

비대칭 구조를 갖는 두 협조 로봇의 컴플라이언스
제어방법

(A Compliant Control Method for Cooperating
Two Arms with Asymmetric Kinematic
Structures)

呂熙珠, 徐一弘

(Hee-Joo Yeo and Il Hong Suh)

論文96-33B-7-5

비대칭 구조를 갖는 두 협조 로봇의 컴플라이언스 제어방법

(A Compliant Control Method for Cooperating Two Arms with Asymmetric Kinematic Structures)

呂熙珠*, 徐一弘**

(Hee-Joo Yeo and Il Hong Suh)

요 약

두대 로봇 매니퓰레이터가 힘을 일정하게 유지시키기 위한 단일화된 컴플라이언스 힘 제어 알고리즘을 제안한다. 여기서 두대 로봇은 기구학적인 관점에서 단일 로봇으로 간주된다. 두대 로봇의 양 끝에 달린 힘/토크 센서의 정보로부터 계산된 힘 에러는 최소 액추에이터 좌표계(minimum actuator coordinator)로 전달되고, 전체 시스템 액추에이터 좌표계로 분배된다. 전체 액추에이터 좌표계(total actuator coordinator)에서의 위치보정은 작업 좌표계와 전체 액추에이터 좌표계 사이의 좌표변환에 의해 얻어지는 전체 액추에이터 좌표계에 대한 컴플라이언스 매트릭스를 기초로 하여 계산된다. 두대 로봇과 환경 사이에 상호작용하는 힘을 제어하기 위하여, 비대칭 구조를 갖는 두대 로봇을 이용한 실험을 수행하였다. 제안된 제어 알고리즘의 우수성을 보이기 위하여, 마스터/슬레이브 구조의 로봇과 실험적으로 비교하였다. 결과적으로 제안된 컴플라이언스 힘 제어 알고리즘은 다른 알고리즘 보다 훨씬 우수할 뿐만 아니라, 단일화된 접근법으로 일반적인 기구학 구조를 갖는 임의의 두대 로봇 시스템에 적용할 수 있다.

Abstract

An unified compliant control algorithm to regulate the force by dual arms is proposed, where two arms are treated as one arm in a kinematic viewpoint. The force error calculated from the information of two force/torque sensors attached to the end of each arm is transferred to minimum actuator coordinates, and then is distributed to total system actuator coordinates. The position adjustment at the total actuator coordinates is computed based on the effective compliance matrix with respect to total actuator coordinates, which is obtained by coordinate transformation between the task coordinates and the total actuator coordinates. An experiment is carried out for dual arms with asymmetric kinematic structure to control an interaction force between manipulators and the environment. The performances of the proposed control algorithm are experimentally compared to those of dual arms employing master/slave scheme. The proposed compliant control algorithm not only outperforms other algorithms, but also can be treated as an unified approach in the sense that it can be applied to arbitrary dual arm systems with general kinematic structures.

* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Hanyang Univ.)

** 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

서울대 制御計測 新技術研究센터 研究委員

(Dept. of Electronics Eng., Hanyang Univ.)

* 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 연구과제 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字: 1996年4月1日, 수정완료일: 1996年7月1日

I. 서론

산업 공정의 자동화를 위한 많은 작업들은 로봇 매니퓰레이터가 주변 환경과 상호 접촉하여 작업하는 것을 필요로 한다. 그러한 작업들의 대표적인 예로서는 pushing/polling, scraping, grinding, pounding, bending, 그리고 twisting 등이 있다. 근본적으로 이와 같은 작업들의 대부분은 로봇 매니퓰레이터가 힘 제어되는 것을 필요로 한다. 그러나 일반적으로 대부분의 산

업용 로봇을 이용한 응용은 실제로 충분한 정밀도를 보장하기가 어렵기 때문에, 스프레이 페인팅, 점 용접, 그리고 간단한 운반과 같은 정밀도가 낮은 비접촉성 일들에 국한되어 왔다. 힘 제어는 경로 제어의 일반적인 형태로써 고려될 수 있다. 따라서, 힘 제어는 이론과 실제적인 산업 현장에 있어서 아직도 상당히 많은 연구가 필요되고 있다.

현재 대부분의 산업용 로봇 매니플레이터들은 위치 제어 용도로 설계되어 있는 장치이다. 따라서, 액츄에이터들에 의해 힘을 직접적으로 제어할 수 없으며, 힘 오차를 측정하여 로봇 매니플레이터의 엔드 포인터 위치를 보정함으로써 간접적으로 제어할 수 있다. 지금까지의 컴플라이언스 제어구조 방식들은^[1,9,12,18] 단일 로봇이 환경과 접촉하여 작업하는 문제에 적용되었다. 이러한 주제하의 대부분의 연구들은 하이브리드 위치/힘 제어방식^[2,10,14,15, 16]으로 연장되며, 다른 힘 제어방식들은 임피던스 제어^[3,4], 적응 제어^[5], 퍼지/뉴럴 제어^[6,8,19] 등이 있다.

다중 협조로봇은 단일 로봇으로 수행할 수 없는 많은 작업들을 수행할 수 있게 한다. 그림 1은 다중 로봇으로 수행할 수 있는 작업들을 나타내고 있다. 그림 1(a)는 무겁고 부피가 큰 물체들의 운반 작업을 보이고 있다. 시스템의 높은 강성을 필요로 하는 몇몇 작업들(그림 1(b))은 다중 로봇의 폐쇄 구조(closed chain structure)가 강성을 제공해 주기 때문에, 다중 로봇의 사용이 선호된다. 또한, 복잡한 부품들의 조립작업(그림 1(c))도 다중 로봇의 활용이 필요한 응용분야들이다.

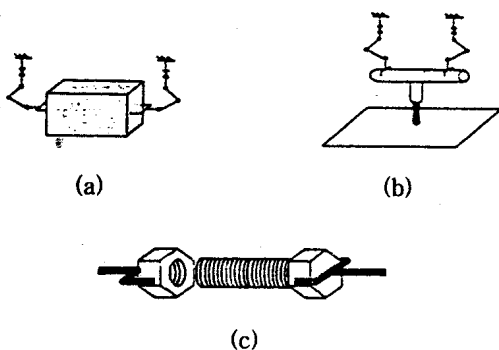


그림 1. 다중 로봇에 의한 대표적인 작업^[18]
Fig. 1. Typical tasks by multiple arms^[18].

이러한 다중 로봇 혹은 이중 로봇 시스템들은 시스템의 자유도보다 더 많은 액츄에이터를 갖고 있기 때문에 여유구동 시스템(force-redundant system)으로

간주할 수 있다. 그러므로, 여유구동으로 인한 힘 분배 문제가 제기된다. 힘 분배 문제는 힘 공유(load sharing)와 힘 평형(load balancing)의 두 주제로 분류할 수 있다. 다중 로봇이 잡은 물체에 작용되는 동적 부하와 외부 부하는 여러가지 기준^[10,12,14,20,21]에 따라 각 로봇에게 균등하게 분배될 수 있다. 내력(internal force)은 시스템의 운동에는 영향을 미치지 않는 않지만, 로봇이 잡은 물체를 압착하고, 휘게하고, 변형시키는데 유용하게 사용될 수 있다. 또한, 개회로 방식으로 내부적인 강성 효과를 생성할 수 있다^[11]. 두 팔 로봇 시스템을 제어하기 위하여 마스터/슬레이브 시스템^[9,17,18]에 대한 많은 연구 결과들이 보고 되었지만, 그것들은 실제적으로 한 대의 로봇 팔만이 상호 작용하는 힘(interaction force)을 측정하고, 다른 팔은 기구적인 구속조건을 만족시키는 방법으로 움직이기 때문에 힘 분배(load distribution)의 잇점을 살리지 못한다. Luh와 Zheng^[9]는 두 대 로봇에 대한 컴플라이언스 협조 제어 알고리즘을 볼트와 너트의 조립 작업에 적용시켰다. Kosuge^[18]은 두 대 로봇의 분산(decentralized) 제어구조를 제안했다. 분산 제어방법으로 작업을 수행하기 위하여, 물체의 운동은 주 로봇(lead)에 따르고, 종 로봇(follower)은 그 자체 힘 센서로부터의 힘 정보에 기준하여 주 로봇의 운동을 추종하도록 하였다. 마스터/슬레이브 제어구조에서 야기될 수 있는 단점들을 극복하기 위해 Uchiyama^[20]은 두 로봇의 양 손목에 힘/토크 센서를 장착하여 동시에 힘과 위치를 조정(regulate)하는 대칭적 제어 알고리즘(symmetric control algorithm)을 제안하였다. 그러나 대칭적 제어 알고리즘은 똑같은 기구학적 구조를 갖는 두 대 동종 로봇의 경우에만 적용될 수 있다. 따라서, 비대칭 구조를 갖는 두대의 비동종 로봇 시스템에 대한 힘 제어를 위해서는 기존에 쓰인 알고리즘들은 수정되어야 한다.

본 논문에서는, 로봇 시스템의 기구적 구조에 상관없이 적용할 수 있는 단일화된 컴플라이언스 제어 알고리즘을 제안하였다. 단일화된 접근 방법의 주된 아이디어는 두 로봇이 기구적으로 단일 로봇처럼 고려된다. 즉, 다시 말하면 두 로봇은 협조적인 방법보다는 단일화된 하나의 로봇으로 동작된다. 두 로봇의 엔드-이펙트에 부착된 힘/토크 센서로부터 계산된 힘 에러는 우선 최소 액츄에이터 좌표계(minimum actuator coordinator)로 전달되고, 다시 전체 액츄에이터 시스템 좌표계(total actuator system coordinator)로 분배된

다. 전체 액츄에이터 좌표계에서의 위치보정은 작업 좌표계와 전체 액츄에이터 좌표계 사이의 좌표변환에 의해 얻어지는 전체 액츄에이터 좌표계에 대한 컴플라이언스 매트릭스를 기초로 하여 계산된다. 두 대 로봇 시스템의 일반적인 형태에 대한 기구학적인 모델링은 단일화된 컴플라이언스 제어 알고리즘을 지원하기 위해 선행되어야 한다.

제안된 접근 방법의 타당성을 보이기 위해, 외부에서 가해진 힘을 제어하기 위해 두 대 로봇을 사용한 힘분배 문제를 논의한다. 그림 1(b)는 본 논문에서 고려하고자 하는 즉, 두 로봇이 물체를 견고하게 잡고 작업환경과의 접촉 상황에서 일정한 힘을 유지하도록 제어하는 경우를 나타내고 있다. 환경강성의 크기는 미리 안다고 가정한다. 결과를 비교하기 위해 두 대 로봇을 이용한 마스터/슬레이브 제어방법의 성능을 두 대 로봇을 위하여 개발된 실험 장치를 이용하여 실험하고, 우리가 제안한 단일화된 컴플라이언스 제어방법의 힘 추적(force tracking) 성능이 마스터/슬레이브 제어방법 보다 우수하다는 것을 실험적으로 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 처음으로 2장에서는 로봇 매니플레이터의 형태를 기구적 구조와 액츄에이터의 수에 따라서 분류한다. 다음으로, 3장에서는 일반적인 두 대 매니플레이터 형태에 대한 기구학적 모델링 방법이 소개되며, 4장에서는 컴플라이언스 모델링에 대해 소개한다. 5장에서는 힘을 일정하게 유지시키기 위해 두 대 로봇 매니플레이터에 대한 컴플라이언스 제어 알고리즘이 제안된다. 제안된 제어 알고리즘을 확증하기 위해 실험결과를 6장에서 설명한다. 마지막으로 7장에서 결론을 내린다.

II. 로봇 매니플레이터의 분류

대표적인 산업용 로봇 매니플레이터들은 직렬형 구조(serial-type structure)를 갖는다. 그러나, 로봇 적용분야가 광범위해짐에 따라, 다양한 구조의 매니플레이터가 개발되고 있다. 본 장에서는 기구학적 구조와 액츄에이터의 수에 따라 로봇 매니플레이터의 형태를 분류한다. 로봇 매니플레이터의 mobility는 메카니즘의 모든 요소들의 위치를 서로에 대하여 정할 수 있는 최소한의 독립변수의 수와 일치한다. R 체인으로 형성된 매니플레이터를 고려하자. 시스템이 J 관절과 L 링크를 갖고 각 관절이 F_i 의 자유도를 갖는다고 가정하자.

이때, mobility는

$$M = D(L-1) - \sum_{i=1}^L (D - F_i)$$

으로 정의된다. 여기에서 D 는 각 링크의 최대 자유도(공간운동에 대해서는 6, 평면이나 구 운동에 대해서는 3)를 나타내고, L 은 fixed link까지 포함한다. N 을 로봇 매니플레이터의 작업공간 자유도(operational degree of freedom)이라고 하면, M 과 N 사이의 관계에 따라 로봇 매니플레이터는 다음과 같이 여유자유도 시스템(redundant system), 비 여유자유도 시스템(non-redundant system), 그리고 과다 구속 시스템(overconstrained system)으로 분류할 수 있다.

- Nonredundant manipulator : $M = N$
 - serial-type : $R = 1$
 - parallel-type : $M = N$ and $M_i = N (i=1, \dots, R)$
 - nonparallel-type : $M = N$ and some $M_i > N$
 - (fully parallel or In-parallel manipulator : $M = N$ and $M_i = N = R (i=1, \dots, R)$)
- Kinematically redundant manipulator : $M > N$
 - serial-type : $R = 1$
 - parallel-type : $M_1 = \dots = M_i$ and $M_i > N$
 - nonparallel-type : $M_1 = \dots = M_i$ and some of $M_i > N$
- Overconstrained-type manipulator : $M < N$

여기서 M_i 는 각 체인의 mobility를 나타낸다. 각 경우는 각각 직렬형, 병렬형, 비병렬형으로 분류할 수 있다. overconstrained-type에서는 작업공간의 운동방향 중 몇 방향만이 독립적으로 제어될 수 있다.

이제, A 를 구동되는 관절의 수라고 하자. 구동되는 입력의 수에 따라, 매니플레이터들은 다음처럼 분류될 수 있다.

- Force nonredundant manipulator : $A = M$
- Force redundant manipulator : $A > M$
 - (or redundantly actuated manipulator)
 - kinematically nonredundant type : $A > M = N$
 - kinematically redundant type : $A > M > N$.

본 논문에서는, 이중암(dual arms) 시스템이 고려된다. 이중암이 공통의 물체를 견고하게 잡고 있는 3가지

경우를 고려하자. 우선, 이중암의 각 암이 6개의 관절, 6개의 링크를 가지고 있는 경우 이 시스템의 mobility는 6인 병렬형 매니플레이터로써 인식된다. 다음으로, 두번째 이중암 매니플레이터의 각 암이 7개의 관절과 7개의 링크를 가진다고 가정하자. 이 경우의 mobility는 8이며, 기구적으로 여유 자유도 매니플레이터로써 인식된다. 그러므로 이러한 이중암들은 mobility만큼의 액츄에이터 수에 의해서 제어될 수 있다. 반면에, 이러한 이중암은 모든 입력을 구동시키는 여유구동 형태가 될 수 있다. 마지막으로, 다른 수의 관절(즉, 왼쪽 암은 4개의 관절, 오른쪽 암은 5개의 관절)을 가진 3번째 경우를 보면, 시스템 mobility는 3이고, 이 시스템은 overconstrained-type임을 나타낸다. 그러므로 작업 공간에서 단지 세 방향으로의 운동만이 세개의 관절 액츄에이터들에 의해 독립적으로 제어될 수 있다. 또한 이 시스템도 모든 관절로 여유구동 될 수 있다. 첫번째와 두번째 경우는 두 개의 암이 동일한 기구학 구조를 갖는 대칭적 구조이다. 일반적으로 이러한 현상에 대한 제어 방법은, 두 단계로 나뉜다. 첫번째 단계에서는 잡은 물체에 가해진 힘과 운동을 제어하기 위하여 다양한 의사결정 기준에 따라 각 암에 힘이 분배되며, 그 다음으로 각 암은 독립적으로 제어된다. 한편, 세번째 경우는 비대칭 형상에 대응된다. 이 형상에서는 각 암이 잡은 물체에 가해진 힘과 운동을 제어하기 위한 충분한 수의 액츄에이터를 갖고 있지 못하기 때문에 대칭구조에서의 같은 제어방법이 사용될 수 없다. 그러므로, 보다 일반적인 접근 방법이 고려되어야만 한다. 다음 장에서 임의의 기구학 구조를 갖는 이중암 제어에 적용될 수 있는 기구학적 모델링 방법을 소개한다.

III. 이중 암의 기구학적 모델링

다중 로봇 혹은 이중 로봇과 같은 일반적인 폐쇄체인 시스템(closed-chain system)의 기구학은 두 단계로 나뉘어진다. 첫번째 단계는 독립관절 집합(independent joint set)과 종속관절 셋(dependent joint set)사이의 내부 관계를 나타낸다. 이에 대한 기구학적 관계는 다중 체인 사이의 고차 기구학적 구속 방정식에 의해 얻어진다. 두번째 단계에서는 엔드-이펙트 운동 좌표계와 독립 관절 셋 사이의 관계를 다룬다. 이러한 관계는 첫번째 단계에서 결정된 내부 기구학적 관계를 하나의 오픈 체인 기구학 모델에 접목시킴으로써

얻어진다.

1. 내부 기구학(internal kinematics)

다음은 N-차원 작업공간에서 공통의 물체를 붙잡고 작동하는 두 개의 직렬 체인으로 구성된 이중 암의 내부 기구학에 대하여 논의하고자 한다. 각 체인은 다른 관절 수를 가질 수 있다. 각 암이 엔드-이펙트 좌표계에서 같은 속도와 가속도를 갖고 있기 때문에, 엔드-이펙트 좌표계는 내부적인 기구학 관계를 결정하기 위하여 중간적인 좌표계로서 선택된다.

엔드-이펙트의 속도벡터 (w)는 r개의 오픈 체인 구조의 관절속도 ($\dot{\phi}_r$)의 향으로 직접 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$w = [{}_r J] \dot{\phi}_r \quad r=1,2, \tag{1}$$

여기서 $[{}_r J]$ 는 엔드-이펙트 좌표계 벡터를 관절 좌표계 벡터로 관련짓는 1차 기구학적 영향 계수(KIC) 매트릭스를 나타낸다. (1)식은 관절 속도 셋 중의 하나를 다른 셋으로 관련 짓는 N개의 대수학 방정식을 의미하며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[{}_1 J] \dot{\phi}_1 = [{}_2 J] \dot{\phi}_2. \tag{2}$$

1차 KIC 매트릭스를 열 벡터 형태로 보이기 위해, (2)식을 다음과 같이 나타낸다.

$$[\begin{matrix} {}_1 g_1 & : & {}_1 g_2 & : & \cdots & : & {}_1 g_{M_1} \end{matrix}] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{M_1} \end{bmatrix} = [\begin{matrix} {}_2 g_1 & : & {}_2 g_2 & : & \cdots & : & {}_2 g_{M_2} \end{matrix}] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{M_2} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

여기서 M_r 은 r번째 개루프 체인의 관절 수를 나타낸다. 이제 (3) 식은 각 체인의 독립, 종속 관절 속도 셋에 따라 다음과 같이 재배치되고 재그룹 될 수 있다.

$$[{}_1 J_a] \dot{\phi}_a + [{}_1 J_b] \dot{\phi}_b = [{}_2 J_a] \dot{\phi}_a + [{}_2 J_b] \dot{\phi}_b. \tag{4}$$

(4)식은 다음의 (5)식과 같은 단일한 매트릭스 방정식으로 정의되며

$$[A] \dot{\phi}_b = [B] \dot{\phi}_a, \tag{5}$$

여기에서 $[A]$ 와 $[B]$ 는 (6), (7)식과 같다.

$$[A] = [[{}_1 J_b] : - [{}_2 J_b]], \tag{6}$$

$$[B] = [-[{}_1J_a]; [{}_2J_a]]. \quad (7)$$

(4), (5) 식에서, $\dot{\phi}_a$ 와 $\dot{\phi}_b$ 는 각각 M 차원 독립관절 속도벡터와 $(M_1 + M_2 - M)$ 차원 비 독립관절 속도벡터를 나타낸다. $[A]$ 와 $[B]$ 는 각각 $(M_1 + M_2 - M) \times (M_1 + M_2 - M)$ 와 $M \times M$ 매트릭스를 나타낸다.

그러므로, 매트릭스 $[A]$ 의 역행렬이 특이 행렬이 아니라고 가정하면 다음과 같이 관계되어 구해진다.

$$\dot{\phi}_b = [A]^{-1}[B] \dot{\phi}_a = [G \ddot{\phi}] \dot{\phi}_a. \quad (8)$$

여기서 $[G \ddot{\phi}]$ 는 이중암 시스템의 1차 내부 기구학적 영향계수(IKIC) 매트릭스를 나타낸다. $\dot{\phi}$ 는 시스템의 전체 관절 셋을 나타낸다고 가정하면, 독립관절 셋과의 관계는 (9)식 처럼 표현할 수 있다.

$$\dot{\phi} = [G \ddot{\phi}] \dot{\phi}_a. \quad (9)$$

여기에서 $M_i (= (M_1 + M_2) \times M)$ 의 차원을 가지는 $[G \ddot{\phi}]$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$[G \ddot{\phi}] = \begin{bmatrix} [J] \\ [G \ddot{\phi}]^T \end{bmatrix}. \quad (10)$$

2. 정방향 기구학

r 번째 체인 (i, ϕ)의 관절들은 독립, 종속 관절들로 구성되기 때문에, $\dot{\phi}$ 는 다음과 같이 시스템의 독립 관절 향으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\phi} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_a \\ \dot{\phi}_b \end{bmatrix} = [{}_rG \ddot{\phi}] \dot{\phi}_a. \quad (11)$$

여기서, $[{}_rG \ddot{\phi}]$ 는 (8)식에서 $\dot{\phi}_b$ 에 해당되는 열들을 추출함으로써 얻어진다. 따라서, 공통의 물체에 대한 순방향 기구학은 1차 IKIC를 하나의 개회로 직렬 체인에 접속함으로써 다음과 같이 최종적으로 얻어진다.

$$\dot{u} = [{}_rJ], \dot{\phi} = [{}_rG \ddot{\phi}] \dot{\phi}_a. \quad (12)$$

여기서

$$[{}_rG \ddot{\phi}] = [{}_rJ] [{}_rG \ddot{\phi}]. \quad (13)$$

본장에서 소개한 기구학 방법론은 이중 암 뿐만 아니라, 일반적인 다중 로봇에게도 적용될 수 있다.

IV. 이중 암의 컴플라이언스 모델링

본절에서는 이중 암에 대한 일반적인 컴플라이언스 모델이 유도된다. 일반적인 방법으로 폐쇄체인 매니퓰레이터 시스템의 동력학은 최소 좌표계 셋으로 나타낼 수 있다. 따라서, 독립 관절셋에 대한 시스템의 관성부하(effective inertial load) T_a^* 는 시스템의 부하 (T_a 와 T_b), 외부에서 가해진 힘(T_a^e), 그리고 중력(T_g^a)과 관련되어 다음과 같이 나타내어진다.

$$T_a^* = [G \ddot{\phi}]^T T_a - [G \ddot{\phi}]^T T_b^e + [G \ddot{\phi}]^T T_g^a. \quad (14)$$

여기서

$$T_a = \begin{bmatrix} T_{a1} \\ T_{a2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

$$T_b^e = [G \ddot{\phi}]^T T_b^e. \quad (16)$$

$$T_g^a = [({}_1T_g^a)^T ({}_2T_g^a)^T]^T. \quad (17)$$

$$T_g^b = [({}_1T_g^b)^T ({}_2T_g^b)^T]^T. \quad (18)$$

그리고

$${}_rT_g^e = \sum_{i=1}^{M_i} [{}_iG \ddot{\phi}]^T {}_iF_G, \quad r=1,2. \quad (19)$$

독립 관절 셋에 대한 관성부하와 중력부하는 개회로 체인들의 동력학이 가상일에 기초한 전달방법(virtual work-based transfer method)을 적용하여 얻어진다^[23]. T_a 와 T_b 는 각각 독립, 종속 관절에서의 부하, T_a 는 전체 관절에서의 부하, 그리고 T_b^e 은 엔드-이펙터에 가해진 부하를 나타낸다. 또한, ${}_iF_G$ 는 r 번째 체인의 i 번째 링크의 질량 중심에 가해진 중력 부하이므로, ${}_rT_g^a$ 와 ${}_rT_g^b$ 는 r 번째 체인에서의 관성 부하와 중력을 나타낸다. 매트릭스 $[{}_iG \ddot{\phi}]$ 는 r 번째 체인의 i 번째 링크의 질량 중심을 r 번째 체인의 입력에 관계짓는 자코비안이다.

이제, 시스템이 평형상태에 있다고 가정하자, 이를 위해 독립 관절에 대한 부하는 0이어야만 한다.

즉,

$$T_a^* = [G \ddot{\phi}]^T T_a - [G \ddot{\phi}]^T T_b^e + [G \ddot{\phi}]^T T_g^a = 0. \quad (20)$$

여기서, 최소 액추에이터만이 구동된다고 가정하면, 구동되는 관절과 외부에서 시스템에 가해진 힘들과의 정

적인 힘 관계식은 다음과 같다.

$$T_a = [G_a^T]^T T_a^L - [G_a^T]^T T_a^G. \quad (21)$$

(21)식의 선형화된 형태는 다음과 같이 구해지며

$$\delta T_a = [G_a^T]^T \delta T_a^L + \left[\frac{\partial [G_a^T]^T}{\partial \phi_a} \delta \phi_a \right]^T T_a^L - [G_a^T]^T \delta T_a^G - \left[\frac{\partial [G_a^T]^T}{\partial \phi_a} \delta \phi_a \right]^T T_a^G. \quad (22)$$

시스템에 외란이 가해질 때, 결과적인 상태는 시스템의 독립 관절에 대한 스프링 효과로 모델될 수 있다. 그래서 시스템의 강성 방정식은 (22)식의 양쪽항을 ϕ_a 에 대해 미분함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$[K_{aa}] = -\frac{\partial T_a}{\partial \phi_a} = [G_a^T]^T [K_{aa}] [G_a^T] - \frac{\partial [G_a^T]^T}{\partial \phi_a} T_a^L - [G_a^T]^T [V] [G_a^T] + \frac{\partial [G_a^T]^T}{\partial \phi_a} T_a^G. \quad (23)$$

윗 식에서는 다음의 관계식이 활용된다.

$$\delta T_a = -[K_{aa}] \delta \phi_a. \quad (24)$$

$$\delta T_a^L = -[K_{aa}] \delta u. \quad (25)$$

그리고

$$\delta T_a^G = -[V] \delta \phi. \quad (26)$$

여기서 $[V]$ 는 $M_i \times M_i$ 블록의 주 행렬이고, 각 블록 주 행렬 요소는 다음식과 같다.

$$[V_{ij}] = \sum_{r=1}^{M_i} \frac{\partial [{}^i G_{aj}^T]}{\partial \phi_r} ({}^i F_{Cr}) \quad r=1,2. \quad (27)$$

두번째 항과 (23)식 우변의 세번째, 네번째 항은 외부에서 가해진 부하와 중력 부하로 인한 추가의 강성효과를 나타낸다. 반면에 최소 입력에 기초를 둔 컴플라이언스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[C_{aa}] = [K_{aa}]^{-1}. \quad (28)$$

전체 구동(full actuation)의 경우에, 최소 액츄에이터의 부하는 (29)식으로 표현되며

$$T_a = [G_a^T]^T T_a. \quad (29)$$

이식의 미분 관계식은 다음과 같다.

$$\delta T_a = [G_a^T]^T \delta T_a. \quad (30)$$

미소한 움직임의 경우 (9)식의 등가 미분 관계식은 아

래와 같으며

$$\delta \phi = [G_a^T] \delta \phi_a. \quad (31)$$

여기서 $\delta \phi$ 와 $\delta \phi_a$ 는 다음 관계에 의해 나타낼 수 있다.

$$\delta \phi = -[C_{aa}] \delta T_a. \quad (32)$$

$$\delta \phi_a = -[C_{aa}] \delta T_a. \quad (33)$$

(30)식을 (33)식에 대입하고 식(32)와 식(33)을 다시 (31)에 대입하면, 아래 (34)식과 같이 전체 액츄에이터(total actuator)와 최소 액츄에이터(minimum actuator) 사이의 컴플라이언스 관계가 구해진다.

$$[C_{aa}] = [G_a^T] [C_{aa}] [G_a^T]^T. \quad (34)$$

일반적으로 현재 산업용 매니플레이터들은 위치 제어 장치이므로 작은 위치 에러에도 큰 힘 에러를 유발시킨다. 그래서, 힘 제어될 양을 위치로 보상하여 힘 에러를 없애는 컴플라이언스 제어방법이 적용되어 왔다. 그러나, 환경강성은 (23)식에서 보여지는 것과 같이 외부에서 가해진 힘(externally applied force), 중력(gravity load)과 관절부하(joint load)에 비해 매우 크기 때문에(i.e., 50,000 N/m 이상) (34)식을 (35)식처럼 단순화 할 수 있다.

$$[C_{aa}] = [G_a^T] [G_a^T]^{-1} [K_{aa}]^{-1} [G_a^T]^{-T} [G_a^T]^T. \quad (35)$$

대부분의 실제적인 응용 중에서, 환경강성의 정확한 크기는 미리 알 수 없다. 그래서, 알지 못하는 또는 변화하는 환경강성의 크기를 추정하기 위해서, 많은 연구자들이 로봇 다이내믹스나 적응 알고리즘(adaptation algorithm)으로 강성값을 알아내기 위한 여러가지 방법을 제안하였다^[12,13].

V. 단일화된 컴플라이언스 제어 알고리즘

결과를 비교하기 위하여, 이중 로봇 시스템의 제어를 위한 마스터/슬레이브 알고리즘이 간단히 설명된다. 그림 2는 마스터/슬레이브 형태를 적용하는 컴플라이언스 협조제어의 시스템 블록선도를 나타낸다. 두 로봇이 공통된 대상을 잡고 협조작업을 할때, 마스터 로봇은 미리 정의된 경로를 정확하게 추적하고, 슬레이브 로봇은 기구학적 관계를 이용하여 마스터 로봇의 움직임을

추적한다. 이와같이 움직이는 동안에 마스터 로봇은 힘/토크 센서로부터 측정된 힘 데이터를 사용하여 경로를 수정한다. 마스터/슬레이브 방법의 한 단점은 힘 추적(force tracking)에 있어서의 시간 지연이다. 왜냐하면 원하는 지점의 힘 정보가 단지 마스터를 위해서만 사용되기 때문이다. 또한, 이러한 형태는 실질적으로 이중 로봇간의 힘 분배를 할 수 없다. 왜냐하면, 오직 한 대의 팔만이 상호작용하는 힘을 측정하고 또 다른 팔은 단지 기구학적 관계를 만족시키는 방향으로 따라가기 때문이다. 결론적으로, 우리는 이러한 형태로 부터 두 팔을 이용하는 장점을 얻을 수 없다.

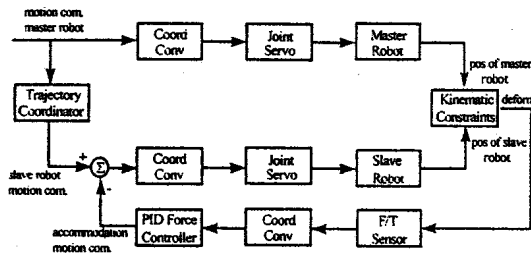


그림 2. 마스터/슬레이브 제어구조를 위한 블록선도
Fig. 2. Block diagram for master/slave control scheme.

마스터/슬레이브 구조로 부터 야기되는 단점을 극복하기 위해, 각각의 양 손목에 힘/토크 센서가 달린 이중압을 이용한 대칭 제어 알고리즘(symmetric control algorithm)이 Uchiyama등^{10,20}에 의해 제안되었다. 그러나, 대칭 제어 알고리즘은 같은 기구학 구조를 갖는 동종 로봇의 경우에 대해서만 적용될 수 있다. 비대칭 기구학 구조를 갖는 이중압에 대해서는 그들의 힘제어 알고리즘은 수정되어야 할 필요가 있다. 또 다른면에서 살펴보면, 임의의 관절 액츄에이터에 고장이 발생할 경우, 이중압과 같이 폐쇄체인을 형성하고 있는 응용에서는 동작하지 않는 액츄에이터들은 시스템의 mobility를 잃지 않도록 자유로운(free) 상태로 해주어야만 한다. 또한, 이러한 경우는 동종 압이라 할지라도 구동측면(actuation level)에서 비대칭을 형성한다. 이전의 대칭제어 방법은 이러한 문제를 다룰 수 없다. 따라서 시스템의 기구학 구조와 액츄에이터 수에 관계없이 단일화 된 힘 제어 알고리즘이 필요하다. 제안된 컴플라이언스 제어방식의 주목할 만한 장점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 이중압 로봇이 한팔 로봇으로 간주될 수 있다.

- 기구학 구조와 두 로봇의 액츄에이터 숫자에 무관하게 적용할 수 있다.
- 최소의 액츄에이터에 의한 동작을 할 수 있다.
- 선택된 액츄에이터에 의한 동작이 가능하다.

제안된 힘제어 알고리즘은 다음과 같다. 그림 3은 제안된 제어기의 블럭선도를 나타낸다. 우선, 힘오차 δF 에 대해 최소 입력에서의 부하(δT_e)는 다음과 같이 계산되고,

$$\delta T_e = [G_e^*]^T \delta F, \quad (36)$$

모든 입력에 대한 부하(δT_e)는 최소 입력과 모든 입력 사이의 관계로 부터 계산된다. 여기서 선형 또는 비선형 제어기의 적용으로 힘 오차 보상을 해줄 수 있다. 식(30)의 일반 해는 다음과 같이 구해지고

$$\delta T_e = ([G_e^*])^+ \delta T_e + (I - ([G_e^*])^+ [G_e^*]) \epsilon, \quad (37)$$

여기서 $([G_e^*])^+$ 는 $[G_e^*]^T$ 의 의사 역행렬(pseudo-inverse) 해이고, 첫째, 둘째 항은 각각 최소 norm 해(minimum norm solution)와 내력(internal load)을 나타낸다. 또한 만약, 임의의 갯수의 액츄에이터만 동작할 때에는 $[G_e^*]^T$ 로부터 구동에 해당되는 열들만 추출하여 $[G_e^*]^T$ 를 재구성한다.

이제 식(35)의 컴플라이언스 관계에 따라, 관절각 들은 힘 오차가 제거될 수 있도록 제어된다. 단순한 PID 힘 제어가 힘 오차를 보상하고 좋은 힘 응답을 위하여 사용된다. 여기에 필터 다이내믹스가 포함되는데 이것은 위치 명령이 주어진 후의 로봇의 움직임에 대한 지연된 성질을 나타낸다. Exponential 필터와 위치 서보 다이내믹스(position servo dynamics)는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$G_e(s) = \frac{\delta q_d(s)}{\delta q(s)} = \frac{6.5}{s+6.5}, \quad (38)$$

$$G_p(s) = \frac{\delta q_a(s)}{\delta q_d(s)} = \frac{555,000(s+50)}{s^3 + 550s^2 + 333,000s + 2,775,000}. \quad (39)$$

그러나 높은 기어비를 가진 산업용 매니플레이터의 경우에는 매니플레이터 다이내믹스가 무시되고 단지 필터 다이내믹스만 고려된다.

이중압과 환경에 대해 상호 느끼는 힘과 모멘트는 각각의 로봇 팔 손목에 부착된 두 개의 힘/토크 센서를 이용하여 측정할 수 있고 잡은 대상물의 질량은 무시

할 수 있는 정도로 작다고 가정한다.

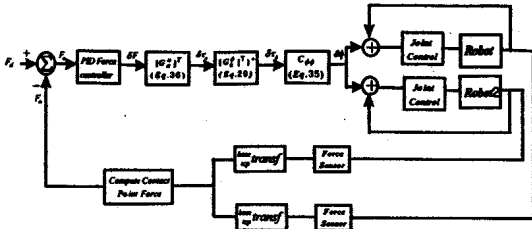


그림 3. 제안된 컴플라이언스 제어방식의 블록선도
Fig. 3. Block diagram of the proposed compliant control scheme.

이때, 측정된 힘/토크 벡터와 작업 환경과의 상호 작용하는 힘/토크 벡터 사이의 관계는 그림 4로부터 유도되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ S_1 & I & S_2 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ N_1 \\ F_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

여기서 행렬 S_i 는 i 번째 로봇의 힘 벡터 F_i 와 환경으로부터 미치는 모멘트 N 사이의 관계를 나타낸다.

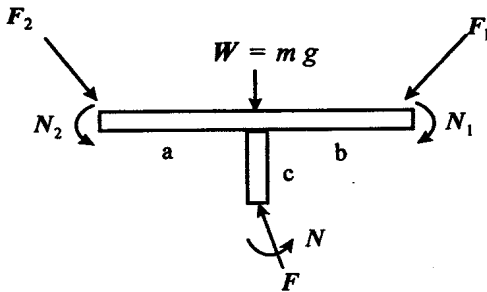


그림 4. 대상 물체의 표현
Fig. 4. Description of the grasped object.

VI. 실험 결과

실험은 각각 로봇 양 끝에 힘 센서가 장착된 수평 다관절 로봇(SCARA)과 5축의 산업용 수직 다관절 로봇(PT200V)으로 수행하였다. 제안한 알고리즘은 C언어로 작성하였고, 그림 5와 같이 두 장의 32비트 마이크로 프로세서 보드(FORCE30^[22])를 사용한 다중 로봇 제어기^[7]를 이용하여 검증하였다. 우리가 제안한 컴플라이언스 제어를 위한 실험장치는 그림 6과 같다. 두 로봇으로 구성된 두 대의 로봇 암은 비대칭 구조를

갖고 있다. 각 로봇에 대한 기구학적 파라미터는(kinematic parameter)는 표 1과 표 2에 나타내었고, 표 3은 이중 로봇 시스템의 초기자세를 나타내고 있다.

표 1. PT200V 로봇의 기구학 파라미터
Table 1. Kinematic parameters of PT200V robot.

Parameter Joint	Link Length a_i	Twist Angle α_i	Offset d_i	Rotation Angle θ_i
1	0 m	90°	0.4 m	θ_1
2	0 m	0°	0 m	θ_2
3	0.25 m	0°	0 m	θ_3
4	0.25 m	90°	0 m	θ_4
5	0 m	0°	0.065 m	θ_5

표 2. SCARA 로봇의 기구학 파라미터
Table 2. Kinematic parameters of SCARA robot.

Parameter Joint	Link Length a_i	Twist Angle α_i	Offset d_i	Rotation Angle θ_i
1	0 m	0°	0 m	θ_1
2	0.367 m	0°	0 m	θ_2
3	0.233 m	0°	d_3 m	0
4	0 m	0°	0 m	θ_4

표 3. 두 대 로봇 시스템의 초기자세
Table 3. Initial configuration of dual arm system.

Robot	PT200V Robot	SCARA Robot
Initial Angle		
θ_1	-9.21°	58.9°
θ_2	20.75	85.46°
θ_3 or d_3	34.89°	0.17 m
θ_4	24.4°	-54.39°
θ_5	9.21°	-

샘플링 시간은 120msec이며, 그동안 힘 센서로부터 다중 로봇 제어기로의 데이터 전송이 일어나고 센서 데이터를 근거로 하여 제어 알고리즘이 수행된다. 제안된 제어 알고리즘의 타당성을 보이기 위하여, 단일화된 컴플라이언스 제어 알고리즘의 수행 능력을 마스터/슬레이브 구조를 갖는 두 로봇 알고리즘과 실험적으로 비교하였다.

비 대칭구조를 갖는 이중 로봇과 환경 사이에 상호 작용하는 힘(interaction force)을 제어하기 위한 실험이 수행되었다. Z축의 (-)방향으로 원하는 힘(10N)에

대해 마스터/슬레이브 형태(DAMS : dual arms employing the master/slave scheme)의 이중 로봇과 제안된 형태(DAPS : dual arms employing the proposed scheme)의 이중 로봇에 대한 힘 응답은 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

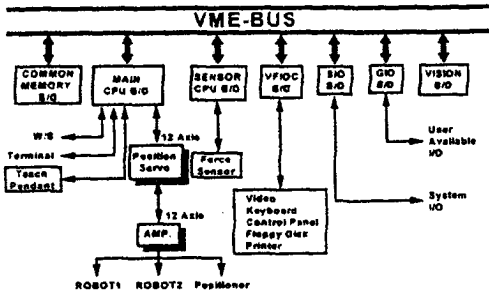


그림 5. 다중 로봇 제어시스템의 하드웨어 구조
Fig. 5. Hardware architecture of the multi-robot controller.

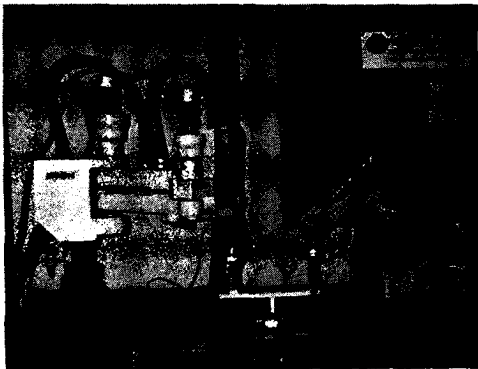


그림 6. 힘 제어 실험을 위한 실험 환경
Fig. 6. Experimental set-up for force control experiment.

DAMS의 상승시간은 DAPS보다 더 길고 DAMS에서 슬레이브 암의 힘 응답은 초기 진동이 심하며 5N에 매우 느리게 수렴하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 슬레이브 암의 정확한 힘 제어 대신에 순전히 기구학적 제어방법을 사용하여 발생하는 시간지연에 기인된다.

한편, 제안된 컴플라이언스 제어방법은 빠른 상승시간과 양 암에 균등한 힘분배가 이루어지고 있음을 보여주고 있다. 따라서 이중 암을 이용하여 원하는 힘을 제어하는데 있어서, 제안된 컴플라이언스 제어 알고리즘은 마스터/슬레이브 방식보다 우수한 성능을 지닐 수 있다.

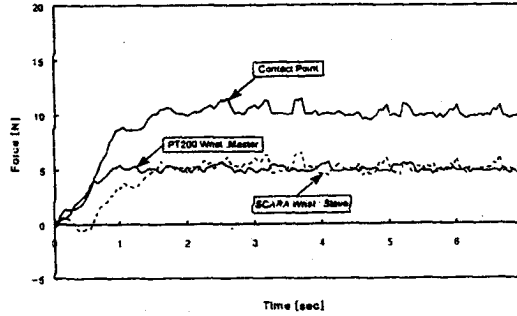


그림 7. 마스터/슬레이브 제어구조를 갖는 이중 로봇의 힘 응답
Fig. 7. Force response for dual arms employing master/slave scheme.

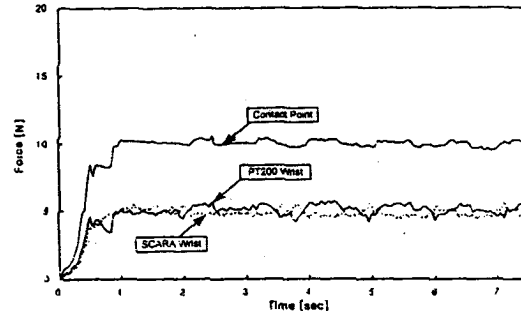


그림 8. 단일화된 컴플라이언스 제어 구조를 갖는 이중 로봇의 힘 응답
Fig. 8. Force response for dual arms employing unified compliance control scheme.

대체로 긴 상승시간이 힘 응답 곡선에서 보여지는데, 이는 계산량에 따른 샘플링 시간이 길기 때문이다. 따라서 CPU의 성능을 개선하면 (보다 빠른 CPU 또는 병렬처리 방식으로 샘플링 시간을 짧게 하면) 더 빠른 응답을 얻을 수 있을 것이다.

우리가 제안한 단일화된 컴플라이언스 협조 제어방법에 의한 정확한 힘 제어는 특히, 하이브리드 위치/힘 제어에서와 같이 경로를 따른 연속적인 힘 제어(force regulation)가 요구되어질 때 유용하게 쓰일 수 있다.

VII. 결 론

비대칭의 기구학 구조를 갖는 이중 로봇의 정확한 힘 제어를 위해, 단일화된 힘 제어 알고리즘이 제안되었다. 우리가 제안한 방법의 주된 개념은 이중 로봇이

한대의 로봇으로 고려될 수 있다는 것이다. 즉, 이중 로봇은 협조적인 방법보다는 오히려 단일화된 방식으로 동작되도록 제어된다. 제안한 방법의 두드러진 장점은 다음과 같다. (1) 두팔의 기구학적 구조나 액츄에이터의 개수에 관계없이 적용될 수 있다. (2) 최소 액츄에이터에 의해 제어될 수 있다. (3) 구동 액츄에이터를 선택할 수 있다. 이러한 장점을 얻기 위하여, 일반적인 이중 로봇에 대한 기구학/컴플라이언스 모델을 소개하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," *IEEE Trans. Syst., Man, Cyber.*, Vol. SMC-11, pp. 418-432, June 1981.
- [2] M. W. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," *Int. J. of Dynamic System Measurement Control*, Vol. 102, pp. 120-133, 1981.
- [3] N. Hogan, "Impedance Control ; an Approach to Manipulation," *Part I, Part II and Part III. Int. J. of Dynamic System Measurement Control*, Vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [4] W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance Control with Adaptation for Robotic Manipulation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*. Vol. 7, No. 3, pp. 308-415, 1991.
- [5] E. Slotine, "Performance in Adaptive Manipulator Control," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 10, No. 2, pp. 149-161, 1991.
- [6] I. H. Suh, K. S. Eom, H. J. Yeo, and S.-R. Oh, "Fuzzy Adaptation Force Control of Industrial Robot Manipulators with Position Servos," *Int. J. of Mechatronics*, Vol. 5, No. 8, pp. 899-918, 1995.
- [7] I. H. Suh, H. J. Yeo, T. W. Kim, and S.-R. Oh, "A Control System for Multiple-Robot Manipulators ; Design and Implementation," *Proc. of the 5th ISRAM*, Vol. 5. pp. 279-285, 1994.
- [8] X. Cui, K. G. Shin, "Direct Control and Coordination Using Neural Networks," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, May 1993.
- [9] J. M. Tao, J. Y. S. Luh, and Y. F. Zheng, "Compliant Coordination Control of Two Moving Industrial Robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 3, pp. 322-330, June 1990.
- [10] M. Uchiyama, et al., "Adaptive Load Sharing for Hybrid Controlled Two Cooperative Manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Sacramento, California, pp. 986-991, April 1991.
- [11] B. J. Yi and R. A. Freeman, "Geometric Analysis of Antagonistic Stiffness in Redundantly Actuated Parallel Mechanisms," *Int. J. of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 581-603, 1993.
- [12] M. Pelletier and L. K. Daneshmend, "An Adaptive Compliance Motion Controller for Robot Manipulators Based on Damping Control," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Ohio, pp. 1060-1065, May 1990.
- [13] H. Seraji, "Adaptive Admittance Control : an Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Diego, CA, pp. 2705-2712, May 1994.
- [14] T. Yoshikawa and X. Z. Zheng, "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 219-230, June 1993.
- [15] C. A. Derventzis and E. J. Davison, "Robust Motion/Force Control of Cooperative Multi-Arm Systems," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, O.K. France, pp. 2230-2337, May, 1992.
- [16] Y. R. Hu, A. A. Goldenberg, and C. Zhou, "Motion and Force Control of Coordinated Robots During Constrained Motion Tasks," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 351-365, August 1995.

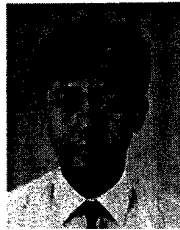
- [17] K. Kosuge, et al., "Control of Single-Master Multi-Slave Manipulator System Using VIM," *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1172-1177, 1990.
- [18] K. Kosuge, et al., "Decentralized Control of Robots for Dynamic Coordination," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 76-81, 1995.
- [19] I. H. Suh, et al., "Fuzzy Rule Based Position/Force Control of Industrial Manipulators," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, pp. 1617-1622, November 1991.
- [20] M. Uchiyama and P. Dauchez, "A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two Robots," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, pp. 350-356, April 1988.
- [21] Y. F. Zheng and J. Y. S. Luh, "Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, pp. 344-349, April 1988.
- [22] CPU-30 Users Manual, Force Computers, Inc., Germany, 1991.
- [23] H. J. Kang, B. J. Yi, W. Cho, and R. A. Freeman, "Constraint Embedding Approaches for General Closed-Chain System Dynamics in Terms of a Minimum Coordinate Set," *Proc. of the 1990 ASME 21st Mechanism Conf.* Chicago, IL, DE-Vol. 24, pp. 125-132, Sept. 1990.

— 저 자 소 개 —



呂熙珠(正會員)

1965년 5월 2일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 한양대 대학원 전자공학과 박사과정



徐一弘(正會員)

1977년 서울대 졸업. 1982년 한국과학기술원 졸업(공학박사). 1982년 ~ 1985년 대우중공업 기술연구소 근무. 1987년 ~ 1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대 공학대 전자공학과 교수