

Masterarm⁺ Development for Teleoperation of a Humanoid Robot

金潤相* · 李章旭** · 李秀容*** · 金汶相[§] · 李宗元^{§§}

(Yoon Sang Kim, Jangwook Lee, Sooyong Lee, Munsang Kim, Chong-Won Lee)

Abstract - In this paper, a masterarm for teleoperation of humanoid robot is presented. This masterarm is based on human kinematics, which not only mimics human posture/motion completely, but also has wider work range. In addition, by using the distributed controller architecture and electric brake for force reflection, small size and lightweight of the device can be achieved. Some important experiments integrated with the humanoid robot, CENTAUR developed by KIST(Korea Institute of Science and Technology), are conducted to evaluate the performance of the proposed masterarm.

Key Words : masterarm, teleoperation, human kinematics, distributed controller architecture, humanoid robot

1. 서 론

원격조종 시스템 (teleoperation system)은 Goetz [1]에 의해 최초로 원전 조종 (nuclear operation)에 도입된 이후, 심해저 (underwater), 우주 (space)의 극한 작업, 원격시술 (telesurgery)과 폭발물제거등에 광범위하게 적용되고 있다. 이는 인간작업자와 실제 로봇이 동일한 작업 공간에 있지 않아도 되는 장점에서 비롯되며, 최근 오락 및 가상훈련과 같은 가상현실 (VR : virtual reality)로 응용 범위가 확대되고 있다[2]-[4].

원격조종 시스템은 크게 인간작업자 (HO : human operator), 마스터 장치 (master device), 통신채널 (communication channel), 원격러 슬레이브 로봇 (remotely slave robot) 및 환경 (environment)으로 구성된다.

마스터 장치는 원격조종 시스템의 핵심 장치로 경로 명령 생성 (path command generation)과 감각 제환 (kinesthetic feedback)의 기능을 갖추어야 한다. 감각 제환을 위한 다양한 구현 방법 가운데, 힘 반향 (force reflection)에 기초한 연구가 널리 이루어지고 있다. 이러한 힘 반향에 기초하는 마스터 장치는 크게 HO의 손에 의해 조종되는 마스터글러브 (Masterglove)/조이스틱 형태와 HO가 몸에 착용하여 조종되

는 암하네스 (Arm-harness)/ 엑소 (Exo) 형태의 마스터 암 (masterarm)으로 구분될 수 있다. 이중, 마스터 암은 모션/자세 캡처 (motion/posture capturing)에 의한 인간의 팔 운동과 유사한 경로 명령 생성을 가능하게 함으로써, 자동화/인공지능에 기초하여 생성된 경로 명령보다 더 자연스럽고 광범위한 경로의 제공으로 최근 원격조종 시스템의 마스터 장치로 널리 이용되고 있다.

마스터 암은 HO의 팔에 직접 부착되는 장치이므로 설계시 다음의 사항들이 고려되어야 한다: 착용의 간편성, 소형화, 경량성, 이동성, 간단한 기구학, 운동/작업 범위. 센서, 액츄에이터 등은 마스터 암의 필수적 요소로 장치의 크기, 무게 및 이동성과 직결된다. 힘 반향 구현시 액츄에이터로 전기 모터를 사용하는 대부분의 경우[4],[5], 구동회로의 복잡함, 이동성의 어려움, 장치의 중량화를 단점으로 가지고 있으며, 공압 실린더를 이용한 경우[6], 장치의 소형화, 경량화는 얻어지나, 힘 반향을 위한 공기 공급 장치 (air compressor)가 필수적이며 이동성이 떨어지는 단점을 가진다. 병렬형 메커니즘에 기초하는 마스터 암은 정교한 작업의 수행이 가능하나, 직렬형 메커니즘에 비해 운동범위가 상대적으로 작게 된다 [4]-[7].

본 논문에서 제안되는 마스터 암의 연구 배경은 위에서 언급된 사항들에서 비롯된다. 우선, 본 마스터 암의 넓은 운동 범위는 여유 관절의 추가에서 비롯되며, 장치의 소형화 및 경량화에 필수적인 센서 및 액츄에이터의 최소화는 간단한 기하학(geometry)에 의한 기구학 해의 유도로부터 이루어진다. 여기서 언급된 최소화란 인간 팔 운동에 대응되는 7 자유도 (D.O.F)는 그대로 독립관절로 유지하면서, 운동 범위의 확대를 위해 본 마스터 암에서 도입한 여유관절들에 대한 센서 및 액츄에이터의 추가를 배제시킴을 의미한다. 또한, 분산 제어기 구조에 기초하여 전기 모터 대신 전기 브레이크를 힘 반향 구현을 위한 액츄에이터로 이용가능케 함으로써, 장치의 현저한 경량화, 소형화 및 standalone 형태의 하드웨어로

* 正 會 員 : Univ. of Washington 電氣工學科 Post-Doc · 工博

** 正 會 員 : 삼성 SDI R&D 센터 專任研究員

*** 正 會 員 : Texas A&M Univ. 機械工學科 助教授 · 工博

§ 正 會 員 : 韓國科學技術研究員 휴먼로봇연구센터 센터장 · 工博

§§ 正 會 員 : 韓國科學技術研究員 휴먼로봇연구센터 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2000年 8月 4日

最終完了 : 2001年 5月 11日

부터 이동의 용이성등을 가능하게 하였다.

2. 마스터 암 개발

2.1 기구학 해

마스터 암의 설계시 가장 중요한 고려 사항은 작업자의 운동 범위이다. 즉, 설계된 마스터 암이 우수한 성능을 가지기 위해서는 기구학적 제약으로 작업자의 운동 공간이 제한되지 않아야 하고, 사용자의 편리한 조작을 위하여 장치의 무게가 가볍고 착용이 용이하도록 설계되어야 한다. 또한, 자세 정보 획득의 용이성, 착용 및 조작의 편리함 및 유지 보수성의 간결성을 위해 기구학적으로도 간단하게 설계되어야 한다. 인간의 팔 운동은 3 자유도의 어깨, 1 자유도의 팔꿈치 및 3 자유도의 손목에 기초한다. 따라서, 한 팔에 7축의 회전축을 갖도록 설계하는 것이 이상적인 방법이나, 마스터 암의 회전 관절은 인간 어깨와 손목의 회전 중심에 직접 부착될 수 없을 뿐만 아니라, 인간의 어깨 및 손목 운동이 동일한 점을 중심으로 회전하기 때문에 기구학적 간섭(kinematic interference)이 발생하는 문제점을 내포한다.

따라서, 본 논문에서는 위와 같은 문제점을 보완하기 위해 어깨부 및 손목부에 각각 3 자유도의 여유관절을 추가한 그림 1과 같은 마스터 암을 설계하였다.

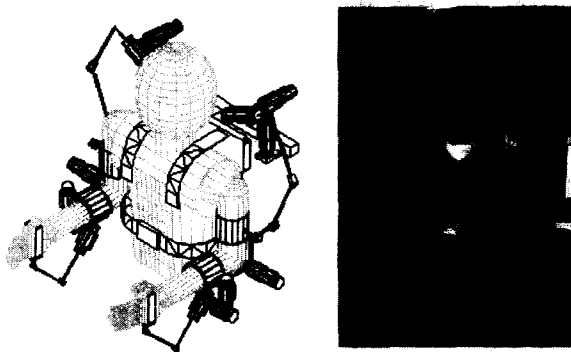
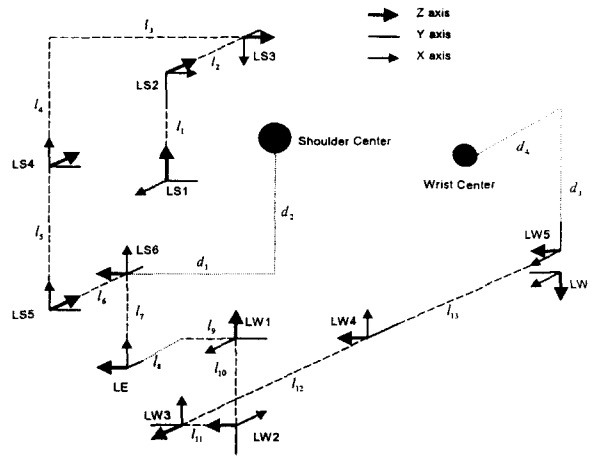


그림 1. 제안된 마스터 암
Fig 1. Proposed masterarm

제안된 인간 기구학에 기초하는 마스터 암은 그림 2와 같이 어깨 및 손목 각각에 6축(어깨부 θ_1, \sim, θ_6 , 손목부 $\theta_8, \sim, \theta_{13}$)과 팔꿈치 각각 1축의 총 13축으로 구성된다. 이때 어깨와 손목의 6축 중 3축(어깨부 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 손목부 $\theta_8, \theta_9, \theta_{10}$)이 독립 관절인 기본 회전축이 되며, 나머지 3축(어깨부 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$, 손목부 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$)은 기본 3축에 종속되는 여유 관절이 된다. 따라서, 나머지 종속 3축의 여유 관절 회전각은 추가의 측정 장치없이 기본 3축의 관절 회전각의 측정으로부터 얻어질 수 있다.



	1	2	3	4	5	6
θ_i	LS1	LS2	LS3	LS4	LS5	LS6
l_i	157.3 2	59	80	185	185	61
7	8	9	10	11	12	13
LE	LW1	LW2	LW3	LW4	LW5	LW6
100	90	80	100	35	140	140

그림 2. 제안된 마스터 암의 기구학 구조 (왼쪽, 후면도) [mm]
Fig. 2. Kinamatic structure of proposed masterarm left back view [mm]

관절 변수의 측정을 위해 요구되는 센서, 즉 인코더(encoder)의 최소화는 하드웨어 구조를 간단하게 할 뿐만 아니라, 장치의 소형화 및 경량화를 가능하게 할 수 있다. 본 절에서는 이러한 목적으로 직관적인 기하학(geometry)에 기초하여 어깨와 손목 각각의 측정된 3개의 관절 회전각으로부터 측정 장치없이 나머지 3개의 관절 회전각을 얻을 수 있는 간단한 기구학 해의 유도 과정을 설명한다.

그림 2 어깨부로부터 측정되는 독립 관절(measured : $\theta_1, \theta_2, \theta_3$)과 계산되는 종속 관절(calculated : $\theta_4, \theta_5, \theta_6$)은 그림 3과 같다.

그림 2로부터 기구학 해를 유도하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

(i) 어깨(손목) 회전 중심점(shoulder/wrist center)은 각각 고정된 점이며 알 수 있는 값이다.

(ii) 부착점으로부터 어깨 및 손목 중심까지의 거리(d_1, d_2, d_3, d_4)를 알 수 있다.

(iii) 어깨와 손목은 각각 i 의 점을 중심으로 구 운동을 한다.

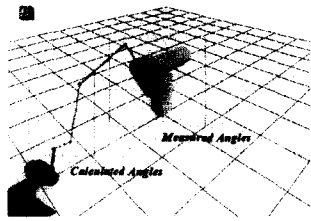


그림 3. 어깨부의 측정 관절과 계산 관절

Fig. 3. Measured angles and calculated angles of shoulder parts

왼쪽 어깨의 경우에 대해서만 고려하며, 구하고자 하는 관절 변수를 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 이라 표기한다. 원점으로부터 어깨 중심까지의 벡터를 \vec{P}_s 라 하면, 그림 2의 LS4 좌표축에서 본 어깨 중심의 좌표 $P_4(P_{4x}, P_{4y}, P_{4z})$ 는 \vec{P}_s 와 LS4 좌표계(θ_4)의 기본 방향 벡터 $(\vec{0}_{4x}, \vec{0}_{4y}, \vec{0}_{4z})$ 들과의 내적(innerproduct)으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{4x} \\ P_{4y} \\ P_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\vec{P}_s - \vec{O}_4) \cdot \vec{O}_{4x} \\ (\vec{P}_s - \vec{O}_4) \cdot \vec{O}_{4y} \\ (\vec{P}_s - \vec{O}_4) \cdot \vec{O}_{4z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

θ_4 는 그림 4와 같이 θ_4 에는 종속이고 θ_5, θ_6 에는 독립인 점 A의 조건으로부터 유도할 수 있다. θ_4 에 종속이고 θ_5, θ_6 에는 독립인 점은 무수히 존재하나, A점의 조건으로부터 유일한 해를 유도할 수 있다. A점은 LS4 좌표계의 원점을 중심으로 하는 반경 $\sqrt{l_5^2 + l_6^2}$ 을 갖는 구 S_1 의 표면과 어깨 회전 중심점으로부터 거리 $\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$ 을 갖는 점의 집합인 구 S_2 표면과의 교점 중 z좌표가 l_6 인 점으로 놓을 수 있다.

θ_4 좌표계의 원점을 중심으로 하는 구 S_1 은 다음과 같다.

$$x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = l_5^2 + l_6^2 \quad (2)$$

또한 P_4 를 중심으로 하는 구 S_2 는 다음과 같다.

$$(x_4 - P_{4x})^2 + (y_4 - P_{4y})^2 + (z_4 - P_{4z})^2 = d_1^2 + d_2^2 \quad (3)$$

즉, (2)와 (3) 두 개의 구 S_1, S_2 의 교점을 구함으로써 A점의 좌표를 구할 수 있고, 이로부터 θ_4 를 구할 수 있다.

S_1, S_2 교점의 궤적은 원의 형태이지만, z_4 의 값이 l_6 으로 결정되어 있으므로 실제로는 다음 (4)와 (5)로 나타나는 두 원의 교점이 A점이 된다.

$$x_4^2 + y_4^2 = l_5^2 \quad (4)$$

$$(x_4 - P_{4x})^2 + (y_4 - P_{4y})^2 = d_1^2 + d_2^2 - (l_6 - P_{4z})^2 \quad (5)$$

(4)에서 (5)를 빼면 다음과 같다.

$$2x_4P_{4x} - P_{4x}^2 + 2y_4P_{4y} - P_{4y}^2 = l_5^2 - d_1^2 - d_2^2 + (l_6 - P_{4z})^2 \quad (6)$$

(6)을 정리하면 다음과 같다.

$$x_4P_{4x} + y_4P_{4y} = \alpha \quad (7)$$

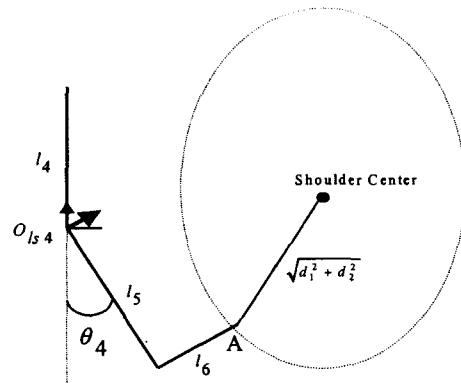


그림 4. θ_4 을 구하기 위한 A점의 조건

Fig. 4. Condition of point A for θ_4 solution

여기서

$$\alpha = \frac{P_{4x}^2 + P_{4y}^2 + l_5^2 - d_1^2 - d_2^2 + (l_6 - P_{4z})^2}{2} \quad (8)$$

따라서, y_4 는 다음과 같이 된다.

$$y_4 = \frac{\alpha - x_4P_{4x}}{P_{4y}} \quad (9)$$

이때, $y_4 = 0$ 이면,

$$x_4 = \frac{\alpha}{P_{4x}} \quad (10)$$

$y_4 \neq 0$ 이면, (9)을 (4)에 대입하여 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$x_4^2 + \frac{\alpha^2 - 2\alpha x_4 P_{4x} + (P_{4x} x_4)^2}{P_{4y}^2} = l_5^2 \quad (11)$$

양변에 P_{4y}^2 를 곱하고 정리하면 다음과 같고,

$$(P_{4x}^2 + P_{4y}^2)x_4^2 - 2\alpha P_{4x}x_4 + \alpha^2 - (l_5 P_{4y})^2 = 0 \quad (12)$$

(12)를 x_4 와 y_4 에 대해 풀면,

$$x_4 = \frac{\alpha P_{4x} \pm \sqrt{(\alpha P_{4x})^2 + (l_5^2 P_{4y}^2 - \alpha^2)(P_{4x}^2 + P_{4y}^2)}}{P_{4x}^2 + P_{4y}^2}$$

$$y_4 = \frac{\alpha - x_4 P_{4x}}{P_{4y}} \quad (13)$$

와 같은 두 쌍의 해가 구해진다.

위와 같이 얻어지는 두 쌍의 해 중 x_4 가 큰 쌍은 실제로 도달할 수 없는 해이기 때문에, 따라서 다음과 같이 유일한 해를 얻을 수 있다.

$$\theta_4 = \text{atan2}(y_4, x_4) - \pi \tag{14}$$

$$x_4 = \frac{aP_{4x} - \sqrt{(aP_{4x})^2 + (l_5^2 P_{4y}^2 - a^2)(P_{4x}^2 + P_{4y}^2)}}{P_{4x}^2 + P_{4y}^2}$$

$$y_4 = \frac{a - x_4 P_{4x}}{P_{4y}} \tag{15}$$

θ_5 역시 θ_4 를 구하기 위한 위의 과정과 마찬가지로, θ_5 에 종속이며 θ_6 에 독립인 점의 조건을 살펴봄으로써 해의 유도가 가능하다. 또한, θ_4 와 θ_5 가 결정되면 θ_6 의 값도 유일한 해로 유도될 수 있으며, 유도된 θ_5 와 θ_6 는 각각 (16)과 (17)과 같다.

$$\theta_5 = \text{atan2}(y_5, x_5) - \frac{\pi}{2} \tag{16}$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(P_{6y}, P_{6x}) \tag{17}$$

오른쪽 어깨부 및 양쪽 손목부의 여유 관절각 역시 위에서 설명된 동일한 방법으로 간단하게 유도될 수 있다.

2.2. 분산 제어기 구조

기존의 마스터 암은 대부분 하나의 제어기로 구성된 단일 제어기 구조를 사용하였다. 이러한 단일 제어기 구조는 제어기와 각 관절 측정 장치와의 일대일 연결에 의해 선 연결을 복잡하게 만들뿐 아니라, 단일 제어기와 관절 측정 장치간의 거리가 길수록 전기적 잡음에 의한 신호의 정확한 전달이 어려운 문제점을 내포하고 있다. 또한, 단일 제어기만으로 관절 각의 측정과 제어 신호를 모두 처리해야 하기 때문에, 측정 장치와의 신속한 데이터 교환을 저하하는 원인이 된다. 제안하는 마스터 암은 이러한 단점을 보완하기 위하여 중앙제어기와 위성제어기로 구성되는 분산 제어기 구조[8][9]에 기초한다. 중앙제어기는 기구학 해, 관절 변수 변환 및 자코비안 계산의 수치적 연산과 직렬 통신(serial communication)에 의한 제어 신호 전송을 담당하고, 위성제어기는 회전관절 축마다 부착되어 각 관절의 측정된 회전각을 중앙제어기로 전송하는 역할과 힘 반향 구현을 위한 액츄에이터의 제어를 담당하도록 하였다. 중앙제어기와 위성제어기들은 3선 데이터-체인 방식인 SPI 프로토콜을 이용하여 연결하였다. 마스터 암에 사용되는 SPI 프로토콜은 클럭(CLK)의 생성 여부로 마스터의 중앙제어기와 슬레이브의 위성제어기를 구분하는 데이터 입력(SDI), 데이터 출력(SDO), 및 클럭(CLK) 3개의 선만으로 통신을 수행하는 규약이다. 그림 5는 제안된 마스터 암에 사용된 분산 제어기 구조와 SPI 프로토콜을 나타낸다. 그림 5와 같이 제안된 분산 제어기 구조는 위성제어기가 관절의 가까운 곳에 부착되고 서로 데이터-체인 방식으로 연결되므로 선 연결을 간단하게 할 수 있으며, 축의 수가 증가하더라도 가장 가까운 위성제어기로부터 추가되는 위성제어기로 간단하게 연결을 연장시키는 방법으로 제어기 사이의 통신을 가능하게 할 수 있는 장점이 있다. 또한, 각 위성제어기에 고유 주소를 할당하는 방법을 이용하여 중앙제어기가 데이터를 요청하기 전에, 응답을 원하는 위성제어기의 주소를 먼저 전송하고 그 주소에 일치하는 위성제어기만이 응답하도록 하였다.

록 하였다.

기구학 해, 관절 변수 변환 및 자코비안 계산등의 수치적 연산 수행을 담당하는 중앙제어기로는 고속의 부동 소수점 연산 기능을 갖는 TMS320C31(50MHz) DSP를 사용했으며, 위성제어기로는 소형의 SPI 모듈을 내장한 PIC16C73(20MHz) 프로세서를 사용하였다. 그림 6 및 7은 분산 제어기 구조에 기초하여 설계된 마스터 암의 중앙제어기와 위성제어기 하드웨어 외형을 각각 나타낸다. 그림 5(a)의 액츄에이터 제어부는 PWM (Pulse Width Modulation) 전압 방식으로, 본 마스터 암에서 도입하는 전기 브레이크에 의한 힘 반향 구현을 가능하게 한다.

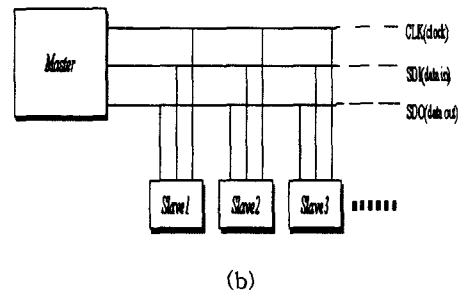
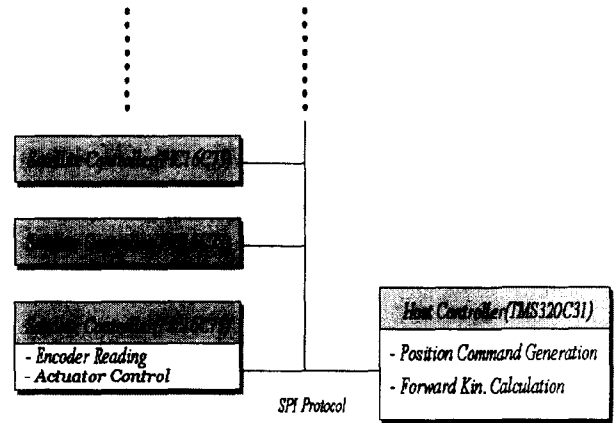


그림 5. 분산 제어기 구조 (a) 및 SPI 프로토콜 (b)
Fig. 5. Distributed Controller Architecture(a) and SPI protocol(b)



그림 6. 마스터 암의 중앙제어기
Fig. 6. Host Controller master arm

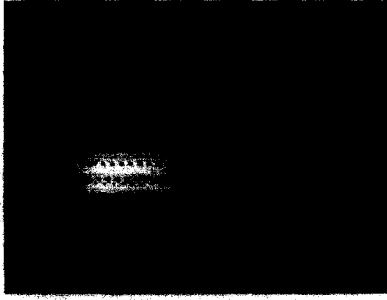


그림 7. 마스터 암의 위성제어기
Fig. 7. Satellite Controller of masterarm

2.3 전기 브레이크에 의한 힘 반향

본 연구에서 제안되는 마스터 암은 힘 반향 구현을 위해 널리 사용되는 전기 모터 대신 전기 브레이크를 이용함으로써 장치의 경량화 및 소형화를 도모하고자 한다. 액츄에이터로 이용된 전기 브레이크의 사양은 다음과 같다.

Static Torque[Nm]	Electric response[ms]	Mechanical response[ms]	Weight[g]
0.565	5	18	80

본 마스터 암의 힘 반향 구현은 2.2절에서 언급된 위성제어의 PWM 제어에 의해 수행된다. 각 관절에 부가되는 토크 벡터는 다음과 같은 자코비안으로부터 계산된다.

$$\tau = J(q)^T F_m$$

자코비안과 슬레이브 로봇 힘은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$J_0^{13} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial x}{\partial \theta_{13}} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial y}{\partial \theta_{13}} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial z}{\partial \theta_{13}} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_{13}} \\ \frac{\partial \beta}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial \beta}{\partial \theta_{13}} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial \gamma}{\partial \theta_{13}} \end{bmatrix}$$

$$F_s = [F_x \ F_y \ F_z \ F_\alpha \ F_\beta \ F_\gamma]^T, \quad F_m = F_s$$

그림 8은 최종적으로 설계된 마스터 암의 각 독립 관절(어깨부, 팔꿈치부)의 CAD 모델로, 각각 센서(E), 전기 브레이크(D), 감속기(C), 토크 방향 감지용 장치(torque direction detection mechanism)(A,B) 이다. 특히, AB부의 토크 방향 감지용 장치는 전기 브레이크의 단방향성 제약을 보완하여,

실제환경/가상환경과의 접촉상태(contact regime) 및 자유운동상태(free motion state)시 브레이크의 잠금(Hold)과 풀림(Release)의 기능을 수행할 수 있도록 하였다.

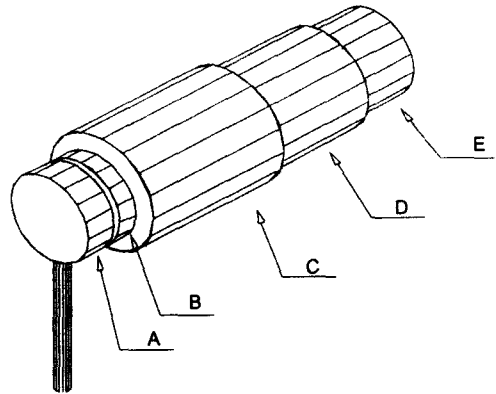


그림 8. 제안된 마스터 암의 회전관절 모듈
Fig. 8 A Revolute Module of the proposed masterarm

어깨부, 팔꿈치부의 경우 토크의 증가를 위해 감속기가 사용되었으며, 중량은 어깨부의 경우 500g 이다. 위와 같이 간단한 기구학, 분산 제어기 구조 및 전기 브레이크를 이용함으로써, 장치의 소형화, 경량화 및 이동의 용이성을 가능하게 할 수 있다.

3. 휴먼 로봇의 원격조종

본 장에서는 2장에서 제안된 마스터 암의 성능을 가상환경(VE:virtual environment) 및 실제 슬레이브 로봇과의 실시간 원격조종 실험을 통하여 검토한다.

3.1 보정

본 절에서는 2.1절에서 유도된 기구학 해의 타당성이 보정 실험을 통하여 검토된다. 어깨부의 경우, 그림 2의 d_1, d_2 는 HO에 따라, 또는 동일한 HO라도 착용시마다 변하는 변수임과 동시에, 제안된 마스터 암의 기구학 해의 유도를 위해서 반드시 필요한 변수들이다. 이의 검토를 위해 어깨부 유연관절 (θ_4) 에 센서(인코더)를 장착하여 보정 전후의 계산된 값과 실제 센서로부터의 측정값을 그림 9와 같이 비교하였다. 보정 알고리즘으로는 비선형 최소자승법(nonlinear least square method)을 이용하였다.

그림으로부터 보정 후에 계산된 θ_4 가 보정 전보다 실제 값에 더욱 근접한 것을 보여준다. 이때의 실제값과의 오차는 작업자의 팔이 정확히 고정된 중심을 가지고 구 운동을 하지 않는 것에서 비롯된 결과이다.

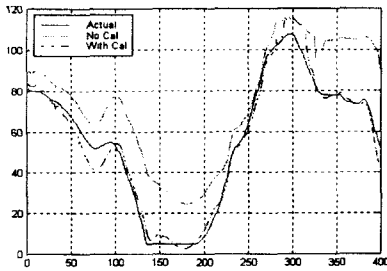


그림 9. θ_4 의 측정치, 보정전 계산치, 보정후 계산치 비교

Fig. 9. θ_4 comparison of measured, and calculated with/without calibration θ_4

다음은 θ_4 를 포함한 모든 축에 대한 보정의 성능 검증을 위하여, 부착점의 위치를 IGT사의 Flashpoint를 이용하여 실제 측정하고 보정 전후 계산된 추정값과 비교하였다. 그림 10은 마스터 암의 오른쪽 어깨 부분의 베이스를 기준으로 하였을 때의 실험결과를 나타내고 있다. X는 어깨 부분 베이스를 나타내며, O는 실제 측정값, +는 보정을 수행하지 않은 추정값, 그리고 *는 보정을 행한 후 추정된 부착점의 위치를 나타낸다.

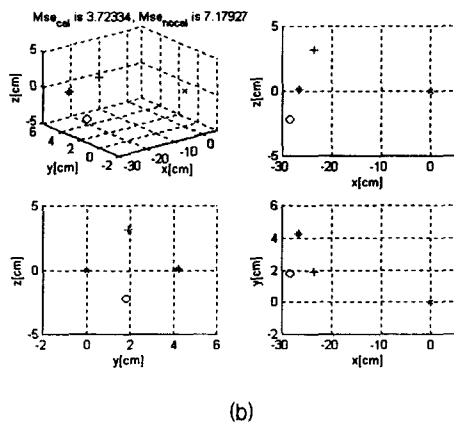
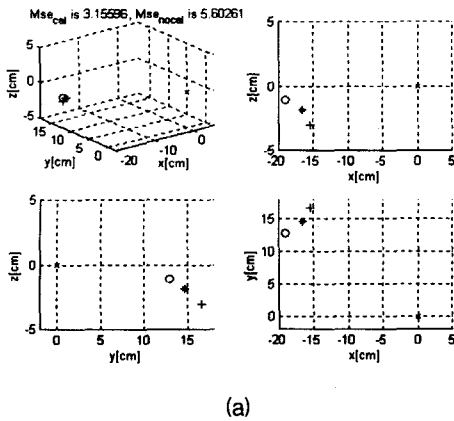


그림 10. 보정 전후와 실제 측정값의 부착점 비교

Fig. 10. Point comparison of measured and calculated with/without calibration

실험 결과로부터 보정을 수행함으로써 평균제곱오차(MSE)가 각각 5.60261[cm]와 7.17927[cm]에서 3.15596[cm]와 3.72334[cm]로 감소됨을 알 수 있다. 이로부터 2장에서 제안된 기구학 해의 타당함을 확인할 수 있으며, 따라서 본 마스터 암이 서론에서 언급된 바와 같이 인간 팔 운동과 거의 유사한 자세/모션 캡처를 가능케함을 확인할 수 있다.

3.2 관절 변환

본 절에서는 마스터 암에 의해 원격조종되는 휴먼 로봇 센토의 관절 변수 변환 과정을 설명한다.

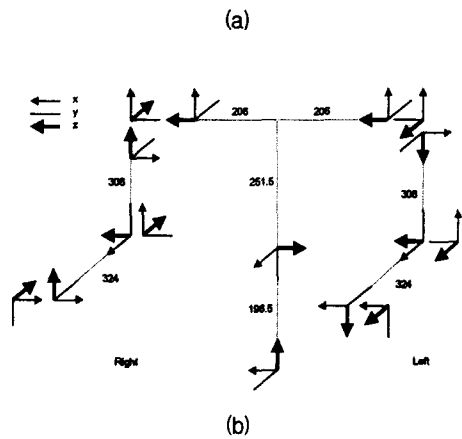
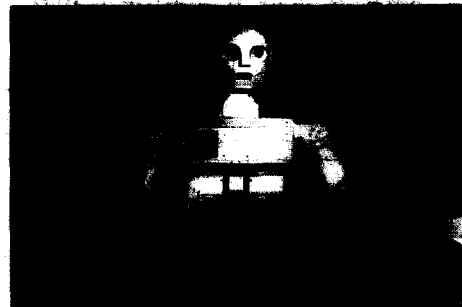


그림 11. 휴먼 로봇 센토 (a) 와 기구학 구조 (b) [mm]

Fig. 11 Humanoid robot Centaur (a) and its kinematic structure (b) [mm]

휴먼 로봇 센토의 외형 및 기구학 구조는 그림 11과 같다. 그림으로부터 센토의 어깨 부분 3축과 팔꿈치 부분 1축은 인간과 동일한 구조를 갖지만 손목 부분은 Euler(z-y-z) 형태로 되어있음을 알 수 있다. 따라서, 마스터 암의 자세 정보 추종을 위해서는 센토 관절 변수로의 변환 과정이 요구된다. 센토는 좌우가 유사한 구조로 되어 있으므로 오른팔의 경우만 서술한다. 센토의 관절 변수로의 변환을 위해 마스터 암으로부터 얻어지는 작업자의 오른팔 자세 정보를 다음과 같이 표기하기로 한다.

$A = [A_x \ A_y \ A_z]^T$ - 작업자의 어깨 중심점
 $B = [B_x \ B_y \ B_z]^T$ - 작업자의 팔꿈치 중심점
 $C = [C_x \ C_y \ C_z]^T$ - 작업자의 손목 중심점
 θ_{me} - 작업자의 팔꿈치 부분 회전각
 Rot - 작업자 손목 중심의 오리엔테이션 행렬(3x3)

그림으로부터 구하고자 하는 센토의 관절 변수는 $\theta = [\theta_3 \ \theta_4 \ \dots \ \theta_9]$ (radian) 이다. 이 가운데, 어깨 부분의 변환은 A, B, C점의 좌표를 이용하여 다음과 같이 유도된다.

$$\theta_3 = \text{atan2}(\overrightarrow{A'B_y}, \overrightarrow{A'B_x}) + \pi \quad (18)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(\overrightarrow{A'B_{4y}}, \overrightarrow{A'B_{4x}}) \quad (19)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(\overrightarrow{B'C_{5y}}, \overrightarrow{B'C_{5x}}) + \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

$$\theta_6 = -\theta_{me} \quad (21)$$

식 (18)~(20)의 A' , B' , C' 는 각각 $A' = \text{rot}_m^s A$, $B' = \text{rot}_m^s B$, $C' = \text{rot}_m^s C$ 와 같이 정의되는 A, B, C 를 센토 좌표계를 기준으로 한 점이다. (즉, $P_s = \text{rot}_m^s P_m$, P_m : 마스터 암 좌표계에서의 점, P_s : 센토 좌표계에서의 점)

센토의 손목은 인간의 손목과 다른 z-y-z 구조이기 때문에, 마스터 암으로부터 얻을 수 있는 작업자 손목의 오리엔테이션 행렬과 센토의 손목부에서 z-y-z 회전에 의해 얻어진 말단부(end effector)의 오리엔테이션 행렬을 동일하게 함으로써, z-y-z의 회전 값들을 계산할 수 있다. 여기서 r_{ij}' 는 Rot 행렬의 i행 j열에 위치하는 원소이며, 결과식은 다음과 같다.

$$\theta_7 = \text{atan2}(\sqrt{r'_{13}{}^2 + r'_{23}{}^2}, r'_{33}) \quad (22)$$

$$\theta_8 = \text{atan2}(r'_{13}/\sin \theta_8, -r'_{23}/\sin \theta_8) \quad (23)$$

$$\theta_9 = \text{atan2}(-r'_{32}/\sin \theta_8, r'_{31}/\sin \theta_8) \quad (24)$$

가 된다.

$\theta_8 = 0$ 이면,

$$\theta_7 = 0, \theta_8 = 0 \quad (25)$$

$$\theta_9 = \text{atan2}(-r'_{11}, -r'_{12}) \quad (26)$$

$\theta_8 = -\frac{\pi}{2}$ 이면,

$$\theta_7 = 0, \theta_8 = -\frac{\pi}{2} \quad (27)$$

$$\theta_9 = \text{atan2}(r'_{11}, r'_{12}) \quad (28)$$

으로 구해질 수 있다.

왼쪽부의 경우에도 동일한 방법을 적용하여, 마스터 암의 자세 정보로부터 실험 대상인 센토 관절로의 간단한 변환이 가능하다. 또한, 비록 본 연구에서는 슬레이브 로봇을 휴먼 로봇의 경우에 제한하여 언급하고 있지만, 제한된 마스터 암은 특정 로봇의 기구학에 기초한 것이 아니므로 기준좌표계(world coordinates)에서 마스터/슬레이브간의 scaled TCP 매핑에 의한 관절 변환 방식을 이용함으로써, 산업용 로봇등의 다양한 슬레이브 로봇과의 결합도 가능하다[10].

3.3 원격조종 실험

제한된 마스터 암을 이용한 휴먼 로봇 센토의 원격조종 시스템은 다음과 같다.

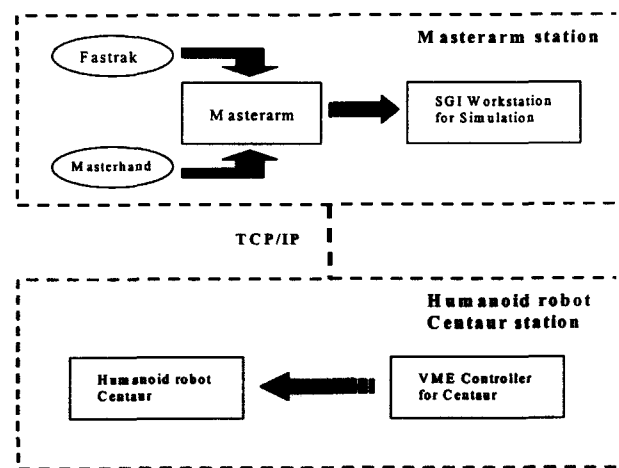


그림 12. 휴먼 로봇 센토의 원격조종 시스템
 Fig. 12. The teleoperation system of humanoid robot, CENTAUR

마스터 암의 중앙제어기(DSP)는 위성제어기(PIC)로부터 전송되는 관절 값에 의해 작업자의 자세를 감지하고, 이를 다시 센토의 관절 변수로 변환한다. 중앙제어기에서 변환된 센토의 관절 변수는 마스터 암으로부터 38400 bps의 직렬 통신을 이용하여 SGI(Silicon Graphics Indigo2) 워크스테이션으로 전송된다. SGI 워크스테이션에서는 실제 로봇의 원격조종에 앞서 성능 검사를 위한 시뮬레이션이 수행되며, 이러한 가상 로봇과의 시뮬레이션은 SGI의 그래픽 시뮬레이터 Envision TR을 이용하였다. 최종적으로 마스터 암 중앙제어기로부터 센토 제어기로의 데이터 전송은 TCP/IP를 이용하여 SGI로 보내진 데이터를 실시간으로 전송하게 된다.

본 원격조종 실험에서는 실제 로봇 센토의 보다 정교한 자세 추종 수행이 가능하도록 그림 9와 같은 x, y, z, roll, pitch, yaw의 위치/방향 데이터를 알려주는 자세 포착 장치 Fastrak과 작업자의 손에 착용하는 마스터 핸드(master hand)를 부가적으로 장착하였다.

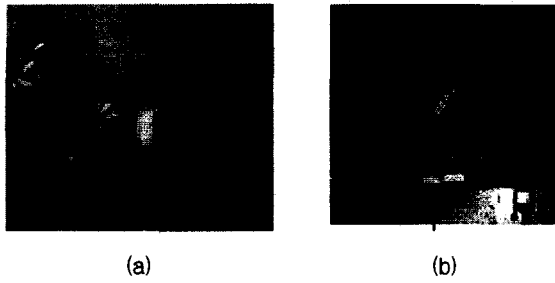


그림 13. 원격조종 시스템에 사용된 마스터 핸드 (a) 및 Fastrak (b)
 Fig. 13. Masterhand (a) and Fastrak (b) used for teleoperation system

3.3.1 VE와의 결합에 의한 힘 반향 실험

본 절에서는 제안된 마스터 암의 힘 반향 기능이 가상환경(VE : virtual environment)과의 결합(integration)을 통하여 검토된다.

다음 그림 14와 15는 센토의 모델링된 그래픽 로봇 (graphic robot)과 임피던스(impedance) 형태의 VE를 나타낸다.



그림 14. 센토의 그래픽 모델과의 결합
 Fig. 14. Integration with the graphic model of CENTAUR

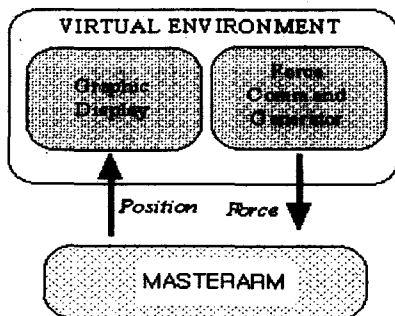


그림 15. 임피던스 형태의 VE 정보 흐름도
 Fig. 15. Schematic information flow for impedance type VE

VE는 다음과 같은 Hooke의 법칙에 기초하여 접촉시 (contact)의 reaction 힘이 계산된다.

$$F = k \cdot \Delta$$

여기서, F 는 접촉시 VE로부터 얻어지는 reaction 힘, k 는 강성계수(stiffness), Δ 는 interpenetration 양이다.

Reaction 힘에 대해 마스터 암으로 반향 되는 힘은 2.3절에서 소개된 자코비안으로부터 계산되며, 이때 roll-pitch-yaw 방향의 모멘트는 0이 된다. 두 강성계수를 갖는 VE가 고려되었으며, 가상벽과의 경계는 $x=-500$ [mm]로 설정하였다.

i) Solid Wall Case : High stiffness ($k_x = k_y = k_z = 10000$ [N/m])

강성계수가 클수록 딱딱한 벽(solid wall)을 의미한다. 이 경우, Δx , Δy , Δz 가 매우 작고 상대적으로 각 관절에 부가 되는 토크가 큰 값을 가진다. 따라서 벽에 접촉이 있을 경우 작업자가 거의 움직일 수 없게 된다.

그림 16(a)은 이 경우에 움직인 마스터 암의 1, 2, 3, 7번 각의 회전 값을 나타내며, 접촉시 HO가 전혀 움직일 수 없음을 알 수 있다. (b)는 마스터 암 끝점의 x, y, z 궤적을 나타내며, 가상의 벽과의 접촉시 움직임이 제약되는 것을 알 수 있다(x 좌표 궤적). 이 때의 브레이크 스위치와 브레이크에 대한 PWM의 값을 (c)에 나타내었으며, 브레이크 스위치의 상태가 ON에서 OFF로 변화되었을 때 반대 방향 동작을 감지하였으며(그림 8 토오크 감지용 장치 : AB), PWM의 값이 reset 되어 작업자의 자유동작(free motion)이 가능해짐을 알 수 있다.

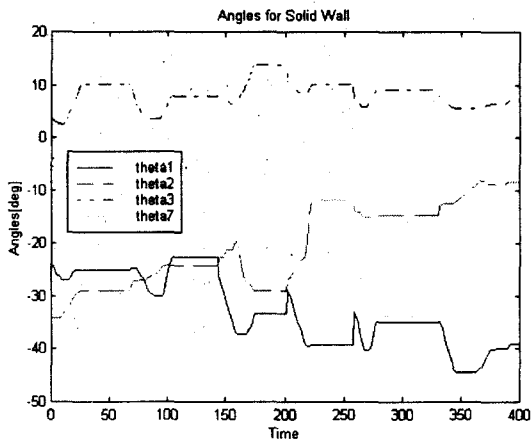
ii) Soft Wall Case : Small Stiffness ($k_x = k_y = k_z = 0.1$ [N/m])

실험으로부터 얻어진 결과는 그림 17과 같다. 그림 17(a)와 (b)로부터 접촉시에 강성계수가 큰 i)의 경우보다 자유롭게 움직이는 것을 알 수 있다. (c)는 VE로부터의 힘을 (d)는 마스터 암의 각 관절로 퍼드백되는 토오크를 나타내며, (e)는 이때의 브레이크 구동 PWM을 나타낸다.

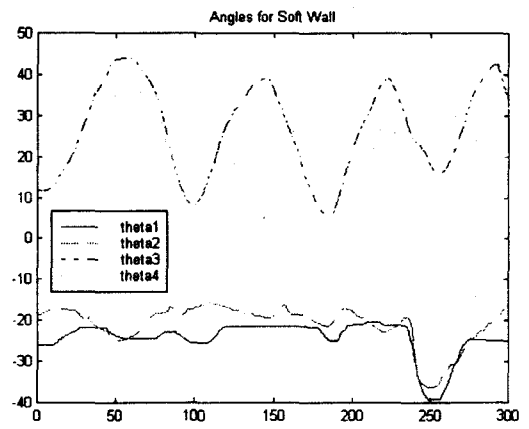
위의 두 다른 강성계수를 갖는 VE와의 힘 반향 실험으로 제안된 마스터 암의 힘 반향 구현 기능에 대한 검토가 이루어졌다. 작은 강성계수를 갖는 VE와의 힘 반향 실험 결과로부터 본 마스터 암이 만족스런 힘 반향 성능을 가짐을 확인할 수 있었으며, 이는 서론에서 언급한 바와 같이, 전기 모터를 대신함으로써 마스터 장치의 소형화 및 경량화를 가능케 하는 중요한 배경이 될 것이다. 현재 토오크 센서 빔을 이용한 보다 정교한 힘 반향 구현 기능을 갖는 2차 Prototype에 대한 연구가 진행중에 있다[11].

3.3.2 원격조종 실험

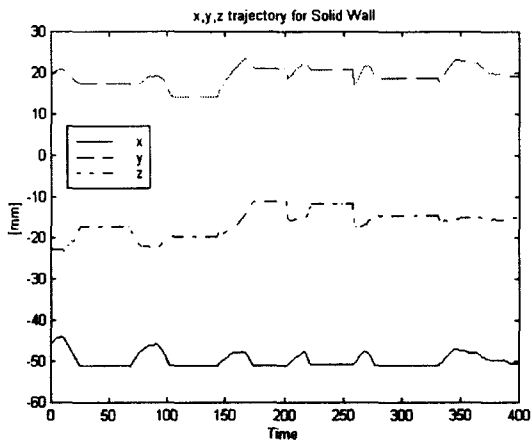
본 절에서는 실제로봇과의 실시간 원격조종 실험을 통하여 제안된 마스터 암과 슬레이브 로봇간의 자세/모션(또는 위치) 추종 성능을 검토하였다.



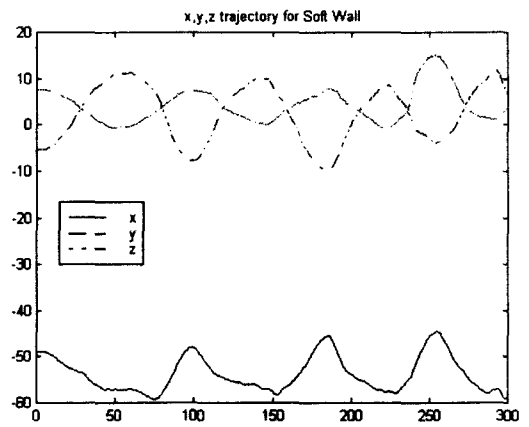
(a) 관절 변수 궤적



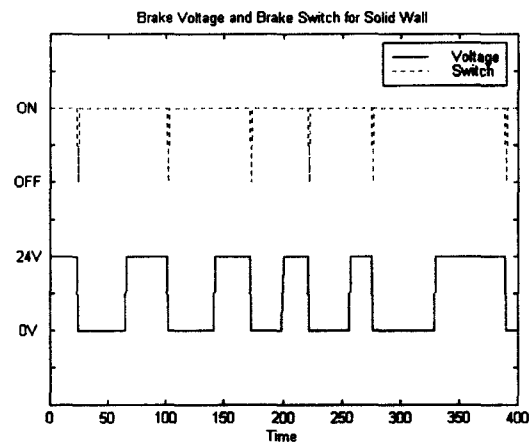
(a) 관절 변수 궤적



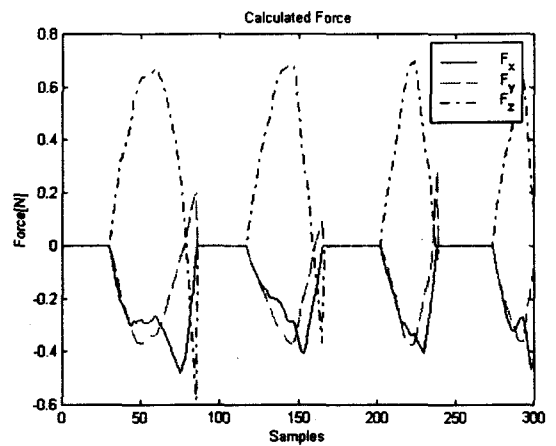
(b) 말단 궤적



(b) 말단 궤적

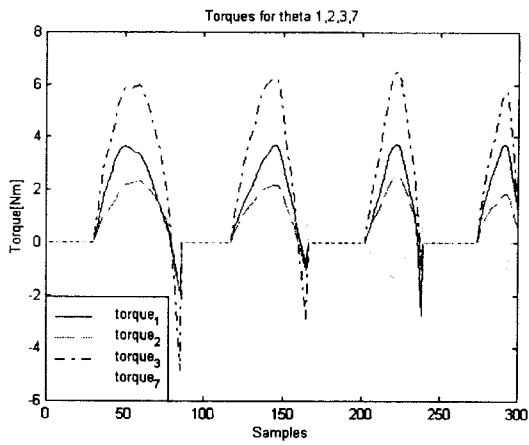


(c) 브레이크의 스위치와 구동 PWM

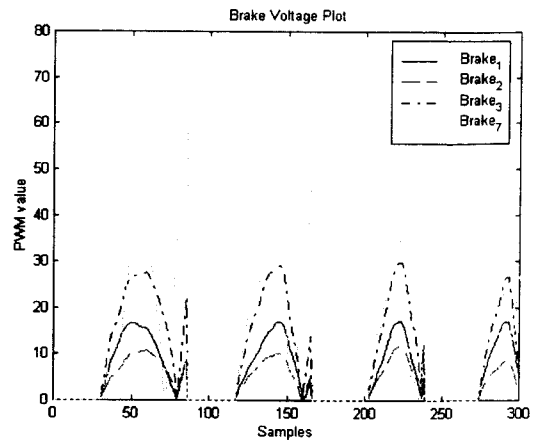


(c) 힘 궤적

그림 16. 10000(N/m) 강성계수를 갖는 VE와의 힘 반향 실험
 Fig. 16. Force reflection integrated VE with stiffness 10000(N/m)

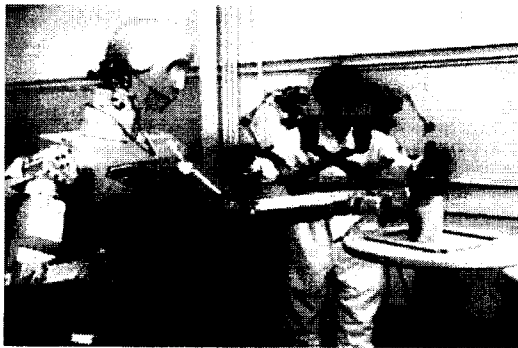


(d) 관절 토크



(e) 브레이크 구동 PWM

그림 17. 0.1[N/m] 강성계수를 갖는 VE와의 힘 반향 실험
Fig. 17. Force reflection integrated VE with stiffness 0.1[N/m]



(a)



(c)



(b)



(d)

그림 18. HO와 센토와의 원격조종에 의한 자세/모션 추종 장면
Fig. 18. Photos of posture/motion tracking of HO/CENTAUR via Teleoperation

그림 18은 수행된 원격조종 실험 장면의 일부를 나타낸다. 그림으로부터 원격조종에 의해 제안된 마스터 암과 휴먼 로봇과의 유사한 자세/모션 추종이 이루어짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 휴먼 로봇의 원격조종을 위하여 인간 기구학과 분산 제어기 구조에 기초하여 개발된 새로운 마스터 암이 제안되었다. 제안된 마스터 암은 인간 기구학에 기초하고 있기 때문에 인간의 동작과 유사한 로봇 동작을 재현할 수 있을 뿐만 아니라, 넓은 동작 범위를 가능하게 할 수 있었다. 독립 관절의 수를 최소화하는 기구학 구조, 액츄에이터로의 전기 브레이크와 분산 제어기 구조는 힘 반향 기능을 갖는 본 마스터 암의 소형화, 경량화 및 이동의 용이함을 가능하게 하였다. 설계된 메카니즘의 기구학적 타당성과 모션 추종 및 힘 반향 기능의 타당성이 보정 실험과 한국과학기술연구원 에서 개발된 휴먼 로봇 센토(CENTAUR)와의 원격조종 실험 으로부터 확인되었다. 따라서, 본 마스터 암은 인간을 대신 하는 극한작업의 원격조종 뿐만 아니라, Macro IMS (intelligent manufacturing system) 산업용 로봇의 경로생성 장치로서도 유용하게 사용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. C. Goertz, "Manipulator Systems Development at ANL," *Proc. the 12th Conference on Remote Systems Technology*, American Nuclear Society, pp. 117-136, 1954.
- [2] Jean Vertut, Philippe Coiffet, *Teleoperation and Robotics: Applications and Technology*, Kogan Page, 1985
- [3] T. B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1992
- [4] J. M. Hollerbach, "Some Current Issues in Haptics Research," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 757-762, 2000.
- [5] M. Bergamasco et al., "An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environments Applications," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1449-1454, 1994.
- [6] S. Lee, D. Choi, M. Kim, C. -W. Lee, J. Song, "An Unified Approach to Teleoperation: Human and Robot Integration", *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp 361-366. 1998
- [7] 차인혁, 한창수, 이병주, "IMS를 위한 Human Interface 시스템 개발," *한국정밀공학회지*, pp. 156-164, no. 15, vol. 8, 1998.
- [8] S. Lee, J. Lee, W. Chung, M. Kim, C. -W. Lee, M. Park, "A New Exoskeleton-type Masterarm with Force Reflection : Controller and Integration", *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp 1438-1443, 1999
- [9] S. Lee, J. Lee, D. Choi, M. Kim, C. -W. Lee, "Distributed Controller Architecture for a Masterarm and its Application to Teleoperation with Force Feedback", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 213-218, 1999
- [10] 산업용 로봇 경로생성을 위한 인간 팔 장착형 Teaching 장치의 개발, KIST, 2000.
- [11] Y. S. Kim, S. Lee, C. Cho, M. Kim, C. -W. Lee, "A New Exoskeleton-type Masterarm with Force Reflection based on the Torque Sensor Beam", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (accepted and to be appear) 2001.

저 자 소 개



김 윤 상 (金潤相)

1993년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 동 대학원 졸업(박사). 1999년~2000년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 POST- DOC. 2000년 9월~현재 University of Washington

전기공학과, Visiting scientist & POST-DOC.(과학재단해외포닥).

Tel : 206-616-4936, Fax : 206-543-3842

Email : yoonsang@rcs.ee.washington.edu



김 문 상 (金汶相)

1980년 서울대 기계설계학과 졸업. 1982년 서울대 기계설계학과 졸업(석사). 1987년 Technical University of Berlin 졸업(박사). 1987년~현재 한국과학기술연구원 휴먼로봇센터 책임연구원. 1996년 University of

Michigan/Perceptron Inc. Visiting faculty & Senior soft engineer. 2000년~현재 휴먼로봇연구센터 센터장.

Tel : 958-5623, Fax : 958-5629

Email : munsang@kist.re.kr



이 장 옥 (李章旭)

1997년 성균관대 제어계측공학과 졸업. 1999년 연세대 전자공학과 졸업(석사). 1997년~1999년 한국과학기술연구원 시스템연구부 연구원(학연). 2000년~현재 삼성 SDI Corporate R&D Center 전임연구원.

Tel : 031-210-7863, Fax : 031-210-8489

Email : tante@samsung.co.kr



이 종 원 (李宗元)

1968년 서울대 기계공학과 졸업. 1971년 University of Minnesota (Twin Cities) 항공공학과 졸업(석사). 1976년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학). 1977년 University of Colorado (Boulder) 조교수. 1988년~1991

년 과학기술처 연구개발조정실 기계연구조정관. 1995년~1999년 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 센터장. 1978년~현재 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 책임연구원.

Tel : 958-5611, Fax : 958-5629

Email : cwlee@kist.re.kr



이 수 용 (李秀容)

1989년 서울대 기계공학과 졸업. 1991년 서울대 기계설계학과 졸업(석사). 1996년 Massachusetts Institute of Technology 기계공학과 졸업(공학). 1996년~2000년 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연

구원. 1999년~2000년 Texas A&M University 전산과, 전자과, Visiting faculty. 2000년~현재 Texas A&M University 기계공학과 조교수.

Tel : 979-845-5243, Fax : 979-862-2418

Email : SLee@mengr.tamu.edu