

로봇을 이용한 다기능 상지 재활 시스템에 관한 연구

원주연*, 심형준*, 박범석**, 한창수***

A Study on the Multi-Purpose Rehabilitation System for the Upper Limb Using a Robot Manipulator

Joo Yeon Won*, Hyung Joon Sim*, Bum Seok Park** and Chang Soo Han***

ABSTRACT

This paper presents a rehabilitation exercise system which utilizes a 6 DOF robot as a motion generator. This system was proposed for a stroke patient or a patient who has hemiplegia. A master-slave system was designed to exercise either paralysis or abnormal limb by using normal limb motion. The study on the human body was applied to calculate the motion range of elbows and shoulders. In addition, a force-torque sensor was applied to the slave robot to estimate the rehabilitation extent of the patient. Therefore, the stability of the rehabilitation robot could be improved. By using the rehabilitation robot, the patients could exercise by themselves without assistance. In conclusion, the proposed system was verified by computer simulations and system experiment.

Key Words : Robot(로봇), Rehabilitation(재활), Master-slave system(마스터-슬레이브 시스템)

기호설명

- a_{i-1} : the distance from \hat{Z}_i to \hat{Z}_{i+1} measured along \hat{X}_i
- α_{i-1} : the angle between \hat{Z}_i to \hat{Z}_{i+1} measured about \hat{X}_i
- d_i : the distance from \hat{X}_{i-1} to \hat{X}_i measured along \hat{Z}_i
- θ_i : the angle between \hat{X}_{i-1} to \hat{X}_i measured about \hat{Z}_i
- θ_n : the rotate angle of n^{th} axis

1. 서론

1995년, 의료보험 연합회와 2001년, 건강보험공단에서 조사한 결과를 비교해보면 사회 발전과

함께 정형외과적 질환 및 사고가 증가하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 1998년 통계청 자료에 따르면 우리나라에서 뇌혈관 질환으로 인한 사망이 가장 많은데 단일 질환으로서는 뇌졸중이 압도적으로 많은 것을 알 수 있다. 미국의 경우도 심장질환과 암에 이어 뇌졸중이 세 번째 사인으로 지적되고 있다. 이러한 뇌졸중과 정형외과적 질환의 경우 치료 후 재활치료의 방법이 아주 중요하며, 회복기간을 단축하기 위해서는 지속적인 연속 운동과 다양한 재활훈련이 필요하다. 뇌졸중의 경우 발병 후의 급성기와 퇴원 후 가정에서의 재활요법이 얼마나 효율적이냐에 따라 환자의 사회생활 복귀에 상당한 영향을 미친다. 따라서 초기의 체계적인 재활치료가 중요한 것으로 알려져 있

접수일: 2003년 1월 9일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

- * 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과
- # 교신저자, 한양대학교 메카트로닉스공학과
Email simba@ihanyang.ac.kr Tel. (031) 400-4062
- ** 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
- *** 한양대학교 기계산업공학부

다.^{1,2,3} 정형외과적 질환의 대상 중 어깨 관절의 경우 인체의 타 관절에 비해 안정성(stability)면에서 취약한 관절이지만 운동성(mobility)이 가장 큰 관절이다. 따라서, 운동량이 많은 운동선수의 경우 매우 흔하게 손상을 받을 수 있다. 어깨 관절부위에 손상을 받은 모든 환자들은 수술적 치료의 여부와 관계없이 유사한 염증기(inflammation)와 치유기(healing)를 거치게 된다. 특히 수술 후에는 치유를 위해 보다 주의를 요하게 되므로 전문적인 재활치료가 필요하다.^{4,5}

본 연구에서 제안한 시스템은 뇌졸중의 경우와 같이 한쪽 팔이나 다리가 마비된 환자와 정형외과적인 수술 후 재활치료가 필요한 환자의 재활을 돕기 위한 시스템이다. 뇌졸중 환자의 경우 몸의 반쪽이 마비 되는 증상이 있다. 이와 같은 환자의 정상운동이 가능한 팔의 움직임을 이용하여 마비되거나 정상적으로 움직이기 어려운 팔을 혼자서 운동할 수 있도록 마스터-슬레이브 시스템으로 구성하고, 사람 팔의 팔꿈치와 어깨의 기구학을 해석하기 위하여 기존의 인체에 대한 연구 결과를 적용하였다. 이로 인해 물리치료사의 도움 없이 환자 혼자 운동이 가능하도록 하는 시스템을 개발하였다. 또한 로봇에 force 및 torque센서(이하 F/T 센서)를 부착하여 환자의 재활 정도를 측정할 수 있도록 하고 재활 운동 과정의 안전성을 높였다.⁶ 이러한 시스템은 앞으로 진행될 원격 진료 시 상당한 잇점을 기대할 수 있다.

또한 전문가의 소견에 따르면 환자들은 물리치료사에 의한 시술보다 재활기에 의한 시술을 더 신뢰하는 성향을 갖는다고 한다. 환자들은 재활기기로 운동할 경우 주어진 조건에 만족하는 정확한 궤적으로 운동하지만 물리치료사들이 재활운동을 시술할 경우 정확한 궤적과 범위를 운동하지 못하고 운동할 수 있는 범위를 넘어서 운동시켜 주는 경우가 있는 것으로 생각한다고 한다. 이로 인해 많은 환자들이 물리치료사 보다 재활기기를 더 신뢰 하는 성향을 갖는다.

따라서 제안된 시스템에서 로봇의 정확한 위치를 제어하는 것과 마스터 로봇의 기능을 하는 마우스로부터 데이터를 획득하여 로봇을 구동하는데 제한된 구동범위 안에 있는 것인지를 판단하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다.^{7,8} 이에 따라 본 논문에서는 마스터 기구로부터 궤적을 입력 받아 로봇과 사람 팔이 운동 할 수 있는 범위인지를

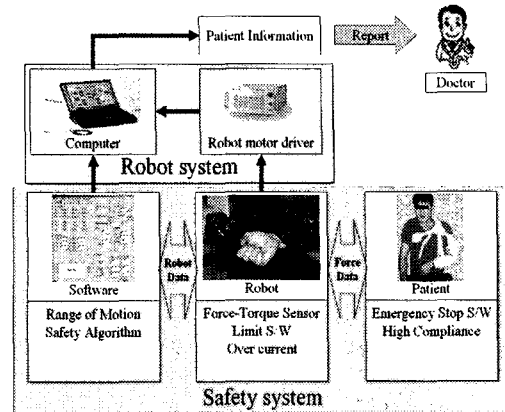


Fig. 1 Total System flow chart

판단한 후, 로봇을 구동하여 환자를 재활 하도록 하는 재활운동 시스템을 개발 하였다.^{9,10}

2. 재활운동 시스템 구성

시스템은 크게 마스터기구와 슬레이브 기구로 구분 할 수 있다. 마스터기구는 정상 팔의 궤적 획득하기 위하여 사용되며, 환자의 마비되지 않은 부분의 운동을 획득하기 위하여 사용된다. 이러한 마스터 기구는 인체의 팔의 운동을 획득하여야 하므로 운동범위와 자유도면에서 최소한 팔과 같은 수준이어야 한다. 마스터 기구의 형태는 링크, 외골격¹¹, 와이어¹² 등을 이용한 다양한 형태로 연구되어있다. 마스터 기구의 자유도 및 운동범위가 인체의 팔에 미치지 못할 경우에는 환자와 마스터 기구간의 상대적인 자세를 조정하여 경우에 따른 특정 운동의 궤적을 획득할 수 있다.

슬레이브 기구는 일반적인 수직 다관절 6자유도 로봇을 사용하였다. 슬레이브 기구의 역할은 실제적인 재활운동을 구현할 수 있는 구동력을 제공하여야 하므로 마스터 기구와 달리 스스로 구동되는 로봇을 이용한다. 앞서 설명한 마스터 기구와 마찬가지로 슬레이브 기구 또한 인체의 팔을 운동시켜야 하므로 팔의 자유도 및 운동범위를 포함하는 것이 바람직하다. 이러한 기준으로 볼 때 6자유도 로봇은 자유도 면에서는 충분하지만, 운동범위는 로봇의 크기에 따라 적합하지 않을 수 있다는 것을 지적할 수 있다. 이런 경우에는 마스터 기구의 경우와 마찬가지로 슬레이브 기구와 환

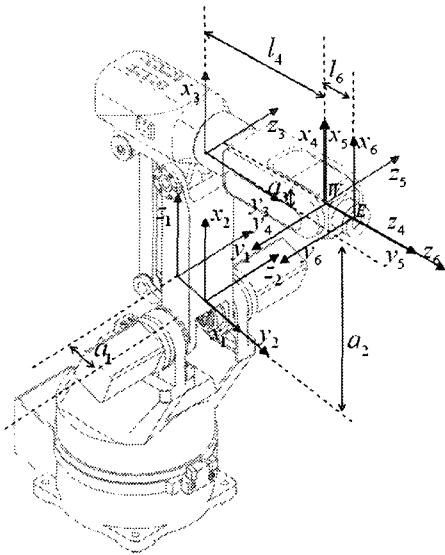


Fig. 2 Robot Cartesian Coordinates

자간의 상대위치를 조절할 수 있다.

슬레이브 기구는 로봇이므로 환자와 접촉하여 재활동 시스템을 구성하기 위하여 충분한 안전성을 확보해야 한다. 이를 위하여 F/T 센서, 리미트 센서, 비상정지 등을 사용하였다.

이상 설명한 재활동 시스템의 전반적인 개략도를 Fig. 1에 보이고 있다. 이러한 재활동 시스템은 실험을 통하여 시스템을 구성하는 마스터, 슬레이브의 기구학 및 제어프로그램을 검증하였다.

3. 로봇 기구학 해석

3.1 정기구학 해석

본 절에서는 슬레이브 기구로 사용되는 로봇의 정기구학을 해석하였다.¹³ Fig. 2는 로봇의 좌표계를 설정한 것이다. 이러한 좌표계를 이용하여 Denavit-Hartenberg 파라미터를 구하였다. 구해진 파라미터는 Table 1과 같이 정리되며 이를 이용하여 구한 로봇의 변환 행렬은 부록에 보이고 있다.

한편, 로봇의 말단의 환자를 구속하는 부분에 부착되는 F/T 센서는 운동시에 발생하는 힘과 토크를 측정하기 위하여 사용된다. 측정되는 힘과 토크는 운동상태에 따라 변화하는 F/T 센서의 위치와 방향을 기준으로 하는 값이므로 운동의 평가 및 안전을 위한 제어에 그대로 사용할 수 없다.

Table 1 DH parameters for Robot

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90	150	0	θ_2
3	0	350	0	θ_3
4	-90	100	350	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	-90	0	95	θ_6

Units - a_{i-1}, d_i : cm α_{i-1}, θ_i : °(degrees)

따라서, 측정결과를 로봇의 기준 좌표계로 변환하기 위하여 변환 행렬을 사용하였다. 이 변환 행렬은 F/T 센서가 로봇의 좌표계 중 Z_6 축을 중심으로 45°가 회전되어 있는 형태이므로 F/T 센서의 축을 7번 축으로 하여 앞에서 구한 전체 변환 행렬에 적용하여 얻었다(부록 참조).

F/T 센서에서 측정된 내용은 변환을 통하여 로봇의 기준 좌표계에서의 위치와 방향을 구하게 되며 이 결과를 기준으로 운동상태를 파악하고 환자 입장에서의 힘과 토크를 구할 수 있도록 하였다.

3.2 역기구학 해석

슬레이브 기구로 사용되는 6축 로봇의 역기구학은 앞서 제시된 정기구학을 이용하여 유도하였다. 얻어진 각 조인트 값 $\theta_1 \sim \theta_6$ 의 값은 정기구학의 결과와 함께 부록에 보이고 있다.

3.3 기구학 해석의 검증

기구학 해석의 검증을 위하여 앞서 구한 정기구학과 역기구학을 MATLAB을 이용한 시뮬레이션 결과와 실험을 비교하였다. 실험은 로봇의 작업영역 내의 임의의 평면에 원 궤적을 입력하여 구동하고 로봇 각 축의 변위를 측정된 결과를 정기구학을 이용하여 얻는 궤적과 실제로 로봇 말단이 보이는 궤적을 비교하는 방법을 사용하였다.

Fig. 3은 실험결과 중의 하나를 보이고 있다. 로봇의 말단에서 측정된 궤적과 로봇의 운동을 위해서 사용한 궤적 명령 사이에 반지름 방향으로 최대 약 2mm정도의 오차를 보인다. 이러한 오차는 로봇의 반복적인 실험 결과 운동 속도와 함께

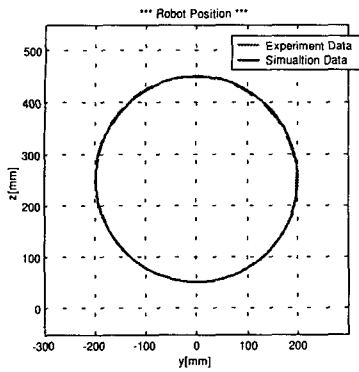


Fig. 3 Simulation & Experiment (circle)

변화하는 것을 확인 할 수 있었으며 따라서, 기구학 해석의 오차가 아닌 각 축의 수렴 속도의 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다.

이와 같은 결과로 볼 때 로봇 기구학을 검증할 수 있고 로봇의 제어에 추가적인 연구가 필요함을 확인할 수 있다.

4. 로봇을 이용한 재활 운동 프로그램

재활운동 시스템을 운영하기 위한 프로그램은 다음과 같이 구성하였다. 먼저 로봇과 F/T 센서로부터 데이터를 받아서 화면상에 출력하고 힘과 토크의 제한 범위를 설정할 수 있도록 하였다. 또, 팔의 운동에 따라서 궤적을 설정하기 위해서 팔꿈치와 어깨 각각의 운동을 선택하고 운동 대상이 되는 환자의 움직일 수 있는 정상 팔의 길이와 운동의 대상이 되는 마비된 팔의 길이를 입력할 수

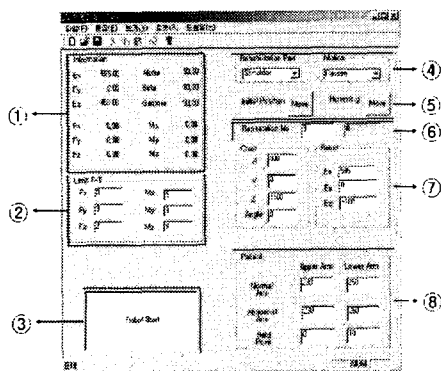


Fig. 4 Rehabilitation exercise program window

있도록 하였다. Fig. 4는 프로그램이 실행모습을 보이고 있다. Fig. 4에 나타난 각 부분의 기능을 설명하면 다음과 같다.

- ① 로봇 말단의 좌표와 자세, F/T 센서의 측정치를 화면에 출력.
- ② 각 방향 별 힘과 모멘트의 범위 설정.
- ③ 로봇 작동 / 정지 버튼.
- ④ 운동 조건을 선택.
- ⑤ 초기위치 설정 및 원점 복귀.
- ⑥ 각 운동의 반복횟수 입력 및 현재 반복 횟수를 출력.
- ⑦ 로봇과 환자의 위치 설정.
- ⑧ 환자의 팔의 길이 입력.

이 프로그램의 사용 순서는 다음과 같다. 처음으로 로봇을 초기위치로 이동 한 후, 환자의 상태에 따라 운동 조건을 선택한다. 다음으로 환자의 팔 길이, 반복 횟수, 운동 조건에 따른 X, Y, Z 방향의 힘과 모멘트 각각의 성분을 설정한 후 로봇을 구동 시킨다. 운동이 완료되면 로봇을 원점으로 복귀 시켜 프로그램을 종료한다.

5. 실험 및 결과

이 장에서는 실험을 통한 운동 시스템을 검증하였다. 실험은 팔꿈치의 flexion, 어깨의 flexion, extension, abduction, adduction, horizontal abduction, horizontal adduction, internal rotation, external rotation 등의 운동을 구현하는 궤적을 이용하여 실험하였다. 이러한 운동 중에서 어깨의 abduction, adduction,

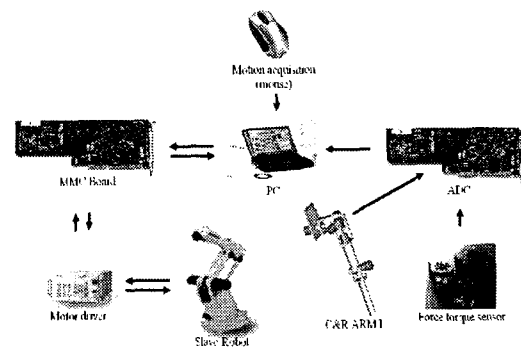


Fig. 5 Total System Hardware flow chart



Fig. 6 C&R arm I

horizontal abduction, horizontal adduction의 경우 팔의 운동 범위가 로봇의 구동 범위를 벗어나므로 초기 위치를 변경해서 실험하였다. abduction, adduction의 경우 로봇의 기준 좌표계인 Z축을 중심으로 -90° 회전시켜 초기 위치를 설정하였고, horizontal abduction, horizontal adduction의 경우 로봇의 기준 좌표계인 Y축을 중심으로 -90° , Z축을 중심으로 -90° 회전시켜 초기위치로 설정하였다. abduction, adduction, horizontal abduction, horizontal adduction은 주어진 궤적과 로봇의 궤적을 비교하였다. 이로 인해 모든 팔의 궤적을 로봇의 기준 좌표계를 중심으로 Y-Z평면에서 실시하였다.

5.1 실험장치 구성

실험 장치는 Fig. 5와 같이 마우스, PC, 로봇, C&R arm I, F/T 센서로 구성하였다. 로봇의 구동은 MMC Board를 사용하여 PC의 제어신호가 로봇의 각 구동부에 전달되도록 하였다.

마우스는 실험장치 구성에서 마스터 기구로 사용되었다. 본 연구에서 목적으로 하는 인체 팔의 움직임은 4자유도로 하고 있지만, 실험장치의 경우 그 구성을 간단히 하여 시스템의 검증할 수 있도록 마우스를 이용하여 평면운동을 획득하도록 하였다.

C&R arm I은 인체 팔을 모방하여 만든 기구로 사람을 대신하여 슬레이브 로봇과 연결하여 실험하기 위하여 제작되었다. 전체 시스템의 실험에 앞서 시뮬레이션과 로봇 구동실험을 통하여 로봇

의 구동은 검증되었지만, 사람이 직접 실험에 참가하는 것은 위험할 뿐만 아니라 객관적인 데이터를 확보할 수 없으므로 C&R Arm I을 도입하였다. Fig. 6과 같이 팔꿈치와 어깨의 운동을 표현할 수 있는 기구를 설계하였다. 이 기구는 팔꿈치 1자유도 (flexion)와 어깨 3자유도(flexion/extension, abduction/adduction, internal rotation/external rotation, horizontal abduction/horizontal adduction) 운동을 표현 할 수 있다. 기구를 구성하는 forearm(193mm)과 upper arm(237.5mm)의 길이는 장년층(40~59세)을 대상으로 산업자원부 기술표준원에서 조사(1997년)한 평균값을 사용하였다. C&R arm I은 사람을 대신하여 실험의 위험을 피하기 위한 목적과 함께 구현된 운동에 대한 객관적인 데이터를 수집하기 위한 것이므로 각 관절에 인코더를 설치하여 관절의 운동을 측정하도록 하였다.

5.2 실험 방법

실험을 위한 팔의 궤적은 마우스를 이용하여 획득하였다. 인체의 팔 운동을 구현하기 위한 궤적은 앞서 언급한 바와 같이 3차원 공간에서 표현되지만, 실험을 위한 궤적은 각 관절과 각 운동 별로 2차원에서 구현하였다.

먼저 팔꿈치의 궤적을 획득하기 위하여 어깨는 고정을 시키고 팔꿈치의 운동(flexion) 범위를 움직이며 마우스를 사용하여 원하는 궤적을 입력하였다. 마우스를 통하여 얻어지는 궤적은 제어에 사용한 컴퓨터 모니터 해상도인 1024×768과 슬레이브 기구의 구동범위 사이의 관계식을 이용하여 로봇에서 구현되어야 하는 궤적을 획득하였다.

어깨 관절의 운동도 팔꿈치와 같은 방법으로 flexion/extension, abduction/adduction, horizontal abduction/horizontal adduction, internal rotation/external rotation에 대하여 로봇의 궤적을 획득하였다.

이상과 같은 방법으로 획득된 팔꿈치와 어깨의 운동의 궤적을 이용하여 로봇을 구동하는 한편, 로봇은 C&R Arm I을 운동시키도록 실험하였다. 따라서, 로봇에 의하여 구현된 운동은 C&R Arm I에서 측정될 수 있으며 로봇이 구현한 운동을 평가하는 기준으로 사용하였다.

로봇과 C&R arm I은 재활동동을 가정하여 로봇이 인체의 팔을 구속하는 것과 같은 형태로 천, 스폰지 등의 완충물과 벨크로로 만들어진 기구를

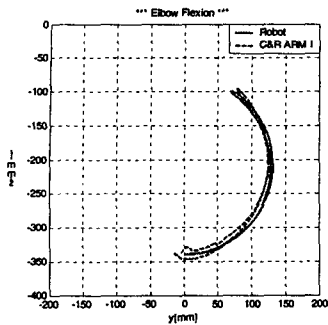


Fig. 7 Elbow flexion
(comparison of robot & C&R arm I)

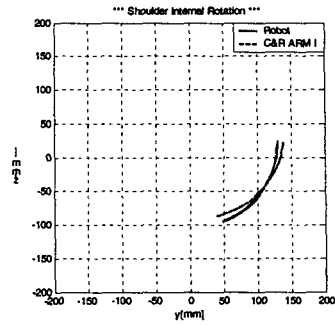


Fig. 10 Shoulder internal rotation
(comparison of robot & C&R arm I)

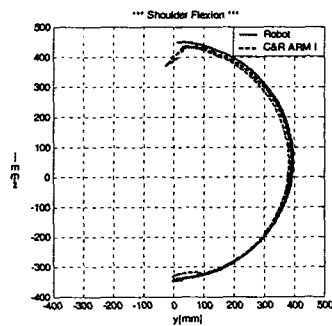


Fig. 8 Shoulder flexion
(comparison of robot & C&R arm I)

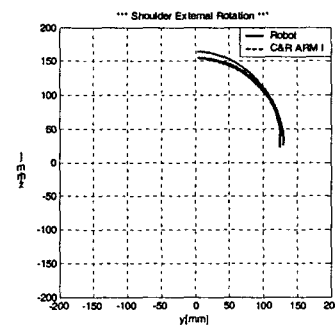


Fig. 11 Shoulder external rotation
(comparison of robot & C&R arm I)

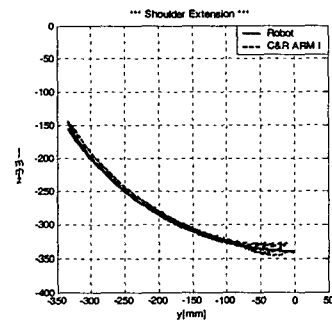


Fig. 9 Shoulder extension
(comparison of robot & C&R arm I)

사용하여 연결하였다. 이러한 연결방법은 인체에 대한 연결의 경우와 마찬가지로 피부와 근육, 기구의 완충물에 의한 유격과 오차를 허용하고 있는 것이다.

5.3 실험 결과

Fig. 7~11 은 실험 결과를 보이고 있다. 앞서 실험 방법에서 설명한 것과 같이 팔꿈치와 어깨 관

절의 운동을 분리하여 2 자유도 평면에 대하여 궤적을 설정하여 각각 실험한 결과이다. 그림에서 보이고 있는 내용은 로봇 말단의 궤적과 C&R arm I 에서 측정된 궤적을 비교하고 있다. 대부분의 경우 로봇과 C&R arm I 은 비슷한 궤적을 그리는 것으로 나타난다.

각각의 경우를 자세히 살펴보면 크게 세가지 종류의 오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 팔꿈치의 flexion 운동(Fig. 7), 어깨의 flexion 및 extension 운동(Fig. 8, 9)에서 보이는 것과 같이 운동의 경향은 일치하지만 전반적인 운동범위에서 작은 오차를 보이는 현상을 발견 할 수 있다. 또한 같은 운동에서 궤적의 양 끝에서는 비교적 큰 오차를 발생하는 결과를 확인 할 수 있다. 한편, 어깨의 internal/external rotation(Fig. 10, 11)은 앞서 설명한 운동에서 발생하는 오차와는 다른 형태를 보이고 있다. 반복되는 궤적 사이에 큰 오차를 찾을 수 없지만 로봇의 궤적과 C&R arm I 궤적이 회전된 모양으로 다른 경향을 보이고 있다.

6. 결론 및 고찰

실험 결과 슬레이브 기구로 사용된 로봇의 운동 궤적과 사람을 대신하고, 측정을 위하여 사용된 C&R arm I의 궤적이 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 로봇을 이용한 재활운동의 구현은 가능한 것으로 판단된다.

하지만, 실험에서 보이는 오차의 요인은 제거되어야 할 것이다. 앞서 실험에서 지적한 세가지 종류의 오차는 로봇과 C&R arm I의 연결부분에서 발생하는 것으로 구속기구를 구성하는 스펀지 등의 재료가 갖는 변형이 오차의 원인으로 판단된다. 운동방향이 바뀌는 반복운동에서 운동이 전환되는 시점인 궤적의 양끝에서 오차가 발생하는 경우가 팔꿈치와 어깨의 flexion, extension에서 발생하는 현상이며, 로봇과 C&R arm I의 구속부분에서 발생하는 회전으로 발생하는 오차가 어깨의 internal / external rotation에서 보이는 오차이다.

이렇게 운동의 종류에 따라서 오차가 다르게 발생하는 것은 운동의 종류에 따라서 로봇과 C&R arm I의 상대적인 위치가 조정되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 어깨의 abduction, adduction, horizontal abduction, horizontal adduction은 C&R arm I의 궤적을 로봇의 구동범위가 모두 포함하지 못하므로 로봇과 C&R arm I간의 상대적 위치를 조정하여도 표현하기가 어렵다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 로봇을 이용한 재활운동 시스템을 개발하기 위하여 슬레이브 기구를 보다 더 넓은 구동범위를 갖는 로봇이 요구되며 로봇과 신체를 연결하는 기구가 유격이 없이 고정할 수 있도록 연구되어야 한다.

하지만, 고정기구는 인체를 대상으로 하는 것이므로 유격이 없이 고정하는 데는 한계가 있을 수 밖에 없으므로 거부감이나 불편함 없이 로봇과 신체를 연결할 수 있는 기구와 함께 고정기구의 유격이 커지는 방향의 운동에 대하여 궤적을 보정할 수 있는 제어기술에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서 제안하고 기본적인 개념을 실험한 로봇을 이용한 재활운동 시스템은 3차원에서 사람 팔의 모든 자유도를 표현하여 재활운동을 구현하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서, 본 논문에서 다룬 궤적의 획득과 재현에 관한 연구와 함께 재활운동에 필요한 운동의 성질(등속성, 등장성, 등적성)을 구현하기 위한 제어에 관한 연구가 필

요하다.

본 연구에서 제안한 시스템을 기본으로 하여 향후 슬레이브기구를 교체하고 6자유도 마스터로봇을 도입하여 마스터로봇과 슬레이브기구를 제어한다면 좀더 높은 안전성을 갖는 인간 친화적인 재활 시스템을 개발할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임(과제고유번호 : 02-PJ1-PG11-VN01-SV03-0044).

참고문헌

1. Sivenius, J., Pyorala, K., Hcinone, O. P., Salonen, I. T., & Rcikine, P., "The Significance of Intensity of Rehabilitation of Stroke-a Controlled Trial," *Stroke*, 16, pp. 928-931, 1985.
2. Sim, M. S., "A Study on the Weekly Rehabilitation Nursing Program and Its Use for the Stroke," *Latest Medicine*, Vol. 43, No. 1, pp. 42-50, 2000.
3. Ahn, Youngpal, "Rehabilitation of Patients with Cerebral Vascular Accident," *J. of Korean Med. Assoc.* Vol. 24, No. 2, pp. 128-134, February, 1981.
4. Whang, J. H., "Non-operative Treatments and Rehabilitation for Shoulder," *Latest Medicine*, Vol. 42, No. 6, pp. 11-17, 1999.
5. Tae, S. K., "Diagnosis and Treatment of Shoulder Disease," *J. of Korean Med. Assoc.*, Vol. 43, NO. 9, pp.831-838, 2000.
6. Boissy, P., Bourbonnais, D., Aubert, M. P., Goyette, M. & Steele, C., "A Static Dynamometer For the Simultaneous Measurement Of Shoulder And Elbow Torques," *IEEE-EMBC and CMBC*, 1995.
7. Peter S. Lum, Charles G. Burgar, Deborah E. Kenney, H. F. Machiel Van der Loos, "Quantification of force Abnormalities during Passive and Active-assisted Upper-limb Reaching Mmovements in Post-stroke Hemiparesis," *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, Vol. 46, No. 6, June 1999.
8. Cha, Inhyuk and Han, Changsoo, "The Robust Robot Controller Design by Using the Parameter Multiplier," *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ*

International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS 2000), Vol. 1, IEEE Industrial Electronics Society/IEEE Robotics and Automation Society/Robotics Society of Japan, Kagawa University, Takamatsu, Japan, pp. 763-768, October, 31-November 5, 2000.

9. Choi, C. W., Choi, H. S., Han, C. S., "Development of the Pneumatic Physiotherapy Robot with a Hybrid Type," AROB 7th, Vol. 1, pp. 467-470, 2002.
10. Kiyoshi Nagai, Isao Nakanishi, Hideo Hanafusa, Sadao Kawamura, Masaaki Makikawa, Noriyuki Tejima, "Development of an 8 DOF Robotic Orthosis for Assisting Human Upper Limb Motion," International Conference on Robotics & Automation, May 1998.
11. Hyung-Joon Sim, In-Hyuk Cha, Chang-Soo Han, "The Development of String type Tele-operation Controller for 3D Environment," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 15, No. 5, May, pp. 153-160, 1998.
12. Inhyuk Cha, Changsoo Han, Byungju Yi, "Debelopment of a Human Interface System for the IMS - Application of the Teleoperation System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 15, No. 8, August, pp. 156-164, 1998.
13. Dinesh Manocha, John F. Canny, "Real Time Inverse Kinematics for General 6R Manipulators," IEEE, International Conference on Robotics and Automation, May 1992.

부록

A.1 로봇의 정기구학

$${}^6_0T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

A.2 F/T 센서의 변환 행렬

$${}^0_7T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(r_{11} + r_{12}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(r_{12} - r_{11}) & r_{13} & p_x \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(r_{21} + r_{22}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(r_{22} - r_{21}) & r_{23} & p_y \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(r_{31} + r_{32}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(r_{32} - r_{31}) & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

A.3 역기구학

$$\theta_1 = A \tan 2(w_y, w_x) \quad (A.3)$$

$$\theta_2 = A \tan 2(K_2, K_3) - A \tan 2\left(w_z, \pm\sqrt{K_2^2 + K_3^2 - w_z^2}\right) \quad (A.4)$$

$$\theta_3 = A \tan 2(a_3, l_4) - A \tan 2\left(K_1, \pm\sqrt{a_3^2 + l_4^2 - K_1^2}\right) \quad (A.5)$$

$$\theta_4 = A \tan 2(K_8, -K_7) \quad (A.6)$$

$$\theta_5 = A \tan 2\left(\pm\sqrt{K_5^2 + K_6^2}, K_4\right) \quad (A.7)$$

$$\theta_6 = A \tan 2(-K_{10}, K_9) \quad (A.8)$$

이상 각 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{11} &= s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\ &\quad + c_1(s_{23}c_4c_5c_6 + c_{23}s_5c_6 - s_{23}s_4s_6) \\ r_{12} &= c_6(s_1c_4 - c_1s_{23}s_4) \\ &\quad - s_6(s_1s_4c_5 + c_1(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5)) \\ r_{13} &= c_1c_{23}c_5 - s_5(c_1s_{23}c_4 + s_1s_4) \\ r_{21} &= c_6(c_5(s_1s_{23}c_4 - c_1s_4) + s_1c_{23}s_5) \\ &\quad - s_6(c_1c_4 + s_1s_{23}s_4) \\ r_{22} &= c_1(-c_4c_6 + s_4c_5s_6) \\ &\quad - s_1(s_{23}s_4c_6 + s_6(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5)) \\ r_{23} &= s_1c_{23}c_5 - s_5(s_1s_{23}c_4 - c_1s_4) \\ r_{31} &= c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6 \\ r_{32} &= s_2(s_3s_4c_6 + s_6(s_3c_4c_5 + c_3s_5)) \\ &\quad + c_2(s_3s_5s_6 - c_3(s_4c_6 + c_4c_5s_6)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_{33} &= -s_{23}c_5 - c_{23}c_4s_5 \\
 p_x &= -l_6s_1s_4s_5 \\
 &\quad + c_1(a_1 + c_{23}(l_4 + l_6c_5) + a_2s_2 + a_3s_{23} - l_6s_{23}c_4s_5) \\
 p_y &= s_1(a_1 + c_{23}(l_4 + l_6c_5) + a_3s_{23} + a_2s_2 - l_6s_{23}c_4s_5) \\
 &\quad + l_6c_1s_4s_5 \\
 p_z &= c_2(a_2 - (l_4 + l_6c_5)s_3 + c_3(a_3 - l_6c_4s_5)) \\
 &\quad - s_2(c_3(l_4 + l_6c_5) + s_3(a_3 - l_6c_4s_5)) \\
 K_1 &= w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 + a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 \\
 &\quad - l_4^2 - 2a_1(w_xc_1 + w_ys_1) \\
 K_2 &= a_2 + a_3c_3 - l_4s_3 \\
 K_3 &= a_3s_3 + l_4c_3 \\
 K_4 &= c_1c_{23}r_{13} + s_1c_{23}r_{23} - s_{23}r_{33} \\
 K_5 &= c_1s_{23}r_{13} + s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33} \\
 K_6 &= -s_1r_{13} + c_1r_{23} \\
 K_7 &= c_1s_{23}r_{13} + s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33} \\
 K_8 &= -s_1r_{13} + c_1r_{23} \\
 K_9 &= c_1c_{23}r_{11} + s_1c_{23}r_{21} - s_{23}r_{31} \\
 K_{10} &= c_1c_{23}r_{12} + s_1c_{23}r_{22} - s_{23}r_{32}
 \end{aligned}$$