

고정기준점에 대한 거리측정 신호를 이용하는 자율무인잠수정의 수중항법

이관목* · 전봉환* · 임용곤*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양탐사장비연구사업단

Underwater Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle Using Range Measurements from a Fixed Reference Station

PAN-MOOK LEE*, BONG-HUAN JUN* AND YONG-KON LIM*

*Ocean Exploration System Research Division, MOERI, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Underwater navigation 수중항법 Range measurement 거리측정 Observability 가관측성 Autonomous underwater vehicle (AUV) 자율무인잠수정, Kalman filter 칼만필터

ABSTRACT: This paper presents an underwater navigation system based on range measurements from a known reference station fixed on the sea bottom or floated at surface with a buoy, for which the system is extended to 3-dimensional coordinates. We formulated a state equation in polar coordinates and constituted an extended Kalman filter for discrete-time implementation of the navigation algorithm. The autonomous underwater vehicle, ISiML, cruising with a constant speed can estimate its trajectory using just range measurements and additional depth, heading, and pitch sensors. Simulation studies were performed to evaluate the underwater navigation of the maneuvering AUV with range measurements. We modulated the sample rate of range measurements to evaluate the effect of the update rate, and changed the initial position error of the AUV to check the robustness to estimation errors. Simulation results illustrate that the extended navigation system provides convergence of the state estimates. The navigation system was conditionally stable when it had initial position errors.

1. 서 론

자율무인잠수정의 수중항법을 위하여 초음파 속도계(Doppler velocity log, DVL)를 이용하고 관성센서를 이용하여 맹목항법(Dead-reckoning)하거나 이들 센서의 신호를 거리계측신호와 융합하여 IMU-DVL (Inertial measurement unit - Doppler velocity log) 기반의 수중 복합항법시스템을 구현하는 방법이 많이 사용되고 있다 (이관목 등, 2004; 2005a, 2005b, 2007; Larsen 2000a; Lee et al., 2007; Lee and Jun 2007). 심해에서 LBL의 위치추적 정밀도를 높이기 위하여, Kinsey and Whitcomb (2004)은 DVL 신호를 융합하는 항법에 관한 연구를 수행한 바 있다.

한편, 고정밀의 IMU를 사용하지 않고 상대적으로 크기가 크고 비싼 도플러 속도계를 사용하지 않는 저가형 AUV의 항법에 대한 연구가 필요하다. 이러한 항법 시스템은 한국해양연구원이 개발한 테스트베드 AUV인 이십이와 같이 소형 AUV에 적용 가능하다. 테스트베드 이십이는 직경이 작아 IMU와 DVL을 부착하기 곤란하다. 본 논문은 이의 해결 방법으로써, 해저 또는 수상의 기준점으로부터의 거리신호를 기반으로 하고 자세센서와 심도계를 보조로 이용하는 저가 항법시스템에 대하여 논하고자 한다.

거리(Range) 또는 방위(Bearing) 계측만을 이용하여 목표물의 위치를 추적하고 목표물의 운동해석에 관한 연구가 비행체, 미사일 궤도제어 및 수상선에서의 목표물 추적 분야에서 활발하게 연구되었다. 최근에는 수중에서 운항하는 잠수체의 항법에 거리와 방위 계측을 이용하는 연구가 비교적 활발히 진행되고 있으며, Song(1999), Larsen(2000b), Vaganay et al.(2000), Baccou and Jouvencel(2003), Gadre and Stilwell(2004; 2005a; 2005b) Gadre(2007), Jouffroy and Reger(2006) 등이 거리계측 신호를 이용하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 해저의 기준점 또는 모선 AUV와의 거리정보를 이용하며, AUV에 내장된 방위센서, 경사센서 및 심도계만을 이용하여 저가형 항법시스템 구현 방안을 제안하였다. 거리계측은 미리 시각이 동기화된 수중통신시스템을 이용하며, 시간지연에 따른 음파의 이동거리를 계산하여 거리를 측정하는 센서를 이용하는 것으로 상정하였다.

거리계측을 위한 일반적인 방식은 양방향 신호 교신(Transceiver-transponder) 방식을 이용하나, 본 논문에서는 사전에 정확하게 맞춰진 클럭을 이용하여 AUV 선단간의 시각을 동기화하는 방법을 진제하였다. 양방향 수중음향 모뎀을 이용하여 거리를 측정하는 방법은 수중통신에 부담이 있다. 최근 Eutice et al.(2007)는 WHOI 마이크로 모뎀의 시각을 동기화하여 단방향으로 거리를 측정하는 방법을 제안하였다.

양방향 통신에 의한 거리측정은 AUV에서 Interrogation 신호를 발신하고 트랜스폰더가 이를 수신하여 응답신호를 해당

교신저자 이관목: 대전광역시 유성구 장동 171
042-868-7532 pmlee@moeri.re.kr

AUV에 전송하는 과정을 반복해야 한다. 이 거리측정 방법은 음파가 AUV와 기준점 간에 전파하는 지연시간 동안, AUV 이동에 따른 거리오차 존재하는 단점이 있으며, 단방향 거리계측에 비하여 시간지연이 2배 크다는 단점이 있다.

정밀 관성센서, DVL 및 수중음향모뎀을 사용하지 않는 항법은 저가로 항법 시스템을 구현할 수 있다. 제안된 방법은 조류가 존재하는 해역에서 운항하는 AUV에 대하여, 거리정보를 이용하여 AUV의 위치를 추적하면서 미지의 조류를 온라인으로 추정하는 것을 포함한다. 한편, 거리계측을 외부정보로 이용하는 방법은 시스템을 단순화시킬 수 있는 반면에, 가관측성이 확보되는 것을 증명하고 안정적인 위치추적을 위하여 필요한 운동모드를 정의하는 것이 필요하다.

본 논문은 3차원 공간상에서 정속으로 운항하는 AUV에 대하여 직접 적용이 가능하도록 3차원 운동을 추정하는 확장된 거리측정 신호 기반의 저가형 항법 알고리즘을 개발하였다. 제안된 방법은 수중에서 정속으로 운항하는 다수의 AUV의 위치추정에 적용할 수 있으며, 가관측성 확보 조건에 대하여 문헌(Lee et al., 2008)에서 검토한 바 있다. 이 방법은 다수의 AUV의 항법으로 확장하기 용이한 장점이 있다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 이십이 AUV의 6차유도 수치 모형(이판욱 등, 2007)을 이용하여 항법 알고리즘 성능을 검토하였다. 초기 속도를 갖는 이십이 AUV가 스파이럴 운동으로 심도변화를 갖고 해저면에 도달하면 이때부터 '르'자로 운동을 하면서 해저를 관측하는 탐사모드를 상정하여 운동데이터를 생성하였고, 개발된 알고리즘을 이용하여 추적하는 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 거리정보를 기반으로 하는 저가형 수중항법

2.1 AUV의 운동 모델링

AUV는 일반적으로 정속운동을 하면서 수중을 조사 관측한다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 AUV가 정속으로 운동을 하고 수면 혹은 해저의 기준점 O에 대한 거리를 측정 가능하다고 가정하였다. AUV가 운항하는 해역에는 수평면 방향으로 흐르는 미지의 조류가 존재한다고 가정하였다. 거리측정은 기준점과 AUV의 시각이 동기화된 타이머(Synchronized timer)를 이용하여 단방향으로 거리를 측정할 수 있다고 가정하였다. 이러한 방법은 AUV가 거리측정을 위하여 별도의 음향신호를 발신할 필요가 없으며, AUV가 기준점에서 발신된 신호를 받는 순간의 AUV 위치를 정확히 측정할 수 있으므로 양방향 통신에 의한 거리측정시에 발생하는 AUV 자신의 운동 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

Gadre and Stilwell(2004; 2005a; 2005b)은 AUV의 3차원 운동에 대하여 수직방향은 심도계를 이용하여 구할 수 있으므로 2차원에 투영된 운동으로도 AUV의 항법시스템을 간단하게 구성하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 AUV가 수평면 운동을 하는 경우에는 적합하나, AUV가 상하방향으로 이동하는 경우에는 전진속도가 일정하더라도 x-y 평면에 투영된 속도는 일정하지 않으므로 오차를 갖게 된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 Gadre 방법의 3차원 적용시 발생하는 단점을 극복할 수 있다.

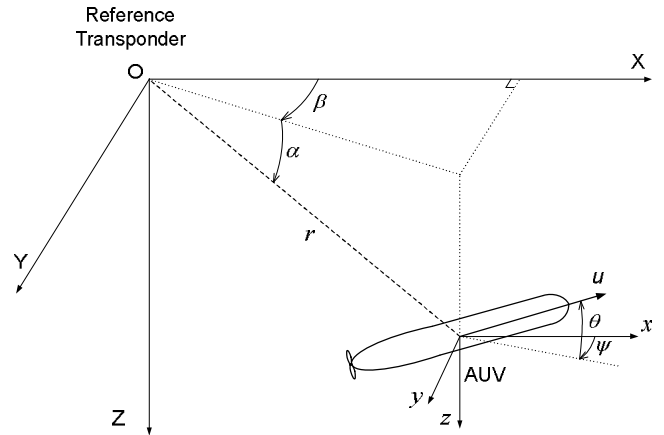


Fig. 1 Coordinates of the range measurement-based underwater navigation

기준점에 대한 AUV의 위치를 (x, y, z) , 전진속도 u_1 , 방위각 ψ , 피치각 θ , 방위각속도 u_2 , 피치각속도 u_3 , x, y 방향에 대한 수평면상의 미지의 조류를 v_x, v_y 라 하고, AUV의 x, y, z 위치, 방위각, 피치각 및 미지의 조류 v_x, v_y 를 상태변수로 다음과 같이 정의하였다.

$$s_r(t) = \{x(t), y(t), z(t), \psi(t), \theta(t), v_x(t), v_y(t)\}^T \quad (1)$$

기준점과의 상대거리, AUV의 심도, 방위각 및 피치각을 측정할 수 있다고 하면, AUV의 속도 관계식으로부터 상태방정식과 관측방정식을 (2), (3)과 같이 각각 정리할 수 있다.

$$\dot{s}_r(t) = \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{v}_x(t) \\ \dot{v}_y(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \cos \theta(t) \cos \psi(t) + v_x(t) \\ u_1 \cos \theta(t) \sin \psi(t) + v_y(t) \\ -u_1 \sin \theta(t) \\ u_2 \\ u_3 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$h(t) = \begin{Bmatrix} \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)} \\ z(t) \\ \psi(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

2.2 거리정보 기반 항법시스템의 가관측성 해석

거리계측 신호를 기반으로 하는 항법시스템은 가관측성을 검토하는 것이 중요하다. 측정된 거리 r 를 직교좌표계로 변환하여 가관측성을 검토하는 것은 수식이 복잡해지므로, 본 논문에서는 극좌표계로 변환된 상태방정식에 대하여 가관측성을 검토하였다.

Fig. 1에서 보이는 것과 같이, 거리측정 신호 기반의 수중항법에 있어서 AUV와 기준점과의 거리를 r 이라 하고, 거리 벡터 r 이 수평면 상에 투영되어 X축과 이루는 각을 베어링각 (Bearing

angle) β 라 정의하고, r 이 X-Y 평면과 수직방향으로 이루는 각을 경사각(Slant angle) α 라고 정의한다.

$$r(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)} \quad (4)$$

$$\alpha(t) = \tan^{-1}\{z(t)/\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}\} \quad (5)$$

$$\beta(t) = \tan^{-1}\{y(t)/x(t)\} \quad (6)$$

여기서, 모든 시간 t 에 대하여 $r(t) > 0$ 이며, $-\pi/2 \leq \alpha(t) \leq \pi/2$ 이다. AUV와 기준점의 상대위치 x, y, z , 상대거리 r , 상대 경사각 α 및 배어링 각 β 는 $x(t) = r(t)\cos\alpha(t)\cos\beta(t)$, $y(t) = r(t)\cos\alpha(t)\sin\beta(t)$, $z(t) = r(t)\sin\alpha(t)$ 와 같은 관계를 갖는다. 극좌표계에 대한 상태변수 $s(t)$ 를 다음과 같이 정의하면

$$s(t) = \{r(t), \alpha(t), \beta(t), \psi(t), \theta(t), v_x(t), v_y(t)\}^T, \quad (7)$$

AUV의 시스템 동력학 모델과 측정방정식은 다음 식으로 정리된다.

$$\dot{s}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \dot{r}(t), \dot{\alpha}(t), \dot{\beta}(t), \dot{\psi}(t), \dot{\theta}(t), \dot{v}_x(t), \dot{v}_y(t) \\ \left. \begin{array}{l} u_1(\cos\alpha\cos\theta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\theta) + \cos\alpha\cos\beta v_x + \cos\alpha\sin\beta v_y \\ -\frac{1}{r}\{u_1(\sin\alpha\cos\theta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\theta) + \sin\alpha\cos\beta v_x + \sin\alpha\sin\beta v_y\} \\ \frac{1}{r\cos\alpha}(-u_1\cos\theta\sin\gamma - \sin\beta v_x + \cos\beta v_y) \\ u_2 \\ u_3 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (8)$$

여기서, $t \geq t_0$, $s(t_0) = s_0$ 이며, β 는 배어링각과 AUV 방위각의 차이각을 나타낸다.

$$\gamma(t) = \beta(t) - \psi(t) \quad (9)$$

시스템 상태방정식 (8)과 관측방정식 (3)을 이용하여 거리측정 신호 기반의 항법 알고리즘을 구현하였다.

비선형 시변 모델식 (8)을 공칭상태의 궤적 $s_0(t)$ 와 이에 대응하는 공칭입력 $u_0(t)$ 에 대하여 섭동법으로 미소증분에 대하여 $s(t) = s_0(t) + \delta s(t)$ 으로 선형화하면 선형 상태방정식이 $\dot{x}(t) = A(t)x(t)$, $y(t) = C(t)x(t)$ 와 같은 형태로 얻어진다. 이러한 형태의 선형 상태방정식으로 나타내지는 n 차 선형 시변시스템의 가관측성은 다음과 같이 가관측 행렬 $O(t)$ 의 랭크를 검토함으로써 확인할 수 있다(Rugh, 1993).

$\beta(t)$ 가 변하지 않고 일정한 값을 갖는 경우는 AUV가 기준점 O를 향하여 전진하거나 반대로 멀어지는 운동을 하는 것으로서, 2차원 운동으로 투영하였을 때에는 Gadre and Stilwell이 얻었던 2차원 거리측정 항법의 조건과 동일하다. AUV가 3차원 운동을 하는 경우에도 2차원에 투영된 배어링 각도에 변화가 없으면

시스템은 가관측하지 않게 된다. 따라서 거리측정 신호를 기반으로 하는 항법 시스템이 가관측하기 위해서는 모든 시간 $t \in [t_0, t_f]$ 에 대하여 다음의 조건을 가져야 한다.

$$\dot{\beta}(t) \neq 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & -\dot{\alpha}(t)r(t)\sin^2\beta(t)[2q'(t)\cos\alpha(t) + q''(t)\sin\alpha(t)] \\ & -\dot{\beta}(t)q(t)\sin 2\alpha(t)\cos\beta(t) + r(t)q'(t)\sin\alpha(t)\sin^2\beta(t) \neq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, 관측방정식의 심도 $z(t)$ 는 테일러 전개에 의하여 $z(t) = r(t)\sin\alpha(t) \approx r(t)\{\alpha - \alpha^3(t)/3! + \alpha^5(t)/5!\}$ 으로, $q(t)$ 는 $q(t) \cong r(t)\{1 - \alpha^2(t)/6 + \alpha^4(t)/120\}$ 으로 근사되었다.

AUV가 기준점 O와 동일한 수심을 유지하면서 수평면을 운항하는 경우에는 경사각 $\alpha(t)$ 가 변화하지 않으므로 시스템이 가관측하지 않다. 수심이 다른 상태에서는 AUV가 수평운동을 하더라도 가관측하다. 따라서 수평면으로 운동하는 AUV의 항법을 위해서는 트랜스폰더가 설치되는 기준점의 심도를 AUV가 운항하는 심도와 달리 정해야 한다. (11)을 만족시키는 AUV 운동은 매우 특수한 조건이며, 일반적으로 운항하는 AUV가 순간적으로 (11)이 영이 되는 조건에 들 수는 있지만, 일정한 시간 구간에서 볼 때는 영이 되지 않아 (11) 조건을 만족시키므로, 일정 시간 구간에서 시스템이 가관측하다.

2.3 거리계측 항법 Kalman filter 적용

AUV 운동에 대한 직교좌표계의 기구학 방정식 (2)와 관측방정식 (3)을 k 시간 스텝에서 이산화하고 잡음을 포함하면 다음과 같이 표현된다.

$$s_r(k+1) = f(s_r(k), k) + w(k) \quad (12)$$

$$h(k) = \bar{h}(s_r(k), k) + v(k) \quad (13)$$

여기서, $s_r(k) = \{x(k), y(k), z(k), \psi(k), \theta(k), v_x(k), v_y(k)\}^T$ 는 상태변수, $w(k)$ 는 프로세스 잡음, $v(k)$ 는 계측잡음이고, 시스템의 비선형 함수는 다음과 같다.

$$f(s_r(k), k) = s_r(k) + \delta t \dot{s}_r(k) \quad (14)$$

$$\bar{h}(s_r(k), k) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} \\ z(k) \\ \psi(k) \\ \theta(k) \end{array} \right\} \quad (15)$$

여기서, δt 는 샘플링 시간간격이다. 프로세스 잡음 공분산과 계측잡음 공분산을 각각 $Q(k)$, $R(k)$ 로 정의하고 시스템의 비선형함수를 추정치에 대해 선형화하여 다음과 같이 시스템 행렬을 계산한다.

$$F(k+1, k) = \left. \frac{\partial f(s_r(k), k)}{\partial s_r} \right|_{s_r(k) = \hat{s}_r(k|k)} \quad (16)$$

$$H(k) = \left. \frac{\partial \bar{h}(s_r(k), k)}{\partial s_r} \right|_{s_r(k) = \hat{s}_r(k|k)} \quad (17)$$

$$H(k) = \left. \frac{\partial \bar{h}(s(k), k)}{\partial s} \right|_{s(k) = \hat{s}(k|k)} = C(k) \Big|_{s(k) = \hat{s}(k|k)} \quad (26)$$

여기서,

$$F(k+1, k) = \mathbf{I} + \delta t \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1/\hat{r}(k) & 1/\hat{r}(k) & 1/\hat{r}(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

이산화된 시스템 (16)에 대하여 확장형 Kalman 필터를 적용하여 거리측정을 기반으로 하는 AUV의 항법 알고리즘을 구성할 수 있다 (Gelb, 1974). k번째 시간스텝에서의 상태변수는 k-1번째 시간스텝의 상태변수에 대한 비선형 시스템 함수를 이용하여 추정하고, 선형화된 시스템을 이용하여 오차공분산을 추정한다.

$$\hat{s}(k|k-1) = f(s(k-1), k-1) \quad (18)$$

$$P(k|k-1) = F(k, k-1)P(k-1|k-1)F^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (19)$$

거리측정 정보를 이용하여 Kalman 계인을 계산하며 추정변수와 오차공분산을 보정한다.

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (20)$$

$$\hat{s}(k|k) = \hat{s}(k|k-1) + K(k)[h(k) - \hat{h}(\hat{s}(k|k-1), k)] \quad (21)$$

$$P(k|k) = P(k-1|k-1) - K(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]K(k)^T \quad (22)$$

여기서, 초기화 상태추정치와 초기오차 공분산은 각각 $\hat{s}(0|0) = E[s(0)]$, $P(0|0) = E[(s(0) - E[s(0)])(s(0) - E[s(0)])^T]$ 으로 계산한다.

AUV 운동에 대한 극좌표계의 기구학 방정식 (8)을 이용할 경우에도 상태변수 $s_r(k) = \{r(k), \alpha(k), \beta(k), \psi(k), \theta(k), v_x(k), v_y(k)\}^T$ 로 정하고 동일한 과정으로 Kalman 필터를 적용할 수 있다.

$$s(k+1) = f(s(k), k) + w(k) \quad (23)$$

$$h(k) = \bar{h}(s(k), k) + v(k) \quad (24)$$

이때 천이행렬과 관측행렬은 다음과 같다.

$$F(k+1, k) = \left. \frac{\partial f(s(k), k)}{\partial s} \right|_{s(k) = \hat{s}(k|k)} = \exp(A(k)\delta t) \Big|_{s(k) = \hat{s}(k|k)} \quad (25)$$

3. 거리측정 기반 수중항법 시뮬레이션

3.1 거리측정 기반 AUV 항법 시뮬레이터

3차원 수중공간에서 정속운동을 하는 AUV에 대하여 거리계 측치와 자세센서 신호를 이용하는 거리측정 기반 항법 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 한국해양연구원에서 개발한 테스트 베드 AUV인 이십이의 위치를 추적하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이십이 AUV는 문헌(Lee et al., 2007)의 6자유도 수치모델을 이용하였다. 시뮬레이션은 수면 기준점 O에 트랜스폰더가 설치되어 있으며, 이십이에는 기준점 트랜스폰더와 시각이 동기된 수신기를 장착하여 거리를 측정하는 경우를 상정하였다. AUV가 해저를 탐사하기 위하여 수면에서 하강하는 경우에는 나선형 운동을 하면서 잠수하고 해저면에 도달하면 일정한 수심을 유지하면서 해저를 탐사하고 탐사 종료후에는 다시 나선형으로 부상하는 모드를 정의하였다.

수중 기준점이 설치된 위치를 수평면상의 원점 (0, 0)으로 설정하고, AUV의 초기위치가 (50, 50)m에 있다고 가정하였다. 초기 선수각은 북쪽(x축 방향)을 향하는 것으로 정의하였다. AUV의 전진 속도는 1.0m/s이며, AUV가 운항하는 해역에는 유속 0.2m/s이며 x축에 대하여 -30°(북동북방향)를 갖는 조류가 존재하는 경우를 상정하였다. AUV는 초기 선수각이 x축 방향을 향해 전진하다 50초가 경과되면 나선운동으로 잠항하여 50m 수심에 도달하면 위치를 이동하여 'r' 모드로 해저를 탐사하도록 프로그램 되었다.

제안된 항법 알고리즘은 0.1초 간격으로 AUV 자세정보를 센싱하며, 기준점과의 거리측정치는 1.0초 또는 2.0초 마다 얻어지는 조건을 고려하였다. 따라서 확장형 칼만 필터의 시간증분은 0.1초이며, 거리측정치가 얻어지는 1.0초 또는 2.0초 마다 거리측정치를 이용하여 오차공분산과 상태변수를 업데이트하였다. 거리 측정치와 방위각 측정치는 평균이 영이며, 정규분포를 갖는 백색잡음으로 가정하였다. 거리측정치와 방위각은 각각 1.5m와 5°의 표준편차를 가지며, 두 신호 모두 바이어스 오차는 없는 것으로 가정하였다. 조류는 미리 알려지지 않았다고 가정하여 초기 유속 추정치를 영으로 지정하였다.

3.2 초기위치오차 없는 경우 - 1.0초 간격 거리측정

Fig. 2는 거리측정 업데이트 간격이 1.0초이고, AUV의 초기 위치가 정확하게 주어졌을 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 x-y 평면상 투영된 AUV의 위치추적 및 3차원 공간에 나타낸 AUV의 위치추적 결과를 나타낸다. Fig. 5.5-2(c)는 AUV의 위치추정 오차를 3차원 공간오차 $e_k = \sqrt{(x_k - \hat{x}_k)^2 + (y_k - \hat{y}_k)^2 + (z_k - \hat{z}_k)^2}$ 로 나타낸 것이며, Fig. 2(d)는 AUV에서 온라인으로 추정되는 조류의 x, y 성분을 나타낸다.

Fig. 2(a)에서 보이는 것처럼, AUV는 초기에 북쪽을 향하여 전진하나 조류의 영향으로 10시 방향으로 드리프트 하는 운동을 보였다. 초기에 조류속도를 모르는 것으로 가정하여 조류추정치를 영으로 정했으므로 추정되는 AUV의 운동방향은 북쪽을 향하고 있다.

거리측정 기반 항법 알고리즘을 이용하므로써, 조류속도를 포함하여 상태변수를 추정하면서 서서히 AUV의 위치추적오차를 줄이는 방향으로 항법시스템이 동작하는 것을 알 수 있다. Fig. 2(c)에서 알 수 있듯이, 초기오차가 없더라도 초기 조류속도 오차에 기인하여 의하여 위치오차가 서서히 증가하였으며, AUV가 회전운동을 하는 순간부터 상태변수 추정이 활발히 진행되면서 위치추적 오차가 감소하는 결과를 보였다. AUV는 약 420초가 경과한 후에 위치추정오차가 5m 이내에 들어와 2.5m의 평균 오차를 갖는다. 이때 추정되는 조류는 약 10% 이내 오차범위에서 추정되었다. 조류속도가 안정한 추정치를 가지면서 위치추정 오차도 수렴된 결과를 갖는다.

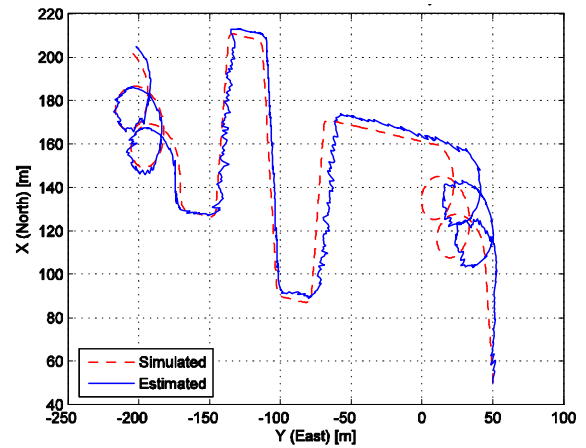
AUV가 수심을 증가하기 위하여 나선형 운동을 하는 경우에는 한 번의 원운동 마다 두 번씩 AUV의 이동방향이 기준점을 향하여 멀어지거나 가까워지는 방향으로 운동을 하게 된다. 이 순간은 $\beta(t)$ 의 각변화가 없어 $\beta(t)$ 가 영을 가지므로 가관측성을 잃게 된다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 AUV가 기준점을 향하여 접근하는 경우에는 위치추정에 오차가 발생하여 잡음이 커진다. AUV가 방향을 선회하여 $\beta(t)$ 의 각변화가 존재하게 되면 위치추정은 다시 안정적으로 이루어지는 경향을 보였다. AUV가 부상하기 위하여 나선형 운동을 하는 경우에도 동일한 경향을 보인다.

3.3 초기위치오차 없는 경우 - 2.0초 간격 거리측정

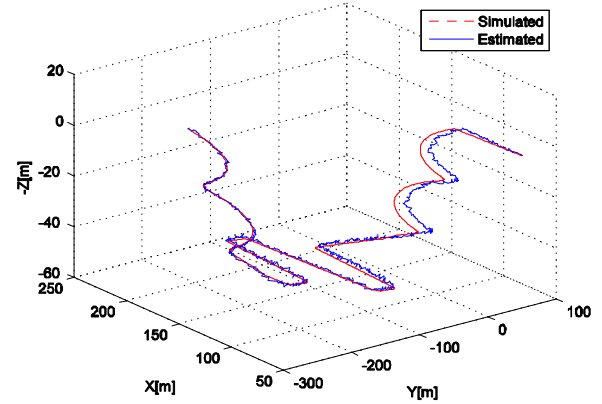
Fig. 3은 거리측정 업데이트 간격이 2.0초이고, AUV의 초기 위치가 정확하게 주어졌을 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2.0초 간격으로 얻어지는 거리측정치를 이용하는 경우에도 1.0초의 경우와 유사한 결과를 보였으나, 거리추정 최대오차가 약 20% 증가하였으며, 상태추정이 안정화된 이후의 거리추정 오차도 약 20% 증가하는 결과를 보였다. 또한 시간이 경과하면서 AUV와 기준점 사이의 거리가 멀어지면서 위치추정 오차가 서서히 증가하는 경향을 보였다. 조류 추정오차도 1.0초 시간 간격을 갖는 경우보다 증가된 결과를 보였다.

3.4 초기위치오차를 갖는 경우 - 1.0초 간격 거리측정

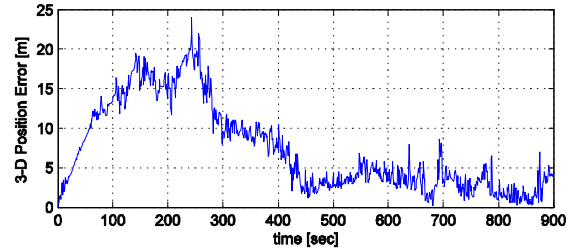
AUV의 초기 위치가 정확히 주어지지 않았을 경우에 대하여, 거리측정 기반의 수중 항법시스템의 위치추정을 수치 시뮬레이션 하였다. Fig. 4는 AUV의 초기위치는 x, y 방향으로 각각 20m, -20m 거리오차가 존재하는 경우의 결과이다. 이 경우는 AUV의 위치오차가 존재하더라도 측정된 거리와 추정된 거리에 오차가 크게 나타나지 않는 경우에 해당된다. Fig. 4(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 AUV가 북쪽으로 전진하는 초기시간 동안에 항법시스템은 위치오차를 신속하게 보정하지 못하는 결과를 보였다. 또한 이 시간동안은 초기에 영으로 세팅된 조류속도 추정 오차도 제대로 보정되지 못하고 초기 값 근처에 머물고 있다.



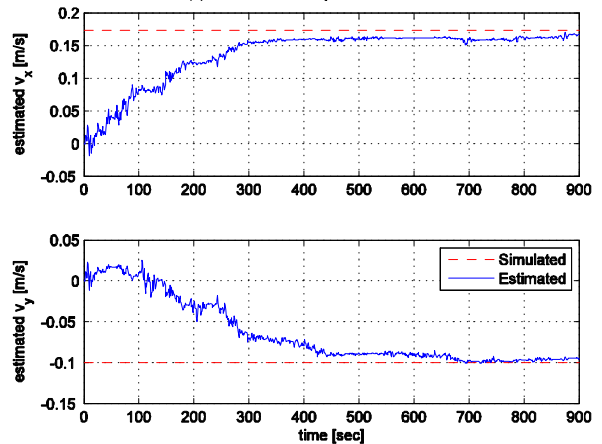
(a) AUV trajectories in X-Y plane



(b) 3-dimensional trajectories

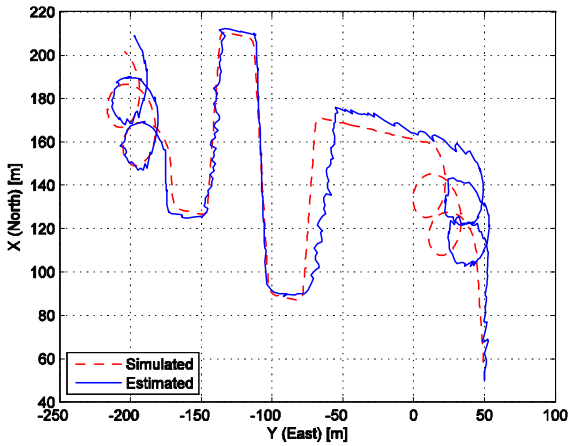


(c) Estimated position error

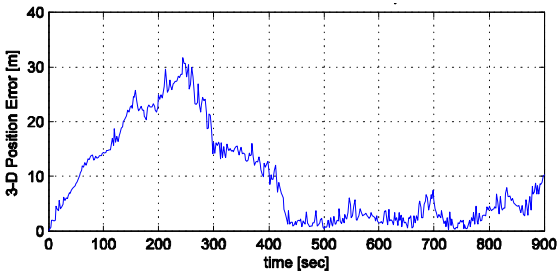


(d) Estimated currents in x and y directions

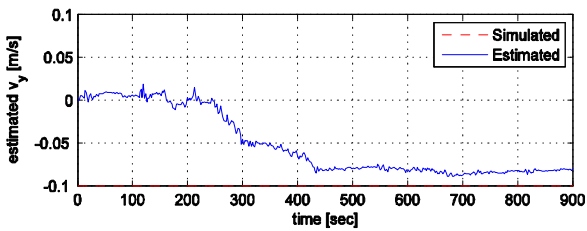
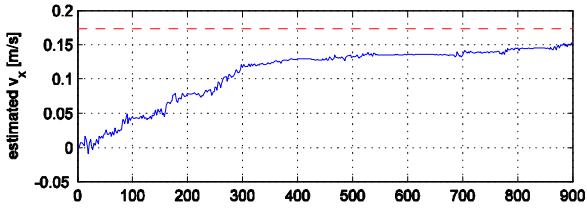
Fig. 2 Simulation results of the range-measurement-based navigation system: Case study - the sample rate 1.0 seconds without initial position error



(a) AUV trajectories in X-Y plane



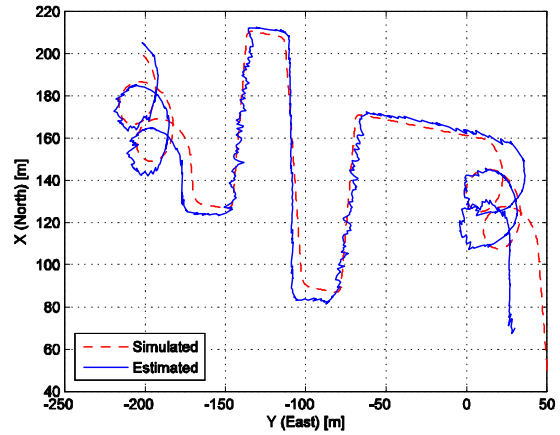
(b) Estimated position error



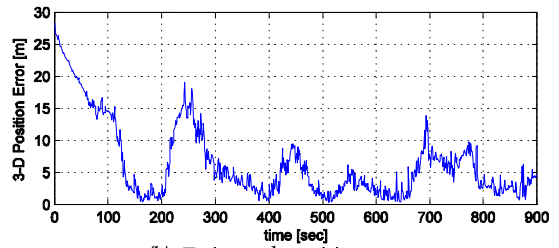
(c) Estimated currents in x and y directions

Fig. 3 Simulation results of the range-measurement-based navigation system: Case study - sample rate 2.0 seconds without initial position error

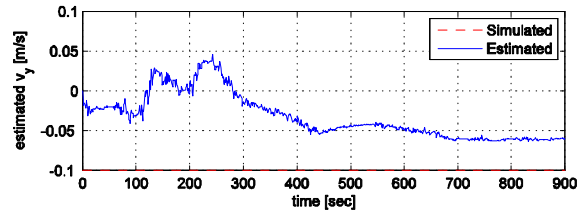
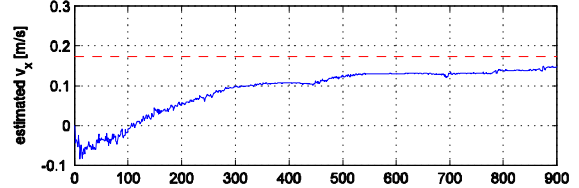
Fig. 4(b)에서, 150초 근방에서 추정오차가 작아졌다가 200초 이후 다시 증가하는 것은 조류속도 추정이 정확하게 이루어지지 않은 상태이므로 조류추정이 수렴하면서 위치추적 오차가 다시 증가한 결과이다. 약 400초 이후에는 조류속도 추정과 함께 위치추적이 수렴한 결과를 보였으나, 조류속도는 초기위치오차가 없는 경우에 비하여 약 2배 증가하였다. 수렴이후의 위치추적 오차도 변동 폭이 크게 나타났다. AUV가 수심을 변화하기 위한 나선형 운동에 대한 특성은 앞 절의 결과와 유사하게 나타나고 있다.



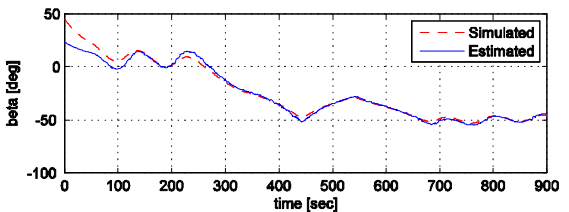
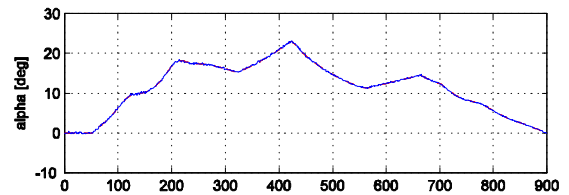
(a) AUV trajectories in X-Y plane



(b) Estimated position error



(c) Estimated currents in x and y directions



(d) The estimated and simulated of $\alpha(t)$ and $\beta(t)$

Fig. 4 Simulation results of the range-measurement-based navigation system: Case study - sample rate 2.0 seconds with initial position error

Fig. 4(b)에서, 150초 근방에서 추정오차가 작아졌다가 200초 이후 다시 증가하는 것은 조류속도 추정이 정확하게 이루어지지 않은 상태이므로 조류추정이 수렴하면서 위치추적 오차가 다시 증가한 결과이다. 약 400초 이후에는 조류속도 추정과 함께 위치추적이 수렴한 결과를 보였으나, 조류속도는 초기위치오차가 없는 경우에 비하여 약 2배 증가하였다. 수렴이후의 위치추적 오차도 변동 폭이 크게 나타났다. AUV가 수심을 변화하기 위한 나선형 운동에 대한 특성은 앞 절의 결과와 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 4(d)는 (5)와 (6)에 정의된 $\alpha(t)$ 와 $\beta(t)$ 추정치를 나타낸 그림이다. 초기에 AUV가 기준점과 동일한 평면에서 전진운동을 하는 동안은 $\alpha(t)$ 가 영이므로 항법시스템이 가관측하지 못하다. 이는 수직방향의 변화에 대해 보정이 어려운 것을 의미하는데, 추정되는 심도의 불안정을 계속 심도가 보상하는 구조이므로 시스템의 성능에는 큰 영향을 주지 않았다.

AUV의 초기 위치오차가 거리계측을 이용하는 수중 항법시스템의 성능에 영향을 미치므로, 항법 알고리즘을 수행하기 이전에 최소제곱법 등을 이용하여 초기위치를 정확하게 정의하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 또한 거리측정 시간간격이 증가함에 따라 추정오차가 증가하므로 가능한 한 거리측정 시간간격이 작을수록 추적오차를 줄일 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 정속으로 운항하는 AUV에 대하여 관성과 속도를 계측하지 않으면서, 방위, 자세, 심도 및 거리계측치만을 이용하여 3차원 위치를 추적하는 수중 항법시스템을 제안하고, 항법시스템의 가관측성을 갖는 조건을 유도하였다. 거리계측을 위한 방법으로써 시각이 동기화된 단방향 거리측정법을 도입하여 시간 지연에 따른 위치오차를 방지하면서 AUV 위치추적에 적합한 방법을 제안하였다. 제안된 항법시스템을 이용하여 미지의 조류가 존재하는 해역에서 정속 운항하는 이심이 AUV에 대한 위치추적 시뮬레이션을 수행하였다. 거리계측 시간간격에 따른 위치추적 성능을 검토하였고, 초기 위치 오차가 항법 시스템에 미치는 영향을 검토하였다. AUV의 항법 시뮬레이션 결과로부터 AUV가 위치추적과 함께 조류를 추정하면서 1초 시간간격으로 거리를 측정하는 경우는 2.0m 평균오차를 갖는 성능을 보였다. AUV의 초기 위치오차가 거리계측을 이용하는 수중 항법시스템의 성능에 영향을 미쳤으며, 따라서 초기위치를 정확하게 정의하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 또한 거리측정 시간간격이 증가함에 따라 추정오차가 비례하여 증가하므로 가능한 한 거리측정 시간간격이 작을수록 추적오차를 줄일 수 있다. 거리정보만을 이용한 AUV의 수중항법은 고가의 관성세서나 DVL 센서를 장착하기 곤란한 소형 AUV에 적용하기 적합하다. 향후 개발된 항법 알고리즘을 이용하여 테스트베드 AUV인 이심이의 항법에 적용하여 실용성을 검증할 예정이다.

후 기

본 논문은 해양수산부 지원으로 수행된 “차세대 심해무인잠수정 개발” 과제와 해양연구원 기본연구사업 “U-기반 탐사선단의 스마트 운용기술 개발” 과제 연구결과 중 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 이판목, 전봉환, 김시문, 이종무, 임용곤, 양승일 (2004). “초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템”, 한국해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 33-39.
- 이판목, 전봉환, 김시문, 이종무, 최현택 (2005a). “초음파 거리계를 갖는 수중 복합항법시스템의 초기오차 수렴 특성”, 한국해양공학회지, 제19권 제6호, pp 78-85.
- 이판목, 전봉환, 홍석원, 임용곤, 양승일 (2005b) “두개의 초음파 거리계를 이용한 관성센서 기반의 의사 장기선 (Pseudo-LBL) 복합항법 알고리즘”, 한국해양공학회지, 제19권, 제5호, pp 71-77.
- 이판목 등 (2007). 차세대 심해용 무인잠수정 개발 (1단계 최종 보고서), 한국해양연구원 보고서, UCM 01240-07035.
- Baccou, P. and Jouvencel, B. (2003). "Simulation Results, Post-processing Experimentation and Comparison Results for Navigation, Homing and Multiple Vehicle Operations with a New Positioning Method Using a Transponder," in Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, pp 811-817.
- Eutice, R.M., Whitcomb, L.L., Singh, H. and Grund, M. (2007). "Experimental Results in Synchronous-clock One-way-travel-time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles," in Proc. Intl. Conf. Robotics and Automation, Roma, Italy, pp 4257-4264.
- Gadre, A.S. and Stilwell, D.J. (2004). "Toward Underwater Navigation Based on Range Measurements from a Single Location," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, pp 4472-4477.
- Gadre, A.S. and Stilwell, D.J. (2005a). "Underwater Navigation in the Presence of Unknown Currents Based on Range Measurements from a Single Location," in American Control Conference, Portland, OR, pp. 656-661.
- Gadre, A.S. and Stilwell, D.J. (2005b). "A Complete Solution to Underwater Navigation in the Presence of Unknown Currents Based on Range Measurements from a Single Location," in Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. Intell. Robots Systems, pp 1420-1425.
- Gadre, A.S. (2007). Observability Analysis in Navigation Systems with an Underwater Vehicle Application, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Gelb, A. (1974). Applied Optimal Estimation, MIT, Cambridge, MA.

- Jouffroy, J. and Reger, J. (2006) "An Algebraic Perspective to Single-transponder Underwater Navigation," Int. Conf. of Control and Automation (CCA).
- Kinsey, J.C. and Whitcomb, L.L. (2004). "Preliminary Field Experience with the DVLNAV Integrated Navigation System for Oceanographic Submersibles," Control Engineering Practice, Vol 12, No 12, pp 1541-1549.
- Larsen, M.B. (2000a). "High Performance Doppler Inertial Navigation - Experimental Results," Proc. of Oceans Conf., Vol 2, pp 1449-1456.
- Larsen, M.B. (2000b). "Synthetic Long Baseline Navigation of Underwater Vehicles", in Proc. of Oceans Conf., vol 3, pp 2043-2050
- Lee, P.M. and Jun, B.H. (2007). "Pseudo Long Base Line Navigation Algorithm for Underwater Vehicles with Inertial Sensors and Two Acoustic Range Measurements", Ocean Engineering, Vol 34, issue 3-4, pp. 416-425.
- Lee, P., Jun, B., Kim, K., Lee, J., Aoki, T. Hyakudome, T. (2007). "Simulation of an Inertial Acoustic Navigation System with Range Aiding for an Autonomous Underwater Vehicle", IEEE J. of Oceanic Engineering, vol 32, No 2, pp 392-345.
- Lee, P.M., Jun, B.H. and Lim, Y.K. (2008). "Review on Underwater Navigation System Based on Range Measurement from One Reference", in the Proc. of OTO'08, April 9-11.
- Rugh, W.J. (1993). Linear System Theory, Prentice- Hall Publication.
- Song, T.L. (1999). "Observability of Target Tracking with Range-only Measurements", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol 24, No 3, pp 383-387.
- Vaganay, J., Baccou, P. and Jouvencel, B. (2000). "Homing by Acoustic Ranging to a Single Beacon," in Proc. Oceans, Providence, pp 1457-1462.

2008년 6월 10일 원고 접수

2008년 7월 28일 최종 수정본 채택