

論文96-33B-11-2

다중 로봇의 위치, 운동야기힘과 내부힘의 강건 독립 제어

(Robust independent control for position,
motion-inducing force, and internal force of
multi-robot)

金鍾守*, 朴世承**, 朴鍾國***

(Kim Chong Soo, Park Sei Seung, and Park Chong Kug)

요 약

다중로봇 시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇 매니플레이터는 물체의 정확한 운동을 보장하기 위하여 요구되는 물체 운동힘을 정확히 인가하여야 한다. 다중 로봇의 말단효과장치로부터 물체에 인가되는 힘은 물체 내부에서 운동야기힘(Motion-inducing force)과 내부힘(Internal force)으로 분해되어 진다. 여기에서 운동야기힘은 물체의 운동에 영향을 미치지 않지만, 내부힘은 물체좌표계의 Null공간에 존재하는 힘으로서 물체의 운동에 영향을 미치지 못한다. 각각의 매니플레이터는 부하부할 구조를 통하여 부하분할된 힘을 물체에 정확히 인가하여야 하는데 이와같은 내부힘 요소로 인하여 물체의 운동은 요구되는 운동을 정확히 추적하지 못하게 되므로 내부힘요소를 고려하여 제어를 설계하여야 한다. 또한 각각의 로봇 동력학은 비선형성으로 인하여 매개변수 불확실성을 가질 수 있으므로 매개변수의 부정확한 추정에 대하여 강건성을 유지하여야 한다. 본 논문에서, 첫째로 동력학 매개변수를 정확히 추정한다는 가정하에 내부힘 요소를 고려하여 제어를 구성한다. 이때 내부힘은 힘센서의 측정값을 자코비안 행렬의 Null basis set에 사상(Mapping)하여 얻는다. Resolved acceleration 제어 기법과, 내부힘은 자코비안 행렬의 Null 공간에 존재한다는 것을 이용하여 위치, 운동야기 힘, 내부힘에 대한 제어를 독립적으로 구성한다. 둘째로 로봇 동력학은 비선형성의 매개변수 불확실성을 가지므로 이에 대하여 강건성을 유지하도록 강건제어입력을 구성한다.

Abstract

Robot manipulators constituting multi-robot system must exert the desired motion force on an object to preserve the fine motion of it. The forces exerted on an object by the end-effectors of multi-manipulators are decomposed into the motion-inducing force and the the internal force. Here, motion-inducing force effects the motion of an object, but internal force as lies in the null space of an object coordinate can't effect it. The motion of an object can't track exactly the desired motion by the effect of internal force component, therefore internal force component must be considered. In this paper, first, under assumption that we can estimate exactly the parameter of dynamics, we constitute the controller concerning internal force. And we obtain the internal force as projecting force sensor readings onto the space spanned by null basis set of jacobian matrix. Using the resolved acceleration control method and the fact that internal force lies in the null space of jacobian matrix, we construct independantly the position, motion-inducing force and internal force controller. Secondly we construct the robust control law to preserve the robustness with respect to the uncertainty of manipulator parameters.

* 正會員, 尙志大學校 電算學科
(Dept. of Computer Science Sang Ji University)

** 正會員, 朝鮮大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Engineering Cho Sun University)

*** 正會員, 慶熙大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering Kyung Hee University)

※ 본 논문은 1994년도 조선대학교 학술 연구비 지원을 받아 연구되었음

接受日字: 1996年7月10日, 수정완료일: 1996年10月31日

I. 서 론

현대의 작업이 점차 복잡하여지고 다양한 형태를 가지므로서 로봇의 응용에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔으며 최근에는 다중 로봇 시스템에 대하여 관심을 가지게 되었다. 다중 로봇 또는 다중 손가락을 가지고 단일 물체를 조종하는 작업은 로봇 연구에 있어서 가장 중요한 분야의 하나로서 인식되어지고 있으며 많은 작업분야에 로봇을 응용하기 위하여 말단 효과장치(End-effector)의 위치 및 물체에 인가하는 힘을 정확히 제어할 수 있어야 한다.

다중로봇 시스템의 한 분야로서 두대의 로봇을 이용하는 시스템에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Nakano^[11]는 마스터/슬레이브 제어구조를 제안하였고, Kurono^[12]는 방향에 종속되는 Compliance를 변화시키는 기법을 제안하였으며 Mason^[13]은 마스터와 슬레이브의 구분없이 두 로봇의 힘을 결정하는 기법을 제안하였다. Raibert and Craig^[14]는 물체의 운동을 위치 및 힘의 공간으로 분해하여 제어하는 Hybrid position/force제어 기법을 연구하였다. 또한 Yoshikawa^[15]는 물체의 운동을 사전에 일정하게 위치와 힘의 공간으로 분해하던 것을 물체의 동적운동의 각 시점에서 제어 공간 분해에 대하여 연구하였다. 또한 작업공간에서 위치와 힘제어 공간을 분리하여 제어하는 Operational space formulation (Resolved acceleration control) 기법이 O. Khatib^[16]에 의하여 제안되었다. Bonitz and Hsia^[7]는 내부힘과 운동야기힘의 분해에 대하여 고려하였다.

또한 다중로봇 시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇 매니플레이터는 비선형 특성으로 인하여 매개변수 불확실성을 나타내는데 이를 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔으며 기존의 제어를 이용하여 강건입력을 첨가하므로서 외란에 대하여 강건성을 유지하게 하는 강건제어 기법이 많이 연구되어 졌다. 강건제어기법은 주어진 제어기로부터 요구되는 시스템 성능을 유지하고 매개변수 불확실성에 대한 출력의 강건성을 유지하도록 하는 제어입력을 구성하는데 목적이 된다.

Y.H.Chen^[18]과 G.Leitmann^[9]은 불확실한 요소를 가지는 선형시스템을 고려하여 불확실한 입력에 대한 시스템 출력의 유용성을 연구하였다. 정합조건(Matching condition)과 불확실한 매개변수의 한계값을

이용하고 Lyapunov 안정도 조건으로부터 매개변수 변이에 둔감성을 갖도록 하는 시스템 강건입력을 구성하였다.

본 연구에서는 매니플레이터의 정확한 제어를 위하여 다중 로봇 시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇 매니플레이터의 매개변수를 정확히 추정할 수 있다는 가정하에 Resolved acceleration 제어기법을 이용하여 물체의 위치, 운동야기힘과 내부힘 제어공간으로 분해하여 독립적으로 제어한다.

이때 위치와 힘의 공간으로의 분해는 선택행렬을 이용하여 구성하며 운동야기힘과 내부힘은 물체의 관점에서 Null 공간 개념을 이용하여 독립적으로 분해한다. 둘째로 매니플레이터는 비선형성으로 인하여 매개변수 불확실성을 가지므로 이에 대하여 강건성을 유지하도록 Y.H.Chen^[8]과 G.Leitmann^[9]이 제안한 강건제어기법으로부터 정합조건 및 불확실성의 매개변수 한계값을 이용하여 독립된 강건제어기를 구성할 수 있게 하는데 그 목적이 있다.

II. 다중로봇(Multi-Robot)의 동력학 방정식

1. 다중로봇 시스템의 동력학

일반적으로, n-강체 링크를 갖는 로봇 매니플레이터는 비선형 역학특성을 포함하는데 매니플레이터의 동력학 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기에서 모든 매니플레이터는 Non - redundant하며 말단 효과장치와 물체는 강접촉을 유지한다고 가정한다.

$$M_k(\theta_k) \ddot{\theta}_k + H_k(\theta_k, \dot{\theta}_k) + G_k(\theta_k) = \tau_k(t) - J_k^T F_k \quad (1)$$

여기서, $k=1, \dots, k$, $M_k(\cdot) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $H_k(\cdot) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 그리고 $G_k(\cdot) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 k번째 로봇 매니플레이터의 대칭 정정 관성행렬(Symmetric positive definite inertia matrix), 원심력과 코리올리스항 그리고 중력벡터항이다. $\theta_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\dot{\theta}_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\ddot{\theta}_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 k번째 로봇 매니플레이터의 조인트 변수, 속도, 가속도 벡터이다. $\tau_k(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 k번째 로봇 매니플레이터의 구동기가 공급하는 토크벡터이고, $F_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 운동을 야기하는 힘 벡터이다. 또한 $J_k^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 k번째 로봇 매니플레이터의 조인트 공간에서의 자코비안(Jacobian)행렬이다.

다중 로봇 시스템의 운동을 단일한 형태로 표현하기 위하여 다음과 같은 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_1(\theta_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2(\theta_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & \dots & M_k(\theta_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1(\theta_1, \dot{\theta}_1) \\ H_2(\theta_2, \dot{\theta}_2) \\ \vdots \\ H_k(\theta_k, \dot{\theta}_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(\theta_1) \\ G_2(\theta_2) \\ \vdots \\ G_k(\theta_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \\ \vdots \\ \tau_k(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J_1^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2^T & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & J_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M(\theta) \ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau(t) - J^T F \quad (3)$$

여기서, $M = \text{diag}(M_1, \dots, M_k) \in \mathbb{R}^{kn \times kn}$, $H = (H_1^T, \dots, H_k^T)^T \in \mathbb{R}^{kn \times 1}$, $G = (G_1^T, \dots, G_k^T)^T \in \mathbb{R}^{kn \times 1}$, $\theta = (\theta_1^T, \dots, \theta_k^T)^T \in \mathbb{R}^{kn \times 1}$, $\tau = (\tau_1^T, \dots, \tau_k^T)^T \in \mathbb{R}^{kn \times 1}$, $F = (F_1^T, \dots, F_k^T)^T \in \mathbb{R}^{kn \times 1}$, $J^T = \text{diag}[J_1^T, \dots, J_k^T] \in \mathbb{R}^{kn \times kn}$ 이다.

여기에서 로봇트 매니퓰레이터의 말단효과장치의 속도(\dot{r}_c)와, 조인트 속도($\dot{\theta}$), 그리고 물체의 속도(\dot{r}_o)와의 관계를 나타내면

$$\dot{r}_c = J \dot{\theta} = J_o \dot{r}_o \quad (4)$$

과 같으며 여기에서 J_o 는 물체좌표계에서의 자코비안 행렬이다. 다중로봇트 시스템을 구성하고 있는 모든 매니퓰레이터는 Non-redundant 하다고 가정하였으며, 특이구조(Singular configuration)내에 존재하지 않는다고 가정하면 $J(t)$ 는 정방행렬이며 비특이 행렬이 되므로 자코비안 행렬을 이용하여 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\dot{r}_c - \dot{J}\theta) \quad (5)$$

식(5)와 $\tau(t) = J^T F_c(t)$ 를 이용하여 카테시안 공간에서의 힘의 방정식으로 표현하면 다음과 같이 재표현할 수 있다.

$$M_c \dot{r}_c + H_c + G_c = F_c(t) - F(t) \quad (6)$$

여기에서 $M_c = J^{-T} M J^{-1}$, $H_c = J^{-T}(H - M J^{-1} \dot{J} \theta)$ 과 $G_c = J^{-T} G$ 이며, J^{-T} 는 자코비안 행렬의 전치행렬의 역행렬을 나타낸다.

2. 힘 분해 (Force decomposition)

시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇트 매니퓰레이터의 말단효과장치는 초기의 일정한 접촉점을 운동 중에도 유지한다고 가정하고 또한 강접촉(Rigid contact)을 유지한다고 가정하였다. 다중 로봇트 시스템에서 각 로봇트 매니퓰레이터의 말단효과장치로부터 물체에 인가되는 힘은 물체가 원하는 운동을 수행할 수 있도록 하여야 한다.

k대의 로봇트 매니퓰레이터가 물체에 인가하는 힘은 다음과 같이 구성된다.

$$F_{om} = J_o^T F = J_o^T (F_m + F_l) \quad (7)$$

여기에서, $(\cdot)^T$ 는 전치행렬을 나타내고, $F = [F_1^T, F_2^T, \dots, F_k^T]^T$ 이며 $F_i (\in \mathbb{R}^{n \times 1}, i=1, \dots, k)$ 은 i번째 매니퓰레이터의 말단효과장치로부터 물체에 인가되는 힘이다. 또한 $F_m = [F_{m1}^T, F_{m2}^T, \dots, F_{mk}^T]^T \in \mathbb{R}^{n \times k \times 1}$, $F_l = [F_{l1}^T, F_{l2}^T, \dots, F_{lk}^T]^T \in \mathbb{R}^{n \times k \times 1}$ 는 물체의 운동야기힘(Motion-inducing force)과 내부힘(Internal force)이다. 또한 $F_{om} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 은 물체의 Resultant force이며 $J_o^T = [J_{o1}^T, J_{o2}^T, \dots, J_{ok}^T] \in \mathbb{R}^{m \times nk}$ 는 물체좌표계의 자코비안 행렬로서 $m \leq 6$ 이다.

말단효과장치와 물체의 접촉위치는 자코비안 행렬이 특이성(Singularly)을 갖지않도록 선택할 수 있으며 또한 물체의 운동중 변하지 않는다고 가정하였다. 물체 좌표계의 자코비안 행렬을 $n = m=6$ 일 경우에 대하여 다음과 같이 구성할 수 있으며 이때 $\text{rank}(J_o^T) = 6$ 이다.

$$J_o^T = \begin{bmatrix} E_3 & 0_3 & \dots & E_3 & 0_3 \\ -P_1 & E_3 & \dots & -P_k & E_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_i = p_i \times = 0 \text{ (강접촉일 경우)}$$

여기에서 $p_i = [p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}]$ 는 말단효과장치와 물체가 접촉할 경우 말단효과장치의 위치를 나타내며 이때 \times 는 cross product를 의미하며 $E_3, 0_3$ 는 3×3 단위행렬, 3×3 영행렬을 나타낸다.

식(7)에서와 같이 인가되는 힘은 운동야기힘과 내부힘으로 분해가 가능한데 내부힘은 물체의 운동에 관여하지 않으므로 물체 자코비안 행렬의 Null 공간에 존재하게 된다. 즉, 각 매니퓰레이터에서 물체에 인가되는 내부힘의 총합은 0이다. 운동야기힘과 내부힘은

$$F = F_m + F_l \quad (9)$$

$$F_m = J_o^{T\#} J_o^T F = J_o^{T\#} F_{om} \quad (10)$$

$$F_I = NV_I \quad (11)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, N 는 Null 공간의 basis set, V_I 는 N 에 대응하는 F 의 요소를 나타내며 이때의 $J_o^{T\#}$ 은 J_o^T 의 Generalized 역행렬을 의미하며 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$J_o^{T\#} = WJ_o(J_o^T WJ_o)^{-1} \quad (12)$$

W 은 자코비안 행렬의 Generalized 역행렬을 구하기 위한 정칙하중행렬로서 다음의 조건^[7]을 만족하도록 선택하면 식(12)은 자코비안 행렬의 Generalized 역행렬로서 만족되어진다.

$$\text{rank}(J_o^T WJ_o) = \text{rank}(J_o^T) \quad (13)$$

여기에서 물체의 운동야기힘은 자코비안 행렬의 Generalized 역행렬을 이용하여 구할 수 있으나 물체에 인가하는 내부힘은 총합이 0이므로 물체의 운동에 영향을 미치지 못하므로 내부힘은 물체의 요구되는 힘으로부터 유도할 수 없고 물체에 인가하는 힘으로부터 유도하여야 한다.

$$F_I = F - F_m = NV_I \quad (14)$$

여기에서 N 은 각 로봇트 매니플레이터가 물체를 잡는 위치가 결정되면 일정한 형태의 행렬로서 표현될 수 있고, 또한 V_I 는 사전에 정의된 것과 같이 N 의 영역에 해당하는 F 의 요소이므로 매 제어시간마다 물체에 인가하는 힘 F 를 측정하여 N 에 사상하므로써 유도할 수 있다.

식(9)을 식(6)에 대입하면 동력학 방정식을 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$M_c \dot{r}_c + H_c + G_c = F_c(t) - (F_m + NV_I) \quad (15)$$

III. 강건제어 입력 (Robust control law)

1. 다중 로봇트 시스템의 위치/힘 독립 제어

다중 로봇트를 구성하고 있는 각 로봇트 매니플레이터는 정확한 위치제어와 접촉힘을 물체에 인가하여야 한다. 물체의 관점에서 물체가 정확한 운동을 하기 위하여서는 물체의 원하는 운동을 만족할 수 있는 힘을 각 말단효과장치가 인가하여야 하는데 이를 위하여 다

중 로봇트 시스템에서는 각 매니플레이터의 기계학적 단점(발생할 수 있는 최대 힘 등)을 고려하여 부하분할이 이루어져야하며 이때 이루어진 부하분할된 힘이 각 매니플레이터의 기준힘으로 구성되어야 한다.

이때 구성된 기준힘은 각 말단효과장치가 물체에 인가하는 힘의 기준이 아니라 물체가 원하는 운동을 보장할 수 있는 힘이고 또한 말단효과장치에서 물체에 인가하는 힘은 내부힘로 인하여 정확한 운동을 보장할 수 없다. 그러므로 내부힘을 제어하는 제어요소가 필요하게 된다. 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 Resolved acceleration 제어기법^[6]을 이용하여 다음과 같은 제어입력을 구성한다.

$$\begin{aligned} F_c(t) = & \hat{M}_c [\dot{r}_{cd} + \sum K_v (\dot{r}_{cd} - \dot{r}_c) + \sum K_p (r_{cd} - r_c)] \\ & + \sum [F_{md} + K_{fp}(F_{md} - F_m) + K_{fv}(\dot{F}_{md} - \dot{F}_m) \\ & + K_{ff} \int (F_{md} - F_m) + NV_{Id} + K_{vp}N(V_{Id} - V_I) \\ & + K_{vv}N(\dot{V}_{Id} - \dot{V}_I) + K_{vl} \int N(V_{Id} - V_I)] + \hat{H}_c + \hat{G}_c \quad (16) \end{aligned}$$

여기에서, \hat{M}_c , \hat{H}_c , \hat{G}_c 는 동력학 매개변수 M_c , H_c , G_c 의 추정값을 나타낸다. 그리고 K_p 과 K_v 는 knxkn 정방 위치, 속도오차이득이며, K_{fp} , K_{ff} 과 K_{fv} 는 운동야기힘 제어를 위한 knxkn PID정방이득행렬이며, K_{vp} , K_{vl} 과 K_{vv} 는 내부힘 제어를 위한 knxkn PID정방이득행렬이다. r_{cd} 는 물체의 목적 궤적을 의미한다. 또한 F_{md} 와 F_m 는 목적 운동야기힘과 실제 운동야기힘을 나타내며 V_{Id} , V_I 는 목적 내부힘요소와 실제 내부힘요소를 나타낸다. \sum 는 선택 행렬(Selection matrix)^{[4] [6]}이다.

식(15)와 식(16)으로 부터 제어기를 포함하는 시스템 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \hat{M}_c \sum [\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p] + \sum [(E + K_{fp}) F_{me} + \\ & K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{ff} \int F_{me} + (E + K_{vp}) N \\ & V_{Ic} + K_{vv} N \dot{V}_{Ic} + K_{vl} \int NV_{Ic}] = \\ & (M_c - \hat{M}_c) \dot{r}_c + (H_c - \hat{H}_c) + (G_c - \hat{G}_c) \quad (17) \end{aligned}$$

여기에서 $e_p = r_{cd} - r_c$, $F_{me} = F_{md} - F_m$, $V_{Ic} = V_{Id} - V_I$ 는 위치오차, 운동야기힘오차 그리고 내부힘 오차를 나타낸다. 또한 매개변수 불확실성으로 야기되는 시스템 변이를

$$\Delta G = (M_c - \hat{M}_c) \dot{r}_c + (H_c - \hat{H}_c) + (G_c - \hat{G}_c) \quad (18)$$

로서 정의하면 식(17)은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \hat{M}_c \Sigma [\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p] + \Sigma [(E+K_{fp})F_{me} + \\ & K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} + \\ & (E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le}] = \Delta G \end{aligned} \quad (19)$$

여기에서 매개변수에 대한 정확한 추정이 이루어진다면, 즉 ΔG 가 0이면

$$\begin{aligned} & \hat{M}_c \Sigma [\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p] + \Sigma [(E+K_{fp})F_{me} + \\ & K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} + \\ & (E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le}] = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

과 같이 표현할 수 있다. 또한 Resolved acceleration control 기법에서 위치와 힘은 제어공간이 선택행렬로부터 상호 독립이 되므로¹⁶⁾ 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p = 0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & (E+K_{fp})F_{me} + K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} + (E+K_{vp})NV_{le} \\ & + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

그러므로 식(21)로 부터 오차의 이득행렬을 적절히 선택하면 위치오차를 0로 수렴하도록 할 수 있다. 또한 운동야기힘과 내부힘 오차식인 식(22)의 양변에 J_o^T 를 곱하면 즉, 물체의관점에서 물체에 인가되는 힘으로부터 물체에 영향을 미치는 항으로 표현하면

$$\begin{aligned} & J_o^T [(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} + \\ & (E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le}] = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

과 같이 표현할수 있으며 여기에서 아래와 같이 두 항으로 분리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & J_o^T [(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me}] + J_o^T \\ & [(E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le}] = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

우변 두번째항의 $J_o^T [(E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le}]$ 에서 $[(E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le}]$ 는 J_o^T 의 Null 공간에서 나타나는 값으로서 J_o^T 를 곱하면 0가 된다. 그러므로 식(24)는 다음과 같이 다시

나타낼 수 있다.

$$J_o^T [(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me}] = 0 \quad (25)$$

식(25)로부터 J_o^T 는 0가 아닌 단위 행렬의 합성행렬이므로 식(25)를 만족하기 위한 충분조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} = 0 \quad (26)$$

식(26)으로 부터 이득행렬을 적절히 선정하면 운동야기 힘 오차를 독립적으로 0에 수렴하게 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 식(26)을 식(22)에 대입하면, 식(22)를 만족하는 충분조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}N\dot{V}_{le} + K_{vl} \int NV_{le} = 0 \quad (27)$$

식(26)과 식(27)로 부터 운동야기힘 제어공간과 내부힘 제어공간은 서로 영향을 미치지 못하므로 서로 독립임을 알 수 있다. 여기에서 물체의 위치, 운동야기힘과 내부힘은 서로 독립이고 각 이득행렬은 정방행렬이므로 역행렬이 존재한다는 것을 이용하여 식(20)은 다음과 같이 분리 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p = 0 \quad (28)$$

$$\dot{F}_{me} + K_{fv}^{-1}(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv}^{-1}K_{fl} \int F_{me} = 0 \quad (29)$$

$$N\dot{V}_{le} + K_{vv}^{-1}(E+K_{vp})NV_{le} + K_{vv}^{-1}K_{vl} \int NV_{le} = 0 \quad (30)$$

그러므로 식(28), 식(29), 식(30)으로부터 각각의 제어공간이 독립이므로 위치오차, 운동야기힘 오차, 내부힘 오차는 각각의 오차이득을 적절히 선정하므로서 오차를 0로 수렴할 수 있다. 그러나 이것은 $\Delta G = 0$ 인 경우에 만족하는 제이기로서 실제 ΔG 를 고려하여야만 한다. ΔG 는 동력학 시스템의 불확실성의 영향을 나타내는 것으로 위치제어공간과 힘제어공간으로 나누어 표현할 수 있다. 또한 힘제어부분은 운동야기힘과 내부힘제어 공간이 서로 독립이므로 다음과 같이 나누어 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p = \hat{M}_c^{-1} \Delta G |_{r_o = \Sigma r_o} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & \dot{F}_{me} + K_{fv}^{-1}(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv}^{-1}K_{fl} \int F_{me} \\ & = \Delta G |_{(r_o = \Sigma r_o, \text{ and } \text{space}(J_o^T))} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} N\dot{V}_{le} + K_{vv}^{-1}(E + K_{vp})NV_{le} + K_{vv}^{-1}K_{vl} \int NV_{le} \\ = \Delta G \mid (r_o = \sum r_o, \text{ and } n \text{ null space}(J_o^T)) \end{aligned} \quad (33)$$

여기에서 $\Delta G \mid_{r_o = \sum r_o}$ 는 위치제어 공간, $\Delta G \mid_{(r_o = \sum r_o, \text{ and } \text{space}(J_o^T))}$ 는 힘제어 공간과 J_o^T 의 공간, 즉 운동야기 힘 제어 공간, $\Delta G \mid_{(r_o = \sum r_o, \text{ and } n \text{ null space}(J_o^T))}$ 는 힘제어공간과 J_o^T 의 Null 공간, 즉 내부힘 제어공간에서의 매개변수 불확실성의 영향을 나타내며, 이 것은 외란의 형태로서 정확한 구성요소값을 알수 없다. 그러므로 매개변수 불확실성이 존재하는 식(31), 식(32)과 식(33)으로 부터 적절한 이득값 선정으로는 오차를 수렴하게 할 수 없다.

2. 다중로봇 시스템의 강건입력 [18][19]

식(28),(29),(30)은 매개변수 변이가 없다고 가정할 경우 즉 매니플레이터의 매개변수를 정확히 추정하였을 경우 성립이 된다. 그러나 비선형성으로 인하여 정확한 추정이 어려우므로 제어입력을 구성할 때 매개변수 변이도 고려하여야 한다. 이를 위하여 Chen [18], Leitmann [19]이 제안한 강건제어기법을 이용하여 강건 제어입력을 구성한다.

식(31),(32),(33)를 상태공간함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B\Delta G, \quad x(t_o) = x_o \quad (34)$$

여기에서 $x = [e_p^T (\int F_{me})^T (\int NV_{le})^T e_p^T F_{me}^T (NV_{le})^T]^T \in R^{6n \times 1}$ 이다.

시스템 행렬 A 와 입력행렬 B 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며여기에서, $K_{fp}' = K_{fv}^{-1}(E + K_{fp})$, $K_{ff}' = K_{fv}^{-1}K_{ff}$, $K_{vv}' = K_{vv}^{-1}(E + K_{vp})$, $K_{vl}' = K_{vv}^{-1}K_{vl}$, $E_{6n \times 6n}$, $0_{6n \times 6n}$ 은 $6n \times 6n$ 단위행렬, $6n \times 6n$ 영행렬이다. 또한 K_{fv} , K_{vv} 는 정방행렬이고 각 대각요소가 0가 아니도록 선택하면 역행렬이 존재한다.

$$A_{6n \times 6n} = \begin{pmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & E_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & E_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & E_{n \times n} \\ -K_{fp}' & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & -K_{fv}' & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & -K_{ff}' & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & -K_{vl}' & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & -K_{vv}' \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$B_{6n \times 3n} = \begin{pmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ E_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & E_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & E_{n \times n} \end{pmatrix} \quad (36)$$

여기에서, 이득행렬이 정확히 구성되어진다면 행렬 A 는 불확실성이 존재하지 않는 행렬이며 또한 B 는 시스템 입력행렬로서 식(36)과 같이 표현되므로 정확히 알고 있는 요소로 인정할 수 있다. 시스템 입력 $\Delta G \in R^{3n \times 1}$ 가 0 이면 즉 정확히 모델링을 할 수 있으면 식(34)는 외란이 존재하지 않는 공칭시스템이 된다. 그러나 식(34)는 ΔG 의 영향으로 외란이 존재하는 시스템이므로 시스템이 외란에 대하여 강건성을 유지하기 위하여 다음과 같이 강건입력을 구성한다.

$$\dot{x} = Ax + B\Delta G + BP_x \quad (37)$$

여기에서 $P_x \in R^{3n \times 1}$ 는 강건제어입력을 나타낸다.

식(34)에서 시스템 행렬 A 의 구성요소인 제어기의 이득은 행렬 A 가 복수평면의 좌반평면에 고유값을 갖도록 구성되어 진다. 또한 매니플레이터의 매개변수 불확실성을 나타내는 ΔG 는 임의의 한계값에 의하여 한정(Bound)되어 지고 이때 한계값은 알고 있다고 가정할 수 있다.

$$\| \Delta G \| \leq \rho_x \quad (38)$$

여기에서 ρ_x 는 임의의 알고 있는 Nonnegative한 값이며 $\| \cdot \|$ 는 Euclidean norm을 나타낸다.

시스템의 안정성을 나타내는 연구는 많이 수행되어져 왔다. 그 중에서 선형시스템의 안정성의 충분조건을 발생하는 Lyapunov 안정도 판별법이 많이 이용되어지고 있다. 외란이 존재하고 강건제어입력 P_x 를 포함하는 시스템(37)에 대하여 Lyapunov 안정도 판별법을 이용하여 시스템이 안정할 수 있는 강건제어 입력을 유도한다.

주어진 대칭정행렬 $Q \in R^{6n \times 6n}$ 에 대하여 다음과 같은 Lyapunov 방정식을 만족하는 해, 대칭정행렬 $P_L \in R^{6n \times 6n}$ 이 존재한다. [10]

$$P_L A + A^T P_L = -Q \quad (39)$$

$P_L > 0$ 이므로, 손실함수 $V(\cdot) \in R^1$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V(x) = x^T P_L x, \quad (40)$$

Lyapunov 제 2 방법은 시스템의 손실함수가 0보다 크고 손실함수의 시간에 대한 1차 도함수가 0과 같거나 작을 경우, 즉 손실함수의 기울기가 0보다 작을 경우 그 시스템은 안정하다고 판별하는 것이다. 식(40)은 제곱의 형태를 유지하므로 0보다 큰값을 가지며 안정여

부를 판별하기 위하여 시간에 대한 손실함수의 미분값 ($L(x,t)$)을 유도한다.

$$\begin{aligned}
 L(x,t) &= grad V(x)[Ax + BP_x + B\Delta G] \\
 &= -x^T Qx + 2(B^T P_L x)^T [P_x + \Delta G] \\
 &\leq -x^T Qx + 2(B^T P_L x)^T [P_x + \frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \|\Delta G\|] \\
 &\leq -x^T Qx + 2(B^T P_L x)^T [P_x + \frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \rho_x] \quad (41)
 \end{aligned}$$

그러므로 Lyapunov 안정도를 만족하는 충분조건은 다음과 나타낼 수 있다.

$$P_x = -\frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \rho_x \quad (42)$$

여기에서 식(42)의 분모항이 0가 되면 강건제어입력 P_x 가 ∞ 의 값을 가지므로 가능하지 않으므로 강건제어 입력에 대하여 $\|B^T P_L x\|$ 가 임의의 값보다 작을 경우 $\|B^T P_L x\|$ 를 임의의 양의 작은 값으로 대치하여 강건 제어입력의 분모항이 0가 되는 것을 방지한다. 이에 강건제어입력은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &-\frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \rho_x \quad (\|B^T P_L x\| \geq \epsilon \text{ 일 경우}) \\
 P_x = & \\
 &-\frac{B^T P_L x}{\epsilon} \rho_x \quad (\|B^T P_L x\| < \epsilon \text{ 일 경우})
 \end{aligned} \quad (43)$$

여기에서, ϵ 는 사전에 표현된 임의의 작은 양의 값이다.

여기에서 P_x 를 P_{x1}, P_{x2}, P_{x3} 로 나누어 표현할 수 있는데 이것은

$$P_x = [P_{x1}^T \ P_{x2}^T \ P_{x3}^T]^T \quad (44)$$

과 같이 표현할 수 있다. 이때 $P_{x1}, P_{x2}, P_{x3} \in R^{n \times 1}$ 이다. 이것을 식(43)으로 부터 다시 표현하면

$$\begin{aligned}
 P_x &= [P_{x1}, P_{x2}, P_{x3}]^T \\
 &-\frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \rho_x \quad (\|B^T P_L x\| \geq \epsilon \text{ 일 경우}) \\
 = & \\
 &-\frac{B^T P_L x}{\epsilon} \rho_x \quad (\|B^T P_L x\| < \epsilon \text{ 일 경우})
 \end{aligned} \quad (45)$$

과 같으며 또한 실제 P_{x1}, P_{x2}, P_{x3} 는 위치, 운동야기힘과 내부힘에 대한 강건제어 입력으로서 실제 x 의 함수로서 주어진다. 이때 Resolved acceleration 제어 기법을 사용하기 위하여 위치, 운동야기힘과 내부힘의 공간이 독립이 되도록 제적이 설계가 되고 실제 제어가 정확히 이루어진다면 P_{x1}, P_{x2}, P_{x3} 는 위치, 운동야기힘, 그리고 내부힘의 제어 공간에 존재하게 된다. 그러므로 실제 시스템에 인가되어지는 입력 형태(식 16))는 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_c(t) &= \hat{M}_c [\ddot{r}_{cd} + \sum K_v \dot{e}_p + \sum K_p e_p + P_{x1}] \\
 &+ \sum [F_{md} + K_{fp} \dot{F}_{me} \\
 &+ K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} + P_{x2} + N(V_{ld} + K_{vp} V_{le} \\
 &+ K_{vv} \dot{V}_{le} + K_{vl} \int V_{le} + P_{x3})] + \hat{H}_c + \hat{G}_c \quad (46)
 \end{aligned}$$

IV. 모의실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 강건제어기의 유용성을 알아보기 위하여 2링크를 갖는 두대의 로봇 시스템을 이용하여 모의실험을 수행하였다.

로봇 매니플레이터의 링크 매개변수 및 제어기 구성을 위한 이득 행렬은 다음과 같다.

표 1. 모의실험을 위한 매니플레이터 링크 매개변수

Table 1. Link parameters of manipulators for simulation.

	링크 매개변수			
	1번 링크 길이	2번 링크 길이	1번 링크 무게	2번 링크 무게
매니플레이터 1	0.432 (m)	0.432 (m)	15.91 (Kg)	11.36 (Kg)
매니플레이터 2	0.3 (m)	0.3 (m)	12.0 (Kg)	11.0 (Kg)

표 2. 제어기 이득 행렬 (E2 : 2x2 단위행렬)

Table 2. Gain matrix of controller. (E2 : 2x2 identity matrix)

	제어기 이득 행렬							
	K_p	K_v	K_{fp}	K_{fv}	K_{fl}	K_{vp}	K_{vl}	K_{vl}
매니플레이터 1	230E2	80E2	80E2	45E2	45E2	80E2	45E2	45E2
매니플레이터 2	230E2	80E2	80E2	45E2	45E2	80E2	45E2	45E2

본 모의실험에서 사용한 물체의 목적궤적(r_{od}), 물체의 목적운동힘(F_{omd}), 각 매니플레이터의 목적 내부힘(NV_{Id})은 다음과 같이 설정하였다.

$$r_{od} = [0.46 + 0.15 \sin(t/1.5) \ 0]^T \text{ (m)} \quad (47)$$

$$F_{omd} = [0 \ 34]^T \text{ (N)} \quad (48)$$

$$NV_{Id} = [0 \ -7 \ 0 \ -7]^T \text{ (N)} \quad (49)$$

힘분해를 위한 하중행렬 W 는 부하분할 계수를 요소로 하여 식(14)를 만족하도록 다음과 같이 구성하였는데 여기에서 0.6과 0.4는 두로봇 매니플레이터의 부하분할 계수를 의미하는 것이다.

$$W = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (50)$$

하중행렬 W 로 부터 각 매니플레이터가 물체에 인가하여야 할 운동야기힘은 물체 자코비안 행렬의 Generalized 역행렬을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$F_{md} = J_o^{T\#} F_{omd} \quad (51)$$

물체의 목적궤적으로 부터 말단효과장치의 목적궤적을 유도하기 위하여 매니플레이터 1,2는 각기 물체의 x 축상의 반대방향에서 물체에 접촉한다고 가정하고 각 위치는 물체의 무게중심으로 부터 0.2m씩 떨어져 있다고 가정하고 모의실험한다. 그러므로 물체의 목적궤적으로 부터 매니플레이터 1의 목적궤적은 $[0.26 + 0.15 \sin(t/1.5) \ 0]^T$, 매니플레이터 2의 목적궤적은 $[0.66 + 0.15 \sin(t/1.5) \ 0]^T$ 이다. 또한 외란의 한계값(ρ_x)을 100N으로 가정하고 강건제어 입력을 구성하였으며 매니플레이터의 동력학 방정식은 30%정도의 불확실성을 갖는다고 가정하였으며, ϵ 는 0.01로 정의하였다. 또한 본 모의실험에서는 2링크를 갖는 2대의 로봇을 사용하였는데 두 대의 로봇의 모의실험 결과가 거의 유사하게 나타나므로 본 논문에서는 매니플레이터 1의 결과만 나타내었다. 물체의 자코비안 행렬은 강접촉을 유지한다고 가정하였으므로 다음과 같이 유도된다.

$$J_o^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (52)$$

강접촉을 유지하고 부하분할 계수가 0.6과 0.4, 또한 물체의 목적운동힘을 일정한 값으로 설정하였으므로 매니플레이터 1이 20.4N, 매니플레이터 2가 9.6N를 물체에 인가하여야 한다.

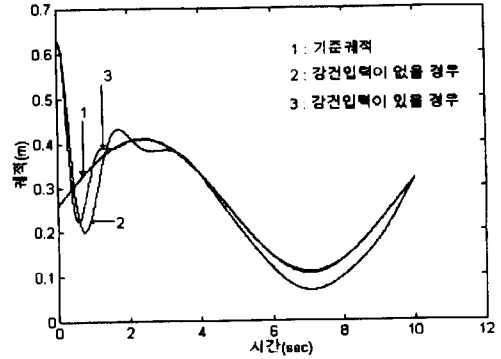


그림 1. 매니플레이터 1의 위치 응답
Fig. 1. Position response of manipulator 1.

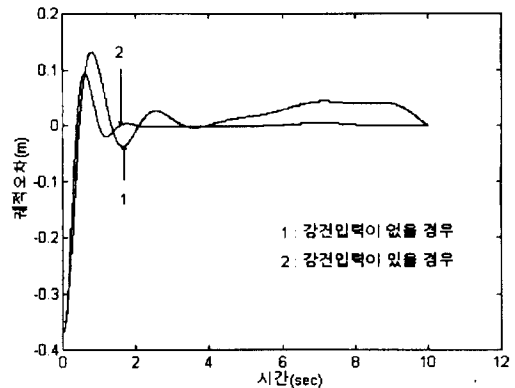


그림 2. 매니플레이터 1의 위치 오차
Fig. 2. Position error of manipulator 1.

그림 1은 강건제어입력을 첨가한 시스템과 강건입력을 첨가하지 않을 경우의 물체의 위치 궤적을 추적하는 것을 나타내고 있으며 그림 2는 이때의 위치오차 수렴을 나타내고 있다.

그림 3은 운동야기힘 추적을 나타내고 있으며 그림 4는 이때의 운동야기힘 오차를 나타내고 있다. 강건입력을 첨가하였을 경우가 더 나은 결과를 나타내고 있으며 목적운동야기힘을 추적하는 정도가 강건입력을 첨가하지 않을 경우 수렴의 형태가 일정한 형태를 지나 오차의 수렴성은 미비한 것으로 나타나고 있다. 즉 위치보다 힘의 제어시 강건제어 입력의 영향은 크

다고 볼수 있다.

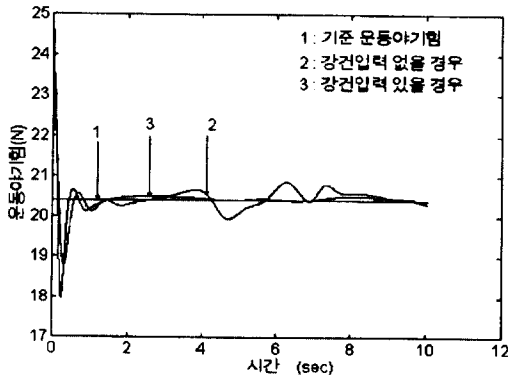


그림 3. 매니플레이터 1의 운동하기힘 응답
Fig. 3. Response of motion-inducing force of manipulator 1.

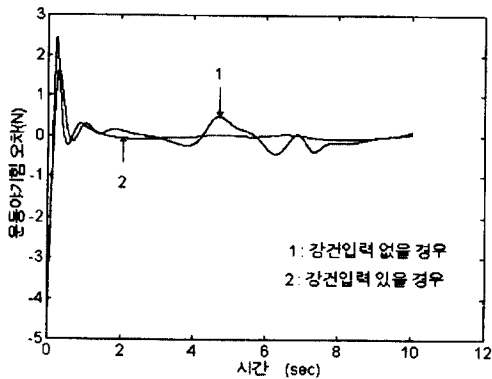


그림 4. 매니플레이터 1의 운동하기힘 오차
Fig. 4. Error of motion-inducing force of manipulator 1.

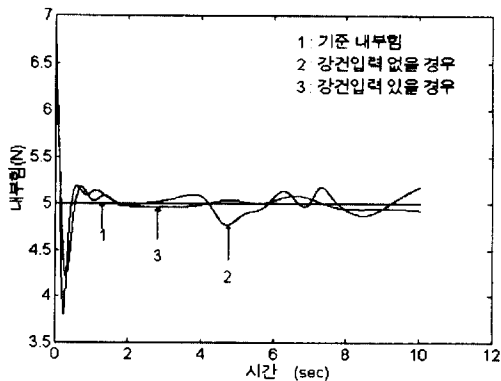


그림 5. 매니플레이터 1의 내부힘 응답
Fig. 5. Response of internal force of manipulator 1.

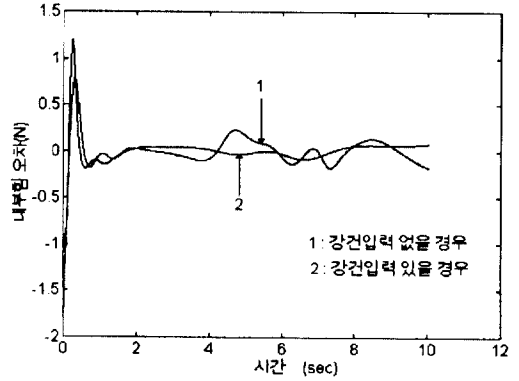


그림 6. 매니플레이터 1의 내부힘 오차
Fig. 6. Error of internal force of manipulator 1.

또한 그림 5는 내부힘추적, 그림 6은 내부힘 오차를 나타내고 있으며 강건입력을 첨가할 경우 내부힘추적, 오차 수렴성이 향상된 것을 볼 수 있다. 위의 결과에서 나타난 것과 같이 강건제어 입력을 첨가하더라도 어느 일정시간이 지난후 오차가 0에 거의 수렴하는 것을 보이는 것은 아니고 강건제어를 첨가하지 않을 경우 발생할 수 있는 정상상태오차를 줄이는데 목적이 있다. 그러므로 적응제어와는 다르게 강건제어를 사용할 경우 완벽한 0으로의 오차 수렴보다는 정상상태의 오차를 최대한 줄이는데 역점을 둔다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

다중 로봇 시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇 매니플레이터는 물체의 요구되어지는 운동을 보장하기 위하여 위치제어 및 물체에 제공하는 힘을 정확히 제어하여야 한다. 다중 로봇 시스템을 구성하는 각각의 로봇 매니플레이터를 정확히 제어하기 위하여, 물체의 운동으로 부터 운동하기힘을 유도하고 이때 고려되어야 하는 내부힘을 유도하여 위치와 힘 공간으로 분해하여 제어하였다. 위치, 운동하기힘, 내부힘을 제어하기 위하여 Resolved acceleration 제어기법을 이용하였으며 이와 같은 과정에서 선택행렬로 부터 위치와 힘은 독립된 제어기를 구성할 수 있었다. 또한 말단효과장치의 힘은 각각 운동하기힘과 내부힘으로 분해되고 분해된 힘을 제어하기 위하여 물체의 자코비안 행렬의 Null 공간개념을 이용하여 독립된 제어기를 구성할 수 있었다. 또한 매니플레이터 매개변수의 불확실성

에 대한 한계값을 이용하여 강건 입력을 구성하였으며 2링크를 갖는 2대의 로봇 매니퓰레이터를 이용한 모의실험을 통하여 각각의 독립된 강건 제어기에 대한 유용성을 알아보았다. 앞으로 본 연구의 결과를 토대로 다중 로봇 시스템의 중요요소 중 하나인 부하분할을 위하여 내부힘을 포함하는 제어기의 토오크 발생한계를 이용한 부하분할 구조에 대하여 연구를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] E.Nakano, S.Ozaki, T.Ishida and I.Kato, "Cooperational control of the Anthropomorphic manipulator 'MELARM'," *Proc. 4th Int. Symposium on Industrial Robots*, pp. 251-260 1974.
- [2] S.Kurono, "Coordinated control of a pair of artificial arms," in *Bimechanism 3*, pp. 182-913, Tokyo :Tokyo University Press, 1975.
- [3] M.T. mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," *IEEE Trans. Syst.Man Cybeeernet*, Vol. SMC-11, pp. 418-432, 1981
- [4] M.H. Raibet and J.J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME J.Dyn. Syst. Measurement Contr.*, vol. 102, pp. 126-133, June, 1981
- [5] T.Yoshikawa, "Dynamics hybrid position. force control of robot manipulators description of hand constraints and caluculation of joint driving forces", in *Proc. IEEE Conf. Robotics and Auto.*, San-Francisco, CA, 1986, pp. 1393-1398.
- [6] O.Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators : the operational space formulation," *IEEE J. Robotics Automat.*, Vol. RA-3, pp. 43-53, 1987.
- [7] R.G. Bonitz and T.C. Hsia, "Force decomposition in cooperating manipulators using the theory of metric space and generalized inverse," in *Proc.of Robotics and Auto.*, vol. 2, pp. 1521-1527, 1994.
- [8] Y.H. Chen, "On the Deterministic performance of uncertain dynamical systems," *Int. J. Contr.*, Vol. 43, No. 5, pp 1557-1579, 1986.
- [9] G.Leitmann, "On the Efficacy of nonlinear control in uncertain linear systems," *Trans. ASME, J. Dynamic Syst. Meas. Contr.*, Vol. 102, pp. 95-102, June, 1981.
- [10] K.J. Astrom and B.Wittenmark, *Adaptive control*, Addison-Wesley, 1989.

— 저 자 소 개 —

金 鍾 守(正會員)

1962년 3월 25일생. 1985년 경희대 공대 전자공학과 졸업. 1987년 경희대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1992년 경희대 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1996년 ~ 현재 상지대학교 전산학과 조교수. 주 관심 분야는 Robotics, 제어이론

朴 世 承(正會員)

1948년 8월 2일생. 1975년 조선대 공대 전자공학과 졸업. 1980년 조선대학원 전자공학과 졸업(석사). 1990년 경희대 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1985년 미국 Univ. of Michigan 객원교수. 1986년 미국 Univ. of Washington 객원교수. 1996년 현재 조선대 공대 전자공학과 교수. 주 관심 분야는 로보틱스 및 공장자동화

朴 鍾 國(正會員) 第 33卷 B編 第 4號 參照

1945년 2월 7일생. 1971년 서울대학교 물리학과 졸업. 1975년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1979년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 ~ 1989년 미국 Oregon State Univ. 전기과 교환교수. 1992년 ~ 1993년 대한전자공학회 제어계 측분과위원회 위원장. 1992년 ~ 1994년 대한전기학회 편집위원. 1996년 현재 한국 Fuzzy System 학회 부회장. 1996년 현재 경희대학교 전자공학과 교수. 주 관심분야는 Robotics, Fuzzy 이론, 제어이론, Mobile Robot