

수중로봇의 롤 운동제어를 위한 모델 베이스 제어에 관한연구

김치효† · 박근우* · 김태성** · 이민기***

† 창원대학교 제어계측공학과 대학원, *(주)로토스, **창원대학교 제어계측공학과 교수

Study on Model Based Control for the Roll Motion of an Underwater Robot

Chi-Hyo. Kim† · Woo-Kun. Park* · Tae-Sung. Kim** · Min-Ki. Lee***

† Graduate school of Changwon National University, Kyungnam 641-773, Korea

*,**ROTOS Co., Ltd., Kyungnam 641-773, Korea

***Department of Control and Instrumentation Eng., Changwon National University, Kyungnam 641-773, Korea

요 약 : 병렬기구를 이용하여 항만공사를 위한 수중로봇을 개발하였다. 수중으로 큰 피복석을 옮기기 위해 수중로봇은 크레인에 의해 권양된다. 수중로봇의 요오와 피치운동은 유압 실린더에 의해 제어되지만 롤 운동은 제어되지 않는다. 롤 운동을 위해 로봇 양쪽에 프로펠러가 장착되어 제어된다. 본 논문은 수중로봇의 롤 운동제어에 관한 것이다. 롤 운동 각도를 측정하기 위해 자이로 센서가 사용되었다. 로봇의 롤 운동을 2차 비선형 시스템으로 나타내고 반복 리스트 스캐어 방법과 적응인식 방법으로 동적 모델을 찾았다. 동적모델로 외란을 보상하기 위한 제어입력을 계산하고 PD 제어, 반복 리스트 스캐어 모델 베이스 제어, 적응 모델 베이스 제어를 롤 운동제어에 적용했다. 수중로봇의 시스템을 설명하고 제안한 제어기의 시뮬레이션과 실험결과를 보인다.

핵심용어 : 롤 운동, 모델-베이스 제어기, 수중로봇, 병렬기구 머니플레이터, 항만공사

Abstract : We have been developing an underwater robot for harbour construction using a parallel mechanism. The robot is attached to the rope of a crane, which carries a large stone into the undersea. The robot's yaw and pitch are controlled by hydraulic cylinders but its roll is uncontrollable. We mount propellers in both side of the robot to generate the roll motion. This paper studies on the control for the roll motion of a underwater robot. A gyro-sensor is used to measure the angle in a roll motion. We develop the dynamic model to describe the robot's roll motion by a second order non-linear system and identify the model parameters by recursive least square and adaptive identifier. PD control, recursive model based control and adaptive model based control are applied with the dynamic model which computes the control input to compensate disturbances. This paper introduces the underwater robot system and presents the simulated and experimental results of the proposed controller.

Key words : roll motion, model-based controller, underwater robot, parallel-typed manipulator, harbor construction

1. 서 론

방파제 피복작업을 위한 수중항만공사 로봇을 개발했다(이 등, 2008). 방파제 피복작업은 사석의 유실을 방지하기 위해 방파제 결면에 2-3톤의 돌을 쌓는 작업이며 이를 위해 바다 속에서 피복석을 짜 맞추는 로봇인 스톤다이버(Stone Diver)와 작업장면을 촬영해 운전실로 전송하는 수중촬영장치를 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 개발하였다. 본 연구에서는 스톤다이버의 롤 운동제어에 관한 것이다.

피복 작업에서 가장 큰 문제는 탁도가 높은 수중에서 작업장면을 촬영하는 방법과 자유자재로 피복석을 조절해 짜 맞추는 방법이다. 이를 해결하기 위해 탁도가 높은 수중에서도 촬영할 수 있도록 맑은 물이 담겨있는 투명박스과 이를 이동시키는 이동 틀로 수중촬영장치를 개발하였으며 투명박스 뒤에

수중카메라가 설치되어 원거리에서 넓게 수중촬영을 할 수 있다.

무거운 피복석을 핸들링하고 방파제 면에 피복석을 차곡차곡 쌓기 위해 가반중량이 크고 조립성이 뛰어난 병렬기구 로봇과 이동 틀을 조합해 6 자유도의 스톤 다이버를 개발하였다. 병렬기구는 두 개의 유압 실린더와 중앙축으로 이루어져있다(Kim et al., 2005). 두 개 실린더가 플랫폼을 밀고, 당기면 중앙축이 운동을 구속해 요오, 피치운동을 생성하고 플랫폼 밑에 장착된 스톤 그레플이 피복석을 집는다. 기중기가 스톤다이버를 작업 장소에 적당히 위치시키면 이동 틀이 상하, 전후, 좌우의 위치 운동을 생성하고 병렬기구가 방파제 경사면에 맞게 피복석의 각도를 맞추어 피복 작업을 한다. 또, 로프에 매달린 스톤다이버를 프로펠러가 회전시켜 주위 돌 사이에 피복석을 끼워 넣을 수 있도록 롤 운동을 생성한다.

† 교신저자 : 김치효(정회원), chkim@changwon.ac.kr 055)275-7553

* 정회원, kwoopark@sarim.changwon.ac.kr 055)265-7553

** 정회원, tskim@rotos.biz 055)275-7553

*** 정회원, minkilee@changwon.ac.kr 055)213-3663

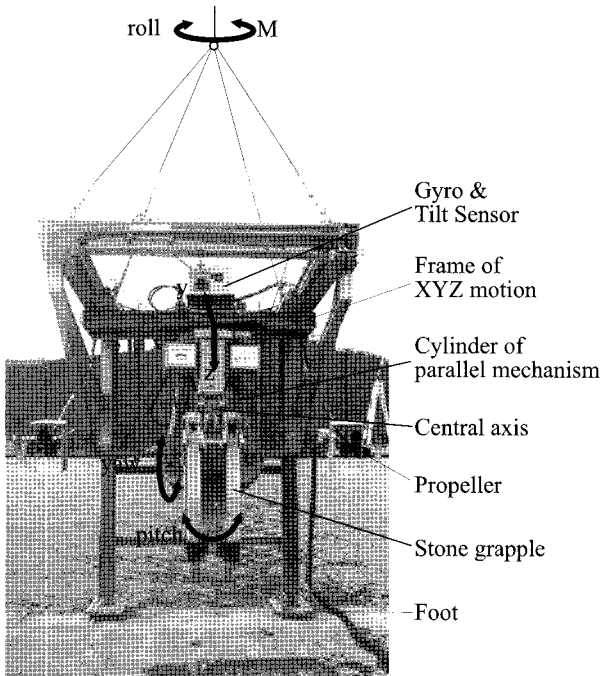


Fig. 1 Stone Diver

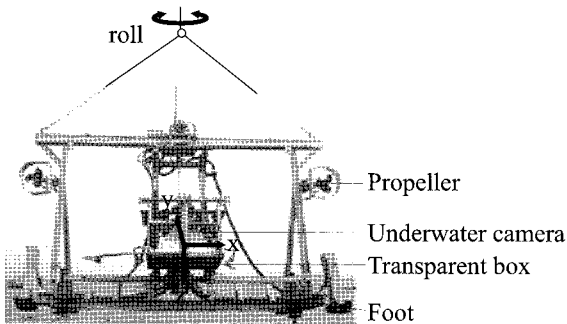


Fig. 2 Underwater filming equipment

스톤다이버의 수중운동에 있어서 문제가 되는 것은 파랑, 파력 및 기증기 로프에 의한 흔들림과 회전이다. 로봇무게가 아래쪽으로 향함으로 x, y, z 방향과 요오, 피치 방향의 흔들림은 크지 않으나 로프를 중심으로 회전하는 롤 운동은 아무런 제약 없이 임의로 회전한다. 본 연구에서는 수중로봇의 위치를 유지하면서 롤 운동만 이뤄지는 프로펠러의 제어조건을 찾고 파력 등의 외란을 극복하며 입력에 응답이 빠른 모델-베이스 제어를 개발한다.

수중로봇도 일반 로봇과 같이 여러 가지 제어방법이 적용되었으나 특수한 환경 때문에 실제 적용한 사례는 흔치않다. Slotine and Yoerger(1985)는 동특성식을 자유도에 따라 분리해 X, Y와 헤딩 운동에 슬라이딩 모드 제어를 적용해 시뮬레이션으로 보였다. 그 외에도 뉴럴과 퍼지 논리제어(Kim and Yuh, 2001) 등이 연구되었다. 지금까지 연구는 수중차량이 위치/속도 명령을 단순히 따라가는 추종제어이다. 진보된 제어를 적용해 로봇이 항만공사와 같은 특수한 작업에 적용한 사례는 없다. 본 연구에서는 수중방파제 피복작업을 수행할 로봇에 진보된 제어를 적용하여 로프를 중심으로 회전하는 롤 운동의

일정한 각도 유지제어와 궤적명령에 따라 운동하는 추종제어에 초점을 맞춘다.

로봇의 롤 운동을 2차 비선형으로 모델링하고 3-종류의 제어, 즉 PD 제어, Recursive least square Model Based(RMB) 제어, Adaptive Model Based(AMB) 제어를 적용한다. 로봇의 모델을 고려하지 않은 PD 제어는 다른 제어의 성능을 비교하는 기준으로 사용한다. RMB 제어는 Recursive Least Square(RLS)방법으로 모델 변수를 예측하고 동적영향을 고려해 로봇을 제어한다. AMB 제어는 Smallwood and Whitcomb (2004)이 제시한 모델변수 갱신규칙과 Erlic and Lu(1995)의 속도 관측방법을 이용해 가속도나 속도의 정보가 없이 위치 정보만으로 변수를 찾아 제어한다. 시뮬레이션과 실험결과로부터 3-종류의 제어성능을 비교분석하고 노이즈, 파력 등의 외란에 따른 각 제어의 특징을 보인다.

2. 수중로봇의 롤 제어 시스템

수중로봇은 유체역학을 고려한 유한요소법과 무한요소법으로 모델링된다. 각 자유도의 간섭과 롤 운동에 영향이 적은 부가관성모멘트를 무시하고 2차계 비선형 모델을 수중로봇의 롤 운동에 적용하면

$$M(t) = \dot{I}w(t) + d_Q w(t) |w(t)| + d_L w(t) + b \quad (1)$$

으로 $M(t)$ 는 네트 모멘트, $\dot{w}(t)$ 와 $w(t)$ 는 각가속도 및 각속도, I 는 롤 운동에 대한 관성 모멘트, d_Q 와 d_L 는 유체역학적 인력, 그리고 b 는 부력이다.

프로펠러에 의해 로프를 중심으로 회전하는 네트 모멘트는

$$M(t) = l_L f_L(t) - l_R f_R(t) \quad (2)$$

이다. 여기서 l_L 과 l_R 은 로프에서부터 왼쪽/오른쪽 프로펠러까지의 거리이며 $f_L(t)$ 과 $f_R(t)$ 은 양쪽 프로펠러의 추진력이다. 양쪽 추진력의 크기가 같고 방향이 반대일 때 최대의 모멘트를 얻을 수 있다. 두 추진력이 다를 경우 로봇은 전진하거나 후진하면서 롤 운동을 하게 된다. 전압 $V_L(t)$ 이 왼쪽 유압서보밸브에 인가될 때 짝힘을 내기 위한 오른쪽 유압서보밸브의 전압 $V_R(t)$ 은

$$V_R(t) = \chi(V_L(t)) \quad (3)$$

으로 $\chi(\cdot)$ 는 짝힘을 생성하는 전압 함수로 정의한다. 제어입력을 하나로 통일하기 위해 $V_L(t)$ 에 상응하는 $V_R(t)$ 을 찾아 종속되도록 하고 $V_L(t)$ 을 제어입력으로 하여 2개의 유압서보모터로 1-자유도의 롤 운동을 제어한다. 두 프로펠러가 완벽한 짝힘을 이룰 경우 네트 모멘트는

$$M(t) = \mathcal{J} V_L(t) \quad (4)$$

으로 여기서 \mathcal{J} 는 입력전압과 네트 모멘트의 관계를 나타내는 상수이다. 식(4)를 식(1)에 대입하면

$$V_L(t) = \beta_1 \dot{w}(t) + \beta_2 w(t) |w(t)| + \beta_3 w(t) + \beta_4 \quad (5)$$

으로 $\beta_1 = \mathcal{J}^{-1} I$, $\beta_2 = \mathcal{J}^{-1} d_Q$, $\beta_3 = \mathcal{J}^{-1} d_L$, $\beta_4 = \mathcal{J}^{-1} b$ 이다. 위식으로부터 가속도를 유도하면

$$\dot{w}(t) = a_1 V_L(t) + a_2 w(t) |w(t)| + a_3 w(t) + a_4 \quad (6)$$

이며 다음과 같이 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\dot{w}(t) = A^T s(t) \quad (7)$$

여기서 $A = [a_1; a_2; a_3; a_4]_{4 \times 1}$ 는 변수벡터이고 $s(t) = [V_L(t); w(t) |w(t)|; w(t); 1]_{4 \times 1}$ 는 제어입력과 속도로 이뤄진 상태벡터이며 변수벡터의 요소는 $a_1 = \Gamma^{-1} \mathcal{J}$, $a_2 = -\Gamma^{-1} d_Q$, $a_3 = -\Gamma^{-1} d_L$, $a_4 = -\Gamma^{-1} b$ 로 정의된다.

위에서 모델링된 변수를 RLS 방법(Smallwood and Whitcomb, 2003)을 이용해 찾아낸다. RLS는 예측된 각가속도와 실제 측정된 각가속도의 오차를 줄이도록 모델변수를 갱신한다.

RLS는 동적방정식을 정확히 모델링한 것이나 가속도 및 속도의 정보를 필요로 한다. 일반적으로 로봇에서 가속도를 측정하는 센서는 설치되지 않으며 속도를 미분해 사용한다. 이 때 노이즈는 가속도를 오염시켜 변수인식에 오차를 야기한다. 따라서 가속도 측정 없이 속도 또는 위치만으로 모델변수를 찾는 방법(Smallwood and Whitcomb, 2004; Erlic and Lu, 1995)들이 제시되었다. 본 논문에서는 Smallwood and Whitcomb (2004)이 제시한 적응예측기와 Erlic and Lu(1995)이 제안한 관측기를 이용해 위치측정만으로 변수를 찾는 인식기를 설계해 제어하고자 한다.

3. 수중로봇 제어

수중로봇의 제어는 대부분 각 자유도에 대해 PD 제어로 행해졌다. PD 제어는 로봇 모델이 선형이고 외란이 일정할 경우 위치를 유지하는 성능은 우수하다. 스톤다이버의 경우 파랑, 파력 등에 의해 예상할 수 없는 외력을 받을 때 이를 극복할 수 있는 제어가 필요하다. 본 단원에서는 기본적인 PD 제어와 2 종류의 모델 베이스 제어를 제안한다.

3.1 PD 제어기

동특성을 고려하지 않고 PD 제어기로 폐 루프를 구성하면 제어입력은 다음과 같다.

$$V_L(t) = K_p \Delta \theta(t) + K_d \Delta w(t) \quad (8)$$

여기서 K_p 와 K_d 는 PD 게인 값이며 $\Delta \theta(t)$ 와 $\Delta w(t)$ 는 각

각 위치 및 속도 오차이다. PD제어는 일반적으로 많이 사용되므로 모델 베이스 제어의 성능을 비교하는 기준으로 한다.

3.2 RMB 제어기

RLS 방법으로 동적모델 변수를 찾고 동특성을 고려해 제어 입력을 계산하면

$$V_L(t) = \beta_1 \dot{w}_d(t) + \beta_2 w_a(t) |w_a(t)| + \beta_3 w_d(t) + \beta_4 + K_p \Delta \theta(t) + K_d \Delta w(t) \quad (9)$$

이다. 여기서 $\theta_d(t)$, $w_d(t)$, $\dot{w}_d(t)$ 는 각각 목표 각도, 각속도 및 각가속도이고, $\theta_a(t)$, $w_a(t)$, $\dot{w}_a(t)$ 는 실제 각도, 각속도 및 각가속도이며 $\Delta \theta(t) = \theta_d(t) - \theta_a(t)$, $\Delta w(t) = w_d(t) - w_a(t)$, $\Delta \dot{w}(t) = \dot{w}_d(t) - \dot{w}_a(t)$ 이다. 식(9)을 식(5)에 대입하면 폐 루프 동특성식이 다음과 같이 얻어진다.

$$0 = \beta_1 \Delta \dot{w}(t) + (\beta_3 + K_d) \Delta w(t) + K_p \Delta \theta(t) \quad (10)$$

위식은 위치오차에 대해 2차 선형 시스템으로 계수 β_1 , β_3 , K_d , K_p 가 모두 양수이므로 안정적이고 모든 오차는 0에 수렴한다.

3.3 AMB 제어기

예측한 모델 변수($\hat{\beta}_1(t)$, $\hat{\beta}_2(t)$, $\hat{\beta}_3(t)$, $\hat{\beta}_4(t)$)를 사용하고 각도 정보만 사용하기 위해 P 제어만 적용하여 제어입력을 계산하면

$$V_L(t) = \hat{\beta}_1(t) \dot{w}_d(t) + \hat{\beta}_2(t) w_a(t) |w_a(t)| + \hat{\beta}_3(t) w_d(t) + \hat{\beta}_4(t) + K_p \Delta \theta(t) \quad (11)$$

이다. 모델변수의 오차를 아래와 같이 정의한다.

$$\Delta \beta_i = \hat{\beta}_i - \beta_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

$$\Delta \Psi(t) = \hat{\Psi}(t) - \Psi$$

여기서 $\hat{\Psi} = [\hat{\beta}_1; \hat{\beta}_2; \hat{\beta}_3; \hat{\beta}_4]_{4 \times 1}$ 는 제어기가 예측한 모델 변수벡터로 실제 시스템의 모델변수 $\Psi = [\beta_1; \beta_2; \beta_3; \beta_4]_{4 \times 1}$ 의 예측한 값이다. 식(11)을 식(5)에 대입하고 $\Delta \dot{w}(t)$ 에 관하여 다시 정리하면

$$\Delta \dot{w}(t) = -\beta_1^{-1} (\Delta \Psi(t)^T X(t) + \beta_2 (w_a(t) |w_a(t)| - w_a(t) |w_a(t)|) + (\beta_3 + K_d) \Delta w(t) + K_p \Delta \theta(t)) \quad (13)$$

이다. 여기서 $X(t) = [\dot{w}_d(t); w_d(t) |w_d(t)|; w_d(t); 1]_{4 \times 1}$ 이다. 식(13)의 변수 오차를 감안한 항을 첨가해 Lyapunov 함수의 후보를 다음과 같이 정의한다(Smallwood and Whitcomb, 2004).

$$W(\Delta\theta(t), \Delta w(t), \Delta\Psi(t)) = \frac{1}{2} K_p \Delta\theta(t)^2 + \frac{1}{2} \beta_1 \Delta w(t)^2 + \frac{1}{2} \Delta\Psi(t)^T \Gamma^{-1} \Delta\Psi(t) \quad (14)$$

식 (14)를 시간으로 미분하고 식 (13)의 $\Delta\dot{w}(t)$ 를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{W}(\Delta\theta(t), \Delta w(t), \Delta\Psi(t)) &= -\Delta\Psi(t)^T X(t) \Delta w(t) \\ &- \beta_2 (w_d(t)|w_d(t)| - w_a(t)|w_a(t)|) \Delta w(t) \\ &- (\beta_3 + K_d) \Delta w(t) \Delta w(t) + \Delta\Psi(t)^T \Gamma^{-1} \Delta\dot{\Psi}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

이다. 여기서, $-(\beta_3 + K_d) \Delta w(t) \Delta w(t) < 0$, $-\beta_2 (w_d(t)|w_d(t)| - w_a(t)|w_a(t)|) \Delta w(t) < 0$ 이므로 안정하기 위해서는

$$-\Delta\Psi(t)^T X(t) \Delta w(t) + \Delta\Psi(t)^T \Gamma^{-1} \Delta\dot{\Psi}(t) = 0 \quad (16)$$

이 되어야 한다. 그러므로 다음과 같이 파라미터는 업데이트 된다.

$$\Delta\dot{\Psi}(t)_{4 \times 1} = \Lambda X(t) \Delta w(t) \quad (17)$$

여기서 $\Lambda_{4 \times 4} = \text{diag}[\gamma_i]$, for $i = 1 \dots 4$, $\gamma_i > 0$ 으로 변수갱신 계인 이다. 실제 시스템의 모델 변수는 시간에 따라 변하지 않으므로 $\dot{\Psi}(t) = 0$ 이다. 따라서 $\Delta\dot{\Psi}(t)_{4 \times 1} = \dot{\hat{\Psi}}(t)_{4 \times 1}$ 이며 식(17)을 구간 $[t_0, t]$ 동안 적분하면

$$\hat{\Psi}(t) = \hat{\Psi}(t_0) + \Lambda \int_{t_0}^t X(t) w_d(t) dt - \Lambda \int_{\theta_a(t_0)}^{\theta_a(t)} X(t) d\theta_a \quad (18)$$

으로 변수를 갱신할 때 속도와 가속도를 측정할 필요가 없다. $X(t)$, $w_d(t)$, $\theta_a(t)$ 가 연속적이고 샘플링 시간 t_d 가 충분히 작다면 식(18)은 다음과 같이 변수를 갱신하는 이산화 규칙을 유도할 수 있다.

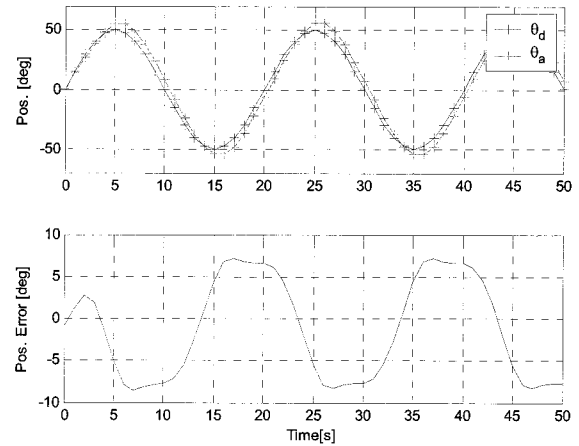
$$\begin{aligned} \hat{\Psi}(i+1) &= \hat{\Psi}(i) + \Lambda [X(i) w_d(i) t_d - X(i) (\theta_a(i+1) \\ &- \theta_a(i))] \end{aligned} \quad (19)$$

4. 시뮬레이션

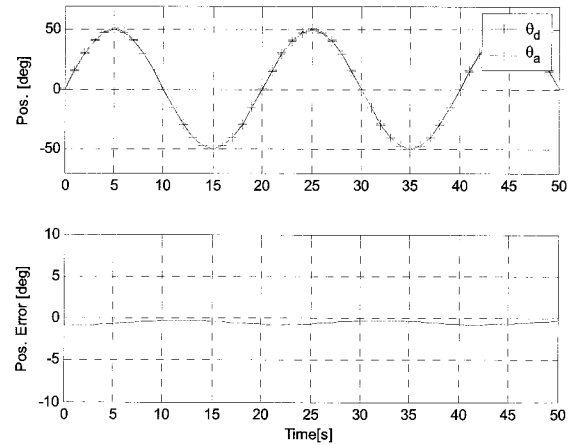
수중로봇의 실험에 앞서 시뮬레이션을 통하여 PD 제어, RMB 제어 및 AMB 제어의 성능을 비교한다. 시뮬레이션 파라미터는 Table 1과 같이 정의하였다. 그리고 $|V_R| = |V_L|$, $l_L = l_R = 1300[\text{mm}]$, $\mathcal{J} = 2.6$ 및 $-10V \leq V_L \leq 10V$ 으로 한다.

위치명령 $\theta_d = 50 \sin(2\pi(1/20)t)$ 로 주었을 때 각 제어기의 성능을 검토한다. Fig. 3는 각 제어기의 위치추종결과(상부 그래프) 및 위치오차(하부 그래프)를 나타낸다. PD제어는 시스템

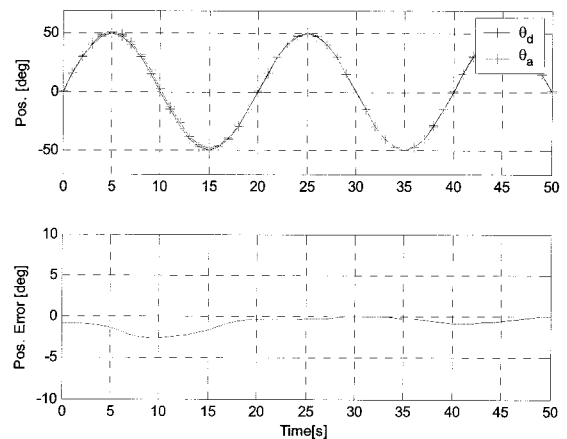
모델을 반영하지 않아 회전방향이 바뀔 때 최대 8도의 위치오차가 발생하면서 θ_d 를 늦게 추종한다. RMB는 1도 이내의 위치오차를 유지하며 AMB는 파라미터를 인식하는 과정에 3도 정도의 오차가 있다. RMB와 AMB는 PD제어에 비해 위치오차가 작으며 응답속도가 빠르다. Fig. 4는 AMB의 파라미터 수렴결과이다. 각 파라미터는 초기값 0에서 Table 1의 설정된 파라미터까지 수렴한다.



(a) PD



(b) RMB



(c) AMB

Fig. 3 Simulation results of PD, RLS and AMB

Table 1 Simulation parameters

| Physical parameter | | PD gain | | | Update gain | |
|--------------------|----------------------------------|------------|-------|-------|-------------|-------|
| I | 2266.31 [Kg m ² /rad] | controller | K_P | K_d | γ_1 | 5000 |
| d_Q | 5173.37 [Kg m ²] | PD | 1000 | 500 | γ_2 | 20000 |
| d_L | 0 [Kg m ² /rad*s] | RMB | 500 | 200 | γ_3 | 0 |
| b | -10.96 [N-m] | AMB | 500 | - | γ_4 | 10 |

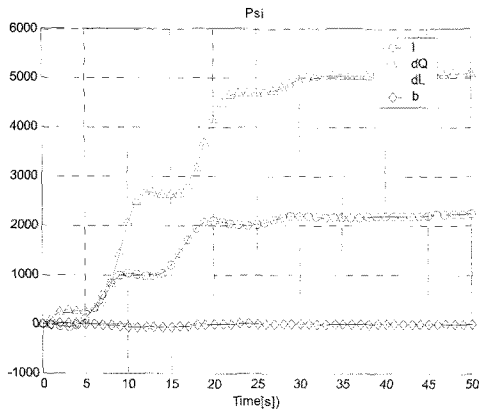


Fig. 4 Parameter identification

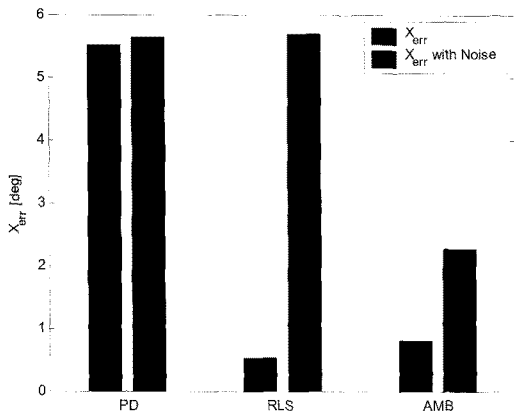


Fig. 5 Simulated tracking error in PD, RMB, AMB

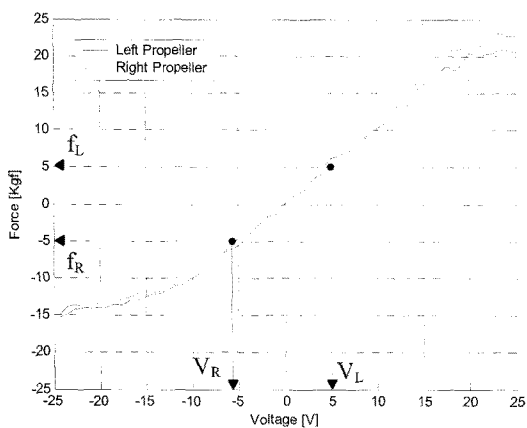


Fig. 6 Propeller force for V_L and V_R

위치 정보에 $\pm 1^\circ$ 이내의 랜덤 화이트노이즈를 추가하여 제어기 성능을 검토하였다. Fig. 5는 노이즈가 없을 경우와 있을 경우의 $X_{err} = \text{mean}(|\theta_d - \theta_a|)$ 을 막대그래프로 나타낸 것이다.

PD제어는 노이즈에 대한 성능변화가 거의 없으며 RMB 제어기는 성능이 현격히 떨어진다. 이는 노이즈를 포함한 위치를 미분한 속도와 가속도 정보를 사용함으로써 변수 인식에 큰 오차가 발생했기 때문이다. 그러나 위치 정보만 사용해 변수를 갱신하는 AMB는 큰 차이 없이 변수 값에 수렴하여 노이즈가 있을 경우에도 좋은 성능을 보인다.

5. 현장실험

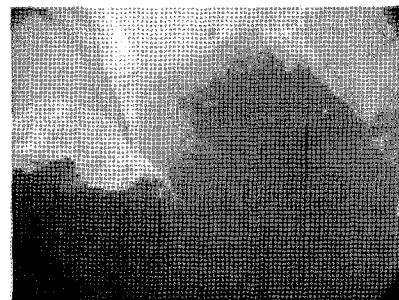
양쪽 프로펠러를 구동하는 서보밸브에 $-25V \sim 25V$ 를 인가하여 프로펠러의 전/후진력을 측정하였다. Fig. 6은 두 전압에 대한 추진력을 나타낸다. 왼쪽 서보밸브에 V_L 을 인가하면 f_L 의 추진력이 발생하고 이와 짝힘이 되는 $f_R = -f_L$ 을 생성하기 위한 오른쪽 서보밸브의 전압은 V_R 이다. 프로펠러의 특성상 전진과 후진 때 추진력은 다르고 비선형성으로 나타난다. 본 연구에서는 선형성이 좋은 $-10V \sim 10V$ 구간을 제어입력으로 사용하고 보간법을 이용하여 실험 데이터로부터 짝힘을 구하는 함수 $\chi(\cdot)$ 를 구한다.



(a) Field test of Stone Diver and underwater filming equipment



(b) Roll motion of Stone Diver



(c) Assembling Armour stone by Stone Diver

Fig. 7 Performance test of Stone Diver and Underwater filming equipment



Fig. 8 Operating room

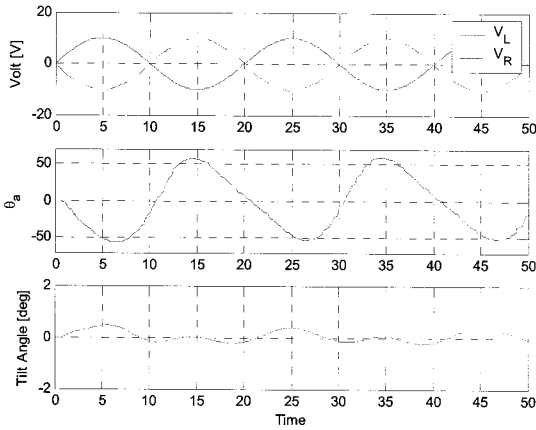


Fig. 9 Angle of inclination representing the disturbance from the uncoupled forces when $V_L = 10\sin(2\pi(1/20)t)$

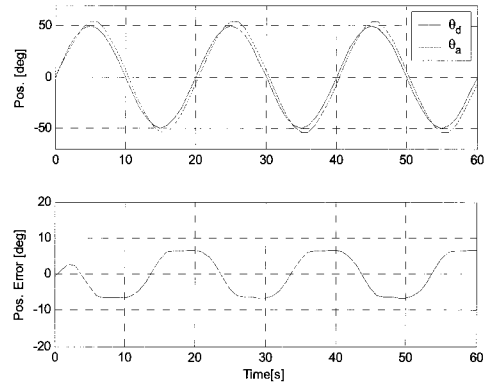
스톤다이버를 Fig. 7과 같이 현장에 투입하여 성능을 검증했다. 바지선 위에 피복작업을 위한 크레인, 굴삭기 장비가 설치되고 수중촬영장치가 수중에서 작업할 위치를 촬영하고 있으면 스톤다이버는 피복석을 집고 수심 20~30m까지 내려가 피복작업을 한다. 로프에 매달린 로봇이 파력이나 파랑에 의해 회전하지 않고 롤 방향을 유지하면서 방과제 면에 나란히 내려놓도록 제어되어야 한다. 또한, Fig. 8과 같이 운전자는 수중촬영장치에서 보내온 영상을 보고 피복석을 짜 맞추기 위한 신호를 보내 로봇을 회전시킨다. 수중로봇의 롤 회전 각도를 측정하기 위해 microinfinity 사의 R1001E 자이로 센서를 사용하였으며 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of gyro sensor

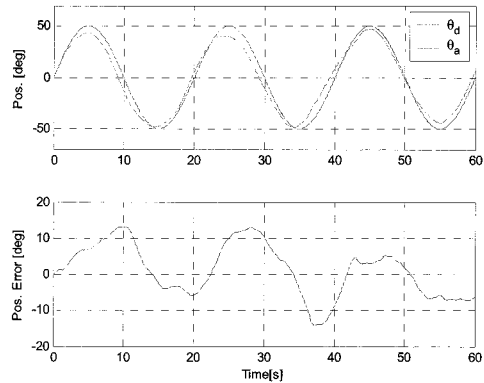
| Performance | value |
|---|------------------------|
| Input Rate(Max) | ± 150 °/sec |
| Rate Noise(1 σ @ 50Hz bandwidth) | < 0.1 °/sec |
| Scale Factor Nonlinearity | < 0.1 % |
| Bandwidth | 10 Hz ~ 50 Hz |
| Output rate Over | Over 100 Hz (UART/SPI) |
| Bias drift | < 10 °/hr |

제어입력 V_L 에 대해 짝힘을 이루면서 롤 운동을 잘 수행하는지 점검했다. 짝힘이 정확히 이루어지지 않으면 전/후진력이

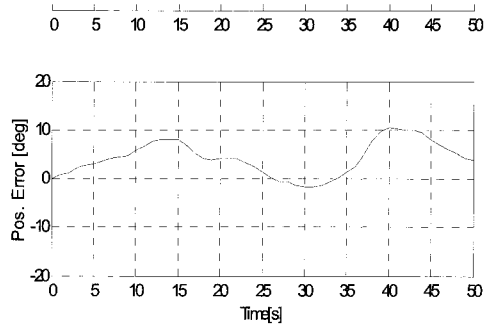
발생하게 되고 로봇의 경사각을 변화시키게 된다. 제어를 하지 않는 상태에서 전압 $V_L=10\sin(2\pi(1/20)t)$ 을 인가했을 때 이와 짝힘이 되는 V_R , 로봇의 롤 운동 그리고 로봇의 경사각은 Fig. 9와 같다. 스톤다이버는 0.5도 이내의 경사각을 이루면서 로프를 중심으로 회전 주기운동을 한다. 따라서 짝힘을 이루는 전압관계는 잘 설정된 것으로 볼 수 있다.



(a) PD



(b) RMB



(c) AMB

Fig. 10 Experimental results of PD, RMB and AMB in case $\theta_d=50\sin(2\pi(1/20)t)$

위치추종명령에 따른 각 제어기의 성능을 비교하기 위해 $\theta_d = 50\sin(2\pi(1/20)t)$ 로 주었다. 샘플링 시간 $t_d = 0.05[s]$ 로 충분히 빠르게 제어를 실시한다. Fig. 10은 각 제어기의 위치추종결과 및 위치오차이다. PD 제어는 제어의 방향이 바뀔 때 최대 8도

의 오차를 가지며 늦게 추종한다. RMB제어는 최대 13도의 오차를 가지며 PD제어보다 성능이 떨어진다. AMB제어는 부분적으로 최대 10도의 오차를 가지지만 전체적인 성향은 PD제어보다 잘 추종한다.

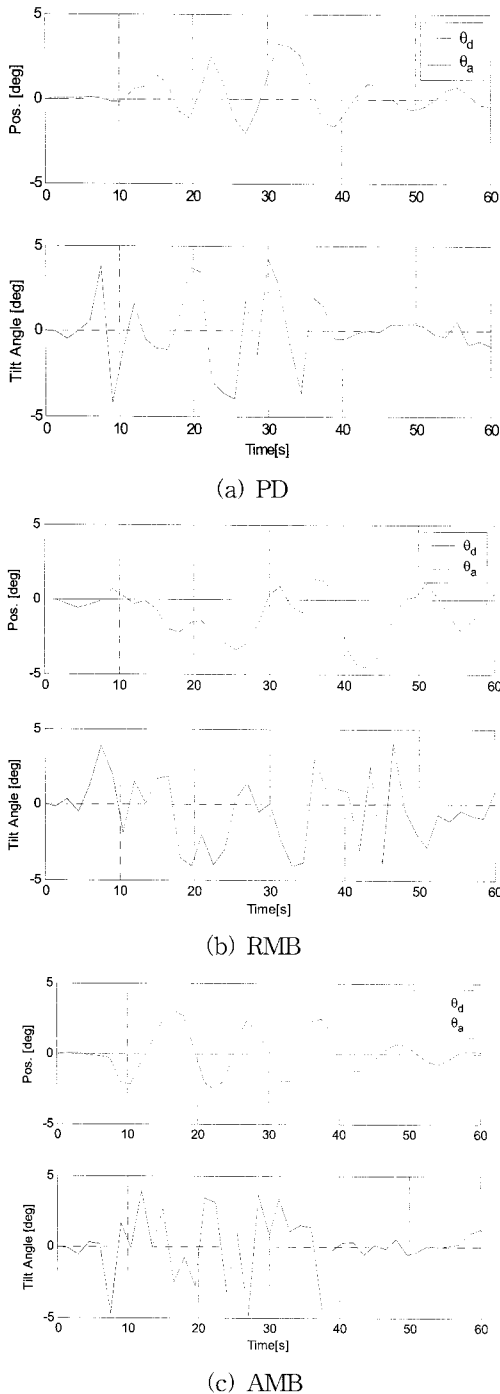


Fig. 11 Experimental results of PD, RMB and AMB in case $\theta_d=0$

의력이 크게 작용할 때 로봇을 수심 20m까지 하강시키고 이 때 $\theta_d=0$ 명령을 주어 각 제어기의 위치유지 성능을 비교했다. Fig. 11은 각 제어기의 위치유지결과 및 각도센서에 의한 로봇

의 경사각 변화이다. 로봇의 경사각은 ± 4 도 이내로 로봇이 큰 파력을 받고 있는 상태에서 PD제어, RMB제어 및 AMB제어는 각각 3도, 5도 및 3도 이내의 오차를 가진다. RMB제어는 위치유지명령에 대해서도 PD보다 좋지 못한 성능을 보인다. AMB제어는 위치정보만 사용해 변수를 갱신하므로 노이즈와 외란에 의한 영향이 작으며 PD제어와 비슷한 성능을 보였다.

Fig. 12는 제어기의 성능을 수치적으로 비교하기 위해 위치 오차의 크기를 X_{err} 로 나타낸 것이다. 위치 유지 명령일 때 보다 위치추종명령일 때 각 제어기의 오차는 크게 나타나며 RMB제어의 오차가 가장 크다. AMB제어기는 PD제어와 비슷한 성능을 보이며 파력, 파랑 등의 외란이 있을 때 운전자 명령 및 수심 20m 까지 내려가는 동안 5도 이내의 오차를 유지한다. 이 정도의 오차는 대형 돌을 쌓는 항만공사 로봇의 운동에는 만족할 만한 결과이다.

시뮬레이션과 다르게 AMB제어의 성능이 PD제어보다 크게 좋지 못한 것은 유압시스템의 비선형성과 파랑, 파력 등의 외란, 자이로 센서의 측정오차가 제어성능을 악화시키기 때문이다. 본 연구로부터 PD제어를 개선하기 위한 AMB제어의 가능성은 입증하였지만 정밀수중작업을 위해서는 유압 서보 시스템 및 측정장치의 개선이 필요하다.

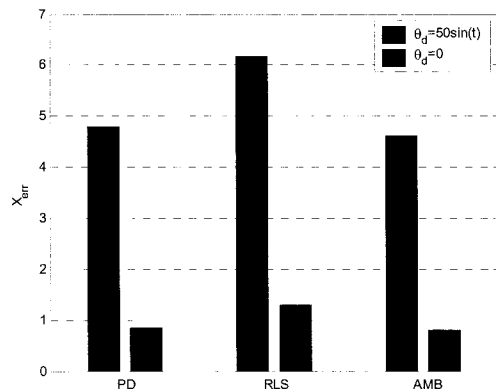


Fig. 12 Experimental tracking errors of PD, RMB and AMB

6. 결 론

본 논문은 수중항만공사 로봇이 수중에서 원하는 물 운동을 생성하거나 유지하면서 방파제 피복작업을 수행할 수 있도록 제어기를 개발했다. 로봇 좌우측에 설치된 프로펠러에 의해 생성되는 물 운동을 2차계 비선형으로 모델링하고, RLS 방법과 적응제어 방법으로 모델링 변수를 찾았다. 물 운동만 생성하기 위해 좌우 프로펠러의 추진력이 짝힘을 이루도록 양쪽 서보밸브에 인가하는 전압관계를 찾았다.

시뮬레이션을 통해 위치 정보에 노이즈가 있을 경우와 없을 경우에 대해 각 제어기의 성능을 비교하였다. 현장투입실험은 파랑과 파력에 의한 외란이 큰 조건에서 수행하였다. 동특성이 포함된 모델-베이스 제어기의 성능은 우수하나 위치정보를 미분해 사용하는 RMB제어는 PD보다 성능이 떨어졌다. 노이즈

에 의해 모델 변수가 잘못 갱신되면 동적 모델을 적용하지 않은 PD제어보다 성능이 나빠졌다. 그러나 RMB제어는 속도와 가속도에 대한 정보만 정확하면 가장 우수한 제어기임을 시뮬레이션에서 입증했다. AMB제어는 PD제어와 비슷한 성능을 보이며 파력, 파랑 등의 외란이 있을 때 운전자 명령 및 수심 20m 까지 내려가는 동안 5도 이내의 오차를 유지하여 항만공사 로봇의 제어로 가능성을 입증했다. AMB제어의 성능이 PD 제어 보다 크게 좋지 못한 이유는 유압시스템의 비선형성과 파랑, 파력 등의 외란, 자이로 센서의 측정오차가 제어성능을 악화시키기 때문이다. 이러한 문제를 개선시키면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

원고접수일 : 2009년 3월 18일
 심사완료일 : 2009년 6월 26일
 원고채택일 : 2009년 6월 29일

후 기

본 연구는 국토해양부 연구개발과제 “수중항만공사 기계화 시공 장비 개발” 로 수행된 것임.

참고문헌

- [1] 이민기 (2008), “수중항만공사 기계화 시공 장비 개발 연구 결과 보고서”.
- [2] Eric, M. and Lu, W. S.(1995), “A Reduced-Order Adaptive Velocity Observer for Manipulator Control”, IEEE Trans on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 2, pp. 293-303.
- [3] Kim, T. S., Park, K. W., Kim, C. H., Park, J. H., and Lee M. K.(2005), “Development of a Parallel Typed Robot with a Sensorless Observer for Harbor Construction”, Int. Conf. on Information Acquisition(IEEE ICIA), pp. 187-192.
- [4] Kim, T. W. and Yuh, J.(2001), “A Novel Neuro-Fuzzy Controller for Autonomous Underwater Vehicles”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2350-2355.
- [5] Smallwood, D. A. and Whitcomb, L. L.(2004), “Model-Based Dynamic Positioning of Underwater Robotic Vehicles: Theory and Experiment”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 1-19.
- [6] Smallwood, D. A. and Whitcomb, L. L.(2003), “Adaptive Identification of Dynamically Positioned Underwater Robotic Vehicles”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11 No. 4, pp. 505-515.
- [7] Yoerger, D. R. and Slotine, J. J. E.(1985), “Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 462-470.