

논문 2010-47SC-6-6

유한 상태 기계를 이용한 자율무인기뢰처리기의 다중센서융합기반 수중유도항법시스템 설계

(Multi-sensor Fusion Based Guidance and Navigation System Design
of Autonomous Mine Disposal System Using Finite State Machine)

김기훈*, 최현택*, 이종무*

(Kihun Kim, Hyun-Taek Choi, and Chong-Moo Lee)

요 약

본 연구에서는 실해역에서 해류를 고려한 실용적인 유도 시스템을 제안하고 있다. 본 논문에서는 생성된 경로의 최적성은 주요 이슈가 아니다. 시작점부터 목표점까지의 경로는 주요 해류의 방향축을 고려하여 운용 경험이 많은 전문가의 경유점 선택을 통하여 생성된다. 본 논문에서는 또한 초단기선, GPS, 도플러 속도계 그리고 자세센서 등의 계측치를 통해서 다중센서융합알고리즘을 이용하여 정밀 수중항법 솔루션 구현에 대하여 설명하고 있다. 정밀하고 정확하고 갱신 주기가 빠른 수중항법 솔루션을 구현하기 위하여 세 가지 전략을 사용하였다. 첫째는 추측항법의 단독 성능을 향상시키기 위하여 선수각 정밀 정렬을 수행하였다. 둘째는 기본이 되는 단독추측항법이 적분 알고리즘에 기반을 두었기 때문에 시간의 추이에 따른 누적오차의 증가 특성을 가지고 있는데 이를 막기 위하여 주기적으로 절대 위치 정보를 다중센서융합 기법을 이용하여 융합하여 주는 것이다. 셋째는 융합알고리즘의 품질 향상을 위하여 효율적인 특이점 제거 알고리즘을 도입하는 것이다. 개발된 정밀수중항법알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 자율기뢰처리기와 심해무인잠수정의 실해역 데이터를 사용하였다.

Abstract

This research propose a practical guidance system considering ocean currents in real sea operation. Optimality of generated path is not an issue in this paper. Way-points from start point to possible goal positions are selected by experienced human supervisors considering major ocean current axis. This paper also describes the implementation of a precise underwater navigation solution using multi-sensor fusion technique based on USBL, GPS, DVL and AHRS measurements in detail. To implement the precise, accurate and frequent underwater navigation solution, three strategies are chosen. The first one is the heading alignment angle identification to enhance the performance of standalone dead-reckoning algorithm. The second one is that absolute position is fused timely to prevent accumulation of integration error, where the absolute position can be selected between USBL and GPS considering sensor status. The third one is introduction of effective outlier rejection algorithm. The performance of the developed algorithm is verified with experimental data of mine disposal vehicle and deep-sea ROV.

Keywords : Underwater navigation, Multi-sensor fusion, Dead-reckoning, Finite State Machine

I. 서 론

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 자율무인기뢰처리기의 운용 시나리오를 도시한 것이다.

제시된 시나리오와 같이 다소 복잡한 로봇의 임무를 구현하기 위해서는 수중 유도 및 항법 시스템의 구현이 선행되어야 한다. 본 연구에서 제안하는 수중 유도시스템은 수중 로봇의 임무를 구현하기 위해 최적해를 고려하기 보다는 실용적이고 실해역에서 적용이 가능하도록 요구 조건을 분석 적용하였다.

자율무인기뢰처리기의 운용 시나리오는 Fig. 1과 같

* 정희원, 한국해양연구원

(Korea Ocean Research & Development Institute)

접수일자: 2010년7월15일, 수정완료일: 2010년11월15일

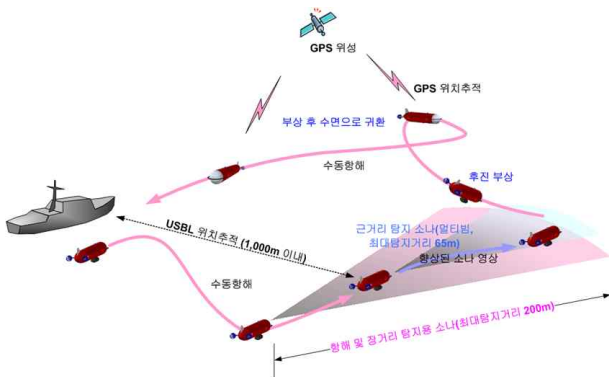


그림 1. 운용 시나리오 개념도
Fig. 1. Conceptual operation scenario.

다. 모선에 탑재된 GPS와 자세센서로부터 모선의 위치와 선수각을 알 수 있다. 모선에 탑재된 장거리 소나로부터 타겟(이 때는 오차가 어느 정도 있음)까지의 상대 각과 거리가 추정 가능하다. 위 두 값을 입력하면 타겟의 좌표가 프로그램 상에 생성된다. 운용자는 이로부터 모선, 수중로봇, 타겟, 주요한 조류의 방향을 고려하여 경유점을 마우스 클릭을 통하여 선택할 수 있다. 수중로봇의 현재 위치는 III장에 소개되는 정밀항법시스템을 통하여 추정 가능하며 경유점까지의 목표 선수각과 목표 수심값을 순차적으로 갱신하면서 수중 로봇에 탑재된 정밀 탐지 및 식별 소나에 타겟이 정밀 탐지될 때까지 유도 제어를 수행하게 된다. 타겟의 위치가 정밀 탐지된 후에는 유도 프로그램에서 타겟의 위치를 수중 로봇을 기준으로 한 상대 선수각과 거리 입력을 통하여 갱신함으로써 타겟에 정밀하게 접근할 수 있다.

수중정밀항법 시스템은 수중 로봇의 임무를 구현하기 위해 필수불가결하게 요구되는 핵심 기술에 해당한다. 수중항법센서 혹은 알고리즘의 성능은 다음의 세 가지 관점에서 평가될 수 있는데 정밀도, 분해능, 갱신 주기이다.

첫째 정밀도는 얼마나 계측치가 참값에 가까운지를 나타내는 지표이며 둘째 분해능은 계측치가 얼마나 세밀하게 측정되는지를 나타내는 값이다. 마지막으로 갱신 주기는 계측치가 얼마나 빠른 주기로 갱신이 가능한지에 관한 정도를 나타낸다. 이 세 가지 항목을 모두 갖추어야 수중에서의 정밀 매핑, 정밀 제어 및 운동체 식별 등에 적용이 가능한 정밀 수중항법이 구현된 것이다.

수중 운동체의 운동은 6자유도 운동에 고도를 덧붙여 기술되는데 일반적으로 자세, 심도, 고도는 상용 센

서를 사용하여 정밀하게 계측 가능하다. 하지만 수평 위치인 위도, 경도의 경우를 정밀하게 추정하기 위해서는 상대적으로 많은 난이도를 요구한다.

수중에서 수중체의 수평 위치를 계측하는 센서에는 두 가지 종류의 센서가 있는데 한 가지는 수중 음향을 이용하여 절대 위치를 계측하는 시스템으로서 USBL (Ultra short base line), LBL(Long base line), SBL(Short base line)이 있다.

이 종류의 센서들은 갱신 주기가 다소 느리고 잡음(noise)으로 인해 다소 분산되는 계측치를 제공하기는 하나 시간에 따라 오차가 누적되지 않고 정밀하다는 장점을 가지고 있다. 반면 다른 그룹은 상대 운동을 계측하는 센서들로서 이루어져 있으며 DVL, IMU(Inertial motion unit) 등이 이에 해당한다. 이들 센서들은 분해능과 갱신주기 측면에서 좋은 성능을 보여주지만, 적분 알고리즘을 기반으로 위치를 추정하기 때문에 시간의 추이에 따라 오차가 누적되는 단점을 가지고 있다. 따라서 다중센서융합을 통하여 각 센서의 장점만을 결합하는 것이 정밀하고 분해능이 좋으며 갱신 주기가 빠른 정밀수중항법 솔루션을 확보할 수 있는 좋은 예가 될 수 있다.

본 연구에서는 수중정밀항법을 구현하기 위하여 다음 세 가지 전략을 사용하였다. 첫째, 단독추측항법 알고리즘의 성능을 향상시키기 위하여 정밀 선수각 정렬을 수행하였으며 둘째, 절대 계측치 보정 시 특이점(Outlier)을 효과적으로 제거할 수 있는 알고리즘을 포함하였다. 마지막으로 수심에 따른 가용한 센서의 상태에 따라 특이점이 제거된 절대 계측치와 단독추측항법 알고리즘 결과를 융합하는 알고리즘을 사용하였다.

II. 수중 유도시스템

Fig. 2는 본 연구에서 구현 중인 수중 유도항법 프로그램의 구동 예이다. 빨간색 오각형이 모선의 위치와 선수각을 나타낸 것이고 파란색 화살표가 자율무인기뢰처리기의 위치와 선수각 정보를 나타낸 것이다. 녹색의 원은 기뢰로 추정되는 물체의 위치이다. 항법 프로그램에 의해 갱신되는 각 항체의 상태 정보에 따라 모선과 자율무인기뢰처리기의 위치와 선수각 정보는 갱신된다. 이는 운용자에게 상대적인 위치와 선수각 차이를 인지시키기 위함이다. 본 연구에서 개발된 수중유도항법프로그램은 선상제어택 시스템, 자율무인기뢰처리기로부터

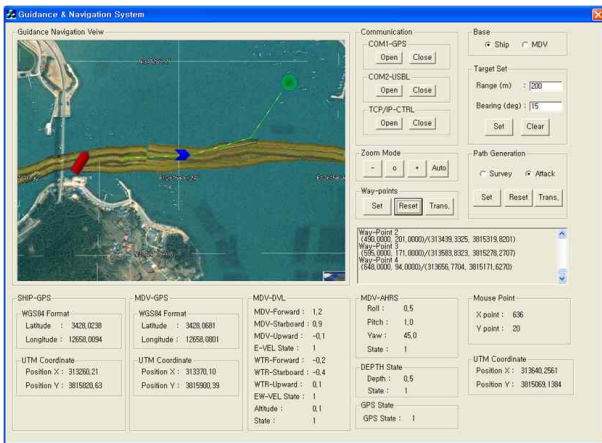


그림 2. 유도 시스템(버전 1.1)
Fig. 2. Guidance system(Ver 1.1).

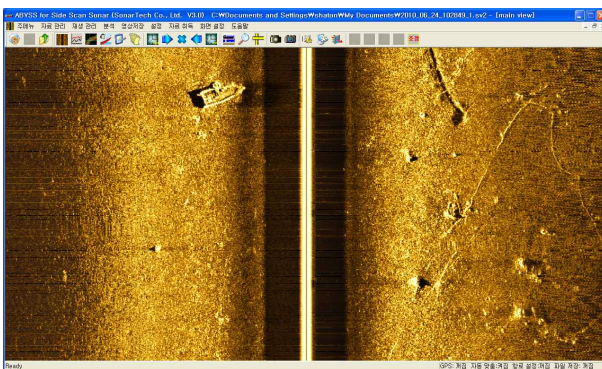


그림 3. 측면주사소나 해저매핑이미지
Fig. 3. Side scan sonar sea bottom mapping image.

과 직렬 혹은 이더넷 통신을 통하여 프로토콜을 A주기와 B주기로 주고 받으면서 유도 및 항법에 관한 알고리즘을 구동시키고 운용자에게 직관적인 지구 고정 좌표계에서의 상대 위치 및 주요 항법 센서 정보를 도시하여 제공한다. 또한 운용자의 경유점 입력과 확보된 센서 정보 등을 통합하여 자동경로생성 및 제어 선수각, 제어 수심 등의 제어 명령을 통신을 통하여 선상시스템과 수중로봇에 전달함으로써 복잡한 임무를 수행할 수 있도록 한다.

현재까지는 Google Earth를 통하여 확보한 위성 이미지를 수동 모자이크 한 후 GPS 정밀 측위를 통하여 보정하여 주변 지형 정보와 현재 위치를 동시에 도시함으로써 운용자의 상대적인 위치 파악을 가능하게 함으로써 운용에 편의를 주고 있다. Ver. 1.1의 가장 큰 특징은 Fig. 3과 같은 측면 주사 소나를 통하여 획득한 해저 지형 이미지 모자이크 결과를 유도 프로그램 상에 오버레이하여 해저 장애물과 타겟의 이미지를 운용자가 확인하면서 운용할 수 있도록 개발되었다는 것이다.

III. 수중 정밀항법시스템

1. 유한상태기계

본 장에서는 가용 센서의 상태 변화에 따른 유한상태기계(finite state machine) 천이를 통한 수중정밀항법 구현에 대해 설명하기로 한다. 유한 상태 기계는 게임 인공지능 분야에서 많이 쓰이는 기법으로 로봇이 어떤 임무를 수행하기 위해 필요한 세부 동작이나 상태를 유한 개의 상태 기계로 정의한 후에 우선 순위나 제약 조건 혹은 순차 흐름에 따라 전환하게 하여 목표를 이루게 하는 방법이다. 본 연구에서는 연속적인 수중항법정밀 추정이라는 미션을 수행하기 위해서 로봇의 공간적인 위치에 따른 가용한 항법 센서의 종류에 따라 다음과 같이 다섯 개의 범주로 유한 상태 기계를 정의하였다. 첫째, 표면에 있어 GPS 수신이 가능하면서 DVL을 통하여 대지 속도 측정이 가능한 상태(DVL은 최대측정 범위가 수심 110m임) A, 둘째, 수중에 있어 USBL을 통한 위치 추적이 가능하면서 DVL을 통하여 대지 속도 측정이 가능한 상태 B, 셋째, GPS 수신은 가능한데 수심이 110m를 초과하여 DVL이 대지속도를 정확히 측정할 수 없는 상태 C, 넷째, USBL 수신은 가능한데 수심이 110m를 초과하여 DVL을 통한 대지속도 측정이 불가능한 상태 D, 다섯째, 앞서 언급한 4가지 경우를 제외한 나머지 모든 경우에 해당하는 항법 알고리즘 구동을 위한 최소의 조건이 불가능한 상태 E로 더 이상 항법 알고리즘을 구동할 수 없어 운용자에게 센서의 상태를 점검하라는 경고 메시지를 송출해야 하는 경우로 나누었다. Fig. 4는 항법알고리즘의 최상위에서 구동되

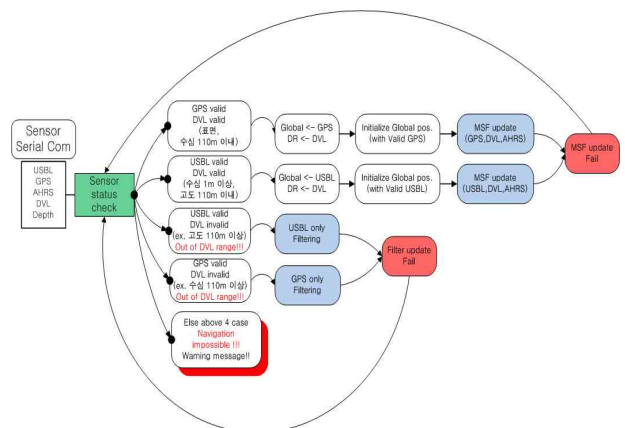


그림 4. 유한상태기계에 따른 항법알고리즘 상태변환
Fig. 4. Navigation algorithm state change logic according to finite state machine.

는 센서 상태를 체크하고 센서 상태에 따라 어떤 센서를 사용하여 다중센서융합기반의 항법 알고리즘을 구동 혹은 종료 할지를 결정하는 유한 상태 기계의 전환 로직을 도시한 것이다.

2. 추측항법 기반의 수중정밀항법

항체 고정 속도 벡터는 NED 좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{n} &= u \cos\psi \cos\theta + v(\cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\phi) \\ &\quad + w(\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \cos\phi \sin\theta) \\ \dot{e} &= u \sin\psi \cos\theta + v(\cos\psi \cos\phi + \sin\phi \sin\theta \sin\psi) \\ &\quad + w(\sin\theta \sin\psi \cos\phi - \cos\psi \sin\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 u 와 v 는 각각 항체 고정 좌표계에서 계측된 전진 방향의 속도와 횡방향 속도이다. 또한 \dot{n} 과 \dot{e} 는 지구고정 좌표계에서의 북쪽 방향과 동쪽 방향으로의 속도이다.

여기에서 중동요각과 횡동요각의 보정을 통하여 수평 방향의 항체 속도를 보정하면 아래 식 (2)와 같이 간단하게 기술될 수 있다. 이는 DVL 속도계에 내부에 탑재된 자세 센서 계측치를 통하여 계산하여 출력하도록 구현되어 있다.

$$\begin{aligned} \dot{n} &= u' \cos\psi - v' \sin\psi \\ \dot{e} &= u' \sin\psi + v' \cos\psi \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 u' 와 v' 는 각각 항체 고정 좌표계에서 중동요각과 횡동요각 성분이 보정된 전진 방향의 속도와 횡방향 속도이다.

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \delta t \times \dot{n} \\ e &= e_0 + \delta t \times \dot{e} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 n 과 e 는 지구고정 좌표계에서의 북쪽 방향과 동쪽 방향으로의 위치이고 아래 첨자 0은 초기 위치를 의미한다. δt 는 시간의 증분을 의미한다.

3. 정밀항법 구현을 위한 선수각 정밀정렬 기법

선수각 정렬 오차는 추측항법 수행 시 가장 주의해서 보정해 주어야 할 항목이다^[1].

선수각 정렬 오차 식별 기법은 다음과 같다. USBL(혹은 GPS)을 통하여 지구 고정 좌표계에서의 위경도 좌표를 동기 화 된 상태로 계측하고 DVL과 AHRS 값을 식 (1)~(3)에 적용한 단독추측항법 결과로부터 추정된 위경도 좌표를 계산한 후 이 두 값을 비교하여 오차

가 가장 적게 나오는 선수각 정렬 오차를 최소자승법을 통하여 식별 보정한다^[2].

4. 특이점 제거 알고리즘

본 연구에서는 거리 계측을 통한 위치 계측 센서의 특징인 특이점(Outlier)을 제거하기 위하여 강인 가중치를 다음과 같이 단순 이분함수 형태로 부여한다.

$$\omega_i = \begin{cases} 1 & |r_i| < 3\gamma \\ 0 & |r_i| \geq 3\gamma \end{cases} \quad (4)$$

여기서 r_i 는 i 번째 USBL(혹은 GPS) 데이터와 다중센서융합 기반 항법알고리즘 결과와의 차이를 나타낸다. 그리고 γ 는 USBL 정밀정렬 캘리브레이션 과정에서 통계적으로 산출 가능한 값으로 해저에 고정된 트랜스폰더의 수평 방향의 위치 추적 RMS 오차를 나타내는 값이다. 수중로봇이 수면에서 운용되어 절대 위치 계측 센서로 GPS가 사용될 경우에는 γ 를 정적으로 계측했을 때의 RMS 오차 값을 사용한다.

본 알고리즘에서 시도하고자 하는 바는 절대 계측 갱신치가 새로 들어올 때 그 값이 수평 방향의 차이가 범위 내에 들어오는 경우 타당한 값으로 받아들이고 아닌 경우 버리는 알고리즘인데 다중센서융합 알고리즘의 성능에 큰 영향을 미친다.

5. 다중센서융합 알고리즘

본 연구에서는 분해능이 높고 갱신주기가 빠른 장점을 갖고 있는 단독추측항법 알고리즘과 장시간 오차가 누적되지 않고 항법 좌표계에서 절대 위치를 제공하는 USBL(혹은 GPS)의 장점만을 융합하여 고성능의 수중용 정밀항법 추정알고리즘을 구현하기 위하여 다음의 다중센서융합 알고리즘을 사용하였다.

본 연구에서는 후보가 되는 두 개의 추정치 \hat{x}_1 과 \hat{x}_2 사이에서 각 추정치 혹은 센서의 충실도에 따른 가중치를 부여함으로써 최종 추정치에 최적성을 부여하는 공분산 교차(Covariance Intersection) 알고리즘을 도입하였다. 공분산 교차법을 사용한 다중센서융합 알고리즘의 최종식은 다음과 같다.

$$\hat{x} = \omega_1 P P_1^{-1} \hat{x}_1 + \omega_2 P P_2^{-1} \hat{x}_2 \quad (5a)$$

$$P^{-1} = \omega_1 P_1^{-1} + \omega_2 P_2^{-1} \quad (5b)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \tag{5c}$$

여기서 ω_1 과 ω_2 값은 음수가 아니어야 하며 일반적으로 P가 최소가 되도록 선택되어야 하는 비선형 최적화 문제이다.

Nielsen이 식 (5)와 같은 비선형 최적화 문제를 빠르게 풀기 위하여 다음의 근사해를 제안하였다^[3].

$$\omega_1 = \frac{\text{trace}(P_1)}{\text{trace}(P_1) + \text{trace}(P_2)} \quad \text{혹은} \tag{6}$$

$$\omega_1 = \frac{\det(P_1)}{\det(P_1) + \det(P_2)}$$

본 연구에서는 공분산이 초기부터 계속해서 누적되는 개념을 지양하고 일시적인 외란에 강인한 알고리즘을 도입하기 위하여 이동 창(receding horizon) 개념을 추가 도입하여 국부 공분산을 사용하는 알고리즘을 구현하였다^[4].

III. 정밀항법 알고리즘의 성능 검증

본 연구에서는 개발된 유한상태기계 기반의 알고리즘을 검증하기 위하여 실험역에서 측정된 데이터를 사용하여 알고리즘의 성능을 분석하였다. 1절에서는 유한상태기계 상태 A에 해당하는 GPS, DVL, AHRS의 센서 정보를 융합하는 경우에 대한 성능 분석을 수행하였으며 2절에서는 잠항 상태에 해당하는 유한상태기계 상태 B의 USBL, DVL, AHRS에 대하여 성능 분석을 수행하였다.

1. GPS, DVL, AHRS의 융합 결과 및 분석

1절에서는 우선 유한상태기계 A에 해당하는 GPS, DVL, AHRS 센서에 대한 다중센서융합알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 자율무인기뢰처리기 항체좌표계와 DVL 센서좌표계의 선수각 오차를 정밀정렬하기 위해 수행하였던 실험의 측정 데이터를 사용하여 선수각 정밀 정렬 과정과 다중센서융합 알고리즘을 통하여 항법 알고리즘의 어떤 식으로 구현되는지 검증하고자 한다.

Fig. 5에 도시된 그림은 자율무인기뢰처리기의 자세 센서를 통해 측정된 위로부터 각각 횡동요각, 종동요각, 선수각 자세정보를 도시한 것이다.

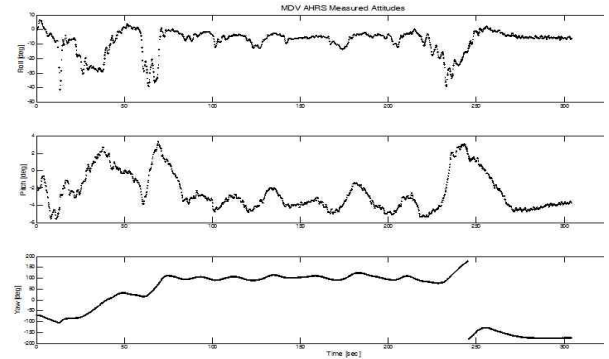


그림 5. AHRS로 측정한 MDV의 자세
Fig. 5. Measured MDV attitudes by AHRS.

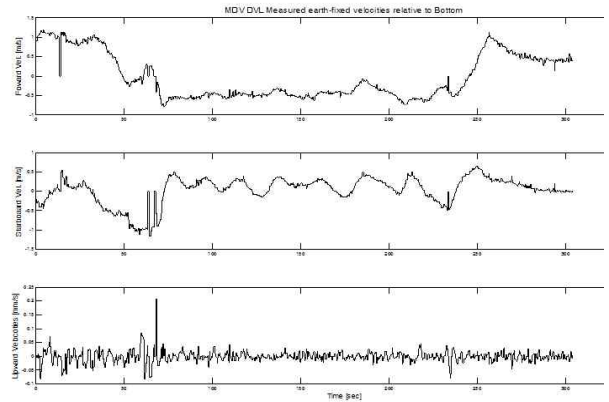


그림 6. DVL로 측정한 MDV의 속도
Fig. 6. Measured MDV velocities by DVL.

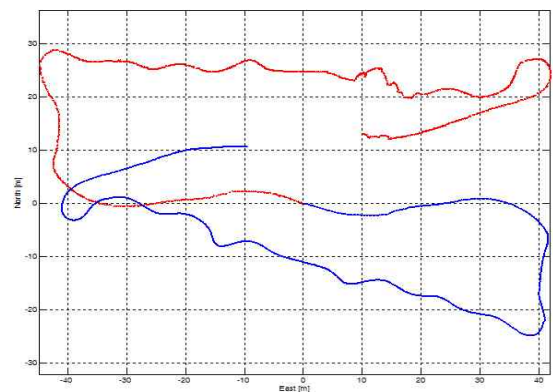


그림 7. 선수각 정렬 전 (적색: GPS, 청색: 추측항법)
Fig. 7. Before heading angle alignment (red: GPS, blue: Dead-reckoning).

Fig. 6은 동시에 측정된 자율무인기뢰처리기에 탑재된 도플러 속도계의 값을 도시한 것이다. 위로부터 전진방향의 속도, 횡방향 속도, 상승 속도를 나타낸다.

Fig. 7은 선수각 정밀정렬을 수행하기 이전의 DVL의 속도 정보와 AHRS의 자세센서정보만을 이용한 추측항법 알고리즘 적용결과와 GPS 계측치를 비교한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 항체와 DVL 센서의 좌표계가 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 비록 추측항법의 경우 누적 오차가 발생하고는 있지만 광역에서 계측된 GPS 데이터와의 비교를 통하여 선수각 정렬을 위해서는 180도 정도 더 회전하여야 한다는 것을 확인할 수 있다. 이를 선수각 오차의 식별을 정밀하게 수행하기

위하여 최소자승법을 사용한다. Fig. 8은 선수각오차를 보정하고 난 후의 추측항법과 GPS를 통한 계측치를 비교한 결과이다. 처음에는 잘 일치하고 있지만 시간이 지남에 따라 누적 오차가 발생하고 있음을 관측할 수 있다.

Fig. 9는 본 연구에서 개발한 다중센서융합 기반의 항법알고리즘과 추측항법을 수행한 경우, GPS 계측치를 각각 비교한 결과이다. 결과로부터 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 다중센서융합 알고리즘의 경우 GPS(1Hz, 특이점 존재)와 DVL(5Hz, 누적오차 존재)의 장점만을 융합하여 정밀하고, 정확하고, 갱신율이 높은 항법 솔루션을 구현하고 있음을 확인할 수 있다.

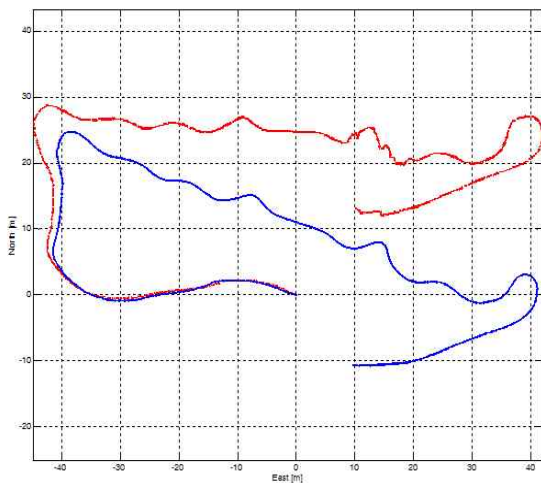


그림 8. 선수각 정렬 후 (적색: GPS, 청색: 추측항법)
 Fig. 8. After heading angle alignment.
 (red: GPS, blue: Dead-reckoning)

2. USBL, DVL, AHRS의 융합 결과 및 분석

2절에서는 USBL, DVL, AHRS 센서의 계측치가 가용한 경우에 대하여 본 연구에서 제안한 다중센서융합 기반 항법 알고리즘의 성능을 검증하고 각 알고리즘의 성능을 비교 분석하고자 한다. USBL 센서의 경우 갱신율이 느리고(1초 이상, 본 예제의 경우 8초) 특이점이 빈번하게 발생하기 때문에 다중센서융합 알고리즘의 우수성을 보여주기 위한 좋은 예라고 할 수 있다.

본 연구에서는 아직 전체 과제의 진도상의 이유로 자율무인기뢰처리기의 USBL 계측치가 포함된 다중센서 정보 계측치를 확보하지 못하였기 때문에 심해무인잠수정 해미래의 센서 계측치를 대신 사용하여 제안된 알고리즘의 성능을 검증하고자 한다.

심해무인잠수정의 계측치는 심도 1,500m의 동해 메탄하이드레이트 발생 영역에서 계측되어 특이점이 빈번하고 USBL의 절대 위치 갱신 주기가 8초로 매우 느리

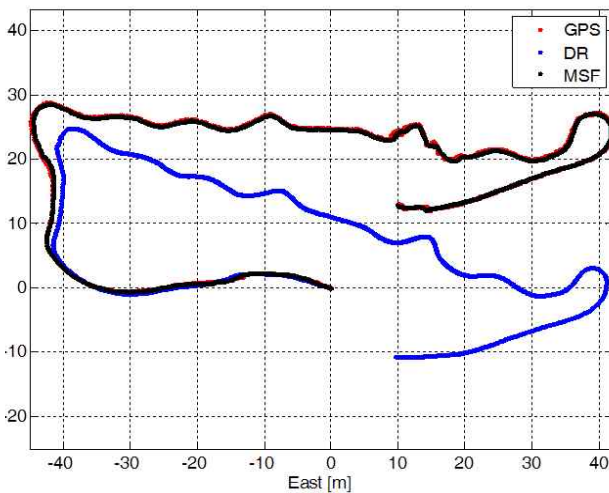


그림 9. 추측항법(청색), 다중센서융합(흑색), GPS계측치(적색)의 성능 평가
 Fig. 9. Performance evaluation of Dead-reckoning (Blue), Multi-sensor fusion (Black), GPS measurements (Red).

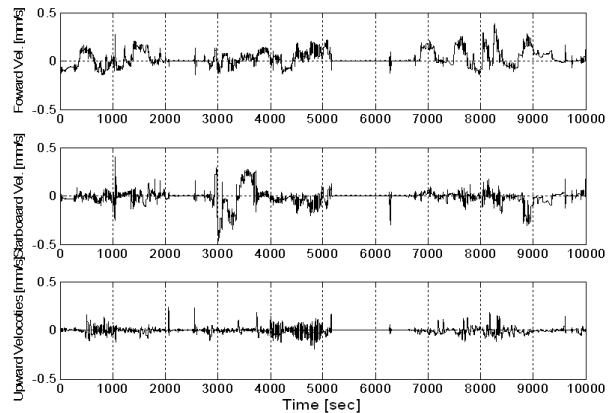


그림 10. DVL에 의한 계측 대지속도
 Fig. 10. Measured velocities against sea bottom by DVL.

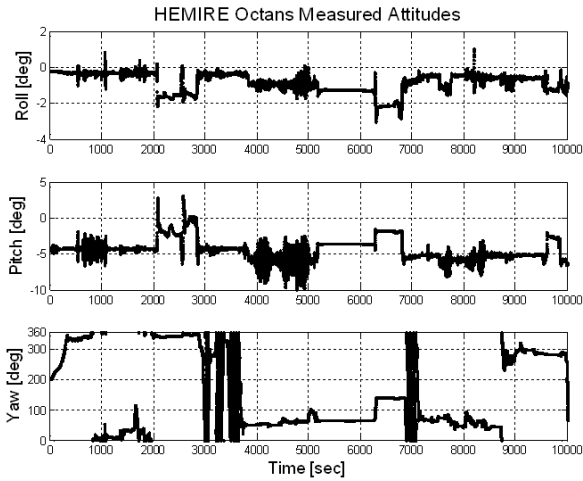


그림 11. 탐사 중 IMU에 의한 자세 계측치
Fig. 11. Measured attitudes by IMU during exploration.

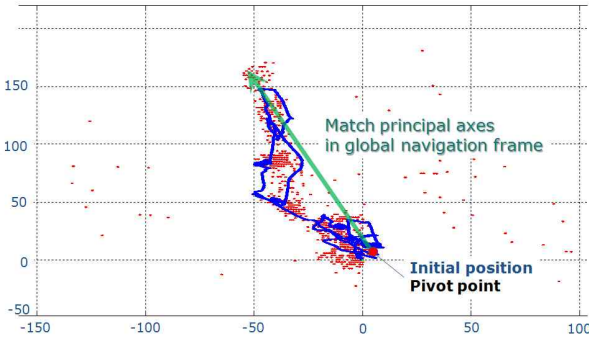


그림 12. 선수각 정렬 후 단독 추측항법 결과
Fig. 12. Standalone DR results after heading alignment calibration.

다는 특징이 있다. 이는 다중센서융합알고리즘의 우수성을 보여줄 수 있는 좋은 예라고 할 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 도플러 속도계와 자세 센서 계측치를 도시한 것이다.

Fig. 12는 1절에서의 내용과 동일하게 선수각 정밀 정렬을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 이때 USBL 계측치가 앞 절에서의 GPS 계측치의 역할을 수행하게 된다. 선수각 오차를 정밀 보정하기 위해서는 광역에서의 데이터 취득이 유리하다.

Fig. 13부터 Fig. 15에 도시된 결과는 특이점 제거 알고리즘의 성능을 보여주는 좋은 예이다. USBL과 같은 초음파를 사용한 거리 계측 기반의 위치 추정 센서는 다중 경로, 주변 잡음 등 다양한 원인의 노이즈에 의해 특이점을 가지고 있는데 메탄하이드레이트 영역의 경우 약 전체 계측치의 6.65% 정도의 빈도로 특이점이 발생하였다. 이를 효과적으로 걸러 주기 위한 로직이 특이

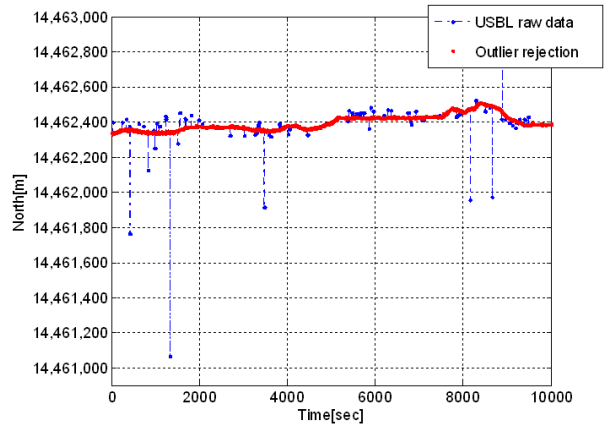


그림 13. UTM 좌표계에서의 North[m]값에 대한 특이점 제거 결과
Fig. 13. Outlier rejection algorithm results for North[m] in UTM coordinate.

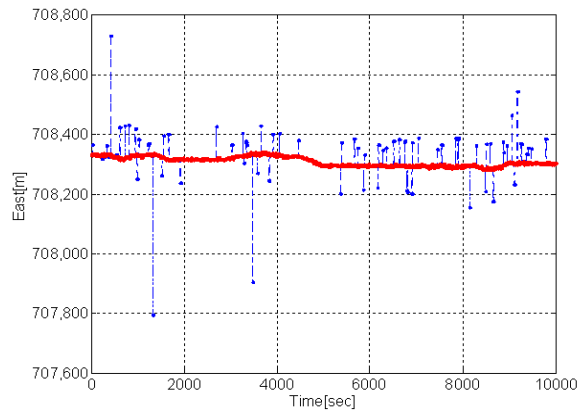


그림 14. UTM 좌표계에서의 East[m]값에 대한 특이점 제거 결과
Fig. 14. Outlier rejection algorithm results for East[m] in UTM coordinate.

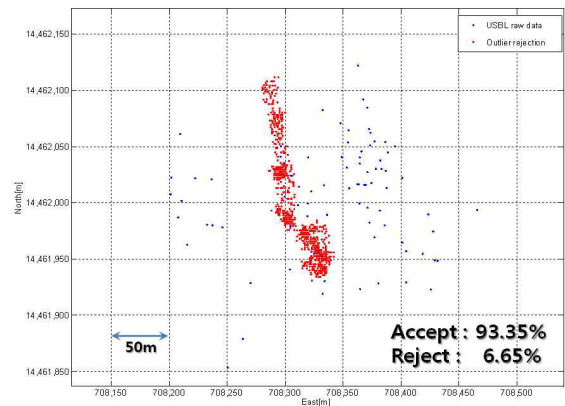


그림 15. 항법 좌표계에서 특이점 제거 결과
Fig. 15. Outlier rejection algorithm results in navigation frame.

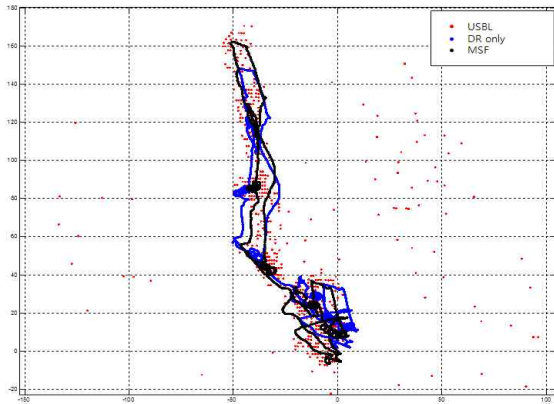


그림 16. 초단기선 센서 계측치, 단독 추측항법 결과, 다중센서융합알고리즘 결과의 비교

Fig. 16. Comparison of USBL measurements, standalone DR algorithm results and Multi-sensor fusion algorithm results.

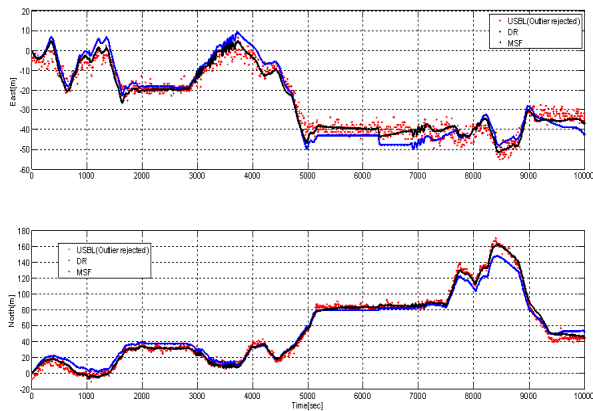


그림 17. 초단기선(특이점 제거), 단독추측항법 알고리즘, 다중센서융합 알고리즘 간의 비교

Fig. 17. Comparison between USBL(Outlier removed), standalone DR algorithm and MSF algorithm results.

점 제거 알고리즘이다. 특이점 제거 알고리즘이 존재할 경우 전체 다중센서융합 알고리즘의 성능이 현저히 향상되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 16과 17은 USBL 단순 계측치와 단독 추측항법, 다중센서융합알고리즘의 성능을 각각 공간과 시간축에서 비교한 것이다. 빨간 점이 USBL만 단순 계측한 결과이며, 파란 점이 DVL 기반의 단독추측항법 결과이다. 검은 점이 본 연구에서 개발한 다중센서융합 기반 항법 알고리즘 결과이다. 결과로부터 다중센서융합 알고리즘 결과가 정밀도, 정확도, 갱신을 등 모든 요소에서 확연히 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

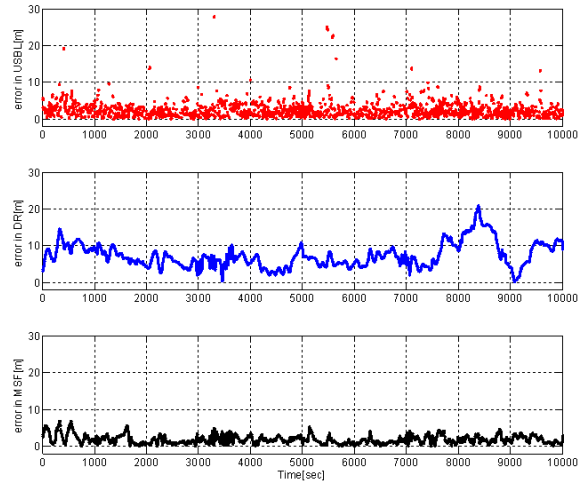


그림 18. 초단기선, 단독추측항법 알고리즘, 다중센서융합 알고리즘의 강인 회귀 필터링에 대한 오차 분석

Fig. 18. Error analysis for USBL, standalone DR algorithm and MSF algorithm results against robust regression filtering.

Fig. 18은 물리적으로 본 연구에서 추정하고자 하는 위도, 경도 값의 참값을 계측할 수 없기 때문에 분산된 데이터에 대하여 Cleveland가 제안한 강인 회귀 스무딩^[5] 결과를 참 값이라고 가정하고 수행한 오차 분석 결과를 도시한 것이다.

맨 위의 그림이 USBL 단순 계측치를 도시한 것인데 비교를 위하여 30m 축을 최대치로 자른 것이다. 실제로는 200m 정도까지의 오차를 가지는 특이점도 발생하였다. 두 번째 그림이 도플러 속도계를 사용한 단독 추측항법의 결과인데 선수각 정밀 정렬이 잘 이루어져 있어서 3시간 정도 움직인 후에도 최대 오차가 20m 정도로 양호하다. 하지만 누적 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 세 번째 그림은 다중센서융합 알고리즘의 결과인데 RMS 오차 3m정도로 센서 동작 상태가 변하지 않는 이상 계속해서 우수한 성능의 항법 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 자율무인기뢰처리기를 타겟으로 하는 수중 로봇의 고난도 임무 수행을 위한 유도 및 항법 시스템 구현에 대하여 기술하였다.

유도 프로그램에서는 항법 센서 정보를 주변 지형 이미지 모자이크에 연동하고 모션, 수중로봇, 타겟의 상대

위치와 상대 선수각 정보를 디스플레이하는 프로그램을 개발하였고 사용자 입력을 통하여 경유점을 입력 받은 후 제어 선수각과 제어 수심을 전송하는 프로그램을 개발 하였다.

또한 수중용 정밀 항법 프로그램 구현을 위해서 공분산 교차이론을 적용한 다중센서융합 기반의 정밀 항법 알고리즘을 구현함으로써 절대 위치 제공 센서와 속도 계측 센서의 장점만을 취합하는 우수한 성능의 항법 알고리즘을 확보하였다. 향후에는 자율무인기뢰처리기의 수중 계측치를 사용하여 정밀 항법알고리즘의 성능을 검증하고 유한 상태 기계가 실제로 전환되면서 항법 알고리즘이 연속적으로 구동되는 시나리오를 실험적으로 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 방위사업청의 ACTD사업 연구결과 중 일 부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] L. Whitcomb, D. Yoerger, and H. Singh, "Advances in Doppler-Based Navigation of Underwater Robotic Vehicles," Proc. Of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 399-406, 1999.
- [2] J. C. Kinsey, and L. L. Whitcomb, "In Situ Alignment Calibration of Attitude and Doppler Sensors for Precision Underwater Vehicle Navigation: Theory and Experiment," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 286-299, 2007.
- [3] W. Niehsen, "Information fusion based on fast covariance intersection filtering," In Proc. Int. Conf: Inf: Fusion (FUSION '02), pp. 901-905, 2002
- [4] K. Kim, H. T. Choi, S. M. Kim, and P. M. Lee, "Implementation of precise underwater navigation," UUST 09, 2009.
- [5] W.S. Cleveland, "Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatter plots," Journal of the American Statistical Association, Vol. 74, pp. 829-836. 1979.

저 자 소 개



김 기 훈(정회원)

1998년 서울대학교 조선해양
공학과 학사 졸업.

2000년 서울대학교 조선해양
공학과 석사 졸업.

2005년 서울대학교 조선해양
공학과 박사 졸업.

2005년~현재 한국해양연구원 선임연구원
<주관심분야 : 수중로봇, 센서, 항법, 인지, 추정>



이 종 무(정회원)

1985년 서울대학교 조선공학과
학사 졸업.

1987년 서울대학교 조선공학과
석사 졸업.

2005년 서울대학교 조선공학과
박사 졸업.

<주관심분야 : 수중로봇 설계, 수중 추진 시스템,
수중음향항법>



최 현 택(정회원)

1991년 한양대학교 전자공학과
학사 졸업.

1993년 한양대학원 전자공학과
석사 졸업.

2000년 한양대학원 전자공학과
박사 졸업.

1993년~1995년 KT 연구개발원 전임연구원
2000년~2003년 미국하와이주립대학교
기계공학과 박사후과정
2003년~현재 한국해양연구원 선임연구원
<주관심분야 : 수중 로봇, 정밀/강인제어, 인공지능>