

수동 RFID 환경에서의 공간/시간 정보를 이용한 이동로봇의 효율적 위치 추정 기법

Efficient Localization of a Mobile Robot Using Spatial and Temporal Information from Passive RFID Environment

김성복* · 이상협*

Sungbok Kim and Sanghyup Lee

요약

본 논문에서는 수동 RFID 환경에서 획득되는 위치 및 시간 정보를 이용하여, 태그가 배치된 노면을 주행하는 이동로봇의 위치를 효과적으로 추정하는 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안된 위치 추정 기법은 기존 연구에 비해 위치 추정 오차를 감소시키고 또한 초기 태그 배치 비용을 감소시키는 효과가 있다. 기본적으로 이동로봇이 일련의 직선 구간을 구간별로 일정한 속도로 주행하며, 또한 매 순간 이동로봇에 의해 감지되는 태그의 수는 한 개 이하라고 가정한다. 첫째, 이미 알려진 지점을 출발하여 정속 직선 주행하는 이동로봇의 속도 및 위치를 추정하는 알고리즘을 개발하는데, 이는 최초를 제외한 여타 구간의 경우에 유효하다. 다음, 최초 구간의 경우 출발 위치를 모르는 상태이므로, 이동로봇이 두 개 이상의 태그를 정속 직선 주행하도록 하여 이동로봇의 속도 및 위치를 추정한다. 마지막으로, 제작된 수동 RFID 위치 추정 시스템을 이용한 실험을 통해 본 논문에서 제안된 이동로봇 위치 추정 기법의 유효성 및 성능을 입증한다.

Abstract

This paper presents the efficient localization of a mobile robot traveling on the floor with tags installed, using the spatial and temporal information acquired from passive RFID environment. Compared to previous research, the proposed localization method can reduce the position estimation error and also cut down the initial cost tag installation cost. Basically, it is assumed that a mobile robot is traveling over a series of straight line segments, each at a certain constant velocity, and that the number of tags sensed by a mobile robot at each sampling instant is at most one. First, the velocity and position estimation of a mobile robot starting from a known position, which is valid for all segments except the first one. Second, for the first segment in which the starting position is unknown, the velocity and position estimation is made possible by enforcing a mobile robot to traverse at least two tags at a constant velocity with the steering angle unchanged. Third, through experiments using our passive RFID localization system, the validity and performance of the mobile robot localization proposed in this paper is demonstrated.

Keywords : passive RFID, mobile robot, localization, estimation error, tag arrangement

I. 서론

* 한국의국어대학교 전자정보공학부

논문 번호 : 2008-1-4 접수 일자 : 2008. 2. 9

심사 완료 : 2008. 4. 14

※이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-521-D00168).

이제까지 이동로봇의 위치 추정을 위해 여러 유형의 센서를 사용한 다양한 시도가 이루어져 왔다 [1]. 그러나 엔코더의 경우 추정 오차가 누적되고, 초음파/레이저 센서의 경우 line-of-sight가 확보되어야 하며, 카메라의 경우 복잡한 영상처리가 요구되며, GPS의 경우 정밀도가 떨어져 실제 응용에 어려움이 따른다. 최근 들어 태그, 안테나, 리더

로 구성되는 RFID 시스템을 [2] 실내 환경에서의 이동로봇의 위치 추정에 적용하려는 시도가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. RFID 기반 이동로봇의 위치 추정에 관한 기존 연구는 다음의 두 그룹으로 대분될 수 있다. 첫 번째 그룹에서는 위치 정보가 수록된 RFID 태그를 벽면에 부착하여 beacon 혹은 landmark로 활용하고 [3-10], 이동로봇 주행, 시각장애인 및 응급처치요원의 경로유도 등에 응용하고 있다. 두 번째 그룹에서는 태그를 주행 노면에 배치하여 위치 정보를 제공하도록 함으로써, 이동로봇의 자율주행에 응용하고 있다 [11-14]. 첫 번째 그룹에 속하는 연구가 국내외적으로 매우 활발히 전개되었는데 반해, 본 논문이 속하는 두 번째 그룹의 연구는 상대적으로 우리나라에서 주도하고 있다고 할 수 있다.

수동 RFID 태그를 위치 정보 제공자로 활용한 이동로봇의 위치 추정에 관한 기존 연구를 살펴보면 이동로봇의 위치 추정에 있어 기본적으로 태그 간격 혹은 안테나 구경만큼의(안테나 구경이 태그 간격보다 작은 경우) 추정 오차가 발생한다고 전제하고 있다. 위치 추정 오차를 줄이기 위한 방안으로 노면 상의 태그 분포 밀도를 높여 이동로봇이 감지하는 태그의 수가 여러 개가 되도록 한 후 이들로부터 취득된 위치 정보들의 최대/최소, 혹은 가중평균을 취하여 절대위치를 추정하는 방법이 제시되었다 [11, 12]. 그러나 태그 밀도가 높아지면 초기 설치비용이 증가하는 경제성 문제 뿐 아니라, 동일 태그로부터의 위치 정보가 중복 수신되는(태그를 지정하여 정보를 취득할 수 없는 경우 발생) 기술적 문제가 제기될 수 있다.

추정 오차를 줄이기 위해 또 다른 방안으로는 태그 감지 후 주행하는 이동로봇의 위치 추정을 확률적으로 취급하여, 일단 이동로봇이 현재 추정 위치를 중심으로 팽창하는 원상에 위치한다고 하고 새로운 태그가 감지되는 순간 이동로봇의 추정 위치를 갱신하는 방법이 제시되었다 [13]. 그러나, 확률적 처리를 위해 particle filtering과 몬테카를로법을 적용하고 있어 소요 연산이 클 뿐 아니라 추정 위치가 갱신될 때까지는 이동로봇의 현재 위치가 확정되지 못한다는 문제점을 안고 있다.

최근 들어 수동 RFID 기반 이동로봇의 위치 추정 및 주행 제어에 관한 연구결과들이 발표되었으나 [11-14] 소요 태그 수, 위치 추정 오차 등 기술적 문제를 지니고 있으며 결과적으로 연구 결과의 실용화에 걸림돌이 되어 왔다. 일례로 기존 연구의 실험 결과에 의하면 20 cm/sec의 저속 주행 상태에서도 위치 추정 오차가 태그 간격의 60%에 이르는 것으로 보고하고 있다 [12].

본 논문에서는 태그에 의해 제공되는 위치 정보와 함께 이동로봇이 태그의 감지 범위를 통과하는 동안의 시간 정보를 활용함으로써 이동로봇의 현재 위치를 효율적으로 추정하고자 한다. 이동로봇이 일련의 직선 구간을 구간별로 정속 주행하며, 또한 한 순간 이동로봇에 의해 감지되는 태그의 수는 하나라고 가정한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 주어진 구간에서 이미 알려진 지점을 출발하여

정속 직선 주행하는 이동로봇의 현재 위치를 추정한다. 다음, 출발 위치를 모르는 상태인 최초 구간에 대해서는 이동로봇이 두 개의 인접 태그를 정속 직선 주행하도록 하여 이동로봇의 출발 위치와 현재 위치를 추정하도록 한다. 마지막으로, 다양한 태그 배치 패턴에서의 이동로봇 주행 실험을 통해, 제안된 이동로봇 위치 추정 기법의 유효성 및 우수성을 입증한다.

II. 위치 추정의 기본 원리

본 논문에서는 기본적으로 이동로봇이 일련의 직선 구간을 구간별로 일정한 속도로 주행하며, 또한 한 순간 이동로봇에 의해 감지되는 태그의 수는 한 개 이하라고 가정한다. 이러한 가정 아래서, 태그에 의해 제공되는 위치 정보 외에도 이동로봇이 태그의 감지 범위를 통과하는 동안의 시간 정보를 활용하여 이동로봇의 현재 위치를 추정하고자 한다. 기존 연구 결과와 비교하여 본 논문에서 제안하는 방법은 이동로봇의 위치 추정 오차를 줄일 수 있으며, 또한 주행 노면상의 배치되는 태그의 밀도를 최소화한다는 장점을 지닌다.

실제로는 주행 중인 이동로봇이 안테나를 통해 감지 범위에 속하는 태그를 감지하게 되지만, 기본 원리에 대한 설명의 편의를 위해 그림 1에 보인 것과 같이 태그의 감지 범위를 해당 태그를 중심으로 하는 원으로 나타내고 이동로봇이 태그의 원형 감지범위를 통과한다고 상정한다. 위에서 기술한 바와 같이 각 구간마다 이동로봇은 일단 제자리 회전을 통해 조향각을 조정 한 후, 조향각을 유지한 상태에서 일정한 속도로 직선 주행하며 태그의 감지 범위를 경유한다고 가정한다. 또한, 주행 노면 즉 2차원 평면상의 태그는 상호간에 감지 범위가 중첩되지 않도록 배치되어 있다고 가정하며, 결과적으로 한 순간 이동로봇이 감지하는 태그의 수는 하나 이하가 되게 된다.

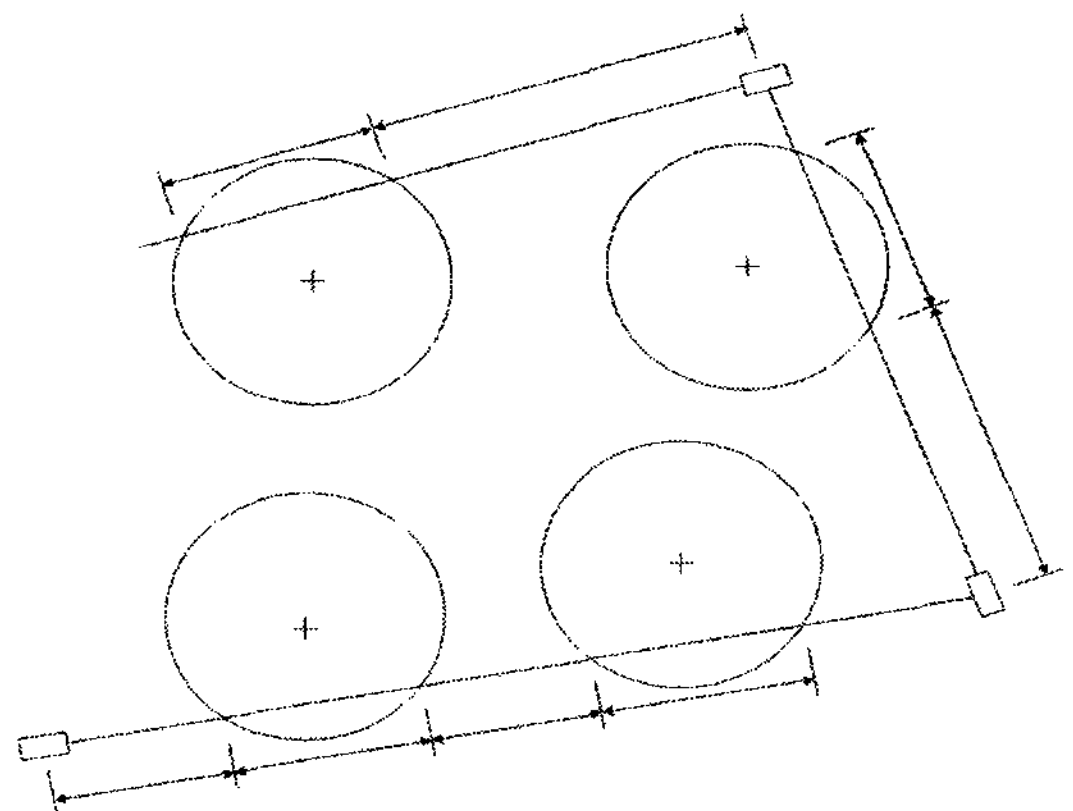


그림 1. 태그가 설치된 노면에서의 이동로봇의 주행 궤적.
Fig. 1. Mobile robot motion trajectory on the floor with tags installed.

우선, 주어진 주행 구간의 시작 시점에서의 이동로봇의 출발 위치가 알려져 있다고 하자. 출발 후 태그 진입까지 경과 시간과 이후 태그 이탈까지의 경과 시간, 즉 태그의 경유와 관련된 한 쌍의 시간 정보가 주어진다면 해당 구간에서 일정하게 유지되고 있는 이동로봇의 조향각과 선속도를 결정할 수 있을 것이다. 여기서, 미지수가 2개이고 또한 제한식이 2개임에 주목한다.

다음, 맨 처음 주행 구간의 경우 이동로봇의 출발 위치가 알려져 있지 않다고 가정하는 것에 타당하므로, 이를 해결하기 위한 별도의 방안이 요구되게 된다. 최초 구간에서의 문제를 최대한 단순화하기 위해, 이동로봇이 일정한 조향각을 유지한 상태에서 일정한 선속도로 2개의 태그를 연속적으로 경유한다고 하면, 2개의 태그를 경유하는 과정에서 얻어지는 두 쌍의 시간 정보로부터 해당 구간에서의 이동로봇의 조향각과 선속도, 그리고 이동로봇의 초기 위치를 결정할 수 있을 것이다. 이 때, 미지수의 개수와 제한식의 개수가 각각 4개임에 주목해야 한다.

일단 이동로봇의 속도가 추정되면, 이를 시간에 대해 적분함으로써 이동로봇의 현재 위치를 얻을 수 있다. 물론, 엔코더의 경우와 같이 시간 경과에 따라 위치 추정 오차가 증가하는 현상을 피할 수는 없지만, 반면 위치 추정 오차의 최대 크기가 태그 배치 상태 및 분포 밀도에 따라 일정한 범위 이내로 제한된다는 장점이 따르게 된다.

III. 이동로봇의 위치 추정

그림 2에 보인 것과 같이 주어진 주행 구간을 이동로봇이 사전에 알려진 지점을 출발하여 일정한 조향각과 속도를 유지한 채 태그를 진입한 후 이탈하고 있다고 하자. 이동로봇의 위치 추정 문제는 출발지점이 사전에 알려진 이동로봇이 해당 태그를 경유하는 과정에 대한 한 쌍의 시간 정보가 주어진 상황에서 해당 태그를 빠져나가는 시점 이후의 이동로봇의 위치를 결정하는 문제이다. 여기서, 태그 이탈 이전의 이동로봇에 대한 위치 추정은 고려하지 않는다는 점에 유의할 필요가 있다. 출발 후 태그 진입까지의 경과 시간 t_1 과 태그 진입 후 이탈까지의 경과 시간 t_2 로부터 이동로봇의 조향각 θ 와 선속도 v 를 정하는 문제이므로 일반적으로 본 문제에 대한 수학적 해가 존재함을 알 수 있다.

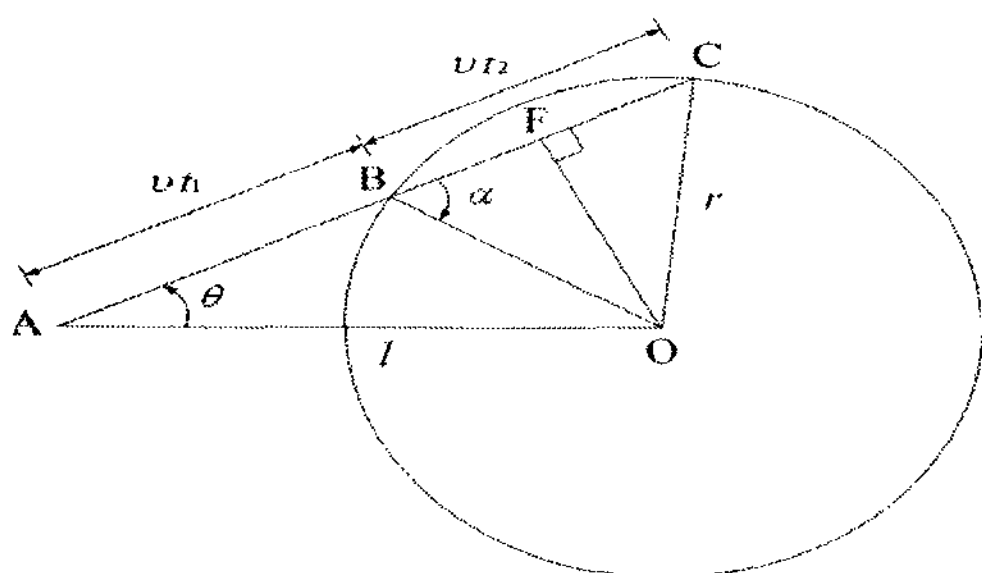


그림 2. 태그 경유 시간 정보를 활용한 이동로봇의 속도 추정.

Fig. 2. Mobile robot velocity estimation utilizing the temporal information of tag traversing.

3.1 국부 좌표계에서의 위치 추정

먼저, 문제 해결을 용이하게 하기 위해 그림 2에 보인 바와 같이 국부 좌표계를 도입하여, 태그의 중심을 원점 $O = [0 \ 0]^t$ 라 하고, 또 원점으로부터 이동로봇 출발 지점까지의 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\overrightarrow{OA} = \begin{bmatrix} -l \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

먼저, $\overline{OB} = r$ 이고 $\overline{BF} = \frac{t_2}{2} v$ 이므로 $\angle OBF$ 를 α 라 하면,

$$\cos \alpha = \frac{\overline{BF}}{\overline{OB}} = \frac{\frac{t_2}{2} v}{r} \quad (2)$$

다음, ΔABO 에 코사인 법칙을 적용하면

$$\overline{AB}^2 + \overline{OB}^2 - 2 \times \overline{AB} \times \overline{OB} \times \cos(\angle ABO) = \overline{AO}^2 \quad (3)$$

여기서, $\overline{OB} = r$, $\overline{OA} = l$, $\overline{AB} = vt_1$, 그리고 $\angle ABO = \pi - \alpha$ 이므로

$$(vt_1)^2 + r^2 - 2(vt_1)r \cos(\pi - \alpha) = l^2 \quad (4)$$

식 (2)를 식 (4)에 대입한 후 정리하면

$$(t_1^2 + t_1 t_2) v^2 = l^2 - r^2 \quad (5)$$

이고, 이로부터 이동로봇의 선속도 v 는 다음과 같이 얻어진다.

$$v^2 = \frac{l^2 - r^2}{(t_1 + t_2)t_1} \quad (6)$$

일단 식 (6)에 의해 v 가 결정되면, 이동로봇의 조향각 θ 을 나타내는 $\angle BAO$ 는 다음과 같이 구해질 수 있다. 즉,

$$\cos \theta = \frac{\overline{AB}^2 + \overline{AO}^2 - \overline{OB}^2}{2 \overline{AB} \overline{AO}} = \frac{(vt_1)^2 + l^2 - r^2}{2(vt_1)l} \quad (7)$$

이므로, 이 결과를 이용하면

$$\theta = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta}, \cos \theta) \quad (8)$$

식 (8)에서 보듯 일반적으로 이동로봇의 조향각 θ 에 대한 해가 두 개 존재하게 된다. 즉, 동일 태그를 경유하는 과정의 한 쌍의 시간 정보에 상응하는 서로 다른 이동로봇의 속도벡터 해가 두 개 존재하게 되는데, 이를 도시하면 그림 3과 같다. 실제적으로 두 개의 해 가운데 하나만이 유효하므로, 이러한 수학적 해의 이중성은 반드시 해소되어야 한다. 이를 위해서는 RFID 시스템 외에 다른 속도 측정 센서 (예: 엔코더)의 도움이 필요하며, 이에 대한 자세한 내용은 조금 뒤 기술하기로 한다.

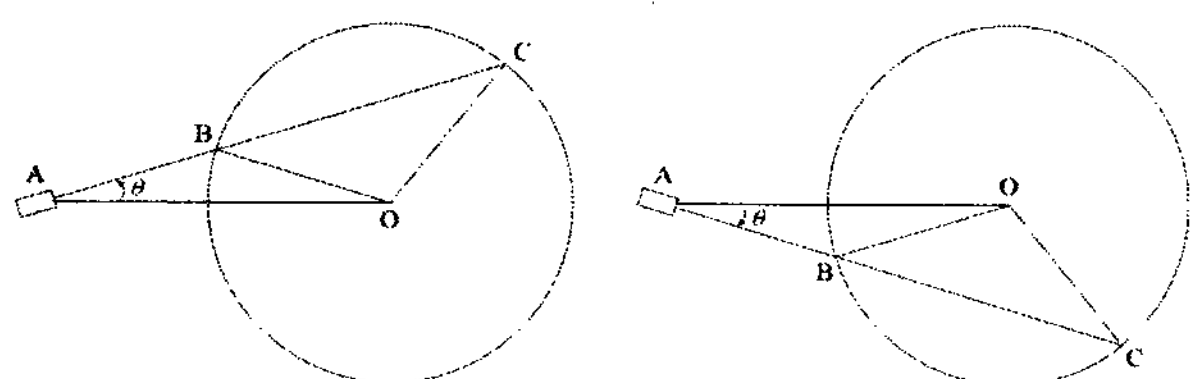


그림 3. 속도 벡터에 대한 해의 이중성.

Fig. 3. The solution multiplicity for the velocity vector.

식 (6)과 식 (8)에 의해 이동로봇의 선속도 v 와 조향각 θ 가 각각 결정되고 나면, A 지점 출발 이후 경과 시간 $t(\geq t_1 + t_2)$ 에서의 이동로봇의 위치는 다음에 의해 구해진다.

$$\vec{OA} + (tv) \times \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

위와 같이 이동로봇의 속도를 시간에 대해 적분하여 이동로봇의 현재 위치를 얻으면, 엔코더에서 보듯이 시간 경과에 따라 위치 추정 오차가 증가하는 현상을 피할 수는 없다. 하지만, RFID 기반 위치 추정은 엔코더의 경우와는 다르게 위치 추정 오차의 최대 크기가 태그 배치 상태 및 분포 밀도에 따라 제한된다는 장점을 지니게 된다.

3.2 전역 좌표계로의 위치 변환

이제까지는 문제 해결의 편의상 국부 좌표계를 사용하여 이동로봇의 현재 위치를 표현하였으나, 이동로봇의 주행 제어에 적용하기 위해서는 그 결과를 전역 좌표계로 변환하여야 한다. 여기서는 일례로 태그 이탈 시점에서의 이동로봇의 위치를 전역 좌표계에서 표현해 보도록 한다. 우선, 그림 4에서 $O_w = [0 \ 0]^t$ 을 원점으로 하는 전역 좌표계를 기준으로 이미 알려져 있는 태그의 중심과 이동로봇 출발 지점을 다음과 같이 정의하자.

$$\vec{O_w O} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \end{bmatrix}, \quad \vec{O_w A} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

그리고

$$\delta = \text{atan2}(o_y - a_y, o_x - a_x) \quad (11)$$

식 (11)은 $\vec{AO} = \begin{bmatrix} o_x - a_x \\ o_y - a_y \end{bmatrix}$ 와 전역 좌표계의 x_w 축과 사이 각을 나타낸다.

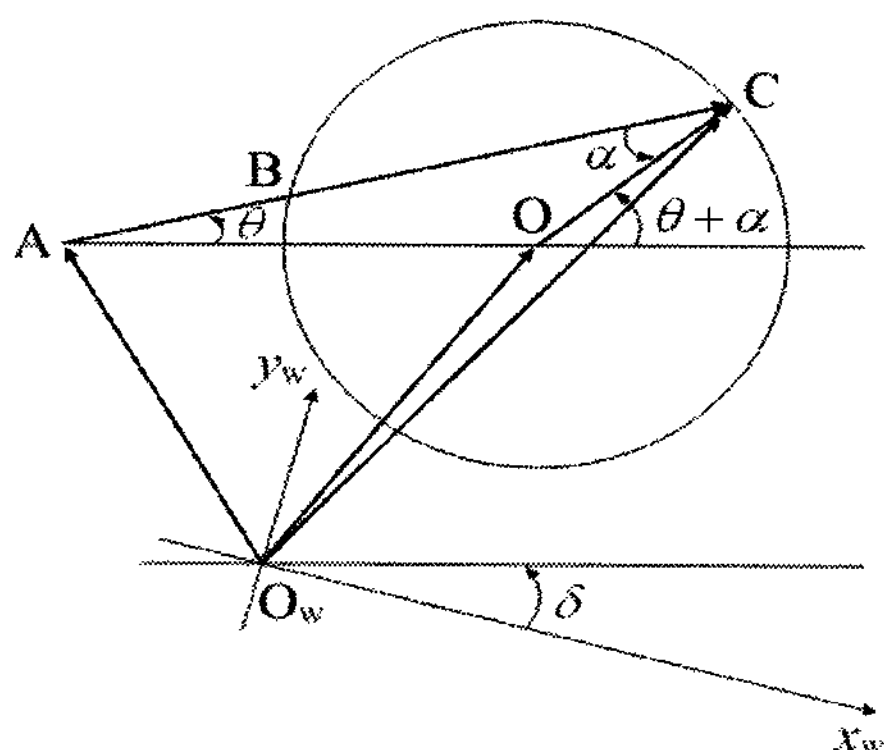


그림 4. 전역 좌표계에서의 이동로봇 위치 추정.

Fig. 4. The mobile robot localization in world coordinate system.

그림 4를 참조하면, 태그 이탈 시점에서의 이동로봇의 전역 좌표계에서의 위치는 다음과 같이 얻어진다.

$$\vec{O_w C} = \vec{O_w O} + \vec{OC} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r \cos(\theta + \alpha + \delta) \\ r \sin(\theta + \alpha + \delta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

한편, 그림 4로부터 전역 좌표계에서의 이동로봇의 조향각을 Θ 라 하면, 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\Theta = \theta + \delta \quad (13)$$

3.3 해의 이중성 해소

본 논문에서는 매 구간마다 이동로봇이 시작 시점에 제자리 회전을 통해 조향각을 조정 한 후, 조향각을 유지한 상태에서 일정 속도로 직선 주행한다고 가정하고 있다. 이전 구간인 $(k-1)$ 번째 구간에 대해 전역 좌표에서의 이동로봇의 조향각을 θ_{k-1} 라 하자. 또한, 현재 구간인 k 번째 구간 초기에 대해 조향각이 일정한 각속도 w_k 로서 $t_{k,0}$ 시간 동안 조정된다고 하자. k 번째 구간에서의 조향각의 예상치를 $\hat{\theta}_k$ 라 하면

$$\hat{\theta}_k = \theta_{k-1} + w_k \times t_{k,0} \quad (14)$$

여기서, θ_{k-1} 은 $(k-1)$ 번째 구간에 대해 식 (8)에 의해 최종 결정된 조향각을 나타내고 있음에 유의해야 한다.

본 논문에서는 상용 이동로봇에서 널리 채택하고 있는 차동구동 방식과 바퀴 회전 속도를 측정하는 한 쌍의 엔코더가 가용하다는 전제 아래 후속 논의를 전개하기로 한다. 차동구동 방식의 이동로봇의 속도 기구학은 k 번째 구간에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_k &= \frac{R}{2}(w_{k,r} + w_{k,l}) \\ w_k &= \frac{R}{D}(w_{k,r} - w_{k,l}) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 R 과 D 는 각각 이동로봇의 바퀴 반지름과 바퀴 사이 간격을 나타내고, v_k 과 w_k 은 각각 이동로봇의 선속도와 각속도를 나타내며, $w_{k,r}$ 과 $w_{k,l}$ 은 각각 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 회전속도를 나타낸다.

앞서, 이동로봇의 조향각이 제자리 회전을 통해 조정된다고 하였으므로, 식 (15)에서 $w_{k,l} = -w_{k,r}$ 이고 또한

$$w_k = \frac{2R}{D} w_{k,r} \text{이다. 이 결과를 식 (14)에 대입하면}$$

$$\hat{\theta}_k = \theta_{k-1} + \frac{2R}{D} w_{k,r} t_{k,0} \quad (16)$$

식 (8)과 식 (13)에 의해 얻어진 이동로봇의 조향각을 각각 $\theta_{k,1}$ 과 $\theta_{k,2}$ 라 하면, 마지막으로, 다음에 의거하여 이

동로봇의 실제 조향각 θ_k 가 결정된다.

$$\min_{i=1,2} \|\theta_{k,i} - \hat{\theta}_k\|^2 \quad (17)$$

식 (17)에서 보듯이 식 (8)과 식 (13)에 의해 얻어진 두 개의 조향각 가운데 엔코더에 의한 속도 정보에 가까운 하나의 값을 실제로 유효한 조향각으로 선택한다. 여기서 엔코더의 속도 정보를 그 자체로서 사용하고 있는 것이 아니라 다른 대상에 대한 선택의 기준으로만 사용되고 있음에 유의할 필요가 있다.

IV. 이동로봇 최초 위치 추정

이제까지는 이동로봇의 출발 지점이 알려져 있는 주행 구간에서 태그 경유에 대한 한 쌍의 시간 정보를 이용하여, 이동로봇의 속도 및 위치를 결정하는 문제를 다루었다. 위치 추정이 시작되는 맨 처음의 주행 구간의 경우에는 이동로봇의 출발 위치가 알려져 있지 않다고 가정하는 것이 타당하며, 이를 해결하기 위한 위치 추정 알고리즘의 초기화 문제가 제기된다. 위치 추정이 시작되는 최초 시점에서는 이동로봇의 선속도, 조향각, 그리고 주행 평면상의 출발 위치 등 미지수의 개수가 총 4개로 늘어나게 되므로, 이동로봇의 주행 패턴에 관련하여 이전과는 다른 가정이 요구된다. 본 논문에서는 이동로봇이 일정한 조향각과 선속도를 유지한 상태에서 2개 이상의 태그를 경유한다고 가정한다.

4.1 최초 위치 추정

그림 5에서 보듯이, 주행이 최초로 시작되면서 경유하게 되는 첫 번째 및 두 번째 태그와 관련된 한 쌍의 시간 정보를 각각 (t_{11}, t_{12}) 와 (t_{21}, t_{22}) 라 하고, 또 해당 태그 중심으로부터 출발 지점까지의 길이를 각각 l_1 과 l_2 라 하자.

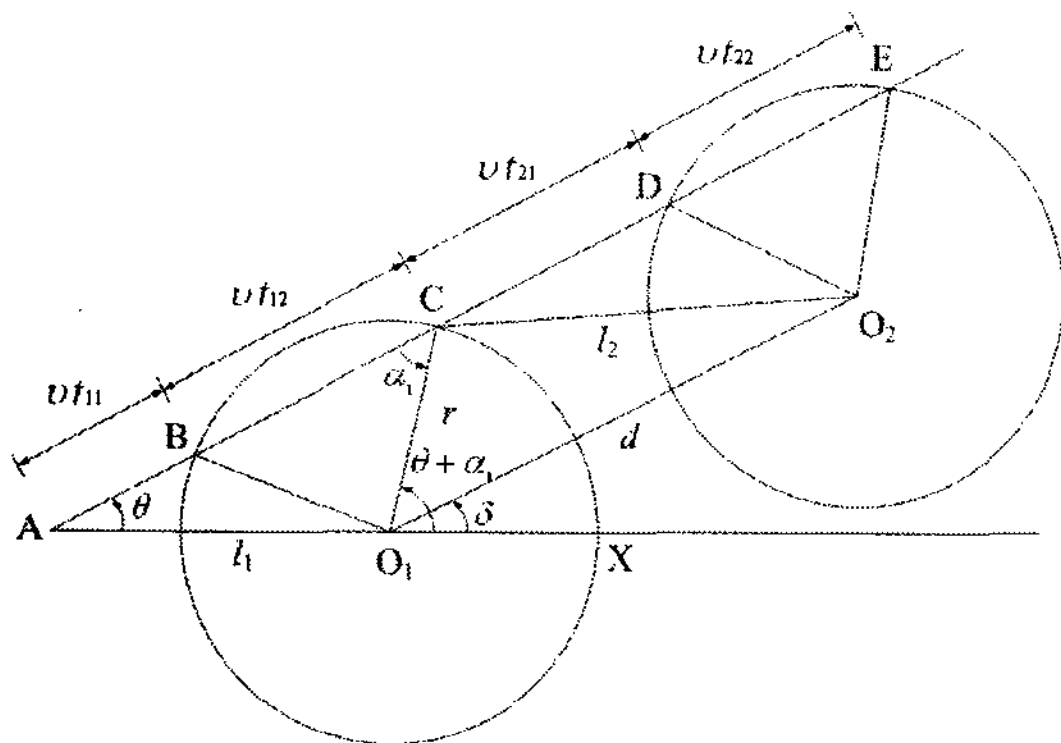


그림 5. 출발 위치를 모르는 최초 구간에 대한 이동로봇 위치 추정.

Fig. 5. The mobile robot localization for the first segment with unknown starting position.

이동로봇의 선속도 v 가 두 구간에서 일정하게 유지되고 있다고 하였으므로, 식 (6)으로부터, 다음 두 관계식을 얻을 수 있다.

$$v^2 = \frac{l_1^2 - r^2}{(t_{11} + t_{12})t_{11}} \quad (18)$$

$$v^2 = \frac{l_2^2 - r^2}{(t_{21} + t_{22})t_{21}} \quad (19)$$

그림 5를 참조하면 다음과 같은 중요한 사실을 관찰할 수 있다. 즉 식 (17)과 식 (18)은 ΔABO_1 과 ΔCDO_2 에 각각 코사인 법칙을 적용한 결과이며, 또한 ΔABO_1 과 ΔCDO_2 사이의 기하적 관계는 이 둘을 연결하고 있는 ΔCO_1O_2 에 의해 결정된다. $\angle O_1AB = \theta$ 그리고 $\angle O_1CB = \alpha_1$ 이라 하면

$$\angle CO_1X = \angle O_1AB + \angle O_1CB = \theta + \alpha_1 \quad (20)$$

이동로봇 출발 지점과 첫 번째 및 두 번째 태그의 상대적 위치를 나타내는 $\angle O_2O_1X$ 를 δ 라 하면, 다음 관계식이 얻어진다.

$$\angle CO_1O_2 = \angle CO_1X - \angle O_2O_1X = \theta + \alpha_1 - \delta \quad (21)$$

이제, ΔCO_1O_2 에 코사인 법칙을 적용하면

$$\overline{CO_2}^2 = \overline{O_1C}^2 + \overline{O_1O_2}^2 - 2 \times \overline{O_1C} \times \overline{O_1O_2} \times \cos(\angle CO_1O_2) \quad (22)$$

두 태그사이의 거리를 나타내는 $\overline{O_1O_2}$ 를 d 라 하면

$$l_2^2 = r^2 + d^2 - 2rd \cos(\theta + \alpha_1 - \delta) \quad (23)$$

식 (23)에 코사인 뿔셈 공식을 적용하여 정리하면

$$l_2^2 - r^2 = d^2 - 2rd_x \cos(\theta + \alpha_1) - 2rd_y \sin(\theta + \alpha_1) \quad (24)$$

여기서

$$d_x = d \cos \delta, \quad d_y = d \sin \delta \quad (25)$$

로서 첫 번째 태그의 중심에 원점을 둔 국부 좌표계에서의 두 번째 태그의 위치를 나타낸다.

식 (18)을 식 (24)에 대입하여 정리하면

$$Pv^2 - d^2 + Q \cos(\theta + \alpha_1) = R \sin(\theta + \alpha_1) \quad (26)$$

여기서

$$\begin{aligned} P &= (t_{21} + t_{22})t_{21} \\ Q &= 2rd_x \\ R &= -2rd_y \end{aligned} \quad (27)$$

식 (26)의 양변을 제곱한 후 정리하면,

$$(Pv^2 - d^2)^2 + 2(Pv^2 - d^2)Q \cos(\theta + \alpha_1) + Q^2 \cos^2(\theta + \alpha_1) = R^2 \sin^2(\theta + \alpha_1) \quad (28)$$

즉

$$(Pv^2 - d^2)^2 + 2(Pv^2 - d^2)Q \cos(\theta + \alpha_1) + (Q^2 + R^2) \cos^2(\theta + \alpha_1) - R^2 = 0 \quad (29)$$

한편, ΔAO_1C 에 코사인 법칙을 적용하면

$$\cos(\angle AO_1C) = \frac{\overline{O_1C}^2 + \overline{O_1A}^2 - \overline{AC}^2}{2 \times \overline{O_1C} \times \overline{O_1A}} \quad (30)$$

인데, $\overline{AC} = (t_{11} + t_{12})v$ 그리고 $\angle AO_1C = \pi - (\theta + \alpha_1)$ 이므로

$$\cos(\theta + \alpha_1) = -\frac{r^2 + l_1^2 + Sv^2}{2rl_1} \quad (31)$$

여기서

$$S = -(t_{11} + t_{12})^2 \quad (32)$$

식 (31)을 식 (29)에 대입한 후, 정리하여 다시 쓰면

$$4r^2(Pv^2 - d^2)^2 l_1^2 - 4r(Pv^2 - d^2)Q(r^2 + l_1^2 + Sv^2)l_1 + (Q^2 + R^2)(r^2 + l_1^2 + Sv^2)^2 - 4r^2R^2 l_1^2 = 0 \quad (33)$$

식 (18)을 이용하면 v^2 을 다음과 같이 l_1 의 간단한 함수로 표현할 수 있다.

$$v^2 = T l_1^2 + U \quad (34)$$

여기서

$$T = \frac{1}{(t_{11} + t_{12})t_{11}} \quad (35)$$

$$U = -\frac{r^2}{(t_{11} + t_{12})t_{11}}$$

식 (34)를 이용하면 다음과 같은 관계식이 성립됨을 보일 수 있다.

$$\begin{aligned} Pv^2 - d^2 &= V l_1^2 + W \\ r^2 + l_1^2 + Sv^2 &= X l_1^2 + Y \end{aligned} \quad (36)$$

여기서

$$\begin{aligned} V &= PT, & W &= PU - d^2 \\ X &= ST + 1, & Y &= r^2 + SU \end{aligned} \quad (37)$$

최종적으로, 식 (37)을 식 (33)에 대입한 후 정리하면, 다음과 같은 l_1 에 대한 6차 다항식을 얻을 수 있다.

$$A l_1^6 + B l_1^5 + C l_1^4 + D l_1^3 + E l_1^2 + F l_1 + G = 0 \quad (38)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= 4r^2V^2, \\ B &= -4rQVX \\ C &= 8r^2VW + (Q^2 + R^2)X^2, \\ D &= -4rQ(VY + WX) \\ E &= 4r^2W^2 + 2(Q^2 + R^2)XY - 4r^2R^2, \\ F &= -4rQWY \\ G &= (Q^2 + R^2)Y^2 \end{aligned} \quad (39)$$

식 (39)에 보인 6차 다항식의 A 부터 G 까지의 7개 계수가 태그의 감지 범위 r , 두 태그의 상대적 위치 (d_x, d_y) 그리고 두 쌍의 태그 경유 시간 정보, 즉 (t_{11}, t_{12}) 와 (t_{21}, t_{22}) 등 7개 변수들의 함수임에 주목해야 한다. 즉, 안타나 감지 범위, 태그 배치 상태, 그리고 두 쌍의 시간 정보가 주어지면 6차 다항식의 모든 계수가 정해지게 된다.

식 (38)을 풀어 l_1 이 구해지면, 식 (18)로부터 이동로봇의 선속도 v 를 결정하고, 이어 식 (8)로부터 조향각 θ 를 결정하게 된다. 6차 다항식인 식 (38)에 대한 수학적 해가 최대 여섯 개 존재하게 되는 반면 그 가운데 실제적으로는 하나만이 유효하므로, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 수학적 해의 다중성이 해소되어야 한다.

4.2 해의 다중성 해소

일반적으로 6차 다항식의 주어진 계수로부터 해의 성질을 알아내는 것은 대수학적으로 매우 어려운 문제에 속한다. 이러한 난해성을 피하고자 본 논문에서는 앞에서 언급한 $r, (d_x, d_y), (t_{11}, t_{12}),$ 및 (t_{21}, t_{22}) 등 7개 변수의 값을 폭넓게 변화시켜 가면서 matlab을 이용하여 6개의 해를 직접 구해 보았다. 컴퓨터를 이용한 다수의 반복 실험 결과 흥미롭게도 l_1 에 대한 실수해는 최대 2개이고 나머지는 모두 복소수 해임을 확인할 수 있었다. 그림 6은 얻어진 2개의 실수해를 도시하고 있는데, 그 가운데 하나의 해만이 실제로 유효한 해임을 바로 알 수 있다.

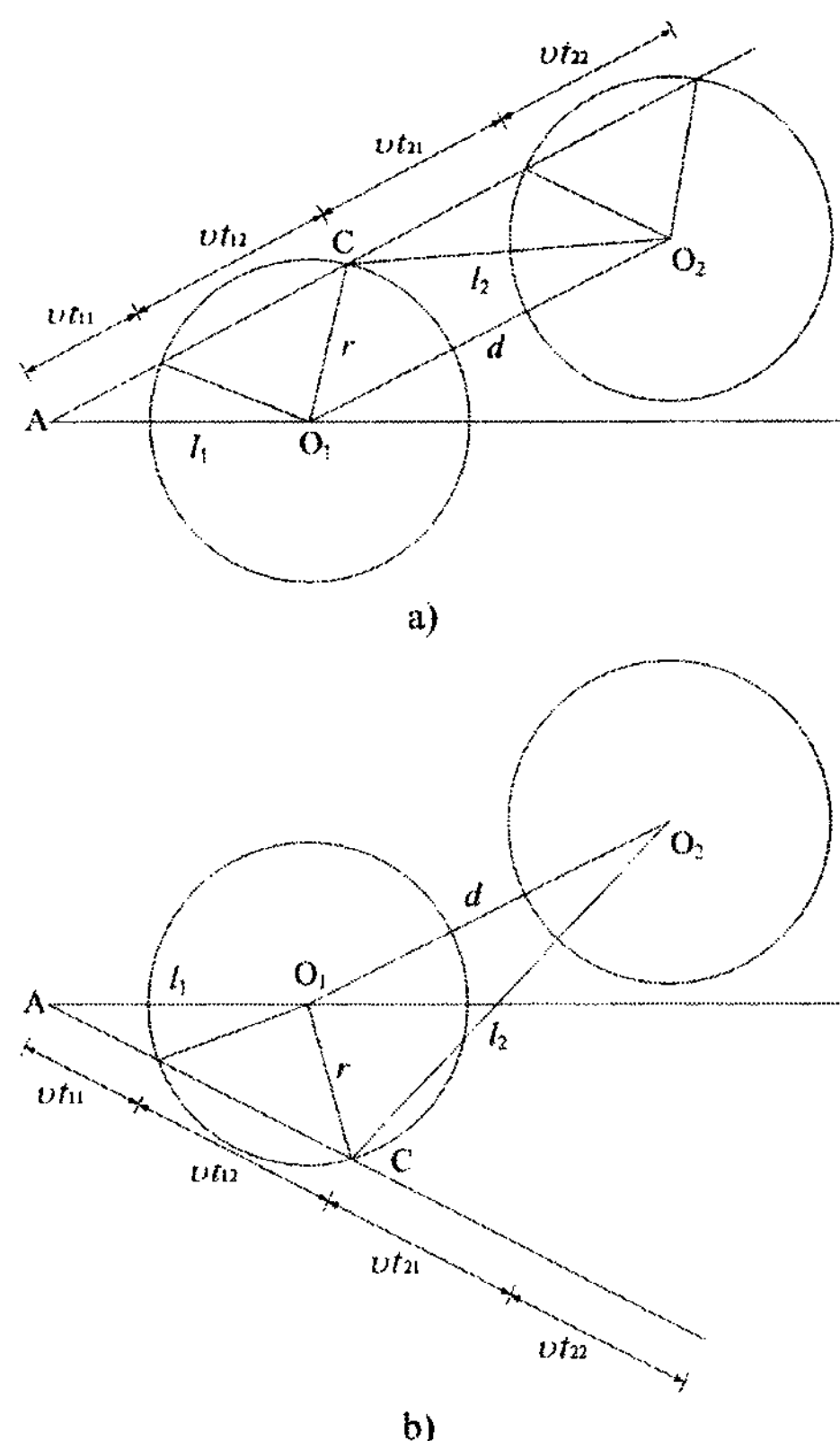


그림 6. 최초 위치 벡터에 대한 해의 다중성.

Fig. 6. The solution multiplicity for the initial position vector.

V. 시스템 구성과 실험 결과

5.1 위치 추정 시스템 구성

그림 7은 본 논문에서 사용한 Inside Contactless사의 RFID 시스템을 보이고 있는데, M300-2G RFID 리더기, 원형 루프 안테나, 그리고 ISO 15693 표준을 따르는 주파수 13.56 MHz의 coin type 태그로 구성된다. 그림 8은 제작된 수동 RFID 위치 추정 시스템을 보이고 있는 바, 리더기는 원형 형태로 제작된 모바일 로봇의 상단에 올리고 안테나는 로봇의 바닥 면에 부착하였으며, 리더기와 안테나는 유선 케이블을 통해 연결되어 있다. 태그가 부착된 바닥면으로부터 1.5 cm 높이에 위치하도록 안테나를 설치하였는데, 이때 유효 감지 반경은 10 cm임을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

이동로봇이 일군의 태그가 부착되어 있는 주행 노면 위를 움직이면, 매 순간 안테나는 감지된 태그에 수록되어 있는 위치 정보를 읽어 리더기로 보낸다. 다음, 리더기는 수신된 위치 정보를 RS-232 시리얼 케이블을 통해 최대 115200bps의 속도로 사용자 컴퓨터로 전송한다. 마지막으로 사용자 컴퓨터는 태그 진입 및 이탈에 대한 시간 정보를 이용하여 주행 중인 이동로봇의 현재 위치를 추정한다. 본 실험에서는 설치된 태그의 위치 정확도를 높이고 또한 태그 배치 패턴의 변화가 용이하도록 하기 위해, 태그에는 절대 위치 대신 고유 번호를 부여하고, 고유 번호에 대한 절대 위치로의 매핑은 사용자 컴퓨터에서 처리하도록 하였다.

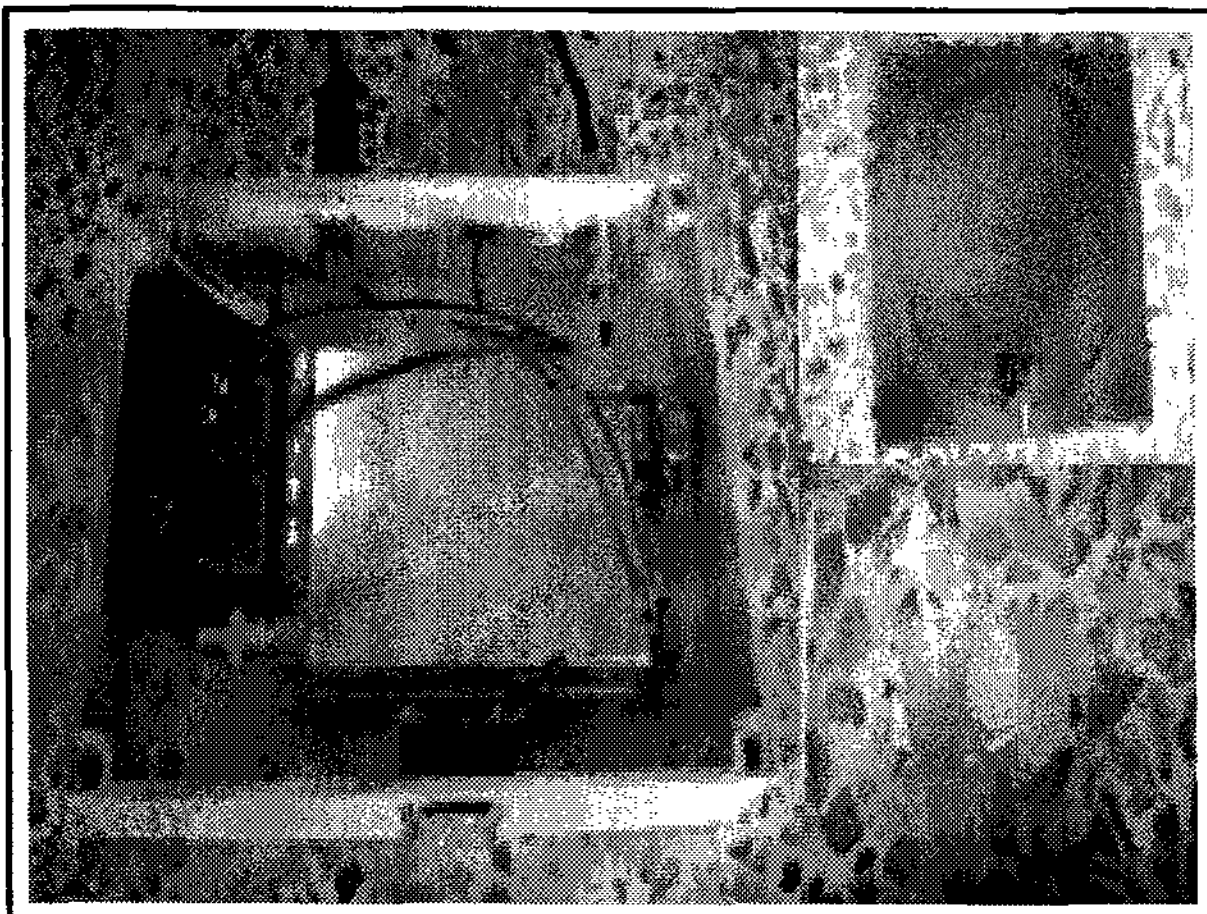


그림 7. 수동 RFID 시스템 구성 요소: 리더기, 안테나, 그리고 태그.
Fig. 7. Passive RFID system components: reader, antenna, and tag.

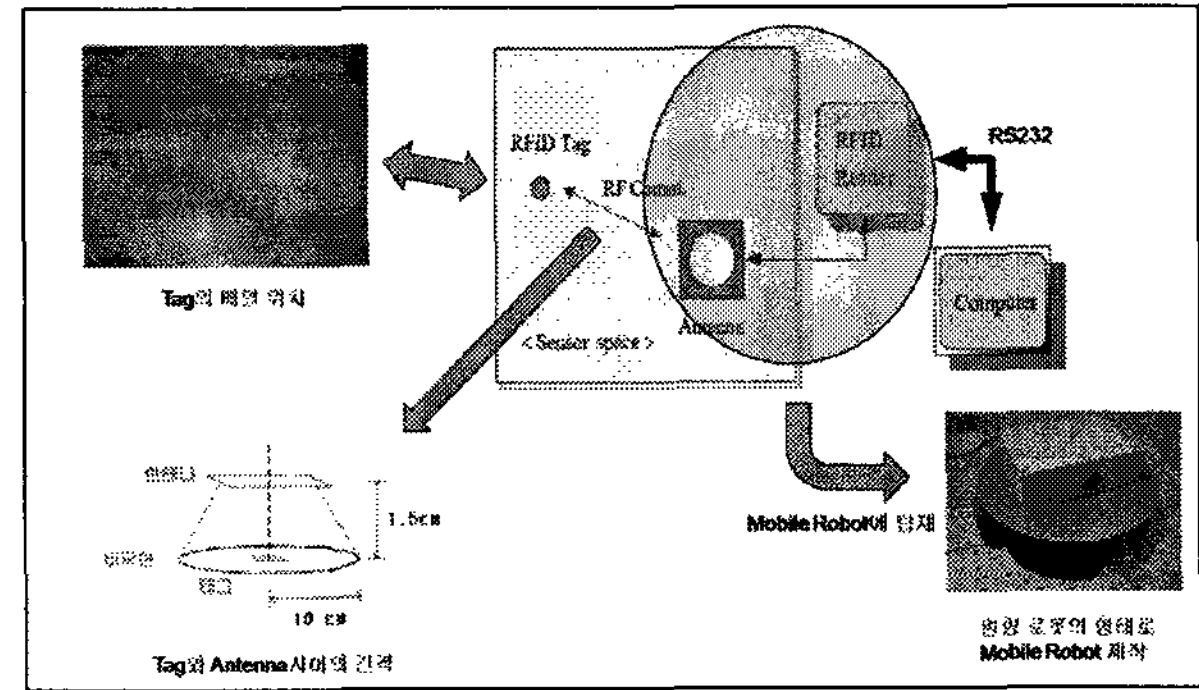


그림 8. 수동 RFID 위치 추정 시스템.
Fig. 8. Passive RFID localization system.

5.2 실험 결과

본 논문에서 제안된 RFID 기반 이동로봇 위치 추정 기법의 유효성과 우수성을 검증하기 위한 다양한 실험을 실시하였다. RFID 기반 이동로봇 위치 추정의 성능은 주행 노면 상의 태그의 분포 밀도 및 태그의 배치에 따라 크게 영향을 받는다. 우선, 그림 9에 보인 바와 같이 태그를 유사 랜덤 형태로 배치하였다. 설치의 편의를 위해, 먼저 70×70 cm 크기의 정다각형 타일에 유효 감지 반경이 10 cm인 태그를 4개씩 부착시켰다. 다음, 정다각형 타일을 가로 5줄, 세로 4줄이 되도록 배치하여, 전체 크기가 350×280 cm인 태그 부착 주행 노면을 설치하였다.

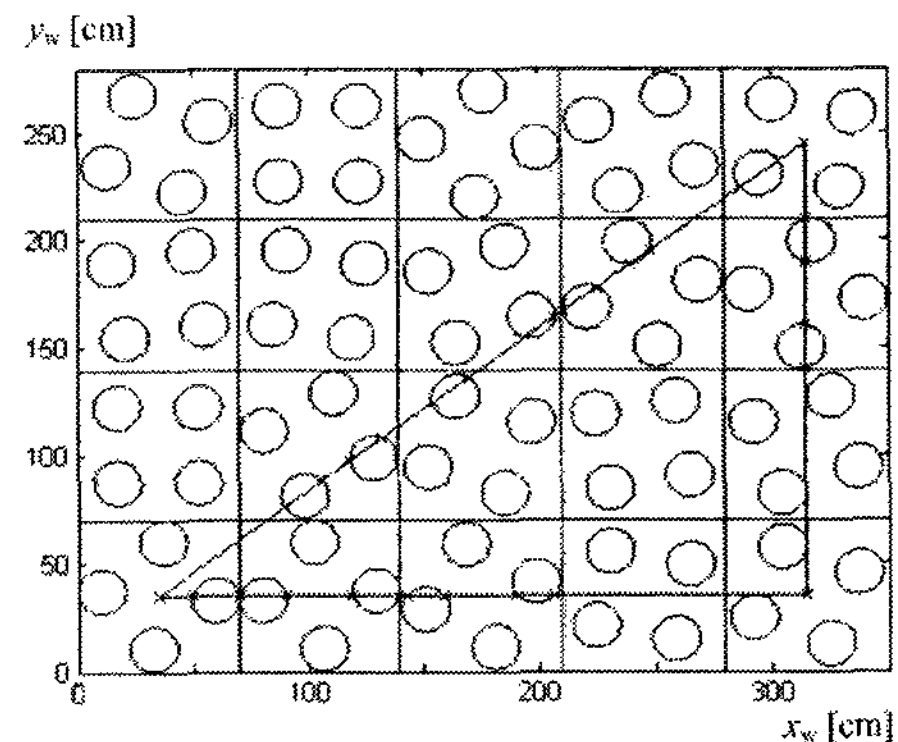


그림 9. 유사 랜덤 패턴 태그 배치 상황에서의 이동로봇의 위치 추정 실험.

Fig. 9. The mobile robot localization experiment under the pseudorandom tag pattern.

그림 9에 보인 바와 같이 이동로봇이 태그가 부착된 주행 노면상의 3개 직선 구간을 따라 10 cm/sec의 일정한 속도로 주행하도록 하였다. 이동로봇이 시작 지점에서 대각 방향으로 조향각을 조정 한 후 중간 지점까지 정속 주행하고, 다음 아래 방향으로 조향각을 조정 한 후 다음 중간 지점까지 정속 이동하고, 마지막으로, 왼쪽 방향으로 조향각을 조정 한 후 시작 지점으로 정속 복귀하도록 하였다.

그림 10은 본 논문에서 제안한 방법에 의거 추정 한 이동

로봇의 선속도 v 와 전체 좌표계에서의 조향각 θ 을 보인다. 추정 값과 실제 값 사이의 편차를 관찰되는데, 이는 태그 경유 시간 정보 측정에 수반되는 잡음의 영향에 기인한다고 하겠다.

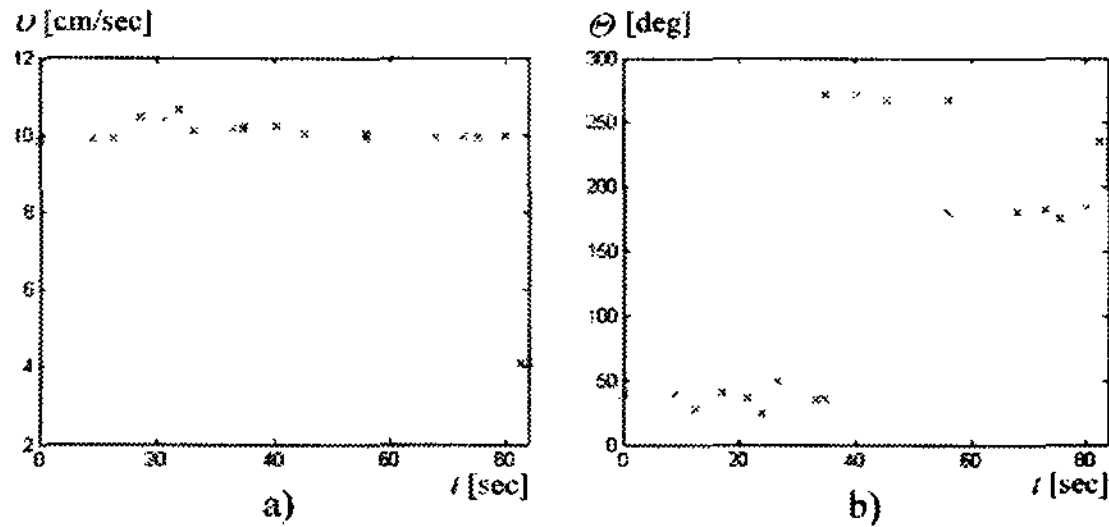


그림 10. 이동로봇의 추정 속도: a) 선속도와 b) 조향각.
Fig. 10. Mobile robot velocity estimates: a) the velocity magnitude and b) the steering angle.

다음, 그림 11은 그림 10의 결과로부터 계산된 좌표별 이동로봇의 추정 위치 궤적 그리고 좌표별 실제 주행 궤적으로부터의 편차를 보이고 있다. 마지막으로, 그림 12는 주행 평면상에서의 추정 위치 궤적('x'로 표시) 그리고 실제 주행 궤적('o'으로 표시)를 함께 보이고 있다. 3개 구간에 걸쳐 전반적으로 추정 위치 궤적과 실제 주행 궤적이 매우 근사함을 관찰할 수 있다. 다만 세 번째 구간 마지막 부분에서 편차가 크게 발생하고 있는데, 이는 그림 9에서 보듯 해당 태그 경유 시 t_1 이 매우 작은 값이어 식 (6)에 의한 선속도 추정 오차가 커지는데 기인한다.

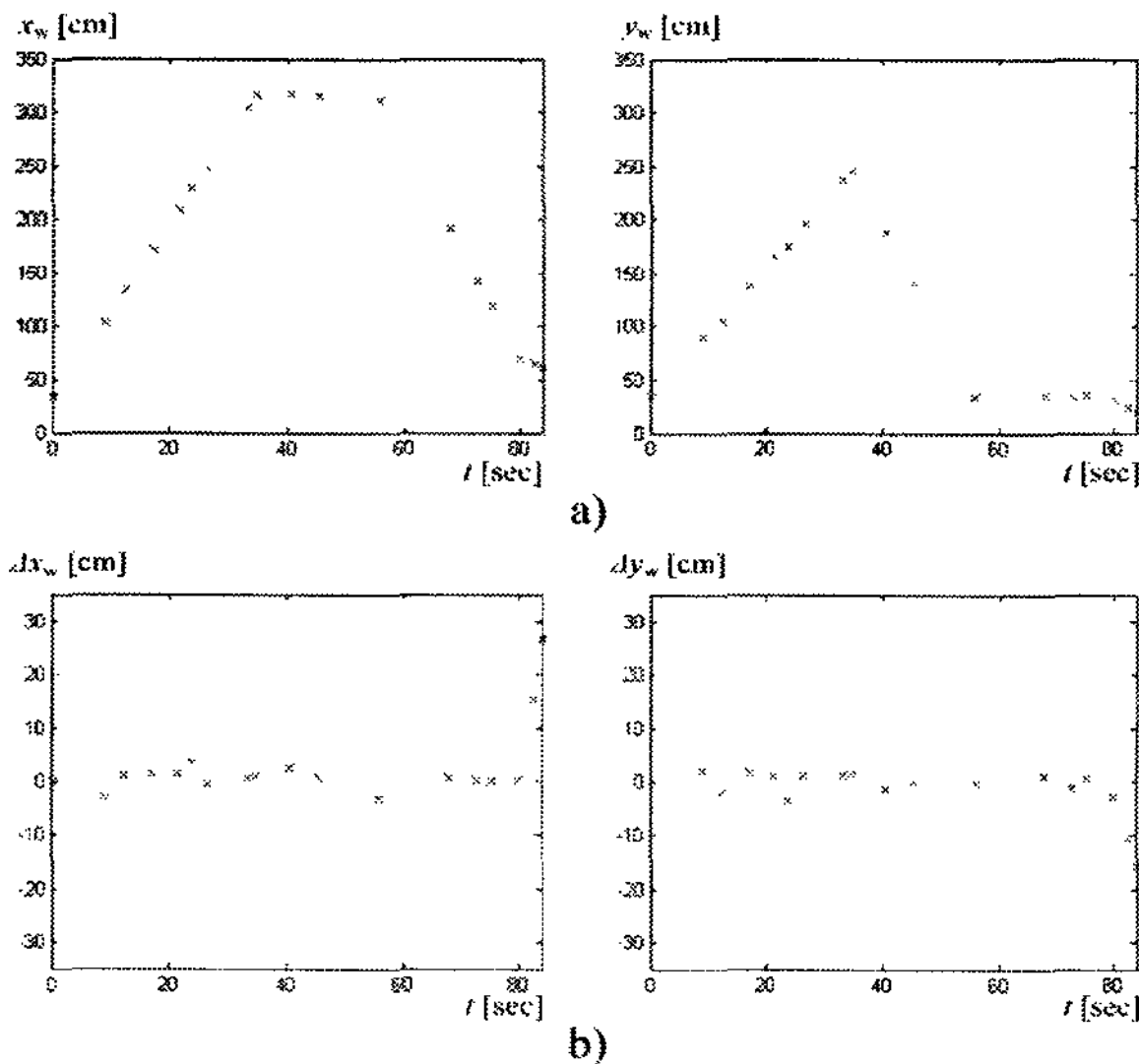


그림 11. 이동로봇의 위치 추정: a) 좌표별 추정 위치와 b) 실제 위치로부터의 편차.
Fig. 11. The mobile robot localization: a) the componentwise positional estimates and b) their deviations from the actual value.

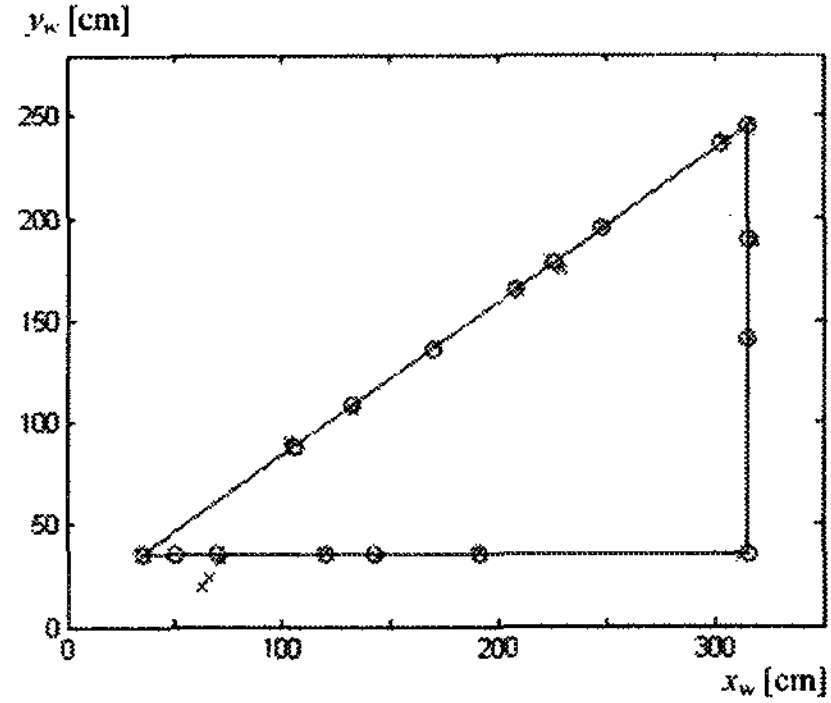


그림 12. 주행 평면상에서의 추정 위치 궤적('x'로 표시) 그리고 실제 주행 궤적('o'으로 표시).
Fig. 12. The estimated trajectory, marked by 'x', and the actual trajectory, marked by 'o', on the traveling floor.

마지막으로, 태그의 분포 밀도는 그림 9와 동일하게 유지하되 태그의 배치를 정사각형 패턴과 평행사변형 패턴으로 하는 경우 이동로봇의 기준 주행 궤적을 그림 13에 보이고 있다. 그림 13a)에 보인 정사각형 패턴의 경우 첫 번째 구간 이후로는 이동로봇이 태그를 전혀 감지하지 못하므로 결과적으로 이동로봇의 속도 및 위치 추정이 불가능하게 된다. 한편, 그림 13b)에 보인 평행사변형 패턴의 경우 세 번째 구간에서만 이동로봇의 속도 및 위치 추정이 불가능하여, 그림 13a)의 정사각형 패턴의 경우보다는 양호한 결과이나 그림 9의 유사 랜덤 패턴의 경우에 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

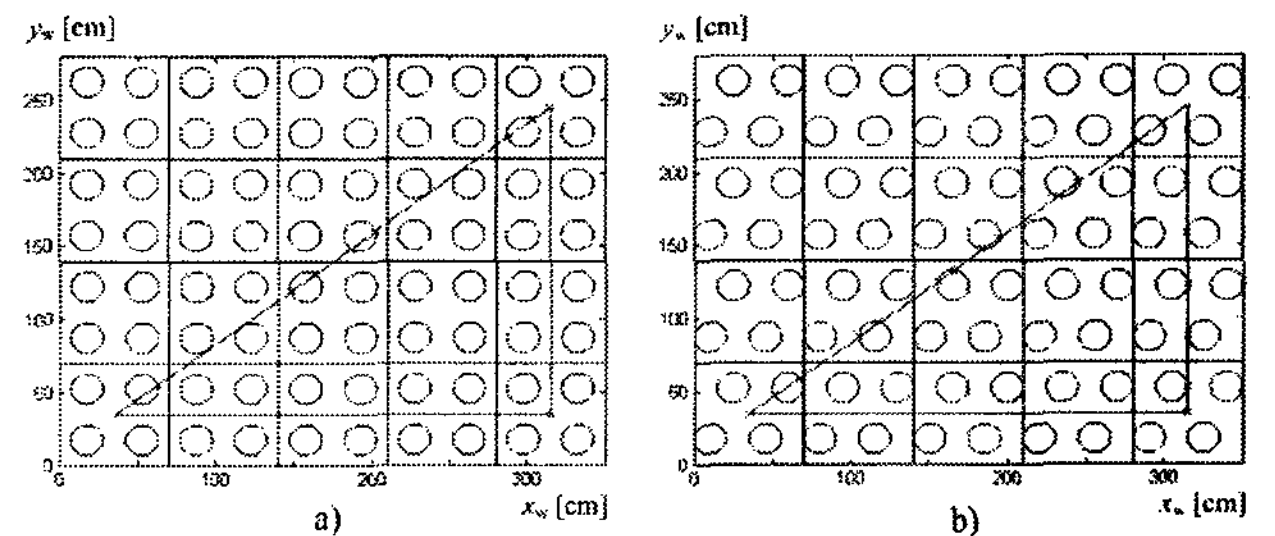


그림 13. 태그 배치 패턴에 따른 이동로봇의 위치 추정: a) 정사각형 패턴과 b) 평행 사변형 패턴.
Fig. 13. The mobile robot localization under different tag patterns: a) the square pattern and b) the parallelogram pattern.

VI. 결론

본 논문에서는 태그로부터의 위치 정보와 함께 태그 감지 시간 정보를 활용하여 이동로봇의 현재 위치를 효율적으로 추정하는 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제안된 이동로봇의 위치 추정 기법은 이동로봇이 일련의 직선 구간마다 일정 속도로 주행한다고 가정하고 있으나, 이는 중저

가대의 서비스 로봇에 대해서는 타당성 있는 전제라 할 수 있다. 반면, 매 순간 이동로봇에 의해 감지되는 태그의 수는 하나거나 영이라고 전제하고 있는 바, 동시에 여러 개의 태그를 감지하는 기존 연구에 비해 태그 분포 밀도가 낮아지는 효과를 보이게 된다. 본 논문에서 제안된 성능 및 경제성을 겸비한 실용적 RFID 기반 위치 추정 기법이 서비스 로봇 실용화를 앞당기는데 기여할 수 있기를 기대한다.

참고 문헌

[1] J. Borenstein, et al., "Where am I?": Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, The University of Michigan, 1996.

[2] K. Finkenzeller, RFID handbook: Radio-Frequency Identification Fundamentals and Application, Wiley, 2000.

[3] O. Kubitz et al., "Application of radio frequency identification devices to support navigation of autonomous mobile robots," Proc. VTC, pp. 126-130, 1997.

[4] G. Kantor et al., "Preliminary results in read-only localization and mapping," Proc. ICRA, pp. 1818-1823, 2002.

[5] D. Hahnel et al., "Mapping and localization with RFID technology," Proc. ICRA, pp. 1015-1020, 2004.

[6] K. Yamano et al., "Self-localization of mobile robots with RFID system by using support vector machine," Proc. IROS, pp. 3756-3761, 2004.

[7] V. Kulyukin et al., "RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired," Proc. IROS, pp. 1979-1984, 2004.

[8] K. Penttila et al., "Performance development of a high-speed automatic object identification using passive RFID technology," Proc. ICRA, pp. 4864-4868, 2004.

[9] 김성부 외 2인, "RFID 응용 기술을 이용한 이동 로봇의 실내 위치 추정," 제어자동화시스템공학논문지, 제 11권, 제12호, pp. 996-1001, 2005.

[10] 문승욱 외 2인, "정적 passive RFID 태그를 이용한 지능적인 로봇위치추정기법," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 9-14, 2006.

[11] 최병석 외 1인, "RFID 센서 공간에서의 모바일 로봇의 효율적인 위치 인식," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 15-22, 2006.

[12] 이현정 외 3인, "RFID를 이용한 이동로봇의 위치인식 기술," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 41-46, 2006.

[13] 서대성 외 4인, "RFID 태그에 기반한 이동 로봇의 문

태카를로 위치추정," 제어자동화시스템공학논문지, 제 12권, 제1호, pp. 47-53, 2006.

[14] 최정욱 외 2인, "RFID 태그플로어 방식의 내비게이션에 관한 연구," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제10호, pp. 968-974, 2006.



김성복(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



이상협(Sanghyup Lee)

2007년 2월 한국외국어대학교

디지털정보공학과(공학사)

2007년~ 현재 한국외국어대학교

디지털정보공학과 석사과정

※주관심분야 : 지능형 로봇시스템의 설계 및 제어