

간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파 속도센서 기반의 수중 복합항법 알고리즘

이종무* · 이판목* · 성우제**

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

** 서울대학교 조선해양공학과

Underwater Hybrid Navigation Algorithm Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using an Indirect Feedback Kalman Filter

CHONG-MOO LEE*, PAN-MOOK LEE*, AND WOO-JAE SEONG**

* Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI, Daejeon, Korea,

** Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Hybrid Navigation System 복합항법시스템, Indirect Feedback Kalman Filter 간접 되먹임 칼만필터, Inertial Navigation 관성항법, Doppler Velocity Log 도플러 속도센서, Inertial Measurement Unit 관성측정장치

ABSTRACT: This paper presents an underwater hybrid navigation system for a semi-autonomous underwater vehicle (SAUV). The navigation system consists of an inertial measurement unit (IMU), and a Doppler velocity log (DVL), accompanied by a magnetic compass. The errors of inertial measurement units increase with time, due to the bias errors of gyros and accelerometers. A navigational system model is derived, to include the scale effect and bias errors of the DVL, of which the state equation composed of the navigation states and sensor parameters is 20. The conventional extended Kalman filter was used to propagate the error covariance, update the measurement errors, and correct the state equation when the measurements are available. Simulation was performed with the 6-d.o.f. equations of motion of SAUV, using a lawn-mowing survey mode. The hybrid underwater navigation system shows good tracking performance, by updating the error covariance and correcting the system's states with the measurement errors from a DVL, a magnetic compass, and a depth sensor. The error of the estimated position still slowly drifts in the horizontal plane, about 3.5m for 500 seconds, which could be eliminated with the help of additional USBL information.

1. 서 론

무인잠수정은 수중으로 전파가 통과하지 못하는 한계로 인하여 LBL(Long baseline), SBL(Short baseline), USBL(Ultra short baseline) 등의 초음파 측위시스템을 이용한다(Milne, 1983). 이들 초음파 센서는 시간이 경과함에 따른 위치오차의 발산은 없지만, 고주파수의 위치오차가 있으며 수중에서의 초음파 전달특성으로 인하여 긴 시간 간격의 샘플링 주기를 갖는다. 일반적으로 수중항법으로서 LBL을 많이 이용하고 있으나, 센서를 해저에 설치하는 번거로운 작업과 센서 설치 범위를 벗어난 영역에서의 항법이 곤란한 단점이 있다. USBL은 사용이 편리하고 이동형 무인잠수정을 추적하며 모니터링하기에는 용이하나, 측정거리가 늘어날 경우에는 현존하는 최고성능

의 USBL도 단독으로는 수중 운항제어에 사용하기에 곤란하다(Trimble, 1998). 이에 따라 관성센서와 초음파 센서 및 GPS(Global positioning system) 센서를 융합하는 복합항법시스템을 구성하는 것이 요구된다.

관성항법 시스템은 관성센서(Inertial measurement unit, IMU)의 바이어스 오차로 인하여 시간이 경과됨에 따라 기하급수적으로 증가하는 오차가 발생한다. 단시간의 운항에서 관성항법시스템은 매우 정밀한 정보를 제공할 수 있지만 항법정보를 계산하기 위해 적분 과정을 포함하므로 센서 측정 데이터에 포함된 오차가 시간에 따라 계속 항법 정보에 누적된다. 따라서 관성항법시스템의 항법정보는 장시간 후에는 매우 큰 오차를 포함하게 된다(Titterton, 1997; Larsen, 2000; 홍현수 등, 2002). 이러한 관성항법시스템의 단점을 극복하고 성능을 향상시키기 위하여, 비관성센서인 GPS, 심도계, 도플러 속도센서(Doppler velocity log, DVL), 경사계, 마그네틱 콤파스를 보조센서로 활용하는 보조항법시스템을 개발하는 것이 필요하다.

육상에서의 항법시스템은 최근에 GPS가 보편화되면서 GPS

제1저자 이종무 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171
042-868-7533 jmlee@kriso.re.kr

를 이용한 복합항법시스템을 구성하는 것이 최근의 동향이다. 한편, 수중에서의 항법을 위한 항법시스템은 관성센서와 초음파센서를 이용한 항법시스템을 주로 이용하며, 천해역에서 수면에 주기적으로 부상하는 무인잠수정의 경우에는 GPS신호를 이용하는 복합항법시스템으로 구성하기도 한다(Marco and Healey, 2001; Yun, et al., 1999; An et al., 1996, 1997). 최근에는 수중항법시스템을 구성함에 있어서 초음파 속도계를 이용하고 관성센서의 신호를 융합하여 복합항법시스템을 구현하는 방법을 많이 사용하고 있다(Larsen, 2000a, 2000b; Beiter et al., 1998; Uliana, 1997). 한편 심해에서 LBL의 위치추적 정밀도를 높이기 위하여 DVL 신호를 융합하는 항법에 관한 연구(Kinsey and Whitcomb, 2003)도 최근에 진행중이다.

본 논문에서는 심도계, 마그네틱 콤파스, 초음파 속도계 DVL 및 스트랩다운형 관성센서(SDINS)를 이용한 항법시스템을 구성하고자 한다. IMU 및 DVL과 방위각 오차를 포함하는 측정치 오차방정식을 유도하여 수중 복합항법시스템을 구현하였다. 본 논문에서는 칼만 필터를 통하여 얻어지는 항법시스템의 상태변수 추정치와 측정치의 오차를 이용하여 변수 추정치를 보정하는 방식의 간접 되먹임법을 이용하였다. 수중 복합항법시스템은 외부신호의 입력이 주어지지 않을 경우에는 칼만 필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 외부의 측정신호가 있는 경우에 오차를 update하고 상태변수를 보정하게 된다. 본 논문은 복합항법시스템에 관한 항법 알고리즘을 설명하고, 한국해양연구원에서 개발중인 반자율무인잠수정에 대하여 시뮬레이션을 통하여 제안된 항법시스템의 성능을 고찰하고자 한다.

2. 간접 되먹임 오차법을 이용한 SDINS의 항법 알고리즘

2.1 위치 속도 자세의 오차 모델

스트랩다운형 관성항법시스템(SDINS)의 항체의 위치 및 속도에 대한 미분방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$L = \frac{V_N}{R_m + h}, \quad l = \frac{V_E}{(R_m + h)\cos L} \quad (1)$$

$$\nabla^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \nabla^n + g^n \quad (2)$$

식(1)은 위치정보인 위도 L 과 경도 l 을 계산하기 위한 수식이며 식(2)는 항법좌표계의 속도 ∇^n 의 계산을 위한 수식이다. 위 식에 쓰이는 기호들의 정의는 다음과 같다(Titterton, 1997).

$$\nabla^n = [V_N \ V_E \ V_D]^T$$

$$\omega_{ie}^n = [\Omega_N \ 0 \ \Omega_D]^T = [\Omega \cos L \ 0 \ -\Omega \sin L]^T$$

$$\omega_{en}^n = [\rho_N \ \rho_E \ \rho_D]^T = [l \cos L \ -L \ -l \sin L]^T$$

$$R_m = R_o(1 - 2e + 3e \sin^2 L), \quad R_l = R_o(1 + e \sin^2 L)$$

여기서, R_m , R_l 는 지구 모델의 반경, R_o 는 적도에서의 지구 반경, e 는 이심률, h 는 심도를 나타낸다.

항법좌표계와 동체좌표계 사이의 방향여현 행렬인 C_b^n 을 계

산하기 위한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n \quad (3)$$

여기서, Ω_{ib}^b , Ω_{in}^n 는 각각 자이로의 측정치 ω_{ib}^b , 지구자전 각속도, 위도 및 경도변화율로 구성된 ω_{in}^n 을 성분으로 하는 왜대칭(skew-symmetric) 행렬이다.

식(1)~(3)과 같은 SDINS의 항법 알고리즘에 대한 오차 모델을 유도하기 위하여 보편적으로 사용되는 섭동법(perturbation method)을 사용한다. 섭동법은 항법 알고리즘으로 얻어진 각각의 변수와 실제 값의 차를 오차변수로 두어 시스템을 해석하는 것으로 비선형 시스템에서는 오차의 크기가 작은 경우에 적용될 수 있다. 위치, 속도, 자세 및 센서에 오차가 존재한다는 가정 하에 선형 섭동법을 적용하면 위치, 속도 및 자세 오차에 대한 항법오차 모델을 유도할 수 있다. 다음의 식(4)~(6)은 각각 위치오차, 속도오차, 자세오차에 대한 미분방정식이다.

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{L} \\ \delta \dot{l} \\ \delta \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_E R_{mm}}{R_m + h} \delta L + \frac{\rho_E}{R_m + h} \delta h + \frac{1}{R_m + h} \delta V_N \\ \rho_N \sec L (\tan L - \frac{R_u}{R_l + h}) \delta L - \frac{\rho_N \sec L}{R_l + h} \delta h + \frac{\sec L}{R_l + h} \delta V_E \\ -\delta V_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\delta \nabla^n = -(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta \nabla^n + (C_b^n f^b) \times \phi + C_b^n \delta f^b - (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) \times \nabla^n \quad (5)$$

$$\dot{\phi} = -\omega_{in}^n \times \phi - C_b^n \delta \omega_{ib}^b + \delta \omega_{in}^n \quad (6)$$

여기서,

$$R_{mm} = \frac{\partial(R_m)}{\partial L} = 6R_o e \sin L \cos L$$

$$R_u = \frac{\partial(R_l)}{\partial L} = 2R_o e \sin L \cos L$$

자세오차 ϕ 는 해석적 플랫폼 좌표계와 실제 항법좌표계 사이의 미소각으로 정의되는 벡터로서 두 좌표계 사이의 변환 행렬은 다음 식(7)과 같다(Titterton, 1997; 홍현수 등, 2002).

$$C_n^p = \begin{bmatrix} 1 & \phi_D & -\phi_E \\ -\phi_D & 1 & \phi_N \\ \phi_E & -\phi_N & 1 \end{bmatrix}, \quad \phi = [\phi_N \ \phi_E \ \phi_D]^T \quad (7)$$

δf^b 와 $\delta \omega_{ib}^b$ 는 각각 가속도계와 자이로의 측정오차를 나타내며 측정치 모델에서 다룬다.

2.2 측정치 모델

가속도계 출력의 오차 δf^b 와 자이로 출력의 오차 $\delta \omega_{ib}^b$ 는 식(8), (9)와 같이 랜덤상수와 백색잡음의 합으로 모델링하였다.

$$\delta f^b = \nabla + w_a(t), \quad w_a(t) \sim N(0, Q_a) \quad (8)$$

$$\nabla = 0, \quad \nabla = [\nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T, \quad \nabla(0) \sim N(0, P_a)$$

$$\delta \omega_{ib}^b = \varepsilon + w_g(t), \quad w_g(t) \sim N(0, Q_g) \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon} = 0, \quad \varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T, \quad \varepsilon(0) \sim N(0, P_g)$$

여기서, ∇ 와 ε 는 가속도계와 자이로의 출력에 포함된 바이어스 오차(bias error)로서 관성센서가 작동되는 순간에 결정되는 불규칙한 값이며 랜덤상수로 모델링되었다. w_a , w_g 는 백색잡음(white noise)으로 모델링된 측정잡음을 나타낸다. 수중 보조항법을 위하여 장착되는 심도계, 도플러 센서, 마그네틱 콤파스의 측정 오차들도 각각 랜덤상수와 백색잡음의 합으로 모델링하였다.

계산된 항법정보와 보조센서의 측정치의 차를 이용하여 필터의 측정식을 산출한다. SDINS에서 계산된 심도 h 와 심도계가 측정한 심도 h_{meas} 의 차이는 다음 식과 같다.

$$\hat{h} - h_{meas} = h + \delta h - (h + h_b) = \delta h - h_b \quad (10)$$

여기서, h_b 는 심도계의 랜덤상수로 모델링된 바이어스를 나타내며 상태변수의 성분으로 포함되어 있다.

도플러 속도센서는 물체좌표계에 대하여 x , y 및 z 방향의 세 속도성분이 얻어지며 SDINS에서 계산된 자세정보를 이용하여 속도벡터를 계산하면 추정 속도와의 속도벡터 차는 다음과 같다.

$$\hat{V}^n - V_{meas} = V^n + \delta V^n - C_b^n \begin{bmatrix} V + V_b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \delta V^n - V^n \times \phi - C_b^n \begin{bmatrix} V_b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

SDINS에서 계산된 기수각 정보 ϑ 와 마그네틱 콤파스에서 측정하는 기수각 ψ_{meas} 의 차는 다음과 같다.

$$\hat{\psi} - \psi_{meas} = -\phi_D - \psi_b \quad (12)$$

2.3 수중 복합항법 알고리즘

수중 복합항법 알고리즘은 선형시스템에 최적의 성능을 나타내는 칼만필터로 구성되며 식(4)~(6)의 항법오차 모델과 식(8), (9)의 센서 모델이 시스템 모델을 이룬다. 보조센서들이 제공하는 측정치를 이용하여 항체의 심도, 속도벡터 및 기수각을 산출한 후 SDINS에 의한 정보와 차를 칼만필터의 측정치로 사용한다. 시스템 모델을 구성하기 위하여 식(4)~식(6)에서 사용된 변수들 중에 계산되지 않은 변수들에 대한 계산식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta \omega_{ie}^n &= [\Omega_D \delta L \quad 0 \quad -\Omega_N \delta L]^T \\ \delta \omega_{in}^n &= \begin{bmatrix} (\Omega_D - \frac{\rho_N R_u}{R_i+h}) \delta L + \frac{1}{R_i+h} \delta V_E - \frac{\rho_N}{R_i+h} \delta h \\ -\frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} \delta L - \frac{\rho_E}{R_m+h} \delta h - \frac{1}{R_m+h} \delta V_N \\ -(\Omega_N + \rho_N \sec^2 L + \frac{\rho_D R_u}{R_i+h}) \delta L + \frac{\rho_N \tan L}{R_i+h} \delta h - \frac{\tan L}{R_i+h} \delta V_E \end{bmatrix} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\delta \omega_{en}^n = \delta \omega_{in}^n - \delta \omega_{ie}^n$$

$$\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n \quad (14)$$

식(13), (14)의 수식을 항법오차 모델에 대입하여 얻어진 위치 오차, 속도오차, 자세오차 등의 미분방정식과 랜덤상수로 모델링된 센서의 바이어스 오차의 미분방정식을 결합하여 시변 선형시스템을 구성하면 시스템 모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q(t)) \quad (15)$$

$$x = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \quad \delta V_N^T \quad \phi^T \quad \nabla_a^T \quad \varepsilon_g^T \quad h_b \quad a_v \quad \psi_b]^T$$

$$w = [0_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 3} \quad w_a^T \quad w_g^T \quad 0 \quad 0_{1 \times 3} \quad 0]^T$$

여기서, $x(t)$ 는 무인잠수정의 위도오차, 경도오차, 심도오차, 속도오차 및 자세오차로 구성된 항법오차와 심도계의 바이어스 오차, 도플러 센서의 변환계수오차, 마그네틱 콤파스의 바이어스 오차로 이루어진 20차 상태변수이다.

$w(t)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $Q(t)$ 인 시스템의 공정잡음이며 가속도계와 자이로의 측정오차를 나타낸다. USBL의 측정잡음에서 바이어스 오차를 랜덤상수로 가정하면 시변 시스템 행렬 $F(t)$ 는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 5} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 5} & 0_{3 \times 3} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & 0_{3 \times 3} & F_{35} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 5} & 0_{3 \times 3} \\ & & & 0_{14 \times 23} & & & & \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} & 0 & \frac{\rho_E}{R_m+h} \\ \rho_N \sec L \left(\tan L - \frac{R_u}{R_i+h} \right) & 0 & -\frac{\rho_N \sec L}{R_i+h} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_m+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sec L}{R_i+h} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} -\left(2\Omega_N + \rho_N \sec^2 L + \frac{\rho_D R_u}{R_i+h}\right) V_E + \frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} V_D & 0 & -\frac{\rho_D}{R_i+h} V_E + \frac{\rho_E}{R_m+h} V_D \\ \left(2\Omega_N + \rho_N \sec^2 L + \frac{\rho_D R_u}{R_i+h}\right) V_N + \left(2\Omega_D - \frac{\rho_N R_u}{R_i+h}\right) V_D & 0 & \frac{\rho_D}{R_i+h} V_N - \frac{\rho_N}{R_i+h} V_D \\ -\frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} V_N - \left(2\Omega_D - \frac{\rho_N R_u}{R_i+h}\right) V_E & 0 & -\frac{\rho_E}{R_m+h} V_N + \frac{\rho_N}{R_i+h} V_E \end{bmatrix}$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} \frac{V_D}{R_m+h} & 2\Omega_D + 2\rho_D & -\rho_E \\ -2\Omega_D - \rho_D & \frac{V_N \tan L + V_D}{R_i+h} & 2\Omega_N + \rho_N \\ 2\rho_E & -2\Omega_N - 2\rho_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{23} = \begin{bmatrix} 0 & -f_D & f_E \\ f_D & 0 & -f_N \\ -f_E & f_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{24} = C_b^n$$

$$F_{31} = \begin{bmatrix} \Omega_D - \frac{\rho_N R_u}{R_i+h} & 0 & -\frac{\rho_N}{R_i+h} \\ -\frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} & 0 & -\frac{\rho_E}{R_m+h} \\ -\Omega_N - \rho_N \sec^2 L - \frac{\rho_D R_u}{R_i+h} & 0 & -\frac{\rho_D}{R_i+h} \end{bmatrix}$$

$$F_{32} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_i+h} & 0 \\ -\frac{1}{R_m+h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan L}{R_i+h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{33} = -\begin{bmatrix} \Omega_N + \rho_N \\ \rho_E \\ \Omega_D + \rho_D \end{bmatrix} \times$$

$$F_{35} = -C_b^n$$

심도계와 방위각센서 및 DVL 계측신호로부터 측정오차식을

유도하면 칼만필터의 측정 모델식이 얻어진다.

$$y_k = \begin{bmatrix} \hat{n} - h_{meas} \\ \mathcal{V}^n - V_{meas} \\ \hat{\psi} - \psi_{meas} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1_{1,2} & 1 & 0 & 1_{1,3} & 0 & 1_{1,2} & 0 & 0 & 1_{1,6} & -1 & 0 & 1_{1,3} & 0 \\ 0 & 3_{,2} & 0 & 3_{,1} & I_{3,3} & -V^{n \times} & 0 & 1_{1,2} & 0 & 3_{,6} & 0 & C_b^s & 0 & 0 \\ 0 & 1_{1,2} & 0 & 0 & 1_{1,3} & 0 & 1_{1,2} & -1 & 0 & 1_{1,6} & 0 & 0 & 1_{1,3} & -1 \\ I_{2,2} & & & & & & 0 & 2_{,13} & & & & 0 & 2_{,1} & 0 & 2_{,3} & 0 & 2_{,1} \end{bmatrix} x(t_k)$$

$$+ \begin{bmatrix} \nu_n(t) \\ \nu_v(t) \\ \nu_{meas}(t) \end{bmatrix}$$

식(15)와 식(17)로 구성된 칼만 필터로부터 필터의 오차 공분산을 계산하여 각 상태변수의 공분산을 얻을 수 있다(Gelb, 1974). 초음파 항법시스템과 복합된 관성항법시스템의 구성은 Fig. 1과 같으며, 관성센서인 IMU에 보조항법 센서로서, 속도계, 심도계 (또는 고도계) 및 마그네틱 콤파스의 외부 계측신호를 이용하는 수중 복합항법시스템을 나타낸다.

수중 복합항법시스템은 가속도 센서와 자이로의 바이어스 오차, 스케일 오차, 비정렬 오차 등에 의하여 위치추정 오차가 발생하는 것을 DVL, 수심신호 및 방위각 신호를 이용하여 시간에 따라 누적되는 SDINS 시스템의 항법오차를 보정하게 된다. 필터 알고리즘은 항법정보의 추정치에 포함된 오차를 추정하고 측정치를 이용하여 보정하는 방식의 간접 되먹임법을 이용하였다.

시스템은 외부신호의 입력이 주어지지 않을 경우에는 확장 칼만 필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 외부의 측정 신호가 있는 경우에 오차를 update하고 상태변수를 보정하게 된다

3. 수중 복합항법시스템의 시뮬레이션

본 논문에서 개발된 수중 복합항법시스템의 성능을 검증하기 위하여 한국해양연구원에서 개발중인 반자율무인잠수정 SAUV(홍석원 등, 2000)에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 SAUV는 자세계측을 위한 IMU로 미국 하니웰사의 HG1700AG11 IMU를 DVL로는 RDI사의 Work Horse Navigator를 내장하고 있다. 본 시뮬레이션에 사용된 IMU는 3개의 가속도 센서와 3개의 자이로를 내장하며, DVL은 서로 대칭인 4개의 센서가 경사각을 갖고 설치되어 수중에서 선체의 운동에 따른 초음파의 도플러 효과를 이용하여 3축의 속도를 측정한다. 그밖에도 SAUV에는 마그네틱 콤파스 TCM2와 심도계 및 고도계 등이 탑재되어 있다. 본 논문에서는 이들 센서가 내장된 SAUV의 수중항법을 시뮬레이션 하였으며, Table 1은 시뮬레이션에 사용된 각 센서의 특성을 나타내고 있다. 여기서 마그네틱 콤파스는 SAUV 내부의 전자장비에 의한 영향을 고려하여 바이어스 오차를 정하였으며, 심도계는 실제 사용되는 센서의 특성을 고려하여 정하였다. 한편, DVL의 최대 사용고도는 100m이다.

Table 1 Specification of the sensors of the hybrid underwater navigation system

	Bias Error	Random Noise
Accelerometer	1.0 mg	100 µg
Gyro	1.0 deg/h	0.3 deg/h
USBL	18 m	18 m
DVL	0.01 m/s	0.1 m/s
Magnetic Compass	10.0 deg	1.0 deg
Depthmeter	0.5 m	0.5 m

시뮬레이션은 SAUV의 6자유도 운동방정식(홍석원 등, 2000)을 이용하였으며, 물체좌표계에 대하여 얻어진 가속도, 각속도, 속도, 방위각 및 심도 성분은 Table 1에 나타나 있는 각각의 센서 특성에 부합되는 바이어스와 랜덤 노이즈를 추가하여 측정치를 생성하였다. SAUV의 초기조건은 해양수조의 위치에 해당하는 지점을 입력하였으며, 초기 선수각은 북쪽을 바라보며 자세오차는 없는 것으로 정하였다.

- AUV 초기위치
 - * 경도 : 127°21'43.56"
 - * 위도 : 36°23' 38.52"
- 초기자세
 - * roll = pitch = yaw = 0°
 - * 선수각 : Heading 0°(= AUV 선수가 북쪽)

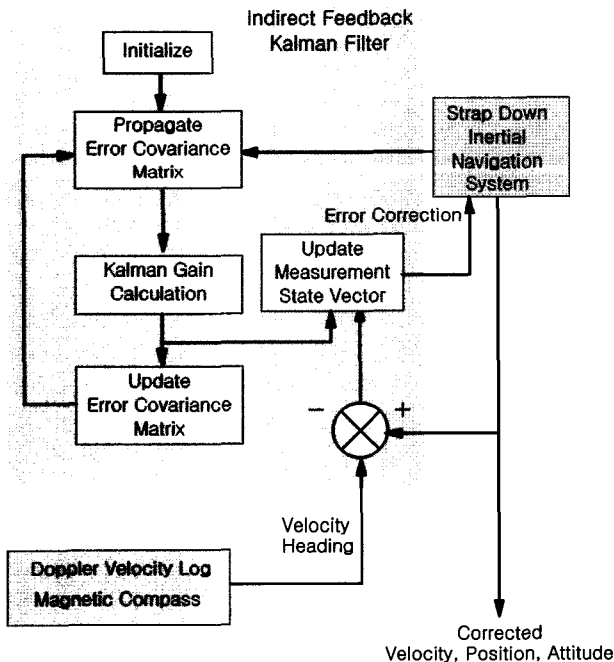


Fig. 1 Block diagram of the indirect feedback Kalman filter of the hybrid navigation system for an unmanned underwater vehicle

항법오차의 추정은 확장 칼만필터를 통하여 이루어지며, 간접 되먹임 방식으로 최종 항법해가 얻어진다. 수중 복합항법시

시뮬레이션은 총 500초 동안 수행되었으며, IMU의 샘플링 주기는 100Hz, DVL의 샘플링 주기는 2Hz 이었다. SAUV가 해저면을 따라 '르'자 모양(lawn-mowing survey mode)으로 이동하며 해저를 조사하는 임무를 수행하는 것으로 가정하였고, 직선 코스 중간에 고도를 5m 씩 번갈아 증감하는 임무를 수행하는 것으로 가정하였다. Table 2는 시간대별 제어명령을 나타낸다.

Table 2 Reference commands for lawn-mowing survey mode of SAUV

Time [sec]	Depth Increment [m]	Heading Increment [deg]
0	0	0
30	+5	-
100	-	+90
120	-	+90
150	-5	-
220	-	-90
240	-	-90
270	+5	-
340	-	+90
360	-	+90
390	-5	-
460	-	-90
480	-	-90

Fig. 2~4는 시뮬레이션에 사용된 데이터로서 SAUV의 물체 좌표계에 대한 3방향 가속도, 자이로 및 속도 신호를 나타낸다.

항법오차 모델로 만들어진 항법시스템 모델식 (15)와 측정모델 (17)을 이용하여 확장 칼만필터 기반의 수중 복합항법 알고리즘을 구동하였다. 초기의 속도와 자세는 알고 있는 것으로 가정하였다.

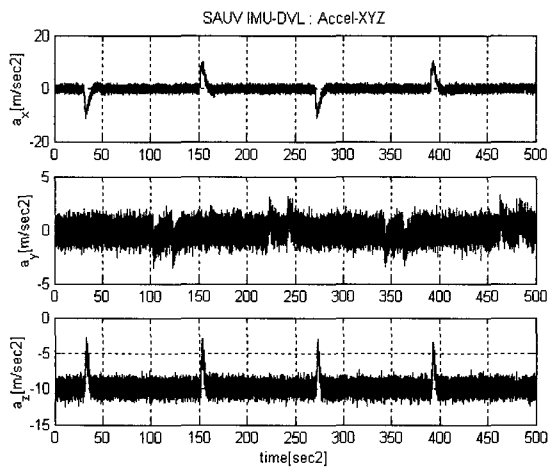


Fig. 2 Simulated acceleration signals of SAUV in lawn-mowing mode

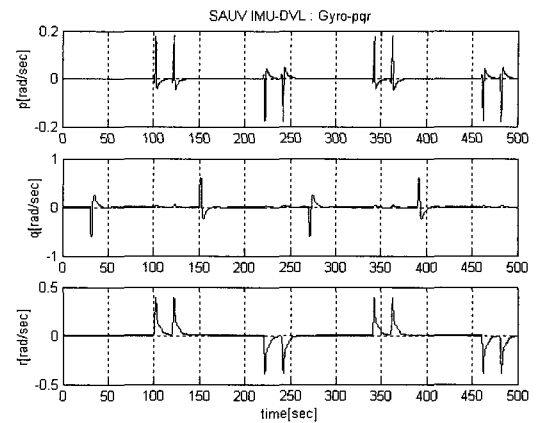


Fig. 3 Simulated gyro signals of SAUV in lawn-mowing mode

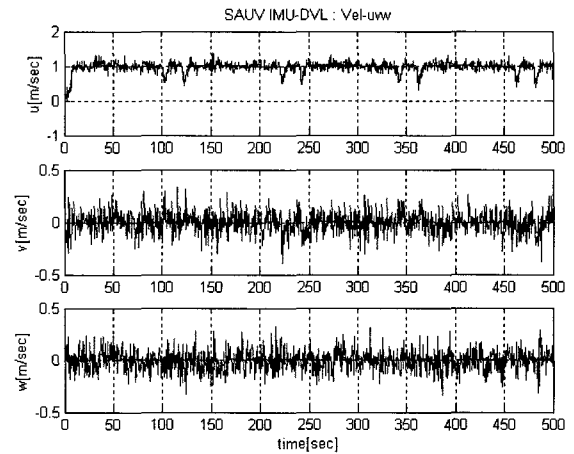


Fig. 4 Simulated velocity signals of SAUV in lawn-mowing mode

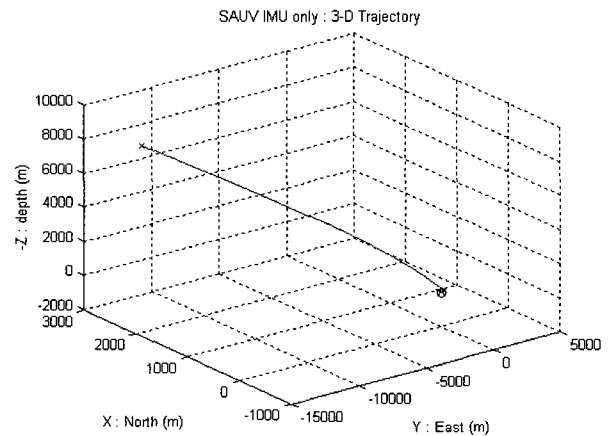


Fig. 5 Simulated localization of SAUV with IMU-only navigation algorithm

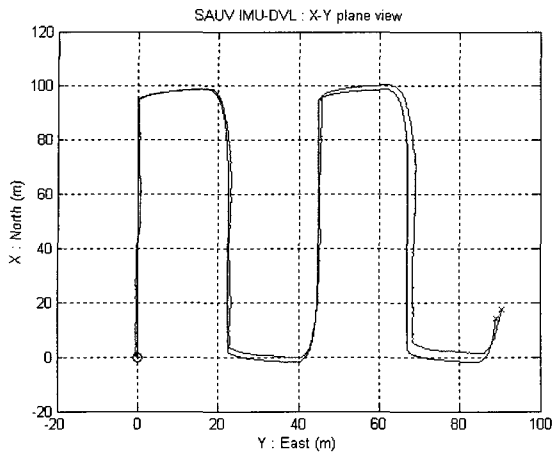


Fig. 6 Simulated localization of SAUV with IMU-DVL-depth-heading fusion (X-Y plane)

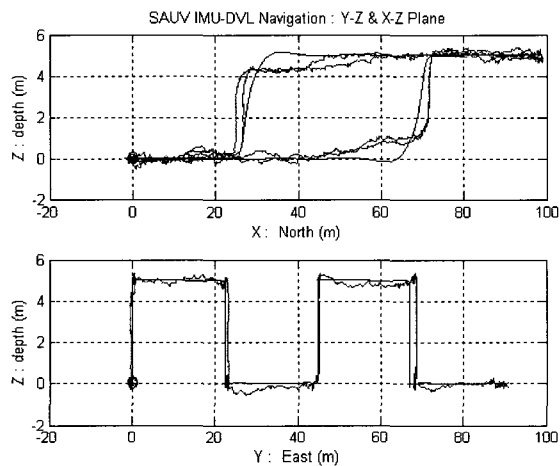


Fig. 7 Simulated localization of SAUV with IMU-DVL-depth-heading fusion (X-Z & Y-Z planes)

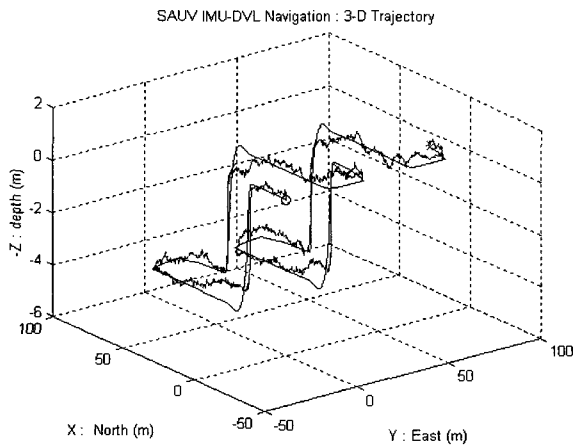


Fig. 8 Simulated localization of SAUV with IMU-DVL-depth-heading fusion

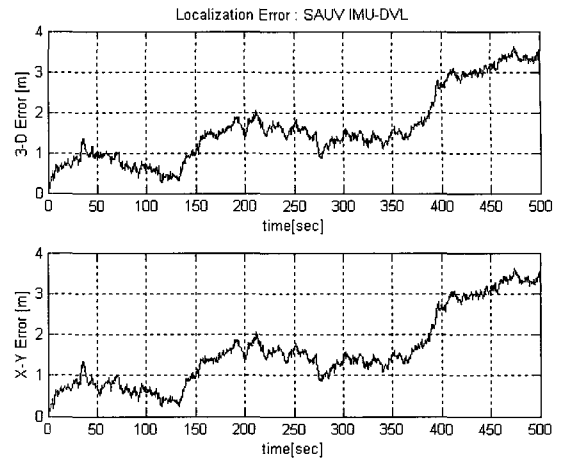


Fig. 9 Simulated localization error of SAUV with IMU-DVL-depth-heading fusion

시뮬레이션은 일차적으로 SAUV가 해저면으로부터 100m 이상 떠 있고 모션으로부터도 멀리 떨어져 있는 경우를 상정하였다. Fig. 5는 측정치가 주어지지 않는 경우에 IMU 단독으로 오차의 상태변수를 추정한 결과를 나타낸다. 즉, 항법 알고리즘이 100Hz로 취득되는 IMU의 관성신호만을 이용하여 위치를 추정한 결과를 보인다. 그림에서 위치추정 오차는 기하급수적으로 발산하고 있는 결과를 보이고 있다. 이러한 발산현상은 IMU의 가속도 및 자이로의 바이어스 오차와 스케일 오차에 따라 기인하는 것으로서, 보다 정밀한 관성센서를 사용하더라도 발산하는 현상 자체를 제거하기 어렵다. 따라서, 상태변수 추정오차를 보정하기 위한 외부 계측신호가 반드시 필요하다.

본 논문에서 제안한 수중 복합항법 시스템을 이용하여 위치 추적 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 SAUV가 해저면으로부터 100m 이내의 고도에서 2Hz로 얻어지는 DVL 신호를 이용하여 측정치를 생성하고 이때의 선수각과 심도를 이용하여 측정치 벡터를 만드는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6~8은 2Hz로 얻어지는 초음파 속도계와 지자기센서의 신호를 이용하여 확장 칼만필터의 오차공분산을 update하고 상태변수의 보정이 이루어진 항법 결과를 각각 X-Y 평면, X-Z 평면과 Y-Z 평면, 및 3차원으로 나타낸 그림이다. Fig. 9는 이때의 위치추정 오차를 3차원상의 오차와 X-Y 평면상의 위치오차를 나타낸 그림이다.

Fig. 5에서 사용하였던 동일한 IMU를 이용한 관성항법시스템에 대하여 보조항법 센서로 초음파 속도계와 방위각 측정치를 이용하는 경우의 복합항법시스템은 앞의 시뮬레이션과는 달리 500초 경과 후의 위치추정 오차가 약 3.5m가 되어 양호한 위치추적이 가능한 항법시스템이 되었다. Fig. 7에서 수직방향의 위치는 0.5m 해상도를 갖는 심도계를 이용하여 보정이 이루어지므로 0.5m 심도 오차 범위이내의 정확한 심도 추적이 가능하였다. 또한, 속도 정보를 이용하여 항법오차의 보정이 이루어져서 오차의 드리프트가 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

동일한 센서 사양을 갖는 항법시스템의 회전팔 시험(이종무 등, 2003)에서 1.0m 이내의 오차를 보여 유사한 항법 성능 결

과를 얻었다.

수평면의 위치오차는 USBL에서 얻어지는 위치추적 데이터를 이용함으로써 서서히 증가하는 X-Y 평면상의 오차 발산을 막을 수 있을 것이다. 개발된 수중 복합항법시스템을 심해 무인잠수정에 적용 가능성을 검토하기 위하여 심해용 USBL에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 USBL은 측정거리의 0.3% rms 오차를 갖는 Posidonia 6000을 대상으로 하였다.

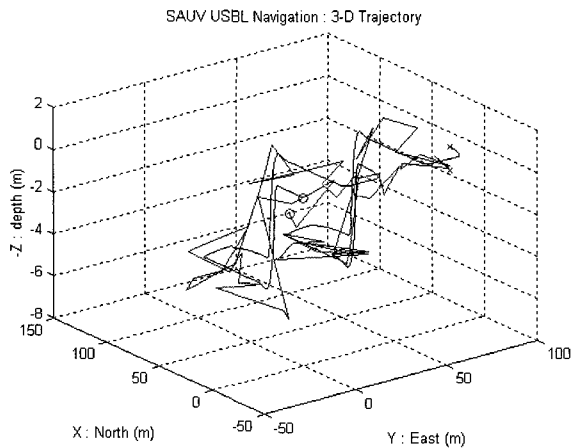


Fig. 10 Simulated localization of SAUV with USBL at 6,000m depth (sampling period : 8 sec)

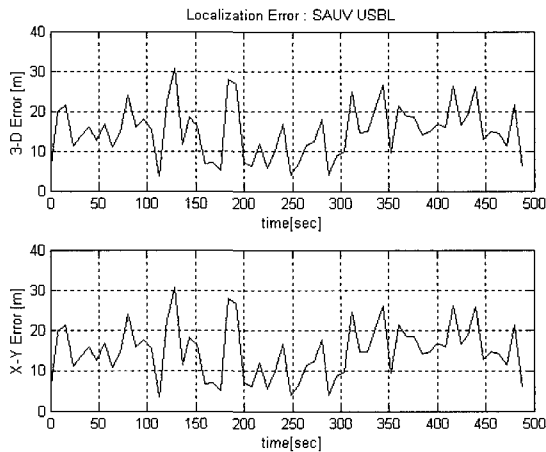


Fig. 11 Simulated localization error of SAUV with USBL at 6,000m depth (sampling period : 8 sec)

Fig. 10과 11은 6,000m 수심에서 무인잠수정이 이전의 시뮬레이션과 동일한 임무를 수행하는 경우에 8초 간격으로 위치 데이터를 얻는 경우의 USBL 추적 결과이다. 수직방향의 위치 추정치는 심도계를 이용하여 보정이 가능하므로 오차가 1m 이내를 보이며, 수평면 오차는 USBL의 오차 특성에 따라 최대 30m의 위치추정 오차를 보이며 표준편차 18m를 갖고 있다. USBL의 신호는 초기의 오차편차가 시간이 경과하여도 증가하

지 않는 특성을 보이므로 IMU 및 DVL을 융합한 항법시스템의 수평면 오차 증가를 막을 수 있다.

본 연구에서 개발된 수중 복합항법시스템의 USBL 신호 융합은 현재 연구가 진행중이며, 시뮬레이션에 사용된 센서로부터 얻어진 정보를 이용하여 수중 복합항법시스템의 성능을 검토하기 위해서는 보다 장시간의 시뮬레이션이 요구되었다. 이에 대한 결과를 추후 보완하여 발표할 예정이다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터 수중의 항법을 위해서는 속도와 방위각 정보가 반드시 필요하다는 결론을 얻을 수 있으며, 본 연구에서 개발한 수중항법시스템은 500초가 경과된 후에 약 3.5m의 위치오차를 보여 유효성을 입증하였다.

4. 결 론

본 논문은 초음파 속도계 DVL, 방위각 센서 및 스트랩다운형 관성센서를 이용한 수중 복합항법시스템을 제안하였다. 개발된 복합항법시스템은 칼만필터를 통하여 얻어지는 항법시스템의 상태변수 추정치와 측정치의 오차를 이용하여 변수 추정치를 보정하는 방식의 간접 되먹임법을 이용하였다. 수중 복합항법시스템은 외부신호의 입력이 주어지지 않을 경우에는 확장 칼만필터를 이용하여 IMU 신호만을 이용하여 위치를 추정하며, 외부의 측정 신호가 있는 경우에 오차를 업데이트하고 상태변수를 보정한다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 항법시스템의 성능을 검증하여 500초 경과 후에 위치추정 오차가 3.5m 범위 이내이다. 따라서, 관성센서와 초음파 속도센서를 융합한 복합항법시스템이 무인잠수정의 항법시스템으로 적합하다는 결론을 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 민군겸용기술개발사업인 “무인잠수정의 운항제어 및 매니퓰레이터 기술 개발”과 해양수산부의 “차세대 심해용 무인잠수정 개발” 사업의 일환으로 수행된 연구결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

이종무, 이판목, 김서균, 홍석원, 서재원, 성우제 (2003). “반자율 무인잠수정의 수중 복합 항법 시스템 성능평가를 위한 회전팔 시험”, 한국해양공학회지, 제17권 제4호, pp 73-80.
 홍석원, 이판목, 이종무 외 (2000). 반자율무인잠수정의 운항제어 및 매니퓰레이터 기술 개발, 한국해양연구원 연구보고서.
 홍현수, 이장규, 박찬국 (2002). “초기 기수각 정보가 필요한 SDINS의 운항중 정렬”, 제어자동화시스템공학회논문집, 제8권, 제6호, pp 524-532.
 An, P.E., Healey, A.J., Park, J. and Smith S.M. (1997). "Asynchronous Data Fusion for AUV Navigation via Heuristic Fuzzy Filtering Techniques," Proc. of Ocean 97

- Conference, Vol 1, pp 397-402.
- An, P.E., Healey, A.J., Smith, S.M. and Dunn, S.E. (1996). "New Experimental Results on GPS/INS Navigation for Ocean Voyager II AUV", Proceedings of AUV '96, pp 249-255.
- Beiter, S., Poquette, R., Filipo, B.S. and Goetz, W. (1998). "Precision Hybrid Navigation System for Varied Marine Applications," Position Location and Navigation Symposium, IEEE, pp 316-323, 20-23.
- Gelb, A. (1974). Applied optimal estimation, MIT Press, Cambridge.
- Kinsey, J.C. and Whitcomb, L.L. (2003). "Preliminary Field Experience with the DVLNAV Integrated Navigation System for Manned and Unmanned, Submersibles", 1st IFAC Workshop on Guidance and Control of Underwater Vehicle.
- Larsen, M.B. (2000a). "Synthetic Long Baseline Navigation of Underwater Vehicles", Proc of Oceans 2000 Conference, Vol 3, pp 2043-2050.
- Larsen, M.B. (2000b). "High Performance Doppler Inertial Navigation - Experimental Results," Oceans 2000 Conference, Vol 2, pp 1449-1456.
- Marco, D.B. and Healey, A.J. (2001). "Command, Control, and Navigation Experimental Results with the NPS ARIES AUV," IEEE J of Oceanic Engineering, Vol 26, No 4, pp 466-476.
- Milne, P.H. (1983). Underwater Acoustic Positioning Systems, Gulf Publishing Company.
- Titterton, D.H. and Weston, J.L. (1997). Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Pegerinus, London.
- Trimble, G.M. (1998). "The Doppler Inertial Acoustic System for Littoral Navigation (DIAS)," Proceedings of AUV '98, pp 27-33, 20-21.
- Uliana, M., Andreucci, F. and Papalia, B. (1997). "The Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle for Antarctic Exploration," Oceans '97. Conference, Vol 1 , pp 403-408.
- Yun, X., Bachmann, E.R., McGhee, R.B., Whalen R.H., Roberts, R.L., Knapp R.G., Healey, A.J. and Zyda, M.J. (1999). "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.

2003년 6월 13일 원고 접수

2003년 11월 19일 최종 수정본 채택