

다중 로봇 시스템의 위치, 운동야기힘, 내부힘의 강건 독립 제어기
(Robust Independant Controller for Posiotion, Motion-inducing force, Internal force
of Multi-Robot System)

° 김 중 수*, 박 세 승**, 박 중 국***

* 상지대학교 이공과대학 전산학과 (Tel : 0371-730-0166, FAX : 0371-732-5596)
** 조선대학교 공과대학 전자공학과 (Tel : 062- 230-7184)
*** 경희대학교 공과대학 전자공학과 (Tel : 0331-280-2523)

Abstract : 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. Motion-inducing force effects the motion of an object and internal force can't effect it. The motion of an object can't track exatly the desired motion because of internal force component, therefore internal force component must be considered. In this paper,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 controller to preserve the robustness with respect to the uncertainty of manipulator parameters.

Key Words : Motion-inducing force, Internal force, Robust, Null space, Resolved acceleration control

1. 서 론

많은 작업분야에 로봇트를 응용하기 위하여 말단효과장치 (End-effector)의 위치 및 물체에 인가하는 힘을 정확히 제어할 수 있어야 한다. 다중로봇트 시스템의 한 분야로서 두대의 로봇트를 이용하는 시스템에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Nakano^[1]는 마스터(Master)/슬레이브(Slave) 제어구조를 제안하였고, Kurono^[2]는 방향에 종속되는 Compliance를 변화시키는 것을 제안하였으며 Mason^[3]은 마스터와 슬레이브의 구분없이 두 로봇트의 힘을 결정하는 기법을 제안하였다. Raibert and Craig^[4]는 물체의 운동을 위치 및 힘의 공간으로 분해하여 제어하는 Hybrid position/force제어 기법을 연구하였다. 또한 작업 공간에서 위치와 힘제어 공간을 분리하여 제어하는 Operational space formulation (Resolved acceleration control) 기법이 O.Khatib^[5]에 의하여 제안되었다. Bonitz and Hsia^[6]는 내부힘과 운동을 야기하는 힘의 분해(Decomposition)에 대하여 고려했다. 또한 다중로봇트 시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇트 매니플레이터는 비선형 특성으로 인하여 매개변수 불확실성을 나타내는데 이를 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔으며 기존의 제어기를 이용하여 강건입력을 첨가하므로써 외란에 대하여 강건성을 유지하게 하는 강건제어 기법이 많이 연구되어 졌다. Y.H.Chen^[7]과 Leitman^[8]은 불확실한 요소를 가지는 선형시스템을 고려하여 불확실한 입력에 대한 시스템 출력의 유용성을 연구하였다. H.X.Hu and N.K. Loh^[9]는 Lyapunov 안정조건 대신 Krasovskii조건을 이용하여 구조화된 불확실성에 대한 강건입력을 구성하였는데 이 알고리즘은 최적 제어입력을 구하기 위하여 반복적 수행을 하여야 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 매니플레이터의 정확한 제어를 위하여 다중 로봇트 시스템을 구성하고 있는 각각의 로봇트 매니플레이터의 매개변수를 정확히 추정할 수 있다는 가정하에 Resolved acceleration control 기법을 이용하여 물체의 위치, 운동야기힘과 내부힘 제어공간으로 분해하여 독립적으로 제어한다. 이때 위치와 힘의 공간으로의 분해는 선택행렬(Selection matrix)를 이용하여 구성하며 운동야기힘과 내부힘은 물체의 관점에서 Null 공간 개념을 이용하여 독립적으로 분해한다. 둘째로 매니플레이터는 비선형성으로 인하여 매개변수 불확실성을 가지므로 이에 대하여 강건성을 유지하도록 독립된 강건제어기를 구성할 수 있게 하는데 그 목적이 있다.

2. 다중로봇트의 동력학 방정식

일반적으로, n-강체 링크를 갖는 로봇트 매니플레이터는 비선형

역학특성을 포함하는데 매니플레이터의 동력학 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기에서 모든 매니플레이터는 Non-redundant하며 말단효과장치와 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 로봇트 매니플레이터의 대칭정적 관성행렬, 원심력과 콜리올리시항 그리고 중력벡터항이다. $\theta_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 k번째 로봇트 매니플레이터의 조인트 변수이며 $\tau_k(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 k번째 로봇트 매니플레이터의 구동기가 공급하는 토크벡터이고, $F_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 운동을 야기하는 힘벡터이다. 또한 $J_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 k번째 로봇트 매니플레이터의 조인트 공간에서의 자코비안(Jacobian)행렬이다. 다중 로봇트 시스템의 운동을 단일한 형태로 표현하기 위하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(\theta) \ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau(t) - J^T F \quad (2)$$

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. 식(2)를 Cartesian Space에서 표현하면

$$M_c \ddot{r}_c + H_c + G_c = F_c(t) - F(t) \quad (3)$$

$M_c = J^{-T} M J^{-1}$, $H_c = J^{-T} (H - M J^{-1} \dot{J} \dot{\theta})$ 과 $G_c = J^{-T} G$ 이다. k대의 로봇트 매니플레이터가 말단효과장치를 통하여 물체에 인가하는 힘은 다음과 같이 구성된다.

$$F_{om} = J_o^T F = J_o^T (F_m + F_f) \quad (4)$$

여기에서, $(\cdot)^T$ 는 전치행렬을 나타내고, $F = [F_1^T \ F_2^T \ \dots \ F_k^T]^T$ 이며 $F_i \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $i=1, \dots, k$ 은 i번째 매니플레이터의 말단효과장치로 부터 물체에 인가되어지는 힘이다. 또한 $F_m = [F_{m1}^T \ F_{m2}^T \ \dots \ F_{mk}^T]^T \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $F_f = [F_{f1}^T \ F_{f2}^T \ \dots \ F_{fk}^T]^T \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 는 물체의 운동 야기힘과 내부힘이다. 또한 $F_{om} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 은 물체의 Resultant force이며 $J_o^T = [J_{o1}^T \ J_{o2}^T \ \dots \ J_{ok}^T] \in \mathbb{R}^{m \times kn}$ 는 물체좌표계의 자코비안 행렬로서 $m \leq 6$ 이다.

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

$$J_0^T = \begin{bmatrix} E_3 & 0_3 & \cdots & E_3 & 0_3 \\ -P_1 & E_3 & \cdots & -P_k & E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

여기에서 $p_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]$ 는 말단효과장치와 물체가 접촉할 경우 말단효과장치의 위치를 나타내며 이때 x 는 Cross product를 의미하며 $E_3, 0_3$ 는 3×3 단위행렬, 3×3 영행렬을 나타낸다. 식(4)에서와 같이 인가되는 힘은 운동야기힘과 내부힘으로 분할이 가능한데 이때에 내부힘의 정의로부터 물체의 운동에 관여하지 않으므로 물체 자코비안 행렬의 Null 공간에 존재하게 된다. 즉, 각 매니플레이터에서 물체에 인가되는 내부힘의 총합은 0이며, 운동야기힘과 내부힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_m + F_I \quad (6)$$

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

$$F_I = NV_I \quad (8)$$

여기에서, N 는 Null 공간의 basic set, V_I 는 N 에 대응하는 F 의 요소를 나타내며 이때의 J_o^{T*} 은 J_o^T 의 Generalized 역행렬^[6]을 의미한다. 물체에 인가하는 내부힘은 총합이 0이므로 물체의 운동에 영향을 미치지 못하므로 내부힘은 물체의 요구되는 힘으로부터 유도할 수 없다. 여기에서 N 은 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 사상하므로서 유도할 수 있다. 이와 같이 물체에 인가하는 힘은 운동야기힘과 내부힘으로 분해되어지므로 식(6)을 식(3)에 대입하면 동력학 방정식을 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$M_c \dot{r}_c + H_c + G_c = F_c(t) - (F_m + NV_I) \quad (9)$$

3. 다중로봇 시스템의 독립제어기 구성

본 연구에서는 위치와 운동야기힘, 내부힘의 제어를 위하여 resolved acceleration control^[5] 기법을 이용하여 제어입력을 다음과 같이 구성한다.

$$F_c(t) = \hat{M}_c [\dot{r}_{cd} + \sum K_v (\dot{r}_{cd} - \dot{r}_c) + \sum K_p (r_{cd} - r_c)] + \sum [F_{md} + K_{fp} (F_{md} - F_m) + K_{fv} (\dot{F}_{md} - \dot{F}_m) + K_{fl} \int (F_{md} - F_m) + N(V_{ld} + K_{vp} (V_{ld} - V_I) + K_{vv} (\dot{V}_{ld} - \dot{V}_I) + K_{vl} \int (V_{ld} - V_I))] + \hat{H}_c + \hat{G}_c \quad (10)$$

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 위치이득, 속도이득이며 K_{fp}, K_{fl} 과 K_{fv} 는 운동야기힘의 제어를 위한 PID정방이득행렬이며, K_{vp}, K_{vl} 과 K_{vv} 는 내부힘 제어를 위한 PID정방이득행렬이다. r_{cd} 는 물체의 목적 궤적을 의미한다. 또한 F_{md} 와 F_m 는 목적 운동야기힘과 실제운동야기힘을 나타내며 V_{ld}, V_I 는 목적 내부힘요소와 실제 내부힘 요소를 나타낸다. Σ 과 Σ 는 선택 행렬(selection matrix)이다.

식(9)와 식(10)으로부터 제어기를 포함하는 시스템 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\hat{M}_c \sum \dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p + \sum [(E + K_{fp}) F_{me} + K_{fv} \dot{F}_{me} + K_{fl} \int F_{me} + N((E + K_{vp}) V_{Ie} + K_{vv} \dot{V}_{Ie} + K_{vl} \int V_{Ie})] = \Delta G \quad (11)$$

여기에서 $e_p = r_{cd} - r_o, F_{me} = F_{md} - F_m, V_{Ie} = V_{ld} - V_I$ 는 위치오차, 운동야기힘오차 그리고 내부힘 오차를 나타내며 $\Delta G = (M_c - \hat{M}_c) \dot{r}_c + (H_c - \hat{H}_c) + (G_c - \hat{G}_c)$ 이다. 또한 매개변수 불확실성으로 야기되는 변이 ΔG 가 0이면 즉, 매개변수 추정이 정확히 이루어지면 resolved acceleration 제어 기법으로부터 위치와 힘은 제어공간이 선택행렬로부터 상호 독립이된다^[6]. 여기에서 식(11)의 오른쪽 두 번째항은 힘 제어항으로서 J_o^T

를 곱하면 즉, $J_o^T[(E+K_{fp})F_{me}+K_{fv} \dot{F}_{me}+K_{fl} \int F_{me}]+N((E+K_{vp})V_{Ie}+K_{vv} \dot{V}_{Ie}+K_{vl} \int V_{Ie})$ 에서 두 번째항의 $J_o^T N((E+K_{vp}) V_{Ie} + K_{vv} \dot{V}_{Ie} + K_{vl} \int V_{Ie})$ 는 $J_o^T N((E+K_{vp})V_{Ie}+K_{vv} \dot{V}_{Ie}+K_{vl} \int V_{Ie})$ 로 표현된다. N 은 J_o^T 의 null space를 나타내므로 $J_o^T N$ 은 0가 된다. 그러므로 운동야기힘과 내부힘은 물체와 말단효과장치의 접촉 공간에서 서로 독립이므로 다음과 같이 분리 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p = 0 \quad (12)$$

$$\dot{F}_{me} + K_{fv}^{-1}(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv}^{-1}K_{fl} \int F_{me} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{V}_{Ie} + K_{vv}^{-1}(E+K_{vp})V_{Ie} + K_{vv}^{-1}K_{vl} \int V_{Ie} = 0 \quad (14)$$

그러므로 식(12), 식(13), 식(14)로부터 각각의 제어공간이 독립이므로 위치오차, 운동야기힘 오차, 내부힘 오차는 각각의 오차이득을 적절히 이용하므로서 오차를 0로 수렴할 수 있으나 ΔG 는 동력학 시스템의 불확실성의 영향을 나타내는 것으로 위치 제어공간과 힘제어공간으로 나누어 표현할 수 있다. 또한 힘제어부분은 운동야기힘과 내부힘제어 공간이 서로 독립이므로 다음과 같이 나누어 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p = \hat{M}_c^{-1} \Delta G |_{ro=\Sigma r_o} \quad (15)$$

$$\dot{F}_{me} + K_{fv}^{-1}(E+K_{fp})F_{me} + K_{fv}^{-1}K_{fl} \int F_{me} = \Delta G |_{(ro=\Sigma r_o \text{ and } space(J_o^T))} \quad (16)$$

$$\dot{V}_{Ie} + K_{vv}^{-1}(E+K_{vp})V_{Ie} + K_{vv}^{-1}K_{vl} \int V_{Ie} = \Delta G |_{(ro=\Sigma r_o \text{ and } null \text{ space}(J_o^T))} \quad (17)$$

여기에서 $\Delta G |_{ro = \Sigma r_o}$ 는 위치제어 공간, $\Delta G |_{(ro = \Sigma r_o \text{ and } space(J_o^T))}$ 는 힘제어 공간과 J_o^T 의 공간, $\Delta G |_{(ro = \Sigma r_o \text{ and } null \text{ space}(J_o^T))}$ 는 힘제어공간과 J_o^T 의 null 공간에서의 매개변수 불확실성의 영향을 나타내며, 이것은 외란의 형태이므로 정확한 구성요소값을 알 수 없다. 식(15), 식(16), 식(17)은 적절한 이득값으로 오차를 수렴하게 할 수 없다.

4. Krasovskii 이론을 이용한 강건제어 입력

로봇 매니플레이터는 강한 비선형성으로 인하여 실제 매개변수 불확실성이 존재한다. 그러므로 매개변수 불확실성이 존재할 경우 오차의 수렴성을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔으며 본 연구에서는 강건제어 기법을 이용하여 제어기를 구성한다. 식(15), 식(16), 식(17)을 상태방정식으로 표현하면

$$\dot{x} = A x + B_d U, \quad x(t_0) = x_0 \quad (18)$$

여기에서 $x = [e_p^T \ f_{me}^T \ v_{Ie}^T \ \dot{e}_p^T \ \dot{f}_{me}^T \ v_{Ie}^T]^T \in \mathbb{R}^{6n \times 1}$ 이며 B_d 는 입력외란이 존재하는 입력행렬을 나타낸다.

시스템 행렬 A 와 입력행렬 B 는 위치, 운동야기힘, 내부힘의 제어기 이득값과 단위행렬로 구성되어진다. 여기에서 이득행렬이 정확히 구성되어진다면 행렬 A 는 불확실성이 존재하지 않는 행렬이며 시스템 입력 $\Delta G \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ 가 0이면 즉 정확히 모델링을 할 수 있으면 외란이 존재하지 않는 공칭시스템이 된다.

식(18)에서 A 과 B 는 공칭시스템의 시스템 행렬 및 입력행렬을 나타낼 경우 식(18)은 공칭시스템에 입력외란이 존재하는 것이므로 $B_d = B + \Delta B(s)$ 로 나타낼 수 있다. 식(19)를 이용하여 식(18)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = A x + B U + \Delta B(s) U \quad (19)$$

여기에서 (A, B) 가 가제어성을 가지고, 시스템 행렬 $M(=A+BK)$ 의 근이 복소수평면의 좌반면에 존재하도록 하는 이득 K 가 존재한다면 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\sigma_{\min}(M+M^T) \leq 2Re(M) \leq \sigma_{\max}(M+M^T) \quad (20)$$

여기에서 $Re(\cdot)$ 는 eigenvalue(\cdot)의 실수값을 의미하며 또한 $\sigma_{\min}(\cdot), \sigma_{\max}(\cdot)$ 는 최소, 최대 eigenvalue를 나타낸다.

시스템 제어입력 U 를 다음과 같이 선택한다.

$$U = K x + P_x \quad (21)$$

여기에서 $P_x \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ 는 매개변수 불확실성에 대한 강건제어 입

력을 나타낸다.

식(21)을 식(19)에 대입하고 정합조건을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Mx + BP_x + B(E(s)Kx + E(s)P_x) \quad (22)$$

식(22)은 미지의 매개변수 $E(s)$ 를 포함하고 있으므로 정확한 제어를 위해서는 미지의 매개변수를 일정한 알고있는 값으로 변환하여 제어입력을 유도하여야 한다.

여기에서 강건제어입력을 구성하지 않은 상태의 시스템이 안정성을 유지하기 위하여 $E(s)$ 와 공칭시스템의 매개변수와의 조건식을 유도한다. 조건식을 유도하기 위하여 본 연구에서는 Krasovskii 이론을 사용하였다.

[정리] Krasovskii 정리^[10]

일반적인 선형이론을 발생하기 위하여 다음과 같은 동력학 시스템을 고려한다.

$$\dot{X}(t) = f(x,t), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (23)$$

여기에서 $f(0,0)=0$ 이고 $f(x,t)$ 는 상태 x 에 대하여 최소 1차 미분가능한 함수이다. $N_f(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 를 시스템 (23)의 자코비안(Jacobian) 행렬이라 가정하였을 경우 $N_f + N_f^T$ 가 모든 x 에 대하여 부정행렬(negative definite matrix)이면 $x=0$ 는 점근적 안정성을 갖는다.

강건제어입력이 첨가되어 지지않는 시스템의 안정성을 만족하는 $E(s)$ 와 공칭시스템의 조건을 유도하기 위하여 식(22)의 P_x 항을 고려하지 않고 Krasovskii이론을 적용한다. 이때 Jacobian 행렬 $N_f(x)$ 는

$$N_f(x) = M + BE(s)K \quad (24)$$

과 같이 유도 할 수 있으며 점근적 안정성을 유지하기 위하여 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$x^T[M + BE(s)K + (M + BE(s)K)^T]x < 0, \quad \forall x \neq 0 \quad (25)$$

여기에서 $x^T x$ 가 제곱의 형태이며, 식(25)를 만족하도록 하는 충분조건은 다음과 같다.

$$x^T(BE(s)K + (BE(s)K)^T)x < \sigma_{\min}(-M - M^T)x^T x \quad (26)$$

$$\|x^T(BE(s)K)x\| \leq \|B\| \|E(s)\| \|K\| x^T x \quad (27)$$

과 같이 정의할 수 있고, 여기에서 $\|\cdot\|$ 는 행렬 Euclidean norm을 의미하며 $\|B\| = 1$ 이다. $\|x^T(BE(s)K + (BE(s)K)^T)x\| \leq \|2x^T(BE(s)K)x\|$ 이므로 식(27)의 충분조건은 다음과 같다.

$$\|E(s)\| \|K\| x^T x < \frac{1}{2} \sigma_{\min}(-M - M^T)x^T x \quad (28)$$

그러므로 일정한 이득값을 이용하여 Krasovskii 안정성을 만족시키는 조건식을 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$\|E(s)\| = \gamma \frac{\sigma_{\min}(-M - M^T)}{\|K\|} = \gamma \Psi \quad (29)$$

여기에서 γ 는 0.5보다 작은 이득값을 나타내며 $\Psi = \sigma_{\min}(-M - M^T) / \|K\|$ 이다.

식(22)를 미지의 매개변수항과 공칭 시스템의 매개변수로 나누어 시스템을 다시 정리하면 다음과 같은 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Mx + BP_x + B \varepsilon(x,t) \quad (30)$$

여기에서, $\varepsilon(x,t) = E(s)Kx + E(s)P_x$ 로 정의하면 이것은 불확실성의 매개변수 $E(s)$ 로 인한 시스템의 영향을 나타내는 미지의 매개변수로서 일반적인 강건제어 기법에서는 Ultimate uniform Stability^{[7][8]}의 정의로부터 한계값을 안다고 가정하고 이 때 한계값을 ρ 라고 정의하면 $\|\varepsilon(x,t)\|$ 는 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$\|\varepsilon(x,t)\| \leq \|E(s)\| \|K\| \|x\| + \|E(s)\| \|P_x\| \triangleq \rho \quad (31)$$

여기에서 Y.H.Chen^[7]이 제안한 강건제어로부터 $\|P_x\| = \rho$ 임을 알 수 있다. 그러므로 $\|P_x\|$ 대신 ρ 로 치환하고 식(29)를 이용하면 $\|\varepsilon(x,t)\|$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\|\varepsilon(x,t)\| \leq \frac{\gamma \Psi \|K\| \|x\|}{1 - \gamma \Psi} \quad (32)$$

시스템의 안정성을 나타내는 연구는 많이 수행되어져 왔다. 그중에서 선형 시스템 안정성의 필요조건을 발생하는 Lyapunov 안정도 판별법이 많이 이용되어 지고 있다. 강건제어입력 P_x 를 포함하는 시스템에 대하여 Lyapunov안정도 판별법을 이용하여 강건제어 입력을 유도한다.

손실함수 $V(\cdot) \in \mathbb{R}^1$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V(x) = x^T P_L x, \quad (33)$$

Lyapunov 미분값($L(x,t)$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L &= \text{grad } V(x)[Mx + BP_x + BE(s)Kx + BE(s)P_x] \\ &= -x^T Qx + 2(B^T P_L x)^T [P_x + \varepsilon(x,t)] \\ &\leq -x^T Qx + 2(B^T P_L x)^T \left[P_x + \frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \right. \\ &\quad \left. \frac{\gamma \Psi \|K\| \|x\|}{1 - \gamma \Psi} \right] \end{aligned} \quad (34)$$

식(34)로 부터 Lyapunov 안정도를 만족하기위하여 Lyapunov 미분값 $L(x,t)$ 가 0보다 작거나 같아야한다. 그러므로 식(34)를 만족하는 충분조건은 다음과 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_x &= - \frac{B^T P_L x}{\|B^T P_L x\|} \frac{\gamma \Psi \|K\| \|x\|}{1 - \gamma \Psi} \quad (\|B^T P_L x\| \geq \varepsilon \text{ 일 경우}) \\ &= - \frac{B^T P_L x}{\varepsilon} \frac{\gamma \Psi \|K\| \|x\|}{1 - \gamma \Psi} \quad (\|B^T P_L x\| \leq \varepsilon \text{ 일 경우}) \end{aligned} \quad (35)$$

5. 모의실험 및 고찰

동일 매개변수를 갖는 두대의 로보트 시스템이 물체와 강접촉을 유지한다고 가정하고 모의실험을 수행한다. 본 모의실험을 위하여 PUMA 560 2,3 번째 링크의 값을 사용하며, 매개변수 추정은 30%의 불확실성을 갖는다고 가정한다. 목적위치와 목적 운동 야기힘, 그리고 목적 내부힘은 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} r_{od} &= [0.56 + 0.3 \sin(t/1.5) \ 0]^T \quad (\text{m}) \\ F_{omd} &= [0 \ 20 + 4.5 \sin(t/1.5)]^T \quad (\text{N}) \\ NV_{Id} &= [0 \ 8 \ 0 \ -8]^T \quad (\text{N}) \end{aligned}$$

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 $[0.36 + 0.4 \sin(t/1.5) \ 0]^T$, 매니플레이터 2의 목적궤적은 $[0.76 + 0.4 \sin(t/1.5) \ 0]^T$ 이다. 또한 물체에 인가하여야 할 목적운동야기힘을 나타낸다. 강접촉을 유지하고 부하분할 계수가 0.6과 0.4로 설정하면 매니플레이터 1이 $12 + 2.7 \sin(t/1.5)$, 매니플레이터 2가 $8 + 1.8 \sin(t/1.5)$ 를 물체에 인가하여야 한다.

본 모의실험 결과 두 대의 로보트를 이용한 다중로보트 시스템이므로 두 대의 로보트 결과는 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. 그러므로 본 모의실험의 결과로 로보트 매니플레이터 1에 대한 결과만을 싣는다. 그림 1은 물체의 목적궤적에 대한 실제 궤적의 응답과 궤적 추적 오차를 나타낸 결과로서 물체의 목적 궤적을 따라 실제 궤적이 수렴하는 형태를 보여주고 있다. 그림 2는 목적운동야기힘에 대한 각 매니플레이터의 실제 운동야기 힘 응답을 나타내고 있으며, 또한 이의 오차를 나타내고 있다. 결과로 부터 실제 힘이 수렴하는 것을 보여주고 있으므로 물체의 정확한 운동을 보장할 수 있다는 것을 나타낸다. 그림 3은 목적 내부힘에 대한 실제 내부힘의 응답과 내부힘 오차를 나타낸다.

6. 결론

본 논문에서는 다중 로보트 시스템을 구성하는 각각의 로보

트 매니플레이터를 정확히 제어하기 위하여, 물체의 운동으로 부터 운동을 야기하는 힘을 유도하고 이때 고려되어야 하는 내부힘을 유도하여 위치와 힘 공간으로 분해하여 제어하였다. 위치, 운동야기힘, 내부힘을 제어하기 위하여 resolved acceleration 제어 기법을 이용하였으며 이와 같은 과정에서 위치와 힘은 독립된 제어를 구성할 수 있었다. 또한 말단효과장치의 힘은 각각 운동야기힘과 내부힘으로 분해되고 분해된 힘을 제어하기 위하여 물체의 자코비안 행렬의 null space 개념을 이용하여 독립된 제어를 구성할 수 있었다. 또한 2링크를 갖는 2대의 로봇트 매니플레이터를 이용한 모의실험을 통하여 각각의 독립된 제어기에 대한 유용성을 알아보았다. 각각의 로봇트 동력학은 비선형성으로 인하여 매개변수 불확실성을 가질 수 있으므로 매개변수의 부정확한 추정으로 인하여 독립된 제어기는 정확한 제어를 수행할 수 없다. 이에 매니플레이터의 비선형성으로 인한 매개변수 불확실성에 대하여 강건성을 유지하도록 강건제어입력을 구성하였으며 모의 실험 결과 강건제어입력을 첨가하였을 경우 첨가하지 않은 경우 보다 나은 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

[1] E.Nakano,S.Ozaki,T.Ishida and I.Kato,"Cooperational control of the Anthropomorphous manipulator 'MELARM', "Proc.4th Int. Symposium on Industrial Robots, pp.251-260 1974

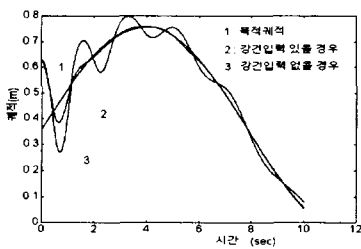
[2] S.Kurono,"Coordinated control of a pair of artificial arms," in *Bimechanism* 3,pp.182-913,Tokyo:Tokyo University Press, 1975

[3] M.T.mason,"Compliance and force control for computer controlled manipulators,"*IEEE Trans. Syst.Man Cyber net*,Vol.SMC-11,pp.418-432,1981

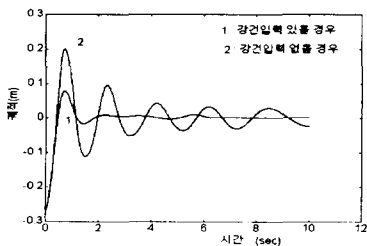
[4] M.H.Raibet and J.J.Craig,"Hybrid position/force control of manipulators,"*ASME J.Dyn. Syst.Measurement Contr.*,vol. 102, pp.126-133,June,1981

[5] 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

[6] R.G.Bonitz and T.C.Hsia,"Force decomposition in co-operating manipulators using the theory of metric space and generalized inverse," in *Proc.of Robotics and Auto.*,vol.2, pp.1521-1527,1994



(a)



(b)

그림 1. 궤적 추적 응답 (a : 궤적추적, b : 추적오차)
Fig. 1. Response of Trajectory Tracking of an object

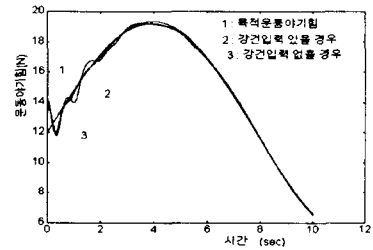
(a : Trajectory Tracking, b : Tracking error)

[7] Y.H.Chen,"On the Deterministic performance of uncertain dynamical systems," *Int.J.Contr.*, Vol.43,No.5, pp1557 - 1579 ,1986

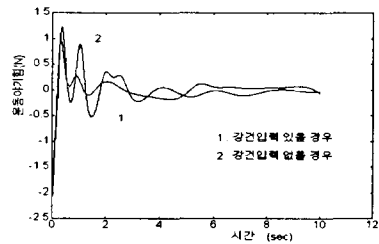
[8] G.Leitman,"On the Efficacy of nonlinear control in uncertain linear systems," *Trans. ASME,J.Dynamic Syst. Meas. Contr.*,Vol.102,pp.95-102,June,1981

[9] H.X.Hu and N.K.Luh,"Robust Control in state space : An Approach Via The Krasovskii Theorem," *Proceedings of the ACC*,Vol.2,pp.1592-1597,June,1989

[10] J.J.D'Azzo and C.H.Houpis, *Linear control system analysis & design : conventional and modern*, McGraw-Hill, 3e, 1988



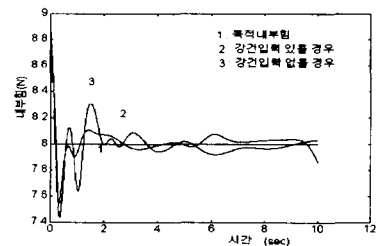
(a)



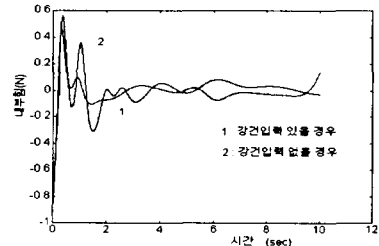
(b)

그림 2. 운동야기힘 응답 (a : 추적, b : 오차)

Fig. 2. Response of Motion-Inducing Force
(a : Tracking , b : Error)



(a)



(b)

그림 3. 내부힘 응답 (a : 추적 , b : 오차)

Fig. 3. Response of Internal Force