

## 이동 로봇의 위치 추정을 위한 RFID Tag 의 효율적 배치

송성호\*(한양대 대학원 기계설계학과), 박희환(한양대 대학원 기계설계학과), 문승욱(한양대 대학원 기계설계학과), 지용관(한양대 대학원 기계설계학과), 박장현(한양대)

### The optimal arrangement of RFID tags for mobile robot's position estimation

S. H. Song (HYU), H. H. Park (HYU), S. W. Moon (HYU), Y. K. Ji (HYU), J.H. Park (HYU)

#### ABSTRACT

It is very important to arrange landmarks when a mobile robot needs to measure its own location. So, it has been discussed often how to arrange landmarks in the optimal way until now. We, there, chose the RFID (Radio Frequency Identification) tags as landmarks which can be observed by a mobile robot, and demonstrated the possibility of the optimal arrangement of them. For this work first, we defined the optimization problem and its parameters for the arrangement of tags. Second, we proposed the algorithm which can be applied to the optimization problem. Finally we could obtain closely optimal and practical arrangement with the minimum number of landmarks which satisfied the necessary condition by experimentation.

**Key Words** : RFID, Tag arrangement(태그 배치), estimated position error(추정 위치 오차), steepest descent method.

#### 1. 서론

이동 로봇이 자신의 위치를 알아내는 것은 항법의 가장 기본적인 기능이다. 이와 관련 가장 많이 쓰이는 방법이 바로 dead reckoning 이라는 방법인데, 이는 거리가 늘어날수록 누적되어 발생하는 오차 때문에 그 신뢰도가 떨어진다. 이러한 문제를 개선하기 위해 최근 로봇 시스템은 dead reckoning 기능뿐만 아니라 로봇이 스스로 특정한 이정표(Landmark)를 알아 볼 수 있도록 하는 visual sensor 등을 가지고 있다. 만약 로봇의 자율성이 가장 우선시 된다면, 로봇 스스로 electric light 나 sprinkler 와 같은 특정물체를 찾고 이를 Landmark 로서 인지해야 한다. 만약 우리가 간단하게 제작된 인공 표식(Artificial Landmark)을 로봇에 적용 시킨다면 로봇의 self position measurement 가 더욱 빨라지고 신뢰도 또한 높아질 것이다. 따라서 효율적인 인공 표식의 제작에 관련된 연구나 이를 로봇에 적용시키는 방법론에 관련된 연구는 진행 되어 왔다. 하지만, 이러한 인공 표식을 어떻게 효율적으로 배치해야 하는지에 대한 연구는 아직까지 미비하다.

본 연구의 목적은 이러한 인공표식으로서 RFID Tag 를 사용하여, 로봇의 위치를 추정하고, 추

정된 로봇의 위치로부터 추정 위치 에러(estimated position error)를 산출한다. 궁극적으로 우리는 산출된 추정 위치 에러를 최소화 하기 위한 RFID Tag 의 효율적인 배치 방법론을 제시하였다. 이어지는 제 2 장에서는 RFID 를 이용한 로봇의 위치 추정에 대하여, 제 3 장에서는 배치 기법을 위한 최적화 문제의 정의와 배치 기법 알고리즘에 대해, 제 4 장에서는 실험을 통한 제시한 배치기법의 타당성을 검증할 것이다.

#### 2. RFID 를 이용한 이동로봇의 위치 추정

##### 2.1 확률 센서 모델

실험을 통해 RFID 리더기에 대한 확률 센서 모델을 구축하고, 이를 기반으로 로봇의 위치를 추정하였다. 실험을 통하여 리더기와 태그의 상대거리 및 방향 변화에 따라 인식되는 2-dimension 확률분포를 조사하였다. 리더기를 고정시킨 상태에서 태그를 한 위치에서 10 도씩 회전시키면서 36 번 회전된 방향에 대한 인식횟수를 알아보고 이를 통해 인식률을 구한다.

실험을 통해 원점을 중심으로 확률분포가 대칭인 것을 확인할 수 있다. 실험을 통해 인식에 대한

확률분포를 discrete-simplified sensor model 로 근사화 시키고, 이를 10(deg) 단위로 (d)간격으로 나누어 인식확률을 다음의 Fig. 1 과 같이 이산화한다.

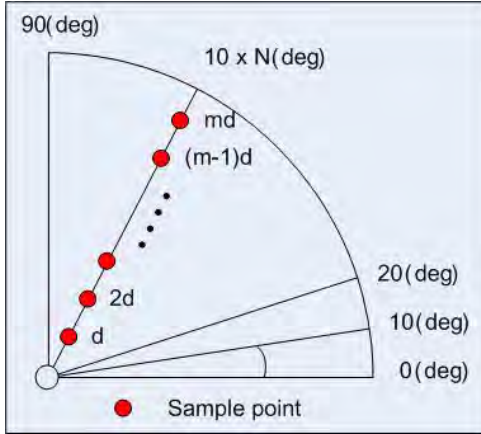


Fig. 1 The approximated probability sensor model of the RFID reader.

## 2.2 Tag 위치 추정을 위한 알고리즘

본 연구에서는 태그의 위치추정을 위한 인자로서 리더기의 회전을 통한 인식의 방향성과 인식률을 선정하였다. 정적인 태그에 대해서 리더기를 회전시켜보면 리더기의 위치에 따라 태그가 인식되는 각도가 변화하며, 이를 통해 리더기, 태그간의 상대 위치와 인식되는 각도영역 사이에 상관관계가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 상관관계를 기반으로 우리는 태그에 대한 위치를 추정할 수 있었다. Fig. 2 는 태그의 위치를 추정하기 위한 개념도이다. 리더기의 확률 센서모델로부터 거리 (l) 와 방향 (θ) 을 근사화 할 수 있으며, 이를 이용하여 태그의 위치를 추정할 수 있었다.

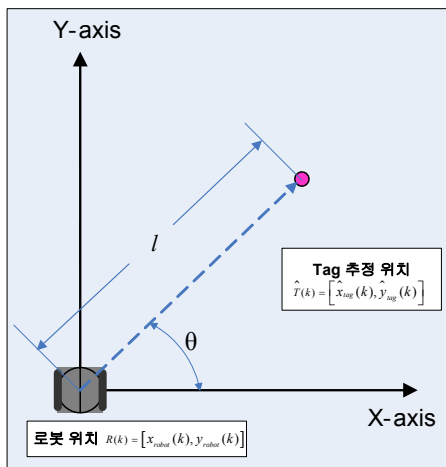


Fig. 2 The conceptual diagram for tag position estimation.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{tag}(k) \\ \hat{y}_{tag}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{robot}(k) + l \cos \theta \\ y_{robot}(k) + l \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 3. Tag 최적 배치 기법

### 3.1 Tag 배치를 위한 최적화 문제 정의

여러 가지 Landmark 가 존재할 수 있지만, 우리는 그러한 Landmark 중 로봇이 자신의 상대적인 위치를 알 수 있게 해 주는 Landmark 만으로 제한을 두었으며, 그러한 Landmark 를 RFID Tag 로 사용하였다. 이동 로봇은 tag 를 인식하고, 제 2 장의 알고리즘을 통해 상대적인 거리와 방위를 계산 함으로써 자신의 위치를 알 수 있다. 하지만 이러한 위치는 측정 오차를 가지게 되지만, 이러한 측정오차는 dead reckoning 에 의한 누적된 오차와는 구별되며, 이는 항법 시스템의 환경적 디자인(environmental design) 과정에서 줄일 수 있다.

이제 우리는 Tag 를 어떻게 배치하느냐에 대한 최적화 문제를 명확히 해 보고자 한다. 인공표식을 가지고 environmental design 하는 과정에서 로봇이 어디에 있는지 위치 추정(estimated position)의 성능이 반드시 보장되어야 한다. 이러한 사실을 토대로 하여, 우리는 먼저 위치 추정 오차(estimated position error)의 최대 허용 값을 정하고 이에 따라 환경을 설계하게 된다. 그러므로 설계 조건은 estimated position 의 maximum error 를 허용된 최대값 보다 낮게 만드는 것이다. 또한 비용적인 측면에서 보았을 때, 최소한의 Tag 를 사용하는 것이 더욱 효율적임을 알 수 있다. 위와 같은 사항들을 고려하여 다음과 같은 최적화 문제를 정의 하였다.

**Definition :** Tag 를 배열하는 최적화 문제는 estimated position 의 maximum error 가 주어진 최대 허용치보다 작아야 한다는 필요조건을 만족시키도록 Tag 를 배치시키고 사용되는 Tag 의 개수를 최소화 시키는 것이다.

위의 문제를 접근함에 있어서 두 개의 step 이 있다. 첫 번째로 Tag 의 개수를 고정시키고 Tag 의 배치를 바꿔가면서 estimated position 의 maximum error 를 최소화 시킨다. 그리고 Tag 의 개수를 변화시켜 가면서 효율적인 배치를 획득한다. 두 번째로 필요조건을 만족하는 Tag 의 최소 개수를 찾는다. 결과적으로, 우리는 어떠한 환경하에서 적어도 몇 개의 Tag 가 필요한지 알게 되고, 이를 토대로 Tag 의 최적배치를 획득하게 된다.

### 3.2 위치 추정 오차 정의

이제 우리는 위에서 언급한 최적화 문제의 parameter 인 위치 추정 오차(estimated position error)와 최대 위치 추정 오차(maximum estimated position error)에 대해 정의하고자 한다. 먼저 Fig. 3은 위치 추정 오차에 대한 개념적인 그림이다.

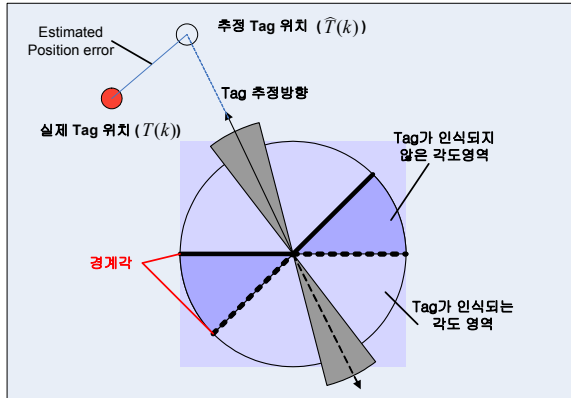


Fig. 3 Conceptual definition for the estimated position error.

제 2 장에서 언급했던 리더기, 태그간의 상대위치와 인식되는 각도영역 사이에 상관관계와 실험을 통해 구축한 센서 모델을 기반으로 Tag 의 위치를 추정 한 후, 실제 Tag 의 위치와의 거리를 계산함으로써 위치 추정 오차를 정의 하였다.

$$\begin{aligned} \text{The estimated position error} \equiv E(k) &= |T(k) - \hat{T}(k)| \\ &= \sqrt{\{x_{tag}(k) - \hat{x}_{tag}(k)\}^2 + \{y_{tag}(k) - \hat{y}_{tag}(k)\}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

만약 robot position R 에서 하나 이상의 Tag 가 인식된다면, 그 중 position error 가 가장 작은 Tag 가 선택될 것이며, 그 때의 position error 가 적용된다. 이는 로봇이 자신의 위치를 수정하고 확인하고자 할 때 오로지 1 개의 optimal Tag 만을 참조한다는 것을 의미한다. 또한 금속 등의 장애물로 인해 인식 가능한 Tag 가 하나도 없거나 인식 범위를 벗어난 경우, 그 위치에서 position error 는 무한대라고 가정한다. 두 번째로 최대 위치 추정 오차를 정의 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{The maximum estimated position error } E_{\max} & \\ \equiv \max \{E(k), \forall k \in W\} \end{aligned} \quad (3)$$

W 는 로봇이 위치할 수 있는 모든 공간을 의미하며, k 는 로봇이 위치하게 되는 지점의 index 이다. 즉  $E_{\max}$  는 로봇이 위치하는 모든 k 지점에서의 추정 위치 에러 중 가장 큰 값이 되는 것이다.

### 3.3 최적 배치 기법 공식화

Tag 의 최적 배치 기법은 다음과 같은 두 개의 단계를 거친다. 첫 번째 단계는 n 개의 Tag 가 배치된 공간에서 maximum position error 를 최소화 시키는 것이다. 이때 Tag 의 개수는 고정되어 있다. 이러한 과정은 아래의 식 (3)의  $E_{\max}$  를 최소화 시키는 것이다. 두 번째 단계는 허용되는 position error 의 최대치로 주어지는 K 를 만족하는 Tag 의 개수를 최소화 시키는 것이다. 식 (3)에서 Tag 의 수를 고정시켰으나, 그 수를 다양화하고 각 Tag 개수 하에 최적 배치를 찾는 과정에서 우리는 적어도 얼마나 많은 Tag 가 필요한지 알 수 있다. 이상의 두 단계로 이뤄지는 최적화 문제는 다음과 같은 두 개의 식으로 표현할 수 있다.

$$E_{\max} \equiv \max \{E(k), \forall k \in W\} \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Conv(n) &\equiv \min \{E_{\max}(n) | n \text{ is fixed}\} \\ \min \{n | Conv(n) \leq K\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Conv(n)은 n 개의 Tag 일 경우  $E_{\max}$  의 최소화된 값을 나타낸다.

### 3.4 최적 배치 기법 알고리즘

여기서 소개되는 최적 배치 기법 알고리즘은 무작위로 배치된 Tag 로부터 우리가 원하는 수준으로 배치가 어느 정도 수렴할 때까지 수행되는 것으로 다음과 같은 3 가지 알고리즘을 가지고 있다.

- (1) 'steepest descent method'에 의해 이동시킨다.
- (2) maximum position error point 에 가장 가까우면서 이동 가능한 위치로 Tag 를 움직인다.
- (3) (1),(2)의 방법으로 maximum position error 를 감소시킬 수 없다면, 그 자리를 유지한다.

Tag 가 steepest descent method 에 의해 shift 될 때의 좌표계를 정의하면 다음과 같다. 원점은 물체의 경계면 위에 있는 Tag 의 중심이며 좌표축  $\zeta$  는 Fig. 4 와 같이 물체 경계면 위의 시계 방향으로 정의된다.

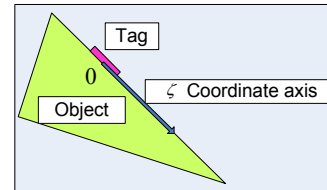


Fig. 4 The coordinate system when a tag is shifted by steepest descent method

우리는 steepest descent method 를 적용시키기 위해 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\Delta\zeta_i = -K \frac{E_{\max}(\zeta_i + d\zeta) - E_{\max}(\zeta_i)}{d\zeta}, \quad (6)$$

$$\zeta_{i+1} = \zeta_i + \Delta\zeta_i$$

where,  $\zeta_i$  : position of the tag at step i

$d\zeta$  : constant value for quasi-partial-differential

K : coefficient

$\Delta\zeta_i$  : steepest descent direction

여기서 하나의 step 은 tag 를 위의 알고리즘에 따라 한번 이동시키는 것을 의미한다. 위에서 소개한 3 가지 알고리즘에 대한 전반적인 순서도를 Fig. 5 에 나타내었다.

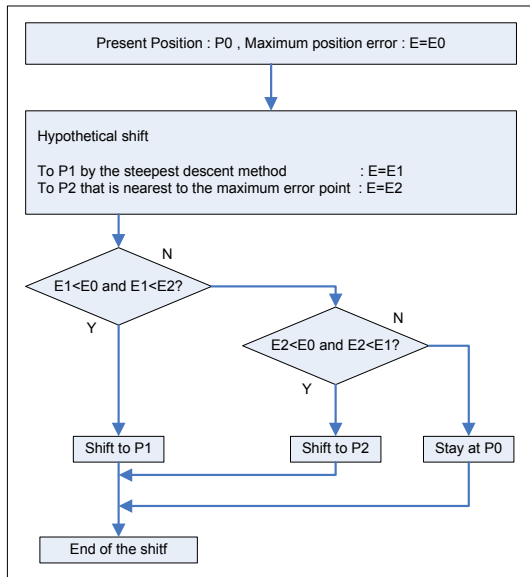


Fig. 5 flow chart of shifting tags

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 실험 환경

지금까지 소개된 알고리즘을 검증한 실험 환경은 다음과 같이 setting 되었다.

- (1) 전체 공간은 1.08[m]\*1.08[m]이며 약간의 장애벽면이 있다. (Fig. 7)
- (2) 실험에 사용된 RFID 리더기는 STS-2000(최대인식거리;30[cm])이다.
- (3) Steepest descent method 에 관련된 parameter 는 각각  $d\zeta = 3.0[cm]$ ,  $K = 2.0$  이다.

먼저 Tag 를 무작위로 배치하고, 앞서 제안한 알고리즘을 이용하여 필요조건에 부합되는 arrangement 를 찾게 된다. Fig. 6 은 실제 실험 환경 사진이다.

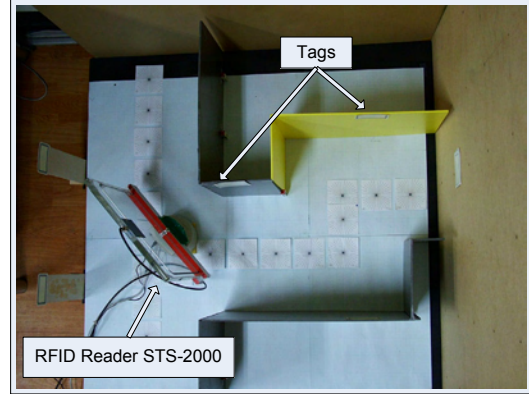


Fig. 6 The experimental environment

### 4.2 실험 결과

최초 8 개의 Tag 를 무작위로 배치하고 로봇이 이동 가능한 모든 지점에서의 maximum position error 를 산출 해 보았다(Fig. 7). 이때의 maximum position error 는 25.3[cm] 이었다.

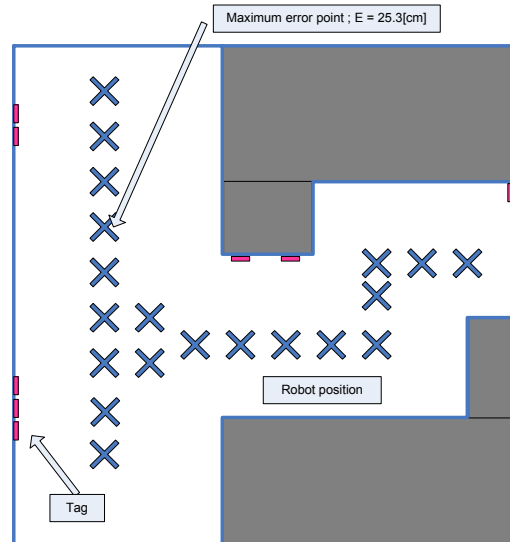


Fig. 7 Initial arrangement of RFID tags

그리고 앞서 소개했던 알고리즘을 적용하여 8 step 경과 후의 모습을 Fig. 8 에 나타내었다. 이 때의 maximum position error 값은 4.5[cm]이었다. 우리가 원하는 최대 허용치를 5[cm]로 잡았다면, 이 배치는 충분히 적합한 배치라고 할 수 있겠다.

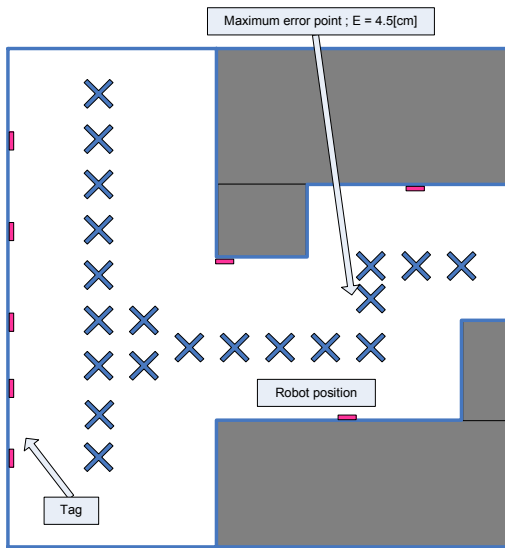


Fig. 8 Arrangement of RFID tags at step 8

또한 maximum position error 값의 천이 그래프를 Fig. 9 에 나타내었다.

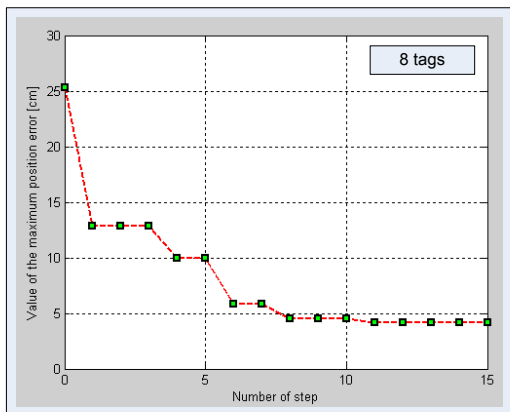


Fig. 9 Transition of the maximum position error

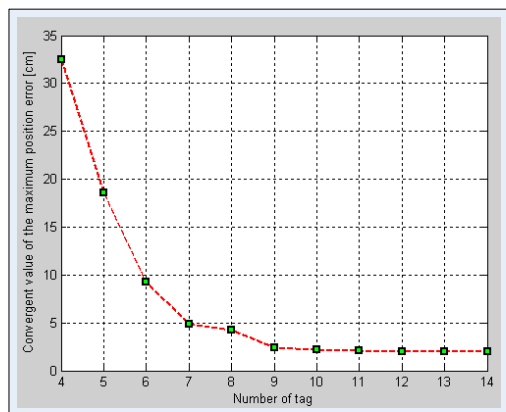


Fig. 10 Convergent value of the maximum position error

마지막으로 Tag 의 개수를 바꿔가며 각 case 에서 maximum position error 를 최소화 시키고 수렴되는 arrangement 를 찾아내었다. 이와 관련된 그림이 바로 fig 4.5 이다. fig 4.5 를 통해 알 수 있듯이 우리가 만약 최대 허용 오차를 10[cm]이라 정했다면, 이때의 필요한 Tag 의 개수는 6 개이다. 마찬가지로 5[cm]일 경우 적어도 7 개의 Tag 가 필요하게 된다. 또한 Tag 의 개수가 3 개 이하이면 maximum position error 가 무한대가 되어 아무리 최적 배치를 찾는다 하더라도 허용지물이 된다. 이는 RFID 리더기의 최대 인식 범위가 한정적이기 때문이다.

## 5. 결론

우리는 실험을 통해 RFID 리더기에 대한 확률 센서 모델을 구축하고, 이를 기반으로 로봇의 위치를 추정하였다. 그리고, 로봇의 위치 추정을 위한 RFID Tag 의 효율적 배치를 위해 최적화 문제를 정의하고 공식화 하였다. 또한 최적화 문제의 parameter 인 위치 추정 오차(estimated position error) 와 최대 위치 추정 오차(maximum estimated position error) 를 정의하였다. 또한 최저 배치 기법을 위한 알고리즘을 제시하고 실험을 통해 그 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 결과적으로 우리는 최대 위치 추정 오차를 최소화 하는 최적 배치를 찾을 수 있었으며, 최대 허용 오차보다 작게 하기 위해 최소한 몇 개의 Tag 가 필요한지 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원으로 수행되었음(과제번호: 2004-041-D00053).

## 참고문헌

1. 지용관, 문승욱, 박장현, "RFID 의 확률적 센서 모델을 이용한 위치 추정 알고리즘", 한국정밀공학회 춘계학술대회요약논문집, pp.296,2005
2. Klaus Finkenzeller, "RFID Handbook : Radio Frequency Identification Fundamental and Applications" Wiley, 2000
3. Kenji TASHIRO, Jun OTA, Yuan C.LIN and Tamio ARAI, " Design of the Optimal Arrangement of Artificial Landmarks" IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 1995
4. T. Rupp and P. Levi, "Optimized Landmark Arrangement for Absolute Localization – A Practical Approach" IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems