

이동로봇을 위한 IR 랜드마크 기반의 실시간 실내 측위 시스템

A Real-time Localization System Based on IR Landmark for Mobile Robot in Indoor Environment

이재영*, 채희성, 유원필
(Jae Y. Lee, Hee Sung Chae, and Won Pil Yu)

Abstract : The localization is one of the most important issues for mobile robot. This paper describes a novel localization system for the development of a location sensing network. The system comprises wirelessly controlled infrared landmarks and an image sensor which detects the pixel positions of infrared sources. The proposed localization system can operate irrespective of the illumination condition in the indoor environment. We describe the operating principles of the developed localization system and report the performance for mobile robot localization and navigation. The advantage of the developed system lies in its robustness and low cost to obtain location information as well as simplicity of deployment to build a robot location sensing network. Experimental results show that the developed system outperforms the state-of-the-art localization methods.

Keywords : localization, navigation, artificial landmark, mobile robot

1. 서론

이동로봇이 목적지에 대한 경로계획을 세우고 자율주행을 하기 위해서는 자기위치를 파악하는 것이 전제되어야 한다. 위치인식은 이동로봇을 위한 핵심기술로 로봇이 속한 공간에서의 2차원 좌표와 로봇이 향한 방향정보를 파악하는 것이다. 그동안 로봇 측위를 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며 최근의 로봇 인프라 기술, 무선 통신 및 센서 네트워크 기술의 발달에 따라 지능형 로봇 서비스 공간 구축을 위한 기술적 인프라가 형성되면서, 실내공간에서의 정확한 위치인식 기술에 대한 요구가 한층 더 높아지고 있다[1,2].

무선통신 기반의 위치인식 기술로서 가장 잘 알려진 GPS (Global Positioning System) 기술은 높은 정확도, 전세계적 동작, 저렴한 비용으로 인해 실외 위치인식 시스템으로 널리 이용되고 있다[3]. 그러나 실내 환경의 경우에는 잘 알려진 다중경로 페이딩(multi-path fading), 상호 간섭, LOS (Line of Sight) 제약 등으로 인해 안정적인 위치인식이 어려운 문제점을 갖는다.

RSSI (Received Signal Strength Indicator), TOA (Time-Of-Arrival), AOA (Angle-Of-Arrival), TDOA (Time-Difference-Of-Arrival) 등에 기반한 삼각측위 기술들은 전파신호를 처리하여 위치정보를 산출하기 위한 잘 알려진 기술들이다. 그러나 이러한 기술들은 이미 언급한 전파 고유의 문제점들로 인해 환경에 따른 전파 특성, 송수신기의 기하학적 관계 등에 따라 심각한 성능 저하를 나타낸다. 이러한 문제점들을 극복하기 위한 한 시도로 실내의 전파 분포를 위치별로 저장하여 패턴인식 기법을 적용한 방법도 보고된 바 있

다[2,4]. 최근에는 UWB (Ultra WideBand) 시스템이 정확한 위치정보를 얻기 위한 한 방법으로 주목받고 있지만 전파 특성을 공유하기 때문에 안정성과 정확도 측면에서 한계를 갖는다[5,6].

컴퓨터 비전 분야에서 자연 표식을 이용한 위치인식 방법들도 많은 연구가 진행되고 있다[7]. 이들 방법은 실내 공간에 자연적으로 존재하는 특징들 중에서 배경과 구분력이 뛰어나며 로봇의 위치변화에 따른 스케일, 회전, 크기 변화 등에 강인하게 반복적으로 검출 가능한 특징점들을 자동으로 추출하여 로봇의 위치를 계산한다. 최근에는 로봇의 위치파악과 지도작성 문제를 동시에 풀고자 하는 SLAM 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 여기에는 EKF-SLAM, Fast SLAM, VSLAM 등이 포함된다. 이들 자연표식을 이용한 시각 기반의 위치인식 방법들은 일정 부분 좋은 성능을 보이지만 조명 등 환경 변화에 민감하고 긴 연산시간에 따른 실시간성 확보 문제 등은 아직도 해결해야 될 문제점으로 남아 있다.

실내 위치 인식에 있어서 이상적인 센서는 정확하고 안정적이며 저렴하게 구현할 수 있는 것이다. 또한 유연한 모션 제어 및 동적 경로 변경을 위해 위치정보의 실시간성이 요구되며, 가정, 사무실 등 다양한 구조와 규모를 갖는 공간에 위치인식 네트워크를 구성하기 위해서는 위치인식 범위를 손쉽게 확장할 수 있어야 한다. 자연광 및 인공조명 등 외부환경 변화에 대한 강인성 또한 매우 중요한 요소이다. 기존의 위치인식 센서들은 각각의 장단점들을 가지고 있으며 이러한 조건을 모두 만족하는 센서는 현재까지는 매우 드문 상태이다[8].

최근 들어, 무선 네트워크를 기반으로 건물 내에서 로봇과 인간을 지원하기 위한 지능형 시스템에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[9-11]. 이러한 공간 기술에 있어서 환경

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 30., 채택확정 : 2006. 6. 10.

이재영, 채희성, 유원필 : 한국전자통신연구원

(jylee@etri.re.kr/hschae@etri.re.kr/ywp@etri.re.kr)

※ 본 논문은 정부통신부의 지원하에 연구되었음.

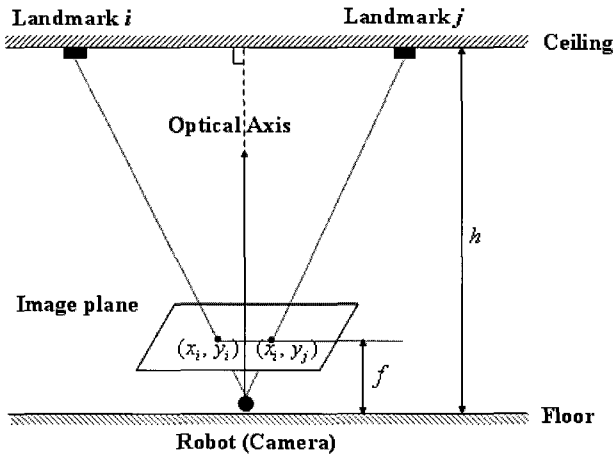


그림 1. 제안된 위치인식 시스템의 센서 배치.

Fig. 1. Sensor configuration of the proposed location sensing system.

정보를 파악하는 것은 지능형 서비스 공간을 위한 핵심 요소이다. 위치 정보는 크게 보아 지능형 서비스 제공을 위한 환경 정보의 하나로 볼 수 있으며, 넓은 공간에서 연속된 로봇의 위치 정보를 제공하기 위하여 네트워크로 연동되는 센서들을 공간에 내제하는 것은 이러한 문제에 대한 유망한 접근법이다.

본 논문에서는 위치인식 네트워크를 구성하기 위한 위치인식 센서 시스템을 제안한다. 위치인식 네트워크는 특정 로봇 작업이 전통적인 방법에 비해 좀더 효율적으로 수행될 수 있고 로봇과 인간이 이러한 공간으로부터 지원을 받을 수 있는 유비쿼터스 로봇 공간을 구축하기 위한 핵심 요소로 적용된다. 제안되는 위치인식 시스템은 일반적인 실내환경에서 정확하고 안정적인 위치정보를 산출하며 로봇이 이동중에도 실시간 위치갱신이 가능하다. 또한 제안된 시스템은 무선통신 기능을 갖추어 센서 네트워크 등 지능형 서비스 공간 구축을 위한 네트워크 환경에 쉽게 접목하여 확장될 수 있는 특징을 갖는다.

본 논문에서 제안된 위치인식 시스템으로 위치인식을 하기 위한 최소한의 요구는 천장에 부착되는 두개의 IR (infrared) 광원 표식과 이동로봇의 상단에 장착되는 이미지 센서이다. 이러한 구성 자체는 사실 로봇틱스 분야에서 잘 알려진 방법이다[12-14]. 그러나 이를 이용하여 임의의 구조와 크기를 갖는 실내공간에서 실질적인 위치인식 네트워크를 구축하는 것은 또 다른 문제로 안정성, 실시간성, 확장성 등 많은 문제를 해결해야 하나 이에 대한 해결책은 구체적으로 제시되고 있지 않다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 제안된 위치인식 센서 시스템의 구성요소에 대해 설명한다. III절에서는 위치인식을 위한 기본적인 위치산출 원리에 대해 기술하고, 이를 기반으로 IV절에서는 제안된 시스템의 실시간 위치산출 알고리즘 및 위치인식 네트워크 구축 방법에 대해 기술한다. 그리고 V절에서는 실험을 통해 제안된 센서 시스템의 성능을 보이고 로봇 주행에 적용한 결과를 보인다. 마지

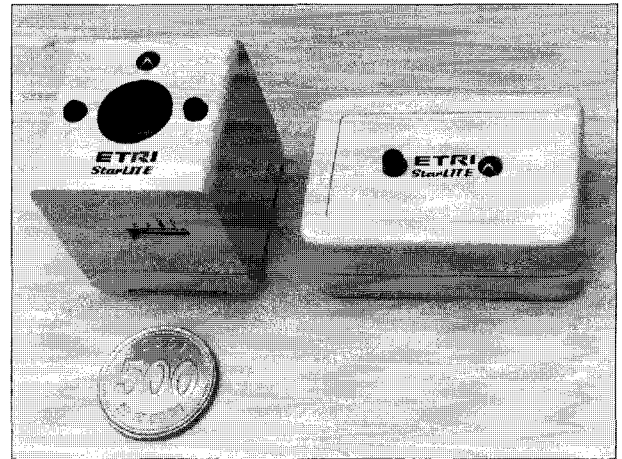


그림 2. 제안된 위치인식 시스템의 장치 구성 요소.

Fig. 2. System components of the proposed location sensing system.

막으로 VI절에서는 본 논문의 기여를 요약하고 장단점에 대해 논하며 향후 연구방향에 대해 기술한다.

II. 시스템 구성

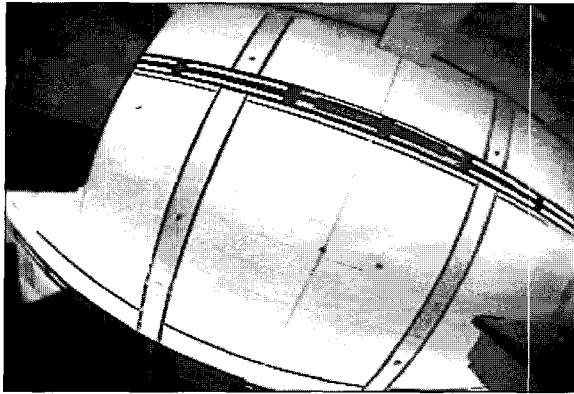
제안된 위치인식 센서 시스템은 소정의 광원 표식들과 하나의 이미지 센서로 구성된다. 그림 1과 같이 각 광원 표식들은 물리공간의 천장에 부착되고 이미지 센서는 카메라의 광학축이 천장을 수직으로 바라보도록 로봇의 상단에 설치된다. 이러한 표식 및 센서 배치는 표식이 사람 또는 정적 장애물에 가려질 확률을 최소화시키고, 또한 자유도를 제한함으로써 위치인식을 위한 연산과정을 매우 단순화시킨다.

각 광원 표식에는 특정 파장대의 빛을 발산하는 IR 광원이 포함되며 무선 통신을 통한 외부신호에 따라 점멸/점등할 수 있는 기능을 갖는다. 각 광원표식들을 독립적으로 제어하기 위해 각 광원표식에는 유일한 ID (Identifier)가 부여된다. 이미지 센서는 일반적인 CCD 혹은 CMOS 카메라로서 천장에 설치되는 광원표식들을 감지하여 위치정보를 산출하기 위해 사용된다. 이미지 센서에는 광원표식에서 발산되는 특정 파장대의 빛만을 필터링해 투과시키기 위한 광학필터가 별도로 장착되고 넓은 카메라 시야 확보를 위해 광각렌즈가 사용된다.

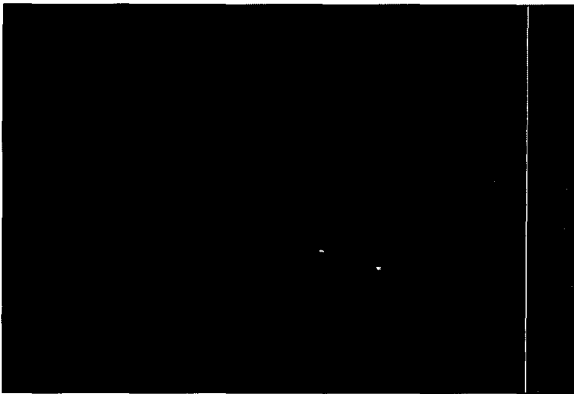
그림 2는 위치인식 네트워크를 구성하기 위해 개발된 기본 위치인식 센서 모듈을 보여준다. 그림 2에서 왼쪽은 위치 센서 모듈을 나타내고 오른쪽은 광원표식 모듈을 나타낸다. 개발된 위치 센서 모듈에는 카메라 모듈 외에도 무선 통신 모듈 및 자체 마이크로 프로세서가 내장되어 영상 처리 및 위치산출에 필요한 계산을 내부적으로 처리하고 계산된 위치결과를 표준 인터페이스를 통해 외부로 출력한다.

III. 위치산출 원리

TOA, AOA 등을 이용한 기존의 전파방식의 삼각 측위 기술들은 위치정보를 산출하기 위해 최소한 3개 이상의 표



(a)



(b)

그림 3. 광원표식에 대한 샘플 이미지. (a) 일반 카메라로 촬영한 영상. (b) 광학 필터를 장착한 후 촬영한 영상.

Fig. 3. Two sample images of a pair of infrared landmarks. (a) Image captured by an ordinary camera. (b) Image captured by the same camera with an infrared band-pass filter.

식 혹은 비콘(beacon)을 필요로 한다. 그러나 제안된 위치인식 시스템은 카메라와 천장의 수직 조건을 이용하여 2개의 표식만으로 로봇의 2차원 좌표와 방향 정보를 산출한다.

제안된 시스템의 위치산출 과정은 천장에 설치된 광원표식들을 카메라로 촬영하여 영상을 획득하고 획득된 영상에서 표식의 영상좌표를 검출하는 표식검출 단계와 검출된 표식의 영상좌표와 각 표식의 물리공간에서의 공간좌표를 참조하여 위치정보를 계산하는 위치산출 단계로 구성된다. 공간에 설치된 각 표식의 공간좌표는 캘리브레이션 또는 측정을 통해 미리 주어진 것으로 가정한다.

1. 표식검출

이미지 센서에 장착된 광학필터는 가시 대역의 빛은 차단하고 광원 표식으로부터의 IR 대역의 특정 파장대만을 투과시킨다. 그림 3은 사용된 광학 필터의 효과를 보여준다. 그림 3(a)는 천장에 설치된 한쌍의 광원표식을 일반 카메라로 촬영한 샘플 영상이고, 그림 3(b)는 동일한 장면을 동일 카메라에 광학필터를 장착하여 촬영한 영상이다. 컴퓨터 비전 분야에서 잘 알려져 있듯이 변화하는 조명 조건에서 영상으로부터 특정 패턴을 안정적으로 검출하는 것은 매우 어려운 문제이다. 특히, 로봇 이동에 따라 패턴의 크

기, 방향 및 시점이 변할 경우 문제는 더욱 복잡해진다. 제안된 광원표식과 광학필터를 이용한 방법은 표식 검출 문제를 간단한 이진화 문제로 단순화시키고 보다 중요하게는 주야간 관계없이 안정적인 표식검출을 가능케 한다.

표식검출을 위해 촬영된 영상을 $I(x, y)$ 에서의 영상 밝기를 $I(x, y)$ 라 하자. 먼저 미리 정의된 밝기 임계값 T 로 영상 I 를 이진화한다. 결과로 얻어진 이진영상에 연결성분석(connected component analysis) 과정을 적용하여 표식 후보영역들을 검출한다. 후보 영역들 중 특정 크기 이하인 영역들은 노이즈로 간주하여 제거한다. 최종적으로 검출된 표식 영역들을 b_1, b_2, \dots, b_m 라 하자. 이때, 각 표식영역 b_k 의 영상좌표 (x_k, y_k) 는 다음 수식에 의해 주어진다. 단, $k=1, \dots, m$.

$$\begin{aligned} x_k &= \frac{1}{S_k} \sum_{(x,y) \in b_k} xI(x,y) \\ y_k &= \frac{1}{S_k} \sum_{(x,y) \in b_k} yI(x,y) \\ S_k &= \sum_{(x,y) \in b_k} I(x,y) \end{aligned} \tag{1}$$

제안된 시스템에서 위치 산출을 위해서는 동시에 2개 이상의 광원표식이 카메라의 시야에 검출되어야 한다. 따라서 위치산출이 가능한 영역의 크기는 카메라의 시야각에 의해 결정되고, 넓은 카메라 시야 확보를 위해 광각렌즈가 사용된다. 광각렌즈는 렌즈 특성상 영상왜곡이 심하기 때문에 정확한 위치산출을 위해서는 렌즈계의 왜곡보정 과정이 필수적으로 요구된다. 카메라 캘리브레이션 및 렌즈계 왜곡보정을 위해 본 논문에서는 잘 알려진 Zhengyou Zhang의 알고리즘을 적용하였다[15]. 위치산출의 실시간성을 위해 렌즈계 왜곡보정은 검출된 표식의 영상좌표에 대해서만 수행된다. 이후 본 논문에서는 설명의 편의상 검출된 표식의 영상좌표는 모두 렌즈계의 왜곡이 보정된 것으로 가정한다.

2. 위치산출

제안된 시스템의 위치산출 과정을 설명하기 위해 먼저

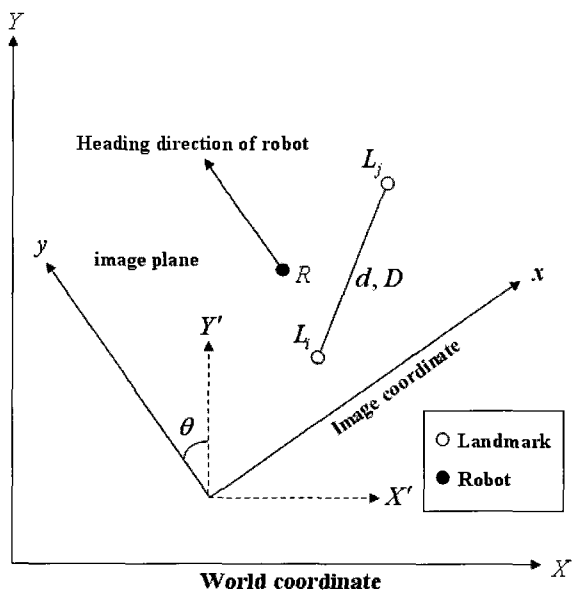


그림 4. 로봇 위치산출을 위한 좌표계 시스템.

Fig. 4. Two coordinate systems used in robot localization.

영상좌표계와 공간좌표계를 정의한다. 영상좌표계(image coordinate)는 영상에서의 픽셀좌표계로, 카메라가 천장을 수직으로 바라보도록 설치되기 때문에 영상좌표계의 y축은 로봇의 정면 방향과 일치하고 x축은 로봇의 오른쪽 방향과 일치된다. 공간좌표계(world coordinate)는 로봇이 운용되는 공간상에 미리 정의되는 물리적 좌표계로서 최종적인 로봇의 위치정보는 공간좌표계 상의 좌표로 표현된다. 그림 4는 영상좌표계와 공간좌표계 사이의 관계도를 보여준다.

표식검출 단계에서 검출된 두 표식을 L_i, L_j , 각각의 영상좌표를 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$, 해당 표식에 대해 미리 저장된 공간좌표를 각각 $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j)$ 라 하자. 또한 영상중심의 픽셀좌표를 (c_x, c_y) , 검출된 두 표식 사이의 픽셀 거리를 각각 d, D , 구하고자 하는 로봇의 공간좌표계 상의 위치정보를 $(r_x, r_y; \theta)$ 라 하자. 여기서, θ 는 공간좌표계의 Y축을 기준으로 한 로봇의 방향각이다(heading angle).

카메라가 로봇에 장착되고 또한 천장을 수직으로 바라보기 때문에 영상에서의 로봇의 위치는 영상중심이 된다. 즉, 로봇의 영상좌표는 (c_x, c_y) 이다. 로봇의 공간좌표 (r_x, r_y) 는 검출된 표식 L_i, L_j 의 영상좌표를 공간좌표로 변환시키는 변환과정(c_x, c_y)에 적용함으로써 계산된다. 카메라가 천장을 수직으로 바라보기 때문에 좌표계 변환은 스케일(scale) 변환, 2차원 회전 변환, 2차원 평행 이동만으로 간단히 계산된다. 즉, 로봇의 위치정보 $(r_x, r_y; \theta)$ 는 다음 수식에 의해 주어진다.

$$s = \frac{D}{d} = \frac{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}$$

$$\cos \theta = \frac{(x_j - x_i)(X_j - X_i) + (y_j - y_i)(Y_j - Y_i)}{dD} \quad (2)$$

$$\sin \theta = \frac{(y_j - y_i)(Y_j - Y_i) - (x_j - x_i)(X_j - X_i)}{dD}$$

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix}$$

이상 설명된 위치산출 과정은 검출된 표식들의 ID가 식별 가능한 것을 전제 조건으로 한다. 표식 식별은 표식검출 단계에서 검출된 표식들의 영상좌표에 미리 저장된 공간좌표를 대응시키기 위해서 반드시 필요한 과정이다. 앞서 설명한 바와 같이 제안된 광원표식과 광학필터를 이용한 방법은 외부 조명에 관계없이 안정적인 표식 검출을 가능하게 하고 영상처리에 필요한 연산비용을 최소화시킨다. 하지만 광원표식들 사이에는 형태상의 차이가 없기 때문에 영상처리 만으로는 이들을 식별할 수 없다. 다음 절에서는 검출된 표식들을 실시간으로 식별하고 위치인식 범위를 임의의 공간으로 확장시키기 위한 방법을 기술한다.

IV. 이동로봇의 실시간 위치인식

제안된 위치인식 시스템에서 이동로봇의 위치인식은 초기위치 인식 단계와 실시간 위치갱신 단계로 이루어진다. 초기위치 인식은 로봇이 위치정보를 전혀 모르는 상태에서 로봇이 놓여진 실내공간 상의 위치를 파악하는 것이다. 일단 초기위치가 파악되면 이후에는 표식의 영상추적 및 영상좌표 예측을 통해 실시간으로 위치정보가 갱신된다.

1. 초기위치 인식

이동로봇의 초기위치 인식 단계에서는 검출된 표식을 식별하기 위해 무선통신을 통한 각 광원표식의 순차적 점등, 점멸 제어가 사용된다. 먼저 설치된 표식들 중 오직 하나의 광원표식만을 켜 후 영상을 획득한다. 획득된 영상에서 표식이 검출되면 검출된 표식은 점등시켰던 표식과 동일한 것으로 식별된다. 이러한 검출 및 식별 과정은 위치산출에 필요한 2개의 표식이 검출될 때까지 설치된 각 표식에 대해 순차적으로 반복된다. 마지막으로, 검출 및 식별된 표식들에 대해 III절에서 설명된 위치산출 과정을 적용하여 초기위치를 산출한다.

이상 설명된 초기위치 인식과정은 로봇이 정지된 상태에서 이루어져야 하고 공간에 설치된 표식의 총 개수에 비례하여 시간이 소요되는 문제점을 갖는다. 하지만 이러한 광원표식의 점등, 점멸 제어를 통한 위치산출 과정은 최초 한번만 수행되고 이후에는 표식의 영상추적 및 영상좌표 예측을 통해 로봇의 정지 및 주행 상태에 관계없이 실시간 위치갱신이 이루어진다.

2. 실시간 위치갱신

초기위치가 인식된 이후에는 일정한 시간 간격으로 카메라로부터 영상을 획득하고 획득된 영상으로부터 표식을 검출하여 로봇의 위치정보를 갱신한다. 로봇의 위치정보 갱신 주기는 사용된 카메라의 영상 획득 속도에 의해 결정된다. 이동로봇의 실시간 위치갱신 과정은 다음과 같다.

현재 영상을 획득한 시각을 t , 바로 이전 영상을 획득한 시각을 $t-1$ 이라 하자. 시각 $t-1$ 에 획득한 영상으로부터 검출된 표식을 L_i, L_j , 영상좌표를 $(x_i^{t-1}, y_i^{t-1}), (x_j^{t-1}, y_j^{t-1})$, 해당 표식에 대해 미리 저장된 공간좌표를 $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j)$, 산출된 로봇위치를 $(r_x^{t-1}, r_y^{t-1}; \theta^{t-1})$ 라 하자. 시각 $t-1$ 에서의 표식 및 로봇 위치정보는 최초에는 초기위치 인식 단계에서 얻어진 값들로 설정된다. 다음으로, 현재 획득된 영상으로부터 영상처리 과정을 거쳐 표식을 검출한다. 이 때, 영상 전체에서 표식을 검출하지 않고 이전 시각 $t-1$ 에서 검출된 표식의 영상좌표를 중심으로 한 탐색영역 내에서만 표식을 검출한다(그림 5(a)). 탐색영역의 크기는 로봇의 이동속도 및 천장

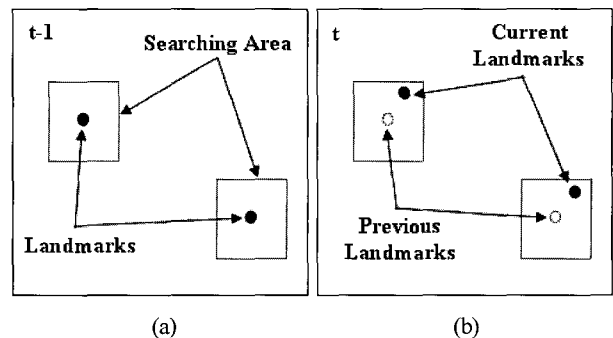


그림 5. (a) 표식추적을 위한 탐색영역 설정. (b) 로봇 이동에 따른 표식 위치 변화.

Fig. 5. (a) Searching area for landmark tracking. (b) Position change of the landmarks according to the movement of a robot.

의 높이를 고려하여 카메라의 영상획득 간격 동안 영상 내에서 표식이 최대로 이동할 수 있는 거리로 설정한다. 만일 (x_i^{t-1}, y_i^{t-1}) 를 중심으로 한 탐색영역 내에서 표식이 검출되면 검출된 표식은 L_i 로 식별된다. 표식 L_i 의 시각 $t-1$ 에서의 영상좌표와 시각 t 에서의 영상좌표는 로봇의 이동으로 인해 차이가 발생할 수 있다(그림 5(b)). 그러나 카메라의 영상획득 속도에 비해 로봇의 이동속도는 상대적으로 빠르지 않기 때문에 영상좌표의 차이는 크지 않게 된다. 예를 들어, 초당 30 프레임의 영상획득 속도와 3m/s의 로봇 이동속도를 가정하면 한 영상획득 주기 동안 로봇은 10cm를 이동하게 되고 일반적인 천장 높이를 고려하면 영상에서는 많아야 수 픽셀 내외의 위치 차이가 발생하게 된다. 따라서 시각 t 에서 검출된 표식과 시각 $t-1$ 에서 검출된 표식의 영상좌표 차이가 작은 경우 이들은 동일한 표식으로 식별될 수 있다. 마찬가지로, (x_i^{t-1}, y_i^{t-1}) 를 중심으로 한 탐색영역 내에서 검출된 표식은 L_i 로 식별된다.

만일 두 탐색영역 내에서 모두 표식이 검출된 경우에는 이미 식별이 되었기 때문에 새로 검출된 영상좌표와 수식 (2)로부터 새로운 로봇 위치정보를 산출할 수 있다. 그러나 넓은 공간에 걸쳐 위치인식 네트워크를 구축하기 위하여 다수의 표식을 사용한 경우, 로봇의 이동에 따라 영상에서 추적하던 표식이 사라지고 새로운 표식이 검출될 수 있다. 새롭게 검출된 표식은 앞서 기술된 영상추적으로는 식별할 수 없다. 이를 해결하기 위해, 로봇의 위치로부터 역으로 각 표식의 영상좌표를 예측하여 새로 검출된 표식의 영상좌표와 비교하는 방법을 사용한다.

만일 하나 이상의 탐색영역 내에서 표식검출에 실패한 경우, 시각 t 에서 획득한 영상 전체에서 표식검출을 수행한다. 이 때, 새로 검출된 표식 L 의 영상좌표를 (x, y) 라 하자. 표식 L 을 식별하기 위해 공간에 설치된 각 표식에 대해 시각 $t-1$ 에서의 로봇 위치를 기준으로 영상좌표를 예측한다. 공간에 설치된 표식들을 L_1, L_2, \dots, L_n 라 하자. 표식 L_k 의 예측된 영상좌표 (x_k', y_k') 는 수식 (2)로부터 다음과 같이 계산된다. 단, $k = 1, \dots, n$.

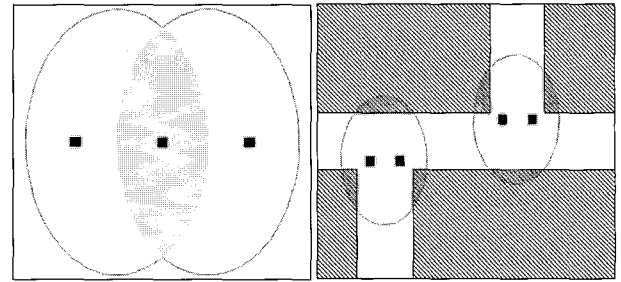
$$\begin{bmatrix} x_k' \\ y_k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} - \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \cos \theta^{t-1} & \sin \theta^{t-1} \\ -\sin \theta^{t-1} & \cos \theta^{t-1} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} r_x^{t-1} \\ r_y^{t-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

$$s = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

$$\text{oversqrt}(x_i^{t-1} - x_j^{t-1})^2 + (y_i^{t-1} - y_j^{t-1})^2$$

표식 L 은 L_1, L_2, \dots, L_n 중 (x, y) 와 가장 가까운 예측된 영상좌표를 갖는 표식으로 식별된다. 각 표식에 대해 예측된 영상좌표는 시각 $t-1$ 에서의 로봇의 위치를 기준으로 계산되었기 때문에 현재 영상(시각 t)과는 차이가 발생할 수 있다. 그러나 로봇의 이동으로 인한 위치변화는 크지 않기 때문에 영상좌표의 근접성에 기반하여 표식을 식별할 수 있다.

이상에서 기술한 표식의 영상추적 및 영상좌표 예측을 통해 현재 영상에서 최종적으로 검출 및 식별된 표식을 L_p, L_q , 영상좌표를 $(x_p, y_p), (x_q, y_q)$, 해당 표식에 대해 미리 저장된 공간좌표를 $(X_p, Y_p), (X_q, Y_q)$ 라 하면 새로운 로봇의 위치정보 (r_x^t, r_y^t, θ^t) 는 다음 수식에 의해 계산된다.



(a) Continuous arrangement (b) Discontinuous arrangement.

그림 6. 위치인식 네트워크 구축을 위한 표식 배치.

Fig. 6. Two kinds of landmark arrangement for the construction of a location sensing network.

$$s = \frac{D}{d} = \frac{\sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2}}{\sqrt{(x_p' - x_q')^2 + (y_p' - y_q')^2}}$$

$$\cos \theta^t = \frac{(x_q' - x_p')(X_q - X_p) + (y_q' - y_p')(Y_q - Y_p)}{dD} \quad (4)$$

$$\sin \theta^t = \frac{(y_q' - y_p')(Y_q - Y_p) - (x_q' - x_p')(X_q - X_p)}{dD}$$

$$\begin{bmatrix} r_x^t \\ r_y^t \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos \theta^t & -\sin \theta^t \\ \sin \theta^t & \cos \theta^t \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_p' \\ y_p' \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix}$$

3. 위치인식 네트워크 구축

제한된 시스템에서 위치산출을 위해서는 카메라 영상에 동시에 2개 이상의 표식이 검출되어야 한다. 따라서 위치인식 범위는 카메라의 시야각 및 천장 높이에 의해 제한되므로 넓은 공간 전체에 걸쳐 위치인식 네트워크를 구축하기 위해서는 다수의 표식 설치가 필요하다. 위치인식 네트워크 구축을 위한 표식 설치는 다음 두 가지 방식이 가능하다.

첫째, 그림 6(a)와 같이 실내공간의 임의의 위치에서 동시에 2개 이상의 표식이 카메라의 시야에 들어오도록 표식들을 설치한다. 이 경우 앞서 기술된 표식추적 및 영상좌표 예측을 통해 표식들이 자동전환 되면서 공간 전체에 걸쳐서 로봇 주행 중 실시간 위치정보가 산출된다.

둘째, 공간의 규모가 큰 경우에 표식들을 공간 전체에 걸쳐 설치하는 것은 비효율적이므로 그림 6(b)와 같이 코너나 통로입구 등 정밀한 위치정보가 필요한 곳을 중심으로 표식들을 분산 설치한다. 표식들을 분산 설치할 경우에는 제안된 위치인식 시스템으로 위치정보를 산출할 수 없는 영역이 발생할 수 있다. 이러한 문제는 영상예측에 기반한 표식식별 원리를 이용하여 dead-reckoning 등 기존의 측위기법과 제안된 위치인식 시스템을 혼합 운용함으로써 쉽게 해결할 수 있다.

V. 위치인식 성능 및 로봇 주행에의 적용

제한된 위치인식 시스템의 성능 실험에는 Active Media 사의 pioneer 로봇 플랫폼이 사용되었다(그림 7). 표식 검출을 위한 이미지 센서로는 초당 30프레임의 영상획득 속도와 352 × 240의 영상해상도를 갖는 1/3인치 CCD 카메라가 사용되었으며 넓은 시야각 확보를 위해 150도 화각의 2.1mm 렌즈가 장착되었다.

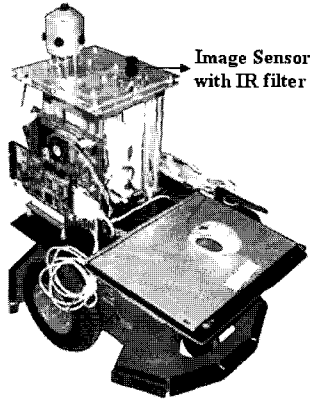


그림 7. 실험에 사용된 모바일 로봇 플랫폼.
Fig. 7. The mobile robot platform used for experiments.

1. 위치인식 성능

제안된 시스템의 성능실험은 위치인식 범위, 위치 정확도, 방향 정확도, 동일 지점에서의 위치 반복도에 대해 수행되었다.

위치인식 범위를 측정하기 위해 천장에 60cm 간격으로 두개의 표식을 설치하고 로봇을 이동시키면서 두 개의 표식이 모두 검출되는 영역의 크기를 측정하였다. 실험 결과 표식과 카메라의 수직거리가 3m인 경우 8.6m × 5.46m, 2m인 경우 5.6m × 3.7m의 영역에서 위치산출이 가능하였다.

위치 정확도 실험에서는 2.44m 높이의 천장에 1.2m 간격으로 표식을 설치하고 60cm 간격으로 로봇을 이동시키면서 산출된 위치를 측정하였다. 그림 8은 로봇의 방향을 0°로 고정시켰을 때의 실험 결과를 보여준다. 그림에서 흰색 원 (o)은 실제 위치를 나타내고 별표(*)는 측정된 위치를 나타낸다. 실험결과와의 평균 위치 오차는 4.1cm, 오차의 표준편차는 2.9cm이다. 위치 오차는 주로 광각렌즈 사용에 따른 영상왜곡에 의한 것으로 위치 정확도 향상을 위해서는 보다 정밀한 영상왜곡 보정이 필요하다.

방향 정확도 실험에서는 2m 높이의 천장에 60cm 간격으로 표식을 설치하고 10도 간격으로 로봇을 회전시키면서 산출된 방향 정보의 오차를 측정하였다. 그림 9는 표식 바로 밑과 표식으로부터 1.2m 떨어진 두 지점에서 각각 측정된 방향오차를 보여준다. 방향오차는 모두 ±1도 이내였으며 (a)의 경우 평균 0.26도, 표준편차 0.21, (b)의 경우 평균 0.37도, 표준편차 0.28의 결과를 보였다. 표식으로부터 멀어졌을 때 오차가 증가하는 것은 영상왜곡 문제와 관련된다.

위치 반복도(repeatability) 실험은 방향 정확도 실험의 경우와 동일한 표식 배치 하에서 수행되었다. 표 1은 표식 바로 밑의 (0,0) 지점과 외곽의 (200,200) 지점에서 반복적으로 측정된 실험 결과를 보여준다. 실험 결과에서 편차(deviation)는 위치오차의 영향을 제거하기 위해 측정값들의 평균을 기준으로 계산되었다. 표 1에서 볼 수 있듯이 동일 지점에서의 위치변화는 1cm 내외로 매우 안정적인 위치산출 결과를 보인다.

2. 로봇 주행에의 적용

제안된 시스템의 위치정보에 기반한 로봇 주행성능을 실험

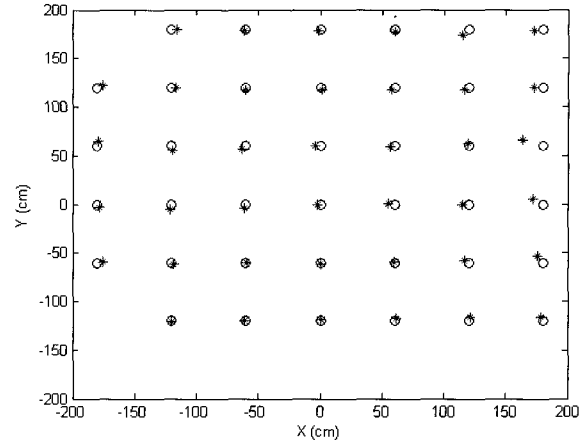


그림 8. 위치 정확도 실험 결과.
Fig. 8. Position accuracy of the proposed system.

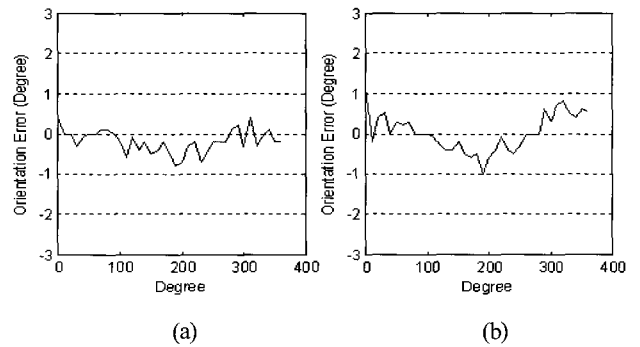


그림 9. 방향 오차. (a) 표식 바로 밑에서 측정된 결과. (b) 표식과 1.2m 거리에서 측정된 결과.
Fig. 9. Heading angle error. (a) Estimated result under a landmark. (b) Estimated result at distance of 1.2m from landmarks.

표 1. 위치 반복도 실험 결과.

Table 1. Experimental result of position repeatability. (unit: cm)

	(0,0)		(200,200)	
	Estimation	Deviation	Estimation	Deviation
1	(-2.1, -2.3)	0.02	(198.1, 196.7)	0.38
2	(-2.1, -2.3)	0.02	(198.5, 196.4)	0.78
3	(-2.1, -2.2)	0.08	(196.8, 197.1)	1.08
4	(-2.1, -2.3)	0.02	(197.5, 196.8)	0.33
5	(-2.1, -2.3)	0.02	(198.2, 196.7)	0.48
6	(-2.1, -2.3)	0.02	(198.5, 196.4)	0.78
7	(-2.1, -2.3)	0.02	(197.5, 196.8)	0.33
8	(-2.1, -2.2)	0.02	(198.1, 196.7)	0.38
9	(-2.0, -2.3)	0.02	(196.7, 195.3)	1.64
10	(-2.1, -2.3)	0.02	(197.5, 196.8)	0.33
mean	(-2.09, -2.28)	0.04	(197.74, 196.57)	0.65

하기 위하여 우리는 실제 사무실 환경에 그림 10과 같은 위치 인식 네트워크를 구축하였다. 대상 공간의 크기는 22.8m × 21.6m의 대규모 공간으로 위치인식을 위해 총 11

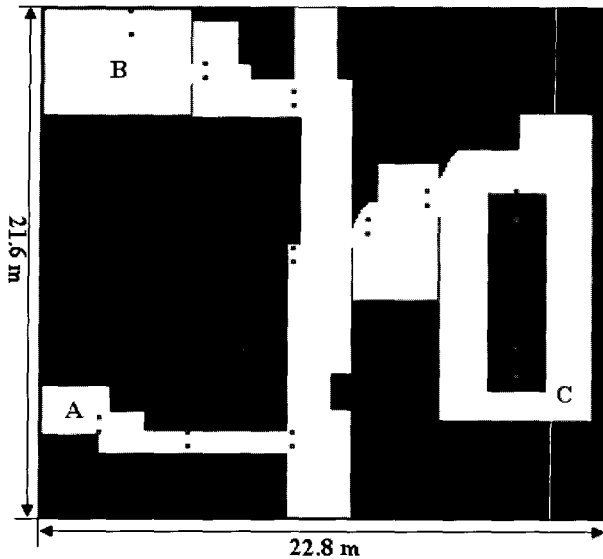


그림 10. 로봇 주행을 위한 격자 지도 및 표식 배치.

Fig. 10. Grid map for robot navigation and landmark arrangement.

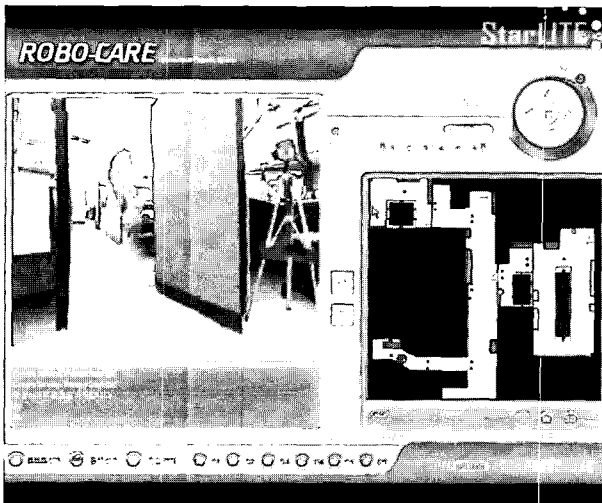


그림 11. 사용자 인터페이스 프로그램.

Fig. 11. User Interface program.

쌍의 광원표식들이 사용되었다. 표식들은 주로 정밀한 위치 정보가 요구되는 좁은 통로의 진입점을 중심으로 설치되었다. 환경 맵으로는 단위 셀의 크기가 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 인 228×216 의 격자 지도(grid map)가 사용되었다. 로봇 주행 속도는 2.5m/sec 로 설정하였고, 경로 탐색에는 A*를 기반으로 실시간성을 위해 자체 개발된 알고리즘이 적용되었다. 설치된 표식쌍들 사이에 표식이 검출되지 않는 중간 영역에서는 오도메트리(odometry)를 연동하여 공간상의 전 영역에서 위치정보가 산출되도록 하였다.

주행 시험은 주로 지도상의 A지점, B지점, C지점을 목표로 주고 로봇에 이동 명령을 내림으로써 수행되었다. 주행 도중 로봇은 구축된 위치인식 네트워크로부터 실시간 위치정보를 제공받고 이를 기반으로 주행 오류를 복구하기 위한 동적 경로탐색을 수행한다. 로봇이 위치인식 네트워크

로부터 제공받은 위치정보는 무선통신을 통해 그림 11과 같이 사용자 인터페이스 프로그램 상에 표시된다.

수십여 차례에 걸친 주행 시험 결과 제안된 위치인식 시스템의 정확한 위치정보를 기반으로 전 지역에서 원활한 자율 주행이 가능함을 확인하였다. 특히 지도상의 지점 A와 중앙 통로 사이의 좁은 통로는 폭이 80cm 로 모션제어 오차 및 격자 맵의 해상도(10cm)에 따른 오차로 인해 일반적인 방법으로는 통과하기 매우 힘든 지역이다. 실험에 사용된 로봇의 폭이 40cm 임을 감안하면 해당 통로에 대한 원활한 주행은 제안된 시스템의 우수성을 잘 설명한다.

VI. 결론

본 논문에서 우리는 IR 광원표식과 이미지 센서에 기반한 실시간 위치인식 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 위치인식 시스템이 핵심적으로 갖추어야 될 위치정보의 정확성, 안정성, 실시간성, 그리고 임의의 공간으로의 확장성에 대한 종합적인 해결책을 제시한다. 실험 결과는 제안된 시스템을 기반으로 이동로봇의 자율주행을 위한 실질적인 위치인식 네트워크 구축이 가능함을 보여준다.

앞으로의 지능형 로봇에 대한 연구는 로봇 뿐만 아니라 생활 가전, 정보 단말, 기계 등 모든 사물 및 공간 자체에 컴퓨팅 기능과 네트워크 기능을 부여하여, 환경과 상황을 자동으로 인지하고 지능적인 서비스를 제공할 수 있는 기술 개발에 초점이 맞추어지고 있다. 이러한 면에서, 제안된 시스템은 무선 통신 기능을 확장하여 그 기능을 위치인식 뿐만 아니라 센서 네트워크 등으로 폭넓게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

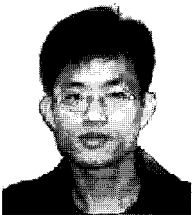
향후 연구방향은 공간에 설치되는 표식들의 위치에 대한 자동 캘리브레이션 기술개발과 개발된 시스템을 독립된 임베디드 형태로 최적화시키는 것이다.

참고문헌

- [1] Fuji-Keizai USA, Inc., "Wireless sensing networks: Market, R&D and commercialization activities," *Market Research Report*, Feb. 2004.
- [2] K. Pahlavan, X. Li, and J. Makela, "Indoor geolocation science and technology," *IEEE Communications Magazine*, pp. 112-118, Feb. 2002.
- [3] T. S. Rappaport, J. H. Reed, and B. D. Woerner, "Position location using wireless communications on highways of the future," *IEEE Communications Magazine*, pp. 33-41, Oct. 1996.
- [4] K. Yamano, *et al.*, "Self-localization of mobile robots with RFID system by using support vector machine," *IEEE Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 3756-3761, 2004.
- [5] J. Y. Lee and R. A. Scholtz, "Ranging in a dense multipath environment using UWB radio link," *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 9, Dec. 2002.
- [6] The Ubisense Smart Space Platform, <http://www.ubisense.com>.

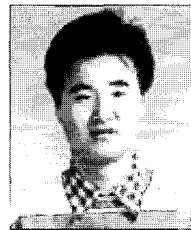
net.

- [7] D. C. K. Yuen and B. A. MacDonald, "Vision-based localization algorithm based on landmark matching, triangulation, reconstruction, and comparison," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 21, no. 2, pp. 217-226, Apr. 2005.
- [8] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *IEEE Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57-66, Aug. 2001.
- [9] J. H. Lee, K. Morioka, N. Ando, H. Hashimoto, "Cooperation of distributed intelligent sensors in intelligent environment," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 9, no. 3, Sep. 2004.
- [10] N. Y. Chong, H. Hongu, K. Ohba, S. Hirai, and K. Tanie, "A distributed knowledge network for real world robot applications," *IEEE Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 187-192, 2004.
- [11] D. Hachnet, W. Burgard, D. Fox, K. P. Fishkin, and M. Philipose, "Mapping and localization with RFID technology," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1015-1020, 2004.
- [12] W. Lin, S. Jia, T. Abe, and K. Takase, "Localization of mobile robot based on ID tag and WEB camera," *IEEE Int. Conf. Robotics and Mechatronics*, pp. 851-856, 2004.
- [13] Y. Nagumo and A. Ohya, "Human following behavior of and autonomous mobile robot using light-emitting device," *IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interaction*, pp. 18-21, 2001.
- [14] J. S. Park and M. J. Chung, "Path planning with uncalibrated stereo rig for image-based visual servoing under large pose discrepancy," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 19, no. 2, pp. 250-258, Apr. 2003.
- [15] Z. Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," *IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 1999.



이재영

2005년 서울대학교 컴퓨터공학과(공학박사). 2005년 4월~현재 한국전자통신연구원 지능형로봇연구단. 관심분야는 로봇비전, 영상처리.



채희성

1998년 전북대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 석사. 2000년~현재 한국전자통신연구원 지능형로봇연구단. 관심분야는 로봇 주행 및 위치인식.



유원필

1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 1999년 3월~2001년 4월 국방과학연구소. 2001년 4월~현재 한국전자통신연구원 지능형로봇연구단. 관심분야는 로봇 비전, 신호처리, 영상처리, 이동로봇제어.