

Development of a Muscle Rigidity Measurement System for an Early Diagnosis of Parkinson's disease

Seunghoon Lee, Hyunji Park, Jangwoon Park, and Hecheon You

Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH, Pohang, South Korea, 790-784

ABSTRACT

Background: Muscle rigidity is one of the basic characteristic of PD and which is defined as an increase in resistance to passive stretch of muscle. In an early stage of PD, clinical assessment of rigidity is commonly performed with the rigidity item in the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UDPRS). However, the UDPRS is time-consuming and also deficient in reliability and reproducibility due to inter and intra-observer variability. **Objective:** The purpose of this study is to develop a torque based measurement system of muscle rigidity which can be used in early diagnosis of Parkinson's disease (PD) in a quantitative manner. **Method:** To validate the torque based method, human arm was modeled and tested with one healthy male subject by passive flexion of the elbow joint. Torque and angle data in the dynamic phase were used to calculate elastic coefficients in flexion. **Results:** The present study designed a compact, portable, and precise system based upon a glove type device. Our system is composed of compact force sensor and a gyroscope. **Application:** A new muscle rigidity measurement system can be used for an early diagnosis of PD in terms of an elastic coefficient of muscle.

Keywords: Parkinson's disease, Muscle rigidity, Early diagnosis, Torque based device

1. Introduction

파킨슨병(Parkinson's disease)은 근육의 움직임에 관장하는 신경세포와 신경 전달 물질의 이상으로 인한 만성 진행성 퇴행성 질환이다. 파킨슨병의 발병률과 사망률이 증가하고 있으며, 파킨슨병은 완치가 불가능하여 지속적 치료가 필요하다. 파킨슨병의 10%는 유전적, 환경적 요인에 기인한다고 알려져 있지만, 90%의 파킨슨병은 명확한 원인이 밝혀져 있지 않다(Weintraub, 2008). 또한 파킨슨병은 초기에 진단하기 어려워 오진이 많이 발생하고 있다.

파킨슨병의 주요 증상으로 알려진 근 경직(muscle rigidity)은 근육이 급격히 수축함으로써 근육의 저항(resistance)이 증가하는 것을 의미한다(Fahn & Przedborski, 2005). 근 경직을 포함한 다양한 질병의 진단에 근육의 경직에 따른 인체 관절의 강성(stiffness) 변화 측정을 이용한다. 파킨슨병 환자에게 있어 근육과 관절의 경직은 환자의 자발적 움직임이 아닌 수동적인 움직임이 수행 될 때 많이 발생한다. 이를 수동적 근 경직(passive rigidity)이라고 하며, 근육 조직의 기계적(mechanical) 특성의 변화로 인해 나타난다. 근육 경직으로 인하여 관절의 강성이 변화되므로, 관절의 강성 측정

은 근 경직을 진단하기 위한 방법 중 하나로 사용된다. 하지만, 근 경직을 객관적으로 측정하기 위한 표준화된 방법이 부재하다.

임상가는 근 경직을 평가하기 위하여 환자의 관절에 대해 강성을 평가하여 점수로 나타내고 있다. 이 중 근 경직의 임상적 평가 방법으로 널리 사용되고 있는 파킨슨병 평가 점수(Unified Parkinson's Disease Rating Scale, UPDRS)는 관절 경도를 0에서 4의 다섯 단계로 나누어 구분한다. 0점은 근 경직이 없음을 나타내며, 4점은 가장 높은 근 경직과 함께 제한된 관절범위를 가진다. 그러나 UPDRS는 관찰자간 및 관찰자내부 변동성(inter and intra observer variability)으로 인하여 신뢰성과 재현성의 저하가 초래될 수 있으며 검사에 많은 시간이 소요된다(Prochazka, 1997).

근 경직을 정량적으로 측정하고 평가하기 위한 연구가 수행되어 왔으나 현재까지 표준화된 방법을 제안하지 못하였다. Lee et al. (2002)과 Fung et al. (2000)의 연구는 생체역학, 생리학 특성 활용하여 굽힘/신전 운동시의 탄성 성분, 일률 등의 운동역학적 분석 방법을 제안하였다. Meara et al. (1992)과 Levin et al. (2008)의 연구는 근전도계(Electromyography, EMG)를 이용하여 굽힘/신전 시 근육의 수축을 정량적으로 측정하고자 하였다. 하지만, 운동역학적

특성을 이용한 연구들은 측정장비로 과도한 크기로 인하여 피실험자에게 육체적인 스트레스를 발생시켜 연구결과를 임상에 적용하기 어려웠다. 또한, 근전도계를 이용한 연구들은 실험 결과 피실험자간의 근 경직도 측정결과에 심대한 차이를 보여 실제의 진단에 사용하기 어려웠다.

본 연구는 파킨슨병 조기 진단 및 선별을 위한 근 경직도 정량적 측정 시스템 개발을 목적으로 기존의 torque based measurement system을 모사하여 근 경직도를 측정하여 타당성을 보이고 인간공학적 측면에서 측정장비의 개선 아이디어를 도출하였다.

2. Method

본 연구는 인간공학적 근 경직도 측정 장치 개발을 위해 시제품을 제작하고 인간공학적 평가를 통해 장비의 유용성을 파악하였다. 시제품으로부터 근 수축에 따른 근 경직도 변화를 측정하고 평가 결과로부터 장비의 개선안 도출이 수행되었다.

2.1 The production of test-bed for test

근 경직도를 정량화하기 위하여 기존 장비와 유사하게 torque-based measurement system을 고안하였다. 그림 1과 같이 구성된 장치는 팔을 지지하는 판(plate), 로드 셀(lead cell), 인코더(encoder), 신호 증폭기(amplifier), 그리고 전원 공급장치(power supply)로 이루어져 있으며 컴퓨터와 연결되어 정보를 송수신 할 수 있다.

근 골격계 질병의 경력이 없는 건강한 남성을 대상으로 근 경직도 측정을 수행하였다. 피실험자는 팔을 장치에 올려둔 뒤 자발적인 힘을 가하지 않도록 하였다. 판이 일정한 속도로 움직이는 동안 기기에 저항하는 힘을 로드 셀로 측정하였다. 이와 함께 팔꿈치의 각도(joint angle)를 인코더로 측정 및 기록하였다. 측정된 각도와 힘은 토크(torque), 각속도, 그리고 각 가속도의 계산에 사용되었으며 계산된 결과는 근 경직도를 측정하는데 사용되었다.

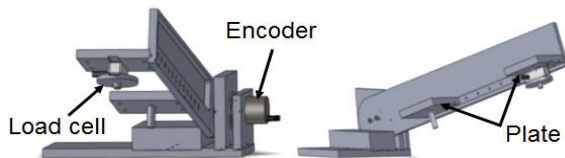


Figure 1. Test-bed for torque based muscle rigidity measurement system

2.2 Human arm modeling

점탄성(viscoelastic) 특성을 고려하여 인체 관절의 모멘트 평형 방정식을 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$I\alpha = \tau - B\omega - K\theta + C \quad (1)$$

I : inertial force, τ : torque, B : damping coefficient

K : spring coefficient, C : offset torque

θ : angle, ω : angular velocity, α : angular acceleration

식 (1)에서, τ 는 팔 지지부에 작용되는 토크로써 로드셀에 의하여 측정된다. θ 는 측정된 관절각도를 나타내며, ω 와 α 는 각각 각속도와 각 가속도를 나타낸다.

모든 운동형상학(kinematic) 변수와 토크는 굽힘을 양의 방향으로 나타내었다. 상수 C 는 오프셋 토크로써 초기상태에서 발생된 토크의 영향을 제거하기 위하여 도입되었다. 장치는 등속도로 인체 관절을 회전시키므로 각 가속도는 무시할 수 있다. 따라서 식 (1)은 다음의 식 (2)와 같이 정리된다.

$$\tau = B\omega + K\theta + C \quad (2)$$

따라서, 식 (2)와 같이 인체관절의 점탄성 특성을 나타낼 수 있도록 스프링상수와 damping 상수를 사용하여 torque-based measurement system에 적용 가능한 인체 관절 모델을 생성하였다.

2.3 Evaluation of torque-based measurement system

측정된 토크, 각속도, 그리고 각 가속도를 이용하여 식 (2)로부터 스프링 상수(K)와 damping 상수(B)를 구할 수 있다. 스프링 상수와 각도의 곱, 그리고 damping 상수와 각속도의 곱은 측정된 토크와 선형적인 관계가 있다. 따라서, 근육 경직도를 나타내는 스프링상수와 damping 상수의 크기 변화는 토크를 변화시킨다.

측정된 토크는 팔꿈치의 굽힘/신전, 내회전/외회전, 내반/외반의 3축 토크를 갖는다. 하지만, 팔꿈치의 내반/외반은 다른 두 가지 축에 비하여 매우 작은 크기를 가지므로 무시할 수 있다. 차원 축소 방법(dimension reduction method)을 통해 3축 방향의 토크를 굽힘/신전과 내회전/외회전 방향의 움직임으로 2차원화하였다.

피실험자는 등속도로 움직이는 판에 대하여 파킨슨병 평가 점수 0,1,2에 해당하는 힘과 유사한 강도로 저항하는 힘을 주며 실험을 반복 하였다.

3. Results

등속으로 움직이는 판에 팔을 고정한 뒤 근 경직을 측정할 결과 그림 2와 같이 저항하는 힘을 증가시키에 따라 토크도 함께 증가하였다. 근 경직도 점수에 따라 작용하는 토크를 내회전/외회전 토크와 굽힘/신전 토크에 대하여 그래프로 나타낸 결과 측정된 토크는 파킨슨병 평가점수에 따라 분류할 수 있었다. 파킨슨병 평가점수가 2점인 경우는 넓은 범위에 토크가 분포되었다.

굽힘 모멘트는 내회전 모멘트에 비하여 약 100배 이상의 값을 갖는다. 따라서 근 경직을 측정하는데 고려되어야 할 주요 변수는 굽힘 방향 토크, 각속도, 그리고 각 가속도임을 확인 할 수 있었다.

측정된 토크와 장성으로부터 torque based muscle rigidity measurement system의 유용성을 확인 할 수 있었다. 또한, 근 경직을 정량적으로 측정하기 위하여 필요한 주요 변수를 확인하였다. 인간공학적으로 측정장비를 검토하여 그림 3과 같은 착용가능하며 작은 크기의 근 경직도 측정 장비의 컨셉을 도출할 수 있었다.

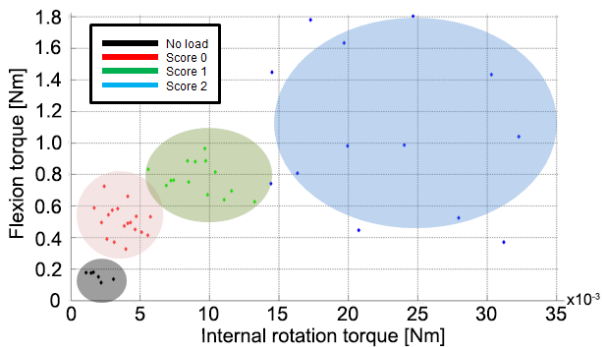


Figure 2. Internal rotation and flexion torque during passive flexion of elbow joint

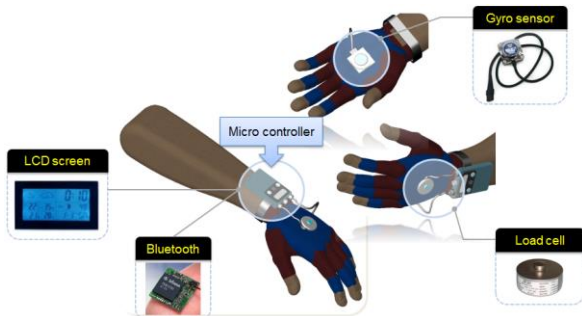


Figure 3. An improvement scheme of muscle rigidity measurement system

4. Discussion

본 연구를 통해 근 경직을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하고 기존 제품과 유사한 torque based measurement system을 제작하여 측정의 유용성을 확인하였다. 또한 평가 결과를 활용하여 파킨슨병의 조기 진단을 위한 정량적 근 경직도 측정 장비의 크기, 무게, 휴대성, 사용성 측면에서 4가지 개선안을 도출할 수 있었다.

근 경직도 측정을 수행한 결과 관절의 등속 운동과 가속 운동에 의한 차이가 존재하지 않았다. 이는 근 경직 측정 시 사람의 팔은 1Hz이하의 낮은 진동수로 움직이기 때문이었다. 그러므로 이러한 결과는 근 경직 측정 시 사람의 팔 동작에서 가속도의 영향을 무시하고 등속으로 가정 할 수 있다는 점을 의미한다. 기존의 측정장비는 수동적 근 경직의 측정을 위해 피검자의 팔을 등속으로 움직이도록 하는 메커니즘을 포함하고 있다. 따라서, 본 연구는 기존 장비의 동력원을 제거함으로써 장비의 크기와 무게를 획기적으로 줄일 수 있는 개선안을 도출할 수 있었다.

인체 관절의 속도 및 각속도를 정확하게 측정하기 위해 기존 장비는 팔을 지지하는 프레임은 불필요하게 장비를 크게 만들어 개선이 필요하다. 따라서 본 연구는 관절의 속도와 각속도를 자이로 센서(gyro sensor)를 사용하여 적은 크기로 장비를 만들 뿐 아니라 측정결과와 정확성도 향상 시키고자 한다. 또한 장비의 신호를 컴퓨터에 전달하는 케이블을 무선 장비로 변경하여 장비의 휴대성과 사용성을 높이고자 한다. 본 연구를 통해 개선된 근 경직도 측정 장비는 사용자의 편의성을 고려하여 장비의 크기를 획기적으로 작게 변경가능하며 착용 가능한 장비로 개선하고자 한다. 따라서 추후 정상인, 환자, 그리고 임상의를 대상으로 사용성에 대한 평가와 함께 개선안을 지속적으로 도출하는 연구가 수행될 계획이다.

본 연구를 통해 개발될 근 경직도 측정 시스템은 인간공학적인, 임상적 측면, 그리고 경제적 측면 등을 전반적으로 만족시켜 파킨슨병의 진단에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 기존의 파킨슨병 진단에는 임상의가 근 경직을 주관적으로 판단하여 진단의 정확성과 신뢰성이 떨어졌다. 하지만, 개선된 시스템은 정량적인 근 경직을 측정함으로써 진단의 신뢰성을 높여줄 수 있다. 또한 사람이 감지할 수 없는 약한 근 경직을 측정할 수 있으므로 파킨슨병의 진행을 조기진단 할 수 있어 사회적, 경제적 효과에 큰 기여를 할 것이다.

References

- Weintraub, D., Dopamine and impulse control disorders in Parkinson's disease, *Annals of Neurology*, 64, S93-S100, 2008.
- Fahn S and Przedborski S. Parkinsonism., *In: Merritt's Neurology*, Williams and Wilkins, 2005.
- Prochazka, A., Bennett, D. J., Stephens, M. J., Patrick, S.K., Sears Duru, R., Roberts, T. and Jhamandas, J.H., Measurement of rigidity in Parkinson's disease, *Movement Disorders*, 12(1), 24-32, 1997.
- Lee, H.M., Huang, Y.Z., Chen, J.J. and Hwang, I.S., Quantitative analysis of the velocity related pathophysiology of spasticity and rigidity in the elbow flexors. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 72, 621-629, 2002.
- Fung, V.S., Burne, J.A. and Morris, J.G., Objective quantification of resting and activated parkinsonian rigidity: a comparison of angular impulse and work scores. *Movement Disorders*, 15, 48-55, 2000.
- Meara, R.J. and Cody, F.W., Relationship between electromyographic activity and clinically assessed rigidity studied at the wrist joint in Parkinson's disease. *Brain*, 115, 1167-1180, 1992.
- Levin, J., Krafczyk, S., Valkovic, P., Eggert, T., Claassen, J. and Botzel, K., Objective measurement of muscle rigidity in parkinsonian patients treated with subthalamic stimulation. *Movement Disorders*, 24, 57-63, 2008.

Author listings

Seunghoon Lee: shoonlee@postech.ac.kr

Highest degree: M.S, Mechanical Engineering, Sogang University, 2013

Position title: Ph.D. candidate, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Digital human modeling & simulation, User-centered product design & development, Anthropometric and biomechanical methods for product development

Hyunji Park: parkphj730@postech.ac.kr

Highest degree: B.S., Department of Industrial and Management Engineering, Hongik University

Position title: M.S. candidate, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic Product Design & Development, Medical Ergonomic, Human performance assessment

Jangwoon Park: parkjw@postech.ac.kr

Highest degree: Ph.D., Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Position title: Post-doctoral research associate, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: User-centered product design & development, anthropometric and biomechanical methods for product design, digital human modeling & simulation, usability testing, automobile ergonomics, affective engineering

Heecheon You: hcyou@postech.ac.kr

Highest degree: Ph.D., Industrial Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Associate Professor, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation, Digital human modeling & simulation, Human performance & workload assessment, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing