

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음

3D 작업 수행을 위한 string형 원격 제어기 개발

심형준*, 차인혁**, 한창수***

The Development of String type Tele-operation Controller for 3D Environment

Hyung-Joon Sim*, In-Hyuk Cha**, Chang-Soo Han***

ABSTRACT

A master-slave system for tele-operation had been developed and tested for several decades. In this paper the master robot is composed of several wires and provides position information of the handle which is driven by an operator within the master robot work space. A PC is used for the command calculation for a slave robot. This paper deals with the relation between the number of strings and D.O.F of the master robot, control method of the slave robot during the operation and the monitoring method over the working area by the computer graphics simulation. The D.O.F of the master robot can be modified by adding or subtracting some strings. The controller of the slave robot uses the advanced PD control method to keep the performance against varying working load.

Key Words : tele-operation(원격 제어), master robot(마스터 로봇), slave robot(슬레이브 로봇)

1. 서론

원자력 발전 시설이나 심해 또는 우주 공간과 같은 사람이 직접 작업하기 어려운 환경에서는 로봇의 사용이 불가피하다. 이런 경우 로봇의 제어는 변화하는 상황에 적절히 대응할 수 있는 명령을 사람으로부터 받아 작업을 수행하게 된다. 이러한 작업을 수행하기 위하여 제안된 방법 중의 하나가 원격 조종에 의한 로봇의 조작이다. 실 작업은 로봇이 수행하고 이 로봇의 조종은 안전한 환경에서 로봇 조작자가 조종하는 것이다.

이와 같이 사람의 생각하고 판단하는 능력을 로봇에 연결시켜 주는 시스템을 MMI(Man Machine Interface)

시스템이라 한다. 모니터나 각종 시뮬레이션 장치들을 통해 로봇 조작자가 작업 환경에 대한 정보를 받아보고 적절한 판단을 통해 조작자가 로봇을 조정하여 작업을 수행하는 원격 조정 시스템도 MMI시스템이라 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 Tele-operation system 중에서 핵심이라 할 수 있는 원격 제어 조종기(master robot)의 개발과 실험에 초점을 두었다. 마스터 로봇은 스트링을 사용하는 조이스틱 타입으로 개발되었다. 이러한 형태의 마스터 로봇은 슬레이브 로봇의 형태와 관계 없이 위치 지령을 생성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 원격 제어 시스템에 적용하기 위하여 작업 현장의 정보를 조작자에

* 한양대학교 기전공학과 대학원
 ** 한양대학교 정밀기계공학과 대학원
 *** 한양대학교 정밀기계공학과

게 전달할 수 있는 모니터링 시스템도 실험 하였다. 모니터 시스템은 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션으로 자유로운 시점의 선택을 가능하게 한다.

스트링을 이용한 원격 조정 시스템에 대한 연구는 이미 1988년 텍사스 주립 대학에서 시작되었으며 만능형/힘 반향 제어기를 개발하여 산업용 Cincinnati Milacron T3-726 Industrial Robot과 함께 원격 조정 시스템을 구성하였다. 1990년에는 이동 가능한 3 자유도 만능형/힘 반향 원격제어기를 개발하여 ORNL에서 HERMIES Mobile System과 7자유도를 갖춘 CESARM의 원격 제어에 사용되어 핵폐기물 처리 및 핵 발전소 보수에 관계된 연구에 활용하고 있다. 1992년에는 일본 Tokyo Institute of Technology에서 SPIDER (Space Interface DEvice for artificial Reality)를 개발하였으며 Univ. Ritsumeikan Kyoto에서는 6자유도의 스트링형 마스터 로봇을 개발하였다.

2. 마스터 로봇

2.1 자유도와 스트링의 개수

스트링 타입의 마스터 로봇의 자유도는 사용되는 스트링의 개수와 배치에 의해 결정된다^{(2),(3)}. 다음의 (Fig. 1)을 참고하여 이를 직관적으로 살펴보면 2자유도를 구현하기 위해서는 최소한 3개의 스트링이 필요함을 알 수 있다. 이를 일반적인 경우로 확대하여 보면 n자유도의 구현을 위해서는 n+1개의 스트링이 필요하다는 결론을 얻을 수 있게 된다.

이에 대한 증명은 마찰이 없는 점 접촉에 의한 멀티핑거 시스템에서의 force closure의 도입으로 가능하다. 즉, 멀티핑거 시스템에서는 미는 힘만이 존재하는 것과 마찬가지로 스트링으로 구성된 시스템은 당기는 힘만으로 구동 되기 때문에 같은 개념의 도입이 가능하다. 이러한 force closure는 Goldman과 Tucker가 제안한 vector closure에 근거를 두고있다. 동작 중 vector closure

를 만족시키지 못하는 위치로 이동하는 경우 목표로 하는 자유도를 잃게 되므로 스트링의 각도 설정에 중요한 역할을 하여 스트링의 부착 위치와 작업영역 결정에 영향을 준다. Vector closure의 개념은 다음과 같다.

n차의 공간에서 벡터 집합 V가 vector closure이기 위해서는 V가 다음의 두 조건을 만족하는 최소한 n+1개의 벡터($v_1, v_2 \dots v_{n+1}$)로 이루어져야 한다는 필요충분 조건을 만족해야 한다.

(1) n+1개의 벡터 중에서 n개의 벡터는 각각 선형 독립이다.

$$(2) \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i v_i = 0 \quad (\alpha_i > 0 \text{ for any } i)$$

위의 조건에서 α_i 는 각 스트링에 걸리는 장력이고 벡터 v_i 는 스트링의 방향을 뜻한다. 따라서, 작업영역내의 임의의 위치에서는 주어진 스트링의 각도와 장력으로 평형을 유지할 수 있음을 나타낸다. 일반적으로 임의의 자유도를 얻기 위해서는 병진운동의 경우 자유도보다 하나 더 많은 수의 스트링을 필요로 한다.

본 논문에서 실험하고있는 마스터 로봇은 공간상의 직선운동에 의한 3자유도를 목표로 하고있으므로 4개의 스트링을 사용하여 시스템을 구성 하였다.

2.2 위치 측정

마스터 로봇에서 핸들의 위치는 직접적으로 측정되지 않는다. 핸들의 위치는 핸들이 움직임에 따라 이에 연결되어 변화하는 스트링의 길이로부터 계산된다. (Fig. 2)는 센서와 스트링을 이용하여 변위를 측정할 수 있는 기구의 좌표계를 나타내고 있다.

스트링의 길이를 측정하기 위한 센서의 위치는

$$\begin{aligned} P1(A1 \quad 0 \quad 0) \\ P2(-A1 \quad A2 \quad 0) \\ P3(-A1 \quad 0 \quad A2) \\ P4(A1 \quad A2 \quad A3) \end{aligned}$$

로 나타내어 지며 l_1, l_2, l_3, l_4 를 각 센서로부터 핸들의 스트링 부착점 까지 줄의 길이라 할 때 손의 위치 좌표계를 각 스트링의 길이에 대한 식(1), (2), (3)으로 나타낼 수 있다.

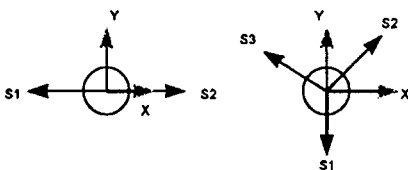


Fig. 1 D.O.F and the number of strings

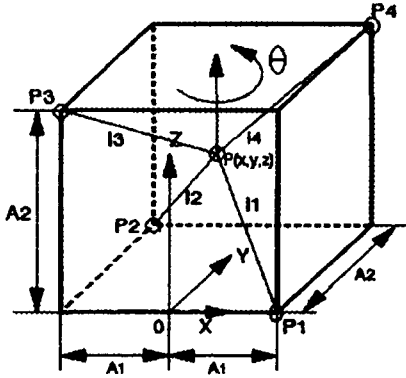


Fig. 2 Coordinate system of the master robot

$$x = \frac{l_1^2 - l_2^2 - l_3^2 + l_4^2}{-8A_1} \quad (1)$$

$$y = \frac{l_1^2 - l_2^2 + l_3^2 - l_4^2 + 2A_2^2}{4A_2} \quad (2)$$

$$z = \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 - l_4^2 + 2A_2^2}{4A_2} \quad (3)$$

이와 같은 식에 의해 원격 조정 시스템의 각 센서에서 출력된 신호로 대상 로봇의 작업단이 움직여야 하는 위치를 계산해 낼 수 있다.

2.3 센서

마스터 로봇의 핸들에 연결된 스트링의 길이 측정을 위해 선형 포텐서미터를 사용 하였다. 핸들의 움직임으로 인해 스트링이 감기거나 풀리는 길이를 측정하여 핸들이 움직인 변위를 측정한다. 포텐서미터를 (Fig. 2)의 P1, P2, P3, P4 위치에 배치하여 각 포텐서미터에서 발생한 아날로그 신호를 A/D 컨버터를 통해 입력받고 계산에 의해 3차원 상에서 핸들이 움직인 변위 값을 계산한다. 센서와 ADC간의 배선은 노이즈의 혼입으로 측정값의 오차를 발생시키는 요인으로 지적되었다. 이러한 문제를 최소화 하고자 차폐된 배선과 필터 등의 하드웨어를 도입했고, 얻어진 정보를 소프트웨어적으로 처리 하였다.⁽⁶⁾

2.4 작업 영역의 사상

작업 영역 사상은 마스터 로봇과 슬레이브 로봇의 기구학적인 형태가 서로 다른 경우에 제어가 가능하도록 한

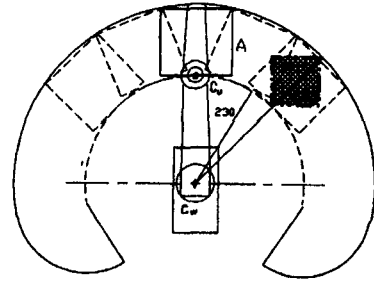


Fig. 3 Work area of a SCARA robot

다. 마스터 로봇으로 슬레이브 로봇을 움직일 경우 슬레이브 로봇의 동작이 작업 영역을 넘지 않도록 하는 것이 중요하다. 따라서 대상 로봇의 작업 영역을 새로 설정할 필요가 있다. 슬레이브 로봇은 마스터 로봇과 같은 육면체의 작업 영역 내에서 작업하게 되며 작업 영역 내의 모든 위치가 원격 제어 기구의 작업 영역으로 사상 될 수 있도록 해야 한다.

위의 (Fig. 4)에서 정사각형의 영역으로 표시된 부분이 시뮬레이션과 실험에서 슬레이브 로봇의 작업영역으로 설정되었다.

로봇의 작업 영역 내의 각 위치는 원격 제어 기구의 핸들의 위치와 배울 α 와 편차 δ 를 매개로 사상 되며 관계식은 다음과 같다.

$$X_S = \alpha_X \cdot X_M + \delta_X \quad (4)$$

$$Y_S = \alpha_Y \cdot Y_M + \delta_Y$$

$$Z_S = \alpha_Z \cdot Z_M + \delta_Z$$

M : 원격 조정기구

S : 대상 로봇

α 와 δ 의 값은 슬레이브 로봇의 작업 영역이 마스터 로봇의 작업 영역을 정확히 반영하도록 설정되어야 한다. 뒤에 보일 실험에서 보여지는 결과는 이러한 배울의 설정에 큰 영향을 받는다.

3. 전체 시스템의 구성

실험을 위해 구성된 원격 조정 시스템은 다음의 (Fig. 5)와 같은 구성을 보인다. 그림에서 조작자가 원격 조정 시스템을 통해 명령을 입력하면 컨트롤러가 그 신호를 대상 로봇에 맞게 적절한 계산을 통해 그 값을 대상 로봇에

출력하게 된다. 대상 로봇은 입력받은 신호에 따라 움직임을 추종하게 되고 그 결과에 따른 신호가 인터페이스를 통해 모니터링 시스템에 입력된다. 따라서 로봇 조작자는 모니터링 시스템을 통해 로봇의 현 상태를 알 수 있게 된다.

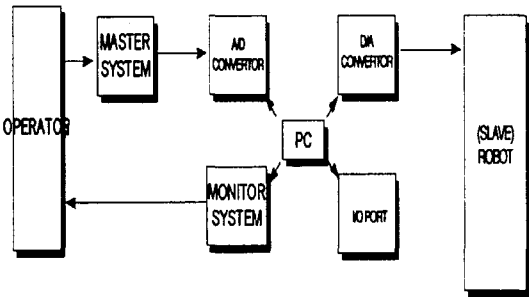


Fig. 4 Early version of the system

연구의 초기 단계에서 구성되었던 시스템은 ADC, DAC, I/O포트 등의 각각의 장비를 PC에 설치해 이루어졌다. 하지만 이러한 다단계 시스템은 복잡한 구성 자체의 문제 뿐만 아니라 각 과정에서 발생하는 오차나 외란의 영향을 배제하기 어렵다는 점에서 만족스럽지 못한 결과를 보여주었다.

이런 문제를 해결하기 위해 연구가 진행되면서 아나로그 신호 처리 과정에서 외란의 감소를 목적으로 하드웨어, 소프트웨어적인 필터 기능이 추가 되었고 현재 MMC(Multi Motion Controller)를 이용한 통합 시스템을 구축했다. 이러한 통합 시스템의 구성으로 시스템의 하드웨어적인 구성과 구동 소프트웨어를 단순화 시키고 시스템의 신뢰도를 향상시키는 결과를 얻을 수 있었다.

앞의 (Fig. 6)에서는 새롭게 구성된 전체 시스템을 보여준다. 이 시스템에서는 마스터 로봇으로부터의 아나로그 신호 입력과 슬레이브 로봇에 대한 제어 명령과 슬레

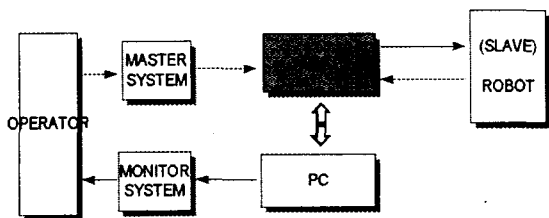


Fig. 5 Integrated version of the system

이브 로봇으로부터의 신호의 입출력을 모두 MMC를 통해 처리 한다. 따라서, PC에서 A/D, D/A 컨버터와 I/O 포트 등에 직접 접근할 필요가 없으므로 처리 속도와 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

4. 제 어

마스터 로봇으로부터 얻어지는 위치 정보와 속도 정보는 슬레이브 로봇의 제어를 위해 이용된다. 다수의 통과 점을 이용해 슬레이브 로봇의 제어를 위한 경로를 생성할 경우 시간지연으로 인한 조작성의 감소를 우려하여 경로의 생성 없이 충분히 짧은 샘플링 시간 동안 얻어진 두 점간의 위치와 속도 정보와 고정된 가속도값을 이용해 슬레이브 로봇을 제어한다. 일반적으로 로봇의 동역학적 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$T = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\dot{\Theta}, \Theta) + G(\Theta) \quad (5)$$

여기서,

- T : 각 관절의 구동 토크 ($n \times 1$)
- $M(\Theta)$: 관성 행렬 ($n \times n$)
- $V(\dot{\Theta}, \Theta)$: Corioli 힘 등에 관계된 항 ($n \times 1$)
- $G(\Theta)$: 중력에 관계된 항 ($n \times 1$)

위에 보인 것처럼 움직이는 로봇에서는 각 관절의 위치와 속도에 따라 그 모양이 변하며 이로 인하여 $M(\Theta)$, $V(\dot{\Theta}, \Theta)$, $G(\Theta)$ 행렬이 관절의 위치와 속도의 함수로 나타내진다. 따라서, 적절한 구동 토크의 발생을 위해서는 매 순간 각 관절의 위치와 속도에 따른 파라미터를 구해야 한다. 이렇게 변화하는 파라미터의 영향을 받지 않고 제어를 설계하기 위해서 model-based부분과 servo부분으로 나누어 제어를 구성한다.

Model-based부분은 주어진 시스템의 파라미터로 구성되며 servo부분의 구성이 쉽도록 시스템이 단위 질량만으로 구성된 것처럼 재구성한다.

Model-based부분은 다음과 같은 제어 법칙으로 구성하여 구동 토크를 얻는다.

$$T = \alpha T' + \beta \quad (6)$$

식 (6)를 앞의 로봇의 모델(5)과 비교하면 다음과 같다.

$$M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\dot{\Theta}, \Theta) + G(\Theta) = \alpha T' + \beta \quad (7)$$

여기서, $M(\Theta) = \alpha$, $V(\dot{\Theta}, \Theta) + G(\Theta) = \beta$ 로 정하면

다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\ddot{\Theta} = T' \quad (8)$$

정리된 결과식 (8)은 앞서 의도와 마찬가지로 단위 질량만을 가지는 시스템을 보여주고 있다. 이 시스템을 제어의 대상으로 보고 다음과 같은 새로운 제어 법칙을 도입한다.

$$T' = \ddot{\Theta}_d + K_v \dot{e} + K_p e \quad (9)$$

여기서, K_v , K_p 는 각 관절에 대한 게인을 갖는 대각 행렬이다.

식(8)과 식(9)를 정리하면

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (10)$$

와 같은 식을 얻는다. 이로서 주어진 로봇의 구동을 위한 토크의 제어는 단순한 2차 시스템으로 변형되었다. 또한 각 관절간의 연관도 없어져 각 관절이 독립된 것으로 보고 제어가 가능해진다.

이상과 같은 computed-torque method를 이용한 제어기의 구성은 다음의 (Fig. 7)에 보이고 있다.

이상과 같은 model-based 제어를 사용할 경우 신뢰성 있는 제어를 실현 하기 위해서는 실제 시스템을 정확히 반영하는 모델을 사용하는 것이 중요하다. 모델과 실제 시스템간의 오차가 클수록 제어의 신뢰성은 감소한다. 로봇이 작업을 위해 물체나 도구를 집어 들 경우를 예로 들면 물체의 무게로 인해 로봇과 물체를 포함한 전체 시스템은 제어에 사용하고 있는 모델과 달라지게 된다.

이런 경우 제어기의 성능의 저하를 막기 위해서는 적절

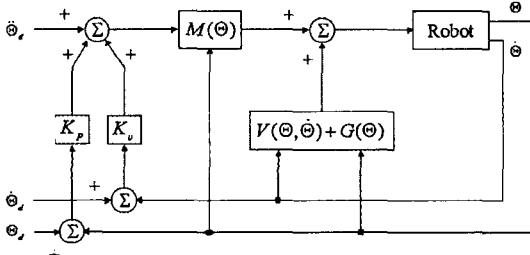


Fig. 6 Controller

한 모델의 변경이 필요하다⁽⁷⁾. 즉, 적절한 모델의 변경을 위한 대상물에 대한 정보를 입력 받아야 한다. 작업 내용이 미리 정해진 경우 작업의 순서와 대상물에 따라서 적절한 모델을 선택해 사용할 수 있다. 하지만 불규칙한 작업을 수행하는 경우 모델의 수정을 위해서 대상물에 대한 정보를 작업단으로부터 입력받아야 한다.

4.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB을 사용하였다. 시뮬레이션은 마스터 로봇이 평면상의 원의 궤적을 따라 움직일 때 슬레이브 로봇의 추종성을 보여주고있다. 시뮬레이션 대상으로 사용한 것은 SCARA타입의 로봇으로 로봇에 대한

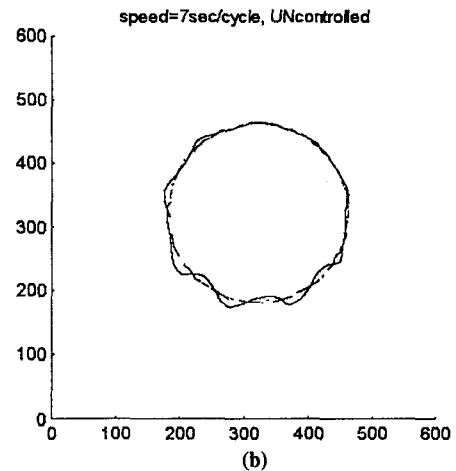
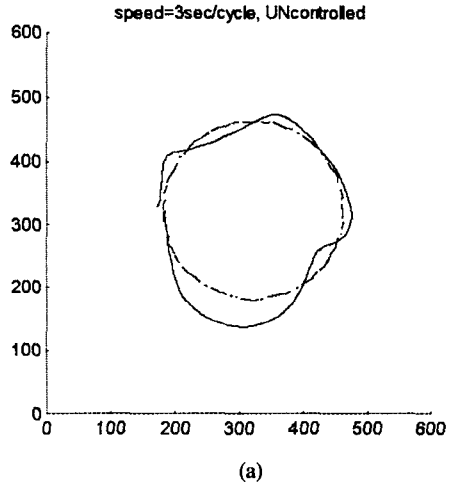


Fig. 7 Uncontrolled responses

파라미터는 실제로 다음 절에서 다루고 있는 실험에 사용한 로봇의 데이터를 사용하였다.

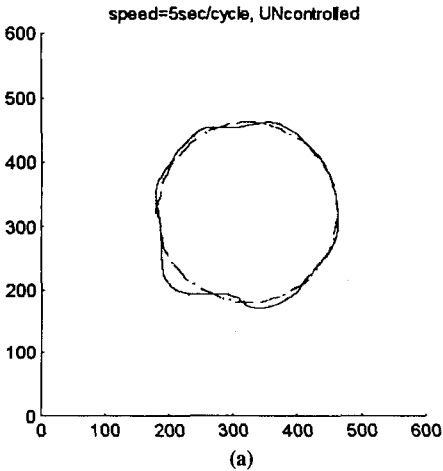
시뮬레이션의 내용은 마스터 로봇의 속도의 변화와 제어기능의 유무에 따른 슬레이브 로봇에서 보이는 응답의 변화를 비교하는 것이다.

다음에 보이는 두개의 결과는 오픈 루프로 제어되는 동작에서 마스터 로봇의 작동 속도에 따른 슬레이브 로봇의 움직임을 비교한 것이다.

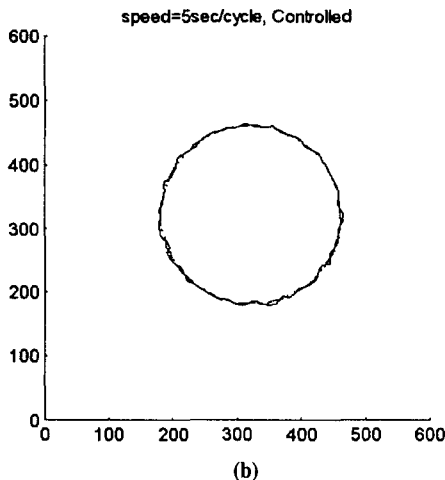
(Fig. 8)의 결과는 제어를 하지 않은 경우에 마스터 로봇의 작동 속도에 따른 슬레이브 로봇의 응답을 보여준다. (a)는 3sec/cycle의 속도로 마스터 로봇을 작동한 경우로 슬레이브 로봇의 추종성이 매우 좋지 않음을 보여준다. (b)는 보다 저속인 7sec/cycle의 속도로 마스터 로봇

을 작동 시킨 경우로 (a)의 경우에 비해 주어진 경로에 비교적 가깝게 추종하지만, 만족스러운 결과는 아님을 알 수 있다. 저속에서 추종성이 증가되는 것은 동력학적 영향의 감소로 인한 것으로 생각할 수 있다.

(Fig. 8)을 통해 볼 때 보다 만족스러운 슬레이브 로봇의 작동을 위해서 앞서 제시한 제어 방법을 도입한 결과를 다음의 (Fig. 9)에 보이고 있다. 속도는 5sec/cycle로 고정된 마스터 로봇의 경로(점선) 데이터에 대해서 제어의 유무에 따른 슬레이브 로봇의 응답(실선)을 보여준다. 제어가 되지 않은 (a)는 (Fig. 8)의 두 가지 응답에 비교해 볼 때 그 중간 속도에 해당하는 추종 정도를 보이고 있다. (b)에서는 제어의 도입으로 거의 완벽하게 주어진 경로를 추종하는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Controlled responses

4.2 실험

실험은 시뮬레이션을 통해 수행한 것과 같은 내용을 중심으로 마스터 로봇에서 얻어지는 위치정보에 대한 슬레이브 로봇의 추종성을 검증하는 것을 목표로 한다. 이와 함께 마스터 로봇에서 제공되는 위치 정보의 정확성도 함께 평가 하였다. 이를 위해서 마스터 로봇의 핸들이 고정된 높이와 반지름을 갖는 원주상을 운동하도록 기구적으로 제한하고 얻어지는 결과를 직접 분석하는 한편, 슬레이브 로봇의 추종 결과도 분석하였다. 실험에서 사용한 슬레이브 로봇은 SCARA형태의 로봇으로 시뮬레이션에서 사용한 로봇과 같은 것이다. 4장에서 제시한 computed-torque method를 MMC에서 직접 지원하지 않으므로 실험에서 로봇의 제어를 위한 처리는 PC를 사용하여

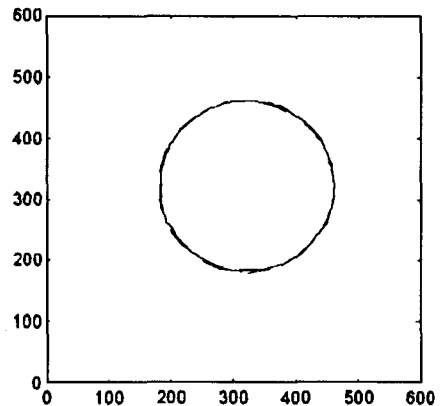


Fig. 9 Output form maser robot (r=140mm)

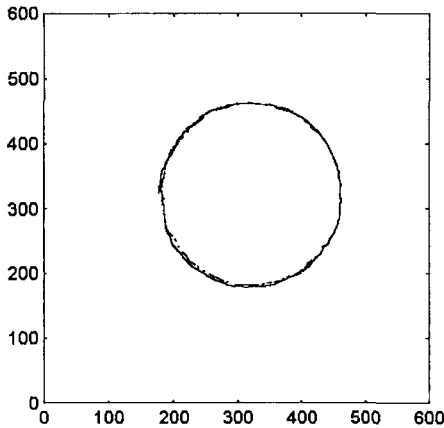


Fig. 10 Output from slave robot
(x-y plane, r=140mm)

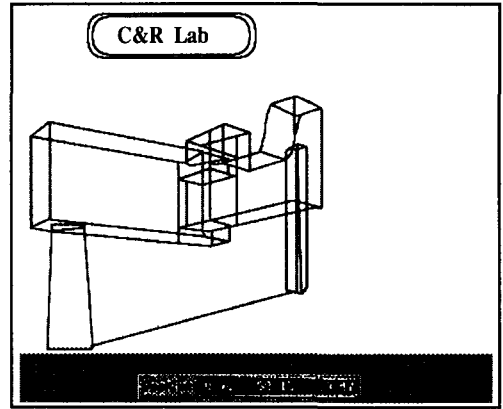


Fig. 11 Graphic simulation of the slave robot

program으로 구현하였다. 따라서, MMC는 로봇의 제어에 직접 사용되지 않는다.

마스터 로봇의 경우 각 스트링의 길이로부터 위치를 계산하는 식은 앞서 (1), (2), (3)에 보인 바와 같이 간단한 식으로 얻어진다. 하지만, 제작상의 공차와 배울 문제로 정확한 절대 위치를 제공하지는 못했다. 따라서, 마스터 로봇의 원운동의 중심을 슬레이브 로봇의 작업 영역의 중심으로 사상하는 것을 기준으로 마스터 로봇의 위치 정보를 평가 하였다. 이러한 문제는 앞의 식 (4)의 배울과 편차를 적용해 수정 하였다. 다음의 (Fig. 10)로 마스터 로봇으로부터의 출력(실선)과 기하학적으로 그려진 원(점선)을 비교해 보이고 있다. 이것으로 마스터 로봇의 출력이 정확한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

마스터 로봇의 출력을 수정, 확인한 후 원격 조정 기구의 성능을 실험하기 위하여 슬레이브 로봇의 추종성을 알아 보았다. 원격 조정 기구의 조정 핸들을 움직여 140mm의 반경을 갖는 원을 그리도록 하였을 때 로봇의 추종 결과를 비교하여 보았다. 같은 각도 위치를 갖는 점의 위치를 비교해 본 결과 x, y축에서 각각 최대 2.963mm, 2.943mm 각각 평균 -1.548mm, -1.356mm의 오차를 갖는 것으로 측정되었다.

(Fig. 11)은 마스터 로봇의 x-y평면상에 지름 140mm의 컴퍼스를 설치하고 원을 그리도록 작동하였을 때 나타난 마스터 로봇(점선)과 슬레이브 로봇(실선)의 궤적을 그래프로 그린 것이다. 이런 경우의 x, y축의 오차는 각각 최대치가 5.949mm, 4.888mm로 (Fig. 11)에 보인 바와 같이 다소 거친 결과를 보여준다.

4.3 현장의 관찰

원격조정 시스템에서 대부분의 경우 CCD 카메라를 사용해 모니터하지만 카메라에 의한 화면은 평면적이므로 입체적인 상황에 대한 감시가 어렵고 카메라의 위치도 일반적으로 고정되어 있으므로 원활한 감시가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 로봇의 동작을 입체적으로 감시 할 수 있는 3차원 그래픽 시뮬레이션을 이용하여 관찰 위치와 관찰 각도를 작업 상황에 따라 변화 시킬 수 있도록 하였다. 다음의 (Fig. 12)는 조작 중의 화면을 보여준다.

이 작업 화면은 직접 작성한 그래픽 라이브러리를 이용한 시뮬레이션 프로그램의 화면이다. 실험에 사용한 슬레이브 로봇의 데이터를 이용해 그래픽과 함께 작업단의 위치를 제시해 준다. C언어로 자체 제작한 그래픽 라이브러리를 사용한 프로그램으로 그래픽을 와이어 프레임으로 처리해 실시간 처리의 부담을 감소하고 있다.

5. 결 론

이번 연구에서 개발된 마스터 로봇은 스트링을 추가함으로써 자유도를 증가시킬 수 있다. 자유도의 증가를 위해서는 스트링 수의 증가와 함께 force closure를 고려하여 적절한 작업영역을 확보할 수 있도록 스트링 위치의 선정이 필요하다. 또한, 적용하고자 하는 슬레이브 로봇의 역기구학 정보에 따라 프로그램을 수정함으로써 마스터 로봇과 기구학적으로 다른 다양한 대상 로봇을 제어할 수 있다. 또한 슬레이브 로봇의 제어를 위해서는 로봇의

동력학적인 영향을 고려한 비선형 제어를 도입함으로써 로봇의 자세와 작업의 종류에 영향에 대하여 보다 신뢰성 있는 반응을 얻을 수 있었다. 추종성 향상을 위한 알고리즘과 시스템 개량, 다양한 슬레이브 로봇을 손쉽게 적용시킬 수 있도록 기구적 파라미터를 입력시킬 수 있는 사용자 인터페이스, 보다 향상된 MMI를 구성하기 위해 힘 반향 기능의 추가 등을 향후의 과제로 제시할 수 있다.

참 고 문 헌

1. V. Lumelsky. On human performance in teleorobotics. IEEE Trans. on System, Man and Cybernics, Vol. 21, No. 5, pp. 971-982, Sep./Oct. 1991.
2. V. D. Nguyen, "Construction Force-Closure Grasp", Proceeding of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986.
3. Sadao Kawamura, Ken Ito. July 7-10. "A New Type of Master Robot for Teleoperation Using a Radial Wire Driver System" Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, 1993.
4. Yukihiro Hirata, Makoto Sato. "3-Dimensional Interface Device for Virtual Work Space" Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and System
5. L. Conway, R. A. Volz, and M. W. Walker. Teleautonomous system : Projecting and coordinating intelligent action at a distance. IEEE Trans. of Robotics and Automation, Vol. 6, No. 2, pp. 146-158, Apr. 1990.
6. 岡村迪夫, "노이즈防止와 對策", CQ出版社, 1987.
7. John J. Craig, Ping Hsu, S. Shanker Sastry "Adaptive Control of Mechanical Manipulator", proceeding of the IEEE international conference on Robotics and Automation, 1986.