

Wi-Fi 기반 옥내측위를 위한 확장칼만필터 방법

임재걸* · 박찬식** · 주재훈*** · 정승환*

Extended Kalman Filter Method for Wi-Fi Based Indoor Positioning

Jaegool Yim* · Chansik Park** · Jaehun Joo*** · Seunghwan Jeong*

Abstract

The purpose of this paper is introducing WiFi based EKF(Extended Kalman Filter) method for indoor positioning. The advantages of our EKF method include : 1) Any special equipment dedicated for positioning is not required. 2) Implementation of EKF does not require off-line phase of fingerprinting methods. 3) The EKF effectively minimizes squared deviation of the trilateration method.

In order to experimentally prove the advantages of our method, we implemented indoor positioning systems making use of the K-NN(K Nearest Neighbors), Bayesian, decision tree, trilateration, and our EKF methods. Our experimental results show that the average-errors of K-NN, Bayesian and decision tree methods are all close to 2.4 meters whereas the average errors of trilateration and EKF are 4.07 meters and 3.528 meters, respectively. That is, the accuracy of our EKF is a bit inferior to those of fingerprinting methods. Even so, our EKF is accurate enough to be used for practical indoor LBS systems. Moreover, our EKF is easier to implement than fingerprinting methods because it does not require off-line phase.

Keywords : Indoor Positioning, Location-Based Service, WiFi, Ubiquitous Computing, Kalman Filter, Decision Tree, Bayesian Method, Fingerprinting Methods

논문접수일 : 2008년 02월 22일 논문게재확정일 : 2008년 05월 31일

* 동국대학교 컴퓨터멀티미디어학과 교수, 연구원

** 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

*** 교신저자, 동국대학교 경상학부 교수, (780-714) 경북 경주시 석장동 707, Tel : 054-770-2346, e-mail : givej@dongguk.ac.kr

1. 서 론

유비쿼터스 환경에서 응용되는 다양한 위치기반서비스(Location-Based Service : LBS)에서는 점차 고정밀도의 신속한 사용자 위치 측정을 요구하고 있다. 사용자 위치를 판정하는 측위기술은 유비쿼터스 컴퓨팅과 유비쿼터스 네트워크의 환경에서 상황인지형(context-aware) 서비스를 제공하는 핵심요소이다. 이들 옥내외 측위 기술은 위치기반서비스와 상황인지 서비스를 가능하게 하여 기존의 다양한 사업 영역에서 제공되는 서비스를 개선하고, 새로운 혁신적 사업모델을 제공하는 동기가 된다.

실외에서는 GPS(Global Positioning System)가 실용적인 수준의 정확한 사용자의 위치를 제공하는 수단으로 널리 사용되고 있다. 한편 옥내외의 위치기반서비스를 위한 옥내측위방법에 대한 연구도 다양하게 진행되고 있다[Liu et al., 2007]. 그 대표적인 방법에는 적외선 신호를 감지하여 위치를 파악하는 Active Badge[Want et al., 1992], 초음파와 RF(Radio Frequency) 신호의 지연시간을 이용하는 Active Bat[Harter and Hopper, 1997]과 Cricket[Priyanthat et al., 2000], 신호 세기를 이용한 RADAR[Bahl and Padmanabhan, 2000] 등이 있다. 이들 기존의 옥내측위 방법은 측위만을 위한 특수 장비를 설비해야만 측위가 가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 무선 LAN(Wireless Local Area Network) 환경을 이용하는 방법[Lin and Lin, 2005]이 제안되기도 하였다.

무선 LAN 환경의 옥내측위방법에는 지문(fingerprint) 방식[Harter and Hopper, 1997; Xiang et al., 2004]과 거리와 신호세기간의 관계식(propagation model이라 함)을 이용하는 방식[Lassabe et al., 2005]이 있다. 지문방식은 준비 단계(off-line phase)와 실시간 단계(realtime phase)로 구

성된다. 준비단계에서는 측위 소프트웨어가 적용되는 영역을 바둑판 모양으로 나누고, 두 선이 교차하는 지점을 후보지점이라고 한 다음, 각 후보지점에서 AP(access point : 무선 LAN에 설치된 접근장치)들의 신호의 세기(RSSI : Received Signal Strength Indicator)를 측정하여 훈련데이터를 작성한다. 어떤 후보지점에서 잡히는 AP는 일반적으로 여러 개이며, 일 회 측정시 채집되는 일군의 신호 세기들을 지문이라고 한다. 실시간 측정 단계에서는 사용자의 현재 위치에서 측정한 지문과 준비 단계에서 작성한 지문들을 비교하여 지문이 비슷한 후보지점을 사용자의 현재 위치로 판정한다. 한편 거리와 신호세기의 관계식을 이용하는 방법은 AP에서 일정 거리마다 신호의 세기를 측정하여 거리와 신호세기 간의 관계식을 미리 작성하여 둔다. 측위 과정은 우선 실제 사용자의 현재 위치에서 측정한 신호의 세기를 관계식에 대입하여 AP까지의 거리를 계산한 다음, 그들 AP의 위치와 거리를 삼각측량법에 대입하여 사용자의 위치를 판정한다.

지문방식의 실시간 단계의 처리 과정은 준비 단계와는 달리 반드시 속도가 빨라야 한다. 그렇지 않으면 사용자가 계속 움직이고 있기 때문에 측위 결과가 나왔을 시점의 사용자의 위치가 측위 결과와 일치하지 않게 된다. 이러한 실시간 단계의 처리 속도를 개선하는 방법으로 최근의 선행연구[Yim, 2008]에서는 의사결정나무(decision tree) 방법을 제안하였다. 의사결정나무 방법은 준비 단계에서 다른 방법보다 더 많은 시간을 소요하지만, 사용자의 위치를 판정하는 실시간 단계의 처리 시간은 매우 빠르다는 장점이 있다.

지문방식은 정확도가 높다는 장점이 있지만 준비 단계가 너무 긴 시간과 노력을 요구한다는 단점이 있다. 예를 들어, 가로 세로가 각각 40과 100미터인 건물에 지문방식을 적용한다면, 후보

지점 간의 거리를 1미터로 할 때 약 4,000개의 후보 지점이 필요하다. 훈련 데이터를 작성할 때, 각 후보지점에서 최소 100개의 지문은 채취해야 함으로 필요한 지문은 약 400,000개가 된다. 지문 하나 채취하는 데 6초씩 걸린다면 훈련데이터 채취에 걸리는 시간은 약 666시간이 된다. 이에 반하여 거리와 신호 세기의 관계식을 이용하는 삼각측량방법은 준비단계가 필요 없다는 장점이 있는 반면에 신호 세기에 잡음이 크기 때문에 결과의 편차가 매우 크다는 단점이 있다. Kalman Filter는 잡음환경에서 얻어진 측정치의 오류의 자승 평균을 최소화하여 동적 시스템의 상태를 추정하는 필터로, 이미 [Kotanen 2003]과 [Quasem 2007]에 적용된 바 있다. 그러나 Kotanen[2003]의 연구는 블루투스 통신 기반이고 Quasem[2007]의 연구에서는 레이더 송수신기를 사용하였다. 이들 연구를 현실에 적용하기 위해서는 블루투스 환경 구축과 레이더 송수신기의 설치라는 기반 시설에 대한 투자가 요구된다는 한계점이 내재되어 있다.

본 연구에서는 준비 단계를 요구하지 않고, 현실에 적용함에 있어서 새로운 시설투자가 필요하지 않으면서도 측위의 정확도를 높일 수 있는 방안을 제안하고 실험을 통해 이를 검증하고자 한다. Wi-Fi는 무선인터넷의 업계표준으로 대학, 호텔, 전시회장, 아파트 단지 등에 이미 널리 설치되어 있다는 측면에서 새로운 투자를 요구하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 Wi-Fi 기반 옥내 측위를 위한 확장칼만필터 방법을 제안한다. 또한, 기존의 측위방식과 제안하는 방식을 Wi-Fi 환경에서 구현하여 그 성능을 실험적으로 비교분석한다.

서론에 이어 제 2장에서는 기존 연구를 소개하고, 제 3장에서는 Wi-Fi 환경에서 확장칼만필터를 구현하고, 제 4장에서 본 연구에서 제안한 방식과 기존 방식을 Wi-Fi 환경에서 비교실

험하고, 제 5장에서 결론을 제시한다.

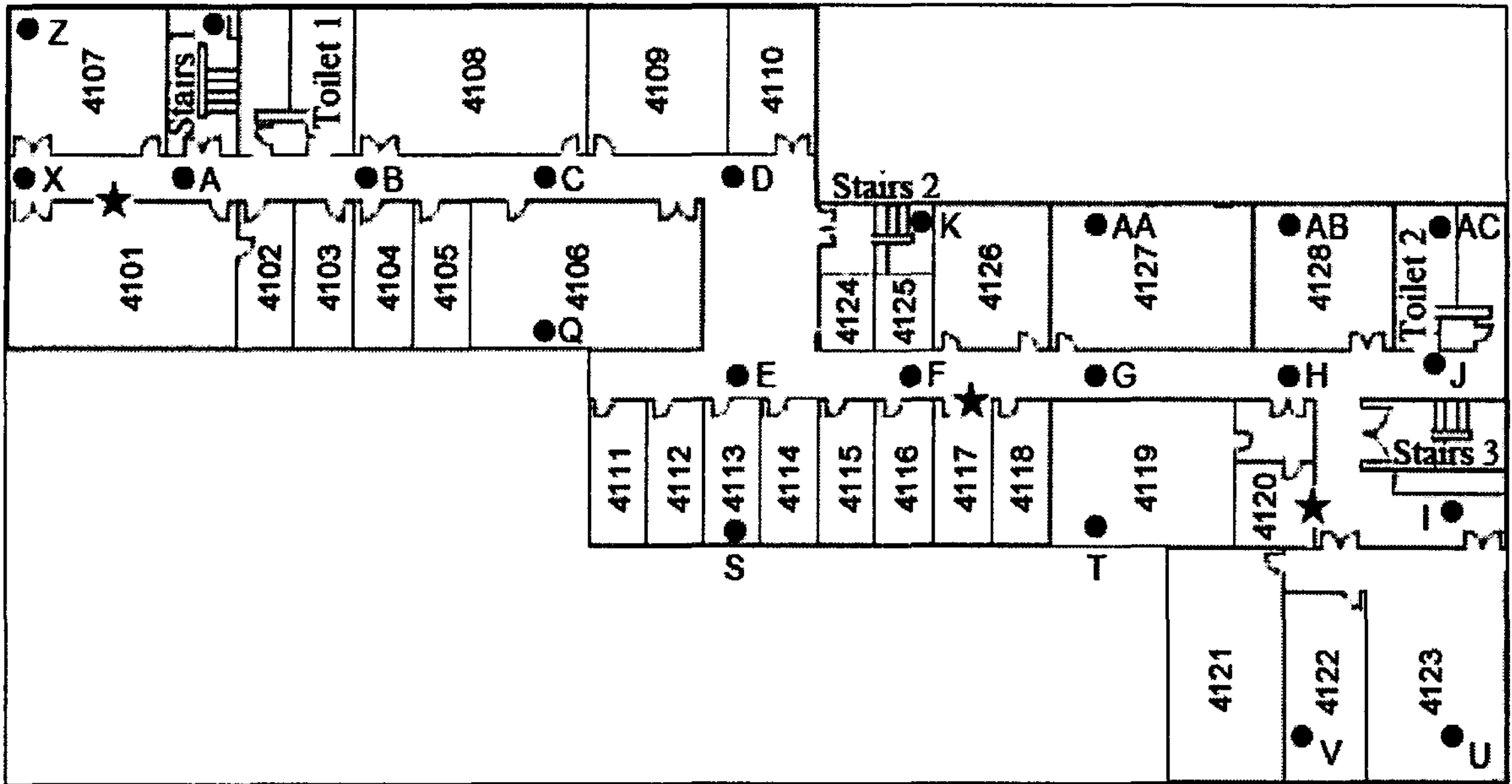
2. 기존의 연구

여기서는 기존의 연구로 지문방식에 속하는 K-NN 방법, 베이시안(Bayesian) 방법, 의사결정나무 방법과 거리와 신호세기의 관계식을 이용하는 방식에 속하는 삼각측량방법과 확장칼만필터를 소개한다.

2.1 K-NN 방법

K-NN 방법은 준비단계(off-line phase)와 실시간 측정단계(realtime phase)로 구성된다. 준비단계에서는 측위 소프트웨어가 적용되는 범위 내의 각 후보지점에서 RSSI를 측정하여 훈련데이터(training data)라 한다. 각 후보지점에서 일반적으로 3개 이상의 AP들의 RSSI가 읽힘으로 한 훈련데이터는 3개 이상의 RSSI로 구성된다. 각 후보지점에서 100개 이상의 훈련데이터를 수집하여, 각 AP마다 훈련데이터의 RSSI들의 평균을 구한다. K-NN 방법에서는 이와 같이 구한 훈련데이터의 평균을 지문이라 한다. K-NN 방법은 준비단계에서 후보지점 이름과 지문으로 구성된 찾아보기 표를 작성한다. 실시간 측정단계에서는 사용자의 현재 위치에서 측정한 RSSI 값과 찾아보기 표의 내용을 비교하여 사용자의 위치를 판정한다. 이때 K개의 가장 비슷한 항목을 찾아, 이 후보지점들의 좌표의 평균을 사용자의 현재 위치로 판정하는 방법을 K-NN이라 한다 [임재걸 외, 2006].

예를 들어 옥내측위 대상 지역의 건물 배치도가 <그림 1>과 같다고 하자. 세 개의 AP가 <그림 1>의 별표 자리에 위치한다고 하자. <그림 1>의 까만 점(Z, X, A, ... 등의 label이 붙어 있음)은 후보지점이라 하자. K-NN 방법은 준



<그림 1> 옥내측위 대상 지역인 건물 4층의 배치도

비단계에서 <표 1>과 같이 각 후보지점에서 측정한 RSSI 값으로 구성된 찾아보기 표를 작성한다. 표에서 $RSSI_i$ 는 AP_i 가 발신한 신호의 세기이다.

<표 1> 찾아보기 표의 예

후보지점	$RSSI_1$	$RSSI_2$	$RSSI_3$
A	31	48	55
B	37	47	54
C	40	45	52
D	45	45	50
...

실시간 단계에서 사용자의 현재 위치에서 RSSI 값을 실측하고, 실측한 값과 가장 가까운 항목을 찾아보기 표에서 K개 찾는다. 예를 들어 실시간 측위 단계에서 실측한 값이 $X = (38, 46, 53)$ 이라 하면, X와 A의 거리는 $\sqrt{(38-31)^2 + (46-48)^2 + (53-55)^2}$ 이 된다. 비슷한 방법으로 다른 후보지점들에 대

한 거리도 구한다. K가 1이라면 X와 가장 가까운 후보지점 하나를 찾아 현재 위치가 그곳이라고 판정한다. K=2라면 가장 가까운 두 후보지점을 찾아 이들의 평균(지점이 좌표임으로 좌표의 평균)을 현재 지점으로 판정한다.

2.2 베이시안 방법

베이시안 방법도 지문방식임으로 준비단계에서 훈련데이터를 수집한다. 단, K-NN 방법이 RSSI들의 평균인 지문으로 찾아보기 표를 작성하는데 반하여 베이시안 방법은 평균을 구하지 않는 대신 RSSI 값들을 급간으로 나타낸다. 베이시안 방법의 준비단계가 작성한 훈련데이터의 예가 <표 2>에 보인다.

<표 2>는 <표 1>과 대동소이하다. <표 1>에서는 신호세기의 평균값을 사용하여 각 후보지점당 하나의 배열이 연립되어 있는데 반하여 <표 2>에서는 평균값을 쓰지 않고 측정치를 그대로 사용함으로 하나의 후보지점 당 여러 개

(예를 들어 100개)의 배열(이하 터플이라고 함)이 연합된다. <표 1>에서는 측정치의 단위를 그대로 사용하는데 반하여 <표 2>에서는 급간격으로 표현한다. 급간격을 결정하는 예로 다음을 들 수 있다.

<표 2> 훈련데이터의 예(C.P는 후보지점, CP_i 는 i 번 후보지점의 좌표, AP는 i 번 AP의 MAC 주소 i 는 급간격임)

C.P \ AP	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5
CP_1	I2	I1	I2	I5	I5
	I1	I1	I2	I1	I1
	...				
CP_2	I3	I2	I3	I1	I2
	...				
...	...				

$$I1 = \{x|x > -30\}, I2 = \{x|-40 < x \leq -30\},$$

$$I3 = \{x|-50 < x \leq -40\}, \dots$$

또한 <표 2>에서는 수신하는 AP의 수가 다섯 개이다.

베이시안 방법은 실시간 측정 단계에서 채취한 터플이 주어진 조건에서 각 후보지점이 발생할 조건부 확률이 가장 큰 후보지점을 현재 사용자의 위치로 판단하는 측위 방법이다. 예를 들어, 실시간 측정 단계에서 실측하여 얻은 AP들의 신호세기들로 구성된 배열이 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 라 하고, 후보지점의 수를 m 이라 하면, 다음 식을 만족하는 후보지점 CP_i 를 사용자의 현재지점이라고 베이시안 알고리즘은 결정한다.

$$P(CP_i|X) > P(CP_j|X) \text{ for } 1 \leq j \leq m, j \neq i \quad (1)$$

베이의 정리에 의하여 다음이 참이다.

$$P(CP_i|X) = \frac{P(X|CP_i)P(CP_i)}{P(X)} \quad (2)$$

모든 후보지점에 대하여 $P(X)$ 는 상수임으로 $P(X|CP_i)P(CP_i)$ 를 최대로 하여주는 CP_i 가 공식 (1)을 만족하는 후보지점이 된다. 따라서 베이시안 알고리즘은 $P(X|CP_i)P(CP_i)$ 를 극대화하는 CP_i 를 찾아 준다[Ito and Kawaguchi, 2005].

2.3 의사결정나무 방법

의사결정나무 알고리즘은 준비 단계에서 훈련데이터로 의사결정나무를 구축한다. 훈련데이터는 준비단계 동안 각 후보지점에서 실측한 신호세기들로 구성된 터플이며, 각 후보지점에서 실측하는 회수가 크면 측위가 더욱 정확해지는 경향이 있다.

주어진 훈련데이터로 의사결정나무를 구축하는 알고리즘, Construct_DT는 <그림 2>와 같다[Yim 2008]. 알고리즘의 단계 D의 i 는 다음과 같은 식으로 <표 2>와 같은 훈련데이터를 후보지점별로 나누는데 필요한 예상정보량인 I 를 구한다.

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i) \quad (3)$$

단, m 은 후보지점의 수, S 는 훈련데이터의 수 (<표 2>의 행 수), s_i 는 후보지점 CP_i 의 훈련데이터의 수, $p_i = \frac{s_i}{S}$ 이다.

알고리즘의 단계 D의 ii 는 엔트로피, 즉 훈련데이터를 k 번째 AP의 신호세기를 기준으로 구분한 결과를 분류하는데 필요한 예상 정보량을 계산한다. AP_k 가 다음과 같이 v (급간격의 수)

가지의 값을 갖는다고 하자.

$$\{a_1, a_2, \dots, a_v\}$$

S_j 는 S 를 구성하는 행 중, AP_k 의 값이 a_j 인 행의 집합이다. 부분집합 S_j 에서 후보지점 CP_i 의 행의 수를 s_{ij} 라 하자. 그러면 엔트로피 $E(AP_k)$ 는 다음 식으로 구한다.

$$E(AP_k) = \sum_{j=1}^v \frac{s_{ij} + \dots + s_{mj}}{s} I(s_{ij}, \dots, s_{mj}) \quad (4)$$

알고리즘의 단계 D의 iii은 다음 식으로 정보이득 $G(AP_k)$ 를 구한다.

$$Gain(AP_k) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(AP_k) \quad (5)$$

알고리즘 Construct_DT는 정보이득이 가장

큰 AP_k 를 선택하여 훈련데이터를 분류하는 작업을 더 이상 분류가 되지 않을 때까지 반복한다.

의사결정나무를 구축하는 과정의 처리시간은 찾아보기 표를 구축하는 시간보다 더 걸린다. 그러나 주어진 의사결정나무를 이용하여 사용자의 위치를 판정하는 실시간 단계의 처리 시간은 기존의 방법들보다 빠르다. 의사결정나무의 깊이가 훈련데이터를 구성하는 AP들의 수보다 크지 않고, 각 노드의 가지의 수가 급간격의 수보다 크지 않으므로, AP들의 수를 M 이라 하고 급간격의 수를 V 라 한다면, 실시간 단계의 처리 시간은 $O(M*V)$ 이다. 후보지점의 수를 C 로 표기하면, K-NN 방법의 실시간 단계의 처리 시간은 $O(C*M)$ 이고 베이시안 방법은 $O(M*V*C)$ 이다. 일반적으로 측위에 사용되는 AP의 수는 $M=5$ 개 이하이고 급간격의 수는 $V=7$ 개 이하인데 반하여 후보지점의 수 C 는 백여 개 이상으로 훨씬 더 큰 수임으로 의사결정나무 방법의 실시간 단계 처리 시간

```

algorithm Construct_DT(int[ ][ ] Table, ListType MacList, int Index)
{
    // Table with only one row satisfies this condition
    A. if (all the CPs of Table are the same, CPi)
        i. Tree[Index] = CPi
    B. else if (number of rows in Table == 0)
        i. Tree[Index] = NULL;
    C. else if (number of columns in Table == 1)
        i. Tree[Index] = for each CPi in Table, probability of CPi
    D. else { // Number of rows !=1 and !A and !B and !C
        i. Compute I;
        ii. Compute Entropies for each AP;
        iii. Tree[Index] = MacAddress of the AP with maximum Gain and array P, where P[i] is the probability of CPi in Table;
        iv. Construct subMacList;
        v. loop (i = 1; i <= number of Intervals; i++) {
            1. generate subTable;
            2. subIndex = Index * number of Interval + i;
            3. Construct_DT (subTable, subMacList, subIndex);
        }
        vi. end loop }
    E. end if }
}
End Construct_DT

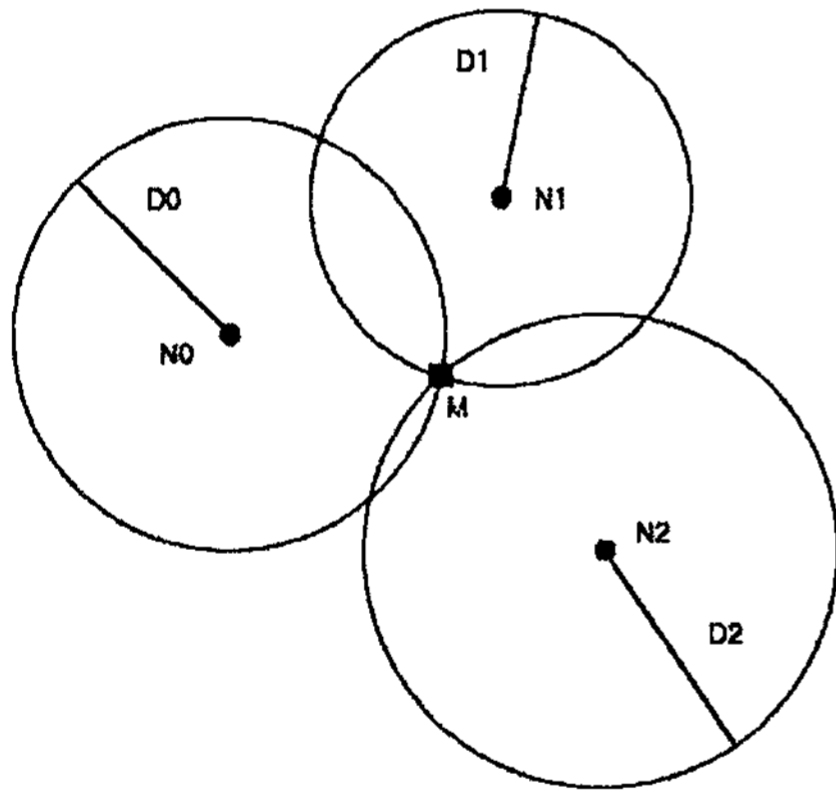
```

〈그림 2〉 의사결정나무를 구축하는 알고리즘

이 훨씬 빠른 것을 알 수 있다.

2.4 삼각측량기법

삼각측량기법이 적용되려면 <그림 3>에 보이는 바와 같이 이동노드에서 최소 3개의 위치를 알고 있는 고정노드까지의 거리를 알아야 한다. <그림 3>에서 N_0, N_1, N_2 는 알려진 고정노드 AP의 위치이며 D_0, D_1, D_2 는 이동노드인 사용자(M)의 위치에서 AP까지의 거리이다. AP를 중심으로 이들 AP와 사용자 간의 거리를 반지름으로 하는 원 또는 구를 형성할 때 생성되는 교차점이 바로 사용자의 위치가 된다.



<그림 3> 삼각측량 기법을 나타내는 도형

일반적으로 M 과 N_i 의 위치를 각각 (x, y, z) , (X_i, Y_i, Z_i) 좌표로, 그리고 M 과 N_i 간의 거리를 D_i 로 나타내면 좌표와 거리와의 관계식은 아래와 같다.

$$(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 = D_i^2 \quad (6)$$

$(i = 0, 1, 2, \dots, m-1)$

3차원의 경우 최소한 4개의 고정 노드가 필요하며, 위의 식에서 제곱 항을 소거하면, 3개의 변

수를 갖는 선형방정식을 구할 수 있고 이를 Matrix 형태로 표현하면 $A\vec{x} = \vec{b}$ 가 된다. 여기에서

$$A = \begin{bmatrix} 2(X_1 - X_0) & 2(Y_1 - Y_0) & 2(Z_1 - Z_0) \\ 2(X_2 - X_0) & 2(Y_2 - Y_0) & 2(Z_2 - Z_0) \\ 2(X_3 - X_0) & 2(Y_3 - Y_0) & 2(Z_3 - Z_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ 2(X_{m-1} - X_0) & 2(Y_{m-1} - Y_0) & 2(Z_{m-1} - Z_0) \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} (X_1^2 - X_0^2) + (Y_1^2 - Y_0^2) + (Z_1^2 - Z_0^2) - (D_1^2 - D_0^2) \\ (X_2^2 - X_0^2) + (Y_2^2 - Y_0^2) + (Z_2^2 - Z_0^2) - (D_2^2 - D_0^2) \\ (X_3^2 - X_0^2) + (Y_3^2 - Y_0^2) + (Z_3^2 - Z_0^2) - (D_3^2 - D_0^2) \\ \dots \\ (X_{m-1}^2 - X_0^2) + (Y_{m-1}^2 - Y_0^2) + (Z_{m-1}^2 - Z_0^2) - (D_{m-1}^2 - D_0^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

이다. 위의 식을 풀기 위해서는 다음 식에서 δ 를 최소로 하는 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 를 구하는 것이다.

$$\delta = (A\vec{x} - \vec{b})^T (A\vec{x} - \vec{b}), \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

\vec{x} 는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방식에 의한 Matrix 해답으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{b} \quad (9)$$

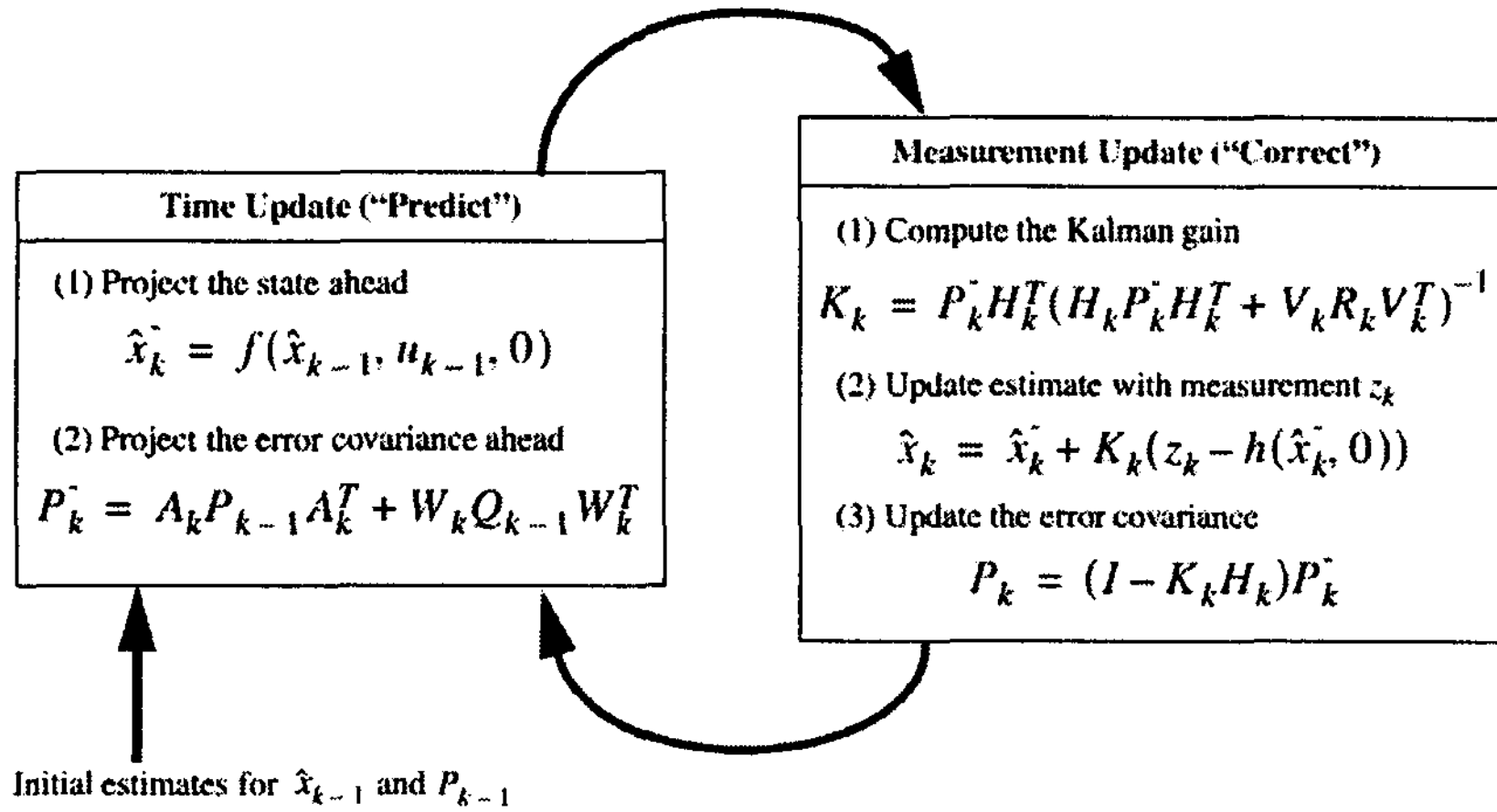
2.5 확장칼만필터

측정하고자 하는 시스템이 식 (10)과 식 (11)과 같은 동역학 식과 조건으로 표현되면, <그림 4>와 같은 과정으로 측정치를 구할 수 있다는 것이 확장칼만필터이다.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (10)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (11)$$

단, w_k 와 v_k 는 각각 시스템 모델의 잡음과 측정



〈그림 4〉 확장칼만필터 과정

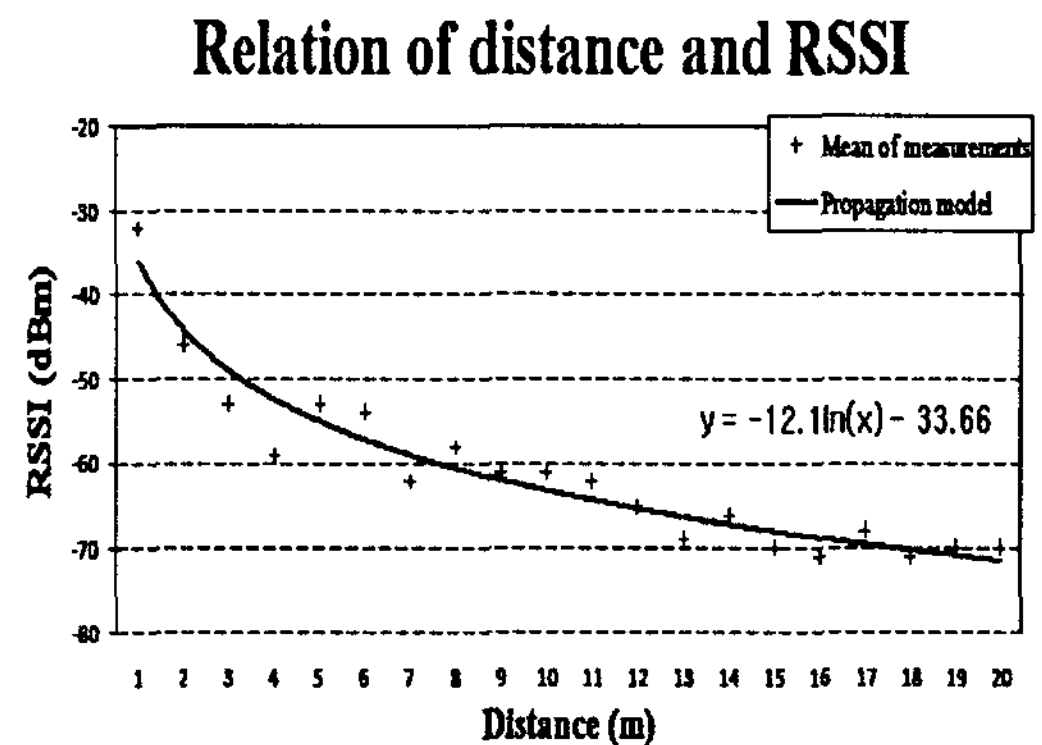
잡음을 나타내는 무작위 변수이도 이고, 평균 0, 분산 σ_v^2 인 백색 Gaussian 잡음으로 가정한다.

식 (10)의 비선형함수 f 는 이전 상태로부터 다음 상태를 구하는 함수이며, 식 (11)의 함수 h 는 상태와 측정치를 연관 짓는 함수이다. 〈그림 4〉에서 A 는 f 를 x 에 관하여 편미분한 것이고, W 는 f 를 w 에 관하여 편미분한 것이며, H 는 h 를 x 에 관하여 편미분한 것이고, V 는 h 를 v 에 관하여 편미분한 것이다[Welch and Bishop 2006].

3. 제안방법-Wi-Fi 환경에서 확장칼만 필터 알고리즘

본 절에서는 Wi-Fi 환경에서 옥내측위를 위한 확장칼만필터 방법을 구현하는 방법을 소개한다. 칼만필터 방법은 제 2장에서 소개한 바와 같이, 상태 모델을 적용하여 현재 상태를 예상하고 측정치로 예상치를 교정하는 과정을 반복한다. 옥내측위의 상태 모델은 고정 상태를 나타내며, 측정치는 신호세기를 측정하여 거리와 신호세기 간의 관계식으로 계산한 거리이다. 따라서 거리와 신호세기 간의 관계식을 먼저 구해야 한다. 이를 위하여 AP로부터 매 1미터 간격으로, 매

지점마다 AP의 신호세기를 300회 판독하여 평균을 구한다. 신호세기의 평균치를 y-축으로 하고 거리를 x-축으로 나타낸 그래프가 〈그림 5〉에 보인다. 그래프의 실선은 회귀곡선이고, 수식은 신호세기와 거리 간의 관계식이다.



〈그림 5〉 거리와 신호세기의 관계

모르는 위치의 $[x \ y \ z]^T$ 에서 알고 있는 위치의 $AP_i = (X^i, Y^i, Z^i), i=1, \dots, m$ 에 대하여 측정된 거리는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$r^i = \sqrt{(X^i - x)^2 + (Y^i - y)^2 + (Z^i - z)^2} + v^i \quad (12)$$

여기서 v^i 는 측정오차를 나타내며 평균 0, 분산 σ_v^2 인 백색 Gaussian 잡음(AWGN)으로 가정한다. $m(\geq 3)$ 개 Neighbor device에서 거리측정치를 구했다면 WLSQ(Weighted Least Square)기법으로 Node의 위치를 구할 수 있으며, $r^0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ 을 기준으로 선형화 하면 다음과 같고

$$\begin{bmatrix} r^1 - r_0^1 \\ \dots \\ r^m - r_0^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_x^1 & h_y^1 & h_z^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ h_x^m & h_y^m & h_z^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v^1 \\ \dots \\ v^m \end{bmatrix} \quad (13)$$

이를 다시 다음과 같은 간략한 식으로 표현할 수 있다.

$$\delta r = H \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + v \quad (14)$$

여기서 $r_0^i = \sqrt{(X^i - x_0)^2 + (Y^i - y_0)^2 + (Z^i - z_0)^2}$ 는 알고 있는 Neighbor device의 위치와 기준점으로 계산한 거리이며, $(h_x^i = \frac{X^i - x_0}{r_0^i}, h_y^i = \frac{Y^i - y_0}{r_0^i},$

$h_z^i = \frac{Z^i - z_0}{r_0^i})$ 는 기준점에서 Neighbor device로

의 시선(LOS : Line Of Sight) 벡터를 나타낸다. 시스템 모델에는 여러 가지가 있을 수 있는데 항법에서는 P(Position : 정지), V(Velocity : 등속), A(Acceleration : 등가속) Model을 사용하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 움직이는 경우가 아닌 모두 멈춘 상태에서 실험을 하므로 정지 모델을 이용하여 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{xk} \\ w_{yk} \\ w_{zk} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 시스템 오차 $W_k \sim N(0, Q_k)$ 는 모델링

오차를 나타낸 것으로, $Q_k = 0$ 으로 멈추어 있음이 틀림없다고 모델링 한다. 시스템 모델과 측정 모델을 일반화 하면 $X_{k+1} = X_k + W_k$, $Z_k = h(X_k) + V_k$ 이고, Kalman Filter를 적용하기 위하여 비선형 측정식을 선형화하면 $\delta X_{k+1} = \phi_k \delta X_k + W_k$, $\delta Z_k = H_k \delta X_k + V_k$ 이다. 이때 구해진 값은 $\delta \hat{X}_k$ 이며 최종 위치는 $\hat{X}_{k+1} = X_0 + \delta \hat{X}_k$ 로 구하면 된다.

오차 $\delta \hat{X}_k$ 가 아닌 전체 \hat{X}_k 를 state로 두고 EKF를 구성하면 최종 위치는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= \hat{X}_k + K_{k+1}(Z_{k+1} - \hat{Z}_{k+1}), \\ (\hat{Z}_{k+1} &= h(\hat{X}_k)) \end{aligned} \quad (16)$$

- 1) Initial guess : \hat{X}_0 and P_0
- 2) Linearizing : $h(X_k) = h(\hat{X}_k) + H_k \delta X_k$, $\hat{Z}_k = h(\hat{X}_k)$
- 3) Kalman Gain : $K_{k+1} = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_{k+1})^{-1}$
- 4) Measurement update : $\hat{X}_k = \hat{X}_k + K_{k+1}(Z_{k+1} - \hat{Z}_{k+1})$
- 5) Update error covariance : $P_k = (I - K_k H_k) P_k$
- 6) State propagation : $\hat{X}_{k+1} = \phi \hat{X}_k$, $P_{k+1} = \phi P_k \phi^T + Q_k$
- 7) Goto step2

<그림 6> Wi-Fi 환경의 옥내측위를 위한 EKF 처리 과정

<그림 6>은 EKF의 시스템 모델과 측정 모델을 정리하여 최종 위치를 구하는 과정이며, 정지 모델을 이용하므로 $\phi_k = I$, $Q_k = 0$ 으로 적용하면 4), 5), 6)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= \hat{X}_k + K_{k+1}(Z_{k+1} - \hat{Z}_{k+1}) \\ P_{k+1} &= (I - K_{k+1} H_k) P_k (I - K_{k+1} H_k)^T \\ &\quad + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \end{aligned}$$

<그림 6>의 확장칼만필터 방법을 Wi-Fi 환경에의 옥내측위에 적용한 알고리즘은 <그림 7>과 같다. 이 알고리즘의 인수 AP_Positions는 각 AP

들의 좌표가 기록된 배열이고, Distances는 <그림 5>에 보이는 거리와 신호세기 간의 관계식을 이용하여 얻은 각 AP까지의 거리가 기록된 배열이다. 알고리즘의 첫 번째 단계는 \vec{x}_0 과 p_0 의 초기 값을 결정하고, 또한 <그림 6>에서 사용되는 I, R, Q, Φ 행렬들에 해당하는 배열들에 초기 값을 배정한다. 본 연구에서 사용한 초기 값은 <표 3>과 같고, 옥내 측위는 정지 모델을 이용하므로 $\Phi_k = I$, $Q_k = 0$ 으로 초기화한다.

단계 2에서는 배열 r_0 [number of APs]에 예상 지점인 \vec{x}_0 과 각 AP간의 거리를 구하여 배정한다. 단계 3에서는 예상지점의 좌표와 AP 좌표의 차이를 단계 2에서 구한 r_0 값으로 H_matrix 즉 <그림 6>의 H를 구한다. 단계 4-7에서 칼만 계인을 구한다(<그림 6>의 3에 해당함). 본 알고리즘의 배열들은 클래스 Matrix의 객체들이고, Matrix 클래스에는 역행렬, 전치행렬 등을 구하는 메소드가 정의되어 있다. 단계 8과 9는 측정치

Algorithm PositioningEKF(AP_Positions, Distances)

```
// AP_Positions : Array of APs' positions.
// Distances : Array of estimated distances from the mobile terminal to the APs.

// Step 1) Initialize I_matrix, Pie_matrix, ..., and guess X_matrix and P_matrix
1 initialization X_matrix, P_matrix
// Step 2-3) Linearizing.
2 for (i = 0; i < number of APs; i++)
  2-1 Temp = square_of (AP_Positions[i][0] - X_matrix[0])
            + square_of (AP_Positions[i][1] - X_matrix[1])
            + square_of (AP_Positions[i][2] - X_matrix[2]);
  2-2 r_0[i] = square root of Temp; // computed distance between nominal point and the i-th base station
3 for (i = 0; i < number of APs; i++)
  3-1 for (j = 0; j < number of axes; j++)
    3-1-1 if (((X_matrix[j] - AP_Positions[i][j]) is 0) or (r_0[i] is 0))
      then H_matrix[i, j] = 0
    3-1-2 else H_matrix[i, j] = (X_matrix[j] - AP_Positions[i][j]) / r_0[i];
// Step 4-7) Kalman Gain
4 Temporary_K = H_matrix * P_matrix * H_matrix.Transpose() + R_matrix;
5 Inverse_K = Temporary_K.Inverse();
  // If K is not invertable then terminate
6 If(Inverse_K is not the inverse of K) then return false;
7 K_matrix = P_matrix * H_matrix.Transpose() * Inverse_K;
// Step 8-9) Measurement update
8 for (i = 0; i < number of APs; i++)
  8-1 Z_matrix[i] = Distances[i] - r_0[i];
9 X_matrix = Pie_matrix * (X_matrix + K_matrix * Z_matrix)
// Step 10) Update error covariance
10 P_matrix = (I_matrix - K_matrix * H_matrix) * P_matrix;
// Step 11) State propagation
11 P_matrix = Pie_matrix * P_matrix * Pie_matrix.Transpose() + Q_matrix;
// Step 12) Goto step2
12 if(continue) then Update Distances and Goto Line 2
   else return true;
end PositioningEKF
```

를 이용하여 예상치를 교정하고(<그림 6>의 4에 해당함), 단계 10과 단계 11은 오차공분산 배열을 계산한다(<그림 6>의 5에 해당함). 본 옥내측위에서는 $\Phi_k = I$, $Q_k = 0$ 으로 하였으므로 <그림 6>의 6은 결과치에 아무런 영향을 미치지 않기 때문에 알고리즘에서는 이 단계를 생략한다. 알고리즘의 단계 12에서는 알고리즘을 종료하든지 아니면 새로운 거리 측정치를 구하고 단계 2부터 반복한다.

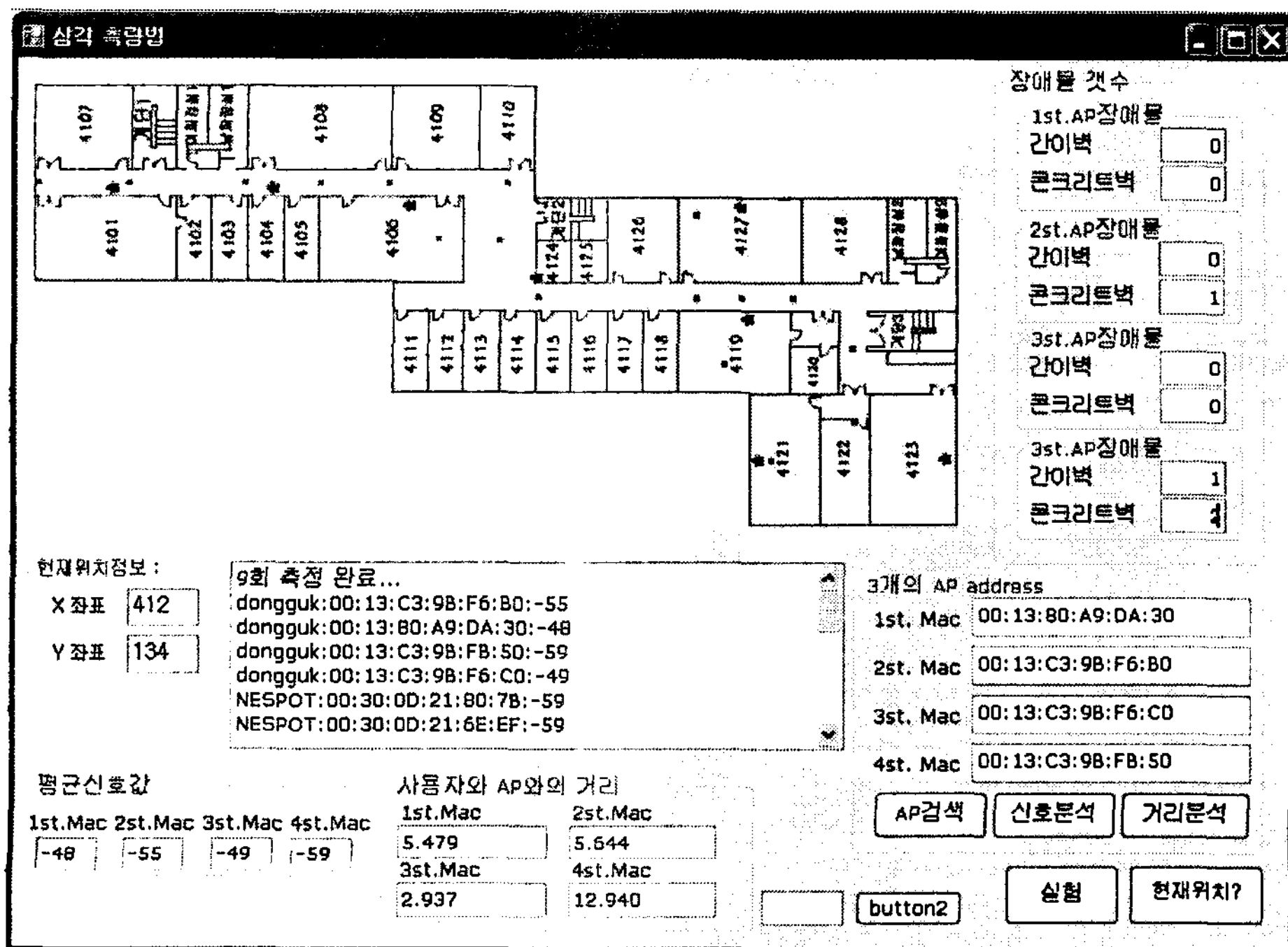
<표 3> 확장칼만필터에 사용된 인수 값

Description	Value	Unit
\vec{X}_0	[40.0 40.0 2.0] ^T	m
P_0	$\begin{bmatrix} 100.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 100.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 100.0 \end{bmatrix}$	m
R_0	0.01	

4. 실험

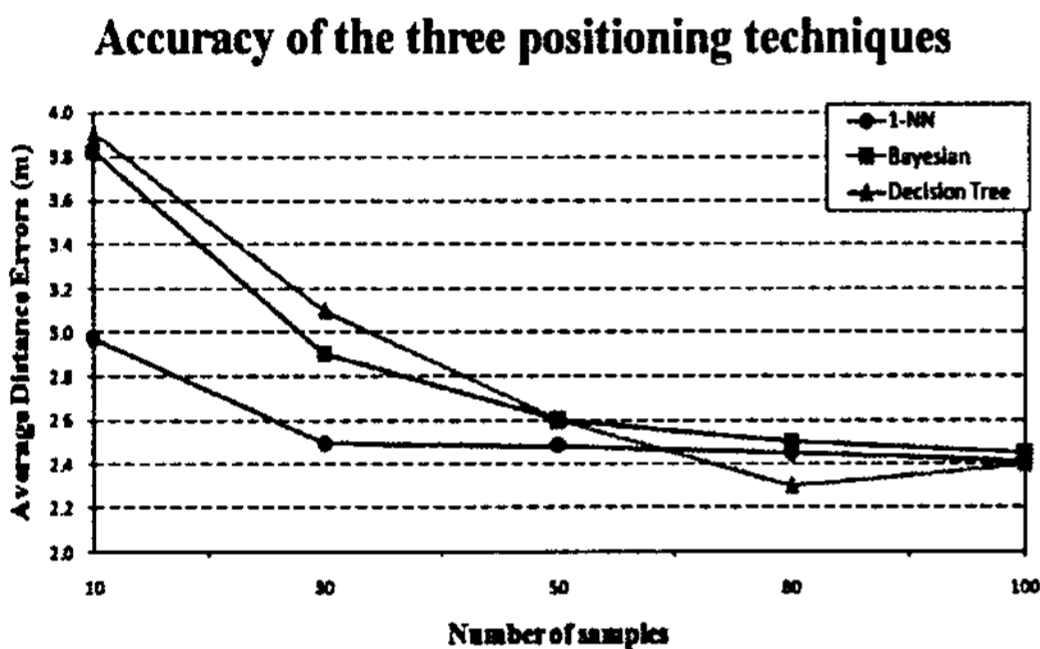
제 2장과 제 3장에서 소개한 알고리즘을 노트북 컴퓨터에 구현하여 성능 평가 실험을 수행하였다. 사용하는 랜 카드는 Intel(R) PRO/Wireless 2200BG Network Connection이며, 프로그램 개발 도구로는 Microsoft Visual C# 2005를, AP 신호세기 판독 함수로는(임재걸 외, 2007)에 소개된 라이브러리 함수를 사용하였다. <그림 8>은 구현한 측위 모듈의 사용자 인터페이스를 나타내 보이며, 사용자가 “현재위치?”를 클릭하면 측위 결과가 현재위치정보에 출력되고 도면에도 표시된다.

각 후보지점에서 준비단계에 채취한 훈련데이터의 수를 변화하면서 1-NN, 베이시안, 의사결정나무 방법을 실행하여 정확성을 비교한 결과가 <그림 9>에 보인다. 훈련데이터의 수가 10개일 때, 1-NN 방법이 다른 방법들보다 훨씬 더 정확하였다. 그러나 그 차이는 지문의 수가



<그림 8> 구현한 측위 모듈들의 전형적인 사용자 인터페이스

증가할수록 감소하여 그 수가 50일 때 정확도 면에서 세 가지 방법이 거의 모두 비슷하였다. 준비 단계에서 채취하는 훈련 데이터의 수는 일반적으로 100개 이상 여러 개임으로 세 가지 방법의 정확도에 차이가 없다고 볼 수 있다. 실시간 단계에서 사용하는 실측치 배열 X도 여러 측정치의 평균을 사용할 수 있으며 평균을 구하기 위한 측정회수가 정확도에 영향을 준다. 본 실험에서는 10회 평균을 사용하였다.

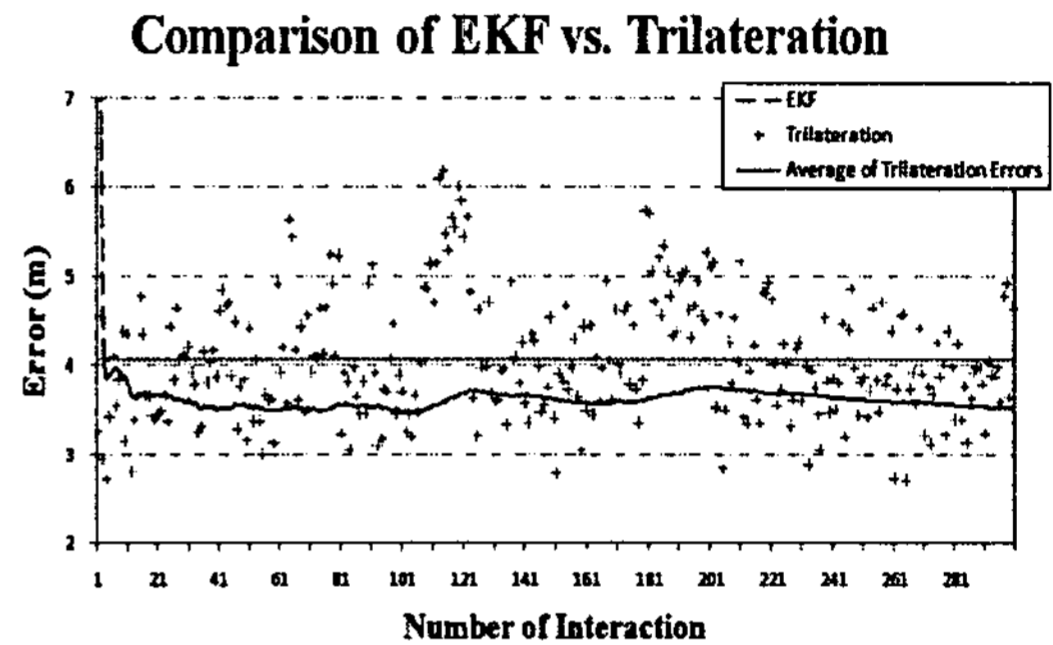


<그림 9> 샘플의 수와 세 가지 방법의 정확도의 관계

윈도우즈 XP 플랫폼에서 응용소프트웨어가 Wi-Fi 통신 카드의 통신 내용을 읽어오려면 DeviceIoControl() 함수를 비롯한 NDISUIO가 제공하는 다양한 API를 사용한다. NDISUIO에 대한 접근은 Wireless Zero Config 서비스(WZCSVC)를 경유해야 함으로 RSSI 판독 과정의 초기 작업은 윈도우즈 XP가 사용하고 있는 WZCSVC의 비활성화를 포함한다.

<그림 10>은 Trilateration 기법과 EKF를 이용한 각각의 측위 시스템에 대하여 반복 횟수에 따른 측정 오차를 보이고 있다. 본 실험을 위하여 복도 상의 30지점 각각에서 RSSI를 측정하여 Trilateration과 EKF를 각각 실행하는 작업을 300번 반복하였다. 각 반복마다 30지점에서 얻은 값의 평균과 실제 위치 사이의 거리를 나타낸 그래프가 <그림 10>이다. EKF가 찾아주는 위치의 오

류는 3.528m로 수렴하였고, Trilateration 방법으로 얻은 위치의 오차들의 평균은 4.07m이었다. 본 실험에서는 EKF의 행렬 P_0 의 대각원소들을 25.0으로 초기화하였는데, P_1 의 대각원소는 0.0021, P_2 는 0.0003, P_3 은 0.0002이었으며, 그 이후로는 0.0001로 동일한 값을 가졌다.



<그림 10> 반복 횟수에 따른 측위 시스템의 실측 오차

5. 결 론

기존의 옥내측위 방법으로 지문방식이 널리 알려져 있다. 지문방식은 정확도가 비교적 높지만 준비단계에서 많은 시간과 노력을 투자해야 하는 치명적인 단점이 있다. 예를 들어, 가로 세로가 각각 40과 100미터인 건물의 한 층에 지문방식을 적용한다면, 훈련 데이터 채취에 걸리는 시간만 약 666시간이 된다. 이에 반하여 확장칼만필터 방법은 준비단계가 필요 없다는 장점이 있으므로, 블루투스 기반의 칼만필터 방법과 레이저를 이용한 칼만필터 방법이 이미 소개된 바 있다. 그러나 이 경우에는 현실적 적용에 있어서 블루투스 통신 시설이나 레이저 시설의 설비 투자가 필요하다는 단점이 있다. 이에 반하여, Wi-Fi는 업계표준 무선인터넷으로 이미 널리 설치되어 있으므로 실생활에 적용하기에 경제적이란 장점이 있으므로, 본 논문은 옥내 측위 방법으로 준비 단계도 필요 없고 추가 시설

도 필요 없는, Wi-Fi기반 확장칼만필터를 제안하고 기존의 연구와 비교실험을 하였다.

제안하는 방법의 성능을 실험적으로 비교 평가하기 위하여 대표적인 지문방식인 K-NN, 베이시안, 의사결정나무 방식들을 구현하고, 지문방식이 아닌 신호세기와 거리간의 관계식을 이용하는 삼각측량법과 확장칼만필터를 Wi-Fi 환경에서 구현하여 측위 결과를 비교하는 실험을 수행하였다.

실험 결과에 의하면, 지문방식의 평균 오차는 세 가지(K-NN, 베이시안, 의사결정나무 방식) 모두 약 2.4m인데 반하여 신호세기와 거리와의 관계를 이용한 삼각측량 방법의 오차는 평균 4.07m이고, 확장칼만필터 방법의 평균 오차는 3.528m로 삼각측량 방법보다는 정확하지만 지문방식보다는 부정확하다는 것을 알 수 있다. 그러나 Xiang et al.[2004]의 무선랜 환경에서의 옥내측위방식은 휴대단말기를 사용하는 경우 평균 오차가 5m였다. 직접적인 비교는 아닐지라도 본 연구에서 제안한 확장칼만필터 방법이 그들의 방식에 비해 오차가 적다는 것을 알 수 있다. 또한 확장칼만필터 방법은 지문방식에 비하여 준비단계를 요구하지 않는다는 장점이 있다. 나아가서, 이 정도 오차라면 대학의 강의실이나 회사의 사무실 단위를 분별하여 위치기반서비스를 제공하는 응용에는 문제가 없음을 알 수 있다.

향후에는 확장칼만필터 방법의 정확도를 제고하는 방법에 대한 연구가 진행되어야 한다. 또한 본 논문에서 제안한 측위방식을 통합정보시스템으로 개발하여 사용자가 상황에 적합한 옥내측위방법을 적용할 수 있도록 하면 기존 LBS의 수준을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 본 연구의 결과는 유비쿼터스 환경에서 위치기반서비스와 상황인지 서비스를 제공하는 사업 분야에서 널리 활용될 수 있어 기업 경영의 효율성과 효과성을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] 임재걸, 주재훈, 남윤석, "위치기반서비스를 위한 통합측위시스템 설계 및 응용", *Journal of Information Technology Applications and Management*, Vol. 13, No. 4, 2006, pp. 57-70.
- [2] 임재걸, 심규박, 정승환, "RSSI 판독 라이브러리 함수 및 옥내 측위 모듈 구현", *멀티미디어학회논문지*, 제10권, 제11호, 2007, pp. 1483-1495.
- [3] Bahl, P. and Padmanabhan, V., "RADAR : An in-building RF-based user location and tracking system", *INFOCOM 2000*, Mar. 2000, pp. 775-784.
- [4] Harter, A. and Hopper, A., "A new location technique for the active office", *IEEE Personal Communications*, Vol. 4, No. 5, 1997, pp. 43-47.
- [5] Ito, S. and Kawaguchi, N., "Bayesian based location estimation system using wireless LAN", *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, 2005. (PerCom 2005 Workshops)* 8-12 March 2005, pp. 273-278.
- [6] Lassabe, F., Canalda, P., Chatonnay, P. and Spies, F., "A Friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning", *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2005*, 13-16 June 2005, pp. 382-387.
- [7] Lin, T.N. and Lin, P.C., "Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless

- networks”, *Proceedings of the 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, Vol. 2, 13-16, June 2005, pp. 1569-1574.
- [8] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., and Liu, J., “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems”, *Transactions on Systems, Man and Cybernetics : Part C - Applications and Reviews*, Vol. 37, No. 6, 2007, pp. 1067-1080.
- [9] Kotanen, A., Hannikainen, M., Leppakoski, H., and Hamalainen, T., “Experiments on local positioning with bluetooth”, *Proceedings of International Conference on Information Technology : Coding and Computing [Computers and Communications] (ITCC 2003)*, 2003, pp. 297-303.
- [10] Priyanthat, N., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H., “The cricket location-support system”, *Proc. of 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, Aug. 2000.
- [11] Qasem, H. and Reindl, L., “Unscented and Extended Kalman estimators for non linear indoor tracking using distance measurements”, *Proceedings of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, WPNC 2007*, 2007, pp. 177-181.
- [12] Want, R., Hopper, A., Falcao, V., and Gibbons, J., “The active badge location system”, *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 10, No. 1, 1992, pp. 91-102.
- [13] Welch, G. and Bishop, G. “An Introduction to the Kalman Filter”, Updated : July 24, 2006, <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalmanIntro.html>.
- [14] Xiang, Z., Song, S., Chen, J., Wang, H., and Gao, X., “A Wireless LAN-based indoor positioning technology”, *IBM J. RES. and DEV*, Vol. 48, No. 5/6, 2004, pp. 617-625.
- [15] Yim, J., “Introducing a decision tree-based indoor positioning technique”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 34, No. 2, 2008, pp. 1296-1302.

■ 저자소개



임재걸

현재 동국대학교(경주캠퍼스) 공학대학 컴퓨터멀티미디어학과 교수로 재직 중이다. 일리노이 주립대학교에서 컴퓨터과학 박사학위를 취득하였다.

주요 관심분야는 페트리 넷 이론과 응용, 시스템 분석, 컴퓨터 네트워크, 인공지능 등이다. 한국정보과학회논문지, 한국정보처리학회논문지, 대한전자공학회논문지, 멀티미디어학회논문지, Information Sciences 등에 다수의 논문을 게재하였다.



박찬식

서울대학교에서 학사, 석사, 박사 학위를 취득하였다. 현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수로 재직하고 있다. 연구 관심분야는 GNSS, SDR, AJ,

ITS, WSN 등이다.



주 재 훈

현재 동국대학교(경주캠퍼스) 경영·관광대학 경상학부 교수로 재직 중이다. 부산대학교에서 경영학박사 학위를 취득하였다. 주요 관심분야는 전자상

거래와 e-비즈니스 전략/모형/개발방법론, 시맨틱 웹, 상황인지 및 유비쿼터스 응용, 웹기반 DSS 등이다. 경영학연구, 경영정보학연구, 한국경영과학회지, Information Systems Management, International Journal of Industrial Engineering, Expert Systems with Applications, Journal of Computer Information Systems 등에 다수의 논문을 게재하였다.



정 승 환

현재 동국대학교 대학원 전자계산학과 석사과정 재학 중이다. 동국대학교에서 공학대학 컴퓨터학과 공학사를 취득하였다. 주요 관심분야는 LBS,

GIS, 802.11 표준 등이다. 한국정보과학회, 한국정보처리학회의 학술발표 논문집에 다수의 논문을 게재하였고, JCIT, 멀티미디어학회 논문지에 논문을 게재하였다.