

## 장애물 보행 시 노화에 따른 신체질량중심의 변화

손남국 · 김형동<sup>†</sup>

고려대학교 보건과학대학 물리치료학과

### Age Effects on Center of Mass during Obstacle Crossing

Nam-Kuk Son, MS, Hyeong-Dong Kim, PT, PhD<sup>†</sup>

Department of Physical Therapy, College of Health Science, Korea University

Received: January 12, 2014 / Revised: February 9, 2014 / Accepted: February 20, 2014

© 2014 J Korean Soc Phys Med

#### | Abstract |

**PURPOSE:** The purpose of this study was to compare three dimensional displacement and peak velocity of the center of mass (COM) during obstacle crossing in young and older adults.

**METHODS:** 10 young adults (6 males/4 females, 24.6±1.9 years, age range: 22.0-26.9) and 10 older adults (1 male/9 females, 76.9±5.1 years, age range: 65.2-81.2) participated in the study. Both groups crossed an obstacle, which is 10% of leg length, and COM was measured using motion analysis system. Independent t-test was used to find significant differences between two groups.

**RESULTS:** The older adults showed significantly greater and faster COM displacement and peak velocity in mediolateral (M-L) direction as compared with young adults ( $p<.01$  and  $p<.001$  respectively). However, the young adults showed significantly greater and faster COM displacement and peak velocity in anteroposterior (A-P) direction as compared with older adults ( $p<.05$  and  $p<.001$  respectively). Furthermore, the young adults showed faster peak velocity of COM in vertical direction as compared with older adults

( $p<.001$ ). However, no significant difference was found in the COM displacement in vertical direction between two groups.

**CONCLUSION:** Greater and faster COM displacement and peak velocity in M-L direction in older adults were due to compensatory adjustment for appropriate contact on base of support of swing limb. Thus, the motion of the COM in M-L direction may be a crucial factor to identify risk of falls in older adults.

**Key Words:** Ageing, Center of mass, Falls, Obstacle crossing

#### I. 서론

65세 이상 노인의 약 30%는 매년 1회 이상의 낙상을 경험하며(Lord 등, 1993), 외측으로 넘어지는 낙상은 고관절 골절(hip fracture)을 일으키는 중요한 위험 요소이다(Greenspan 등, 1998). 이러한 낙상으로 인한 골절은 장애 발생, 사망률 그리고 의료비용 증가의 주요한 원인이 되고 있다(Tinetti 등, 1988; Campbell 등, 1981; Hayes 등, 1996).

낙상 시 균형을 유지할 수 있는 것은 시각, 전정기관,

<sup>†</sup>Corresponding Author : hdkimx0286@yahoo.com

고유수용 감각기관, 그리고 근골격계 등에 달려있는데, 연령이 증가함에 따라 다양한 생리적 변화로 인해 신체 균형조절과 관련된 기관들의 기능이 저하되고 이로 인해 보행과 균형조절 능력이 감소하여 낙상의 위험이 증가하게 된다(Lockhart 등, 2005; Bird 등, 2009). 특히 보행 시 장애물에 걸려 균형을 잃는 것은 노인의 낙상을 유발하는 가장 흔한 원인 중 하나이다(Campbell 등, 1990). 장애물을 넘을 때 지지하는 다리(stance limb)의 능동적 고관절 외전은 체간과 장애물을 넘어가는 다리(swing limb)의 균형을 유지하는데 중요한 역할을 한다(MacKinnon과 Winter, 1993). 이와 함께 노화에 따른 근육량 감소는 근력의 약화를 가져오고, 하지 근력의 약화는 낙상의 주요한 원인이 된다(Cummings 등, 1990).

Keffigan 등(2001)은 고관절의 가동성 감소는 노화로 인한 보행 변화에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이며, 고관절의 신전은 길항근인 고관절 굴곡근의 긴장 상태에 영향을 받는다고 하였다. 또한 잦은 낙상 경험이 있는 노인은 건강한 노인과 젊은 성인에 비하여 보행 시 과도한 고관절 긴장 상태를 보인다(Keffigan 등, 2001). 장애물을 넘는 동안 각 신체 분절의 빠르고 큰 움직임은 신체질량중심(center of mass)의 빠르고 큰 움직임을 유발하여(Chou 등, 2003), 이에 따른 부적절한 신체 분절 간의 움직임은 관상면에서 신체균형을 유지하는데 어려움을 야기하여, 외측으로 넘어지는 낙상의 위험성을 증가시키며, 이로 인하여 고관절과 골반 골절의 위험을 증가시킨다(Nevitt와 Cummings, 1993).

최근의 연구 결과에 의하면 건강한 노인과 균형감각에 이상이 있는 노인의 장애물 보행 실험에서 장애물의 높이가 높아질수록 건강한 노인에 비해 균형감각에 이상이 있는 노인의 신체질량중심의 좌우방향 변위(displacement)와 최대 속도가 증가하는 것으로 나타났다(Chou 등, 2003). 젊은 성인과 노인의 장애물 보행 실험에서는 젊은 성인 집단이 노인 집단에 비하여 신체질량중심의 좌우방향 변위와 최대속도가 더 작게 나타났지만, 장애물 높이를 키의 10%로 하였을 때, 다른 높이에 대한 결과 값과는 반대로 신체질량중심의 좌우방향 변위와 최대속도가 젊은 성인집단이 노인에 비해

크게 나타났다(Hahn과 Chou, 2004).

노인의 장애물 보행에 관한 선행 연구는 시공간적 변수(spatio-temporal parameters)와 신체압력중심의 변화에 대한 연구가 주를 이루고 있다(Wang과 Watanabe, 2007; Kim, 2009; Moghadam 등, 2011). 이에 반해 신체질량중심의 3D 움직임을 다룬 연구는 상대적으로 매우 부족하며, 특히 고관절 골절의 위험성이 매우 크며, 측면으로의 낙상과 관련성이 매우 크다고 알려진, 노화에 따른 신체질량중심의 좌우방향 변위(Chou 등, 2003)의 변화에 관한 연구는 장애물의 높이에 따라 서로 상반된 연구결과가 제시되고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 노인의 장애물(실험 참가자 키의 10% 높이) 보행 시 신체질량중심의 변위와 최대 속도(peak velocity)를 3차원 즉, 좌우/전후/수직 방향에서 분석하여, 젊은 사람과 비교했을 때 노인의 동적인 균형능력에 어떤 변화가 있는지 여부와, 노인의 낙상위험 및 균형능력을 판단하는 주요한 변수가 될 수 있는 지를 살펴보고자 하는 것이다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 대상

실험 참가자는 서울 소재 K대학교 재학생 중 근골격계 및 신경계 질환이 없는 대학생 10명(남성 6명/여성 4명, 평균나이: 24.6±1.9세, 나이범위: 22.0-26.9세)과 서울 소재 J복지관 회원 중 한국형 간이 정신검사 K-MMSE(Kang 등, 1997) 점수가 24점 이상(인지적 손상이 없음을 나타냄), 근골격계 및 신경계 질환이 없으며, 보조기 없이 독립 보행이 가능하며, 최근 1년 동안 낙상의 경험이 없고, 65세 이상인 10명(남성 1명/여성 9명, 평균나이: 76.9±5.1세, 나이범위: 65.2-81.2세)의 건강한 노인을 대상으로 하였다. 실험 참가자에게는 실험 전에 실험의 목적과 방법을 충분히 설명하였고, 실험참여 동의서를 작성하게 하였다. 연구대상자의 신체적 특성은 <Table 1>에 나와 있다.

Table 1. Characteristics of subjects.

	Young adults (n=10)	Older adults (n=10)
Age (yrs)	24.6±1.9	76.9±5.1
Height (cm)	165.6±7.9	152.5±7.2
Weight (kg)	61.1±9.8	59.9±9.6

Values are group means ± Standard deviations.

## 2. 실험 장비

장애물 보행 시 신체질량중심의 3차원적 움직임을 분석하기 위해 6대의 적외선 카메라(Vicon T10, Oxford Metrics Ltd., 영국)와 2대의 지면반력기(Advanced Mechanical Technology, Inc., 미국)를 사용하였다. 데이터는 샘플링 주파수 100Hz(적외선 카메라)와 1000Hz(지면반력기)를 사용 수집하였다. 지면반력기는 장애물 보행 시 정확한 분석구간을 설정하기 위해 사용하였고, 지면반발력(ground reaction force)이 발생하는 시점을 뒤꿈치 접지기(heel contact)로 설정하여 분석하였다. 본 연구의 목적 상 신체질량중심 이외의 데이터는 분석에서 제외하였다. 보행로 중앙에 설치된 장애물은 가로 150cm, 세로 10cm, 높이 2cm의 목재판과 장애물의 높이 조절을 위한 가로 10cm, 세로 10cm, 높이 1cm 또는 2cm 인 목재 거치대로 이루어져 있다.

## 3. 실험 절차

장애물 보행을 위한 보행로(walkway) 길이는 6m로 설정하였고, 보행 속도는 각 피험자의 평소 보행속도로 걷도록 하였다(Chou 등, 2001). 맨발 보행을 실시하였으며, 노인의 경우 피부 노화로 인해 반사마커 부착 시 피부에 손상이 염려되는 피험자에 한하여 양말을 착용하도록 하였다. 본 실험 전 3회의 예비 보행을 실시하였으며, 출발신호는 구두로 지시하였다. 신체질량중심의 움직임 좌표를 구하기 위해 동작분석 장비인 Vicon Nexus software(Nexus, Oxford Metrics Ltd., 영국)의 PluginGait full body marker set model (Kadaba et al., 1990)에 의거하여, 신체 주요 표지 35곳에 14mm 구형 반사마커를 Fig 1과 같이 부착하였으며, 장애물의 높이는 각 피험자 신장의 10%로 설정하였다(Chou 등, 2001)(Fig 2). 분석구간은 장애물을 뒤따라 넘는 발(trailing limb)

이 장애물을 넘기 전 뒤꿈치 접지기(heel contact)로 부터 동일한 발의 다음 뒤꿈치 접지기 까지(crossing stride)로 설정하였다. 본 실험은 각 피험자 당 3회의 장애물 보행을 실시하였으며, 그 평균값으로 결과를 분석하였다.

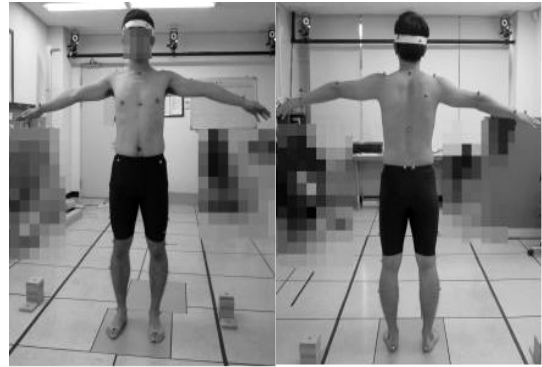


Fig. 1. Full body marker set.



Fig. 2. Obstacle crossing.

## 4. 자료 분석 방법

본 연구의 종속변수는 젊은 성인 집단과 노인 집단의 장애물 보행 시 신체질량중심의 좌우/전후/수직 방향에서의 변위와 최대 속도이며, 두 집단 간의 차이를 비교하기 위하여 독립표본 t-검정(Independent t-test)을 적용하였다. 자료 분석은 SPSS 12.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 통계 프로그램을 사용하였고, 유의수준은  $p < 0.05$ 로 설정하였다.

### III. 결과

#### 1. 신체질량중심(COM) 변위 비교

신체질량중심의 좌우/전후/수직 방향에서의 변위는 선행연구와 동일하게 정규화(normalization) 방식에 따라(Smith 등, 2002; Huang 등, 2008), 각 피험자의 다리길이에 대한 비율로 정규화 하였으며(%leg length) 그 결과는 Table 2와 같다.

좌우방향에서의 변위는 두 그룹 간에 통계적으로 유의한 차이가 있었으며( $p < .01$ ), 전후방향과는 달리 젊은 성인집단과 비교 했을 때 노인집단에서 더 크게 증가하였다. 전후방향에서의 변위 또한 통계적으로 유의한 차이가 있었으며( $p < .05$ ), 노인 집단과 비교했을 때 젊은 성인 집단이 노인 집단에 비하여 더 크게 증가하였다. 하지만 수직방향에서의 변위는 두 그룹 간에 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

Table 2. COM displacements(%leg length)

	Anteroposterior*	Mediolateral**	Vertical
Young adults	156.93±7.70	5.54±1.83	9.20±0.68
Older adults	124.87±38.44	10.79±4.68	7.86±2.62

Values are group means ± Standard deviations. For each group, n=10. COM displacement normalized by leg length.

Abbreviation: COM, center of mass.

\* $P < .05$ .

\*\* $P < .01$ .

#### 2. 신체질량중심(COM) 최대 속도 비교

신체질량중심의 좌우/전후/수직 방향에서의 최대 속도는 Table 3에 나와 있다. 두 집단 간의 좌우/전후/수직 방향 모두에서 신체질량중심의 최대 속도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다( $p < .01$ ). 좌우방향에서는 노인 집단에서 젊은 성인 집단과 비교했을 때 최대속도가 더 크게 증가하였다. 하지만, 전후방향과 수직방향에서는 젊은 성인 집단이 노인 집단에 비하여 최대속도가 더 크게 증가하였다.

Table 3. Center of mass peak velocities(cm/s)

	Anteroposterior**	Mediolateral**	Vertical**
Young adults	116.93±15.39	9.12±2.21	30.22±4.69
Older adults	74.09±11.94	14.77±3.50	19.61±5.20

Values are group means ± Standard deviations. For each group, n=10.

\*\* $P < .01$ .

### IV. 논의

본 연구에서는 젊은 성인 집단과 노인 집단을 대상으로 장애물 보행 시 신체질량중심의 움직임에 어떠한 차이가 있는지를 비교하고자 하였으며, 이것이 노인의 낙상위험과 균형능력과 관련된 주요한 위험요인으로 평가될 수 있는지를 확인하고자 하였다. 신체질량중심의 움직임 요소 중 변위와 최대 속도를 좌우/전후/수직 방향에서 분석하였으며, 그 결과 변위에서는 좌우/전후 방향에서 유의한 차이가 있었고, 최대 속도에서는 세 방향에서 유의한 차이가 있었다. 이러한 차이가 노인의 낙상위험 및 균형능력과 어떠한 연관성을 지니는지 여부를 논의해 보고자 한다.

Chou 등(2003)의 연구에서는 현기증이나 불안정함을 나타내는 노인이 건강한 노인에 비하여 장애물 보행 시 신체질량중심의 좌우방향 움직임에서 유의한 차이가 있었는데, 변위는 더 크게 증가하였고, 최대 속도 또한 더 빠르게 증가하는 것이 관찰되었다. 이것은 노인이 장애물 보행 시 좌우 쪽에서 균형을 유지하는데 어려움 겪어 넘어가는 발(swing limb)이 새로운 지지면에 안정적으로 발을 내딛기 위해 일으키는 ‘보상적 조절(compensatory adjustment)’의 결과이다(Chou 등, 2003). 따라서 이러한 신체질량중심의 좌우 움직임이 낙상의 위험이 높은 노인과 그렇지 않은 노인을 구분할 수 있는 주요한 요인이 될 수 있다고 보고하였다(Chou 등, 2003). 또한 Schrage 등(2008)은 54세에서 92세 사이의 성인 34명을 대상으로 한 보행 실험에서 각 연령 별로 신체질량중심의 좌우 움직임에서 유의한 차이가 있었

는데, 피험자의 연령이 증가할수록 좌우방향에서의 신체질량중심의 변위가 더 크고, 최대 속도 또한 더 빠르게 증가한다고 하였다.

본 연구에서 수행한 노인 집단과 젊은 성인 집단 간의 장애물 보행 시 신체질량중심의 좌우방향에서의 변위와 최대속도 비교 결과는 선행연구들의 결과와 같이 노인 집단에서 변위가 유의하게 더 크게 증가하였고, 최대 속도도 유의하게 더 빠르게 증가하였다. 이러한 결과는 노화에 따른 일반적인 현상들 중 근육량의 감소로 인한 하지 근력의 약화가(Fiastone과 Evans, 1993) 장애물 보행 시 균형을 유지하기 위해 필수적인, 지지하는 발에서의 충분한 고관절 외전(abduction)을 발생시키지 못하여 좌우방향으로의 더 크고 빠른 움직임을 유발시킨다고 하였다(Horak 등, 1989). 이러한 결과 고관절 골절의 직접적인 원인이 되는 외측으로의 낙상 위험을 증가시킬 수 있으며, 신체질량중심의 좌우 움직임은 노인의 낙상 위험 및 균형능력과 관련된 중요한 위험요인이 될 수 있다고 사료된다.

Hahn과 Chou(2004)는 젊은 성인 집단과 노인 집단을 대상으로 실시한 다양한 높이의 장애물 보행 실험에서 전후방향에서의 신체질량중심 움직임에서 유의한 차이가 있었는데, 변위는 노인집단에서 더 작게 나타났고, 전후방향에서의 최대 속도는 더 느리게 나타났다. 이러한 결과는 장애물 보행 시 노인이 보행하는 동안 적절한 신체균형을 유지하기 위해 지면과 지지하는 발에 주어지는 역학적 부하를 줄이기 위한 일종의 '보존적 전략'으로 설명할 수 있다.

본 연구에서는 선행연구의 결과와 같이 노인 집단에서 전후 방향의 변위가 유의하게 더 작았고, 최대속도 또한 유의하게 더 느리게 나타났다. Chen 등(1994)과 McFadyen과 Prince(2002)의 연구에서는 장애물 보행 시 노인 집단의 보행 속도와 활보장(stride length)이 젊은 성인에 비하여 작게 나타난다고 하였는데, 이것을 신체질량중심의 전후방 움직임과 관련하여 생각해보면, 신체질량중심의 최대 속도와 보행 속도, 신체질량중심의 변위와 활보장을 연관 지을 수 있다. 노인 집단에서 관찰되는 전방으로의 느린 보행 속도와 짧은 활보장은 전후 방향의 변위를 작게 하고, 최대속도 또한 느리게

하는 요인이라고 생각된다. 이러한 결과는 신체질량중심의 움직임을 연구한 선행연구들과 본 연구의 결과가 일치하는 것이라고 사료된다. 하지만 신체질량중심의 전후방 움직임이 노인의 낙상 위험 및 균형능력을 평가할 수 있는 주요한 요인이 될 수 있는지에 관해서는 관련 연구가 전무하여, 노인 낙상의 주요한 요인이 된다고 확정지을 수 없다. 이와 관련해서는 보행과 관련된 다른 변인, 즉 압력중심(center of pressure) 및 시공간적 변수 등과 관련지어 추후 보다 자세한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Hahn과 Chou(2004)의 연구에서는 장애물 보행 시 노인 집단과 젊은 성인 집단을 비교하였을 때, 수직방향에서의 신체질량중심 변위와 최대 속도 모두 유의한 차이가 나타나지 않았다고 하였다. 본 연구의 결과에서 변위는 두 집단 간에 유의한 차이가 없었으나, 최대 속도는 젊은 성인 집단이 노인 집단에 비하여 유의하게 높게 나타나서, 선행연구 결과와 일치하지 않았다. Smith 등(2002)은 보행 시 신체질량중심의 수직방향으로의 변위에서 유의하지 않지만 젊은 성인 집단이 노인 집단에 비하여 0.2%leg length 만큼 변위가 크게 나타났다고 보고하였다. 이러한 결과는 본 연구에서의 젊은 성인 집단이 노인 집단에 비하여 통계적으로 유의하지는 않았으나, 신체질량중심의 수직방향으로의 변위가 1.34%leg length 만큼 크게 나타난 것과 유사하다.

선행연구와 본 연구 결과의 공통된 점은 젊은 성인 집단과 노인 집단 간에 보행 시 신체질량중심 변위는 통계적으로 유의한 차이가 없었다는 것이다. 따라서 수직방향에서의 변위 차이가 노인의 낙상위험 및 균형능력에 주요한 영향을 미치는 요인인지는 명확하지 않다고 생각되며, 선행연구 결과에서도 명확하게 노인의 장애물 보행 시 낙상위험 및 균형능력과 관련된 요인으로 제시한 부분을 찾을 수 없었다. 그러나 추후 다른 보행 변수와 관련지어 더 많은 피험자를 대상으로 연구한다면 보다 명확하게 낙상 및 균형능력과 밀접한 연관성을 갖는 요인인지 여부를 판단할 수 있을 것이라고 사료된다.

본 연구는 다음과 같은 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 실험에 참여한 피험자의 수가 적었고 젊은 성인 집단과

노인 집단의 성별 비율이 일치하지 않았다는 점이다. 따라서 본 연구의 결과를 일반화하기에는 무리가 있다고 사료된다. 둘째, 건강한 노인을 대상으로 젊은 성인과 비교하여 낙상의 위험인자를 찾고자 하였기 때문에, 실제로 낙상의 위험이 높은 노인 집단을 대상으로 한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 필요성이 있다고 사료된다. 추후에는 이러한 제한 사항들을 보완한 보다 심도 있는 연구가 이루어져야 할 것이다. 셋째, 본 연구에서는 신체질량중심의 변화만을 측정하여 다른 보행 변수 즉, 신체압력중심, 시공간 변수 등을 함께 고려하지 못하였다. 추후 연구에서는 다른 보행 변수에 대한 추가적인 분석을 통한 심도 있는 고찰이 필요하다고 사료된다.

## V. 결론

본 연구는 젊은 성인 집단과 노인 집단의 장애물 보행 시 신체질량중심의 움직임을 비교 분석하여, 각 방향에서의 변위와 최대 속도가 노인의 낙상위험 및 균형능력을 판단하는 주요한 요인이 될 수 있는지를 살펴보고자 하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다. 좌우방향에서의 신체질량중심 변위와 최대 속도는 유의한 차이가 있었으며 노인 집단의 변위 및 최대 속도가 더 크고 빠르게 나타났다. 전후방향에서의 신체질량중심 변위와 최대 속도는 유의한 차이가 있었으며 젊은 성인 집단의 변위 및 최대 속도가 더 크고 빠르게 나타났다. 수직방향에서의 신체질량중심 변위는 유의한 차이가 없었으며, 최대 속도는 젊은 성인 집단이 더 빠르게 나타났다.

노인에게서 좌우방향에서의 변위와 최대속도의 증가는 장애물 보행 시 동적 자세조절 능력의 저하로 인해 넘어가는 발(swing limb)의 안정적인 지지면 딛기를 위한 '보상적 기진'으로 발생하는 것이라 사료된다. 이러한 결과는 고관절 골절을 야기할 수 있는 외측 낙상의 위험성을 증가시킬 수 있으며, 노인 낙상위험 및 균형능력을 판단할 수 있는 주요한 지표라고 볼 수 있겠다. 전후방향에서는 두 분석 변수에서 유의한 차이는 명확

하게 나타났지만 낙상위험과 관련된 인과관계는 분명하지 않았다. 수직방향에서의 변위는 유의한 차이가 없었지만 최대속도는 유의한 차이가 있어, 추후 보행 관련 다른 변수들과 함께 연관지어 보다 정밀한 연구가 이루어져야 한다고 사료된다. 마지막으로 노인의 낙상 예방과 관련된 다양한 운동 프로그램들을 적용하여 운동 전후의 장애물 보행 시 신체질량중심의 움직임 및 기타 중요한 보행 변수의 변화를 대조군과 비교한다면 낙상예방에 대한 운동의 효과를 적절히 평가할 수 있으리라 사료된다.

## References

- Bird ML, Hill K, Ball M, et al. Effects of resistance and flexibility exercise interventions on balance and related measures in older adults. *J Aging Phys Act.* 2009;17(4):444-54.
- Campbell AJ, Reinken J, Allan BC, et al. Falls in old age: a study of frequency and related clinical factors. *Age Ageing.* 1981;10(4):264-70.
- Campbell AJ, Borrie MJ, Spears GF, et al. Circumstances and consequences of falls experienced by a community population 70 years and over during a prospective study. *Age Ageing.* 1990;19(2):136-41.
- Chen H C, Ashton-Miller JA, Alexander NB, et al. Age effects on strategies used to avoid obstacles. *Gait Posture.* 1994;2(3):139-46.
- Chou L-S, Kaufman KR, Brey RH, et al. Motion of the whole body's center of mass when stepping over obstacles of different heights. *Gait Posture.* 2001;13(1):17-26.
- Chou L, Kaufman KR, Hahn ME, et al. Medio-lateral motion of the center of mass during obstacle crossing distinguishes elderly individuals with imbalance. *Gait Posture.* 2003;18(3):125-33.
- Cummings SR, Black DM, Nevitt MC, et al. Appendicular bone density and age predict hip fracture in women. *JAMA.* 1990;263(5):665-8.

- Fiastone MA, Evans WJ. The etiology and reversibility of muscle dysfunction in the aged. *J Gerontol.* 1993;48S:77-83.
- Greenspan SL, Myers ER, Kiel DP, et al. Fall direction, bone mineral density, and function: risk factors for hip fracture in frail nursing home elderly. *Am J Med.* 1998;104(6):539-45.
- Hahn ME, Chou L-S. Age related reduction in sagittal plane center of mass motion during obstacle crossing. *J Biomech.* 2004;37(6):837-44.
- Hayes WC, Myers ER, Rovinovitch SN, et al. Etiology and prevention of age related hip fractures. *Bone.* 1996;18(1 suppl):77S-86S.
- Horak F, Diener HC, Nashner LM. Influence of central set on human postural response. *J Neurophysiol.* 1989a;62:363.
- Huang SC, Lu TU, Chen HL, et al. Age and height effects on the center of mass and center of pressure inclination angles during obstacle crossing. *Med Eng Phys.* 2008;30(8):968-75.
- Kadaba MP, Ramakrishnan HK, Wootten ME. Measurement of lower extremity kinematics during level walking. *J Orthop Res.* 1990;8(3):383-92.
- Kang YW, Na DL, Hahn SH. A validity study on the Korean mini-mental state examination (K-MMSE) in dementia patients. *Korean J Neurology.* 1997;15(2):300-8.
- Keffigan DG, Lee LW, Collins JJ, et al. Reduce hip extension during walking: healthy elderly and fallers versus young adults. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001;82(1):26-30.
- Kim HD. The influence of aging on the center of pressure trajectory: a comparison of crossing an obstacle and stepping onto a curb from a position of quiet stance. *J Phys Ther Sci.* 2009;21(2):183-8.
- Lockhart TE, Smith JL, Woldstad JC. Effects of aging on the biomechanics of slips and falls. *Hum Factors.* 2005;47(4):708-29.
- Lord SR, Ward JA, Williams P, et al. An epidemiological study of falls in older community-dwelling women: the Randwick falls and fractures study. *Aust J Public Health.* 1993;17(3):240-5.
- Mackinnon CD, Winter DA. Control of whole body balance of the frontal plane during human walking. *J Biomech.* 1993;26(6):633-44.
- McFadyen BJ, Prince F. Avoidance and accommodation of surface height changes by healthy, community-dwelling, young and elderly men. *J Gerontol.* 2002;57(4):B166-B74.
- Moghadam M, Ashayeri H, Salavati M, et al. Reliability center of pressure measures of postural stability in healthy older adults: effects of postural task difficulty and cognitive load. *Gait Posture.* 2011;33(4):651-5.
- Nevitt MC, Cummings SR. Type of fall and risk of hip and wrist fractures: the study of osteoporotic fractures research group. *J Am Geriatr Soc.* 1993;41(11):1226-34.
- Schrager MA, Kelly VE, Price R, et al. The effects on medio-lateral stability during normal and narrow base walking. *Gait Posture.* 2008;28(3):466-71.
- Smith LK, Lelas JL, Kerrigan DC. Gender differences in pelvic motions and center of mass displacement during walking: stereotypes quantified. *J Womens Health Gen Based Med.* 2002;11(5):453-8.
- Tinetti ME, Speechley M, Ginter SF. Risk factors for falls among elderly persons living in community. *N Engl J Med.* 1998;319(26):1071-7.
- Wang Y, Watanabe K. The relationship between obstacle height and center of pressure velocity during obstacle crossing. *Gait Posture.* 2007;27(1):172-5.

