

# 상지 외골격 로봇의 특이성 회피를 위한 힘 제어기 개발 Development of force controller for singularity avoidance of upper limb exoskeleton robot

\*한정수<sup>2</sup>, 이병규<sup>1</sup>, 이희돈<sup>1</sup>, #한창수<sup>1</sup>

\* J. S. Han<sup>2</sup>, B. K. Lee<sup>1</sup>, H. D. Lee<sup>1</sup>, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 기계공학과, <sup>2</sup>한성대학교 기계시스템공학과

Key words : Wearable Robot, Upper Limb Exoskeleton, Singularity, Damped Least Square

## 1. 서론

외골격 로봇은 착용자의 근력보조 및 증강 또는 재활치료를 목적으로 개발된 시스템으로써 인체의 외부에 부착되며 인체와 유사한 동작이 가능한 관절 자유도를 가진다.[1] 또한, 착용자의 동작의도를 파악하여 로봇의 제어를 위하여 사용하며, 상지 및 하지 로봇으로 구분할 수 있다. 그 중 상지 외골격 로봇은 인체 상지는 관절의 동작범위가 크고 로봇 동작 시 특이점(singular point)을 지나기 때문에 외골격 로봇의 제어기 개발 시 이에 대한 고려가 되어야 한다. 외골격 로봇은 특이점 부근에서 진동이나 동작오류 등의 특이성(singularity)이 발생 할 수 있으며 따라서 이로 인하여 착용자에게 위해를 가할 수 있다.

본 연구에서는 힘 센서를 이용하여 착용자 동작의도를 파악하는 상지 외골격 로봇에 대하여 특이성 회피를 위한 힘 제어기 개발을 목적으로 한다. 이를 위하여 동역학 모델 기반의 힘 제어기를 구성하고, 이 제어기에 DLS(Damped Least Square)기법을 적용하여, 기존의 힘 제어기와 특이점 부근에서 동작 특성을 비교하고자 한다.

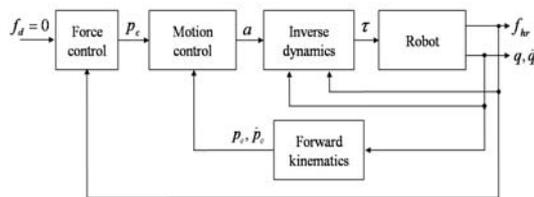


Fig. 1 Block diagram of controller

## 2. 제어기 설계

본 연구에서 사용하는 상지 외골격로봇은 착용자의 등과 손에서만 체결되며 손 체결부에 장착된 3 축 힘 센서에 의하여 착용자 동작의도를 파악하고 이는 제어기 입력으로 사용한다. 상지 Fig. 1 은 상지 외골격 로봇의 제어 알고리즘을 도식화한 것이다.  $f_{hr}$  은 외골격 로봇과 착용자의 상호작용력이며  $f_d$  는 제어 목표 값이다. 이때, 로봇과 착용자 사이의 힘이 0 이면 로봇이 착용자의 동작을 잘 추종한다고 할 수 있다. 또한, end effector 의 위치  $p_e$  를 end effector 가 움직여야 할 위치  $p_c$  로 움직이기 위한 가속도  $a$  는 식 (1)에 의하여 각 관절의 각속도로 변환되며, 여기서  $\alpha$  는 식 (2)의 inverse dynamics 를 통하여 end effector 가 목표 위치로 움직이기 위한 토크입력으로 사용된다.[2] 하지만 외골격 로봇이 기구학적 특이점에 접근할 경우, 식 (1)의  $J^{-1}$  는 singular matrix 가 되며 계산이 불가능해지고 시스템을 불안정하게 하는 원인이 된다. 이러한 문제를 피하기 위하여 DLS 기법이 제안되었다.[3] DLS 기법은  $J^{-1}$  를 SRI(Singularity Robust Inverse)로 대체하여  $J^{-1}$  의 크기가 매우 커지는 것을 방지하는 방법으로서 SRI 는  $J^*$  는 식 (3)과 같다. 여기서  $\lambda$  는 non-zero damping constant 이다.[4]

$$\alpha = J^{-1}(q)(a - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}) \quad (1)$$

$$\tau = M(q)\alpha + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T f_{hr} \quad (2)$$

$$J^* = J^T (JJ^T + \lambda^2 E)^{-1} \quad (3)$$

$$\alpha = J^*(q)(a - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}) \quad (4)$$

### 3. 특이성 회피 효과 검증 실험

DLS 기법의 효과를 검증하기 위하여 DLS 기법을 사용한 제어기와 일반적인 특이성 회피 방법인 pseudoinverse 기법을 사용한 제어기를 특이점을 포함한 영역에서 동작하는 실험을 하였다. 실험은 외골격 로봇을 착용한 상태에서 대상 시스템의 특이점인 각 관절의 각도가 0° 인 지점을 지나도록 임의의 높이만큼 팔을 들었다 원 위치로 돌아오게 조작하였다.

Fig. 2 의 (a)는 pseudoinverse 기법을 이용한 제어기를 사용하였을 때, 각 관절의 관절각을 측정한 그래프이다. 외골격 로봇의 end effector 가 실험 시작 후 특이점인 모든 관절의 각도가 0° 가 되는 지점으로 접근하는 2.5 초 이후에 각 관절의 각도가 진동하며 시스템이 불안정한 것을 볼 수 있다. Fig. 2 의 (b)는 DLS 기법을 사용한 제어기를 사용하였을 때, 각 관절의 관절각을 측정한 그래프이다. (a)와 비교해보면 로봇의 end effector 가 원점으로 접근하였을 때, 진동이 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이것은 DLS 기법을 제어기에 적용함으로써 특이점에서의 제어 안정성을 확보했다고 볼 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 상지 외골격 로봇의 제어기를 구성하였다. 로봇 시스템의 특이점 주변 영역에서의 제어 안정성을 검증하기 위하여 DLS 기법과 Pseudoinverse 기법을 적용한 제어기를 특이점에서 동작하는 실험을 하였고, DLS 기법을 사용한 제어기가 Pseudoinverse 기법을 사용한 제어기에 비해 특이점에서 안정한 것을 확인하였다.

### 후기

본 연구는 지식경제부 및 산업기술평가관리원의 지식경제 기술혁신 로봇산업원천기술개발사업[No. 10035461, 산업노동지원을 위한 착용식 근력증강 로봇 기술 개발]의 지원으로 수행 되었음.

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의

재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0020450).

### 참고문헌

1. K.H. Low, Xiaopeng Liu and Haoyong Yu, "Development of NTU Wearable Exoskeleton System for Assistive Technologies", Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, July, 2005.
2. B. Siciliano and L. Villani, Robot Force Control, Kluwer Academic Publishers, Boston., 1999.
3. Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse kinematics solutions with singularity robustness for robot manipulator control", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, No.3, pp. 163-171, 1986.
4. Arati S. Deo and Ian D. Walker, "Overview of damped least-squares methods for inverse kinematics of robot manipulators", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 14, No.1, pp. 43-68, 1995.

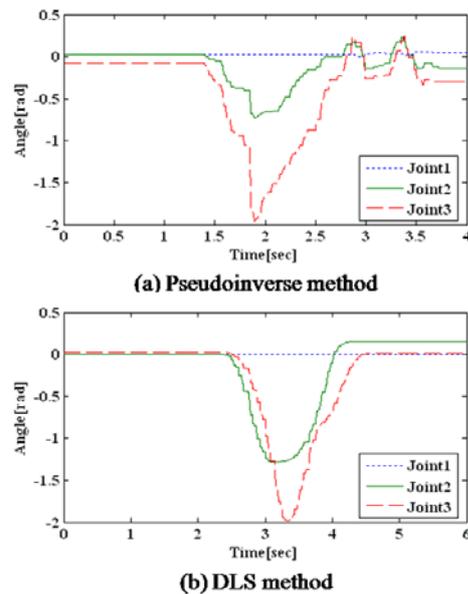


Fig. 3 Joint angle of upper limb exoskeleton robot