring with overlapped beam pattern for the efficient obstacle detection of a mobile robot. Basically, it is assumed that a relatively small number of inexpensive low directivity ultrasonic sensors are installed at regular spacings along the side of a circular mobile robot with their beams overlapped. First, for both single and double obstacles, we show that the positional uncertainty inherent to an ultrasonic sensor can be reduced using the overlapped beam pattern, and also quantify the relative improvement in positional uncertainty. Second, given measured distance data from one or two ultrasonic sensors, we devise the geometric method to determine the position of an obstacle with respect to the center of a mobile robot. Third, we examine and compare existing ultrasonic sensor models, including Gaussian distribution, parabolic distribution, uniform distribution, and impulse, and then build the sensor model of overlapped ultrasonic sensors, adequate for obstacle detection in terms of positional uncertainty and computational requirement. Finally, through experiments using our prototype ultrasonic sensor ring, the validity of overlapped beam pattern for reduced positional uncertainty and efficient obstacle detection is demonstrated.

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

I. 서론

자율 주행 이동로봇을 구현하기 위한 핵심 기술에는 자기 위치 추정 기술, 환경 지도 작성 기술, 장애물 탐지 및 회피 기술 등이 포함된다 [1]. 본 논문에서 다루고자 하

는 이동로봇의 장애물 탐지를 위해서 사용되는 대표적인 센서로는 카메라, 적외선 센서, 초음파 센서 등을 들 수 있다 [1-4]. 카메라의 경우 데이터 처리를 위한 연산이 복잡하여 실시간 적용에 한계가 따르고, 적외선 센서의 경우 주변 빛에 민감하여 통상 장애물까지의 거리 보다는 존재 유무 판정에 적합하다고 할 수 있다. 대안으로 초음파 센서가 널리 채택되고 있는데, 이는 빛에 비해 초음파는 반사가 용이하고 또한 전파 속도(음속 340 m/sec)가 늦다는 사실에 기인한다.

1980년대 중반 미국 카네기멜론 대학에서 환경 지도 작성 및 자율 주행을 위해 기존의 비전 센서 대신 초음파 센서를 사용해 보고자 하는 시도가 이루어졌다 [5, 6]. 이러한

*한국의국어대학교 전자정보공학부

투고 일자 : 2009. 7. 7 수정완료일자 : 2009. 7. 28

계재확정일자 : 2009. 7. 29

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

시도는 당초 기대 이상의 성과를 거두었으며 그를 계기로 미국 뿐 아니라 전 세계적으로 초음파 센서를 이용하는 다양한 응용 연구가 활발히 진행되었다. 대부분의 자율 주행 이동로봇의 경우 일련의 초음파 센서를 이동로봇의 측면에 일정 간격을 두고 링 형태로 배열하여 360° 전방향의 장애물을 탐지할 수 있도록 하고 있다 [7]. 한편, 초음파 센서를 장애인(맹인) 보행 지원 장치 개발을 위해 사용한 사례도 있으며, 초음파 센서의 시계를 전방으로 국한시키고 있음을 볼 수 있다 [8].

초음파 센서는 빔 폭 내에 존재하는 장애물까지의 거리를 측정할 수 있으나, 장애물의 정확한 위치는 모르는 상태로 남게 되는데, 통상 이를 초음파 센서의 위치 불확실성이라 부른다 [2, 5]. 장애물 위치에 대한 불확실성을 줄이기 위해 기존의 자율 주행 이동로봇은 대부분 많은 개수의 빔 폭이 협소한 고지향성 초음파 센서를 사용하고 있다. 그러나 고가의 고지향성 초음파 센서를 다수 사용하게 되면 센서 장치 비용이 상승할 뿐 아니라 데이터 처리 연산량도 증가하게 된다. 본 논문에서는 상대적으로 적은 개수의 중저가대의 저지향성 초음파 센서를 사용하되, 인접 초음파 센서간의 빔 폭 중첩을 활용하여 초음파 센서의 위치 불확실성을 감소시키고, 이를 토대로 장애물 탐지 능력을 향상시키고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 빔 폭 중첩을 이용하여 초음파 센서의 위치 불확실성을 감소시키고 그 향상 정도를 정량화한다. III장에서는 초음파 센서의 장애물 거리 데이터로부터 이동로봇의 중심을 기준한 장애물 위치 산정 방법을 고안한다. IV장에서는 기존의 단일 초음파 센서 모델을 비교 검토한 후, 장애물 탐지에 적합한 중첩 초음파 센서 모델을 수립한다. V장에서는 자체 제작된 초음파 센서 링을 이용한 실험을 통해 제안된 중첩 초음파 센서의 효용성을 입증한다. 마지막으로, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 위치 불확실성 감소

2.1. 단일 초음파 센서의 위치 불확실성

초음파 센서는 송신부와 수신부로 이루어지며, 송신부에서 발사된 초음파가 장애물에 의해 반사되어 수신부에 의해 검출되기까지의 경과 시간(Time of flight)을 측정하여 빔 폭 내에 위치한 장애물까지의 거리를 산출한다. 초음파 센서는 그 구성에 따라 송수신 분리형 반사 방식, 송수신 일체형 반사 방식, 직접파 방식 등으로 구분할 수 있다 [3, 4]. 본 논문에서는 이동로봇의 장애물 탐지 용도로 주로 사용되는 분리형 반사 방식을 논의 대상으로 한다.

초음파 센서는 원뿔 형태의 초음파 빔을 이용하여 장애물을 탐지하는 장치로서 그림 1에 보인 바와 같이 빔 폭 내에 위치한 장애물까지의 거리 정보를 제공할 뿐 장애물의 정확한 위치는 모르는 상태로 남게 되며, 이를 초음파 센서의 위치 불확실성이라 부른다. 초음파 센서는 빔 폭의

크기에 따라 빔 폭이 12°인 Polaroid사의 600 Series와 [9] 같은 가격이 비싼 고지향성 센서와 빔 폭 50°인 Murata사의 MA40B8과 [10] 같은 중저가의 저지향성 센서로 구분된다. 고지향성 초음파 센서의 경우 전방향 장애물 탐지를 위해 필요한 센서의 개수가 많아지는 대신 장애물 위치에 대한 불확실성 문제가 완화되며, 반면 저지향성 센서의 경우는 그 반대의 현상이 나타나게 된다. 본 논문에서는 저지향성 초음파 센서를 사용한다고 전제하고 있다.

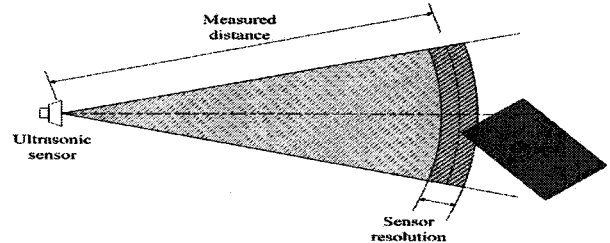


그림 1. 단일 초음파 센서의 위치 불확실성.

Fig. 1. The positional uncertainty of a single ultrasonic sensor.

2.2. 중첩 초음파 센서의 위치 불확실성

그림 2는 상호 빔 폭이 중첩된 1쌍의 초음파 센서를 보이고 있다. 그림 2에서 좌측과 우측 초음파 센서의 빔 폭을 각각 $L_1S_1R_1$ 과 $L_2S_2R_2$ 로 표시하고, 탐지된 장애물까지의 최단 거리를 굵은 점으로 표현하고 있다. 그림 2에서 보듯, 빔 폭 중첩 결과 두 초음파 센서 빔 폭의 합집합인 전체 감지 영역이 I 영역, II 영역, III 영역 등 3개의 세부 영역으로 나눌 수 있게 된다. 우선, 단일 장애물에 대해 고려하여 보자. 그림 2a)에서와 같이 장애물이 I 영역에 존재하는 경우 좌측 초음파 센서만이 장애물을 탐지하게 된다. 다음, 그림 2b)에서와 같이 장애물이 II 영역에 존재하는 경우 좌측 및 우측 초음파 센서 모두 장애물을 탐지하게 된다. 마지막으로, 그림 2c)에서와 같이 장애물이 III 영역에 존재하는 경우 우측 초음파 센서만이 장애물을 탐지하게 된다.

장애물의 위치에 따라 장애물을 탐지하게 되는 초음파 센서 조합이 달라진다는 사실은 역으로 장애물을 탐지하는 초음파 센서 조합으로부터 장애물이 존재하는 세부 영역을 구분할 수 있음을 의미한다. 나아가 인접 초음파 센서간의 빔 폭 중첩을 이용하면 장애물 위치에 대한 불확실성이 단일 초음파 센서의 경우에 비해 현저히 감소되는 효과가 발생하게 된다. 단일 장애물의 경우, 중첩 초음파 센서의 위치 불확실성이 본래 값의 최대 3분의 1로 감소될 수 있다.

이어서, 이중(2개) 장애물에 대해 고려하여 보자. 그림 3에 보인 바와 같이 이중 장애물 상대적 위치에 따라 이중 장애물을 탐지하는 초음파 센서의 조합은 두 가지 형태로 나뉜다. 여기서, 주변에 존재하는 장애물의 개수와 무관하게 초음파 센서에 의해 탐지되는 장애물은 최대 2개 이하인 점에 유의하여야 한다. 예로서, 그림 3a)에서와 같이 원거리 장애물이 (영역 I ∪ 영역 II)에 존재하고 단거리

III. 장애물 위치 산정

3.1. 중첩 초음파 센서 링

그림 4a)와 b)는 각각 Murata사의 초음파 센서 MA40B8의 송수신부와 제작된 초음파 센서 모듈을 보이고 있다. 통상 이동로봇은 주변의 임의의 방향에 존재하는 장애물을 탐지할 수 있어야 하며, 이러한 전방향 장애물 탐지를 위해서 일군의 초음파 센서를 원형 이동로봇 측면에 일정 각도 간격으로 배치한다. 그림 5는 초음파 센서 모듈 12개를 30° 간격으로 배치하여 전방향 시계가 확보되도록 한 사례를 보이고 있다.

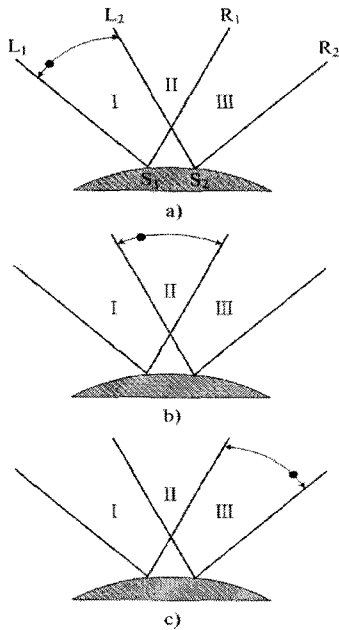


그림 2. 중첩 초음파 센서의 단일 장애물 탐지.
Fig. 2. The single obstacle detection by a pair of overlapped ultrasonic sensors.

장애물이 영역 III에 존재하는 경우, 좌측 초음파 센서는 원거리 장애물을 그리고 우측 초음파 센서는 단거리 장애물을 탐지하게 된다.

단일 장애물에서와 같이 이중 장애물의 경우에도 역시 장애물 탐지 초음파 센서 조합으로부터 장애물 존재 영역을 세분할 수 있으며 결과적으로 장애물 위치 불확실성이 줄어들게 되는 효과가 있게 된다. 이중 장애물의 경우, 중첩 초음파 센서의 위치 불확실성이 본래 값의 최대 3분의 1 또는 3분의 2로 감소될 수 있다.

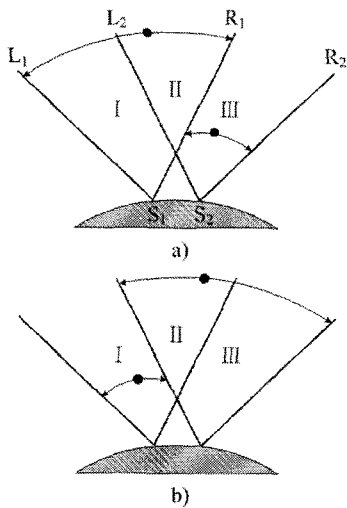


그림 3. 중첩 초음파 센서의 이중 장애물 탐지.
Fig. 3. The double obstacle detection by a pair of overlapped ultrasonic sensors.

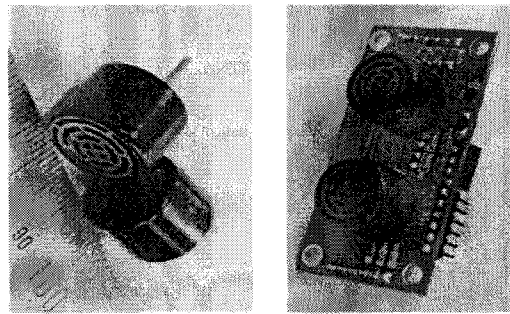


그림 4. 상용 초음파 센서.
Fig. 4. A commercial ultrasonic sensor.

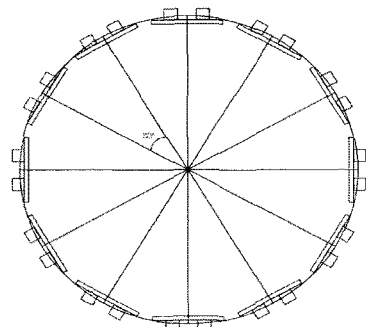


그림 5. 중첩 초음파 센서 링.
Fig. 5. An overlapped ultrasonic sensor ring.

3.2. 기하학적 장애물 위치 산정

중첩 초음파 센서 링을 구성하는 초음파 센서는 제작기 자신을 기준으로 탐지된 장애물까지의 측정 거리 데이터를 제공하게 된다. 반면, 이동로봇의 장애물 탐지 및 회피 기능을 구현하기 위해서는 초음파 센서의 장애물 거리 측정 데이터로부터, 이동로봇의 중심을 기준으로 하여 장애물의 위치를 산정할 수 있어야 한다.

먼저, 그림 6에 보인 바와 같이 국부 좌표계를 도입하여 원형 이동로봇의 중심을 좌표 원점 $O=[0\ 0]^t$ 라 하고, 이동로봇의 바퀴 축 방향과 전진 방향을 각각 x 축과 y 축 이라고 하자. 반지름이 r 인 원형 이동로봇 측면에 N 개의 초음파 센서가 일정 각도 $\varphi (=360^\circ/N)$ 간격으로 설치되어 있다고 하자. 편의상, 각 초음파 센서에 번호를 부여하되,

맨 처음 y 축 방향으로 설치된 초음파 센서에 1번($N=1$)을 부여한 후, 시계 방향을 따라서 순차적으로 증가된 번호를 초음파 센서에 부여한다. $k(k=1, \dots, N)$ 번째 초음파 센서의 설치 위치를 S_k 라 하면, 해당 초음파 센서에 대한 위치 벡터 $s_k(=\overrightarrow{OS_k})$ 는 다음으로 표현된다.

$$s_k = \begin{bmatrix} s_{kx} \\ s_{ky} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin(k-1)\varphi \\ r \cos(k-1)\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

$$\|s_k\|^2 = s_{kx}^2 + s_{ky}^2 = r^2 \quad (2)$$

먼저, 인접한 한 쌍의 초음파 센서가 동시에 장애물을 탐지하는 경우에 대해 고려해 보도록 한다. 기술 편의상, 첫 번째와 두 번째 초음파 센서가 인접 초음파 센서 쌍을 이루고 있다고 하자. 첫 번째 초음파 센서로부터의 장애물 측정 거리를 ρ_1 이라 하면, 탐지된 장애물 P 는 초음파 센서의 위치 불확실성에 따라 다음 원호 상에 존재하게 된다.

$$(x-s_{1x})^2 + (y-s_{1y})^2 = x^2 + (y-r)^2 = \rho_1^2 \quad (3)$$

여기서 $s_{1x}=0$ 그리고 $s_{2y}=r$ 임에 주목하라. 식 (3)은 그림 6에서 점 S_1 을 중심으로 반지름이 ρ_1 인 원에 해당한다. 마찬가지로, 두 번째 초음파 센서에 의한 장애물 측정 거리를 ρ_2 라 하면, 다음 관계식이 성립된다.

$$(x-s_{2x})^2 + (y-s_{2y})^2 = \rho_2^2 \quad (4)$$

식 (4)은 그림 6에서 점 S_2 를 중심으로 반지름이 ρ_2 인 원에 해당한다.

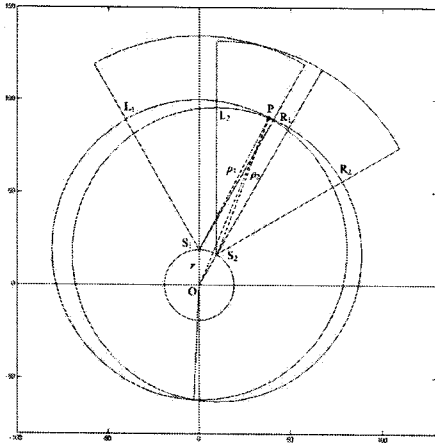


그림 6. 중첩 영역에 존재하는 장애물의 위치 산정.
Fig. 6. Determining the position of an obstacle lying within the overlapped beam zone.

두 초음파 센서에 의해 동시에 탐지된 장애물의 위치를 찾기 위해서는 그림 6에 보인 바와 같이 식 (3)과 (4)에 의해 정의된 두 원의 교점을 찾으면 된다. 통상 두 원의 교점은 2개로 얻어지지만 두 센서의 상대적 위치를 고려하면 그 중 하나를 장애물 위치로 용이하게 결정할 수 있다. 두 원의 교점을 구하는 과정을 생략하는 대신 최종적인 장애

물의 위치 벡터 $p(=\overrightarrow{OP}=[x \ y]^t)$ 에 대한 해를 제시하면 다음과 같다.

$$y = \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (5)$$

$$x = Dy + E$$

여기서

$$A = 1 + D^2, \quad B = DE - r, \quad C = E^2 + r^2 - \rho_1^2 \quad (6)$$

이 때

$$D = \frac{1}{s_{2x}}(r - s_{2y}), \quad E = \frac{1}{2s_{2x}}(\rho_1^2 - \rho_2^2) \quad (7)$$

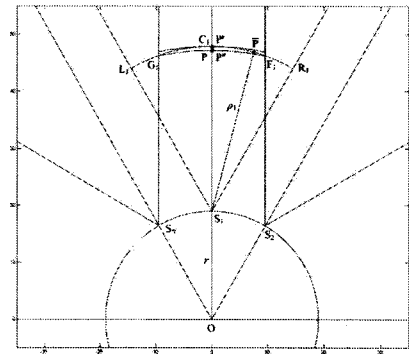


그림 7. 비중첩 영역에 존재하는 장애물의 위치 산정.
Fig. 7. Determining the position of an obstacle lying outside the overlapped beam zone.

다음, 인접한 3개의 초음파 센서 중 하나만이 장애물을 탐지하는 경우에 대해 고려해 보도록 한다. 기술 편의상, 첫 번째 초음파 센서를 중심으로 N 번째와 두 번째 초음파 센서가 인접 초음파 센서를 구성하고 있다고 하자. 그림 7은 첫 번째 초음파 센서가 장애물을 탐지한 반면 나머지 좌, 우측의 초음파 센서들은 장애물을 탐지하지 못하는 상황을 보이고 있다. 첫 번째 초음파 센서의 장애물 측정 거리를 ρ_1 이라 하면, 탐지된 장애물 P 는 점 S_1 을 중심으로 반지름이 ρ_1 인 원호 상에 존재하여야 하고, 또한 그 원호의 범위는 양쪽에 위치한 초음파 센서들의 빔 폭 경계선에 의해 한정되게 된다. 점 S_1 을 중심으로 반지름이 ρ_1 인 원과 첫 번째 초음파 센서의 빔 폭 좌측 경계선, 중앙선 및 우측 경계선과의 교점을 각각 L_1, C_1 및 R_1 이라 하자. 또한, 좌측에 위치한 초음파 센서의 빔 폭 우측 경계선과 우측에 위치한 초음파 센서의 빔 폭 좌측 경계선과의 교점을 각각 G_1 과 F_1 이라 하자. 여기서, 초음파 센서의 빔 폭은 중앙선을 기준으로 좌우 대칭이라고 가정한다.

장애물은 첫 번째 초음파 센서의 빔 폭 내 원호 상에 존재하되 좌우에 위치한 초음파 센서들의 빔 폭과 중첩되지 않는 부분에 존재하여야 한다. 이를 고려하여 이동로봇 중심으로부터 장애물까지의 거리를 산정해 보도록 하자. 구체적으로, 첫 번째 초음파 센서 중심 S_1 으로부터의 거리가 ρ_1 인 장애물에 대해 이동로봇 중심 O 로부터 거리를 결정

해야 한다. 그림 7에 보인 바와 같이 점 O를 중심으로 하여 점 C₁을 지나고 점 O를 중심으로 하여 점 G₁과 F₁을 지나고 원 사이의 영역 내에서는 어느 곳이든 장애물이 존재할 가능성이 있다. 그러나 장애물 탐지의 궁극적 목적이 이동로봇 자율 주행 시 장애물 회피에 있음을 감안하면, 이동로봇으로부터 장애물까지의 거리는 최악의 경우를 상정한 최소 거리로 하는 것이 타당하다고 할 것이다.

위와 같은 방법으로 이동로봇 중심에서 장애물까지의 거리를 구하면 그림 7에서 원점 O로부터 점 F₁까지의 거리 $\rho (= \overline{OF_1})$ 가 된다. 위치 벡터 $f_1 (= \overline{OF_1} = [x \ y]^t)$ 에 대한 해는 점 S₁을 중심으로 반지름이 ρ_1 인 원, 즉 식 (3)과 점 S₂와 F₁을 지나고 다음 직선 식의 교점으로부터 구할 수 있다.

$$y = Dx + E \tag{8}$$

여기서

$$D = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \theta\right), \quad E = -Ds_{2x} + s_{2y} \tag{9}$$

세부적인 과정을 생략하고 최종적인 장애물 거리에 대한 해를 제시하면,

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{10}$$

여기서

$$x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \tag{11}$$

$$y = Dx + E$$

이 때

$$A = 1 + D^2, \quad B = D(E - r), \quad C = (E - r)^2 - \rho_1^2 \tag{12}$$

IV. 초음파 센서 모델

4.1. 단일 초음파 센서 모델

초음파 센서의 장애물 위치 불확실성은 초음파 센서의 감지 각도(빔 폭) 및 감지 거리(장애물까지 거리)의 함수로서 표현할 수 있다. 그림 8은 대표적인 기존의 단일 초음파 센서 모델들을 보이고 있다. 보통, 초음파 센서의 모델은 2차원 원뿔 형태의 빔 폭 영역을 장애물 점유 구역과 비점유 구역으로 나누어 달리 정의되지만, 본 논문에서는 장애물 점유 구역에 국한하여 기술하기로 한다.

그림 8a)는 초음파 센서의 반사 특성, 거리 측정 오차 등을 고려하여 감지 각도와 감지 거리에 대한 불확실성을 정규 분포를 이용하여 나타내고 있다 [5, 6]. 다음, 그림 8b)에 보인 초음파 모델은 감지 각도와 감지 거리의 불확실성을 포물선 분포를 이용하여 나타내고 있는데 [11], 이는 앞의 정규 분포 모델의 근사화라 볼 수 있다. 한편, 그림 8c)의 모델 경우 감지 거리에 대한 불확실성은 무시하고 감지 각도에 대한 불확실성만을 균일 분포를 기반으로 나타내고 있는데 [12-14], 이는 초음파 센서의 거울 반사(Specular

Reflection) 효과를 [15, 16] 무시할 수 있을 만큼 장애물 감지 영역이 상당히 적다는 전제 아래 얻어진 결과라고 할 수 있다. 마지막으로 그림 8d)는 감지 각도 및 감지 거리에 대한 불확실성을 무시한 가장 단순한 형태라 할 수 있는데, 장애물이 초음파 센서의 빔 폭 중앙선 상의 감지 거리에 위치한다고 가정하고 있다 [17-19]. 통상, 주변 환경을 연속된 격자로 나눈 후 장애물의 존재 여부를 정사각형 셀 단위로 표시하게 되는데, 셀의 크기와 함께 채택된 초음파 센서 모델에 따라 환경 지도의 정확성, 소요 연산량 등이 좌우되게 된다는 점에 주목할 필요가 있다 [17, 20].

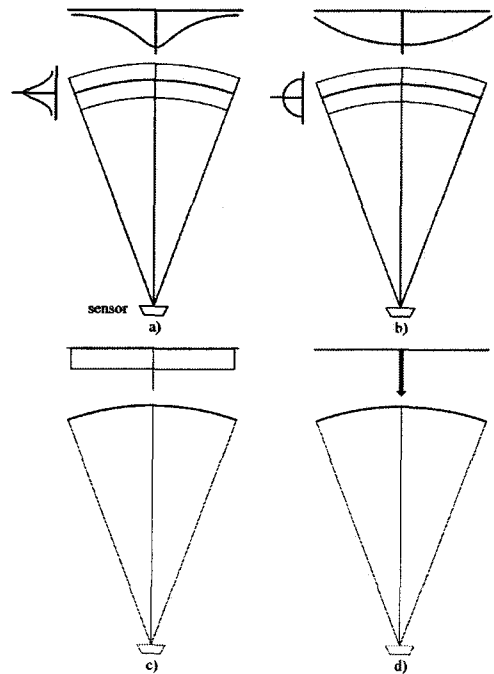


그림 8. 단일 초음파 센서 모델: a) 정규 분포, b) 포물선 분포, c) 균일 분포, 그리고 d) 임펄스.

Fig. 8. The single ultrasonic sensor models: a) Gaussian distribution, b) parabolic distribution, c) uniform distribution, and impulse.

4.2. 중첩 초음파 센서 모델

앞에서 비교 검토한 단일 초음파 센서 모델을 바탕으로, 위치 불확실성 및 소요 연산량 측면에서 장애물 탐지에 적합한 중첩 초음파 센서 모델을 수립하도록 한다.

그림 9a)는 그림 6에서와 같이 장애물이 중첩 영역에 존재하는 경우에 대한 중첩 초음파 센서 모델을 보이고 있다. 이 경우 이동로봇 중심을 기준한 장애물의 위치가 식 (5)에 의해 특정되므로 중첩 초음파 센서 모델은 별 다른 논란 없이 그림 9a)에 보인 임펄스 기반으로 귀결될 수 있다. 한편, 그림 9b)는 동일 장애물을 단일(중앙) 초음파 센서를 사용하여 탐지했다고 상정하여 이에 상응하는 초음파 센서 모델을 보이고 있다. 그림 9a)와 9b)의 비교에서 보듯, 중첩 초음파 센서를 사용함으로써 장애물 위치 불확실성이 현저히 감소됨을 알 수 있다.

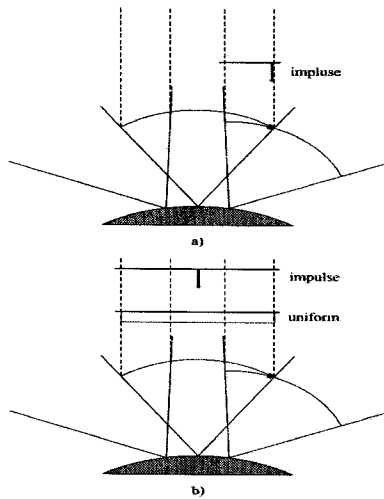


그림 9. 중첩 영역에서의 초음파 센서 모델: a) 중첩 초음파 센서 모델과 b) 단일 초음파 센서 모델.

Fig. 9. The ultrasonic sensor models within the overlapped beam zone: a) overlapped ultrasonic sensor model and b) single ultrasonic sensor models.

그림 10a)는 그림 7에서와 같이 장애물이 비중첩 영역에 존재하는 경우에 대한 중첩 초음파 센서 모델을 보이고 있다. 이 경우에는 이동로봇 중심으로부터 장애물까지의 거리가 식 (10)에 의해 정해지나, 장애물의 위치는 특정되지 못하므로 중첩 초음파 센서 모델은 그림 10a)에 보인 균일 분포 혹은 임펄스 기반으로 선정할 수 있다. 한편, 그림 10b)는 동일 장애물을 단일(중앙) 초음파 센서를 사용하여 탐지했다고 상정하여 초음파 센서 모델을 보이고 있다. 그림 10a)와 비교하여 보면, 임펄스 기반의 경우에는 장애물 위치 불확실성에 변화가 없으나 균일 분포 기반의 경우에는 상당한 개선 효과가 있음을 알 수 있다.

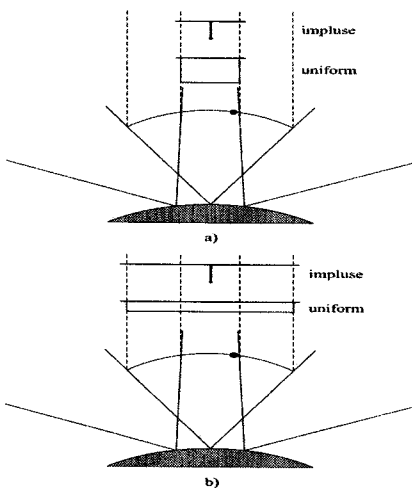


그림 10. 비중첩 영역에 대한 초음파 센서 모델: a) 중첩 초음파 센서 모델과 b) 단일 초음파 센서 모델.

Fig. 10. The ultrasonic sensor models outside the overlapped beam zone: a) overlapped ultrasonic sensor models and b) single ultrasonic sensor models.

V. 실험 결과

5.1. 중첩 초음파 센서 링의 제작

그림 4에 보인 빔 폭이 50° 인 초음파 센서 모듈 12개를 사용하여 그림 5와 같이 전방향 시계를 갖는 중첩 초음파 센서 링을 제작하였다. 그림 11은 제작된 초음파 센서 링을 장착한 원형 이동로봇을 보이고 있다. 초음파 센서 모듈을 이동로봇 측면에 직접 부착하기가 용이치 않아 먼저 반지름이 19 cm인 원통형 아크릴판 2장을 지지대로 삼아 12개의 초음파 센서 모듈을 30° 간격으로 배열한 후, 다음 제작된 초음파 센서 링을 이동로봇의 상단에 고정시켰다.

12개 초음파 센서는 이동로봇 주위에 존재하는 장애물을 탐지하며, 탐지된 장애물에 대한 측정 거리 정보를 순차적으로 RS-232C 시리얼 케이블을 통해 호스트 컴퓨터로 전송한다. 다음, 호스트 컴퓨터는 앞서 기술한 바와 같이 인접 초음파 센서 쌍으로부터의 장애물 거리 정보로부터 이동로봇의 중심을 기준으로 한 장애물의 위치 혹은 거리를 연산하게 된다.

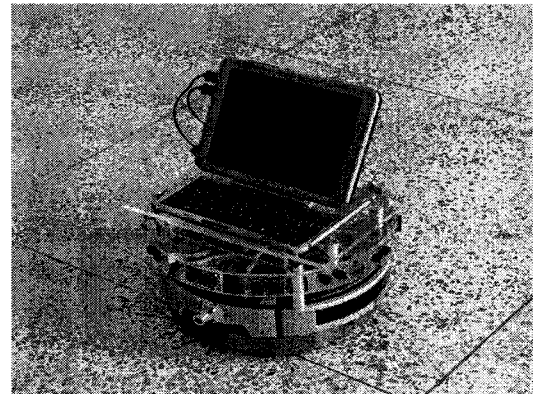


그림 11. 중첩 초음파 센서 링을 장착한 원형 이동로봇.

Fig. 11. A circular mobile robot equipped with our overlapped ultrasonic sensor ring prototype.

5.2. 단일 장애물 탐지 실험

먼저, 제작된 초음파 센서 링을 장착한 이동로봇이 단일 장애물 앞을 직선 주행하도록 하며 초음파 센서의 거리 측정값의 변화를 살펴보았다. 이동로봇의 궤도 추정 오차, 모터 및 초음파 센서간의 간섭 등 외부 영향을 없애기 위해, 이동로봇은 정지 상태로 유지하고 대신 장애물을 직선을 따라 이동시키도록 하였다. 그림 12에 보인 바와 같이 지름이 12.5 cm인 원통형 장애물을 이동로봇의 표면으로부터 1 m 떨어진 직선 궤적을 따라 왼쪽에서 오른쪽으로 일정한 간격(10 cm)으로 움직이며 매 번 초음파 센서의 거리 측정값을 읽었다. 이러한 상황에서 장애물을 바라보는 인접한 3개의 초음파 센서가 장애물을 탐지하게 되는데, 좌측, 중앙, 우측 초음파 센서를 각각 S_L , S_C , S_R 이라 하고, 또 각각의 거리 측정값을 ρ_L , ρ_C , ρ_R 이라 하자.

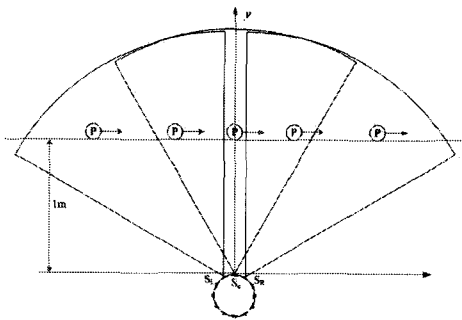


그림 12. 단일 장애물 탐지 실험 설정.

Fig. 12. The experimental setting for single obstacle detection.

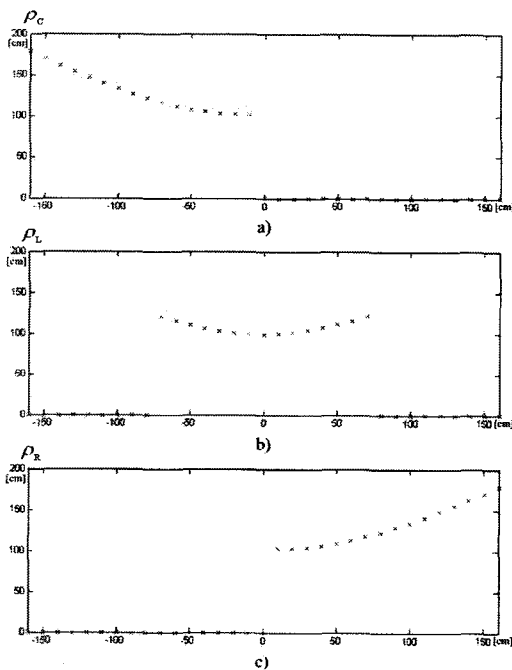


그림 13. 단일 장애물에 대한 측정 거리 데이터.

Fig. 13. The measured distance data for single obstacle detection.

그림 13은 원통 장애물의 이동에 따른 인접 3개 초음파 센서의 거리 측정값을 보이고 있다. 그림 13을 보면 이동로봇 왼쪽에서 장애물이 나타난 이후 한 동안 S_L 만 장애물을 탐지하다가, 이동로봇 중심에서 좌측 70cm 되는 지점에 도달했을 때부터 S_L 과 함께 S_C 도 장애물을 탐지하게 된다. 이어 장애물이 이동로봇의 중심 기준 좌우 10 cm 정도 이내에서는 S_C 만이 장애물을 탐지하게 된다. 그 이후로는 대칭적인 양상을 보여, 이동로봇이 오른쪽으로 이동함에 따라 S_C 와 S_R 이 함께 장애물을 탐지하는데 이어 S_R 만이 장애물을 탐지하게 된다. 그림 13에 나타나 있는 장애물 탐지 초음파 센서의 조합 정보를 활용함으로써 장애물이 존재하는 영역에 대한 세분화, 즉 초음파 센서의 위치 불확실성을 현저히 감소시킬 수 있게 된다.

그림 14는 그림 13의 측정 거리 데이터를 바탕으로 원통

장애물 이동 직선 궤적을 장애물 탐지 초음파 센서의 조합에 따라 구간으로 분할한 결과를 보인다. 그림 14를 보면, P_1 부터 P_3 까지의 간격은 약 170 cm이고 P_2 부터 P_5 까지의 간격은 약 140 cm임을 관찰할 수 있다. 이 결과를 이용하여 초음파 센서의 유효한 빔 폭을 계산하여 보면, S_C 의 경우 70° 정도인데 반해 S_L 과 S_R 의 경우 60° 정도로 나타나는데, 이는 주로 초음파 센서의 거울 반사(Specular Reflection) 효과에 기인한다.

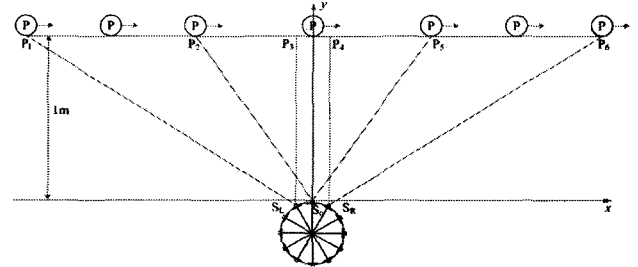


그림 14. 단일 장애물 탐지 실험 결과.

Fig. 14. The experimental results for single obstacle detection.

5.3. 이중 장애물 탐지 실험

중첩 초음파 센서 링을 이용한 이중 장애물에 대한 위치 불확실성 감소를 확인하기 위해 그림 15에 보인 바와 같이 이동로봇 전방에 2개의 장애물을 두고 좌측(S_L), 중앙(S_C), 우측(S_R) 초음파 센서로부터의 거리 측정값을 관찰하였다. 표 1은 3개의 인접 초음파 센서의 측정 거리값인 ρ_L , ρ_C , 및 ρ_R 을 보이고 있다. 중첩 초음파 링을 사용할 경우 표 1에 보인 장애물 탐지 초음파 조합 및 측정 거리를 이용하여 좌측에 위치한 원거리 장애물과 중앙 쪽에 위치한 근거리 장애물을 구분해서 탐지할 수 있음을 알 수 있다. 중첩 초음파 센서와 단일 초음파 센서간의 비교를 위해 중앙(S_C) 초음파 센서만을 사용한 경우 측정 거리값 ρ_C 를 표 1에 추가하였다. 물론, 단일 초음파 센서만으로는 2개의 장애물을 구분하여 탐지할 수 없고 단지 중앙의 근거리 장애물만을 탐지할 수 있게 된다.

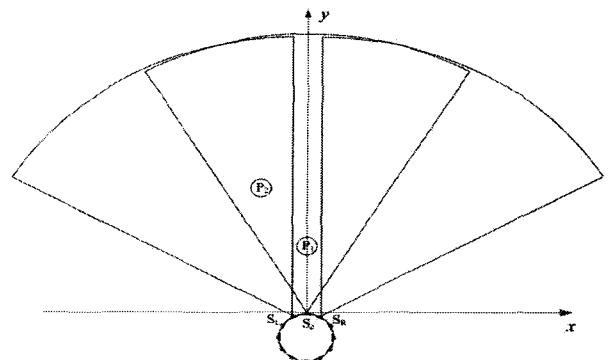


그림 15. 이중 장애물 탐지 실험 설정.

Fig. 15. The experimental setting for double obstacle detection.

표 1. 이중 장애물 탐지 실험 데이터.

Table 1. The experimental data for double obstacle detection.

	ρ_L	ρ_C	ρ_R
중첩 초음파	176.4 cm	76.8 cm	∞ cm
단일 초음파	NA	76.8 cm	NA

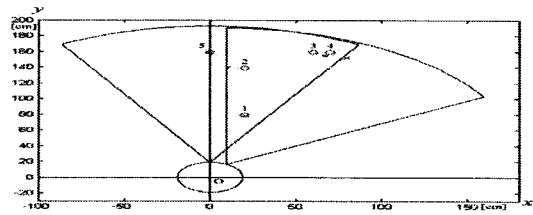


그림 16. 장애물 위치 산정 실험 설정 및 결과.

Fig. 16. The experimental setting and results for determining the position of an obstacle.

표 2. 장애물 위치 산정 실험 데이터.

Table 2. The experimental data for determining the position of an obstacle.

장애물 번호	실제 위치 [cm] (x, y)		측정 거리값 [cm] (ρ_L, ρ_C, ρ_R)			추정 위치 [cm] (x, y)	
	x	y	ρ_L	ρ_C	ρ_R	x	y
1번	20	79	∞	62.4	62.4	20.9	77.8
2번	20	139	∞	120.6	122.7	10.4	139.2
3번	60	159	∞	151.6	150.0	66.9	155.0
4번	70	159	∞	155.1	152.7	79.6	152.1
5번	0	159	∞	138.7	∞	0.0	157.7

5.4. 장애물 위치 산정 실험

그림 16과 같이 이동로봇 전방의 장애물의 위치를 변화시키면서 인접한 3개 초음파 센서의 측정 거리값을 읽고, 이를 이용하여 식 (5) 또는 (10)에 의거 장애물의 위치 또는 거리를 산정하는 실험을 행하였다. 표 2는 5회에 걸쳐 실시한 실험 데이터와 연산 결과를 보이고 있다. 그림 16에 장애물의 실제 위치와 함께 연산을 통한 얻어진 장애물의 산정 위치를 각각 'o'와 'x'로 나타내었다. 그림 16으로부터, 장애물의 거리가 멀어질수록, 또한 빔 폭의 가장자리에 가까울수록 실제 위치와 산정 위치간의 오차가 커지는 경향이 있음을 관찰할 수 있다. 반복 실험 결과 오차는 최대 10 cm 이내로 한정되는 것을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 상대적으로 적은 개수의 중저가대의 저지향성 초음파 센서를 사용하되, 빔 폭 중첩을 활용하여 초음파 센서 고유의 위치 불확실성을 감소시키고, 이를 활용하여 장애물 탐지 능력을 향상시키는 방안을 제안하였다. 본 논문의 구체적인 기여로서는 1) 빔 폭 중첩을 이용한 위치 불확실성 감소 원리 규명, 2) 초음파 센서 측정 데이터로부터 이동로봇 기준 장애물 위치 산정, 3) 이동로봇 장애물 탐지에 적합한 중첩 초음파 센서 모델 수립 등을 들 수 있다. 다수의 고가의 고지향성 초음파 대신 본 논문에서와 같이 적은 개수의 중저가의 저지향성 초음파 센서를 중첩 배열하여 사용하면, 장애물 탐지 성능 저하 없이도 센서 장치 비용 및 데이터 처리 비용을 현저히 줄일 수 있게 된다.

참 고 문 헌

- [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. Kuc, "Physically Based Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-9, no. 6, pp. 766-778, 1987.
- [3] 이종락, 초음파와 그 사용법, 세화출판사, 1997.
- [4] 최병준, 김수일, 김춘승, 이연정, 이상룡, "자율이동로봇을 위한 초음파 센서 응용기술," 제어자동화시스템공학회지, 제8권, 제5호, pp. 31-42, 2002.
- [5] H. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps for Wide Angles Sonar," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 116-121, 1985.
- [6] A. Elfes, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE J. Robotics and Automation, vol. RA-3, no. 3, pp. 249-265, 1987.
- [7] S. A. Walter, "The Sonar Ring: Obstacle Detection for a Mobile Robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1574-1579, 1987.
- [8] I. Ulrich and J. Borenstein, "The GuideCane-Appling Mobile Robot Technologies to Assist the Visually Impaired," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 31, no. 2, pp. 131-136, 2001.
- [9] www.polaroid.com.

[10] www.murata.com.

[11] 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.

[12] P. J. McKerrow, "Echolocation-from Range to Outline Segments," Robotics and Autonomous Systems, vol. 11, no. 4, pp. 205-211, 1993.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] H. Moravec, "Sensor Fusion in Certainty Grids for Mobile Robot," AI Magazine, vol. 9, no. 2, pp. 61-74, 1988.

[21] 이상협, 빔 폭이 중첩된 초음파 센서를 이용한 이동로봇의 장애물 탐지, 석사학위논문, 한국외국어대학교, 2009.



김 성 복(Sungbok Kim)
 1980년 2월 서울대 전자공학과(학사)
 1882년 2월 한국과학기술원
 전기및전자공학과(석사)
 1993년 5월 미국 University of Southern
 California 전기공학과(박사)

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



이 상 협(Sanghyup Lee)
 2007년 2월 한국외국어대학교
 디지털정보공학과(공학사)
 2007년~ 현재 한국외국어대학교
 디지털정보공학과 석사과정

※주관심분야 : 지능형 로봇시스템의 설계 및 제어