

# Zigbee와 초음파를 이용한 자세결정

박찬식<sup>1</sup>, \*강동연<sup>1</sup>, 윤희학<sup>1</sup>, 김승범<sup>2</sup>, 차은종<sup>3</sup>, 이상정<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전기전자컴퓨터공학부, 충북대학교, CBITRC(Tel: 043-261-3529 E-mail: chansp@cbucc.chungbuk.ac.kr)

<sup>2</sup>전기정보통신공학부, 충남대학교(Tel: 042-821-6542 E-mail: eesjl@cslab.cnu.ac.kr)

<sup>3</sup>의공학부, 충북대학교, CBITRC(Tel: 043-261-2856 E-mail: ejcha@chungbuk.ac.kr)

**Abstract:** 위치 정보를 얻기 위해 GPS를 이용하며 다수의 GPS 안테나를 이용하면 자세까지 구할 수 있다. 그러나 실내에서는 GPS 신호 세기가 너무 약해 동작하지 않는 단점이 있다. 본 논문에서는 GPS 대신 Zigbee와 초음파를 이용하여 실내에서도 위치와 자세를 구하는 기법을 제시하였다. Zigbee 신호와 초음파 신호의 도착 시간차로부터 송신기와 수신기간의 거리를 구할 수 있으며 이로부터 위치를 구할 수 있다. 여기에 추가의 발신기를 장착하면 두 발신기의 위치 차이로 정의되는 기저선 벡터를 구할 수 있으며 이로부터 자세를 구할 수 있다. 본 논문에서는 다수의 발신기를 이용하여 효과적으로 기저선 벡터를 구하는 기법과, 이로부터 자세를 구하는 시스템을 구축하였다. 추가로 오차해석을 통하여 구해진 자세의 정확도를 예측하였다. 실제 실험을 통하여 20cm 간격의 두 발신기를 이용하여 1도 이하의 오차를 갖는 방위각과 앙각을 연속적으로 구할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords:** Zigbee, 초음파, 위치결정, 자세결정, 자세오차

## 1. 서론

대부분의 WSN(Wireless Sensor Network)에서는 저가격, 저전력 등의 이점으로 Zigbee를 사용하는 추세이다. 802.15.4 표준의 Zigbee는 2.4GHz 대역에서 저속의 데이터 통신이 필요한 응용에 주로 사용된다[1]. 많은 WSN 응용에서 노드의 위치를 필요로 하며 이를 만족 시키기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. GPS(Global Positioning System)는 실외에서는 정확한 위치를 제공하지만 신호세기가 약하여 아직 실내에서는 사용에 한계가 있으며, 다른 기법에 비하여 비용문제로 아직 WSN에서 많이 적용되지 않고 있다. 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 해상도가 낮고 주변 환경에 따라 변화가 심하므로 이를 이용하여 구한 위치는 정확도가 낮아 실제 적용에 제한이 따른다[6,7]. 정확한 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 전파와 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.

차량, 비행기, 로봇 등의 항체는 위치뿐 아니라 자세 정보도 필요로 하며 이를 위하여 DR(Dead Reckoning)[13], 표적 인식[14], 영상 처리[15], GPS 등의 기법이 사용된다. GPS를 이용하는 경우 여러 개의 GPS 안테나를 항체에 부착하고 이로부터 안테나간의 기저선 벡터를 구하고 이로부터 항체의 자세를 구하는 방법이 알려져 있다[16]. 3개 이상의 안테나를 부착하면 3차원 자세를, 2개의 안테나를 부착하면 2차원 자세를 구할 수 있으며, 기저선 길이가 길수록 정확한 자세를 구할 수 있다. 그러나 실내에서 사용하고자 하는 경우

GPS는 적용이 어려우므로 대신 초음파를 이용하여 위치를 구할 수 있다. 즉 여러 개의 초음파 센서를 항체에 부착하고 이로부터 기저선 벡터를 구하여 자세를 구할 수 있다. 또 이 경우 GPS에서와는 달리 미지정수 검색이 필요 없으므로 쉽게 적용할 수 있다.

본 논문에서는 GPS에서의 자세결정기법에 기초하여 초음파를 이용하여 실내 환경에서 적용할 수 있는 자세결정 기법을 제시하고 이를 실제 구현된 시스템을 통하여 검증하였다. 또한 오차해석을 수행하였으며 이를 이용하면 원하는 정확도를 얻기 위한 초음파 송신기와 수신기의 설치, 기저선 벡터의 길이 등을 예측할 수 있다. 본 논문의 결과는 위치와 자세를 동시에 필요로 하는 청소용 로봇, 무인 헬체어 등의 응용에 효과적으로 사용될 수 있으며 특히 캡슐형 내시경에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. Zigbee와 초음파를 이용한 자세 결정기법

본 논문에서 제안하는 자세결정기법은 먼저 Zigbee 신호와 초음파의 전송시간 차를 이용하여 거리를 구하고, 구해진 거리를 이용하여 항체의 위치를 구한다음 이로부터 기저선 벡터를 구하고, 기저선 벡터의 배치로부터 자세를 구한다. 이장에서는 이 과정을 차례로 설명한다.

### 2.1 Zigbee와 초음파를 이용한 위치 결정 기법

Zigbee와 초음파의 전파 속도 차를 이용하여 거리를 구하는 과정을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 비컨은 알고 있는 위치  $B^i = [X^i, Y^i, Z^i]$  에 설치되어 있는 장치이며, 노드는 위치를 알고자 하는 장치이다. 본 논문에서는 초음파를 노드에서 송신하고 비컨에서 수신하는 구조를 채택했으며, 이 방법은 비컨에서 송신하고 노드에서 수신하는 구조에 비하여 비컨의 설치 및 확장, 빠른 노드의 움직임에 대하여 장점을 갖는다[17].

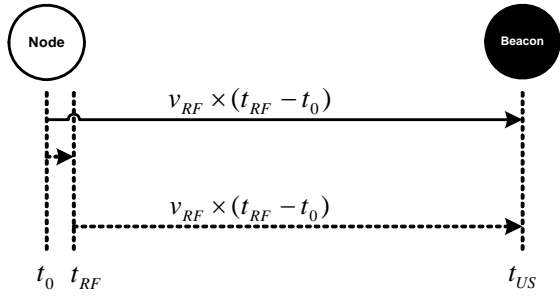


그림 1. Zigbee와 초음파의 도착시간 차를 이용한 거리측정  
Figure 1. Range measurement using time difference of Zigbee and Ultrasound

노드에서  $t_0$  시각에 Zigbee 신호와 초음파를 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.

$$\rho_A^i = (t_{US} - t_{RF})v_{US} = \sqrt{(X^i - x_A)^2 + (Y^i - y_A)^2 + (Z^i - z_A)^2} + w_A^i \quad (1)$$

여기서,  $u_A = [x_A, y_A, z_A]$  는 구하고자 하는 노드의 위치이며,  $w_A^i$  는 평균 0, 분산  $\sigma^2$  인 백색 Gaussian 잡음(AWGN) 측정오차이다. 측정오차는 온도에 따른 초음파 전달 속도차이, 초음파 검출 회로 등의 요인에 의하여 결정된다.

$m(\geq 3)$  개 이상의 비컨에서 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 나타내자.

$$\begin{bmatrix} \rho_A^1 - \rho_0^1 \\ \vdots \\ \rho_A^m - \rho_0^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_x^1 & h_y^1 & h_z^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_x^m & h_y^m & h_z^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_A \\ \delta y_A \\ \delta z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_A^1 \\ \vdots \\ w_A^m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\delta r_A = H_A \delta u_A + w_A \quad (3)$$

여기서  $\rho_0^i = \sqrt{(X^i - x_0)^2 + (Y^i - y_0)^2 + (Z^i - z_0)^2}$  는 계산된 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 Sight) 벡터를 나타낸다. 여기서 각각의 거리 측정치가 서로 독립이므로, 측정잡음의 공분산은 다음과 같이 대각 행렬로 나타낼 수 있다.

$$Q_A = \text{cov}(w_A) = \text{diag}(\sigma_i^2) \quad (4)$$

식 (3)에 가중 최소자승법을 적용하면 식 (5)와 (6)의 위치오차와 공분산을 구할 수 있다. 구해진 위치오차 추정치  $\delta \hat{u}_A$  를 기준점  $u_0$  에 더하여 최종 위치를 구할 수 있으며, 위의 과정을 반복하여 수행하기도 한다.

$$\delta \hat{u}_A = (H_A^T Q_A^{-1} H_A)^{-1} H_A^T Q_A^{-1} \delta r_A \quad (5)$$

$$\text{cov}(\delta u_A) = (H_A^T Q_A^{-1} H_A)^{-1} \quad (6)$$

만약 각 비컨에서 같은 정확도로 거리를 측정한다면  $\sigma^2 = \sigma_1^2 = \dots = \sigma_m^2$  로 둘 수 있으며, 이 때 위치오차의 공분산은  $\text{cov}(\delta u_A) = \sigma^2 (H_A^T H_A)^{-1}$  이 된다.

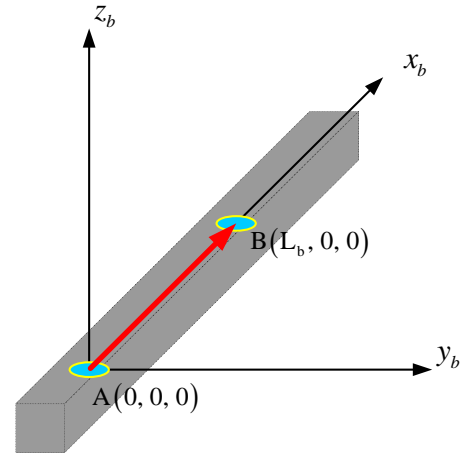


그림 2. 항체 좌표계와 노드의 설치  
Figure 2. Body frame and deployment of nodes

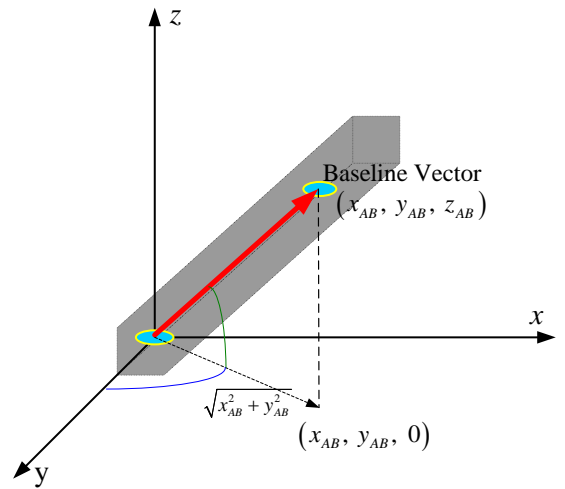


그림 3. 2차원 자세 결정  
Figure 3. 2-Dimensional attitude determination

## 2.2 Zigbee와 초음파를 이용한 자세 결정 기법

항체에 세 개 이상의 노드를 설치하면 3차원 자세를 구할 수 있으며, 두 개의 노드를 이용하면 2차원 자세를 구할 수 있다. 본 논문에서는 2차원 자세를 구하는 과정을 나타내었으며 이 결과는 쉽게 3차원으로 확장될 수 있다.

항체 좌표계는 그림 2에서와 같이 항체의 진행방향으로  $x_b$ , 오른쪽으로  $y_b$ , 여기에 수직으로  $z_b$  축을 정의한다. 따라서 롤, 피치, 요는 각각  $x_b$ ,  $y_b$ ,  $z_b$  축 중심으로 회전을 나타낸다. 본 논문에서는 편의상 노드 A를 항체의 중심에 설치하고 노드 B를  $x_b$  축 방향으로  $L_b$  인 지점에 설치하였다고 가정한다.

$m(\geq 3)$  개의 비컨으로부터 수신한 Zigbee와 초음파 신호의 도착시간 차를 이용하여 거리를 구하고 이를 이용하면 노드 A의 위치  $\hat{u}_A$  를 구할 수 있다. 같은 방법으로 노드 B의 위치  $\hat{u}_B$  를 구할 수 있으며 이를 이용하면 노드 A에서 B로의 기저선 벡터  $b_{AB} = \hat{u}_B - \hat{u}_A$  를 구할 수 있다. 다른 방법으로는 노드 A와 노드 B에서 직접 초음파 신호의 도착 시간차를 구하고 여기에 초음파의 전송속도를 곱하여 기저선 벡터를 구할 수 있다. 두 번째 방법이 차분에 의하여 측정오차가 증폭되지 않은 점에서 유리하지만 초음파의 도착 시간차를 구해야 하므로 구현이 복잡해지는 단점이 있다. 본 논문에서 기저선 벡터를 구하는 방법에 제약을 두지는 않으며, 구현의 편의 등을 고려하여 선택할 수 있다. 어떤 방법을 사용하던 식 (7)의 측정치를 얻을

수 있다. 여기서 노드 A의 위치 식 (5)를 이용하여  $\hat{u}_A$ 를 구하고 이를 기준점으로 식 (7)을 선형화하면 식 (8)을 얻으며  $m(\geq 3)$  개의 측정치가 있는 경우 이를 이용하여 기저선 벡터를 구할 수 있다.

$$\rho_{AB}^i = (t_B - t_A)v_{US} = \frac{\sqrt{(X^i - x_B)^2 + (Y^i - y_B)^2 + (Z^i - z_B)^2}}{\sqrt{(X^i - x_A)^2 + (Y^i - y_A)^2 + (Z^i - z_A)^2} + w_{AB}^i} \quad (7)$$

$$\rho_{AB}^i = [h_x^i \ h_y^i \ h_z^i] b_{AB} + w_{AB}^i \quad (8)$$

구해진 기저선 벡터  $b_{AB} = [x_{AB} \ y_{AB} \ z_{AB}]^T$ 와 2차원 자세와의 관계를 그림 3에 나타내었으며,  $y$ 축과 이루는 각인 방위각(Heading:  $\psi$ )과 수평면과 이루는 각인 양각(Elevation:  $\theta$ )은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{x_{AB}}{y_{AB}}\right), \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{z_{AB}}{\sqrt{x_{AB}^2 + y_{AB}^2}}\right) \quad (9)$$

노드 B를  $(0, L_b, 0)$ 에 설치하면 방위각과 양각 대신 방위각과 롤(roll)을 구할 수 있으며, 3차원 자세를 구하기 위해서는 세 개 이상의 노드를 설치하면 된다.

### 3. 자세 오차 해석

$m(\geq 3)$  개의 비컨에 대하여 식 (8)의 측정치를 이용하여 구한 기저선 벡터와 공분산은 다음과 같다.

$$b_{AB} = (H_A^T Q_{AB}^{-1} H_A)^{-1} H_A^T Q_{AB}^{-1} \rho_{AB} \quad (10)$$

$$\text{cov}(b_{AB}) = (H_A^T Q_{AB}^{-1} H_A)^{-1} \quad (11)$$

여기서  $\rho_{AB} = [\rho_{AB}^1 \ \dots \ \rho_{AB}^m]^T$ ,  $Q_{AB} = \text{cov}(w_{AB})$ 을 나타낸다. 두 노드 A, B에서 각 비컨에 대하여 같은 정확도로 거리를 측정하고 이를 이용하여 구한 위치를 차분하여 기저선 벡터를 구한다면  $Q_{AB} = \text{cov}(w_A) + \text{cov}(w_B) = 2\sigma^2 I$ 가 된다. 따라서 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{cov}(b_{AB}) = 2\sigma^2 (H_A^T H_A)^{-1} = 2\sigma^2 \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m (h_x^i)^2 & \sum_{i=1}^m (h_x^i h_y^i) & \sum_{i=1}^m (h_x^i h_z^i) \\ \sum_{i=1}^m (h_x^i h_y^i) & \sum_{i=1}^m (h_y^i)^2 & \sum_{i=1}^m (h_y^i h_z^i) \\ \sum_{i=1}^m (h_x^i h_z^i) & \sum_{i=1}^m (h_y^i h_z^i) & \sum_{i=1}^m (h_z^i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (12)$$

$$\equiv 2\sigma^2 \begin{bmatrix} q_x^2 & q_{xy} & q_{xz} \\ q_{xy} & q_y^2 & q_{yz} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_z^2 \end{bmatrix}$$

직각 좌표계에서의 기저선 벡터를 극 좌표계로 바꾸면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[x_{AB} \ y_{AB} \ z_{AB}]^T = d [-\sin\psi \cos\theta \ \cos\psi \cos\theta \ \sin\theta]^T \quad (13)$$

여기서  $d$ ,  $\psi$ 와  $\theta$ 는 각각 기저선 벡터의 길이, 방위각 및 양각을 나타낸다. 위 식을 선형화 기준점  $(b_0, \psi_0, \theta_0)$ 에서 선형화하면 다음을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} d_0 \cos\theta_0 \delta\psi \\ d_0 \delta\theta \\ \delta b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\psi_0 & \sin\psi_0 & 0 \\ -\sin\psi_0 \sin\theta_0 & -\cos\psi_0 \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \\ \sin\psi_0 \cos\theta_0 & \cos\psi_0 \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_{AB} \\ \delta y_{AB} \\ \delta z_{AB} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)로부터 식 (15)와 (16)의 자세 오차 공분산을 얻는다. 여기서 방위각 오차는 고도 오차 ( $q_z^2$ )에 영향을 받지 않고 기저선이 길수록 작아지며, 양각 오차도 기저선이 길어질수록 줄어들음을 볼 수 있다.

$$\sigma_{\delta\psi}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0 \cos\theta_0)^2} \{(q_x \cos\psi_0)^2 + (q_y \sin\psi_0)^2 - 2q_{xy} \sin\psi_0 \cos\psi_0\} \quad (15)$$

$$\sigma_{\delta\theta}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0)^2} \{(q_x \sin\psi_0 \sin\theta_0)^2 + (q_y \cos\psi_0 \sin\theta_0)^2 + (q_z \cos\theta_0)^2 + 2q_{xy} \cos\psi_0 \sin\psi_0 \sin^2\theta_0 - 2q_{yz} \sin\psi_0 \sin\theta_0 \cos\theta_0 - 2q_{xz} \cos\psi_0 \sin\theta_0 \cos\theta_0\} \quad (16)$$

수평면에서만 움직이는 항체라면  $\theta_0 = 0$ 를 이용하여 다음의 간단한 결과를 얻는다.

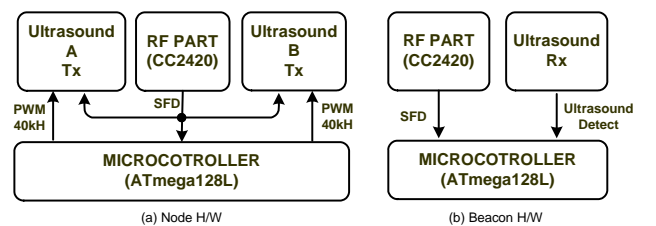
$$\sigma_{\delta\psi}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0)^2} \{(q_x \cos\psi_0)^2 + (q_y \sin\psi_0)^2 - 2q_{xy} \sin\psi_0 \cos\psi_0\} \quad (17)$$

$$\sigma_{\delta\theta}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0)^2} \{(q_z^2)\} \quad (18)$$

## 4. 시스템 구현 및 실험

### 4.1 ZigBee와 초음파를 이용한 자세결정 시스템

본 논문에서 제안하는 Zigbee와 초음파를 이용한 자세결정 시스템의 노드와 비컨의 하드웨어 구성은 그림 4와 같다. 노드와 비컨은 각각 RF 파트, 초음파 회로 그리고 마이크로 컨트롤러로 구성되며 노드에는 기저선 벡터 측정을 위하여 초음파 회로가 1개 더 추가되어 있다. 노드와 비컨의 동기를 맞추기 위해 Chipcon사 CC2420 칩의 SFD(Start of Frame Delimiter) 신호를 사용한다. SFD신호는 RF로 데이터 프레임을 전송할 때 발생하므로 이 신호에 동기시켜 초음파를 발진시키면 두 신호의 동기를 맞출 수 있다. 비컨에서는 SFD신호의 발생 시점이 RF신호의 도착시간이 되며 이때부터 초음파가 도착할 때까지 타이머를 동작시켜 두 신호의 시간차를 측정할 수 있다. 이 값에 초음파 전송속도를 곱하면 거리를 구할 수 있다. 초음파 신호의 수신은 포락선 검출기를 이용하였고 신호의 검출을 위한 임계치는 실험적으로 구했다. 모든 비컨에서 같은 이득을 갖도록 설정하였으며, 고정된 임계치를 이용하므로 거리가 멀수록 오차가 증가할 수 있다. 이는 신호 감쇄에 따라 이득을 증가함으로써 보상하거나, 가중 최소자승법으로 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  $100^\circ$ 로 넓은 모델을 사용하였다.



(a) Node H/W

(b) Beacon H/W

그림 4. 노드와 비컨의 하드웨어 구성

Figure 4. Hardware configuration of node and beacon

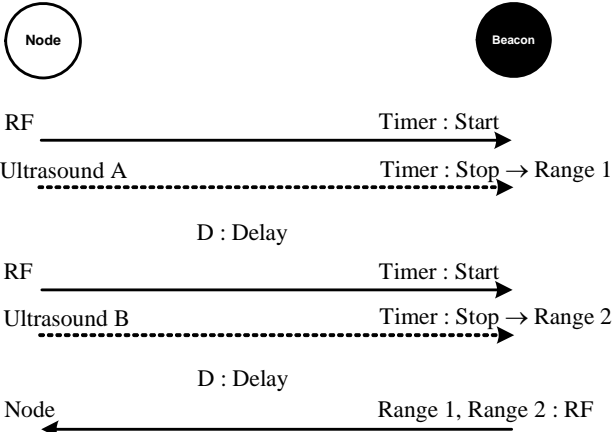


그림 5. 거리측정 흐름도  
Figure 5. Flowchart of range measurement

노드와 비컨의 거리측정 과정은 그림5와 같다. 한 개의 노드에 두개의 초음파 발진기가 있으며, 먼저 초음파 발진기 A의 40kHz PWM을 활성화하고 RF 패킷을 전송한다. 이때 패킷은 주변의 모든 비컨이 수신할 수 있도록 주소 영역을 방송(broadcasting)으로 설정하여 전송하며, 이 패킷의 전송에 따라 발생한 SFD 신호에 의하여 초음파 신호도 동시에 전송된다. 패킷 전송 후 초음파가 모든 비컨까지 전송될 수 있는 시간을 확보한 후 같은 방법으로 초음파 발진기 B를 이용하여 초음파와 RF 패킷을 방송한다. 초음파의 전파를 보장하는 시간 지연 이후 비컨에게 차례로 거리 측정치를 요구하는 패킷을 보내고 응답을 받는다. 이 경우 패킷 손실을 고려하여 일정시간 이내 응답이 없으면 측정치 요구를 최대 3회까지 재시도하도록 하였다.

비컨은 RF 신호가 수신되면, 초음파 전송시간을 측정하기 위한 타이머를 구동하고 초음파가 검출되면 타이머를 멈춘다. 같은 방법으로 두개의 초음파 A와 초음파 B에 해당하는 타이머 값을 구한 후, 노드로부터 측정치를 요구하는 패킷을 받으면 노드로 전송한다. 노드에서는 두 개의 거리 측정치로 초음파 발진기 A와 B의 위치를 구하여 이를 이용하여 기저선 벡터와 자세를 차례로 계산한다.

#### 4.2 실험환경

테스트베드는 그림 6과 같이 구성하였다. 그림에서 폭은 3m, 깊이는 3m, 높이는 2.8m이고, 구조물 각 모서리에 4개의 비컨을 설치하였다. 노드는 초음파 A와 초음파 B 2개의 초음파 발진기로 구성하였다. 먼저 정지한 상태에서 기저선 길이에 따른 위치 정확도를 파악하기 위하여 초음파 A를 테스트베드의 중심에 두고 초음파 B를 비컨 1 방향으로 거리 3cm를 두고 거리측정치 500개를 확보하였다. 그리고 5cm부터 80cm까지 5cm씩 거리를 증가해 가면서 거리데이터를 500개씩 획득하였다. 추가로 회전대를 이용하여 움직이는 경우의 반복 정확도를 나타내었다.

#### 4.3 실험결과

##### 4.3.1 기저선 길이에 따른 정확도

그림 7은 테스트베드에서 확보한 측정치로 가장 최소자승법을 이용하여 초음파 A를 기준으로 초음파 B를 17개의 지점으로 이동하며 구한 상대위치를 나타내었다. 그림에서 원점의 붉은 색 o는 초음파 A를 나타내며, 파란색 x는 초음파 A에 대한 B의 상대위치, 즉 기저선 벡터를 나타낸다. 그림에서 초음파 B의 상대 위치가 대략 지름 3cm 이내에 몰리는 것을 확인할 수 있으며, 이는 한 개의 초음파를 이용하여 구한 절대 위치에 비하여 오차가 2배 증폭된 결과이다. 그림 8에 기저선 길이가 80cm일 때 구한 방위각과 양각을 나타내었다. 그림에서 방위각은 평균 135.7도, 표준편차는 0.22도이며, 양각의 평균은 0.03도, 표준편차는

0.24도이다. 이는 80cm 정도의 기저선을 이용하면 정확한 자세를 구할 수 있음을 보여준다. 나머지 위치에 대해서도 같은 방법으로 자세와 표준편차를 구할 수 있다.

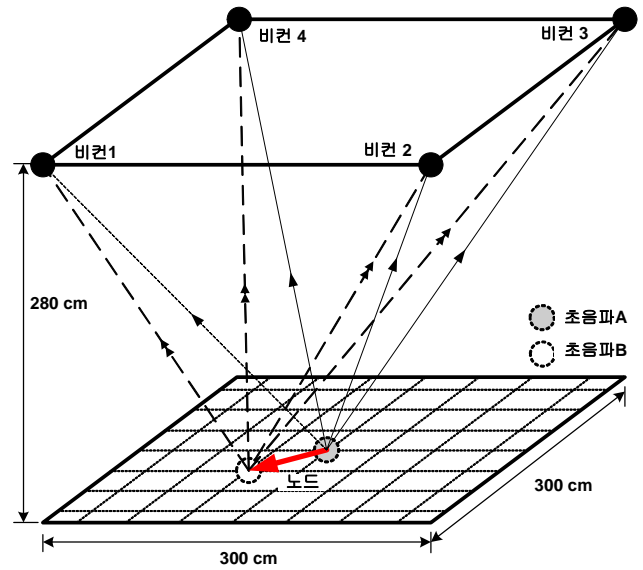


그림 6. 테스트 베드의 구성  
Figure 6. Configuration of experiments

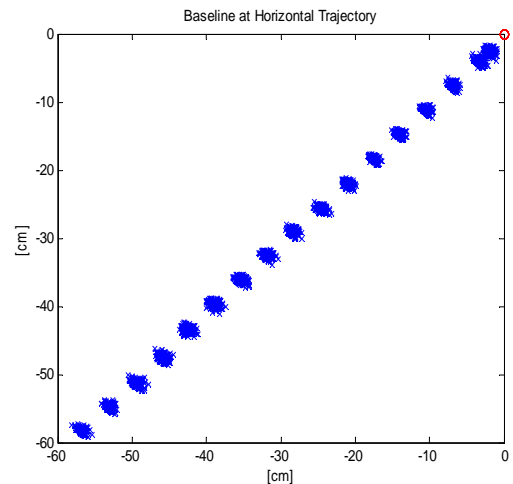


그림 7. 기저선 벡터  
Figure 7. Baseline vectors

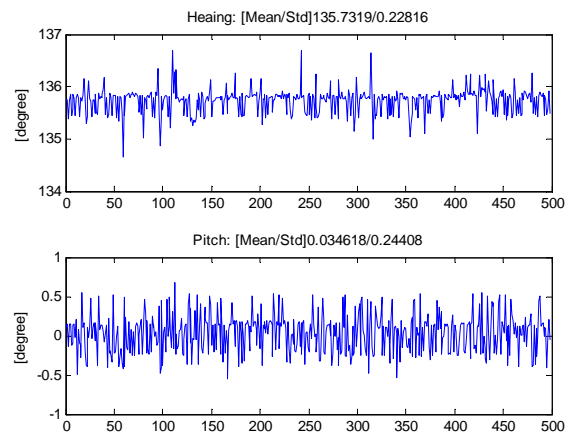


그림 8. 방위각과 양각 (기저선 80cm)  
Figure 8. Heading and pitch (baseline 80cm)

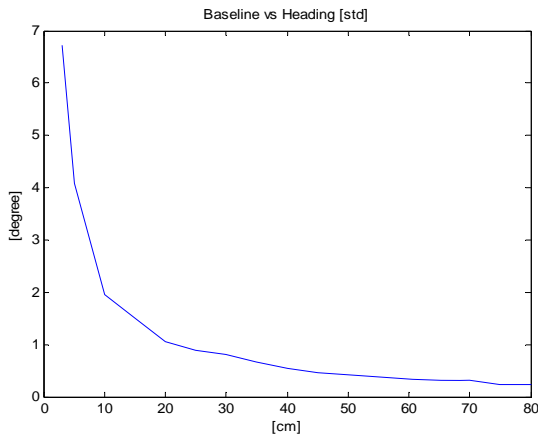


그림 9. 기저선길이 대 방위각오차  
Figure 9. Baseline length vs. heading error

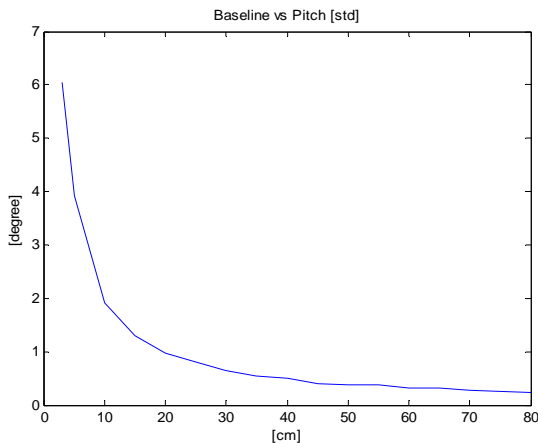


그림 10. 기저선길이 대 양각오차  
Figure 10. Baseline length vs. pitch error

기저선 길이가 짧아지면 자세 정확도가 감소하며 그림 9와 10에 기저선 길이에 따라 구한 방위각과 양각의 표준편차를 도시하였다. 식 (17)과 (18)에서 예측한 바와 같이 방위각 오차와 양각 오차 모두 기저선의 길이가 늘어남에 따라서 줄어드는 결과를 볼 수 있다. 또한 그림으로부터 표준편차 1도 이하의 방위각 오차와 양각 오차를 구하기 위해서는 20cm 이상의 기저선을 사용해야 함을 확인할 수 있다. 요구되는 정확도는 응용 대상에 따라 다르지만 청소용 로봇의 경우 20cm 이상의 기저선을 충분히 확보할 수 있으므로 쉽게 적용할 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 짧은 기저선에서 정확한 자세를 원하는 응용이라면 거리측정 오차를 줄여야 이를 만족시킬 수 있다.

#### 4.3.2 움직이는 경우 반복 정확도

움직이는 자세의 변화를 알아보기 위해 그림 11과 같이 초음파 A와 초음파 B를 회전체의 중심 (150cm, 150cm) 으로부터 각각 67cm, 87cm의 거리에 설치하고 4.6cm/s의 일정한 속도로 회전운동을 하였다. 그림 12에 초음파 A의 궤적을 나타내었으며, 그림 13에 A를 중심으로 한 초음파 B의 상대 궤적을 나타내었다. 그림 12에서 Zigbee와 초음파를 이용하면 움직이는 경우에도 정확한 위치를 구할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 13에서 차분에 의하여 오차가 증폭되는 것을 확인할 수 있으며, 그림의 우측 하단부분에 튀는 부분은 회전체의 베어링의 영향으로 판단된다. 그림 14에서 회전에 의하여 방위각 일정하게 변하는 것을 볼 수 있으며, 양각이 약 3도로 유지되는 것을 볼 수 있다. 양각이 0이 아닌 이유는 회전체의 바깥이 중심에 대하여 약 3도 기울어져 있기 때문이다. 양각의 표준편차는 그림 10에서 예측한 1도 부근의 값과 정확히 일치함을 확인할 수 있다.

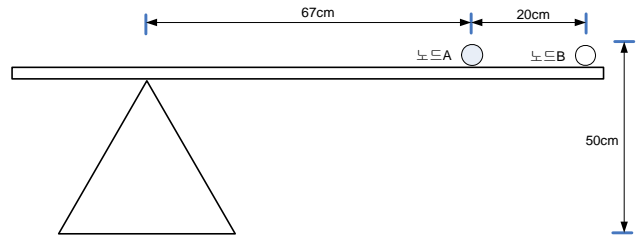


그림 11. 동적 실험 환경  
Figure 11. Dynamic test environment

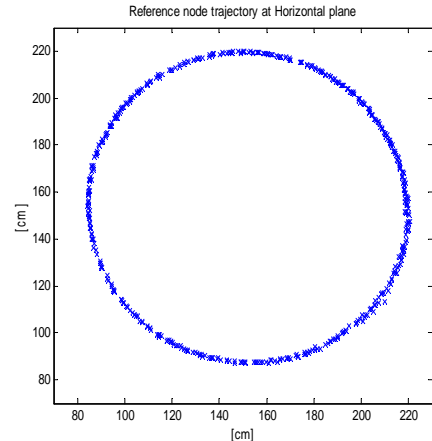


그림 12. 초음파 A의 궤적  
Figure 12. Trajectory of ultrasound transducer A

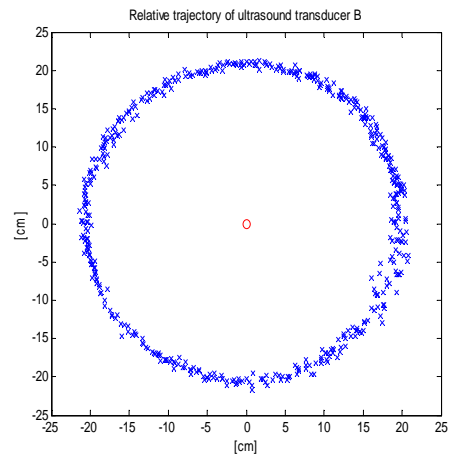


그림 13. 초음파 A에 대한 초음파 B의 상대궤적  
Figure 13. Relative trajectory of ultrasound transducer B

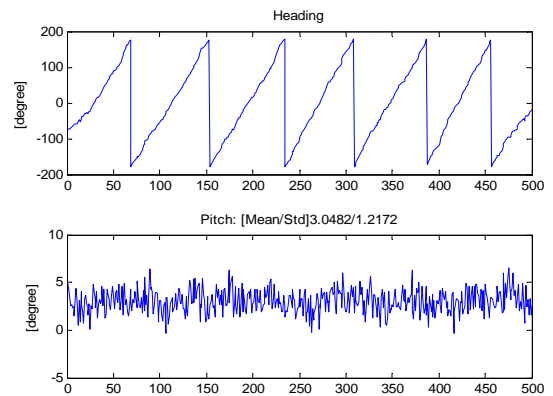


그림 14. 방위각과 양각  
Figure 14. Heading and pitch

## 5. 결론

본 논문에서는 Zigbee와 초음파를 이용하여 실내 환경에서 적용할 수 있는 자세결정기법을 제시하고, 이를 실제 시스템 구현을 통하여 검증하였다. 또한 오차해석을 수행하였으며 이를 이용하여 주어진 환경에서 얻을 수 있는 위치정확도를 예측할 수 있으며, 역으로 원하는 정확도를 얻기 위한 초음파 송신기와 수신기의 설치, 기저선 벡터의 길이 등을 제시할 수 있었다. 실험 결과 기저선의 길이와 정확도가 반비례하며 20cm 이상의 기저선을 확보하면 1도 이하의 오차로 방위각과 양각을 구할 수 있음을 확인하였다. 항체가 움직이는 경우에도 예측한 정확도로 연속적으로 자세를 구할 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 결과는 위치와 자세를 동시에 필요로 하는 정소용 로봇, 무인 헬기 등의 응용에 효과적으로 사용될 수 있으며 나아가 랩솔형 내시경 등에도 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*, May. 2005.
4. 박찬식, 김승범, 강동연, 윤희학, 차은중, 이상정, "RF와 초음파를 이용한 위치측정 시스템 개발," *2006 제어 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*, Rome, Italy, 2001, pp. 166-179
8. P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," *In Proc. IEEE Infocom*, Tel-Aviv, Israel, April. 2000, pp 775-784
9. R. Want, A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons, "The Active Badge Location System," *In ACM Transactions on Information Systems*, January. 1992, 10(1):91-102
10. *Ubisense homepage*. <http://www.ubisense.net/>
11. Nissanka Bodhi Priyantha, "The Cricket Indoor Location System," *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. 이재호, 서흥석, 성태경, 박찬식, 이상정, "A Two - antenna 자세 결정용 GPS 수신기와 DR 센서의 통합 시스템," *한국 자동제어 학술회의 논문집*, 2000, 10.
14. 강현덕, 조강현, "다중 표식을 이용한 자율이동로봇의 자기위치추정," *제어 자동화 시스템공학 논문지*, 제 10 권 제 1 호, 2004, 1, pp81-86.
15. 이기철, 김현태, 고재원, 이성렬, 박민용, "단일 카메라를 이용한 이동 로봇의 위치 추정과 주행제어," *제어 자동화 시스템공학 논문지*, 제 5 권 제 5 호, 1999, 7, pp529-539.
16. 손석보, 박찬식, 이상정, "이차원 자세 측정용 GPS 수신기 설계," *한국군사과학기술학회 논문지 3 권 2 호*, 2000, pp131-139.
17. Chansik Park, Seung Beom Kim, Dong Youn Kang, Hee Hak Yun, En Jong Cha, Sang Jeong Lee, "Positioning using ZigBee and Ultrasound," *In International Symposium on GPS/GNSS*, 2006.