

수중 선체에 장착된 로봇팔 궤적의 비귀환형 적응제어

이판목* · 여준구**

*한국해양연구소 선박해양공학분소 해양개발시스템연구센터

**하와이대학교 기계공학과

Non-regressor Based Adaptive Tracking Control of an Underwater Vehicle-mounted Manipulator

PAN-MOOK LEE* AND JUNKU YUH**

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI, Yusung, Taejeon 305-600, Korea

**Mechanical Engineering, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822, USA

KEY WORDS: Underwater manipulator 수중 로봇팔, unmanned underwater vehicle 무인잠수정, Adaptive control 적응제어, Disturbance 외란, Non-regressor 비귀환기

ABSTRACT: This paper presents a non-regressor based adaptive control scheme for the trajectory tracking of underwater vehicle-mounted manipulator systems (UVMS). The adaptive control system includes a class of unmodeled effects is applied to the trajectory control of an UVMS. The only information required to implement this scheme is the upper bound and lower bound of the system parameter matrices, the upper bound of unmodeled effects, the number of joints, the position and attitude of the vehicle, and trajectory commands. The adaptive control law estimates control gains defined by the combinations of the bounded constants of system parameter matrices and of a filtered error equation. To evaluate the performance of the non-regressor based adaptive controller, computer simulation was performed with a two-link planar robot model mounted on an underwater vehicle. The hydrodynamic effects acting on the manipulator are included. It is assumed that the vehicle's motion is slow and can be predicted with a proper compensator.

1. 서 론

수중 로봇팔의 제어를 위해서는 공기중 로봇팔의 일반적인 특성뿐 만 아니라 유체 동력학적인 비선형성을 고려한 제어기의 설계가 필요하다. 또한, 수중 선체에 탑재된 로봇팔의 경우는 로봇팔의 베이스에 선체의 6 자유도 운동으로 인한 외란이 작용하므로 이를 고려한 로봇팔 제어기를 구성하지 않으면 수중 작업을 원활히 수행할 수 없게 된다. 공기중 로봇팔 제어기는 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이에 대한 해석법 및 응용 사례를 서적(Craig, 1988; Yoshikawa, 1990)이나 Abdallah *et al.*(1991) 논문 등 다양한 문헌을 통하여 얻을 수 있다. 그러나, 수중 로봇팔에 대한 연구는 극히 제한적인 분야에서 이루어지고 있다 (Mahesh, *et al.*, 1991; Shoults, 1996; McLain, *et al.*, 1996).

수중 로봇팔의 비선형성과 불확실성을 고려한 제어기의 하나로 적응제어기를 선택할 수 있다. 적응제어기는 귀환적인 시스템 파라미터의 추정을 통한 제어기의 설계가 일반적이나 (Craig, 1988; Ortega, *et al.*, 1989; Yuh and Holley, 1988), 이 방법은 추정변수의 차원이 커지는 경우 계산량이 증가한다. 또한, 이들 방법은 동적인 모델을 알고 있다는 가정이 필요하며, 센서 노이즈나 외란을 고려하기 위한 별도의 메커니즘을 필요

로 하므로(Reed and Ioannou, 1989), 수중 로봇팔과 같이 불확실하며 시변인 유체 외란을 받는 시스템에 대해서는 원하는 성능을 얻기 힘들다.

이러한 귀환형 적응제어기의 단점을 보완하는 방편으로 비귀환형(non-regressor based) 적응제어법에 대한 연구사례가 최근에 보고되고 있다. 이 제어법은 로봇팔의 시스템 파라미터의 경계값(bound)을 추정하고 이를 이용하여 제어 게인을 조정하는 방법이다. (Choi and Yuh, 1996)는 시스템 파라미터와 외란의 경계값으로 조합된 변수를 추정하였고, 수중 로봇에 대한 심도제어 실험에 적용한 바 있다. 이 방법은 초기 입력 변화가 과도한 것과 파라미터 추정이 단순 증가(monotonically increase)하여 경계값을 과도하게 초과 추정하는 단점이 있다. Tarokh(1996)는 로봇팔 각각의 조인트의 경계값으로 구성된 6개의 파라미터를 이용하여 파라미터를 추정하는 분산(decentralized) 적응제어법을 제안하였다. 그는 조인트의 요구되는 속도와 가속도의 정규(norm)를 제어 게인의 항목에 포함시켰으며, Puma 560 로봇에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Song(1996)은 형상함수(shape function)와 모든 파라미터의 경계 최대값의 추정치를 이용하는 적응제어기를 제안하였으며, 이 적응제어기는 각 조인트에 대해서 PD 제어기 구조로 구성되었다. 언급한 모든 제어법에 있어서 Lyapunov 법을 이용하여

제어기의 안정성이 검증되었다. 한편, (Lee and Yuh, 1999)는 문헌 (Choi and Yuh, 1996)의 비귀환형 적응제어기의 변수추정법을 개선하여 초기 과도입력 및 파라미터 추정이 과도하게 되는 단점을 보완하였으나, 안정성 검토가 이루어지지 않았다.

본 논문은 문헌(Lee and Yuh, 1999)에서 제안된 변수추정법 및 이에 따른 위치오차에 대해서 Lyapunov 법을 이용하여 비귀환형 적응제어기의 안정성을 검증하였고, 수중 선체에 장착된 로봇팔 (underwater vehicle-mounted manipulator systems, UVMS)의 위치추적제어를 수치 시뮬레이션하였다. 이 제어법은 모든 작업조건에 있어서 모델링되지 않은 유체 동력학적 외란의 경계값이 유한한 최대값을 갖는다는 가정에 기초한다. 또한 이 제어법은 동력학적인 모델링이나 로봇팔 파라미터의 초기값을 필요로 하지 않으므로, UVMS와 같이 비선형성이 강하고 시스템을 모델링하기 어려운 불확실 시스템의 제어에 적용가능하다. 제안된 제어기는 시스템 파라미터 행렬의 경계값 추정치를 조합하여 제어 계인을 구하므로, 제어기의 구조가 간단하고 계산이 효율적이다. 제안된 제어기를 이용하여 수평 운동을 하는 수중 선체에 장착된 2 자유도의 단순 로봇팔의 위치추적 제어에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하여 위치추적 성능 및 변수추정의 수렴성을 검토하였다.

2. 비귀환형 적응제어기

수중 선체에 탑재된 n -조인트 로봇팔의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + h + u_d = u \quad (1)$$

여기서, q 는 $n \times 1$ 조인트 각도 벡터이고, u 는 $n \times 1$ 입력 토크 벡터이고, $M(q)$ 는 부가질량을 포함하는 $n \times n$ 질량행렬이고, $C(q, \dot{q})$ 는 항력, 원심력, 및 Coriolis 힘을 포함하는 $n \times n$ 행렬이고, h 는 $n \times 1$ 중력 및 부력 벡터이다. u_d 는 모델링되지 않은 유체 외력 및 베이스의 운동에 기인하는 외란 성분을 포함하는 벡터로써, 선체 운동 및 로봇팔의 운동이 유한하다는 가정 하에 다음과 같은 경계값에 대한 관계식을 갖는다.

$$\|u_d\| \leq d_0 + d_1\|\dot{e}\| + d_2\|e\| \quad (2)$$

여기서, $d_i (i=0,1,2)$ 는 양의 상수이며, 위치추적오차 벡터 e 는 다음과 같이 정의하였다.

$$e = q_d - q \quad (3)$$

여기서, q_d 는 요구되는 q 값을 나타낸다.

로봇팔의 시스템 파라미터가 다음과 같이 유한(bound)하다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \|M^{-1}\| &\leq \alpha, \|M\| \leq \beta_1, \|C\| \leq \beta_2, \\ \|h\| &\leq \beta_3, \lambda_{\min}(M^{-1}) > \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\|\cdot\|$ 는 Euclidean norm을 나타내고, λ_{\min} 은 최소

고유치를 나타내며, α , β_i , 및 γ 는 양의 상수를 나타낸다. 식 (4) 대신에 다음과 같이 정의된 새로운 변수

$$\theta_i = \frac{\alpha(\beta_i + d_{i-3})}{\gamma} \quad i=1, \dots, 5 \quad (5)$$

를 이용하여 파라미터 추정을 수행하고자 한다. 여기서, $\beta_4 = \beta_5 = \eta/\alpha$ 이며, η 는 식(4)의 조건을 만족시키는 양의 상수, $d_i = 0$ (for $i < 3$)이다.

본 논문에서는 다음과 같은 제어법칙을 선택하였다.

$$u = K_1\ddot{q}_d + K_2\dot{q} + K_3x + K_4\dot{e} + K_5e = \sum_{i=1}^5 K_i\Phi_i \quad (6)$$

여기서, $\Phi_1 = \ddot{q}_d$, $\Phi_2 = \dot{q}$, Φ_3 는 양의 상수 x , $\Phi_4 = \dot{e}$, $\Phi_5 = e$, K_i 는 제어 게인 행렬이다.

식(1)과 식(6)을 이용하여 오차 방정식이 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= M^{-1}\{(M-K_1)\ddot{q}_d + (C-K_2)\dot{q} \\ &\quad + (h/x - K_3)x + u_d - K_4\dot{e} - K_5e\} \\ &= M^{-1}\sum_{i=1}^5 (P_i - K_i)\Phi_i + M^{-1}u_d \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $P_1 = M$, $P_2 = C$, $P_3 = h/x$, $P_4 = P_5 = 0$ 이다.

정리: 식(8)과 식(9)로 나타낸 제어 게인과 파라미터 추정식을 갖는 제어시스템 식(6)은 위치추적 오차 e 가 점근적으로 영에 수렴하여 최종유한(ultimately bound)하며, 파라미터 추정치는 임의의 유한 범위를 갖는 상수에 수렴한다.

$$K_i = \frac{\hat{\theta}_i \hat{e} \Phi_i^T}{\|\hat{e}\| \|\Phi_i\|} \quad i=1, \dots, 5 \quad (8)$$

$$\hat{\theta}_i = \begin{cases} f_i \|\hat{e}\| \|\Phi_i\| & \text{if } \|\hat{e}\| \|\Phi_i\| \geq \mu_i \\ -\varepsilon_i \hat{\theta}_i + f_i \|\hat{e}\| \|\Phi_i\| & \text{if } \|\hat{e}\| \|\Phi_i\| < \mu_i \end{cases} \quad (9)$$

여기서, ε_i 와 f_i 는 양의 상수, $\hat{\theta}_i$ 는 θ_i 의 추정치이며, \hat{e} 는 다음으로 정의된다.

$$\hat{e} = e + \sigma e \quad (10)$$

여기서, σ 는 $\sigma < \eta$ 과 $\eta > 1$ 을 만족하는 양의 상수이며, $\mu_i < 1$ 이다.

증명: 다음과 같은 Lyapunov 식을 선택하여

$$V = \frac{1}{2} \hat{e}^T \hat{e} + \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 f_i^{-1} \gamma (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2 \quad (11)$$

이를 미분하고 식 (7)을 대입하여 정리하면 다음 식이 얻어진다.

$$\dot{V} = \hat{e}^T \dot{\hat{e}} + \sigma \hat{e}^T \dot{e} + e^T \dot{e} - \sum_{i=1}^5 f_i^{-1} \gamma (\theta_i - \hat{\theta}_i) \dot{\hat{\theta}}_i$$

$$\begin{aligned}
&= \left[\dot{e}^T (M^{-1} \sum_{i=1}^5 P_i \Phi_i + M^{-1} u_d) + \sigma \dot{e}^T \dot{e} \right. \\
&\quad \left. + e^T \dot{e} - \sigma e^T e - \sum_{i=1}^5 f_i^{-1} \gamma \theta_i \hat{\theta}_i \right] \\
&\quad + \left[-\dot{e}^T M^{-1} \sum_{i=1}^5 K_i \Phi_i + \sum_{i=1}^5 f_i^{-1} \gamma \hat{\theta}_i \dot{\theta}_i \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

적응제어기 식(8)과 (9) 및 $\sigma < \eta$ 조건을 대입하면, 식(12)의 첫 번째 괄호는 다음과 같으며,

$$\begin{aligned}
&\dot{e}^T (M^{-1} \sum_{i=1}^5 P_i \Phi_i + M^{-1} u_d) + \sigma \dot{e}^T \dot{e} + e^T \dot{e} - \sigma e^T e \\
&\quad - \sum_{i=1}^5 f_i^{-1} \gamma \theta_i \hat{\theta}_i \\
&= \dot{e}^T \sum_{i=1}^5 M^{-1} P_i \Phi_i - \sum_{i=1}^5 \alpha \beta_i \|\dot{e}\| \|\Phi_i\| + \sigma \dot{e}^T \dot{e} \\
&\quad - \eta (\|\dot{e}\| \|\dot{e}\| + \|\dot{e}\| \|\dot{e}\|) + \dot{e}^T M^{-1} u_d \\
&\quad - \alpha (d_0 \|\dot{e}\| + d_1 \|\dot{e}\| \|\dot{e}\| + d_2 \|\dot{e}\| \|\dot{e}\|) \\
&\quad + e^T \dot{e} - \sigma e^T e + \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma \theta_i \hat{\theta}_i \\
&\leq \sum_{i=1}^5 (\|M^{-1}\| \|P_i\| - \alpha \beta_i) \|\dot{e}\| \|\Phi_i\| + (\sigma - \eta) \|\dot{e}\| \|\dot{e}\| \\
&\quad - (\eta - 1) \|\dot{e}\| \|\dot{e}\| + (\|M^{-1}\| - \alpha) (d_0 + d_1 \|\dot{e}\| \\
&\quad \quad + d_2 \|\dot{e}\|) \|\dot{e}\| - \sigma e^T e + \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma \theta_i \hat{\theta}_i \\
&\leq -\sigma e^T e + \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma \theta_i \hat{\theta}_i \quad (13)
\end{aligned}$$

두 번째 괄호는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
&-\dot{e}^T M^{-1} \sum_{i=1}^5 K_i \Phi_i + \sum_{i=1}^5 f_i^{-1} \gamma \hat{\theta}_i \dot{\theta}_i \\
&= \sum_{i=1}^5 \left(-\frac{\dot{e}^T M^{-1} \dot{e}}{\dot{e}^T \dot{e}} + \gamma \right) \|\dot{e}\| \|\Phi_i\| \hat{\theta}_i - \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma \hat{\theta}_i^2 \\
&\leq \sum_{i=1}^5 (-\lambda_{\min}(M^{-1}) + \gamma) \|\dot{e}\| \|\Phi_i\| \hat{\theta}_i - \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma \hat{\theta}_i^2 \\
&\leq -\sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma \hat{\theta}_i^2. \quad (14)
\end{aligned}$$

식(12), (13), 및 (14)으로부터, \dot{V} 는 다음으로 정리된다.

$$\dot{V} \leq -\sigma e^T e - \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \gamma (\hat{\theta}_i^2 - \theta_i \hat{\theta}_i). \quad (15)$$

이 식으로부터, 오차 관계식이 임의의 작은 상수값 μ_i 보다 크면, 즉, $\|\dot{e}\| \|\Phi_i\| \geq \mu_i$ 이 되면, 식 (9)에서 $\epsilon_i = 0$ 이 되어 \dot{V} 는 영보다 작아진다. 따라서, 오차관계식이 μ_i 보다 큰 범위에서는 $\dot{V} < 0$ 이 되어 시스템이 안정하게 된다. 오차가 작아져 영으로 수렴하고 모든 $\hat{\theta}_i$ 가 θ_i 보다 큰 값을 갖도록 추정되면, 모든 $\hat{\theta}_i$ 가 식(9)의 둘째 식에 의해 θ_i 로 수렴하고 $\dot{V} < 0$ 가 되어 시스템이 안정적이 된다. 한편, $\|\dot{e}\| \|\Phi_i\| < \mu_i$ 이며, $\hat{\theta}_i$ 가 θ_i 보다 작은 값으로 추정될 경우, $\dot{V} > 0$ 이 되어 추적 오차가 증대되거나 $\hat{\theta}_i$ 가 더욱 작아질 수 있다. 이의 결과로 오차관계식은 다시 $\|\dot{e}\| \|\Phi_i\| \geq \mu_i$ 이 되어, 시스템이 다

시 안정적인 영역으로 진입하게 되므로, 오차가 다시 감소하고 $\hat{\theta}_i$ 가 증가하는 제어를 수행하게 된다.

따라서, 제안된 비귀환형 적응제어기를 갖는 제어 시스템은 추적오차가 영으로 수렴하여 영의 부근에 작은 영역에서 최종유한하는 특성을 가지며, 파라미터 추정은 임의의 경계값 범위 내의 파라미터 값으로 추정되어 시스템이 안정적으로 제어된다.

제어기를 실제 적용할 경우에 제어 게인식 (8)은 위치추적오차가 영에 수렴할 경우에 과도한 제어 입력을 발생시키므로, 영 근처에 작은 영역의 경계를 정의하여 다음과 같이 변형된 제어 게인식을 적용하는 것이 채터링 방지에 유리하다.

$$K_i = \begin{cases} \frac{\hat{\theta}_i \dot{e} \Phi_i^T}{\|\dot{e}\| \|\Phi_i\|} & \text{for } \|\dot{e}\| \|\Phi_i\| > \delta_i \\ \frac{\hat{\theta}_i \dot{e} \Phi_i^T}{\delta_i} & \text{for } \|\dot{e}\| \|\Phi_i\| \leq \delta_i \end{cases} \quad (16)$$

여기서, $i=1, \dots, 5$ 이며, δ_i 은 작은 양의 상수이다. 변형된 식 (16)을 이용하는 경우, 영 근처에서 최종유한한 특성을 보이므로 작은 값의 δ_i 선정이 요구된다. 본 논문에서는 시행오차 방법으로 δ_i 를 선정하였다. 또한 정상상태 오차를 줄이기 위해 오차의 적분항 $K_I \int e dt$ 을 삽입하여 제어 성능을 증대시킬 수 있다.

3. 선체탐재형 수중 로봇팔의 위치 추적 제어

제안된 제어기를 이용하여 수평 운동을 하는 수중 선체에 장착된 2 자유도 단순 로봇팔의 end-effector 위치추적 제어에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하여 성능을 검토하였다. 계산의 편의를 위하여 각각의 링크 질량과 부가질량은 각 링크의 끝단에 작용시켰으며, 유체 항력은 각 링크의 길이방향으로 분포하여 작용시켰다. 링크의 질량중심과 부력중심은 일치한다고 가정하였다. 선체의 운동은 수평운동에 국한시켰다. 선체에 탑재된 관성센서를 이용하여 가속도를 계속하였다고 가정하였다.

각각의 링크에 작용하는 유체항력에 의한 토오크는 다음 식으로 계산되었으며,

$$u_D = \frac{\rho C_D A_S}{2} \int_0^l x |V_n(x)| V_n(x) dx \quad (17)$$

여기서, ρ 는 유체질량, C_D 는 항력계수, A_S 는 투영면적, $V_n(x)$ 는 링크 수직방향의 상대속도를 나타낸다.

이러한 수중 로봇팔의 운동방정식 (1)의 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
M(q)_{11} &= l_2^2 m_{\omega} + 2l_1 l_2 m_{\omega} c_2 + l_1^2 (m_{a1} + m_{\omega}) \\
M(q)_{12} &= l_2^2 m_{\omega} + l_1 l_2 m_{\omega} c_2 \\
M(q)_{21} &= l_2^2 m_{\omega} + l_1 l_2 m_{\omega} c_2 \\
M(q)_{22} &= l_2^2 m_{\omega}
\end{aligned}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_{a2} l_1 l_2 s_2 \dot{q}_2 & -m_{a2} l_1 l_2 s_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ m_{a2} l_1 l_2 s_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h = \begin{bmatrix} (m_2 - \nabla_2) l_2 g c_{12} + (m_1 + m_2 - \nabla_1 - \nabla_2) l_1 g c_1 \\ (m_2 - \nabla_2) l_2 g c_{12} \end{bmatrix}$$

$$u_d = \begin{bmatrix} -\{m_{a1} l_1 s_1 + m_{a2} (l_1 s_1 + l_2 s_{12})\} \ddot{x}_0 + u_{D1} \\ -m_{a2} l_2 s_{12} \ddot{x}_0 + u_{D2} \end{bmatrix}$$

여기서, q_1 과 q_2 는 조인트 1과 2의 각도, l_1 과 l_2 는 링크 각각의 길이, m_1 과 m_2 는 각각의 링크의 질량, m_{a1} 과 m_{a2} 는 부가질량이 포함된 질량을 나타낸다. \ddot{x}_0 는 수중선체의 수평방향 가속도, g 는 중력가속도를 나타낸다.

또한 $u_{a2} = u_{D2}$, $u_{a1} = u_{D1} + u_{D2} + F_{D2} l_1 c_2$, $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ 이다.

로봇팔의 링크 단면은 원형이고, 직경이 0.1 m이며 시뮬레이션에 사용된 데이터는 다음과 같다: $l_1 = 0.7m$, $l_2 = 0.5m$, $m_1 = 10kg$, $m_2 = 5kg$, $m_{a1} = 15.64kg$, $m_{a2} = 9.03kg$, $\rho = 1025kg/m^3$, $C_D = 1.1$. 제어기 식 (6), (9), (16)의 체 계수: $x = 30$, $f = [30 \ 30 \ 30 \ 10 \ 10]^T$, $\epsilon = [.05 \ .05 \ .05 \ .02 \ .02]^T$, $\sigma = 10$, $\mu = [.2 \ .2 \ 5 \ .01 \ .01]^T$, $\delta_i = 10$, $K_f = 0.1$. 여기서, σ 는 시스템의 시정수에 영향을 미치며, f_i 는 파라미터 적응속도에, ϵ_i 는 추정 파라미터의 감소비율에 영향을 미친다. x 는 임의의 상수이고, δ_i 는 허용가능한 오차범위, 채터링 문제, 및 입력의 최대제한범위 등에 의해 결정된다. K_f 는 안정성에 영향을 미치지 않을 정도의 작은 값을 선정하였다.

3.1 시뮬레이션 I - 영의 초기 파라미터

로봇팔의 end-effector의 요구되는 궤도를 $x = 0.6m$, $y = 0.5 + 0.2 \sin(2\pi t/T)$, 주기 T 는 4초로 정하였다. 반면에, 선체의 운동은 주기 $T_V = 8$ 초를 갖는 수평운동 $x_0 = 0.4 \sin(2\pi t/T_V)$ 으로 정하였다. 문헌(Choi and Yuh, 1996)의 비귀환형 적응제어기는 반드시 초기의 파라미터가 영인 상태에서 제어가 시작되므로, 본 논문에서는 비교 목적으로 문헌(Choi and Yuh, 1996)과 동일한 초기조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 수치적분을 위한 시간증분은 0.002초 선택하였으며, Euler법을 이용하여 수치적분하였다.

Fig. 1은 조인트 1과 2의 각도를 나타내며, Fig. 2는 조인트 1과 2의 토크를 나타낸다. 초기의 파라미터 추정이 완료된 후에는 위치추적이 만족스럽게 수행되나, 초기의 천이역에서 제어입력의 과도한 변화가 발생하는 특성을 보인다. 이는 초기의 파라미터 추정치가 영으로부터 시작하므로 실제의 파라미터보다 작은 값을 갖기 때문에 발생하는 현상이다. 문헌(Choi and Yuh, 1996)의 방법은 파라미터 추정이 단순증가하는 특성을 가지므로, 미지의 파라미터 추정을 위해서는 반드시 영으로부터 시작해야 하는 한계를 갖고 있다.

Fig. 3는 추정된 파라미터 $\hat{\theta}_i$ 를 보인다. 그림에서 추정된 변수가 경계값을 초과하는 영역으로 수렴하기 전까지는 문헌

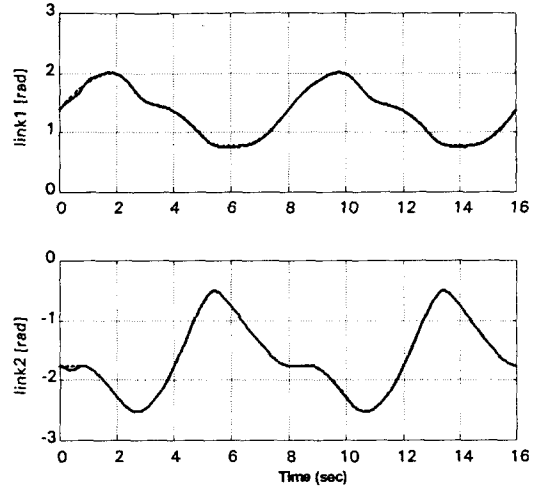


Fig. 1 Joint trajectories of UVMS with zero initial parameters: solid line - simulated, dotted line - desired

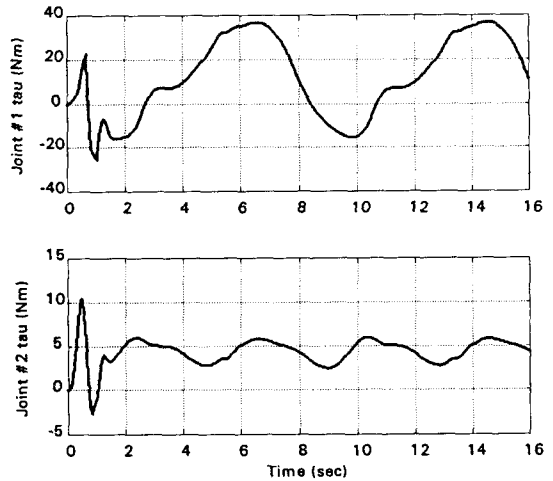


Fig. 2 Joint torque of UVMS with zero initial parameters

(Choi and Yuh, 1996)과 동일한 양상으로 단순증가하며, 추정변수가 수렴한 후에는 일정범위 내에서 증감을 반복하는 최종유한 특성을 보인다.

3.2 시뮬레이션II - 임의의 초기 파라미터

본 논문에서 제안한 비귀환형 적응제어기를 이용하고, 초기의 파라미터 추정치를 영이 아닌 임의의 값으로 선정하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 앞 절의 결과와 비교목적으로 시뮬레이션에 이용된 계계수는 동일한 값을 이용하였으며, 초기 파라미터 추정값들은 시뮬레이션 I에서 얻어진 최종값보다 큰 값 $\hat{\theta}_{i=0} = [60 \ 50 \ 2500 \ 3 \ 1]^T$ 으로 정하였다.

Fig. 4와 5는 각각 조인트 1, 2의 각도 및 각도오차를 나타내며, Fig. 6는 조인트 1, 2의 토크를 나타낸다. 초기 파라미터 추정치를 영이 아닌 값을 선정하여 시뮬레이션을 수행하므로써, 시뮬레이션 I에서 보인 초기의 과도한 토크 변화를 방지

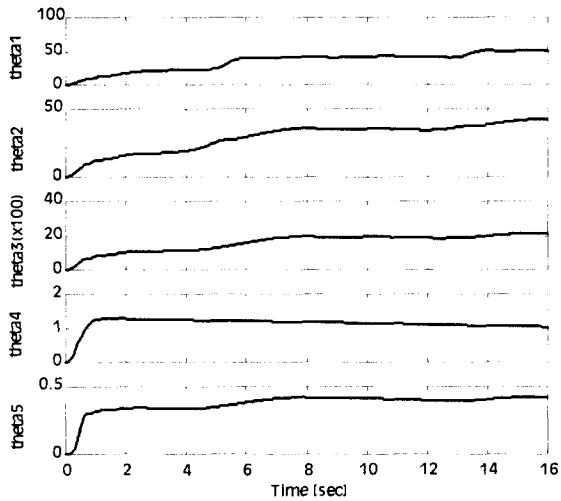


Fig. 3 Estimated parameters with zero initial values

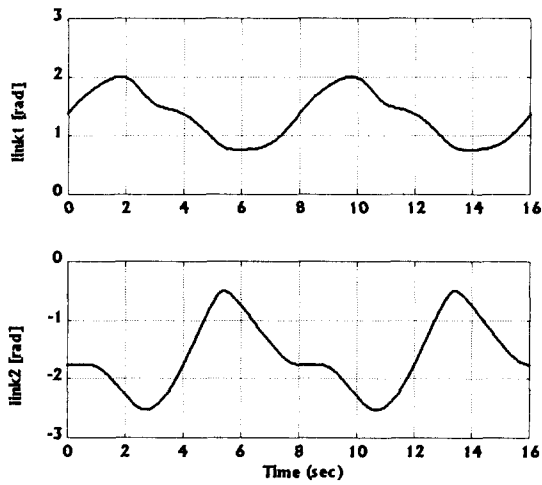


Fig. 4 Joint trajectories of UVMS with non-zero initial parameters: solid line - simulated, dotted line - desired

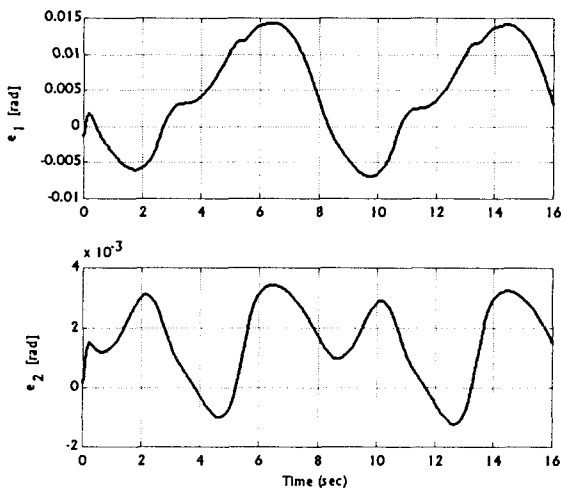


Fig. 5 Joint errors with non-zero initial parameters

할 수 있었으며 초기 위치오차도 줄일 수 있었다. Fig. 7 수직면 상에서 로봇팔의 궤적을 0.5초 간격으로 나타낸 그림으로써, 요구되는 end-effector의 상하운동이 선체의 운동교란에도 불구하고 원만히 수행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 본 논문의 파라미터 추정법을 이용한 적응제어의 추정 파라미터 $\hat{\theta}_i$ 의 변화를 나타낸 그림으로서, 추정 파라미터가 임의의 경계를 갖는 범위 내에서 안정적으로 변화하는 최종유한 특성을 보이고 있다. 이 그림은 위치추적오차가 경계값 밖에 존재하는 경우에는 시스템을 안정하게 하기 위해 추정 파라미터가 증가하는 방향으로 적응하고, 위치추적오차가 경계값 안에 존재하는 경우에는 파라미터가 단순증가하지 않도록 감소시키는 방향으로 적응하는 결과를 나타낸다.

따라서, 본 논문의 비귀환형 적응제어기는 제어시스템을 안정하게 하며, 유체 외란이 작용하는 수중 로봇팔의 시변특성에 적응하여 파라미터 추정을 자기동조하는 특성을 갖는다.

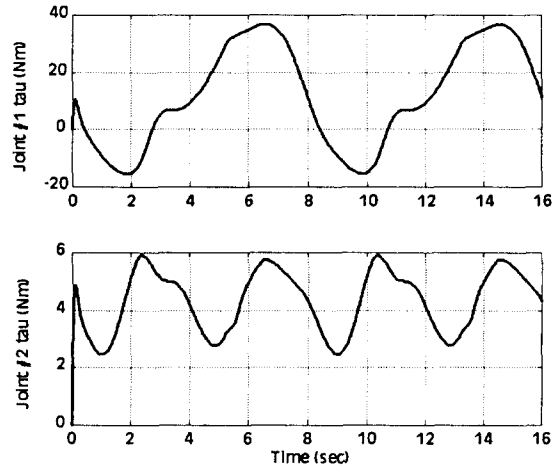


Fig. 6 Joint torque of UVMS with non-zero initial parameters

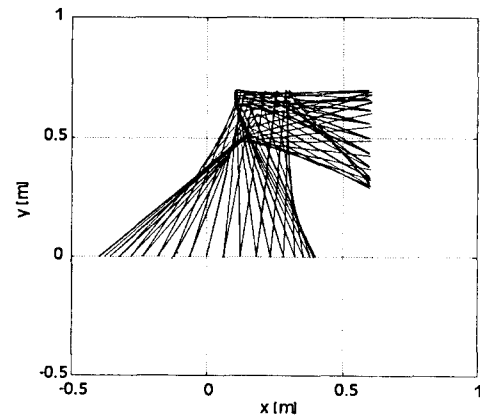


Fig. 7 Trajectories of UVMS with non-zero initial parameters every 0.5 seconds

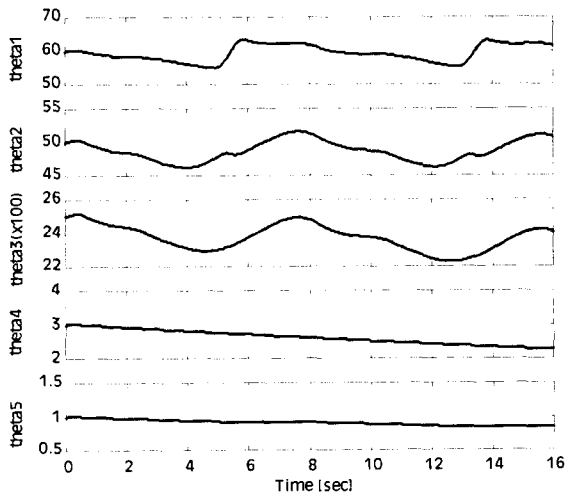


Fig. 8 Estimated parameters with non-zero initial values

4. 결 론

본 논문은 경계값과 파라미터 추정법에 기초한 비귀환형 적응제어를 제안하였으며, 이 제어를 수중 선체에 탑재된 수중 로봇팔의 위치추적 제어에 적용하여 시스템의 불확실성과 유체력에 의한 외란을 갖는 시스템으로의 적용 가능성을 검토하였다. 적응제어 법칙은 시스템 파라미터의 미지의 경계값을 이용하며, 시스템의 동특성에 대한 정보 없이도 시스템의 출력 및 제어 결과만을 이용하여 제어기의 계인을 조정한다. 제안된 적응제어기에 있어서, 제어시스템이 최종유한하게 안정한 것을 Lyapunov 법을 이용하여 검증하였으며, 위치오차를 영 근처의 미소 영역으로 수렴하게 하며, 추정 파라미터가 단순증가하지 않고 일정 범위 내에서 유한한 값을 갖는다. 제안된 적응제어기는 초기 추정 파라미터를 임의의 초기값으로 선정할 수 있으므로, 기존의 방법이 갖는 초기의 과도한 제어입력 변화를 방지하는 특성을 갖는다. 제안된 제어를 이용하여 수평 운동을 하는 수중 선체에 장착된 2 자유도 단순 로봇팔의 위치추적 제어에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하여 기존의 방법 보다 개선된 제어 성능을 보임을 예증하였다.

후 기

본 논문은 과기부 특정연구사업의 일환으로 수행한 “고성능 중작업용 수중 로봇 개발(II)” 연구 내용의 일부임을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

- Abdallah, C., Dawson, D., Dorato, P. and Jamshidi, M.(1991). “Survey of robust control for rigid robots”, *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 11, No. 2, pp 24~30.
- Craig, J. J.(1988). “Adaptive Control of Mechanical Manipulators”, Addison-Wesley, New York.
- Choi, S. K. and Yuh, J.(1996). “Experimental study on a learning control system with bound estimation for underwater robots”, *Int. J. of Autonomous Robots*, Vol. 3, No. 2&3, pp 187~194.
- Yoshikawa, T.(1990). “Foundation of Robotics: Analysis and Control”, The MIT Press.
- Lee P. M. and Yuh, J.(1999). “Application of non-regressor based adaptive control to an underwater mobile platform-mounted manipulator”, *Proc. IEEE Conf. on Control Application*, pp CC A 1135-1140, Hawaii, 23-26 August.
- Mahesh, H., Yuh, J. and Lakshmi, R.(1991). “A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robot Manipulator”, *J. of Robotic Systems*, Vol. 8, No. 3, pp 339~370.
- McLain, T. W., Rock, S. M. and Lee, M. J.(1996). “Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System”, *Autonomous Robots*, Vol. 3, pp 213-232, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
- Ortega, R. and Spong, M. W.(1989). “Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial”, *Automatica*, Vol. 25, No. 6, pp 877~888.
- Reed, J. and Ioannou, P.(1989). “Instability analysis and robust adaptive control of robot manipulators”, *IEEE Tran. Rob. Auto.*, Vol. 3, No. 3, pp 381~386.
- Shoults, G. A.(1996). “Dynamics and Control of an Underwater Robotic Vehicle with an N-axis Manipulator”, *Ph.D. Thesis*, Washington University, December, 1996.
- Song, Y. D.(1996). “Adaptive motion tracking control of robot manipulators - non-regressor based approach”, *Int. J. Control*, Vol. 63, No. 1, pp 41~54.
- Tarokh, M.(1996). “Decentralized adaptive tracking control of robot manipulators”, *J. Rob. Syst.*, Vol. 13, No. 12, pp 803~816.
- Yuh, J. and Holley, W. E.(1988). “Application of discrete-time model reference adaptive control to industrial robots: a computer simulation”, *J. of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp 47~56.

2000년 2월 25일 원고 접수

2000년 4월 24일 수정본 채택