

# 토크 제한을 고려한 외란관측기에 기반을 둔 로봇 매니퓰레이터의 경로 추적 제어

論 文

46~12~20

## Disturbance Observer Based Path Tracking Control of Robot Manipulator Considering Torque Saturation

嚴光植\*·徐一弘\*\*  
(Kwang Sik Eom · Il Hong Suh)

**Abstract** - In this paper, a path tracking algorithm is proposed to compensate path deviation due to torque bound. 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. For an arbitrary trajectory generated for a given path in Cartesian space, whenever the saturation of any actuators is met, the desired acceleration of the nominal trajectory in Cartesian space is modified in on-line by using SERD. Also an integral action with respect to the difference between the nominal and the modified trajectories is utilized in nonsaturated region of actuators to reduce the path error. To verify the effectiveness of the proposed algorithms, numerical simulations and real experiments are performed for two degrees of freedom SCARA type direct-drive arm.

**Key Words** : disturbance observer, torque saturation, path tracking control

### 1. 서 론

산업 현장에서 생산성을 높이기 위해서 로봇의 빠르고 정확한 동작이 요구되고 있으나, 직교 좌표계에서 로봇 동작은 로봇이 낼 수 있는 최대 속도가 로봇 자세에 따라 다르기 때문에 관절 좌표계에서의 동작에 비해 최대 속도가 느린 것이 일반적이다. 직교 좌표계에서의 로봇 동작을 위해서는 로봇의 기구학을 기반으로 궤적을 생성하여 경로를 추적하지만, 로봇이 낼 수 있는 가속도가 로봇의 자세에 종속적이기 때문에 임의로 생성된 궤적은 액츄에이터의 포화 현상을 야기하고, PID 등의 전통적인 제어 방법을 사용할 경우에는 액츄에이터의 포화 현상으로 경로 오차를 발생시킨다.

지금까지 액츄에이터의 포화 현상을 고려하여 특정 경로를 추적하기 위한 시간 최적 궤적 생성 알고리즘이 제안되어 왔다 [1, 2]. 이들 제어 알고리즘은 로봇의 임의의 축이 항상 포화 상태를 유지하도록 하면서 로봇의 운동을 위한 궤적을 생성하는 시간 최적 궤적을 생성하는 것으로, 로봇이 목표점으로 이동하기 위해서 서보의 위치 되먹임 제어를 수행하여 생성된 궤적을 추종하도록 제안되었다. 이러한 제어 방법은 항상 액츄에이터가 포화 상태에 이르기 때문에 외란 등에 의한 위치 오차를 줄일 수 없고, 또한 궤적의 생성이 로봇의 동역학을 기초로 하기 때문에 정확한 로봇 모델링이 필요한 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 온라인 경로 추종 알고리즘이 제안되었다[3]. Arai 등은 로봇을 동작하려는 경로 상에 경로 좌표계(path coordinate)를 정의하고, 경로 방향과 이에 직각인

방향을 독립적으로 제어하였다. 이 알고리즘은 토크 제한에 걸리지 않고 좋은 경로 추종 성능을 보였다. 그러나, 제안된 알고리즘이 로봇 동역학에 기반을 두고 있기 때문에 모델링 불확실성 등에 의한 경로 오차를 발생시킬 수 있는 단점이 있다. 최근에는 외부 외란뿐 아니라 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. 이렇게 로봇의 동역학적 특성은 선형화하는 것은 토크 제한이 있는 시스템에서는 외란을 적절히 제거할 수 없는 단점이 있다.

Ohishi 등은 강인 제어 알고리즘을 이용하여 액츄에이터 토크 제한과 제어기의 출력 제한을 동시에 고려한 경로 추종에 관한 알고리즘을 제안하였다[4]. 여기서 제안된 방법은 등가 외란을 제거하기 위해서 복잡한 로봇 동역학 계산 없이  $H^\infty$  제어를 각 조인트에 적용한 것으로, 로봇 출력이나 토크가 제한되는 경우에는 로봇의 가속도를 선형적으로 감소시키기 때문에 임의의 로봇 자세에 대해서 토크 제한에 걸리는 경우 효과적으로 보상할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 토크 제한이 있는 로봇 매니퓰레이터에 대해서 외란 관측기에 기반을 둔 경로 추종 알고리즘을 제안한다. 먼저,  $n$  자유도의 로봇 매니퓰레이터를 선형 시스템인 이차적분 시스템으로 표현되는 간단한 등가 동역학적 특성(simple equivalent robot dynamics:SERD)을 보이도록 외란 관측기를 설계하여 각 조인트에 적용한다. 직교 좌표계에서 임의로 생성된 궤적에 대해서 토크 제한에 걸리는 경우 SERD에 의해서 온라인으로 직교 좌표계에서의 가속도 명령을 수정한다. 외란

\* 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 教授 · 工博

接受日子 : 1997年 8月 18日

最終完了 : 1997年 10月 29日

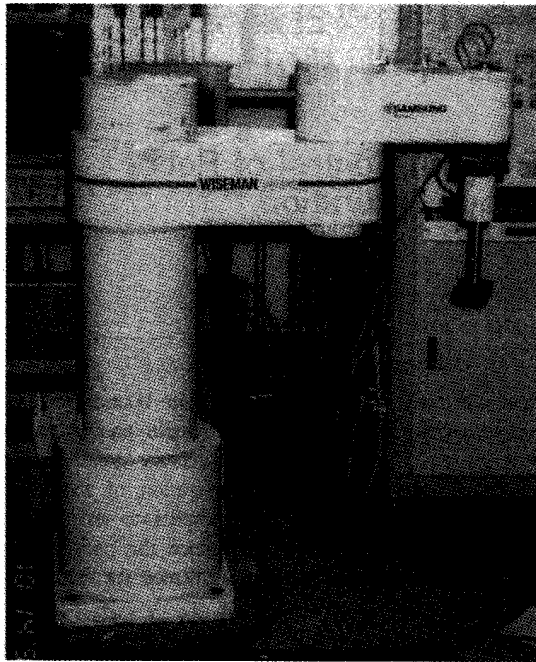


그림 1 2자유도를 가진 수평다관절형의 직접구동형 로봇  
Fig. 1 Two DOF SCARA type direct-drive arm

관축기의 출력과 제어기 출력의 합이 역추레이터의 토크 제한보다 큰 경우에는 외란 관측기가 적절한 작용을 못하므로 제어기가 낼 수 있는 최대 출력을 조절하여 SERD를 보장하기 위한 등가 외란을 보상하도록 하였다. 직교 좌표계에서의 가속도 명령은 SERD를 기반으로 수정되기 때문에 복잡한 로봇 동역학 방정식을 이용한 방법에 비해서 모델링 오차에 의한 영향에 둔감한 영향을 받는다. 제안된 알고리즘은 그림 1에 나타난 2 자유도의 수평다관절형 로봇 매니플레이터를 대상으로 모의 실험 및 실험을 통하여 그 효용성을 보였다.

2. 외란 관측기를 포함한 로봇 동역학

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

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

여기서,  $M(q)$ 는  $n \times n$  관성 행렬이고,  $c(q, \dot{q})$ ,  $g(q)$ ,  $f(\dot{q})$ 은 각각 구심 및 원심력, 중력, 점성력을 나타내는  $n \times 1$  벡터이고 로봇 관절의 함수이며,  $\tau$ 는 로봇의 각 관절에 가해지는  $n \times 1$  토크 벡터이다.  $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 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.

$$\hat{M}\ddot{q} + \tau_d(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau \tag{2}$$

여기서,  $\hat{M} = \text{diag} \{ \hat{M}_{11}, \dots, \hat{M}_{mm} \}$ 은  $n \times n$  diagonal 행렬이

며,  $\hat{M}_{ii}$ 는  $i$ 축의 주파수 응답으로부터 구해진 모델링된 상수 값을 갖는 관성 값이다.  $i$ 축의 주파수 응답은  $i$ 축을 제외한 축들을 고정시킨 상태에서  $i$ 축의 입력력 관계가  $\tau_i = \hat{M}_{ii}\ddot{q}_i$ 라고 가정하고, 토크 입력과 속도 출력관계로부터 실험적으로 구한 주파수 응답으로 구한 값이다. 그림 2에 실험적으로 구한 주파수 응답의 예를 나타내었다. 이 그림에서 실선으로 표현한 것이 실험적으로 구한 주파수 특성을 나타내며, 점선이 실험적으로 구한 곡선으로부터 선형화하여 근사화한 것을 나타낸다. 이 그림으로부터,  $\hat{M}_{22}$ 는  $0.1 [Kg m^2]$ 임을 알 수 있다.

식 (2)에서,  $\tau_d(q, \dot{q}, \ddot{q}) = [\tau_{1d}, \dots, \tau_{nd}]$ 는 비선형 성분, 간섭 항 및 모델링 불확실성등의 모든 모델링되지 않은 동역학 항을 포함하는  $n \times 1$  벡터이며,  $i$ 축의 외란을 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

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

만일, 식 (3)의 등가 외란이 구해지면, 각 축의 동역학은 등가 외란을 제거하므로써 분리될 수 있다. 따라서, 간단한 제어기를 사용하더라도 충분히 위치 명령,  $q_d(t)$ 을 추종할 수 있다. 등가 외란은 외란 관측기[5, 9]에 의해서 추정될 수 있으며, 제어 신호에 추정된 등가 외란을 더해줌으로써 제거할 수 있다. 그림 3은 모델링된 플랜트에 기반을 둔  $i$  축의 외란 관측기의 구조를 나타낸 것이다. 이 그림에서  $P_{in}(s)$ 는 실제 플랜트  $P_i(s)$ 의 모델링된 플랜트로, 여기서  $P_{in}(s)$ 은  $1/\hat{M}_{ii}s$ 로 주어졌으며,  $Q_i(s)$ 는  $P_{in}^{-1}(s)$ 를 구현하고 측정 신호의 노이즈 영향을 줄이기 위해 사용된 저역역 통과 필터이다.

그림 3의 블록도에서 입력과 출력 관계는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

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

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

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

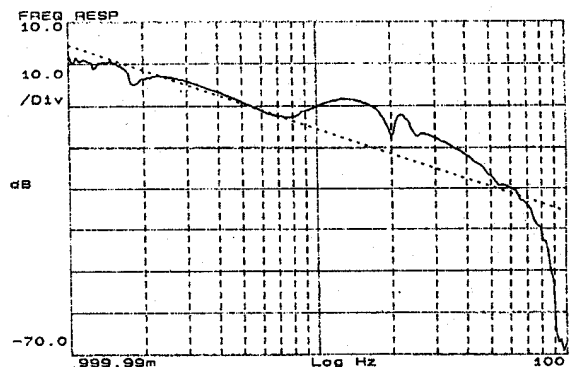


그림 2 스카라 로봇의 2축의 주파수 응답의 예  
Fig. 2 A frequency response for the 2nd axis of the SCARA type manipulator in Fig.1

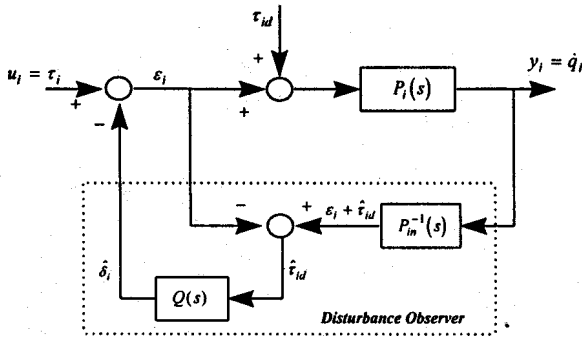


그림 3 외란 관측기의 구조  
Fig. 3 A structure of disturbance observer

$$G_{u_i y_i} = \frac{P_i(s) P_{in}(s) (1 - Q_i(s))}{P_{in}(s) + (P_i(s) - P_{in}(s)) Q_i(s)} \quad (6)$$

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

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

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

$$G_{u_i y_i}(s) \approx P_i(s), \quad G_{\tau_{id} y_i}(s) \approx P_{in}(s) \quad (8)$$

로서 외란 관측기에 의해서 시스템에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서, 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.

$$\hat{M}_n \ddot{q} = \tau \quad (9)$$

### 3. 토크 제한을 고려한 직교 좌표계에서의 경로 추적 제어 알고리즘

로봇 동작을 위한 직선 궤적은 오프 라인으로 생성되며, 기준 좌표계를 기준으로 로봇의 말단 효과 장치(end-effector)의 위치  $p$ 를 생성하고, 로봇의 역기구학(inverse kinematics)를 이용하여 각 관절 좌표계에서의 위치  $q$ 를 구한다. 이를 위한 기구학은 다음 식과 같다.

$$p = k(q) \quad (10)$$

$$\dot{p} = J(q) \dot{q} \quad (11)$$

$$\ddot{p} = J(q, \dot{q}) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} \quad (12)$$

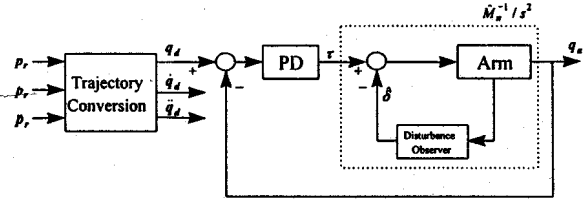


그림 4 외란 관측기에 기반을 둔 직교 좌표계에서의 독립 관절 제어의 개념도  
Fig. 4 Disturbance observer based independent joint control scheme in Cartesian space

여기서,  $J(q)$ 는 자코비안 행렬이며,  $\dot{J}(q)$ 는  $J(q)$ 의 미분이다. 만약, 식 (2)의 외란이 외란 관측기에 의해서 제거된다면, 간단한 PD 제어기로 로봇의 위치  $q$ 가 생성된 궤적인  $q_d$ 를 추종할 수 있다[6]. 그림 4에 외란 관측기에 기반을 둔 직교 좌표계에서의 로봇 동작을 위한 독립 관절 제어의 개념도를 나타내었다.

실제로 모든 축의 액츄에이터는 토크 제한을 가지고 있으며, 만약 외란 신호의 크기가 액츄에이터의 물리적인 토크 한계보다 크면 외란 관측기는 적절하게 작동할 수 없다. 그러므로, 외란 관측기가 외란 신호를 적절히 제거하도록 하기 위해 최대 허용 가능한 관절 액츄에이터의 토크 값은 SERD를 사용하여 결정한다. PD 제어기가 낼 수 있는 최대 토크 명령  $\tau_{max} = [\tau_1^{max} \dots \tau_n^{max}]^T$ 은 SERD를 보장하기 위해서 다음 식과 같이 주어진다.

$$\tau_{max} = \tau_{lim} - \delta \quad (13)$$

여기서,  $\tau_{lim}$ 과  $\delta$ 은 액츄에이터의 물리적인 토크 한계와 외란 관측기의 출력을 나타내는 벡터이다. 직교 좌표계와 관절 좌표계의 가속도의 관계는 식 (9)와 식 (12)로부터 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\ddot{p} = J(q, \dot{q}) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} \quad (14)$$

액츄에이터가 토크 한계를 가진 경우 직교 좌표계에서의 최대 허용 가능한 가속도  $\ddot{p}_{max} = [\ddot{p}_1^{max} \dots \ddot{p}_n^{max}]^T$ 는 로봇의 자세에 의해 좌우되기 때문에 빠른 동작을 위해 임의로 생성된 궤적에 대한 토크 명령은  $\tau_{max}$ 보다 큰 값을 생성할 수 있으며, 결과적으로 간단한 PID제어 알고리즘을 사용하는 경우에는 로봇이 생성된 경로로부터 벗어날 수 있다. 이러한 현상을 보상하기 위해서 임의로 생성된 기준 궤적에 대한 로봇의 속도를  $\tau_{max}$ 를 넘지 않도록 줄여 준다. 이를 위해 임의의 액츄에이터가 포화 상태일 때, 로봇 자세를 고려치 않고 임의로 생성된 직교 좌표계에서의 기준 가속도  $\ddot{p}_r = [\ddot{p}_{r1} \dots \ddot{p}_{rn}]^T$ 를 최대 허용가능한 가속도  $\ddot{p}_{max}$ 로 수정하는 방법을 제안한다.

액츄에이터가 포화 상태인 경우, 기준 가속도  $\ddot{p}_r$ 의 방향으로의 최대 허용 가능한 가속도  $\ddot{p}_{max}$ 는 시간에 대한 최적의 해를 얻도록 유도되며[2],  $m$ 개의 포화된 액츄에이터 중에  $i$ 번째 액츄에이터가 기준 가속도  $\ddot{p}_r$ 에 대해 포화 상태가 되었다고 가정하면,  $i$ 번째 액츄에이터의 토크 한계  $\tau_i^{max}$ 에서 기준 가속도  $\ddot{p}_r$ 의 방향에서 최대 허용가능한 가속도  $\ddot{p}_{max}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\bar{p}}_{\max}^i = \alpha_i \dot{\bar{p}}_r \quad (15)$$

여기서  $\alpha_i$  는 상수이다. 식 (15)를 식 (14)에 대입하면 다음과 같다.

$$\alpha_i \dot{\bar{p}}_r = c(q, \dot{q}) + D(q)\tau \quad (16)$$

여기서,

$$c(q, \dot{q}) = \hat{J}(q, \dot{q})\dot{q}. \quad (17)$$

이고

$$D(q) = J(q) \hat{M}_n^{-1} = [d_1 \dots d_n] \quad (18)$$

식(16)에서,  $d_i$ 는  $D(q)$ 의  $i$ 번째 열벡터이다. 임의의 자세에서의  $q$ 와  $\dot{q}$ 에 대해  $\tau_i^{\max}$ 는 식 (14)에서의  $\tau_i$ 와 대치하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{D}_i(q) \tilde{\tau}_i = \tilde{c}_i(q, \dot{q}), \quad (19)$$

여기서,

$$\tilde{c}_i(q, \dot{q}) = c(q, \dot{q}) + d_i \tau_i^{\max}, \quad (20)$$

$$\hat{D}_i(q) = [-d_1 \dots -d_{i-1} \dot{\bar{p}}_r - d_{i+1} \dots -d_n] \quad (21)$$

그리고,

$$\tilde{\tau}_i = [\tau_1 \dots \tau_{i-1} \alpha \tau_{i+1} \dots \tau_n]^T \quad (22)$$

이다. 그러므로  $\tilde{\tau}_i$ 는 식(19)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\tilde{\tau}_i = \hat{D}_i(q)^{-1} \tilde{c}_i(q, \dot{q}) \quad (23)$$

식 (23)에서  $\alpha_i$  가 얻어지고, 식 (15)에서의  $\dot{\bar{p}}_{\max}^i$ 도 구해진다.  $m$ 개의 포화된 액츄에이터에 대해  $\dot{\bar{p}}_{\max}$ 는 다음 식과 같이 구해진다.

$$\dot{\bar{p}}_{\max} = \min(\dot{\bar{p}}_{\max}^1, \dots, \dot{\bar{p}}_{\max}^i, \dots, \dot{\bar{p}}_{\max}^m) \quad (24)$$

$\dot{\bar{p}}_{\max}$ 의 계산은 SERD을 이용하여 어떠한 자세에서도 매우 간단하다.  $\dot{\bar{p}}_m$ 을  $\dot{\bar{p}}_r$ 과  $\dot{\bar{p}}_{\max}$ 로 부터 얻어질 실제 가속도 명령이라 하자. 만약 임의의 액츄에이터가 포화되면  $\dot{\bar{p}}_m$ 는  $\dot{\bar{p}}_{\max}$ 가 되어야 하며, 액츄에이터가 포화되지 않았을 때,  $\dot{\bar{p}}_m$ 는 보상된 가속도에 의해 매니플레이터가 원래 원하는 위치에서 벗어나지 않도록 해야한다. 이를 위해,  $\dot{\bar{p}}_c$ 는  $\dot{\bar{p}}_r$ 과  $\dot{\bar{p}}_{\max}$ 의 차이에 대해 보상하도록 다음과 같이 결정된다.

$$\dot{\bar{p}}_m = \dot{\bar{p}}_r - \dot{\bar{p}}_c \quad (25)$$

여기서,

$$\dot{\bar{p}}_c = \begin{cases} \dot{\bar{p}}_r - \dot{\bar{p}}_{\max}, & \text{if } \tau_i \geq \tau_i^{\max} \\ K \int_0^t (\dot{\bar{p}}_r - \dot{\bar{p}}_{\max}) dt, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

이며,  $K$ 는  $n \times n$  이득 행렬이다. 액츄에이터 포화 영역에서는 제어가 낼 수 있는 최대 가속도 명령을 내도록 가속도 명령을 수정하고 포화되지 않는 영역에서는 수정된 명령에 의한 위치 변경을 보상하기 위해 적분기를 사용하여 보상하였다. 제안된 가속도 수정 방법에 대한 블록도를 그림 5에 나타내었다.

제안된 알고리즘을 PD 제어가 적용된 경우와 외란 관측기를 사용한 경우와 비교하기 위해 SCARA 형의 로봇 매니플레이터에 대상으로 직교 좌표계에서의 직선을 일정한 속도로 동작하는 모의 실험을 시행하였다. 먼저, 사다리꼴 형태의 속도 프로파일을 갖는 궤적을 그림 6과 같이 생성하였으며 이때, 속도는 2[m/sec]으로 지정하였다. 이와 같은 경우 로봇의 시작점에서 1축이 포화 상태가 된다.

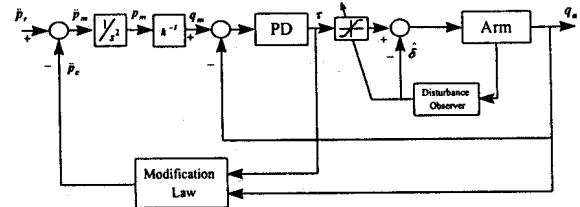


그림 5 외란 관측기에 기반을 둔 가속도 수정 방법의 블록도  
Fig. 5 Block Diagram of the acceleration modification scheme based on disturbance observer

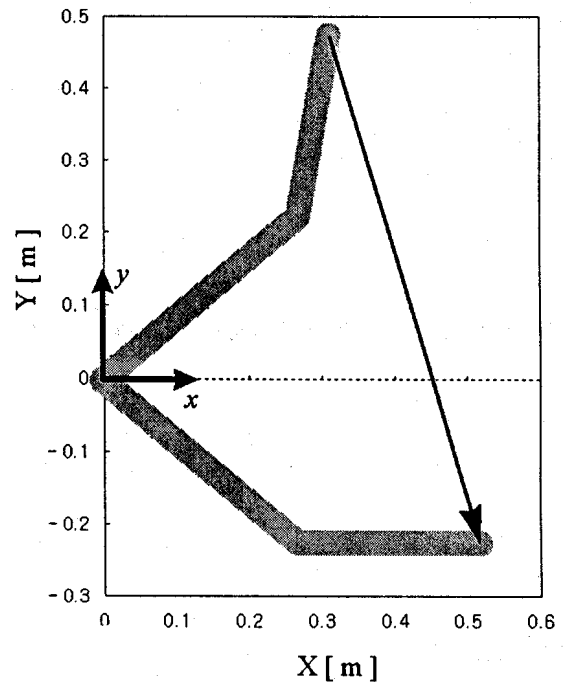


그림 6 직교 좌표계에서 생성된 궤적  
Fig. 6 Desired Path in Catesial Coordinate

그림 7에 PD 제어를 적용한 경우에 대한 모의 실험 결과를 나타내었다. 그림 7의 (a)와 (b)로부터 추적 에러는  $0 < t < 0.2$  사이에 나타나고 실제 경로는 생성된 경로 부터 벗어남을 알 수 있다. 그림 8은 PD 제어기와 외란 관측기가 결합된 제어가 적용되었을 때의 모의 실험 결과를 나타낸다. 이 그림에서 외란 관측기가 적용되었음에도 불구하고 액추에이터의 포화 상태 때문에 실제 경로는 생성된 경로로 부터 벗어남을 볼 수 있다. 이것은 외란 관측기가 외란 상태에서는 등가의 외란을 제거 할수 없음을 의미한다. 제안된 방법이 적용되었을 때의 모의 실험 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 (c)에서 점선으로 나타낸 것이 수정된 궤적이며, 직교 좌표계에서 가속도는 포화 영역에서 적절히 수정되어 생성된 궤적을 잘 추종함을 알 수 있다. 이상의 세가지 방법에 대한 경로 에러를

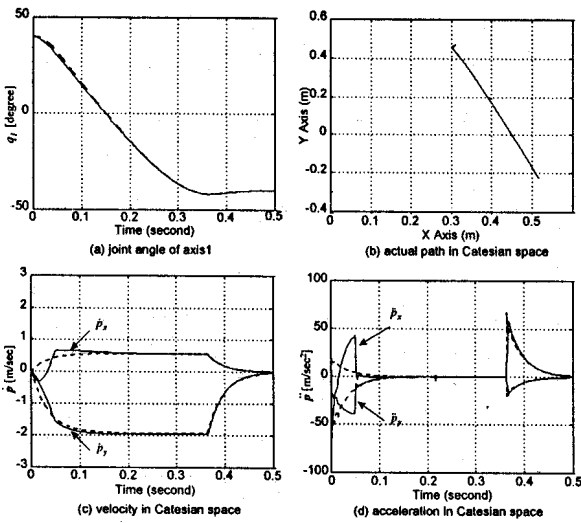


그림 7 PD 제어가 적용된 경우의 모의 실험 결과  
Fig. 7 Simulation results for the PD Controller



그림 8 PD 제어기와 외란 관측기가 적용된 경우의 모의 실험 결과  
Fig. 8 Simulation results for the PD Controller with disturbance observer

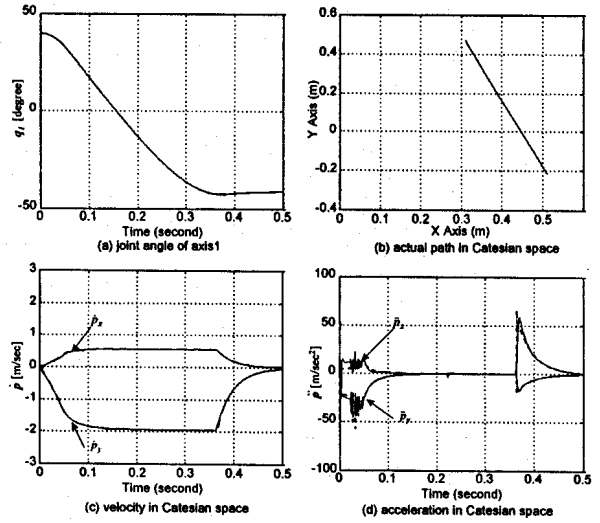


그림 9 제안된 가속도 수정 방법에 의한 모의 실험 결과  
Fig. 9 Simulation results for the proposed acceleration modification method

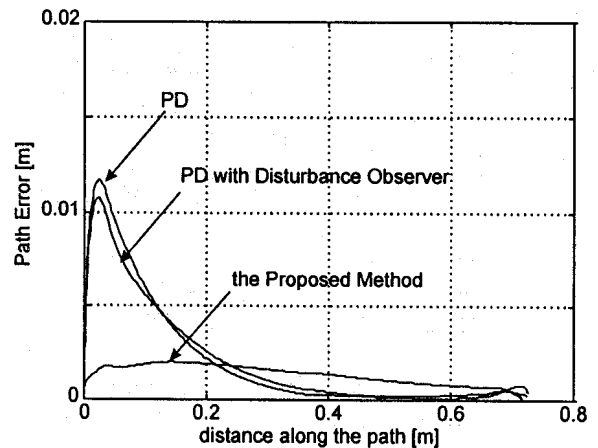


그림 10 생성된 궤적으로부터의 경로 오차에 대한 모의 실험 결과  
Fig. 10 simulation result for the path deviation from the desired path

그림 10에 함께 나타내었다. PD제어기와 외란 관측기를 사용한 PD제어기의 경우 액추에이터의 포화 현상으로 인해 로봇 동작의 시작 부분에 큰 경로 오차를 나타내었지만 제안된 방법은 다른 두 방법보다 바람직한 경로로 부터 적게 벗어난다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 실험 결과

그림 1의 SCARA 형의 직접 구동형 로봇 매니플레이터에 대해 실험을 수행하였으며, 이때 사용한 제어기의 구성을 그림 11에 나타내었다. 실시간 제어를 위해 실시간 운영체제인 Vxworks가 장착된 32비트 마이크로 프로세서와 서보 제어를 위한 DSP 보드를 사용하였으며, 제어를 위한 샘플링 시간은  $1 [msec]$ 이다. 실험에 사용된 직교 좌표계에서의 경로와 속도

는 모의 실험과 동일하게 적용하였다.

먼저, PD 제어를 사용한 경우의 실험 결과를 그림 12에 나타내었다. 이 그림에서 시작점에서의 1축 액츄에이터의 포화

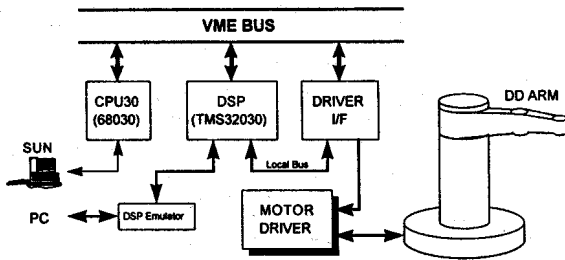


그림 11 실험 환경  
Fig. 11 Experimental Setup

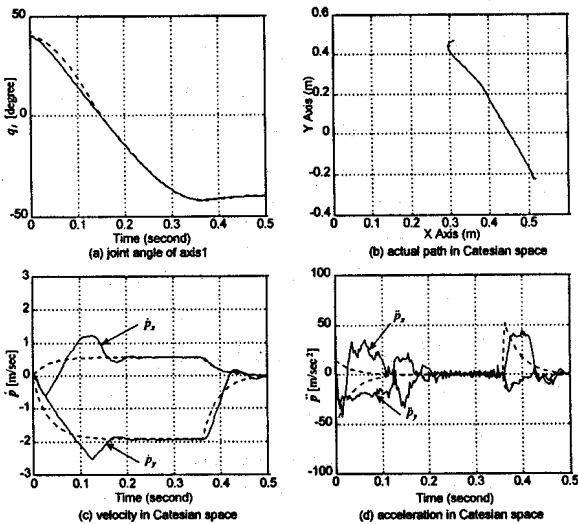


그림 12 PD 제어를 사용한 경우의 실험 결과  
Fig. 12 Experimental results for the PD controller

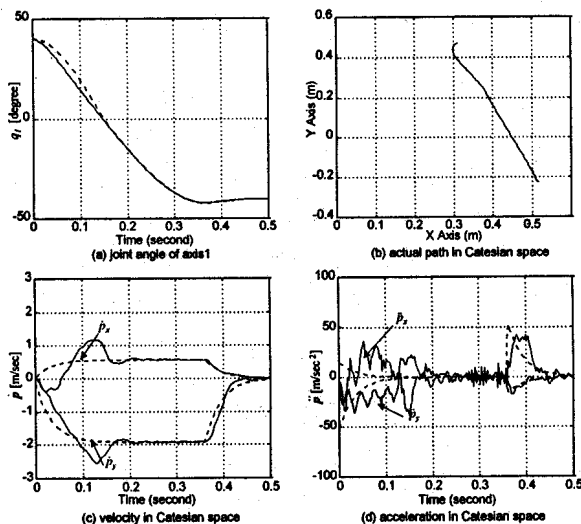


그림 13 PD 제어기와 외란 관측기가 적용된 경우의 실험 결과  
Fig. 13 Experimental results for the PD controller with disturbance observer

상태로 인하여 경로 오차가 발생하고 이로 인해 직교 좌표에서의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 시작점에서의 1축이 낼 수 있는 가속도보다 더 큰 가속도 명령이 생성되었기 때문이다. 2장에서 제시한 등가 외란을 제거하기 위해 PD 제어기와 외란 관측기를 같이 사용한 경우의 실험 결과를 그림 13에 나타내었다. 이 경우도 포화 상태에서는 외란 관측기가 이상적으로 동작할 수 없기 때문에 로봇 운동의 시작점에서 경로 오차가 발생됨을 알 수 있다. 이것은 외란 관측기가 액츄에이터의 포화 상태에서는 SERD를 만족시킬 수 없음을 나타낸다. 반면에, 제안된 제어기를 사용한 경우에는 그림 14와 같이 각 축이 포화 상태에 있을 때 액츄에이터가 낼 수 있는 최대 출력을 내도록 가속도 명령을 온라인으로 수정함으로써 직교 좌표계에서의 경로 오차가 줄어들었음을 알 수 있다. 실험이 적용된 세가지 방법에 대한 직교 좌표계에서의 경로 오차를 그림 15에 나타내었다. 이 그림에서 비교해보면, 제안된 알고리즘이 시작점에서의 액츄에이터 포화시에 가속도를 수정함으로써 경로 오차를 현저히 줄임을 알 수 있다.

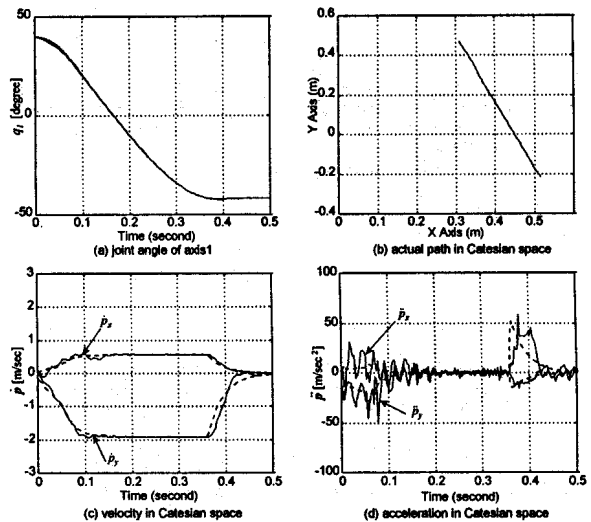


그림 14 제안된 가속도 수정 방법에 의한 실험 결과  
Fig. 14 Experimental results for the proposed acceleration modification method

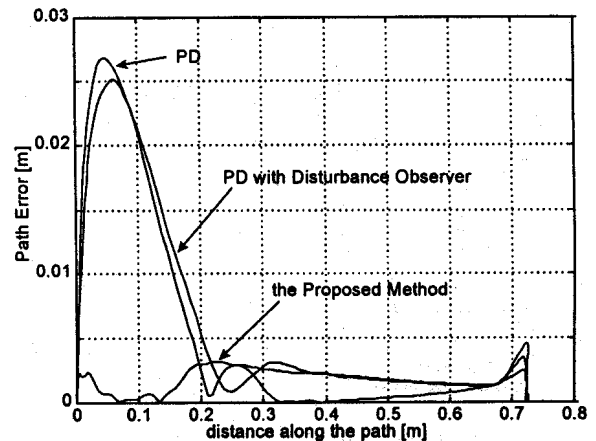


그림 15 생성된 궤적으로부터의 경로 오차에 대한 실험 결과  
Fig. 15 Experimental result for the path deviation from the desired path

### 5. 결 론

본 논문에서 액츄에이터가 포화 상태인 경우에도 정확히 경로를 추적하기 위한 제어 알고리즘이 제안되었다. 특히 외란 관측기를 이용한 SERD를 제안하여, 간단한 제어 알고리즘으로도 로봇을 쉽게 제어하도록 하였으며, 임의의 축이 포화 상태 일때에는 생성된 가속도 명령을 시간에 대한 최적해로 수정하는 방법을 적용함으로써, 경로 오차가 발생하지 않도록 하였다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위해 모의 실험 결과와 실험 결과를 제시하였으며, 고전적인 로봇 제어 알고리즘과 외란 관측기를 사용한 경우와의 결과를 비교 분석하여, 모의 실험 및 실험 결과로부터 제안된 알고리즘의 경우 경로 오차가 현저하게 줄어드는 것을 보였다.

본 연구는 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터의 연구비 지원에 의해서 이루어졌습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. G. Shin and N. D. McKay, "Minimum-time control of robotic manipulator with geometric path constraints," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. Ac-30, No. 6, pp. 531-541, 1985.
- [2] J. E. Bobrow, S. Dubowsky and J. S. Gibson, "Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths," *International Journal of Robotic Reserch*, Vol. 4, No. 3, pp. 3-17, 1985.
- [3] H. Arai, K. Tanie, and S. Tachi, "Path tracking control of a manipulator considering torque saturation," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 41, No. 1, pp. 25-31, 1994.
- [4] K. Ohishi, K. Akahori, W. Kaewprom and T. Mashimo, "Robust manipulator control method considering limit values of torque and controller output," *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Conference*, pp. 1252-1257, 1996.
- [5] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. on Japanese Society of Electrical Engineering*, Vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [6] 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.
- [7] O. Dahl and L. Nielsen, "Torque-limited path following by on-line trajectory time scaling," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 5, pp. 554-561, 1990.
- [8] 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.
- [9] H. S. Lee, "Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High-Accuracy Positioning System," Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994.

## 저 자 소 개



#### 엄 광 식 (嚴 光 植)

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



#### 서 일 홍 (徐 一 弘)

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