

# 확장칼만필터를 이용한 무인잠수정의 3차원 위치평가

임종환<sup>#</sup>, 강철웅<sup>\*</sup>

## 3-D Localization of an Autonomous Underwater Vehicle Using Extended Kalman Filter

Jong Hwan Lim<sup>#</sup>, Chul Ung Kang<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

This paper presents a 3-D localization of an autonomous underwater vehicle(AUV). Conventional methods of localization, such as LBL or SBL, require additional beacon systems, which reduces the flexibility and availability of the AUV. We use a digital compass, a pressure sensor, a clinometer and ultrasonic sensors for localization. From the orientation and velocity information, a priori position of the AUV is estimated based on the dead reckoning. With the aid of extended Kalman filter algorithm, a posteriori position of the AUV is estimated by using the distance between the AUV and a mother ship on the surface of the water together with the water depth information from the pressure sensor. Simulation results show the possibility of practical application of the method to autonomous navigation of the AUV.

**Key Words** : AUV(자율무인잠수정), Extended Kalman(확장칼만필터), Localization(위치평가), Mother ship(모선)

### 1. 서론

수중 로봇 분야는 해저의 환경에 대한 탐사, 오염으로부터 해저 자원의 보호, 그리고 해저 자원들을 효과적으로 인간의 삶에 이용할 수 있도록 하는데 그 중요성이 있다. 그러나 해저는 “인간 활동이 자유롭지 않다”, “인간의 감지능력이 저하된다”, “전파를 사용할 수 없다.” 라는 열악한 환경조건 등으로 인해 달과 화성까지도 탐사가 가능한 현재의 로봇 기술로도 해저 탐사가 어려운 실정이다.

현재 상업적으로 이용되는 잠수정은 대부분이 원격 조작 형 잠수정(Remotely Operated Vehicle : ROV), 또는 유인 잠수정이다. ROV나 유인 잠수정은 작업 비용이 과다하게 소요될 뿐만 아니라 조작자의 많은 노력이 필요하다. ROV의 통신 방법은 유선을 통한 양방향 통신방법인데 통신 케이블에 발생하는 유체저항력 때문에 잠수정의 이동을 방해하여 항법을 어렵게 만들 뿐만 아니라, 에너지 소모가 과다하고 케이블이 끊어져 10% 정도의 잠수정이 케이블 절단에 의해 분실되고 있는 것으로 조

접수일: 2004년 2월 9일; 게재승인일: 2004년 4월 9일

<sup>#</sup> 교신저자: 제주대학교 생산공학과

E-mail jhlim@cheju.ac.kr Tel. (064) 754-3712

<sup>\*</sup> 제주대학교 생산공학과

사된 바 있다. 또한 조작자가 탑승한 모선이 필요한데, 모선의 일일 작동 부대비용이 약 20,000 달러 이상인 것으로 알려져 있다. 따라서 ROV는 비용이나 안전문제 등으로 인해 그 용도가 극히 제한적이다.

이에 따라 AUV의 필요성이 점차 확대되어 다양한 연구들이 진행되어 왔으며, 그 결과 약 47 종류의 조작자의 노력이 획기적으로 줄어드는 AUV가 개발되었다<sup>1</sup>. 그러나 아직은 완전히 인간의 도움이 필요 없을 정도의 자율성을 갖는 잠수정은 개발되지 못하고 있다. AUV 개발에 있어서 크게 걸림돌이 되고 있는 문제는 수중에서의 항법, 수중 통신, 그리고 고밀도 고효율의 에너지 공급 등이다.

잠수정의 항법에 있어서 가장 큰 문제는 잠수정의 위치평가이다. 육상에서는 엔코더나 GPS 등을 이용하여 위치평가가 가능하지만 수중에서는 모두 불가능하다<sup>2</sup>. 현재 잠수정의 위치를 추적하는 방법으로 이용되는 것은 외부 응답기를 설치하여 그 응답신호로서 위치를 평가하는 Acoustic Long Base Line (LBL), Short Base Line (SBL), Ultra Short Base Line (USBL)이 주종이다<sup>3</sup>. 그러나 이 방법은 작업 영역 부근 해저에 사전에 음파 표식장치(beacon)를 설치하여야 하므로 현실성이 떨어지며 잠수정의 작업 영역이 제한될 뿐만 아니라 설치비용 또한 아주 고가이며 음파 beacon이 설치되지 않은 영역에서는 작업이 불가능하다<sup>4</sup>.

또 다른 방법으로는 초음파 센서를 이용하여 육상 로봇분야에서와 같이 주위 환경정보로부터 상대적으로 위치를 추정하는 방법들도 연구되었다<sup>5</sup>. 이와 같은 방법은 육상 환경에서 초차 초음파 센서의 넓은 지향각, 다중반사경로현상 등으로 인해 그 신뢰성 및 정밀도면에서 한계가 있는 만큼 해상 환경에의 적용은 무리가 있다<sup>6</sup>.

국부 항법(local navigation)은 장애물 감지, 회피를 위한 경로계획, 그리고 경로제어가 가장 중요한 이슈이다. 만약 국부 항법에 잠수정의 위치정보(x, y, z)만 제공이 된다면 초음파, 또는 비전센서 등을 이용한 지금까지 개발된 육상 로봇분야의 여러 가지 방법들이<sup>7,9</sup> 거의 그대로 적용될 수 있다. 결국 잠수정의 항법에서 가장 중요한 것은 위치 판단(localization)이며 이것이 해결된다면 잠수정의 자율 항법 구현 가능성이 상당히 높다고 할 수 있다.

본 연구는 AUV의 3차원 위치평가에 관한 것으로서, 기존의 LBL, SBL 등과는 달리 외부의 추가

적인 센서의 도움 없이 모선과의 상대적인 거리로부터 AUV의 3차원 위치를 추적할 수 있는 방법을 제안한다. 시스템은 해수 표면에 작동하는 모선과 수중의 잠수정이 한 조로 구성된다.

모선은 기존의 유인 조사선도 가능하지만 부대비용등을 고려할 때 원격제어 형 전용소형 무인 탐사선을<sup>10,11</sup> 가정한다. 위치평가는 비교적 저가이며 데이터 처리가 용이한 디지털 컴퍼스, 수압센서, 그리고 경사센서의 정보 및 초음파센서로부터의 모선과 잠수정 사이의 상대거리 정보를 이용하여 확장 칼만필터 방법을 적용하여 수행한다.

## 2. 무인잠수정의 위치평가

### 2.1 시스템 모델

Fig.1은 시간  $k$ 에서 무인 잠수정(Unmanned Underwater Vehicle : UUV)의 자세에 따른 속도성분을 나타낸다.  $x$ 축은 경도방향,  $y$ 축은 위도방향, 그리고  $z$ 축은 고도방향과 일치한다. 그림에서  $\bar{v}$ 는 잠수정의 속도,  $\lambda$ 는  $x$ 축에 대한 잠수정의 방향각, 그리고  $\phi$ 는 수평면에 대한 잠수정의 경사각을 나타낸다. 각 속도 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \phi(k) \cos \lambda(k) \\ V \cos \phi(k) \sin \lambda(k) \\ V \sin \phi(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

시간  $k$ 에서  $k+1$ 동안의 이동거리를  $d(k)$ , 자세 각 변화를 각각  $\Delta \phi(k)$ ,  $\Delta \lambda(k)$ 라 하면 시간  $k+1$ 에서 잠수정의 위치 및 자세를 다음과 같이 모델링하였다<sup>9</sup>.

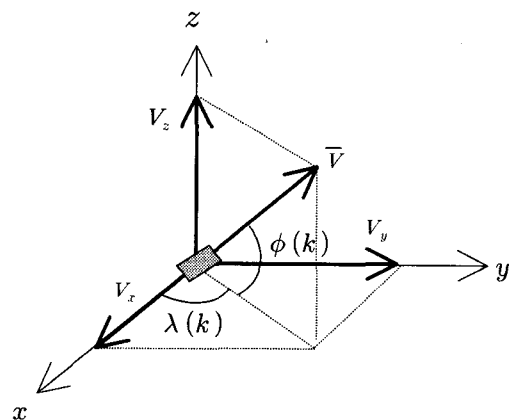


Fig.1 Velocity components of the UUV

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ z(k+1) \\ \phi(k+1) \\ \lambda(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) + d(k)\cos\phi\cos\lambda(k) \\ y(k) + d(k)\cos\phi\sin\lambda(k) \\ z(k) + d(k)\sin\phi(k) \\ \phi(k) + \Delta\phi(k) \\ \lambda(k) + \Delta\lambda(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $d(k)$ 는  $V\Delta t$  이다.

식(2)를 이용한 위치추적을 Dead Reckoning(DR)이라하며 DR에 의한 위치추적은 잠수정의 속도나 방향각에 대한 오차가 없을 때만 가능한데, 그 이유는 잠수정의 속도나 방향에 대한 오차가 발생하여 거리의 증가에 따라 무한히 커지기 때문이다.  $X(k)$ 를  $[x(k), y(k), z(k), \phi(k), \lambda(k)]^T$ 로 정의하고 발생하는 오차를 고려한 시스템 모델을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X(k+1) &= F(X(k), U(k)) + w(k), \\ w(k) &\sim N[0, Q(k)] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $F(X(k), U(k))$ 는 식(2)와 같이 정의되는 비선형 상태전이함수이며  $U(k)$ 는 제어입력으로서  $[d(k), \Delta\phi(k), \Delta\lambda(k)]^T$ 이다. 또한  $w(k) \sim N[0, Q(k)]$ 는 기댓값이 0이며 공분산이  $Q(k)$ 인 가우시안 잡음을 나타낸다.

### 2.2 측정모델

잠수정에 장착된 위치평가를 위한 센서는 초음파센서, 수심센서, 디지털 컴퍼스, 그리고 경사센서이다. 초음파 센서는 잠수정 상부에 위치하는 모선과의 상대거리를 측정하며, 수심센서는 수면에 대한 잠수정의 깊이, 경사센서는 수평면에 대해 잠수정이 기울어진 각도( $\phi$ ), 그리고 디지털 컴퍼스는 경도선에 대한 잠수정의 자세 각( $\lambda$ )을 각각 측정한다.

Fig. 2는 측정 모델을 표현하는 좌표시스템을 나타낸다.  $L(k)$ 는 모선과 잠수정사이의 거리이며,  $D(k)$ 는 수심센서에 의해 측정되는 수면에 대한 잠수정의 수심이다.  $(x_0, y_0, z_0)$ 는 이미 알고 있는 모선의 위치이며,  $(x(k), y(k), z(k))$ 는 시간  $k$ 에서의 잠수정의 위치이다. 측정모델  $M(k)$ 는 센서의 측정값과 잠수정의 위치 및 방향을 서로 연관시키는 식으로서 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} M(k) &= H(X(k), S_i) + v(k), \\ v(k) &\sim N(0, R(k)) \end{aligned} \quad (4)$$

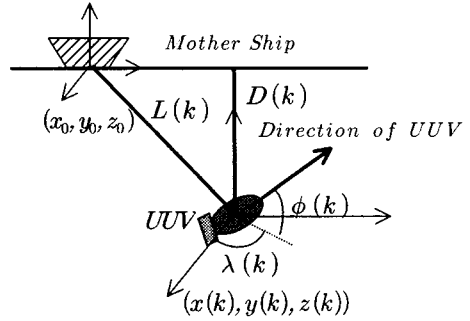


Fig. 2 Coordinates for the measurement model

여기서  $v(k)$ 는 역시 기댓값이 0이며 공분산이  $R(k)$ 인 가우시안 특성을 갖는 측정 잡음이며,  $S_i$ 는 초음파 센서 또는 수심센서 등과 같은 센서의 종류를 나타낸다.

식(4)에서  $H(X(k), S_i)$ 는 각 센서에 따른 측정함수로서 Fig. 2에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$H(X(k), S_i) = \begin{bmatrix} [(x_0 - x(k))^2 + (y_0 - y(k))^2 + (z_0 - z(k))^2]^{\frac{1}{2}} \\ z_0 - z(k) \\ \phi(k) \\ \lambda(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 위치평가

위치평가의 목적은 시간  $k$ 에서 평가된 위치  $\hat{X}(k|k)$ 와 공분산  $P(k|k)$ , 제어입력  $U(k)$ , 그리고 측정값  $M(k)$ 로부터 시간  $k+1$ 에서의 위치  $\hat{X}(k+1|k+1)$ 와 공분산  $P(k+1|k+1)$ 를 평가하는 것이다. 시간  $k+1$ 에서의 잠수정의 새로운 위치는 식 (3)으로 정의되는 시스템 모델과 제어입력  $U(k)$ 를 이용하여 다음과 같이 추측할 수 있다.<sup>12</sup>

$$\hat{X}(k+1|k) = F(\hat{X}(k|k), U(k)) \quad (6)$$

이 추측에 관련된 공분산  $C(k+1|k)$ 은 다음과 같다.<sup>11</sup>

$$P(k+1|k) = \nabla F \cdot P(k|k) \cdot \nabla F^T + Q(k) \quad (7)$$

여기서  $\nabla F$ 는 상태전이함수  $F(\hat{X}(k|k), U(k))$ 의 자

코비안으로서 식(2)를  $\hat{X}(k|k)$ 에 대해 선형화 하여 구하면 다음과 같다.<sup>13</sup>

$$\nabla F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d(k)\sin\hat{\phi}(k)\cos\hat{\lambda}(k) & -d(k)\cos\hat{\phi}(k)\sin\hat{\lambda}(k) \\ 0 & 1 & 0 & -d(k)\sin\hat{\phi}(k)\sin\hat{\lambda}(k) & +d(k)\cos\hat{\phi}(k)\cos\hat{\lambda}(k) \\ 0 & 0 & 1 & d(k)\cos\hat{\phi}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $d(k)$ 는 잠수정의 속도로부터 구한다. 다음단계는 측정값을 예상하는 단계로서, 추정된 위치  $\hat{X}(k+1|k)$ 에 대해 각 센서의 예상된 측정값  $\hat{M}(k+1)$ 을 2.2절에 기술된 측정 모델을 이용하여 구하면,

$$\hat{M}(k+1) = H(\hat{X}(k+1|k), S_i) \quad (9)$$

이 된다. 실제 센서의 측정값  $M(k+1)$ 와 예상된 측정값  $\hat{M}(k+1)$ 의 차이를  $\nu(k+1)$ 로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \nu(k+1) &= [M(k+1) - \hat{M}(k+1)] \\ &= [M(k+1) - H(\hat{X}(k+1|k), S_i)] \end{aligned} \quad (10)$$

여기에 연관된 공분산  $S(k+1)$ 은 다음과 같다.

$$S(k+1) = \nabla H P(k+1|k) \nabla H^T + R(k+1) \quad (11)$$

여기서,  $R(k+1)$ 은 측정 잡음 행렬로서 각 센서의 잡음은 각각 서로 독립적으로 발생한다고 가정하면 대각 행렬이 된다.

각 측정에 관련된 측정 자코비안  $\nabla H$ 는 식(5)를 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla H = \begin{bmatrix} \frac{1}{L(k)}(x(k) - x_0) & \frac{1}{L(k)}(y(k) - y_0) & \frac{1}{L(k)}(z(k) - z_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,  $L(k)$ 는 추측된 잠수정의 위치와 모선의 위치  $(x_0, y_0, z_0)$  사이의 거리이다.

마지막 단계로  $\hat{X}(k+1|k+1)$ 을 평가하기 위해 잘 알려진 칼만 이득  $W(k+1)$ 을 다음과 같이 구한다.

$$W(k+1) = P(k+1|k) \nabla H^T S^{-1}(k+1) \quad (13)$$

식(13)을 이용하여 잠수정의 위치를 평가하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{X}(k+1|k+1) &= \\ \hat{X}(k+1|k) &+ W(k+1)\nu(k+1) \end{aligned} \quad (14)$$

그리고 이 평가에 연관된 공분산 행렬은 다음과 같이 갱신된다.

$$\begin{aligned} P(k+1|k+1) &= \\ P(k+1|k) &- W(k+1)S(k+1)W^T(k+1) \end{aligned} \quad (15)$$

### 3. 위치평가 시뮬레이션

본 연구의 위치평가 방법은 모선의 위치는 위성항법 등으로 평가되어 이미 알고 있으며 다만 모선에 대한 잠수정의 상대적 위치를 평가함으로써 잠수정의 절대 위치를 평가하는 방법에 관한 것이다. 따라서 모선의  $(x, y)$ 는 이미 알고 있는 위치에 고정된 것으로 가정하였으며  $z$ 방향은 파도에 의한 변위를 고려하였다.

Table 1은 시뮬레이션을 위해 가정된 각 센서 오차의 통계학적 특성을 나타낸다. 파도는 진폭이 1m, 주기가 2초인 단순한 사인파 형태로 가정하였고 잠수정이 매 0.1m 이동 마다 위치평가를 수행하였다. 잠수정의 이동거리( $d(k)$ ) 오차는 최대  $\pm 30\%$ 로 가정하였는데, 이는 주로 조류에 의한 영향을 반영하는 것이다.

Fig. 3은 위치평가의 결과를 나타내는데, 검은 선은 잠수정의 실제 경로, 원은 식(2)에 의한 DR 경로, 그리고 사각형은 확장칼만필터(EKF)로 추정된 경로를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 DR에 의한 위치는 거리의 증가에 따라 오차가 커지지만 확

Table 1 Error characteristics

Parameter	standard deviation
range error (ultrasonic sensor)	0.1 m
depth error(water depth sensor)	0.1 m
tilting error(clinometer)	5.0 deg.
heading error(digital compass)	5.0 deg.

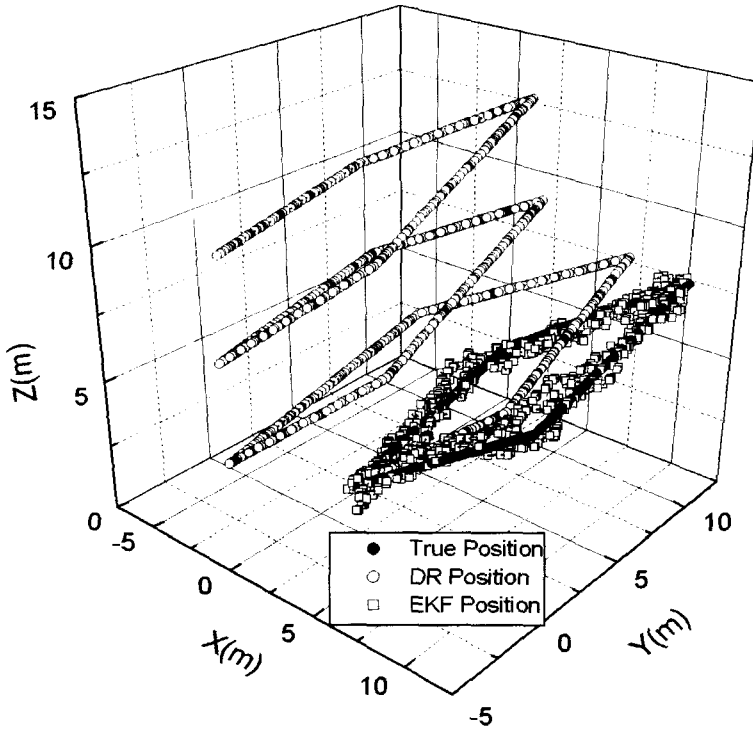


Fig. 3 Simulation results of localization

장 칼만필터에 의한 위치는 DR 및 모선과의 거리, 그리고 수심 등의 정보를 동시에 이용하므로 실제 위치를 크게 벗어나지 않고 있다.

또한 실제 위치에 대한 각 방법의 거리 오차를 Fig. 4에 나타내었다. 확장칼만필터에 의한 위치평가의 최대 오차는 약 2.2m, 표준편차가 약 0.354m, 그리고 평균 오차는 0.7m 정도로서 수중의 열악한 환경, 그리고 육상로봇보다는 상대적으로 위치 정밀도가 덜 요구된다는 점을 고려하면 제안된 방법은 잠수정의 절대위치 평가에 효과적으로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 AUV의 항법에 있어서 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 AUV의 3차원 위치평가에 관한 것으로서, 기존의 LBL, SBL 등과는 달리 외부의 추가적인 센서의 도움 없이 모선과의 상대적인

거리로부터 AUV의 3차원 위치를 추적할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 잠수정에 장착된 비교적 저가이며 데이터 처리가 용이한 디지털 컴퍼스, 수압센서, 그리고 경사센서의 정보 및 초음파센서를 이용한 모선과 잠수정 사이의 상대거리를 확장 칼만필터로 처리하여 잠수정의 (x, y, z) 좌표를 평가하는 것이다. 시뮬레이션 결과 제안된 방법은 잡음이 심한 환경에서 잠수정의 이동거리 증가에도 불구하고 위치오차가 수렴함이 확인되었으며 따라서 이 방법은 AUV의 자율항법 구현에 효과적으로 적용 될 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교 발전기금 청봉 학술연구 기금 지원에 의해서 연구된 논문이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

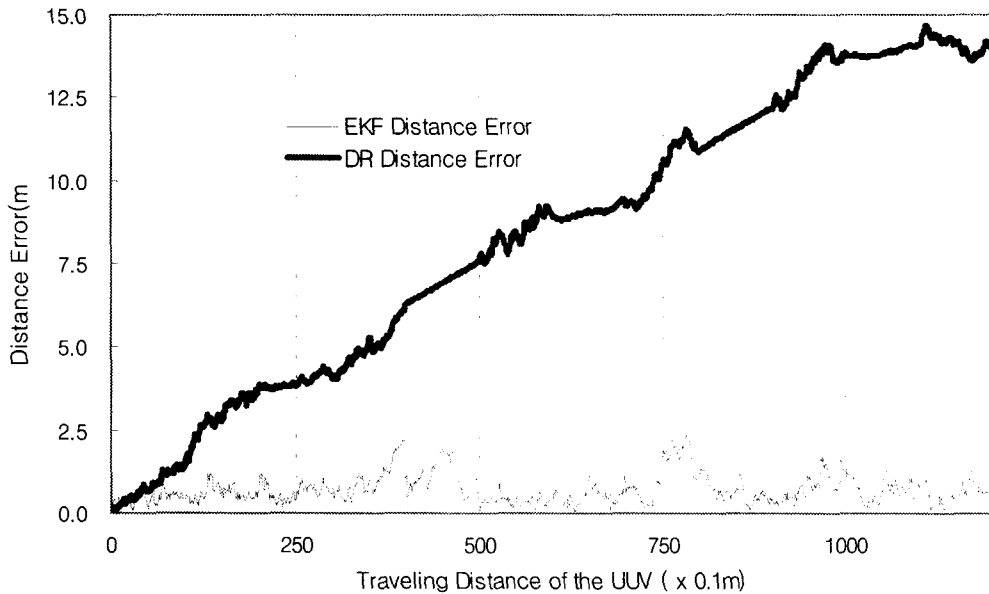


Fig. 4 Distance errors for DR and EKF methods.

### 참고문헌

1. Yuh, J., "Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey," *Int. J. of Autonomous Robots*, Vol. 8, pp.7-24, 2000.
2. Bachmann, E.R., Healey, A.J., Knapp, "Testing and Evaluation of an Integrated GPS/INS System for Small AUV Navigation," *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 396-404, 1999.
3. Black, M.R. and Butler, B., "Arctic ocean trials of track point ultrashort baseline acoustic positioning system," *Proc. on IEEE AUV systems*, pp.297-302, 1994.
4. Vaganay, J., Bellingham, J.G. and Leonard, J.J., "Outlier rejection for autonomous acoustic navigation," *Proc. on IEEE Robotics and Automation*, pp.2174-2182, 1996.
5. Cristi, R., Caccia, M., "A sonar approach to AUV localization," *CAMS'95*, pp.291-298, 1995.
6. Lim, J. H. and Leonard, J. J., "Mobile Robot Relocation from Echolocation Constraints," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 9, pp.1035-1041, 2000.
7. Borenstein, J. and Koren, Y., "Real time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No.6, pp.1179-1189, 1989.
8. Lumelsky, V. and Vladimir, J., "Path planning strategies for point mobile automation moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape," *Algorithmica*, Springer-Verlag, New York, 1987.
9. Leonard, J. J. and Durrant-White, H. F., *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
10. Kim, S. C., Lim, J. H., Kang, C. U., "Development of a Small Marine Prober," *Proc. of KSPE*, pp.312-315, 2003.
11. Lim, J. H., Kang, C. U., "Development of a Small Unmanned Marine Prober and Navigation," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 3, pp.59-65, 2004.
12. Gelb, A. C., *Applied Optimal Estimation*, The MIT Press, 1973.
13. Bar-Shalom, Y. and Fortmann, T. E., *Tracking and Data Association*, Academic Press, 1988.