

Original Article

Open Access

스마트폰 어플리케이션을 이용한 뇌졸중 환자의 보행 평가 가능성

안보라 · 기경일¹ · 우영근^{2†}

라운휴병원 물리치료실, ¹대한PNF학회 대전충남도회, ²전주대학교 의과대학 물리치료학과

Potential Use of a Smartphone to Evaluate Gait during Walking in Stroke Patients

Bo-Ra An · Kyong-Il Ki¹ · Young-Keun Woo^{2†}

Department of Physical Therapy, RAON HUE Hospital

¹Daejeon-Chungnam branch in KPNFA®

²Department of Physical Therapy, College of Medical Sciences, Jeonju University

Received: November 16, 2017 / Revised: November 29, 2017 / Accepted: November 29, 2017

© 2018 Journal of Korea Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

| Abstract |

Purpose: Smartphones, which are widely used worldwide to detect acceleration and position, have been used in the area of rehabilitation medicine in recent clinical research studies and tests. The aim of the present study was to determine the feasibility of using a smartphone application based on center of movement (COM) displacement to measure gait parameters in stroke patients in the clinical field of rehabilitation medicine.

Methods: The study consisted of 30 stroke patients. The COM was measured using a smartphone application, Gait Analysis Pro, during a 6-m walk. Each patient performed three 6-m walking trials, and the smartphone application measured gait duration, gait speed, step length, cadence, and vertical and lateral displacement of the COM. The Kolmogorov-Smirnov test was conducted to determine the normality in gait parameters, and a repeated one-way analysis of variance (ANOVA) was performed to determine the consistency among the three trials. A p value of 0.05 was considered statistically significant in all the tests.

Results: In all the measured parameters, the smartphone application showed a normal distribution, as shown by the results of the Kolmogorov-Smirnov test. There were no significant differences among the three repetitive walking trials.

Conclusion: These results suggest that the smartphone application can be used for evaluating gait in stroke patients, as well as in healthy adults. However, prior to using the smartphone application in the clinical field, further research involving three-dimensional gait analysis is needed to enhance the confidence level of the findings.

Key Words: Gait, Smartphone application, Stroke

†Corresponding Author : Young-Keun Woo (ykw092@naver.com)

I. 서론

뇌졸중은 노인뿐만 아니라 젊은 성인에서 신경학적 장애의 주요 원인이 되는 질환 중 하나이다 (Jorgensen et al., 2002). 뇌졸중의 일반적인 증상으로는 하지 근육 약화, 발목 관절의 뻣뻣함, 움직임 동안 힘의 상실과 근 수축 조절 실패, 그리고 안정성의 문제를 동반하게 된다(Chung et al., 2004; Hidler et al., 2007; Neckel et al., 2006). 또한, 편측 마비로 인한 균형과 자세 조절의 어려움을 동반하여 보행 동안의 지구력, 보행 속도의 감소 및 비대칭적인 보행 주기 등이 관찰된다(Dean et al., 2001; Olney et al., 1991; von Schroeder et al., 1995), 따라서, 이러한 증상들의 복합적인 결과로 인하여 많은 뇌졸중 환자는 일상생활에서 많은 어려움을 겪게 된다(Vearrier et al., 2005).

뇌졸중 환자의 보행 능력은 앞서 언급한 여러 가지 문제점과 감각 운동 손상의 심각성에 따라 다양한 형태로 나타나게 되어, 보행 능력의 회복은 뇌졸중 환자 재활 영역에서 중요한 목표로 제시되고 있다(Birol & Tok, 2014). 또한, 이러한 보행 능력의 평가는 지속적인 재활 프로그램의 효과와 치료의 효과성을 평가하기 위한 중요한 영역이 되며, 보행 속도, 활보장등과 같이 양적인 변수 측정을 규칙적으로 수행하는 것이 중요하다(Duberstein et al., 2014). 대부분의 뇌졸중 환자의 보행 평가는 보행 속도, 유각기 시간, 입각기 시간, 유각기와 입각기 비율, 활보장 등의 시공간적 변수로 측정하고, 이를 기반으로 한 대칭성을 주로 측정하게 된다. 또한, 에너지 효율을 측정하기 위한 방법으로 비정상적인 체중심의 이동경로를 사용한다(Birol & Tok, 2014).

일반적으로 임상에서 보행 분석을 사용하는 목적은 보행 시 나타나는 문제점 파악, 적절한 치료의 계획, 그리고 효과적인 중재의 결과 확인을 위하여 사용하며, 대부분은 3차원적인 보행 분석을 이용하여 보행 평가에서 사용하고 있다(McGinley et al., 2009). 하지만, 3차원적인 보행 분석은 임상에서 많은 공간을 차지하고, 장비가 비싸며, 측정시간이 오래

걸리며, 측정 도구 사용 시 측정자의 숙련성이 요구되는 바로 지속적인 측정이 쉽지 않은 실정이다. Yi 등(2002)은 비교적 비싸고 측정하기 어려운 3차원적 동작 분석 시스템 보다 간편하게 보행 분석이 가능한 체중심의 가속도 기반의 보행 분석의 유용성을 강조하였으며, 정상 보행 시 입각기와 유각기를 구분할 수 있다고 하였으며, Zijlstra와 Hof (1997)는 보행 시 규칙적인 체중심의 이동경로를 보고하였으며, 이러한 체중심의 이동경로는 역학적 분석으로 가능하였으며, 보행 시 규칙적으로 발생하는 중요한 변수라고 하였다. 또한, do Carmo 등(2015)은 보행 시 뇌졸중 환자의 체중심 이동 경로는 유용한 보행 분석 변수로 사용할 수 있다고 하였다. Evans 등(1991)도 체중심의 가속도를 측정하여 보행 주기 단계들을 구분할 수 있다고 하였다.

최근 정보통신 기술(information technology, IT) 발달에 따른 스마트폰 사용이 많아지고, 스마트폰에 내장되어 있는 자이로 센서(gyro sensor)와 가속도 센서(acceleration sensor)를 연구에 응용한 연구들이 제시되고 있다. Park 등(2014)은 스마트폰을 이용하여 뇌졸중 환자의 수동관절 범위를 측정하였으며, Jung 등(2015)은 스마트폰에 내장되어 있는 가속도 센서와 가속도계를 이용하여 정상인과 뇌졸중 환자에서 보행시 체중심 이동 경로 평가 가능성을 제시하였으나, 스마트폰으로 제시되는 체중심 이동 경로의 결과값 분석이 어렵고, 이로 인한 상관성이 일관되게 나타나지 않았다. 또한, An과 Woo (2017)는 체중심의 이동경로를 쉽게 산출해주는 스마트폰 어플리케이션을 이용하였으나 정상인의 값만을 제시하여 임상에서 사용성의 한계를 제시하였다.

따라서, 본 연구는 스마트폰 어플리케이션을 이용한 체중심 기반의 보행 분석을 뇌졸중 환자에게 적용하고 뇌졸중 환자의 보행 평가 가능성을 제시하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구는 뇌졸중으로 진단받고 재활병원에 입원 및 외래 환자로 물리치료를 받고 있는 환자 30명으로 하였다. 뇌졸중 환자는 의사로부터 뇌졸중으로 진단 받고, 10m 이상 보행 보조기구 없이 독립보행이 가능하며, 의사소통에 문제가 없는 환자(MMSE-K 24점 이상)를 포함시켰다. 인지 문제, 소뇌로 인한 뇌졸중 환자 또는 정형외과적 문제를 동반한 뇌졸중 환자는 제외시켰다. 모든 대상자에게 나이, 신장, 체중, 발병일, 발병 원인을 조사 및 측정하였으며, 측정 및 조사 전 환자에게 연구의 목적을 설명하였으며, 연구 참여 동의를 획득하였다. 연구 대상자의 일반적인 특성은 다음과 같았다(Table 1).

2. 측정 도구

1) 스마트폰 어플리케이션(smartphone application, SMAP)

뇌졸중 환자의 보행 평가를 위해 스마트폰 어플리

케이션 Gait Analysis Pro (Gait Analysis for iPhone, YTA KK, Japan)을 이용하였다. 스마트 폰은 가속도계가 내장된 스마트폰 (iPhone 7, Apple Inc., USA)을 이용하였으며, 이 어플리케이션을 적용된 표본 추출률은 100Hz 이었다. Gait Analysis Pro 어플리케이션은 자유 보행 및 10m 보행을 선택하게 되어 있으며, 보행 후 체중심 움직임임과 보행 변수 데이터는 스마트폰에서 자동 분석된 후 화면에 표시되며, 이메일로 데이터를 전송하여 최종 자료 분석에 사용하였다(Fig. 1).

Table 1. General characteristics of subjects (n=30)

	Mean±SD	Range (min. ~max.)
Age (years)	60.10±12.23	29~83
Height (cm)	165.83±8.20	150~180
Weight (kg)	63.38±8.48	50~80
Onset (months)	11.07±9.42	2~38
Sex (male/female)	21/9	
Affected side (left/right)	10/20	
Etiology (ischemic/hemorrhage)	21/9	

overground measurement was completed.

최 20171108_084742

Duration: 6.0 [sec]

Distance: 6.0 [m]

Gait speed: 59.8 [m/min]

Step length: 59.6 [cm]

Cadence: 100.4 [steps/min]

Coefficient of variation: 0.016

Bilateral symmetry: 0.999

COM displacement

(vertical): 3.3 [cm]

(lateral): 1.7 [cm]

Show graph

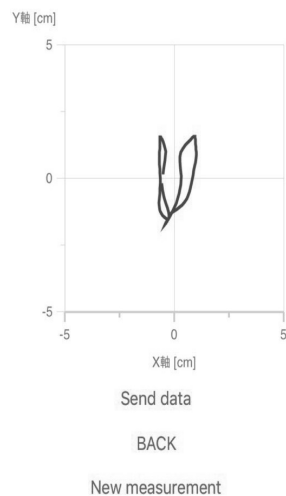


Fig. 1. Sample data from smartphone application.

3. 측정 절차

연구 대상자는 허리밴드를 이용하여 스마트폰을 허리띠 3번에 고정한 후, 스마트폰 어플리케이션 사용법에 따라 걷게 하였다. 연구 대상자들은 시작점에서 측정자가 ‘시작’이라고 신호하면 스마트폰의 실행과 동시에 6 m를 보행하였고 이 동안 측정 도구에서 데이터를 수집하였다. 6 m의 보행이 모두 완료 된 후에는 ‘그만’이라고 신호하고 스마트폰의 데이터 수집을 멈추었다. 대상자들은 편안한 속도와 빠른 보행을 실시하였고, 총 3번의 실험을 통한 평균값을 최종 결과값으로 사용하였다.

4. 자료 분석

본 연구 자료의 통계처리를 위해 통계프로그램인 SPSS (statistical package for the social sciences ver. 23.0, IBM Corporation, USA)를 사용하였다. 연구대상자의 일반적인 특성은 기술통계와 빈도분석을 이용하였으며, 뇌졸중 환자의 보행 평가 변수의 정규성 검증을 위하여 Kolmogorov-Smirnov 검증을 실시하였다. 또한, 뇌졸중 환자의 3번 보행 중 측정값의 차이가 있는지 알아보기 위하여 반복 일원분산분석(repeated one-way of analysis of variance)를 실시하였다. 통계적 유의성을 분석하기 위해 유의수준을 $\alpha=0.05$ 로 설정하였다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 스마트폰 어플리케이션을 이용한 보행 변수의 정규성 검증 결과

뇌졸중 환자를 대상으로 3번의 보행 후, 각 변수들의 측정된 평균값을 Kolmogorov-Smirnov 정규성 검증 결과, 모든 보행 변수에서 정규 분포를 이루는 것을 보여주었다.

2. 스마트폰 어플리케이션을 이용한 3번의 보행 변수 측정값의 차이 결과

뇌졸중 환자를 대상으로 3번 반복 측정값의 값의 반복 일원분산분석 결과는 Table 2와 같았다. 측정 결과, 3번의 반복 측정 간의 통계적으로 유의한 차이를 보여주지 않았다($p>0.05$).

Ⅳ. 고 찰

본 연구는 스마트폰 어플리케이션을 사용하여, 체중중 기반의 뇌졸중 환자의 보행 평가 시 사용 가능성을 제시하고자 하였다. 뇌졸중 환자는 6m의 보행거리를 편안한 보행으로 실시하였으며, 보행 평가를 위하여 스마트폰을 허리띠 3번에 위치하고 걷게 하였다. 연구 결과, 3번의 보행 측정값들은 정규성을 이루었으며, 3번의 측정값간의 차이가 통계적으로 나타나지

Table 2. Repeated one-way ANOVA among 3 trial walking performances

(n=30)

Parameters	1st	2nd	3rd	F	p
Duration (sec)	9.66±3.91 ^a	9.46±3.83	9.04±3.41	2.58	0.09
Gait speed (m/min)	42.33±13.94	43.12±14.07	44.09±12.82	1.91	0.16
Step length (cm)	37.39±13.25	38.28±13.80	38.39±12.50	0.63	0.54
Cadence (steps/min)	115.48±11.73	115.22±12.21	113.26±22.25	0.24	0.67
Vertical ^b COM displacement (cm)	1.88±0.85	1.94±0.95	1.95±0.96	0.17	0.84
Lateral COM displacement (cm)	1.52±1.05	1.61±1.11	1.51±1.07	0.18	0.83

^amean±standard deviation, ^bCOM: center of mass

않아 일관된 값을 산출하는 것을 보여 주었다.

본 연구에서 사용한 보행 측정 방법은 스마트폰에 내장되어 있는 자이로 센서(gyro sensor)와 가속도 센서(acceleration sensor)가 허리부위에서 체중심의 이동 특성을 반영하여 보행 변수를 산출하는 원리로 측정되었다. Jung 등(2015)은 이미 이러한 특성을 이용하여 기존의 체중심 기반의 가속도계 보행 분석과 스마트폰을 이용한 분석의 상관성을 제시하였다. 하지만, 이들 연구에서는 스마트폰이 제시하는 가속도 값의 원 데이터 값을 공학적 계산으로 변환하여 체중심 이동 특성을 제시하여, 실제 공학적 지식이 부족한 임상 물리치료사들이 사용함에 있어 많은 제한이 되었다. 그렇지만, Jung 등(2015)은 향후 스마트폰 내장부품이나 기술개발로 향후 많은 평가 이용이 가능할 것이라 하여 사용 가능성을 제시하였다. 실제 본 연구에서 사용한 스마트폰은 선행 연구에서 사용한 스마트폰의 내장 부품이 향상된 제품이며, 또한, 공학적 계산과 같은 변환 과정이 필요 없이 어플리케이션 자체적으로 필요한 보행 변수를 산출해 주어, 임상적 사용 가능성을 제시 할 수 있었다.

본 연구에서 제시된 보행 시간(gait duration), 보행 속도(gait speed), 보폭(step length), 그리고 분속 수(cadence)는 일반적으로 많이 제시되는 보행 변수이다. 이러한 값들은 연구 대상자, 특히 뇌졸중 환자와 같이 보행에 많은 영향을 주는 경우, 피험자의 특성에 따라 다양한 값이 제시된다. Bae 등(2011)의 연구에 참여했던 뇌졸중 환자의 경우 평균 보폭은 40.22cm, 평균 보행 속도는 60.64cm/s, 그리고 평균 분속 수는 90.08steps/min를 보여주었다. 본 연구에서 사용된 어플리케이션은 체중심 기반으로 시간과 거리를 역으로 산출하여 보행 변수를 간접적으로 제시하였다. Park과 Woo (2015)의 연구에서는 체중심 기반의 보행 분석기를 허리에 차고, 동시에 압력 기반의 보행 분석시스템의 걷기를 통하여 활보장, 보행 속도, 보행 시간 등에서 통계적으로 유의한 상관관계를 입증함으로써 체중심의 가속도 기반의 보행 측정이 임상에서 사용 가능하다고 제시하였다. 압력 기반 중심의 보행 분석과 체중심 기반으

로 한 보행 분석은 실제 데이터 값의 수집 위치가 바닥에서 압력을 인식하여 처리하는 과정과 허리부위 주위에서 발생하는 체중심 가속도 기반의 데이터 값을 기준으로 처리하는 차이로 인하여 실제 측정값의 차이가 발생할 수 있다고 생각된다.

또한, 본 연구에서 뇌졸중 환자의 수직 체중심 이동 범위는 $1.92 \pm 0.79\text{cm}$ 이었으며, 좌우 체중심 이동 범위는 $1.55 \pm 0.90\text{cm}$ 로 나타났다. 본 연구과 똑같은 어플리케이션을 이용한 An과 Woo (2017)는 정상인을 대상으로 실시하였다. 연구 결과, 정상인에서의 수직 체중심 이동 범위는 $2.98 \pm 0.62\text{cm}$ 이었으며, 좌우 체중심 이동 범위는 $1.81 \pm 0.68\text{cm}$ 이었다. do Carmo 등(2015)은 보행 중 체중심은 좌우 $7.2 \pm 1.3\text{cm}$, 수직 $2.9 \pm 0.7\text{cm}$, 편마비 환자의 경우 좌우측 $8.9 \pm 3.9\text{cm}$, 수직 $3.9 \pm 1.2\text{cm}$ 더 크게 보고하였으며, Smith 등(2002)는 젊은 남성의 경우 수직은 $3.85 \pm 0.93\text{cm}$, 젊은 여성 $3.11 \pm 0.66\text{cm}$, 노인 남성 $3.49 \pm 0.67\text{cm}$, 노인 여성 $2.88 \pm 0.59\text{cm}$, 좌우 움직임은 젊은 남성 $5.15 \pm 1.49\text{cm}$, 젊은 여성 $4.55 \pm 1.01\text{cm}$, 노인 남성 $5.07 \pm 1.06\text{cm}$, 노인 여성 $5.09 \pm 1.58\text{cm}$ 로 제시하였다. An과 Woo (2017)의 연구에서 정상 성인 남자와 여자의 수직 체중심 이동 범위의 유의한 차이를 남성과 여성에서 유의한 차이를 보인 신장 때문일 것이라고 하였다. 즉, 실제 허리부위의 위치나 체중심의 위치는 신장에 영향을 받게 되고, 이로 인하여 움직이는 체중심의 범위는 연구 대상자의 신체 특성이나 보행 특성에 많은 영향을 줄 수 있으리라 생각된다.

일반적으로 체중심은 인간의 보행을 간단하게 표현하는 변수로 사용 될 수 있으며, 체중심의 이동 변위는 몸에 작용하는 힘의 결과로 볼 수 있다(Saunders et al., 1953). do Carmo 등(2015)은 체중심 이동 경로는 뇌졸중 환자에서 중요한 보행 평가 변수로서 주로 입각기 뿐만 아니라 유각기 기간의 변화를 보여준다고 하였으며, Ellis 등(2015)은 스마트폰 기반의 보행 분석은 전통적인 보행 분석을 대체할 분석방법으로서 특히 비용대비 효과가 좋고 편하고 임상에서 사용하기 좋은 평가방법이라고 하였다. Isho 등(2015)은 스마트폰 기반의 보행 분석을 뇌졸중 환자에게 적용해 넘어짐의 위험이 있는

사람과 없는 사람을 구분할 수 있을 것이라고 하였으며, Furrer 등(2015)는 스마트폰 어플리케이션은 사용하기 편하며, 임상에서 사용할 수 있는 타당도 있고 편하고 좋은 잠재력을 가지고 있다고 하였다. 그리고, Capela 등(2015)은 스마트폰이 포함하고 있는 하드웨어를 이용하여 6분 걷기 검사와의 타당도를 입증하였으며, 특히 가속도기반의 보행 주기의 뒤꿈치 닿기도 구분하여 향후 임상 현장에서 편리하게 사용할 수 있다고 하였으며, O'Sullivan 등(2009)은 넘어짐의 경험이 있는 노인과 넘어짐 경험이 없는 노인과의 가속도 기반의 균형 측정과 높은 상관관계를 제시하였다.

본 연구는 기존의 복잡하고 비교적 많은 시간과 장소가 소요되는 3차원적 보행 분석에 비해 비교적 좀 더 임상에서 쉽고 빠르며, 간단하게 사용할 수 있는 방법으로 스마트폰 어플리케이션을 이용하여 보행을 평가하였다. 하지만, 본 연구에서는 30명의 뇌졸중 환자를 보행의 특성별로 구분하지 않았으며, 다른 객관적 평가 도구 특히 압력 기반 중심이나 3차원적인 보행 분석 시스템과 동시에 측정하지 않아 신뢰도나 타당도를 단정하기에는 제한이 있을 수 있으리라 생각된다.

V. 결론

본 연구는 IT 발달과 스마트폰 사용 대중화의 따른 스마트폰 어플리케이션 개발이 활성화됨에 따라, 이를 이용한 뇌졸중 환자의 보행 측정 가능성을 알아보 고자 하였다. 3번의 보행 측정 결과, 측정된 보행 변수 들은 정규 분포를 하였으며, 3번의 측정 값 간의 통계 적으로 유의한 차이를 보여주지 않았다. 연구 결과, 스마트폰 어플리케이션의 보행 평가는 일관된 값을 제시하며, 반복 측정함에도 불구하고 환자가 보여주는 값을 큰 오차 값을 벗어나서 제시하지 않았다. 향후 연구에서는 현재 사용하고 있는 3차원적 보행 분석 시스템과 같은 보행 분석을 동시에 측정하여 부족한 부분을 개선되고, 새로운 어플리케이션이 개발된다

면, 임상에서 스마트폰 어플리케이션을 이용한 보행 평가가 충분히 가능 할 것이라 생각된다.

References

- An B, Woo Y. Center of mass with the use of smartphone during walking in healthy individuals. *Journal of Physical Therapy Science*. 2017;29(8):1426-1428.
- Bae W, Lee G, Nam H. The relation between the Fugl-Meyer motor assessment and walking and balance ability in stroke patient. *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*. 2011;6(1):59-69.
- Birrol B, Tok F. Gait disturbances in patients with stroke. *The American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2014;6(7):635-642.
- Capela NA, Lemaire ED, Baddour N. Novel algorithm for a smartphone-based 6-minute walk test application: algorithm, application development, and evaluation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2015;12(19):doi 10.1186/s12984-015-0013-9.
- Chung SG, Van Rey E, Bai Z, et al. Biomechanic changes in passive properties of hemiplegic ankles with spastic hypertonia. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2004;85(10):1638-1646.
- Dean CM, Richards CL, Malouin F. Walking speed over 10 meters overestimates locomotor capacity after stroke. *Clinical Rehabilitation*. 2001;15(4):415-442.
- do Carmo AA, Kleiner AF, Barros RM. Alteration in the center of mass trajectory of patients after stroke. *Topics in Stroke Rehabilitation*. 2015;22(5):349-356.
- Duberstein KJ, Platt SR, Holmes Sp, et al. Gait analysis in a pre- and post-ischemic stroke biomedical pig model. *Physiology & Behavior*. 2014;125:8-16.
- Ellis RJ, Ng YS, Zhu S, et al. A validated smartphone-based assessment of gait and gait variability in Parkinson's disease. *Public Library of Sciences One*

- 2015;10(10):e0141694.
- Evans AL, Duncan G, Gilchrist W. Recording accelerations in body movements. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 1991;29(1):102-104.
- Furrer M, Bichsel L, Niederer M, et al. Validation of a smartphone-based measurement tool for the quantification of level walking. *Gait & Posture*. 2015;42(3):289-294.
- Hidler JM, Carroll M, Federovich EH. Strength and coordination in the paretic leg of individuals following acute stroke. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2007;15(4):526-534.
- Isho T, Tashiro H, Usuda S. Accelerometry-based gait characteristics evaluated using a smartphone and their association with fall risk in people with chronic stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Disease*. 2015;24(6):1305-1311.
- Jorgensen L, Engstad T, Jacobsen BK. Higher incidence of falls in long-term stroke survivors than in population controls: depressive symptoms predict falls after stroke. *Stroke*. 2002;33(2):542-547.
- Jung S, Lee I, Yoon S, et al. Analysis of walking using smartphone application. *PNF and Movement*. 2015;13(1):39-46.
- McGinley JL, Baker R, Wolfe R. The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: a systematic review. *Gait & Posture*. 2009;29(3):360-369.
- Neckel N, Pelliccio M, Nichols D, et al. Quantification of functional weakness and abnormal synergy patterns in the lower limb of individuals with chronic stroke. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 2006;3:17.
- Olney SJ, Griffin MP, Monga TN, et al. Work and power in gait of stroke patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1991;72(5):309-314.
- O'Sullivan M, Blake C, Cunningham C, et al. Correlation of accelerometry with clinical balance tests in older fallers and non-fallers. *Age and Ageing*. 2009;38(3):308-313.
- Park G, Woo Y. Comparison between a center of mass and a foot pressure sensor system for measuring gait parameters in healthy adults. *Journal of Physical Therapy Science*. 2015;27(10):3199-3202.
- Park I, Lim O, Park K, et al. Intra- and inter-rater reliability of measuring passive range of shoulder motion with smartphone and goniometer in patients with stroke. *Physical Therapy Korea*. 2014;21(1):1-12.
- Saunders JB, Inman VT, Eberhart HD. The major determinants in normal and pathological gait. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1953;35(A3):543-558.
- Smith LK, Lelas JL, Kerrigan DC. Gender differences in pelvic motions and center of mass displacement during walking stereotypes quantified. *Journal of Women's Health & Gender-Based Medicine*. 2002;11(5):453-458.
- Shumway-Cook A, Woollacott MH. Motor control: translating research into clinical practice, 5th ed. Philadelphia. Lippincott Williams & Wilkins. 2017.
- Vearrier LA, Langan J, Shumway-Cook A, et al. An intensive massed practice approach to retraining balance post-stroke. *Gait & Posture*. 2005;22(2):154-163.
- von Schroeder HP, Coutts RD, Lyden PD, et al. Gait parameters following stroke: a practical assessment. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 1995;32(1):25-31.
- Yi J, Kang S, Kim Y. Characteristics of vertical acceleration at center of mass of the body in normal gait. *Physical Therapy Korea*. 2002;9(3):39-46.
- Zijlstra W, Hof AL. Assessment of spatio-temporal gait parameters from trunk accelerations during human walking. *Gait & Posture*. 2003;18(2):1-10.