

분산 제어기 구조를 갖는 마스터 암의 기구학 설계 및 해석

Kinematic Design and Analysis of Masterarm with Distributed Controller Architecture

이 장 욱, 김 윤 상, 이 수 용, 김 문 상
(Jangwook Lee, Yoonsang Kim, Sooyong Lee, and Munsang Kim)

Abstract : In robot teleoperation, much research has been carried out to control the slave robot from remote site. One of the essential devices for robot teleoperation is the masterarm, which is a path command generating device worn on human arm. In this paper, a new masterarm based on human kinematics is proposed. Its controller is based on the distributed controller architecture composed of two controller parts: a host controller and a set of satellite controllers. Each satellite controller measures the corresponding joint angle, while the host controller performs forward and inverse kinematics calculation. This distributed controller architecture can make the data updating faster, which allows to implement real-time implementation. The host controller and the satellite controllers are networked via three-wire daisy-chained SPI(Serial Peripheral Interface) protocol, so this architecture makes the electrical wiring very simple, and enhances maintenance. Analytical method for finding three additional unknown joint angles is derived using only three measured angles for each shoulder and wrist, which makes the hardware implementation very simple by minimizing the required number of satellite controllers. Finally, the simulation and experiment results are given to demonstrate the usefulness and performance of the proposed masterarm.

Keywords : masterarm, teleoperation, distributed controller architecture

I. 서론

로보틱스(robotics)는 전자, 기계 및 제어 기술의 급속한 발전과 더불어 가장 혁신적인 성장을 이룩한 분야중의 하나이다. 특히, 원거리상에서 로봇을 제어함으로써 인간의 작업을 로봇이 대신하는 원격제어(teleoperation)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 원격제어는 작업자(human operator)와 제어 대상 로봇이 동일한 작업 공간에 있지 않아도 되는 장점으로 인간의 접근이 어렵거나 위험한 극한 심해저(underwater), 우주(space), 원전(nuclear power plants) 환경의 다양한 작업이나 원격수술(tele-surgery) 및 폭발물제거등에 광범위하게 적용되고 있다 [1][2].

마스터 장치(master device)는 힘 반영 기능을 갖도록 설계된 원격제어 시스템의 핵심적인 제어 조종 장치로, 경로 생성 장치(teaching pendant)와 마스터 암(masterarm)이 가장 널리 사용되고 있다. 경로 생성 장치는 작업자의 손으로 로봇을 제어하도록 조이스틱 또는 스위치등으로 구성된 마스터 장치이다. 이러한 경로 생성 장치는 사용이 간편하고 생산 비용이 적지만, 로봇이 항상 관찰 가능한 위치에 있어야 하고 작업자의 사고를 신속하게 반영할 수 없는 단점이 있다. 마스터 암은 작업자의 팔에 착용하여 작업 대상인 실제 로봇을 제어할 수 있도록 경로 명령(path

command)을 생성하는 장치이다. 이러한 마스터 암은 경로 생성 장치에 비해 인간 팔 운동에 기초하여 보다 자연스럽게 광범위한 경로로 움직일 수 있기 때문에, 최근 원격제어 장치로 널리 이용되고 있다. 마스터 암은 인간의 팔에 직접 부착되는 장치이므로 착용의 간편성, 경량성 및 간단한 기구학을 가지도록 설계되는 것이 중요하다. 그러나, 기존의 마스터 암은 주로 인간의 기구학이 아닌 특정 로봇의 기구학에 기반하여 설계되었기 때문에, 장치의 무거움 및 착용의 불편함과 같은 사용상의 단점과 다양한 로봇에 적용할 수 없는 단점을 가진다[2][4].

본 논문에서는 인간의 기구학(human kinematics)에 기반한 새로운 마스터 암을 제안하고자 한다. 제안하는 마스터 암은 기구학적 간섭을 피하기 위해서 인간의 기구학에 기반하여 인간의 어깨와 손목에 대해 각각 기본 자유도(d.o.f:degree of freedom) 3개와 여유 자유도 3개를 가진 형태로 설계한다. 또한, 전체시스템을 간단화하기 위해 중앙제어기(host controller)와 위성제어기(satellite controller)로 구성된 분산 제어기 구조(distributed controller architecture)를 이용한다. 이러한 분산 제어기 구조는 3선 테이저-체인(daisy-chain) 방식으로 연결하는 SPI(Serial Peripheral Interface) 프로토콜에 의해 각 제어기들을 중앙제어기(host controller)와 위성제어기(satellite controller)로 구성한 것으로, 전체시스템의 신속한 데이터 통신을 가능하게 할 뿐만 아니라, 선 연결(wiring) 및 유지 보수를 보다 편리하게 할 것이다. 또한, 설계시 요구되는 위성제어기의 수를 최소화하기 위해 어깨와 손목 3개의 회전관절 측정값으로부터 나머지 3개의 회전 관절값을 추가의 센서 및 위성제어기없이 구할 수 있는 기구학 해를 유도한다. 따라

접수일자 : 2000. 7. 12., 수정완료 : 2001. 2. 7.

이장욱 : SDI R&D 센터(tante@samsung.co.kr)

김윤상 : University of Washington 전기공학과(yoonsang@rcs.ee.washington.edu)

이수용 : Texas A&M University 기계공학과(SLee@mengr.tam.u.edu)

김문상 : 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터(munsang@kist.re.kr)

서, 제안된 마스터 암은 인간 기구학에 기반하여 최소화된 간단한 하드웨어 장치로부터 인간의 자세 정보를 보다 신속하고 간단하게 로봇의 정보로 변환할 수 있으며, 이로부터 보다 효율적인 실제 로봇의 실시간 원격제어를 가능하게 할 것이다.

II. 분산 제어기 구조

기존의 마스터 암은 대부분 하나의 제어기로 구성된 단일 제어기 구조를 사용하였다. 이러한 단일 제어기 구조는 제어기와 각 관절 측정장치와의 일대일 연결에 의해 선 연결을 복잡하게 만들뿐 아니라, 전기적 잡음의 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한, 단일 제어기만으로 관절값의 측정과 제어 신호를 모두 처리해야 하기 때문에, 측정 장치로부터 전달되는 데이터의 갱신 속도를 저하하는 원인이 된다. 제안하는 마스터 암은 이러한 단점을 보완하기 위하여 분산 제어기 구조[5]-[7]에 기반하여 제어기를 중앙제어기와 위성제어기 두 부분으로 나누어 구성하였다. 즉, 중앙제어기는 기구학 해 및 관절 변수 변환등의 연산과 직렬 통신(serial communication)에 의한 슬레이브 로봇 제어기와의 제어 신호 통신을 담당하고, 위성제어기는 회전관절 측마다 부착되어 각 관절의 측정된 회전각을 중앙제어기로 전송하는 역할을 담당한다. 중앙제어기와 위성제어기들은 SPI 프로토콜을 이용하여 연결하였다. SPI 프로토콜은 클럭(CLK)의 생성 여부로 중앙제어기와 위성제어기를 구분하는 데이터 입력(SDI), 데이터 출력(SDO), 및 클럭(CLK) 3개의 선만으로 통신을 수행하는 규약이다. 그림 1은 제안된 마스터 암에 사용된 분산 제어기 구조를 나타낸다. 그림 1과 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 통신선 연결로 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.

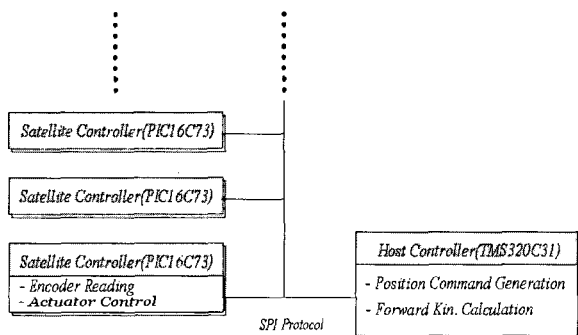


그림 1. 분산 제어기 구조.
Fig. 1. Distributed controller architecture.

마스터 암의 중앙제어기는 기구학 해 유도, 관절 변수 변환 및 힘/토크 변환의 자코비안과 같은 수치적 연산을 많이 수행해야 하기 때문에 고속의 프로세서가 요구된다. 따라서, 제안된 마스터 암의 중앙제어기와 위성제어기로는 각각 고속의 부동 소수점 연산 기능을 갖는 TMS320C31(50MHz) DSP와 소형의 SPI 모듈을 내장한 PIC16C73(20MHz) 프로세서를 사용하였다. 그림 2는 분산 제어기 구조에 기반하여 설계 제작된 제안하는 마스터 암 중앙제어기와 위성제어기의 하드웨어 외형을 각각 나타낸다.

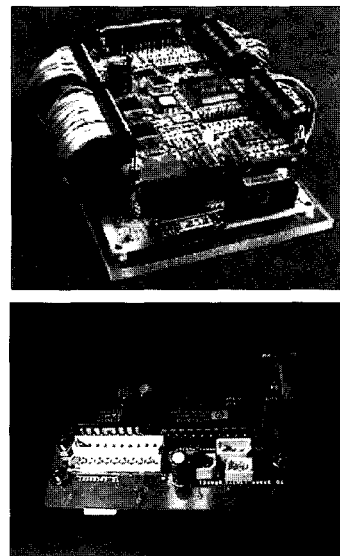


그림 2. (a) 중앙제어기 (b) 위성제어기.
Fig. 2. (a) Host controller (b) Satellite controller.

각각의 위성제어기는 관절 정보의 측정외에 액츄에이터 제어를 위한 모듈을 가지고 있으며, 이는 다음과 같은 힘/토크 변환 자코비안식으로부터 얻어지는 각 관절의 토크 값을 중앙제어기로부터 받음으로써 할당된 관절의 제어만을 국부적으로 수행하게 된다[6][7].

$$\tau = J^T_{master} F_{slave} \tag{1}$$

단, τ : 13x1 마스터 암의 각 관절 토크 벡터이며, J_{master} 및 F_{slave} 는 각각 다음과 같은 마스터 암의 자코비안과 슬레이브 로봇 힘/모멘트 벡터이다.

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

$$F_{slave} = [F_x \ F_y \ F_z \ F_\alpha \ F_\beta \ F_\gamma]^T$$

따라서, 위와 같은 분산 제어기 구조를 갖는 마스터 암은 중앙제어기와 위성제어기의 역할을 분담시킴으로써, 원격 제어 시스템의 실시간 구현을 보다 용이하게 할 것이다.

III. 인간 기구학 기반 마스터 암

1. 기구학 구조

마스터 암의 설계 시 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. 즉, 자세 정보 획득의 용이성, 착용 및 조작의 편리함 및 유지 보수의 간결성을 위해 기구학적으로도 간단하게 설계되어야 한다. 인간의 팔 운동은 3 자유도의 어깨, 1 자유도의 팔꿈치 및 3 자유도의 손목에 기반한다. 따라서, 한 팔에 7축(3+1+3)의 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 그림 3과 같이 기구학적 간섭을 피할 수 있는 마스터 암을 설계하였다.

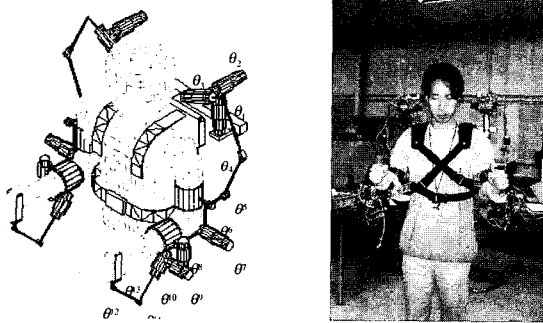
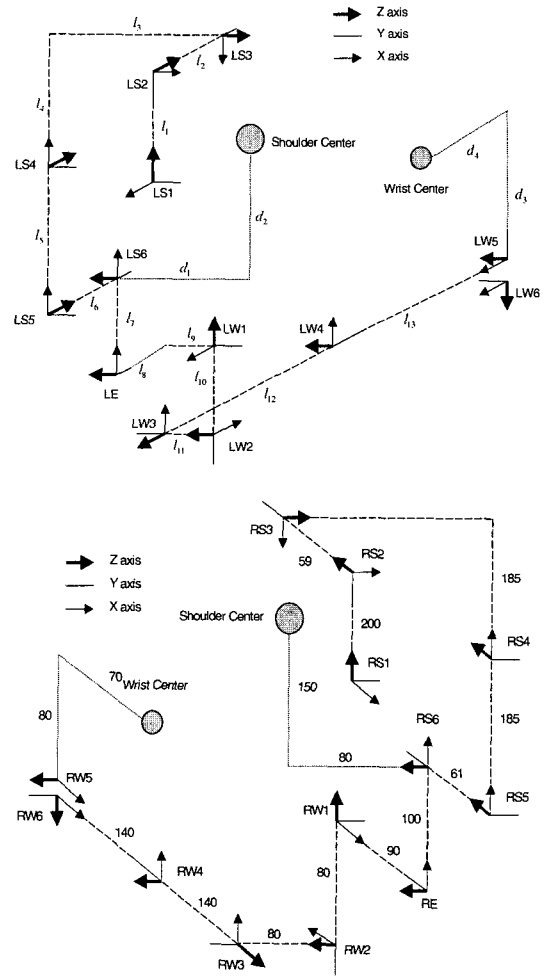


그림 3. 제안된 인간 기구학 기반 마스터 암의 외형과 실제 착용 모습.

Fig 3. Proposed masterarm based on human kinematics.

제안된 인간 기구학 기반의 마스터 암은 그림 4와 같이 어깨 및 손목 각각에 6축과 팔꿈치 각각 1축의 총 13축으로 구성된다. 이때 어깨와 손목의 6축 중 3축이 기본 회전축이 되며, 나머지 3축은 기본 3축에 종속되는 여유 관절이 된다. 따라서, 기본 3축의 값이 정해지면 나머지 종속 3축의 값도 정해지게 된다. 즉, 나머지 종속 3축의 여유 관절 회전각은 측정 장치를 직접 부착하지 않고 기본 3축의 관절 회전각의 측정으로부터 얻어질 수 있다. 이러한 측정된 기본 관절 회전각으로부터 추가의 측정 장치 없이 여유 관절의 회전각을 얻을 수 있는 기구학적 해의 유도 과정은 다음의 2절에서 설명한다.



$\theta_1(LS1), \dots, \theta_6(LS6), \theta_7(LE), \theta_8(LW1), \dots, \theta_{13}(LW6)$ (Left arm) : Back View

그림 4. 제안된 마스터 암의 기구학 구조. (a) 왼쪽, (b) 오른쪽 [mm].

Fig. 4. Kinematic structure of proposed masterarm. (a) Left, (b) Right [mm].

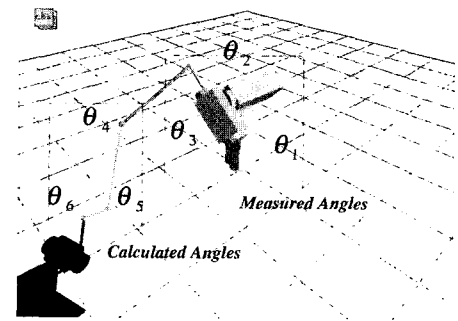


그림 5. 어깨부분의 측정 관절($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)과 계산 관절($\theta_4, \theta_5, \theta_6$).

Fig. 5. Measured angles($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) and calculated angles($\theta_4, \theta_5, \theta_6$) of shoulder parts.

2. 기구학 해의 유도

관절 변수 측정을 위해 요구되는 측정 장치, 인코더(encoder) 수의 최소화는 위성제어기의 수를 감소시킴으로써 하드웨어 구조를 간단하게 할 뿐만 아니라, 장치의 경량화를 가능하게 할 수 있다. 본 절에서는 이러한 목적으로 어깨와 손목 각각의 측정된 3개의 관절 회전각으로부터 측정 장치없이 나머지 3개의 관절 회전각을 얻을 수 있는 간단한 기구학 해의 유도 과정을 설명한다.

어깨 부분의 측정 관절과 계산 관절은 그림 5와 같다.

기구학 해를 유도하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

i) 그림 4 마스터 암의 어깨(손목) 회전 중심점은 고정된 점이며 알 수 있는 값이다.

ii) 부착점으로부터 팔 중심선까지의 거리(어깨부 d_1 , 손목부 d_3)와 중심점(어깨부 d_2 , 손목부 d_4)까지의 거리를 알 수 있다.

iii) 어깨와 손목은 각각 i)의 점을 중심으로 구 운동을 한다.

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 4의 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($\vec{O}_{4x}, \vec{O}_{4y}, \vec{O}_{4z}$)들과의 내적(innerproduct)으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{4x} \\ P_{4y} \\ P_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\vec{P}_s - \vec{O}_4) \cdot \vec{O}_{4x} \\ (\vec{P}_s - \vec{O}_4) \cdot \vec{O}_{4y} \\ (\vec{P}_s - \vec{O}_4) \cdot \vec{O}_{4z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

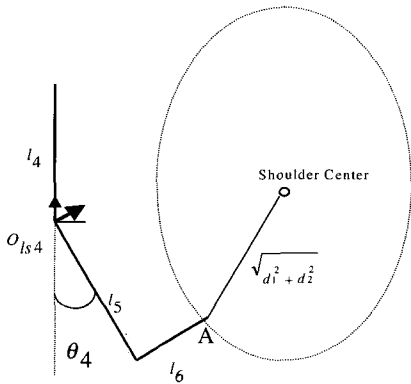


그림 6. θ_4 을 구하기 위한 A점의 조건.

Fig. 6. Condition of point A for θ_4 solution.

θ_4 는 그림 6과 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 집

합인 구 S_2 표면과의 교점 중 z 좌표가 l_6 인 점으로 놓을 수 있다.

θ_4 좌표계의 원점(O_{ls4})을 중심으로 하는 구 S_1 은 다음과 같다.

$$x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = l_5^2 + l_6^2 \quad (3)$$

또한 P_4 를 중심으로 하는 구 S_2 는 다음과 같다.

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

즉, (3)과 (4) 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 (5)와 (6)으로 나타나는 두 원의 교점이 A점이 된다.

$$x_4^2 + y_4^2 = l_5^2 \quad (5)$$

$$(x_4 - P_{4x})^2 + (y_4 - P_{4y})^2 = d_1^2 + d_2^2 - (l_6 - P_{4z})^2 \quad (6)$$

(5)에서 (6)을 빼면 다음과 같다.

$$2x_4P_{4x} - P_{4x}^2 + 2y_4P_{4y} - P_{4y}^2 = l_5^2 - d_1^2 - d_2^2 + (l_6 - P_{4z})^2 \quad (7)$$

(7)을 정리하면 다음과 같다.

$$x_4P_{4x} + y_4P_{4y} = \alpha \quad (8)$$

여기서

$$\alpha = \frac{P_{4x}^2 + P_{4y}^2 + l_5^2 - d_1^2 - d_2^2 + (l_6 - P_{4z})^2}{2} \quad (9)$$

따라서, y_4 는 다음과 같이 된다.

$$y_4 = \frac{\alpha - x_4P_{4x}}{P_{4y}} \quad (10)$$

이때, $y_4 = 0$ 이라면,

$$x_4 = \frac{\alpha}{P_{4x}} \quad (11)$$

이고, $y_4 \neq 0$ 이라면, (10)을 (5)에 대입하여 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

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

양변에 P_{4y}^2 를 곱하고 정리하면 다음과 같고,

$$(P_{4x}^2 + P_{4y}^2)x_4^2 - 2\alpha P_{4x}x_4 + \alpha^2 - (l_5 P_{4y})^2 = 0 \quad (13)$$

(13)을 x_4 와 y_4 에 대해 풀면,

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

$$y_4 = \frac{\alpha - x_4 P_{4x}}{P_{4y}} \quad (14)$$

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.

$$\theta_4 = \text{atan2}(y_4, x_4) - \pi \quad (15)$$

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

$$y_4 = \frac{\alpha - x_4 P_{4x}}{P_{4y}} \quad (16)$$

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 (17)과 (18)과 같다.

$$\theta_5 = \text{atan2}(y_5, x_5) - \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(P_{6y}, P_{6x}) \quad (18)$$

위의 과정은 왼쪽 어깨 3개의 독립관절로부터 추가의 측정장치 없이 나머지 3개의 여유관절을 유도하기 위한 과정을 설명하였다. 제안된 마스터 암은 그림 4와 같이 양쪽이 유사한 구조를 가지고 있기 때문에, 오른쪽 어깨 및 양쪽 손목 부분의 여유 관절각 역시 동일한 방법으로 간단하게 유도할 수 있다.

IV. 실험 및 고찰

1. 인간형 로봇 센토(Centaur)의 역기구학

제안하는 인간 기구학에 기반하여 설계된 마스터 암의 성능 및 유용성을 검토하기 위하여 한국과학기술연구원(KIST)에서 개발된 휴먼로봇(humanoid robot) Centaur와 결합한 원격제어 실험을 수행하였다. 본 절에서는 마스터 암과 결합되는 Centaur의 관절 변수 변환 과정을 고찰한다.

Centaur의 기구학 구조는 그림 7과 같다. 그림으로부터 Centaur의 어깨 부분 3축과 팔꿈치 부분 1축은 인간과 동일한 구조를 갖지만 손목 부분은 z-y-z 형태(Euler angle)로 되어있음을 알 수 있다. 따라서, 마스터 암의 자세 추종

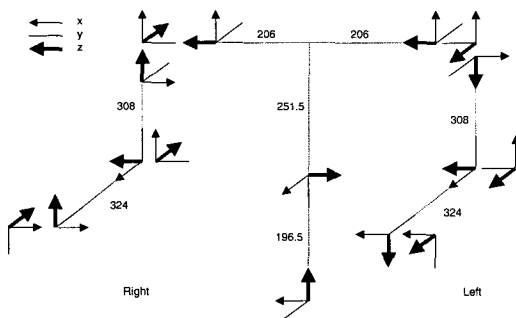


그림 7. 센토의 기구학 구조 [mm].

Fig. 7. Kinematic structure of centaur [mm].

을 위해서는 Centaur 관절 변수로의 변환 과정이 요구된다. Centaur는 좌우가 유사한 구조로 되어 있으므로 오른팔의 경우만 서술한다. Centaur의 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_7 - 작업자의 팔꿈치 부분 회전각

Rot - 작업자 손목 중심의 오리엔테이션 행렬(3x3)

구하고자 하는 Centaur의 관절 변수를 $\theta_c = [\theta_{c1} \ \theta_{c2} \ \dots \ \theta_{c7}]$ (radian)라고 하면(그림 7의 3번째 관절부터 해당됨), 어깨 부분의 관절은 위의 A, B, C점의 좌표를 이용한 다음과 같은 매핑 관계로부터 변환될 수 있다.

$$\theta_{c1} = \text{atan2}(\overrightarrow{A'B'}_y, \overrightarrow{A'B'}_x) + \pi \quad (19)$$

$$\theta_{c2} = \text{atan2}(\overrightarrow{A'B'}_{4y}, \overrightarrow{A'B'}_{4x}) \quad (20)$$

$$\theta_{c3} = \text{atan2}(\overrightarrow{B'C'}_{5y}, \overrightarrow{B'C'}_{5x}) + \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

$$\theta_{c4} = -\theta_7 \quad (22)$$

이때, 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 Centaur 좌표계를 기준으로 한 점이다(즉, $P_s = \text{rot}_m^s P_m$, P_m : 마스터 암 좌표계에서의 점, P_s : 센토 좌표계를 기준으로 한 점,

$$\text{rot}_m^s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Centaur의 손목은 인간의 손목과 다른 Euler angle의 z-y-z 구조이기 때문에, 마스터 암으로부터 얻을 수 있는 작업자 손목의 오리엔테이션 행렬과 Centaur의 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.

$$\theta_{c6} = \text{atan2}(\sqrt{r'_{13}{}^2 + r'_{23}{}^2}, r'_{33}) \quad (23)$$

$$\theta_{c5} = \text{atan2}(r'_{13}/\sin \theta_{c6}, -r'_{23}/\sin \theta_{c6}) \quad (24)$$

$$\theta_{c4} = \text{atan2}(-r'_{32}/\sin \theta_{c6}, r'_{31}/\sin \theta_{c6}) \quad (25)$$

가 된다.

$\theta_{c6} = 0$ 이라면

$$\theta_{c5} = 0 \quad (26)$$

$$\theta_{c4} = \text{atan2}(-r'_{11}, -r'_{12}) \quad (27)$$

이 된다.

또한, $\theta_{c6} = -\frac{\pi}{2}$ 이라면,

$$\theta_{c5} = 0 \quad (28)$$

$$\theta_{cl} = \text{atan2}(r'_{11}, r'_{12}) \quad (29)$$

으로 구해질 수 있다.

왼쪽 부분의 경우에도 동일한 방법을 적용하여, 마스터 암의 자세 정보로부터 실험 대상인 Centaur 관절로의 간단한 변환이 가능하다.

2. 실험결과 및 고찰

전체 실험 시스템의 구성은 그림 8과 같다. 마스터 암의 중앙제어기(DSP)는 위성제어기(PIC)로부터 전송되는 관절 값에 의해 작업자의 자세를 감지하고, 이를 다시 Centaur의 관절 변수로 변환한다. 중앙제어기에서 변환된 Centaur의 관절 변수는 그림 8과 같이 마스터 암으로부터 38400 bps의 직렬 통신을 이용하여 SGI(Silicon Graphics Indigo2) 워크스테이션으로 전송된다. SGI 워크스테이션에서는 실제 로봇과의 실험에 앞서 성능 검사를 위한 시뮬레이션이 수행되며, 가상 로봇과의 시뮬레이션은 SGI의 그래픽 시뮬레이터 Envision TR을 이용하였다. 최종적으로 마스터 암 중앙제어기로부터 Centaur 제어기로의 데이터 전송은 TCP/IP를 이용하여 SGI로 보내진 데이터를 실시간으로 전송하게 된다.

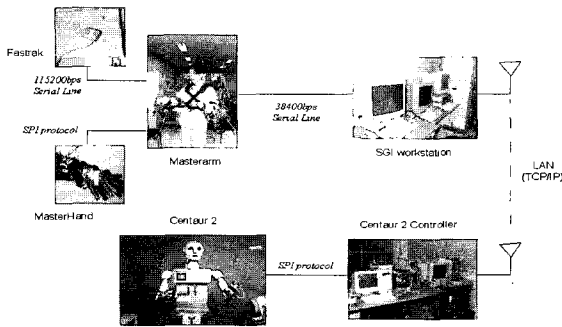


그림 8. 전체 실험 시스템.
Fig. 8. Overall experiment system.

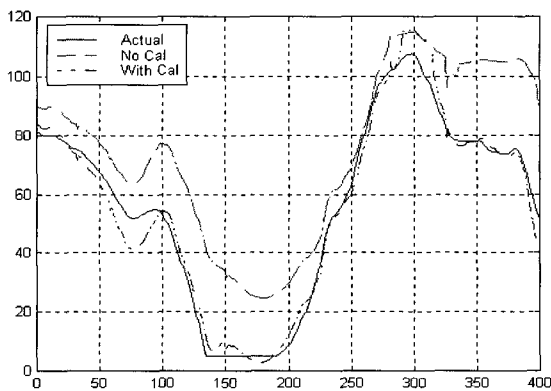


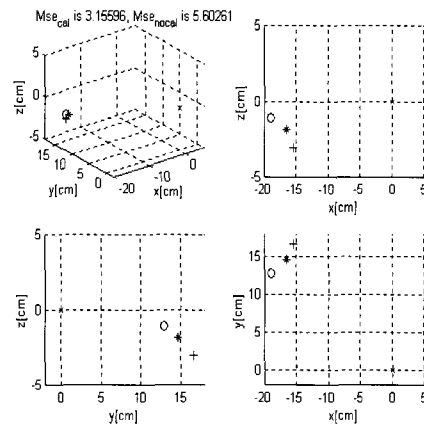
그림 9. θ_4 의 측정치, 보정전 계산치, 보정후 계산치 비교.
Fig. 9. θ_4 comparison of measured, and calculated with/without calibration θ_4 .

가상 로봇 및 실제 로봇과의 실험에 앞서 유도된 마스터 암의 기구학 해를 검토하기 위하여 다음과 같이 초기 보정을 수행하였다. 초기 보정을 위하여 어깨부의 여유 관절 (θ_4)에 엔코더를 부착하여 부착점(어깨부 θ_6 , 손목부 θ_{13})의 여러 데이터를 수집하고 이러한 데이터들로부터 새로운 어깨와 손목의 중심점을 구하여 기구학을 풀기 위한 가정에 포함하였다. 다음 그림은 보정 전후 계산된 오른쪽 어깨의 θ_4 와 실제 측정된 값을 비교한 결과이다.

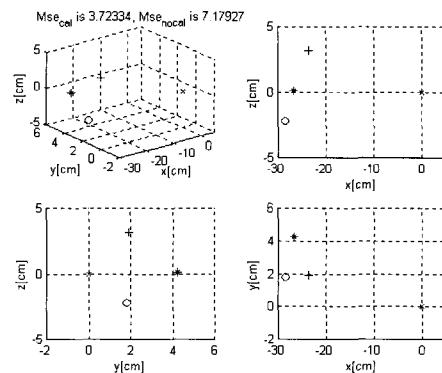
초기보정 방법은 다음과 같이 수행되었다.

- 1) 팔 운동에 의한 어깨부착점의 데이터를 얻는다,
- 2) 최소자승법으로부터 어깨중심점과 반지름을 구한다,
- 3) d1, d2를 구한다.
- 4) 2),3)의 값들을 이용하여 기구학 해(이 경우 θ_4)를 얻는다

보정 후에 계산된 θ_4 가 보정 전보다 실제 값에 더욱 근접한 것을 보여준다. 작업자의 팔이 정확히 고정된 중심을 가지고 구 운동을 하지 않는 원인으로 오차가 발생함을 알 수 있다. 그리고 θ_4 를 포함한 모든 축에 대한 보정의 성능 검증을 위하여, 부착점의 위치를 IGT사의 Flashpoint를 이



(a)



(b)

그림 10. 보정 전후와 실제 측정값의 부착점 비교.
Fig. 10. Point comparison of measured and calculated with/without calibration.

용하여 실제 측정하고 보정 전후 계산된 추정값과 비교하였다. 다음 그림은 마스터 암의 오른쪽 어깨 부분의 베이스를 기준으로 하였을 때의 실험 결과를 나타내고 있다. X는 어깨 부분 베이스를 나타내며, O는 실제 측정값, +는 초기 보정을 수행하지 않은 추정값, 그리고 *는 초기 보정을 행한 후 추정된 부착점의 위치를 나타낸다.

위의 실험 결과로부터 초기 보정을 수행함으로써 평균 제곱오차(MSE)가 5.60261[cm]와 7.17927[cm]에서 각각 3.15596[cm]와 3.72334[cm]로 줄었음을 알 수 있다.

다음은 슬레이브 로봇 Centaur와의 결합을 통하여 마스터 암을 착용한 인간 조작자에 의해 생성된 동작의 추종 성능을 검토하고자 한다. 그림 11은 가상 로봇과의 자세 추종 검증을 위한 시뮬레이션 수행 장면을 나타낸다.

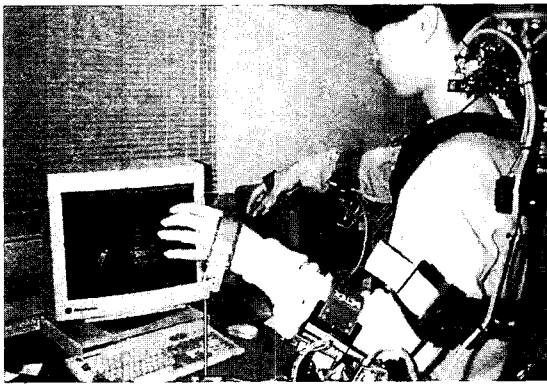


그림 11. 가상 로봇과의 실험.
Fig. 11. Experiment with virtual robot.

위의 같이 가상 로봇과의 시뮬레이션에 의한 자세 추종 검증 후에 실제 로봇 Centaur와의 원격제어 실험을 최종적으로 수행하였다. 그림 12는 실제 Centaur와 실시간으로 수행된 원격제어 실험장면의 일부를 나타내고 있다. 이러한 가상 로봇 및 실제 로봇과의 실험 결과로부터 인간 기구학에 기반하여 설계된 제안된 마스터 암의 기구학적 해의 타당성을 확인할 수 있다.

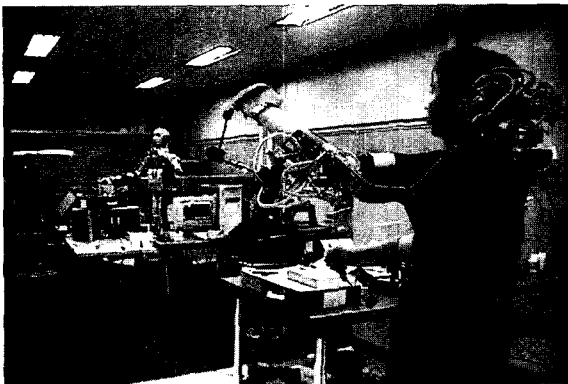


그림 12. 원격제어에 의한 Centaur와의 모션 추종.
Fig. 12. Motion tracking with Centaur via teleoperation.

위의 같은 형태의 마스터암의 설계시 정확도외에 장치의 소형 및 경량화, 이동성, Standalone 기능을 확보하는 것이 매우 중요하나, trade-off가 항상 존재하게 된다. 따라서, 만족스런 성능은 적용하고자 하는 작업 대상의 정의에서 비롯된다.

V. 결론

본 논문에서는 기구학적 간섭을 피할 수 있도록 인간의 어깨와 손목에 각각 기본 자유도 3개와 여유 자유도 3개를 갖는 새로운 인간 기구학에 기반한 원격제어용 마스터 암을 개발하였다. 제안된 마스터 암은 전체시스템을 간단화하기 위해 중앙제어기와 위성제어기로 구성된 분산 제어기 구조를 이용함으로써, 각 제어기들간의 고속 통신에 의해 가상 로봇 및 실제 로봇 Centaur와의 자세 추종을 위한 실시간 구현을 가능하게 하였다. 또한, 3개의 어깨 및 손목의 독립 관절 측정값만으로 측정 장치 없이 나머지 3개의 관절 변수를 얻는 기구학 해의 유도는, 최소수의 센서 및 위성제어기만을 이용함으로써 마스터 암의 하드웨어 구현을 보다 간단하게 할 수 있었을 뿐만 아니라, 장치의 소형경량화 및 작업자의 착용과 조작을 보다 용이하게 할 수 있었다. 제안된 인간 기구학에 기반하여 설계된 마스터 암의 성능 및 유용성을 가상 로봇 및 실제 로봇 Centaur와의 자세 추종 실험으로부터 확인할 수 있었다. 따라서, 정교한 자세 추종 능력을 갖는 제안된 마스터 암은 극한작업을 위한 원격제어 뿐만 아니라, 산업용 로봇의 경로 생성 장치로서도 유용하게 사용될 것으로 생각되며, 현재 이에 관한 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

- [1] Jean Vertut and Philippe Coiffet, *Teleoperation and Robotics: Applications and Technology*, Kogan Page, 1985.
- [2] T. B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [3] M. Bergamasco, et al., "An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications", *Proceedings of the 1994 IEEE ICRA*, pp. 1449-1454, 1994.
- [4] H. Maekawa and J. M. Hollerbach, "Haptic display for object grasping and manipulating in virtual environment", *Proceedings of the 1998 IEEE ICRA*, pp. 2566-2573, 1998.
- [5] S. Lee, D. Choi, M. Kim, C. Lee, and J. Song, "A unified approach to teleoperation: Human and robot integration", *Proceedings of IEEE IROS*, vol. I, pp. 361-366, 1998.
- [6] S. Lee, J. Lee, W. Chung, M. Kim, C. Lee, and M. Park, "A new exoskeleton-type masterarm with Force reflection : Controller and integration",

Proceedings of the 1999 IEEE IROS, vol. 3. pp. 1438-1443, 1999.

[7] S. Lee, J. Lee, D. Choi, M. Kim, and C. Lee, "Distributed controller architecture for a masterarm and its application to teleoperation with force

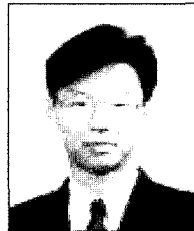
feedback", *Proceedings of the 1999 IEEE ICRA*, vol. 1, pp. 213-218, 1999.

[8] K. Brady and T. Tarn, "Internet-based remote teleoperation", *Proceedings of IEEE ICRA 1998*, pp. 65-70, May, 1998.



이 장 욱

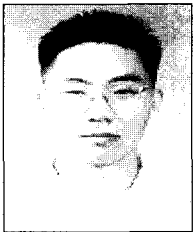
1997년 성균관대학교 제어계측공학과 졸업. 연세대학교 전자공학과 석사(1999). 2000년 ~ 현재 삼성 SDI Corporate R&D Center 전임연구원. 관심분야는 로보틱스, 시스템 프로그래밍, ASIC 설계.



김 윤 상

1993년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1995). 동 대학원 박사(1999). 2000년 ~ 현재 University of Washington 전기공학과 POST-DOC(과학재단해외포다). 관심분야는 bi-lateral teleoperation, haptic

interface stabilization/high performance control, mechatronics application, unstructured STC design.



이 수 용

1989년 서울대학교 기계공학과 졸업. 동 대학원 기계설계학과 석사(1991). Massachusetts Institute of Technology 기계공학과 박사(1996). 2000년 ~ 현재 Texas A&M University 기계공학과 조교수. 관심

분야는 로봇제어 및 응용, haptic interface, mobile robot.



김 문 상

1980년 서울대학교 기계설계학과 졸업. 동 대학원 석사(1982). Technical University of Berlin 기계공학과 박사(1987). 1987년 ~ 현재 한국과학기술연구원 휴먼로봇센터 책임연구원. 관심분야는 robot calibration, sensor

based motion planning, haptic interface design and application, novel mechanism design in service robotics area.