

## 만성 뇌졸중 환자에서 스마트폰을 이용한 보행변수 평가의 신뢰도와 타당도

박진 · 김태호<sup>†</sup>

대구대학교 대학원 물리치료학과, <sup>1</sup>대구대학교 물리치료학과

### Reliability and Validity of a Smartphone-based Assessment of Gait Parameters in Patients with Chronic Stroke

Jin Park, PT, MSc · Tae-Ho Kim, PT, PhD<sup>†</sup>

Department of Physical Therapy, The Graduate School, Daegu University

<sup>1</sup>Department of Physical Therapy, Daegu University

Received: April 24, 2018 / Revised: April 26, 2018 / Accepted: May 23, 2018

© 2018 J Korean Soc Phys Med

#### | Abstract |

**PURPOSE:** Most gait assessment tools are expensive and require controlled laboratory environments. Tri-axial accelerometers have been used in gait analysis as an alternative to laboratory assessments. Many smartphones have added an accelerometer, making it possible to assess spatio-temporal gait parameters. This study was conducted to confirm the reliability and validity of a smartphone-based accelerometer at quantifying spatio-temporal gait parameters of stroke patients when attached to the body.

**METHODS:** We measured gait parameters using a smartphone accelerometer and gait parameters through the GAITRite analysis system and the reliability and validity of the smartphone-based accelerometer for quantifying

spatio-temporal gait parameters for stroke patients were then evaluated. Thirty stroke patients were asked to walk at self-selected comfortable speeds over a 10 m walkway, during which time gait velocity, cadence and step length were computed from smartphone-based accelerometers and validated with a GAITRite analysis system.

**RESULTS:** Smartphone data was found to have excellent reliability ( $ICC_{2,1} \geq .98$ ) for measuring the tested parameters, with a high correlation being observed between smartphone-based gait parameters and GAITRite analysis system-based gait parameters ( $r = .99, .97, .41$  for gait velocity, cadence, step length, respectively).

**CONCLUSION:** The results suggest that specific opportunities exist for smartphone-based gait assessment as an alternative to conventional gait assessment. Moreover, smartphone-based gait assessment can provide objective information about changes in the spatio-temporal gait parameters of stroke subjects.

**Key Words:** Assessment, Gait, Smart phone, Stroke

<sup>†</sup>Corresponding Author : Tae-Ho Kim

hohoho90@naver.com, <https://orcid.org/0000-0001-7939-2139>

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.

## I. 서론

뇌졸중은 뇌 영역의 손상으로 인해 사지마비와 근력 약화, 감각문제, 지각, 인지기능 소실 등 복합적인 문제를 유발한다(Gunaydin 등, 2011; Hoseinabadi 등, 2013). 특히 뇌 손상부위 반대편측의 마비에 따른 편마비 증상은 비정상적인 움직임과 비대칭적인 체중지지, 체중이동 능력 감소, 독립적인 기립자세 유지의 어려움 등을 관찰할 수 있다(Peurala 등, 2007). 또한 움직임과 협응의 조절 문제로 인하여 정상적인 보행이 어려워지고 일상생활의 문제를 유발한다(Januario 등, 2010).

뇌졸중 환자의 일상생활능력의 향상을 위하여 병원에서 재활치료 후 지역사회로 복귀를 하게 되지만, 보행속도와 균형능력 감소 등의 장애가 유지되어 독립적인 보행을 수행하기 어려운 경우가 많다(Eng 등, 2002; Jorgensen 등, 1995). 뇌졸중 환자의 보행특성을 살펴보면 단 하지 지지시간의 감소, 고관절과 슬관절 각의 감소, 족관절 지축굴곡 각의 증가, 비마비측의 보장작용 증가 등으로 인한 보행속도와 분속수 감소, 마비측과 비마비측 하지의 보장차이, 보행지구력 감소 등의 시공간적 요소 및 운동학적 요소의 변화가 나타난다(Balasubramanian 등, 2007; Bowden 등, 2006; Jung 등, 2010).

이러한 뇌졸중 환자의 변형된 보행패턴을 변화시키고 기능적 회복을 위하여 보행문제를 파악하고, 적절한 중재를 제공하기 위한 보행평가는 중요한 요소이다(Lord 등, 2013). 임상에서 주로 실시하는 보행평가는 카메라를 이용하여 동작을 촬영한 후 평가하는 동작분석, 힘판을 이용한 보행평가, GAITRite 보행분석 시스템과 같은 보행로 위를 걷는 동안의 보행평가 등이 이루어지고 있다(Bilney 등, 2003; Webster 등, 2005). 이러한 장비들은 높은 신뢰도와 타당도를 나타내지만 가격이 비싸고, 측정을 위한 실험 환경의 조절이 요구되며 무겁고 부피가 커서 휴대성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 임상에서 치료사나 뇌졸중 환자가 직접 다루고 측정하기에는 복잡하고 어렵다는 단점을 가지고 있다(Silsupadol 등, 2017).

이러한 단점을 보완하기 위하여 3축의 가속도계를

통한 보행평가가 이루어지고 있다. 가속도계는 크기가 작기 때문에 휴대하기 편리하고 사용방법이 간단하며 보행평가를 실시함에 있어 높은 수준의 측정 신뢰도와 타당도를 나타낸다(Fortune 등, 2014; Hartmann 등, 2009a). 3축 가속도계를 통한 보행측정은 시상면(sagittal plane), 관상면(coronal plane), 횡단면(transverse plane)에서 발생하는 체중심(Center Of Mass, COM)의 움직임을 양적 보행변수로 변화시켜 측정하게 된다(Meichtry 등, 2007; Rueterborries 등, 2010). 이러한 가속도계는 스마트폰에도 내장되어 있는데 스마트폰 가속도계를 통한 평가가 최근 많이 이루어지고 있다(Busis, 2010). 스마트폰 가속도계를 통해 체중심 위치 변화의 평가에 대한 측정 신뢰도와 타당도에 관한 연구에서, 요추 3번 위치에 스마트폰을 부착시킨 후 보행을 실시하였을 때와 동작분석을 통하여 측정된 값을 비교한 결과 높은 신뢰도(ICC: .49-.86)와 중간 수준의 상관성( $r$ : .61-.92)을 나타냈다(Furrer 등, 2015). 류마티스 관절염 환자에게 요추 3번 위치에 스마트폰을 부착시킨 후 체중심 위치 변화에 따라 변환되는 보행변수와 건강상태에 관련된 설문지의 상관관계 분석을 통하여 스마트폰 보행변수 측정의 유용성을 검증하였다(Yamada 등, 2012). 또한 일반인과 파킨슨 환자에게서 측정된 스마트폰 보행변수와 GAITRite 보행분석 시스템 보행변수의 비교를 통하여 스마트폰을 이용한 보행변수 측정의 신뢰도와 타당도를 검증하였다(Ellis 등, 2015; Silsupadol 등, 2017). 이렇게 비정상적인 보행을 나타내는 여러 대상자에게 스마트폰 보행변수 측정의 신뢰도와 타당도가 검증되었으나, 뇌졸중 환자에게 적용된 스마트폰 보행변수의 측정값이 신뢰할 수 있고 타당한지에 대한 연구는 드문 실정이다.

따라서 본 연구에서는 병적보행을 나타내는 뇌졸중 환자에게 누구나 쉽게 구할 수 있고 쉽게 사용이 가능한 스마트폰에 내장되어 있는 3축의 가속도계를 바탕으로 측정된 시공간적 보행변수의 신뢰성, 타당성에 대한 검증을 실시하고 임상에서 뇌졸중 환자의 보행 훈련 전과 후 시공간적 보행변수의 변화에 대한 측정의 방법을 제공하고자 하였다.

**II. 연구방법**

**1. 연구기간 및 연구대상**

2018년 1월부터 2018년 2월까지 재활운동치료를 받는 뇌졸중 환자 중에서 연구의 목적을 이해하고 연구에 참여하겠다고 동의한 30명의 대상자에게 동의서를 받은 후 실시하였다. 대상자의 진단명, 나이, 성별, 손상 부위 그리고 기간 등은 대상자와의 면접과 의무 기록을 통해 조사하였으며, 연구대상자의 선정 기준은 다음과 같다.

- 1) 뇌졸중 발병 후 6개월 이상 2년 미만인 자
- 2) 보조도구 없이 10 m 이상 보행 가능한 자
- 3) 약시(amblyopia), 현훈(vertigo), 전정기능이상(vestibular dysfunction) 등의 시각 및 청각에 장애가 없는 자
- 4) 하지에 보행에 영향을 줄 수 있는 정형외과적 문제가 없는 자
- 5) 한국판 간이 정신상태 검사(Mini Mental State Examination-Korean; MMSE-K) 점수가 24점 이상으로 치료사의 지시사항을 따를 수 있는 자
- 6) 6분 동안 걷기 후 혈압, 맥박, 호흡의 이상이 없는 자

연구 대상자의 제외조건은 보행에 영향을 줄 수 있는 뇌졸중 이외의 다른 신경학적 질환을 가진 자와 편측무시를 가지고 있는 자는 제외하였다. 연구대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다.

**2. 연구절차**

스마트폰을 통해 측정되는 보행변수의 신뢰도와 타당도 검증에 위하여 스마트폰을 통한 보행변수의 측정과 GAITRite 보행분석 시스템을 통한 보행변수의 측정을 동시에 실시하였다. 스마트폰을 이용한 보행변수의 측정은 스마트폰(iPhone 6s, Apple Inc, USA)에 내장되어 있는 가속도계를 바탕으로 측정되는 어플리케이션인 Gait Analysis Pro (Gait Analysis Pro, YTA K K, Japan)를 이용하였다. Gait Analysis Pro의 표본 추출률은 100 Hz이며, 체중심의 움직임과 보행변수는 스마트폰에서 자동으로 분석되어 화면에 표시된다. 보행동안 시공간적 보행변수의 측정은 GAITRite 보행분석 시스템

Table 1. General Characteristics of Subjects

	Subjects
Age (years)	56.1±13 <sup>a</sup>
Gender	
Male	20
Female	10
Time Since Stroke (Month)	11.6±4.4
Type of Lesion	
Hemorrhagic	10
Infarction	20
Side of Lesion	
Right	20
Left	10
Height (cm)	165.8±9.4
Weight (kg)	66.1±6.8

<sup>a</sup>mean±standard deviation.

(GAITRite, CIR Systems Inc, USA)을 통하여 실시하였다. GAITRite 보행분석 시스템의 보행판을 따라 수직으로 배열되어 있는 센서를 통하여 시공간적 보행변수를 측정하고 수집된 정보는 전산화 프로그램(GAITRite GOLD, Version 3.2b CIR Systems Inc, USA)으로 처리하였다. 대상자들은 편안한 속도로 10 m의 거리를 총 2번 보행을 실시하였다. 10 m의 거리를 시작지점과 끝지점에 각각 테이프를 표시한 후 중간지점에 GAITRite 보행분석 시스템을 위치시켰다. 스마트폰은 대상자들의 요추3번에 허리밴드를 이용하여 고정하였다. 대상자들은 시작지점에 선 후 연구자가 “시작”이라고 구령하면 보조 연구자가 스마트폰 어플리케이션을 실행과 동시에 편안한 속도로 보행을 실시하였다. 총 2회 보행을 실시하였으며 측정된 보행변수 중 보행속도, 분속수, 보장의 평균값을 통계처리 하였다.

**3. 통계방법**

대상자들의 측정된 값에 대한 통계처리를 위하여 SPSS software (ver 18.0 ; SPSS Inc, Chicago, USA)를 통하여 분석하였다. GAITRite 보행분석 시스템과 스마트폰을 통해 측정된 보행변수의 측정자내 신뢰도를 분석하기 위해 급내상관계수(ICC2,1)를 실시하였다. 또

Table 2. Reliability of gait parameters in GAITRite analysis system and smartphone

	GAITRite Analysis System		Smartphone	
	ICC (2,1)	95%CI	ICC (2,1)	95%CI
Gait Velocity (cm/s)	.99	.98-.99	.99	.99-.99
Cadence (steps/m)	.99	.99-.99	.98	.96-.99
Step Length (cm)	.97	.93-.98	.98	.96-.99

Table 3. Validity of Smartphone Gait Parameters

	GAITRite Analysis System	Smartphone	r <sup>a</sup>
Gait Velocity (cm/s)	61.3±36 <sup>b</sup>	61.9±34.9	.99**
Cadence (steps/m)	87.2±28.2	88.8±29.9	.97**
Step Length (cm)	25.8±2.2	25.2±3.6	.41*

<sup>a</sup>Pearson's Correlation, <sup>b</sup>mean±standard deviation, \*p<.05, \*\*p<.01

한 스마트폰으로 측정된 보행변수의 타당도를 분석하기 위해 Pearson 상관분석을 실시하였다. 자료의 모든 통계학적 유의 수준(p)은 .05 이하로 하여 검정하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 연구대상자의 일반적 특성

본 연구에 참여한 대상자 총 30명의 평균 나이는 56.1±13세, 남자 20명과 여자 10명으로 구성되어 있으며, 평균 유병기간은 11.6±4.4개월, 평균 신장은 165.8±9.4 cm, 평균 체중은 66.1±6.8 kg이었다(Table 1).

#### 2. GAITRite 보행분석 시스템과 스마트폰에서의 보행 변수 측정 신뢰도

GAITRite 보행분석 시스템을 통하여 측정된 보행변수의 측정자내 신뢰도 결과 보행속도는 .99, 분속수는 .99, 보장은 .97로 높은 수준의 신뢰도를 보였다. 스마트폰 어플리케이션을 통해 측정된 보행변수의 측정자내 신뢰도는 보행속도 .99, 분속수 .98, 보장은 .98으로 높은 수준의 신뢰도를 보였다(Table 2).

#### 3. 스마트폰으로 측정된 보행변수 타당도

스마트폰 어플리케이션을 통하여 측정된 보행변수와 GAITRite 보행분석 시스템을 통하여 측정된 보행변

수의 상관성을 분석한 결과 보행속도는 상관계수 .99로 강한 상관관계를 보였다(p<.01). 분속수의 경우 상관계수 .97로 강한 상관관계를 보였다(p<.01). 보장은 .41로 중간 수준의 상관관계를 보였다(p<.05)(Table 3).

### IV. 고찰

본 연구는 병적보행을 나타내는 뇌졸중 환자의 보행변수를 측정함에 있어 간편하고, 편리하며 누구나 쉽게 적용할 수 있는 측정방법을 제시하고자 실시하였다. 이를 위해 스마트폰에 내장되어 있는 3축의 가속도계를 바탕으로 측정된 시공간적 보행변수가 GAITRite 보행분석 시스템을 통해 측정된 보행변수와 비교하여 신뢰할 수 있고, 타당한지 검증하였다.

그 결과 스마트폰을 통해 측정된 보행변수 중 보행속도, 분속수, 보장에서 모두 높은 수준의 신뢰도를 나타냈다. 이와 유사하게 Silsupadol 등(2017)의 연구에서도 일반인의 요추 3번에 부착된 스마트폰을 통해 수집되는 보행변수 중 보행속도의 급내상관계수는 .93, 분속수의 급내상관계수는 .97, 보장의 급내상관계수는 .91으로 높은 수준의 신뢰도를 보였다. 또한 Obuchi 등(2018)의 연구에서도 일반인에게 스마트폰을 이용하여 측정된 보행변수 중 보행속도의 급내상관계수는 .90, 분속수의 급내상관계수는 .92으로 높은 수준의 신뢰도

를 보였다. 이러한 결과가 나타난 이유는 3축 가속도계를 몸통에 부착하고 보행하는 동안 측정된 보행변수는 높은 수준의 신뢰도를 나타내게 되는데(Hsu 등, 2016), 흔히 사용하는 스마트폰에도 이러한 보행변수 측정의 높은 신뢰도를 나타내는 3축 가속도계가 내장되어 있기 때문에 스마트폰을 몸통에 부착 후 측정된 보행변수의 신뢰도가 높게 나타난 것이라 할 수 있다. 즉, 스마트폰을 통한 뇌졸중 환자의 보행변수 측정 신뢰성은 충분하다고 사료된다.

스마트폰을 통해 측정된 뇌졸중 환자의 보행변수 중 보행속도, 분속수는 GAITRite 보행분석 시스템을 통해 측정된 보행속도, 분속수와 상관관계 분석결과 강한 상관관계를 나타냈다. 일반 노인의 요추 부위에 부착된 가속도계를 바탕으로 보행변수를 측정한 연구에서 보행변수 중 보행속도, 분속수는 GAITRite 보행분석 시스템을 통하여 측정된 보행속도, 분속수와 상관관계 분석결과 강한 상관관계를 나타냈다(Hartmann 등, 2009b). GAITRite 보행분석 시스템이 족저압을 분석하여 보행평가를 실시하는 장비임에도 불구하고 몸통에 부착된 3축 가속도계와의 상관성이 높다는 것은 3축 가속도계를 통하여 수집되는 체간의 전후, 좌우, 수직방향 움직임에 따른 보행변수 측정의 가능성을 확인할 수 있다. 이러한 3축 가속도계가 내장되어 있는 스마트폰을 일반인의 요추 3번에 부착 후 수집된 보행변수와 GAITRite 보행분석 시스템을 통하여 측정된 보행변수의 상관관계 분석결과 보행속도  $r=.90$ , 분속수  $r=.97$ 으로 강한 상관관계가 나타났다(Silsupadol 등, 2017). Manor 등(2018)의 연구에서도 스마트폰을 통해 측정되는 활 보장시간과 GAITRite 보행분석 시스템을 통하여 측정되는 활 보장시간의 상관관계 분석결과  $r=.95$ 으로 강한 상관관계가 나타났으며, 이를 통해 스마트폰을 통해 측정되는 보행속도와 분속수의 타당도를 검증하였다. 이는 보행평가 시 스마트폰을 위치시키는 체중심은 보행하는 동안 전후, 좌우, 수직방향 움직임을 가장 효과적으로 평가할 수 있는 위치이기 때문에(Moenilssen, 1998), GAITRite 보행분석 시스템 보행변수와 상관성이 높게 나타난 것으로 생각된다. 선행연구와 본 연구의 결과를 미루어볼때 스마트폰에 내장되어 있

는 가속도계를 통하여 수집되는 체간의 전후, 좌우, 수직방향 움직임에 따른 보행변수의 측정은 보행분석을 실시함에 있어 타당한 방법임을 뜻하게 된다.

스마트폰을 통해 측정된 뇌졸중 환자의 보행변수 중 보장은 GAITRite 보행분석 시스템을 통해 측정된 보장과의 상관관계 분석결과 다른 보행변수들 보다 낮은 수준의 상관관계를 나타냈다. 그러나 An과 Woo (2016)의 연구에서는 일반인에게 스마트폰을 통해 측정된 보장과 족저압 기반 보행평가 장비를 통해 측정되는 보장과의 상관관계 분석결과  $r=.64$ 으로 높은 수준의 상관관계를 나타냈다. Silsupadol 등(2017)의 연구에서도 스마트폰을 통해 측정된 일반인의 보장과 GAITRite 보행분석 시스템을 통해 측정된 보장과의 상관관계 분석결과  $r=.83$ 으로 강한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 뇌졸중 환자에게 3축 가속도계를 통해 측정된 보장과 GAITRite 보행분석 시스템을 통해 측정된 보장과의 상관분석을 실시한 연구에서는  $r=.12$ 으로 상관관계가 없는 것으로 나타났다(Moore 등, 2017). 이는 3축 가속도계를 통한 보장의 측정은 수직방향으로 움직임을 통해 계산하는데(Zijlstra와 Hof, 2003), 뇌졸중 환자의 경우 보행동안 체간의 움직임이 비대칭적으로 움직이는 것에 따른 결과라 하였다. 본 연구에서도 일반인을 대상으로 실시한 선행연구와 대조적인 결과가 나타난 이유는 뇌졸중 환자를 대상으로 실시하였기 때문에 보행을 하는 동안 보상작용으로 체간의 움직임이 커지는 것에 따른 수직방향 움직임이 증가되어 보장의 결과값에 영향을 미친 것으로 사료된다.

스마트폰은 휴대성이 높고 보행을 측정하기 위한 다른 장비보다 값이 싸며, 누구나 쉽게 조작이 가능하기 때문에 편의성을 제공한다(Ayu 등, 2012). 일상생활 시 스마트폰은 주로 주머니 또는 가방에 넣거나 손으로 휴대하고 있는 경우가 많다(Antos 등, 2014). 따라서 스마트폰에 내장되어 있는 가속도계를 바탕으로 보행평가를 실시하고자 한다면 어느 부위에 스마트폰을 위치시켜야 하는가에 대한 부분을 고려해야 한다. 일반인을 대상으로 스마트폰을 몸통, 가방, 허리띠, 손, 주머니에 각각 위치시키고 측정된 보행변수의 신뢰도와 GAITRite 보행분석 시스템과의 상관관계 분석결과 몸

통에 스마트폰을 위치시키는 것이 높은 신뢰도와 강한 상관관계를 나타냈다(Silsupadol 등, 2017). 이를 바탕으로 본 연구에서는 뇌졸중 환자에게 몸통에 해당하는 요추 3번에 스마트폰을 위치시키고 보행변수를 측정하였다. 그 결과 높은 수준의 신뢰도와 타당도를 나타냈는데, 뇌졸중 환자에게 스마트폰을 통하여 보행변수를 측정하고자 한다면 요추 3번에 스마트폰을 고정시키고 측정하는 것을 고려해야 할 것이다.

본 연구에서는 스마트폰을 통해 측정되는 보행변수의 신뢰도와 타당도를 검증하기 위하여 GAITRite 보행분석 시스템을 통하여 측정되는 시공간적 보행변수와 상관관계를 분석하였다. 그러나 GAITRite 보행분석 시스템을 통한 보행분석은 높은 수준의 신뢰도와 타당도를 나타내지만 족저압을 받아들이는 입력판의 길이가 정해져 있기 때문에 10 m의 보행을 실시하여 분석된 스마트폰 보행변수와의 직접적인 비교에서 차이가 있을 수 있다. 또한 시공간적인 보행변수만을 분석하였기 때문에 뇌졸중 환자에서 특징적으로 나타나는 비정상적인 보행의 패턴이나 보상적인 움직임을 고려하지 못한 제한점이 있다. 따라서 임상에서 스마트폰을 이용하여 보행변수를 측정하고자 한다면 이러한 점들을 충분히 고려해야 할 것이다.

## V. 결론

본 연구는 병적보행을 나타내는 뇌졸중 환자의 보행변수를 측정함에 있어 간편하고, 편리하며 누구나 쉽게 적용할 수 있는 측정방법을 제시하고자 실시하였다. 뇌졸중 환자의 보행동안 스마트폰을 몸통에 위치시키고, 이때 측정되는 보행변수는 높은 수준의 신뢰도와 타당도를 나타냈다. 따라서 임상에서 뇌졸중 환자의 보행훈련 전과 후 기능적 평가와 더불어 객관적으로 확인하고자 한다면 스마트폰을 이용한 보행변수의 측정을 권장한다.

## References

An BR, Woo YG. Study of validity using a smartphone

application for gait analysis during walking in healthy adults. *J Korean Acad Ther.* 2016;8(2):59-66.

Antos SA, Albert MV, Kording KP. Hand, belt, pocket or bag: Practical activity tracking with mobile phones. *J Neurosci Methods.* 2014;231:22-30.

Ayu MA, Ismail SA, Abdul Matin AF, et al. A comparison study of classifier algorithms for mobile-phone's accelerometer based activity recognition. *Procedia Eng.* 2012;41:224-9.

Balasubramanian CK, Bowden MG, Neptune RR, et al. Relationships between step length asymmetry and walking performance in subjects with chronic heparesis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2007;88(1):43-9.

Bilney B, Morris M, Webster K. Concurrent related validity of the GAITRite walkway system for quantification of the spatial and temporal parameters of gait. *Gait Posture.* 2003;17(1):68-74.

Bowden MG, Balasubramanian CK, Neptune RR, et al. Anterior-posterior ground reaction forces as a measure of paretic leg contribution in hemiplegic walking. *Stroke.* 2006;37(3):872-6.

Buis N. Mobile phones to improve the practice of neurology. *Neurol Clin.* 2010;28(2):395-410.

Ellis RJ, Ng YS, Zhu S, et al. A validated smartphone-based assessment of gait and gait variability in parkinson's disease. *PLoS One.* 2015;10(10):e0141694.

Eng JJ, Chu KS, Dawson AS, et al. Functional walk tests in individuals with stroke: relation to perceived exertion and myocardial exertion. *Stroke.* 2002;33(3):756-61.

Fortune E, Lugade V, Morrow M, et al. Validity of using tri-axial accelerometers to measure human movement-part II: Step counts at a wide range of gait velocities. *Med Eng Phys.* 2014;36 (6):659-69.

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):289-94.

- Gunaydin R, Karatepe AG, Kaya T, et al. Determinants of quality of life (QoL) in elderly stroke patients: a short-term follow-up study. *Arch Gerontol Geriatr.* 2011;53(1):19-23.
- Hartmann A, Luzi S, Murer K, et al. Concurrent validity of a trunk tri-axial accelerometer system for gait analysis in older adults. *Gait Posture.* 2009a;29(3):444-8.
- Hartmann A, Murer K, de Bie RA, et al. Reproducibility of spatio-temporal gait parameters under different conditions in older adults using a trunk tri-axial accelerometer system. *Gait Posture.* 2009b;30(3):351-5.
- Hoseinabadi MR, Taheri HR, Keavanloo F, et al. The effects of physical therapy on exaggerated muscle tonicity, balance and quality of life on hemiparetic patients due to stroke. *J Pak Med Assoc.* 2013;63(6):735-8.
- Hsu CY, Tsai YS, Yau CS, et al. Test-retest reliability of an automated infrared-assisted trunk accelerometer-based gait analysis system. *Sensors.* 2016;16(8):E1156.
- Januario F, Campos I, Amaral C. Rehabilitation of postural stability in ataxic/hemiplegic patients after stroke. *Disabil Rehabil.* 2010;32(21):1775-9.
- Jorgensen HS, Nakayama H, Raaschou HO, et al. Recovery of walking function in stroke patients: the copenhagen stroke study. *Arch Phys Med Rehabil.* 1995;76(1):27-32.
- Jung T, Lee DK, Charalambous C, et al. The influence of applying additional weight to the affected leg on gait patterns during aquatic treadmill walking in people poststroke. *Arch Phys Med Rehabil.* 2010;91(1):129-36.
- Lord S, Galna B, Verghese J, et al. Independent domains of gait in older adults and associated motor and nonmotor attributes: validation of a factor analysis approach. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2013;68(7):820-7.
- Manor B, Yu W, Zhu H, et al. Smartphone app-based assessment of gait during normal and dual-task walking: demonstration of validity and reliability. *JMIR Mhealth Uhealth.* 2018;6(1):e36.
- Meichtry A, Romkes J, Gobelet C, et al. Criterion validity of 3D trunk accelerations to assess external work and power in able-bodied gait. *Gait Posture.* 2007;25(1):25-32.
- Moe-Nilssen R. A new method for evaluating motor control in gait under real-life environmental conditions. Part 1: The instrument. *Clin Biomech.* 1998;13(4-5):320-7.
- Moore SA, Hickey A, Lord S, et al. Comprehensive measurement of stroke gait characteristics with a single accelerometer in the laboratory and community: a feasibility, validity and reliability study. *J Neuroeng Rehabil.* 2017;14(1):130.
- Obuchi SP, Tsuchiya S, Kawai H. Test-retest reliability of daily life gait speed as measured by smartphone global positioning system. 2018;61:282-6.
- Peurala SH, Kononen P, Pitkanen K, et al. Postural instability in patients with chronic stroke. *Restor Neurol Neurosci.* 2007;25(2):101-8.
- Rueterbories J, Spaich EG, Larsen B, et al. Methods for gait event detection and analysis in ambulatory systems. *Med Eng Phys.* 2010;32(6):545-52.
- Silsupadol P, Teja K, Lugade V. Reliability and validity of a smartphone-based assessment of gait parameters across walking speed and smartphone locations: Body, bag, belt, hand, and pocket. *Gait Posture.* 2017;58:516-22.
- Webster KE, Wittwer JE, Feller JA. Validity of the GAITRite walkway system for the measurement of averaged and individual step parameters of gait. *Gait Posture.* 2005;22(4):317-21.
- Yamada M, Aoyama T, Mori S, et al. Objective assessment of abnormal gait in patients with rheumatoid arthritis using a smartphone. *Rheumatol Int.* 2012;32(12):3869-74.
- Zijlstra W, Hof AL. Assessment of spatio-temporal gait parameters from trunk accelerations during human walking. *Gait Posture.* 2003;18(2):1-10.