
자이로 도플러 센서와 USBL을 통한 수중체 위치추적 알고리즘 개발

김덕진* · 박동원* · 박연식**

Development of Underwater Vehicle Position Tracking Algorithm by using a Gyro-Doppler Sensor and Ultra Short Base Line

Deok-jin Kim* · Dong-won Park* · Yeon-Sic Park**

요 약

본 논문에서는 IMU(Inertial Motion Unit), DVL(Doppler Velocity Log), USBL(Ultra Short Base Line) DGPS(Differential Global Positioning System) 등의 센서로부터 취득된 데이터를 융합하여 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 같은 수중체의 위치를 지구 전체 영역에서 추정하기 위한 기본적인 알고리즘을 다루고 있다. 본 논문에 소개된 알고리즘은 6,000m급 과학 조사용 심해무인잠수정인 해미래[1]의 수중 위치추적에 사용될 예정이다.

ABSTRACT

This paper reports the absolute position tracking algorithm of underwater vehicles such as ROV, AUV in global region by fusing sensor informations of IMU, DVL, USBL, DGPS etc. This algorithm is to be used in the position tracking of the 6,000m class deep-sea unmanned underwater vehicle, HEMIRE for scientific exploration.

키워드

ROV, AUV, 항법, USBL, DVL, 센서 융합

I. 서론

ROV, AUV와 같은 수중체를 실해역에서 유기적으로 운용하고 진정한 의미의 자동 제어기를 구현해 내기 위해서는 정확하고 신뢰성이 있는 항법 알고리즘의 개발이 무엇보다 선행되어야 할 필요가 있다.

현재까지 항법 알고리즘의 추이를 정리해 보면 최초에는 관성항법을 기반으로 IMU 센서에 단독으로 의존하여

수중체의 위치를 추정하였으나 시간이 흐름에 따라 표류 현상이 발생하여 장 시간 사용하는 데에는 한계점이 노출되었다. 이에 관성항법 알고리즘에 DVL 센서를 통해 얻어지는 속도 정보를 융합함으로써 정밀도와 표류 속도를 지연시킬 수 있었다. 하지만 이 방법 역시 시간이 흐르게 됨에 따라 위치가 표류되는 문제점이 있어 왔다. 따라서 최근에는 절대 위치 정보를 제공하는 GPS(공기중)나 수중 음향 위치 추적 장치(수중)를 이용하여 항법 알고리즘

* 한국해양연구원 남해연구소

접수일자 : 2006. 10. 27

** 경상대학교 해양산업연구소, 교신저자

의 표류나 발산을 방지하고 있다. 수중 음향을 이용한 위치 추적 장치의 경우 센서 단독으로 수중체의 위치 추적이 가능하나 노이즈가 있고 센서 정보가 제공되는 시간 간격이 수 초 정도로 크므로 DVL, IMU 등의 센서와 융합하여 사용하는 것이 각 센서의 장점을 취하여 좋은 결과를 확보할 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

또한 본 논문에서는 지구 규모의 이동에 대해서도 수중체의 위치 추적이 가능하도록 GPS와 USBL에서 사용하는 WGS-84 NED(North East Depth) 좌표계와 ECEF(Earth Centered Earth Fixed) 좌표계를 사용하여 수중체가 지구 상의 어느 공간에 있든지 사용이 가능하도록 위치 추적 알고리즘을 구현하였다.

II. 좌표계

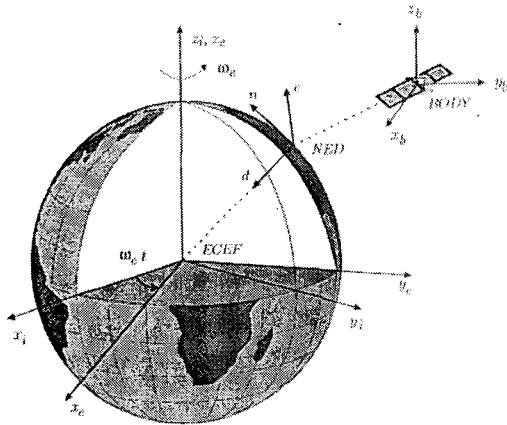


그림 1. 공간 상에 고정되어 있는 Earth-centered inertial(ECI) 프레임을 ω_e 의 각속도로 회전하고 있는 Earth-centered Earth-fixed(ECEF) 프레임[2]
 Fig. 1. The Earth-centered Earth-fixed(ECEF) frame is rotating with angular rate ω_e with respect to an Earth-centered inertial(ECI) frame fixed in space[2]

수중체의 6자유도 운동을 묘사할 경우 그림 1에 정의된 것과 같은 두 개의 지구 중심의 좌표계를 사용하면 편리하다. 덧붙여 수중체의 운동을 묘사하기 위해서는 몇 가지의 지리정보를 참조하는 좌표계를 필요로 한다.[2]

지구중심 직교좌표계

ECI(i-frame): ECI 좌표계는 뉴턴의 운동법칙이 적용되는 공간상에 고정된 가속이 없는 좌표계이다.

ECEF(e-frame): ECEF 좌표계는 원점을 지구 중심으로 하며 x_e, y_e, z_e 를 세 축으로 하는 지구에 고정된 좌표계로 관성좌표계인 ECI 좌표계와 z 축을 공유하며 z 축을 중심으로 $\omega_e = 7.2921 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$ 의 각속도로 회전하고 있다.

지리정보 참조 좌표계

NED(n-frame): 지구를 가장 유사한 형태의 타원체(WGS84, World Geodetic System 1984)로 수학적으로 정의한 North(n), East(e), Down(d)을 세 축으로 하는 좌표계로서 일상 생활에서 우리가 기준으로 삼는 좌표계이다. 지구표면상에 수평면에 정의된 좌표계로 볼 수 있으며 좌표는 타원좌표계로 경도(l)와 위도(μ), 고도(h)로 표현할 수 있다.

표 1. WGS-84 파라미터
 Table 1. WGS-84 parameters

Parameters	Comments
$r_e = 6378137 \text{ m}$	타원체 적도축 반경
$r_p = 6356752 \text{ m}$	타원체 극축 반경
$\omega_e = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$	지구 회전 각속도
$\mu_g = 3986005 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$	지구의 중력 가속도
$e = 0.0818$	타원체의 이심률

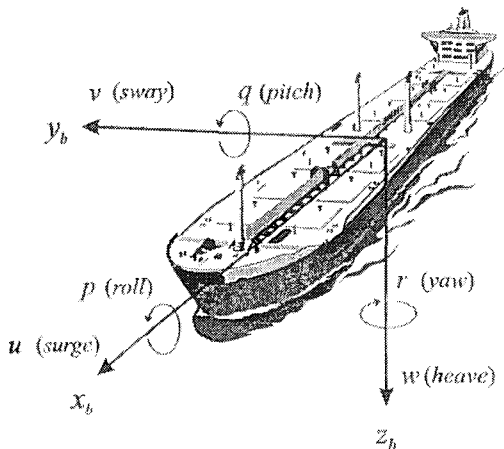


그림 2. 수중체의 운동을 나타내는 변수[3]
 Fig 2. Motion variables for a marine vessel[3]

BODY(b-frame): 운동하는 항체를 중심으로 항체에 고정된 좌표계로 항체의 전방을 향하는 것이 x_b 축, 우현 방향이 y_b 축, 위에서 아래로 향하는 방향이 z_b 축으로 정의된다.

III. 좌표변환 알고리즘[2]

BODY 좌표계와 NED 좌표계간의 변환

항체좌표계에서 취득된 NED 좌표계에 대한 항체의 속도를 NED 좌표계에서의 항체의 속도로 변환하기 위해서는 오일러 각 변환이 필요하다. RDI사의 1200kHz DVL 센서를 통해 5Hz의 속도로 계측한 항체의 속도 정보를 식 (1)에 제시된 오일러 각 변환을 수행하게 되면 NED 좌표계에서의 항체의 속도로 변환된다. 오일러각 변환은 유일성 문제가 있으므로 회전의 순서를 정의해두고 일관되게 사용할 필요가 있다. 여기에서는 z축, y축, x축에 대한 순서로 변환을 수행한 결과이다. 이때 오일러각은 IMU 센서를 사용하여 100Hz의 속도로 계측한다.

$$v_0^n = R_b^n(\Theta)v_0^b \quad (1)$$

$$R_b^n(\Theta) = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$\dot{p}^n = R_b^n(\Theta)\dot{v}_0^b \quad (2)$$

여기에서,

$c \equiv \cos, s \equiv \sin$

ϕ, θ, ψ : 각각 roll, pitch, yaw 오일러각

v_0^n : NED 좌표계에서 항체의 속도(= \dot{p}^n)

v_0^b : BODY 좌표계에서 항체의 속도

p^n : NED 좌표계에서의 항체의 위치

NED 좌표계에서의 위치 p^n 의 추적을 위한 수치 연산 알고리즘은 식 (3)과 같다.

$$p^n(k+1) = p^n(k) + hR_b^n(\Theta(k))v_0^b(k) \quad (3)$$

식 (3)에서는 Explicit Euler 알고리즘을 사용한 예이며 다른 수치 적분 알고리즘을 사용하여도 무방하다. 여기에서 k 는 샘플링 시간 인덱스를 나타내며 h 는 샘플링 시간 간격을 나타낸다.

NED 좌표계에서 ECEF 좌표계로의 변환

NED 좌표계에서의 속도는 식 (4)의 관계식에 의해 ECEF 좌표계에서의 속도로 변환된다.

$$\dot{p}^e = R_n^e(\Psi)\dot{p}^n \quad (4)$$

$$R_n^e(\Psi) = \begin{bmatrix} -\cos l \sin \mu & -\sin l & -\cos l \cos \mu \\ -\sin l \sin \mu & \cos l & -\sin l \cos \mu \\ \cos \mu & 0 & -\sin \mu \end{bmatrix}$$

여기서 l 은 경도, μ 는 위도를 나타낸다.

또한 p^e 는 ECEF 좌표계에서의 항체의 위치를 나타낸다. p^e 역시 식 (3)에서 소개한 것과 같은 수치적분 알고리즘을 사용하여 적분할 수 있다.

ECEF 좌표계에서 NED 좌표계로의 변환

1) $p = \sqrt{x_e^2 + y_e^2}$ 계산

2) $\tan \mu_{(0)} = \frac{z_e}{p} (1 - e^2)^{-1}$ 계산

3) $N = \frac{r_e^2}{\sqrt{r_e^2 \cos^2 \mu_{(0)} + r_p^2 \sin^2 \mu_{(0)}}}$ 계산

4) $h = \frac{p}{\cos \mu_{(0)}} - N_{(0)}$ 계산

5) $\tan \mu = \frac{z_e}{p} \left(1 - e^2 \frac{N_{(0)}}{N_{(0)} + h} \right)^{-1}$

6) $|\mu - \mu_{(0)}| < tol$ 이면 계속해서 3)으로 돌아가서 iteration 수행, tol 값은 1.0E-10 정도로 정의한다. 여기에서 파라미터 값은 표1의 값을 참조하면 된다.

IV. 위치 추적 알고리즘

IV 장에서는 III장에서 소개한 좌표 변환 수치 알고리즘과 센서 정보를 이용하여 수중체의 위치를 추적하는 알고리즘을 소개하고자 한다.

수중체의 위치 추적이 사용되는 센서는 NED 좌표계에서 모선의 위치 추적치가 제공되는 DGPS, NED 좌표계에서 수중체의 위치 추적치가 제공되는 USBL, NED 좌표계에서의 수중체의 속도를 계측할 수 있는 DVL 센서, NED 좌표계에 대한 BODY 좌표계의 오일러 자세각을 계측할 수 있는 IMU 센서, NED 좌표계에서 수중체의 심도를 계측할 수 있는 심도계 등이 사용된다. 이때 샘플링 간격이 DGPS는 1Hz, USBL은 1/4Hz, DVL은 5Hz, IMU는 100Hz, 심도계는 10Hz로 제공되므로 샘플링 간격이 동일하지 않은 센서 계측치에 대한 위치추적 알고리즘이 필요하다.

수중체 위치 추적 알고리즘

1) USBL 내부 알고리즘[3-5]에서 DGPS의 NED 상에서의 위치 정보를 참조하여 수중체의 NED 좌표계 상에서의 경도, 위도 정보를 취득하고 심도계로부터 수중체의 고도 정보를 취득한다. 이렇게 함으로써 수중체의 초기 위치를 정보를 NED 좌표계에서 정의할 수 있다.

2) 수중체의 초기 위치를 $R_n^e(\psi)$ 변환행렬을 사용하여 ECEF 좌표계로 변환한다.

3) DVL로부터 취득된 수중체의 NED 좌표계에서의 속도 p^n 을 식(4)를 사용하여 ECEF 좌표계에서의 속도 p^e 로 변환한다. 이때 오일러각은 IMU에서 계측된 값을 사용한다.

4) $p^e(k+1) = p^e(k) + hp^e$ 알고리즘을 사용하여 ECEF에서의 수중체의 위치 정보를 업데이트 할 수 있다.

5) 마지막으로 ECEF에서의 수중체의 위치정보를 NED 좌표계로 변환하는 알고리즘(III장의 1)~5))을 사용하여 NED 좌표계로 변환한 후 위도, 경도, 고도 값으로 업데이트 한다.

V. 결 론

본 논문에서는 여러 가지 센서의 정보를 융합하여 수중체의 위치를 추적하기 위한 좌표변환 알고리즘과 수중체의 위치 추적 알고리즘을 도출하였다.

본 논문에서 작성된 알고리즘들은 수중체의 운동이 주로 일어나고 있는 대상 해역에 대해 근사값을 사용하는 Flat Earth Navigation 알고리즘과 비교할 때 수중체가 지구 경위도상 어느 지점에 있더라도 또 대양을 건너는 등의 원거리 항행을 수행하더라도 원활하게 수중체의 위치를 추적할 수 있는 장점을 가지고 있다.

향후 연구로는 2006년 10월 17일부터 실패역에 나가서 심해무인잠수정 해미래-해누비의 성능 시험이 있을 예정인데 상기 알고리즘을 적용하여 수중체의 위치 추적 성능을 검증할 생각이다. 또한 외란과 센서 노이즈의 영향에 강한 센서 정보 융합 알고리즘에 대해서도 지속적으로 연구를 수행해 나갈 생각이다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부의 후원으로 한국해양연구원 에서 진행 중인 “차세대 심해무인잠수정 개발” 과제의 연구 결과로 작성된 것입니다. 이에 자리를 빌려 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] 이판목 외, 차세대 심해저 무인잠수정 개발, 한국해양연구원 연구보고서 UCM0059A-040 28, 2004.
- [2] Fossen, Marine Control Systems, Marine Cybernetics, Chap. 2, 2002.
- [3] Ixsea-Oceano, Posidonia 6000 User's Manual Rev.
- [4] 김시문 외, “심해무인잠수정 위치추적장치(Posidonia 6000)의 동해 성능시험”, pp. 1710-1716, 부산 BEXCO, 2005.
- [5] 김기훈 외, “심해무인잠수정 해미래 초음파 위치추적 장치의 실패역 성능시험”, 선박해양기술, 41호, pp. 53-63. 2006.

저자소개



김 덕 진(Deok-jin Kim)

1994년 경일대학교 전자공학과 공
학사

1996년 경남대학교 전자공학과 공
학석사

2005년 ~ 현 경상대학교 정보통신공학과 박사과정

1986년 ~ 현 한국해양연구원 남해연구소 기술원

※ 관심분야: 수중화상통신, 컴퓨터 네트워크



박동원 (Dong Won Park)

1988년 한양대학교 전자공학과 공
학사

1980년 고려대학교 전자통신공학과
공학석사

2005년 고려대학교 전자공학과 공학박사수료

1988~ 현 한국해양연구원 남해연구소 책임기술원

※ 관심분야: 해양관측 기기장비 개발, 관측센서 및
부시스템 개발, 자료전송 및 처리



박연식 (Yeoun Sik Park)

1971년 광운대학교 무선 통신공학과
공학사

1980년 건국대학교 행정대학원 행정
학석사

1995년 경상대학교 전자계산학과 공학석사

1999년 해양대학교 전자통신공학과 공학박사

1979 ~ 현 경상대학교 정보통신공학과 교수,

해양산업연구소 연구원

※ 관심분야: 수중화상통신, 컴퓨터 네트워크