

< 논문 >

건설로봇용 인간-로봇 협업 제어

이승열[†] · 이계영* · 이상헌* · 한창수**
 (2006년 5월 29일 접수, 2007년 2월 15일 심사완료)

Human-Robot Cooperative Control for Construction Robot

Seung Yeol Lee, Kye Young Lee, Sang Heon Lee and Chang Soo Han

Key Words : Construction Robot(건설로봇), Human-Robot Cooperation(인간-로봇 협업), Heavy Construction Materials(대형 건설자재), Impedance Control(임피던스 제어), Power Assist Ratio(힘 증폭비)

Abstract

Previously, ASCI(Automation System for Curtain-wall Installation) which combined with a multi-DOF manipulator to a mini-excavator was developed and applied on construction site. As result, the operation by one operator and more intuitive operation method are proposed to improve ASCI's operation method which need one person with a remote joystick and another operating an excavator. The human-robot cooperative system can cope with various and untypical constructing environment through the real-time interacting with a human, robot and constructing environment simultaneously. The physical power of a robot system helps a human to handle heavy construction materials with relatively scaled-down load. Also, a human can feel and response the force reflected from robot end effector acting with working environment. This paper presents the feasibility study regarding the application of the proposed human-robot cooperation control for construction robot through experiments on a 2DOF manipulator.

————— 기호설명 —————

- F_h : 작업자가 로봇시스템에 가하는 힘
- F_e : 외부환경이 로봇시스템에 가하는 힘
- M_r : 가상 중량물을 포함한 로봇시스템의 관성행렬
($n \times n$ positive definite diagonal inertia matrices)
- B_r : 가상 중량물을 포함한 로봇시스템의 댐핑계수
($n \times n$ positive definite diagonal damping matrices)
- P_e : 실제 로봇시스템의 운동 궤적(위치 및 방위)
- P_d : 목표 동특성에 의해 생성된 로봇시스템의 운동 기준값(위치 및 방위)
- P_e : 컴플라이언스를 가지는 로봇시스템의 운동 기준값(위치 및 방위)
- M_e : 가상 중량물을 포함한 로봇시스템의 관성행렬
($M_r = M_e$)

- B_e : 접촉 시 외부환경의 댐핑행렬
- K_e : 접촉 시 외부환경의 강성행렬
($n \times n$ positive definite diagonal stiffness matrices)
- λ : 힘증폭비 = $\frac{\text{중량물에 가해지는 힘}}{\text{작업자가 중량물에 가하는 힘}}$

1. 서론

‘건설 자동화 시스템 및 로봇(Automation System and Robotics in Construction)’의 활용은 오래 전부터 안전성, 생산성, 품질, 작업 환경의 향상에 대한 명백한 해답으로써 거론되었다.^(1,2) 첫 번째 건설로봇은 1983년 일본에서 금속표면에 방화물질을 살포하기 위해 개발되었다. 그 후 다양한 건설로봇들이 개발되어 건설현장에 적용되었다. Gambao⁽³⁾는 블록 공사의 시간과 수고를 덜어줄 로봇 시스템을 개발하였다. Choi⁽⁴⁾는 공압 액츄에이터와 서보 모터를 사용한 하이브리드 타입의 건설 로봇을 제안하였다. 하이브리드 타입의 로봇은 유리창이나 패널을 설치하는 데 사용

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : supras@paran.com

TEL : (031)400-4062 FAX : (031)406-6398

* 삼성물산 건설부문 기술연구소

** 회원, 한양대학교 기계공학과

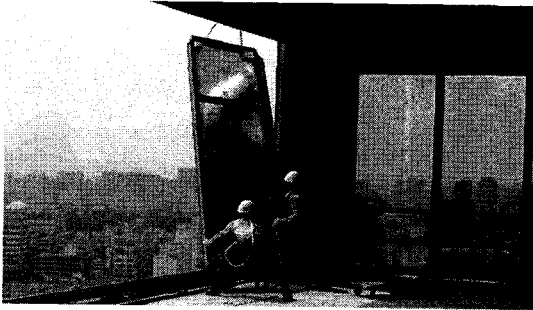


Fig. 1 Installation by human labor

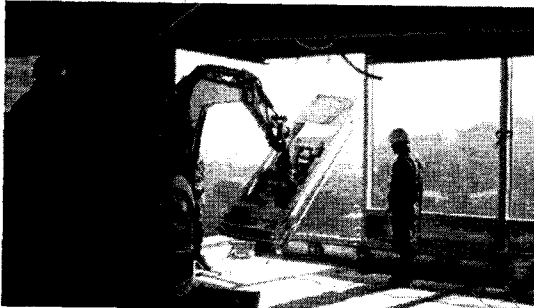


Fig. 2 A mini-excavator with attachment

된다. Ostoja-Starzewski⁽⁵⁾는 건설 관련 작업을 위해 적응성과 생산성을 향상시킨 마스터-슬레이브 포스 피드백 유압 매니플레이터를 개발하였다. Santos⁽⁶⁾는 공장에서 제작된 플라스틱(plaster)를 실내에서 설치할 때 작업자를 도와줄 수 있는 매니플레이터를 소개하였다. Skibniewski⁽⁷⁾는 건축물 자동화 시공 시스템에서 건축자재를 관리하고 취급하기 위해 자동화된 자재 핸들링 시스템의 개념을 설명하였다. Isao⁽⁸⁾는 커튼월(curtain wall) 설치를 위한 자동화 기술의 타당성에 대해 언급하였다.

최근 건축 구조물의 추세가 대형화 및 고층화로 변함에 따라 새로운 건축 자재에 관한 연구·개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 건물의 단열성, 수밀성 및 미관을 담당하는 외벽 커튼월은 건축 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. 하지만 커튼월 시공 작업에 적합한 건설 장비의 부재로 Fig. 1 처럼 기본적인 양중 장비와 다수의 인력에 의존하여 복잡하고 위험한 작업으로 커튼월 시공이 이루어지고 있다.

이 문제를 해결하기 위해 소형 굴삭기와 흡착장치를 결합한 기계화 시공이 Fig. 2와 같이 시도되어 작업환경이 다소 개선되었으나 커튼월 시공이 목적이 아닌 장비를 활용함으로써 정밀시공이 어렵고 장비 운용상에 많은 어려움이 있다. 따라서 기계화 시공에 적합한 자동화 장비(ASCI, Automa-

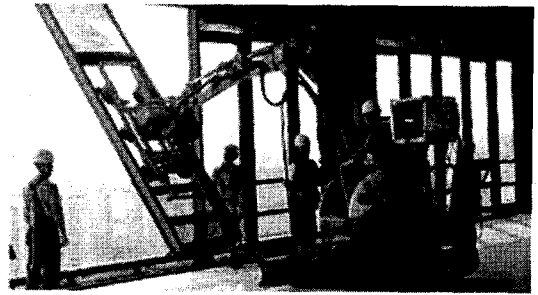


Fig. 3 ASCI(Automation System for Curtain wall Installation)

tion System for Curtain wall Installation)가 Fig. 3과 같이 개발되어 기존의 시공법에 비해 보 다 간단하고 정밀한 설치작업이 이루어졌으며 무엇보다도 작업 상의 안전성을 향상시켰다.⁽⁹⁾

하지만 ASCI 를 활용한 시공 사례를 통해서 몇 가지 개선점이 도출되었다. 건설현장은 일반 제조업 자동화 라인과 비교하여 정형화 되어 있지 않은 공정으로 이루어져 있어서 동일한 패턴의 작업이 반복되는 경우는 거의 없다. 따라서, 다음과 같은 개선사항들이 필요하다.

- 비정형화된 현장에서 다양한 작업에 따른 조 작자의 의도를 추종할 수 있는 로봇
- 작업자와 작업공간을 공유하는 로봇
- 작업자의 힘과 더불어 로봇에 의해 증폭된 작업력의 공조
- 작업자의 숙련도를 반영할 수 있는 직감적인 조작 방식

이러한 요구사항을 충족시키기 위한 해결책 중의 하나가 인간-로봇 협업(HRC; Human-Robot Cooperation)⁽¹⁰⁻¹²⁾ 기술이다. 인간-로봇 협업에 관한 연구는 오늘날까지 끊임없이 수행되어 왔다. 1960년대 미국 국방성에서는 군인에게 중량물을 들고 운송하는 능력을 증가시켜 주는 'suit of armor'가 개발되었다.⁽¹³⁾ 인간의 힘을 증폭시켜 주는 마스터-슬레이브 시스템에 대한 연구는 1966~1971년에 등장한 GE사의 'Hardiman'까지 이어진다.⁽¹⁴⁾ 이후 Kazerooni⁽¹⁵⁻¹⁷⁾는 마스터-슬레이브 시스템과 달리 접촉 힘에 의해 조작자의 힘과 정보가 동시에 전달이 되는 'Extender'를 제안하였다. 특히 이 논문에서는 인간의 팔, extender, 주변 환경으로 나뉘 각각의 임피던스를 이용하여 모델링 하고 조작자의 힘과 매니플레이터의 힘 사이의 컨트롤러를 제안한 것이 특징이다. Kosuge⁽¹⁸⁾는 기동성과 힘 증폭 파라미터를 도입하여 인간-로봇 협업을 위한 제어 알고리즘을 제안하였다.

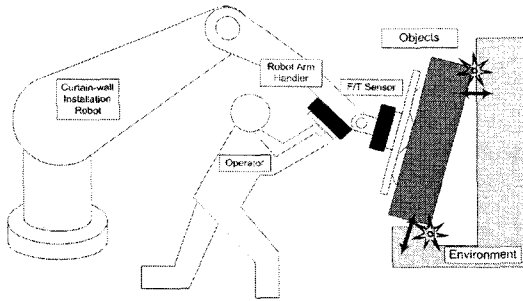


Fig. 4 Human-robot cooperation

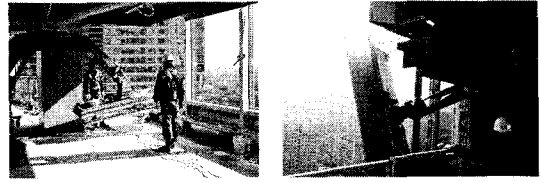
그리고 제한된 환경상에서 인간과 로봇의 협업을 구현하기 위해 Hogan⁽¹⁹⁾에 의해 제안된 임피던스 제어기법이 적용된다.

본 논문에서는 Fig. 4 와 같이 작업자와 로봇이 협업하여 무거운 건설자재를 설치하기 위한 로봇 제어 기술이 설명된다. 특히 작업자의 외력 및 로봇과 환경과의 상호작용을 통해 발생된 접촉력을 고려한 로봇 제어가 설계된다. 즉, 작업자의 외력을 일정한 증폭비로 증폭시켜 마치 작업자가 직접 중량물을 핸들링 하는 것과 같은 작업 형태를 구현한다. 또한, 작업자의 작업자가 작업 중에 외부 환경으로부터 중량물에 전해지는 반력을 느끼도록 함으로써 작업자가 보다 직감적인 작업 수행이 가능하도록 한다.

제안된 제어 기법을 구현하기 위한 연구 내용은 다음과 같다. 우선 인간-로봇-환경의 상호관계는 목표 동특성을 이용하여 모델링하였다. 인간-로봇 협업을 위해 인간-로봇-환경 모델링을 바탕으로 주위환경과 접촉이 일어나는 경우(제한 조건)와 그렇지 않는 경우(비제한 조건)의 각각에 대해 고려된 임피던스제어기가 설계되었다. 그리고, 중량물이 환경과의 접촉 상태가 아닌 경우의 위치 추종성을 높이기 위해 임피던스 제어기 내부에 모션 제어기가 포함되었다. 끝으로 2 자유도 실험시스템을 통해 임피던스 모델의 주요 파라미터가 협업 시스템의 성능에 미치는 영향들을 살펴 보았다.

2. 인간-로봇 협업 시스템의 모델링

인간-로봇 협업을 통한 중량물 핸들링 작업은 Fig. 5 와 같이 주위 환경과 접촉이 일어나는 경우와 일어나지 않는 경우로 나눌 수 있다. 주위 환경과 접촉이 일어나는 동안은 그 환경이 동적 제한(dynamic constraint)이 되어 작업자에게 영향을 미친다. 이런 제한적인 현상들은 제어적인 행동을 통해 보통 피하는 경향이 있지만 몇몇 현상들은 작업자를 포함한 주위 환경으로부터 받아들이는



(a) Unconstrained condition (b) Constrained condition

Fig. 5 Heavy material handling with HRC

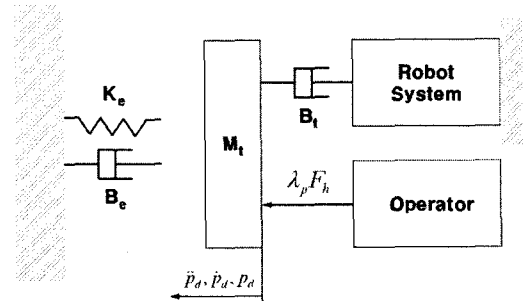


Fig. 6 Unconstrained condition

Table 1 Input & output in the unconstrained condition

	Operator	Environment
Input	$F_h(T_h)$	-
Output	$\ddot{p}_d, \dot{p}_d, p_d(\ddot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_d, \varphi_d)$	-

외력에 대한 ‘가상 시스템 거동’으로 볼 수 있다. 특히 외력과 외력방향으로의 운동간에 발생하는 역학적 관계를 ‘임피던스’라 하고 그 원하는 목표를 ‘목표 동특성’이라고 정의한다.

작업자의 외력은 매니플레이터의 마지막 링크에 부착된 ‘작업자 센서’에 의해 측정되고, 주위 환경으로부터의 접촉력은 매니플레이터의 마지막 링크와 엔드이펙터 사이에 위치한 ‘주위환경 센서’를 통해 측정된다.

2.1 비제한 조건

작업자가 장애물이 없는 공간상에서 중량물을 핸들링 하는 경우를 비제한 조건상의 작업이라 정의한다. Fig. 6 에서 작업자 센서를 통해 측정된 힘(모멘트), 즉 작업자와 중량물 사이의 상호작용으로 발생하는 힘(모멘트)을 $F_h(T_h)$ 하고 원하는 동적 거동에 관계된 임피던스 파라미터를 각각 $M_p(M_o)$, $B_p(B_o)$ ($n \times n$ positive definite diagonal inertia and damping matrices)로 두면 $F_h(T_h)$ 를 입력값으로 로봇이 원하는 동적 거동을 식 (1)과 같이 임피던스 관계식으로 나타낼 수 있다. 여기서 아래 첨자 ‘p’는 위치를 의미하고 ‘o’는 방위를 나타낸다. 그리고 λ 는 작업자의 외력 증폭비를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 M_{pt}\ddot{p}_d + B_{pt}\dot{p}_d &= \lambda_p F_h \\
 M_{ot}\ddot{\phi}_d + B_{ot}\dot{\phi}_d &= \lambda_o T^T(\phi_d)T_h \\
 \text{where, } \varphi &= [\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T \\
 T &= \begin{bmatrix} 0 & -s\alpha & c\alpha s\beta \\ 0 & c\alpha & s\alpha s\beta \\ 1 & 0 & c\beta \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

스프링의 특성을 갖는 K(강성행렬) 파라미터는 외력을 가해 중량물을 원하는 위치에 이동시키는 작업에 오히려 방해가 되므로 제외되었다. 임피던스 파라미터를 각각 조절함은 결국 가상의 시스템의 동적 거동을 조절함과 같다. 가상의 시스템에 작업자가 힘을 가했을 때 임피던스 관계식으로부터 발생하는 동적 거동은 로봇 시스템이 중량물을 이동시키기 위해 추종해야 할 기준값으로 사용된다. 비제한 조건 상에서 로봇을 기준으로 작업자와 주위 환경의 모델링에 관한 입·출력을 Table 1 에서 정리하였다. 힘 증폭비를 거친 작업자의 외력이 입력되면 로봇 시스템이 추종해야 할 원하는 동적 거동을 출력하게 된다.

2.2 제한 조건

작업자가 장애물이 없는 공간상에서 중량물을 핸들링 할 경우를 비제한 조건상의 작업이라 정의하면 주변 환경과 상호작용이 일어나면서 작업이 진행되는 경우를 제한 조건상의 작업이라 볼 수 있다. Fig. 7 에서 작업자 센서를 통해 측정된 힘(모멘트)을 $F_h(T_h)$ 라 하고, 주위환경 센서를 통해 측정된 접촉력(모멘트)을 $F_e(T_e)$ 라 한다. 비제한 조건상의 작업과 달리 제한조건상의 작업은 $F_h(T_h)$ 와 $F_e(T_e)$ 를 입력값으로 로봇이 원하는 동적 거동을 식 (2)과 같이 임피던스 관계식으로 나타낼 수 있다. 역시 스프링의 특성을 갖는 K 파라미터는 외력을 가해 중량물을 원하는 위치에 이동시키는 작업에 오히려 방해가 되므로 제외되었다.

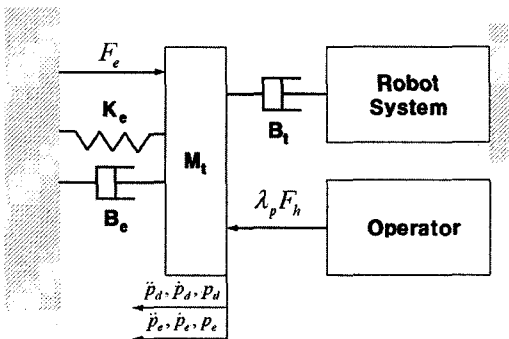


Fig. 7 Constrained condition

$$\begin{aligned}
 M_{pt}\ddot{p}_d + B_{pt}\dot{p}_d &= \lambda_p F_h - F_e \\
 M_{ot}\ddot{\phi}_d + B_{ot}\dot{\phi}_d &= T^T(\phi_d)(\lambda_o T_h - T_e)
 \end{aligned} \tag{2}$$

주위 환경과 상호작용이 일어나는 경우 로봇의 엔드이펙터에서 컴플라이언스가 고려된 거동을 부여해야 한다. 따라서 접촉력(모멘트)와 엔드이펙터의 위치 및 방위 오차 사이의 ‘일반화된 능동 임피던스’를 통한 관계를 식 (3)과 같이 정의하였다. 따라서 접촉력 F_e 를 고려한 병진부분과 등가 접촉 모멘트 $T^T T_e$ 를 고려한 회전부분에 대해 엔드이펙터가 선형적이고 독립된 임피던스 특성을 가질 수 있다. 식에서 $M_{pe}(M_{oe}), B_{pe}(B_{oe}), K_{pe}(K_{oe})$ 는 주위 환경과 상호작용 시 엔드이펙터의 동적 거동을 결정하는 임피던스 파라미터를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 M_{pe}\Delta\ddot{p}_{de} + B_{pe}\Delta\dot{p}_{de} + K_{pe}\Delta p_{de} &= F_e \\
 M_{oe}\Delta\ddot{\phi}_{de} + B_{oe}\Delta\dot{\phi}_{de} + K_{oe}\Delta\phi_{de} &= T^T(\phi_e)T_e \\
 \text{where, } \Delta p_{de} &= p_d - p_e
 \end{aligned} \tag{3}$$

제한 조건 상에서 로봇을 기준으로 작업자와 주위 환경의 모델링에 관한 입·출력을 표 2에서 정리하였다. 힘 증폭비를 거친 작업자의 외력과 주위 환경의 접촉력이 입력되면 로봇 시스템이 추종해야 할 원하는 동적 거동을 출력하게 된다. 식 (3)에서처럼 주위 환경의 접촉력과 임피던스 특성을 통해 로봇 엔드이펙터의 동적 거동이 결정된다. 여기서 발생하는 오차값은 원하는 동적 거동과 실제 엔드이펙터의 동적 거동의 차이를 나타낸다. 즉, 주위 환경과 상호작용이 일어나는 경우 로봇 시스템이 원하는 동적 거동을 실제로 추종하지 못하고 주위 환경과의 순응하는 정도를 나타낸다.

3. 인간-로봇 협업 제어 방안

3.1 임피던스 파라미터 조절

인간-로봇 협업을 통한 중량물 핸들링 작업을 앞서 Fig. 5 에서 주위 환경과 접촉이 일어나는 경우와 일어나지 않는 경우로 분류하였다. Fig. 5 의 각각의 경우를 작업특성의 관점에서 바라보면 전자의 경우는 커튼월을 이미 설치된 커튼월과 상호작용으로 끼워 맞춤이 수행되는 단계로 상대적으로

Table 2 Input & output in the constrained condition

	Operator	Environment
Input	$F_h(T_h)$	$F_e(T_e)$
Output	$\ddot{p}_d, \dot{p}_d, p_d(\ddot{\phi}_d, \dot{\phi}_d, \phi_d)$	$\Delta\ddot{p}_{de}, \Delta\dot{p}_{de}, \Delta p_{de}$ $(\Delta\ddot{\phi}_{de}, \Delta\dot{\phi}_{de}, \Delta\phi_{de})$

로 높은 안정성을 요구하는 작업으로 볼 수 있다. 반면에 후자의 경우는 커튼월을 설치 지점으로 신속히 이동시키는 단계로 상대적으로 높은 기동성을 요구하는 작업으로 볼 수 있다. 인간-로봇 협업 시스템에서 로봇 운용 상에서 중량물이 임피던스 특성을 가질 수 있다. 즉, 높은 안정성을 가지기 위해 중량물은 댐핑 특성을 가지게 된다. 그러나 너무 높은 댐핑 특성은 시스템의 기동성을 떨어뜨린다.

앞에서 언급된 제어방안을 적용하기 위해 로봇엔드 이펙터의 임피던스 파라미터는 작업자의 작업 프로세스에 따라 조절되어야 한다. Fig. 8은 제안된 임피던스 파라미터에 조절에 대한 제어 개념을 나타낸다.

식 (2)의 임피던스 관계식에서 임피던스 파라미터 $M_p(M_\alpha)$, $B_p(B_\alpha)$ 가 작업자에 의해 작업 공정에 따라 안정성을 요구하는 경우와 기동성을 요구하는 경우에 대해 적합한 조합으로 변환된다. 적절한 파라미터 조합은 실험 시스템으로 충분한 시뮬레이션을 통해 결정된다. 또한, 작업자의 연령이나 외력의 크기에 따라 힘 증폭비(λ)는 자유롭게 조절이 가능해야 한다.

3.2 내부 모션 제어기

적합한 임피던스 파라미터의 선정은 주위 환경과 상호작용 시 만족스런 컴플라이언스를 가진 거동을 보장하지만 때로는 비제한 조건상에서 엔드이펙터가 원하는 위치와 방향을 정확히 추종하지 못하는 경우가 있다. 이 문제를 해결하기 위한 해결책은 다음과 같이 임피던스 제어 행동에서 모션 제어기능을 분리하도록 하는 것이다. 모션 제어기능은 기준 위치와 방향을 추종하기 위함이 아니라 왜란의 영향을 배제하기 위해 고의적으로 만들어진 강성기능으로 볼 수 있다. 기준 위치와 방향 추종 특성은 임피던스 제어 동작을 통해 구현된다. 즉, 원하는 위치와 방향값, 그리고 센서를 통해 측정된 접촉력과 모멘트가 임피던스 식에 입력되면 모션 제어 기능을 위한 기준값으로 사용될 위치와 방향을 출력한다.

위의 해결책을 구현하기 위해 위치 벡터 p_d 와 회전행렬 R_d 에 의해 결정된 목표 좌표계보다는 다른 형태의 기준 좌표계의 도입이 필요하다. 이 좌표계는 순응성이 고려된 좌표계로 설명되고, 위치벡터 p_c 와 회전 행렬 R_c 에 의해 결정된다.

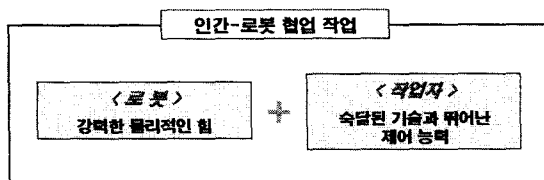


Fig. 8 Concept of control strategy

역 동역학 모션제어 방법에서 위치벡터 p_d 대신 p_c , 회전 행렬 R_d 대신 R_c 가 실제 엔드이펙터 위치 p_e 와 방위 R_e 와 일치되도록 한다. 따라서 실제 엔드이펙터의 선형 속도 \dot{p}_e 와 회전 속도 ω_e 역시 각각 \dot{p}_c , ω_c 와 일치된다. 제안된 제어방안의 블록 선도는 Fig. 9에서 설계되었다. 로봇 제어 시 발생하는 외란을 제거하여 위치추종의 정확성을 향상시키기 위해 그림과 같이 내부 모션 제어기 루프가 존재한다. 즉, 식 (2)의 관점에서 주위 환경으로부터 엔드이펙터에 $F_e(T_e)$ 가 작용될 때 임피던스 식은 위치 변화에 대해 식 (4)와 같이 등가 질량-댐퍼-스프링 거동으로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_{pe}\Delta\ddot{p}_{dc} + B_{pe}\Delta\dot{p}_{dc} + K_{pe}\Delta p_{dc} &= F_e \\
 (M_{ip}\ddot{p}_c + B_{ep}\dot{p}_c + K_{ep}p_c) & \\
 &= M_{ip}\ddot{p}_d + B_{ep}\dot{p}_d + K_{ep}p_d - F_e \quad (4) \\
 M_{oe}\Delta\ddot{\phi}_{dc} + B_{oe}\Delta\dot{\phi}_{dc} + K_{oe}\Delta\phi_{dc} &= T^T(\phi_e)T_e \\
 \text{where, } \Delta p_{dc} &= p_d - p_c
 \end{aligned}$$

Fig. 9의 블록 선도를 기준으로 임피던스 제어는 내부 모션 제어에 대한 기준 위치를 생성한다. 따라서 완벽한 제어를 구현하기 위해 컴플라이언트 프레임의 위치와 속도를 추종하도록 가속도(a)가 설계되어야 한다. 즉,

$$\begin{aligned}
 a_p &= \ddot{p}_c + K_{Dp}\Delta\dot{p}_{ce} + K_{Fp}\Delta p_{ce} \\
 a_o &= T(\phi_e)(\ddot{\phi}_{ce} + K_{Do}\Delta\dot{\phi}_{ce} + K_{Fo}\Delta\phi_{ce}) + \dot{T}(\phi_e, \dot{\phi}_e)\dot{\phi}_e \quad (5) \\
 \text{where, } \Delta p_{ce} &= p_c - p_e
 \end{aligned}$$

여기서 주안점은 p_c 와 관련된 미분치는 힘/토크 센서로부터 측정된 $F_e(T_e)$ 을 입력값으로 작용되는 식 (4)로부터 계산된다.

4. 실험 시스템

Fig. 10은 실험 시스템의 전체적인 형상을 나타낸다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 x, y 방향으로 움직이는 2자유도 매니플레이터에 두 개의 힘/토크 센서를 설치하였다. 하나는 작업자의 작업 신호를 받아들이고, 또 다른 센서는 엔드이펙터와 150[N]의 중량물 사이에 결합되어 주위환경으로부터의 접촉력(모멘트)을 감지한다. 이상의 두 센서로부터 받아들여지는 신호를 이용하여 매니플레이터가 추종해야 할 제어 신호를 만든다.

2 자유도 매니플레이터는 앞 장에서 제안된 내부 모션 제어기를 포함한 임피던스 제어기를 통해 제어가 이루어진다. 또한, 식 (6)을 통해 유도된 힘

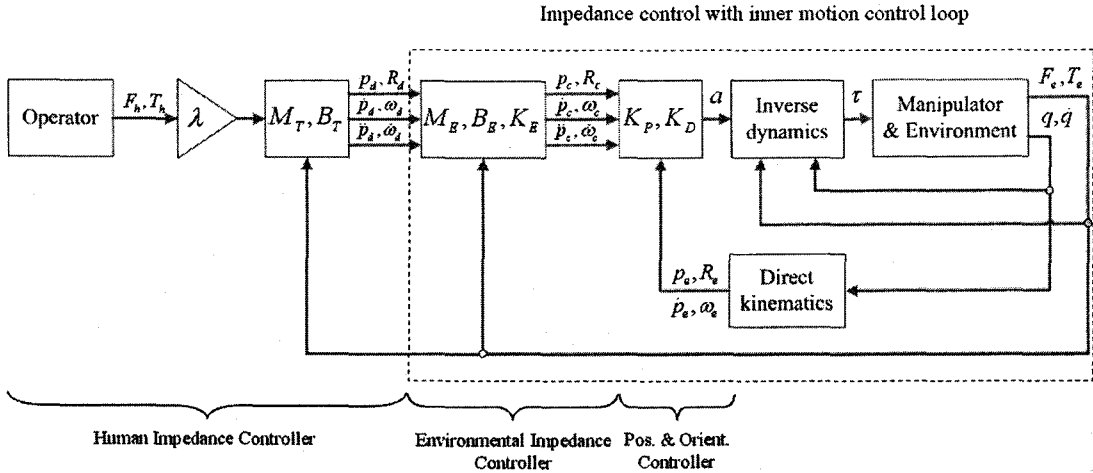


Fig. 9 Control system for human-robot cooperation-work

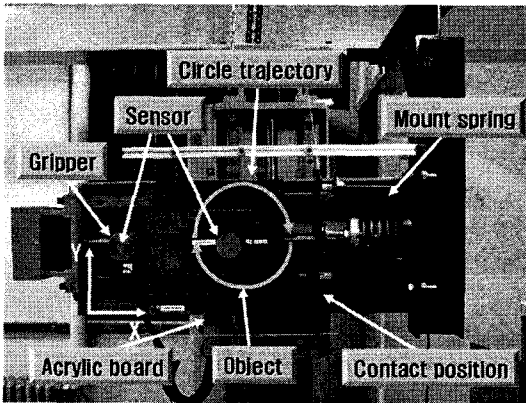


Fig. 10 Configuration of experimental system

측정된 힘(토크)을 분석하고 매니플레이터를 제어하기 위한 샘플링 타임은 약 1[msec]로 한다.

주위 환경을 실험 시스템으로 구현하기 위해 마운트 스프링을 사용하였다. 실제 스프링의 교체를 통해 환경의 강성을 변화시킬 수 있다.

5. 실험 및 결과

인간-로봇 협업 실험 방법은 다음과 같이 크게 4 단계로 나눌 수 있다.

- ① 중량물에 설치된 지침(indicator)이 최초 원점(origin position)에 위치하다가 자동으로 초기점(home position)으로 이동하게 된다.
- ② 작업자가 손잡이를 잡고 지침이 아크릴 판에 그려진 원 궤적을 추종하도록 힘을 가한다.
- ③ 로봇은 입력된 힘을 기반으로 비제한 조건 상의 임피던스 제어가 이루어져 원 궤적을 추종하게 된다.
- ④ 원 궤적을 추종하다가 마운트 스프링과 접촉하게 된다. 이때 발생하는 접촉력을 통해 임피던스 제어가 이루어지며 주위 환경과 순응하며 중량물 핸들링 작업이 완료된다.

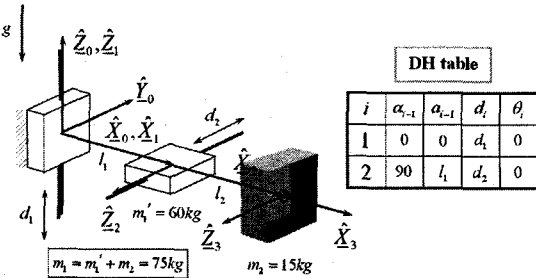


Fig. 11 2DOF manipulator

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{d}_1 \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 g + m_2 g \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{ey} \\ F_{ex} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(토크) 값을 매니플레이터의 각 조인트에 해당하는 서보 시스템이 추종하도록 한다. DSP 에서 센서를 통해

Fig. 12 과 같이 지름이 0.2[m]인 원 궤적을 추종하는 시간은 대략 180[sec]가 소요된다. 실험에 참여한 작업자는 만 30 세의 건강한 남자로서 충분한 연습을 마친 후 실험에 참여하였다.

실험내용은 다음과 같다. 첫 번째로 ‘임피던스 파라미터 조절’을 위해 각각의 파라미터의 영향에 대해 살펴본다. 두 번째로 비제한 조건 상에서 로봇 운전 시 발생하는 위치 추종 오차를 줄이기 위

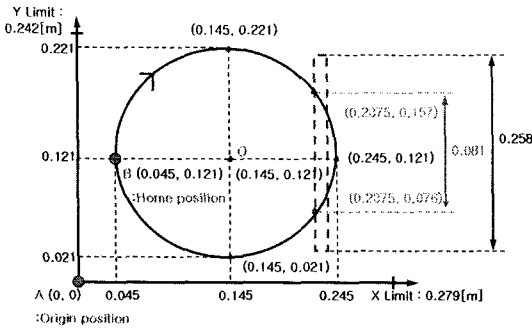


Fig. 12 Experimental system

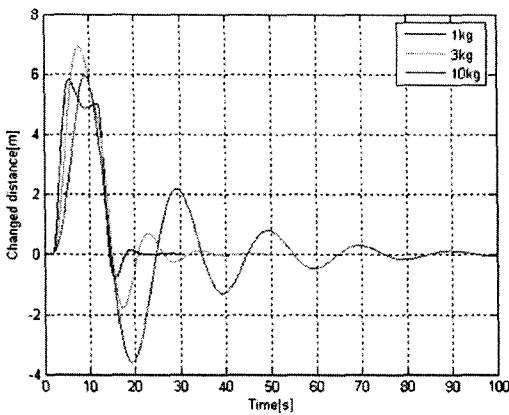


Fig. 13 Influence of impedance parameter $M_{pr}(M_{or})$

해 제안된 ‘내부 모션 제어 루프를 가진 임피던스 제어’의 성능이 평가된다. 세 번째로 작업자의 힘 증폭비 (λ) 변화에 따른 F_h 와 F_e 의 영향을 살펴보고자 한다.

5.1 임피던스 파라미터의 영향

실험목적을 충족하기 위해 ‘실험계획법’이 도입되었다. ‘인자’는 식 (2)에서 임피던스 파라미터 $M_{pr}(M_{or})$, $B_{pr}(B_{or})$ 를 나타내고, ‘수준’은 1, 3, 10 으로 한다. 실험 결과에 의한 ‘특성치’는 Fig. 13, 14 와 같다. 두 실험에 작용된 힘은 5[N]으로 약 10[sec]동안 작용되고 그래프의 수렴을 위해 K 값은 1[N/m]로 둔다. Fig. 13은 인자가 M_{pr} 인 경우로 중량물 핸들링 작업 공정 상 기동성이 요구되는 작업과 관계 있다. 즉, 상대적으로 높은 안정성이 요구하지 않으며, 작은 힘으로 신속히 원하는 위치로 이동시키는 작업에 해당된다. M_{pr} 값이 커질수록 큰 힘이 필요하고, 그래프에서 보는 바와 같이 관성에 의해 민첩성이 감소되는 경향을 보인다.

Fig. 14는 인자가 B_{pr} 인 경우로 중량물 핸들링 작업 공정 상 안정성이 요구되는 작업과 관계 있

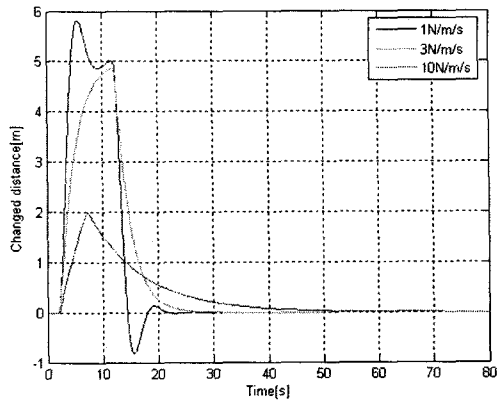


Fig. 14 Influence of impedance parameter $B_{pr}(B_{or})$

다. 즉, 상대적으로 높은 기동성이 요구하지 않으며 정밀하고 안정적인 작업에 해당된다. $B_{pr}(B_{or})$ 값이 커질수록 똑같은 작업자의 힘에 움직일 수 있는 거리는 작아진다. 즉, 기동성은 감소하지만 작업자에게 더 큰 힘을 요구하게 되어 작업자가 느끼는 최소 이동 거리가 더 작아질 수 있다.

두 인자는 기동성과 안정성에 관계되며 두 인자는 서로 상호작용을 한다. 따라서 시스템의 안정성이 보장된 범위 내에서 최대의 기동성을 가지거나 혹은 그 반대의 경우가 되도록 두 인자는 적절히 교환(trade-off)되어야 한다. 또한, 작업자의 작업 취향을 고려하여 각 인자는 단계별로 조절이 가능하도록 한다. 실험에 사용된 M_{pr} 및 B_{pr} 값은 기동성이 요구되는 작업(비제한 조건)에서는 $M_{pr}=50I$, $B_{pr}=2500I$ 이 사용되었고, 안정도가 요구되는 작업(제한 조건)에서는 $M_{pr}=15I$, $B_{pr}=7500I$ 이 사용되었다.

5.2 내부 모션 제어 루프의 영향

Fig. 15는 제안된 임피던스 제어 시스템에 환경의 강성 파라미터(K_{pe})를 변화시켜 얻어진 그래프이다. 작업자의 외력이 작용하지 않는 상태에서 일정한 힘을 제어기에 입력하여 이미 프로그램된 원 궤적을 로봇이 추종하도록 한다. 그래프에서 보는 바와 같이 강성 파라미터가 작으면 전체 실험과정 동안 경로 추종의 정확도가 감소하게 된다. 또한, 제한 조건 상에서 접촉력의 감소를 초래한다. 즉, 접촉력 감소는 중량물 설치작업 시 엔드이펙터의 위치 오차에 영향을 받는다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 ‘내부 모션 제어 루프가 포함된 임피던스 제어’가 제안되었다. 식 (5)에서 내부 모션 루프 계인은 $K_{Dp}=1.5I$, $K_{Pp}=15I$ 로 결정되

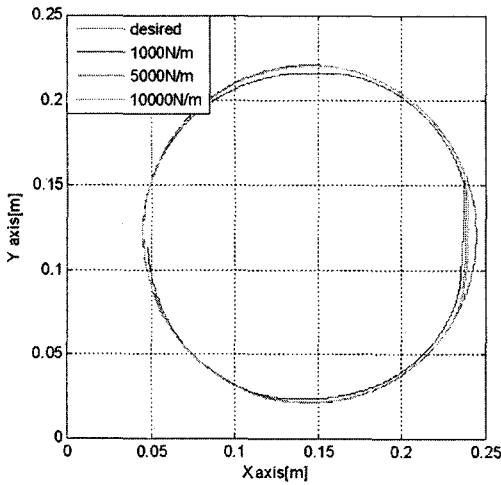


Fig. 15 Without inner motion control loop

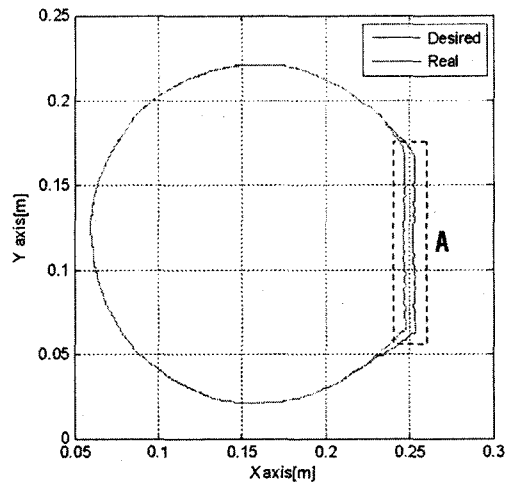


Fig. 17 Experiment result

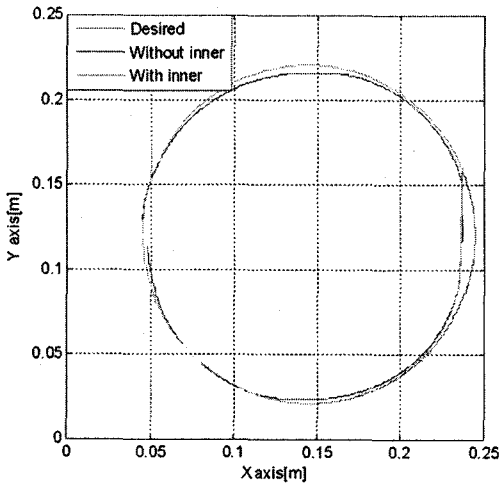


Fig. 16 With inner motion control loop

었다.

Fig. 16은 외부 환경의 강성 파라미터가 1000[N/m] 일 때 내부 모션 제어 루프를 사용한 경우(Fig. 16)와 사용하지 않는 경우(Fig. 15)를 비교한 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 내부 모션 제어 루프를 사용하지 않는 경우 비제한 조건에서 로봇 운전은 원하는 위치 추종 능력이 떨어진다. 이 문제를 해결하기 위해 내부 모션 제어 루프를 사용하면 Fig. 16과 같이 높은 위치 추종 능력을 얻을 수 있다.

5.3 힘 증폭비의 영향

Fig. 17은 제안된 인간-로봇 협업 실험 방법을 따라 수행된 결과 그래프이다. 작업자가 중량물에 설치된 지침이 아크릴 판에 그려진 원 궤적을

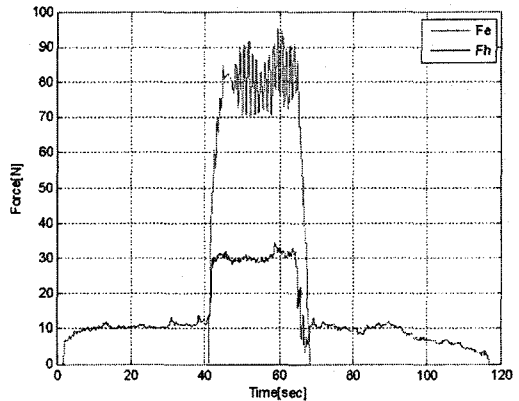


Fig. 18 F_e , F_h at $K_{pe}=8000I$ and $\lambda=3$

추종하도록 손잡이에 힘을 가한다. 그래프에서 A 부분은 중량물이 주위 환경(마운트 스프링)과 접촉이 일어나는 구간이다. 환경의 임피던스 파라미터에 의해 결정된 컴플라이언스가 부여되며 로봇 시스템과 주위 환경이 손상되지 않으면서 중량물 핸들링 작업이 완료된다. (1), (2)식에서 제안된 힘 증폭비(λ)는 인간-로봇 협업 작업 시 작업자로부터 요구되는 힘의 크기를 조절하는 역할을 한다. 본 실험에서 힘 증폭비(λ)를 3에서 6으로 증가시킬 때 F_h 와 F_e 의 변화를 살펴보았다. 실험에 사용된 임피던스 파라미터는 $M_{pt}=15I$, $B_{pt}=7500I$, $M_{pe}=50I$, $B_{pe}=10000I$, $K_{pe}=8000I$ 으로 결정되었다.

Fig. 18와 19은 Fig. 17의 그래프를 얻기 위해 소요된 F_h 와 F_e 의 그래프를 나타낸다. Fig. 18($\lambda=3$)에서 보는 바와 같이 환경과 접촉이 일어나지 않는 경우 중량물을 다루기 위해 F_h 가 약

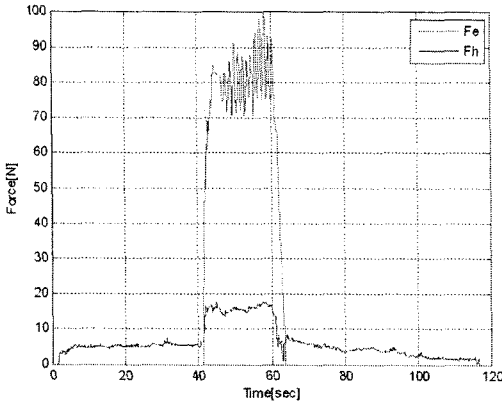


Fig. 19 F_e, F_h at $K_{pe}=8000I$ and $\lambda=6$

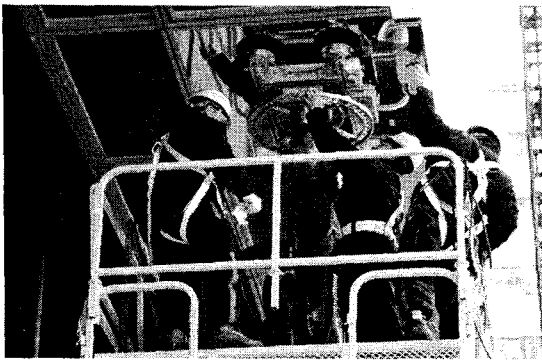


Fig. 20 Ceiling glass installation process

10[N]이 요구되고 접촉이 일어날 경우 F_h 가 약 30[N]이 필요하다. 그리고 λ 가 3 에서 6 으로 증가되었을 때(Fig. 19) 환경과 접촉이 일어나지 않는 경우 소요되는 F_h 가 1/2 배 감소되었고, 접촉이 일어날 경우에도 F_h 가 대략 15[N]으로 1/2 배 감소되었다.

λ 가 커지면 작업자로부터 요구되는 힘이 작아 지지만, 접촉상태에서 반향되는 힘(F_e)은 변화가 없음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 조절 가능한 임피던스 인자들을 이용하여 접촉 환경에 따른 인간-로봇-환경 협업 시스템 모델을 제시하였다. 또한, 전체 인간-로봇 협업 제어기를 인간 임피던스 제어부와 내부 모션 제어 루프를 포함한 임피던스 제어부로 분리하여 구성하였다.

실험 내용은 크게 3 가지로 분류된다. 임피던스 파라미터(M_{pb}, B_{pt})의 영향, 내부 모션 제어 루프가

시스템에 미치는 영향, 힘 증폭비(λ)의 영향을 살펴 보았다. 실험결과, λ 가 커지면 작업자로부터 요구되는 힘이 작아 지지만, 접촉 상태에서 반향되는 힘(F_e)은 변화가 없음을 알 수 있다. 또한, K_{pe} 가 커지면 작업자로부터 요구되는 힘이 커지고, 접촉 상태에서 반향되는 힘(F_e)도 커짐을 알 수 있다. 이로써, 협업 시스템의 장점인 ‘힘 증폭’ 및 ‘힘 반향’ 특성을 실험을 통해 확인하였다.

본 논문에서 언급한 ‘인간-로봇 협업 제어 기술’을 건설 현장의 중량물 핸들링 작업에 적절하게 활용한다면 작업자의 의도와 정확하게 비교적 작은 외력으로 중량물을 이동시킬 수 있다. 또한 건설 자재를 서로 결합하는 작업이나 틀에 끼워 맞춤 작업 시 환경(건설 자재)과의 접촉상태에서 작업자가 직감적인 힘 반향을 통해 실시간으로 변하는 작업 환경에 즉각적으로 대응할 수 있다.

현재 제안된 ‘인간-로봇 협업 제어 기술’이 적용된 중량물 설치를 위한 건설 로봇이 그림 Fig. 20 과 같이 개발 중이며, 테스트를 마친 후 현장에 적용될 예정이다.

후 기

본 연구는 삼성물산 건설부문 및 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음. (R11-2005-056-03003-0)

참고문헌

- (1) Albus, James S., 1986, “Trip Report: Japanese Progress in Robotics for Construction,” *International Journal of Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 103~112.
- (2) Kangari, R. and Halpin, D. W., 1988, “Automation and Robotics in Construction: A Feasibility Study,” *Proceedings of the 5th International Symposium on Robotics in Construction*, Tokyo, Japan, June 6~8, Vol. 1, pp. 161~167.
- (3) Gambao, E., Balaguer, C. and Gebhart, F., 2000, “Robot Assembly System for Computer-Integrated Construction,” *Automation in Construction*, Vol. 9, Issue 5~6, pp. 479~487.
- (4) Choi, H.S., Han, C.S., Lee, K.Y. and Lee, S.H., 2005, “Development of Hybrid Robot for Construction Works with Pneumatic Actuator,” *Automation in Construction*, Vol. 14, No. 4, pp. 452~459.
- (5) Ostoja-Starzewski, M., Skibniewski, M., 1989, “A Master-Slave Manipulator for Excavation and Construction Tasks,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 333~337.
- (6) Santos, P. G., Estremera, J., Jimenez, M. A., Garcia,

- E. and Armada, M., 2003, "Manipulators helps out with Plaster Panels in Construction," *The Industrial Robot*, Vol. 30, No. 6, pp. 508~514.
- (7) Skibniewski, M.J., Wooldridge, S.C., 1992, "Robotic Materials Handling for Automated Building Construction Technology," *Automation in Construction*, Vol. 1, No. 3, pp. 251~266.
- (8) Isao S., Hidetoshi O., Nobuhiro T. and Hideo T., 1996, "Development of Automated Exterior Curtain Wall Installation System," *International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC'96)*, Tokyo, Japan, pp. 915~924.
- (9) Lee, S.Y., Lee, K.Y., Park, B.S. and Han, C.S., 2006, "A Multidegree-of-freedom Manipulator for Curtain-wall Installation," *Journal of Field Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 347~360.
- (10) Fukuda, T., Fujisawa, Y., Muro, E., Hoshino, H., Miyazaki, T., Uehara, K., Ohtsubo, K. and Mikami, T., 1991, "A New Robotic Manipulator in Construction based on Man-Robot Cooperation Work," *Proc. of the 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 239~2445.
- (11) Fukuda, T., Fujisawa, Y., Kosuge, K., Arai, F., Muro, E., Hoshino, H., Miyazaki, K., Ohtsubo, K. and Uehara, K., 1991, "Manipulator for Man-Robot Cooperation," *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Vol. 2, pp. 996~1001.
- (12) Fukuda, T., Fujisawa, Y., Arai, F., et. al., "Study on Man-Robot Cooperation Work-type of Manipulator, 1st Report, Mechanism and Control of Man-Robot Cooperation Manipulator," *Trans. of the JSME*, pp. 160~168.
- (13) Miller, J.S., 1968, "The Myotron - A Servo-Controlled Exoskeleton for the Measurement of Muscular Kinetics," *Cornell Aeronautical Laboratory Report VO-2401-E-1*.
- (14) Mosher, R.S., 1967, "Handyman to Hardiman," *Automotive Engineering Congress*, SME670088.
- (15) Kazerooni, H., 1989, "Human/Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals - part I: Dynamics and Control Analysis," *IEEE Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1632~1640.
- (16) Kazerooni, H., 1989, "Human/Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals - part II: An Experimental Analysis," *IEEE Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1641~1647.
- (17) Kazerooni, H. and Mahoney, S.L., 1991, "Dynamics and Control of Robotic Systems worn by Humans," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 133, No. 3, pp. 379~387.
- (18) Kosuge K., Fujisawa, Y. and Fukuda, T., 1993, "Mechanical System Control with Man-Machine-Environment Interactions," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 239~244.
- (19) Hogan, N., 1985, "Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I-III," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, Vol. 107, pp. 1~24.