

발목관절에서 힘과 위치 측면의 고유수용성감각 수준이 균형능력에 미치는 영향

이재선¹ · 황선홍^{2,3*}

¹호서대학교 일반대학원 물리치료학과, ²호서대학교 생명보건대학 물리치료학과,
³호서대학교 기초과학 연구소

Effects of Force and Position Aspects of the Ankle Proprioception on the Balance Ability

Jae Sun Ree¹ and Seonhong Hwang^{2,3*}

¹Department of Physical Therapy, Graduate School of Hoseo University

²Department of Physical Therapy, Hoseo University

³Research Institute for Basic Sciences, Hoseo University

(Manuscript received 5 December 2019 ; revised 10 April 2020 ; accepted 10 April 2020)

84

Abstract: Despite of a lot of studies about proprioception tests, there are little study results to investigate the relationship between the functional movement and proprioception level. In this study, we tried to perform quantitative analysis for the effect of ankle joint proprioception level on the one leg standing postural control ability. Nine healthy people volunteered for this study. Force and position aspects of proprioception were evaluated using the electromyography system (EMG) and mobile clinometer application, respectively. The center of pressure (COP) trajectories, measured by a pressure mat sensor, were used for quantitative analysis of balance for each subject. We computed indices and errors of force and position aspects of proprioception from the EMG and ankle angle. Mean velocity of total and anterior-posterior direction (V_m and V_{m_ap}), root mean squared distance in anterior-posterior direction (RDap), travel length (L), and area (A) of COP trajectories were also calculated as indices of postural control ability of subjects. Two aspects of proprioception showed the low correlation from each other as previous studies. However, the EMG error of gastrocnemius lateral activation showed a high correlation coefficient with COP variables such as V_m ($\rho=0.817$, $p=0.007$), V_{m_ap} ($\rho=0.883$, $p=0.002$), RDap ($\rho=0.854$, $p=0.003$), L ($\rho=0.817$, $p=0.007$) and A ($\rho=0.700$, $p=0.036$). Within our knowledge, this is almost the first study that investigated the relationship between proprioception level and functional movement. These study results could support that the ankle joint proprioception facilitation exercise would have positive effects on functional balance rehabilitation interventions.

Key words: Proprioception, Balance ability, Center of pressure, Ankle joint, Electromyogram

1. 서 론

기립은 다양한 말초감각 요소들이 작용하여 자세를 제어하는 복잡한 과제이며, 적절한 자세 조절을 위해서는 말초

감각기관의 정확한 기능이 필수적이다[1,2]. 인간은 감각 체계를 통하여 주변 환경을 인지하고, 중추신경계와 함께 전정, 시각, 고유수용성감각을 통합한다[3,4]. 인간의 균형감각은 전정, 시각 그리고 고유수용성 감각체계에 의해 구성되고, 운동학적 근육사슬로부터 정보를 받고 제공한다[5-7]. 균형은 발이 지지하는 작은 면으로부터 수직으로 신체 질량중심(Center of mass; COM)을 유지하는 것으로 정의된다[8,9]. 균형유지 및 자세 조절에 대한 몇몇 연구에서는 시각의 의존성이 가장 높다고 알려졌지만[10,11], 심각한 시력 손상 환자의 경우 균형 유

Corresponding Author : Seonhong Hwang
20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

Tel: +82-041-540-9974

E-mail: shwang@hoseo.edu

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2017R1D1A1B04034104).

지에 체성감각의 기여가 더 증가하는 것을 보여주었다[12]. 또한 시각정보를 차단하고 균형을 유지하는 경우 전정기관의 입력정보뿐만 아니라 다양한 고유수용성 수용체의 감각입력 정보에 크게 의존하게 된다고 알려져 있다[13,14]. 이 때, 관절의 위치 정보와 근력 정보를 제공하는 고유수용성감각이 매우 중요한 역할을 수행하는 것으로 보고되었다[15,16]. 또한 운동 제어 분야 최신 연구들은 신경가역성에 대한 감각 정보의 역할이 중요하며[17], 고유수용성 감각이 신경발달 촉진에 있어서 가장 중요한 지표라고 주장하고 있다[17-21].

고유수용성감각은 기계적 감각 수용기로부터 전달된 감각 신호를 통합하는 능력으로 정의되고, 단순한 생리학적 기능뿐만 아니라 심리적 기능도 포함한다[22]. 고유수용성감각(proprioception)에 특별히 기여하는 기계적 수용기는 고유수용체(proprioceptor)라고 하며 근육, 힘줄, 관절 및 근막에서 발견되고, 피부 또한 고유수용성 감각을 수용할 수 있다[23,24]. 기계적 수용기로부터 전달된 운동감각 정보(kinesthetic information)는 3차원 공간에서 관절이 움직인 각도를 기억하는 관절위치감각, 능동적으로 주어진 힘을 기억하는 힘 감각, 신체 분절의 속도와 가속도에 대한 운동 감각이 있다[25-27].

Han 등은 고유수용성감각 평가에 사용되는 대표적인 3가지 장치(TTDPM: Threshold To Detection of Passive Motion, JPR: Joint Position Reproduction, AMEDA: Active Movement Extent Discrimination Assessment)들에 대한 그 원리와 평가 방법들을 고찰하였는데[26], Krewer 등은 고유수용성감각은 위치(position), 움직임(motion), 감지(detection) 그리고 감별(discrimination)의 4가지 요소로 구분되고 그에 따른 독립적인 평가방법을 선택해야 한다고 반박하였다[28]. 이에 대하여 Han 등은 다시 Krewer 등의 주장을 비판하였는데, 고유수용성 감각의 4가지 측면은 Sherrington[29]이 최초로 정의한 추상적이고, 좁은 의미의 개념이기 때문에 4가지 측면의 고유수용성 감각을 명확히 구별하여 검사하는 독립적인 평가 방법은 현실적으로는 구현이 어렵다고 주장하였다[30].

한편, Phillips 등은 위의 논쟁과는 달리 고유수용성감각의 2가지 측면에만 중점을 두어 연구를 하였는데, 어깨관절에서 고유수용성감각의 위치 측면(position aspect)과 힘 측면(force aspect) 사이의 연관성을 분석하였다. 이 연구에서는 힘 센서로 측정된 반작용력을 어깨관절의 고유수용성감각 중 힘 측면 변인으로 정의하였고, 동작분석 장치로 측정된 관절각을 위치 측면 변인으로 정의하였는데, 두 변인들은 상관도가 낮은 것으로 나타났다[31]. 또한, 고유수용성 평가 방법은 크게 특정(specific), 불특정(non-specific)검사로 나눌 수 있는데[32], 특정 검사는 관절위치감각(JPS), 운동감각(kinesthesia), 힘 감각(force sense)으로 검사를 말하고 [33,34], 불특정 검사는 고유수용성감각을 교란한 상태에서

수행하는 균형 검사와 같은 기능적 검사(functional test)를 말한다. 특정검사 중 관절위치감각 검사에서는 사전에 설정된 관절각도로의 재위치에 대한 정밀도와 정확도를 평가하고, 운동감각검사에서는 수동움직임 역치(TTDPM), 움직임 감별 능력(movement discrimination), 특정 과제 추적(tracking) 정확성을 평가하며, 힘 감각 검사에서는 이전 또는 미리 지정한 힘을 재현하는 능력을 평가한다[35-41]. 불특정 고유수용성감각 검사에서는 특정 감각 또는 특정 부위가 아닌 운동과 감각의 통합기능을 포함하는 전신 기능을 평가하며, 구체적인 방법으로는 근방추를 방해하는 진동[42,43], 전정 정보를 교란하는 갈바니 전류[44,45], 지면에 대한 발목관절의 감각을 교란하는 균형 패드(unstable soft surface)를 적용한 균형 평가 방법[46] 등이 있다.

전통적으로 임상 균형 평가는 평가의 목적에 따라 치료가 필요한 균형 장애가 있는지를 밝히기 위한 기능적 접근(functional approach)과 균형 장애(balance deficit)의 원인을 밝히기 위한 체계적 접근법(systems approach)로 분류된다[47]. 체계적인 접근은 생체역학, 운동 조절, 감각조직의 통제로 분류하여 설명하였고, 기능적인 접근은 수행지향적운동성평가(Performance Oriented Mobility Assessment; POMA)[48], 버그 균형척도(Berg balance scale; BBS)[49], 등 임상에서 사용되어지는 평가들로 설명하였다. POMA와 BBS의 항목 중에 한 발 서기 검사는 노인 및 건강한 성인, 운동선수들을 대상으로 사용된다[48-56]. 한발서기에 대한 난이도는 질량 중심을 압력 중심위에 유지하고 있는 지면 반발력의 변화에 의해 반영된다[57,58]. 압력 중심의 모니터링을 통한 균형평가는 한 발 서기 검사뿐만 아니라 다른 자세조절에 대한 연구들에서도 사용된다[51,52,57-66]. Qiu 등은 자세조절 능력 평가에 사용되는 다양한 압력중심 변인들의 관계와 절대적 신뢰도에 대해 비교하였는데, 상대적, 절대적 신뢰도가 높은 변인은 제공근거리(RMS distance), 전-후방 제공근거리(RMS distance-AP; RDap), 속도평균(mean velocity; Vm), 전-후방 속도평균(mean velocity-AP; Vm_ap), 주파수평균(mean frequency), 전-후방 주파수평균(mean frequency-AP), 위상 평면 매개변수(phase plane parameter; PPP), 프랙탈 차원(fractal dimension) 총 8개를 보고하였다[63].

고유수용성감각에 대한 다양한 정의, 평가방법, 도구들에 대한 선행연구들을 종합해 볼 때 관절의 위치와 움직임 또는 근육에 의해 발휘된 힘을 감지, 감별하는 감각입력 정보를 고유수용성감각이라 요약할 수 있고, 움직임은 속도 즉 시간에 따른 위치에 대한 정보이므로 통칭하여 위치 감각이라 볼 수 있다. 관절의 위치변화 또는 힘의 크기 변화를 언제 얼마만큼 감지할 수 있는지가 감지와 감별 감각 능력이라고 볼 수 있으며 이러한 변화를 얼마나 잘 감별, 감지하느냐가

고유수용성감각의 수준 또는 능력이라고 볼 수 있다. 감별은 얼마나 미세한 변화량까지 구분 하는지로 간단하게 정의 및 평가할 수 있고, 감지는 위치나 힘의 0값에서부터 최소 얼마나 작은 변화량을 인지하는지로 평가하거나, 동일한 관절 위치 또는 동일한 근력의 크기를 얼마나 정확하게 반복하는 지로 평가하는 것이 일반적이다. 이러한 고유수용성감각을 정확하게 평가하려면 맞춤형 장비들을 필요로 하고 있으나 상용되는 제품이 없어 직접 제작해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 근전도 장비와 기울기 측정 모바일 앱을 이용하여 고유수용성 감각 수준을 평가하고, 임상현장에서 널리 사용되는 임상균형평가 방법 중 하나인 한 발 서기 검사를 적용하여 정성적 균형평가를 실시하는 동시에, 저렴하면서도 신뢰도와 타당도가 보장된 압력매트센서를 이용하여 압력중심 좌표를 측정하여 정량적 균형평가를 실시하였다. 이렇게 측정 및 평가된 발목관절에 대한 힘과 위치 재현성 (reproduction) 수준이 한 발 서기 균형능력과 어떠한 상관관계가 있는지 분석하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상자

총 9명의 건강한 20대 성인(여자 6명, 남자 3명)이 본 연구를 위하여 자발적으로 참여하였다. 본 연구는 호서대학교 연구윤리위원회의 심의를 거쳐 승인되었다(1041231-160921-HR-046-02). 연구대상자의 선정기준은 20대의 성인으로 정신적 인지에 문제가 없는 사람, 신경계 및 근골격계의 질병이 없는 사람, 특별한 발목 질환이 없는 사람, 선천적인 발 기형이 없는 사람, 주 3회 3시간 이상 굽이 있는 구두[67]를 신지 않는 사람으로 선정하였다. 3개월 이내에 발목 통증이 있는 사람, 1년 이내에 발목 재할 수술을 경험한 사람, 1개월 이내에

1회 이상 발목의 염좌를 경험한 사람들은 대상자에서 제외하였다. 실험에 참가한 대상자들의 인체 계측학적 특성은 표 1과 같다.

2. 측정 장비 및 도구

(1) 근전도(Electromyogram, EMG) 측정 및 분석 시스템 발등 굽힘과 발바닥 굽힘근의 근력을 대변할 수 있는 지표로 사용 가능한 근전도를 활용해 고유수용성 힘 감각을 나타내었으며[68-70], 앞정강근(TA: Tibialis anterior)과 외측 장딴지근(GCL: Gastrocnemius lateral)에 근전도 (Trigno, Delsys Ltd., Natick, Massachusetts, 그림 1(a)) 전극을 부착하여 신호를 측정하였다.

근전도 신호의 샘플링율은 2 kHz로 하였고, 50% 근력 유지 훈련을 위한 실시간 모니터링을 위하여 실시간 RMS 근전도 신호를 디스플레이 하면서 저장하였다. 이후 오프라인 분석에서는 고유수용성 감각 힘 요소 평가지표 계산을 위하여 저장된 RMS 근전도 신호를 상용 분석 소프트웨어 EMGworks Analysis(Delsys Ltd. Natick, Massachusetts)를 이용하여 1 kHz로 리샘플링하고, 20 Hz의 차단 주파수 저역통과필터 (Butterworth filter)를 사용하여 잡음을 제거하였다[71].

(2) 경사계(Clinometer)

발목관절의 고유수용성감각의 위치요소를 평가하기 위해 발등굽힘과 발바닥 굽힘 각도의 측정을 필요로 하였고, 관절각도 기준 측정 방법(Golden standard method)인 관절측각기(Goniometer)와 높은 상관관계를 보였다는 연구를 바탕으로 스마트폰 어플리케이션인 Clinometer(Clinometer + bubble level, Plaincord™, Stephanskirchen, Germany, 그림 1(b))을 사용하여 관절 각도를 측정하였다[72].

표 1. 실험 대상자들의 특성

Table 1. Characteristic of subjects

N=9	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)
Mean (±SD)	21.4 (±1.35)	169.48 (±7.42)	60.55 (±10.50)

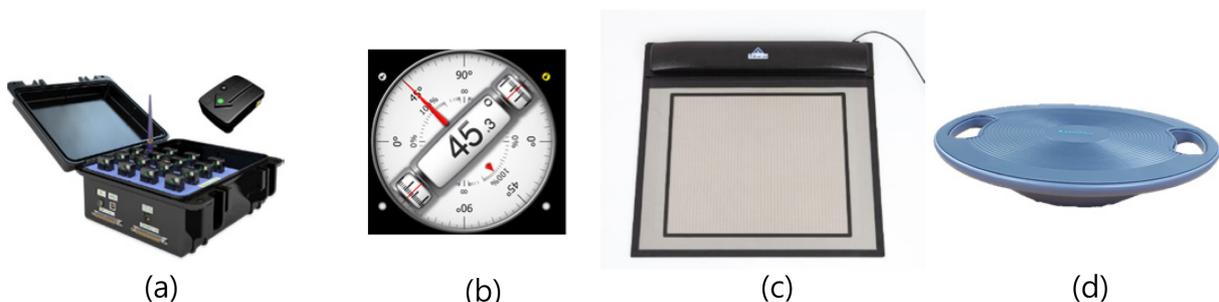


그림 1. 측정장비 및 도구 (a) 근전도 측정 장비, (b) 경사계 어플리케이션, (c) 압력매트센서, (d) 밸런스 보드

Fig. 1. Measurement equipment (a) Electromyogram measurement sensor, (b) Clinometer application, (c) Pressure mat sensor, (d) Balance board

(3) 압력매트센서(Pressure mat)

한발 서기 시 균형능력을 평가하기 위해 압력매트센서(Mat Scan VersaTek system, Teckscan Inc, Boston, Massachusetts, 그림 1(c))를 이용하였고, 압력매트센서에서 측정된 압력 중심 좌표를 이용해 균형능력을 평가하였다. 또한 서로 다른 2가지의 균형 평가 조건을 제공함에 있어서 불안정한 지지면을 통해 고유수용성각각을 교란하여 높은 난이도의 한 발서기를 수행하도록 할 수 있는 밸런스 보드(Egojin balance board, Egojin co., Gyeonggi-do, Republic of Korea, 그림 1(d))를 이용하였다.

3. 실험방법

(1) 고유수용성각각 힘 요소 평가

대상자는 우세측 다리의 앞장강근과 외측 장딴지근에 각각 근전도 전극을 부착하고(그림 2) 발목관절 발등 굽힘과 발바닥 굽힘을 시행하였다. 힘 요소에 대한 평가는 이전에 발생한 힘이나 미리 지정한 최대하의 힘의 양을 인지하고 동일한 값에 대하여 재현하는 능력을 평가한다[36,40,41]. 본 연구에서는 대상자의 두 근육에 대하여 최대 자발성 수축(Maximum voluntary contraction: MVC)시 측정된 평균 근전도 크기의 50%를 목표 값으로 지정하고, 선형 포락 선화된 실시간 근전도 신호와 함께 이 목표 값을 횡축으로 모니터를 통하여 보여주었다. 대상자는 근전도 신호가 목표 값 횡축에서 유지되도록 근 수축력을 조절하는 훈련을 실시하였는데, 이때 근육의 수축과 이완은 각 3초씩 5회정도 반복하도록 지시하였다.

이후 대상자가 MVC 근전도 기준으로 근력의 50%를 인지하였다고 판단되면, 대상자가 보고 있던 모니터를 끄고, 시각적 정보가 없는 상태로 근 수축을 실시하여 근전도 신호의 세기가 목표 값과 동일하게 재현하도록 요구하였다. 이때 연구자는 대상자에게 어떠한 조언도 주지 않고 대상자 본인의 감각을 통해서만 동작을 수행할 수 있도록 유도하였다. 이 재현 능력 평가는 총 3회 실시하였다(그림 3)[31,40].

(2) 고유수용성각각 위치 요소 평가

위치요소 평가는 관절위치감각 검사로서 사전에 설정된



그림 2. 근전도 센서 부착 위치(앞장강근, 외측장딴지근)
Fig. 2. Electromyogram sensor attachment(Tibialis anterior, Gastrocnemius lateral)

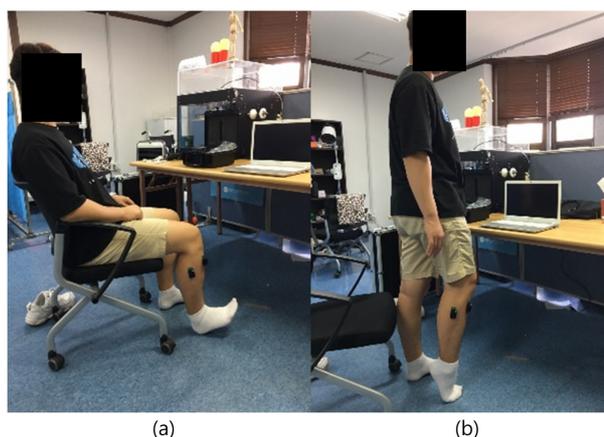


그림 3. 발목관절의 고유수용성각각 힘 요소 측정 (a) 발등 굽힘, (b) 발바닥 굽힘
Fig. 3. Measurement of Ankle joint proprioception of force sense (a) Dorsiflexion, (b) Plantarflexion

관절의 목표 각도에 따른 재위치 정밀 혹은 정확성을 평가한다[35,36]. 스마트폰의 경사계 어플리케이션을 실행시킨 후 대상자가 의자에 앉아서 엉덩관절 90도 굽힘, 무릎관절 90도 굽힘 자세를 취하게 하고 대상자의 우세 발 안쪽에 발바닥과 평행하도록 스마트폰을 부착하였다.

대상자의 정강이는 최대한 움직이지 않도록 고정하고 시상면 발목관절 가동범위(ROM)를 3회 반복 측정한 후, 대상자가 스스로 시상면 발목관절 ROM의 1/2이 되는 각도를 찾아서 유지하는 훈련을 반복하도록 하였다. 이때 대상자의 자신의 발과 경사계의 수치를 보면서 훈련하였다. 5회 정도의 훈련이 끝나면, 대상자는 눈을 감은 채로 어떠한 정보제공 없이 연습할 때의 느낌을 떠올리며 발목관절 1/2 ROM 지점을 찾아 정지하도록 요구하였으며 대상자가 움직임을 멈췄을 때 경사계의 각도를 읽어 기록하였다(그림 4)[40].

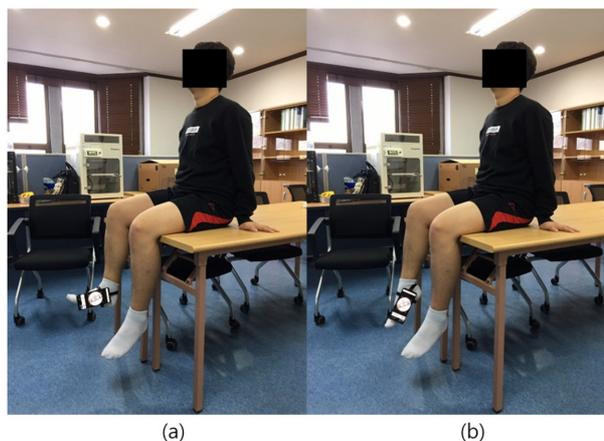


그림 4. 발목관절의 고유수용성각각 위치 측면 측정 (a) 발등 굽힘, (b) 발바닥 굽힘
Fig. 4. Measurement of Ankle joint proprioception of position sense (a) Dorsiflexion, (b) Plantarflexion

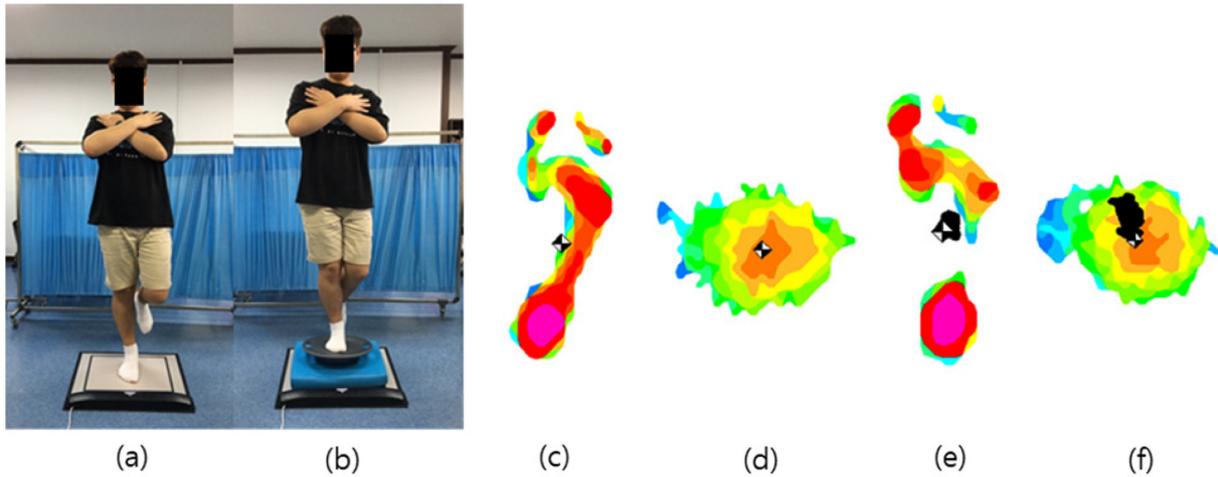


그림 5. 한발서기를 통한 균형 능력 측정 (a) 평지, (b) 발란스 보드+발란스 패드, (c) 평지에서 측정한 압력중심, (d) 발란스 보드+발란스 패드에서 측정한 압력중심, (e) 평지에서 측정된 압력중심 궤적, (f) 발란스 보드+발란스 패드에서 측정된 압력중심 궤적
 Fig. 5. Balance ability test using One-leg standing (a) Floor (b) with Balance board + Balance pad (c) measured COP on Floor condition (d) measured COP on Balance board +balance pad (e) measured COP trajectory on Floor condition (f) measured COP trajectory on Balance board +balance pad

(3) 균형 검사

고유수용성감각의 힘과 위치 측면의 수준 검사를 끝낸 대상자는 압력매트센서 위에서 한발 서기를 통해 균형 능력평가를 실시하였다. 아무것도 올려놓지 않은 딱딱한 바닥위에 놓인 압력매트센서 위에서 대상자가 그림 5(a)와 같이 시선은 정면을 향하고, 양손은 교차하여 가슴에 올린 상태에서 우세측 다리로 지지하여 한발 서기 자세로 30초간 유지하는 동안 압력매트센서를 통해 압력중심을 측정하였다(그림 5(c)). 두 번째 검사 조건에서는 더 높은 난이도를 부여하기 위해[73] 압력 매트센서 위에 밸런스 패드 & 보드를 위치시키고, 대상자는 시선은 정면을 향하고 양손은 교차하여 가슴에 얹은 상태로 패드 & 보드 위에 우세측 다리로 지지하여 한 발로 서서 30초를 유지하는 동안 압력중심을 측정하였다(그림 5(b), 그림 5(d)).

4. 분석방법

(1) 고유수용성감각 힘 요소 평가지표

앞정강근과 외측 장딴지근육의 고유수용성 힘 감각 지표는 선행연구에서 사용된 분석 식을 가져와 부분적으로 수정하여 사용하였으며[31], 이는 MVC인 상태의 근전도 최대값의 50%값(목표전압, EMG_{target})과 평가 세션에서 측정된 EMG 값(검사전압, EMG_{tested})과의 차이의 절대값은 $E_e(EMG_{error})$ 로 써 식 (1)과 같다. $E_I(EMG_{index})$ 는 1에서 식 (1)을 MVC상태의 근전도 최대값의 50%값(목표전압, EMG_{target})으로 나눈 값을 뺀 것(식 2)으로 정의하였다.

$$E_e = |EMG_{tested} - EMG_{target}| \quad (1)$$

$$E_I = 1 - \frac{E_e}{EMG_{target}} \quad (2)$$

$0 \leq E_I < 1 (< MVC)$ 이므로, E_I 가 1에 가까울수록 고유수용성감각 수준이 높고 0에 가까울수록 낮다.

(2) 고유수용성감각 위치요소 평가지표

고유수용성 위치 감각 지표는 선행연구에서 사용된 분석 식을 가져와 부분적으로 수정하여 사용하였으며[31], 이는 계산된 1/2 ROM 값(목표각도, $Angle_{target}$)과 평가 세션에서 측정된 관절각도(검사각도, $Angle_{tested}$)의 차이는 $A_e(Angle_{error})$ 로 써 식 (3)과 같다. $A_I(Angle_{index})$ 는 식 (3)을 1에서 1/2 ROM 값(목표각도, $Angle_{target}$)으로 나눈 값을 뺀 것(식 4)으로 정의하였다.

$$A_e = |Angle_{tested} - Angle_{target}| \quad (3)$$

$$A_I = 1 - \frac{A_e}{Angle_{target}} \quad (4)$$

$0 \leq A_I < 1 (< ROM)$ 이므로, A_I 가 1에 가까울수록 고유수용성감각 수준이 높고 0에 가까울수록 낮다.

(3) 균형능력 평가지표

한발서기를 통한 자세조절 능력 평가는 전체 30초 중에서 중심을 잡아가는 처음 부분과 자세가 흐트러지는 끝부분 2.5초씩 총 5초를 제외한 25초를 분석에 사용하였다. 균형능력의 평가를 위해 사용된 변인들은 다음과 같다. 대상자들이 압력매트센서 위에서(딱딱한 바닥) 눈을 뜨고 한 발 서기를 했을 때와 압력매트센서 위에 균형패드를 놓고 그 위에서 눈을 뜨고 한 발 서기를 했을 때 측정된 압력중심 궤적에서 각각 위상 평면 매개변수(Phase plane parameter; PPP, 식 5)

[74,75], 속도평균(Mean velocity; Vm, 식 6)[76,77], 전-후방 속도평균(Mean velocity at anterior-posterior direction; Vm_ap, 식 7)[76,77], 전-후방 제곱근거리(Root mean squared distance at anterior-posterior direction; RDap, 식 8) [76,78], 압력중심 궤적의 이동거리(Length; L, 식 9)[79], 타원의 넓이(Ellipse Area; A, 식 10)[80, 81]를 계산하였다. 이렇게 계산된 6가지 변인들은 2가지 바닥 조건에서의 차이(ΔPPP , ΔRD_{ap} , ΔVm_{ap} , ΔVm , ΔL , ΔA) 값으로 Qiu의 연구에서 나타난 상대적, 절대적 신뢰도가 높은 5가지 변인들과 압력 중심의 이동거리를 평가 변인으로 선택하고 고유수용성 감각과의 상관관계 분석에 사용되었다[63].

$$PPP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_{vx}^2 + \sigma_{vy}^2} \tag{5}$$

$$Vm = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}}{T} \tag{6}$$

$$Vm_{ap} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2}}{T} \tag{7}$$

$$RD_{ap} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2}}{N} \tag{8}$$

$$L = \sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \tag{9}$$

$$A = ab\pi \tag{10}$$

(4) 상관관계분석

본 실험의 실험결과는 마이크로소프트사의 엑셀 프로그램과, SPSS WIN Ver. 20.0을 이용하여 기본적인 데이터 처리 및 통계분석을 실시하였다. 균형검사 결과와 힘 및 위치 고유수용성감각 능력과의 상관관계를 조사하기 위하여 Spearmann's rho를 계산하였으며 유의수준은(α)는 .05로 설정하였다.

III. 연구결과

본 실험을 통한 고유수용성감각 평가에서 측정된 위치 및 힘 측면 평가지표(Ae, AI, Ee_{TA}, Ee_{GCL}, EI_{TA}, EI_{GCL})와 압력중심 궤적을 이용한 균형능력평가 지표(ΔPPP , ΔRD_{ap} , ΔVm_{ap} , ΔVm , ΔL , ΔA) 들에 대한 대상자들의 값과 평균 및 표준편차는 표 2와 같았다.

2가지 측면의 고유수용성 감각 수준과 균형능력 수준과의 상관관계 분석 결과 GCL의 힘 측면이 균형능력과 유의한 상관관계가 있는 것으로 관찰되었다. Ee_{GCL}과 ΔRD_{ap} 는 $\rho=0.854$ ($p=0.003$), ΔVm_{ap} 는 $\rho=0.883$ ($p=0.002$), ΔVm 는 $\rho=0.817$ ($p=0.007$), ΔL 는 $\rho=0.817$ ($p=0.007$), ΔA 는 $\rho=0.700$ ($p=0.036$) EI_{GCL}과 ΔA 는 $\rho=-0.695$ ($p=0.038$)로 나타났다.

고유수용성감각의 힘측면과 위치측면 사이의 상관관계는 Ae와 EI_{TA}의 평가에서 $\rho=-0.50$ 로 제일 작았고, 가장 큰 상관계수를 보인 것은 AI와 Ee_{GCL}인데 그 값이 0.577로 나타났으

표 2. 분석 변인들의 평균 및 표준편차
Table 2. Mean and standard deviation for each variable

	Ae	AI	Ee _{TA}	Ee _{GCL}	EI _{TA}	EI _{GCL}	ΔPPP	ΔRD_{ap}	ΔVm_{ap}	ΔVm	ΔA	ΔL
Sub.1	8.46	0.65	0.30	0.05	0.957	0.993	0.56	-0.03	-0.14	0.35	6.46	8.65
Sub.2	4.70	0.76	0.06	0.21	0.988	0.990	1.53	0.27	1.15	2.25	31.43	56.20
Sub.3	8.43	0.65	0.21	0.15	0.965	0.978	0.83	0.13	0.54	1.13	11.61	28.20
Sub.4	9.46	0.68	0.02	0.09	0.998	0.995	0.62	0.03	0.13	0.46	5.32	11.56
Sub.5	7.39	0.78	0.18	0.19	0.978	0.992	0.32	0.06	0.27	0.66	5.51	16.51
Sub.6	2.13	0.89	0.46	0.84	0.928	0.961	0.95	0.13	0.55	0.80	13.69	20.08
Sub.7	6.43	0.66	0.16	0.03	0.977	0.998	0.48	-0.06	-0.27	-0.41	5.13	-10.14
Sub.8	14.38	0.42	0.12	0.13	0.996	0.997	0.54	0.09	0.39	0.70	7.70	17.60
Sub.9	11.39	0.64	0.49	0.40	0.984	0.995	0.58	0.18	0.76	1.43	7.63	35.78
Mean	8.09	0.68	0.22	0.23	0.975	0.989	0.71	0.09	0.38	0.82	10.50	20.49
SD	3.38	0.12	0.16	0.24	0.021	0.011	0.34	0.10	0.42	0.70	7.91	17.48

*SD = Standard deviation

Ae = Angle error

AI = Angle index

Ee = EMG error

EI = EMG index

PPP = Phase plane parameter

RD_{ap} = RMS distance - Anterior/Posterior

Vm_{ap} = Velocity mean - Anterior/Posterior

Vm = Velocity mean

A = Ellipse area

L = Length

표 3. 고유수용성 감각과 균형 능력 검사 결과의 상관관계
Table 3. Correlation between proprioception and balance ability test

Correlation coefficient (Spearman's rho) and significances	ΔPPP		ΔRD _{ap}		ΔVm _{ap}		ΔVm		ΔA		ΔL	
	rho	p	rho	p	rho	p	rho	p	rho	p	rho	p
AI	-.350	.356	-.117	.764	-.150	.700	-.083	.831	-.283	.460	-.083	.831
Ae	.259	.500	.038	.923	.084	.831	-.008	.983	.092	.814	-.008	.983
Ee _{TA}	0.000	1.000	.201	.604	.217	.576	.183	.637	.183	.637	.183	.637
Ee _{GCL}	.517	.154	.854**	.003	.883**	.002	.817**	.007	.700*	.036	.817**	.007
EI _{TA}	-.067	.865	.117	.764	.100	.798	.133	.732	-.167	.668	.133	.732
EI _{GCL}	-.644	.061	-.538	.135	-.544	.130	-.527	.145	-.695*	.038	-.527	.145

표 4. 고유수용성 감각 요소들 사이의 상관관계
Table 4. Correlation between two aspects of proprioception

Correlation coefficient (Spearman's rho) and significances		Force sense							
		Ee _{TA}		Ee _{GCL}		EI _{TA}		EI _{GCL}	
		Rho	p	rho	p	rho	p	rho	p
Position sense	Ae	-.050	.898	-.283	.460	.533	.139	.577	.104
	AI	-.109	.781	.343	.366	-.259	.500	-.563	.114

며, 모든 경우에 통계적 유의성은 없었다(0.104 < p < 0.898).

IV. 고찰 및 결론

고유수용성감각에 대한 다양한 평가들이 시도되고 있으나, 고유수용성감각 수준이 신체활동의 기능적인 측면과 어떠한 상관관계를 가졌는지 관찰한 연구는 거의 없었다. 본 연구는 고유수용성감각의 요소별 능력 수준이 대표적인 신체 운동 기능인 균형능력과 어떠한 상관관계가 있는지 분석을 시도한 거의 최초의 연구이다. 또한, 본 연구에서는 신뢰도와 타당도 그리고 임상적 접근성이 높다고 판단되는 측정도구인 근전도와 경사계 어플리케이션을 이용하여 힘과 위치측면에 대한 대상자들의 고유수용성감각 수준을 각각 측정하였고, 이 수준들이 한 발 서기 균형 능력과 어떠한 상관관계를 갖는지 분석하였다. 또한 대상자들의 한 발 서기 능력은 압력 중심좌표를 측정하여 정량적인 균형평가를 시도하였다.

본 연구 결과에 따르면 발목관절의 고유수용성의 힘 감각 중 외측 장딴지근(GCL)의 항목에서 통계적으로 유의한 상관관계를 보였는데 그 중 Index값과 균형능력 평가 요소 중 ΔA와 통계적으로 유의한 상관관계를 보였으며, e값은 ΔRD_{ap}, ΔVm_{ap}, ΔVm, ΔA, ΔL와 높은 상관관계가 있는 것으로 조사되었고, 고유수용성의 위치감각과 균형능력 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이 결과는 한 발로 섰을 때 체중심(Center of gravity) 벡터가 발목관절 앞쪽을 지나기 때문에 발목이 앞으로 무너지는 것을 방지하기 위하여 외측

장딴지근이 강하게 수축을 하여 기립자세를 유지하기 때문인 것으로 사료된다[79]. 또한 본 연구에서 고유수용성감각의 2가지 측면인 힘과 위치 측면들의 상관관계는 매우 낮은 것으로 분석되었는데, 이는 Philips 등의 선행연구의 결과와 유사하였다[31].

근활성도를 나타내는 근전도는 근육에서 발휘되는 근력과 밀접한 관계가 있다. 근전도-힘(EMG to force) 직접 추정법으로 근전도에서 근력을 추정하려는 시도도 많지만[68-70], 일반적으로 개별 근력 추정은 운동형상학적, 운동역학적 결과에 Hill 근육 모델을 적용하여 계산하는데 이때 근전도 측정 결과로부터 얻어진 근활성도 수준(activation level)이 매우 중요한 요소 중 하나이다[83-85]. 본 연구에서는 이러한 근력 추정 모델을 사용하여 근력을 측정하고 고유수용성감각 힘 측면을 훈련, 평가한 것은 아니다. 근전도의 크기가 근력과 정비례하지는 않으나, 본 연구에서 대상이 되는 발목관절의 굽힘, 폼 근은 관절가동범위를 고려할 때 근전도의 세기에 근력이 거의 비례할 것으로 가정하여[84,86,87] 근활성도, 즉 근전도의 세기를 근력의 세기로 정의하였다.

관절각도를 측정하는 현존하는 가장 정확한 방법은 3차원 모션캡처 장비를 이용하는 방법이지만, 장비가 고가이고 조작하는데 전문 기술이 필요하기 때문에 발목관절의 1자유도 동작만을 측정하는 본 연구에 대하여 고사양이다. 따라서 본 연구에서는 선행연구들을 통해 신뢰도와 타당도가 검증된 기울기 측정 모바일 어플리케이션을 이용하여 발목관절 굽힘, 폼 각도를 측정하였다[72].

본 연구에서 고유수용성감각 수준을 평가하는 지표로 사용된 변인 E_s , E_b , A_s , A_b 는 Philips 등의 선행연구에서 사용된 지표와 같은 개념으로 단지, Philips의 연구에서는 RMS를 사용한 반면 본 연구에서는 단순 평균으로 계산한 점만 차이점이다[31].

Qui 연구에서 제안한 상대적으로 가장 신뢰도 타당도가 높은 COP변인 중에 PPP, Vm, Vm_ap, RDap, A를 본 연구에서 평가대상 변인으로 선정하였으며, L은 가장 보편적으로 평가되는 변인이기 때문에 평가 변인에 포함하였다.

본 연구에서는 고유수용성감각 수준 평가에 우세측 발을 대상으로 하였기 때문에 한 발 서기 균형평가도 우세측을 대상으로 실시하였다. 비우세측 발은 자세를 특별히 규정하지 않고 바닥에 닿지 않게만 유지하라고 지시하였는데, 대부분의 대상자들이 약간의 엉덩관절 벌림과 무릎 굽힘만으로 비우세측 발을 지면에서 떠온 자세로 한 발 서기 균형 평가를 실시하였다.

본 연구의 제한점으로 대상자 수가 일반화하기에 충분하지 않은 표본 수이고, 고유수용성감각의 수준 평가에서 50% 지점에 대해서만 반복능력을 측정하였기 때문에, 평가는 30%, 70% 등 좀 더 다양한 수준을 목표로 평가되어야 할 필요성이 있다.

본 연구는 발목관절의 고유수용성 능력 수준이 기능적 신체 활동 중의 하나인 균형능력과 어떠한 상관관계가 있는지 조사하였으며, 고유수용성 수준과 균형능력을 평가함에 있어 신뢰도 타당도가 확보되면서 임상현장에서의 접근성이 높은 도구들을 사용하고자 시도하였다. 또한 정량적 측정 장비와 임상평가도구를 함께 사용하여 평가함으로써 임상적 유용성을 확보하고자 하였다. 본 연구에서 외측 장딴지근의 고유수용성 힘 감각이 압력중심 변인들과 유의하게 높은 상관관계를 보인 것으로 그 결과를 요약할 수 있는데, 본 연구 결과에만 제한한다면, 발목관절 근육, 특히 폼 근에 대한 고유수용성감각 촉진 운동 치료가 균형재활에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다. 차후 연구에서는 더 많은 표본을 대상으로, 다양한 수준의 고유수용성감각 평가 및 운동치료에 대한 연구가 이루어진다면 균형재활 치료에 도움이 될 만한 더 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

References

- [1] Butler AA, Héroux ME, Gandevia SC. Body ownership and a new proprioceptive role for muscle spindles. *Acta Physiologica*. 2017;220(1):19-27.
- [2] Gandevia SC. Proprioception, tensegrity, and motor control. *Journal of motor behavior*. 2014;46(3):199-201.
- [3] Ruhe A, Fejer R, Walker B. The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions—a systematic review of the literature. *Gait & posture*. 2010;32(4):436-45.
- [4] Proske U, Gandevia SC. The kinaesthetic senses. *The Journal of physiology*. 2009;587(17):4139-46.
- [5] Winte D.A. Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & posture*. 1995;3(4):193-214.
- [6] Brandt T, Krafczyk S, Malsbenden I. Postural imbalance with head extension: improvement by training as a model for ataxia therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1981; 374(1):636-49.
- [7] Jackson RT, Epstein CM. Effect of head extension on equilibrium in normal subjects. *Annals of Otolaryngology & Rhinology*. 1991;100(1):63-7.
- [8] Kingma I, Toussaint HM, Commissaris DA, Savelsbergh G. J. Adaptation of center of mass control under microgravity in a whole-body lifting task. *Experimental brain research*. 1999; 125(1):35-42.
- [9] Barton JE, Roy A, Sorkin JD, Rogers MW, Macko R. An engineering model of human balance control—part I: biomechanical model. *Journal of biomechanical engineering*. 2016; 138(1):014502.
- [10] Straube A, Paulus W, Brandt T. Influence of visual blur on object-motion detection, self-motion detection and postural balance. *Behavioural Brain Research*. 1990;40(1):1-6.
- [11] Kejonen PK. Body movements during postural stabilization: Measurements with a motion analysis system. 2004.
- [12] Kotecha A, Webster AR, Wright G, Michaelides M, Rubin GS. Standing Balance Stability and the Effects of Light Touch in Adults With Profound Loss of Vision—An Exploratory Study. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2016;57(11):5053-9.
- [13] Barrett DS, Cobb AG, Bentley G. Joint proprioception in normal, osteoarthritic and replaced knees. *The Journal of bone and joint surgery*. British volume. 1991;73(1):53-6.
- [14] Isakov E, Mizrahi J, Ring H, Susak Z, Hakim N. Standing sway and weight-bearing distribution in people with below-knee amputations. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1992;73(2):174-8.
- [15] Kisner C, Colby LA. *Therapeutic Exercise: Foundations and techniques*. 3rd ed. Philadelphia: PA, F.A. Davis Co.; 1996. pp. 63-65.
- [16] Adler SS, Beckers D, Buck M. *PNF in Practice: An illustrated guide*. 2nd ed. Berlin: Springer; 2000. pp. 1-16.
- [17] Goble DJ. Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice. *Physical therapy*. 2010;90(8):1176-84.
- [18] Xerri C. Plasticity of cortical maps: multiple triggers for adaptive reorganization following brain damage and spinal cord injury. *The Neuroscientist*. 2012;18(2):133-48.
- [19] Xerri C, Merzenich MM, Peterson BE, Jenkins W. Plasticity of primary somatosensory cortex paralleling sensorimotor skill recovery from stroke in adult monkeys. *Journal of neurophysiology*. 1998;79(4):2119-48.
- [20] Pleger B, Schwenkreis P, Dinse HR, Ragert P, Höffken O, Malin JP, Tegenthoff M. Pharmacological suppression of plastic changes in human primary somatosensory cortex after motor learning. *Experimental brain research*. 2003;148(4): 525-32.
- [21] Schwenkreis P, Pleger B, Höffken O, Malin JP, Tegenthoff M. Repetitive training of a synchronised movement induces short-term plastic changes in the human primary somaten-

- sory cortex. *Neuroscience letters*. 2001;312(2):99-102.
- [22] Lee JA, Kim DH, Shin HK, Choi KH, Kwon OY. Difference of proprioceptive sense at elbow joint according to measurement methods. *Physical Therapy Korea*. 2003;10(3):63-70.
- [23] Martin J, Jessell T. Modality coding in the somatic sensory system. In: Kandel E, Schwartz J, Jessell T, editors. *Principles of neural science*. London: Prentice-Hall International Inc.; 1991. pp. 341-52.
- [24] Rothwell J, Lennon S. Control of human voluntary movement. *Physiotherapy*. 1994;80(12):869.
- [25] Lee HS, Choi HS, Kwon OY. A literature review on balance control factors. *Physical Therapy Korea*. 1996;3(3):82-91.
- [26] Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: a critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*. 2016;5(1):80-90.
- [27] Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system, part II: the role of proprioception in motor control and functional joint stability. *Journal of athletic training*. 2002;37(1):80.
- [28] Krewer C, Van de Winckel A, Elangovan N, Aman JE, Konczak J. Commentary on: "Assessing proprioception: A critical review of methods" by Han et al. *Journal of sport and health science*. 2016;5(1):91.
- [29] Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: What do you really want to know?—Response to Krewer et al. *Journal of sport and health science*. 2016;5(1):93.
- [30] Sherrington CS. *The integrative action of the nervous system*. Cambridge: Cambridge University Press; 1906.
- [31] Phillips D, Karduna A. No relationship between joint position sense and force sense at the shoulder. *J Mot Behav*. 2018; 50(2):228-34.
- [32] Röijezon U, Clark NC, Treleaven J. Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. Part 1: Basic science and principles of assessment and clinical interventions. *Manual therapy*. 2015; 20(3):368-77.
- [33] Riemann BL, Myers JB, Lephart SM. Sensorimotor system measurement techniques. *Journal of athletic training*. 2002; 37(1):85.
- [34] Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological reviews*. 2012;92(4):1651-97.
- [35] Lephart SM, Warner JJ, Borsa PA, Fu FH. Proprioception of the shoulder joint in healthy, unstable, and surgically repaired shoulders. *Journal of shoulder and elbow surgery*. 1994;3(6): 371-80.
- [36] Benjaminse A, Sell TC, Abt JP, House AJ, Lephart SM. Reliability and precision of hip proprioception methods in healthy individuals. *Clinical Journal of Sport Medicine*. 2009;19(6): 457-63.
- [37] Waddington G, Adams R, Jones A. Wobble board (ankle disc) training effects on the discrimination of inversion movements. *Australian Journal of Physiotherapy*. 1999;45:95-102.
- [38] Waddington G, Seward H, Wrigley T, Lacey N, Adams R. Comparing wobble board and jump-landing training effects on knee and ankle movement discrimination. *Journal of science and medicine in sport*. 2000;3(4):449-59.
- [39] Kristjansson E, Oddsdottir GL. "The Fly": a new clinical assessment and treatment method for deficits of movement control in the cervical spine: reliability and validity. *Spine*. 2010;35(23):1298-305.
- [40] Dover G, Powers ME. Reliability of joint position sense and force-reproduction measures during internal and external rotation of the shoulder. *Journal of athletic training*. 2003;38(4):304.
- [41] O'Leary SP, Vicenzino BT, Jull GA. A new method of isometric dynamometry for the craniocervical flexor muscles. *Physical therapy*. 2005;85(6):556-64.
- [42] Goodwin G, McCloskey D, Matthews P. The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*. 1972;95(4):705-48.
- [43] Brumagne S, Cordo P, Lysens R, Verschueren S, Swinnen S. The role of paraspinal muscle spindles in lumbosacral position sense in individuals with and without low back pain. *Spine*. 2000;25(8):989-94.
- [44] Fitzpatrick R, Burke D, Gandevia SC. Task-dependent reflex responses and movement illusions evoked by galvanic vestibular stimulation in standing humans. *J Physiol Lond*. 1994;478(2): 363-72.
- [45] Hwang S, Agada P, Kiemel T, Jeka JJ. Dynamic reweighting of three modalities for sensor fusion. *Plos One*. 2014;9(1).
- [46] Kiers H, Brumagne S, van Dieen J, van der Wees P, Vanhees L. Ankle proprioception is not targeted by exercises on an unstable surface. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(4):1577-85.
- [47] Horak FB. Clinical assessment of balance disorders. *Gait & posture* 1997;6(1):76-84.
- [48] Tinetti ME. Performance-oriented assessment of mobility problems in elderly patients. *Journal of the American Geriatrics Society*. 1986;34(2):119-26.
- [49] Berg K, Wood-Dauphine S, Williams JI, Gayton D. Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument. *Physiotherapy Canada*, 1989;41(6): 304-11.
- [50] Bohannon RW, Leary KM. Standing balance and function over the course of acute rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1995;76(11):994-6.
- [51] Muehlbauer T, Roth R, Mueller S, Granacher, U. Intra and intersession reliability of balance measures during one-leg standing in young adults. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2011;25(8):2228-34.
- [52] Matsuda S, Demura S, Uchiyama M. Centre of pressure sway characteristics during static one-legged stance of athletes from different sports. *Journal of sports sciences*. 2008;26(7):775-9.
- [53] Barone R, Macaluso F, Traina M, Leonardi V, Farina F, Di Felice V. Soccer players have a better standing balance in nondominant one-legged stance. *Open access journal of sports medicine*. 2011;2:1-6.
- [54] Frzovic D, Morris ME, Vowels, L. Clinical tests of standing balance: performance of persons with multiple sclerosis. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 2000; 81(2):215-21.
- [55] Jonsson E, Seiger Å, Hirschfeld, H. One-leg stance in healthy young and elderly adults: a measure of postural steadiness?. *Clinical biomechanics*. 2004;19(7):688-94.
- [56] Tsai LC, Yu B, Mercer VS, Gross MT. Comparison of different structural foot types for measures of standing postural control. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2006;36(12):942-53.
- [57] Horak FB, Macpherson JM. Postural orientation and equilibrium. In: Shepard, J., Rowell, L. (Eds.), *Handbook of Physiology: Section 12, Integration of Motor, Circulatory, Respiratory and Metabolic Control During Exercise*. New York: Oxford Univ. Press; 1995. pp. 47-49.

- [58] Patla A, Frank J, Winter D. Assessment of balance control in the elderly: major issues. *Physiotherapy Canada*. 1990;42(2):89-97.
- [59] Frändin K, Sonn U, Svantesson U, Grimby G. Functional balance tests in 76-year-olds in relation to performance, activities of daily living and platform tests. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*. 1995;27(4):231-41.
- [60] Norris JA, Marsh AP, Smith IJ, Kohut RI, Miller ME. Ability of static and statistical mechanics posturographic measures to distinguish between age and fall risk. *Journal of biomechanics*. 2005;38(6):1263-72.
- [61] Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, Lovett EG, Myklebust BM. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on biomedical engineering*. 1996;43(9):956-66.
- [62] Lin D, Seol H, Nussbaum MA, Madigan ML. Reliability of COP-based postural sway measures and age-related differences. *Gait & posture*. 2008;28(2):337-42.
- [63] Qiu H, Xiong S. Center-of-pressure based postural sway measures: Reliability and ability to distinguish between age, fear of falling and fall history. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2015;47:37-44.
- [64] Kim YH, Yang GT, Mun MS, Park SB. Movements of the Center of Pressure During Stance Phase in Free Level Walking of Normal Adults. *J Biomed Eng Res*. 1999;20:587-92.
- [65] Shin YI, Kim YH, Kim NG. A Quantitative Assessment of Static and Dynamic Postural Sway in Normal Adults. *Journal of Biomedical Engineering Research*. 1997;18(2):157-66.
- [66] Cha EJ, Kim KA, Lee TS. Postural Stability Measures Estimated from the Center of Pressure Signal During Static Posture Maintenance. *Journal of Biomedical Engineering Research*. 1999;20(5):559-66.
- [67] Han D. Muscle activation of paraspinal muscles in different types of high heels during standing. *Journal of physical therapy science*. 2015;27(1):67-9.
- [68] Hof AL. The relationship between electromyogram and muscle force. *Sportverletzung· Sportschaden*. 1997;11(03):79-86.
- [69] Bogey RA, Perry J, Gitter AJ. An EMG-to-force processing approach for determining ankle muscle forces during normal human gait. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2005;13(3):302-10.
- [70] Staudenmann D, Kingma I, Daffertshofer A, Stegeman DF, van Dieën JH. Improving EMG-based muscle force estimation by using a high-density EMG grid and principal component analysis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2006;53(4):712-9.
- [71] Türker KS, Miles TS. Surface electromyography, force and single motor-unit data for inhibitory reflex responses in human masseter at two levels of excitatory drive. *Archives of oral biology*. 1989;34(9):731-7.
- [72] Brian C, Russell E, Justin W. et al. Validation of an innovative method of shoulder range-of-motion measurement using a smartphone clinometer application. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2014;23(11):275-82.
- [73] Lee D, Kim H, An H, Jang J, Hong S, Jung S, amp; Lee G. Comparison of ostural sway depending on balance pad type. *Journal of physical therapy science*. 2018;30(2):252-7.
- [74] Riley PO, Benda BJ, Gill-Body KM, Krebs DE. MN Department of. Letters To The Editor Section. 1995;32(3):227-35.
- [75] Raymakers JA, Samson MM, Verhaar HJJ. The assessment of body sway and the choice of the stability parameter (s). *Gait & posture*. 2005;21(1):48-58.
- [76] Maki BE, Holliday PJ, Fernie GR. Aging and postural control: a comparison of spontaneous and induced-sway balance tests. *Journal of the American Geriatrics Society*. 1990;38(1):1-9.
- [77] Lin D, Seol H, Nussbaum MA, Madigan ML. Reliability of COP-based postural sway measures and age-related differences. *Gait & posture*. 2008;28(2):337-42.
- [78] Lafond D, Corriveau H, Hébert R, Prince F. Intrasession reliability of center of pressure measures of postural steadiness in healthy elderly people. *Archives of physical medicine and rehabilitation*. 2004;85(6):896-901.
- [79] Roerdink M, Hlavackova P, Vuillerme N. Center-of-pressure regularity as a marker for attentional investment in postural control: a comparison between sitting and standing postures. *Human movement science*. 2011;30(2):203-12.
- [80] Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, Lovett EG, Myklebust BM. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on biomedical engineering*. 1996;43(9):956-66.
- [81] Chiari L, Rocchi L, Cappello A. Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical biomechanics*. 2002;17(9-10):666-77.
- [82] Le Mouel C, Brette R. Mobility as the purpose of postural control. *Frontiers in computational neuroscience*. 2017;11:67.
- [83] Hill AV. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences*. 1938;126(843):136-95.
- [84] Bujalski P, Martins J, Stirling L. A Monte Carlo analysis of muscle force estimation sensitivity to muscle-tendon properties using a Hill-based muscle model. *Journal of biomechanics*. 2018;79:67-77.
- [85] Kleinbach C, Martynenko O, Promies J, Haeufle DF, Fehr J, Schmitt, S. Implementation and validation of the extended Hill-type muscle model with robust routing capabilities in LS-DYNA for active human body models. *Biomedical engineering online*. 2017;16(1):109.
- [86] Disselhorst-Klug C, Schmitz-Rode T, Rau G. Surface electromyography and muscle force: Limits in sEMG-force relationship and new approaches for applications. *Clinical biomechanics*. 2009;24(3):225-35.
- [87] Hansen LC, Anders C. Trunk muscle amplitude-force relationship is only quantitatively influenced by control strategy. *Journal of biomechanics*. 2016;49(3):408-15.