

자율무인잠수정의 자세계측장치의 개발

김도현*, 오준호*

Development of Motion Reference Unit for Autonomous Underwater Vehicle

Doh Hyun Kim*, Jun Ho Oh*

ABSTRACT

This paper concerns the navigation algorithm of motion reference unit(MRU) for autonomous underwater vehicle(AUV). We apply the strapdown navigation system using middle level inertial sensors. But, because the MRU consists of inertial sensors, the values of AUV motion calculated by navigation computer are increased by drift property of inertial sensors. Therefore, we propose the attitude algorithm using switching method according to the motion of AUV. From this algorithm, the drift terms are eliminated effectively for roll and pitch. But, another device is required for yaw angle.

Key Words : Motion Reference Unit(MRU, 자세계측장치), Autonomous Underwater Vehicle(AUV, 자율무인잠수정), Inertial Navigation System(INS, 관성항법장치), Switching Algorithm(스위칭 알고리즘), Strapdown(스트랩다운)

1. 서론

삼면이 바다인 우리나라는 국토개발의 효율성 증진 및 자원개발을 위해서는 해양개발이 필연적이다. 이를 위해서 추진되고 있는 자율 무인 잠수정(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)의 개발사업은 해양자원 개발 및 해양공간 이용, 확보 차원에서 경제, 사회적으로 필요성이 높아지고 있다.

이러한 AUV를 개발하기 위해서는 수상지원선과의 통신, 현 작업위치의 정밀계측 및 자동항해 제어기능이 필

요하다. 이들 중에서 자동항해 제어기술은 AUV개발에 기본이 된다. 자동항해를 위해서는 수중에서 AUV의 3차원 운동을 정확히 측정할 수 있어야 하는데, 이를 위해서 고정밀도의 관성항법장치(Inertial Navigation System, INS)를 이용하거나 소나신호를 이용한 수중위치 추적장치를 이용하는 방법이 제안되고 있다. 그러나 고정밀도의 INS는 고가일 뿐만아니라 크기 및 중량이 크므로 소형AUV에는 탑재하기가 용이하지 않다. 그리고 소나 신호만으로 위치를 추적하기에는 AUV에 탑재된 CPU에 과중한 부담을 주게되므로 적합하지 않다. 따라서 중급의

정밀도를 갖는 INS와 소나 신호를 적절히 조합하여 AUV의 운동을 측정할 수 있는 자세계측장치(Motion Reference Unit, MRU)의 개발이 필요하다.

MRU에서는 관성센서 신호의 처리 및 항법알고리즘의 구현이 핵심이므로 기계, 전자부 하드웨어와 소프트웨어의 양쪽 모두 수준급의 기술을 요구한다. 따라서 매우 고부가가치, 기술집약적 산업이라고 할 수 있다. 현재 시판되고 있는 MRU 등은 매우 고가에 수입판매 되고 있는 실정이며 본 연구에서 목표로 삼은 Seatex사의 MRU-6는 \$40,000가까이 한다⁽¹³⁾. 또한 MRU 는 그 근본기술을 INS 에 두고 있기 때문에 응용 기술의 파급효과가 매우 큰 분야이며, 또 이러한 기술은 현재 다방면에서 연구되고 있는 자동항법시스템 (Automatic Navigation System), Dead Reckoning 시스템과도 밀접한 연관성을 가지고 있다.

본 연구에서는 중저가의 중급 INS센서를 이용하여 수중에서 AUV의 3차원 운동을 측정할 수 있는 관성측정장치(Inertial Measuring Unit, IMU)를 설계, 제작하며 스트랩다운(Strapdown) 방식의 항법 알고리즘을 구현하여 AUV에 탑재가능한 MRU를 개발하는데 그 목적이 있다.

이에대한 기존의 연구를 살펴보면 항법알고리즘의 해석에 대한 연구⁽⁷⁻¹⁰⁾는 자세변환 알고리즘, 오차해석, 영속도 보정, 계산의 효율등 실제 항법을 염두에 두고 한 연구로서, 지구자체의 물리적 특성을 모두 포함하기 때문에 본 연구처럼 소규모 영역에서의 자세추적과는 적용범위가 좀 다르다. 따라서 본 연구에서는 AUV의 항해특성에 맞게 단순화시킨 항법알고리즘을 사용한다. 또한(3-5)는 실제 관성센서를 이용하여 자세를 측정하는 방법에 대해서 언급하고 있는데, 가속도계와 레이트자이로를 이용한 B. Barashan⁽³⁾의 연구가 본 연구와 비슷하다. 그러나 Barashan은 각 관성센서의 드리프트(drift)에 대하여 미리 측정된 데이터를 이용하여 보상해주는 방법을 이용하였으나, 관성센서의 드리프트는 시간과 온도에 따라서 계속 변하는 성질이므로 미리 측정된 데이터를 이용한다 하더라도 정확한 보상이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 관성센서의 드리프트의 영향을 제거하기 위해 가속도계, 레이트자이로의 신호를 혼합하여 자세각을 구한다. 그리고 자세각을 계산함에 있어서 AUV의 운동상황에 맞춰서 스위칭하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 하드웨어에 관련된 IMU의 제작에 관하여 설명하고, 3장에서는 관성항법알고리즘의 일반적인 내용에 관하여, 4장에서는 AUV

의 자세각도를 계산하는 방법과 본 연구에서 제안하는 스위칭 알고리즘에 관하여, 5장에서 실험결과를, 그리고 6장에서 결론을 서술하겠다.

2. 관성측정장치(IMU)의 제작

IMU는 김발(Gimbal)장치없이 관성센서들로 이루어진 집합체이며, 본 연구에서 제작한 IMU는 Dead-Reckoning센서로서 3축 직선운동을 측정하기 위한 3개의 가속도계와, 3축 회전운동을 측정하기 위한 3개의 레이트자이로를 장착하고 있다. Dead-Reckoning센서는 글자 그대로 외부의 도움없이 자체적으로 내장된 센서에 의해서 운동을 측정하는 방법이다.

가속도계는 중급정밀도를 갖는 Lucas Schaevitz사의 제품을 사용하였고 레이트자이로는 MURATA사의 ENV-05A를 사용하였다. 이들 센서는 항법용이라기 보다는 운동계측용의 관성센서로서 정밀도와 드리프트면에서 항법용으로는 적합하지 않다. IMU의 지그는 최소의 공간에서 관성센서들을 모두 장착할 수 있어야 하며, 제작시 가공이 용이해야 하고, 온도변화에 따른 변형이 거의 없어야 한다. 또한 가속도계가 마그네틱코일에 의한 자기력으로 펜들럼을 널링(Nulling)하는 서어보형이므로 자기장의 영향을 받지않는 재질이어야한다. 본 연구에서는 지그의 재질은 가볍고 가공성이 좋으며 비자성체인 두랄루민 60계열로 선정하였다.

또한 관성센서신호를 A/D변환, 센서신호의 필터링, 좌표계의 변환, 적분등 센서신호처리 및 항법알고리즘을 실시간으로 처리하기 위하여 고속의 부동 소숫점 연산자인 TMS320C31 DSP 프로세서 및 고속(800ns)의 A/D컨버터인 AD1671를 장착한 신호처리보드를 개발하였다.

가속도계와 레이트자이로의 실물사진을 Fig 2.1에 나타내었고, 지그에 관성센서 및 신호처리보드를 장착한 모습을 Fig 2.2에 나타내었다.



Fig. 2.1 The feature of accelerometer and rategyro

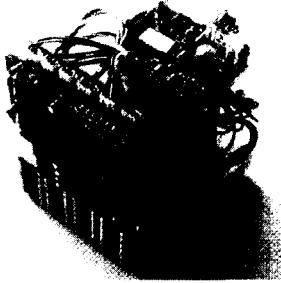


Fig. 2.2 The feature of IMU

3. 관성항법 알고리즘

본 장에서는 MRU에 적용하게 될 스트랩다운 관성항법과 자세변환에 대해 설명한다.

3.1 스트랩다운 관성항법

관성항법은 지배미분 방정식의 실시간 적분을 통하여 동체의 속도와 위치를 결정하는 방법으로 자체내장(Self-contained), 비복사(nonradiating), Dead-reckoning의 특징을 가지고 있다.

관성항법시스템에는 김발형(Gimbaled INS)과 스트랩다운형(Strapdown INS, SDINS)이 있는데, 큰 차이점은 김발형은 안정된 기계적 장치를 이용하는 것이고, SDINS는 동체에 직접 장착하는 것이다. 그리고 SDINS는 김발형에 비해 소형, 저가, 정비 및 설계가 용이한 반면 시간이 지날수록 관성센서의 드리프트와 바이어스(bias)같은 성질로 인하여 누적오차가 증가한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 저가이면서 저중량인 SDINS를 사용하여 AUV의 MRU를 개발한다. SDINS는 위에서 설명한 것과 같이 동체에 직접 장착하기 때문에 항법 프로세서는 기준좌표에 대한 동체의 움직임(자세)을 계속해서 추적해야 한다. 따라서 항법 프로세서는 동체의 가속도계의 신호를 실시간으로 기준좌표계로 변환시켜야 한다.

즉, 김발형의 INS에서 안정한 플랫폼의 역할을 프로세서의 좌표변환이 대신하게 되는 것이다. 따라서 SDINS는 동체의 운동변화정보를 직접적으로 제공하고, 김발형 INS에 필요한 기계적 장치들과 전자부품들이 불필요해진다. Fig 3.1에 일반적인 SDINS의 구조를 나타내었다.^[2]

3.2 자세변환

또한 본 연구에서는 관성항법좌표계중 항법좌표계

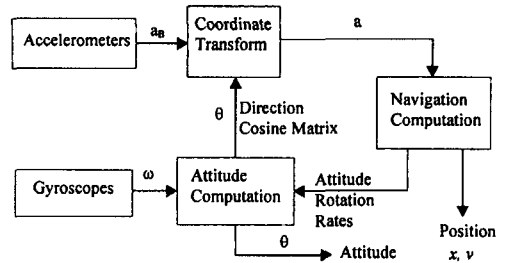


Fig 3.1 The structure of SDINS

(Navigation Frame)와 동체좌표계(Body Frame)을 이용한다. 그 이유는 본 연구에서 다루는 영역이 실제 항법에서처럼 크지 않고, 물위의 모선으로부터의 상대적인 위치를 구하는 것이므로 항법좌표계와 동체좌표계만을 이용하는 것이 타당하다.

그리고 실제 모선에서 AUV의 위치와 자세를 구하기 위해, AUV에 장착된 관성센서에서 측정된 신호(동체좌표계)를 모선에 대한 값(항법좌표계)으로의 변환을 수행하는 자세변환 알고리즘은 방향코사인행렬(Direction cosine matrix)방법을 이용하였다^[8]. 이 방법은 좌표계의 변환을 9개의 파라미터를 이용하여 행렬의 형태로 구하는 방법으로 변환행렬이 직접 계산되고 물리적 의미를 쉽게 파악할 수 있다. 좌표변환은 동체좌표계에서 항법좌표계(기준좌표계)로의 변환이며 다음과 같다.

$$C_c^b = C_\phi C_\psi C_\theta \tag{3.1}$$

$$C_c^b = \begin{bmatrix} \cos\phi \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\psi \cos\theta & \sin\psi \cos\theta & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\phi \cos\psi & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_c^b = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\phi & \cos\psi \sin\phi & -\sin\psi \\ \sin\theta \sin\psi \cos\phi - \cos\theta \sin\phi & \sin\theta \sin\psi \sin\phi + \cos\theta \cos\phi & \sin\theta \cos\psi \\ \cos\theta \sin\psi \cos\phi + \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \sin\psi \sin\phi - \sin\theta \cos\phi & \cos\theta \cos\psi \end{bmatrix}$$

$$C_b^c = (C_c^b)^T$$

여기서 θ 는 롤각도(Roll angle), ψ 는 피치각도(Pitch angle), ϕ 는 요각도(Yaw angle), C_θ 는 롤방향회전 성분(Orientation of roll), C_ψ 는 피치방향회전 성분(Orientation of pitch), C_ϕ 는 요방향회전 성분(Orientation of yaw), C_b^c 는 동체좌표계에서 기준좌표계로의 변환, C_c^b 는 기준좌표계에서 동체좌표계로의 변환이다. 따라서 오일러각도인 θ, ψ, ϕ 를 구하면 좌표변환 행렬인 C_b^c 이 결정되므로 AUV동체에서 측정된 가속도 신호를 곱하여 기준좌표계에서의 AUV의 운동을 구할 수

있다. 기준좌표계에서의 AUV의 운동을 구하는 식은 다음과 같으며 중력에 의한 가속도항을 보상해줘야 한다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{V} \\ \left[\frac{d\mathbf{V}}{dt} \right]_r &= \mathbf{C}_r^b \mathbf{Z}_A - \mathbf{G}(\mathbf{R}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서 \mathbf{R} 은 기준좌표계에 대한 동체의 위치 벡터, \mathbf{V} 는 기준좌표계에 대한 동체의 속도 벡터, \mathbf{Z}_A 는 동체좌표계의 관성센서에서 측정된 가속도, $\mathbf{G}(\mathbf{R})$ 는 위치변화에 따른 중력항이다. 식 (3.2)에서의 중력항은 Jeffreys의 International gravity formula를 이용하였다(1). 따라서 식(3.2)에서 우측항을 계산하여 두번 적분하면 기준좌표계에 대한 동체의 위치가 구해진다. 이를 위해서는 오일러각도인 θ , ψ , ϕ 을 먼저 구해야 하는데 레이트자이로에서 측정된 신호를 이용하여 오일러각도인 θ , ψ , ϕ 을 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega_x + \tan \psi (\omega_y \sin \theta + \omega_z \cos \theta) \\ \dot{\psi} &= \omega_y \cos \theta - \omega_z \sin \theta \\ \dot{\phi} &= (\omega_y \sin \theta + \omega_z \cos \theta) / \cos \psi \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서 ω_x , ω_y , ω_z 는 각각 레이트자이로에서 측정된 롤, 피치, 요 방향의 각속도이다. 식(3.3)에서 볼수 있듯이 우측항을 적분하면 오일러각도가 계산된다. 하지만 레이트자이로의 특성상 드리프트로 인하여 누적오차가 증가하게 된다. 따라서 레이트자이로만을 이용하여 오일러각도를 계산하게 되면 시간이 지날수록 오일러각도는 증가하게 되어서 정확성을 잃게된다. 따라서 이에대한 보완으로 가속도계의 신호를 혼합하는 방법이 제시된다.

4. 항법 알고리즘의 구현

본 장에서는 관성센서인 가속도계와 레이트자이로의 신호를 이용하여 AUV의 자세를 계산하는 항법 알고리즘의 구현에 대하여 살펴본다.

4.1 오일러각도의 계산

먼저 오일러각도를 구해야 하는데, 이 오일러각도는 레이트자이로와 가속도계, 두 센서에서 독립적으로 구할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 두 센서의 신호를 필터처리하여 혼합한 알고리즘을 사용하여 오일러각도를 구했다.

먼저 동체 좌표계에서의 레이트자이로에서 측정된 각속도를 이용하여 식(3.3)에 대입하면 실시간으로 연속적인 오일러각도를 구할 수 있다. 그리고 가속도계 또한 중력장 안에서는 직접 경사계로도 사용이 가능하므로 누적계산이 필요없다. 따라서 드리프트등으로 인한 문제점이 사라진다. 가속도계의 신호를 이용하여 AUV의 오일러각도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_a &= \sin^{-1}(-a_\psi / G / \cos(\psi)) \\ \psi_a &= \sin^{-1}(a_\theta / G) \end{aligned} \quad (4.1)$$

여기서 θ_a , ψ_a 는 가속도값을 이용하여 계산한 롤, 피치 각도, a_ψ , a_θ 는 롤, 피치방향의 가속도 값, G 는 중력 가속도이다. 요각은 가속도계로 구할 수 없다.

이처럼 오일러각도를 자이로와 가속도계로 부터 구할 수 있는데 이렇게 구한 두 값을 비교해보자. 우선 자이로를 통하여 오일러각도를 구하려면 식(3.3)의 우변을 적분해야 하는데, 이 값은 동적인 상황에서는 드리프트의 영향이 적으므로 오일러각도를 잘 표현할 수 있는 반면, 정적인 상황에서는 드리프트로 인하여 값이 증가하게 되는 단점이 있다. 다음 가속도계로부터 오일러각도(경사)를 구하려면 가속도계의 신호를 저역통과 필터를 거치면 바로 AUV의 경사가 계산된다. 다시 말하면 오일러각도를 구함에 있어서 레이트자이로의 정보는 고주파 운동일 때 유효하고 가속도계의 정보는 저주파 운동일 때 유효하다는 뜻이다. 따라서 본 연구에서는 고역통과 필터를 거친 레이트자이로신호와 저역통과 필터를 거친 가속도계의 신호를 합하여 오일러각도를 계산하였다. 관련 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{gf}[k] &= \tau \times (\mathbf{A}_g[k] - \mathbf{A}_g[k-1]) + \tau \times \mathbf{A}_{gf}[k-1] \\ \mathbf{A}_{af}[k] &= (1 - \tau) \times \mathbf{A}_a[k] + \tau \times \mathbf{A}_{af}[k-1] \\ \mathbf{A}[k] &= \mathbf{A}_{gf}[k] + \mathbf{A}_{af}[k] \end{aligned} \quad (4.2)$$

여기서 \mathbf{A}_g 는 자이로를 통하여 구한 오일러각도, \mathbf{A}_a 는 가속도계를 통하여 구한 오일러각도, \mathbf{A}_{gf} 는 \mathbf{A}_g 를 고역통과 필터링한 값, \mathbf{A}_{af} 는 \mathbf{A}_a 를 저역통과 필터링한 값, \mathbf{A} 는 최종적으로 구한 오일러각도, τ 는 필터 파라미터이다. ($0 < \tau < 1$)

위 식(4.2)에서 두 필터의 계인의 합은 1이다. τ 의 값이 커지면 저역통과 필터의 컷오프(cut-off)주파수가 낮아지므로 각도응답이 늦어지며, τ 가 크면 자이로의 진동 성분이 많이 포함되어 오버슛(overshoot)이 생기게 된다.

다. 따라서 MRU시스템에 적절한 τ 값을 선정해야 하는데 본 연구에서 여러번의 실험 끝에 $\tau = 0.94$ 로 하였다.

그러나 위의 방법은 AUV가 회전 운동을 하는 경우에는 잘 적용이 되나, 만일 AUV가 직선방향으로 천천히 직선왕복운동을 하는 경우에는 그 운동이 가속도계에 감지되기 때문에 회전을 하지 않아도 저주파의 직선운동이 회전을 한 것처럼 나타나게 된다. 따라서 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 스위칭 알고리즘을 제안한다.

4.2 스위칭 알고리즘

본 연구에서 제안하는 자세결정 알고리즘은 AUV의 운동상태를 4가지로 분류함으로써, AUV의 운동상태에 따라서 스위칭하는 방법을 이용하였다.

AUV의 운동을 분류하는 기준은 가속도계와 레이트 자이로의 응답신호의 상태로 하였는데 Table 4.1과 같이 4가지로 분류하였다. 가속도계나 레이트자이로의 신호의 정적상태 및 동적상태를 인지하는 기준은 가속도의 변화율(가속도계값의 미분치), 회전속도(레이트자이로의 값)를 계산해서 일정시간(예:1.5초) 동안 정해진 작은 범위 안에서 유지되면 정적상태라고 간주하였다.

그리고 그렇지 않은 경우에 대해서는 동적상태라고 간주하였다. 여기서 가속도의 변화율을 이용한 이유는 AUV가 기울어져 있는 경우에는 움직이지 않아도 가속도계의 값이 0이 아니므로 동적상태라고 하기에는 무리가 있기 때문이다. 그리고 가속도의 변화율이 0인 경우는 등가속시(가속도 값이 상수)에도 발생하나, AUV는 운동특성상 느린운동을 하여 등가속시 매우 작은 가속도를 가지기 때문에 자세각도에 대한 영향이 미비하고, 경험상 가감속시에 등가속이 아닌 어느정도 변화를 가지면서 운동하는 것을 볼 수 있었고, 이런 값은 미분을 취했을때 감지되

는 값이기에 등가속운동은 무시한다. 또한 레이트자이로의 드리프트특성상 가속도계의 신호로 레이트자이로의 값을 상황에 맞춰서 리셋(reset)하였다.

레이트자이로를 리셋하는데 있어서 롤, 피치 방향으로는 가속도계로 리셋이 가능하나 요방향으로는 리셋이 불가능하므로 요방향의 정보는 순전히 레이트자이로의 출력에 의존하였다.









상태1의 경우는 AUV가 정지하거나 등속으로 직선운동을 하는 경우므로 저주파운동이다. 따라서 이 경우는 가속도계의 신호만을 식(4.1)을 이용하여 이용하여 오일러각도를 계산하고 레이트자이로의 값을 리셋을 한다. 물론 이때 이용하는 가속도계 값은 저역통과필터링한 가속도값이다. 그러나 요각도는 가속도계로는 구할 수 없으므로 자이로를 이용하여 구해야 한다.

상태2의 경우는 가속도계값은 정적이고 자이로의 값이 동적인 경우인데 자이로값이 존재한다는 것은 회전을 의미므로 가속도계에 측정이 안될 수 없다. 따라서 존재하지 않는 경우이다.

상태3은 가속도계는 동적이고 자이로는 정적이므로 회전은 하지않고 직선으로 가감속 운동만이 있는 경우이다. 따라서 이 경우 가속도계 값으로 오일러각도를 계산하면 회전성분이 없음에도 불구하고 오일러각도가 값을 가지게 된다. 그러므로 가속도계 값은 이용하지 않고 자이로값으로만 식(3.3)을 이용하여오일러각도 값을 계산한다. 이때 자이로값은 고역통과 필터링을 하지 않는다. 왜냐하면 고역통과 필터링이라는 것이 미분의 기능을 의미하므로 매우 민감한 반응을 하게된다. 따라서 이 경우는 필터링하지 않은 값을 이용하여 오일러각도를 계산한다.

상태4는 회전운동과 직선운동이 복합된 상태이므로 가속도계와 레이트자이로의 신호를 각각 저역통과 필터링, 고역통과 필터링한 값을 혼합하여 오일러각도를 계산한다. 그리고 자이로로 계산된 값을 리셋을 시킨다.

Table 4.1 The concept of switching algorithm

상태	가속도계의 신호	자이로의 신호	AUV의 운동	적용 알고리즘 (Euler 각도 결정)
1	 (정적상태)	 (정적상태)	정지, 등속 혹은 등가속 직선 운동	$A = A_g = A_{gy}$
2	 (정적상태)	 (동적상태)	존재하지 않는 운동	
3	 (동적상태)	 (정적상태)	가감속 직선운동	$A = A_g$
4	 (동적상태)	 (동적상태)	회전운동, 직선운동	$A = A_g = A_{gy} + A_{gy}$

5. 실험 결과

본 연구에서는 정밀회전 구동장치가 없는 관계로 MRU의 테스트 실험으로 실험실 레벨에서의 3가지의 실험을 하였다. 첫째는 로봇트에 장착하여 3축의 회전운동을 각각 발생시켜 각 축의 회전운동의 응답을 보았으며, 둘째는 각 축을 손으로 임의의 각도를 회전시킨 후 원위치를 시켜서 제자리로 다시 돌아오는 가를 보는 드리프트실험을 하였고, 마지막으로 3축을 동시에 30초 가까이 임의

로 회전시킨 후 제자리에 놓았을 때 원위치를 하는가를 테스트해 보았다.

5.1 로봇를 이용한 테스트

본 연구에서 개발한 AUV용 MRU의 성능을 테스트하기 위해서는 3축의 회전운동과 3축의 직선운동을 발생시킬 수 있는 장치가 필요하다. 실험실 레벨에서는 어려운 실정인 관계로 6축 로봇의 End-effect에 MRU를 고정시켜서 운동을 발생시켰다. 본 연구에서 사용한 로봇은 삼성전자의 FARA A1-U, 6축 로봇이며 MRU를 장착한 모습을 Fig 5.1에 나타내었다. 본 연구에서 개발한 AUV용 MRU는 롤, 피치, 요의 절대량과 surge, sway, heave의 상대량을 출력하게끔 설계되었다. 즉, 거리 정보가 절대량으로 출력되지 않으므로 항법용으로는 사용하지 못한다. 따라서 실험은 3축 회전운동에 대해서만 수행하였다.

3축회전은 x, y, z축으로 각각 $\pm 40^\circ$ 를 움직이도록 하였다. 이 실험의 응답특성을 Fig 5.2에 나타내었다. 이 실험에서는 end-effect의 회전각도를 피드백(feedback) 받을 수 없어서 기준값은 그리지 못하고 MRU의 응답만 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 $\pm 40^\circ$ 를 0.3Hz 정도의 주파수를 가지고 정속으로 움직이게 하였는데 비교적 훌륭한 응답을 나타내었다. 그러나 요운동은 가속도계의 도움이 없기 때문에 드리프트하는 양상을 나타내었다. 레이트자이로는 정속으로 움직일 때는 드리프트양이 작으나 각가속도를 받으면 드리프트가 현저하게 나타나게 된다. 위의 실험에서는 각가속도가 양의 방향과 음의 방향으로 거의 같은 양이 주기적으로 발생되므로 그리 큰 양의 드리프트가 발생하지는 않았지만, 손으로 요방향으로 각가속도를 주면서 돌리면 무시 못할 양의 드리프트가 발생하였다.

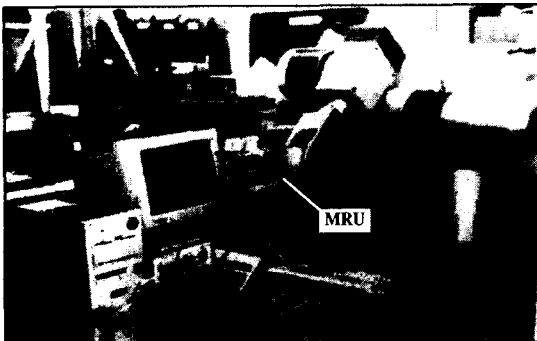


Fig. 5.1 The feature of MRU equipped on robot

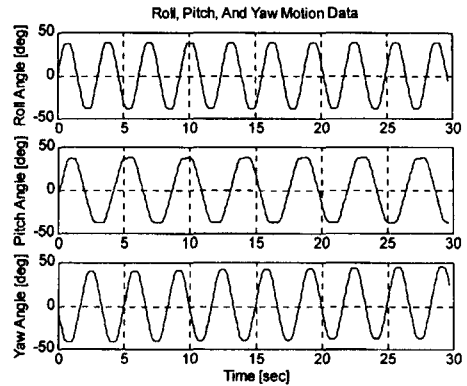


Fig. 5.2 The response of MRU on robot ($\pm 40^\circ$)

5.2 각 축의 드리프트 테스트

다음은 각 축의 회전운동에 대한 드리프트 실험을 하였다. Fig 5.3에 손으로 돌려서 각 축의 회전운동을 발생시켰을 때의 각 축의 응답을 나타내었다. 실험은 0° 에서 임의의 각도로 빠르게 움직인 후 다시 빠른 속도로 원위치한 경우와 천천히 원위치하는 두가지의 운동을 발생시켜 보았다. 그래프에서 기울기가 급격한 부분이 빠르게 움직인 경우고 완만한 부분이 천천히 움직인 경우이다. 이 실험에서 롤과 피치는 두 가지의 경우에 모두 오버슈트나 시간지연이 없이 0° 로 원위치함을 볼 수 있었다. 이는 식(4.2)에서의 τ 값을 0.94로 하여 고역통과 필터를 거친 자이로로 인한 오버슈트와 저역통과 필터를 거친 가속도계의 시간지연을 적절히 보상했기 때문이다. τ 값을 0.98 혹은 0.99정도로 크게 하면 각도의 응답이 늦어짐을 볼 수 있었고, 0.9정도로 작게 하면 오버슈트가 생김을 볼 수 있었다.

그러나 요각은 빠른 움직임에 대해서 원위치로 다시 온 경우 0이 아니라 드리프트로 인한 오셋이 발생함을 볼 수 있었다. 즉, 현재의 상황으로는 요각의 드리프트에 대한 대책이 없다. 따라서 보조 센서의 도움이 필요하다.

Fig 5.4는 30초 가까이 3축을 동시에 임의의 각도로 회전시켜서 얻은 응답특성이다. 이 경우는 각 축의 각도가 서로 연관(coupling)이 되어 영향을 미치는 것을 테스트하려는 의도였으나 3축 회전운동을 동시에 발생시키는 장비가 없어서 손으로 움직이게 되었다. 또한 손으로 움직인 관계로 기준입력의 값을 알 수가 없어서 MRU의 응답만 나타내었다. 처음부터 28초까지는 임의로 움직이다가 제자리에 놓았다. 그림에서 볼 수 있듯이 롤각과 피

회각은 다시 0°로 원위치 하였으나 요각은 드리프트로 인한 옅셋이 발생했음을 알 수 있다.

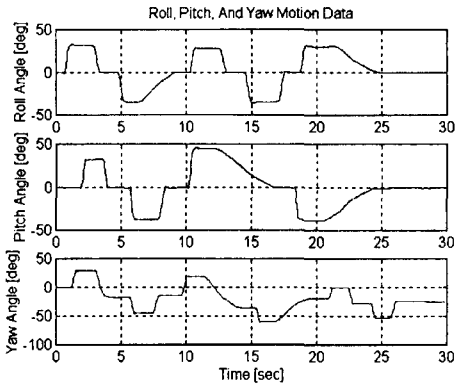


Fig. 5.3 The response of each axis motion

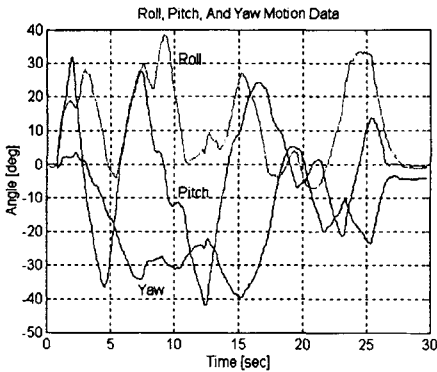


Fig. 5.4 The response of 3-axis motion

6. 결 론

본 연구에서는 자율무인잠수정용 자세계측장치 (Motion Reference Unit, MRU)를 개발하였다. 개발한 AUV용 MRU는 관성센서로는 가속도계 3개와 레이저자이로 3개를 장착하였고, 실시간으로 신호처리 및 항법알고리즘 구현을 하기 위하여 TMS320C31 DSP칩을 제어기로 하는 신호처리보드를 장착하였다.

그리고 AUV의 자세를 결정하기 위해, 본 연구에서 제안한 스위칭 항법알고리즘은 오일러각을 계산함에 있어서 AUV의 운동상태를 4가지로 구분하여 매 상태에 적합하게 가속도계와 레이저자이로의 출력을 혼합하여 이용

하는 것으로, 만족할 만한 드리프트제거 성능을 보였다.

또한 MRU의 성능은 롤, 피치, 요각의 정적인 값과 동적인 값의 절대량과 surge, sway, heave의 상대량을 출력할 수 있으며, 요각도에 대한 보조센서의 보완이 요구된다. 직선운동에 대해서는 상대량을 출력하므로 INS개념의 항법용으로는 사용할 수 없으며, 위치의 절대량을 측정하기 위해서는 소나센서와 같은 외부위치센서와 함께 사용되어야 한다.

따라서 추후연구과제는 소나센서의 일종인 SSBL과 같은 위치검출센서와 MRU의 관성센서를 혼합하여 AUV의 절대위치추정에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. George M. Siouris, Aerospace Avionics systems, Academic Press, Inc. 1993.
2. Ching-Fang Lin, Modern Navigation, Guidance, and Control Processing, Prentice Hall, 1991.
3. Billur Barashan, Hugh F. Durrant-Whyte, "Inertial Navigation Systems for Mobile Robots," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 3, pp328-342, 1995.
4. V. Anantha Subramanian, C. P. Vendhan, "An Efficient Algorithm for Strapdown Accelerometer-Based Motion Measurement," Ocean Eng., Vol. 20, No. 4, pp421-432, 1993.
5. Jeng-Heng Chen, Sou-Chen Lee, Daniel B. DeBra, "Gyroscope Free Strapdown Inertial Measurement Unit by Six Linear Accelerometers," J. of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 17, No. 2, pp286-290, 1994.
6. Sudhakar M. Pandit, Weibang Zhang, "Modeling Random Gyro Drift Rate by Data Dependent Systems," IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, Vol. AES-22, No. 4, pp455-460, 1986.
7. 박홍원, "스트랩다운 관성항법장치의 영속도 보정 칼만필터 구성 및 성능분석," 서울대학교 대학원,

- 제어계측공학과, 석사학위 논문, 1988.
8. Bernard Friedland, "Analysis Strapdown Navigation using Quaternions," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-14, No. 5, pp764-768, 1978.
 9. Robin B. Miller, "A New Strapdown Attitude Algorithm," J. Guidance, Vol. 6, No. 4, pp287-291, 1983.
 10. M. B. Ignagni, "Optimal Strapdown Attitude Integration Algorithms," J. Guidance, Vol.13, No. 2, pp 363-369, 1990.
 11. TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments, 1993.
 12. 박귀태, 이상락, C언어로 쉽게 쓰는 TMS320C31, 대영사, 1995.
 13. Seatex Motion Reference Unit MRU Technical Data and Applications, Seatex