

초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템

이판묵* · 전봉환* · 김시문* · 이종무* · 임용곤* · 양승일*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

A Hybrid Navigation System for Underwater Unmanned Vehicles, Using a Range Sonar

PAN-MOOK LEE*, BONG-HWAN JEON*, SEA-MOON KIM*, CHONG-MOO LEE*, YONG-KON LIM* AND SEUNG-IL YANG*

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

KEY WORDS: Inertial Measurement Unit 관성계측센서, Doppler Velocity Log 도플러 속도센서, Range Sonar 거리계측 소나, Hybrid Navigation System 복합항법시스템, Unmanned Underwater Vehicle 무인잠수정

ABSTRACT: This paper presents a hybrid underwater navigation system for unmanned underwater vehicles, using an additional range sonar, where the navigation system is based on inertial and Doppler velocity sensors. Conventional underwater navigation systems are generally based on an inertial measurement unit (IMU) and a Doppler velocity log (DVL), accompanying a magnetic compass and a depth sensor. Although the conventional navigation systems update the bias errors of inertial sensors and the scale effects of DVL, the estimated position slowly drifts as time passes. This paper proposes a measurement model that uses the range sonar to improve the performance of the IMU-DVL navigation system, for extended operation of underwater vehicles. The proposed navigation model includes the bias errors of IMU, the scale effects of VL, and the bias error of the range sonar. An 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. To illustrate the effectiveness of the hybrid navigation system, simulations were conducted with the 6-d.o.f. equations of motion of an AUV in lawn-mowing survey mode.

1. 서 론

무인잠수정의 항법시스템에 있어서, 스트랩다운 관성항법 시스템은 소형의 관성센서(Inertial measurement unit, IMU)가 내압선체에 내장되어 외부의 도움 없이 자신의 위치를 알 수 있는 장점이 있다. 그러나 관성항법센서는 센서의 바이어스 오차로 인하여 시간이 경과됨에 따라 기하급수적으로 오차가 증가한다. 단시간의 운항에서 관성항법시스템은 정밀한 위치정보를 제공할 수 있지만, 항법정보를 계산하기 위해 적분 과정을 포함하므로 센서 측정 데이터에 포함된 오차가 시간에 따라 계속 항법 정보에 누적된다(Titterton and Weston, 1997). 이러한 관성항법시스템의 단점을 극복하고 성능을 향상시키기 위하여, 비관성 센서인 GPS, 심도계, 도플러 속도센서(Doppler velocity log, DVL), 경사계 또는 마그네틱 컴파스를 보조센서로 활용하는 보조항법시스템을 개발하는 것이 필요하다.

무인잠수정의 수중항법을 위하여 초음파 속도계를 이용하고 관성센서의 신호를 융합하여 IMU-DVL 기반의 수중 복합항법 시스템을 구현하는 방법이 많이 사용되고 있다 (Witcomb et al., 1999; Larsen, 2000; Kinsey and Witcomb, 2003). 천해역에

서 수면에 주기적으로 부상하는 무인잠수정의 경우에는 GPS신호를 이용하는 복합항법시스템으로 구성하기도 한다 (Yun et al., 1999; Macro and Healey, 2001). 한편 심해에서 LBL(Long Base Line)의 위치추적 정밀도를 높이기 위하여 DVL 신호를 융합하는 항법에 관한 연구(Witcomb et al., 1999; Kinsey and Witcomb, 2003)도 최근에 진행 중이다.

본 논문에서는 무인잠수정의 IMU-DVL 복합항법시스템의 성능을 개선시키기 위하여 해저의 기준점에 대한 무인잠수정의 거리정보를 얻을 수 있는 초음파 거리계를 도입하였다(Lee et al. 2004). 본 논문은 AUV에 장착된 능동형 소나를 이용하고 해저에 설치된 핑거로부터 얻어지는 응답시간을 측정하는 방식의 초음파 거리계를 도입하고 DVL과 함께 보조센서로 이용한 관성센서 기반의 수중 복합항법시스템을 구성하였다. 이러한 방법은 관성항법시스템이 갖는 위치추적오차의 누적을 피하면서, 하나의 리스폰더만을 설치하여 운용되므로 LBL 운용을 위하여 4개의 트랜스폰더를 설치하는 것보다 운용이 편리한 이점이 있다. 한편, AUV가 일정수심을 유지하며 해저를 탐사하는 목적으로 많이 사용되므로, 운항되는 AUV는 해저 기준점이 놓인 평면상에서 평면운동을 하는 것으로 가정하였다.

제안된 항법시스템은 관성항법시스템의 수학적모델에 DVL의 환산오차와 바이어스 오차를 포함하며 초음파 거리계의 오차 모델을 포함한다. 수중 복합항법시스템은 상태변수가 21차이며,

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

확장 칼만필터를 이용하여 오차 공분산의 전파와 상태변수의 보정을 수행하였다. 본 논문에서는 칼만 필터를 통하여 얻어지는 항법시스템의 상태변수 추정치와 측정치의 오차를 이용하여 변수 추정치를 보정하는 방식의 간접되먹임법을 이용하였다.

본 논문은 6자유도 수중운동을 하는 AUV가 IMU 기반의 항법시스템으로 구성되어 있으며, DVL과 심도계 및 방위계를 장착하고 있고, 이에 추가적으로 초음파 거리계를 장착하여 기준점으로부터 응답되는 초음파 신호의 시간지연을 이용하여 거리를 측정할 수 있다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. AUV의 경로제어는 '꺾' 모드 운항에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 IMU-DVL 복합항법의 위치추정 성능과 제안된 수중 복합항법시스템의 항법 성능을 비교 검증하였다. 또한, AUV의 운항고도가 높아 해저면으로부터 반사되는 DVL 신호를 이용할 수 없는 경우에도 제안된 수중 복합항법시스템이 적용될 수 있는 가능성을 검토하였다.

2. 초음파 거리계를 갖는 IMU-DVL 기반의 수중복합항법 시스템

스트랩다운 관성센서(IMU)를 갖는 선체의 지구고정좌표계에 대한 항법시스템은 센서좌표계의 가속도 및 각속도 오차 방정식을 이용하고 좌표변환을 수행하여 미분방정식으로 얻어진다(Titterton and Weston, 1997). 스트랩다운 관성센서의 오차는 불규칙 바이어스 오차와 백색잡음으로 모델링할 수 있으므로, 스트랩다운 IMU의 가속도 및 자이로 센서의 출력 오차 δf^b 와 $\delta \omega_{ib}^b$ 는 식(1)과 (2)과 같이 랜덤 변수와 백색잡음 벡터의 조합으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

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

보조항법 센서인 심도계, DVL, 방위계의 오차도 같은 방법으로 랜덤변수와 백색잡음으로 모델링된다면, 스트랩다운 IMU로부터 얻어지는 추정변수 \mathcal{h} , \mathcal{V}^n , ψ 와 예측오차 h_{meas} , V_{meas}^n , ψ_{meas} 의 차이는 다음과 같이 모델링 된다.

$$\mathcal{h} - h_{meas} = (h + \delta h) - (h + h_b) = \delta h - h_b \quad (3)$$

$$\mathcal{V}^n - V_{meas}^n = (V^n + \delta V^n) - C_b^n (V^n + V_b) = \delta V^n - V^n \times \phi - C_b^n V_b \quad (4)$$

$$\psi - \psi_{meas} = \delta \psi - \psi_b \quad (5)$$

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

Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 AUV에 초음파 트랜스듀서가 장착되어 초음파 신호를 발생하고, 기준점의 트랜스폰더가 이에 응답신호를 보내면 AUV는 기준점으로부터의 거리를 환산할 수 있다. 거리를 R 이라 하고, X-Y 수평면에 투영된 각도를 β 로 표시한다. 초기위치가 주어졌 상태에서 AUV의 IMU-DVL 항법시스템은 AUV의 위치와 거리를 추정할 수 있다.

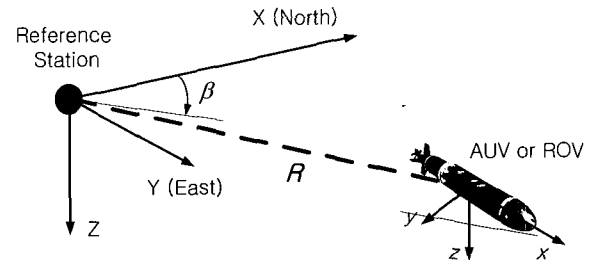


Fig. 1 Coordinates of the line-of-sight angle β projected to the horizontal plane and the range R of a vehicle

거리 추정오차가 δR 이고, 초음파 거리계의 바이어스 오차가 R_b 라고 하면, 거리 추정치와 측정치의 오차는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \mathcal{R} - R_{meas} &= (R + \delta R) - (R + R_b) = \delta R - R_b \\ &= \frac{dR}{dx} \delta x + \frac{dR}{dy} \delta y + \frac{dR}{dz} \delta z - R_b \\ &= \frac{x}{R} \delta x + \frac{y}{R} \delta y + \frac{z}{R} \delta z - R_b \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 초음파 거리센서의 바이어스 오차는 초음파 신호가 전파되는 순간에 AUV가 이동하는 것에 기인하는 위치오차를 의미한다.

해저의 기준점이 AUV의 수심변화에 비하여 충분히 멀리 떨어져 있는 경우에는 AUV의 수심변화에 따른 오차 성분을 무시할 수 있으므로 식(6)은 다음으로 근사된다.

$$\mathcal{R} - R_{meas} \cong \cos \beta \delta L + \sin \beta \delta l - R_b \quad (7)$$

여기서, β 는 항법 알고리즘으로부터 얻어지는 AUV의 위치로부터 추정되는 주시각이고, L 과 l 은 각각 위도와 경도를 나타낸다. 측정방정식은 식(3), (4), (5) 및 (7)로 얻어진다.

따라서 초음파 거리계를 보조센서로 사용하는 IMU-DVL 항법시스템의 상태방정식은 다음으로 정리된다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q(t)) \quad (8)$$

여기서,

$$x = [\delta L \ \delta l \ \delta h \ \delta V_n^T \ \phi^T \ \nabla_a^T \ \varepsilon_g^T \ R_b \ h_b \ a_v \ \phi_b]^T$$

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

F(t)는 Titterton(1997)이 정리한 것과 같은 스트랩다운 IMU의 시스템 행렬로서, AUV의 위치, 속도, 자세를 계산하는 미분방정식으로부터 얻어진다. 시스템의 상태변수 x(t)는 21개의 상태오차를 나타내며, δL과 δl은 위도 및 경도 오차, δh는 고도오차, δV_n는 3차의 속도오차 벡터, φ는 3차의 AUV 자세 벡터, ∇_a 및 ε_g는 가속도계 및 자이로의 바이어스 오차 벡터, a_v는 DVL의 환산오차 벡터, φ_b는 방위각 바이어스 오차를 나타낸다. 측정오차 w는 제로 평균이며 오차공분산이 Q(t)인 가속도계 및 자이로의 노이즈를 나타낸다.

k번째 시간 스텝에서 얻어지는 측정방정식은 오차 상태변수로 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \begin{Bmatrix} \mathcal{R} - R_{meas} \\ \hat{h} - h_{meas} \\ \mathcal{V}^n - V_{meas} \\ \hat{\psi} - \psi_{meas} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

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

$$+ \begin{Bmatrix} v_R(t_k) \\ v_h(t_k) \\ v_v(t_k) \\ v_{ang}(t_k) \end{Bmatrix}$$

여기서, ^는 추정치를 나타내며, C_bⁿ(* , 1)은 좌표변환행렬 C_bⁿ의 첫 번째 행이고, v(t_k)는 각 센서의 측정오차를 나타낸다.

항법오차의 추정은 확장 칼만필터(Gelb, 1974)를 통하여 이루어지며, 간접피드백방식으로 최종 항법해가 얻어진다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 스트랩다운 IMU를 기반으로 하면서 초음파 거리계를 비롯하여 DVL, 심도계 및 방위계를 보조센서로 이용하는 수중 복합항법시스템의 신호 흐름도를 나타낸다. 이 항법시스템은 보조센서의 신호가 없는 경우에는 확장 칼만 필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 외부의 측정 신호가 유효한 경우에 오차행렬과 상태변수를 보정한다.

3. AUV의 수중 복합항법 시뮬레이션

3.1 항법센서 및 AUV 운동 시뮬레이션

본 논문에서 개발된 수중 복합항법시스템의 성능을 검증하기 위하여 SAUV(Hong et al., 2002)에 대하여 시뮬레이션을

수행하였다. 이 SAUV는 자세계측을 위한 IMU로 미국 하니웰사의 HG1700AG11 IMU를, DVL로는 RDI사의 Work Horse Navigator를 내장하고 있다. RDI의 DVL은 서로 대칭인 4개의 센서가 경사각을 갖고 설치되어 수중에서 선체의 운동에 따른 초음파의 해저면에 대한 도플러 효과를 이용하여 3축의 속도를 측정한다.

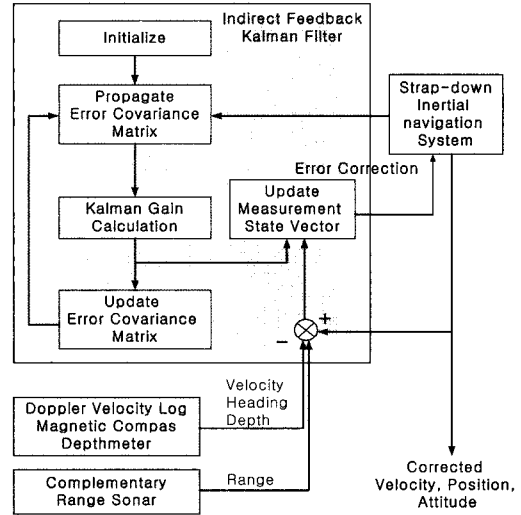


Fig. 2 Schematic diagram of the indirect feedback Kalman filter of the inertial-Doppler navigation with a range sonar

초음파 거리계는 정지상태에서 1.0m 이내의 정밀도를 유지하면서 측정이 가능하나, AUV가 운항중인 경우에는 초음파 전달시간 경과에 따른 위치오차와 다중경로 오차 등의 외란이 존재한다. 초음파 거리계는 측정범위에 따라 샘플 시간간격이 정해지며, 본 시뮬레이션에서는 300m 이내 거리에서 작동하는 것을 기준으로 2 sps로 정하였다. AUV의 속도가 3 노트인 경우 초음파 거리계의 바이어스 오차가 최대 2.0m가 되는 것으로 정하였다. Table 1은 수중 복합항법시스템의 시뮬레이션에 사용되는 센서의 사양을 정리하였다.

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
Range Sonar	2.0 m	2.0 m
DVL	0.01m/s	0.1 m/s
Magnetic Compass	10.0 deg	1.0 deg
Depthmeter	0.5 m	0.5 m

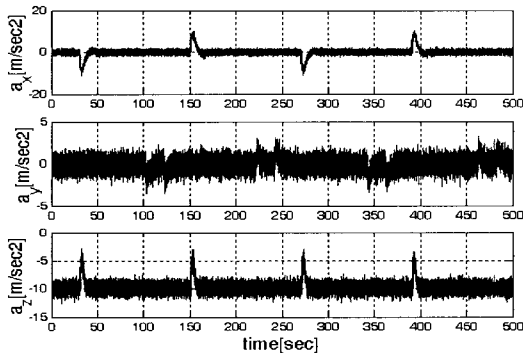
시뮬레이션은 SAUV의 6자유도 운동방정식(Hong et al., 2002)을 이용하였으며, 물체좌표계에 대하여 얻어진 가속도, 각

속도, 속도, 방위각 및 심도 성분에 각각의 센서 특성에 부합되는 바이어스와 랜덤 노이즈를 추가하여 측정치를 생성하였다. 시뮬레이션을 위한 SAUV의 초기위치는 한국해양연구원 해양공학수조의 위치를 입력하였으며, 초기 선수각은 북쪽을 바라보며 자세오차는 없는 것으로 정하였다(Lee et al., 2003).

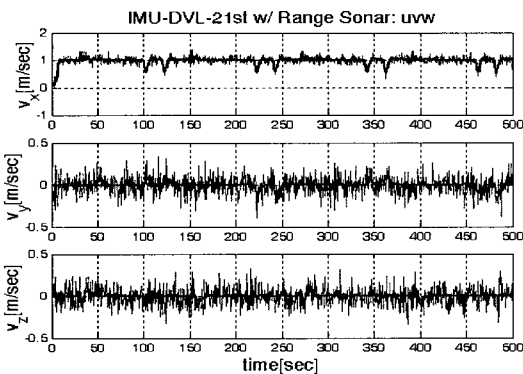
- AUV 초기위치
 - * 경도: 127°21'43.56"
 - * 위도: 36°23' 38.52"
- 초기자세
 - * 롤, 피치, 요 운동 초기오차 = 0°
 - * 선수각: 0°(= AUV 선수각 북쪽)

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

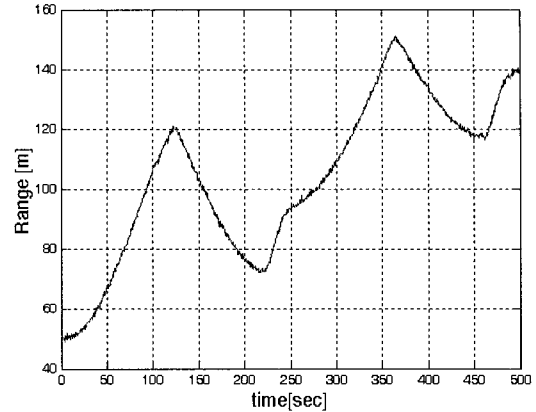
Fig. 3은 AUV의 운동 시뮬레이션 결과 데이터로서 SAUV의 물체좌표계에 대한 3방향 가속도, 자이로, 속도 신호 및 거리 신호를 나타낸다. 선수각과 심도 제어는 LQ 제어를 이용하였으며, 초음파 거리계 정보를 해저의 기준점이 $x=0$, $y=-50$ m에 위치하는 것으로 정하여 얻어진 결과이다.



(a) Accelerations (a_x , a_y and a_z)



(b) Velocities (v_x , v_y and v_z)



(c) Range sonar

Fig. 3 Simulated signals of an AUV motion for the measurement of IMU, DVL and range sonar

3.2 AUV의 수중 복합항법 시뮬레이션

항법오차 모델로 만들어진 항법시스템 모델 (8)와 측정모델 (9)를 이용하여 확장 칼만필터 기반의 수중 복합항법 알고리즘을 구동하였다. DVL 신호와 거리신호가 각각 0.5초 간격으로 얻어지는 매 순간마다 상태변수의 보정이 이루어진다. 초기의 속도와 자세는 미리 알고 있는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션은 거리정보를 이용하지 않는 경우와 거리정보를 이용하는 경우에 대한 항법 성능을 비교 검토하였다. 첫 번째 시뮬레이션은 SAUV가 2Hz로 얻어지는 DVL 신호만을 이용하여 측정치를 생성하고 이때의 선수각과 심도를 이용하여 측정치 벡터를 만드는 방법으로 수행하였다. Fig. 4는 2Hz로 얻어지는 초음파 속도계, 심도계 및 지자기센서의 신호를 이용한 항법시스템의 X-Y 평면상의 위치추정 결과를 나타낸 그림이고, Fig. 5는 이 경우의 위치추정오차를 3차원상의 오차와 X-Y 평면상의 위치오차를 나타낸 그림이다.

보조항법 센서로 거리정보를 제외한 보조센서를 이용하는 복합항법시스템은 500초 경과후의 위치추정 오차가 약 3.5m가

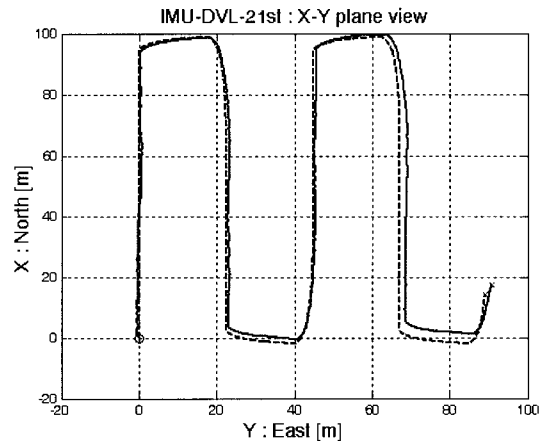


Fig. 4 Estimated position of the AUV with a conventional IMU-DVL navigation system (X-Y plane)

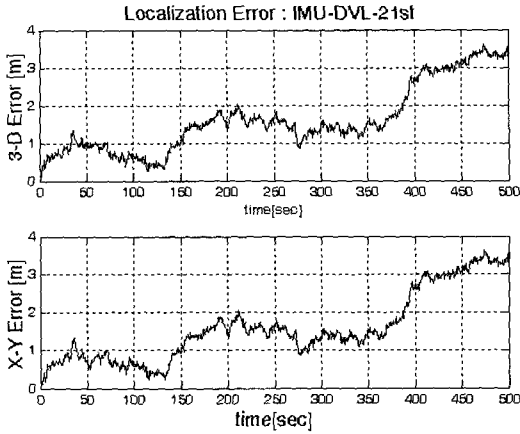


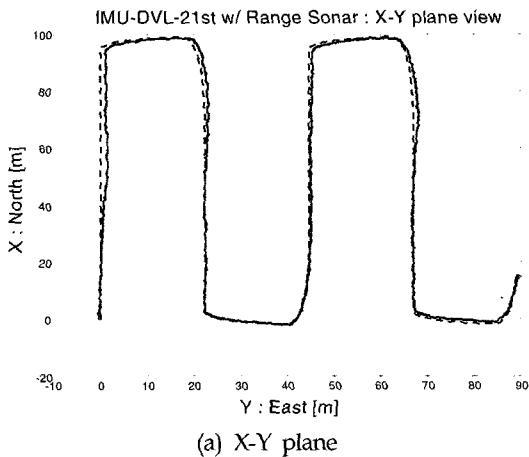
Fig. 5 Position error of the AUV with the conventional IMU-DVL navigation system

되어 비교적 양호한 위치추적이 가능한 항법시스템이 되었다. DVL의 속도 정보를 이용하여 항법오차의 보정이 이루어지므로 IMU 단독의 항법에 비하여 항법 성능이 상당히 개선되었다(Lee et al., 2003). 그러나 이러한 항법 성능 개선에도 불구하고, IMU-DVL 기반의 수중 복합항법시스템은 오차의 드리프트가 시간경과에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

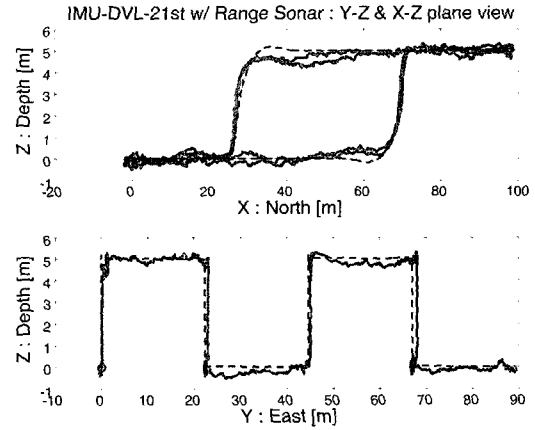
기존의 DVL, 심도계 및 방위계에 초음파 거리계를 추가하여 보조센서로 이용하는 수중 복합항법시스템의 위치추적 시뮬레이션을 수행하였다. 초음파 거리계는 0.5초 간격으로 거리정보가 얻어지며, 시뮬레이션 조건은 앞의 경우와 동일하게 하였다. 거리신호는 DVL과 독립적으로 주어지나 시뮬레이션의 편의를 위하여 동시에 얻어진다고 가정하였다.

Fig. 6은 AUV가 '꺾' 모드로 해저를 조사할 경우의 수평면 위치추적 궤적과 수직면 위치추적을 각각 나타내며, Fig. 7은 거리정보를 이용하는 수중 복합항법시스템의 위치추정 오차를 나타낸다. AUV가 운항한 전반적인 궤적에 대하여 위치추정이 비교적 정확히 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 출발후 30초 경과시에 위치추정 오차가 증가하여 1.5m가 되었으며, 이는 AUV가 수심을 5m로 변화시킴으로써 심도변화에 의한 거리오차 영향이 측정거리를 이용하는 x-y



(a) X-Y plane



(b) X-Z & Y-Z planes

Fig. 6 Estimated position of the AUV with the proposed hybrid navigation system

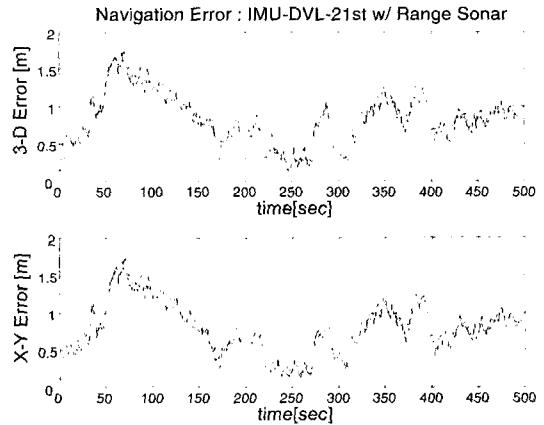


Fig. 7 Position error of the AUV with the proposed hybrid navigation system

평면의 주시각 β 계산에 영향을 준 것임을 알 수 있다. 이 오차는 AUV의 진행방향에 수직인 방향으로 위치보정이 이루어지는 방향으로 영향을 미치고 있다. 한편, 120초 경과후에 AUV가 본래의 수심으로 돌아왔을 때에는 심도변화가 β 계산 오차에 미치는 영향이 작아져 위치추정 오차가 다시 줄어드는 효과를 보였다. AUV가 '꺾' 모드로 해저를 조사할 경우에 기준점과 거리가 멀어지면서 수심변화에 의한 영향은 미미하게 나타났다.

수심이 변화함에도 불구하고, Fig. 7은 거리정보를 보조신호로 이용하는 수중 복합항법시스템의 위치추정오차는 시간경과에 따라 증가하지 않는 특성을 보이고 있다. 500초 시간경과에 대하여 1.0m 범위의 위치오차를 보이며, 거리정보를 이용하지 않는 통상의 IMU-DVL 항법에 비하여 위치추정 성능이 3배 정도 개선되었다. 따라서 초음파 거리센서를 항법 보조센서로 사용하는 수중 복합 항법시스템은 시간경과에 따른 위치추정 오차의 누적을 막을 수 있는 장점이 있다.

AUV가 일정수심을 유지하면서 해저를 운항할 때에 해저 지형변화에 따라 고도가 높아지는 경우에는 DVL 신호가 얻어지

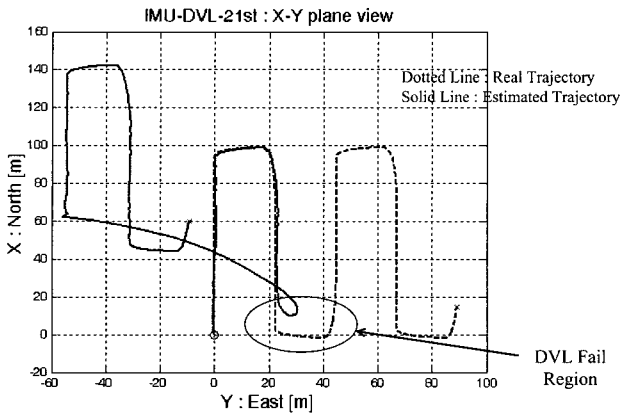


Fig. 8 Position error of the AUV with the conventional IMU-DVL navigation system when DVL failure occurs

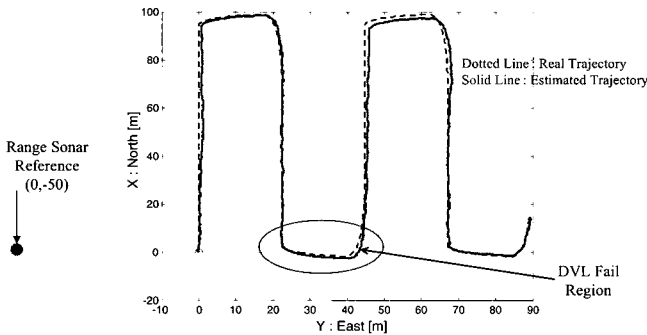


Fig. 9 Position error of the AUV with the proposed hybrid navigation when DVL failure occurs

지 않는 경우가 발생한다. 본 연구에서는 AUV가 출발후 [205, 265]초 사이의 1분 동안 DVL 신호가 들어오지 않는다고 가정 하였을 때에 AUV 위치를 추적하는 항법 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우에는 통상적인 방법과 제안된 복합항법 모두가 발산하는 결과를 보였다. Fig. 8은 통상의 IMU-DVL 항법시스템을 이용하는 경우의 AUV 위치추적 결과를 나타낸다.

DVL 신호가 유효하지 않는 동안에 IMU의 오차누적에 의하여 위치추정치가 발산하므로, 수중항법시스템을 이용하기 위해서는 별도의 속도추정치를 이용해야 한다. Fig. 9는 DVL 신호가 얻어지지 않는 경우에 AUV의 전진 속도 3노트를 이용하여 수중 복합항법시스템을 이용하여 AUV의 위치를 추적한 결과이다. 거리계측 소나를 이용하는 수중 복합항법시스템은 위치 추정 오차가 발산하지 않고 다시 수렴하는 결과를 보였다.

5. 결 론

본 논문은 무인잠수정의 항법을 위하여 초음파 거리계와 도플러 속도계(DVL)를 보조센서로 이용하는 관성센서 기반의 수중 복합항법시스템을 제안하였다. 개발된 항법시스템은 관성항법시스템의 수확모델에 DVL의 환산오차와 바이어스 오차와

초음파 거리계의 오차모델을 포함하며 시스템 차수가 21차이고, 확장 칼만필터를 이용하여 오차 공분산의 전파와 상태변수의 보정을 수행하였다. 6자유도 수중운동을 하는 AUV의 '크' 모드 운항에 대한 시뮬레이션을 통하여 개발된 수중 복합항법시스템의 성능을 검증하였다. 초음파 거리계와 DVL을 보조 센서로 이용하는 경우가 DVL만을 이용하는 항법시스템에 비하여 이용한 항법 성능이 3배 개선되었으며, 개발된 항법 시스템은 시간경과에 따른 위치추정오차의 누적을 방지할 수 있는 장점이 있다. 또한 개발된 수중 복합 항법시스템은 해저면에 대한 상대 속도를 계측할 수 없는 경우에도 관성항법시스템이 표류하는 것을 방지할 수 있는 장점이 있다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 지원으로 수행된 "차세대 심해용 무인잠수정 개발" 사업의 연구결과이다.

참 고 문 헌

이종무, 이판목, 김시문, 홍석원, 서재원, 성우제 (2003). "반자율무인잠수정의 수중 복합항법 시스템의 성능평가를 위한 회전팔 시험", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 73-80.

이종무, 이판목, 성우제 (2003). "간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파 속도센서 기반의 수중 복합항법 알고리즘", 한국해양공학회지, 제17권, 제6호, pp 83-90.

Gelb, A. (1974). Applied optimal estimation, MIT, Cambridge, MA.

Hong, S., Lee, P., Lim, Y., Lee, C., Jeon, B., Park, J., Choi, Y., Kim, S. and Seo, J. (2002). "Design and implementation of a dual use purpose semi-autonomous underwater vehicle", Underwater Defense Technology 2002, Oct. 8-10, Jeju, Korea, pp 101-111.

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, April 9-11, pp 51-60.

Larsen, M.B. (2000). "High performance Doppler inertial navigation experimental results", Oceans 2000 Conf., Vol 2, pp 1449-1456.

Lee, P., Kim, S., Jeon, B., Choi, H. and Lee C. (2004). "Improvement on an inertial-Doppler navigation system of unmanned underwater vehicles using a complementary range sonar", Underwater Technology 2004 Symposium, Taipei, Taiwan, April 21-24, pp 10-19.

Marco, D.B. and Healey, A.J. (2001). "Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol 26, No 4, pp 466-476.

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. 1999, pp. 399-406.
Yun, X., Bachmann, E., McGhee, R., Whalen, R., Roberts, R.,

Knapp, R., Healey, A. and Zyda, M. (1999). "Testing and evaluation of an integrated GPS/INS system for small AUV navigation", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol 24, No 3, pp 396-404.

2004년 7월 7일 원고 접수

2004년 8월 2일 최종 수정본 채택