

수중환경에서 위치추적 시스템의 DSP 구현

DSP Implementation of The Position Location System in Underwater Channel Environments.

이 덕 환*, 고 학 립*, 임 용 곤**

(Deok-Hwan Lee*, Hak-Lim Ko*, Yong-Kon Lim**)

*호서대학교 정보통신공학과, **한국해양연구원

(접수일자: 2006년 10월 23일, 수정일자: 2006년 12월 7일 채택일자: 2006년 12월 22일)

본 논문에서는 수중에서 이동체의 3차원 위치를 추정하기 위한 위치추적 시스템을 구현하였다. 본 연구에서는 네 개의 초음파 센서를 수중의 서로 다른 위치에 고정시키고, 이동체인 이동체 센서와 서로 다른 신호를 송·수신하게 함으로써 고정체와 이동체 모두에서 이동체의 3차원 위치 추적과 이동체의 원격제어를 가능하게 하였다. 또한 위치 추적 시에 Newton 알고리즘에서 매 iteration 시에 Jacobian 행렬의 norm을 추정하고, 행렬의 norm이 임계값 이상이 되어 역행렬에 의한 해가 불안정해질 때는 또 다른 초기값을 이용하여 해를 구하게 함으로써 이동체의 위치가 보다 신뢰성 있게 추정되게 하였다. 그리고 제안한 알고리즘을 이용하여 실시간 위치 추적이 가능한 위치 추적DSP 시스템을 구현하였으며, 성능 검증을 위한 수조 실험을 수행하였다. 성능 검증결과 본 연구에서 구현한 위치 추적 시스템은 1초에 2회 이상의 속도로 오차율 5cm 이내에서 이동체의 위치를 추적함을 알 수 있었다.

핵심용어: 3차원 위치 추적, DSP, 실시간 신호처리, Newton 알고리즘, 초음파통신

투고분야: 수중음향 분야 (5.7)

In this paper we have implemented a 3-D PL (Position Location) system to estimate the 3-dimensional position of a moving object in underwater environments. In this research, we let four sensors fixed in different positions and moving sensorsto communicate with each other to find the 3-dementional positions for both the fixed and moving objects. Using this we were also able to control the moving object remotely. When finding the position, we calculated the norm of the Jacobian matrix every iteration in the Newton algorithm. Also by using a different initial value for calculating the solution when the norm became higher than the critical value and the solution from the inverse matrix became unstable, we could find a more reliable position for the moving object. The proposed algorithm was used in implementing a DSP system capable of real-time position location. To verify the performance, experiments were done in a water tank. As a result we could see that our system could located the position of an object every 2 seconds with a error range of 5cm.

Key words: 3-D position localization, DSP, Real time signal processing, Newton algorithm, Sonar communications

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.7)

I. 서론

수중 환경 보호 및 자원 개발을 위하여 수중 작업용 로봇 및 무인 잠수정 등 많은 장비들이 개발되었거나 연구가 진행 중에 있다. 이러한 연구에 발 맞추어 장비들

의 수중에서 장비의 위치를 정확하게 파악 할 수 있는 기술 개발 또한, 작업 수행 능력 향상 및 장비의 보호 차원에서 꼭 필요한 기술이다. 수중환경에서의 위치 추적 기술은 3차원 공간상에서 얼마만큼 이동체의 위치를 정확하게 추정할 수 있는 가치는 신뢰성 있는 좌표의 추정이 관점인 것이다. 이러한 수중의 위치추적에 대한 연구가 다방면에서 이루어졌을 뿐만 아니라 많은 발전을 거듭해 왔다.

책임저자: 이 덕 환 (mothello@chol.com)
336-795 충남 아산시 배방면 세출리 호서대학교 1공학관 323호
(전화: 041-540-5691; 팩스: 041-540-5693)

일반적인 표적의 위치추적은 3차원 공간상에서 표적의 방위각, 고각, 거리를 추정하는 것으로서 배열센서를 이용하여 수중환경에서 수면이나 바닥에 반사되어 도달하는 다중경로 신호들의 입사각과 이 신호들 사이의 시간차 (time difference)를 이용하여 이동체의 위치를 추정하며 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다 [1-4]. 수직 배열센서를 이용할 경우 센서에 도달하는 신호들의 고각만을 이용하여 이동체의 위치를 추정하며 [3-4], 수평 배열센서를 이용하는 경우 각각의 다중경로를 통하여 도달한 신호의 시간차만을 이용하여 표적의 거리와 깊이를 동시에 추정할 수 없다는 단점이 있다. 또한 여러 개의 이동체가 존재할 경우에 음원들이 동일한 방향에 존재하면 가까이 근접해 있을 경우와 근접해 있지 않는 두 경우 모두 빔 형성기로는 이동체의 위치 분해능이 떨어지게 되어 하나의 이동체로만 추정하는 결과를 가진다.

본 논문에서는 Hyperbolic 위치 추적 방식 [5]을 사용하여 이동체와 고정체 간의 시간 동기화 관계없이 이동체나 각 고정체에서 수신되는 신호의 상대 시간 지연 [6]을 이용하여 이동체의 3차원 위치를 추정하였다. 또한 이동체나 고정체에서 다중 음원일 경우 이동체의 구분 및 상호 간의 시간 지연을 추정하기 위하여 고정체에서는 코드의 길이가 31이고 코드의 펄스폭이 $25\mu\text{sec}$ 인 상대상관 값이 작은 골드 코드를 전송하였으며, 이동체에서는 같은 펄스폭을 갖고 코드의 길이가 31자가상관 값이 큰 신호를 BPSK로 위상 변조하여 전송함으로써 이동체와 고정체 모두에서 이동체의 3차원 위치가 추정되게 하여 [7] 쌍방향 통신이 가능하게 하고 향후 고정체에서 원격으로 이동체 (예, AUV)의 제어가 가능하게 하였다. 그리고 본 연구에서는 Hyperbolic 위치 추적 방식으로 구한 쌍곡면 방정식의 해를 Newton 알고리즘 [8] 이용하여 추정하였으며, Newton 알고리즘에서 매 반복때마다 Jacobian 행렬의 singular 근접 여부를 추정하고 Jacobian 행렬이 singular에 근접하면 위치 추적에 대한 초기값을 수정해 주는 방식으로 이동체 위치 추적의 신뢰성을 증가 시켰다.

또한, 본 연구에서 제안한 위치 추적 알고리즘의 성능 검증에 위하여 실시간으로 위치 추적이 가능한 DSP보드 및 운용 GUI로 구성된 위치추적시스템을 개발하였으며, 해양연구원에서의 수조 실험을 통하여 개발된 시스템의 성능을 검증하였다.

II. 위치추적 알고리즘

본 연구에서는 N개의 센서가 고정되어 있으며 이동체와 고정된 센서가 정의된 코드를 송·수신 함으로써 상호 간의 3차원 위치추적이 가능하게 하였다. 본 연구에서 사용한 기하학적 구조가 그림 1에서 보여진다. 또한, 본 연구에서 사용된 센서는 모두 전 방향성 센서로 각각 임의의 위치에 불규칙적으로 분포되어 있다고 가정하였고, 고정체 센서의 위치는 안다고 가정하였다.

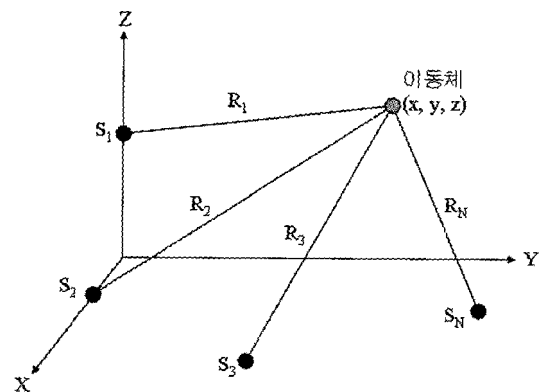


그림 1. 센서배열과 이동체의 기하학적 구조

Figure 1. The location of objects in underwater environment.

만약 이동체나 고정체에서 신호를 전송하고 상대편 센서에서 신호를 수신하여 이동체와 고정체 사이의 시간 지연을 추정하였을 때, 이동체와 고정체 i 사이의 시간 지연(TOA) τ_i 와 i 번째 고정체에서 이동체까지의 거리 R_i 의 관계는 다음과 같다.

$$R_i = c\tau_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad (1)$$

위 식(1)에서 (x, y, z) 는 이동체의 좌표를 의미하며, (X_i, Y_i, Z_i) 는 i 번째 고정체의 좌표값을 의미하고, c 는 음파의 전달 속도로 수중에서 음파전달 속도는 여러 요소에 의하여 변화하지만 일반적으로 1500m/s이다. Hyperbolic 위치 추적 방식에 의하여 i 번째 기준 고정체와 j 번째 고정체 사이의 상대 시간지연 (TDOA) τ_{ij} 를 이용하여 구한 상대 거리차 R_{ij} 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{ji} = c\tau_{ji} = c(\tau_j - \tau_i) = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2} - \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad (2)$$

3차원 공간에서 식 (2)는 고정체간의 상대 거리차 R_{ji} 를 쌍곡면으로 나타내게 되며, 4개 이상의 TDOA측정으로 구성된 3개 이상의 독립적 쌍곡면으로부터 교차점이 발생하고, 쌍곡면의 교차점이 구하고자 하는 이동체의 실질적인 위치가 된다.

$$F(x, y, z)_{ji} = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2} - \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} - R_{ji} \quad (3)$$

따라서 네 개의 고정체와 이동체에서 서로 다른 시간 지연 정보 네 개를 이용하면 식(3)과 같은 비선형 방정식이 세 개를 구할 수 있으며, Newton 알고리즘을 이용하여 벡터 방정식 $F(x, y, z) = 0$ 의 해를 추정한다. 또한 벡터 방정식의 해를 반복 방식으로 추정하기 위해 변수 x, y, z 에 대한 함수 $F(x, y, z)_{ji}$ 의 편도함수를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(x, y, z)_{ji}}{\partial x} &= (X_i - x)/R_i - (X_j - x)/R_j \\ \frac{\partial F(x, y, z)_{ji}}{\partial y} &= (Y_i - x)/R_i - (Y_j - x)/R_j \\ \frac{\partial F(x, y, z)_{ji}}{\partial z} &= (Z_i - x)/R_i - (Z_j - x)/R_j \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 네 개의 고정체 센서를 고려한 벡터방정식에 대한 Jacobian 행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F(x, y, z)_{21}}{\partial x} & \frac{\partial F(x, y, z)_{21}}{\partial y} & \frac{\partial F(x, y, z)_{21}}{\partial z} \\ \frac{\partial F(x, y, z)_{31}}{\partial x} & \frac{\partial F(x, y, z)_{31}}{\partial y} & \frac{\partial F(x, y, z)_{31}}{\partial z} \\ \frac{\partial F(x, y, z)_{41}}{\partial x} & \frac{\partial F(x, y, z)_{41}}{\partial y} & \frac{\partial F(x, y, z)_{41}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 벡터 방정식 $F(x, y, z) = 0$ 으로 표현된 비선형 연립 방정식의 근 P 를 구하기 위한 Newton방법은 초기값 $P(0)$ 가 주어졌을 때 다음 단계의 추정 위치벡터 P 를 아래의 식(6)과 같이 추정한다.

$$P(k) = P(k-1) - [J(P(k-1))^{-1} F(P(k-1))], \quad k \geq 1 \quad (6)$$

그리고 여기서 $P(k)$ 는 k 번째 반복에서 추정된 위치 벡터 (x_k, y_k, z_k) 를 의미하며 식 (6)의 함수를 이용하여 최적화된 이동체의 위치를 찾기 위해 반복적으로 아래의 조건을 만족하는 $P(k)$ 로 근접해간다.

$$\|P(k) - P(k-1)\| = 0 \quad (7)$$

Newton 방법은 실제의 위치 추정을 위해서 알고리즘의 반복 실행 중 행렬 $J(P(k-1))$ 가 singular에 근접하면 $P(k)$ 의 값이 심하게 변하면서 원하지 않는 위치로의 수렴되는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 $J(P(k-1))$ 의 condition number [4]를 매 반복 과정마다 추정하고 추정된 condition number가 정해진 임계값 이상이 되면 초기값 $P(0)$ 를 다른 값으로 초기화시켜 이동체의 위를 다시 추적되게 함으로써 이동체의 3차원 위치 추정에 대한 시스템의 신뢰성을 증가시켰다. 여기서 $J(P(k-1))$ 의 condition number값은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\text{cond}(J(P(k-1))) = \|J(P(k-1))\| \cdot \|J(P(k-1))^{-1}\| \quad (8)$$

따라서 본 논문에서 수행한 3차원 위치추정 기법은 아래와 같이 요약된다.

〈Step 1〉 네 개의 고정체에서 동시에 코드가 서로 다른 네 개의 신호를 각각 전송한다.

〈Step 2〉 이동체에서는 네 개의 고정체로부터 전송된 신호를 이용하여 demodulation을 수행한 후에, 서로 다른 코드를 갖는 네 개의 matched filter를 이용하여 상대 시간 정보를 추출한 후에 이를 이용하여 이동체의 3차원 위치를 추정한다.

〈Step 3〉 이동체에서 신호를 전송한다.

〈Step 4〉 네 개의 고정체에서는 각각 이동체로부터의 신호를 수신한 후에, 네 개의 고정체가 연결된 고정체 보드에서 demodulation과 matched filter를 이용하여 네 개의 시간 정보를 각각 추정한 후에, 이를 이용하여 이동체의 3차원 위치를 추정한다.

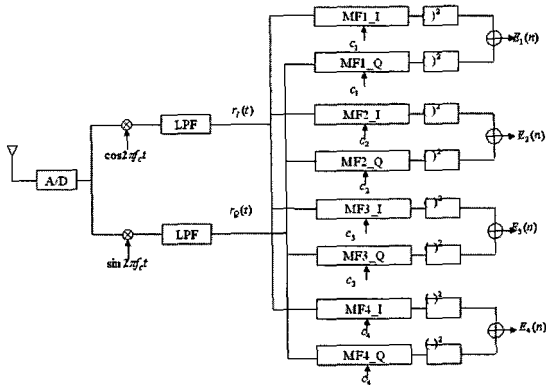


그림 2. matched filter의 블록도
Figure 2. The Block diagram of the matched filter.

〈Step 5〉 고정체에서 추정된 이동체의 3차원 위치 정보는 고정체 보드와 연결된 PC로 전송되어 기록되며, 고정체에서의 신호 전송 주기 역시 PC의 제어에 의해 결정된다.

또한, 그림 2에서 보이는 바와 같이 matched filter에서는 수신한 BPSK 신호를 I 채널과 Q채널의 신호로 분리한 후에, 매 샘플링 주기마다 수신된 신호의 에너지를 추정함으로써, 수신된 BPSK 신호의 위상에 관계없이 수신 신호의 상대 지연을 추정할 수 있게 하였다.

III. 위치추적시스템의 DSP 구현

3.1. 시스템 개념도

본 연구에서는 2장에서 제시된 위치 추적 알고리즘의 성능 검증 및 실제 수조에서의 테스트를 위하여 DSP 보드를 구현하였다. 또한 이동체와 고정체 모두가 이동체의 위치를 알 수 있도록 각각을 나누어 구현하였다. 그림 3은 본 연구에서 개발한 이동체부와 고정체부 시스템 블록도를 나타낸다.

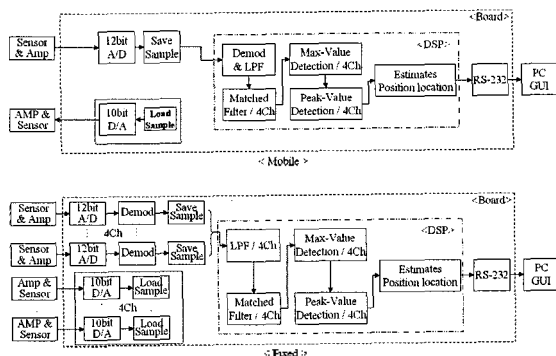


그림 3. 이동체 및 고정체의 시스템 블록도
Figure 3. System bloc diagram of moving and fixed objects.

그림 2에서 보이는 바와 같이 고정체용 보드에서 신호를 전송하면 이동체가 그 신호를 수신하여 자신의 위치를 스스로 추정한 뒤에 다시 신호를 고정체로 전송하고, 고정체에서는 이 신호를 수신하여 이동체의 3차원 위치를 추적하게 하였다. 이때 이동체와 고정체 모두에서 정합 필터 (Matched Filter)의 출력 에너지가 가장 큰 것을 기준으로 상대시간 차이를 구한 후에, 위치 추정이 수행되게 함으로써 다중경로에 의한 위치의 추정 오차가 적도록 설계하였다.

3.2. 시스템 구현

본 연구에서 DSP (TMS320VC33)를 이용하여 이동체와 고정체용 보드를 구현하였으며, 그림 4와 그림5에 이동체 보드의 블록도와 구현된 DSP 보드가 보여진다.

그림 4에서 보이는 바와 같이 이동체용 보드는 크게 7개의 블록으로 나뉘어지며, 각 블록의 기능은 다음과 같다. 개발 단계의 프로그램 다운로드 및 디버깅을 위한 JTAG 블록, 최종적으로 완성된 프로그램을 저장시켜 전원 인가 시에 보드 동작을 위한 프로그램을 DSP로 보내

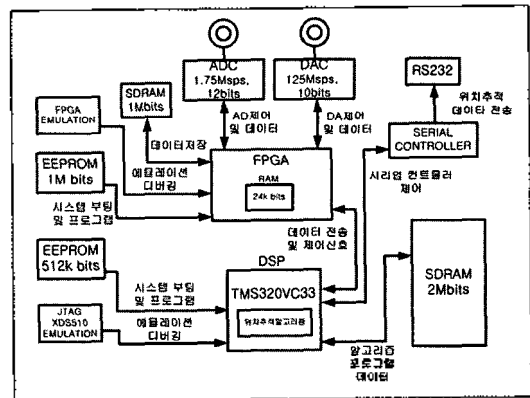


그림 4. 이동체용 보드의 블록도
Figure 4. Block Diagram of moving object.

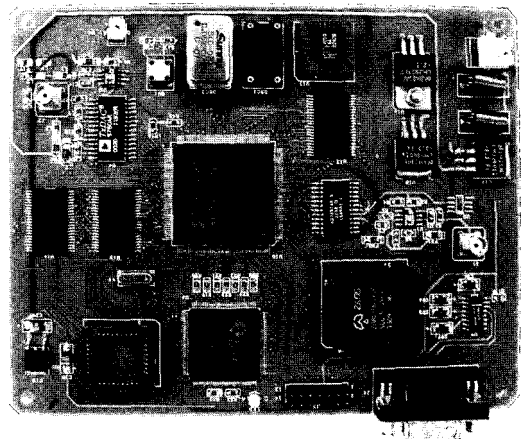


그림 5. 이동체용 DSP보드
Figure 5. DSP Board of moving object.

주는 ROM 블록, 측정 데이터를 저장할 수 있는 SDRAM 블록, 신호를 송·수신하기 위한 송수신 블록, AD/DA 등 주변 소자를 제어하기 위한 제어 블록, 신호처리 블록, 추적된 위치를 전송하기 위한 전송제어 블록이다. 보드의 동작 순서를 보면 우선 고정체가 이동체로 신호를 전송하고 이동체에서 일정 레벨 이상의 신호가 수신되면 FPGA에 의해 수신된 신호가 디지털 데이터로 변환되어 DSP로 전송되며, DSP에서는 변환된 디지털 데이터를 이용하여 이동체가 자카 위치가 추정을 하게 되며, 추정된 위치는 이동체 내의 메모리에 저장된다. 향후 추정된 위치 정보 데이터는 이동체 보드에 장착된 시스템에 RS-232 직렬통신 방식으로 PC에 전달된다. 또한, 고정체로의 위치식별을 위한 코드 전송 시에는 자기 상관인 우수한 31비트 코드를 상승 변형 필터링과 BPSK 변조하여 메모리에 저장되어 있는 신호를 FPGA의 제어에 의해 디지털-아날로그 변환기를 통해 전송한다.

그림 6과 그림 7에서는 고정체 보드의 블록도와 구현된 DSP 보드가 보여진다. 그림에서 보이는 바와 같이 고정체용 보드는 네 개의 고정체가 한 개의 시스템 보드에

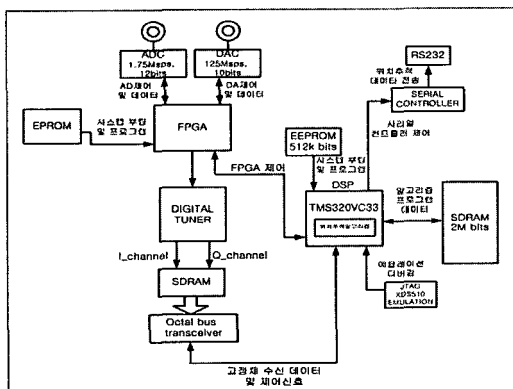


그림 6. 고정체용 보드의 블록도
Figure 6. Block diagram of fixed object.

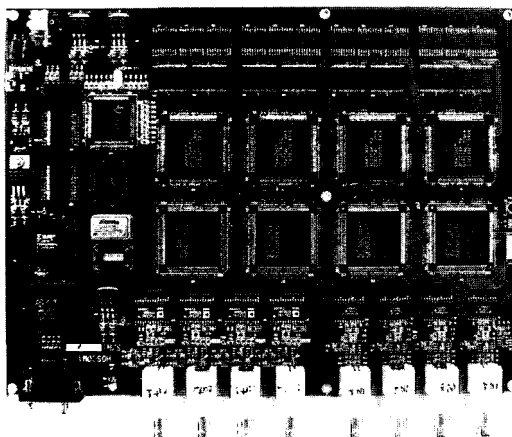


그림 7. 고정체용 DSP 보드
Figure 7. DSP board of fixed object.

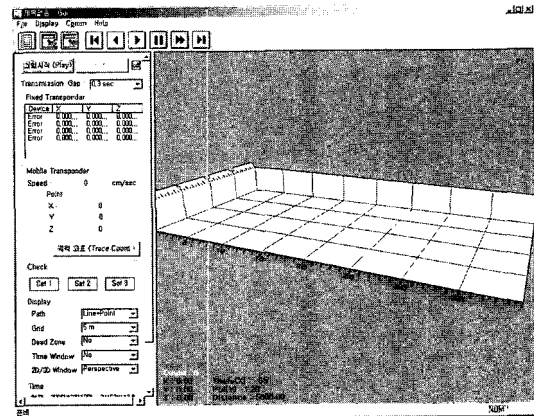


그림 8. 추정된 이동체의 3차원 위치 표시를 위한 GUI
Figure 8. GUI for system operation and 3D position indication.

구성되어 있다. 따라서 각 고정체 센서에 수신된 신호는 그림 7의 고정체 보드에 있는 FPGA에 의해 모두 디지털 데이터로 변환되며, 변환된 디지털 데이터는 digital tuner에 의해 I채널과 Q 채널로 분리되어 복조된다. 또한 복조가 수행된 네 개 고정체로부터의 데이터는 보드 내의 SDRAM에 저장되며, DSP에서는 저장된 각각의 데이터를 이용하여 시간지연차 (TDOA)를 구한 후 내장된 위치추적 알고리즘을 수행하여 이동체의 위치를 추정하게 된다. 그리고 고정체가 이동체로의 데이터 전송 시에는 이동체에서와 동일한 방법으로 BPSK 변조와 송신을 수행한다. 다만 고정체의 경우 상호상관 (Cross Correlation) 이 우수한 31비트 길이의 골드코드 (Gold Code)를 사용하여 데이터를 전송한다.

또한 본 연구에서는 DSP 보드를 이용하여 추정된 이동체의 위치를 직렬통신으로 PC에 전송하여 사용자가 실시간으로 이동체의 위치추적뿐만 아니라 현재 시간까지의 이동경적까지 파악할 수 있는 그림 8의 GUI를 개발하였다.

IV. 수조 성능 테스트

본 연구에서는 구현된 위치 추적 시스템의 성능을 검증하기 위하여 한국해양연구소의 해양공학 수조에서 실험을 수행하였다. 성능 검증에서 이동체와 고정체는 모두 펄스폭이 25 μ 인 코드를 80KHz의 반송주파수를 갖는 BPSK 신호로 변조하여 전송하였으며, 수신 시에는 전송된 신호를 수신한 후에 400KHz의 샘플링 율로 A/D 변환하고 위치추적 알고리즘을 통하여 이동체의 3차원 위치를 추정하였으며 RS232 통신 방식을 통하여 노트북

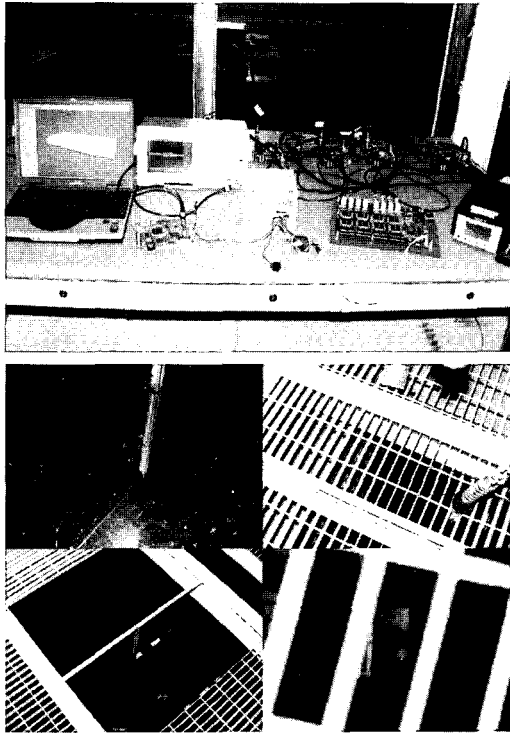


그림 9. 수조 실험 환경
Figure 9. Test environment in the water tank.

컴퓨터의 GUI상에 위치를 표시하였다. 그림 9에 성능검증의 실험 환경이 보여진다.

그림 9에서 보이는 바와 같이 실험에 사용한 초음파 센서는 송수신 모두 전 방향 하이드로폰을 사용하였으며, 앰프는 자체 제작한 송신 앰프와 B&K사의 수신앰프를 사용하였다. 또한 그림 10에서 보이는 바와 같이 네 개의 고정체용 센서를 수조의 필요 위치에 고정하여 설치하였으며, 이동체 센서를 이동시키면서 이동체의 3차원 위치 추적을 수행하였다.

그림 11(a), (b)와 (c)에 본 실험 수행 후에 고정체와 이동체에서 각각 추정된 이동체의 3차원 위치와 실제 이동체의 3차원 위치가 보여진다.

- (a) 고정체에서 추정된 이동체의 위치.
- (b) 이동체에서 추정된 이동체의 위치.

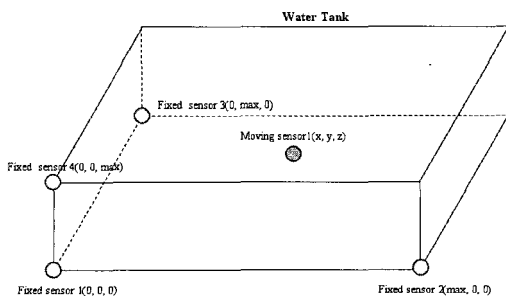
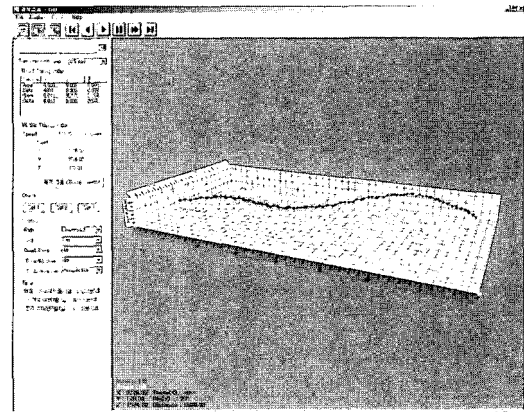


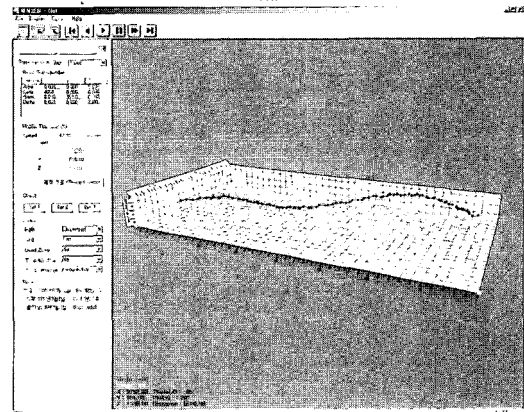
그림 10. 실험을 위한 센서의 설치도
Figure 10. The install of the sensor for the experiment.

(c) 실제 이동체의 위치.

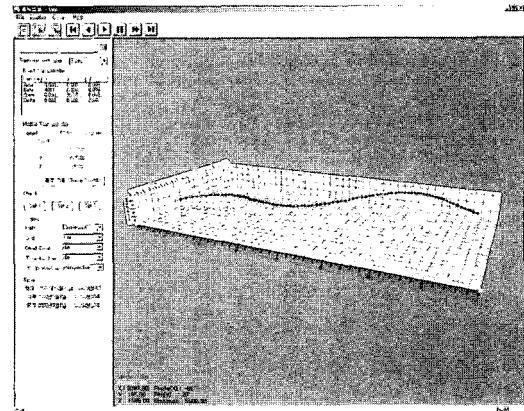
본 연구에서 구현한 위치 추적 시스템에서는 추정된 이동체의 3차원 궤적과 실제 이동체의 3차원 위치 궤적을 이용하여 이동체 위치 추적의 정확도를 검증하였다. 또한 이동체의 3차원 위치 궤적을 추정하는 경우, 만약 임의의 시간에서 추정한 이동체의 위치가 바로 전에 추정된 위치를 기준으로 해당시간 동안 이동체가 최대로 이동할 수 있는 거리 보다 더 크게 추정되는 경우에는,



(a)



(b)



(c)

그림 11. 고정체와 이동체에서 추정된 이동체의 위치와 실제 이동체의 위치
Figure 11. Position of moving object that estimated in moving object and fixed object, and position of actuality moving object.

현 시간에서 추정된 위치 정보를 무시하고 다음 시간에 대한 위치를 추정하였다. 만약 다음 시간에 추정된 위치가 이전 위치를 기준으로 해당 거리 이내에 있으면, 이전에 추정된 위치와 다음 추정 위치를 선을 그어 이동체의 이동 궤적으로 하였다. 따라서 임의의 시간에 위치 추정이 잘못되더라도 위치 궤적에 대한 에러가 최소화되었으며, 이 경우 본 연구에서 구현한 위치 추적 시스템은 해양 연구원의 수조 시험에서 5 cm 오차 범위 내에서 이동체의 위치를 추적함을 확인하였다.

또한, 만약 이동체의 위치에 의해서 수신된 신호가 matched filter에서의 샘플링 시간과 정확하게 일치하지 않을 때, 식 (3)에서 식 (7)까지에서의 벡터 방정식 $F(x, y, z) = 0$ 의 해가 수렴하지 않거나 다른 위치로 수렴하는 경우가 발생하였으며, 이는 향후 전송 데이터 율의 증가나 샘플링 율의 증가로 해결할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수중환경에서 이동체의 3차원 위치를 추적하기 위한 방법과 구조도를 제안하였으며, 이를 바탕으로 DSP보드를 구현하였다. 제안된 기법에서는 이동체와 고정체의 시간동기 없이도 신뢰성 있게 이동체의 위치 추적을 하기 위하여 hyperbolic 위치 추적 기법과 Newton 알고리즘을 이용하였으며, 특히 Newton 알고리즘 수행 시에는 매 반복 과정마다 Jacobian 행렬의 condition number를 조사하고 알고리즘의 신뢰성이 위험하다고 판단되면 위치 추적의 초기값을 변화시켜 다시 알고리즘이 수행되게 함으로써 위치 추적의 오류를 최소화 하였다. 또한, 이동체 및 고정체에서 서로 다른 코드를 사용하여 위치를 추적함에 의하여 향후 양방향 통신에 의한 이동체 위치추적은 물론 이동체의 위치에 따른 AUV의 무선 제어가 가능하게 하였다. 그리고 본 연구에서는 구현된 위치 추적 보드를 이용하여 한국 해양연구원의 수조에서 성능 검증 실험을 수행하였으며, 검증 결과 5 cm 오차 범위 내에서 이동체의 3차원 위치를 정확하게 추정함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. H. C. Schau and A. Z. Robinson, "Passive Source

Localization Employing Intersecting Spherical Surfaces from Time-of-arrival Differences," IEEE Trans. Acoustics, Speech sig. Processing, ASSP-35, 8 1223-1225, Aug. 1987.

2. M. Rendas and J. Moura, "Cramer-Rao Bound for Location System in Multipath Environments," IEEE Trans. sig. Processing, 39 (2) 2593-2610, Dec. 1991.

3. M. Hamilton and P. M. Schultheiss, "Passive Ranging in Multipath Dominant Environments, Part I: Known Multipath Parameters," IEEE Trans. sig. Processing, 40 (1) 1-12, Jan. 1992.

4. Y. X. Yuan, G. C. Carter and J. E. Salt, "Near-Optimal Range and Depth Estimation Using a Vertical Array in a Correlated Multipath Environment," IEEE Trans. Sig. Processing, 48 (2) 317-330, Feb. 2000.

5. J. C. Liberti Jr. and T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, (Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999)

6. G. C. Carter, *Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test, and Evaluation Engineers.*, (Piscataway, NJ, IEEE Press, 1993).

7. 박준석, 지용일, 김성현, "수중환경에서 위치추적 시스템의 구현에 관한 연구", 음향학회지(학술대회논문집) 22 (4) 33-436, July. 2003

8. R. L. Burden and J. D. Faires, *Numerical Analysis*, Brooks/Cole Publishing Company, (Pacific Grove, CA, 1997)

저자 약력

• 이 덕 환 (Deok-Hwan Lee)



2001년 2월: 호서대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 호서대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2003년 3월 ~ 현재: 호서대학교 정보통신공학과 (박사과정)
 2003년 3월 ~ 현재: 한국해양연구원 해양시스템안전 연구소 연수실습생.
 * 주관심분야: 수중음향통신, 배열 신호처리, 디지털 신호처리

• 고 학 림 (Hak-Lim Ko)



1983년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 8월: Fairleigh Dickson Univ. Electrical Eng. (공학석사)
 1995년 8월: North Carolina State Univ. Electrical & Computer Eng. (공학박사)
 1996년 3월 ~ 현재: 호서대학교 정보통신공학과 부교수.
 * 주관심분야: 수중음향통신, 배열 신호처리, 스마트 안테나 시스템

• 임 용 곤 (Yong-Kon Lim)



1979년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
 1984년 2월: 충남대학교 전력전자공학 (공학석사)
 1984년 2월: 아주대학교 통신 및 신호처리 (공학박사)
 1980년 7월 ~ 현재: 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 책임연구원.
 * 주관심분야: 수중음향 신호처리 및 통신 시스템, 수중 로봇, 해양 장비개발