

퍼지 모델링과 칼만 필터를 이용한 WSN에서의 위치 측정

논문

58-10-33

Localization on WSN Using Fuzzy Model and Kalman Filter

김 종 선* · 주 영 훈†
(Jong Seon Kim · Young Hoon Joo)

Abstract - In this paper, we propose the localization method on WSN(Wireless Sensor Network) using fuzzy model and Kalman filter. The proposed method is as follows: First, we estimate the distance of RSSI(Receive Signal Strength Index) by using fuzzy model in order to minimize the distance error. Second, we use a triangulation measurement for estimating the localization. And then, we minimize the localization error using a Kalman filter. Finally, we show the effectiveness and feasibility of the proposed method through some experiments.

Key Words : Receive signal strength index, Triangulation, Fuzzy model, Kalman filter, Wireless sensor network

1. 서 론

1988년 Mark Wiser에 의해 본격적인 연구가 시작된 유비쿼터스는 21세기에 들어 무선 통신 기술의 급속한 발전에 힘입어 활발한 연구가 진행되고 있다. 유비쿼터스와 관련하여 주목받는 무선 센서 네트워크는 국내뿐 만 아니라 미국, 일본 등을 중심으로 활발하게 개발 및 실제 적용되고 있다. 센서 네트워크의 연구는 크게 센서 노드 분야, 검출 노드 분야, 네트워크 분야, 시스템 운용 분야로 나누어진다[1]. 센서 노드 분야에서 실내 측위 관련 기술로는 WLAN(Wireless Local Area Network) 기반, 적외선 기반, 초음파 기반, Bluetooth 기반, RFID(Radio Frequency Identification) 기반, UWB(Ultra Wide Band) 기반 등이 있다. 이 중에서 Bluetooth 기반의 측위 기술은 일반적으로 RSSI(Receive Signal Strength Index)를 이용하기 때문에 위치 측정을 위한 별도의 케이블 및 하드웨어가 필요하지 않고 초음파 및 적외선이 갖는 측정 각의 구속에서 벗어 날 수 있다. 그러나 RSSI는 신호 대 잡음비(SNR: Signal noise ratio), 장애물에 의한 전파 지연과 같은 왜란 때문에 이를 극복하기 위한 많은 연구들이 진행 중에 있다.

일반적인 무선 센서 네트워크의 측위 방법은 측위 데이터를 획득한 뒤 이를 모델링하고 동정된 모델이 갖는 취약점(잡음/왜란)을 극복하기 위해 최적화 과정을 거친다. Awad 등은 ETH사의 Bnode 센서(Bluetooth, 433 - 915Mhz)를 실내 공간에 설치하고 이동 로봇의 RSSI를 측정한 뒤 신경망을 이용하여 RSSI의 값을 분류하였으며 노드의 총 오차

범위를 1m 내외로 축소시킨 바 있다[3]. 또한, Feng등은 RSSI의 감도(dB)와 거리를 퍼지 모델링하고 신경 회로망을 이용하여 위치를 측정하였으나 특정 범위에서 측정 오차가 2-3m 내외로 크게 발생하는 문제점을 갖고 있다[4]. 국내의 경우 윤숙현 등은 앵커 노드(anker node: 위치를 알고 있는 노드)에 백색 가우시안 노이즈를 적용한 RSSI를 퍼지 모델링한 뒤 노드의 연결 가중치를 유전 알고리즘을 이용해 동정함으로써 미지노드(unknow node: 측위 대상)의 위치를 시뮬레이션 하였으며 위치 측정오차는 0.76m로 우수한 결과를 얻어 RSSI의 응용 가능성을 제시한바 있다[7]. Wan등은 무선센서 네트워크 환경에서 AOA, TOA, TDOA, RSSI의 측위 모델링(삼각측량 법)한 후 최적화를 위해 Least-Squares, Weighted Taylor-based Least-Squares, Cramer-Rao bound 등과 같은 방법을 적용해 위치 측위 결과를 비교 및 검토하여 측위 시스템에 효과적인 잡음 제거 방법을 제안한바 있으며 Takabayashi등은 TDOA/FDOA(Frequency Difference of Arrival)의 측위를 모델링 한 후 위치 추측에 효과적인 칼만 필터를 이용해 최적화를 연구한 바 있다[11, 13]. 그러나 칼만 필터는 예측 및 관측 값이 정규 분포에 해당하는 경우 최적 성능을 나타내지만 그렇지 않을 때는 효율적이지 못하다. 특히, 본 논문에서 측위 데이터로 사용하는 RSSI는 SNR 및 전파 공간의 영향에 쉽게 간섭 받기 때문에 측정된 측위 데이터에서 신뢰할 수 없는 데이터를 배제시킬 필요가 있다.

상기 문제를 해결하기위해 본 논문에서는 퍼지 모델링과 칼만 필터를 이용한 WSN에서의 위치 측정 방법을 제안한다. 제안한 방법은 다음과 같다: 먼저, RSSI의 오차를 최소화하고자 측정된 RSSI를 거리로 환산하고 이들이 갖는 오차를 퍼지 모델링하여 거리 오차를 최소화 시킨다. 다음, 거리를 위치로 환산하기 위해 삼각 측량법을 이용하고, 마지막으로, 위치 측정에 최적인 칼만 필터를 이용해 측위 오차를 최소화하는 방법을 제안한다. 마지막으로 제안한 방법은 실제 실험을 통하여 그 우수성을 증명한다.

* 정 회 원 : 군산대학교 전자정보공학부 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 군산대학교 전자정보공학부 교수

E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 26일

최종완료 : 2009년 9월 7일

* 본 논문은 본 학회 2009년 하계학술대회 학술위원회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회 심사 후 본 논문지에 게재 되었음.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 본 논문에서 실험에 사용할 측위 시스템에 대해 설명하고 3장은 본 논문에서 제안하는 RSSI의 거리 오차 최소화를 위한 퍼지 모델링에 대해 설명하고 위치추정을 위해 거리를 좌표로 환산하기 위한 삼각측량법 및 측위 오차를 최소화하기 위한 칼만 필터에 대해 설명한다. 4장에서는 제안한 기법의 실험 결과를 통해 본 논문의 우수성 및 응용 가능성을 증명하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 위치 측정 시스템

본 논문은 위치 측정을 위해 (주)한백 전자의 Zigbee 센서 노드를 이용한다[12]. 센서 노드는 무선 통신 칩인 Texas Instrumentation(사)의 CC2420 무선 RF칩을 탑재했다. 위치 측정 시스템은 4개의 앵커노드에 1개의 미지노드를 구성되어 있으며, 미지노드는 이동 가능한 로봇에 부착되어 있고 이를 원격 조정함으로써 위치를 변화시킨다.

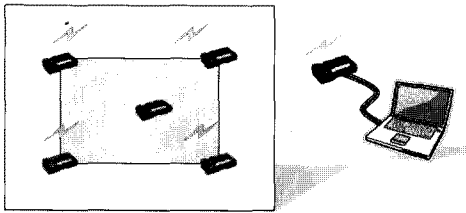


그림 1 위치 측정 시스템
Fig. 1 Localization system

미지노드의 위치를 확인하기 위해 각 앵커 노드는 미지노드의 RSSI를 측정하여 서버 측 노드로 패킷을 전송하고 서버는 수신된 RSSI를 거리로 환산하게 된다. RSSI의 거리에 따른 전력손실은 식 (1)과 같으며 그림 2는 측정된 RSSI와 이상적인 공간에서의 RSSI 전력 손실을 보여준다. 그림 2에서 알 수 있듯이 이상적인 공간과 실제 공간에서의 전력손실 오차는 매우 크다. 따라서 측위를 위한 RSSI의 오차 최소화는 반드시 수행해야 한다.

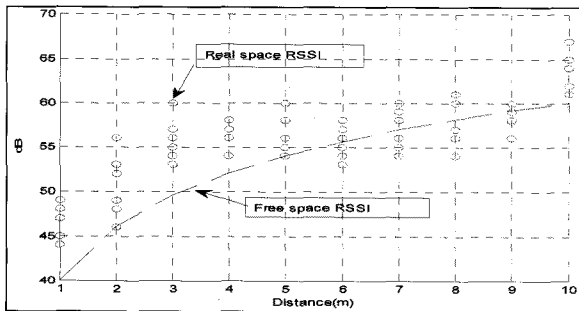


그림 2 이상적인 공간과 실제 공간에서의 RSSI 비교
Fig. 2 Comparison of RSSI in ideal and real space

$$P_r(d) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

여기서, $P_r(d)$ 는 거리 d 인 위치에서 측정된 수신측 전력이며, $P(d_0)$ 는 d 가 거리 기준거리 d_0 일 때의 전력이다. 측정된 RSSI는 측위를 위해 거리로 환산해야 하며 RSSI의 전력 손실에 따른 거리 환산은 다음과 같다.

$$d = d_0 \times 10^{\frac{P_r(d_0) - P_r(d)}{10n}} \quad (2)$$

여기서, n 은 전파 속도이다.

3. 퍼지 모델과 칼만 필터를 이용한 WSN에서의 위치 측정

앞 절에서 간단한 실험을 통해 확인한 바와 같이 RSSI는 거리에 따른 전력손실이 매우 크다. 이를 바로 측위를 위한 데이터로 사용할 경우 측위 오차가 커진다는 것은 자명하다. 따라서 본 논문에서는 측위 이전에 측정된 RSSI(거리로 환산)의 오차를 줄이기 위해 퍼지 모델링을 제안한다. 이후 오차가 감소된 거리 값으로 삼각측량법을 이용해 미지노드의 위치를 좌표로 환산하고 칼만 필터를 이용해 미지노드의 측위를 수행함으로써 측위 오차를 최소화 하는 방법을 제안한다.

3.1 퍼지 모델을 이용한 RSSI의 거리 측정

무선통신은 장애물과 부딪히게 되면 굴절되어 수신측에 전파된다. 굴절 시 손실되는 전파의 세기는 굴절되는 장애물 및 굴절 횟수 등 많은 원인으로 측정이 불가능하다. 그러나 장애물이 없는 경우 전파는 가장 빠른 시간 안에 수신측에 도달하게 되고 이때의 RSSI는 손실되는 전파의 양이 적기 때문에 위치 오차가 작다. 이러한 현상은 그림 3에 도시되었다. 그림 3에서 굵은 점선의 화살표가 미지노드에서 앵커노드로 가기 위한 가장 빠른 전송 경로임을 알 수 있으며 이외의 전파의 굴절로 인한 전송은 전파의 감소가 이루어지게 된다[6]. 그러나 주의해야 할 점은 가장 빠른 전송 경로로부터 수신된 RSSI가 반드시 실제 거리에 준하는 RSSI는 아니다. 이것은 그림 2에서 보는 바와 같이 이상적인 RSSI 전력 손실에 비해 실측된 RSSI의 수신 전력이 더 크게 나타날 수 있기 때문이다.

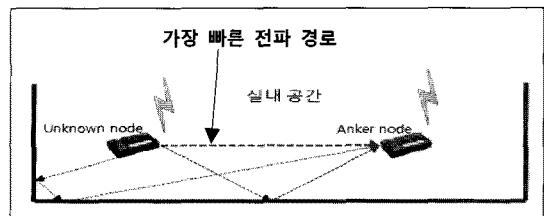


그림 3 전파 경로의 예
Fig. 3 Example of radio wave path

상기 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 1개의 앵커 노드에서 수신된 다수의 RSSI 측정 값을 거리로 환산하여 미지노드와 가장 짧은 거리를 찾고 그 외 거리(짧은 거리를 제외한 나머지 거리 값)와의 오차를 퍼지 모델링하여 오차

를 최소화하는 거리를 구하는 방법을 사용한다[3-6]. 퍼지 이론은 퍼지 집합의 사고방식을 기초로 하고 있다.

퍼지 모델의 구조를 살펴보면 선형추론의 경우 아래와 같은 규칙으로 이루어진다.

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1}, \dots, \text{ and } x_k \text{ is } A_{ik}, \text{ Then } y_i = f_i(x_1, \dots, x_k) \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

여기서, R_i 는 i 번째 규칙, A_{ij} 는 멤버십 함수, $x_j(j=1, \dots, k)$ 는 입력 변수, $f_i(x_1, \dots, x_k) = a_{i0} + a_{i1}x_1 + \dots + a_{ik}x_k$, a_i 는 후반부 파라미터, n 은 퍼지 규칙 총 수를 나타낸다.

각 규칙은 식(4)-(6)와 같이 전반부 적합도를 계산하고 추론 결과를 얻은 뒤 비퍼지화를 거쳐 최종 추론 결과를 얻게 된다.

$$w_i = \mu A_{i1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu A_{ik}(x_k) \quad (4)$$

$$y_i = w_i \times f_i(x_1, \dots, x_k) = w_i \times (a_{i0} + a_{i1}x_1 + \dots + a_{ik}x_k) \quad (5)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i(x_1, \dots, x_k)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

여기서, w_i 는 적합도, y 는 최종 추론 결과이다.

본 논문에서는 입력 변수로 RSSI의 환산된 거리와 환산된 거리 중 가장 짧은 거리와의 오차로 한다. 규칙에 사용된 멤버십 함수는 그림 4와 같이 사다리꼴을 사용하며, 표 1과 같이 9개의 규칙을 사용한다. 각 규칙은 입력된 거리와 거리와의 차를 이용하여 멤버십 함수와의 적합도를 계산하고 추론 결과를 계산한 뒤 비퍼지화를 거쳐 오차를 최소화 하는 거리를 구한다.

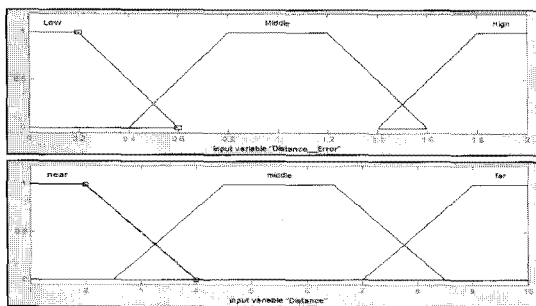


그림 4 멤버십 함수
Fig. 4 Membership function

표 1 거리와 거리 오차에 따른 퍼지규칙
Table 1 Fuzzy rule by distance and distance error

		Distance Error		
		Low	Middle	High
Distance	Near	Very High	Medium High	Medium
	Middle	Medium High	Medium	Medium Low
	Far	Medium	Medium Low	Very Low

3.2 삼각 측량 법

측위 시스템은 대상의 위치를 좌표로 나타낸다. 그러나 RSSI 및 TDOA, TOA, AOA 등과 같은 데이터는 이동 표적(미지노드)과 중계기(AP: Access point, 앵커노드)사이의 거리를 측정하기 때문에 측정된 거리를 좌표로 바꿔주어야 한다. 이러한 거리 측정 데이터는 대부분 삼각 측량법을 이용한다[2, 8].

삼각 측량법은 그림 5와 같이 3개의 앵커노드와 1개의 미지노드가 필요하다. 그림 5에서 N_1, N_2, N_3 는 노드의 위치를 나타내며 D_1, D_2, D_3 는 앵커노드와 미지노드 N_0 간의 측정된 거리를 나타낸다. N_0 의 위치를 (x, y, z) , N_i 의 위치를 (X_i, Y_i, Z_i) 좌표로 나타내면 좌표와 거리와의 관계식은 식 (7)과 같다.

$$(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 = D_i^2 \quad (7)$$

$i=(1,2,3, \dots, m)$

본 논문에서는 2차원 공간에서의 노드 위치를 탐색한다. 따라서, z 축을 제외하면 식 (8)은 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 = D_i^2 \quad (8)$$

식 (8)을 이용하면 2개의 변수를 갖는 선형 방정식을 구할 수 있고 이를 행렬로 표현하면 $\vec{Ax} = \vec{b}$ 가 되며 식 (9)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 2(X_2 - X_1) & 2(Y_2 - Y_1) \\ 2(X_3 - X_1) & 2(Y_3 - Y_1) \\ \dots & \dots \\ 2(X_m - X_1) & 2(Y_m - Y_1) \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} (X_2^2 - X_1^2) + (Y_2^2 - Y_1^2) + D_1^2 - D_2^2 \\ (X_3^2 - X_1^2) + (Y_3^2 - Y_1^2) + D_1^2 - D_3^2 \\ \dots \\ (X_m^2 - X_1^2) + (Y_m^2 - Y_1^2) + D_1^2 - D_m^2 \end{bmatrix}$$

식 (9)에서 $\vec{x} = A^{-1}\vec{b}$ 를 구하여 원하는 \vec{x} 의 좌표를 얻을 수 있다.

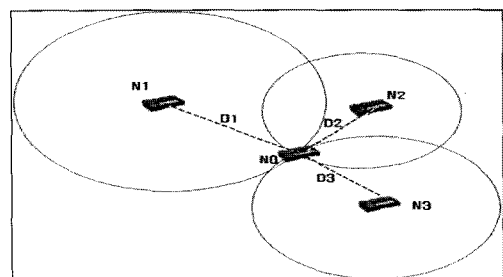


그림 5 삼각 측량법
Fig. 5 Triangulation measurement

3.3 칼만 필터를 이용한 측위 방법

칼만 필터는 잡음이 포함된 데이터에서 갱신되는 측정치와 현재 값으로부터 계산된 칼만 이득을 이용해 데이터의 변화량을 예측하는 방법이다. 칼만 필터는 좌표를 입력받아 위치 변화를 예측하기 때문에 상기에 언급한 삼각 측량법을 이용해 계산한 미지노드의 위치 벡터 \vec{x} 를 칼만 필터의 상태 변수로 선정해야 한다. 칼만 필터의 측위를 위한 상태 모델과 측정 모델을 나타내면 각각 식 (10)과 (11)로 나타낼 수 있다[8, 9-11].

$$x_{k+1} = x_k + w_k \tag{10}$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \tag{11}$$

여기서, w_k 는 상태 모델 잡음, v_k 는 측정 모델 잡음을 나타낸다. 또한, 상태 및 측정 잡음 모델은 식 (12)와 식 (13)과 같이 백색 가우시안 분포라 가정한다.

$$p(w) \sim N(0, Q) \tag{12}$$

$$p(v) \sim N(0, R) \tag{13}$$

또한, y_k 는 물체의 거리를 나타낸 것으로 $h(x)$ 는 x 를 좌표로 변환해주어야 하며 식 (14)와 같다.

$$h_j(x) = \left\| \sum_{i=1}^3 (x_{ij} - x_j) \right\| \tag{14}$$

여기서, i 는 앵커노드 인덱스, j 는 좌표 인덱스이다.

미지노드의 위치 x_k 는 현재 미지노드의 위치, 예측치를 \hat{x}_k , 예측치와 실제 위치와의 오차를 Δx_k 라 하면 이들과의 관계식은 식 (15)와 같다.

$$x_k = \hat{x}_k + \Delta x_k \tag{15}$$

$$h(x_k) \approx h(\hat{x}_k) + H_k \Delta x_k \tag{16}$$

$$H_k = \left[\frac{\partial h}{\partial x} \right] \tag{17}$$

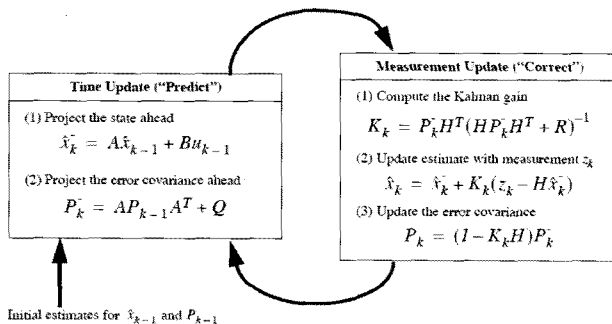


그림 6 칼만 필터 알고리즘
Fig. 6 Algorithm of Kalman filter

예측치와 변화량을 이용해 $h(x_k)$ 를 구하면 식 (16-17)과 같으며 측위에서는 이전 단계의 예측치를 그대로 현재 예측치로 사용한다. 상기의 조건을 이용해 칼만 필터를 수행하고자 하며 알고리즘은 그림 6과 같다[9].

4. 실험 및 결과 고찰

실험에 사용된 한백 전자(주)의 Zigbee 센서 노드 시스템은 2절에서 설명하였다. 이 시스템을 이용해 본 논문에서 제안한 기법의 적용 실험을 위해 이동 중인 미지 노드의 RSSI를 10회 반복 측정하였다. 이때, 비교적 장애물이 없는 실내 공간을 활용하였으며 배터리의 소모 여부(완충 상태에서 실험)는 고려하지 않았다. 위치 측정에 앞서 퍼지 모델링을 이용한 미지 노드와의 거리 측정을 수행 하였고 퍼지 모델링 되지 않은 거리는 COG(Center of gravity)를 이용해 거리를 측정 한 뒤 비교하였다. 이를 그림 7에 나타내었으며 실험 결과는 평균오차 1.3565m 최대오차 3.3101의 오차를 나타내었고 오차를 줄이는데 본 논문에서 제안한 퍼지 모델링이 효과적임을 알 수 있었다.

또한, 제안하는 미지 노드의 측위 최적화를 위해 삼각 측량법을 이용하여 칼만 필터를 적용한 미지노드의 측위 결과와 COG만을 적용한 거리에 칼만 필터를 적용한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 실험 결과에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안한 기법이 평균오차 0.8763m 최대 오차 1.4652m로 오차 최소화에 효과적임을 알 수 있었다.

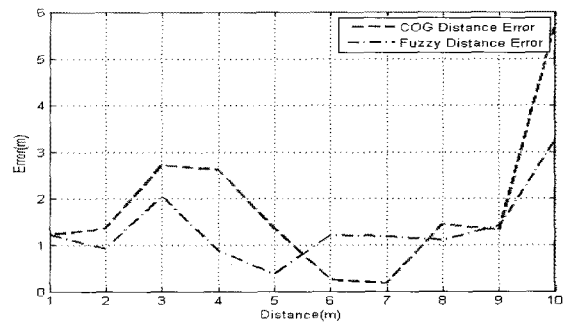


그림 7 거리 측정 실험 결과
Fig. 7 Measurement result of distance

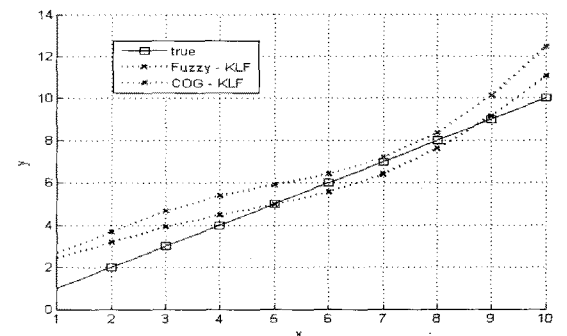


그림 8 측위 실험 결과
Fig. 8 Experiment result of localization

5. 결 론

본 논문에서는 퍼지 모델링과 칼만 필터를 이용한 WSN에서의 위치 측정 방법을 제안했다. 제안한 방법은 다음과 같다: 먼저, RSSI의 오차를 최소화하고자 측정된 RSSI를 거리로 환산하고 이들이 갖는 오차를 퍼지 모델링하여 거리 오차를 최소화 시킨다. 다음, 거리를 위치로 환산하기 위해 삼각 측량법을 이용하고, 마지막으로, 위치 측정에 최적인 칼만 필터를 이용해 측위 오차를 최소화하는 방법을 제안하였다. 실험 결과 본 논문에서 제안하는 퍼지모델과 칼만필터를 이용한 측위 기법이 측위 오차를 감소시키는데 효과적임을 입증하였다

감사의 글

본 연구는 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R01-2008-000-20844-0).

참 고 문 헌

[1] 한국 홈네트워크 산업 협회 "WSN 기술 동향", Vol 11, 2006,11
 [2] 한국전자통신 연구원 "실내외 연속측위 기술 동향" Vol. 22, No. 3, 2007. 6
 [3] A. Awad, T. Frunzke, and F. Dressler, "Adaptive distance estimation and localization in WSN using RSSI measures.", 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools, pp.471-478, 2007.
 [4] X. Feng, Z. Gao, M. Yang, and S. Xiong, "Fuzzy distance measuring based on RSSI in wireless sensor network" ISKE2008. pp. 234-238, 2008.11
 [5] A. G. Dharne, J. Lee and S. Jayasuriya, "Using fuzzy logic for localization in mobile sensor networks: Simulations and Experiments", American Control Conference, pp. 2066-2071, 2006. 6
 [6] 김현중, 강근택, 이원창, "무선 센서 네트워크와 퍼지모델을 이용한 이동로봇의 실내 위치 인식과 주행", 한국지능시스템학회 논문지, Vol. 18, No. 2, pp. 163-168, 2008, 4.
 [7] S. Yun, J. Lee, W. Chung, and E. Kim, "Centroid localization method in wireless sensor networks using TSK fuzzy modeling," 2007 Inter. Symp. on advanced Intelligent Systems, ISIS2007 pp. 971-974, Sep., 2007, 9.

[8] 임재걸, 박찬식, 주재훈, 정승환, "Wi-Fi 기반 옥내 측위를 위한 확장 칼만필터 방법" 한국 데이터 베이스학회 논문지, Vol. 15, No. 2, pp.51-65, 2008. 8
 [9] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter", UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July, 2006.
 [10] A. Kotanen, M. Hannikainen, H. Leppakoski, and T. Hamalainen, "Experiments on local positioning with bluetooth", Proc. of Int. Conference on Information Technology : Coding and Computing, ITCC 2003, pp. 297-303., 2003, 9.
 [11] Y. Takabayashi, T. Matsuzaki, H. Kameda, and M. Ito, "Target tracking using TDOA/FDOA measurements in the distributed sensor network" SICE Annual Conference, pp. 3441-3446, Aug. 2008
 [12] (주)한백전자, <http://www.hanback.co.kr/products/view/21>
 [13] J. Wan, N. Yu, R. Feng, Y. Wu, and C. Su, "Localization refinement for wireless sensor networks", Computer Communication, pp. 10-16, 2009, 6.

저 자 소 개



김 종 선 (金 鍾 善)

2007년 군산대학교 전기전자제어공학과 졸업(공학사). 2009년 동 대학교 대학원 전자정보공학부 졸업(공학석사). 현재 동 대학교 대학원 박사과정 재학 중.



주 영 훈 (周 永 焄)

1958년 6월 25일생. 1982년, 1984년, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사, 공학석사, 공학박사). 1986-1995년 삼성전자(주) 자동화연구소 팀장, 1995년~현재 군산대학교 전자정보공학부 교수. 1998- 1999년 미국 휴스턴대학 박사후박사, 2009년 현재, 대한전기학회 정보제어부문 편집위원장, 한국지능시스템학회 회장, Int. Journal of Control, Automation, and Systems(IJCAS) Editor.
 Tel : 063-469-4706
 E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr