

## 초음파 및 무선 통신 파를 이용한 자기 위치와 비컨 위치 인식 시스템

윤정용\*(서울시립대), 정규식(서울시립대), 신동헌(서울시립대)

### Robot localization and calibration using Ultrasonic and Ratio Frequency

J. Y. Yoon(Dept. of Mechanical and Information Eng., UOS), K. S. Jung(Dept. of Mechanical and Information Eng., UOS), D. H. Shin(Dept. of Mechanical and Information Eng., UOS)

#### ABSTRACT

This paper presents a method for the robot localization and calibration using the ultrasonic and the radio frequency. The distance between the receiver and a beacon can be computed by using the difference between times of flight. The presented method uses the gradient of the maximum amplitude of the ultrasonic in order to measure the time of flight precisely. The measured three distances between the receiver and the beacon are used to compute the robot position by the direct inverse method and the iterated least square approximation method. This paper is defined the calibration as the problem to find the location of 3 beacons and 3 robots, and presents 3 methods for it and found the 2B2R method as the best among them.

**Key Words:** Localization(위치 인식 시스템), Calibration(측정법), Beacon(beacon), Ultrasonic(초음파), Radio Frequency(무선 통신 파)

#### 1. 서론

위치 인식 시스템은 이미 Ubiquitous 또는 Pervasive computing 의 중요한 부분으로 로봇뿐만 아니라 사람을 포함한 모든 주위 환경의 물체를 대상으로 하고 있다. 특히 로봇분야에서는 통상 localization 이라고 불리는 지능형 로봇의 자기 위치 측정 시스템 (Localized Position Sensing System)을 다루고 있다. 현재 연구되고 있는 위치인식시스템을 범주 영역에 따라 분류하면 매크로 위치인식 시스템과 매크로 위치 인식 시스템이 커버하지 못하는 실내 즉 가정, 빌딩 또는 공장에서 사용되는 로봇의 위치 등을 찾는 마이크로 위치인식시스템 등으로 분류 할 수 있고, 그 중 마이크로 위치 인식 시스템<sup>1</sup>은 상대위치 측정법과 절대위치 측정법 등으로 분류 할 수 있다. 그 중 본 논문에서 다루는 위치 인식 시스템은 마이크로 위치 인식 시스템 중 절대위치 측정법으로써 Mobile robot 의 정확한 위치 측정 시스템이다. 현재까지 연구된 논문<sup>2-5</sup>들을 살펴보면 기본구성은 초음파와 무선 통신 파의 시간차이를 이용하여 실내에 고정되어 있는 beacon 과

로봇에 설치되어 있는 수신기 사이의 거리를 측정 한 후 세 개 이상의 거리로써 로봇의 위치를 찾아 내는 구조이다.

지금까지는 좁은 방에서 3~4 개의 beacon 을 사용한 연구<sup>6-8</sup>만이 진행되었다. 하지만 본 논문에서는 건물전체에 몇 백 개의 beacon 이 사용되고 계속적으로 추가되는 경우의 문제를 풀고자 한다. 이러한 경우 첫 번째 제기되는 문제는 beacon 의 위치를 파악하는 calibration 이다. 즉 몇 백 개의 beacon 하나하나마다 사람이 직접 측정하는 것은 불가능하다 그래서 본 연구에서는 우선 3 개의 beacon 과 3 개의 로봇의 위치를 찾는 것을 calibration 문제로 정의하고 이후 나머지 beacon 은 현재 파악된 좌표 계와 beacon 의 위치로부터 측정할 수 있다고 가정한다.

그리고, beacon 과 리시버 사이의 거리는 ultrasonic sound(US)와 radio frequency(RF)의 도착시간차를 이용하여 측정하였는데, 이전에 사용되던 threshold 방식<sup>9</sup>보다 정밀한 측정법으로써 기울기법을 제시하였다. 이 문제는 본 논문의 2 장에서 다루고, calibration 문제는 3 장에서 다룬다.

## 2. 위치 측정

본 연구에서 사용된 시스템은 Fig. 1 과 같이 리시버가 RF 통신으로 각 beacon 을 호출하고, 호출된 beacon 이 송출한 RF 와 초음파를 리시버가 수신하여, 그 도달시간차를 이용하여 각 beacon 과 리시버 사이의 거리를 계산하여 리시버의 위치를 측정하는 시스템이다.

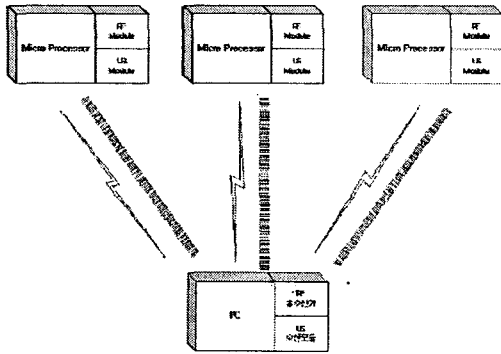


Fig. 1 Basic composition of system

### 2.1 거리 측정

beacon 과 로봇 사이의 거리  $r$  은 US 신호의 도착시간( $T_{US}$ )과 RF 신호의 도착시간( $T_{RF}$ ) 차이를 이용하여 식 (1)과 같이 계산한다. RF 의 속도는 빛의 속도와 같으므로 RF 의 속도는 0 으로 가정 할 수 있다.

$$r = c_{US}(T_{US} - T_{RF}) \quad (1)$$

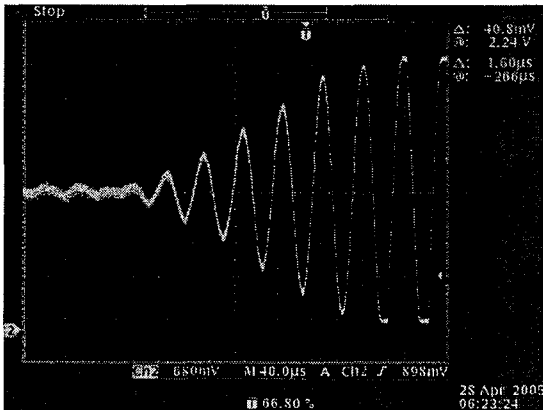


Fig. 2 measurement of the ultrasonic range using gradient method

일반적으로 US 신호의 도착시간 측정에 사용되는 threshold 법은 측정거리가 멀어짐에 따라 리시버에 들어오는 신호가 일정치 않고 threshold(기준값)

에 의하여 정확도가 떨어질 수 밖에 없다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여 기울기 방법을 제안하였다. 기울기 법은 US 의 신호가 들어올 때 Fig. 2 와 같이 그 진폭의 기울기가 일정한 것을 이용하여 일정 주기의 진폭을 측정하여 기울기를 계산하여 최초 US 신호가 들어온 시간을 측정하는 것이다 threshold 법보다 정밀한 시간을 측정하였기 때문에 실제 거리와 좀 더 일치한 결과를 얻을 수 있다.

### 2.2 위치 측정

거리 측정을 이용하여 로봇과 beacon 사이의 3 개 이상의 거리 정보를 알고 있으면 로봇의 위치는 매크로 위치 인식 시스템 등에서 사용되는 방법을 응용하여 아래와 같은 방법으로 측정하였다.

#### 2.2.1 Direct inverse method

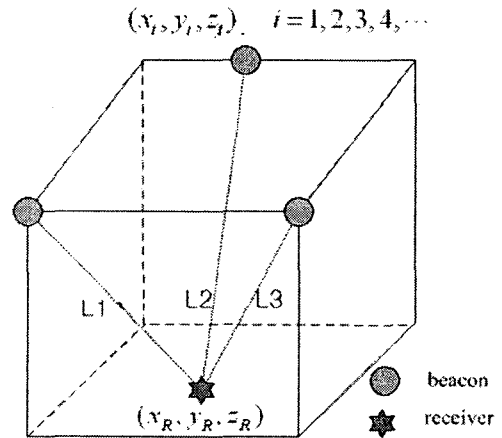


Fig. 3 location of beacon and robot

Fig. 3 과같이 각 beacon 의 위치  $(x_i, y_i, z_i)$  는 측정을 통해서 구한 후 RF 와 US 의 도착 시간을 측정한다. 두 점 사이의 거리 구하는 공식을 이용한 후 정리하면 식(2)와 같다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \\ -2x_4 & -2y_4 & -2z_4 \end{bmatrix}}_H \underbrace{\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} \rho_1 - s_1 \\ \rho_2 - s_2 \\ \rho_3 - s_3 \\ \rho_4 - s_4 \end{bmatrix}}_{R_a} + \underbrace{\begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}}_{R_a}$$

$$(where, s_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, u = x_R^2 + y_R^2 + z_R^2) \quad (2)$$

$HX = R_u + uR_b$  에  $H^* = (H^T H)^{-1} H^T$  을 양변에 곱해준 후 정리하면  $u$  에 관한 2 차 방정식을 얻을 수 있다.  $u$  값을 다시  $u = x_R^2 + y_R^2 + z_R^2$  에 대입하면 로봇의 좌표를 얻을 수 있다.

이와 같은 Direct inverse method 는 반복 없이 한번에 로봇의 위치를 찾을 수 있지만, 측정값의 정확도에 따라 오차의 크기가 결정된다. Ultrasonic 은 온도 및 실내의 기하학적 위치에 의하여 많은 영향을 받으므로 그 정확도의 신뢰를 높이기 위해서는 다른 방안이 고안되어야 한다.

### 2.2.2 Iterated least square approximation method

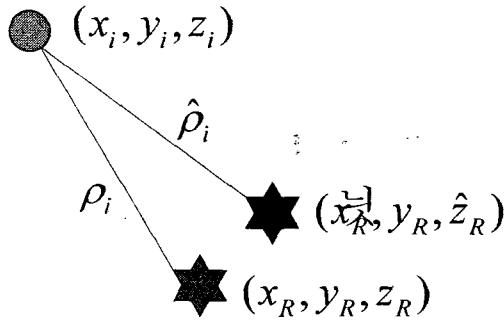


Fig. 4 Virtual robot position

Fig. 4 과 같이 로봇의 위치를  $(\hat{x}_R, \hat{y}_R, \hat{z}_R)$  로 가정하고 실제 로봇의 위치  $(x_R, y_R, z_R)$  로 한 후 실제 거리  $\rho_i$  와 가정에 의한 거리  $\hat{\rho}_i$  를 두 점 사이의 거리 구하는 공식으로 구한 후 정리하면 식(3) 과 같이 된다.

$$\Delta \rho = H \Delta x \rightarrow \Delta x = H^{-1} \Delta \rho$$

$$\Delta \rho = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} \end{bmatrix} \quad \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta z_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)에서 구한  $H \Delta x - \Delta \rho$  를 이용하여 least square approximation 을 적용하면 식(4)을 구할 수 있다

$$\Delta x_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \rho \quad (4)$$

식(4)에서 구한  $\Delta x_{LS}$  값을  $(\hat{x}_R, \hat{y}_R, \hat{z}_R)$  의 초기값인  $\hat{x}_0$  에 더하여  $\hat{x}_1$  값을 구한다.  $|\Delta x_{LS}| < \varepsilon$

(where  $\varepsilon$  은 설정오차 값) 이면  $\hat{x}_1$  이 robot 의 위치이고,  $|\Delta x_{LS}| \geq \varepsilon$  이면 다시  $\hat{x}_1$  을 초기값으로 하여 위와 같은 방법을 반복하여 robot 의 위치를 구할 수 있다. Iterated Least square approximation 의 방법은 상당히 정확한 위치를 찾아내지만 초기값이 잘못 설정된 경우 여러 번의 반복을 해야만 하는 단점을 가지고 있다.

따라서 초기값을 direct inverse solution 방법을 사용하여 반복횟수를 줄일 수 있다.

### 3. Calibration

Calibration 이란 로봇의 위치를 찾기 위하여 사용되는 beacon 의 좌표를 찾아내는 것이다. 기본적으로 로봇의 좌표를 알기 위해서는 앞에서 사용한 direct inverse method 와 iterated least square approximation method 에 적용하기 위한 비컨 3 개의 좌표를 알아야 한다. 또한 beacon 이 추가되었을 경우에는 로봇 3 개의 좌표를 알고 있으면 새로이 추가되는 beacon 의 좌표를 알 수 있다.

beacon 의 좌표를 측정하기 위한 방법으로는 거리를 측정하기 위해서 줄자나 레이저 거리측정기, 혹은 초음파를 이용하여 측정하는 방법이 있다. 레이저 거리측정기의 경우 실제 로봇이 사용될 가정이나 회사 등에서는 사용이 용이하지 않고 정밀도도 떨어지기 때문에 사용하기에 적합하지 않다. 줄자를 사용하여 측정할 경우 수직측정의 정밀도 (1mm)가 비 수직의 정밀도(5mm)보다 높다. 비수직인 경우 환경적인 제약과 수평을 맞추는 문제가 있기 때문이다. 초음파를 이용하여 측정할 경우엔 로봇에 부착된 리시버와 비컨 사이의 거리만이 측정이 가능하다. 줄자에 비하여 어느 공간에서나 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있지만 그 정밀도는 1cm 정도 이고 이 또한 기기의 성능에 의존한다.

2 차원 이상의 상대 좌표를 측정하기 위해서는 줄자등과 더불어 각도기가 필요하게 된다. 따라서 그 정밀도는 신뢰할 수가 없다.

위와 같은 사실들을 바탕으로 다음과 같은 가정을 하였다.

- 줄자 측정은 수직측정을 선호하고 비 수직 측정은 가능하면 피한다.
- 각도기를 사용한 2 차원적인 상대 좌표 측정의 개수를 줄인다.
- 초음파를 이용한 측정의 개수를 최대한 줄인다.

로봇의 위치 측정 시 반드시 필요한 비컨 3 개와 beacon 이 추가되었을 경우에 필요한 로봇 3 개의 좌표를 측정하기 위해 사용되는 거리측정개수와

2 차원적인 상대좌표 측정개수 및 초음파를 이용한 측정 개수를 계산하여 calibration 방법들을 비교하였다.

### 3.1 calibration 3B 방법

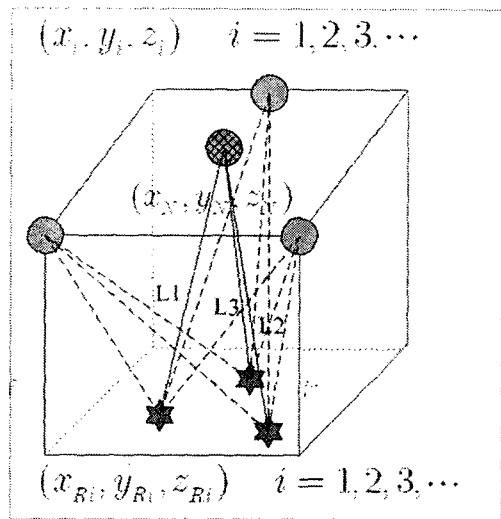


Fig. 5 The method of calibration 3B

이 방법은 기본적으로 3 개의 beacon 의 절대 위치를 측정하여 그로부터 로봇의 위치를 측정하는 방법이다. 추가되는 beacon 의 위치를 측정하기 위해서 3 개의 로봇의 위치를 측정해야 한다. beacon 중 한 개의 위치  $(x_1, y_1, z_1)$  를 기준점  $(0,0,0)$  으로 정하면 나머지 두 개의 beacon 의 좌표는  $(x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$  가 되는데, 이 때 기준점으로 정한 beacon 과 그 다음에 설치될 beacon 의 방향을 x 축으로 정하면  $y_2$  는 0 이 된다.

그러므로, 나머지 좌표 중  $x_2, z_2, z_3$  는 1 차원적인 거리 측정으로 결정할 수 있고,  $x_3, y_3$  는 반드시 2 차원적인 상대좌표 측정을 통하여 결정해야 한다. 또한 3 개의 로봇의 좌표를 측정하기 위하여 각각의 로봇은 3 개의 초음파 측정을 해야 하므로 총 9 번 해야 한다.

### 3.2 calibration 3R 방법

이 방법은 앞 절의 방법과 반대로 로봇이 위치를 정확히 측정한 후 그 좌표를 이용하여 beacon 의 좌표를 찾는 방법이다. 이 방법에서는 기준점은  $(x_{R1}, y_{R1}, z_{R1})$  이 되고 앞 절에서와 마찬가지로  $(0,0,0)$  으로 가정할 수 있다. 앞 절과 유사하게 측정해야 할 좌표는  $(x_{R2}, y_{R2}, z_{R2}), (x_{R3}, y_{R3}, z_{R3})$  이다. 만약, 바닥이 수평이라면  $z_{R2}, z_{R3}$  는 기준점의  $z_{R1}$  과 같으므로 0 으로 놓을 수 있다.

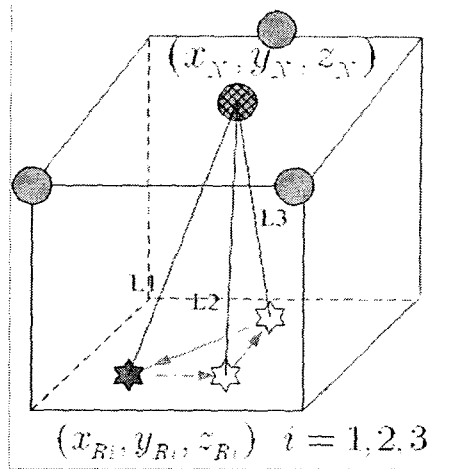
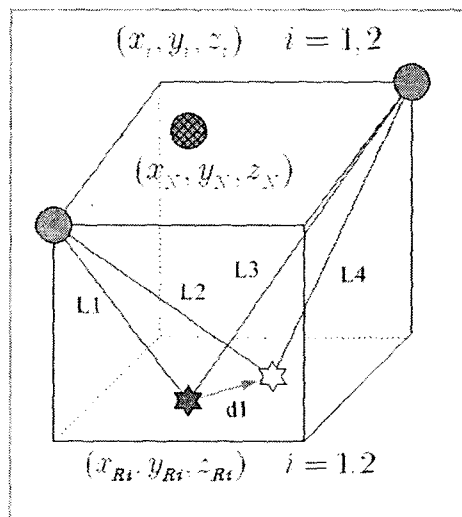


Fig. 6 The method of calibration 3R

또한 로봇 1 에서 로봇 2 방향을 x 축으로 가정하면  $y_{R2}$  역시 0 이 된다. 따라서  $x_{R2}$  는 1 차원적인 거리 측정을 이용해서 구할 수 있고,  $x_{R3}, y_{R3}$  는 2 차원적인 상대 좌표를 이용하여 구해야 한다. 3 개의 beacon 의 좌표를 알기 위한 초음파 측정은 각 beacon 당 3 개씩 총 9 개이다.

### 3.3 calibration 2B2R 방법

Fig. 7 The method of calibration 2B2R



이 방법은 앞선 두 가지 방법을 혼합한 방법으로서 두 개의 beacon 과 두 개의 로봇의 좌표를 측정하여 추가되는 beacon 과 로봇의 좌표를 찾아내는 방법이다. 먼저 기준점은  $(x_{R1}, y_{R1}, z_{R1}) = (0,0,0)$  이 되고, 로봇 1 에서 로봇 2 의 방향을 x 축으로 정하면  $y_{R2}$  는 0 이 된다. 또한, 바닥이 평면이라고 가

정하면  $z_{R2}$  는 0 이 되므로 로봇 사이의 거리  $d_1$  만 거리 측정하면  $x_{R2}$  가 결정된다.

beacon 의 경우 fig. 8 과 같이 beacon 과 로봇의 사이의 거리 L1, L2 를 초음파를 이용한 거리측정을 하고, 높이  $z_1$  를 거리측정을 이용하여 측정한 후 식(5)와 같은 삼각법을 사용하면 beacon 의 좌표를 측정 할 수 있다. 나머지 beacon 들도 같은 방법으로 측정하므로 beacon 측정 시 거리측정은  $z_1, z_2, z_3$  이고, 초음파를 이용한 측정개수는 각 beacon 당 2 개씩 6 개가 된다. 단. 이 경우 앞의 두 방법과 직접적인 비교를 위하여 추가적으로 3 번째 로봇의 좌표를 알기 위하여 초음파를 이용한 측정 3 개가 추가된다.

$$L1^2 = x_1^2 + h^2$$

$$L2^2 = (d_1 - x_1)^2 + h^2 \quad (5)$$

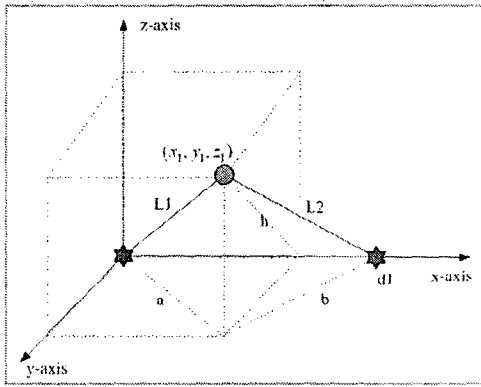


Fig. 8 trigonometry at the 2B2R method

2B2R 방법은 table 1 에서 비교한 것과 같이 3B, 3R 방법에 비하여 2 차원이상의 상대좌표 측정을 하지 않고 정밀도가 높은 1 차원적인 거리측정만을 사용하기 때문에 앞에서 가정한 것에 가장 적합한 방법이라 할 수 있다.

Table 1 the comparison of each method by measuring

method	Distance measure	Coordinate measure	Ultrasonic measure
3B	2	3	9
3R	1	2	9
2B2R	4	0	9

#### 4. 결론

본 논문에서는 US 신호 측정시 사용되던 threshold 법의 단점을 해결하는 기울기 법을 제시하였다. 기울기 법에 의하여 threshold 방법보다 정확한 US 의 도착시간을 측정하여 거리측정시의 정밀도를 높였다.

또한, beacon 이 건물 전체로 확장됨에 따라 제기되는 calibration 문제를 세 개의 beacon 과 세 개의 로봇의 위치를 찾는 것으로 정의하고, calibration 방법들을 제시하였다. Beacon 의 위치에 기준을 둔 3B 방식과 로봇의 위치에 기준을 둔 3R 방식 그리고 3B 방식과 3R 방식을 혼합한 2B2R 방식을 비교, 분석 하였다. 거리를 측정하는 개수와 2 차원적인 상대좌표를 측정하는 개수, 초음파를 이용하여 측정하는 개수를 비교하여 2B2R 방식이 가장 효과적이라는 것을 발견하였다.

#### 참고문헌

1. Tatsuo Arai, Eiji Nakatno., Development of Measuring Equipment for Location and Direction Using Ultrasonic Waves, Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 152-156, 1983.
2. N. Priyantha, A. Chakraborty and H. Balakrishnan., Match Cricket Location Support System, Proc. 6th ACM Mobicom Conf., pp 32-43, 2000.
3. N. B. Priyantha, Allen K. L. Miu, Seth Teller., Match Cricket Compass for Context Aware Mobile Applications, Proc. 7th ACM Mobicom Conf., ACM Press, pp 1-14, 2001.
4. J. Hightower, G. Borriello., Location Systems for Ubiquitous Computing, IEEE, pp57-66, 2001
5. R. Want et al., Match Active Badge Location System, ACM Trans, Information System, pp91-102, 1992
6. S.Y lee, J.H Jin., Matchelf-localization of a Mobile Robot Using Global Ultrasonic Sensor System, Journal of CASE, Vol. 9, pp145-151, 2003.
7. S.Y Kim, D.H Lee, H.T An, M.H Lee., Matcherformance Analysis of Ultrasonic Positioning System Using DGPS, IECON, 2004.
8. Fernando Figueroa, Ajay Mahajan., Match Robust Method to Determine the Coordinates of a Wave Source for 3-D Position Sensing, Transactions of ASME, Vol. 116, pp 505-511, 1994.
9. Billur Barshan., "Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurement," Meas. Sci. Technol. . Vol. 11, pp 45-50, 2000.