

상지 재활을 위한 3-D 로봇 시스템의 혼합 위치/힘 제어

Hybrid Position/Force Control of a 3-D Rehabilitation Robot System for Upper Extremities

이수한¹, 신규현^{2,✉}
Soo Han Lee¹ and Kyu Hyeon Shin^{2,✉}

¹ 울산대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan Univ.)
² 울산대학교 대학원 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Graduate School, Ulsan Univ.)
✉ Corresponding author: khshin111@ulsan.ac.kr, Tel: 052-259-2149

Manuscript received: 2010.11.15 / Accepted: 2011.2.7

A 3-D rehabilitation robot system is developed. The robot system is for the rehabilitation of upper extremities, especially the shoulder and elbow joints, and has 3-D workspace for occupational therapy to recover physical functions in activities of daily living(ADL). The rehabilitation robot system has 1 DOF in horizontal rotational motion and 2 DOF in vertical rotational motion, where all actuators are set on the ground. Parallelogram linkage mechanisms lower the equivalent inertia of the control elements as well as control forces. Also the mechanisms have high mechanical rigidity for the end effector and the handle. In this paper, a hybrid position/force controller is used for controlling positions and forces simultaneously. The controller is tuned according to the robot posture. The active motion modes for rehabilitation program consist of active-resisted motion mode and active-free motion mode. The results of the experiments show that the proposed motion modes provide the intended forces effectively.

Key Words: Rehabilitation Robot System (재활로봇 시스템), Upper Extremities (상지), Hybrid Position/force Controller (혼합 위치/힘 제어기), Active Motion Mode (능동운동 모드)

1. 서론

국민의 의료 수준의 향상으로 평균 수명이 꾸준히 증가하고 있어 65 세 이상의 노인인구가 2005 년 9.1%에서 2018 년 14.3%로 고령사회에 진입할 것으로 예상되고, 2026 년에는 20.8%로 증가될 전망이다.¹ 이처럼 노인인구의 증가에 따라 이들의 신체적 기능 저하를 막고 정상적인 사용이 가능하도록 도와주거나, 척수 손상이나 뇌졸중 후에 수반되는 편마비 증상의 재활을 위한 재활로봇에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다.

이런 관점으로 재활로봇의 응용을 살펴보면 근

력과 관절의 운동범위 등과 같은 운동 특성을 진단하는 연구,² 운동장애를 치료 또는 훈련시키는 시스템에 대한 연구, 이동로봇이나 로봇 팔이 장착된 휠체어 등과 같은 시스템에 대한 연구 등이 있다.³ 여기서 재활치료는 신체의 기능을 향상시켜 장애를 최소화하고 장애와 불구를 없애는데 그 목적이 있다. 이러한 재활치료에는 물리치료, 운동치료, 작업치료 등이 있으며,⁴ 본 연구에서 적용할 작업치료는 일상생활 동작(ADL)에 필요한 상지 기능의 향상에 역점을 둔다.

기존의 재활치료사에 의한 재활치료와 비교하여 로봇을 이용한 재활치료는 재활치료사 한 명이

로봇을 이용하여 여러 명의 환자를 훈련시킬 수 있으므로 환자 일인당 훈련 횟수와 지속 정도를 증가시킬 수 있고, 이는 치료기간을 단축하는 효과를 가져와 개인적인 비용의 절감도 기대할 수 있게 될 것이다.

Cozens⁵은 뇌 손상 후에 발생하는 특유의 운동 장애인 근육의 약화와 경직 증상을 가진 환자를 대상으로 팔꿈치의 굽힘-펴는 능동운동을 보조하는 1 자유도 로봇을 소개하였다. Sakaguchi⁶는 ER 유체의 특성을 이용한 액추에이터를 사용하여 어깨와 팔꿈치의 작업치료를 위한 2 자유도 재활 훈련 시스템을 제작하였고, Morita⁷는 운동기능 회복을 위한 작업치료를 보조하는 재활 시스템을 소개하였다. 이 시스템은 2 자유도 X-Y 테이블 형태의 시스템으로 근력과 상지의 운동범위를 측정하기 위해 근전도 기록 장치와 CCD 카메라를 사용하였으며, 어깨와 팔꿈치의 일상생활동작을 위한 훈련을 보조한다. Ellsworth⁸는 기존의 재활 로봇 시스템이 고가임에 착안하여 시장에서 판매되는 조이스틱을 이용한 상지 재활 시스템을 제안하였다.

최근 상지 재활치료를 위한 연구는 일상생활동작을 위한 훈련에 많이 초점이 맞추어져 있다. 이를 위해서는 로봇이 공간상의 움직임이 가능해야 하므로 많은 자유도를 가져야 하며, 작업공간이 넓어야 한다. Nef⁹는 이런 관점으로 로봇을 크게 말단장치를 기준으로 하는 로봇과 외골격 형태의 로봇으로 구분하였다.

3 차원 공간상의 운동이 가능한 로봇을 살펴보면 먼저 상업적으로 개발되어 실제 재활치료에 사용되고 있는 MIT-MANUS 가 대표적이다.¹⁰ MIT-MANUS 는 뇌졸중 후 수반되는 편마비 환자의 상지 특히 팔꿈치와 어깨의 재활치료를 위한 로봇으로 모터로 구동되는 5 절 링크장치, 포텐서미터, 토크 센서 등으로 구성되어 있으며, Krebs¹¹와 Fasoli¹²은 게임으로 구성된 재활 프로그램을 이용한 임상시험을 통해 효과를 입증하였다. 또한 Williams,¹³ Krebs^{14,15} 그리고 Masia¹⁶은 MIT-MANUS 를 기본 모듈로 사용하고 손목재활 위한 로봇, 공간상의 운동을 위한 상지의 상하 수직운동 로봇, 손 운동을 위한 로봇을 각각 모듈로 개발, 기본 모듈에 장착할 수 있도록 하여 3 차원 공간상의 재활 훈련 및 팔 전체의 재활 훈련이 가능한 시스템을 소개하였다. Lum^{17,18}과 Burgar¹⁹는 편마비 환자의 3 차원 공간에서 상지 재활훈련을 위한 로봇으로 MIME 을 개발하여 다양한 재활모드를 이용

한 임상시험 결과를 소개하였다.

Koyanagi²⁰와 Furusho^{21,22}는 3 차원 공간에서 상지의 재활 훈련을 위한 로봇을 개발하였다. 3 자유도를 가지는 이 로봇은 ER 액추에이터를 이용한 구동으로 기계적인 안정성을 향상시키고, 타이밍 벨트 장치를 이용하여 기계적인 강성을 높인 것이 특징이다. Nef²³와 Mihelj²⁴은 반외골격 구조를 가지는 로봇을 소개하였다. 척수손상이나 뇌졸중 후에 수반되는 상지 불완전마비나 완전마비 환자의 일상생활동작의 훈련에 적용할 수 있는 로봇으로, 어깨와 팔꿈치의 원활한 운동을 위해 6-7 자유도로 구성되어 있고 넓은 작업공간과 다양한 환자의 체격에 맞추어 조절할 수 있는 것이 특징이다. Shin²⁵은 3 차원 공간상의 운동이 가능한 새로운 형태의 로봇 시스템을 개발하였고, 수동운동 모드를 재활 프로그램에 적용하여 로봇을 이용한 재활치료 가능성을 보였다.

본 연구에서는 먼저 전체 시스템과 재활 프로그램 중에서 능동운동 모드 부분의 구성을 살펴보고, 로봇을 제어하기 위한 혼합 위치/힘 제어를 설계하여 실제 실험을 통해 로봇을 이용한 재활훈련의 가능성을 확인한다.

2. 재활 로봇 시스템의 구성

2.1 전체 시스템의 구성

재활 로봇 시스템의 전체 구성도와 제작된 로봇 시스템은 각각 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. 로봇 시스템은 팔꿈치 형상과 평행사변 형 링크 장치의 형상이 혼합된 매니퓰레이터, 엔코더가 부착되어 모터의 회전각 측정이 가능한 3 개의 AC 서보 모터, 자체 제작한 3 축 힘센서 그리고 각종 전원 공급회로, 센서 관련 회로, 비상정지 버튼 회로 등이 배치되어 있는 제어 박스로 구성되어 있다.

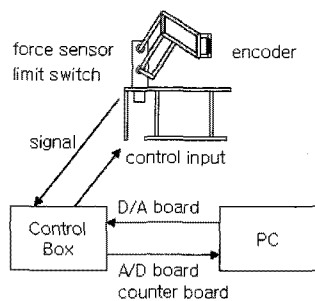


Fig. 1 Configuration of rehabilitation robot system

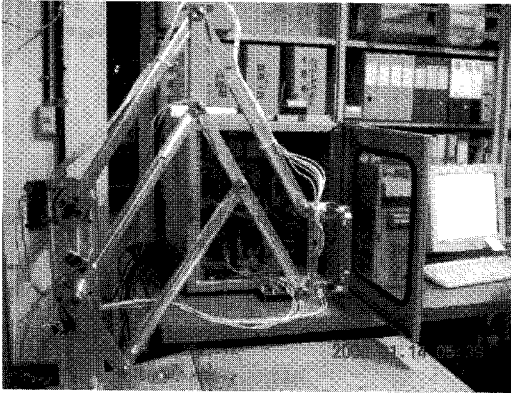


Fig. 2 The rehabilitation system for upper extremities

또한 환자의 안전을 고려하여 구동 프로그램, 리밋 스위치, 관절 부분의 형상, 비상정지 버튼의 4 단계에 걸친 안전 대책을 구현하였다.²⁵

2.2 재활 프로그램의 구성

실제 병원에서 하고 있는 재활 치료는 치료초기 단계에 스스로 운동이 불가능한 환자를 대상으로 재활 치료사가 힘을 주어 운동을 시키는 수동 운동과 어느 정도 움직임이 가능한 환자가 스스로 운동을 하는 능동운동으로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 능동운동에 대한 재활 프로그램을 구현하였으며 프로그램의 전체 흐름도는 Fig. 3 과 같다.

능동운동 모드는 환자가 움직이려는 방향과 반대방향으로 일정한 저항력을 걸어주는 저항운동 모드와 말단장치를 잡고 저항력을 거의 느끼지 않으면서 로봇을 자유롭게 움직일 수 있도록 하는 자유운동 모드로 나누어 구현하였다.

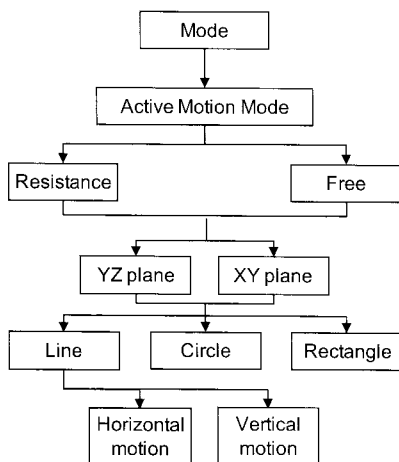


Fig. 3 Flow diagram of rehabilitation program

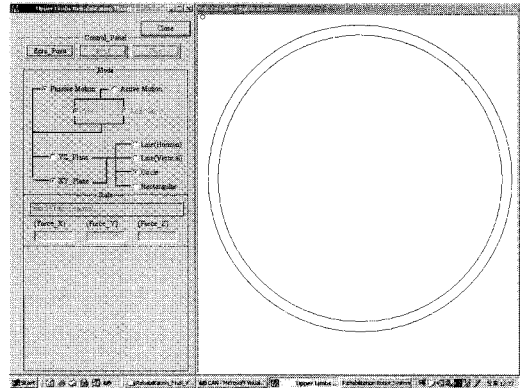


Fig. 4 Visual displays

능동운동 모드는 재활훈련 테이블과 평행한 XY 평면 운동과 테이블에 수직인 YZ 평면 운동으로 나누었으며, 여러 가지 궤적의 운동으로 구성하였다.

재활 프로그램 실행 시에 모니터를 통해 나타나는 화면은 Fig. 4 와 같으며, 운동 모드와 운동 궤적을 결정하는 부분, 결정된 궤적의 출발점으로 말단장치를 이동시키기 위한 부분, 각 방향의 힘을 표시하는 부분 그리고 결정된 궤적과 현재 말단장치의 위치를 시각적으로 표시하는 부분으로 구성되어 있다.

3. 제어기 설계

재활 로봇에 대한 기존의 연구에서는 대부분 전형적인 위치 기반 PID 제어기나 임피던스 제어기를 사용하였다.

본 논문에서는 운동 방향으로는 힘을, 다른 두 직각 방향으로는 위치를 동시에 제어할 수 있는 혼합 위치/힘 제어를 사용하였다. 많은 계산량 때문에 시스템의 동역학을 고려하지 않은 전형적인 혼합 위치/힘 제어기를 기본 골격으로 하고 로봇의 형상에 따라 이득값이 조절되는 형태로 제어기를 구성하였으며, 동역학을 고려하지 않은 전형적인 혼합 위치/힘 제어기를 표현하면 다음과 같다.²⁶

$$\tau = \tau_p + \tau_f. \tag{1}$$

$$\tau_p = k_p J^{-1} S (X_d - X) + k_v J^{-1} S (\dot{X}_d - \dot{X}), \tag{2}$$

$$\tau_f = k_{fp} J^T (I - S) (F_d - F) + k_{fv} J^T (I - S) (\dot{F}_d - \dot{F}). \tag{3}$$

여기서,

k_p, k_v, k_{fp}, k_{fv} ; 양의 스칼라 량,
 X_d, F_d ; 원하는 위치와 힘,
 S ; 선택행렬

을 뜻하고, 선택행렬은 대각선에 0 과 1 을 갖는 대각행렬이다.

자코비안의 전치행렬과 역행렬은 로봇의 자세 변화에 영향을 받으므로 미리 선정한 제어기의 이득값들은 로봇이 움직이는 동안 계속 변하게 된다. 그러므로 식(2)와 (3)의 이득값 k_p, k_v, k_{fp} 그리고 k_{fv} 을 다음과 같이 각 관절의 운동에 따라 변하는 새로운 이득값으로 취한다.

$$k'_p = \frac{k_p}{|J_{ij}^{-1}| + \rho}, \tag{4a}$$

$$k'_v = \frac{k_v}{|J_{ij}^{-1}| + \rho}, \tag{4b}$$

$$k'_{fp} = \frac{k_{fp}}{|J_{ij}^T| + \rho}, \tag{4c}$$

$$k'_{fv} = \frac{k_{fv}}{|J_{ij}^T| + \rho}. \tag{4d}$$

여기서, ρ 는 양의 스칼라 량, $|J_{ij}^{-1}|$ 는 자코비안 역행렬의 i 번째 행 j 번째 열 원소, $|J_{ij}^T|$ 는 자코비안 전치행렬의 i 번째 행 j 번째 열 원소를 의미한다. 이 제어기의 블록 다이어그램은 Fig. 5 에 나타내었다.

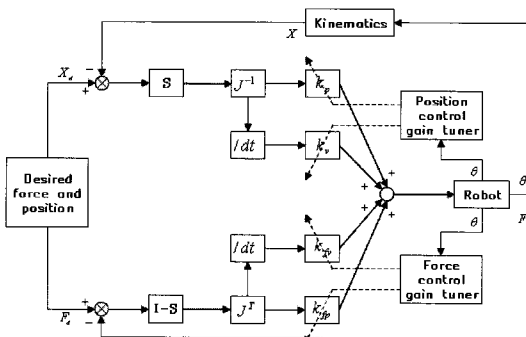


Fig. 5 Block diagram of the hybrid position/force controller

4. 실험 및 결과

본 논문에서는 능동운동 모드에 대한 실험을 수행하였다. 능동운동 모드는 환자가 시스템의 손잡이를 잡은 상태에서 스스로의 힘으로 주어진 궤적을 따라 운동하는 것으로, 운동에 사용되는 근육의 힘을 증가시키고 눈과 팔 근육의 협동장애를 감소시키는데 효과가 있는 것으로 알려져 있다.⁴

실험은 로봇 시스템의 안전을 고려한 대책 작동 여부, 작업 영역 내에서 운동 가능 여부, 말단 장치의 궤적추종 정도, 일정한 저항력 부여 등을 확인하기 위하여 수행하였으며, 환자를 가정한 일반인을 대상으로 하였다. 따라서 능동운동 중에 환자에게 걸리는 저항력은 재활치료의 시기, 환자마다 다르므로 재활 치료사가 언제든지 설정이 가능하도록 하였으며 본 실험에서는 20N 으로 설정하였다.

능동운동 모드는 Fig. 6 과 같이 환자가 길이 40 cm 의 직선궤적을 따라 손잡이를 밀고 당기는 운동과 길이 40cm 의 직선궤적을 따라 좌우로 움직이는 운동에 대하여 각각 능동 저항운동 모드와 능동 자유운동 모드를 적용하여 수행하였다.

Fig. 7(a)에서는 Y 방향의 직선운동에 따른 관절 2 와 3 의 각도변화를 나타내었고, 이 때 말단장치의 Y 방향 위치와 환자와 손잡이 사이에서 발생하는 저항력을 Fig. 7(b)에 나타내었다. 여기서, 45 초 정도에 운동을 멈추었을 때도 환자에게 걸리는 저항력은 약 20N 으로 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 주어진 궤적으로부터 벗어나려는 X 와 Z 방향으로의 힘과 그 때의 위치오차를 나타낸 것으로 46 초에서 48 초 사이에 X 와 Z 방향으로 약 30N 정도의 힘으로 궤적을 벗어나려고 할 때 발생하는 위치오차는 그 최대크기가 1.43cm 이었고 이는 주어진 궤적을 벗어나려는 환자의 운동에 대하여 시스템이 강하게 막는 것을 의미한다.

Fig. 8(a)에서는 X 방향의 직선운동에 따른 관절 1, 2 그리고 3 의 각도변화를 나타내었고, 이 때 말단장치의 X 방향 위치와 환자와 손잡이 사이에서 발생하는 힘을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 여기서, 주어진 궤적 내에서 초반부에 천천히 운동할 때와 약 30 초 이후에 빠르게 운동할 때 모두 크기가 5N 이내의 작은 힘이 걸려 환자의 자유로운 운동이 가능함을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 주어진 궤적으로부터 벗어나려는 Y 와 Z 방향으로의 힘과 그 때의 위치오차를 나타낸 것으로 26 초에서 28 초 사이에 약 30-40N 의 힘으로 궤적을 벗어나려고 할 때 발생하는 위치오차의 최대크기가 0.34cm 로 주어진 궤적을 잘 유지했다.

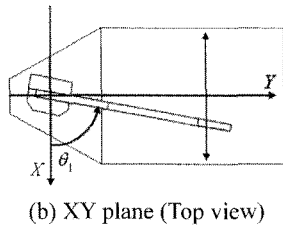
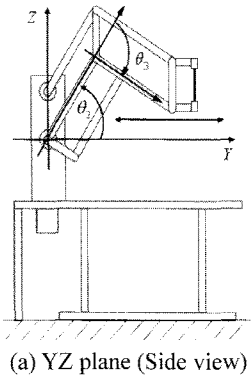


Fig. 6 Desired trajectory of end-effector

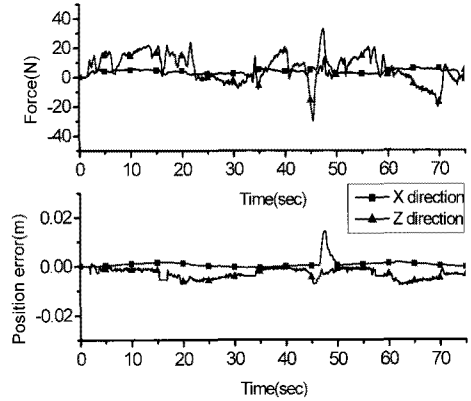
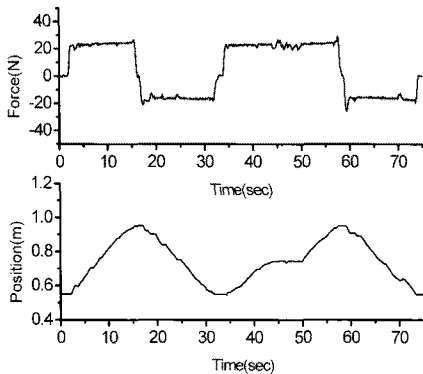
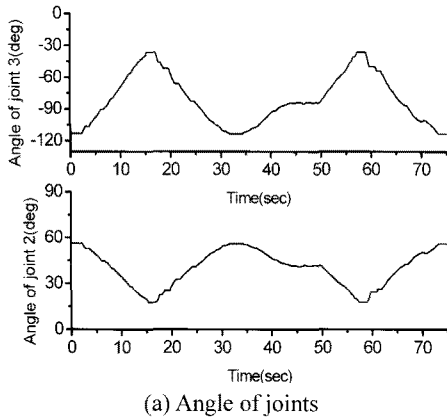
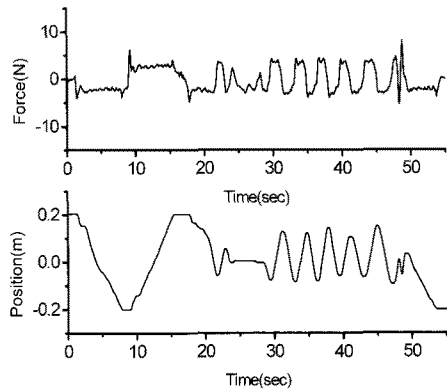
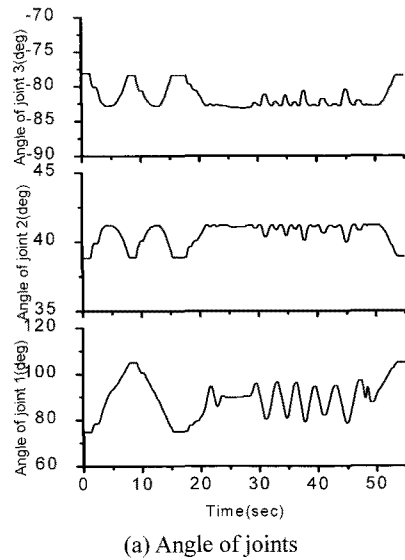
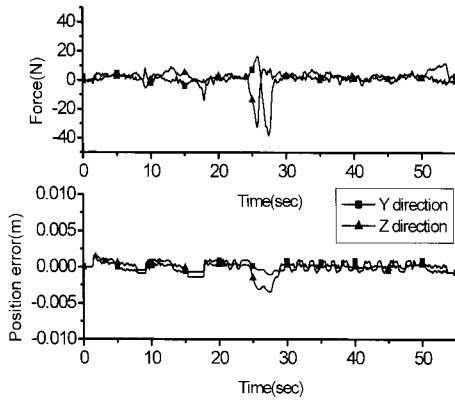


Fig. 7 Results of active-resisted motion mode experiments (YZ plane, horizontal trajectory)





(c) Position errors and forces of Y and Z direction

Fig. 8 Results of active-free motion mode experiments (XY plane, horizontal trajectory)

이 실험을 통해 로봇이 환자에게 자유로운 운동 또는 미리 설정한 저항력을 건 운동이 가능하도록 함을 확인할 수 있었고, 또한 주어진 궤적을 벗어나려는 운동에 대해서는 궤적을 벗어나지 않도록 제어를 하고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 상지 재활훈련을 위한 새로운 재활로봇 시스템을 이용하여 능동운동 모드를 구현하였다. 능동운동 모드는 환자가 스스로의 힘으로 주어진 궤적을 따라 운동하는 것으로 환자와 로봇 사이에 작용하는 힘을 거의 느낄 수 없도록 하여 자유로운 운동이 가능한 능동 자유운동 모드와 환자가 움직이는 방향의 반대 방향으로 일정한 저항력이 걸린 상태로 운동을 하는 능동 저항운동 모드로 나누어 구현하였다.

이 실험을 통해 실제 재활치료에서 사용되고 있는 자유운동과 재활치료가 환자의 운동을 방해하는 힘을 주어 실시되고 있는 저항운동을 로봇 시스템을 이용하여 구현 가능함을 확인하였고, 또한 현재 치료성파에 대한 재활 전문의와 재활치료사의 주관적인 평가에 비하여 로봇 시스템을 이용하는 경우 저항력의 크기, 궤적의 추종 속도, 궤적을 벗어나려는 불필요한 힘에 의한 위치오차 등의 실험결과를 정량화하여 보다 객관적이고 정확한 치료성파를 데이터화할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010 년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Korea National Statistical Office, "Population Projections for Korea," 2007.
2. Bardorfer, A., Muni, M., Zupan, A. and Primožic, A., "Upper Limb Motion Analysis Using Haptic Interface," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 253-260, 2001.
3. Bien, Z. N., Kim, D. J., Chung, M. J., Kwon, D. S. and Chang, P. H., "Development of a Wheelchair-based Rehabilitation Robotic System (KARES II) with Various Human-Robot Interaction Interface for the Disabled," Proceedings IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol. 2, pp. 902-907, 2003.
4. Kim, J. H. and Han, T. Y., "Rehabilitation Medicine 2nd Edition," Koonja Publishing Inc., pp. 9-138, 2003.
5. Cozens, J. A., "Robotic Assistance of an Active Upper Limb Exercise in Neurologically Impaired Patients," IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 254-256, 1999.
6. Sakaguchi, M., Furusho, J. and Genda, E., "Basic Study on Rehabilitation Training System Using ER Actuators," Proceedings IEEE International Conference, Vol. 1, pp. 135-140, 1999.
7. Morita, Y., Akagawa, K., Yamamoto, E., Ukai, H. and Matsui, N., "Basic Study on Rehabilitation Support System for Upper Limb Motor Function," Proceedings IEEE 7th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'02), pp. 127-132, 2002.
8. Ellsworth, C. and Winters, J., "An Innovative System to Enhance Upper-Extremity Stroke Rehabilitation," Proceedings 25th IEEE/EMBS International Conference, Vol. 3, pp. 1617-1620, 2003.
9. Nef, T. and Riener, R., "ARMin-Design of a Novel Arm Rehabilitation Robot," Proceedings IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp. 57-60, 2005.
10. Hogan, N., Krebs, H. I., Charnnarong, J., Srikrishna,

- P. and Sharon, A., "MIT-MANUS: A Workstation for Manual Therapy and Training," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 161-165, 1992.
11. Krebs, H. I., Hogan, N., Aisen, M. L. and Bruce, B. T., "Robot-aided Neurorehabilitation," IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 75-87, 1998.
 12. Fasoli, S. E., Krebs, H. I., Stein, J., Frontera, R., Hughes, R. and Hogan, N., "Robotic Therapy for Chronic Motor Impairments after Stroke: Follow-up Results," Arch. Phys. Med. Rehabilitation, Vol. 85, No. 7, pp. 1106-1111, 2004.
 13. Williams, D. J., Krebs, H. I. and Hogan, N., "A Robot for Wrist Rehabilitation," Proceedings 23rd EMBS International Conference, Vol. 2, pp. 1336-1339, 2001.
 14. Krebs, H. I., Ferraro, M., Buerger, S. P., Newbery, M. J., Makiyama, A., Sandmann, M., Lynch, D., Volpe, B. T. and Hogan, N., "Rehabilitation Robotics: Pilot Trial of a Spatial Extension for MIT-MANUS," Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation, Vol. 1, No. 5, pp. 1-15, 2004.
 15. Krebs, H. I., Volpe, B. T., Williams, D. J., Celestino, J., Charles, S. K., Lynch, D. and Hogan, N., "Robot-aided Neurorehabilitation: A Robot for Wrist Rehabilitation," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 327-335, 2007.
 16. Masia, L., Krebs, H. I., Cappa, P. and Hogan, N., "Design and Characterization of Hand Module for Whole-arm Rehabilitation Following Stroke," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 4, pp. 399-407, 2007.
 17. Lum, P. S., Van der Loos, H. F. M., Shor, P. and Burgar, C. G., "A Robotic System for Upper-limb Exercises to Promote Recovery of Motor Function Following Stroke," Proceedings IEEE 6th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 235-239, 1999.
 18. Lum, P. S., Burgar, C. G., Van der Loos, H. F. M., Shor, P. C., Majmundar, M. and Yap, R., "The MIME Robotic System for Upper-limb Neurorehabilitation: Results from a Clinical Trial in Subacute Stroke," Proceedings IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 511-514, 2005.
 19. Burgar, C. G., Lum, P. S., Shor, P. C. and Van der Loos, H. F. M., "Development of Robots for Rehabilitation Therapy: The Palo Alto VA/Stanford Experience," Journal of Rehabilitation Research and Development, Vol. 37, No. 6, pp. 663-673, 2000.
 20. Koyanagi, K., Furusho, J., Ryu, U. and Inoue, A., "Rehabilitation System with 3-D Exercise Machine for Upper Limb," Proceedings IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol. 2, pp. 1222-1227, 2003.
 21. Furusho, J., Koyanagi, K., Imada, Y., Fujii, Y., Nakanishi, K., Domen, K., Miyakoshi, K., Ryu, U., Takenaka, S. and Inoue, A., "A 3-D Rehabilitation System for Upper Limbs Developed in a 5-year NEDO Project and Its Clinical Testing," Proceedings IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 53-56, 2005.
 22. Furusho, J., Shichi, N., Hu, X., Kikuchi, T., Nakayama, K., Li, C., Yamaguchi, Y., Inoue, A. and Ryu, U., "Development of a 6-DOF Force Display System with High Safety and Its Application to Rehabilitation," Proceedings IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 962-967, 2006.
 23. Nef, T., Mihelj, M. and Riener, R., "ARMin: A Robot for Patient-cooperative Arm Therapy," Medical & Biological Engineering & Computing, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900, 2007.
 24. Mihelj, M., Nef, T. and Riener, R., "ARMin II-7 DOF Rehabilitation Robot: Mechanics and Kinematics," Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4120-4125, 2007.
 25. Shin, K. H. and Lee, S. H., "Development of a 3-D Rehabilitation Robot System for Upper Extremities," Journal of KSPE, Vol. 26, No. 4, pp. 64-71, 2009.
 26. Craig, J. and Raibert, M., "A Systematic Method Hybrid Position/Force Control of a Manipulator," Proceedings IEEE Computer Software Applications Conference, pp. 446-451, 1979.