

学 位 論 文 題 名

A Rehabilitation Engineering Study of Somatosensory Contribution to Standing Balance with Aging

(加齢に伴う立位バランスへの体性感覚の寄与に関するリハビリテーション工学研究)

学位論文内容の要旨

高齢者人口の増加に伴い、高齢者の健康管理の必要性が叫ばれてきており、その中でも転倒による外傷や骨折は深刻な問題になっている。アメリカ合衆国では22万件の股関節周囲骨折のうち65歳以上の老人の占める率は84%であり、骨折治療にかかる国の支出は1987年で16億ドルであったのが、2040年には60億ドルになると予想されている。わが国でも65歳以上の転倒による骨折は若年者の実に3.7倍、65歳以上の骨折による入院期間は64.4日となり国の財政負担にも影響を及ぼしている。

転倒に関する危険因子を評価・分析することにより、高齢者の将来の転倒を予想し、未然に転倒を防ぐことはリハビリテーション工学として重要な課題である。老人の転倒の原因は多種多様であるが、その危険因子の代表的なものとして、筋力低下、バランス能力の低下、歩行異常、反応時間の遅延、そして環境的条件（氷上でのスリップ、階段の踏み外し等）が含まれる。特に加齢に伴う姿勢反射およびバランス能力の低下・障害は日常生活動作における転倒の大きな因子となっている。

そのため、ヒトのバランスを運動学、バイオメカニクスそして生理学の観点から解析し転倒を少しでも防ぐための研究が必要となる。ヒトの種々の運動および日常生活におけるバランスのとり方には大別して2つの方法が考えられる。1つは坐位や直立位の様な比較的固定した姿勢を、ある一定期間持続する場合に行われる様式である静的バランス能力。もう1つは身体の、特に足底部における支持基底面が狭く、不安定な場合に身体の重心を保持し復元する必要がある時に行われる様式の動的バランス能力である。両様式とも、バランスに影響するのは足底部（支持基底面）およびその足底との接触する面から得られる空間における身体の位置、またはその位置の変位についての体性感覚からの継続的な情報を必要とする。

ヒトは滑りやすい路面、絨毯および動く列車のなかで転倒せずに立位姿勢を維持するために、随意的にも無意識にも、床との接触部分である足趾からの体性感覚情報およびその筋活動は必要不可欠な要素である。このように足趾と接触面との感覚（ずれ覚）情報がバランス能力を高める。ヒトは視界の効かない状況でもコップなどをすべって落とすことなく把持できる。これは広義の意味での触覚が、物体を把持した時に皮膚に生ずるわずかな「ずれ」の大きさと方向を検出する機能を備えているためである。これと同様に、足趾においても接触面とのずれ感覚から関節の位置の変化を感知しバランス維持機能を高めていると想像される。50歳代以上の健常人における感覚機能（深部感覚）の低下が報告されていることから、ずれ感覚の評価は老人のバランスを分析するうえで、重要な要素である。多数の研究者が加齢の姿勢バランスに関する影響について述べているが、足趾の感覚情報をもたらすバランス能力に関する研究は国内外含めわずかに数件認められるだけで、定量的に感覚を評価し、バランス訓練に臨床応用しているものはきわめて少ないのが現状である。

本研究課題は、（1）足趾の触圧覚（ズレ覚）を新しく足趾用に開発した感覚計測機器で計測分

析し、(2)姿勢動揺と、足趾からの体性感覚情報およびその筋活動との関係を明らかにし、(3)健康高齢者およびその他のバランスに障害のある中枢神経疾患者に対する臨床応用としてのバランス訓練に関するリハビリテーション工学的考察を加えることを目的とした。

本論文の構成は、第1章で、本研究の社会的背景、研究の必要性、目的について述べた。

第2章では、開発した感覚計測機器を用い足趾感覚を若年者と高齢者で比較検討し、併せて重心動揺と、足趾の体性感覚および足趾圧との関係について述べた。本実験では足関節からの情報攪乱は可能な限り避け、足底面からの感覚情報を低下させたところ、視覚と足底感覚情報ともに遮断、低下させた条件とほぼ同じ重心動揺を示したことから、足趾、足底面のバランスへの影響の重要性が窺えた。本研究での足趾感覚計測により、臨床における神経学的検査に比べより若年者と老年者の相違を明らかにし、老年者の閾値は若年者の数倍から十数倍という結果を得た。以上より、老年者の姿勢維持には足趾、足底感覚からの情報が重要であり、運動面からのバランス訓練に加え、積極的、かつ適切な感覚回復訓練の必要性が示唆された。

第3章では、若年者と高齢者の直立位での静的バランス維持の基本要素である支持基底面の特性について述べ、重心動揺と足趾圧との関係を分析検討した。結果として、腰部、足底圧中心の移動距離の分析より、老年者群においては後方への動的バランスに難を呈した。また、老年者群は、頭部の移動により重心移動を試みる傾向を示した。老年者の支持基底面は、若年者のごとく足底面を外周とした基底面ではなく、前方へ偏り足底面外周よりも前後左右とも狭い傾向となった。足底圧分析結果より、老年者群は若年者群に比べ、特に後方および側方に関して前足部での支持が少なく後足部（踵部）での支持がより強い傾向を示した。これより、老年者のバランス訓練においては腰部の重心移動ばかりでなく頭部の変位に注意し、前足部での支持性および後方への安定性に着目した訓練の重要性が示唆された。これらの結果を踏まえて第4、5章では臨床応用に着目した。

第4章では、片足立ち位での動的バランス維持における重心動揺と、足趾の体性感覚および足趾圧との関係について述べ、さらに、足趾の体性感覚を攪乱したときの重心動揺と足趾圧分析との関係についても分析検討を加えた。外乱刺激としての床面移動を比較的低い周波数で起こした場合、矢状面における定性的動作分析において前後方向の動的姿勢保持は足関節を中心とした ankle strategy を用いる傾向が認められた。本研究はさらに平行機能検査の1つである高度なバランス維持検査としての片足立ち位を用いることにより、より負荷をかけて検査した結果から足趾の重要性を明らかにした。この動的姿勢保持においての体性感覚情報の重要性から、本研究では足趾の感覚と足趾圧を計測することにより感覚運動の両面からその機能を分析し、静的のみではなく動的立位バランスに着目し、足趾の姿勢保持におよぼす重要性を指摘した。

第5章では、脳卒中片麻痺患者の足趾感覚と重心動揺の回復過程の相関について検討し、感覚再教育訓練の重要性を提言した。本研究では開発した感覚計測機器を用いることにより、臨床上的の神経学的検査では確認できない回復過程段階を明らかにすることがした。

第6章では、本研究の結論および今後の課題について述べた。さらに、感覚フィードバックを利用したバランス訓練機器について触れ、リハビリテーション工学的観点からその臨床応用に関して言及した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 福 部 達

副 査 教 授 山 本 克 之

副 査 教 授 下 澤 楯 夫

副 査 教 授 河 原 剛 一

学 位 論 文 題 名

A Rehabilitation Engineering Study of Somatosensory Contribution to Standing Balance with Aging

(加齢に伴う立位バランスへの体性感覚の寄与に関するリハビリテーション工学研究)

近年、高齢者人口の増加に伴い、高齢者の健康管理の必要性が叫ばれてきており、その中でも転倒による外傷や骨折は深刻な問題になっている。アメリカ合衆国では22万件の股関節周囲骨折のうち65歳以上の老人の占める率は84%であり、わが国でも65歳以上の転倒による骨折は若年者の実に3.7倍である。また、65歳以上の骨折による入院期間は64.4日となり国の財政負担にも影響を及ぼしている。転倒に関する危険因子を評価・分析することにより、高齢者の転倒を予想し、未然に転倒を防ぐことはリハビリテーション工学として重要な課題である。老人の転倒の危険因子の代表的なものとして、加齢に伴うバランス能力の低下・障害があり、これは日常生活動作にも多大な支障を来す。

ヒトは滑りやすい路面、絨毯および動く列車のなかで転倒せずに立位姿勢を維持するために、随意的にも無意識にも、床との接触部分である足趾からの体性感覚情報を有効に活かし、筋活動を巧みに制御している。特に、足趾と接触面との触圧覚情報が身体認知ひいてはバランス能力を高める。50歳代以上の健康人における体性感覚機能の低下が報告されていることから、触覚の評価は老人のバランス機能を分析するうえで、重要な課題である。多数の研究者が加齢の姿勢バランスに関する影響について述べているが、足趾の感覚情報がもたらすバランス能力に関する研究は国内外含めわずかに数件認められるだけで、定量的に感覚を評価し、バランス訓練に臨床応用しているものはきわめて少ないのが現状である。

本研究課題は、まず、足趾の触圧覚を新しく足趾用に開発した感覚計測機器で計測分析し、姿勢動揺と、足趾からの体性感覚情報およびその筋活動との関係を明らかにした。その上で、健康高齢者およびその他のバランスに障害のある中枢神経疾患患者に対する臨床応用としてリハビリテーション工学的考察に基づき、感覚フィードバック型バランス訓練機器を提案している。

主な結果は以下に要約される。

第1章では、本研究の社会的背景、研究の必要性、目的について述べている。

第2章では、開発した感覚計測機器を用い足趾感覚を若年者と高齢者で比較検討し、臨床における神経学的感覚検査に比べより定量的データに基づき若年者に比べ高齢者の足趾感覚の低下を明らかにしている。また、静的立位バランス能力、足趾の体性感覚および足趾圧との関係について述べている。特に、高齢者においては足底面からの感覚情報を低下攪乱させたところ、若年者に比べ有意に重心動揺が大となることから、足趾、足底面の静的バランスへの影響の重要性を示唆している。以上より、高齢者の姿勢維持には足趾、足底感覚からの情報が重要であり、運動面からのバランス訓練に加え、積極的、かつ適切な感覚回復訓練の必要性を提言している。

第3章では、前章で行った高齢者の静的立位バランス能力の検討に加え、若年者と高齢者の直立位での動的バランス維持の基本要素である支持基底面の特性について述べ、重心動揺と足趾圧との関係を分析検討している。結果として、高齢者の動的バランス保持は若年者に比べ、後方への動的バランスに難を呈し、頭部移動による重心移動を試みる傾向について述べ、高齢者のバランス保持領域および足趾機能の特性について明かにしている。

第4章では、第2、3章の結果を踏まえ、より高次での動的バランス維持、具体的には片足立ち位での足底面外乱刺激時のバランス能力と、足趾の体性感覚および足趾圧との関係について述べ、より臨床応用に関し論じている。さらに、足趾の体性感覚を攪乱した条件での重心動揺と足趾機能の関係についても分析を加え、高度なバランス維持における足趾機能の重要性を示唆している。

第5章では、脳卒中片麻痺患者の足趾感覚と立位バランスの回復過程について述べ、本研究では開発した感覚計測機器を用いることにより、臨床上の神経学的感覚検査では確認が困難である回復過程段階を明かにしている。これより通常、中枢神経疾患に対する臨床で実施されるバランス主体の運動面からの治療に加え、著者は感覚再教育訓練の重要性を推察している。

第6章では、本研究の成果を統括し、今後の展望について触れている。

本研究の結果から、リハビリテーション治療における体性感覚の定量的評価の必要性および加齢に伴うバランス能力維持回復のための感覚訓練の重要性が示され、感覚フィードバックを利用したバランス訓練機器の臨床応用への有効性が予想される。

以上のように、本研究では、加齢に伴う体性感覚の定量的評価および感覚再教育訓練の重要性を示し、かつ、リハビリテーション工学的観点から感覚フィードバック型バランス訓練機器を提案しており、生体工学に貢献するところが大きい。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。