

두개의 초음파 거리계를 이용한 관성센서 기반의 의사 장기선 (Pseudo-LBL) 복합항법 알고리즘

이판묵* · 전봉환* · 홍석원* · 임용곤* · 양승일*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템기술연구본부

Pseudo Long Base Line (LBL) Hybrid Navigation Algorithm Based on Inertial Measurement Unit with Two Range Transducers

PAN-MOOK LEE*, BONG-HUAN JUN*, YONG-KON LIM*, SEOK-WON HONG* AND SEUNG-IL YANG*

*Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI), KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Range Sonar 초음파 거리계, Inertial Measurement Unit 관성계측센서, Pseudo Long Base Line 의사 장기선, Underwater Navigation 수중항법, Autonomous Underwater Vehicle (AUV) 자율무인잠수정

ABSTRACT: This paper presents an integrated underwater navigational algorithm for unmanned underwater vehicles, using additional two-range transducers. This paper proposes a measurement model, using two range measurements, to improve the performance of an IMU-DVL (inertial measurement unit - Doppler velocity log) navigation system for long-time operation of underwater vehicles, excluding DVL measurement. Extended Kalman filter was adopted to propagate the error covariance, to update the measurement errors, and to correct the state equation when the external measurements are available. Simulation was conducted with the 6-d.o.f. nonlinear numerical model of an AUV in lawn-mowing survey mode, at current flow, where the velocity information is unavailable. Simulations illustrate the effectiveness of the integrated navigation system, assisted by the additional range measurements without DVL sensing.

1. 서 론

수중을 항해하는 무인잠수정은 안정적인 운항, 정확한 궤도 추적과 유도제어를 위하여 고정밀의 항법시스템을 필요로 한다. 무인잠수정의 수중위치추적을 위한 일반적인 방법은 장기선 (LBL, long baseline), 단기선 (SBL, short baseline), 초단기선 (USBL, ultra short baseline) 등의 초음파 위치추적시스템이다 (Milne, 1983). 이러한 초음파 위치추적시스템은 해저에 기준점을 설정해야 하고 위치정보를 얻는 시간간격이 길며 랜덤 오차가 큰 단점이 있다. 따라서 무인잠수정 자체에 내장되는 관성센서와 보조 항법센서를 이용하는 수중 복합항법시스템에 대한 연구가 진행되어 왔다.

무인잠수정의 항법을 위하여 초음파 속도계(Doppler velocity log, DVL)는 필수 보조 항법센서로 이용되고 있으며, DVL과 관성센서(IMU, inertial measurement unit)의 신호를 융합하여 IMU-DVL 기반의 수중 복합항법시스템을 구현하는 방법이 많이 사용되고 있다 (Larsen, 2000; 이종무 외, 2003a~b; Lee et al., 2005). 심해에서 LBL의 위치추적 정밀도를 높이기 위하여 DVL 신호를 융합하는 항법에 관한 연구도 진행되었다 (Whitcomb et al., 1999; Kinsey and Whitcomb, 2004).

이판묵 외 (2004, 2005)와 Lee et al. (2004ab)는 무인잠수정의 IMU-DVL 복합항법시스템의 성능을 개선시키기 위하여 해저의 기준점에 대한 무인잠수정의 거리정보를 얻을 수 있는 초음파 거리계를 도입하였다. 이들은 AUV에 장착된 능동형 소나를 이용하고 해저에 설치된 핑거로부터 얻어지는 응답시간을 측정하는 방식의 초음파 거리계(RS, range sonar)를 도입하여 관성센서 기반의 수중 통합항법시스템(IMU-DVL-RS)을 구성하였다.

DVL에서 얻어지는 속도신호가 항법시스템의 보정 신호로 사용되기 위해서는 절대 속도이어야 한다. 한편, DVL이 절대 속도를 얻기 위해서는 DVL에서 발신되는 초음파 신호가 반드시 해저면 또는 수면에 반사되는 신호를 취득할 수 있어야 한다. 통상 DVL은 사용 주파수에 따라 수십 미터에서 백미터 정도의 범위에서 반사파를 얻을 수 있다(RD Instruments, 1997). 따라서 수중 중간영역과 같이 반사파를 얻을 수 없는 공간에 무인잠수정이 존재하는 경우에는, DVL이 절대기준에 대한 속도를 얻지 못하므로 더 이상 절대속도를 제공하지 못하는 단점이 있다.

본 논문은 수중항법에 필수적인 DVL의 속도정보를 사용하지 않으면서 항법정밀도를 유지할 수 있는 수중 복합항법 알고리즘을 제안하고자 한다. 해저에 3개 이상의 기준점을 갖는 LBL 초음파 위치추적 시스템(Milne, 1983)의 개념을 도입한 항법 시스템으로서, 본 논문은 관성센서를 기반으로 하면서 두

제1저자 이판묵 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171
042-868-7532 pmllee@moeri.re.kr

개의 초음파 기준점을 이용하는 방법을 제안한다. 해저에 두 개의 기준점에 수중음향 트랜스폰더를 설치하여 무인잠수정에서 거리를 취득함으로써, 두 개의 거리정보를 관성항법시스템의 보조 신호로 사용하는 통합항법 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 이 방법을 의사 장기선 (Pseudo-LBL) 복합항법 알고리즘이라고 칭하였다.

제안된 방법은 해저에 두 개의 센서를 추가로 설치하는 단점이 있으나, LBL과 비교하여 운용이 간편하고 IMU-DVL 항법과 비교하여 DVL을 사용하지 않는 장점이 있다. 또한 얼음 밑과 같이 LBL 센서를 설치하기 어려운 해역에서, 두 개의 기준점에 얼음 구멍을 내고 센서를 늘어뜨려 의사 LBL을 구현하는 경우에는 실용적인 방법이 된다.

제안된 항법 알고리즘은 관성항법시스템의 수학적모델에 초음파 거리계의 오차모델을 포함하고, 상태변수가 22차이며, 확장 칼만필터를 이용하여 오차 공분산의 진파와 상태변수를 보정하는 과정으로 구성된다. 본 논문에서는 칼만 필터를 통하여 얻어지는 항법시스템의 상태변수 추정치와 측정치의 오차를 이용하여 변수 추정치를 보정하는 방식의 간접터먹임법을 이용하였다. 조류중에서 6자유도 수중운동을 하는 AUV의 'c' 모드 운항에 대한 시뮬레이션을 통하여 개발된 수중 복합항법시스템의 성능을 수치적으로 검증하였다. 개발된 의사 LBL 수중 통합항법 알고리즘이 해저면에 대한 상대 속도를 측정할 수 없는 경우에도 관성항법시스템이 표류하는 것을 방지할 수 있는지 시뮬레이션 하였다.

2. 의사 LBL 항법 알고리즘

2.1 스트랩다운 관성항법시스템

운항중인 선체에 대한 위치추정은 스트랩다운 관성센서(IMU)를 갖는 선체에서 가속도와 각속도를 계속하고, 물체좌표계를 지구고정좌표계로 변환하여 얻어진 항법방정식에 대하여 센서좌표계의 가속도 및 각속도를 적분함으로써 항주체의 위치변화와 자세를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 가속도와 각속도를 직접 적분하지 않고 이들의 미소 변화량에 대한 항법오차방정식을 적분하는 간접방식을 이용하였다 (Titterton and Weston, 1997; Lee et al., 2005).

일반적으로 스트랩다운 관성센서의 가속도 신호와 각속도 신호는 오차성분을 포함하고 있으므로, 관성센서에서 측정된 신호를 적분할 경우에 시간의 제곱에 비례하여 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 스트랩다운 관성센서의 오차가 불규칙 바이어스 오차와 백색잡음으로 구분될 수 있다고 가정하였다. 스트랩다운 IMU의 가속도 및 자이로 센서의 출력 오차를 각각 δf^b 와 $\delta \omega_{bb}^b$ 로 나타내면, 식(1)과 (2)와 같이 랜덤 변수와 백색잡음 벡터의 조합으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\delta f^b = \nabla + w_a(t), \quad w_a(t) \sim \mathcal{N}(0, Q_a) \quad (1)$$

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

$$\delta \omega_{bb}^b = \varepsilon + w_g(t), \quad w_g(t) \sim \mathcal{N}(0, Q_g) \quad (2)$$

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

여기서, 가속도센서와 자이로의 바이어스 오차 ∇ 와 ε 은 미지의 랜덤 변수이고, 계측 오차 w_a 와 w_g 는 평균이 영이며 공분산이 Q_a 와 Q_g 인 백색잡음이라고 가정하였다.

관성센서의 백색잡음 특성이 변화하지 않는다면 필터를 이용하여 백색잡음을 제거할 수 있지만, 관성센서의 바이어스 오차는 별도로 추정하여 제거하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 바이어스 오차를 항법시스템의 상태변수로 정하고 외부의 계측신호를 이용하여 터먹임 방식으로 보정하였다.

2.2 의사 LBL을 이용한 거리관측 모델

Fig. 1는 AUV에 트랜스폰더를 설치하여 음파를 방출하고 계류장치와 수중진수장치 각각의 트랜스폰더의 응답신호를 수신하여 거리를 측정하는 개념을 나타낸다. AUV는 수중음파의 수신지연시간을 측정하여 AUV와 계류장치, AUV와 진수장치의 거리를 측정할 수 있다. Fig. 1에서 계류장치와 수중진수장치의 트랜스폰더 위치는 지구고정좌표계에 대하여 각각 (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) 이고, AUV와의 거리는 R_1 , R_2

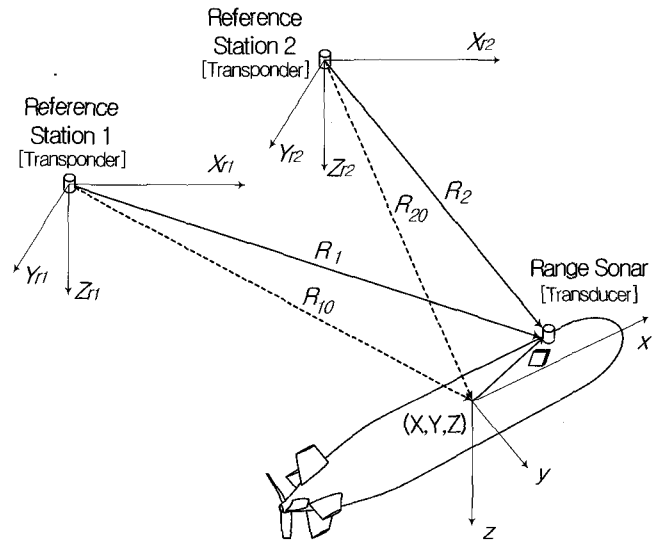


Fig. 1 Coordinates of the range measurement of an AUV for two reference stations.

이며, AUV의 중심위치는 (X, Y, Z) 이다. AUV에 설치된 트랜스폰더의 위치가 물체고정좌표계에 대하여 ρ 라면, 거리 R_1 과 R_2 벡터는 AUV의 자세를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{R}_1 = \vec{R}_{10} + C_b^n \vec{\rho} \quad (3)$$

$$\vec{R}_2 = \vec{R}_{20} + C_b^n \vec{\rho} \quad (4)$$

여기서 트랜스듀서의 설치 위치벡터와 좌표변환행렬 C_b^n 은 다음과 같고,

$$\vec{\rho} = (\rho_x, 0, \rho_z)$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi & \sin \phi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & -\sin \phi \cos \phi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

ϕ , θ , ψ 는 각각 AUV의 롤, 피치, 선수 각을 나타낸다.

의사 LBL의 거리정보를 스트랩다운 관성항법시스템의 보조 센서로 활용하기 위해서는 거리측정 오차모델이 필요하다. 두 기준점과의 거리 R_1 , R_2 는 다음으로 표기될 수 있다.

$$R_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2} \quad (5)$$

$$R_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2} \quad (6)$$

여기서,

$$X_1 = X - X_{n1} + C_{11}\rho_x + C_{13}\rho_z \quad (7)$$

$$Y_1 = Y - Y_{n1} + C_{21}\rho_x + C_{23}\rho_z$$

$$Z_1 = Z - Z_{n1} + C_{31}\rho_x + C_{33}\rho_z$$

$$X_2 = X - X_{n2} + C_{11}\rho_x + C_{13}\rho_z \quad (8)$$

$$Y_2 = Y - Y_{n2} + C_{21}\rho_x + C_{23}\rho_z$$

$$Z_2 = Z - Z_{n2} + C_{31}\rho_x + C_{33}\rho_z,$$

C_{ij} 는 C_b^n 의 i 행 j 열 성분을 의미한다.

스트랩다운 IMU를 이용한 AUV의 위치추정에 오차가 존재하므로, 이를 이용한 거리추정에도 오차가 존재한다. 거리추정 오차모델은 거리 추정오차 δR_1 과 δR_2 을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{R}_1 &= R_1 + \delta R_1 \\ &= R_1 + \frac{X_1}{R_1} \delta X + \frac{Y_1}{R_1} \delta Y + \frac{Z_1}{R_1} \delta Z \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \widehat{R}_2 &= R_2 + \delta R_2 \\ &= R_2 + \frac{X_2}{R_2} \delta X + \frac{Y_2}{R_2} \delta Y + \frac{Z_2}{R_2} \delta Z \end{aligned} \quad (10)$$

한편, 거리측정치에는 바이어스 오차와 백색잡음 오차가 존재한다고 가정하였다. 거리측정치의 바이어스 오차는 초음파 신호가 전파·수신되는 시간지연에 AUV가 이동하는 것, 음속 오차, 다중 경로에 기인하는 위치오차 등이 있다. 또한 수중진수장치의 거리는 수중진수장치의 드리프트 운동으로 유발되는 바이어스 오차 성분이 추가된다. 거리측정의 백색잡음을 v_{R_i} 바이어스 오차를 R_b 라 표기하면, 두 거리측정 모델 R_{1meas} , R_{2meas} 는 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$R_{1meas} = R_1 + R_{1b} + v_{R1} \quad (11)$$

$$R_{2meas} = R_2 + R_{2b} + v_{R2} \quad (12)$$

따라서, 거리 R_1 , R_2 에 대하여 추정치와 측정치의 오차모델은 다음으로 얻어진다.

$$\widehat{R}_1 - R_{1meas} = \frac{X_1}{R_1} \delta X + \frac{Y_1}{R_1} \delta Y + \frac{Z_1}{R_1} \delta Z - R_{1b} - v_{R1} \quad (15)$$

$$\widehat{R}_2 - R_{2meas} = \frac{X_2}{R_2} \delta X + \frac{Y_2}{R_2} \delta Y + \frac{Z_2}{R_2} \delta Z - R_{2b} - v_{R2} \quad (16)$$

의사 LBL의 거리측정센서 외에도 무인잠수정의 보조항법 센서로 심도계, 도플러 속도계 및 방위계가 쓰일 수 있다. 속도 신호는 DVL을 사용하지 않고 AUV의 공칭 속도를 사용하였다. 심도계와 방위계의 오차도 같은 방법으로 랜덤변수와 백색잡음으로 모델링될 수 있다.

스트랩다운 IMU로부터 얻어지는 추정변수 \widehat{h} , \widehat{V}^n , $\widehat{\psi}$ 와 계측오차 h_{meas} , V_{meas}^n , ψ_{meas} 의 차이는 다음으로 모델링 된다.

$$\widehat{h} - h_{meas} = (h + \delta h) - (h + h_b) = \delta h - h_b \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \widehat{V}^n - V_{meas}^n &= (V^n + \delta V^n) - C_b^n (V^b + V_b^b) \\ &= \delta V^n - V^n \times \Phi - C_b^n V_b \end{aligned} \quad (18)$$

$$\widehat{\psi} - \psi_{meas} = \delta \psi - \psi_b \quad (19)$$

여기서, δ 성분은 각 변수의 추정오차를 나타내며, h_b 는 심도계의 바이어스, V_b 는 속도신호의 비정렬오차와 환산오차에 기인하는 오차, ψ_b 는 방위각 바이어스, C_b^n 은 물체고정 좌표계에서 항법좌표계로의 변환행렬, Φ 는 AUV의 오일러 자세각이다.

의사 LBL을 보조항법 센서로 사용하는 수중 통합항법시스템
의사 LBL의 수중음향 트랜스듀서를 이용한 거리측정치를 보조센서로 사용하고, 심도, 도플러 속도계 및 방위계를 이용하는 스트랩다운 IMU 항법시스템의 상태방정식은 다음으로 정리된다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + u(t), \quad w \sim N(0, Q(t)) \quad (20)$$

여기서,

$$x = [\delta L \ \delta l \ \delta h \ \delta V_n^T \ \phi^T \ \nabla_a^T \ \varepsilon_g^T R_{1b} R_{2b} h_b a_v \psi_b]^T$$

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

F(t)는 Titterton과 Weston(1997)와 Lee et al.(2005)이 정리한 것과 같은 스트랩다운 IMU의 시스템 행렬로서, AUV의 위치, 속도, 자세를 계산하는 항법방정식의 미소변화량에 대한 오차방정식으로부터 얻어진다. 시스템의 상태변수 $x(t)$ 는 22개의 상태 오차를 나타내며, δL 과 δl 은 위도 및 경도 오차, δh 는 고도 오차, δV_n 는 3차의 속도오차 벡터, ϕ 는 3차의 AUV 자세오차 벡터, ∇_a 및 ε_g 는 가속도계 및 자이로의 바이어스 오차 벡터, a_v 는 속도신호의 환산오차 벡터, ψ_b 는 방위각 바이어스 오차를 나타낸다. 계측오차 w 는 제로 평균이며 오차공분산이 $Q(t)$ 인 가속도계 및 자이로의 노이즈를 나타낸다.

식(15), (16)에서 X, Y, Z를 지구반경을 고려하여 L, l, h로 치환하고, 식(15)~(19)를 오차상태변수로 재구성하면 k번째 시간 스텝에서 얻어지는 측정방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \begin{Bmatrix} \mathcal{R}_1 - R_{1meas} \\ \mathcal{R}_2 - R_{2meas} \\ \hat{h} - h_{meas} \\ \mathcal{V}^n - V_{meas} \\ \hat{\psi} - \psi_{meas} \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} D_1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 6} & -1 & 0 & 0 & 0_{1 \times 3} & 0 \\ D_2 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 6} & 0 & -1 & 0 & 0_{1 \times 3} & 0 \\ D_3 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 6} & 0 & 0 & -1 & 0_{1 \times 3} & 0 \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & -V^{n \times} & 0_{1 \times 6} & 0 & 0 & 0 & -C_b^n & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 2} & -1 & 0_{1 \times 6} & 0 & 0 & 0_{1 \times 3} & -1 \end{bmatrix} x(t_k)$$

$$+ \begin{Bmatrix} v_R(t_k) \\ v_R(t_k) \\ v_R(t_k) \\ v_R(t_k) \\ v_{\alpha_b}(t_k) \end{Bmatrix} \quad (21)$$

여기서,

$$D_1 = [X_1/R_1 \ Y_1/R_1 \ Z_1/R_1]$$

$$D_2 = [X_2/R_2 \ Y_2/R_2 \ Z_2/R_2]$$

$$D_3 = [0 \ 0 \ 1]$$

이고, \wedge 은 추정치, $v(t_k)$ 는 각 센서의 측정오차를 나타낸다.

항법오차의 추정은 확장 칼만필터(Gelb, 1974)를 통하여 이루어지며, 간접되먹임방식으로 최종 항법해가 얻어진다. 이 항법 시스템은 보조센서의 신호가 없는 경우에는 확장 칼만필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 외부의 측정신호가 유효한 경우에 오차행렬과 상태변수를 보정한다.

3. 의사 LBL 항법을 이용한 AUV의 위치추정 수치해석

3.1 AUV 운동 시뮬레이션

본 논문에서 개발된 수중 복합항법시스템의 성능을 검증하기 위하여 SAUV에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다(이판목 외, 2004a). 이 SAUV는 자세계측을 위한 IMU로 미국 하니웰사의 HG1700AG11 IMU를 내장하고, 압력센서와 마그네틱 컴파스를 내장하고 있다.

의사 LBL의 초음파 거리계는 정지상태에서 0.5m 이내의 정밀도를 유지하면서 측정이 가능하다고 상정하였다. 그러나 AUV가 운항중인 경우에는 초음파 전달시간 경과에 따른 AUV의 운동에 의한 위치오차와 다중경로 오차 등의 외란이 존재한다고 가정하였다. 초음파 거리계는 측정범위에 따라 샘플 시간간격이 정해지며, 본 시뮬레이션에서는 0.5초, 1.0초, 2.0초 및 4.0초의 시간간격을 갖고 샘플링 되는 경우를 고려하였다. AUV의 속도가 3 노트이며 의사 LBL의 거리계가 1.0초의 샘플 간격을 갖는 경우 초음파 거리계의 바이어스 오차가 평균 1.0m가 되는 것으로 정하였다. Table 1은 의사 LBL의 거리 정보를 이용하는 수중 통합항법시스템의 시뮬레이션에 사용되는 센서의 사양을 정리하였다.

Table 1 Specification of the sensors of the integrated navigation system.

| | Bias Error | Random Noise |
|-----------------------|--------------|--------------|
| Accelerometer(ang) | 1.0 | 50.0 |
| Gyro | 1.0 deg/hour | 0.3 deg/sec |
| Range Sonar(m) | 1.0 | 0.5 |
| Magnetic Compass(deg) | 10.0 | 1.0 |
| Depthmeter(m) | 0.5 | 0.5 |

시뮬레이션은 이판목 외 (2004a)와 동일한 방법으로 AUV의 6자유도 운동방정식을 이용하였고, 각각의 센서 특성에 부합되는 바이어스와 랜덤 노이즈를 추가하여 측정치를 생성하였다. 시뮬레이션을 위한 AUV의 초기위치는 한국해양연구원 해양공학수조의 위치를 입력하였으며, 초기 선수각은 북쪽을 바라보는 것으로 정하였다.

지구고정좌표계는 북쪽을 X축으로, 동쪽을 Y축으로 하고 연직하방을 Z축으로 정하였고, 물체고정좌표계는 AUV의 선수방향을 x로 정하였다. AUV의 출발점을 원점으로 하고, 의사 LBL의 트랜스듀서는 계류 기준점과 수중진수장치의 기준점을 각각 (50,-50,0)m와 (-50,50,20)m에 설치된 것으로 정하였다. 시뮬레이션은 조류가 존재하는 해역에서 AUV가 운항하며, AUV의 대수속도만을 계측할 수 있는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 조류는 0.2 m/s로 북쪽(X축) -30도 방향에서 흘러오는 경우를 고려하였다.

시뮬레이션은 총 600초 동안 수행되었으며, IMU의 샘플링 주기는 100Hz, DVL의 샘플링 주기는 2Hz이었다. AUV가 해저면을 따라 '르'자 모양(lawn-moving survey mode)으로 이동

하며 해저를 조사하는 임무를 수행하는 것으로 가정하였고, 직선 코스 중간에 고도를 5m 씩 번갈아 증감하는 임무를 수행하는 것으로 가정하였다. SUV는 운항중에 선속, 선수각 및 심도를 제어하며 LQ 제어를 이용하였다. Fig. 2는 AUV의 운동 시뮬레이션 결과 데이터 중에서 DVL로 측정된 대수속도를 나타내고, Fig. 3은 0.5초의 샘플간격을 갖는 경우에 의사 LBL의 초음파 거리계로부터 얻어진 거리 데이터를 나타낸다. AUV의 운동 시뮬레이션은 AUV의 수학모델을 오일러 방법으로 적분하였으며, 시간증분은 0.01초로 하였다.

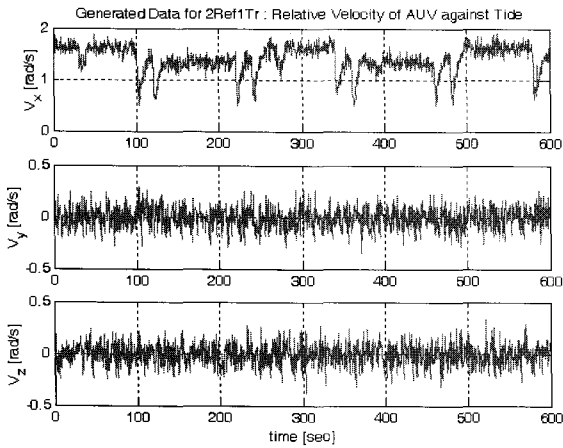


Fig. 2 Simulated relative velocities of AUV motion in current.

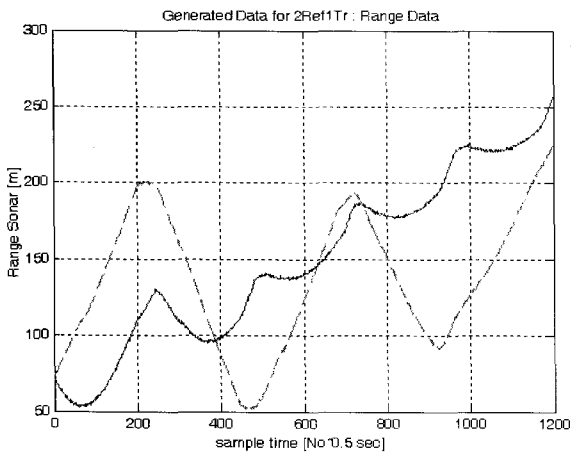


Fig. 3 Simulated range 1 and range 2 of AUV motion.

3.2 IMU-DVL 항법시스템 성능검토

제한된 통합항법시스템의 성능시험에 앞서, 도플러 속도계와 심도계 및 방위계를 이용하는 기존의 IMU-DVL 항법시스템의 항법 성능을 검토하였다. 본 논문에서 고려한 해양환경 조건은 AUV의 속도계가 대지속도를 측정하지 못하고 대수속도를 측정하며 조류가 존재하는 해역이다.

시뮬레이션은 항법모델 (20)과 (21)에서 거리정보를 제외하고 수행되었다. Fig. 4는 대수속도를 이용하는 IMU-DVL 항법시스템의 X-Y 평면 위치추적 결과를 나타낸다. DVL에서 얻어지는

속도정보에 조류에 의한 영향이 포함되어 있으므로 추정되는 AUV의 위치가 시간이 경과함에 따라 계속 누적되어 큰 오차를 보이고 있다. 따라서 IMU-DVL 항법은, 조류가 존재하는 해양에서 절대속도를 측정할 수 있는 경우에 수중 항법시스템으로 사용 가능하지만, 대수속도만이 측정 가능한 경우에 대수속도를 이용하여 항법을 수행하는 것은 불가능하다.

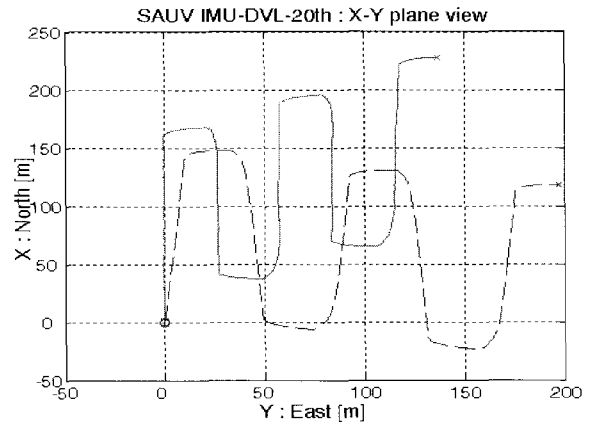


Fig. 4 Estimated X-Y trajectory of the AUV with a conventional IMU-DVL navigation system: solid line estimated, dotted line real trajectory.

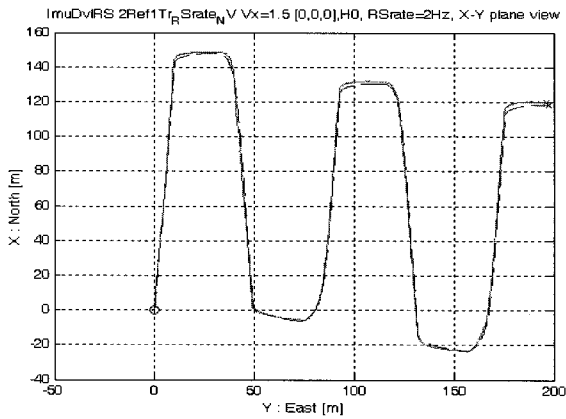
3.3 의사 LBL을 이용한 수중통합항법

의사 LBL의 거리정보를 이용함으로써 조류가 존재하는 해역에서도 AUV의 위치추정을 정확히 할 수 있는 것은 무인잠수정의 속도정보를 의사 LBL의 거리정보가 보정하기 때문이다. 따라서 의사 LBL의 거리측정을 이용하는 경우에는 AUV의 정확한 속도측정이 필요하지 않게 된다. 본 연구에서는 DVL을 장착하지 않은 AUV가 어떤 속도 범위에서 운항할 경우에 AUV의 공칭속도를 이용하여 IMU의 속도보정을 하는 경우에 대하여 항법 성능을 검토하였다.

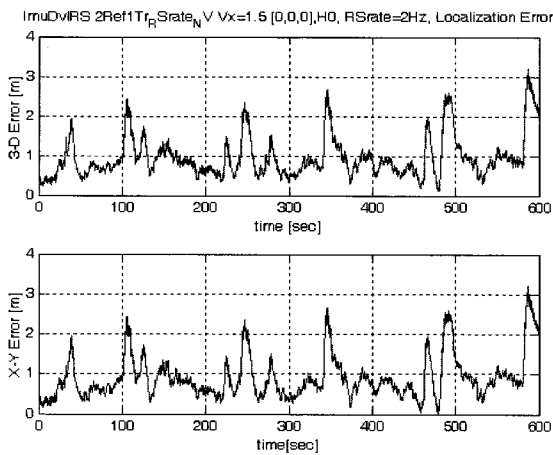
Fig. 2에서 알 수 있듯이 SAUV는 선수방향에 따라 속도가 다른 값을 가지며, 방위를 변경하거나, 수심을 변화할 때에 전진속도가 떨어지는 경향을 보이고 있다. 본 논문에서는 AUV가 1.5m/sec의 일정 속도로 전진하도록 제어하여 운동 데이터를 생성하였다.

Fig. 5(a)는 SAUV의 속도를 DVL로 측정하지 않고 공칭속도 1.5m/sec로 지정한 경우에 대한 X-Y 평면의 위치추적 결과를 나타내며, Fig. 5(b)는 이때의 위치추정 오차를 나타낸다. SAUV의 자세가 바뀌어 전진속도가 2배 차이를 갖는 부분에서 위치추정 오차가 크게 존재하나 그 밖의 영역에서는 오히려 더 좋은 결과를 보이고 있다. 이는 SAUV가 1.5m/sec를 유지하도록 선속을 제어한 까닭이다. 속도오차가 존재하는 영역인 자세변화 부분에서 오차가 크게 존재하나 최대 4.0m 이내의 오차를 보이며, 이러한 위치오차는 곧바로 복구되는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션을 통하여, 의사 LBL의 거리정보를 이용하는 수중 통합항법시스템에서는 공칭속도를 이용하여 IMU의 속도를 보정하는 방법이 유효함을 알 수 있다.



(a) X-Y plane trajectory



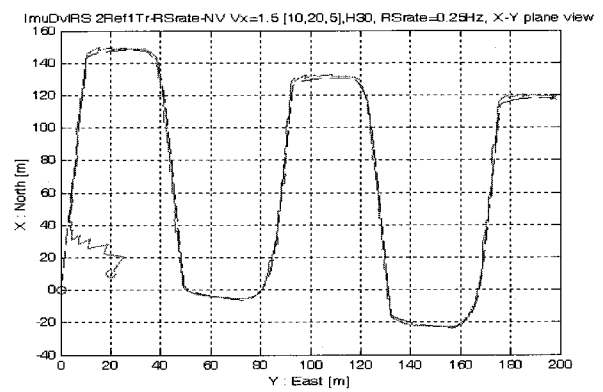
(b) Estimation error

Fig. 5 Simulated results of the Pseudo-LBL with nominal velocity excluding DVL measurement: solid line estimated, dotted line real trajectory.

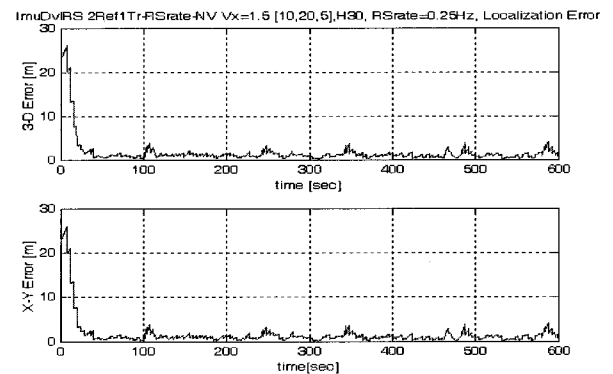
3.4 초기 위치-자세 추정오차의 영향

본 논문에서는 초기위치 오차와 초기자세 오차가 존재하는 경우에 대하여 통합항법시스템의 보정 성능을 검증하였다. 시뮬레이션은 몬테카를로 방법을 이용하여 수행하였다. Fig. 6은 초기위치오차가 X=10m, Y=20m, Z=5m이며, 방위각에 30도 오차가 존재하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 6은 SAUV의 위치와 자세 추정이 20초 이내에 정상 궤도로 복원되는 것을 보이며, 이후의 항법 오차는 초기오차가 없는 경우와 거의 유사한 특성을 보이고 있다. 초기오차가 100m 이내 오차반경에 존재하는 경우에 대해서, 오차의 크기와 위치에 따라 20~30초 이내에 수렴하는 결과를 보였다.

따라서, 의사 LBL의 거리정보를 스트랩다운 IMU 항법 시스템에 적용하는 것은 IMU-DVL 항법이 갖는 한계를 극복할 수 있는 유용한 방법임을 알 수 있었고, DVL의 정보를 이용하지 않고 AUV의 공칭 운항속도를 이용하여 속도를 추정하는 경우에도 DVL을 이용하는 경우와 유사한 성능을 발휘할 수 있었다. 또한, 초기 위치추정 오차가 존재하는 경우에도 강인한 위치추정 성능을 확보함으로써, IMU 항법에서 필요한 초기정렬을 위한 과정을 생략할 수 있는 이점이 있다.



(a) X-Y plane trajectory



(b) Estimation error

Fig. 6 Simulated results of the Pseudo-LBL with nominal velocity including initial position and heading errors: solid line - estimated, dotted line real trajectory (Sample interval of the ranges: 4 seconds).

5. 결 론

본 연구에서는, 해저에 3개 이상의 기준점을 갖는 장기선 (LBL) 초음파 위치추적 시스템과 유사한 시스템으로서, 관성센서를 기반으로 하면서 두 개의 초음파 기준점을 이용하는 의사 장기선 (Pseudo-LBL) 복합항법 시스템의 알고리즘에 대한 연구를 수행 하였다. 해저에 두 개의 기준점에 수중음향 트랜스폰더를 설치하여 무인잠수정에서 거리를 취득함으로써, 두 개의 거리정보를 관성항법시스템의 보조 신호로 사용하는 통합항법 알고리즘을 제안하였다. 개발된 통합항법 알고리즘은 관성항법시스템의 수학모델에 초음파 거리계의 오차모델을 추가하여 구성되고, 확장 칼만필터를 이용하여 오차 공분산의 전파와 상태변수의 보정 과정으로 이루어진다. 조류중에서 6자유도 수중운동을 하는 AUV의 '리' 모드 운항에 대한 시뮬레이션을 통하여 개발된 수중 복합항법시스템의 성능을 수치적으로 검증하였다. 개발된 수중 통합항법시스템은 해저면에 대한 상대 속도를 예측할 수 없는 경우에도 관성항법시스템이 표류하는 것을 방지할 수 있으며, 시간경과에 따른 위치추정오차의 누적을 방지할 수 있는 이점이 있다. 또한, 초기 위치추정 오차가 존재하는 경우에도 강인한 위치추정 성능을 확보함으로써

써, IMU 항법에서 필요한 초기정렬을 위한 과정을 생략할 수 있는 이점이 있다. 따라서 의사 LBL 항법 알고리즘을 이용함으로써, DVL을 이용하지 않고도 IMU-DVL 항법으로 얻을 수 있는 정도의 항법 성능을 갖는 장점이 있다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 지원으로 수행중인 "차세대 심해용 무인잠수정 개발"과 한국해양연구원의 "무인잠수정을 이용한 열수환경탐사 기술 개발" 사업 연구결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 이종무, 이관목, 김시문, 홍석원, 서재원, 성우제 (2003a). "반자율무인잠수정의 수중 복합항법 시스템의 성능평가를 위한 회전팔 시험", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 73-80.
- 이종무, 이관목, 성우제 (2003b). "간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파 속도센서 기반의 수중 복합항법 알고리즘", 한국해양공학회지, 제17권, 제6호, pp 83-90.
- 이관목, 전봉환, 김시문, 이종무, 임용곤, 양승일 (2004). "초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템", 한국해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 33-39.
- 이관목, 양승일, 홍석원, 임용곤, 이종무, 전봉환, 최현택, 김시문, 서영우, 한상철 외 (2005). 차세대 심해용 무인잠수정 개발 (4), 한국해양연구원 연구보고서 UCM00790-05020.
- Gelb, A. (1974). Applied Optimal Estimation, MIT Press.
- Kinsey, J.C. and Whitcomb, L.L. (2004). "Preliminary Field Experience with the DVLNAV Integrated Navigation System for Oceanographic Submersibles," Control Eng. Practice, Vol 12, Issue 12, pp 1541-1549.
- Larsen, M.B. (2000). "High Performance Doppler Inertial Navigation Experimental Results," Oceans Conf., Vol 2, pp 1449-1456.
- Lee, C., Lee, P., Hong, S., Kim, S., Seong, S. (2005). "Underwater Navigation System Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using Indirect Kalman Filter," Int. J. of Offshore and Polar Eng., Vol 15, No 2, pp 88-95.
- Lee, P., Kim, S., Jeon, B., Choi, H. and Lee C. (2004a). "Improvement on an Inertial-Doppler Navigation System of Unmanned Underwater Vehicles Using a Complementary Range Sonar," UT 2004 Symposium.
- Lee, P., Jeon, B., Kim, S., Choi, H., Lee, C., Aoki, T. and Hyakudome, T. (2004b). "An Integrated Navigation System for Autonomous Underwater Vehicles with Two Range Sonars, Inertial Sensors and Doppler Velocity Log," Oceans Techno-Oceans Conf., pp 1586- 1593.
- Milne, P.H. (1983). Underwater Acoustic Positioning Systems, Gulf Publishing Co., Huston.
- RD Instruments Inc. (1997). "Acoustic doppler current profilers - workhorse navigator doppler velocity log technical manual," P/N 957-6023-00, October.
- Titterton, D.H. and Weston, J.L. (1997). Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd., London.
- Whitcomb, L., Yoerger, D. and Singh, H. (1999). "Advances in Doppler-based Navigation of Underwater Robotic Vehicles," Int. Conf. on Robotics & Auto., pp 399-406.

2005년 3월 25일 원고 접수

2005년 9월 28일 최종 수정본 채택