論 文
48A - 9 - 12

외란 관측기에 기반을 둔 힘 추정기 설계

Design of Force Estimator Based on Disturbance Observer

嚴 光 植* · 徐 一 弘**
(Kwang Sik Eom · Il Hong Suh)

Abstract - In this paper, a force estimation method is proposed for force control without force sensor. For this, a disturbance observer is applied to each joint of an *n* degrees of freedom manipulator to obtain a simple equivalent robot dynamics(SERD) being represented as an n independent double integrator system. To estimate the output of disturbance observer due to internal torque, the disturbance observer output estimator(DOOE) is designed, where uncertain parameters of the robot manipulator are adjusted by the gradient method to minimize the performance index which is defined as the quadratic form of the error signal between the output of disturbance observer and that of DOOE. When the external force is exerted, the external force is estimated by the difference between the output of disturbance observer and DOOE, since output of disturbance observer includes the external torque signal as well as the internal torque estimated by the output of DOOE. And then, a force controller is designed for force feedback control employing the estimated force signal. To verify the effectiveness of the proposed force estimation method, several numerical examples and experimental results are illustrated for the 2-axis direct drive robot manipulator.

Key Words : disturbance observer, force estimation, force control

1. 서 론

산업 현장에서 적용되는 응용 작업 중 디버링(deburring) 작업, 연삭 작업, 정밀 조립 작업등을 효과적으로 수행하기 위해서는 로봇의 말단 효과 장치의 정확한 위치 제어뿐 아니라, 외부 접촉 환경과의 일정한 힘 제어가 동시에 요구된다. 그러나 로봇의 정확한 동작을 위해서 힘 제어가 필수적으로 필요함에도 불구하고, 산업 현장에서는 힘 센서의 가격이 고가이기 때문에 그 응용이 미진한 상태이다. 게다가, 힘 센서는 노이즈가 심한 작업 환경이나 고온의 작업 환경에는 매니퓰레이터에 직접 부착될 수 있는 상황이 발생한다. 이를 극복하기위해 로봇 매니퓰레이터의 말단 효과 장치에서 느끼는 힘을 추정하는 방법들이 제안되어 왔다[2,3,4,5].

최근에는 외부 외란뿐아니라 모델링 불확실성을 보상하기 위한 외란 관측기에 관한 연구[5,6]가 활발히 진행되었다. 외란 관측기는 플랜트의 출력과 모델링된 플랜트(nominal plant)의 출력 차이를 모델링된 플랜트에 적용된 등가 외란으로 간주하고 이 등가 외란을 추정하여 외란을 제거하는 제어 신호로 사용한다. 따라서, 로봇의 각 축에 외란 관측기가 적용된 경우 로봇 매니퓰레이터의 각 조인트의 동역학은 간단한 선형 시스템으로 모델링된다. 로봇 매니퓰레이터가 외부 환경과 접촉하는 경우에, 등가 외란은 모델링 불확실성으로 인한 외란 뿐아니라 외부에서 인가되는 힘을 포함한다. 따라서, 외란 관측기를 이용한 힘 추정 방법의 문제는 등가 외란으로부터 어떻게 외부에서 인가되는 힘 정보를 얻는가의 문제로 간략화 된다.

Ohishi 등은 외란 관측기에 기반을 둔 힘 추정 알고리즘을 제안하였다[4]. 여기서 제안된 방법은 모델링 불확실성을 실험적으로 얻은 데이터로부터 생성하고, 외부로부터 인가되는 토크량을 외란 관측기의 등가 외란에서 실험적으로 얻은 모델링 불확실성에 대한 정보를 빼서 구하는 방법을 사용하였다. 그러나, 실험적으로 얻은 데이터는 로봇의 점성 및 중력에 근거한 것이므로 관성이나 원심력, 구심력에 의한 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 외란 관측기가 로봇의 정확한 동력학 없이도 제어가 가능한 잇점이 있기는 하지만 Ohishi 등이 제안한 방법은 모델링된 플랜트(nominal plant)가 정확해야 된다. 한편, Hacksel과 Salcudean은 관측기의 오차 방정식을 외부 환경에 의한 스프링, 점성, 질량 시스템(damped spring-mass system)으로 간주하여 힘 정보를 추정하는 알고리즘을 제안하였다[5]. 그러나, 이 알고리즘에서 사용한 방정식은 정확한 동역학 모델을 기반으로 하기 때문에 모델링 오차에 매우 민감한 반응을 보이는 단점이 있다.

본 논문에서는 외란 관측기의 등가 외란으로부터 힘 정보를 얻기 위해, 로봇 동역학 방정식을 사용한 모델링 불확실성에 대한 정보를 계산하는 알고리즘을 제안한다. 외부의 힘이 인가되지 않은 상태에서의 외란 관측기의 출력을 추정하기 위해, 외란 관측기 출력 추정기(disturbance observer output estimator:DOOE)를 설계한다. 먼저 로봇 매니퓰레이

*正 會 員 : 漢陽大 大學院 電子工學科 博士課程
**正 會 員 : 漢陽大 工大 電子工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 1998年 5月 25日
最終完了 : 1999年 7月 29日

터의 불확실성을 가질 수 있는 파라미터를 정의하고, DOOE의 출력과 외란 관측기 출력간 오차의 제곱 형태로 정의된 성능 지수를 최소화하도록 기울기법(gradient method)을 사용하여 파라미터를 조정하는 방법을 제안한다. 로봇 매니퓰레이터가 외부 환경과 접촉하였을 때 인가된 각 관절에서의 토크는 DOOE의 출력과 외란 관측기 출력의 차로 추정되며, 추정된 각 관절의 토크 값은 로봇 매니퓰레이터의 기구학을 이용하여 힘으로 변환된다. 추정된 힘 정보를 이용하여 위치량을 보상하는 힘 제어기를 구성하여 힘제어기를 구현하고자 한다. 제안된 알고리즘은 그림 1에 나타낸 2자유도의 수평다관절형 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 모의 실험 및 실험을 통하여 그 효용성을 보이며, 이를 통해 제안된 힘 추정 알고리즘이 가격이 비싼 힘 센서를 대신하는 방법으로 사용될 수 있으리라 기대된다.

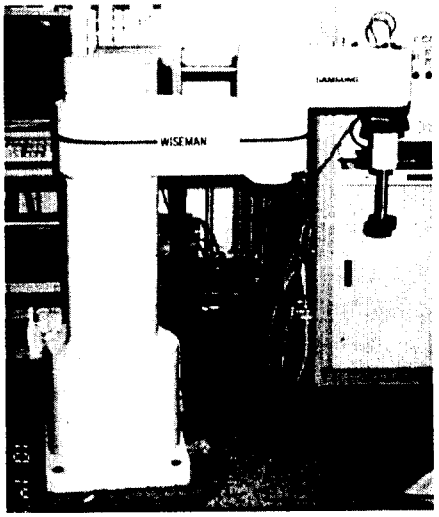

그림 1 2자유도 수평다관절형 직접구동형 로봇

Fig. 1 Two DOF SCARA type direct-drive arm

제 2 장 외란 관측기를 포함한 로봇 동역학

n 자유도를 가진 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식은 식 (1)과 같이 비선형 특성과 각 축간의 간섭 효과를 갖는 미분 방정식으로 표현된다.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\,\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{c}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{f}(\dot{\boldsymbol{q}})=\boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

여기서, $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$는 $n\times n$ 관성 행렬이고, $\boldsymbol{c}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$, $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$, $\boldsymbol{f}(\dot{\boldsymbol{q}})$은 각각 구심 및 원심력, 중력, 점성력을 나타내는 $n\times 1$ 벡터이고 로봇 관절의 함수이며, $\boldsymbol{\tau}$는 로봇의 각 관절에 가해지는 $n\times 1$ 토크 벡터이다. $\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}$ 은 각각 관절 위치, 관절 속도, 관절 가속도를 나타내는 $n\times 1$ 벡터이다. 식 (1)의 로봇 동역학 방정식은 임의의 고정된 관성력과 등가 외란의 합으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{\tau}_d(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}})=\boldsymbol{\tau} \tag{2}$$

여기서, $\overline{\boldsymbol{M}}\equiv \mathrm{diag}\,\{\overline{M}_{11},\cdots,\overline{M}_{nn}\}$은 $n\times n$ 대각 행렬이며, $\overline{M}_{ii}$는 i축의 모델링된 상수 값을 갖는 관성 값이다. $\overline{M}_{ii}$의 값은 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$의 대각 성분의 값이 로봇 자세에 따라 갖는 범위의 값으로 설정할 수 있으며, 실험적으로는 주파수 응답으로부터 쉽게 구해질 수 있다. 실험적으로 $\overline{M}_{ii}$를 구하기 위해서는 i축을 제외한 축들을 고정시킨 상태에서 i축의 입출력 관계가 $\tau_i=\overline{M}_{ii}\ddot{q}_i$라고 가정하고, 토크 입력과 속도 출력관계로부터 실험적으로 구한 주파수 응답으로 구한 값이다. 식 (2)에서, $\boldsymbol{\tau}_d(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}})\equiv[\tau_{1d},\cdots,\tau_{nd}]^T$는 비선형 성분, 간섭 항 및 모델링 불확실성등의 모든 모델링되지 않은 동역학 항을 포함하는 $n\times 1$ 벡터이며, i축의 외란을 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}\tau_{id}=&\sum_{j=1,j\neq i}^{n}M_{ij}(\boldsymbol{q})\ddot{q}_i+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}c_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k\\&+g_i+f_i+(M_{ii}(\boldsymbol{q})-\overline{M}_{ii})\ddot{q}_i\end{aligned} \tag{3}$$

만일, 식 (3)의 등가 외란이 구해지면, 각 축의 동역학은 등가 외란을 제거하므로써 분리될 수 있다. 따라서, 간단한 제어기를 사용하더라도 충분히 위치 명령, $\boldsymbol{q}_d(t)$,을 추종할 수 있다. 등가 외란은 외란 관측기[5,9]에 의해서 추정될 수 있으며, 제어 신호에 추정된 등가 외란을 더해주므로써 제거할 수 있다. 그림 2는 모델링된 플랜트에 기반을 둔 i축의 외란 관측기의 구조를 나타낸 것이다. 이 그림에서 $P_i(s)$는 실제 플랜트를 나타내는 것으로 i번째축에 대하여 $1/M_{ii}s$로 나타낼 수 있고, $P_{in}(s)$는 실제 플랜트 $P_i(s)$의 모델링된 플랜트로 플랜트 입력 토크와 속도와의 관계를 나타내는 것으로, 여기서 $P_{in}(s)$은 $1/\overline{M}_{ii}s$로 주어졌으며, $Q_i(s)$는 $P_{in}^{-1}(s)$를 구현하고 측정 신호의 노이즈 영향을 줄이기 위해 사용된 저영역 통과 필터이다.

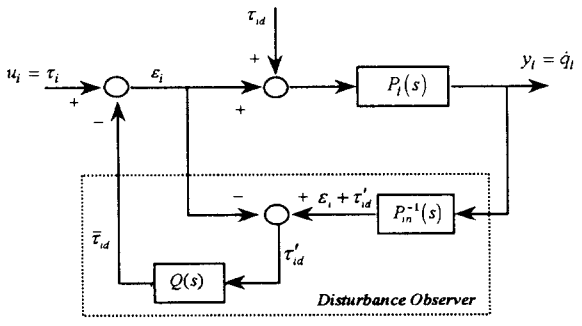

그림 2 외란 관측기의 구조

Fig. 2 A structure of disturbance observer

그림 2의 블록도에서 입력과 출력 관계는 다음 식과 같이 구할 수 있다[10].

$$y_i = G_{u_i y_i}(s)u_i + G_{\tau_{id} y_i}(s)\tau_{id} \tag{4}$$

여기서 $G_{u_i y_i}(s)$와 $G_{\tau_{id} y_i}(s)$는 각각 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$G_{u_i y_i} = \frac{P_i(s)\ P_{in}(s)}{P_{in}(s) + (P_i(s) - P_{in}(s))Q_i(s)} \tag{5}$$

$$G_{\tau_{id} y_i} = \frac{P_i(s)\ P_{in}(s)(1 - Q_i(s))}{P_{in}(s) + (P_i(s) - P_{in}(s))Q_i(s)} \tag{6}$$

위의 식으로부터 외란 관측기의 설계에 있어서 가장 중요한 것 중에 하나는 $Q_i(s)$를 설계하는 것으로서, 이는 시스템의 강인성과 외란 억압 성능을 좌우하는 요소이다. 만약, $Q_i(s)$의 이득 특성이 $Q_i(s) \approx 1$인 경우에는 식 (5)와 식 (6)으로부터

$$G_{u_i y_i}(s) \approx P_{in}(s),\ G_{\tau_{di} y_i}(s) \approx 0 \tag{7}$$

이 된다. 따라서, 외란 관측기가 실제 플랜트를 모델링된 플랜트와 같이 동작되도록 하고 저주파 성분의 외란 토크와 실제 플랜트와 모델링된 플랜트와의 차이를 상쇄시키므로 시스템을 강건하게 한다. 또한 $Q_i(s) \approx 0$ 인 경우에는

$$G_{u_i y_i}(s) \approx P_i(s),\ G_{\tau_{di} y_i}(s) \approx P_i(s) \tag{8}$$

로서 외란 관측기에 의해서 시스템에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 $Q_i(s)$의 설계 문제는 외란 및 모델링 오차 성분을 제거하기 위해서 저역 주파수 다이나믹스가 1에 가깝고, 센서 노이즈 영향을 최소화하기 위해서 고주파 영역에서는 0에 가깝도록 설정하며, 모델링된 플랜트의 역모델을 구현하기 위한 상대 차수(relative degree)가 $P_{in}(s)$의 상대 차수와 같거나 더 크게 설계 한다[10].

로봇의 각축에 외란 관측기를 적용하여 등가 외란을 제거한다면, 로봇 동역학은 식 (9)와 같은 간단한 등가 로봇 동역학 방정식(SERD:Simple Equivalent Robot Dynamics)으로 표현될 수 있다.

$$\bar{M}_n \ddot{q} = \tau \tag{9}$$

3. 외란 관측기 기반의 힘 추정기

외부에서 힘이 인가되지 않았을 때, 외란 관측기의 출력은 식 (3)으로부터 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_d &= (M(q) - \bar{M})\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) + f(\dot{q}) \\ &= W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi + v\end{aligned} \tag{10}$$

여기서, φ는 불확실성을 갖는 파라미터를 나타내는 $r \times 1$ 벡터이다. $W(q, \dot{q}, \ddot{q})$와 v는 각각 관절 값의 함수로 표현되는 $n \times r$ 행렬과 $n \times 1$ 벡터이며, 이 행렬과 벡터의 값은 임의로 주어진 로봇에 대해 관절 값의 함수로 구해진다. 외란 관측기의 출력을 추정하기 위해 외란 관측기 출력 추정기(DOOE)를 식 (11)과 같이 설계한다.

$$\begin{aligned}\hat{\tau}_d &= (\bar{M}(q) - \bar{M})\ddot{q} + \hat{c}(q, \dot{q}) + \hat{g}(q) + \hat{f}(\dot{q}) \\ &= W(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\varphi} + v\end{aligned} \tag{11}$$

여기서, $\hat{\varphi}$는 φ의 추정치이다. 외란 관측기의 출력과 DOOE의 출력간의 오차를 $\tilde{\tau}_d = \bar{\tau}_d - \hat{\tau}_d$로 정의하고, DOOE의 성능 지수(performance index)를 다음 식과 같이 정의하여 기울기법을 이용하면 파라미터 수정 법칙은 식 (13)과 같이 구해진다.

$$J = \frac{1}{2}\tilde{\tau}_d{}^T\tilde{\tau}_d \tag{12}$$

$$\dot{\hat{\varphi}} = -\Gamma W^T(q, \dot{q}, \ddot{q})\tilde{\tau}_d \tag{13}$$

여기서, Γ는 파라미터의 수정률(update rate)을 나타내는 양의 값을 갖는 $r \times r$ 행렬이다. DOOE에 대한 블록도를 그림 3에 나타내었다. 식 (13)의 파라미터 수정 규칙은 파라미터가 제한된 구역에서 그 수렴성을 보장하고[11], 여기서 수정된 파라미터 $\hat{\varphi}$는 외란관측기의 출력을 추정하기위한 파라미터로 작용되며, 식 (13)의 파라미터 수정법칙에 의해서 외란 관측기 출력과의 오차가 최소화되어 잘 조종된 파라미터 $\hat{\varphi}$에 의해 시스템은 외란 관측기를 사용하는 것과 동일한 효과를 보일 수 있다.

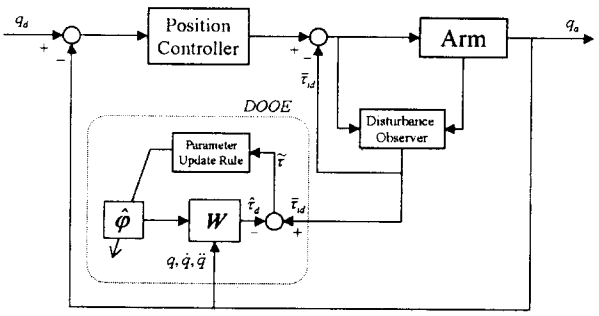

그림 3 DOOE에 대한 블록도
Fig. 3 The Block Diagram of DOOE

로봇 매니퓰레이터가 외부 환경에 접촉하였을 때, 외부에서 인가되는 힘이 포함된 외란 관측기의 출력은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_d &= (M(q) - \bar{M})\ddot{q} + c(q, \dot{q}) \\ &\quad + g(q) + f(\dot{q}) + \tau_e\end{aligned} \tag{14}$$

여기서, τ_e는 외부에서 인가되는 힘에 대응되는 $n \times 1$ 토크

벡터이다. 따라서, 외부 환경의 접촉에 의해서 인가되는 토크는 외란 관측기의 출력으로부터 DOOE의 출력을 뺀 값에 의해서 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\tau}_e = \overline{\tau_d} - \hat{\tau}_d \tag{15}$$

외부 환경의 접촉에 의해서 인가되는 힘 정보는 추정된 토크량으로부터 식 (16)과 같이 자코비안 행렬을 이용하여 구할 수 있다.

$$\hat{f}_e = (J^T(q))^{-1}\hat{\tau}_e \tag{16}$$

외란 관측기와 DOOE를 이용한 힘 추정기의 블록도를 그림 4에 나타내었다.

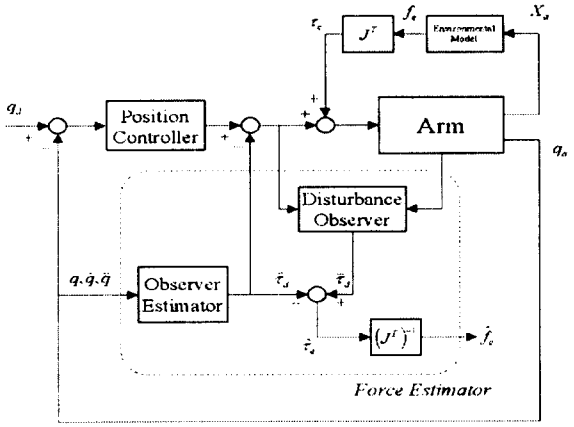

그림 4 힘 추정기에 대한 블록도
Fig. 4 The Block Diagram of Force Estimator

로봇의 말단 효과 장치가 외부 환경과 접촉하는 경우, 힘 변위량과 직교 좌표계의 위치 변위량 간의 관계는 식 (16)과 같으며, 여기서 δf와 δx는 각각 힘과 위치 변위량을 나타내는 $n\times 1$ 벡터이고, K_E는 외부 환경의 직교 좌표계에서의 강성(stiffness)을 나타내는 $n\times n$ 행렬이다.

$$\delta f = K_E \delta x \tag{17}$$

로봇의 직교 좌표계에서의 위치 변위량과 관절 좌표계에서의 위치 변위량간의 관계는 자코비안 행렬에 의해서 식(17)과 같이 구해지며, 식(16)과 (17)로부터 힘과 관절 좌표계에서의 위치 변위량의 관계를 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta x = J(q)\delta q \tag{18}$$

$$\delta q = J(q)^{-1}K_E^{-1}\delta f \tag{19}$$

위치 서보를 이용한 힘 제어에 대한 제어 문제는 힘에 대한 명령과 추정된 힘 정보의 오차를 이용하여 힘 변위량을 생성하는 제어기를 설계하는 것으로 힘 추정기를 이용한 하이브리드 위치/힘 제어에 관한 블록도를 그림 5에 나타내었다. 여기서 S는 힘 제어를 위한 선택 행렬(selection matrix)이다.

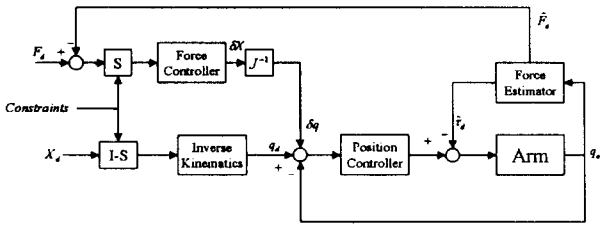

그림 5 힘 추정기를 이용한 하이브리드 위치/힘 제어에 관한 블록도
Fig. 5 The block diagram of hybrid position and force control using force estimator

제안된 힘 추정기의 효용성을 보이기 위해 그림 6에 나타낸 2자유도를 가진 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 모의 실험을 실시하였다. 그림 6에 나타낸 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식은 다음 식과 같이 주어진다.

$$M(q)\ddot{q} + c(q,\dot{q}) + g(q) + f(\dot{q}) = \tau \tag{20}$$

여기서, $M(q)$, $c(q,\dot{q})$ 그리고 $g(q)$는 다음 식과 같이 주어진다.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$m_{11} = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos q_2,$$

$$m_{12} = m_{21} = m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos q_2,$$

$$m_{22} = m_2 l_2^2,$$

$$c(q,\dot{q}) = [\, c_1 \;\; c_2 \,]^T \tag{22}$$

$$c_1 = -m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_2^2 - 2m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2$$

$$c_2 = m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2$$

$$g(q) = [\, g_1 \;\; g_2 \,]^T \tag{23}$$

$$g_1 = (m_1 + m_2)g l_1 \cos q_1 + m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$g_2 = m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

먼저, 외부의 힘이 인가되지 않은 상황에서의 외란 관측기의 출력을 추정하기 위해 불확실성을 갖는 파라미터를 $\hat{\varphi} = [\, \hat{m}_1 \;\; \hat{m}_2 \,]^T$로 정의한다. 여기서 $\hat{m}_i$는 i번째 축에 대한 질량값에 대한 추정치이다. 식 (11)을 이용하여 $W(q,\dot{q},\ddot{q})$와 v를 구하면 다음 식과 같다.

$$W(q,\dot{q},\ddot{q}) = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$w_{11} = l_1^2\ddot{q}_1 + g l_1 \cos q_1,$$

$$w_{12} = (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2)\ddot{q}_1 + (l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2)\ddot{q}_2 - (l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_2 + 2l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) + g l_1 \cos q_1 + g l_2 \cos(q_1 + q_2),$$

$$w_{21} = 0$$

$$w_{22} = (l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2)\ddot{q}_1 + l_2^2 \ddot{q}_2 + l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2 + g l_2 \cos(q_1 + q_2),$$

$$v(q,\dot{q}) = [\, v_1 \;\; v_2 \,]^T \tag{25}$$

$$v_1 = (-(\overline{m}_1 + \overline{m}_2) l_1^2 - \overline{m}_2 l_2^2 - 2\overline{m}_2 l_1 l_2)\ddot{q}_1 + f_1(\dot{q}),$$

$$v_2 = -\overline{m}_2 l_2^2 \ddot{q}_2 + f_2(\dot{q})$$

여기서, g는 중력 가속도이고, $f_i(\dot{q})$는 i번째 축의 점성력이다. 외부로부터 힘이 인가되지 않은 상태에서, 위치 명령은 $q_d = [\sin t \;\; \cos t]^T$로 주어졌으며, 추정 파라미터 $\hat{\varphi}$는 기울기법에 의해 DOOE의 출력과 외란 관측기 출력의 차가 최소화되도록 수정되며 불확실 파라미터의 초기치를 $\hat{\varphi} = [1 \;\; 3]^T Kg$ 으로 설정하였을 때의 추정과정을 그림 7에 나타내었다. 약 3초 후에 로봇 매니퓰레이터의 실제 파라미터 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 추정치가 실제 파라미터 값에 수렴하는 것은 DOOE의 출력이 외란 관측기의 출력에 수렴하는 것을 의미하며, 따라서 두 출력치의 오차는 영이 된다. DOOE와 외란 관측기의 출력을 그림 8에 나타내었다. 여기서 외란 관측기는 시스템의 모델이 $1/M_{ii}s$로 상대 차수가 1이므로, 외란 관측기의 전달함수의 상대 차수가 1이상으로 선정되어야한다. 모의 실험을 위해 사용된 외란 관측기는 다음 식과 같으며, 여기서 τ는 Q필터의 주파수 통과 영역에 영향을 주는 파라미터로 0.01로 설정하였다.

$$Q_i(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^2} \tag{26}$$

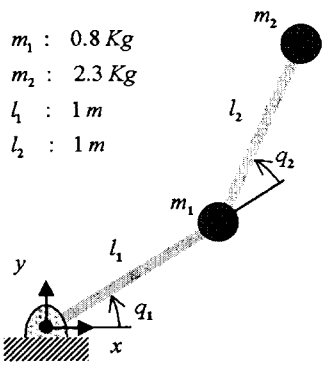

그림 6 2자유도 로봇 매니퓰레이터

Fig. 6 A two DOF planar type robot manipulator

제안된 힘 추정기를 이용한 힘 제어를 위해 그림 5의 힘 제어기로 PD 형태의 제어기를 설계하였을 때 모의 실험 결과를 그림 9에 나타내었으며, 그림으로부터 제안된 알고리즘에 의해 추정된 힘 정보를 이용하였을 때에도 힘 제어가 적절히 이루어 졌음을 알 수 있다.

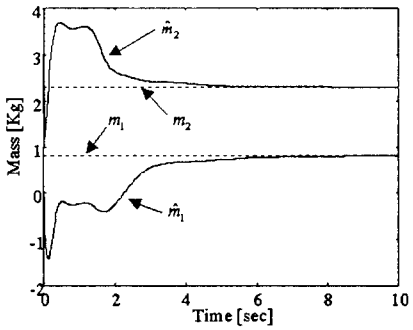

그림 7 DOOE에 의한 질량값 추정

Fig. 7 The mass estimation by DOOE

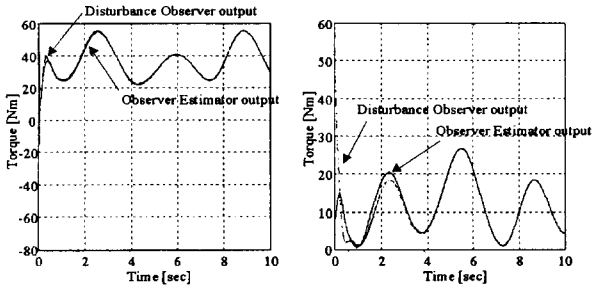

그림 8 DOOE와 외란 관측기의 출력

Fig. 8 The output of DOOE and the output of disturbance observer

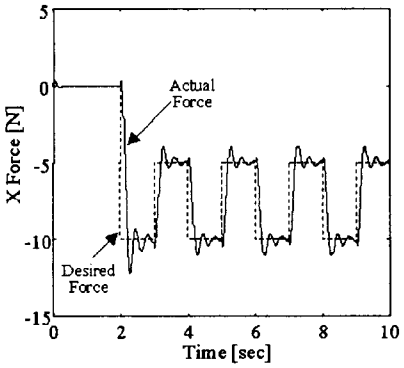

그림 9 제안된 힘 추정기에 의한 힘 응답

Fig. 9 The force response using the proposed force estimator

4. 실험 결과

그림 1의 스카라형 직접 구동형 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 제안된 알고리즘에 대한 실험을 수행하였으며, 이때 사용한 제어기의 구성을 그림 10에 나타내었다. 실시간 제어를 위해 32비트 마이크로 프로세서와 서보 제어를 위한 DSP 보드를 사용하였으며, 제어를 위한 샘플링 시간은 1 [*msec*]이다.

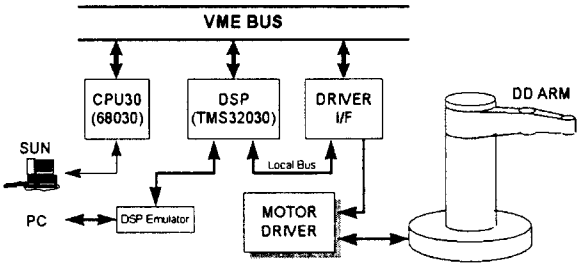

그림 10 실험 환경
Fig. 10 Experimental Setup

각 관절에서의 마찰력 성분의 모델링을 그림 11에 나타내었다. 이 마찰력 성분은 로봇의 토크 명령을 일정하게 주고 이때 발생되는 속도를 측정하여 속도와 토크와의 관계를 구하여 그래프로 나타낸 것이다[4]. 로봇의 속도가 매우 낮은 경우, 로봇의 동역학 방정식의 관성력, 구심 및 원심력에 영향이 거의 나타나지 않으며, 로봇 매니퓰레이터가 본 실험에 사용한 것과 같은 수평 다관절형인 경우 중력에 의한 영향이 없기 때문에 점성 모델은 그림 11에 나타낸 것으로 근사화될 수 있다.

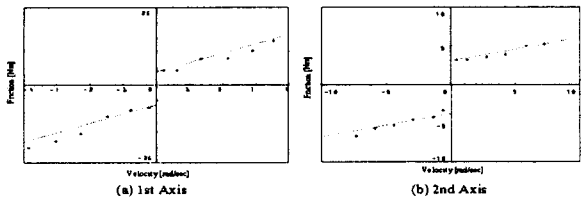

그림 11 점성력 모델
Fig. 11 Friction Model

먼저, 외부에서 인가되는 힘이 없는 상황에서 위치 명령을 $q_d = [\sin 2t \ \cos 2t]^T$로 설정하고, 불확실성을 갖는 파라미터인 질량을 기울기법을 사용하여 추정하였으며, 그 결과를 그림 12에 나타내었다. 이 그림을 통해서 파라미터 추정을 위한 초기 질량 값은 $\hat{\varphi}_i = [20 \ \ 2]^T Kg$으로 설정하였으나, 원래 로봇의 질량인 $\varphi = [29 \ \ 5.5]^T Kg$ 으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 파라미터 추정의 결과로 DOOE의 출력은 외란 관측기의 출력에 수렴하며, 이에 대한 결과를 그림 13에 나타내었다. 힘 추정기의 의해 추정된 힘 정보를 이용한 힘 제어기를 구성하였을 때의 실험 결과를 그림 14에 나타내었으며, 이 결과로부터 힘 센서를 사용하지 않고 제안된 힘 추정기를 사용한 경우에도 추정된 힘에 의해 적절히 동작하는 것을 알 수 있다.

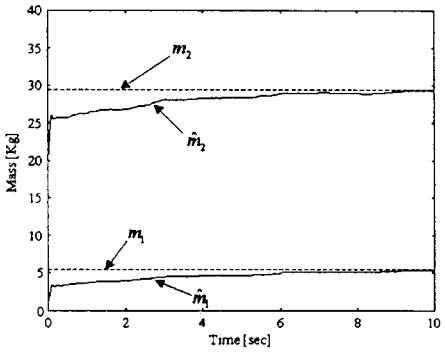

그림 12 DOOE에 의한 질량 추정
Fig. 12 Mass estimation by DOOE

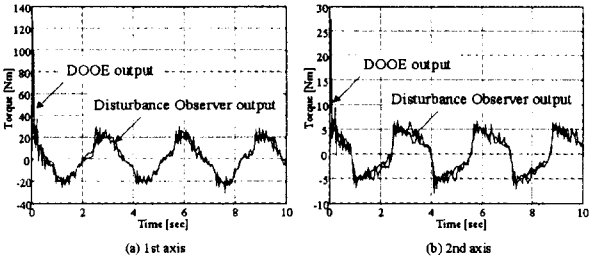

그림 13 DOOE의 출력과 외란 관측기의 출력
Fig. 13 The output of DOOE and the output of disturbance observer

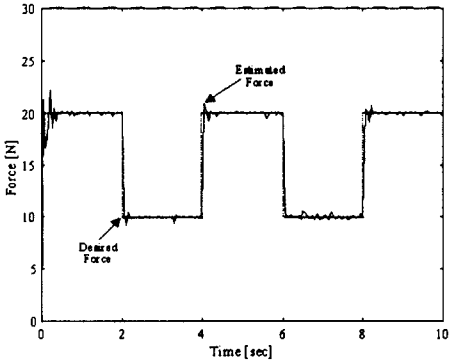

그림 14 제안된 힘 추정기에 의한 힘 응답
Fig. 14 The force response using the proposed force estimator

5. 결론

본 논문에서 힘센서를 사용하지 않고 힘제어를 하기 위해, 로봇 매니퓰레이터 말단효과장치에서의 힘 정보를 추정

할 수 있는 알고리즘을 제안했다. 먼저 외란 관측기를 이용한 간단한 로봇 동역학 방정식(SERD)을 유도하고, 외란 관측기의 등가 외란으로부터 힘 정보를 얻기 위해, 외란 관측기 출력 추정기(disturbance observer output estimator :DOOE)를 설계하였다. 로봇 매니퓰레이터가 외부 환경과 접촉하였을 때 인가된 각 관절에서의 토크는 외란 관측기 출력 추정기의 출력과 외란 관측기 출력의 차로 추정하였으며, 추정된 각 관절의 토크 값은 로봇 매니퓰레이터의 기구학을 이용하여 말단 효과 장치에서의 힘정보를 추정하였다. 제안된 알고리즘은 2자유도의 수평다관절형 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 모의 실험 및 실험을 통하여 그 효용성을 보였으며, 이 결과로부터 제안된 힘 추정 알고리즘이 값비싼 힘센서를 대신할 수 있는 한 방법임을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] K.S.Eom, I.H.Suh and W.K.Chung, "Disturbance Observer Based Path Tracking Control of Robot Manipulator Considering Torque Saturation," Proceedings of 8th International Conference on Advanced Robotics, pp.651-657, 1997

[2] K.Ohishi, M.Miyazaki, M.Fujita and Y.Ogino, "Force Control without Force Sensor Based on Mixed Sensitivity H Design Method," Proc. of 1992 IEEE Int. Con. on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1356-1361, 1992

[3] K.Ohishi, M.Miyazaki, M.Fujita and Y.Ogino, "H∞ Observer Based Force Control without Force Sensor," Proceedings of IEEE Int. Con. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.1049-1054, 1991

[4] K.Ohishi, M.Miyazaki and M.Fujita, "Hybrid Control of Force and Position without Force Sensor," Proceedings of IEEE Int. Con. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.670-675, 1992

[5] P.J.Hacksel and S.E.Salcudean, Estimation of Environment Force and Rigid-Body Velocities using Observer, Proc. of 1994 IEEE Int. Con. on Robotics and Automation, pp. 931-936, 1994

[6] I.H.Suh, K.S.Eom, H.J.Yeo, B.H.Kang, S.R.Oh and B.H.Lee, Explicit Fuzzy Force Control of Industrial Manipulators with Position Servo Drive, Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.657-669, 1994

[7] I.H.Suh, K.S.Eom, H.J.Yeo and S.R.Oh, Fuzzy Adaptive Force Control of Industrial Robot Manipulators with Position Servos, Mechatronics vol.5, No8, pp.899-918, 1995

[8] T.C.Hsia, T.A.Lasky, and Z.Y.Guo, "Robust independent robot joint control: design and experimentation," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1329-1334, 1988

[9] T.Umeno and Y.Hori, "Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 38, no. 5, pp. 363-368, 1991.

[10] H.S.Lee, "Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High-Accuracy Positioning System," Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994

[11] F.L.Lewis, C.T.Abdallah and D.M.Dawson, Control of Robot Manipulators, Macmillan Publishing Company, 1993

저 자 소 개

엄 광 식 (嚴 光 植)

1970년 2월 5일 생. 1993년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 기전공학과 졸업(석사). 1995년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정

Tel : (0345) 408-5802, Fax : (0345) 408-5803
E-mail : kseom@scorpio.hanyang.ac.kr

서 일 홍 (徐 一 弘)

1955년 4월 16일 생. 1977년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 졸업(공박). 1982~1985년 대우중공업 기술연구소 근무. 1987~1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대 공대 전자공학과 교수

Tel : (0345) 400-5172, Fax : (0345) 408-5803
E-mail : ihsuh@email.hanyang.ac.kr