

# 퍼지기반 융합 무선위치추정기법

조성윤\*

## A Fuzzy-based Fusion Wireless Localization Method

Seong-Yun Cho\*

요 약

거리 측정정보를 사용하는 무선위치추정시스템에서 추정기법으로 반복기법기반 근사해를 주로 많이 사용하고 있으나 지역최소문제 및 계산량을 고려해 대안으로 선형 닫힌 형태의 해가 연구되어 왔다. 그러나 각 닫힌 형태의 해는 별도의 특성을 가진 오차요인을 갖고 있으며 이 문제로 인해 그 사용이 제한되기도 한다. 본 논문에서는 대표적인 두 닫힌 형태의 해를 융합하여 각 해가 갖는 오차요인을 서로 상쇄시키는 기법을 제안한다. 두 해를 융합하기 위한 가중치를 각 오차요인이 갖는 오차 특성 기반 퍼지 기법으로 결정하는 방법을 사용한다. 제안된 기법의 성능은 시뮬레이션 기반으로 검증한다.

### ABSTRACT

In the wireless localization systems using range measurements, iteration method-based approximated solutions have been used. Also, linear closed-form solutions have been investigated in the light of local minimum problem and computational load. However, each closed-form solution has individual error factors that cause usage limit of the solutions. In this paper, a fusion method integrating two representative closed-form solutions is presented. The presented method cancels the error factors of each solution out. Weights for integrating the standalone solutions are determined using the error factors-based fuzzy method. The performance of the proposed method is verified using some simulation results.

### 키워드

Wireless Localization, Linear Closed-Form Solution, Fusion Method, Fuzzy Technique  
무선 위치 추정, 선형 닫힌 형태의 해, 융합 기법, 퍼지 기법

## 1. 서론

지난 십여 년 동안 다양한 실내외 위치기반서비스(LBS : Location Based Service)가 제공되고 또한 이에 대한 요구사항이 증가하고 있다[1]. 위치기반서비스는 위치추정기술, 통신기술, 솔루션 및 플랫폼기술 등의 융합에 의해 제공되는 IT 서비스로 차량용/보행자용 내비게이션 및 POI(: Point of Interest) 정보 제

공 등이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 위치기반서비스의 기반기술 중 하나인 보행자용 위치추정기술의 성능을 향상시키는 기법을 제안한다.

거리 측정정보를 사용하는 무선위치추정(Wireless Localization)에서 위치추정을 위한 추정기법으로 반복기법기반 근사해가 주로 사용되고 있으며 그 대표적인 기법이 반복최소자승법(Iterative Least Squares)이다[2-5]. 반복최소자승법은 비선형함수의 선형화를 위

\* 교신저자(corresponding author) : 경일대학교 로봇응용학과(sycho@kiu.kr)  
접수일자 : 2015. 03. 13

심사(수정)일자 : 2015. 04. 13

게재확정일자 : 2015. 04. 23

한 초기 공칭점(Nominal Point)의 오차가 작은 경우 좋은 추정해를 제공한다. 그러나 초기 공칭점의 위치에 따라 지역최소문제(Local Minimum Problem)가 발생함에 따라 큰 추정오차를 야기할 수 있다[5-6]. 또한 반복기법에 의한 큰 계산량의 단점을 갖는다. 이 문제를 피하기 위해 선형 닫힌 형태의 해(Linear Closed-Form Solution)가 연구되어오고 있다[7-9]. 이 방법은 비선형 함수의 선형화를 통한 근사해를 계산하는 대신 비선형 함수의 조작(Manipulation)을 통해 바로 해를 계산한다. 따라서 반복기법에서 발생하는 문제는 갖지 않는다. 그러나 비선형 함수의 조작 과정에서 오차를 유발하는 문제가 발생할 수 있다[10]. 이 문제는 각 닫힌 형태의 해마다 다른 특성을 갖고 나타난다. 본 논문에서는 대표적인 두 닫힌 형태의 해를 소개하고 각 해에서 발생하는 문제점을 정의한다. 그리고 해당 문제점이 발생할 수 있는 원인을 파악하고 이 원인을 사용한 두 해의 융합 기법을 제안한다. 이때 융합기법은 퍼지기법을 사용한다. 퍼지기법을 통해 두 해를 융합하기 위한 가중치를 결정한다. 이를 통해 융합된 해는 단일 해에서 발생하는 문제를 최소한으로 하며 안정적인 해를 제공하는 것을 시뮬레이션 기반으로 검증한다.

## II. 기존의 선형 닫힌 형태의 해

2D 환경에서 거리 측정정보를 사용하는 무선위치 추정에서는 다음과 같은 식을 기본으로 한다.

$$\tilde{r}_{i,m} = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2} + w_{i,m} \quad (1)$$

여기서  $\tilde{r}_{i,m}$ 은 고정되어 위치를 알고 있는 기준노드(Reference Node)  $i$ 와 이동노드(Mobile Node) 사이의 거리 측정치를 의미하며,  $(x_i, y_i)$ 와  $(x_m, y_m)$ 는 각각 기준노드  $i$ 와 이동노드의 위치정보를 의미한다. 그리고  $w_{i,m}$ 는 거리 측정 잡음을 의미한다.

식 (1)에서 이동노드의 위치정보를 추정하기 위해 반복기법에서는 추정된 위치를 공칭점으로 하고 테일러(Taylor) 급수 1차 전개를 통해 비선형 함수를 선형화한 다음 최소자승법을 사용하여 위치정보를 추정한다. 이때 초기 공칭점의 위치에 따라 전역최소(Global

Minimum)가 아닌 지역최소로 수렴하는 경우 큰 추정 오차를 발생한다. 이 문제를 피하기 위해 식 (1)의 제곱을 통해 바로 이동노드의 위치를 계산하는 닫힌 형태의 해가 연구되고 있다. 본 장에서는 대표적인 두 닫힌 형태의 해인 DS(: Direct Solution) 기법과 DSRM(: Difference of Squared Range Measurements) 기법을 본 장에서 설명한다[7],[9].

### 2.1 DS 기법

DS 기법은 식 (1)에서 측정 잡음을 무시하고 양변의 제곱을 통해 제곱근을 제거한다.

$$\tilde{r}_{i,m}^2 = (x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 \quad (2)$$

이 식의 조작을 통해 다음과 같이 두 후보 해를 직접 계산한다[7].

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_m \\ \hat{y}_m \end{bmatrix}_{DS} = L \left( R_a + \begin{bmatrix} -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) \quad (3)$$

여기서

$$L = (H^T H)^{-1} H^T \quad (4)$$

$$H = \begin{bmatrix} -2x_1 - 2y_1 \\ \vdots \\ -2x_n - 2y_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_a = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{1,m}^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ \vdots \\ \tilde{r}_{n,m}^2 - (x_n^2 + y_n^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$a = (LR_b)^T (LR_b) \quad (7)$$

$$b = 2(LR_a)^T (LR_b) - 1 \quad (8)$$

$$c = (LR_a)^T (LR_a) \quad (9)$$

여기서  $n$ 은 이동노드에 연결되어 거리 측정정보를 획득한 기준노드의 수이며 3이상이어야 한다.

이 두 후보 해 중에서 하나는 정확한 위치에 근접한 해이며 나머지 하나는 큰 오차를 가진 해이다. 이 중에서 올바른 한 해는 잔차(Residual) 계산을 통해

선택되며 작은 쪽이 정확한 위치에 근접한 해이다.

식 (2)를 통해 DS 기법의 추정해에 오차를 발생시킬 수 있는 요인은 제곱근의 계산 결과가 복소수인 경우임을 알 수 있다. 이와 관련하여 [9]에서 응용영역 내에 “Red Sea Zone”이 존재하며 이 구간에서 계산된 두 후보 해는 모두 정확한 위치로부터 먼 곳에 위치함을 확인할 수 있다. 즉 DS 기법에서 발생할 수 있는 문제점의 발생 가능 여부를 확인하기 위한 요인으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$idx_{DS} = b^2 - 4ac \quad (10)$$

**Remark 1 :** 식 (9)에서 나타낸 DS 기법의 오차 발생 여부 확인 인덱스의 값이 0 근처가 되면 현재 이동노드의 위치가 “Red Sea Zone” 내에 있음을 추측할 수 있다.

## 2.2 DSRM 기법

DSRM 기법은 식 (1)에서 측정 잡음을 무시하지 않고 양 변을 제공한다.

$$\tilde{r}_{i,m}^2 = (x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 + 2r_{i,m}w_{i,m} + w_{i,m}^2 \quad (11)$$

$n$ 개의 기준노드 중 한 개를 공통 노드(Common Node)로 선택하고 나머지  $n - 1$ 개의 기준노드를 통해 획득한 측정치의 제공한 값과 공통 노드를 통해 획득한 측정치의 제공한 값의 차를 통해 다음과 같이 해를 직접 계산한다[9].

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_m \\ \hat{y}_m \end{bmatrix}_{DSRM} = (G^T Q^{-1} G)^{-1} G^T Q^{-1} Z \quad (12)$$

여기서

$$G = \begin{bmatrix} x_c - x_1 & y_c - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_c - x_{n-1} & y_c - y_{n-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Z = [\rho_{1,c} \cdots \rho_{n-1,c}]^T \quad (14)$$

$$\rho_{i,c} = \frac{\tilde{r}_{i,m}^2 - \tilde{r}_{c,m}^2 - (x_i^2 + y_i^2) + (x_c^2 + y_c^2)}{2} \quad (15)$$

$$Q = \sigma_w^2 \begin{bmatrix} \tilde{r}_{1+c}^2 & \tilde{r}_{c,m}^2 & \cdots & \tilde{r}_{c,m}^2 \\ \tilde{r}_{c,m}^2 & \tilde{r}_{2+c}^2 & \cdots & \tilde{r}_{c,m}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{r}_{c,m}^2 & \tilde{r}_{c,m}^2 & \cdots & \tilde{r}_{(n-1)+c}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\tilde{r}_{i+c}^2 = \tilde{r}_{i,m}^2 + \tilde{r}_{c,m}^2 \quad (17)$$

여기서  $(x_c, y_c)$ 는 공통 노드의 위치이며,  $\sigma_w$ 는 거리 측정정보의 오차의 표준편차이다.

DSRM 기법에서는 식의 조작 과정에서 측정 잡음을 무시하지 않고 처리함으로써 식 (11)의 뒤에서 두 번째 항에서 볼 수 있듯이 측정 잡음이 거리정보와 곱을 수행하게 되며 이로 인해 이동노드의 위치가 기준노드들의 위치로부터 멀어질수록 식에 오차가 크게 반영되어 위치추정 오차가 증가하게 된다. 이 관계는 기준노드들의 위치와 이동노드 사이의 상대적인 위치 상관관계로 해석할 수 있다. 즉, DSRM 기법에서 문제점의 발생 가능 여부를 확인하기 위한 요인으로 다음과 같이 DOP(Dilution of Precision) 값으로 정리할 수 있다.

$$idx_{DSRM} = \sqrt{\text{trace}(G^T Q^{-1} G)^{-1}} \quad (18)$$

**Remark 2 :** 식 (18)에서 나타낸 DSRM 기법의 오차 발생 여부 확인 인덱스의 값이 커질수록 측정 잡음의 영향이 위치계산 식에 크게 반영되어 위치추정 오차가 증가함을 추측할 수 있다.

## III. 퍼지기반 융합기법

II장에서 설명한 두 선형 닫힌 형태의 해는 각각의 식의 조작 과정에서 발생하는 오차요인을 갖고 있으며 이 오차 요인은 서로 다른 원인과 조건을 갖고 있다. 두 Remarks에서 나타낸 오차의 특성을 고려하여 두 해를 융합함으로써 오차가 최소한으로 나타나는 융합 해를 생성하고자 한다. 본 장에서는 퍼지기반으로 두 해를 융합하는 기법을 제시하며 그림 1에 융합 개념도를 나타내었다.

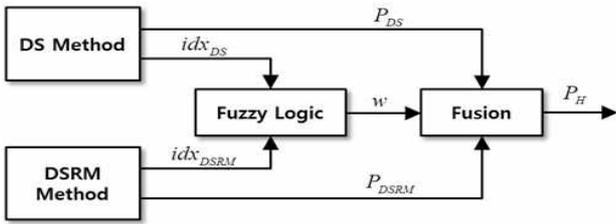


그림 1. 퍼지기반 융합기법 개념도  
Fig. 1 Concept of the fuzzy-based fusion method

DS 기법의 인덱스 값과 DSRM 기법의 인덱스 값에 관련된 퍼지 소속 함수(Membership Function)의 형태는 그림 2와 그림 3과 같으며, 그림 1에서 나타난 융합 가중치  $w$ 를 위한 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)은 표 1과 같다. 여기서 VL(: Very Large), L(: Large), SL(: Slightly Large), M(: Medium), SS(: Slightly Small), S(: Small), 그리고 VS(: Very Small).

무게 중심법을 사용하여 비퍼지화(Defuzzification)를 수행한 다음 융합 가중치를 구하였다. 이때 가중치는 0.1에서 0.8 까지의 값을 가지며 다음과 같이 융합 해를 계산한다.

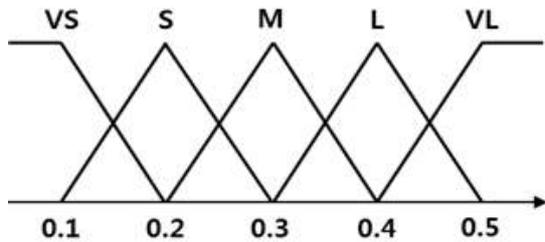


그림 2. idx\_DS에 대한 소속 함수  
Fig. 2 Membership function of idx\_DS

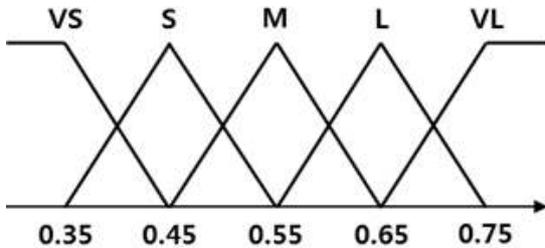


그림 3. idx\_DSRM에 대한 소속 함수  
Fig. 3 Membership function of idx\_DSRM

표 1. 융합 가중치 설정에 관한 퍼지 규칙표  
Table 1. Fuzzy rule table for fusion weighting factor

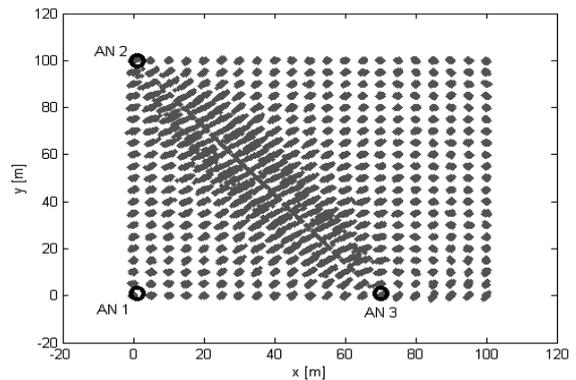
|               |    | index of DS |    |    |    |    |
|---------------|----|-------------|----|----|----|----|
|               |    | VS          | S  | M  | L  | VL |
| index of DSRM | VS | VS          | VS | VS | S  | S  |
|               | S  | VS          | VS | S  | S  | SS |
|               | M  | VS          | S  | S  | SS | SS |
|               | L  | S           | SS | SS | SS | M  |
|               | VL | M           | L  | L  | VL | VL |

$$P_H = wP_{DS} + (1-w)P_{DSRM} \quad (19)$$

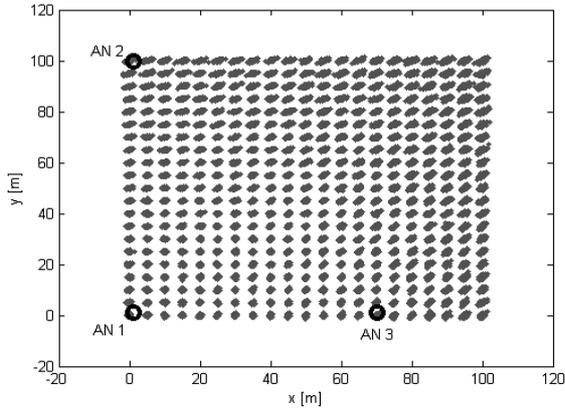
여기서  $P_{DS}$ 와  $P_{DSRM}$ 은 각각 DS 기법과 DSRM 기법을 통해 계산된 위치값이며  $w$ 는 융합 가중치 그리고  $P_H$ 는 융합 해를 의미한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

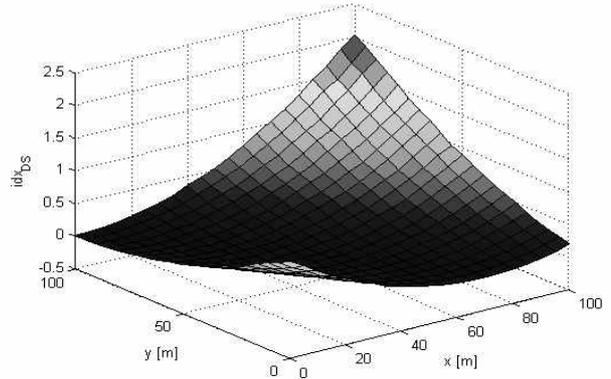
제안된 퍼지기반 융합기법의 성능을 분석하기 위하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Matlab에서 수행하였으며 시뮬레이션 횟수는 100번이다. 응용구간은  $(0m, 0m, 100m, 100m)$ 이며 3개의 고정노드가 각각  $(1m, 1m)$ ,  $(1m, 100m)$ , 그리고  $(70m, 1m)$ 에 놓인 것으로 가정한다. 이동노드는 3m 간격으로 놓인 것으로 가정하였으며 시뮬레이션의 위치추정 결과는 그림 4와 같다.



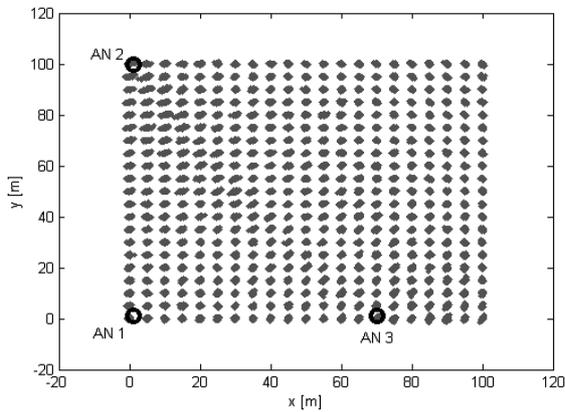
(a) DS 기법  
(a) DS method



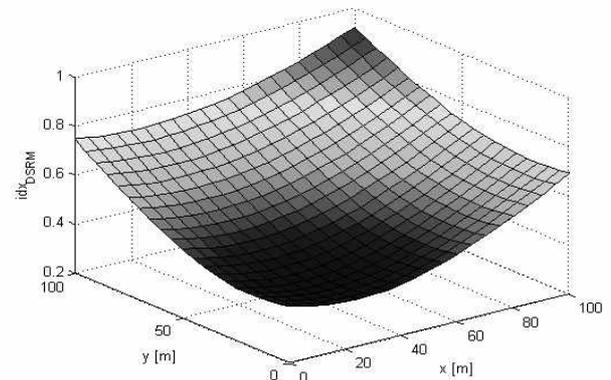
(b) DSRM 기법  
(b) DSRM method



(a) DS 기법  
(a) DS method

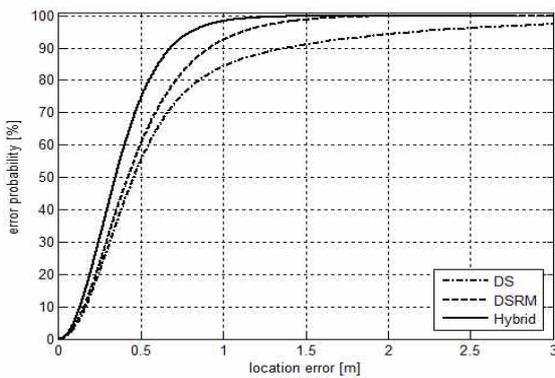


(c) 융합기법  
(c) fusion method



(b) DSRM 기법  
(b) DSRM method

그림 5. 인덱스 값  
Fig. 5 Index values



(d) 오차 확률  
(d) error probability

그림 4. 위치추정 결과  
Fig. 4 Localization results

그림 4(a)와 4(b)는 각각 DS 기법과 DSRM 기법의 위치추정 결과를 나타낸 것으로 DS 기법에서는 고정노드 2와 3을 잇는 대각선 주위에 “Red Sea Zone”이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 DSRM 기법에서는 고정노드로부터 거리가 먼 오른쪽-위쪽 부분에서 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 그 원인을 그림 5에서 나타낸 DS 기법과 DSRM 기법의 각 인덱스 값을 분석해 보면 알 수 있듯이 DS 기법에서 “Red Sea Zone” 부분에서 인덱스 값이 0 근처가 됨을 알 수 있다. 또한 DSRM 기법에서 오차가 큰 부분에서 인덱스 값의 크기가 큰 것을 알 수 있다. 즉 Remark 1과 2에서 설명한 것을 시뮬레이션에서 검증할 수 있다. 그림 4(c)는 퍼지기반의 융합기법의 위치추정 결과를 나타낸 것으로 DS

기법과 DSRM 기법에서 발생하는 오차가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 제안된 융합기법의 성능을 그림 4(d)에서 확인할 수 있다. DS 기법과 DSRM 기법 그리고 융합기법의 CEP(Circular Error Probability) 오차는 각각  $0.456m$ ,  $0.421m$ , 그리고  $0.345m$ 로 제안된 융합기법의 성능이 우수함을 결론내릴 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 선형 닫힌 형태의 해 기반의 무선위치추정에서 성능 향상을 위해 퍼지기반 융합기법을 제안하였다. 기존의 DS 기법 및 DSRM 기법에서 나타나는 문제점들은 제안된 융합기법에서는 나타나지 않음을 몬테칼로 시뮬레이션 기반으로 검증하였으며 본 시뮬레이션 결과 융합기법의 CEP 오차가 DS 기법 대비 75.6%, 그리고 DSRM 기법 대비 81.9%가 됨을 보임으로써 상대적으로 위치추정 정확도가 향상되는 것을 검증하였다.

### References

[1] K. W. Kolodziej and J. Hjelm, *Local Positioning Systems : LBS Applications and Services*. Boca Raton, FL, USA : Taylor & Francis Group, 2006.

[2] J. Yan, C. C. Tiberius, G. J. Janssen, P. J. Teunissen, and G. Bellusci, "Review of range-based positioning algorithms," *Aerospace and Electronic Systems Mag., IEEE*, vol. 28, no. 8, Aug., 2013, pp. 2-27.

[3] K. Yoon, "Improved Localization Algorithm for Ultrasonic Satellite System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 5, 2011, pp. 775-781.

[4] J. Choe, I. Choy and W. Cho, "Study on the Development of Multi-Agents Position Tracking System Using Ultrasonic Transducers," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 5, 2013, pp. 725-731.

[5] S. Cho and Y. Choi, "Access point-less wireless location method based on peer-to-peer ranging of i

mpulse radio ultra-wideband," *IET-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 4, no. 5, 2010, pp. 733-743.

[6] S. Cho, "Local minimum problem of the ILS method for localizing the nodes in the wireless sensor network and the clue," *J. of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 17, no. 10, Oct., 2011, pp. 1059-1066.

[7] I. Biton, M. Koifman, and I. Y. Bar-Itzhack, "Improved direct solution of the global positioning system equation," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, no. 1, Jan., 1998, pp. 45-49.

[8] J. O. Smith and J. S. Abel, "Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurement," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, no. 12, Dec., 1987, pp. 1661-1669.

[9] S. Cho and B. Kim, "Linear closed-form solution for wireless localization based on difference of squared range measurements," *IET-Wireless Sensor Systems*, vol. 3, no. 4, 2013, pp. 255-265.

[10] S. Cho, "Hybrid closed-form solution for wireless localization with range measurements," *J. of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 7, July 2013, pp. 633-639.

### 저자 소개



#### 조성윤(Seong-Yun Cho)

1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

2000년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

2004년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박사)

2004년~2013년 한국전자통신연구원 선임연구원

2008년~2013년 과학기술연합대학원대학교 부교수

2013년~현재 경일대학교 로봇융용학과 조교수

※ 관심분야 : 항법시스템(INS/GPS/Vision/Map 결합항법기술, PDR, WSN 및 무선위치추정기술, 로봇항법기술), MEMS 센서 응용, 선형/비선형 필터 설계, ITS/Telematics/LBS