

〈논 문〉

## 무고정 조립작업을 위한 협조로봇 매니플레이터의 제어에 관한 연구

최 형 식

(1996년 5월 8일 접수)

### A Study on the Control of Two-cooperating Robot Manipulators for Fixtureless Assembly

Hyeung-sik Choi

**Key Words :** Fixtureless Assembly(무고정 조립작업), Uncertain(불확실한), Robust Control(견실제어), Fuzzy Logic(애매논리), Saturation(포화)

#### Abstract

This paper proposes the modeling of the dynamics of two cooperating robot manipulators performing the assembly job such as peg-in-hole while coordinating the payload along the desired path. The mass and moment of inertia of the manipulators and the payload are assumed to be unknown. To control the uncertain system, a robust control algorithm based on the computed torque control is proposed. Usually, the robust controller requires high input torques such that it may face input saturation in actual application. In this reason, the robust control algorithm includes fuzzy logic such that the magnitude of the input torque of the manipulators is controlled not to go over the hardware saturation while keeping path tracking errors bounded. A numerical example using dual three degree-of-freedom manipulators is shown.

#### 1. 서 론

로봇 매니플레이터는 단순하고 반복적이며 위험한 일들을 인간을 대신하여 함으로써 능률을 올리고, 산업재해를 예방하는데 큰 역할을 담당하고 있다. 이러한 로봇 매니플레이터는 산업현장에서 매니플레이터 간에 협조없이 단일로 작업하는 경우가 대부분이었다. 하지만 인간이 양손으로 협조하여 작업하듯이 협조로봇 매니플레이터를 사용하면 조립, 가공 및 보수유지와 같은 작업에 한 매니플레이터는 작업물체를 잡고 원하는 장소로 이동하고,

다른 매니플레이터로는 원하는 작업을 행하는 유연성(flexibility)을 가질 수 있다. 특히 조립작업에는 고정구가 필요없는 무고정 조립작업을 행할 수 있다. 반면 협조로봇 매니플레이터는 단일로봇 매니플레이터보다 운동방정식이 복잡하고 매니플레이터간에 기구학적 및 동력학적 운동의 간섭이 존재한다.

협조로봇 매니플레이터의 경로제어에 대한 연구로는 작업물체를 공동으로 잡고 원하는 위치로 이동(coordination)하는 것으로 Ishida,<sup>(1)</sup> Zheng<sup>(2)</sup> 및 Tarn<sup>(3)</sup> 등에 의한 master/slaver형태의 제어방법이 있다. 이 방법들 중에 Ishida<sup>(1)</sup>는 master arm의 위치제어에는 각각 PID 제어방법을 적용하고, slaver arm은 힘제어를 이용하여 master arm을 따

\*회원, 한국해양대학교 기계시스템공학부

르도록 제어하였다. Zheng<sup>(2)</sup>는 협조로봇 매니플레이터의 3가지 형태의 작업상황에서 holonomic constraints를 이용한 제어에 관하여 연구하였다. Tarn<sup>(3)</sup>은 협조로봇 매니플레이터 시스템의 정확한 선형화를 이룬 후 dynamic coordinator 형태의 제어를 적용하여 시스템의 경로제어를 행하였다. 한편 Hayati<sup>(4)</sup>와 Uchiyama<sup>(5)</sup>는 운동의 제한(constraint)이 없는 방향으로서는 위치제어, 운동의 제한이 있는 방향으로서는 힘제어를 하는 hybrid force-position 제어에 관한 연구를 하였다. 또한 원하는 위치로 이동하는 것 외에 load distribution과 같이 작업물체의 운동력을 협조로봇 매니플레이터에 균등히 혹은 최적으로 분배시키는 제어에 대한 연구가 Walker,<sup>(6)</sup> Pittelkau,<sup>(7)</sup> Alberts<sup>(6)</sup> 등에 의하여 행하여졌다.

매니플레이터의 질량 및 관성모멘트같은 파라미터가 불확실하거나 변할 때, 페루프시스템의 운동은 과도현상을 보이거나 불안정한 상태가 될 수도 있다. 이러한 경우 파라미터를 추정하는 적응제어기에 의하여 실제 파라미터를 추정함으로써 이러한 문제들이 해결할 수 있다. 협조로봇 매니플레이터의 적응제어에 대한 연구로는 적응 PID 제어를 고안한 Seraji<sup>(9)</sup>가 있고, 여기에서 매니플레이터 간에 간섭력은 외란으로 간주되고, 이는 적응제어기에 의해 보상된다. 또한 Choi<sup>(10)</sup>와 Hu<sup>(11)</sup>는 불확실한 파라미터를 갖는 협조로봇 매니플레이터의 실제 파라미터를 추정하는 적응제어와 제안한 제어기의 안정도에 관한 연구를 행하였다. 협조로봇 매니플레이터는 매니플레이터 간에 기구학적 및 동력학적 간섭력이 작용하므로 이는 시스템의 과도현상이나 안정도에 큰 영향을 미치고 따라서 안정도의 연구는 필수적이라 하겠다. 불확실한 협조로봇 매니플레이터의 안정도에 관하여 Choi,<sup>(10)</sup> Hu<sup>(11)</sup>와 Kazerooni<sup>(12)</sup>에서 연구되었다.

위의 발표된 연구들은 협조로봇 매니플레이터에 의하여 작업물체를 원하는 위치로 이동시키거나 작업물체의 운동을 협조로봇 매니플레이터에 분산시키는 Load Distribution에 관한 것들이다. 본 논문에서는 위에 언급된 협조로봇 매니플레이터의 연구들과 달리 peg-in-hole과 같은 조립작업에 협조로봇 매니플레이터를 사용하여 작업물체를 원하는 경로를 따라 이동시키며, 동시에 조립작업을 하는 무고정 조립작업(fixtureless assembly)을 위한 협조로봇 매니플레이터의 모델링과 제어에 관하여 연구

하였다. 작업물체와 매니플레이터의 질량과 관성모멘트가 정확히 측정되지 않은 불확실한 작업물체의 원하는 궤도이동과 동시에 조립작업을 행하는 협조로봇 매니플레이터 시스템의 기구학적 및 동력학적 관계와 작업물체간의 역학적인 관계를 모델링하였다. 이 불확실한 시스템의 제어를 위해 계산토크에 바탕을 둔 견실제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 퍼지논리를 이용하여 안정도를 만족하며 제어 입력이 구동원의 포화 내에 머물도록 조정된다.

본 논문의 구성은 2장에서 질량과 관성모멘트가 정확히 측정되지 않은 불확실한 작업물체의 부하를 협조로봇 매니플레이터가 균등히 분배하며 원하는 궤도로 이동하고 동시에 조립작업을 행하는 무고정 조립작업에 대한 기구학적 및 동력학적 모델링을 행하였다. 3장에서는 이 불확실한 시스템의 견실제어기의 설계와 안정도에 관해 설명하였으며, 4장에서는 견실제어기의 입력의 크기를 제어하는 퍼지논리에 관하여 설명하였다. 5장에서는 제안된 제어기의 적정성을 검증하기 위하여 두 대의 3축 협조로봇 매니플레이터를 이용한 수치 시뮬레이션을 행하였다.

## 2. 협조로봇 매니플레이터 시스템의 운동방정식

### 2.1 협조로봇 매니플레이터의 운동방정식

협조로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같다.

$$H_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) = \tau_i + J_i^T(q_i) F_i \quad (1)$$

$$i=1, 2$$

여기서,  $q_i \in R^{n \times 1}$ 는 매니플레이터의 관절각,  $\tau_i \in R^{n \times 1}$ 는 제어입력,  $H_i(q_i) \in R^{n \times n}$ 는 관성행렬,  $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in R^{n \times 1}$ 는 원심력, 코리올리력 및 중력을 포함하는 비선형 힘벡터,  $J_i(q_i)^T \in R^{n \times n}$ 는 자코비안행렬,  $F_i \in R^{n \times 1}$  ( $F_i$ 의 최대치는  $R^{6 \times 1}$ )는 말단효과장치에 가해지는 외력이다.  $F_i$  식 (1)에서 조립 완료시에 조립체간 충돌이 발생할 수 있고, 이로 인하여 임펄스형태의 충격력  $F_{ai} \in R^{n \times 1}$ 가 다음과 같이 포함될 수 있다. 각 매니플레이터 간에 충격력의 크기는 같고, 방향은 반대이다.

$$H_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) = \tau_i + J_i^T(q_i) (F_i + F_{ai}) \quad (2)$$

$$i=1, 2$$

식 (1)을 행렬식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_1^T & 0 \\ 0 & J_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

간략화하면 다음과 같이 표현된다.

$$H_r \ddot{q} + C_r = \tau + J_r^T F_r \quad (4)$$

여기서,

$$H_r = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_2 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad C_r = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad J_r^T = \begin{bmatrix} J_1^T & 0 \\ 0 & J_2^T \end{bmatrix}, \quad F_r = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

### 2.2 작업물체의 운동방정식

조립(peg-in-hole)이 요구되는 작업물체를 Fig. 1과 같이 한 로봇 매니플레이터가 음각의 작업물체 A를 다른 로봇 매니플레이터가 질량이 무시될 수 있는 가벼운 양각의 작업물체 B를 미끄러지지 않게 잡고, 원하는 방향으로 조립작업을 하면서 동시에 주어진 경로를 따라 이동시킬 때 작업물체의 운동은 뉴턴과 오일러식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$F = m \ddot{r} + b(\dot{r} - \dot{r}_f) \quad (5)$$

$$N = I \dot{w}_0 + w_0 \times (I w_0) \quad (6)$$

여기서,  $m, I \in R^{3 \times 3}$ 는 각각 작업물체의 질량과 관성행렬이고,  $r, w_0 \in R^{3 \times 1}$ 는 각각 절대좌표계에서 작업물체의 무게중심의 위치와 각속도이다.  $\dot{r}_f$ 는 절대좌표계에서 조립방향으로의 원하는 조립속도이다. 벡터  $\dot{r}_f$ 의 성분  $[\dot{r}_{fx}, \dot{r}_{fy}, \dot{r}_{fz}]^T$ 는 크기  $|\dot{r}_f|$ 의  $x, y, z$ 축 방향의 속도성분이며,  $b$ 는 조립작업시 작업물체 사이에 발생하는 동적 마찰계수이다.

작업물체가 협조로봇 매니플레이터에 의하여 이동되면  $F$ 와  $N$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$F = f_1 + f_2 + mg \quad (7)$$

$$N = n_1 + n_2 + P_1 \times f_1 + P_2 \times f_2 \quad (8)$$

여기서,  $f_1, f_2$ 와  $n_1, n_2$ 는 각각 첫째와 둘째 로봇의 말단효과장치에 의해 작업물체에 가해지는 외력과 모멘트이고,  $P_1, P_2$ 는 작업물체 좌표계에 대한 각 말단효과장치의 위치이다. 식 (5), (6), (7)과 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$W = L_0 F_0 \quad (9)$$

여기서,

$$W = M_0 \ddot{x} + C_0(\dot{x}) + Q_0(x, \dot{x}) \quad (10)$$

여기서,  $F_0 \in R^{2n \times 1}$ 는 접촉력(contact force/torque) 벡터이고, 행렬  $L_0 \in R^{n \times 2n}$ 는  $F_0$ 를 질량중심에 관하여 연관시킨다. 또한  $I_d \in R^{3 \times 3}$ 는 단위행렬이고,

$$M_0 = \begin{bmatrix} m I_d & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{r}_0 \\ i \dot{w}_0 \end{bmatrix}, \quad Q_0 = \begin{bmatrix} -mg \\ w_0 \times (I w_0) \end{bmatrix}$$

$$C_0 = b[(\dot{r} - \dot{r}_f)^T \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & 0 & 0 \\ P_1 & P_2(r_f) & I_1 & I_2 \end{bmatrix}$$

$$F_0 = [f_1^T \ f_2^T \ n_1^T \ n_2^T]^T$$

$L_0$ 에서

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & -p_{1z} & p_{1y} \\ p_{1z} & 0 & -p_{1x} \\ -p_{1y} & p_{1x} & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_2(r_f) = \begin{bmatrix} 0 & -p_{2z} & p_{2y} \\ p_{2z} & 0 & -p_{2x} \\ -p_{2y} & p_{2x} & 0 \end{bmatrix}$$

여기서,  $p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}$ 는 조립물체 A의 좌표에서 B를 잡은 말단효과장치의 위치벡터  $r_f$ 의 함수이다.

### 2.3 Load Distribution

작업물체의 운동은 접촉력  $F_0$ 로 표현되어 협조로봇 매니플레이터의 운동식에 최적으로 분배된다. 이를 위해서 식 (9)에서  $F_0$ 에 대하여 풀면 다음과 같이 표현된다.

$$F_0 = L_0^+ W + (I - L_0^+ L_0) \rho \quad (11)$$

여기서,  $\rho$ 는 임의의  $2n$ 차원 벡터이고, 우측 둘째항은 internal force를 나타낸다.  $L_0$ 의 의사역행렬(pseudo-inverse)  $L_0^+$ 는 다음과 같다.

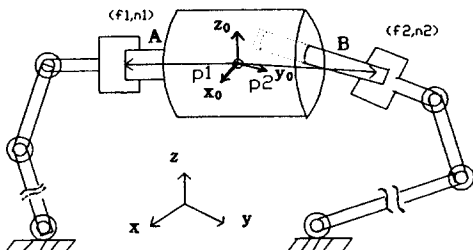


Fig. 1 Cooperating robot manipulators doing assembly job

$$L_0^* = L_0^T (L_0 L_0^T)^{-1} \quad (12)$$

식 (11)에 식 (10)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$F_0 = L_0^* M_0 \ddot{x} + L_0^* C_0 + L_0^* Q_0 + (I - L_0^* L_0) \rho \quad (13)$$

## 2.4 Constraint Equation

한 매니플레이터는 작업물체를 미끄러짐없이 고정하고 있으며, 다른 매니플레이터는 조립을 위한 조립방향의 이동 외에는 고정하고 있다. 따라서 매니플레이터의 각속도와 작업물체의 속도는 다음의 식으로 표현된다.

$$J_r \dot{q} = L_0 \dot{x}_0 \quad (14)$$

여기서,  $\dot{q} = [\dot{q}_1^T, \dot{q}_2^T]^T$ ,  $\dot{x}_0 = [\dot{x}^T, \dot{y}^T]^T$ ,  $J_r$ 은 각 매니플레이터의 자코비안행렬을 의미하고,  $J_r \dot{q}$ 는 매니플레이터의 말단효과장치의 조인트 각속도에 의한 표현이고, 이는 질량중심과 말단효과장치의 상대적 위치를 나타내는 벡터  $p_1$ 과  $p_2$ 로 구성된  $L_0$ 에 의하여 직교좌표계에서의 질량중심의 각속도로 표현되었다. 여기서 작업경로가 적절히 선택되어  $J_r$ 의 역행렬이 항상 존재한다고 가정한다. 식 (14)을 시간에 관하여 미분하면 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{J}_r \dot{q} + J_r \ddot{q} = L_0 \dot{x}_0 + L_0 \ddot{x}_0 \quad (15)$$

식 (15)을  $\ddot{q}$ 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{q} = J_r^{-1} (\dot{L}_0 \dot{x}_0 + L_0 \ddot{x}_0 - \dot{J}_r \dot{q}) \quad (16)$$

또한 식 (4)과 식 (9)에서 매니플레이터의 작용력과 반작용력은 다음과 같다.

$$F_0 = -F_r \quad (17)$$

식 (11), (14), (16)을 식 (4)에 대입하면

$$\begin{aligned} H_r J_r^{-1} (\dot{L}_0 \dot{x}_0 + L_0 \ddot{x}_0 - \dot{J}_r J_r^{-1} L_0 \dot{x}_0) + C_r \\ = \tau - J_r^T (L_0^T W + (I - L_0^* L_0) \rho) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에 식 (10)을 대입하면 정리하면 다음의 간략화된 식으로 표현된다.

$$H_m \ddot{x}_0 + C_m = \tau - J_m^T F \quad (19)$$

여기서,

$$\begin{aligned} H_m &= H_r J_r^{-1} L_0 + J_r^T L_0 + M_0 \\ C_m &= H_r J_r^{-1} (\dot{L}_0 \dot{x}_0 - \dot{J}_r J_r^{-1} L_0 \dot{x}_0) + J_r^T L_0^T (Q_0 + C_0) \\ J_m^T F &= J_r^T (I - L_0^* L_0) \rho \end{aligned}$$

## 3. 건설제어기의 설계 및 안정도

앞장에서 조립작업을 위한 협조로봇 매니플레이터의 운동방정식의 모델링에 관하여 논의하였다. 이 장에서는 이 운동방정식을 이용하여 작업물체를 원하는 장소로 이동시키며, 동시에 조립작업을 행하는 제어 알고리즘에 관하여 논의한다. 본 논문에서는 작업물체나 매니플레이터의 질량, 관성모멘트, 그리고 마찰력의 추정오차들은 매니플레이터의 운동방정식에서 외란으로서 정의된다. 이러한 외란에 건설하게 대처하며, 로봇 매니플레이터의 운동을 제어하여 원하는 경로추적을 성취할 수 있는 건설제어기를 포함하는 계산토크형태의 제어기는 다음과 같다.

$$\tau = \hat{H}_m (v + U) + \hat{C}_m + J_m^T F \quad (20)$$

여기서,  $v = \ddot{x}_d - k_v \dot{e} - k_p e$ ,  $e = x - x_d$

$\hat{H}_m$ ,  $\hat{C}_m(q, \dot{q})$ 는 각각 질량과 관성모멘트를 포함하는  $H_m(q)$ ,  $C_m(q, \dot{q})$ 의 추정치이고,  $x_d$ 는 매니플레이터의 원하는 경로이며, 제어이득  $k_p$ ,  $k_v \in R^{2n \times 2n}$ 는 정정대각행렬(diagonal positive matrix)이다.  $U$ 는 작업물체나 매니플레이터의 질량, 관성모멘트, 그리고 마찰력의 추정오차를 건설하게 제어하는 건설제어기이다. 로봇 매니플레이터에 식 (20)의 제어기를 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$H_m \ddot{x}_0 + C_m = \hat{H}_m (v + U) + \hat{C}_m \quad (21)$$

식 (21)을 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{H}_m (\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e) = \tilde{H}_m \ddot{x}_0 + \tilde{C}_m + \hat{H}_m U \quad (22)$$

여기서,  $\tilde{H}_m = \hat{H}_m - H_m$ ,  $\tilde{C}_m = \hat{C}_m - C_m$ 이다.

식 (21)에서  $\ddot{x}_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{x}_0 = H_m^{-1} \{ \hat{H}_m (v + U) + \tilde{C}_m \} \quad (23)$$

식 (23)을 식 (22)에 적용하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e \\ = \hat{H}_m^{-1} [ \tilde{H}_m H_m^{-1} \{ \hat{H}_m (v + U) + \tilde{C}_m \} + \tilde{C}_m ] + U \\ = (H_m^{-1} \hat{H}_m - I_n) (v + U) + H_m^{-1} \tilde{C}_m + U \end{aligned} \quad (24)$$

여기서,  $H_m^{-1} \hat{H}_m - I_n = \hat{H}_m^{-1} \tilde{H}_m H_m^{-1} \hat{H}_m$ 이고,  $I_n \in R^{2n \times 2n}$ 는 단위행렬이다. 식 (24)은 다음의 간략한 식으로 표현된다.

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = \Omega + U \quad (25)$$

여기서,

$$\Omega = E_1(v + U) + H_m^{-1} \tilde{C}_m, \quad E_1 = H_m^{-1} \tilde{H}_m - I_n$$

시스템의 불확실한 변수들의 추정오차와 외부로의 외란을 제어하기 위하여 견실제어기  $U$ 의 설계가 요구된다. 견실제어기의 적용을 위해 식 (25)을 다음의 상태식으로 표현한다.

$$\dot{x} = Ax + Bw \quad (26)$$

$$\text{여기서, } A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_p & -k_v \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad w = (\Omega + U)$$

여기서, 케환 제어이득을 포함하는 행렬  $A \in R^{4n \times 4n}$ 이고,  $x \in R^{4n \times 1}$ 는 추적오차벡터이다. 식 (26)의 제어를 위한 견실제어기는 Corless<sup>(13)</sup>와 Dawson<sup>(14)</sup>이 제안한 것과 유사한 견실제어기를 이용한다. 이 견실제어기는 리아프노프함수를 이용하여 추적오차가 일정한 작은 상수에 유계됨을 만족한다. 여기서 안정하기 위해서는 몇가지 조건이 요구된다. 첫째, nominal plant가 uniformly asymptotic stable해야 하는데 식 (25)의 좌변에서 제어 이득을 적절히 선택하면 이는 만족된다. 둘째, 식 (28)의  $\|\Omega\| \leq \rho$ 이 만족되어야 하며, 이 조건은 실제 시스템에서 actuator의 포화로 인하여 만족시키기 어렵다. 본 논문에서는  $\|\Omega\| \leq \rho$ 가 되는  $\rho$ 를 식 (27)에서 적용하더라도  $\varepsilon$ 의 크기를 퍼지 제어 알고리즘을 이용하여 제어함으로써  $U$ 의 크기를 입력한계(input saturation)를 초과하지 않는 제어를 설계하는 것이다. 우선 유사한 견실제어기는 다음과 같다.

$$U = -\frac{(B^T P x) \rho^2}{\|B^T P x\| \rho + \varepsilon} \quad (27)$$

여기에서  $\varepsilon$ 는 미소한 양의 상수이고,  $P$ 는 이후에 정의된다.  $\rho$ 의 정의는 식 (26)에서  $\Omega$ 의 구성에서 다음의 부등식과 같고, 식 (27)를 이용하면 식 (28)의 두번째 부등호의 조건을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\Omega\| &\leq \|E_1 v\| + \|H^{-1} \Psi\| + \|E_1 U\| \\ &\leq \|E_1 v\| + \|H^{-1} \Psi\| + \|E_1\| \rho = \rho \end{aligned} \quad (28)$$

여기서,  $\|U\| \leq \rho$ 이고,  $\|\cdot\|$ 는  $L_2$  규범을 의미한다. 식 (28)을 만족하는  $\rho$ 에 대한 정의를 다음과 같이

구할 수 있다.

$$\rho = (1 - \|E_1\|)^{-1} (\|E_1 v\| + \|H^{-1} \Psi\|) \quad (29)$$

$\rho > 0$  조건을 만족하기 위해서

$$\max \|E_1\| < 1 \quad (30)$$

이어야 한다. 추정오차에 대한 견실제어기의 안정도의 결과를 얻기 위해 안정도의 조건을 만족하는 양의 값을 갖는 리아프노프함수는 다음과 같이 정의된다.

$$V = x^T P x \quad (31)$$

여기서, 행렬  $P \in R^{4n \times 4n}$ 은 양의 대칭행렬(positive definite symmetric matrix)이고, 식 (31)은 양의 스칼라  $\lambda_1, \lambda_2$ 에 의하여 아래와 같이 유계된다.

$$\lambda_1 \|x\|^2 < x^T P x < \lambda_2 \|x\|^2 \quad (32)$$

리아프노프함수  $V$ 를 시간에 관하여 미분하고 식 (32)과 리아프노프식(Lyapunov equation) (33)을 이용하면 시간에 관한  $V$ 의 미분식이 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= -x^T Q x + 2x^T P B w \end{aligned} \quad (33)$$

정정대각행렬  $Q \in R^{4n \times 4n}$ 의 조건을 만족하는 리아프노프식은 다음과 같다.

$$A^T P + P A = -Q \quad (34)$$

식(26)과 (34)의 정의를 이용하여 식 (33)을 정리하면 다음의 부등식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -x^T Q x + 2 \|x^T P B\| \rho + 2x^T P B U \\ &\leq -x^T Q x + 2(B^T P x)^T \left( U + \frac{B^T P x}{\|B^T P x\|} \rho \right) \end{aligned} \quad (35)$$

식 (35)에 식 (27)의 견실제어기를 적용하면  $\dot{V}$ 에 대한 다음의 결과가 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -x^T Q x + 2\varepsilon \\ &\leq -\lambda \|x\|^2 + 2\varepsilon \end{aligned} \quad (36)$$

여기서,  $\lambda = \min\{Q\}$ 이다. 식 (36)의 추적오차  $x$ 의 유계에 관한 이론과 증명은 참고문헌<sup>(13,14)</sup>에 나타나 있는 바와 같이 상태오차  $x$ 는 궁극적으로  $\sqrt{\varepsilon}$ 에 어떤 상수를 곱한 값에 유계된다. 따라서  $\varepsilon$ 의 크기가 작을수록 추적오차는 작아진다. 반면 식 (27)의 견실제어기에서  $\rho$ 의 변수인 추적오차  $x$ 가

클수록  $\rho$ 가 증가하여  $U$ 의 크기는 증가하므로 실제 시스템에의 적용시에 하드웨어적으로 제한된 제어입력 때문에 입력포화에 달한다. 즉, 식 (28)에서  $\rho$ 의 크기는  $\|\Omega\|$ 의 크기보다 크다는 조건을 만족해야 하고  $\|\Omega\|$ 가 매우 크면 실제 시스템에서 입력토크는 제한되어 있어서 제어입력  $U$ 가 식 (38)의  $\frac{B^T P x}{\|B^T P x\|} \rho$ 를 제어할 수 없게 되어 식 (36)의 결과를 이끌어 낼 수 없고 안정도도 보장할 수가 없다. 본 논문에서는 퍼지 알고리즘을 이용한 견실제어기<sup>(16)</sup>를 적용하였다. 이는  $U$ 가 입력포화에 도달할 정도로  $\rho$ 의 크기가 증가하면  $\varepsilon$ 의 크기를 증가시켜 견실제어 입력을 입력한제 이하로 제어하고  $\rho$ 가 감소하면 추적오차를 줄이기 위해  $\varepsilon$ 을 감소시키는 논리구조를 갖는다. 식 (27)의 견실제어기에서  $U = -\frac{(B^T P x) \rho^2}{\|B^T P x\| \rho + \varepsilon}$ 에서 제어입력  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$ 과 상태  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 가 벡터임에도 각 인수에 대하여 일관적으로 상수  $\varepsilon$ 을 사용하였으나, 본 논문에서는 벡터의 각 인수  $u_i$ 에 대하여  $x_i$ , 즉  $e_i$ 와  $\dot{e}_i$ 의 크기에 따라 정해진 퍼지 rule에 의해 추론하여  $\varepsilon_i$ 의 크기를 퍼지제어 알고리즘에 따라 제어하여 견실제어 입력의 크기를 제어하는 퍼지견실제어기이다. 제안된 제어기를 작업물체와 매니플레이터의 질량과 관성이 정확히 측정되지 않은 상황하에서 원하는 궤적을 따라 이동하면서 조립작업을 행하는 협조로봇 매니플레이터 시스템에 적용된다.

### 4. 입력포화를 갖는 퍼지 견실 제어기의 설계

퍼지제어는 1975년에 Mamdani 등에 의해 제어에 도입되었고,<sup>(15)</sup> 이의 구성은 일반적으로 퍼지화, 규칙베이스, 추론과 비퍼지화로 구성된다. 본 논문에서 퍼지제어규칙은 "if-then" 형식의 정성적이고 언어적인 규칙으로 표현되며, 이는 퍼지제어기의 특성을 결정하게 된다. 본 논문에서 견실제어 입력의 크기를 결정하는  $\rho$ 의 변수인 위치오차  $e_i$ 와 속도오차  $\dot{e}_i$ 의 값을 다음과 같이 퍼지화시키고 다음과 같이 분할한다.

$$e = \{ NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL \} \quad (37)$$

$$\dot{e}_i = \{ NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL \} \quad (38)$$

$e_i$ 와  $\dot{e}_i$ 을 각각  $e$ 와  $\dot{e}$ 의  $i$ 번째 벡터성분이라 하고, 관측에 의한 확정된 수치라 하면 사용된 퍼지 제어규칙은 49개로 다음과 같이 or로 결합된다.

- R1 : if  $e_i$  is PL and  $\dot{e}_i$  is PL, then  $y_i$  is L1, where L1=P6
  - or
  - R2 : if  $e_i$  is PL and  $\dot{e}_i$  is PM, then  $y_i$  is L2, where L2 = P5
  - or
  - ⋮
  - ⋮
  - ⋮
  - R49 : if  $e_i$  is NL and  $\dot{e}_i$  is NM, then  $y_i$  is L49, where L49 =P6
- (39)

여기서, 오차와 속도오차벡터의 각 성분  $e_i$ 와  $\dot{e}_i$ 에 대해서 각각의  $y_i$ 을 적용한다.

위의 제어규칙을 Table 1과 같이 표로 나타낼 수 있다.

퍼지제어 규칙에 적용된 퍼지집합의 소속함수는 삼각함수를 이용하였고, 이는 다음과 같다.

제어입력 변수에 따라 결정되는 제어변수  $\varepsilon_i$ 은 다음의 crisp한 값들로 구성되어 있다.

$$\varepsilon_i = \{ P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6 \} \quad (40)$$

여기에서 제어입력  $e_i$ 와  $\dot{e}_i$ 의 변화량에 따른  $\varepsilon_i$ 의 크기를 퍼지추론에 따라 결정하여 견실제어 입력의 크기를 줄이거나 추적오차를 줄이는 논리를 적용하였다. 퍼지추론은 Max-Min 형태이고, 제어규칙 R1부터 R49까지의 각 전건부의 최소치인 적

Table 1 Fuzzy rule base

$\dot{e}_i/e_i$	PL	PM	PS	ZO	NS	NM	NL
PL	P6	P5	P4	P3	P4	P5	P6
PM	P5	P4	P3	P2	P3	P4	P5
PS	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4
ZO	P3	P2	P1	P0	P1	P2	P3
NS	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4
NM	P5	P4	P3	P2	P3	P4	P5
NL	P6	P5	P4	P3	P4	P5	P6

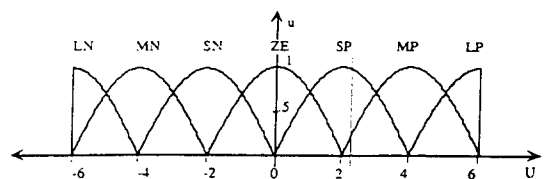


Fig. 2 Membership function of input variables

합도를 퍼지화된 제어입력에 곱하여 더한 전체의 합을 추론결과로 정하였다. 실제의 제어입력으로 적용하기 위하여 추론결과와의 비퍼지화를 행하였고, 이 비퍼지화방법은 무게중심법(center of gravity)을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 매니플레이터의 각 축의 제어를 위한 식 (27)의 견실제어기의  $\epsilon_i$ 를 정한다.

### 5. 시뮬레이션 및 고찰

제안된 퍼지 견실제어기의 성능을 입증하기 위하여 협조로봇 매니플레이터의 대상으로 크기와 모양이 같은 두대의 3축 수평관절형 로봇 매니플레이터를 사용하였다. 시스템의 구성 및 주위환경을 살펴보면 사용된 각 로봇링크의 질량과 길이는 다음의 Table 2와 같이 정의되었고, (·)는 실제변수의 추정치를 나타낸다. 질량중심은 각 링크와 작업물체의 중심점에 있다고 가정하였다.

작업물체 중심점의 원하는 궤적의 시작 및 도착점은  $x$ -축 방향으로  $[0, 0]$ ,  $y[0.2(m), 0.8(m)]$   $z$ -축 중심으로의 회전으로,  $[0(rad), 0(rad)]$ 이

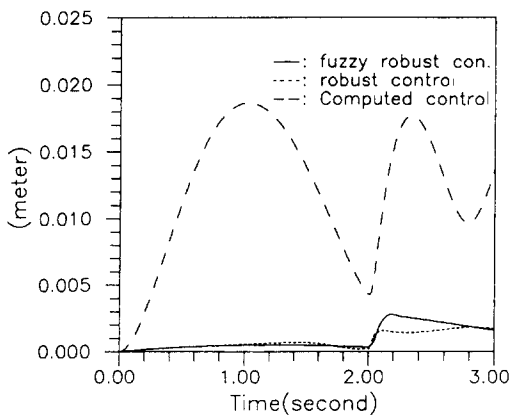
며, 경로함수는 3차 다항식을 사용하여 3초 동안 이동하였다. 양각 조립물체를 잡은 말단효과장치의 조립방향 및 시작 및 도착점은  $x$ -축 방향으로  $[0.3(m), 0.1(m)]$ 이다. 조립물체간에 동적 마찰력이 존재하고, 이의 계수는 20이며, 추정치는 10으로 가정하였다. 시스템의 입력외란으로는 로봇 동작후 조립작업이 끝나는 2초경에 조립체간의 충돌로 인하여  $x$ -축 방향으로 0.05초간 20(Newton)의 충격력이 발생하였다고 가정하였다.

제어기의 구성에서 계산토크제어기의 이득은 각 축에  $k_d=8$ ,  $k_p=16$ 을 사용하였고, 퍼지 견실제어기의 제어변수  $p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ 은 크기를 각각  $10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1$ 로 정하였다.

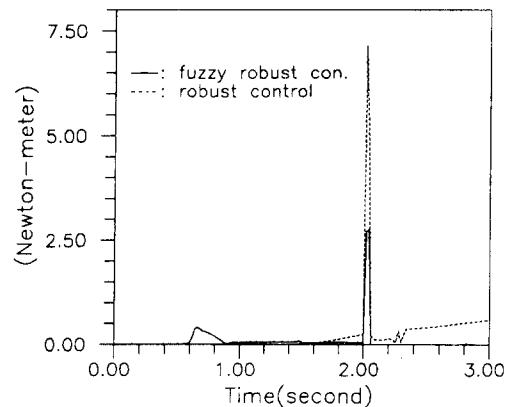
이상과 같은 제어조건과 외부환경하에서 시뮬레이션은 제어기를 적용한 페루프식이 비선형식이어서 4차 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하였다. 결과는 Figs. 3, 4, 5, 6, 7에 나타나 있다. Fig. 3에서 횡축은 운동시간을 종축은 작업물체 중심점의 작업자표제(object coordinates)에서의 위치추적오차를 나타낸다. 긴 점선, 짧은 점선 및 실선은 각 각 계

**Table 2** Mass and moment of inertia of manipulator

Robot arm and object	Length	Mass(Estimation)	Inertia (Estimation)
L1	0.5 m	5 kg (3)	0.6 Kg-m*m (0.24)
L2	0.5 M	3 Kg (1.8)	0.3 Kg-m*m (0.12)
L3	0.2 m	1.5 kg (0.9)	0.1 Kg-m*m (0.4)
L4	0.1 m	10 Kg (3)	2 Kg-m*m (0.6)



**Fig. 3** Tracking errors



**Fig. 4** Input torques for the first link

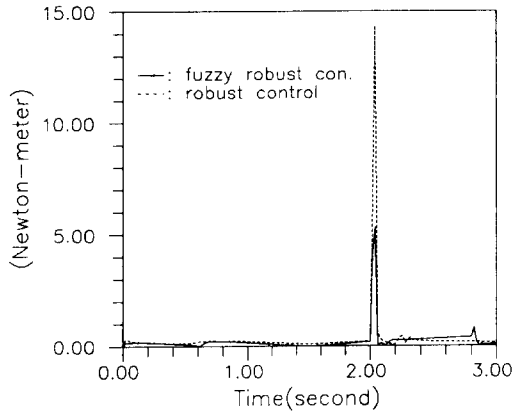


Fig. 5 Input torques for the second link

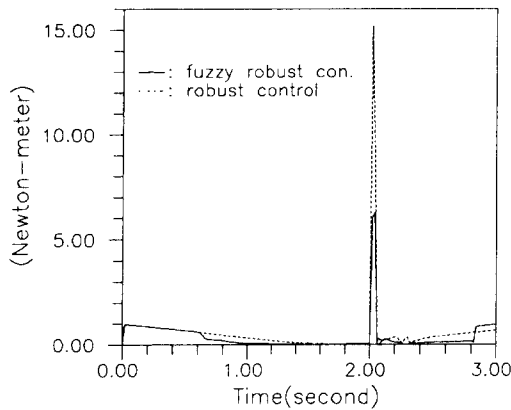


Fig. 6 Input torques for the third link

산토크제어기만 적용했을 경우, 견실제어기를 적용한 경우 그리고 퍼지 견실제어기를 적용한 경우의 추적오차를 나타낸다. 이들 중에서  $\varepsilon=10^{-6}$ 을 대한 견실제어기만을 적용한 경우 추적오차가 가장 적은 것을 알 수 있다. 이는 작은  $\varepsilon$ 을 택할수록 추적오차가 작아진다는 이론에서 확인할 수 있다. 한편으로 추적오차는 작아지나 입력토크는 커질 수 있다는 것을 식 (27)을 유추하면 알 수 있다. Figs. 4, 5, 6은 견실제어기를 적용한 경우와 퍼지견실제어기를 적용한 경우의 링크 1, 2, 3에 가해진 입력토크의 크기를 나타낸 것이다. 짐센과 실선은 각각 견실제어기와 퍼지 견실제어기를 적용한 경우이고 충돌로 인한 외란이 있는 2초경에 퍼지제어기보다 상대적으로 제어입력토크가 크다는 것을 알 수 있다. 입력한계가 있는 실제 시스템에서 입력토크의 한계에 도달할 수 있음을 알 수 있다. 이에 반해

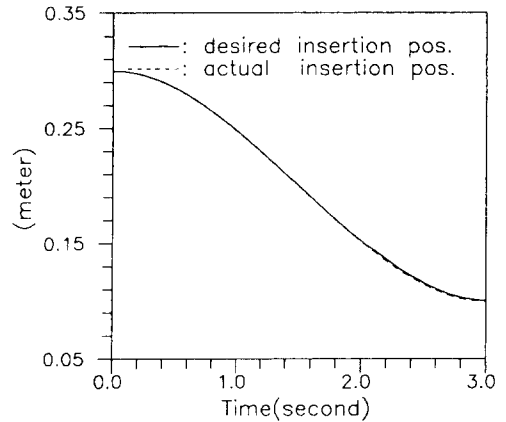


Fig. 7 Assembly position of parts

퍼지 견실제어기는 퍼지제어에 의해  $\varepsilon_i$ 을 조절함으로써 입력토크의 크기를 제한할 수 있다. Figs. 4, 5, 6에서 나타난 바와 같이 퍼지 견실제어기의 추적오차는 견실제어기에 비해 상대적으로 클 수 있으나 퍼지논리제어에 의해 제어입력을 조정하여 크기가 입력한계내에 머물러 실제 적용 가능함을 알 수 있다. Fig. 7에서 종축은 조립물체의  $x$ -축 방향으로 조립경로의 시작 및 도착점을 나타낸다. 충격력의 발생하에서도 원하는 조립경로를 잘 추적함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 질량과 관성모멘트가 정확히 측정되지 않은 불확실한 작업물체의 부하를 힘조로봇 매니퓰레이터가 균등히 분배하며 원하는 궤도로 이동하고 동시에 peg-in-hole과 같은 조립작업을 행하는 부고정 조립작업에 대한 기구학적 및 동력학적 모델링에 관하여 연구하였다. 또한 경로추적과 조립작업의 제어시에 매니퓰레이터와 작업물체의 질량과 관성이 불확실할 때 이의 제어를 위한 견실제어기에 대해 연구하였다. 제안된 제어기는 입력토크의 한계(saturation)가 존재하는 기존의 견실제어기의 문제를 퍼지논리를 이용하여 입력토크를 한계이하로 유지할 수 있도록 개선하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 조립작업이 잘 이루어 짐을 알 수 있다. 한편 제안된 논리에 의한 추적오차는 견실제어기보다 크나 향후 보다 적절한 퍼지논리를 적용하여 향상된 추적오차를 가질 수 있는 제어기를 연구하고자 한다.



후 기

본 논문의 연구는 1995년도 교육부 학술진흥재단 공모과제(01-E-0362)에 의해 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사할 드립니다.

참고문헌

- (1) Ishida, T., 1977, "Force Control in Coordination of Two Arms," *Proc. of the 5th Int. Joint Conf. on A. I.*, Aug., pp. 717~722.
- (2) Zheng, Y. F. and Luh, J. Y. S., 1985, "Constrained Relations Between Two Coordinated Industrial Robots," *Proc. of Conf. Intelligent Systems and Machines*.
- (3) Tarn, T. J., Bejczy, A. K. and Yun, X., 1986, "Coordinated Control of Two Robot Arms," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1193~1202.
- (4) Hayati, S., 1986, "Hybrid Position Force Control of Multi-arm Cooperating Robots," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 82~89.
- (5) Uchiyama, M. and Dauches, P., 1988, "A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for Coordination of Two Robots," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 350~356.
- (6) Alberts, T. E. and Soloway, D. I., 1988, "Force Control of Multi-arm Robot System," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1490~1496.
- (7) Pittelkau, M. E., 1988, "Adaptive Load-sharing Force Control for Two Arm Manipulators," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 498~503.
- (8) Walker, I. D. and Marcus, S. I., 1989, "Distribution of Dynamic Loads for Multiple Cooperating Robot Manipulators," *Journal of Robotic Systems* Vol. 6, No. 10, pp. 35~47.
- (9) Seraji, H., 1988, "Coordinated Adaptive Position/Force Control of Dual-arm Robots," *Int. J. Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 3, pp. 140~149.
- (10) Choi, H. S. and Ro, P. I., 1992, "Robust Adaptive Control for Two-arm Motion Coordination," *ASME WAM 92*.
- (11) Hu, Y. and Goldenberg, A. A., 1989, "An Adaptive Approach to Motion and Force Control of Multiple Coordinated Robot," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1091~1096.
- (12) Kazerooni, H., 1987, "Stability Analysis of Two Cooperating Robot Manipulators," *In Modeling and Control of Robotic Manipulators and Manufacturing Processes*, ASME, New York, pp. 203~212.
- (13) Corless, M. and Leitmann, G., 1979, "Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems," *J. Automatic Controls*, AC-26, pp. 1139~1143.
- (14) Dawson, D. M., Lewis, F. L. and Dorsey, J. F., 1992, "Robust force control of a robot manipulators," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 11, No. 4, Aug.
- (15) Mamdani, E. H. and Appilian, S., 1975, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," *Int. J. Man-Machine Stud.*, Vol. 7, pp. 1~13.
- (16) Choi, H. S., 1996, "The Design of a Fuzzy Robust Controller with Input Saturation for Robot Manipulators," *Proc. of KSME Spring Annual Meeting*, pp. 368~372.