

수신신호세기과 초음파를 동시에 이용한 위치측정 기법

박찬식¹, *윤희학¹, 김승범², 강동연¹, 이학주¹, 차은종³, 이상정²

¹전기전자컴퓨터공학부 충북대학교, CBITRC(Tel: 043-261-2529 E-mail: chansp@chungbuk.ac.kr)

²전기정보통신공학부 충남대학교(Tel: 043-821-6542 E-mail: eesjl@cslab.cnu.ac.kr)

³의공학과 충북대학교, CBITRC(Tel: 043-261-2856 E-mail: ejcha@chungbuk.ac.kr)

Abstract: Zigbee를 이용한 실내 위치 측정 기법에서는 수신신호세기(RSSI) 측정치를 거리측정치로 활용하여 삼각측량법이나 DB 검색법을 이용하여 위치를 구한다. RSSI 측정치는 Zigbee 통신에서 기본적으로 제공하는 값으로 하드웨어 추가 없이 거리 측정에 사용할 수 있지만 정확도가 떨어진다. 이를 해결하기 위해 초음파 센서를 장착하고 RF와 초음파의 속도차이를 이용하여 정확한 거리를 측정할 수 있다. 이렇게 구해진 거리를 이용하면 정확한 위치를 구할 수 있다. 이를 구현하는 방법으로 본 논문에서는 고정된 위치의 비컨들이 순차적으로 신호를 전송하여 노드의 위치를 구하는 경우 발생하는 비컨의 전송 스케줄, 추가 및 동기 유지의 어려움을 해결할 수 있도록 노드에서 신호를 전송하고 비컨에서 구한 거리를 다시 노드로 Zigbee 통신을 이용하여 전달하여 위치를 구하는 기법을 제시하였다. 추가로 본 논문에서는 비컨 수의 제약으로 위치를 구할 수 없는 경우에 초음파 측정치에 추가하여 RSSI 측정치를 동시에 이용하는 위치측정기법을 제시하고, 실제 정적, 동적 실험을 통하여 그 유용성을 보였다. 3개 이상의 초음파 신호가 수신되는 경우 cm 급의 정확도로 위치를 10Hz 이상으로 구할 수 있었으며, 2개 이하의 초음파 신호가 수신되는 경우에도 RSSI 측정치가 있으면 수십 cm 급의 정확도로 위치를 구할 수 있음을 확인하였다.

Keywords: Zigbee, 초음파, 수신신호세기(RSSI), 위치측정

1. 서 론

WSN(Wireless Sensor Network)는 스마트 홈, 헬스 케어, 군수, 물류/유통, ITS(Intelligent Transportation System), 환경, 로봇, 자동차등 많은 응용에 적용될 수 있는 초소형, 초저전력 센서 소자의 통신 네트워크기술이다. 많은 WSN에서 저가격, 저전력 등의 이점으로 Zigbee를 사용하는 추세이며 802.15.4 표준의 Zigbee는 2.4GHz 대역에서 저속의 데이터 통신이 필요한 응용에 주로 사용된다[1]. WSN응용에서 노드의 위치 추정은 환경에 관계 없이 가능해야 하고, 전력 소모가 적어야 한다. GPS(Global Positioning System)는 위치를 구할 때 널리 사용되나 실내나 장애물이 있는 도심지, 가로수가 빽빽한 도로 등의 환경에서는 전파가 차단되어 제대로 동작하지 않는다. 또한 센서 네트워크의 수 많은 노드에 고가의 GPS 수신기를 장착하는 것은 현실적으로 불가능하다. 반면 RSSI(Radio Signal Strength Indicator)는 별도의 추가 장비 없이 Zigbee 통신과정에서 얻을 수 있으므로 MoteTrack[2]등 많은 연구[3][4][5]에서 이를 이용하여 위치를 구하고 있다. 그러나 RSSI 측정치는 정확도가 낮고 주변 환경에 따라 변화가 심하므로 이를 이용하여 구한 위치는 정확도가 낮아 실제 적용에 제한이 따른다[6][7]. 정확도가 높은 위치를 구하기 위하여 RADAR[8]에서는 무선 랜의 신호세기를 추가로 이용하고, Active Badge[9]에서는 적외선, Ubisense[10]에서는 UWB(Ultra Wide Band)를, Cricket[11]이나 U-SAT[12]에서는 초음파를 추가로 이용한다. 초음파를 이용하는 경우 RF와 초음파의 신호 전달 시간 차를 이용하여 정확한 위치를 쉽게 구할 수 있으므로 이를 이용하는 연구가 활발히 진행 중이며 수 cm 정확도로 위치를 구할 수 있음이 알려져 있다.

Cricket과 U-SAT은 알고 있는 위치의 고정된 비컨에서 RF(Radio Frequency)와 초음파를 동시에 전송하고 노드가 이를 수신하여 각 비컨까지 거리 측정치를 구하고 이를 이용하여 위치를 결정하는 방식이다. 아직 초음파에 대한 효과적인 다중화 기법이 존재하지 않으며, 이들 방법에서는 시분할다중접속(TDMA: Time Division Multiple Access)을 사용한다. 즉 시간 T를 m 개의 노드에 대하여 각각 T/m 만큼 시구간을 할당하는 방식으로 할당된 시구간의 최소 값은 초음파가 비컨에서 노드까지 비행할 수 있는 시간 이상이 보장되어야 한다. 이 구조에서는 미리 정해진 순서대로 비컨이 동작하므로 새로운 비컨의 추가가 어렵고, 비컨 간의 시각동기가 유지되어야 하는 문제점이 있다. 예를 들어 4개의 비컨과 1개의 노드가 존재하고 최대 거리가 30m일 때, 시분할다중접속의 시구간은 최소 90ms를 확보해 두어야 하고, 4개의 비컨에 대한 거리 측정치를 모두 확보하기 위해서는 360ms가 필요하므로 위치 결정속도는 3Hz 이하가 된다. 이 위치결정 속도는 일반적인 GPS의 1Hz에 대하여 빠르기는 하지만 4개의 비컨에서 동시에 측정치를 구하지 못하므로 항체의 움직임이 빠른 경우 현재의 위치를 구하지 못하는 문제가 있다. 또한 이 구조에서는 비컨들이 계속해서 RF와 초음파를 전송하며 전력을 소비하기 때문에 무선 센서 네트워크와 같이 저전력을 요구하는 응용 분야에서 사용이 제약이 있다[13]. 본 논문에서는 노드에서 Zigbee의 RF 신호와 초음파를 동시에 전송하고 이를 비컨 들에서 수신하여 거리를 구하고, 구해진 거리를 Zigbee 통신을 이용하여 노드로 전송하고, 최종적으로 노드에서 위치를 구하는 구조를 제안하였다. 제안한 구조는 비컨의 설치와 위치결정 속도, 위치 정보 노출에 의한 사생활 침해, 전력문제를 효율적으로 해결 할 수 있다.

초음파를 사용하는 경우 Zigbee 신호에 비하여 초음파의 도달 거리가 짧아 3개 이상의 비컨을 확보하기 위하여 많은 비컨을 설치해야 하는 문제가 있다. Zigbee는 30m 정도의 거리에서의 통신을 기본으로 최대 100m까지 통신을 지원하지 않음, 초음파는 전력 손실 등을 고려하여 수십 m 이내에서 사용하는 것이 일반적이다. 특히 잡음에 약한 초음파 신호는 수신하지 못하고 Zigbee 신호만을 수신하는 경우도 흔히 발생한다. 따라서 본 논문에서는 Zigbee의 RSSI 신호와 초음파를 동시에 사용하는 위치 결정 기법을 제시하였다. 이 방법은 초음파 신호만을 사용하는 경우에 비하여 항상 나은 결과를 제공하고, 초음파 신호의 수가 부족한 경우에도 위치를 구할 수 있는 장점이 있다. 제안된 기법들은 실제로 구현된 테스트 베드에서 획득한 측정치를 이용하여 검증하였다. 이 결과는 WSN 뿐 아니라 실내외에서 위치를 요구하는 모든 응용에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. RSSI와 초음파를 이용한 위치 결정기법

2.1 거리 측정 기법

Zigbee와 초음파의 공기 중에서 전파되는 속도 차를 이용하여 거리를 구하는 과정은 그림 1과 같다. 그림에서 노드의 위치를 알고자 하며, 비컨은 알고 있는 위치($B^i = [X^i, Y^i, Z^i]$)에 설치되어 있다고 가정한다. 노드에서 t_0 시각에 Zigbee 신호와 초음파 신호를 동시에 전송하면 RF 신호인 Zigbee 신호는 빛의 속도로 전파되는 반면 초음파는 온도 (T_c)에 따라 $v_{US} = 331.5 + 0.60714T_c$ [m/s]의 속도로 전파된다. 따라서 비컨에서는 Zigbee 신호가 도착한 이후 초음파가 도착할 때까지 걸린 시간($t_{US} - t_{RF}$)을 측정하고 여기에 초음파의 전달 속도를 곱하여 식 (1)의 거리를 구할 수 있다.

$$\rho_u^i = \frac{(t_{US} - t_{RF})v_{US}}{\sqrt{(X^i - x)^2 + (Y^i - y)^2 + (Z^i - z)^2} + w_u^i} \quad (1)$$

여기서, $u = [x, y, z]$ 는 구하고자 하는 노드의 위치이며, w_u^i 는 측정오차를 나타내며 평균 0, 분산 σ^2 인 백색 Gaussian 잡음(AWGN)으로 가정한다. 측정오차는 온도에 따른 초음파 전달 속도차이, 초음파 신호 검출 회로 등에 의하여 결정된다. 이중 온도의 영향은 무시할 수 없는 크기이며, 특히 거리가 멀수록 오차가 커지는 특징이 있으므로 정확한 거리를 구하기 위해서는 온도를 측정하여 초음파의 속도를 보정하여야 한다. WSN에는 온도센서를 장착하고 있는 경우가 많으므로 보상이 용이하며, 만약 온도센서가 없다면 일부 기준 비컨에서라도 측정하여 이를 다른 노드들에게 전송하는 것이 바람직하다.

노드 위치를 삼차원에서 구하기 위해서는 3개 이상의 거리측정치가 필요하지만, 노드가 평면에서만 움직이면 이차원으로 가정하여 2개의 거리측정치로도 위치를 구할 수 있다. 일반적으로 측정치에 여유를 두는 것이 장애물에 의한 영향으로 일부 신호의 단절이 생기는 경우에도 연속적으로 위치를 구할 수 있으므로 4개 이상의 위치에 비컨을 설치한다.

그림 2에 위치측정을 위한 비컨 배치의 예를 나타내었다. 그림에서 비컨은 알고 있는 위치에 설치하며, 실내 환경임을 고려하면 천정의 모퉁이가 설치에 용이한 위치 중 하나임을 알 수 있다. 그림 2에서 노드와 비컨 사이의 거리를 구하는 방법으로 비컨에서 RF와 초음파를 동시에 전송하고 노드에서 각 비컨에 대한 거리 측정치를 얻는 방식(방식 1, 그림 3)과 반대로 노드에서 전송하고 각 비컨에서 수신하는 방식(방식 2, 그림 4)이 있다 방식 1은 GPS와 같은 개념으로 노드에서 거리를 측정할 수 있는 장점으로 Cricket, U-SAT에서 적용하고 있다.

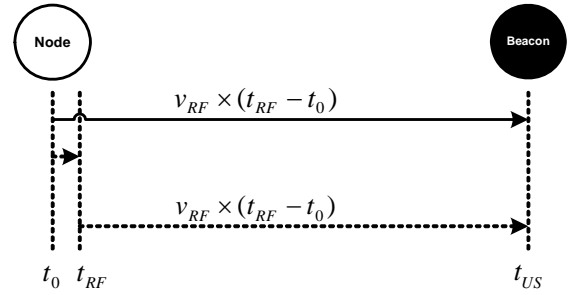


그림 1. RF와 초음파의 시간 지연을 이용한 거리 측정 방법
Figure 1. Range measurement using TD of RF and Ultrasound

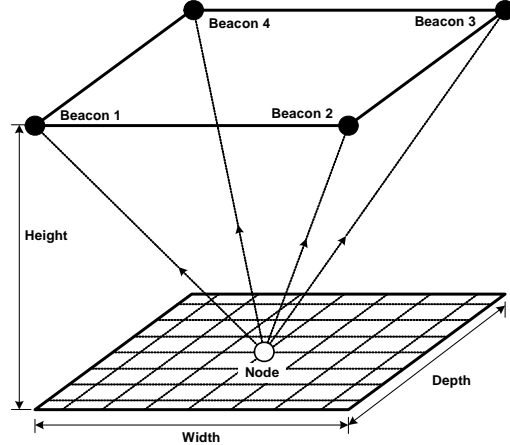


그림 2. 비컨과 노드의 설치
Figure 2. Deployment of Node and Beacons

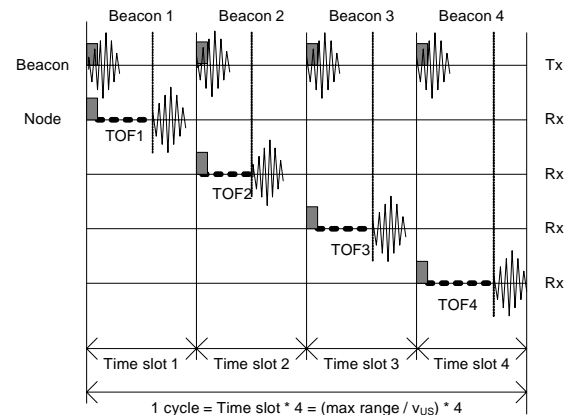


그림 3. 기존 방법의 타이밍 도
Figure 3. Timing diagram of old method

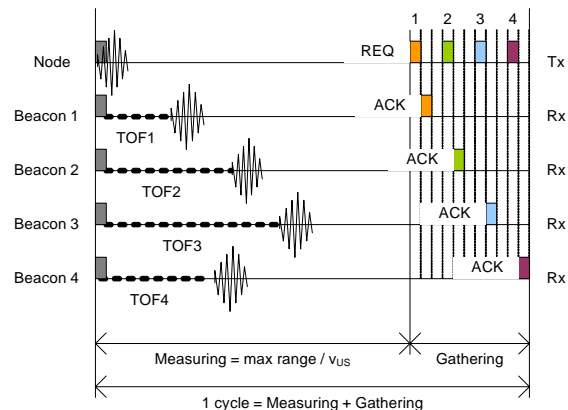


그림 4. 제안하는 방법의 타이밍 도
Figure 4. Timing diagram of proposed method

방법 1에서 비컨들이 동시에 RF와 초음파를 송신하여 충돌이 발생할 경우 이를 해결하기 위한 방법이 필요하며 현재 RF와 초음파에 동시에 적용할 수 있는 방법은 시분할다중접속 밖에 없다. 즉 그림 3에서와 같이 각 비컨들이 일정한 간격으로 시간을 나누고 정해진 시구간에 RF와 초음파를 전송하고, 노드는 이 신호를 받아 거리를 측정한다. 이 때 시구간의 크기는 초음파의 전송속도와 적용장소의 크기에 따른다. 적용장소의 최대 거리를 R_{max} 라고 하면 비컨들의 최소 전송 시간 간격은 R_{max}/v_{US} 를 보장해야 한다. U-SAT에서는 약 28m의 거리를 고려하여 최소 전송 시간을 83ms으로 정하였으며, 4개의 비컨을 이용하여 초당 3번 위치를 구할 수 있다[12]. 방식 1에서 비컨을 추가 혹은 제거 하는 경우 비컨을 변경하여야 하며, 비컨 사이에 시각동기를 위한 기법이 요구된다. 또한 움직임이 빠른 노드의 경우 처음 비컨 신호를 받은 위치와 마지막 비컨 신호를 받은 위치에 차이가 발생하므로 정확한 위치를 구할 수 없는 문제가 있다.

방식 2는 노드에서 RF와 초음파를 동시에 전송하고 모든 비컨에서 동시에 수신하는 구조이며 그림 4에 그 동작을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 노드에서 송신한 RF와 초음파는 각각의 비컨에 차례로 도착하며 각 노드에서 거리측정치를 구한다. 이 구조에서는 거리 측정치를 비컨에서 처리하여 위치를 구할 수 있다. 이 방법은 구현이 쉬운 장점이 있어 병원 등에서 환자의 위치를 감시하는데 효과적으로 적용될 수 있지만 본 논문에서는 본인 위치의 노출에 따른 사생활의 침해를 우려하여 노드에서 위치를 구하는 방법을 고려하였다. 노드에서 위치를 구하기 위해서는 거리측정치를 비컨에서 노드로 전송해야 하며 본 논문에서는 이미 Zigbee가 사용되고 있으므로 이를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. 비컨에서 먼저 전송을 시작하는 방법과 항상 노드의 요구에 의하여 측정치를 돌려주는 방법을 고려할 수 있다. 먼저 전송을 시작하는 방법과 항상 노드의 요구에 의하여 측정치를 전달하는데도 두 가지 방법: 거리측정치가 확보되면 비컨에서 먼저 전송을 시작하는 방법과 항상 노드의 요구에 의하여 측정치를 돌려주는 방법을 고려할 수 있다. 비컨이 먼저 통신을 개시하는 방법은 초음파 신호의 손실과 RF 통신의 충돌에 따른 패킷의 손실을 효과적으로 처리하기 어려우므로, 본 논문에서는 노드에서의 요구에 의하여 측정치를 받는 방법을 선택하였다. 이때 노드에서 초음파를 송신하고 거리측정치를 요구하기 전에 최대거리까지 초음파가 도착할 수 있는 시간을 보장해 주어야 하며, Zigbee 통신의 패킷 손실을 고려하여 재전송 요구 기능도 추가하였다.

초음파 센서가 장착되지 않은 비컨 혹은 초음파 신호를 수신하지 못한 비컨에서도 노드의 거리측정치 요구가 있는 경우 응답하도록 하여 항상 RSSI 값을 측정할 수 있도록 하였다. 이 경우 응답 패킷 내에 거리 측정치 값은 0으로 설정한다. 이렇게 구해진 RSSI는 미리 실험적으로 구해진 거리와의 관계를 이용하여 거리로 환산하여 사용한다. RSSI와 거리와의 관계를 구하기 위하여 DB(Data Base)를 이용하는 방법과 관계식을 이용하는 방법이 있으며, 일반적으로 DB를 이용하는 것이 나은 결과를 준다고 알려져 있다[.]. 본 논문에서는 구현의 간단함을 위하여 실험적으로 구해진 관계식을 이용하였으며, 전적으로 RSSI만을 이용하지 않고 초음파도 동시에 이용하므로 이로 인한 성능 저하는 크지 않을 것으로 기대된다.

2.3 위치 결정 기법

m 개의 비컨에서 RF와 초음파 전송 시간차를 이용하여 거리측정치를 구했다면 다음과 같이 위치를 구할 수 있다. 식 (1)를 기준점(nominal position) $u_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ 을 기준으로 선형화하면 식(2)와 같으며, 이를 다시 식(3)으로 간략히 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \rho_u^1 - \rho_0^1 \\ \vdots \\ \rho_u^m - \rho_0^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_x^1 & h_y^1 & h_z^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_x^m & h_y^m & h_z^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_u^1 \\ \vdots \\ w_u^m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\delta r_u = H_u \delta u + w_u \quad (3)$$

여기서 $\rho_0^i = \sqrt{(X^i - x_0)^2 + (Y^i - y_0)^2 + (Z^i - z_0)^2}$ 는 알고 있는 비컨의 위치와 기준점으로 계산한 거리, $(h_x^i = \frac{X^i - x_0}{\rho_0^i}, h_y^i = \frac{Y^i - y_0}{\rho_0^i}, h_z^i = \frac{Z^i - z_0}{\rho_0^i})$ 는 기준점에서 비컨으로의 시선(LOS: Line Of Sighe) 벡터를 나타낸다. 여기서 각각의 거리 측정치가 서로 독립이므로, 측정잡음의 공분산은 다음과 같이 대각 행렬로 나타낸다.

$$Q_u = \text{cov}(w_u) = \text{diag}(\sigma_r^2) \quad (4)$$

3개 이상의 비컨으로부터 거리를 구한 경우, 식 (3)에 가중 최소 자승법을 적용하면 다음의 위치오차와 공분산을 구할 수 있다. 구해진 위치오차 추정치 $\hat{\delta u}_u$ 를 기준점 u_0 에 더하여 최종 위치를 구할 수 있으며, 위의 과정을 반복하여 수행하기도 한다.

$$\delta \hat{u} = (H_u^T Q_u^{-1} H_u)^{-1} H_u^T Q_u^{-1} \delta r_u \quad (5)$$

$$\text{cov}(\delta u) = (H_u^T Q_u^{-1} H_u)^{-1} \quad (6)$$

만약 각 비컨에서 같은 정확도로 거리를 측정한다면 $\sigma^2 = \sigma_1^2 = \dots = \sigma_m^2$ 이 되며, 이때 위치오차의 공분산은 $\text{cov}(\delta u) = \sigma^2 (H_u^T H_u)^{-1}$ 이 된다.

m 개 초음파 거리 측정치와 n 개의 RSSI 거리 측정치를 동시에 사용하는 경우는 위의 방법을 확장하여 위치를 구할 수 있다. 이 경우 RSSI 측정치는 식 (7)로 나타낼 수 있으며, 이를 식 (2)와 같은 방법으로 기준점 $u_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ 에서 선형화 하고 식 (8)의 간략한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\rho_r^i = \sqrt{(X^i - x)^2 + (Y^i - y)^2 + (Z^i - z)^2} + w_r^i \quad (7)$$

$$\delta r_r = H_r \delta u + w_r \quad (8)$$

식 (3)과 식 (8)을 합하면 식 (9)와 같으며 이를 식 (10)의 간략한 형태로 낼 수 있다. 식 (10)에 가중최소 자승법을 적용하여 위치를 구할 수 있으며, 이때 측정잡음 w_u 의 공분산은 다음과 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta r_u \\ \delta r_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_u \\ H_r \end{bmatrix} \delta u + \begin{bmatrix} w_u \\ w_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\delta r_a = H_a \delta u + w_a \quad (10)$$

$$\text{cov}(w_a) = Q_a = \begin{bmatrix} Q_u & 0 \\ 0 & Q_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

본 논문에서는 초음파 검출 회로에서 고정된 임계치를 이용하므로 측정오차가 거리에 비례하므로 증가하는 점을 반영하여,

$$Q_u = \sigma_u^2 \times \text{diag}[\rho^1 \quad \rho^2 \quad \dots \quad \rho^m] \quad (12)$$

로 가중치를 선정하였으며, RSSI의 측정오차는 초음파 측정오차와 같은 특성을 갖지만 크기만 다르다고 가정하여 $Q_r = \sigma_r^2 \times \text{diag}[\rho^1 \quad \rho^2 \quad \dots \quad \rho^m]$, $\sigma_r = 100\sigma_u$ 으로 두었다.

3. 시스템의 구현

본 논문에서 제안한 RSSI와 초음파를 동시에 이용한 위치결정 시스템의 하드웨어 구성은 그림 5와 같이 RF 파트, 초음파 회로 그리고 마이크로 컨트롤러로 구성된다. RF파트는 Chipcon사의 CC2420 칩을 사용하고 초음파 센서는 KOMAN TECHNICS사의 AT/R40-10P를 사용하며 마이크로 컨트롤러는 Atmel사의 AVR ATmega128을 사용하였다. 비컨은 초음파의 수신 기능이 노드는 초음파의 전송기능이 필요하며, RF와 초음파의 동기를 맞추기 위해 CC2420 칩의 SFD(start of frame delimiter) 신호를 사용한다. SFD 신호는 RF로 데이터 프레임을 전송할 때 발생하므로 이 신호에 동기시켜 발진시킨다. 비컨에서는 SFD신호의 발생 시점이 RF 신호의 도착시간이 되며 이로부터 초음파 신호 도착까지의 시간간격을 측정하여 거리 측정치를 구하게 된다. 초음파 신호의 수신은 포락선 검출기를 이용하였으며 신호의 검출을 위한 임계치는 실험적으로 구했다. 모든 비컨에서 같은 이득을 갖도록 설정하였으며, 고정된 임계치를 이용하므로 거리가 멀수록 신호 감쇄에 따라 검출지연이 발생한다. 이는 거리에 따라 이득을 제어하거나 임계치를 변경함으로써 보상이 가능하며, 위치를 구하는 과정에서 가중치를 조정함으로써 보상할 수도 있다. 노드가 어떤 위치에 있더라도 비컨에서 초음파를 수신해야 하므로 지향성이 넓은 초음파 센서를 사용해야 하며 본 연구에서는 지향각이 100°로 넓은 모델을 사용하였으며, 노드에서는 3개의 초음파 센서를 장착하여 모든 비컨에서 신호를 수신할 수 있도록 하였다.

노드와 비컨의 소프트웨어 흐름도는 그림 6과 같다. 노드는 RF와 초음파를 동시에 전송하기 위해 40kHz PWM를 활성화하고 RF패킷을 방송한다. 이때 패킷은 주변의 모든 비컨이 수신할 수 있도록 주소 영역에 방송(broadcasting)으로 설정하여 전송하며, 이 패킷의 전송에 따라 발생한 SFD 신호에 의하여 초음파 신호도 동시에 전송된다. 패킷 전송 후 초음파가 모든 비컨까지 비행할 수 있는 시간을 확보하기 위해 대기한다. 그 후 모든 비컨에게 차례로 거리 측정치를 요구하는 패킷을 보내고 응답을 받는다. 이 경우 패킷 손실을 고려하여 일정시간 이내 응답이 없으면 측정치를 요구를 최대 3회까지 재시도한다. 패킷을 수신하는 과정에서 CC2420이 제공하는 8 비트의 RSSI 값을 측정하여 위치측정 프로그램에 제공한다.

비컨은 RF 신호가 들어오면, 초음파 비행시간을 측정하는데 사용하는 타이머를 0으로 초기화하고 초음파가 검출되면 타이머를 멈춘다. 이 타이머 값은 노드로부터 거리 측정치를 요구하는 패킷을 받으면 노드로 전송한다. Atmega-128에는 3개의 8비트 카운터와 2개의 16비트 카운터가 있으며, 이중 16비트 카운터 1개를 시간차 측정에 사용한다. 사용한 클럭은 7.3728MHz 이며, 이를 8분주하여 사용하므로 최대 측정거리는 24m, 거리 측정 해상도는 0.367mm가 된다.

4. 실험 및 결과

실험을 위한 테스트 베드는 그림 2와 같이 구성하였으며 폭과 깊이는 3m, 높이는 2.8m 이고 구조물 네모서리에 비컨을 설치하였다. 실험은 테스트 베드 바닥에 40 cm 간격의 49개 지점마다 500번 위치를 구하여 정확도를 비교하였다. 실험에서는 노드에서 직접 위치를 구하지 않고 거리측정치를 PC에 저장한 후 후처리 프로그램을 이용하여 RSSI 거리 측정치와 초음파 거리 측정치의 수에 따른 영향을 비교 분석하였다. 구현된 시스템은 최대 거리 30m로 가정하고 설계하였으며 위치는 20Hz 이상으로 구할 수 있었다.

거리와 RSSI의 관계 49개의 각 지점에서 구해진 500개의 측정치를 이용하여 구해진 그림 7을 바탕으로 구하였다. 그림에서 붉은 색을 기준으로 구해진 식 (13)의 거리와 RSSI의 관계식을 사용하여 측정된 RSSI를 거리로 변환하였다.

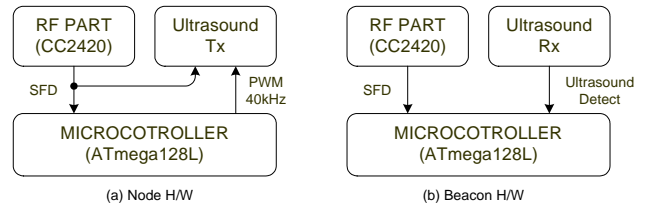


그림 5. 노드와 비컨의 블럭도
Figure 5. Block diagram of Node and Beacon

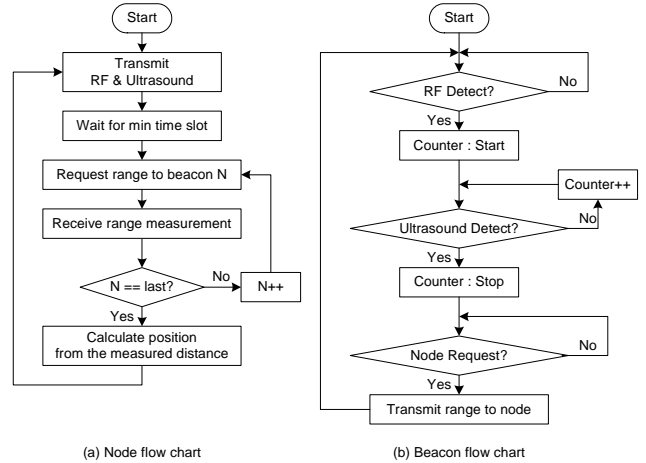


그림 6. 노드와 비컨의 흐름도
Figure 6. Flow chart of Node and Beacon

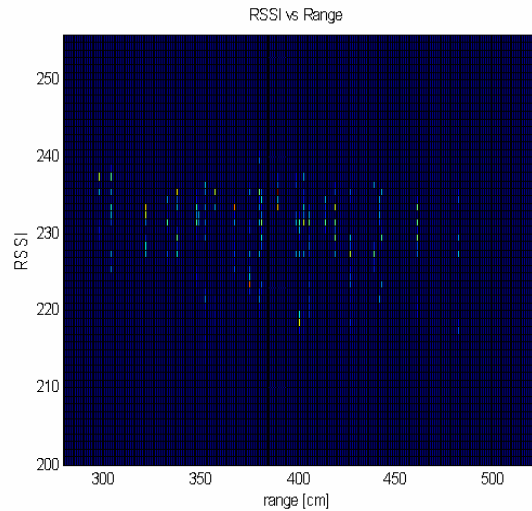


그림 7. RSSI와 거리와의 관계
Figure 7. Relationship between RSSI and Range

$$\rho = -0.1032 \times RSSI + 27.28 \quad (13)$$

그림 8 에 4 개의 초음파 거리측정치와 4 개의 RSSI 거리측정치를 동시에 사용하여 구한 위치를 나타내었다. 그림에서 붉은 색 o 은 참 위치를 나타내며, 파란색 x 는 구해진 위치를 나타낸다. 그림 9 에 각 위치에서 구해진 RMS(Root mean Square) 오차를 나타내었다. 그림에서 x, y 축은 그림 8 에서의 노드 위치를 나타내며 (30cm, 30cm)가 (1,1)을 (270cm, 270cm)가 (7,7)을 나타낸다. 그림 9 에서 (3,2)지점에서 최대 4.62cm의 RMS 오차가, (7,3)지점에서 최소 1.31cm RMS 오차가 발생했으며, RMS 오차의 평균 값은 2.62cm, 전체 RMS 오차의 합은 128.95 이다. 이 결과는 4 개의 초음파 거리측정치만을 이용한 경우의 128.99cm 에 비하여 약간 향상된 결과를 나타낸다.

표 1에 초음파 거리 측정치의 수가 4개에서 0개로 줄어드는 경우에 대하여 구해진 전체 RMS 오차를 나타내었다. 표에서 초음파 거리 측정치의 수가 줄수록 오차가 증가함을 볼 수 있다. 1개의 비컨에서만 초음파 측정치를 얻는 경우, 49개 지점에서의 구한 RMS 오차의 평균은 82.68cm로 나타났다. 이 결과는 충분한 초음파 측정치를 확보한 경우에 비하여 만족스럽지 않지만 위치를 구할 수 있는 장점이 있으며, 초음파 측정치를 전혀 사용하지 못하는 경우의 118.28cm에 비하여 나은 결과를 제공한다. 그림 10에 비컨 (1,2)와 비컨 (1,4)를 이용하여 구한 위치를 나타내었다. 그림에서 초음파 측정치의 정확도가 RSSI 측정치의 정확도에 비하여 월등히 높으므로 비컨 (1,2)를 사용하는 경우 수직방향에 비하여 수평방향의 정확도가 높으며, 반대로 비컨 (1,4)를 이용하는 경우 수직방향의 정확도가 높아지는 현상을 확인할 수 있다.

4.2 동적 실험 결과

움직이는 경우의 위치결정 능력을 확인하기 위하여 그림 2의 테스트 베드 한 가운데에 그림 11과 같이 반경 67cm의 회전대 위에 노드를 설치하여 회전 실험을 수행하였다. 회전대를 143초 동안 7바퀴 회전시켜 595회 얻어진 위치를 그림 12에 나타내었다. 위치는 4개의 초음파와 4개의 RSSI 측정치를 이용하여 구했다. 그림에서 구해진 위치의 반복 정확도를 확인할 수 있으며, 특히 고도에서 2cm 정도의 틀어짐을 확인할 수 있을 정도의 정확도로 위치를 구할 수 있다.

표 1. 초음파 거리 측정치 수에 따른 위치 오차
Table 1. Relation between RMS error and ultrasound measurements

사용한 초음파 비컨	RSSI 측정치의 수	평균 RMS 오차 [cm]	RMS오차의 합 [cm]
(1,2,3,4)	4	2.63	128.95
(1,2,3)	4	4.07	199.55
(1,2)	4	50.89	2493.8
(1)	4	82.68	4051.6
사용 없음	4	118.28	5795.9

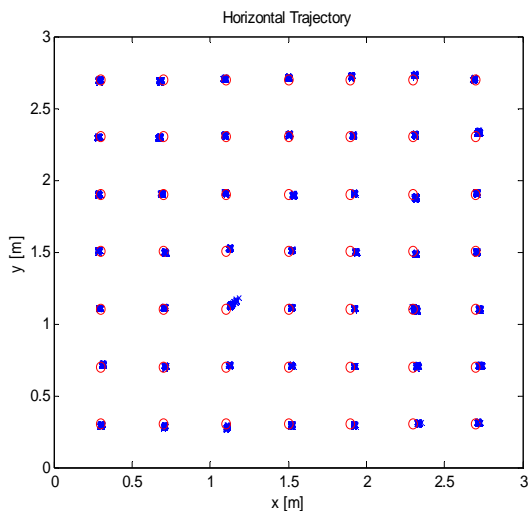


그림 8. 4개의 초음파와 RSSI 측정치를 이용한 수평 위치 오차
Figure 8. Horizontal position error using 4 ultrasound and 4 RSSI measurements

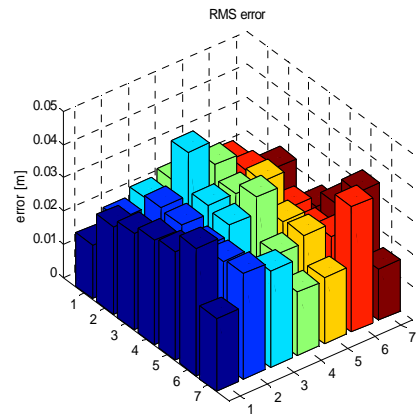
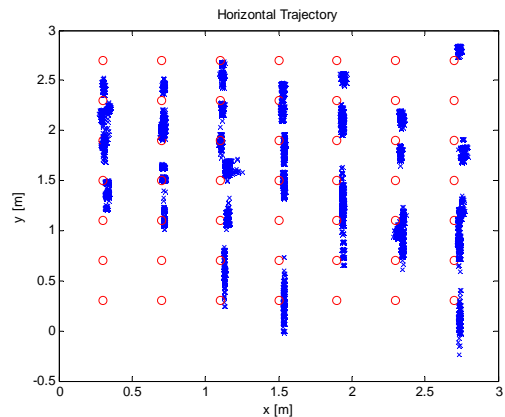
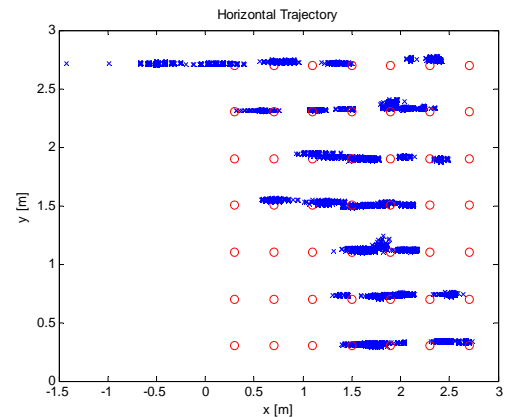


그림 9. RMS 오차
Figure 9. RMS Error



(a) 비컨 (1,2) 사용



(b) 비컨 (1,4) 사용

그림 10. 2개의 초음파와 4개의 RSSI를 이용한 수평 위치 오차
Figure 10. Horizontal position error using 2 ultrasound and 4 RSSI measurements

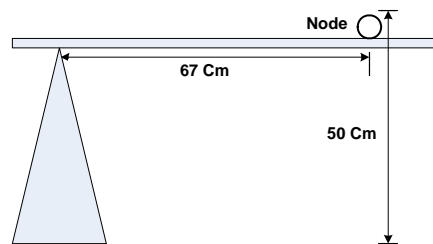
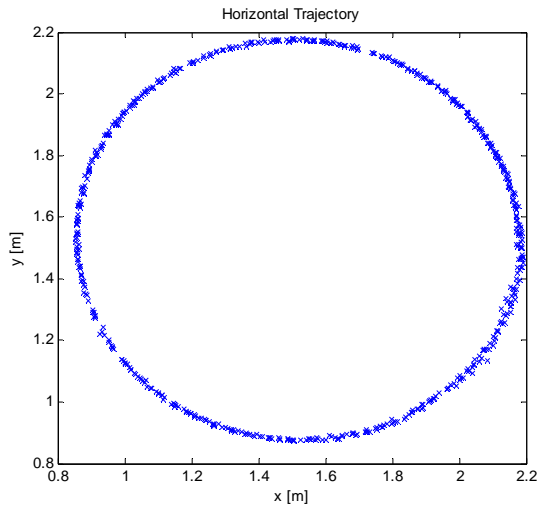
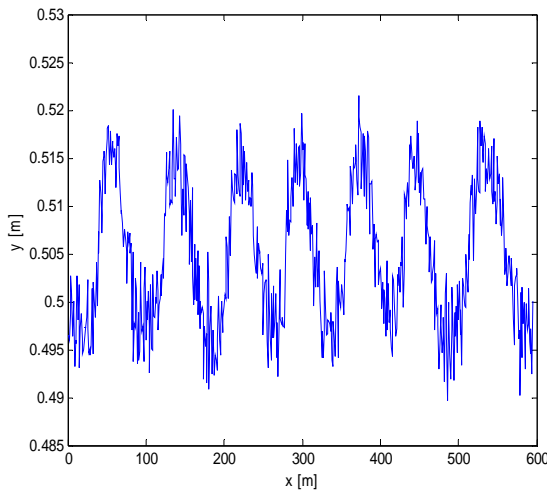


그림 11. 동적 실험 환경
Figure 11. Dynamic Test Environment



(a)



(b)

그림 12. 반복 정확도(회전 속도 20.6cm/s)

(a) 수평면 궤도, (b) 고도

Figure 12. Repeatability test(angular rate 20.6cm/s)

(a) Horizontal trajectory, (b) Height

5. 결론

본 논문에서는 기존의 RF와 초음파를 이용한 위치결정에서 비컨이 순차적으로 신호를 전송하고 노드에서 수신함으로써 발생하는 비컨의 전송 스케줄, 추가 및 동기 유지의 어려움 및 노드에서 저속 위치 결정 문제를 해결할 수 있는 Zigbee와 초음파를 이용한 위치결정 시스템을 제안하고 실험을 통하여 그 타당성을 확인하였다. 제안한 방법은 노드에서 Zigbee와 초음파 신호를 동시에 전송하고 알고 있는 위치에 설치된 다수의 비컨에서 이 신호를 이용하여 거리를 구하고, 구해진 거리를 다시 노드로 Zigbee 통신을 이용하여 전달하여 노드에서 위치를 구하는 기법으로 비컨의 설치와 위치결정 속도, 사생활 보호 및 전력문제를 효율적으로 해결할 수 있었다.

추가로 초음파 측정치의 수가 부족하여 위치를 구할 수 없는 경우, RF의 RSSI 신호를 동시에 이용하여 위치를 구하는 기법을 제시하였다. 구현된 시스템을 통한 실험에서 4개의 초음파 신호가 수신되는 정지한 경우와 움직이는 경우 모두 RMS오차가 2.62cm 이내로 10Hz 이상의 출력 속도로 위치를

구할 수 있음을 확인하였다. 초음파 신호의 수가 줄어들어도 연속적으로 위치를 구할 수 있음을 확인하였다. 제안된 방법은 초음파 수신환경이 열악한 경우의 스마트 홈, 헬스 케어, 로봇 등 많은 WSN 응용에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. *IEEE Standards 802 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*, (IEEE Inc., 2003).
2. Konrad Lorincz and Matt Welsh, "Motetrack: A robust, decentralized approach to rf-based location tracking," *In Proceedings of the International Workshop on Location- and Context-Awareness (Loca 2005)*, 2005.
3. D. Lymberopoulos, Q. Lindsey and A. Savvides, "An Empirical Analysis of Radio Signal Strength Variability in IEEE 802.15.4 Networks using Monopole Antennas," *ENALAB Technical Report*, 2005.05.01.
4. 박찬식, 김승범, 강동연, 윤희학, 차은중, 이상정, "RF와 초음파를 이용한 위치측정 시스템 개발," *2006 제 4회 자동화 시스템 심포지엄 논문집(CASS2006)*, 2006, 6, pp297-302.
5. Masashi Sugano, Tomonori Kawazoe, Yoshikazu Ohta, and Masayuki Murata, "Indoor Localization System Using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network Based on ZigBee Standard," *In The IASTED International Conference on Wireless Sensor Networks (WSN 2006)*, Banff (Canada), July 2006.
6. K. Vandenbussche. Fine-grained indoor localization using wireless sensor nodes. Master's thesis, Delft University of Technology, August 2005.
7. A. Savvides, C. Han, and M. Strivastava, "Dynamic finegrained localization in ad-hoc networks of sensors," *In 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 166--179, Rome, Italy, 2001.
8. P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," *In Proc. IEEE Infocom*, pages 775-784, Tel-Aviv, Israel, April 2000.
9. R. Want, A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons, "The Active Badge Location System," *In ACM Transactions on Information Systems*, 10(1):91-102, January 1992.
10. *Ubisense homepage*. <http://www.ubisense.net/>
11. Nissanka Bodhi Priyantha, "The Cricket Indoor Location System," *In PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, June 2005.
12. 김수용, "의사위성 시스템의 초음파를 이용한 이동 로봇의 위치 추정 및 성능평가," *부산대학교 공학석사 학위논문*, 2005. 2.
13. 조수형, 이상학, "센서 네트워크 기반의 저전력 실내 위치인식 시스템 설계," *전자부품연구원 전자정보센터*, 2005.12.