

前足部関節可動域と足圧分布を用いたバランス機能評価

Evaluation of Balance Function using the Forefoot Joint Range of Motion and
Foot Pressure Distribution

○ 三田隆広(東京電機大学) 山下和彦(東京医療保健大学) 小山裕徳 川澄正史(東京電機大学)

Takahiro MITA, Tokyo Denki University
Kazuhiko YAMASHITA, Tokyo Healthcare University
Hironori KOYAMA and Masashi KAWASUMI, Tokyo Denki University

Abstract: Especially, the movement of a dynamic MP joint (Metatarso-Phalangeal Joint) is important to discuss the elderly walking. The purpose of the study is to develop the device and the system that can easily detect the movement of a dynamic MP joint while walking. To measure the movement of the MP joint, an angle sensor that detects the angle and converts it to voltage is used in the developed system. The field test was performed to 4 healthy youngs and 5 elderlies. It was possible to measure the angle by using the device and the developed system in the measurements of all subjects. In the results, we obtained the feature of elderly walking from the angle. Consequently, the device and the system are considered to be a compact and easy measurement system to discuss the movement of a dynamic MP joint while walking.

Key Words: MP Joint, Elderly Walking, Angle Sensor

1. はじめに

高齢者の転倒には前足部の機能が密接に関係すると考えられる⁽¹⁾。転倒は歩行などの移動中に発生することから、歩行の立脚後期の前足部の蹴りだしなど、歩行周期を通じた前足部の動的動作がおよぼす姿勢制御能への影響に着目することが求められる^(2,3)。運動学的観点から高齢者の転倒に関連する姿勢制御能を検討するには、足底部が地面に接地した上で力を発揮する Closed kinetic chain (CKC: 閉鎖運動連鎖)に着目することが適切であると考えた⁽⁴⁾。CKCの観点からは、運動の起点となる足底部が地面に接地した状態において、地面への力の伝達、すなわち動力源となるのは、足趾部、前足部、足底部である。そして、足趾部が背屈する際に発生する windlass 機構や足底部の筋骨格系の機能が静止立位、あるいは歩行のダイナミクスに直接的に影響をおよぼすと推察される。

歩行のメカニズムと足底部の解剖学的見地からは、歩行の推進力を得るための蹴りだし時は、第1中足骨と足拇趾が最後まで地面に接地することで CKC の力の伝達を進めると考えられる。このとき、注目すべき重要な要素として、前足部関節(以下、MP 関節)が大きく背屈すると足底腱膜、足部内在筋を緊張させ、内側縦アーチを強固にし、歩行時の推進力を発生させることが挙げられる⁽⁵⁾。そして地面に接地していない遊脚中期においても MP 関節は背屈しており、MP 関節は踵接地に備え、背屈角度を増大させることで運動連鎖が効率的に進められる。そのため、MP 関節の可動域に制限があると歩行能力に影響を与えつまずきなどが発生することが考えられる⁽⁶⁾。

厚生労働省の報告によると高齢者における転倒事故の要因として「スリップ・つまずきおよびよろめきによる同一平面上での転倒」が事故原因の半数以上を占めている⁽⁶⁾。また、関節リウマチ患者などでは、MP 関節の可動域に制限があることで歩行速度、歩幅などが減少し、歩行能力が低下すると報告されている⁽⁷⁻⁹⁾。

以上のように、CKCの観点から高齢者の歩行機能を詳細に分析するために、MP 関節の可動域に着目することは重要であり、簡便かつ定量的に計測を行うことが重要である。

現在の MP 関節の計測方法としてスタティックな観点か

ら、角度計を用いた関節可動域計測が挙げられる。ダイナミックの観点から、歩行中の MP 関節の可動域計測として、3次元モーションキャプチャや X 線動画撮影が挙げられる。3次元モーションキャプチャは足の複数の骨特徴点上にマーカを設置し、その位置関係を複数台のカメラから計測するものである⁽¹⁰⁾。X 線動画は軟部組織の影響を受けずに構造変化を計測できるため高い信頼性をもつとされる。しかし、これらの方法は専用の設備や大きなスペースを必要とし、X 線動画においては被ばくなど大きな問題が存在する。

地域在住の高齢者の歩行機能を詳細に計測するためには、大規模な計測システムではなく、簡便に地域で活用できる MP 関節可動域計測システムが求められる。そこで本研究では、静的、および動的な MP 関節可動域を計測する装置を開発することを目的とした。さらに、本計測器を用いた MP 関節可動域計測が高齢者の歩行におよぼす影響を検討し、足底部の筋骨格系の特徴量と比較することで、解剖学的特徴量と歩行中の MP 関節の可動特性との関係を明らかにすることを試みた。

2. 方法

2-1 装置と計測システムの開発

開発した MP 関節可動域計測システムにおいて、MP 関節の角度検出にはポテンションメータ方式の回転角度検出センサ(ALPS 社製 RDC50 シリーズ)を使用した。使用したセンサを Fig.1 に示す。センサの最大検出範囲は $\pm 160^\circ$ であり回転角度によって抵抗値が変化する。センサの出力値はマイコン基板である Arduino を用いて PC 上に読み込んだ。また、無拘束での計測を可能にするためマイコン基板から Bluetooth の無線通信(最大 25m)を行えるようにした。

装置は足部の踵骨側面、第1中足骨頭側面、拇趾基部側面の3点を基点とし、第1中足骨頭側面にセンサが固定できるよう設計した。踵骨側面から第1中足骨頭側面を固定軸、拇趾部を可動軸として MP 関節の背屈、底屈運動を計測可能である。Fig.2 に足部に装置を取り付けた様子を示した。

センサから得られたデータを取得・出力するシステムを Microsoft Visual Basic2010 にて開発した。通信ポートの設定、

センサの出力値をリアルタイムにテキストデータ、グラフで表示するように構成した。ボタン操作のみで計測データをCSVファイルで保存できるよう設計した。計測に必要なPC、装置のみで計測が行えるため容易かつ場所にとらわれずに計測が可能である。開発した計測システムの構成画面をFig.3に示す。

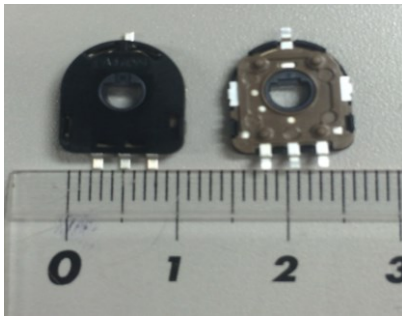


Fig.1 Angle Sensor

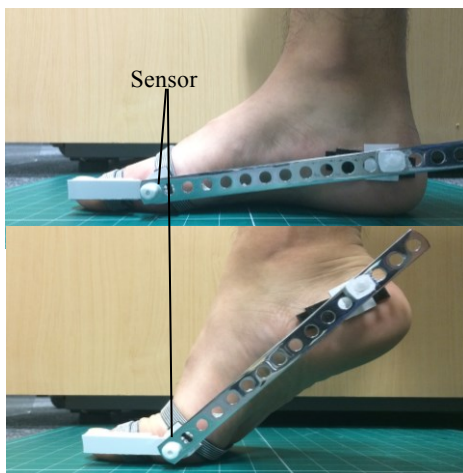


Fig.2 Placement of angle sensor

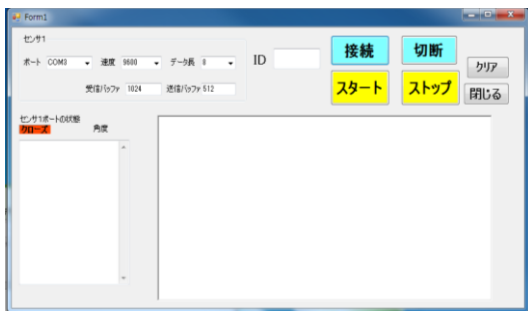


Fig.3 Screen of receiving system

2-2 精度検証

使用するセンサの妥当性および再現性を検証するため実験を行った。角度計にセンサを取り付け0°から90°間を10°刻みに各10回ずつ試行した際のセンサ出力値を読み取り、検証を行った。角度計は実際の医療現場で関節可動域の評価に用いられているものを使用した。

角度計の測定値とセンサ出力値との相関を求め、センサ出力値から回帰式を用いて角度(以下、センサ角度値)に変換した。また、計測誤差(センサ角度値-角度計値の絶対値)を求めセンサの妥当性を検討した。再現性については各試行間のセンサ角度値について級内相関係数(以下、ICC)を用いて検討した。

2-3 開発したMP関節可動域計測システムを用いた歩行機能実験

2-3-1 対象者

本研究で開発した装置で歩行時のMP関節可動域の計測実験、および歩行時のMP関節可動域の特徴を検証するためフィールド実験を行った。対象者は自立歩行に障がない若年健常者4名(22.0±1.4歳)と健常高齢者5名(72.4±3.4歳)とした。

本実験では開発した計測装置を右足部に取り付け、素足で10m自由歩行をさせた。データ取得のサンプリング周波数は100Hzとした。また、足底部の筋骨格系の特徴量と歩行中のMP関節の動作特性との関係を検討するため足圧分布計を用いて静止立位中の足底圧を計測した。

対象者には計測前に、研究の内容について十分な説明を行うとともに、体調状況の把握に努めた上で、個人からの同意を得た後に実施した。

3.結果

3-1 MP関節可動域計測システムの精度検証結果

実験結果をFig.4に示す。Fig.4には各角度10試行の平均値および標準偏差を記載した。その結果、角度計の測定値とセンサ出力値との相関係数はそれぞれ0.99(p<0.05)であり、高い正の相関が認められた。また、計測誤差は最大で2.9°であった。再現性の検討におけるICCの検定の結果は0.99であった。

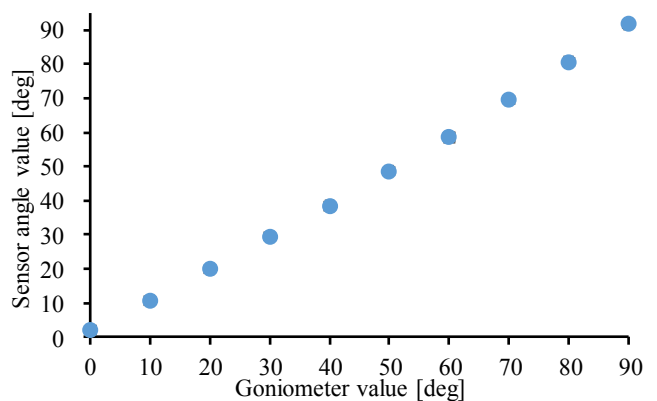


Fig.4 Accuracy test of angle sensor

3-2 フィールドテストにおけるMP関節の角度計測結果

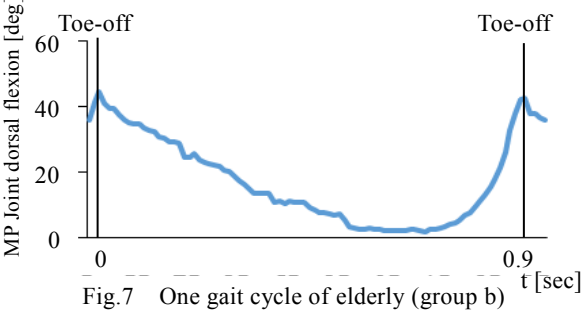
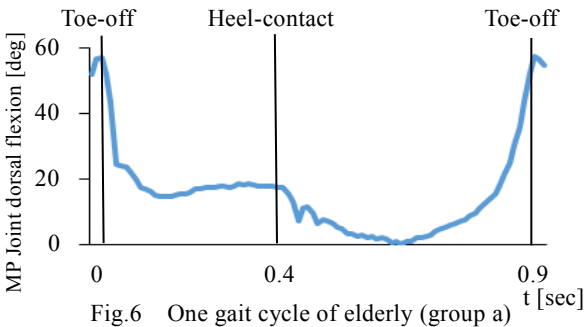
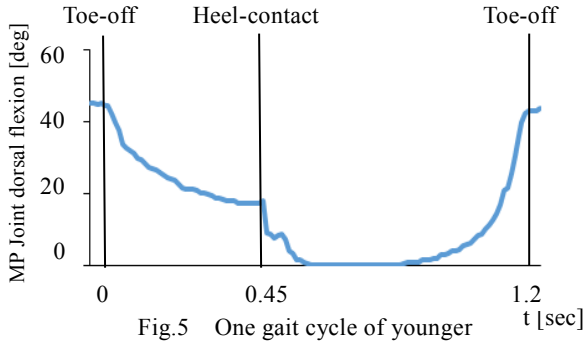
立脚期における前足部運動の角度は踵接地時(Heel contact)の足関節背屈時でMP関節は約25°背屈しており、足底全体が接地するFoot flat時にはMP関節は0°になる。その後、踵離床が進行するにつれMP関節の背屈は増大し、つま先離床(toe off)時には約55°の背屈位となると報告されている⁹⁾。この歩行メカニズムを基準にセンサから得られた角度から歩行時の踵接地、つま先離床を判別した。

Fig.5-7に若年健常者と健常高齢者a群およびb群の1歩行周期の1例を示す。健常高齢者のa、b群とは、歩行のメカニズムにおける踵接地時のMP関節背屈角度の変化がみられた高齢者群3名をa群、判別が困難であった2名をb群と定義した。

若年健常者の平均MP関節背屈角度は踵接地時(Heel contact)において20.5±3.5°、つま先離床時(Toe off)で48.8±4.6°であった。Foot flat時には、全員が0°であり、踵離床が進行するにしたがい、MP関節角度が背屈する様子が観察できた。

Fig.6のように、高齢者では5名中3名は踵接地時のMP

関節背屈角度の変化がみられたが、Fig.7のように2名は踵接地の判別が困難であった。そのため、歩行に対するMP関節の寄与が異なると考え、高齢者群を2群に分けて検討した。MP関節の背屈角度から踵接地が確認できた高齢者a群の踵接地時の平均MP関節背屈角度は $19.1 \pm 1.8^\circ$ 、つま先離床時は $50.3 \pm 0.9^\circ$ であった。高齢者b群は踵接地が十分に確認できなかったが、つま先離床は確認でき、高齢者a、b群含めたつま先離床時の平均MP関節背屈角度は $48.3 \pm 2.8^\circ$ であった。



3-3 足圧分布計測結果

歩行中のMP関節角度には、対象者の足底部の筋骨格系の特徴が関係すると考え、足圧分布データから最大荷重点位置および足底部の荷重の様子を観察した。

若年健常者および高齢者a群、b群の足圧データの1例をFig.8に示す。Fig.8の足圧分布結果は、色が濃くなるにしたがい足底圧が高いことを意味し、”M”のマークは最大荷重点を示している。

結果より、若年健常者4名は踵部に最大荷重点がみられた。足底圧からは、3名正常と判断でき、1名に扁平足が確認された。

高齢者a群のうち2名は踵部、1名は足第5趾中足骨骨頭部(足第5指の付け根部)に最大荷重点がみられた。Fig.8のように、高齢者b群は2名ともに足第2,3趾中足骨骨頭部に最大荷重点がみられた。足底圧について、高齢者b群1名に中足部が地面に接地しづらいハイアーチの傾向がみられた。

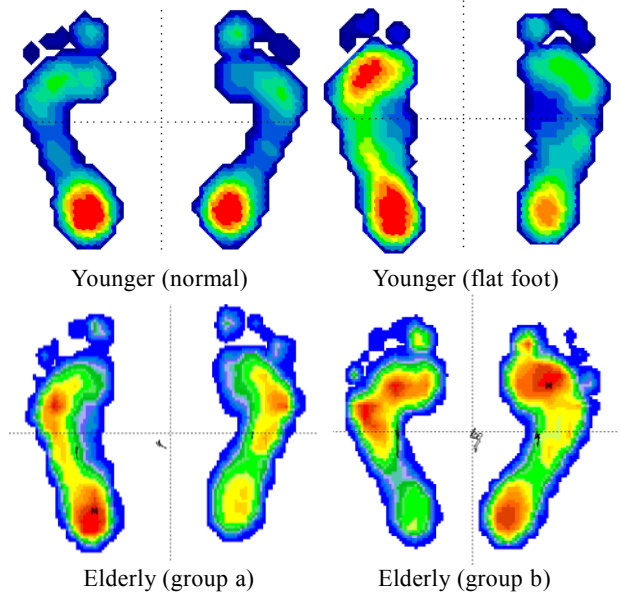


Fig.8 Foot pressure distribution data of elderly

4. 考察

4-1 MP関節可動域計測システムの精度検証の考察

臨床現場における角度計を用いた関節可動域の許容測定誤差は 10° 以内とするものが多い⁽¹¹⁾。使用したセンサから得られた角度は最大誤差 2.9° であり、各平均測定誤差も許容範囲内であることからセンサの妥当性が確認された。また、再現性についてもICCの検定から妥当性が認められた。以上のことから、このセンサは角度計として用いることが可能であると判断できた。

4-2 フィールドテストにおけるMP関節の角度計測の考察

MP関節の可動特性には前脛骨筋、長母指伸筋、長指伸筋、足底腱膜などの足部の筋群と前足部横アーチや内足縦アーチなどの足部のアーチ構造が密接に関与していることがわかっている^(12,13)。そのため、本研究ではMP関節の可動域特性と足底圧の分布を計測し、比較を行った。

Fig.5, 6より歩行時のつま先離床時から踵接地までの遊脚期間(時間軸の0~0.4秒付近)において先行研究⁽⁹⁾と同様にMP関節の背屈が確認された。この特徴は高齢者b群2名を除いた、若年健常者と高齢者a群の7名で確認できた。通常の歩行のメカニズムやCKCの理論において、踵接地時にはつま先が挙上する、すなわち、MP関節が大きく背屈することで、足底部の内側縦アーチ(土踏まず)が大きくなり、踵接地の大きな衝撃を吸収するショックアブソーバの役割を果たすことが考えられる。そのため、Fig.5, 6では踵接地の直前はMP関節の背屈角度が約 20° で接地し、Windlass機構の役割を果たしていることが推測された。またToe off時は足趾部に床面から他動的な外力が加わるため、MP関節の背屈角度が大きくなるが、踵接地時にはパッシブな状態であるため、約 20° の背屈角度は妥当であると判断できる。

Fig.7ではつま先離床から遊脚期において、MP関節の背屈が緩やかに減少し踵接地までに約 20° の背屈角度の維持がみられなかった。このことから歩行時におけるMP関節の可動特性は踵接地までに背屈角度の維持がみられる歩行と背屈角度の維持がみられないb群のような歩行に分類が可能だと考えられ、前者は若年健常者の歩行に近いと考えられる。

背屈の維持がみられない高齢者b群2名の足圧分布データに着目すると静止立位時において、足第2,3趾の付け根

である前足部に荷重が確認された。足底部の解剖学的特徴から、足底部の荷重は踵部、母指球、小指球のいずれかにみられるのが一般的である⁽¹³⁾。前足部に荷重がみられる場合、前足部横アーチが低下していると推測できる。前足部横アーチの低下は前足部を扁平化させ、開帳足、外反母趾や内反小趾など足部変形の原因になる。前足部横アーチの機能の1つとして、緩やかなアーチ構造が存在することで足趾の可動域が確保され、歩行の蹴りだしが安定することが考えられる。このことから高齢者b群2名において背屈角度の維持がみられないのはMP関節可動特性に制限が発生しているためだと推察された。

計測した対象者のうち扁平足であった若年健常者1名(Fig.8)のMP関節可動域に着目すると遊脚期間の背屈の維持はみられたがつま先離床時の背屈および踵接地時の背屈が他の若年健常者と比較し、約 10° 程小さかった。扁平足であると内足縦アーチを構成している足底腱膜および足部内在筋が弛緩し、歩行の推進力を生むWindlass機構⁽¹⁴⁾が正常に作用しないことが考えられる。このことからMP関節の背屈が減少していたと考えられる。

今回実施した実験から歩行時のMP関節可動域で若年健常者の歩行の特徴と高齢者の歩行の特徴を確認できた。若年健常者では遊脚期間もMP関節の背屈角度を維持している。しかし、一部の高齢者ではMP関節の背屈角度の維持はみられなかった。また、前足部横アーチの低下や扁平足化している場合にはMP関節の背屈角度が減少する傾向がみられた。このことからMP関節可動域を計測することで2つの歩行の推定と前足部横アーチや内側縦アーチなど足部アーチの機能評価が行える可能性があると考えた。

そして転倒リスクを推測するうえで歩行時のToe clearanceを評価することは重要である^(15,16)。Toe clearanceは遊脚期のつま先と床面との距離を指し、Toe clearanceを確保させることで転倒の要因のひとつであるつまずき⁽⁶⁾のリスクを減少させることができる。つま先の挙上すなわちMP関節の背屈はつまずきの回避につながると考えられる。

実際に今回の実験から若年健常者と比較して高齢者のうち2名の遊脚期間にMP関節の背屈角度の維持がみられない傾向があった。このことからMP関節の背屈角度の評価をつまずきおよび転倒のリスク推定に加えることが有効である可能性が示された。

以上のことから、本研究で開発を行ったMP関節可動域計測装置はすべての対象者において歩行時のMP関節可動域の計測が可能であり、足底部の筋骨格系の特徴と歩行時のMP関節可動域を利用した足部アーチ構造の推定、高齢者のMP関節可動域の計測でつまずき、転倒リスクの推定に利用できる可能性が推察された。

5. おわりに

本研究では新しく歩行のメカニズムに基づいて静止立位中、歩行中のMP関節の関節角度を計測できる装置を開発した。さらに、本システムを用いて高齢者を含めた歩行時におけるMP関節可動特性を計測し、足底部の特徴と比較を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 本計測装置で歩行時のMP関節可動域の計測が可能であり、歩行計測の結果から先行研究と同様のMP関節の背屈動作がみられた。
- 2) 前足部横アーチの低下や扁平足など足部変形のある対象者のMP関節の背屈は小さい傾向にあるためMP関節の可動域から足部形状、アーチ構造の推定ができる可能性がある。

- 3) MP関節の可動特性は遊脚期間において背屈角度の維持がみられる歩行とみられない歩行の2つに推定が可能であることがわかった。これによりつまずきおよび転倒リスクの推定に応用できる可能性が考えられた。

以上のことから、本計測装置で歩行時のMP関節の可動特性の定量評価が可能であり、今後、つまずきおよび転倒リスクの推定に応用できる可能性が示された。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26282166, 24500658 により行われた。

参考文献

- (1) K.J.Mickle, B.J.Munro, Toe weakness and deformity increase the risk of falls in older people, *Clinical Biomechanics*, Vol.24, pp.787-791, 2009
- (2) H.B.Menz, S.R.Lord, Gait instability in older people with hallux valgus, *Foot Ankle Int*, Vol.26, pp.283-489, 2005.
- (3) J.Zhang, S.Ying, The effects of restricting the flexion-extension motion of the first metatarsophalangeal joint on human walking gait, *Bio-Medical Materials and Engineering*, Vol.24, pp.2577-2584, 2014.
- (4) 加辺憲人, 黒澤和生, 足趾が動的姿勢制御に果たす役割に関する研究, *理学療法科学*, Vol.17, pp. 199-204, 2002.
- (5) 河原勝博, 帖佐悦男, *臨床スポーツ医学*, 文光堂, vol. 31, pp. 623-627, 2014.
- (6) 厚生労働省, 平成21年度「不慮の事故死亡統計」の概況, available from <<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyuu/furyo10/01.html>> (accessed 2015-6-26).
- (7) D.Laroche, T.Pozzo, Effects of loss of metatarsophalangeal joint mobility on gait in rheumatoid arthritis patients, *Rheumatology*, vol.45, pp.435-440, 2006.
- (8) D.Laroche, P.Ornetti, Kinematic adaptation of locomotor pattern in rheumatoid arthritis patients with forefoot impairment, *Exp Brain Res*, vol.176, pp.85-97, 2007.
- (9) F.moller, L.amoreu, Significance of free dorsiflexion of the toes in walking, *Acta orthop. Scand*, vol.50, pp.471-479, 1979.
- (10) A.Leardini, M.G.Benedetti, Rear-foot, mid-foot and fore-foot motion during the stance phase of gait, *Gait & Posture*, vol.25, pp.453-462, 2007.
- (11) 宮前珠子, 小川恵子, 関節可動テストの信頼性, *理・作・療法*, vol.12, pp.139-144, 1978.
- (12) 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩, *基礎運動学*, 第6版, 東京, 医歯薬出版, pp.260-271, 2003.
- (13) Kapandji I.A, *カパンディ 関節の生理学 II*. 下肢 原著第5版, 東京, 医歯薬出版, pp. 220-228, 1988.
- (14) 竹内義亭, 田口大輔, *カラー写真で学ぶ 骨・関節の機能解剖*, 東京, 医歯薬出版, pp. 148-149, 2009.
- (15) 中條友, 大竹喜子, 渡邊雅子・他, 異なる段差でのToe clearanceの定量的解析, *理学療法科学*, Vol.19, pp. 101-106, 2004.
- (16) 相馬正之, 島村亮太, 他, 地域高齢者の障害物を跨ぐ際における足尖・障害物間距離と転倒経験の有無と主観的つまずき易さの関係について, *理学療法科学*, Vol.24, pp. 703-707, 2009.