

초음파와 RF를 이용한 자세결정

Attitude Determination Technique using Ultrasound and RF Signal

김 승 범, 박 찬 식*, 강 동 연, 윤 희 학, 이 건 우, 이 상 정

(Seung Beom Kim, Chansik Park, Dong-Youn Kang, Hee Hak Yun, Geon Woo Lee, and Sang Jeong Lee)

Abstract : GPS is widely used for positioning applications and attitude of a vehicle can be found also with multiple antennas. However, extremely weak signal level prevents GPS from indoor operation. DR with accelerometers and gyros and landmark based localization method used for indoor applications increase complexity and cost. In this paper, a simple but very efficient ultrasound based attitude determination system which determines both position and attitude in WSN is given. The range between transmitter and receivers are measured using the arrival time difference between ultrasound and RF signal. The 3 dimensional positions can be found using more than 3 range measurements. Furthermore, if more than 2 transmitters are used, the attitude can be determined using the baseline vectors obtained by differencing transmitter and receiver positions. The prototype system is implemented to evaluate the performance of the proposed method. In addition, an error analysis shows the relation between the attitude error and baseline length, quality of measurement and orientation of a vehicle. The static and dynamic experiments performed by micro mobile robot shows accurate position with less than 1.5cm error and attitude with less than 1 degree error can be obtained continuously with 20cm baseline. It is expected that these results can be adapted without modification to indoor applications such as home cleaning robot and autonomous wheelchair maneuvering.

Keywords : WSN(Wireless Sensor Network), ultrasound, positioning, attitude determination

I. 서론

최근 각광 받고 있는 WSN(Wireless Sensor Network)에서 위치정보에 대한 요구가 증가하고 있으며 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. WSN에서 사용되는 무선통신인 WPAN(Wireless Personal Area Network)기법에는 UWB(Ultra Wide Band)와 Zigbee가 대표적이며 무선 랜도 사용될 수 있다. 대부분의 WSN에서 저가격, 저전력 등의 이점으로 Zigbee를 사용하는 추세이며 802.15.4 표준의 Zigbee는 2.4GHz 대역에서 저속의 데이터 통신이 필요한 응용에 주로 사용된다 [1]. WPAN을 이용하는 경우 전파신호의 세기를 나타내는 RSSI(Radio Signal Strength Indicator)는 별도의 추가 장비 없이 통신과정에서 얻을 수 있으므로 MoteTrack 등 많은 연구 [2,3,5]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 UWB를, Cricket[11]이나 U-SAT[12,13]에서는 초음파를 추가로 이용하여 위치를 구한다. 초음파를 이용하는 경우 WSN의 WPAN의 RF(Radio Frequency)와 초음파의 신호 전달 시간 차를 이용하여 정확한 위치를 쉽게 구할 수 있으므로 이를 이용하는 연구가 활발히 진행 중이며 저가의 초음파 센서를 이용하여서도 수 cm 정확도로 위치를 구할 수 있음이 알려져 있다. 또

한 다중화 시스템의 구현을 위하여 진폭변조 확산대역 초음파 측위 시스템[19]의 구현도 진행 중이다.

WSN의 응용의 한 예로 병원에서 자율주행이 가능한 휠체어의 경우나 홈 네트워크에서 청소 로봇 등의 응용에서는 위치뿐 아니라 자세 정보도 필요로 하며 이를 위하여 가속도계와 자이로를 이용하는 DR(Dead Reckoning)[14], 천정이나 바닥에 부착된 표적을 인식하는 기법[15], 카메라를 이용한 영상 처리 기법[16], GPS(Global Positioning System)를 이용한 기법 등이 사용된다. GPS를 이용하는 경우 여러 개의 GPS 안테나를 항체에 부착하고 이로부터 안테나간의 기저선 벡터를 구하고 이로부터 항체의 자세를 구하는 방법이 알려져 있다[17,18]. 이 경우 3개 이상의 안테나를 부착하면 3차원 자세를, 2개의 안테나를 부착하면 2차원 자세를 구할 수 있으며, 기저선 길이가 길수록 정확한 자세를 구할 수 있다. 그러나 GPS는 신호세기 문제로 실내에서 적용이 어려우므로 이를 초음파를 이용하는 경우로 변경하여 적용할 수 있다. 즉 여러 개의 초음파 센서를 항체에 부착하고 이로부터 기저선 벡터를 구하여 자세를 구할 수 있다.

본 논문에서는 GPS에서 사용되는 자세결정 기법에 기초하여 WSN에서 초음파를 이용하여 실내 환경에서 적용할 수 있는 자세결정 기법을 제시하고 이를 실제로 구현하고 성능을 검증하였다. 제안하는 자세결정기법은 먼저 무선통신의 RF 신호와 초음파의 전송시간 차를 이용하여 거리를 구하고, 구해진 거리를 이용하여 항체의 위치를 구한다음 이로부터 기저선 벡터를 구하고, 기저선 벡터의 배치로부터 자세를 구한다. 또한 구해진 자세의 오차해석을 수행하였으며 이 결과를 이용하면 정확도와 초음파 송, 수신기의 배치, 기저선 벡터의 길이의 관계를 알 수 있으며 이를 이용하여 성능을 예측하고 역으로 원하는 성능을 얻기 위하여 필요한 요구 조건을 도출할 수 있다.

2장에서는 초음파와 RF를 이용하여 거리측정치를 구하는

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2007. 1. 25., 채택확정 : 2007. 8. 13.

김승범, 이건우, 이상정 : 충남대학교 전기정보통신공학부

(uwbgps@paran.com/liiv@csllab.cnu.ac.kr/eesjl@cnu.ac.kr)

박찬식, 강동연, 윤희학 : 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부

(chansp@cnu.ac.kr/hg879s@paran.com/tzootzme@chungbuk.ac.kr)

※ 이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

기법과 이로부터 위치를 구하는 기법을 소개하고, 센서가 추가되는 경우 위치를 구하는 기법을 설명한다. 3장에서는 공분산 해석을 통하여 자세오차를 예측하고, 4장에서는 정지실험과 움직이는 실험으로부터 기저선 길이에 따른 정확도와 반복 정확도를 확인하고, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

II. 초음파와 RF 를 이용한 자세 결정기법

1. 초음파와 RF를 이용한 위치 결정 기법

초음파와 RF의 전파 속도 차를 이용하여 거리를 구하는 과정은 그림 1과 같다. 그림에서 노드는 위치를 알고자 하는 장치이며, 비컨은 알고 있는 위치($B^i = [X^i, Y^i, Z^i]$)에 설치되어 있는 고정 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[4].

노드에서 t_0 시각에 RF 신호와 초음파를 동시에 전송하면 RF 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 RF 신호가 도착한 이후 초음파가 도착할 때까지 걸린 시간($t_{US} - t_{RF}$)을 측정하고 여기에 초음파의 전달 속도를 곱하여 (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 측정오차로 평균 0, 분산 σ^2 인 백색 Gaussian 잡음(AWGN)으로 가정한다. 측정오차는 온도에 따른 초음파 전달 속도차이, 초음파 신호 검출 회로의 오차 등에 의하여 결정된다.

$m(\geq 3)$ 개 비컨에서 거리측정치를 구했다면 다음과 같이 위치를 구할 수 있다. (1)를 기준점(nominal position) $u_0 = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$ 을 기준으로 선형화하면 (2)와 같으며, 이를 다시 (3)으로 간략히 나눌 수 있다.

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

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

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

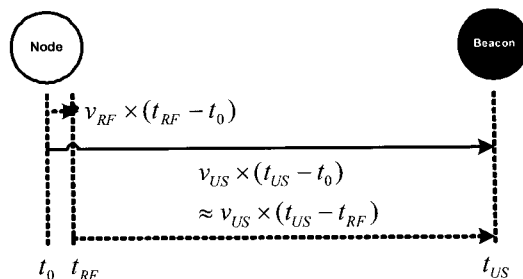


그림 1. 초음파와 RF의 도착시간 차를 이용한 거리측정.

Fig. 1. Range measurement using time difference of Ultrasound and RF.

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

(3)에 가중 최소자승법을 적용하면 다음 (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.

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

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

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

2. 초음파와 RF를 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 두 개의 노드에서 구한 측정치를 차분하여 상대위치를 구하고 이를 이용하여 2차원 자세를 구하는 과정을 나타내었으며 이는 쉽게 3차원 자세로 확장될 수 있다.

항체 좌표계는 그림 2에서 보는 바와 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 계산의 편의를 위하여 노드 A를 항체의 중심으로 설치하고 노드 B를 x_b 축 방향으로 L_b 인 지점에 설치하였다고 가정한다.

$m(\geq 3)$ 개의 비컨으로부터 수신한 초음파와 RF 신호의 도착시간 차를 이용하여 거리를 구하면 앞 절에서 설명한 방법으로 노드 A의 위치 \hat{u}_A 를 구할 수 있다. 같은 방법으로 노드 B의 위치 \hat{u}_B 도 구할 수 있으며 이로부터 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 시간 차를 구하고 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 않으나 구현의 편의 등을 고려하여 처음 방법을 구현하였다. 어떤 방법을 사

용하던 (7)의 차분된 측정치를 얻을 수 있다. 먼저 노드 A의 위치 \hat{u}_A 를 앞 절에서 설명한 방법으로 구하고 이를 선형화 기준점으로 (7)을 선형화하면 (8)을 얻으며 이를 이용하면 기저선 벡터 $b_{AB} = [x_{AB} \ y_{AB} \ z_{AB}]^T$ 를 구할 수 있다. 여기서 $w_{AB}^i \equiv w_B^i - w_A^i$ 는 차분된 측정오차를 나타내며, 시선벡터는 $(h_x^i = \frac{X^i - \hat{x}_A}{\rho_A^i}, h_y^i = \frac{Y^i - \hat{y}_A}{\rho_A^i}, h_z^i = \frac{Z^i - \hat{z}_A}{\rho_A^i})$ 로 나타낸다.

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

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

구해진 기저선 벡터 b_{AB} 와 2차원 자세와의 관계를 그림 3에 나타내었으며, 북쪽과 이루는 각인 방위각(heading: ψ)과 수평면과 이루는 각인 양각(elevation: θ)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.

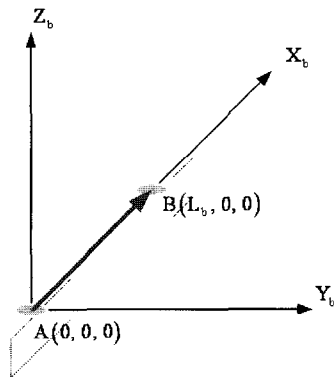


그림 2. 항체 좌표계와 노드의 설치.
Fig. 2. Body frame and deployment of nodes.

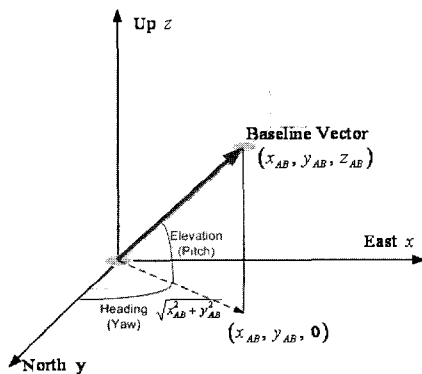


그림 3. 2차원 자세.
Fig. 3. 2-Dimensional attitude.

III. 자세 오차의 해석

(8)을 $m(\geq 3)$ 개의 비컨인 경우로 확장하여 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 $\rho_{AB} = [\rho_{AB}^1 \ \dots \ \rho_{AB}^m]^T$, $w_{AB} = [w_{AB}^1 \ \dots \ w_{AB}^m]^T$, $Q_{AB} = \text{cov}(w_{AB})$ 을 나타낸다. 서로 독립인 두 노드 A, B에서 각 비컨에 대하여 같은 정확도로 거리를 측정하고 이를 이용하여 구한 위치를 차분하여 기저선 벡터를 구한다면 (12)가 성립한다. 이를 이용하면 (11)은 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{AB} = \text{cov}(w_A) + \text{cov}(w_B) = 2\sigma^2 I \quad (12)$$

$$\text{cov}(b_{AB}) = 2\sigma^2 (H_A^T H_A)^{-1}$$

$$= 2\sigma^2 \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m (h_x^i)^2 & \sum_{i=1}^m (h_x^i h_y^i) & \sum_{i=1}^m (h_x^i h_z^i) \\ \sum_{i=1}^m (h_x^i h_y^i) & \sum_{i=1}^m (h_y^i)^2 & \sum_{i=1}^m (h_y^i h_z^i) \\ \sum_{i=1}^m (h_x^i h_z^i) & \sum_{i=1}^m (h_y^i h_z^i) & \sum_{i=1}^m (h_z^i)^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

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

기저선 벡터를 직각 좌표에서 극 좌표로 바꾸어 나타내면 다음과 같다.

$$[x_{AB} \ y_{AB} \ z_{AB}]^T = d [-\sin\psi \cos\theta \ \cos\psi \cos\theta \ \sin\theta]^T \quad (14)$$

여기서 d , ψ 와 θ 는 각각 기저선 벡터의 길이, 방위각 및 양각을 나타낸다. 위 식을 선형화 기준점 (d_0, ψ_0, θ_0) 에서 선형화하면 다음을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} d_0 \cos\theta_0 \delta\psi \\ d_0 \delta\theta \\ \delta d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\psi_0 & \sin\psi_0 & 0 \\ -\sin\psi_0 \sin\theta_0 & -\cos\psi_0 \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \\ \sin\psi_0 \cos\theta_0 & \cos\psi_0 \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_{AB} \\ \delta y_{AB} \\ \delta z_{AB} \end{bmatrix} \quad (15)$$

(15)로부터 다음의 자세 오차 공분산을 얻을 수 있으며 이를 이용하면 오차를 예측할 수 있다. 즉 방위각 오차($\sigma_{\delta\psi}$)는 고도 오차(q_z)에 영향을 받지 않고 기저선의 길이(d_0)가 길수록 줄어들며, 양각 오차($\sigma_{\delta\theta}$)도 기저선이 길어질수록 줄어들음을 볼 수 있다. 또한 항체가 어디를 향하고 있는냐에 따라 ψ_0, θ_0 가 달라지며 이의 영향으로 오차가 변화함을 알 수 있다. 특히 $\theta_0 = 90^\circ$ 인 경우에는 방위각 오차가 발산하며 이는 항체가 수직으로 서있는 경우에는 노드 B의 작은 오차도 방위각이 0에서 360도 사이의 예측할 수 없는 값이 됨을 나타낸다.

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

$$\sigma_{\theta\theta}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0)^2} \{ (q_x \sin\psi_0 \sin\theta_0)^2 + (q_y \cos\psi_0 \sin\theta_0)^2 + (q_z \cos\theta_0)^2 + 2q_{xy} \cos\psi_0 \sin\psi_0 \sin^2\theta_0 - 2q_{yz} \sin\psi_0 \sin\theta_0 \cos\theta_0 - 2q_{xz} \cos\psi_0 \sin\theta_0 \cos\theta_0 \} \quad (17)$$

만약 청소 로봇과 같이 수평면에서만 움직이는 항체라면 $\theta_0 = 0$ 를 이용하여 다음의 간략한 결과를 얻는다.

$$\sigma_{\theta\theta}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0)^2} \{ (q_x \cos\psi_0)^2 + (q_y \sin\psi_0)^2 - 2q_{xy} \sin\psi_0 \cos\psi_0 \} \quad (18)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^2 = \frac{2\sigma^2}{(d_0)^2} \{ (q_z)^2 \} \quad (19)$$

위 식을 이용하여 자세오차를 예측하기 위해서는 $q_x^2, q_y^2, q_z^2, q_{xy}, q_{xz}, q_{yz}$ 를 알아야 하며 GPS의 경우 위성과의 거리가 멀고, 위성 수와 배치의 변화가 적으므로 사전에 관측을 통해 구해진 원하는 지역의 위치 오차 평균을 이용할 수 있다[18]. 그러나 WSN등 실내에서 사용하는 경우 설치된 비컨의 수와 배치에 따라 달라지며, 특히 거리가 가까워 시선 벡터의 변화가 심하므로 정확한 해석을 위해서는 $q_x^2, q_y^2, q_z^2, q_{xy}, q_{xz}, q_{yz}$ 를 상수 값이 아닌 원하는 위치에 대하여 (13)을 이용하여 계산된 값을 이용하여야 한다. 만약 한 지점에서의 값을 안다면 이를 이용하여 자세오차를 해석할 수 있다.

IV. 시스템 구현 및 실험

1. 자세결정 시스템의 구현

본 논문에서 제안하는 초음파와 RF를 이용한 자세결정 시스템의 노드와 비컨의 하드웨어 구성은 그림 4와 같다. 노드와 비컨은 각각 RF 파트, 초음파 회로 및 마이크로 컨트롤러로 구성되며 노드에는 기저선 벡터 측정을 위하여 두 개의 일반 노드를 이용할 수 있지만 여기서는 한 개의 초음파 회로를 추가하여 자세결정용 노드를 구성하였다. 무선통신으로는 Zigbee 통신을 이용하였으며 Chipcon사의 CC2420 칩을 이용하였다.

초음파와 RF신호의 동기는 Chipcon사의 CC2420 칩의 SFD (Start of Frame Delimiter) 신호를 이용하여 맞춘다. SFD신호는 CC2420에서 데이터 프레임 전송할 때 발생하므로 이 신호에 동기 시켜 초음파를 발진시킴으로써 송신 단에서 동기를 맞춘다. 수신 단에서는 RF신호의 도착에 따라 SFD 신호가 발생하므로 이로부터 초음파 신호의 도착시간을 측정하고 초음파의 전파속도를 곱함으로써 거리를 측정할 수 있다. 초음파 신호의 수신은 포락선 검출기를 이용하였고, 수신된 신호세기는 동작 범위와 다중경로 및 전압레벨 등의 영향을 받는다. 임계치는 이런 환경의 영향을 고려하여 가변 될 수 있도록 결정하여야 하지만 본 연구에서는 구현의 편의를 위하여 실험적으로 구한 고정된 임계치를 사용하였다. 모든 수신 단에서 같은 수신 이득을 갖도록 설정하였으며, 고정된 임계치를 이용하므로 거리가 멀수록 오차가 증가할 수 있다. 이는 신호 감쇄에 따라 이득을 증가시키거나, 가중 최소 자승법으로 위치를 구하는 과정에서 가중치를 거리에 따라 조정함으로써 보상할 수 있다. 노드가 어떤 위치에 있더라도 비

컨에서 초음파를 수신해야 하므로 지향성이 넓은 초음파 센서를 사용해야 하며 본 연구에서는 지향각이 100° 인 모델을 사용하였다.

노드와 비컨의 소프트웨어 구성은 그림 5와 같다. 한 개의 노드에 두 개의 초음파 발진기 A, B가 있으며, 먼저 초음파 발진기 A의 40kHz PWM(Pulse Width Modulation)을 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 도착할 수 있는 시간만큼 기다린 후 초음파 발진기 B의 40kHz PWM을 활성화하고 RF 패킷과 초음파를 전송한다. 초음파가 전파될 수 있는 시간만큼 기다린 후 노드에서 비컨으로 거리 측정치를 요구하는 패킷을 보내고 응답을 받는다. 대기 시간은 노드와 비컨 사이의 거리에 따라 달라지며 본 논문에서는 최대 17m의 거리를 고려하여 50msec의 대기시간을 사용하였다. 따라서 두 번의 대기시간과 측정치 수집시간이 필요하며, 현재는 6.3Hz로 자세 출력을 제공할 수 있다. 무선통신 과정에서의 패킷 손실을 고려하여 일정 시간 이내 응답이 없으면 측정치를 다시 요구하며 본 논문에서는 최대 3회까지 재시도한다. 비컨의 입장에서는 처음 RF신호를 수신하면 카운터를 구동시키고 초음파 신호가 수신되면 카운터를 멈춰 시간차를 측정한다. 같은 방법으로 초음파 발진기 B에 해당하는 시간차를 구한 후, 노드로부터 측정치를 요구하는 패킷을 받으면 두 측정치를 노드로 전송한다. 노드에서는 두 개의 거리 측정치로 초음파 발진기 A와 B의 위치를 구하고 이를 이용하여 기저선 벡터와 자세를 차례로 계산한다.

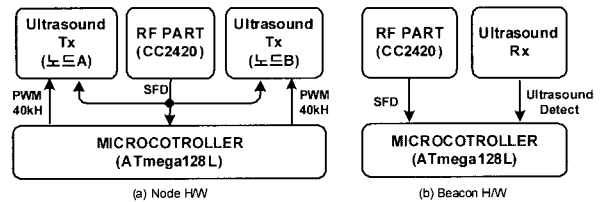


그림 4. 노드와 비컨의 하드웨어 구성.
Fig. 4. Hardware configuration of node and beacon.

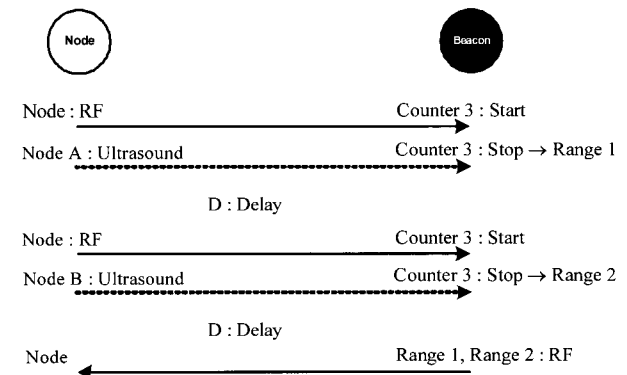


그림 5. 거리측정 흐름도.
Fig. 5. Flowchart of range measurement.

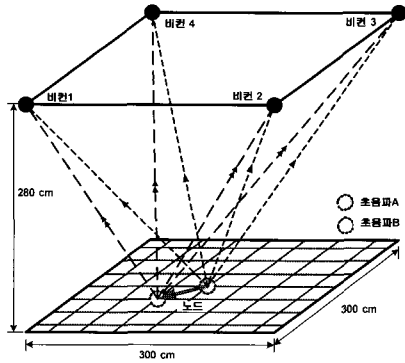


그림 6. 테스트 베드의 구성.
Fig. 6. Configuration of test bed.

2. 실험 및 결과 분석

구현된 시스템의 성능 분석을 위한 테스트 베드는 그림 6 과 같이 구성하였다. 그림에서 폭은 3m, 깊이는 3m, 높이는 2.8m이고, 구조물 각 모서리에 4개의 비컨을 설치하였다. 노드는 A, B 2개의 초음파 발진기로 구성하였으며 초음파 A를 테스트베드의 중심에 두고 초음파 발진기 B를 비컨 1 방향으로 거리 3cm인 곳에 설치하고 500개의 거리 측정치를 수집하였다. 기저선 길이에 따른 오차해석을 위하여 초음파 발진기 B를 5cm부터 80cm까지 5cm씩 거리를 증가하면서 각 지점에서 거리 측정치를 500개씩 획득하였다. 또한 노드가 움직이는 경우의 성능을 파악하기 위하여 일정한 속도로 일정한 궤적을 이동하는 자체 제작한 라인트레이서 형태의 이동형 로봇을 이용하여 동적 실험도 수행하였다.

2.1 기저선 길이에 따른 자세오차 분석

그림 7은 테스트베드에서 확보한 측정치로 가장 최소 상승법을 이용하여 초음파 발진기 A를 기준으로 초음파 B를 17개의 지점으로 이동하며 구한 상대위치 결정 결과이다. 그림에서 원점의 o는 초음파 발진기 A를 나타내며, x는 초음파 발진기 A에 대한 B의 상대위치, 즉 기저선 벡터를 나타낸다. 각 기저선에서 500개의 측정치를 이용하여 구한 초음파 B의 상대 위치오차가 대략 직경 3cm 이내에 몰리는 것을 확인할 수 있으며, 이는 한 개의 초음파를 이용하여 구한 절대 위치에 비하여 오차가 2배 증폭된 결과이다. 그림에서 기저선의 길이가 길어져도 오차 반경의 크기는 일정하며 이 이유로 기저선의 길이가 길수록 자세 오차가 줄어드는 결과를 얻게된다.

그림 8에 기저선 길이가 80cm일 때 구한 방위각과 양각을 나타내었다. 그림에서 방위각은 평균 135.7도, 표준편차는 0.22도이며, 양각의 평균은 0.03도, 표준편차는 0.24도로 나타나며 이는 초음파를 이용하여 정확한 자세를 구할 수 있음을 보여준다.

그림 9와 10에서 17개 지점에서 구한 방위각과 양각 오차의 표준 편차를 나타내었다. 그림에서 빨간색 실선은 (18)과 (19)를 이용하여 구한 자세오차의 예측치이며 파란색 x는 실제 측정치로 구한 오차이다. 실제 측정치와 예측치가 거의 비슷한 결과를 보여주며 기저선의 길이가 늘어남에 따라서 자세오차가 줄어들음을 확인할 수 있다. 그림으로부터 표준편차 1도 이하의 방위각 오차와 양각 오차를 구하기 위해서는 대략 20cm 이상의 기저선을 사용해야 함을 확인할 수 있다.

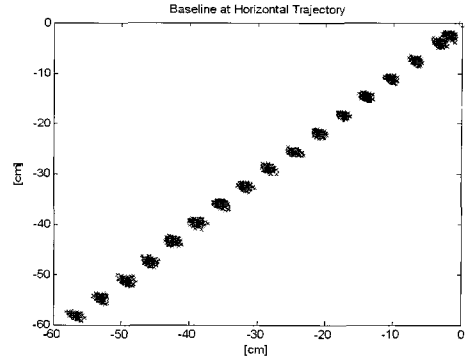


그림 7. 기저선 벡터.
Fig. 7. Baseline vectors.

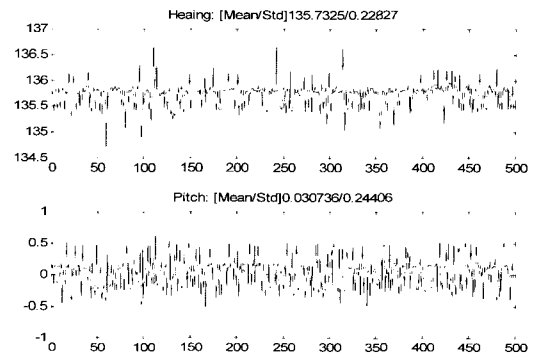


그림 8. 방위각과 양각(80cm 기저선).
Fig. 8. Heading and pitch(80cm baseline).

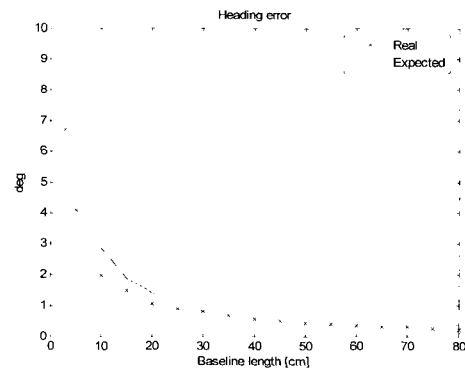


그림 9. 기저선 길이와 방위각 오차.
Fig. 9. Baseline length vs. heading error.

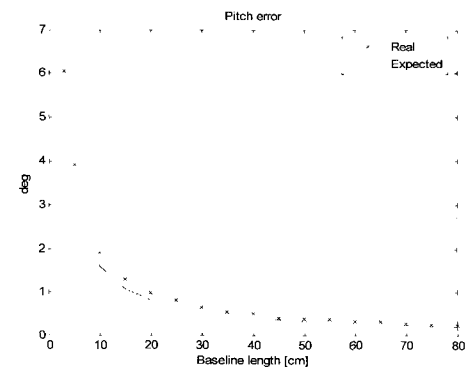


그림 10. 기저선 길이와 양각 오차.
Fig. 10. Baseline length vs. pitch error.

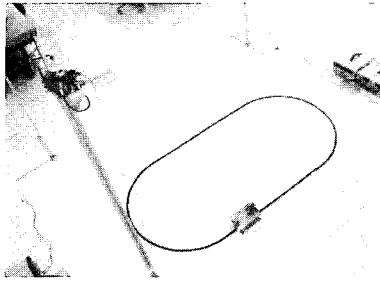


그림 11. 동적 실험 환경.
Fig. 11. Dynamic test environment.

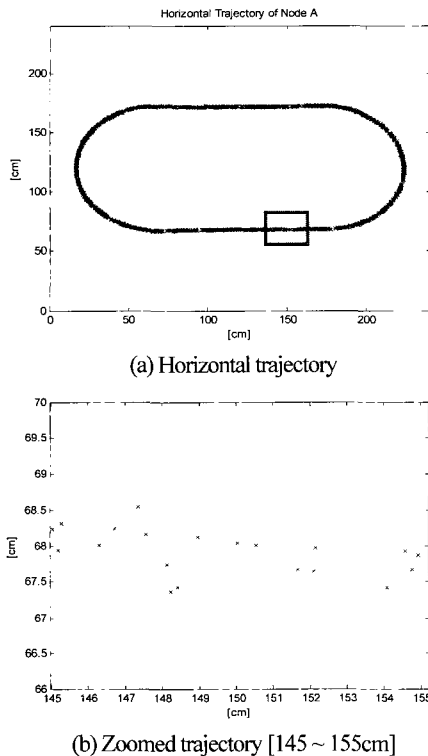


그림 12. 초음파 A의 궤적.
Fig. 12. Trajectory of ultrasonic transducer A.

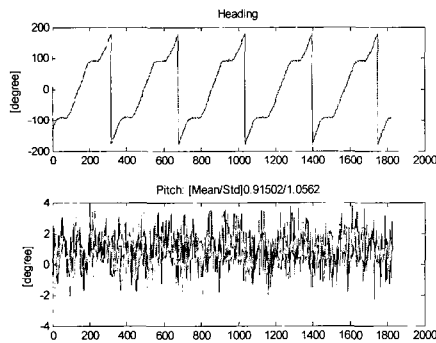


그림 13. 방위각과 양각.
Fig. 13. Heading and pitch.

무인 휠체어나 청소용 로봇의 경우 20cm 이상의 기저선을 충분히 확보할 수 있으므로 정확한 자세를 구할 수 있을 것으로 예측된다. 정확도에 대한 요구는 응용 분야에 따라 다르며 만약 기저선 길이를 늘일 수 없는 상황에서 정확한 자

세를 원하면 (1)에서 거리측정 오차 w'_A 를 줄여야 한다. 본 논문에서는 실험적으로 w'_A 의 표준편차 σ 를 3.8mm로 두었으며, 더 정밀한 초음파 송수신 회로를 이용하는 경우 더 적은 거리측정 오차가 발생하며 더 정확한 자세를 구할 수 있다.

2.2 이동형 로봇을 이용한 동적 실험

구현된 시스템의 성능을 움직이는 환경에서 파악하기 위하여 이동 로봇의 역할을 하는 라인트레이서를 제작하였으며 라인트레이서에 장착된 두 초음파 발진기 A, B의 바닥에서 높이는 약 15.5cm, 사이 거리는 20cm이고 수평을 유지하도록 하였다. 그림 11에 실험을 위한 환경을 나타내었으며 궤적은 반경 1m인 원을 두 개 연결하여 만들었으며 전체 길이는 8.23m이고 4개 비컨을 (0m, 0m, 3.02m), (3m, 0m, 3.02m), (0m, 3m, 3.02m), (3m, 3m, 3.02m)에 설치하였다. 라인트레이서를 1분에 한 바퀴 주행하도록 속도를 13.8cm/sec으로 제어하였다. 5바퀴를 주행하면서 총 1826개의 측정치를 구하였으며 이는 앞의 시스템 구현에서 설명한 것과 같이 초음파의 전달을 보장하는 대기시간에 따른 결과이며 1초에 대략 6번 즉 6Hz로 자세를 구할 수 있었다.

그림 12에 초음파 발진기 A를 이용하여 구한 라인트레이서의 수평면에서의 궤적을 나타내었다. 그림에서 5번 주행 결과가 1.5cm 이내에서 물려있음을 볼 수 있다. 그림 13에 초음파 발진기 A, B를 이용하여 구한 자세를 나타내었다. 그림에서 방위각은 5번 주행 결과를 정확히 나타내며, 양각의 표준편차는 1.05도로 앞 절에서의 예측과 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 이상의 결과로 구현한 자세결정 시스템이 움직이는 경우에도 정확한 위치와 자세를 제공할 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 초음파와 WPAN을 이용하여 실내 환경에서 적용할 수 있는 위치 및 자세 결정기법을 제시하고, 이를 실제 구현을 통하여 검증하였다. 구현된 시스템은 1.5cm 이내의 정확도를 갖는 위치와 기저선 길이가 80cm인 경우 0.2도 정도의 정확도를 갖는 자세를 6Hz 이상으로 제공할 수 있다. 또한 오차해석을 수행하였으며 이 결과를 이용하여 원하는 초음파 송, 수신기의 정확도, 기저선 벡터의 길이, 항체의 자세에 따른 자세 정확도를 예측할 수 있으며, 역으로 원하는 정확도를 만족시키기 위한 설계에도 사용할 수 있음을 보였다. 오차해석과 실험을 통하여 기저선의 길이와 자세오차가 반비례하며 20cm 이상의 기저선을 확보하면 1도 이하의 오차로 방위각과 양각을 구할 수 있음을 확인하였다. 이동 로봇을 이용한 실험결과 항체가 움직이는 경우에도 예측한 정확도로 연속적인 위치와 자세를 구할 수 있었다. 본 논문의 결과는 위치와 자세를 동시에 필요로 하는 청소 로봇, 무인 휠체어의 제어 등의 응용에 효과적으로 사용될 수 있으며 거리측정의 정확도를 높인다면 경구용 내시경에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[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] K. Lorincz and M. Welsh, "Motetrack: A robust, decentralized approach to rf-based location tracking," *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, pp. 297-302, 2006. 6.

[5] M. Sugano, T. Kawazoe, Y. Ohta, and M. Murata, "Indoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network based on ZigBee standard," *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," 7th annual international conference on Mobile computing and networking, pp. 166-179, Rome, Italy, 2001.

[8] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," *Proc. IEEE Infocom*, pp. 775-784, Tel-Aviv, Israel, April 2000.

[9] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, and J. Gibbons, "The active badge location system," *ACM Transactions on Information Systems*, 10(1):91-102, January 1992.

[10] Ubisense homepage. <http://www.ubisense.net/>

[11] N. B. 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] 이동환, 김수용, 이만형, "유비쿼터스 컴퓨팅의 실내 측위 기술을 위한 U-SAT 시스템의 적용에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 12 권, 제 9 호, pp. 876-877, 2006. 9.

[14] 이재호, 서홍석, 성태경, 박찬식, 이상정, "A Two-antenna 자세 결정용 GPS 수신기와 DR 센서의 통합 시스템," 한국 자동제어 학술회의 논문집, 2000. 10.

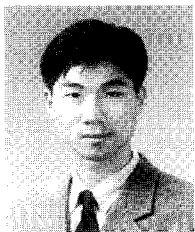
[15] 권인소, 장기정, 김성호, 이왕헌, "인공표식과 자연표식을 결합한 강인한 자기위치 추정," 한국정밀공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, 2003.

[16] 윤국진, 장기정, 김성호, 권인소, "이동로봇을 위한 컬러 표식기반 자기위치 추정기법," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 9 권, 제 7 호, pp. 749-757, 1997.

[17] 손석보, 박찬식, 이상정, "이차원 자세 측정용 GPS 수신기 설계," 한국군사과학기술학회 논문지 제 3 권 제 2 호, pp. 131-139, 2000.

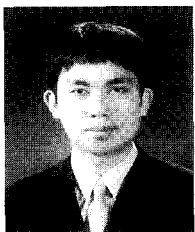
[18] 박찬식, 지규인, 이영재, 이장규, "GPS 반송파 위상을 이용한 정밀 자세 측정," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3 권, 제 6 호, pp. 602-612, 1997. 12.

[19] 심주영, 이형근, "진폭변조 확산대역 초음파 측위 시스템," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 12 권, 제 10 호, pp. 996-1001, 2006. 10.



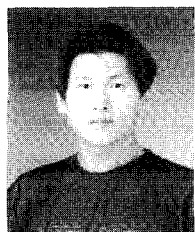
김 승 범

1975년 8월 15일생. 1998년 충남대학교 전자공학교육과 학사. 2000년 충남대학교 전자공학과 석사. 2003년 충남대학교 전자공학과 박사수료. 2003년~현재 한국통신산업(주) 전임연구원. 관심분야는 GNSS, WSN.



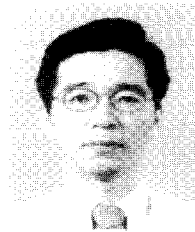
강 동 연

1980년 3월 17일생. 2006년 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 학사. 2006년~현재 충북대학교 제어계측공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 개인항법, 무선 센서네트워크.



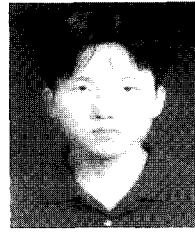
이 건 우

1976년 12월 7일생. 2002년 충남대학교 전자공학과 학사. 2004년 충남대학교 전자공학과 석사. 2004년~현재 충남대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 GNSS, Anti-Jamming.



박 찬 식

1961년 10월 1일생. 1984년 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1986년, 1997년 동대학원 석사, 박사. 1984년~1997년 삼성전자 정보통신 책임연구원. 1997년~현재 충북대학교 전기전자공학부 부교수. 관심분야는 GNSS, 자세결정, ITS, WSN.



윤 희 학

1982년 8월 17일생. 2007년 충북대학교 전자공학과 학사. 2007년~현재 충북대학교 제어계측공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 GNSS, 센서네트워크.



이 상 정

1957년 8월 15일생. 1979년 서울대학교 전자공학과 학사. 1981년 서울대학교 전자공학과 석사. 1987년 서울대학교 제어계측공학과 박사. 1988년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수. 관심분야는 강인 제어, 항법 시스템.