creative commons
COMMONS DEED

저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

Sonar sensor 와 GPS - INS 를 융합한 무인잠수정의 무인항법장치 연구

Study on GPS and Sonar - INS for Unmanned Underwater Vehicle

지도교수 최 형 식

2011 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 호 성

本 論文을 金好成의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위 원 장 유 삼 상 (인)

위 원 최 형 식 (인)

위 원 박 권 하 (인)

2011 년 2 월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

그림목차

표목차

제 1 장 서론 1
제 2 장 좌표계 정의 4
2.1 항법 좌표계(Navigation coordinate) 4
2.2 동체 좌표계(Body coordinate) 5
2.3 좌표계 변환 6
제 3 장 초기개략정렬 연구 8
2.1 Roll, Pitch 알고리즘 8
2.1 Yaw 알고리즘 10
제 4 장 수중복합 항법시스템 13
4.1 AHRS 연구 13
4.1.1 AHRS 소프트웨어 연구 13
4.1.2 AHRS 하드웨어 연구 17
4.2 INS 연구 20
4.2.1 INS 소프트웨어 연구 20
4.2.2 INS 하드웨어 연구 23
4.3 GPS-INS 연구 24
4.3.1 GPS-INS 소프트웨어 연구 24
4.3.2 GPS-INS 하드웨어 연구 26
4.4 GPS and Sonar - INS 연구 28
4.1.1 GPS and Sonar - INS 소프트웨어 연구 28
4.1.2 GPS and Sonar - INS 하드웨어 연구 30
제 5 장 복합 항법시스템 성능시험 32
5.1 matlab을 이용한 시뮬레이션 32
5.1.1 AHRS 결과 32
5.1.2 INS 결과 38

5.1.3 GPS-INS 결과.....43
5.2 성능 시험.....47
5.2.1 AHRS 결과.....47
5.2.2 INS 결과.....50
5.2.3 GPS-INS 결과.....52
5.2.4 GPS and Sonar - INS 결과.....54
제 6 장 결론.....59
참 고 문 헌.....61

Study on GPS and sonar - INS for Unmanned Underwater Vehicle

KIM HO SUNG

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of
Korea Maritime University

Abstract

In this paper, I studied for the navigation system of unmanned underwater vehicle.

The INS(Inertia Navigation System) is composed of 3-axis angular velocity, acceleration and geomagnetic sensor. The Extended Kalman filter is applied to filter out noises of the sensors and to estimate the real sensor states.

Here, to compensate sensor errors, we applied at reference data.

An experimental device was built to test the performance of the composed INS of USBL and AHRS..

그 림 목 차

Fig. 2.1 Navigation coordinate....4
Fig. 2.2 Body coordinate....5
Fig. 4.1 Algorithm of Kalman filter....15
Fig. 4.2 AHRS's algorithm....16
Fig. 4.3 Structure of AHRS's hardware....17
Fig. 4.4 Structure of INS's hardware....23
Fig. 4.5 Software algorithm of GPS-INS....25
Fig. 4.6 Structure of GPS-INS's hardware....26
Fig. 4.7 Software algorithm of GPS and sonar - INS....29
Fig. 4.8 Structure of GPS and sonar - INS's hardware....30
Fig. 5.1 AHRS's simulation using Matlab simulink....33
Fig. 5.2 Simulation of AHRS's sensor model using Matlab simulink....34
Fig. 5.3 The result of AHRS's simulation for roll, pitch, yaw....36
Fig. 5.4 The result of AHRS's simulation for angular velocity....37
Fig. 5.5 INS's simulation using Matlab simulink....38
Fig. 5.6 The result of INS's simulation for acceleration....40
Fig. 5.7 The result of INS's simulation for velocity....41
Fig. 5.8 The result of INS's simulation for position....42
Fig. 5.9 GPS - INSs simulation using Matlab simulink....43
Fig. 5.10 The result of GPS - INS's simulation for velocity....45
Fig. 5.11 The result of GPS - INS's simulation for position....46
Fig. 5.12 Experiment of stationary AHRS's performance at XYZ axis....48
Fig. 5.13 The result of Gimbal lock's rotation test over 90°....49
Fig. 5.14 Experiment of stationary INS's performance at X axis....50
Fig. 5.15 Experiment of stationary INS's performance at Y axis....51
Fig. 5.16 Experiment of stationary INS's performance at Z axis....51

Fig. 5.17 Environment GPS – INS's experiment 52
Fig. 5.18 Experiment of GPS – INS's performance at X axis..... 52
Fig. 5.19 Experiment of GPS-INS's performance at Z axis..... 53
Fig. 5.20 Experiment of USBL's performance at X axis 54
Fig. 5.21 Experiment of USBL's performance at Y axis 55
Fig. 5.22 Experiment of USBL's performance at Z axis 55
Fig. 5.23 Experiment of USBL-INS's performance at X axis..... 56
Fig. 5.24 Experiment of USBL-INS's performance at Y axis..... 56
Fig. 5.25 Experiment of USBL-INS's performance at Z axis 57
Fig. 5.26 Experiment equipment of USBL-INS 57
Fig. 5.27 Experiment of USBL-INS's performance..... 58

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

표 목 차

Table 4.1 DSP28335 Specifications 18
Table 4.2 IMU sensor(ADIS16405) Specifications 19
Table 4.3 GPS Specifications.....27
Table 4.4 USBL Specifications 31

제 1 장 서론

해양 개발이 활발하게 진행되면서 각종 수중작업에 대한 수요가 급격히 증가하고 이에 따라 다양한 해양작업 기술 및 장비가 개발되고 있다. 수중작업장비로는 유인잠수정, 원격조작 무인잠수정(ROV: Remotely Operated Vehicle), 자율무인잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)등이 주로 사용되고 있다.

이러한 수중작업 장비에 대한 기술 개발은 주로 해저석유 산업분야와 해저 광통신 케이블 매설 사업 등 민수 부분 수요와 유실물회수, 기뢰제거 작업 등 특수 군사적인 수요에 의해 주도됐으며, 관련 기술의 발전 속도는 수중작업에 투입되는 다양한 특수 기능의 센서 및 항법 센서와 작업을 직접 수행하는 무인잠수정 기술의 발전에 의해 결정되고 있다.

무인잠수정은 수중이라는 환경에서 운용되기 때문에 수중에서 자신의 위치를 정확히 파악할 수 있는 항법기술이 필수적으로 요구되며 특히 우리나라 연근해와 같이 조류가 강한 곳에서는 그 중요성이 더욱 커진다.

무인잠수정은 수중으로 전파가 통과하지 못함으로 인해 GPS(Global positioning system) 센서를 이용하여 위치의 관측이 불가능하다. 이 때문에 LBL(Long baseline), SBL(Short baseline), USBL(Ultra short baseline) 등의 초음파 관측시스템을 이용이 필요로 한다[1]. 하지만, 이들 초음파 센서는 시간이 지남에 따른 위치 오차의 발산은 없지만, 고주파수의 위치 오차가 있으며 수중에서의 초음파 전달특성으로 말미암아 긴 시간 간격의 샘플링 주기를 가진다. 일반적인 수중항법으로 LBL이 많이 이용되나, 센서를 해저에 설치하는 번거로운 작업과 센서 설치 범위를 벗어난 영역에서의 항법이

곤란한 단점이 있다. USBL은 사용이 편리하고 이동형 무인잠수정을 추적하며 모니터링 하기에는 용이하나, 측정거리가 늘어나면 수중 운항제어에 사용하기에 곤란하다. 이에 따라 관성 센서와 초음파 센서 및 GPS 센서를 융합하는 복합항법시스템이 요구된다[3][4][5][6].

관성항법 시스템은 단시간의 운항에서는 매우 정밀한 정보를 제공할 수 있지만 관성센서의 바이어스 오차 때문에 항법정보를 구하기 위한 적분 과정에서 센서 측정 데이터에 포함된 바이어스 오차가 시간이 지남에 따라 기하급수적으로 증가하여 오차가 발생한다. 이러한 관성항법시스템의 단점을 극복하고 성능을 항상 시키기 위하여, 비관성센서인 GPS, 심도계(Depth gauge), 도플러 속도센서(Doppler velocity), 경사계(Clinometer), 지자기 센서(Geomagnetic sensor), USBL, LBL, SBL을 보조센서로 활용하는 보조항법시스템을 개발하는 것이 필요하다[2].

본 논문에서는 저가형 센서인 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 센서와 GPS, USBL을 보조항법 시스템으로 이용한 항법시스템에 대하여 연구하였다. 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 센서로 얻어진 데이터는 노이즈를 포함하여 이를 제거하기 위해서 칼만 필터를 이용하여 동체의 위치와 자세 값을 추정하며, 비교적 정확한 USBL과 GPS 측정 신호를 바탕으로 이들 신호를 갱신하여 상태변수를 보정한다[3][4].

본 논문의 2장에서는 좌표계를 정의하고 3장에서는 항법모드 진입 전에 동체의 자세를 찾는 초기계략정렬을 논의하였으며, 제 4장에서는 동체의 roll, pitch, yaw의 값을 찾아내는 AHRS, 관성 센서로만 동체의 위치 값과 자세 값을 찾아내는 INS, INS의 오차를 위성항법장치인 GPS로 보정한 GPS-INS, 수중에서의 동체의 위치를 구하기 위한

GPS and Sonar-INS를 논의하였다. 제 5장에서는 사용된 센서들의 특징을 살펴보고 수중복합항법시스템 성능 시험을 위한 장치 구성과 시험결과에 대하여 논의하였으며, 6장에서는 결론 및 향후 연구의 진행 방향에 대하여 논의하였다.

제 2 장 좌표계 정의

무인잠수정의 초기의 자세를 구하기 위한 초기계략정렬과 수중복합항법시스템에서의 무인잠수정의 자세와 위치, 속도를 구하기 위해서는 좌표계와 서로 다른 좌표계간의 좌표변환을 정의해야 한다.

2.1 항법 좌표계(Navigation coordinate)

항법 좌표계(Navigation coordinate)는 운동체의 질량 중심을 원점으로 하고 세 축이 북, 동, 수직 아래쪽을 향하는 지역 수평(Local level)좌표계로 D-축은 지구 타원체에 직교(orthogonal)하고, E-축은 정동, N-축은 정북을 가리키는 좌표계로 Fig. 2.1과 같이 정의한다.

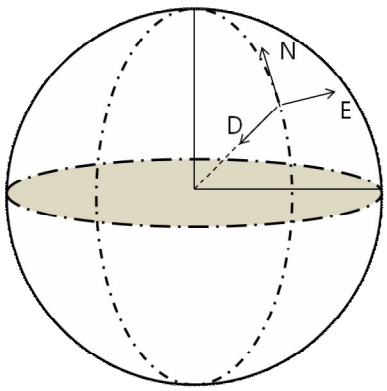

Fig. 2.1 Navigation coordinate

2.2 동체 좌표계(Body coordinate)

동체 좌표계(Body coordinate)는 무인잠수정의 질량 중심을 기준으로 하는 좌표계로 Fig. 2.2의 무인잠수정을 기준으로 하여 무인잠수정의 x-축을 롤(roll, Φ), y-축을 피치(pitch, Θ), z-축을 요(yaw, ψ)로 정의한다.

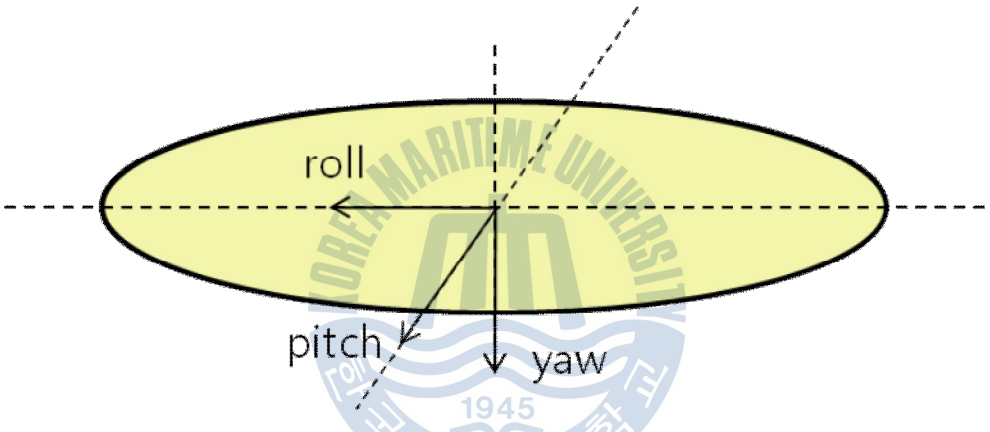

Fig. 2.2 Body coordinate

2.3 좌표계 변환

센서가 출력하는 값이 기준이 되는 좌표계(동체 좌표계)와 항법시스템에서 기준으로 사용되는 좌표계(항법 좌표계)는 서로 다르다. 그러므로 무인잠수정의 자세 값을 계산하기 위해서는 좌표계 간의 좌표변환이 필요하다. 좌표계 간의 좌표변환행렬로서 공학과 과학적인 응용에 많이 사용되는 것이 DCM(Direction Cosine Matrix)이다. DCM은 서로 다른 Cartesian 좌표계간의 좌표변환을 쉽게 할 수 있다.

항법 좌표계로 정의된 r^b 벡터와 동체 좌표계로 정의된 r^n벡터라면, 이들간의 관계는 식(2.1)과 같이 나탈낼 수 있다.

$$r^b = C_n^b r^n \tag{2.1}$$

자세 변환 행렬 C_n^b는 DCM이라고 하며, 세계의 좌표축 roll, pitch, yaw에 대한 연속적인 회전을 통해 얻은 행렬들을 곱하여 구할 수 있으며, x축의 roll, y축의 pitch, z 축의 yaw를 회전행렬을 순서대로 곱하면 항법 좌표계에서 동체 좌표계로 변환하는 C_n^b로 식(2.2)와 같다.

$$C_n^b = C_3^b(\phi)C_2^3(\theta)C_n^2(\psi) = \begin{pmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & c_\theta s_\phi \\ c_\phi c_\psi s_\theta + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - c_\psi s_\phi & c_\phi c_\theta \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

여기서, 기본 동차 변환 행렬은 다음과 같다.

$$C_3^b(\phi)=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\end{pmatrix},\ C_2^3(\theta)=\begin{pmatrix}\cos\theta & 0 & -\cos\theta\\ 0 & 1 & 0\\ \cos\theta & 0 & \cos\theta\end{pmatrix},\ C_n^2(\phi)=\begin{pmatrix}\cos\psi & \sin\psi & 0\\ -\sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix} \quad (2.3)$$

제 3 장 초기개략정렬

초기 자기정렬(initial self-alignment)이란 항법 모드 진입 전에 항체가 정지한 상태에서 가속도계와 자이로 센서의 측정치로부터 항법좌표계에 대한 동체좌표계의 초기자세를 구하는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서 사용된 3축 각속도 센서의 경우 저가형으로 구성되어 있어 지구 자전각속도를 구할 수가 없기에 지자기 센서와 가속도 센서를 이용한 초기 계략 정렬을 수행한다. 본 논문에서는 개략 정렬 시 중력가속도 정보를 포함하는 가속도계 출력을 이용하여 Roll, Pitch을 계산한 후, 계산된 Roll, Pitch 그리고 지구의 지자기 벡터 값을 포함하는 3축 지자기센서를 이용하여 Yaw를 구하게 된다.

3.1 Roll, Pitch 알고리즘

roll과 pitch를 구하기 위해서는 무인잠수정이 움직이지 않을 때, 중력가속도에 항법좌표계에서 동체 좌표계로 변환하는 DCM을 곱하면 센서의 가속도 출력 값과 같다는 가정이 필요하며, 식(3.1)와 같이 표시할 수 있다[14].

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -gs_\theta \\ gc_\theta s_\phi \\ gc_\phi c_\theta \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

a_x, a_y, a_z는 관성센서의 가속도 출력 값으로 동체 좌표계에서의 벡터 값이고 g는 중력 가속도를 나타낸다. roll(Φ)과 pitch(Θ)을 식(3.2)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{a_y}{a_z} = \frac{gc_\theta s_\phi}{gc_\phi c_\theta} = \frac{s_\phi}{c_\phi} = \tan(\phi)$$
$$\phi = \tan^{-1}(\frac{a_y}{a_z}) \qquad (3.2)$$

3.2 Yaw 알고리즘

식(3.1)에서 보는 바와 같이 중력가속도 g에 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 변환 행렬을 곱하면 yaw축 값이 사라짐을 알 수 있다. 따라서, 가속도 이외의 다른 센서의 이용이 필요하다. 일반적으로 자이로 센서로 지구의 자전속도를 검출하는 방법을 사용하지만, 본 논문에서 사용하는 센서의 경우 저가형으로 지구의 자전속도를 검출하지 못한다. 따라서, 지자기 센서를 이용하여 yaw축을 구하는 작업을 진행하였다.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_n^b \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

항법 좌표계의 지구의 지자기 벡터 x축을 m_1, y축을 m_2, z축을 m_3로하고 동체 좌표계의 지자기 센서 출력 x축을 m_x, y축을 m_y, z축을 m_z로 정의하면 항법 좌표계의 지자기 벡터에 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 변환 행렬을 곱하면 식(3.3)과 같이 가정 할 수 있다.

yaw값을 구하기 위한 계산 상의 편의를 위해, C_n^b를 yaw에 관한 행렬, roll, pitch에 관한 행렬로 나누면 식(3.4)과 같다.

$$C_1 = \begin{pmatrix} c_\theta & 0 & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta & c_\phi & s_\phi c_\theta \\ c_\phi s_\theta & -s_\phi & c_\phi c_\theta \end{pmatrix}, C_2 = \begin{pmatrix} c_\psi & s_\psi & 0 \\ -s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

$C_n^b = C_1 C_2$ 이므로, 식(3.5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_1 C_2 \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

양변에 C_1의 역 행렬을 식(3.5)의 양변에 곱하면 식(3.6)와 같이 풀 수 있다..

$$C_1^{-1} \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = C_2 \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_\theta & s_\phi s_\theta & c_\phi s_\theta \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ -s_\theta & s_\phi s_\theta & c_\phi c_\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\psi & s_\psi & 0 \\ -s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

$$\begin{pmatrix} c_\theta m_x + s_\phi s_\theta m_y + c_\phi s_\theta m_z \\ c_\phi m_y - s_\phi m_z \\ -s_\theta m_x + s_1 s_\theta m_y + c_1 c_\theta m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\psi m_1 + s_\psi m_2 \\ -s_\psi m_1 + c_\psi m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

$c_\theta m_x + s_\phi s_\theta m_y + c_\phi s_\theta m_z = c_\psi m_1 + s_\psi m_2$, $c_\phi m_y - s_\phi m_z = -s_\psi m_1 + c_\psi m_2$ 이므로 계산의 편의성을 위해 $c_\theta m_x + s_\phi s_\theta m_y + c_\phi s_\theta m_z = X$, $c_\phi m_y - s_\phi m_z = Y$ 로 치환하면 식(3.7)과 같다.

$$\begin{aligned} c_\psi m_1 + s_\psi m_2 &= X \\ -s_\psi m_1 + c_\psi m_2 &= Y \end{aligned} \tag{3.7}$$

식(3.7)을 행렬식으로 표현하면 식(3.8)과 같다.

$$\begin{pmatrix} m_1 & m_2 \\ m_2 & -m_1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c_\psi \\ s_\psi \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

cosψ와 sinψ를 구하기 위해 식(3.9)와 같이 푼다.

$$\begin{pmatrix} m_1 & m_2 \\ m_2 & -m_1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c_\psi \\ s_\psi \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} c_\psi \\ s_\psi \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} m_1 & m_2 \\ m_2 & -m_1 \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}=\frac{1}{-m_1^2-m_2^2}\begin{pmatrix} -m_1 & -m_2 \\ -m_2 & m_1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

식(3.10)과 같이 풀면 yaw값을 구할 수 있다.

$$t_3=\frac{s_\psi}{c_\psi}=\frac{-m_2X+m_1Y}{-m_1X-m_2Y}=\tan(\psi)$$
$$\psi=\tan^{-1}\left(\frac{-m_2X+m_1Y}{-m_1X-m_2Y}\right)$$
$$=\tan^{-1}\left(\frac{-m_2(c_\theta m_x+s_\phi s_\theta m_y+c_\phi s_\theta m_z)+m_1(c_\phi m_y-s_\phi m_z)}{-m_1(c_\theta m_x+s_\phi s_\theta m_y+c_\phi s_\theta m_z)-m_2(c_\phi m_y-s_\phi m_z)}\right) \tag{3.10}$$
$$=\tan^{-1}\left(\frac{-m_2c_\theta m_x-m_2s_\phi s_\theta m_y-m_2c_\phi s_\theta m_z+m_1c_\phi m_y-m_1s_\phi m_z}{-m_1c_\theta m_x-m_1s_\phi s_\theta m_y-m_1c_\phi s_\theta m_z-m_2c_\phi m_y+m_2s_\phi m_z}\right)$$

roll, pitch 초기 정렬을 실행을 하면 식(3.10)의 우변의 항은 상수 값이 되므로 yaw의 값을 구할 수 있게 된다.

제 4 장 수중복합 항법시스템

4.1 AHRS 연구

4.1.1 AHRS 소프트웨어 연구

자이로 센서를 이용하여 무인잠수정의 자세를 구할 때에는 적분과정이 포함되므로 센서의 바이어스 오차, 잡음 오차, 온도 오차로 인해 시간이 지남에 따라 무인잠수정 자세 값의 오차가 증가하게 된다. 또한, 자이로 센서만으로 절대적인 yaw각을 출력하기 위해서는 지구 자전각속도를 측정할 수 있는 센서이어야 한다. 지구는 약 15deg/hr로 회전하고 있기에 센서의 분해능이 15deg/hr도 안 되며, 1deg/hr급 센서가 있어야 절대적인 yaw각의 출력을 낼 수 있다. 하지만, 본 논문에서 사용하는 자이로 센서의 경우 70deg/s의 분해능을 가지는 저가의 센서로 지구의 자전각속도를 측정할 수 없어서 이로 인해 yaw각 오차를 측정이 불가능하다.

지자기 센서를 이용하여 무인잠수정의 자세를 구할 때에는 지구의 지자기 방향을 이용하기에 yaw만을 구할 수 있게 된다. 또한, 센서의 자기에 대해 민감도 때문에 주위의 자성을 띤 물체가 존재한다면 정확한 yaw각을 측정할 수가 없다.

무인잠수정의 정확한 자세를 찾기 위해서는 하나의 센서에만 의존하는 시스템이 아니라 자이로, 가속도, 지자기 센서에 의존하여 서로의 문제점을 보완해야만 정확한 자세 값을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 자이로 센서의 출력 값을 시간에 따른 적분을 통해 자세 값의 오차의 증가를 가속도 센서의 값에 의한 보정과 절대적인 yaw 값을 얻기

위한 지자기 센서를 보정을 위해 칼만 필터를 사용하였다.

어떠한 시스템에도 measurement noise와 process noise(모델의 부정확도)가 존재하며 이러한 noise를 제거하며 보다 정확한 시스템의 예측을 위해서는 칼만 필터가 필요하다.

칼만 필터는 최소좌승법(Least Square Method)을 사용해서 실시간으로 잡음(noise)을 가지는 운동 방정식(equations of motion)을 가진 시간에 따른 방향(time-dependent state vector)을 추적하는 효율적인 재귀 계산법(recursive computational solution)이다.

Fig. 4.1은 본 논문에 적용된 칼만 필터의 알고리즘을 나타낸다 [7][8][9][10][11][12][13][15]. x는 최적으로 하고자 하는 값으로 실제 구하려는 값이고 z는 센서를 통한 측정 값이다. A는 이전 단계의 상태 변수를 현단계의 상태 변수로 바꿔주는 시스템 매트릭스이고 Bu_k 는 시스템에 무관한 추가 입력 값으로 본 논문의 시스템에서는 무시하였다. Q는 예측노이즈 공분산 행렬이고 R은 측정노이즈 공분산 행렬이다. K는 칼만게인을 의미하고 P는 추정 오차 공분산 매트릭스(the estimation error corvariance matrix)를 나타내며 ^는 상태변수를 –는 이전상태를 말한다.

칼만 필터는 Fig. 4.1에서 보는 바와 같이 크게 time Update(예측단계)와 Measurement Update(교정단계)로 이루어진다. time Update에서는 이전 데이터를 근거로 예측이 이루어지며 Measurement Update에서는 새로운 측정값으로 교정이 이루어진다. 자세히 살펴 보면, Time Update 구간에서는 x에 A를 곱하고 u(예측오차잡음)에 B를 곱하여 순수한 상태 예측 값 x를 구한다. 다음으로 에러 보정을 위해 수집된 자료를 기반으로 구해진 Q(예측노이즈 공분산 행렬)를 더해 프로세스노이즈를 예측하게 된다. Measurement Update(교정단계)에서는 프로세서노이즈와 측정노이즈를 이용하여 K(칼만게인)을 구하게 되고, 다음으로는 측정 값 z를 이용해 측정잡음을 추가하

여 현재상태의 x를 구하게 된다. 마지막으로 현재 상태의 예측오류인 P(추정 오차 공분산 매트릭스)을 구한다.

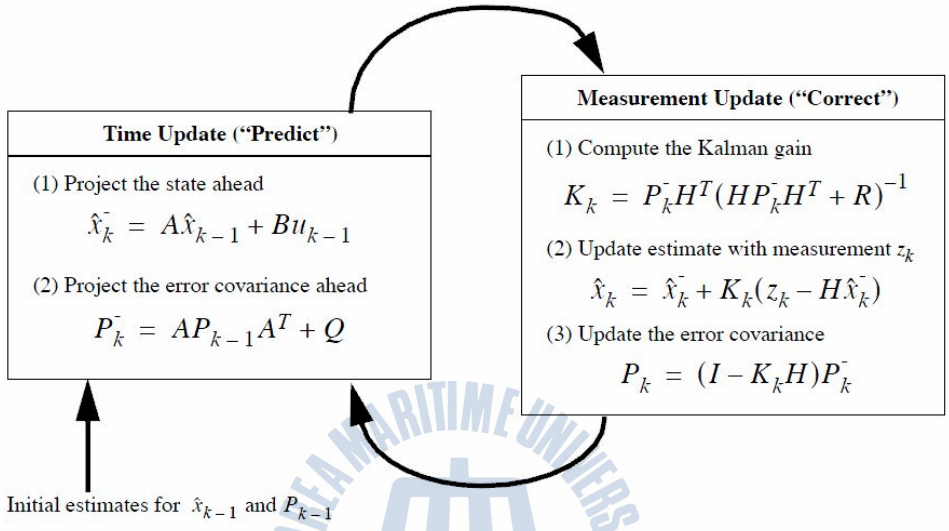

Fig. 4.1 Algorithm of Kalman filter

AHRS단계에서는 무인잠수정의 자세를 구하기 위해 쿼터니안(quaternion)과 각속도를 예측하였다. 오일러 각이라고 알려진 회전 행렬로 물체를 회전하려고 할 때, 한 축을 90°로 회전하면 나머지 2축이 겹치는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위해 쿼터니안을 예측하였다, 그리고 roll, pitch, yaw의 정확한 값을 구하기 위해 각속도를 칼만 필터를 통해 예측하고 그 값을 이용해 roll, pitch, yaw를 구하였다.

본 논문의 칼만 필터알고리즘은 50Hz로 동작하고 있으며 센서 값은 500Hz로 샘플링하여 1st order Low-Pass Filter를 거친 데이터를 사용하여 측정 값(z)의 정확도를 향상시켜 더욱 정확한 예측 값(x)를 구하도록 하였다.

지자기 센서의 경우, 주위의 자성을 띤 물체가 존재하게 되면 많은 오차를 가지게 된

다. 이러한 문제를 해결하기 위해 칼만 필터 알고리즘에서 R(측정노이즈 공분산 행렬)의 지자기 센서 노이즈 값을 크게 하여 지자기 센서의 의존도를 낮추는 방식으로 문제를 해결하였다.

AHRS 소프트웨어 알고리즘은 Fig. 4.2와 같다. AHRS은 자이로 센서의 출력인 각속도의 적분을 이용해 roll, pitch, yaw를 구하게 된다. 하지만 자이로 센서의 출력에는 바이어스 오차, 스케일 오차, 비정렬 오차, 센서 노이즈 등이 존재한다. roll, pitch, yaw를 구하는 적분과정에서 이러한 오차들이 포함되어 정확한 동체의 roll, pitch, yaw를 구할 수 없게 된다. 따라서, 본 논문의 AHRS에서는 지자기 센서의 출력과 가속도 센서의 출력을 이용해 이를 보정하여 무인잠수정의 roll, pitch, yaw를 구하였다.

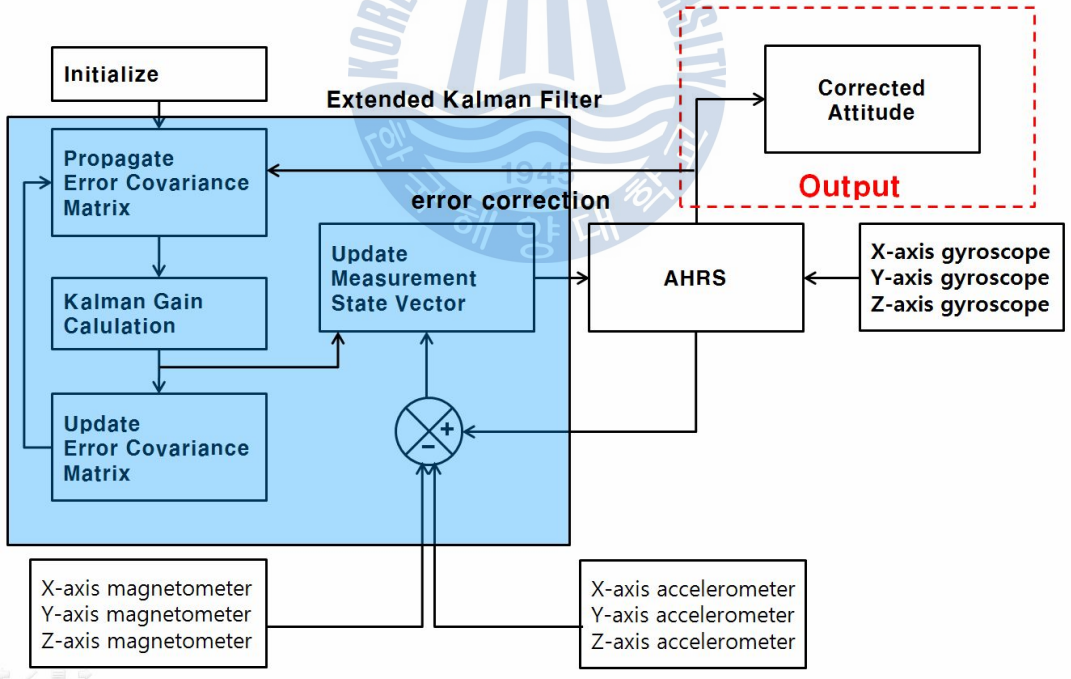

Fig. 4.2 AHRS's algorithm

4.1.2 AHRS 하드웨어 연구

본 논문의 AHRS에서는 Fig. 4.3과 같이 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 출력을 하는 IMU센서와 DSP28335, PC를 이용하여 구성하였다. DSP28335에서는 확장 칼만 필터를 이용한 AHRS 알고리즘의 수행이 이루어 지며, PC에서는 그 결과를 디스플레이 하게 된다.

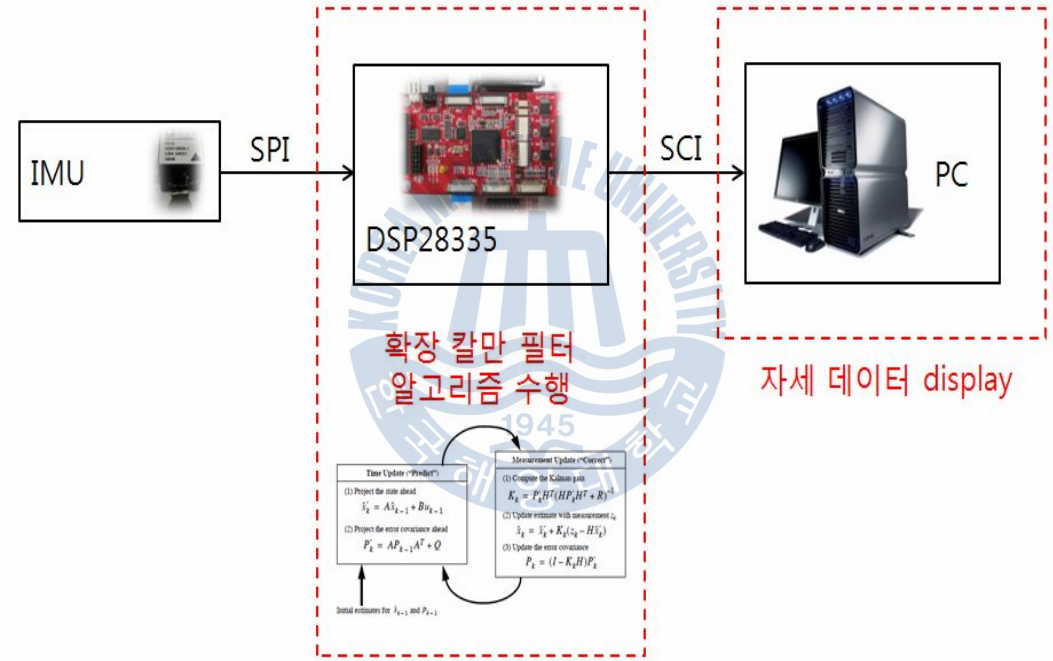

Fig. 4.3 Structure of AHRS's hardware

Table 4.1은 DPS28335의 사양이다. DSP28335의 경우 32bit 정수형 프로세서 이지만, FPU모듈을 탑재하고 있어 실수형 연산에 있어서 강점을 보인다. 150MHz의 연산능력과 다양한 이벤트 모듈 기능을 가지고 있어 항법장치 연구에 있어 적합한 프로세서이다.

Table 4.1 DSP28335 Specifications

CPU	32bit 정수형 C28X Core + FPU
연산능력	150MHz
메모리	RAM : 68kByte / Flash : 512kByte
외부 인터페이스	16bit / 32bit 외부 메모리 인터페이스, 최대 4MByte
타이머	32bit CpuTimer 3개 / 16bit 범용 6개 / 왓치독 1개
PWM	18채널
CAP/QEP	6개 / 2개
ADC	12bit / 16채널
GPIO	88개
통신	SCI 3개 / SPI 1개 / eCAN 2개 / McBSP 2개
부트모드	Flash, SPI, SCI, eCAN, 내부 RAM, OTP, Parallel등 총 16가지
전압	Core : 1.9V, I/O : 3.3V
온도범위	-40도 ~ 85도

Table 4.2는 IMU센서 사양이다. 3축 각속도의 경우, 0.9 °/sec의 오차를 가진다. 따라서, 각속도 센서 만을 이용해 무인잠수정의 자세를 구하게 된다면, 1시간 후에는 54° 각도 오차를 가지게 됨을 알 수 있다.

이러한 각속도의 오차를 보정하기 위하여, 가속도 데이터와 지자기 데이터와의 융합 알고리즘이 필요하다.

Table 4.2 IMU sensor (ADIS16405) Specifications

IMU	Output	3축 각속도	
		3축 가속도	
		3축 지자기	
	Specification	3축 각속도 output noise	0.9 °/sec
		3축 각속도 output noise	9mg
		3축 각속도 output noise	1.25 mgauss

4.2 INS 연구

4.2.1 INS 소프트웨어 연구

INS는 IMU의 출력 만으로 무인잠수정의 현재의 자세와 위치 값을 찾는 시스템이다. 가속도에만 의존하여 무인잠수정의 위치를 찾아야 하기에 IMU의 가속도 센서에 포함된 중력가속도를 보정하는 것이 핵심적인 부분이다[15].

4.1.1의 INS 소프트웨어 연구에서는 중력가속도를 보정하는 알고리즘과 연산속도개선을 위한 코딩 기법, 가속도를 적분하여 속도와 위치를 구하는 방법, INS의 한계점에 대하여 살펴보고 GPS의 필요성을 설명하였다.

$$\begin{aligned} a^b &= f^b - C_n^b g \\ v_n &= \int C_b^n a^b dt \\ x_n &= \int v_n dt \end{aligned} \tag{4.1}$$

센서 출력에는 중력가속도 값이 포함되어 있으므로 중력가속도를 제거하여 실제 무인잠수정의 가속도를 찾아야 한다. 식 (3.1)은 본 논문에 사용되는 중력가속도 보상하여 속도와 위치를 구한 기본 알고리즘 기본 식이다. C_n^b 는 항법 좌표계에서 동체 좌표계로의 회전변환행렬, C_b^n 은 동체 좌표계에서 항법좌표계로의 회전변환행렬이고 a^b 는

동체 좌표계에서의 가속도 값, f^b 는 동체 좌표계에서의 센서에서 측정된 값, g는 항법 좌표계에서의 중력가속도 값, v^n 은 항법 좌표계에서의 속도 값, x^n 은 항법 좌표계에서의 위치 값이다.

f^b 는 동체 좌표계에서의 벡터이고, g는 항법 좌표계에서의 벡터이다. f^b 의 포함된 중력가속도를 제거하기 위해서는 항법 좌표계의 g 벡터를 동체 좌표계의 g벡터로 회전변환을 해야 한다. C_n^b 회전변환행렬을 중력가속도 g에 곱하여 g의 벡터를 동체 좌표계로 변환한 후, 센서에서 측정된 f^b 에 값을 빼주게 되면 실제 무인잠수정의 가속도 a^b 를 알 수 있게 된다. 항법 좌표계에서의 무인잠수정의 속도를 알기 위해서는 동체 좌표계의 a^b 를 C_n^b 에 곱하여 항법 좌표계로 변환 한 후, 이를 적분하면 속도를 구할 수 있게 된다. 가속도 적분을 통해 구한 v^n 값을 다시 적분을 하게 되면 위치 x^n 을 구할 수 있게 된다.

본 논문에서는 가속도와 속도를 적분을 위해서 식 (3.2)의 Trapezoidal 적분기법을 사용 하였다. 여기서 b-a는 이전 스텝과 현 스텝의 시간 간격을 의미하며 본 논문에서는 20ms이다. 이전 스텝의 가속도 값에 현 스텝의 가속도 값을 더하고 2로 나누어 주면 이산시간에서의 간단한 적분을 할 수 있다.

$$\mathrm{T(f)} = \mathrm{(b-a)}\frac{f(a)+f(b)}{2} \tag{4.2}$$

INS 단계의 칼만 필터에서는 쿼터니안 4개의 원소 값과 x, y, z축의 각속도, 속도, 위치 값을 예측하였다. 측정 값은 x, y, z축의 각속도, 가속도, 지자기 값을 측정 받았다. 13개의 값을 예측하였고 9개의 값을 측정하였다. AHRS단계에서 보다 많은 값을 예측하였기에 시스템의 연산 속도의 개선이 필요로 하였고 이를 위해 알고리즘에 사용된 삼각함수를 식 (3.3)과 같은 멱급수로 수정하였다.

$$\cos\frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{(0.5\alpha)^2}{2!} + \frac{(0.5\alpha)^4}{4!} - \bullet\bullet\bullet$$
$$\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{\alpha} = 0.5(1 - \frac{(0.5\alpha)^2}{3!} + \frac{(0.5\alpha)^4}{5!} - \bullet\bullet\bullet) \qquad (4.3)$$

4.2.2 INS 하드웨어 연구

본 논문의 INS에서는 Fig. 4.4와 같이 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 출력을 하는 IMU센서와 DSP28335, PC를 이용하여 구성하였다. DSP28335에서는 확장 칼만 필터를 이용한 INS 알고리즘의 수행이 이루어 지며, PC에서는 동체의 자세, 속도, 위치 데이터를 디스플레이 하게 된다.

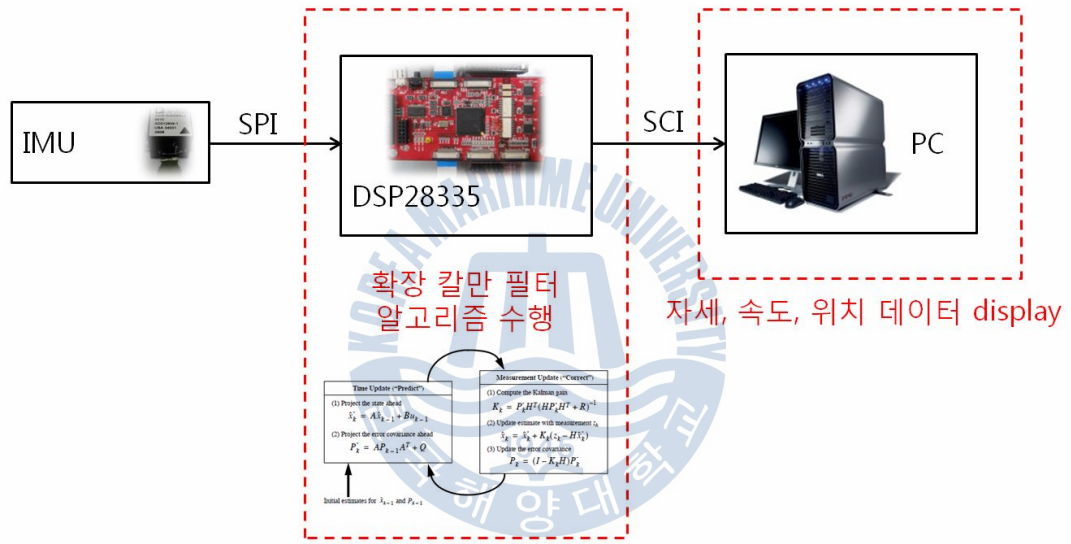

Fig. 4.4 Structure of INS's hardware

INS에서의 사용한 IMU센서의 경우, AHRS와 같은 모델로 9mg의 output noise를 가진다. 따라서, 동체의 속도와 위치를 구하기 위한 적분과정에서 이러한 노이즈를 포함하게 되어 IMU만을 이용한 속도와 위치 추정하게 되면 위치와 속도 값이 발산하게 됨을 알 수 있다.

INS에서 항법 알고리즘을 수행하기 위한 프로세서는 AHRS에서와 같은 DSP28335를 사용하였고, 구체적인 사양은 Table 4.1이다. IMU sensor 또한, AHRS에서와 같은 센서를 사용하였다. 구체적인 사양 Table 4.2이다.

4.3 GPS-INS 연구

4.3.1 GPS-INS 소프트웨어 연구

INS 연구단계에서 보조항법장치와의 필요성을 살펴보았다. GPS-INS 연구단계에서는 INS문제점을 보완하였다. GPS-INS는 INS와 같은 쿼터니안 4개의 원소 값과 x, y, z축의 각속도, 속도, 위치 값을 예측하였다. 측정 값 IMU센서의 x, y, z축의 각속도, 가속도, 지자기 값과 GPS를 통해 x, y, z의 속도, 위치 값을 측정하였다. 13개의 값을 예측하였고 15개의 값을 측정하였다. 본 논문에서 사용된 GPS는 500ms 신호 업데이트 시간을 가지고 있다. 따라서, 칼만 필터의 속도, 위치 측정 값은 500ms마다 업데이트되고, GPS의 업데이트가 없을 때에는 예측한 속도와 위치 값에 의존도를 높이는 방법으로 관성항법장치(INS)와 위성항법장치(GPS)를 융합하였다. GPS와 복합된 관성항법시스템의 구성은 Fig. 4.5과 같으며, 관성센서인 IMU에 보조항법 센서로써, GPS의 외부계측신호를 이용하여 복합항법시스템을 구성하였다. GPS-INS는 IMU센서의 자이로, 가속도, 지자기 센서의 바이어스 오차, 스케일 오차, 비정렬 오차 등에 의하여 위치 추정오차가 발생하는 것을 GPS를 이용하여 시간에 따라 누적되는 INS 시스템의 항법 오차를 보정하게 하였다.

필터의 알고리즘은 항법 정보의 추정치에 포함된 오차를 추정하고 측정치를 이용하여 보정하는 방식의 간접되먹임법을 이용하였다. 항법오차의 추정은 확장 칼만 필터를 이용하여 이루어지며, 최종 항법해가 얻어진다. GPS-INS는 GPS에서의 입력 신호가 주어지지 않을 경우에는 확장 칼만 필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 측정 신호가 있는 경우에 오차를 update하고 상태변수를 보정하게 된다.

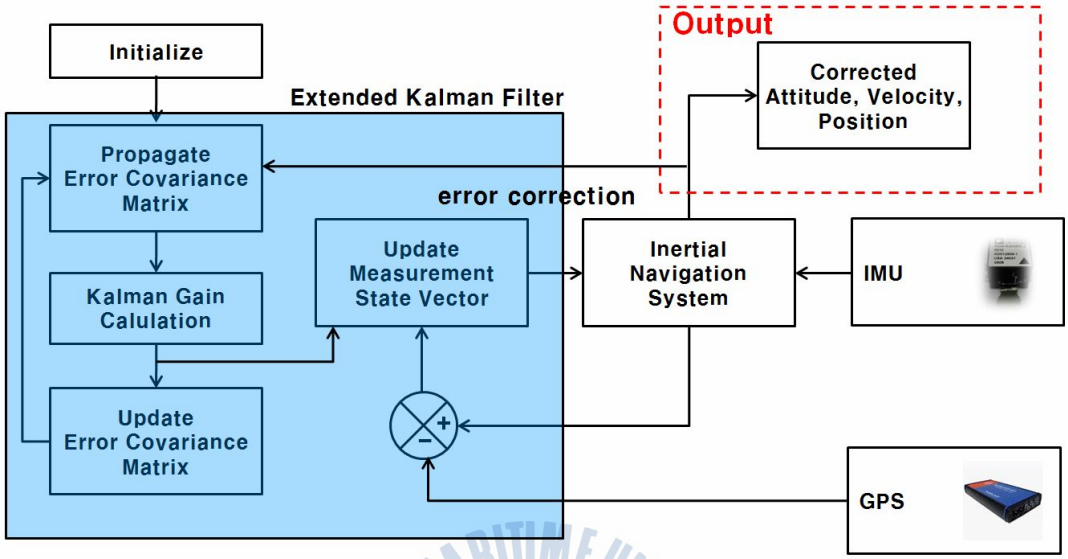

Fig. 4.5 Software algorithm of GPS-INS

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

4.3.2 GPS-INS 하드웨어 연구

본 논문의 GPS-INS에서는 Fig. 4.6과 같이 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 출력을 하는 IMU센서와 DSP28335, GPS, PC를 이용하여 구성하였다. DSP28335에서는 확장 칼만 필터를 이용한 INS 알고리즘의 수행이 이루어 지며, PC에서는 동체의 자세, 속도, 위치 데이터를 디스플레이 하게 된다.

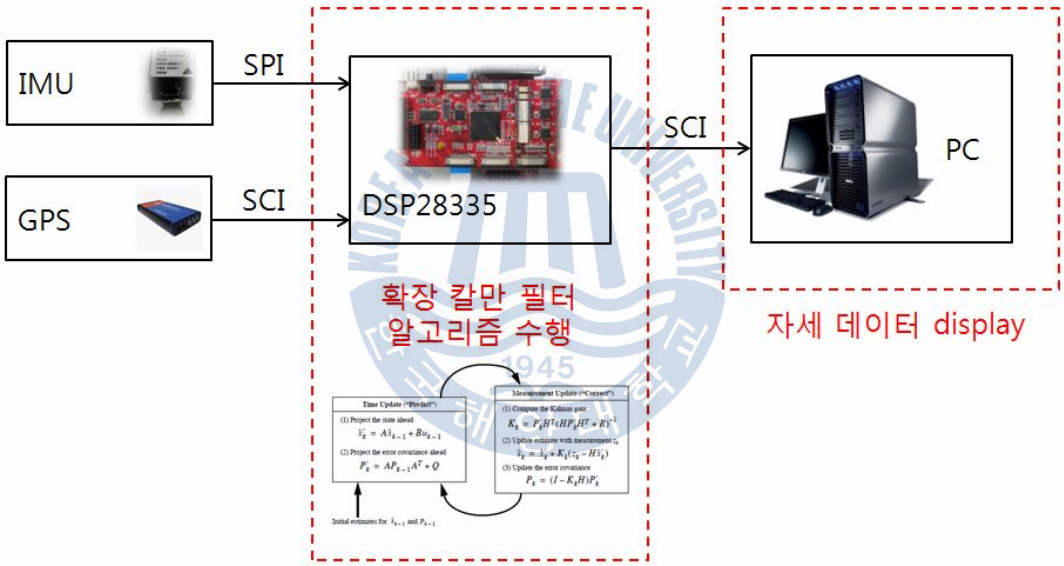

Fig. 4.6 Structure of GPS-INS's hardware

GPS-INS에서의 사용한 IMU센서의 경우, AHRS와 같은 모델로 9mg의 output noise를 가진다. 따라서, 동체의 속도와 위치를 구하기 위한 적분과정에서 이러한 노이즈를 포함하게 되어 IMU만을 이용한 속도와 위치 추정하게 되면 위치와 속도 값이 발산하게 된다. 이러한 문제를 잡기 위해 일정 시간 GPS 신호를 업데이트 하였다. GPS의 구

체적 사양은 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 GPS Specifications

GPS	Output	latitude	
		longitude	
		altitude	
	Specification	Static accuracy(latitude)	< 0.7m
		Static accuracy(longitude)	< 0.7m
		Static accuracy(altitude)	< 1.2m

GPS-INS에서 항법 알고리즘을 수행하기 위한 프로세서는 AHRS에서와 같은 DSP28335와 IMU를 사용하였고, 구체적인 사양은 Table 4.1, Table 4.2이다.

4.4 GPS and sonar - INS 연구

4.4.1 GPS and sonar -INS 소프트웨어 연구

수상에서는 보조항법장치 GPS를 이용하여 무인잠수정의 위치와 속도를 업데이트 시켜줄 수 있지만, 수중에서는 GPS신호를 받을 수가 없어 무인잠수정의 위치를 파악 할 수가 없다. 따라서 수중에서의 무인잠수정의 위치 정보를 파악하기 위해 USBL(Ultra short baseline)의 사용이 필요하다.

GPS and sonar – INS 연구 단계에서는 GPS연구 단계에서와 같은 쿼터니안 4개의 원소 값과 x, y, z축의 각속도, 속도, 위치 값을 예측하였다. 측정 값 IMU센서의 x, y, z축의 각속도, 가속도, 지자기 값과 USBL를 통해 x, y, z의 속도, 위치 값을 측정하였다. 13개의 값을 예측하였고 15개의 값을 측정하였다. 칼만 필터의 예측 x, y, z축의 위치 값에 최종적으로 GPS신호를 업데이트 하여 무인잠수정의 위치를 찾는 알고리즘을 완성하였다.

GPS와 USBL이 복합된 관성항법시스템의 구성은 Fig. 4.7과 같으며, 관성센서인 IMU에 보조항법 센서로써, GPS와 USBL의 외부 계측신호를 이용하여 복합항법시스템을 구성하였다. GPS and sonar – INS 는 IMU센서의 자이로, 가속도, 지자기 센서의 바이어스 오차, 스케일 오차, 비정렬 오차 등에 의하여 위치 추정오차가 발생하는 것을 GPS와 USBL을 이용하여 시간에 따라 누적되는 INS 시스템의 항법 오차를 보정하게 하였다.

필터의 알고리즘은 항법 정보의 추정치에 포함된 오차를 추정하고 측정치를 이용하여 보정하는 방식의 간접되먹임법을 이용하였다. 항법오차의 추정은 확장 칼만 필터를

이용하여 이루어지며, 최종 항법해가 얻어진다. GPS and sonar – INS 는 GPS와 USBL 에서의 입력 신호가 주어지지 않을 경우에는 확장 칼만 필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 측정 신호가 있는 경우에 오차를 update하고 상태변수를 보정하게 된다.

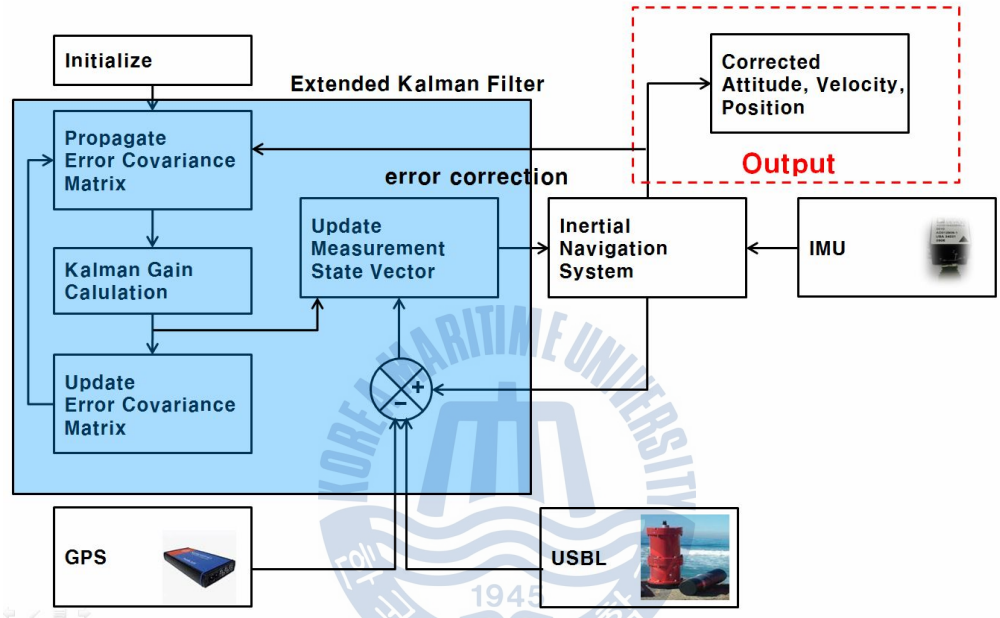

Fig. 4.7 Software algorithm of GPS and sonar – INS

4.4.2 GPS and sonar -INS 하드웨어 연구

본 논문의 GPS and sonar - INS에서는 Fig. 4.8과 같이 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 출력을 하는 IMU센서와 DSP28335, GPS, USBL, PC를 이용하여 구성하였다. DSP28335에서는 확장 칼만 필터를 이용한 GPS and sonar – INS 알고리즘의 수행이 이루어 지며, PC에서는 동체의 자세, 속도, 위치 데이터를 디스플레이 하게 된다.

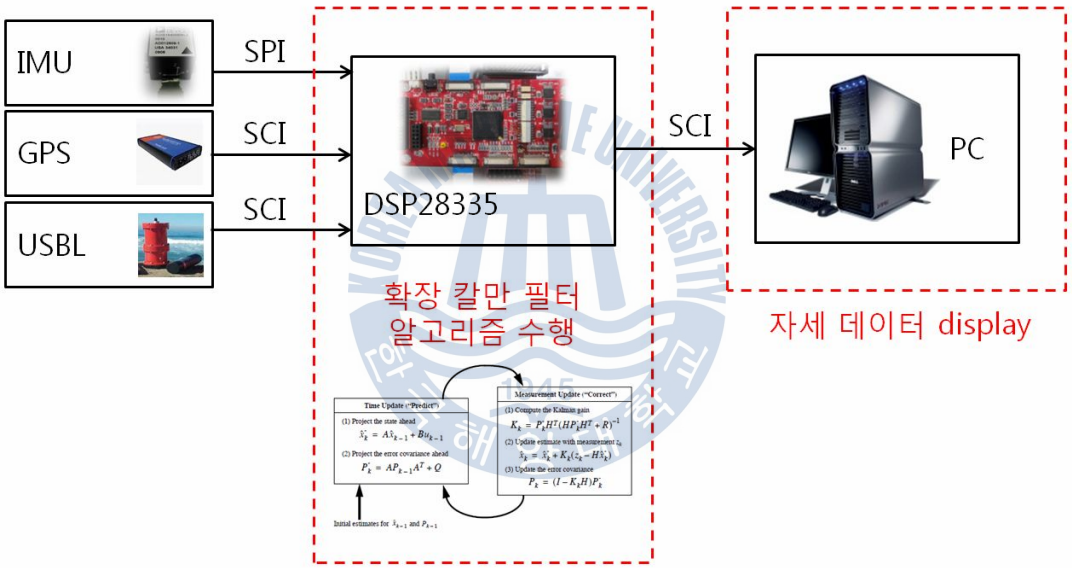

Fig. 4.8 Structure of GPS and sonar - INS's hardware

GPS and sonar - INS에서의 사용한 IMU와 GPS는 GPS - INS와 같은 모델을 사용하였다. USBL의 사양은 Table 4.4와 같다.

Table 4.4 USBL Specifications

USBL	Output	X축 위치	
		Y축 위치	
		Z축 위치	
	Specification	X축 accuracy	< 0.2m
		Y축 accuracy	< 0.2m
		Z축 accuracy	< 0.2m

제 5 장 복합항법시스템 성능시험

5.1 Matlab을 이용한 시뮬레이션

5.1.1 AHRS 결과

Fig. 5.1은 AHRS를 시뮬레이션을 하기 위한 simulink 프로그램이다. Fig. 5.2는 AHRS 시뮬레이션 프로그램 중, sensor 파트 모델이다.

AHRS의 시뮬레이션 프로그램은 입력으로 x, y, z축의 10N과 x축으로 0.69Nm, y축으로 0.66Nm, z축으로 0.36Nm의 크기를 가지는 sine파형을 가지는 힘과 모멘트를 입력으로 사용하고 주파수는 0.02rad/s이다. 센서 모델에서는 각속도 출력에는 분산이 2.5E-4이며, 평균이 0인 white noise를 더하였고 가속도 출력에는 분산이 8.0E1 white noise를 지자기 출력에는 1.56인 white noise를 더하였다.

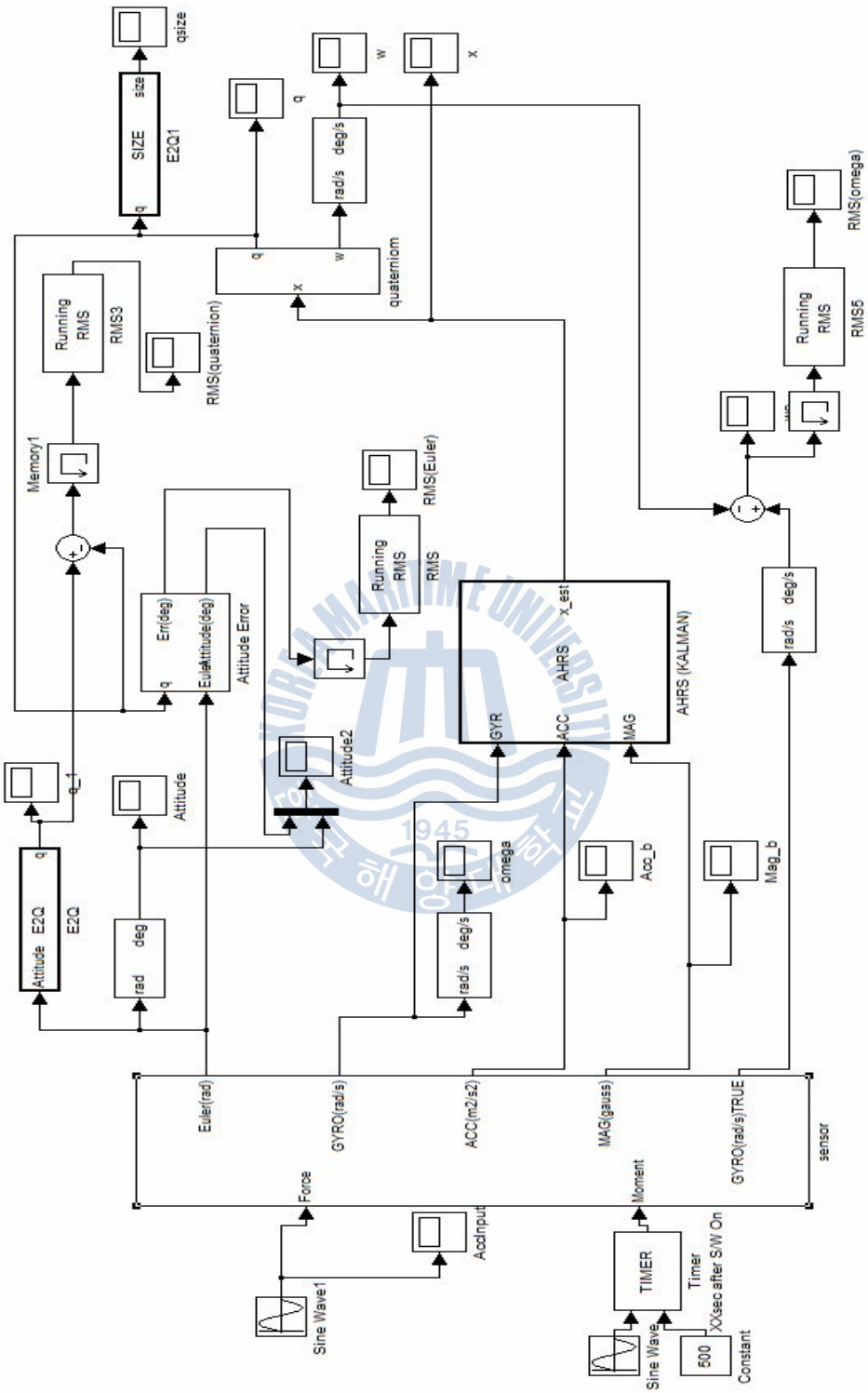

Fig. 5.1 AHRS's simulation using Matlab simulink

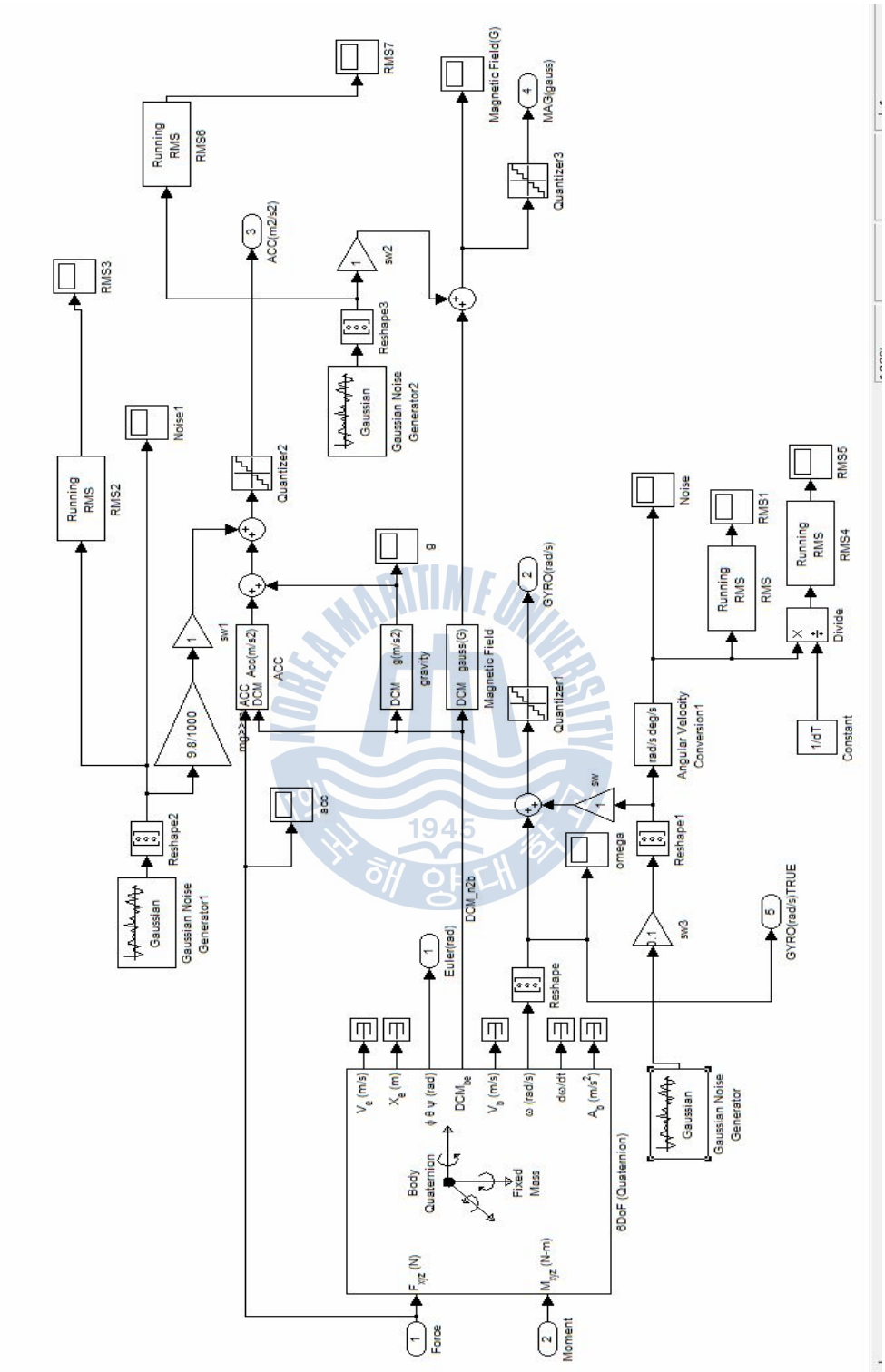

Fig. 5.2 Simulation of AHRS's sensor model using Matlab simulink

확장 칼만 필터를 이용하여 4개의 쿼터니언 원소와 각속도를 예측하였다. 쿼터니언은 결과 값을 확인하기 위해, Euler angle로 변환하여 그래프를 그렸다. Fig.5.3은 쿼터니언을 Euler angle로 변환한 그래프이다. Fig.5.4는 X, Y, Z축 각속도 시뮬레이션 결과이다.

Fig. 5.3의 첫 번째 그래프는 확장 칼만 필터를 사용하여 추정한 roll, pitch, yaw의 값이고 두 번째 그래프는 실제 roll, pitch, yaw의 그래프이다. 세 번째 그래프는 실제 roll, pitch, yaw 값과 확장 칼만 필터를 사용하여 추정한 roll, pitch, yaw 값을 같은 그래프에 표시하였다. 세 번째 그래프에서 추정한 값과 실제 값과 유사함을 알 수 있어 확장 white noise가 포함된 3축 각속도, 가속도, 지자기 값을 이용하여 확장 칼만 필터 알고리즘으로 구한 값과 실제 값과 유사한 출력을 내는 것을 통해 확장 칼만 필터 알고리즘이 정확하게 동작함을 알 수 있다.

Fig. 5.4의 첫 번째 그래프는 white noise가 포함된 각속도 값을 확장 칼만 필터를 사용하여 추정한 X, Y, Z축 각속도 결과 값이고 두 번째 그래프는 실제 X, Y, Z축 각속도 결과 그래프이다. 세 번째 그래프는 실제 X, Y, Z축 각속도 값과 확장 칼만 필터를 사용하여 추정한 X, Y, Z축 각속도 결과 값을 동시에 표시하였다. 세 번째 그래프에서 추정한 값과 실제 값과 유사함을 알 수 있어 확장 칼만 필터 알고리즘이 정확하게 동작함을 알 수 있다.

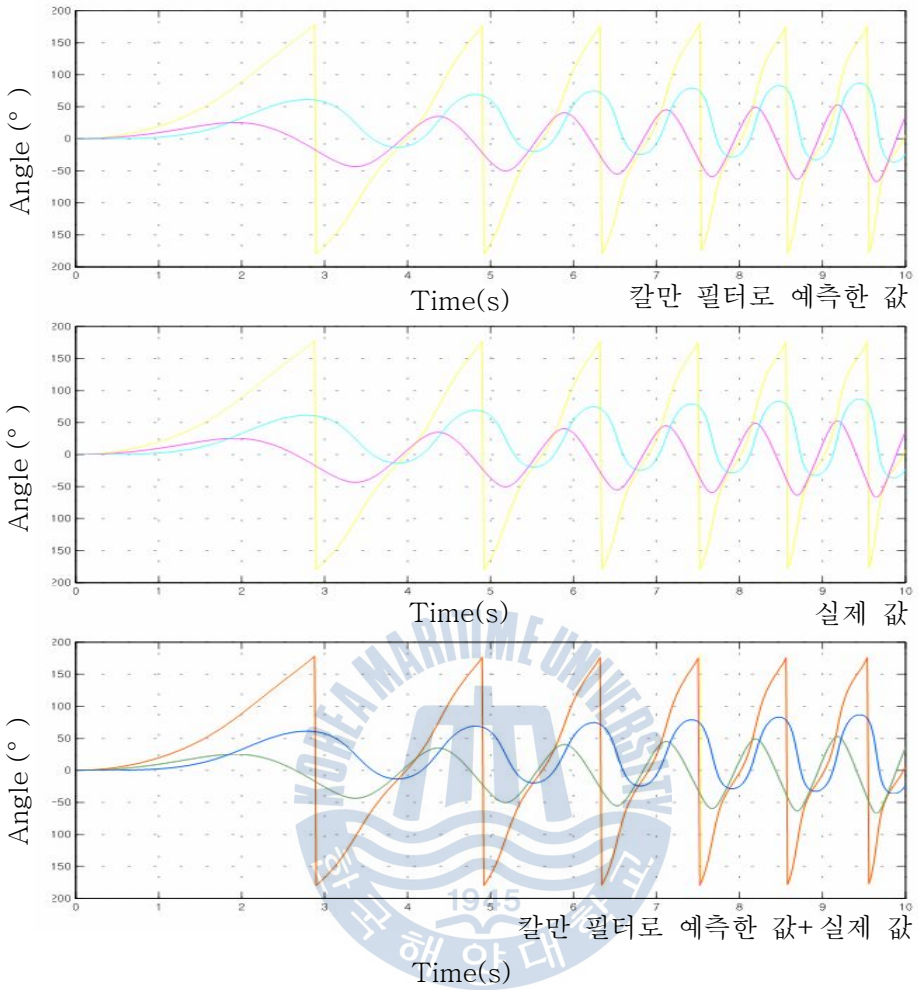

Fig. 5.3 The result of AHRS's simulation for roll, pitch, yaw

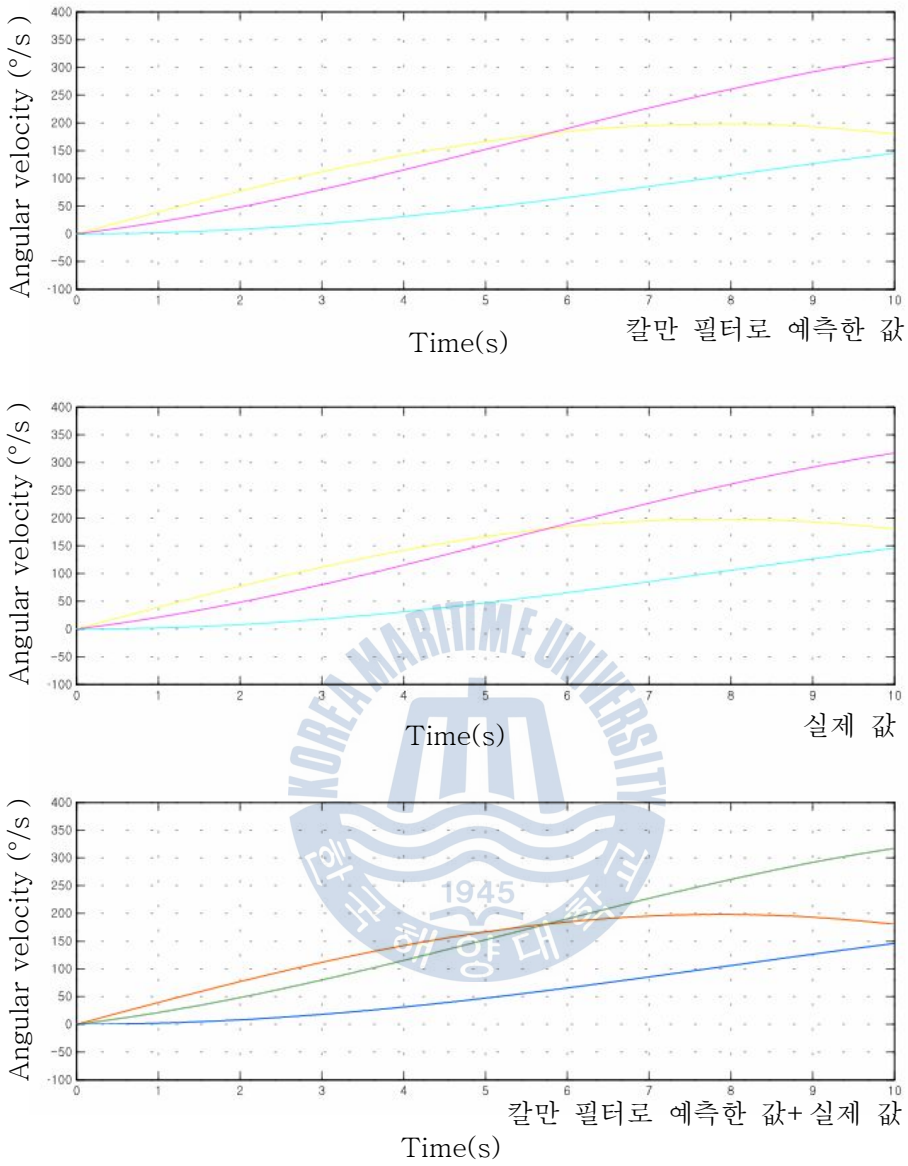

Fig. 5.4 The result of AHRS's simulation for angular velocity

5.1.2 INS 결과

Fig. 5.5는 INS를 시뮬레이션을 하기 위한 simulink 프로그램이다. sensor 파트 모델은 Fig.5.2와 동일하고 입력 또한, AHRS와 같다.

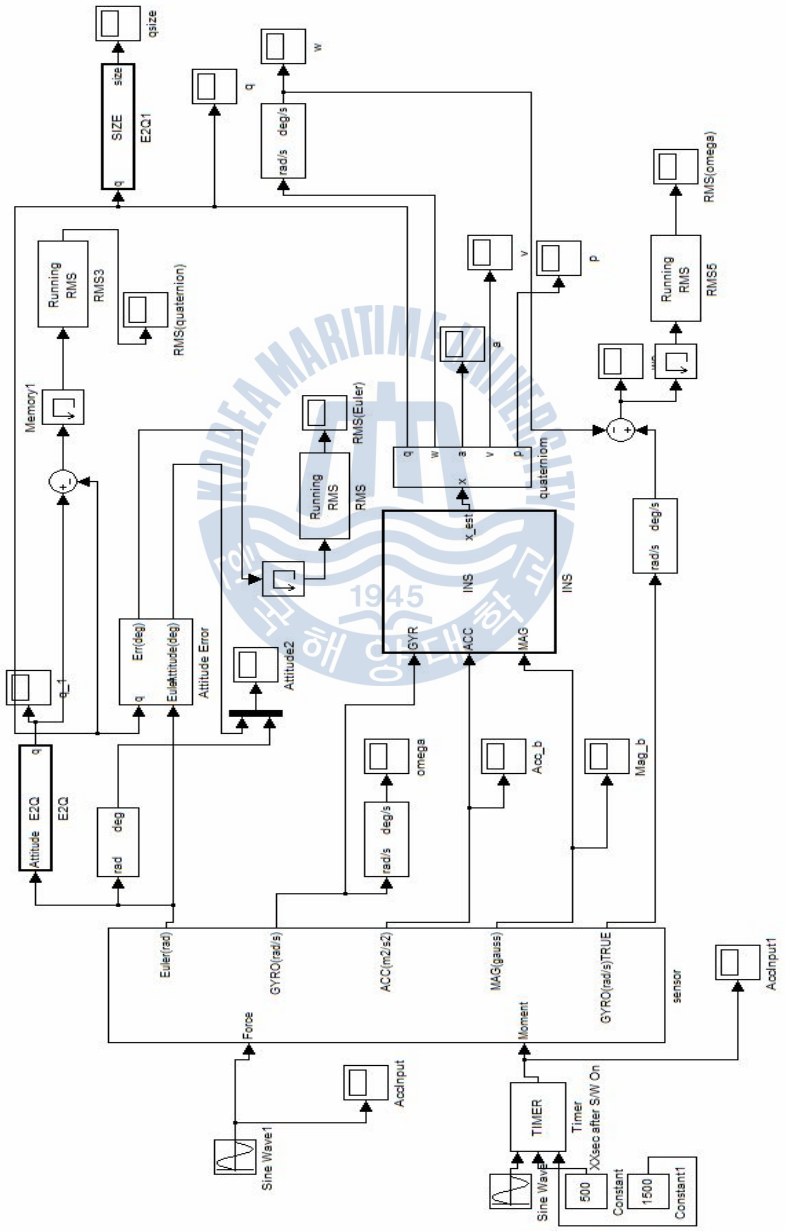

Fig. 5.5 INS's simulation using Matlab simulink

확장 칼만 필터를 이용하여 4개의 쿼터니언 원소와 각속도, 가속도, 속도, 위치를 예측하였다. 쿼터니언과 각속도의 결과는 AHRS와 동일하게 나왔으며 가속도, 속도, 위치 결과는 Fig. 5.6, Fig. 5.7, Fig. 5.8과 같다.

Fig. 5.6은 INS의 속도 결과 그래프이다. 첫 번째 그래프는 white noise가 포함된 3축가속도 값을 확장 칼만 필터를 이용하여 추정한 속도 값이고, 두 번째 그래프는 실제 속도 그래프이다. 세 번째 그래프는 추정한 속도 값과 실제 속도 값을 표시한 그래프이다. 3번째 그래프의 결과로 실제 값과 유사한 속도 값을 예측함을 알 수 있다.

Fig. 5.8은 INS의 위치 결과 그래프이다. 첫 번째 그래프는 white noise가 포함된 3축가속도 값을 확장 칼만 필터를 이용하여 구한 위치 값이고, 두 번째 그래프는 실제 위치 그래프이다. 세 번째 그래프는 추정한 위치 값과 실제 위치 값을 표시한 그래프이다. 3번째 그래프의 결과로 실제 값과 유사한 위치 값을 예측함을 알 수 있다.

(m/s^2)

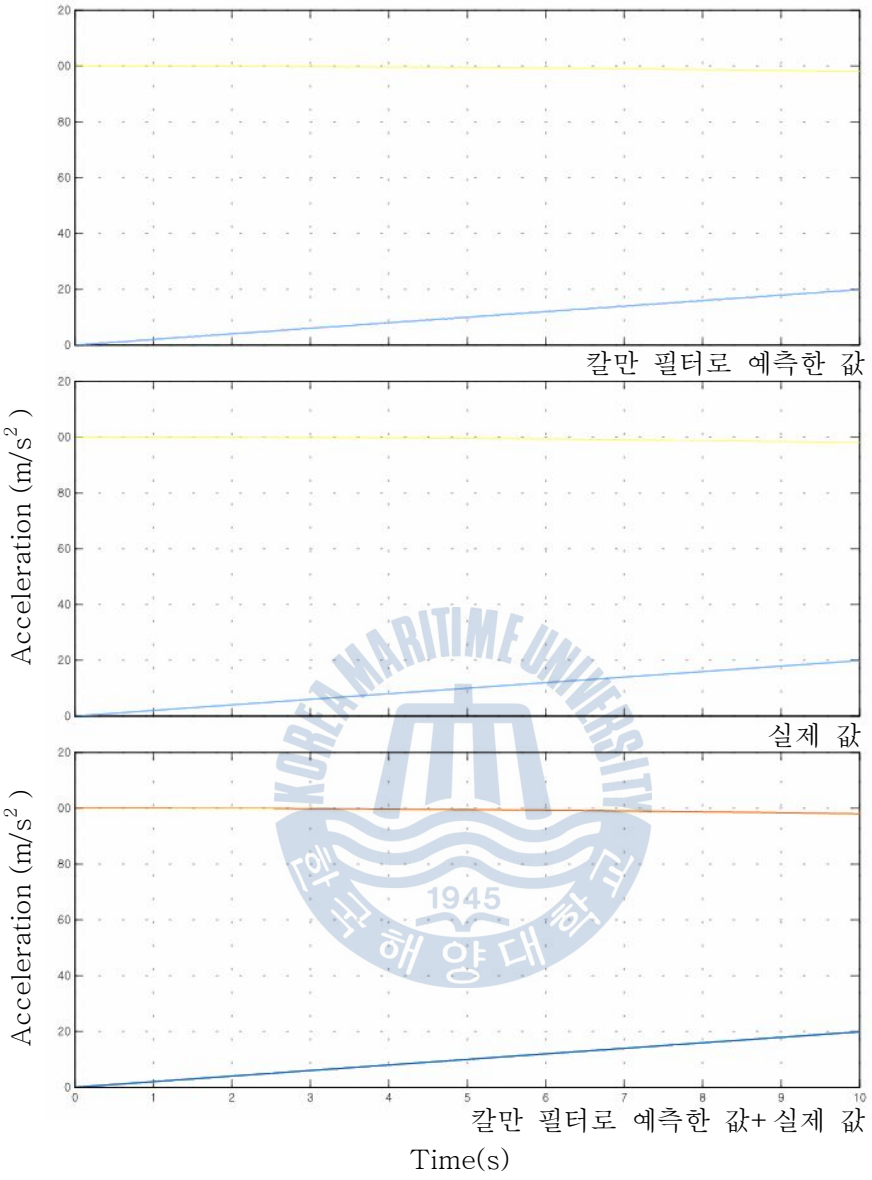

Fig. 5.6 The result of INS's simulation for acceleration

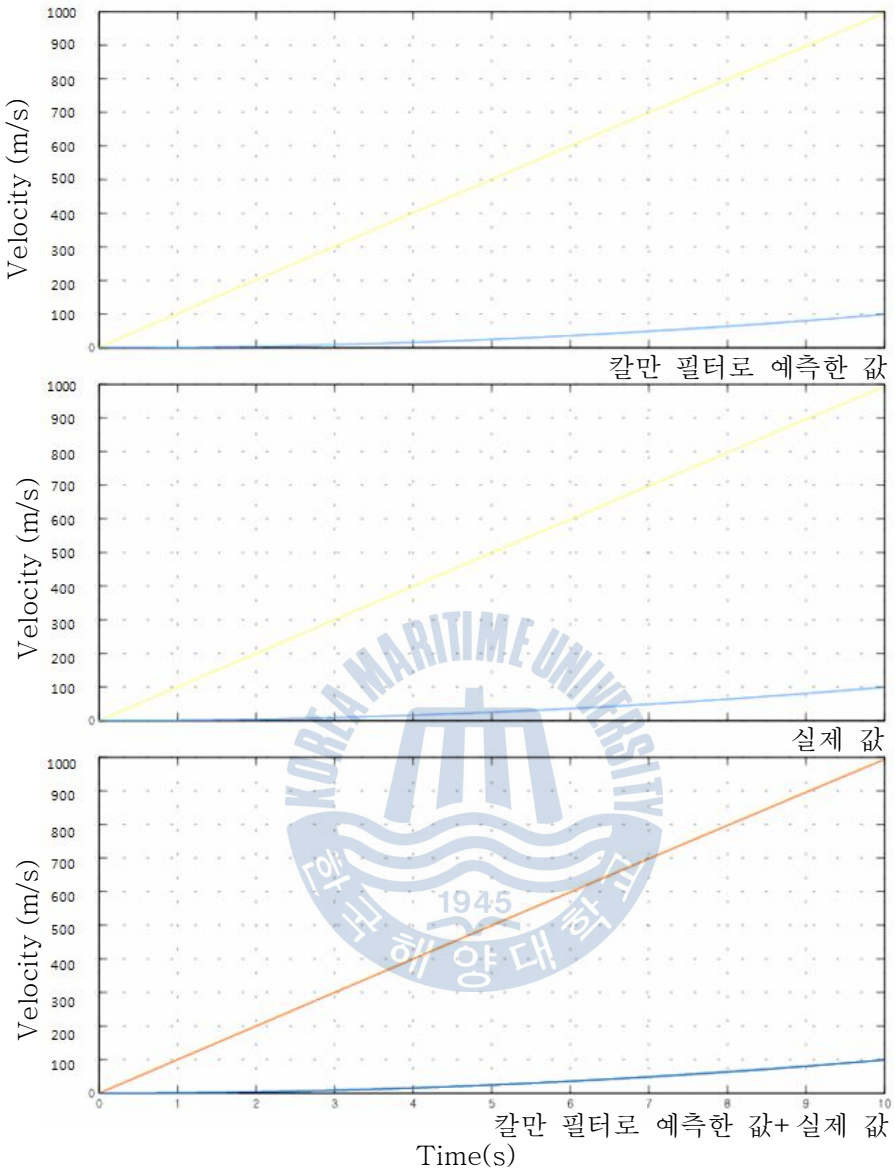

Fig. 5.7 The result of INS's simulation for velocity

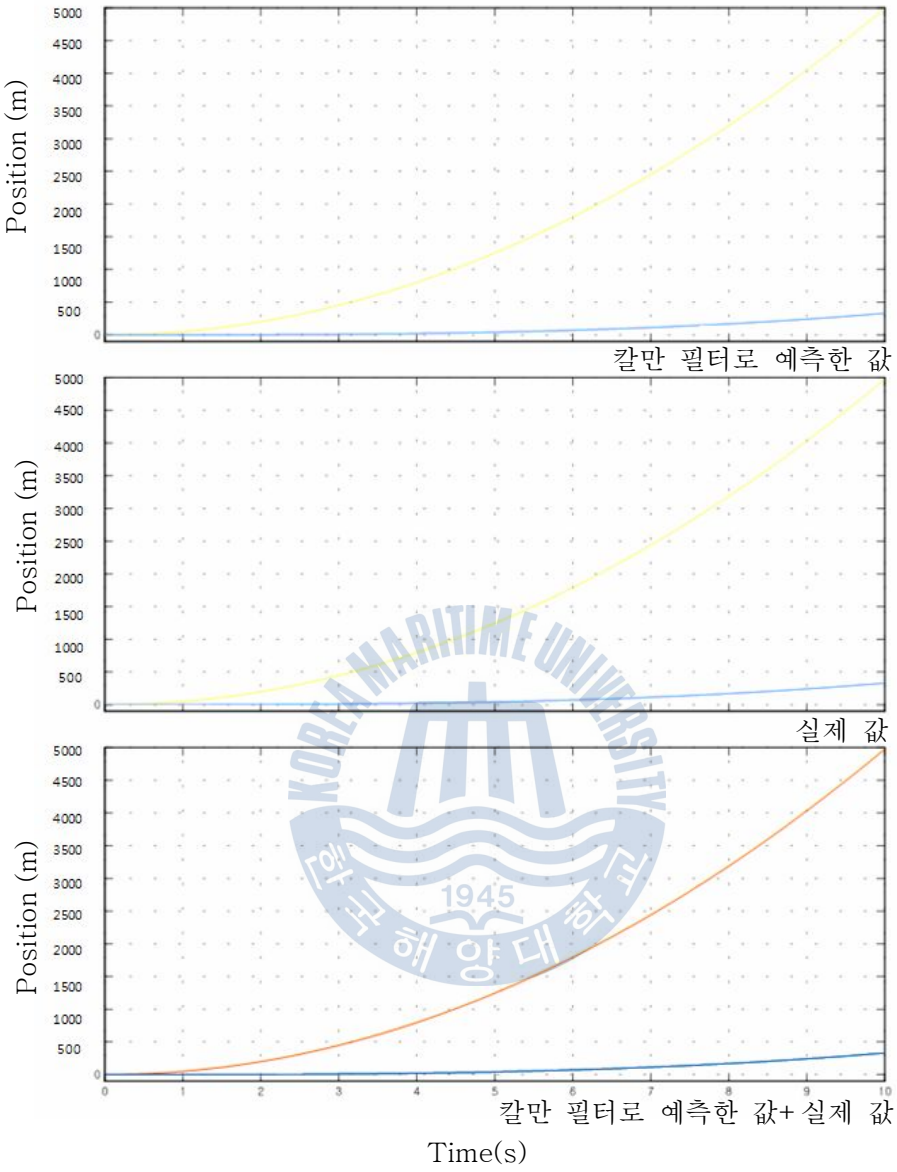

Fig. 5.8 The result of INS's simulation for position

5.1.3 GPS - INS 결과

Fig. 5.9는 GPS - INS를 시뮬레이션을 하기 위한 simulink 프로그램이다. sensor 파트 모델은 Fig.5.2와 동일하고 입력은 AHRS에서의 입력에 위치 값을 추가로 입력 받았다.

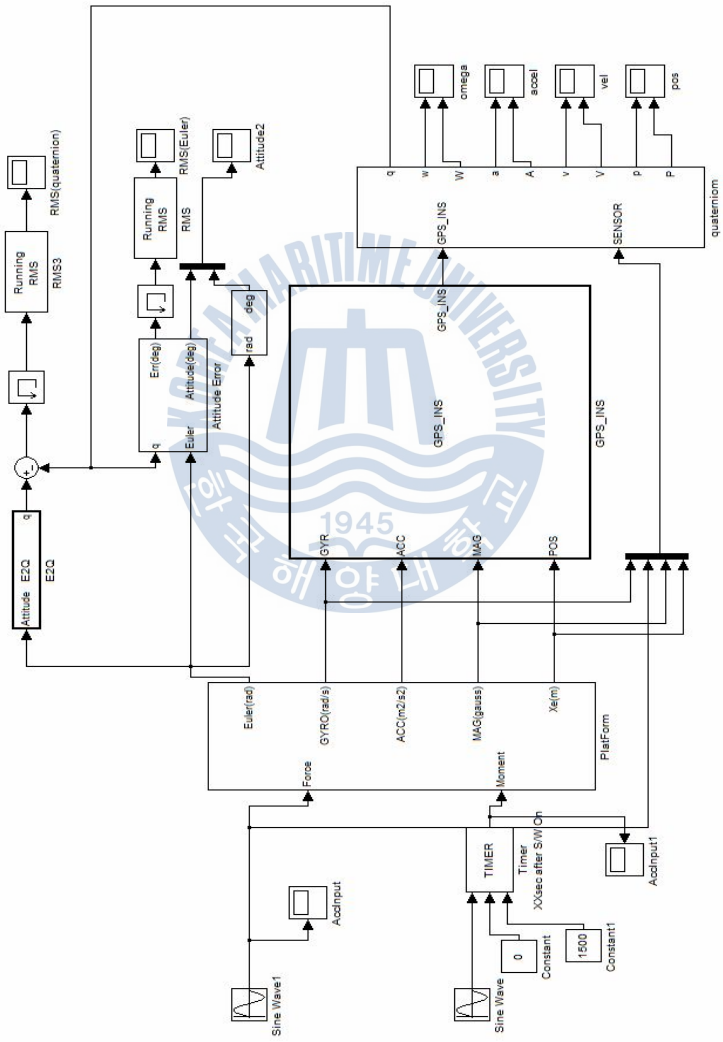

Fig. 5.9 GPS - INS's simulation using Matlab simulink

확장 칼만 필터를 이용하여 4개의 쿼터니언 원소와 각속도, 가속도, 속도, 위치를 예측하였다. 쿼터니언과 각속도의 결과는 AHRS와 동일하게 나왔으며 가속도의 경우에는 INS와 동일한 결과가 나왔다. 속도, 위치 결과는 Fig. 5.10, Fig. 5.11와 같다.

Fig. 5.10은 GPS - INS의 속도 결과 그래프이다. 첫 번째 그래프는 white noise가 포함된 3축 가속도 값을 확장 칼만 필터를 이용하여 추정한 속도 값이고, 두 번째 그래프는 실제 속도 그래프이다. 세 번째 그래프는 추정한 속도 값과 실제 속도 값을 표시한 그래프이다. 3번째 그래프의 결과로 실제 값과 추정 값 사이의 차이가 있지만, 발산하지 않고 실제 값으로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 5.11은 GPS - INS의 위치 결과 그래프이다. 첫 번째 그래프는 white noise가 포함된 3축 가속도 값을 확장 칼만 필터를 이용하여 추정한 위치 값이고, 두 번째 그래프는 실제 위치 그래프이다. 세 번째 그래프는 추정한 위치 값과 실제 위치 값을 표시한 그래프이다. 3번째 그래프의 결과로 실제 값과 유사한 위치 값을 예측함을 알 수 있다.

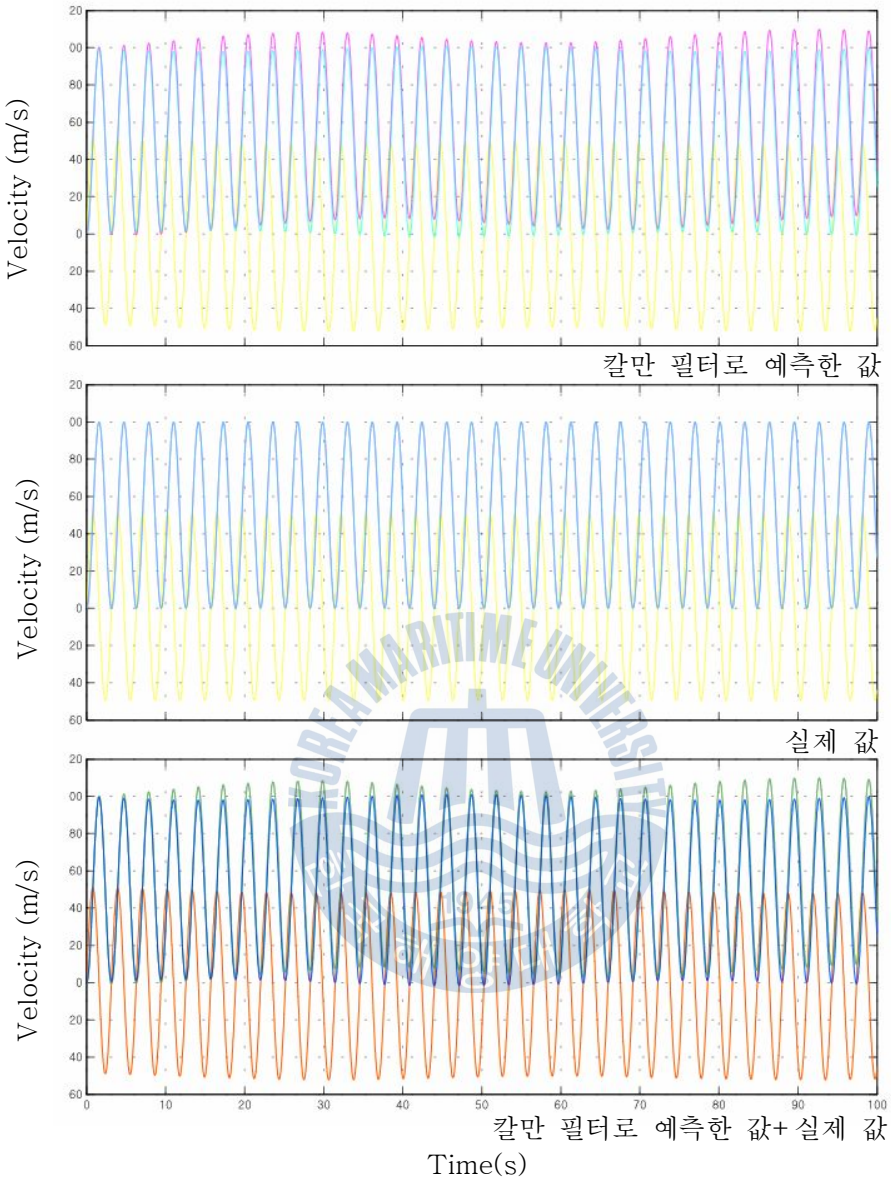

Fig. 5.10 The result of GPS – INS's simulation for velocity

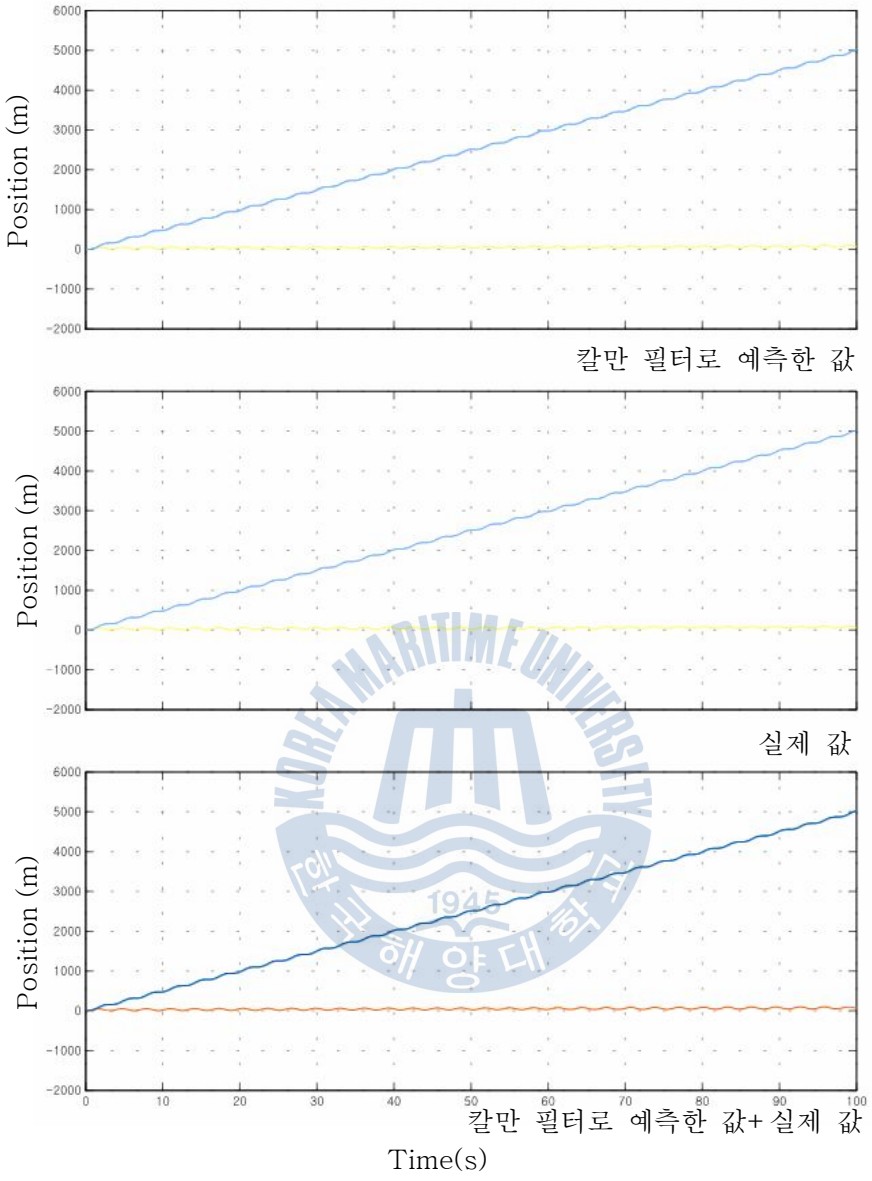

Fig. 5.11 The result of GPS – INS's simulation for position

5.2 성능 시험

5.2.1 AHRS 결과

Fig. 5.12는 정지 상태의 확장 칼만 필터를 적용한 AHRS 테스트 결과이다. 정지 상태에서 X축은 0.22°, Y축은 0.24°, Z축은 0.21°의 오차 범위를 가진다. X사의 AHRS 센서의 경우 X, Y, Z 축의 오차 범위가 0.5°로 그와 유사하거나 더 낮은 결과임을 알 수 있다

.

Fig. 5.13은 90° 이상 회전 하였을 때의 AHRS 실험결과이다. 확장 칼만 필터에서 오일러 각이 아닌 쿼터니언을 추정한 결과 gimbal lock 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

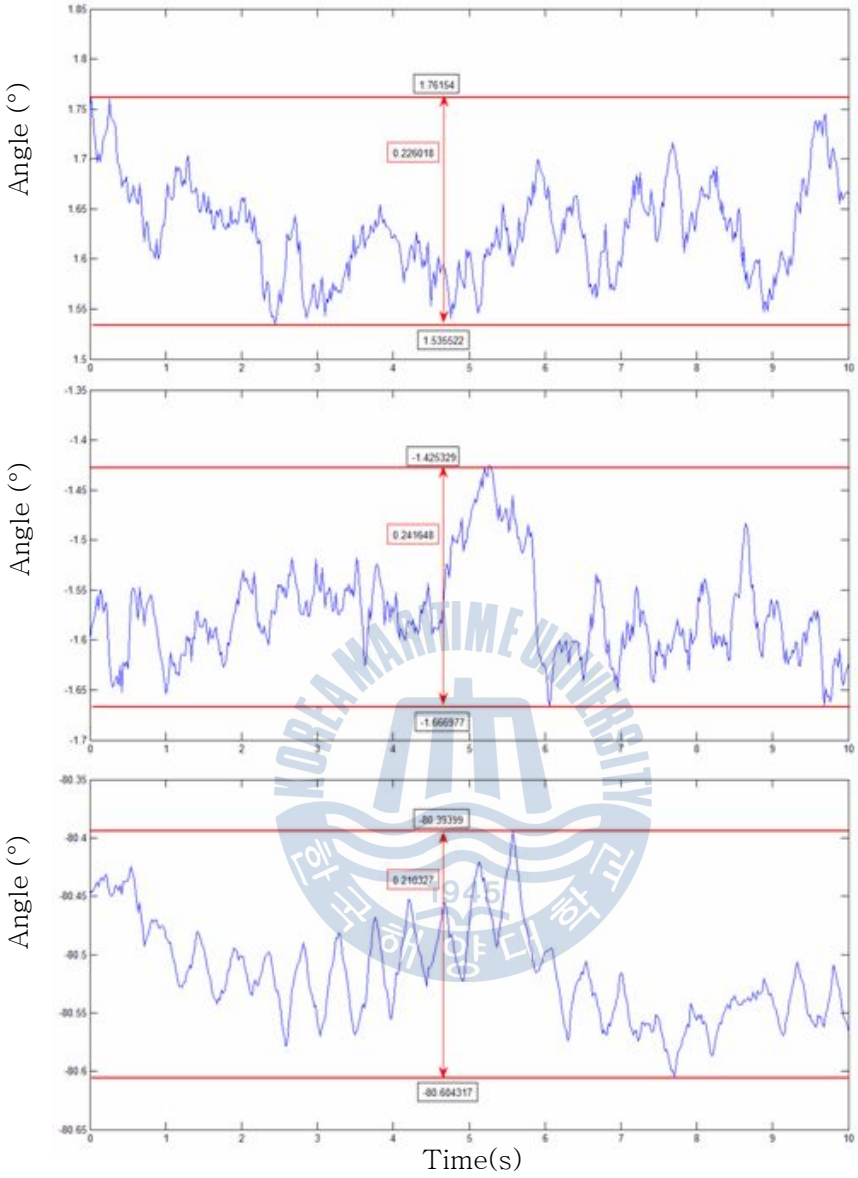

Fig. 5.12 Experiment of stationary AHRS's performance at XYZ axis

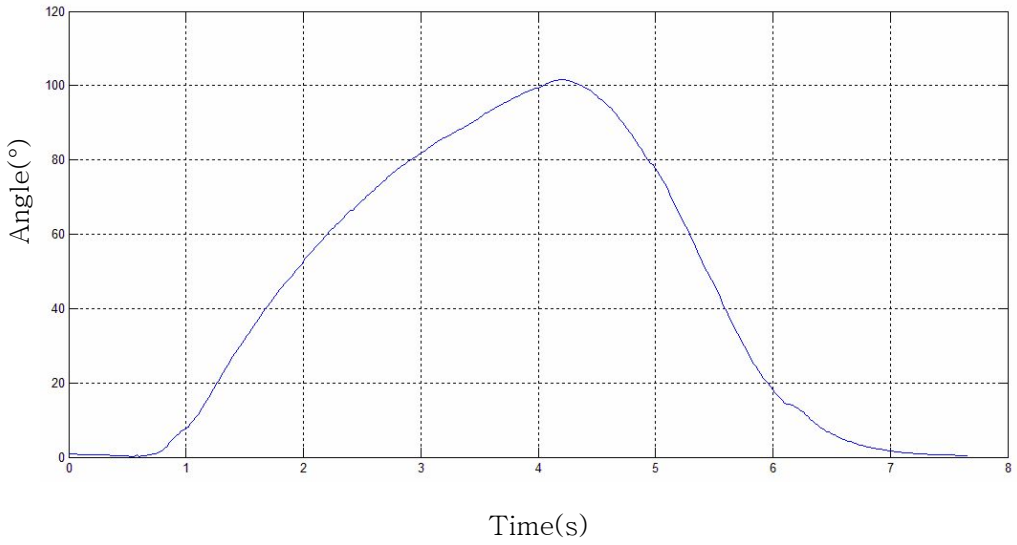

Fig. 5.13 The result of gimbal lock's rotation test over 90°

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

5.2.2 INS 결과

Fig. 5.14, Fig. 5.15, Fig. 5.16은 정지 상태의 확장 칼만 필터를 적용한 INS 실험결과이다. 관성항법장치 만을 이용한 실험에서는 정지 상태에서도 시간이 지남에 따라 발산 함을 알 수 있다. GPS, USBL, DVL등의 보조항법장치를 이용한 보정이 필요하다.

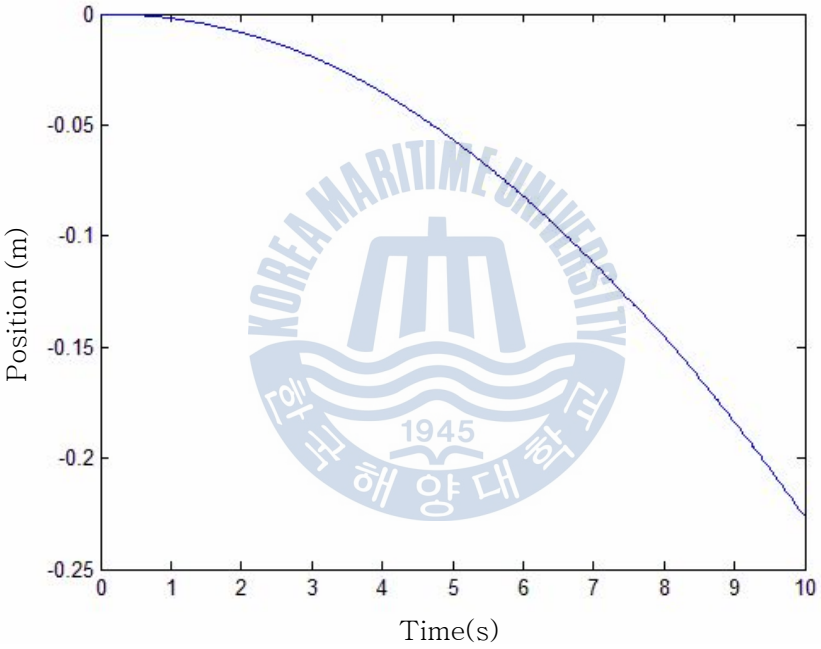

Fig. 5.14 Experiment of stationary INS's performance at X axis

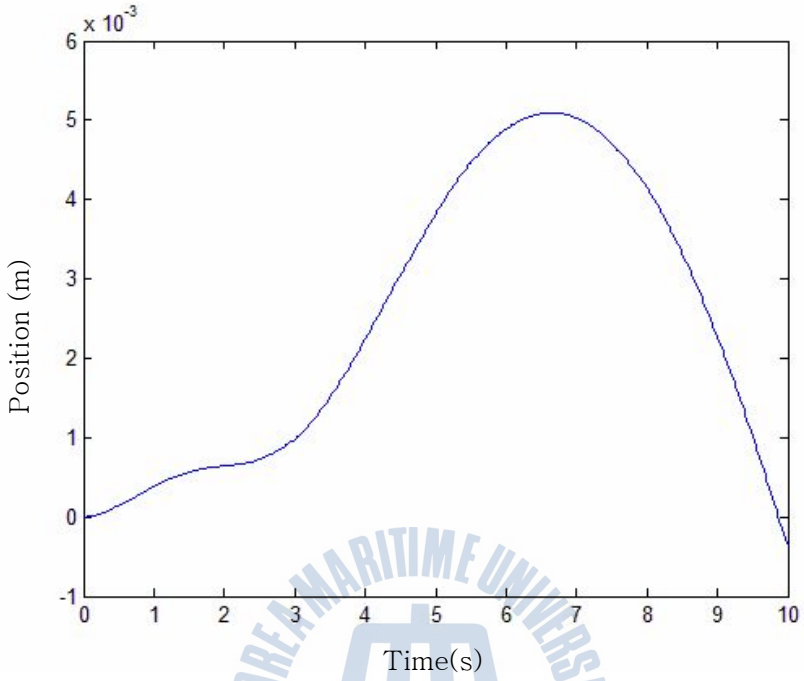

Fig. 5.15 Experiment of stationary INS's performance at Y axis

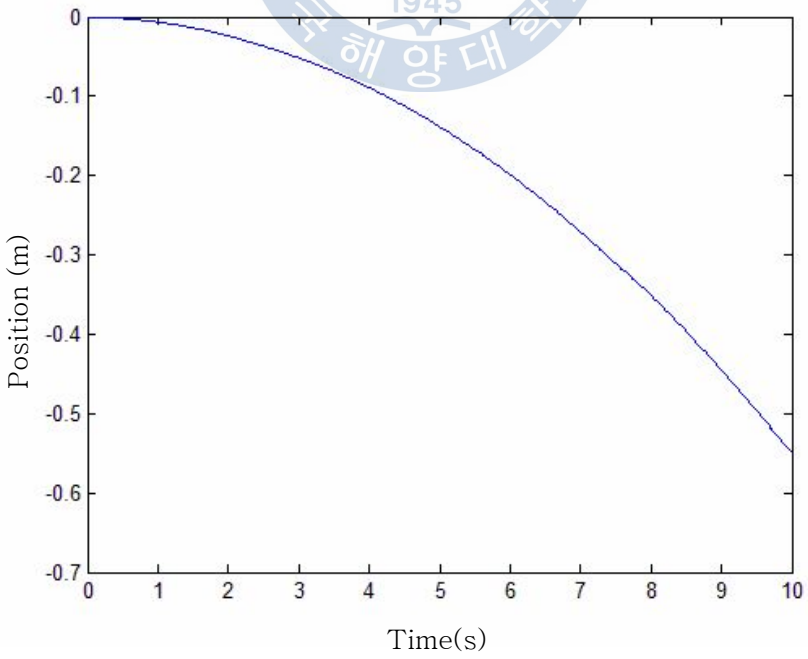

Fig. 5.16 Experiment of stationary INS's performance at Z axis

5.2.3 GPS - INS 결과

Fig. 5.17은 확장 칼만 필터를 적용한 GPS-INS 성능 실험 사진으로 x축으로만 10m 움직이며 실험하였다. Fig. 5.18은 x축 실험 결과이다. 본 논문에서 사용한 IMU의 경우, ±18g 측정 범위를 가지는 센서로 실험과 같은 저속으로 움직이는 상황에서는 많은 측정 오차를 가지게 된다. 따라서, GPS의 의존도를 높여 실험을 하였다. 그 결과, Fig. 5.18에서와 같은 계단형 그래프가 보임을 확인 할 수 있었으며 아주 적은 가속도 값이 보정에 활용되어졌음을 알 수 있다.

Fig. 5.19는 확장 칼만 필터를 적용한 Z축 성능 테스트 결과이다. Z축의 실험의 경우, 좀더 정확한 성능을 확인하기 위해 140초 동안 수평의 평면에서 움직이면서 테스트하였다. 성능 실험결과 0.45m 이내의 결과를 확인하였으며 GPS의 측정 오차 1.2m 보다 0.75m 줄어든 0.45m 결과를 통해 확장 칼만 필터를 적용하였을 때, 센서의 많은 오차를 보정 할 수 있음을 확인하였다.

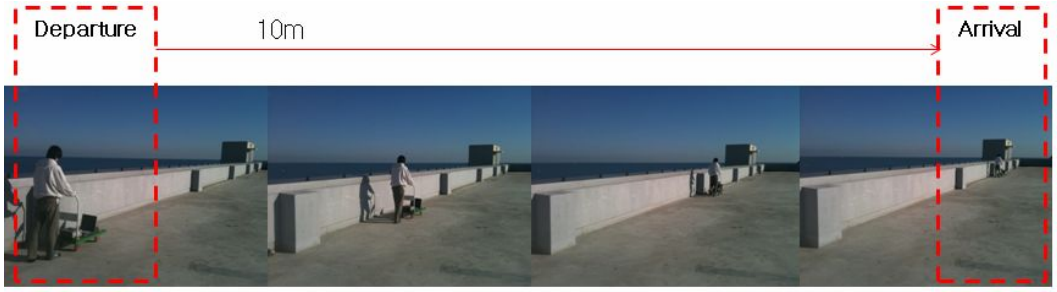

Fig. 5.17 Environment GPS-INS's Experiment

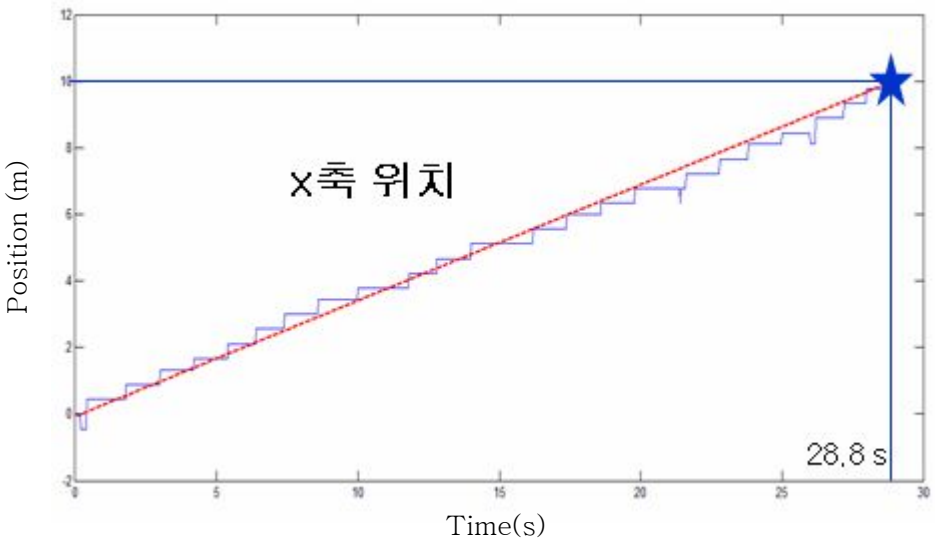

Fig. 5.18 Experiment of GPS-INS's performance at X axis

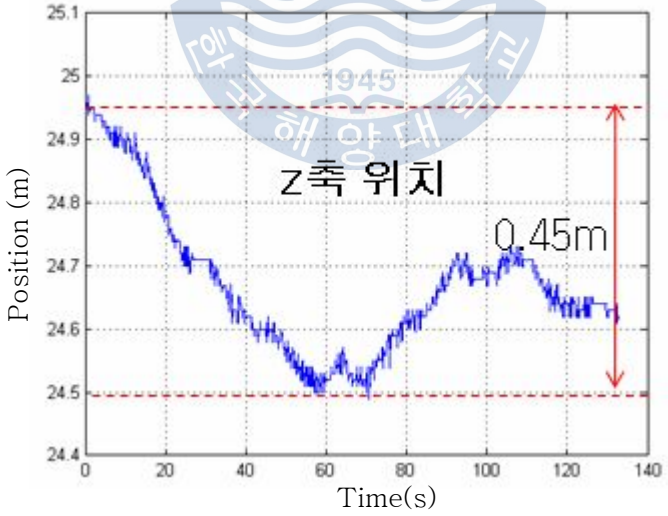

Fig. 5.19 Experiment of GPS-INS's performance at Z axis

5.2.4 GPS and sonar - INS 결과

Fig. 5.20, Fig. 5.21, Fig. 5.22는 USBL만을 이용한 x, y, z축 실험 결과이다. USBL의 경우, Sampling time이 최소 1초에서 최대 9초 사이로 일정하지 않다는 문제가 있었으며 정지 상태에서 y축의 경우 0.1오차 범위를 가지며, z축의 경우 0.2오차 범위를 가지는 것을 실험을 통해 확인하였다.

Fig. 5.23, Fig. 5.24, Fig. 5.25의 경우 확장 칼만 필터를 적용한 USBL-INS 실험 결과이다. 센서 단독 실험의 결과와는 달리 확장 칼만 필터를 적용하였을 때, 정지 상태에서 움직이지 않는 결과를 확인 할 수 있다.

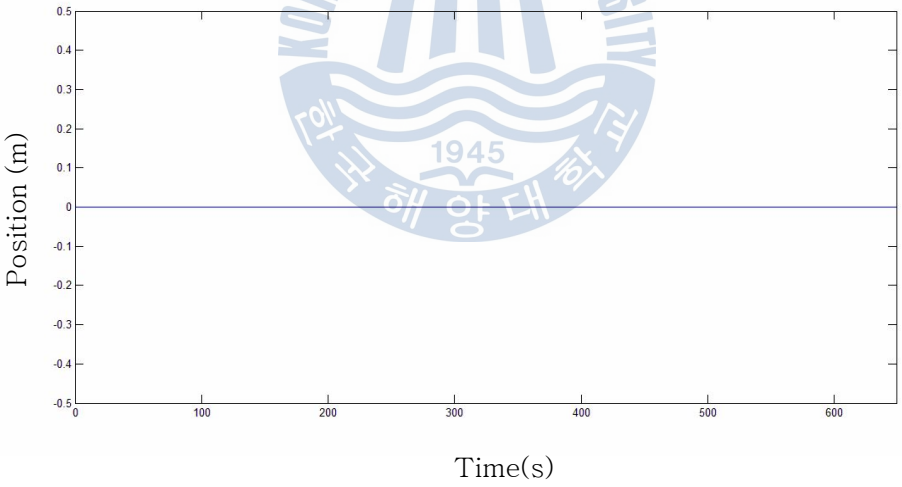

Fig. 5.20 Experiment of USBL's performance at X axis

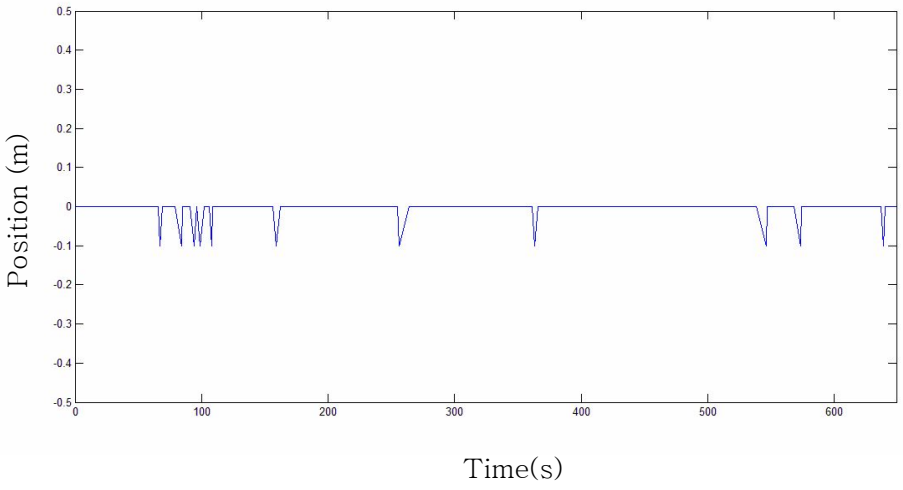

Fig. 5.21 Experiment of USBL's performance at Y axis

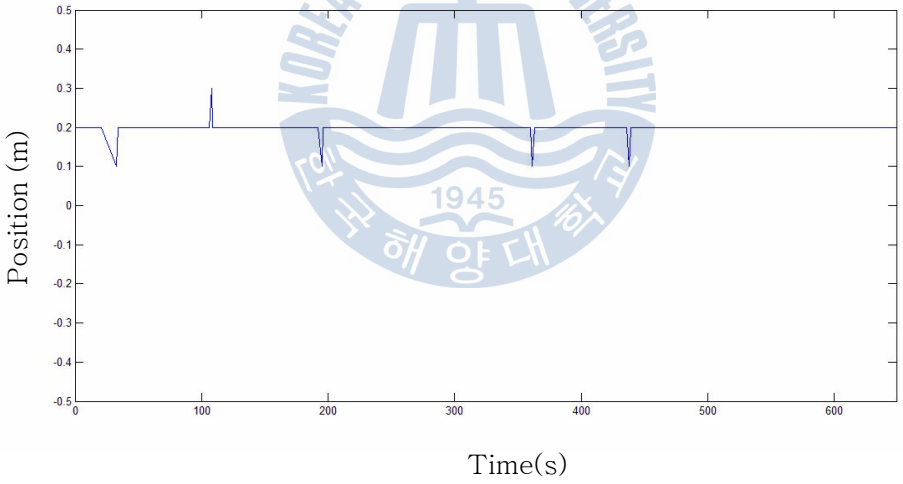

Fig. 5.22 Experiment of USBL's performance at Z axis

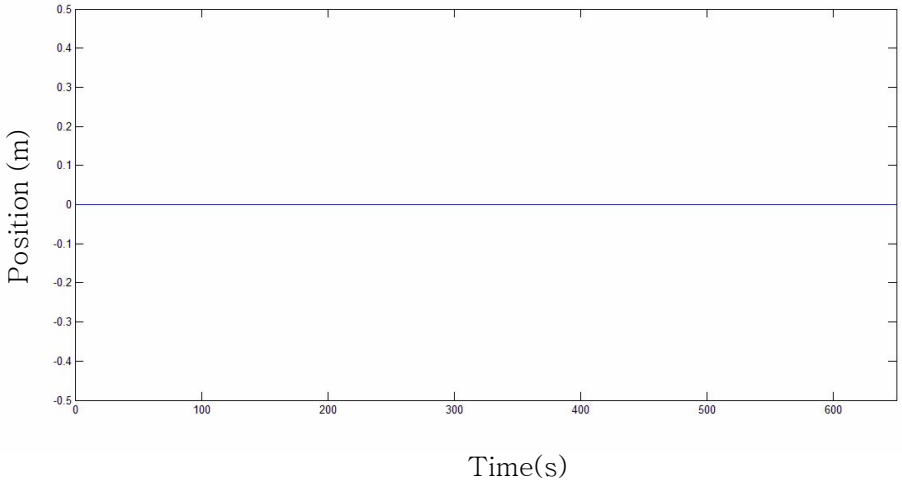

Fig. 5.23 Experiment of USBL-INS's performance at X axis

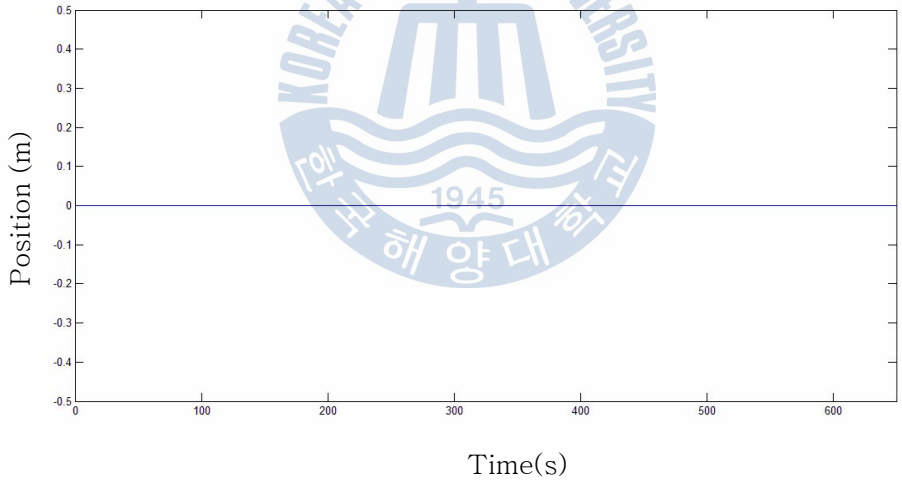

Fig.5.24 Experiment of USBL-INS's performance at Y axis

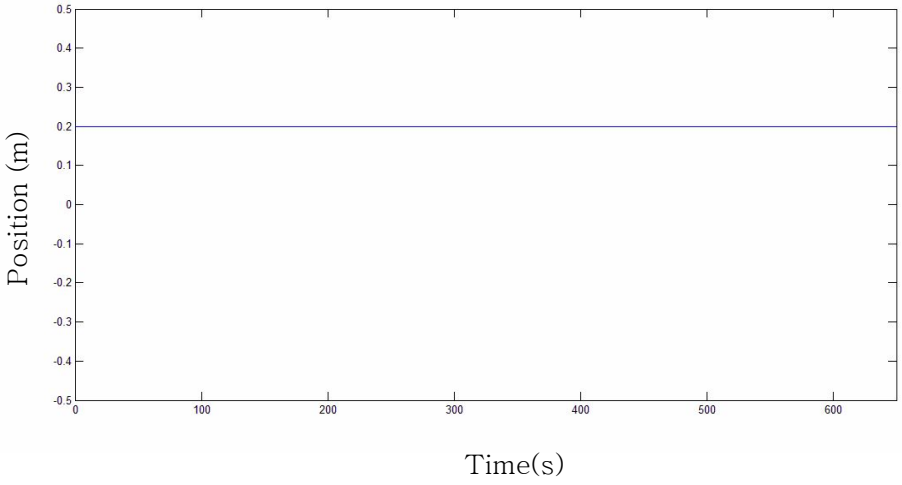

Fig. 5.25 Experiment of USBL-INS's performance at Z axis

USBL-INS의 성능 실험을 위해 Fig. 5.26과 같은 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치는 한 축으로만 움직이며, 최고 속도 4.5m/s 으로 동작하도록 제작하였다. Body 프레임과 트렉롤러, DC모터, 모터드라이버로 구성하였고 트렉롤러에 USBL과 IMU를 부착하여 USBL-INS성능 실험을 하였다.

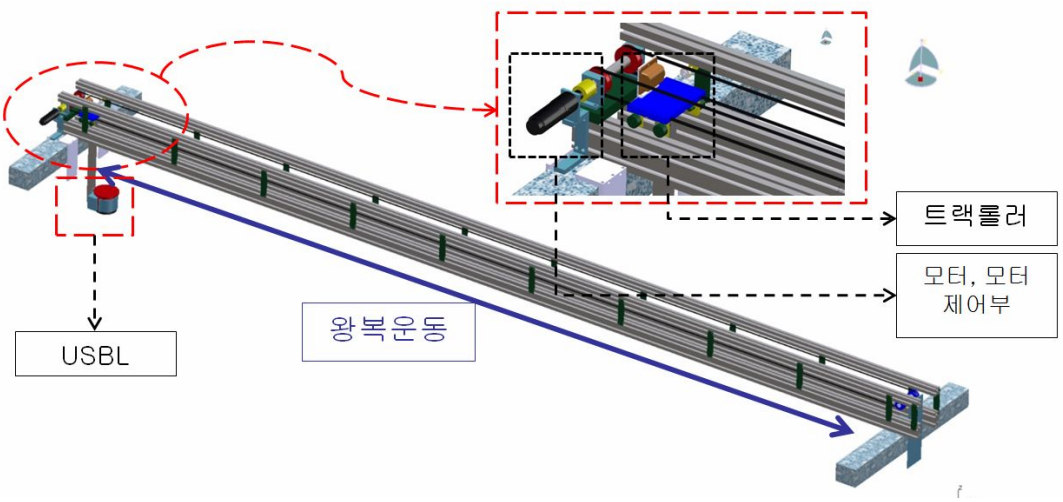

Fig. 5.26 Experiment equipment of USBL-INS

Fig. 5.27은 확장 칼만 필터를 적용한 USBL-INS 실험 결과이다. 실내에서는 0.2m/s속도로 3.8m 구동하였을 때의 실험결과이다. 본 논문에서 사용한 가속도 센서의 경우 ±18g의 범위를 가지는 가속도센서로서 실험에서와 같이 느린 환경에서의 동작 할 경우, 가속도 센서의 측정 값을 신뢰 할 수 없어 USBL의 의존도를 높여 실험하였다. 실험 결과 계단형 그래프가 그려지는 것을 알 수 있으며, 아주 적은 가속도 값이 보정에 활용되어졌음을 알 수 있다.

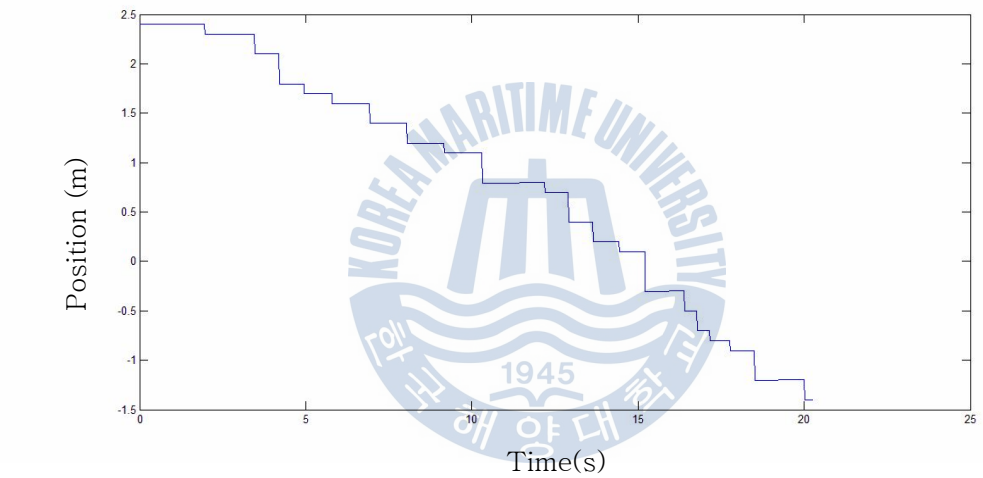

Fig. 5.27 Experiment of USBL-INS's performance

제 6 장 결론

USBL, GPS, 관성센서를 융합한 수중 복합항법시스템은 소형이며 저 소비전력 특성을 가지고 있어 장시간에 걸쳐 수중에서 활동하는 무인잠수정에 적합하다. 본 논문에서는 GPS, USBL, 지자기 센서가 포함된 IMU센서를 이용한 복합항법장치시스템을 제안하였다.

항법알고리즘은 확장 칼만 필터를 이용하여 구성하였고 시스템의 루프 타임은 50Hz로 계산하였다. 항법모드 진입 전에 무인잠수정의 자세를 찾는 초기개략정렬에서는 3축 가속도센서와 3축 지자기 센서만을 이용한 초기 자세 추정 방법을 제시하였고 AHRS 단계에서는 성능 실험을 통해 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 센서의 출력을 이용한 융합알고리즘의 성능을 확인하였다. 정지상태에서는 0.2° 이내의 오차범위를 가지며 90° 이상 움직여도 짐벌락 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 그리고 INS 단계에서는 관성항법장치만을 이용하여서는 항법장치의 구현이 어려움을 확인하였고 GPS - INS 단계에서는 INS의 문제점을 보완하여 움직이는 상황에서도 그 위치를 추정하는 것을 Fig. 5.18을 통해 확인하였다. Fig 5.19에서는 GPS의 오차범위 1.2m보다 작은 0.45m를 임을 통해, GPS-INS성능을 확인하였다. GPS and sonar - INS에서는 전파의 전달이 어려운 환경인 수중에서의 항법시스템 구성 방법과 그 결과를 확인하였다. 실내에서는 0.2m/s속도로 3.8m 구동하였을 때, 실험에서 사용한 가속도 센서의 경우 ±18g의 범위를 가지는 가속도센서로서 실험에서와 같이 느린 환경에서의 동작 할 경우, 가속도 센서의 측정 값을 신뢰 할 수 없어 USBL의 의존도를 높여 실험한 결과, 계단형 그래프가 그려지는 것과 아주 적은 가속도 값의 보정이 되는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Milne, P. H.(1983), Underwater acoustic positioning systems, Gulf Publishing Company

[2] Woolven, S. and Field, M.(1998). "POS/SV – an aided intertial navigation system for submersible vehicles," Proc. Of Oceans '98 Conference, Vol. 1, pp. 103~107, Oct

[3] Yun, X., Bachmann, E. R., McGhee, R.B., Whalen R. H., Roberts, R. L., Knapp R. G., Healey, A. J. and Zyda, M. J.(1999). "Testing and evaluation of an intergrated GPS/INS system for small AUV navigation", IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 24, No.3, pp. 396~404.

[4] An, P. E., Healey, A. J., Smith, S. M. and Dunn, S.E.(1996). "New experimental results on GPS/INS navigation for Ocean Voyager 2 AUV", Proceedings of AUV '96, pp. 249~255, June

[5] Marco, D. B. and Healey, A. J.(2001). "Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV", IEEE j. of Oceanic Engineering, Vol. 26 No. 4, pp. 466~476, Oct

[6] An, E., Healey, A. J., Park, J. and Smith S. M.(1997). "Asynchronous data fusion for AUV navigation via heuristic fuzzy filering techniques", Proc. Of Ocean 97 Conference, Vol. 1, pp. 397~402.

[7] Ppoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Process, Mc-Graw Hill

[8] Maybeck, Peter S., "Stochastic Models, Estimation, and Control", Vol.1

[9] Alberto Leon-Garcia, Probability and Random Process for Electrical

[10] Patrick Billingsley, Probability and Measure, 2^{nd} Ed. Wiley, 1979

[11] Lewis, F.L., Optimal Estimation, John Wiley & Sons, 1986

[12] Branko Ristic et al, Beyond the Kalman Filter, ARTECH House, 2004

[13] An Introduction to the Kalman Filter, Greg Welch and Gary Bishop

[14] 강철우, 유영민, 박찬국, "변형된 오일러각 기반의 칼만 필터를 이용한 자세 추정 성능 향상", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems Vol, 14, No. 9, September 2008

[15] Titterton, David H., Weston, Jessie L, Strapdown Inertial Navigation Technology, Second Edition

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

감사의 글

실험실에서 생활한지 3년이라는 시간이 지나 정든 곳을 떠날 때가 되었다는 생각을 하니 마음이 무겁습니다. 3년 이라는 실험실 생활에서 저에게 많은 도움을 주신 분들께 이렇게 글로써나마 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

부족한 저에게 공부뿐만이 아닌 인생의 많은 조언을 주신 최형식 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 앞으로 사회에 나가서도 교수님의 가르침 잊지 않고 열심히 살아가겠습니다. 교수님의 은혜 잊지 않겠습니다. 그리고 하드웨어에 관하여 아무것도 모르는 저에게 3년 이라는 시간 동안 너무나 많은 것을 가르쳐 주신 조용성 교수님께도 진심으로 감사 드립니다.

실험실에 생활에 많은 도움을 준 01학번 동기 형석, 재관, 진일 그리고 1년 이라는 짧은 시간 동안 저에게 많은 것을 가르쳐 주신 동완형님, 처음 실험실에 들어왔을 때, 적응하지 못하고 있는 저에게 많은 조언과 격려를 해주신 원형 형님께도 진심으로 감사 드립니다. 마지막으로 해용, 성율, 지광, 태웅, 종수, 상기, 동준, 명만에게도 진심으로 감사 드리며 앞으로도 좋은 인연으로 지능로봇 및 자동화 실험실의 발전에 함께하고 싶습니다.

2011년 1월 26일

김 호 성