

수동 RFID 기반 이동로봇 위치 추정 및 효율적 노면 태그 배치

Passive RFID Based Mobile Robot Localization and Effective Floor Tag Arrangement

김성복*, 이상협

(Sungbok Kim and Sanghyup Lee)

Abstract : Under passive RFID environment, this paper presents a new localization of a mobile robot traversing over the floor covered with tags, which is superior to existing methods in terms of estimation performance and cost effectiveness. Basically, it is assumed that a mobile robot is traveling along a series of straight line segments, each segment 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, for a given line segment with known starting point, the velocity and position of a mobile robot is estimated using the spatial and temporal information acquired from the traversed tag. Some discussions are made on the validity of the basic assumptions and the localization for the initial segment with unknown starting point. Second, for a given tag distribution density, the optimal tag arrangement is considered to reduce the position estimation error as well as to make easy the tag attachment on the floor. After reviewing typical tag arrangements, the pseudorandom tag arrangement is devised inspired from the Sudoku puzzle, a number placement puzzle. 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 : estimation error, localization, mobile robot, passive RFID, tag arrangement

I. 서론

이동로봇의 위치 추정을 위해 여러 유형의 센서를 사용한 시도가 이루어져 왔으나, 제각기 근본적인 한계를 지니고 있다[1]. 예를 들어, 엔코더의 경우 추정 오차가 누적되고, 초음파/레이저 센서의 경우 직선 시계가 확보되어야 하며, 카메라의 경우 실시간으로의 복잡한 영상 처리가 요구되며, GPS의 경우 위치 추정 정밀도가 떨어지는 등 실제 응용에 어려움이 따른다. 최근 들어 태그, 안테나, 리더로 구성되는 RFID 시스템을 실내 환경에서의 이동로봇의 위치 추정에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다[2].

RFID 기반 이동로봇의 위치 추정에 관한 기존 연구는 다음의 두 그룹으로 대분될 수 있다. 첫 번째 그룹에서는 위치 정보가 수록된 능동 혹은 수동 RFID 태그를 벽면에 부착하여 beacon이나 landmark로 활용하여[3-10], 이동로봇 자율 주행, 시각 장애인의 경로 유도 등에 응용하고 있다. 두 번째 그룹에서는 수동 RFID 태그를 주행 노면에 배치하여 위치 정보를 제공하도록 하여 이동로봇의 자율 주행에 응용하고 있다[11-14].

수동 RFID 태그를 위치 정보 제공자로 활용한 기존 연구에서는 기본적으로 태그 간격 혹은 안테나 구경만큼의 (안테나 구경이 태그 간격보다 작은 경우) 이동로봇 위치 추정 오차가 발생한다고 전제하고 있다. 이러한 위치 추정 오차를 줄이기 위한 하나의 방안으로 주행 노면 상의 태그

분포 밀도를 높여 이동로봇이 감지하는 태그들로부터 취득된 위치 정보의 최대/최소, 혹은 가중 평균을 취하여 절대 위치를 추정하는 방법이 제시되었다[11,12]. 그러나 태그 밀도가 높아지면 초기 설치비용이 증가하는 경제적 문제 뿐 아니라, 동일 태그로부터의 위치 정보가 중복 수신되는 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 원호 상에 위치한다고 하고 새로운 태그가 감지되는 순간 이동로봇의 추정 위치를 갱신하는 방법이 제시되었다[13]. 그러나 확률적 처리를 위해 particle filtering과 몬테카를로법을 적용하고 있어 소요 연산량이 많을 뿐 아니라 추정 위치가 갱신될 때까지는 이동로봇의 현재 위치가 확정되지 못한다는 문제점을 안고 있다.

이동로봇 위치 추정의 성능은 주행 노면 상의 태그 배치 상태, 즉 태그 분포 밀도 및 태그 배치 패턴에 의해 영향을 받게 되며, 위치 추정 성능 향상을 위해서는 주어진 위치 추정 기법에 따라 태그 배치를 최적화할 필요가 있다 [11-14]. 기존 연구 결과를 살펴보면, 이동로봇이 감지하는 일련의 태그 수가 여럿인 경우 위치 추정 오차 측면에서 삼각형 배치가 사각형 배치 보다 유리하다고 하고 있으며 [12], 반면, 몬테카를로법을 적용한 위치 추정의 경우 소요 되는 연산량 및 태그 수를 기준으로 정사각형 배치가 최적이라고 하고 있다[13].

본 논문에서는 수동 RFID 환경에서 기존 결과에 비해 성능 및 경제성이 우수한 새로운 이동로봇 위치 추정 기법을 제안하고자 한다. 이동로봇이 일련의 직선 구간을 구간 별로 정속 주행하며, 또한 한 순간 이동로봇에 의해 감지되

* 책임저자(Corresponding Author)

논문 접수 : 2008. 7. 8., 채택 확정 : 2008. 8. 19.

김성복, 이상협 : 한국외국어대학교 디지털정보공학과

{sbkim,toto718}@hufs.ac.kr)

※ 본 논문은 2008년도 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의해 연구되었음.

는 태그의 수는 최대 한 개라고 가정한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 태그로부터의 위치 정보와 함께 태그 경유 시간 정보를 이용하여 정속 직선 주행 중인 이동로봇의 현재 속도 및 위치를 추정하는 방법을 제시한다. 다음, 태그 분포 밀도를 유지한 상태에서 이동로봇 위치 추정 오차를 감소시키고 태그 설치상의 용이성을 확보하기 위한 방안으로 의사 랜덤 태그 배치 패턴을 제안한다. 마지막으로, 다양한 태그 배치 패턴에서의 이동로봇 주행 실험을 통해, 제안된 이동로봇 위치 추정 기법의 유효성 및 우수성을 입증한다.

II. 이동로봇의 위치 추정

1. 위치 추정의 기본 원리

실제로는 주행 중인 이동로봇이 안테나를 통해 감지 범위에 속하는 태그를 감지하게 되지만, 기본 원리에 대한 설명을 위해서는 안테나와 태그의 역할을 바꾸는 것이 편리하다. 즉, 그림 1에 보인 것과 같이 태그의 감지 범위를 해당 태그를 중심으로 하는 원으로 나타내고 이동로봇이 태그의 원형 감지범위를 통과한다고 상정한다. 본 논문에서는 이동로봇이 일련의 직선 구간들을 연속 주행하는데, 매 구간 초기 제자리 회전을 통해 조향각을 조정 후 조향각을 유지한 상태에서 일정한 속도로 직선 주행한다고 가정한다. 또한, 2차원 주행 노면 상의 태그는 서로 감지 범위가 중첩되지 않도록 배치되어 있어 한 순간 이동로봇이 감지하는 태그의 수는 최대 한 개라고 가정한다.

우선, 이동로봇의 출발 지점이 알려져 있는 직선 주행 구간에 대해 고려하도록 하자. 출발 후 태그 진입까지 경과 시간과 그 이후 태그 이탈까지의 경과 시간, 즉 태그의 경유 과정에 대한 한 쌍의 시간 정보가 주어지면 해당 구간에서의 이동로봇의 조향각과 선속도를 결정할 수 있다. 여기서, 미지수가 2개이고 또한 제한식이 2개임에 주목하여야 한다. 일단 이동로봇의 속도가 추정되면, 시간에 대해 적분을 통해 이동로봇의 현재 위치를 얻을 수 있다. 근본적으로 시간 경과에 따라 위치 추정 오차가 증가하는 현상을 피할 수는 없지만, 통상적인 엔코더의 경우와는 달리 위치 추정

오차의 최대 크기가 태그 배치 상태 및 분포 밀도에 따라 일정한 범위 이내로 제한된다는 장점이 따르게 된다.

2. 이동로봇의 위치 추정

본 논문에서의 이동로봇 위치 추정 문제는 출발 지점이 사전에 알려진 이동로봇이 태그를 경유하는 과정에 대한 한 쌍의 시간 정보를 이용하여 해당 태그를 빠져나가는 시점 이후의 이동로봇의 위치를 결정하는 문제로서 정의된다.

그림 2에 보인 바와 같이, 출발 후 태그 진입까지의 경과 시간 t_1 과 태그 진입 후 이탈까지의 경과 시간 t_2 가 주어지면 해당 구간에서의 이동로봇의 조향각 θ 와 선속도 v 를 결정할 수 있다. 먼저, 문제 해결을 용이하게 하기 위해 그림 2에 보인 바와 같이 국부 좌표계를 도입하여, 태그의 중심을 원점 $O = [00]^T$ 라 하고, 원점으로부터 이동로봇 출발 지점까지의 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\vec{OA} = \begin{bmatrix} -l \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

먼저, $\angle OBF$ 를 α 라 하면,

$$\cos \alpha = \frac{\overline{BF}}{\overline{OB}} = \frac{vt_2}{r} \tag{2}$$

다음, $\triangle ABO$ 에 코사인 법칙을 적용하면

$$(vt_1)^2 + r^2 - 2(vt_1)r \cos(\pi - \alpha) = l^2 \tag{3}$$

식 (2)를 식 (3)에 대입한 후 정리하면

$$(t_1^2 + t_1 t_2)v^2 = l^2 - r^2 \tag{4}$$

이고, 이로부터 이동로봇의 선속도 v 는 다음과 같이 얻어진다.

$$v^2 = \frac{l^2 - r^2}{(t_1 + t_2)t_1} \tag{5}$$

일단 식 (5)에 의해 v 가 결정되면, 이동로봇의 조향각 θ 을 나타내는 $\angle BAO$ 는 다음과 같이 구해질 수 있다. 즉,

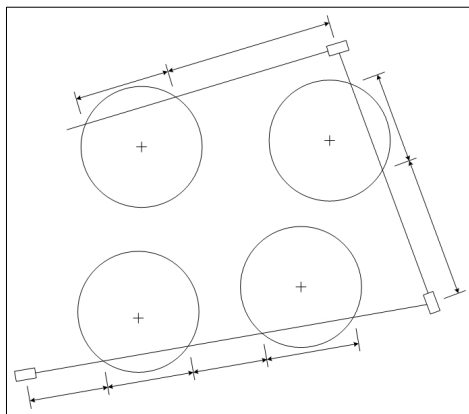


그림 1. 태그가 설치된 노면에서의 이동로봇의 주행 궤적.
Fig. 1. Mobile robot motion trajectory on the floor with tags installed.

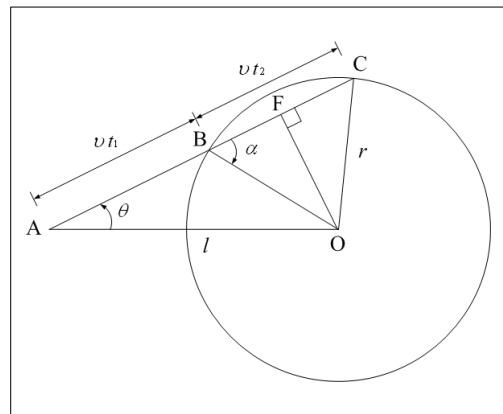


그림 2. 태그 경유 시간 정보를 활용한 이동로봇의 속도 추정.
Fig. 2. Mobile robot velocity estimation utilizing the temporal information of tag traversing.

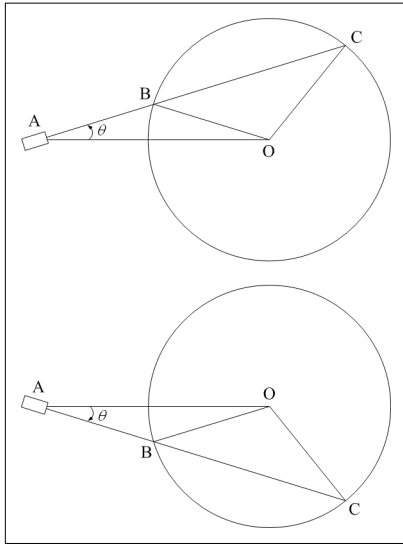


그림 3. 속도 벡터에 대한 해의 이중성.
Fig. 3. The solution multiplicity for the velocity vector.

$$\cos \theta = \frac{(vt_1)^2 + l^2 - r^2}{2(vt_1)l} \quad (6)$$

이고, 이 결과를 이용하면

$$\theta = \text{atan2}(\pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta}, \cos \theta) \quad (7)$$

식 (7)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 두개 존재하게 되는데, 이를 도시하면 그림 3과 같다. 실제적으로 두 개의 해 가운데 하나만이 유효하므로, 이러한 수학적 해의 이중성은 반드시 해소되어야 하며, 이에 대해서는 조금 뒤 기술하기로 한다.

식 (5)와 식 (7)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.

$$\overrightarrow{OA} + \begin{bmatrix} (vt) \cos \theta \\ (vt) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

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 $O_w = [00]^t$ 을 원점으로 하는 전역 좌표계를 기준으로 이미 알려져 있는 태그의 중심과 이동로봇 출발 지점을 다음과 같이 정의하자.

$$\overrightarrow{O_w O} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \end{bmatrix}, \quad \overrightarrow{O_w A} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

그리고

$$\delta = \text{atan2}(o_y - a_y, o_x - a_x) \quad (10)$$

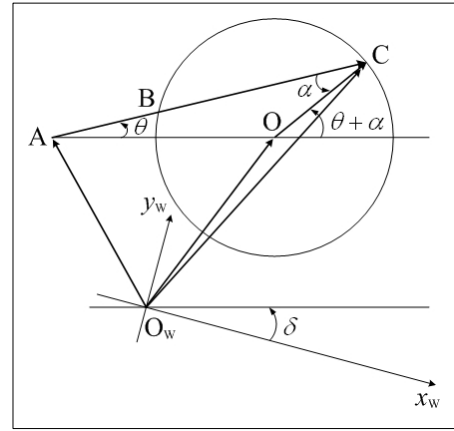


그림 4. 전역 좌표계에서의 이동로봇 위치 추정.
Fig. 4. The mobile robot localization in world coordinate system.

식 (10)은 전역 좌표계의 x_w 축과 $\overrightarrow{AO} = \begin{bmatrix} o_x - a_x \\ o_y - a_y \end{bmatrix}$ 의 사이 각을 나타낸다.

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

$$\overrightarrow{O_w C} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r \cos(\theta + \alpha + \delta) \\ r \sin(\theta + \alpha + \delta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

$$\Theta = \theta + \delta \quad (12)$$

3. 속도 해의 이중성 해소

본 논문에서는 매 구간 마다 이동로봇이 시작 시점에 제자리 회전을 통해 조향각을 조정한 후, 조향각을 유지한 상태에서 일정한 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

$$\hat{\Theta}_k = \Theta_{k-1} + w_k \times t_{k,0} \quad (13)$$

여기서, Θ_{k-1} 은 $(k-1)$ 번째 구간에 대해 식 (7)에 의해 최종 결정된 조향각을 나타내고 있음에 유의해야 한다.

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

$$\begin{aligned} v_k &= \frac{R}{2}(w_{k,r} + w_{k,l}) \\ w_k &= \frac{R}{D}(w_{k,r} - w_{k,l}) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 R 과 D 는 각각 이동로봇의 바퀴 반지름과 바퀴 사이 간격을 나타내고, v_k 과 w_k 은 각각 이동로봇의 선속도

와 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 (14)에서 $w_{k,l} = -w_{k,r}$ 이고 또한 $w_k = \frac{2R}{D}w_{k,r}$ 이다. 이 결과를 식 (13)에 대입하면

$$\hat{\theta}_k = \theta_{k-1} + \frac{2R}{D}w_{k,r}t_{k,0} \quad (15)$$

식 (7)과 식 (12)에 의해 얻어진 이동로봇의 조향각을 각각 $\theta_{k,1}$ 과 $\theta_{k,2}$ 라 하면, 마지막으로, 다음에 의거하여 이동로봇의 실제 조향각 θ_k 가 결정된다.

$$\min_{i=1,2} \|\theta_{k,i} - \hat{\theta}_k\|^2 \quad (16)$$

식 (16)에서 보듯이 식 (7)과 식 (12)에 의해 얻어진 두 개의 조향각 가운데 엔코더에 의한 속도 정보에 가까운 하나의 값을 실제적으로 유효한 조향각으로 선택한다. 여기서 엔코더의 속도 정보를 그 자체로서 사용하고 있는 것이 아니라 다른 대상에 대한 선택의 기준으로만 사용되고 있음에 유의할 필요가 있다.

4. 검토 사항

본 논문에서는 기본적으로 이동로봇이 직선 정속 주행한다고 가정하고 있는 바, 이는 중저가대의 서비스 로봇의 플랫폼으로서의 이동로봇에 대해서는 타당성 있는 전제라 할 수 있다. 고가의 연구용 로봇과 달리 대부분의 서비스 로봇의 주행 속도는 사람의 보행 속도 수준 즉 10cm/sec 또는 그 이하이며, 이 경우 정지 상태에서부터 가속되는데 소요되는 시간은 태그 경과 시간에 비해 상대적으로 적다고 상정할 수 있다. 한편, 가속 시간에 비해 태그 경과 시간이 충분히 크지 않은 경우에 대한 간단한 대처 방안으로는 이미 경유한 태그는 없던 것으로 간주하고 다음 태그로 계속 직선 정속 주행하도록 할 수 있을 것이다. 물론, 이를 위해서는 이동로봇의 주행 제어와 궤도 생성간의 효과적인 연동 방안이 강구되어야 할 것이다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 위치 추정 방법에 가속에 소요되는 시간을 추가적으로 고려할 수도 있는데, 그로 인한 복잡성을 줄이기 위해서는 가속이 일정한 값으로 이루어지고(등가속) 또 가속이 진행되는 경과 시간에 대한 정보가 필요하게 된다.

이제까지는 이동로봇의 출발 지점이 알려져 있는 주행 구간에서 태그 경유에 대한 한 쌍의 시간 정보를 이용하여, 이동로봇의 속도 및 위치를 추정하는 문제를 다루었다. 위치 추정이 시작되는 맨 처음의 주행 구간의 경우에는 이동로봇의 출발 지점이 알려져 있지 않다고 가정하는 것이 타당하며, 이를 해결하기 위한 위치 추정 알고리즘의 초기화 문제가 제기된다. 위치 추정 개시 시점에서는 이동로봇의 선속도, 조향각, 그리고 주행 평면상의 출발 지점 등 미지수의 개수가 총 4개로 늘어나게 되므로, 이동로봇의 주행 패턴에 관련하여 이전과는 다른 가정이 요구되며, 한 가지 방안으로는 이동로봇이 일정한 조향각과 선속도를 유지한 상태에서 2개 이상의 태그를 경유하도록 할 수 있을 것이다.

III. RFID 태그 배치

1. 태그 밀도와 태그 배치

이동로봇 위치 추정의 성능은 주행 노면 상의 태그 배치 상태, 즉 태그 분포 밀도 및 태그 배치 패턴에 의해 영향을 받게 된다. 통상, 주행 노면에 부착하는 태그의 밀도가 높을수록 위치 추정 오차가 감소되게 되나, 태그 밀도가 초기 설치비용과 직결됨을 감안하면 그 한계가 따르게 된다. 결과적으로, 주어진 태그 밀도 아래서, 위치 추정 오차가 최소화되도록 하는 태그의 배치 방식을 고려하는 것이 보다 실질적인 접근 방법이라 하겠다.

태그 배치 패턴을 결정하는데 있어 고려하여야 할 주요 사항 중 하나는 정해진 태그 패턴을 실제 주행 노면에 부착하는데 따른 설치상 용이성이라 할 수 있다. 무엇보다도 태그에 수록된 위치 정보에 따라 주행 노면 상에 태그를 정확히 설치하는 것이 중요하지만, 설치 정확도를 높이기 위해서는 태그 배치 패턴 결정 단계부터 설치 용이성을 함께 고려해야 한다.

2. 통상적인 태그 패턴

우선, 본 논문에서는 태그의 밀도를 일정 수준으로 유지한 상태에서 실제 태그 설치 시 용이성을 비교하기 위해, 태그 배열을 다음과 같이 정의한다. 기본적으로, 감지 반경이 r 인 태그가 변의 길이가 s ($s \geq 2r$) 인 정사각형 내부에 위치한다고 한다. 다음, 4개의 정사각형을 소그룹으로 묶어 하나의 타일에 부착하여 주행 노면 부착 시 태그 설치가 용이하도록 한다. 마지막으로, 소그룹에 속한 4개의 태그를 모두 해당 정사각형 타일 내부에 위치하도록 하여, 태그 간에 감지 범위가 중첩되는 상황을 피한다. 그림 5는 네 가지 형태의 태그 배열 패턴을 보이고 있다.

그림 5(a)의 정사각형 패턴의 경우, 해당 정사각형 내의 각 태그의 위치 $[c_x, c_y]^t$ 가 정중앙이 되도록 하고 태그의

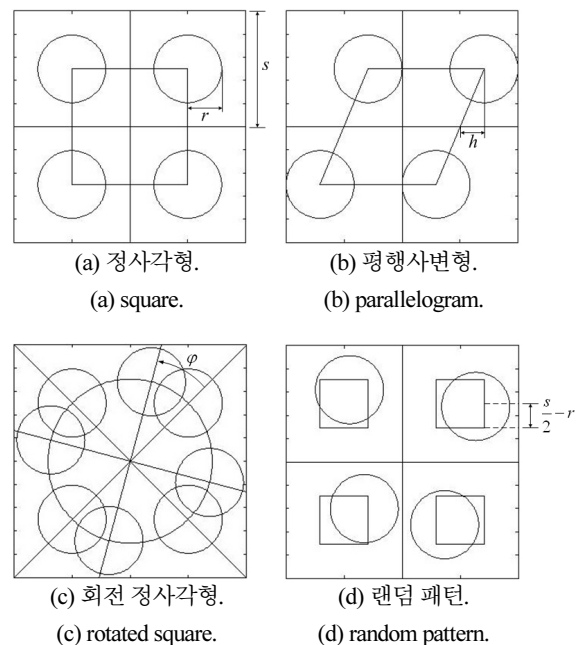


그림 5. 4개 태그의 배열 형태. Fig. 5. Four tag grouping pattern.

감지 반경 r 이 정사각형 변 길이 s 의 절반을 넘지 않도록 한다.

$$c_x = c_y = 0, \quad r \leq \frac{s}{2} \quad (17)$$

그림 5(b)의 평행사변형 패턴은 그림 6(a)의 정사각형 패턴을 종방향의 위치는 그대로 유지한 채, 횡방향의 위치를 한쪽으로 치우치게 한 형태인데, 이 때 기울어진 정도는 태그 감지 범위가 소그룹 범위를 벗어나지 않도록 제한한다.

$$c_x = c_y = 0, \quad r + h \leq \frac{s}{2} \quad (18)$$

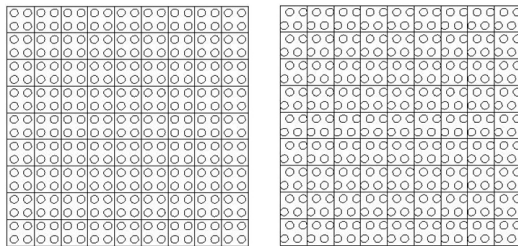
그림 5(c)의 회전 정사각형 패턴은 그림 5(a)의 정사각형 패턴을 소그룹의 중심을 기준으로 회전시킨 형태인데 [14], 이 때 회전 각도는 태그 감지 범위가 소그룹 범위를 벗어나지 않도록 제한한다.

$$c_x = c_y = 0, \quad r \leq (1 - \frac{1}{\sqrt{2}})s \quad (19)$$

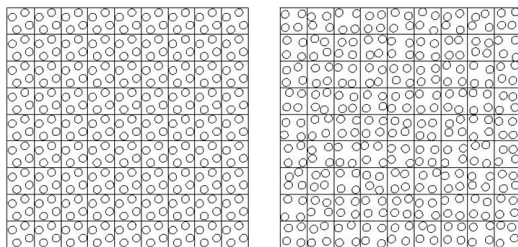
그림 5(d)의 랜덤 패턴은 정사각형 내의 태그의 중심을 무작위로 하되 태그 감지 범위가 해당 정사각형을 벗어나지 않도록 한다.

$$-(\frac{s}{2} - r) \leq c_x, c_y \leq (\frac{s}{2} - r), \quad r \leq \frac{s}{2} \quad (20)$$

그림 6은 그림 5에 보인 네 가지 배열 패턴을 이용하여, 주행 노면 상에 9×9 의 형태로 태그를 배치한 결과를 보인다. 그림 6(a,b)에 보인 정사각형 패턴과 평행사변형 패턴이 가장 전형적인 태그 배치 형태라 할 수 있다. 그러나 정사각형 패턴의 경우 종방향 혹은 횡방향 주행 시 상당 시간 동안 아무 태그도 경유하지 않는 상황이 발생할 수 있으며, 또한 평행사변형 패턴의 경우 종방향으로의 상황은 호전되



(a) 정사각형 패턴. (b) 평행사변형 패턴.
(a) square. (b) parallelogram.



(c) 회전 정사각형 패턴. (d) 랜덤 패턴.
(c) rotated square. (d) random pattern.

그림 6. 태그 배치 패턴을 이용한 9×9 의 형태의 태그 배치.
Fig. 6. 9×9 tag arrangements using tag grouping patterns.

고 있으나, 횡방향으로의 어려움은 여전함을 관찰할 수 있다. 반면, 그림 6(c)에 보인 회전 정사각형 패턴의 경우 종방향 및 횡방향으로의 상황이 개선될 수 있음을 관찰할 수 있다.

태그 밀도를 높이지 않으면서도 종방향 및 횡방향으로의 상황을 궁극적으로 개선시키기 위해서는 그림 6(d)에 보인 바와 같이 무작위 패턴으로 배치하는 것이 바람직할 것이다. 그러나 태그를 무작위 위치에 주행 노면 상에 정확히 설치하는 작업이 현실적으로 매우 어려운 일임을 감안하면, 무작위 패턴의 실질적 유효성에 의문이 생기게 된다.

3. 의사 랜덤 태그 패턴

본 논문에서는 그림 5(c)에 보인 회전 정사각형 패턴을 기초로 하되, 소그룹별로 회전 각도를 서로 다르게 하는 방안을 제안한다. 회전 각도를 무작위로 할 경우 또 다시 태그 설치상의 문제가 제기되므로, 그 대신 회전 각도는 일정 공식에 의거해 정하되, 무작위 경우의 효과가 나타나도록 한다. 우선, 회전 각도가 90° 에 이르면 다시 본래 형태로 돌아가게 되므로, 다음과 같은 9가지의 회전 각도를 사용하도록 한다.

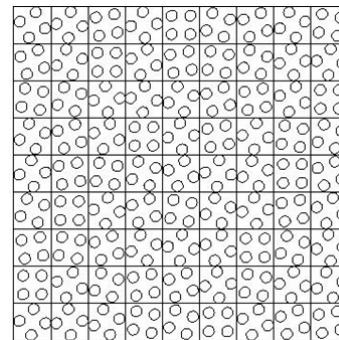
$$\phi_K = (K-1) \frac{\pi}{2} \frac{1}{9} = (K-1) \frac{\pi}{18}, \quad K=1, \dots, 9 \quad (21)$$

여기서, $K=1$ 이면 그림 5(a)의 정사각형 패턴에 해당됨을 주목하라. 다음, 식 (21)에 의해 얻어진 서로 상이한 9가지의 회전 정사각형 패턴을 두뇌 게임의 일종인 스도쿠 게임에서

4	5	2	6	1	8	3	7	9
3	7	1	4	2	9	8	6	5
9	8	6	5	7	3	2	4	1
7	3	4	1	6	2	5	9	8
6	2	9	8	4	5	7	1	3
8	1	5	3	9	7	6	2	4
2	9	3	7	5	4	1	8	6
1	4	8	2	3	6	9	5	7
5	6	7	9	8	1	4	3	2

(a) 스도쿠 게임의 해의 예.

(a) a solution to the Sudoku puzzle.



(b) 그에 해당하는 태그 배치.
(b) the corresponding tag arrangement.

그림 7. 의사 랜덤 태그 배치.

Fig. 7. Pseudorandom tag arrangement.

와 같이 배열한다. 스도쿠 게임에서는 9×9 형태의 정사각 형에 각각 9개씩의 1부터 9까지의 숫자를 배열하되 가로, 세로, 대각 모두 중복되는 숫자가 없도록 하여야 한다.

그림 7(a)는 스도쿠 게임 규칙에 의한 숫자 배열의 일례를 보이며, 그림 7(b)는 그에 따른 태그 배치 결과를 보이고 있다. 이 결과를 그림 6(d)의 랜덤 패턴과 비교하여 보면, 임의의 방향으로의 태그 경유 확률 측면에서 상당히 유사한 효과를 보고 있다는 사실을 관찰할 수 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 그림 7(b)에 보인 태그 배치 패턴을 의사 랜덤 패턴이라 부른다.

IV. 실험 결과

1. 위치 추정 시스템 구성

본 논문에서는 Inside Contactless사로부터의 상용 수동 RFID 시스템을 사용하였는데, 그림 8과 같이 M300-2G RFID 리더기, 원형 루프 안테나, 그리고 ISO 15693 표준을 따르는 주파수 13.56MHz의 coin type 태그로 구성된다. 다음, 그림 9는 제작된 수동 RFID 기반 위치 추정 시스템을 보이고 있는데, 리더기는 원형 형태로 제작된 모바일 로봇의 상단에 올리고 안테나는 로봇의 바닥 면에 부착하였으며, 리더기와 안테나는 유선 케이블을 통해 연결하였다. 주행 노면으로부터 1.5cm 높이에 위치하도록 안테나를 설치하였는데, 실험을 통해 유효 감지 반경이 10cm임을 확인할 수 있었다.

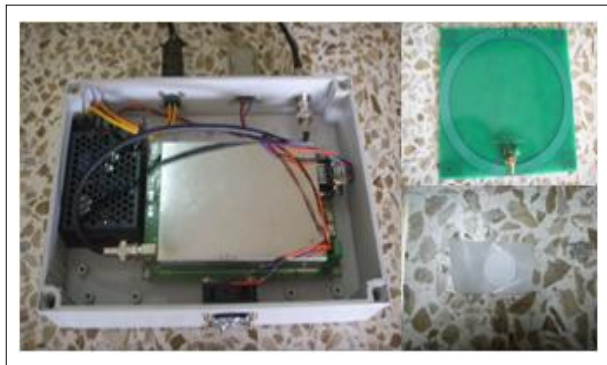


그림 8. 수동 RFID 시스템 구성 요소: 리더기, 안테나, 그리고 태그.

Fig. 8. Passive RFID system components: reader, antenna, and tag.

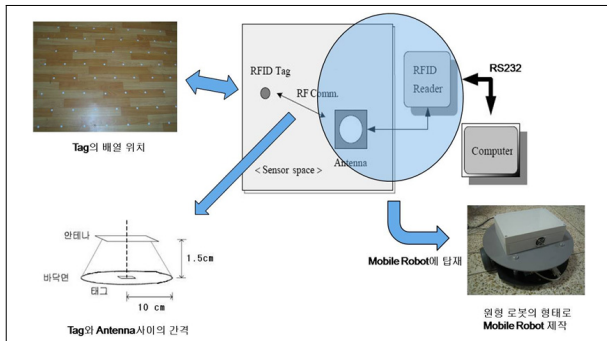


그림 9. 수동 RFID 기반 위치 추정 시스템.

Fig.9. Passive RFID based localization system.

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.

2. 실험 결과

본 논문에서 제안된 RFID 기반 이동로봇 위치 추정 기법의 유효성과 우수성을 검증하기 위해 다양한 주행 실험을 실시하였다. RFID 기반 이동로봇 위치 추정의 성능은 주행 노면 상의 태그 분포 밀도 및 태그 배치 패턴에 따라 크게 달라진다.

우선, 그림 10에 보인 바와 같이 태그를 유사 랜덤 패턴으로 배치하였다. 설치상 편의를 위해, 먼저 70×70cm 크기의 정다각형 타일에 유효 감지 반경이 10cm인 태그를 4개씩 부착시켰다. 다음, 정다각형 타일을 가로, 세로 각각 4줄 씩 배열하여 전체적으로 크기가 280×280cm인 태그를 부착 주행 노면을 제작하였다.

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

그림 11은 본 논문에서 제안한 방법에 의거 추정한 이동로봇의 선속도 v 와 전체 좌표계에서의 조향각 θ 을 보인다. 추정 값과 실제 값 사이의 편차가 관찰되는데, 이는 태그 경유 시간 정보 측정에 수반되는 잡음의 영향에 기인한다고 하겠다. 다음, 그림 12는 그림 11의 추정 속도로부터 계

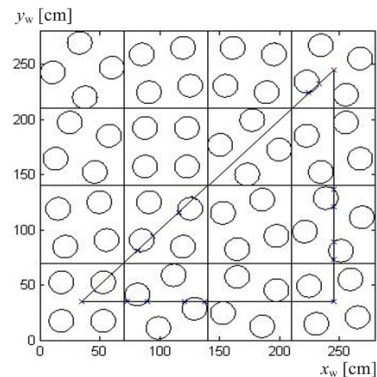


그림10. 유사 랜덤 패턴 태그 배치 아래서의 이동로봇의 위치 추정 실험.

Fig. 10. The mobile robot localization experiment under the pseudorandom tag arrangement.

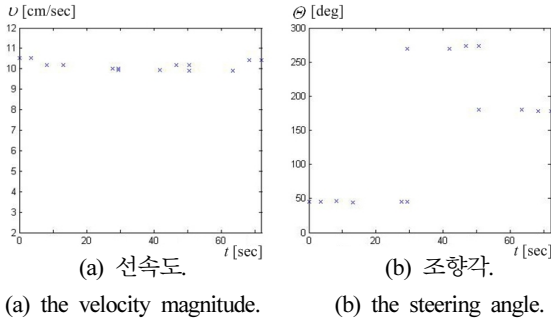


그림11. 이동로봇의 추정 속도.

Fig. 11. Mobile robot velocity estimates.

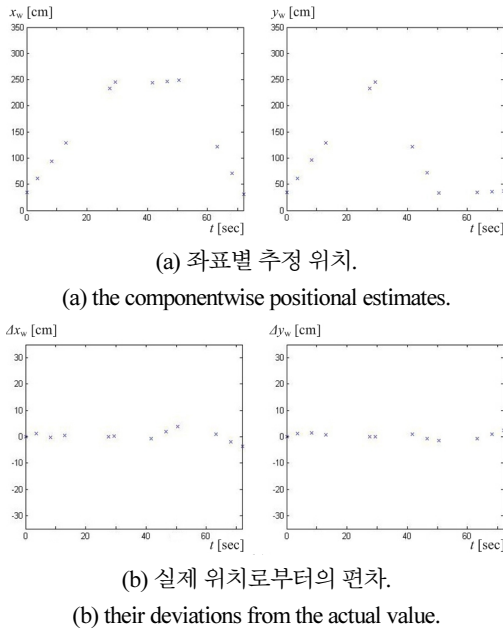


그림12. 이동로봇의 위치 추정.

Fig. 12. The mobile robot localization.

산된 좌표별 이동로봇의 추정 위치 궤적과 그리고 좌표별 실제 주행 궤적으로부터의 편차를 보이고 있다. 그림 13은 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.

마지막으로, 상기 주행 실험을 50회 반복하여 시행하였으며, 반복 실험 결과 얻어진 위치 추정 오차 분포를 그림 14에 보이고 있다. 그림 14에서 보듯이 최대 위치 추정 오차가 대략 5cm 정도로 관찰되고 있는바, 그림 10에서 보듯 태그 분포 밀도가 비교적 낮은 상태를 감안하면 매우 양호한 결과라 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수동 RFID 환경에서 기존 연구 결과에 비해 성능 및 경제성이 우수한 새로운 이동로봇의 현재 위치 추정 방안을 제시하였다. 먼저, 태그로부터의 위치 정보와 태그 감지 시간 정보를 활용하여 이동로봇의 속도 및

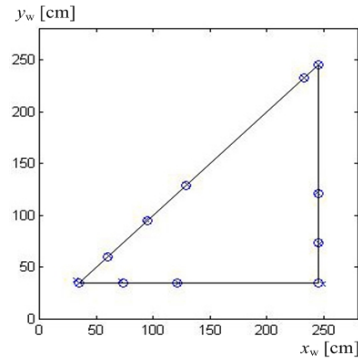


그림13. 주행 평면상에서의 추정 위치 궤적('x'로 표시) 그리고 실제 주행 궤적('o'으로 표시).

Fig. 13. The estimated trajectory, marked by 'x', and the actual trajectory, marked by 'o', on the traveling floor.

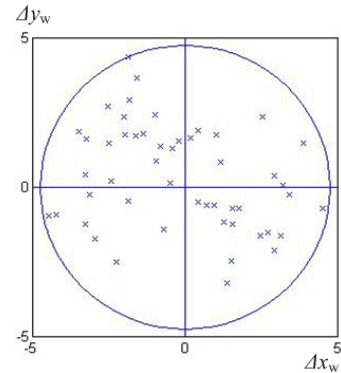


그림14. 반복 주행 실험에 따른 위치 추정 오차 분포.

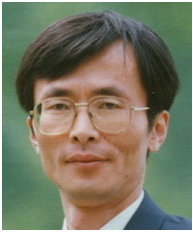
Fig. 14. The distribution of positional estimation errors resulting from repetitive test drives.

위치를 추정하는 새로운 방법을 제안하였다. 다음, 주어진 태그 분포 밀도 아래서, 위치 추정 오차를 줄이고 또한 태그 설치 용이성을 고려한 주행 노면상의 최적 태그 배치 방식을 고안하였다. 마지막으로, 이동로봇의 반복 주행 실험을 통해, 본 논문에서 제안된 위치 추정 기법의 유효성 및 성능을 검증하였다. 본 논문에서 제안된 성능 및 경제성을 겸비한 실용적 RFID 기반 위치 추정 기법이 서비스 로봇 실용화를 앞당기는데 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [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] K. Finkenzeller, *RFID handbook: Fundamentals and Applications*, Wiley, 2000.
- [3] O. Kubitz, M. O. Berger, M. Perlick, and R. Dumoulin, "Application of radio frequency identification devices to support navigation of autonomous mobile robots," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, pp. 126-130, 1997.
- [4] G. Kantor and S. Singh, "Preliminary results in read-on-

- ly localization and mapping,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1818-1823, 2002.
- [5] D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin, and M. Philipose, “Mapping and localization with RFID technology,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1015-1020, 2004.
- [6] K. Yamano, K. Tanaka, M. Hirayama, E. Kondo, Y. Kimura, and M. Matsumoto, “Self-localization of mobile robots with RFID system by using support vector machine,” *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 3756-3761, 2004.
- [7] V. Kulyukin, C. Gharpure, J. Nicholson, and S. Pavithran, “RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired,” *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1979-1984, 2004.
- [8] K. Penttila, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski, “Performance development of a high-speed automatic object identification using passive RFID technology,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 4864-4868, 2004.
- [9] 김성부, 이동희, 이장명, “RFID 응용 기술을 이용한 이동 로봇의 실내 위치 추정,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제11권, 제12호, pp. 996-1001, 2005.
- [10] 문승욱, 지용관, 박장현, “정적 passive RFID 태그를 이용한 지능적인 로봇위치추정기법,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 9-14, 2006.
- [11] 최병석, 이장명, “RFID 센서 공간에서의 모바일 로봇의 효율적인 위치 인식,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 15-22, 2006.
- [12] 이현정, 최규천, 이장명, 이민철, “RFID를 이용한 이동 로봇의 위치인식기술,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 41-46, 2006.
- [13] 서대성, 이호길, 김홍석, 양광웅, 원대희, “RFID 태그에 기반한 이동 로봇의 몬테카를로 위치추정,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 47-53, 2006.
- [14] 최정욱, 오동익, 김승우, “RFID 태그플로어 방식의 내비게이션에 관한 연구,” 제어·자동화·시스템공학논문지, 제12권, 제10호, pp. 968-974, 2006.



김 성 복

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1993년 미국 University of Southern California 전기공학과 박사. 1994년~현재 한국외국어대학 전자정보공학부 교수. 관심 분야는 지능형 로

봇시스템의 분석, 설계 및 제어.



이 상 협

2007년 한국외국어대학교 디지털정보공학과 졸업. 2007년~현재 동대학원 석사과정 재학 중. 관심 분야는 지능형 로봇시스템의 설계 및 제어.