

수동 RFID 기반 효율적인 이동로봇 위치 추정

김성복, 이상협  
 한국외국어대학교 디지털정보공학부  
 (E-mail : {sbkim, toto718}@hufs.ac.kr)

Passive RFID Based Efficient Mobile Robot Localization

Sungbok Kim and Sanghyup Lee  
 Department of Digital Information Engineering, Hankuk University of Foreign Studies  
 (E-mail : {sbkim, toto718}@hufs.ac.kr)

**Abstract** - 본 논문에서는 수동 RFID 환경 아래서 공간/시간 정보를 효과적으로 활용하여, 기존 연구결과에 비해 추정 오차를 감소시키고 동시에 경제성을 향상시키는 새로운 위치 추정 기법을 개발하고자 한다. 기본적으로 이동로봇이 일련의 직선 구간을 구간별로 정속 주행하며, 또한 매 순간 이동로봇에 의해 감지되는 태그의 수는 한 개 이하라고 가정한다. 이러한 가정 아래서, 이동로봇이 위치 정보가 알려진 태그의 감지 범위를 경유하는 과정에서의 시간 정보를 이용하여, 주어진 구간에 대해서 이미 알려져 있는 지점을 출발하여 정속으로 직선 주행하는 이동로봇의 속도 및 위치를 추정하는 알고리즘을 개발한다.

1. 서 론

이제까지 이동로봇의 위치 추정을 위해 여러 유형의 센서를 사용한 다양한 시도가 이루어져 왔다. 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, 리더로 구성되는 RFID 시스템을 실내 환경에서의 이동로봇의 위치 추정에 적용하려는 시도가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다 [1-6].

2. 위치 추정의 기본 원리

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. 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.

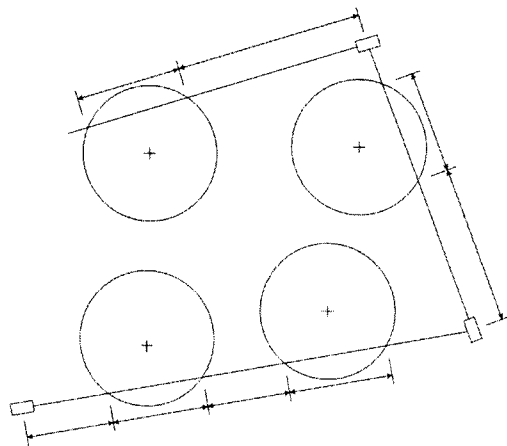


그림 1. 태그가 배치된 2차원 평면에서의 이동로봇의 주행 궤적

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 주어지면 해당 구간에서 일정하게 유지되고 있는 이동로봇의 조향각과 선속도를 결정할 수 있을 것이다. 여기서, 미지수가 2개이고 또한 제한식이 2개임에 주목하여야 한다.

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

3. 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. 여기서, 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. 출발 후 태그 진입까지의 경과 시간  $t_1$  과 태그 진입 후 이탈까지의 경과 시간  $t_2$ 로부터 이동로봇의 조향각  $\theta$  와 선속도  $v$  를 정하는 문제이므로 일반적으로 본 문제에 대한 수학적 해가 존재함을 알 수 있다.

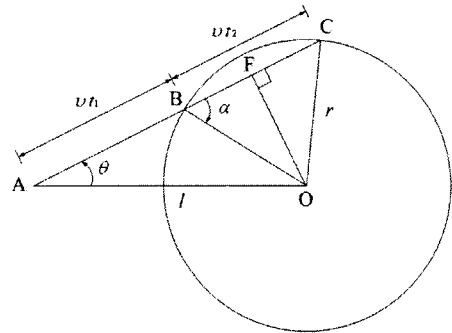


그림 2. 태그 경유 관련 시간 정보를 이용한 이동로봇의 위치 추정

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.

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

먼저,  $\angle OBF$  를  $\alpha$  라 하면,

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

다음,  $\Delta ABO$  에 코사인 법칙을 적용하면

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

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  $\theta$  을 나타내는  $\angle BAO$  는 다음과 같이 구해질 수 있다. 즉,

$$\cos \Theta = \frac{(vt_1)^2 + l^2 - r^2}{2(vt_1)l} \quad (7)$$

이므로, 이 결과를 이용하면

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

식 (8)에서 보듯 일반적으로 이동로봇의 조향각  $\Theta$  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 필요하게 된다.

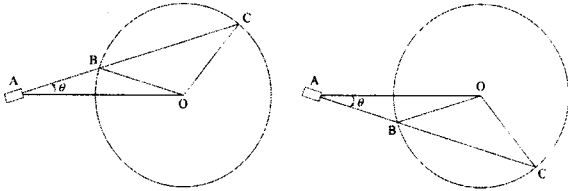


그림 3. 속도 벡터 해의 수학적 이중성

식 (6)과 식 (8)에 의해 이동로봇의 선속도  $v$  와 조향각  $\Theta$  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.

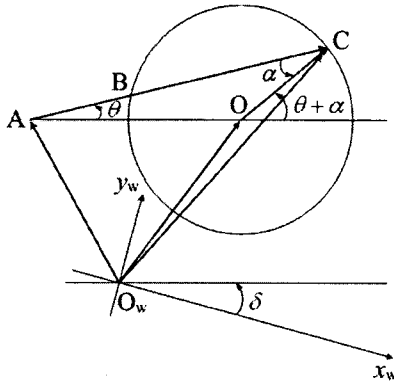


그림 4. 전역 좌표계에서의 이동로봇 위치 추정

### 3.2 전역 좌표계의 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 출발지점을 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 4를 참조하면, 태그 이탈 시점에서의 이동로봇의 전역 좌표계에서의 위치는 다음과 같이 얻어진다.

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

한편, 그림 4로부터 전역 좌표계에서의 이동로봇의 조향각을  $\Theta$  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 조정할 후, 조향각을 유지한 상태에서 일정한 속도로 직선 주행한다고 가정하고 있다. 이전 구간인  $(k-1)$  번째 구간에 대해 전역 좌표에서의 이동로봇의 조향각을  $\Theta_{k-1}$  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,  $\Theta_{k-1}$  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 논의의 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  $w_k = \frac{2R}{D} w_{k,r}$  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 이동로봇의 실제 조향각  $\Theta_k$  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 실제적으로 유효한 조향각으로 선택한다. 여기서 엔코더의 속도 정보를 그 자체로서 사용하고 있는 것이 아니라 다른 대상에 대한 선택의 기준으로만 사용되고 있음에 유의할 필요가 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 태그로부터의 위치 정보와 함께 해당 태그의 감지에 따른 시간 정보를 활용하여 이동로봇의 현재 위치를 효율적으로 추정하는 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제안된 이동로봇의 위치 추정 기법은 이동로봇의 주행 궤적이 일련의 직선을 구간별로 정속 주행하고 있다고 가정하고 있으나, 이는 중저가형 상용 및 교육용 이동로봇에 대해서는 타당성 있는 전제라 할 수 있다. 반면, 본 논문에서는 매 순간 이동로봇에 의해 감지되는 태그의 수가 하나 이하라고 전제하고 있는 바, 동시에 여러 개의 태그를 감지하는 기존 연구 결과에 비해 태그의 분포 밀도가 낮아지게 된다. 또한, 주어진 구간 내에서 정속 직선한다는 이동로봇 주행에 대한 사전 정보를 활용함으로써, 태그 감지 범위 이탈 이후에서의 이동로봇의 위치 추정 오차를 현저히 줄일 수 있게 된다.

## [참고 문헌]

- [1] D. Hahnel et al., "Mapping and localization with RFID technology," Proc. ICRA, pp. 1015-1020, 2004.
- [2] K. Yamano et al., "Self-localization of mobile robots with RFID system by using support vector machine," Proc. IROS, pp. 3756-3761, 2004.
- [3] V. Kulyukin et al., "RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired," Proc. IROS, pp. 1979-1984, 2004.
- [4] 김성부 외 2인, "RFID 응용 기술을 이용한 이동 로봇의 실내 위치 추정," 제어자동화시스템공학논문지, 제11권, 제12호, pp. 996-1001, 2005.
- [5] 최병석 외 1인, "RFID 센서 공간에서의 모바일 로봇의 효율적인 위치 인식," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 15-22, 2006.
- [6] 서대성 외 4인, "RFID 태그에 기반한 이동 로봇의 몬테카를로 위치 추정," 제어자동화시스템공학논문지, 제12권, 제1호, pp. 47-53, 2006.