

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04502

研究課題名(和文) 転倒リスク評価のためのヒト立位安定性と歩行安定性の定量評価

研究課題名(英文) Evaluation of human stand and walking stability for the risk estimation of falling

研究代表者

山本 元司 (Yamamoto, Motoji)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：90202390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では転倒リスク評価のため、力学外乱による姿勢変動から転倒せず回復する能力の基礎となる、ヒト姿勢安定化性能に対する評価手法を確立した。これは下肢への力学外乱印加時の姿勢応答入出力データに基づいて、入出力伝達関数を線形同定することで実験的に求め、この伝達関数の安定性を表す極を数値的に評価することで、信頼性の高い姿勢安定性指標を得るものである。さらに本研究では、姿勢変動時の筋活動測定により、姿勢を安定化する戦略は被験者により異なり、これにより安定化に寄与する主要筋も異なる場合があること、姿勢安定性定量評価値と姿勢安定化に寄与する主要筋の筋活動とは密接な関係があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで転倒リスク評価に関しては、信頼できる定量評価手法が確立していなかった。本研究での力学外乱応答を用いた数理モデルに基づく手法では、同じ被験者では何度測定してもほぼ同じ評価値を得ることができ、実験条件の違いや被験者による差異も明確となることから、信頼性の高い定量評価手法となっている。また姿勢回復時における筋活動評価により、転倒回避戦略は被験者により異なり、主に作動する筋骨格系も異なることを明らかにした。これらの成果により、転倒リスク低減のための転倒リスク評価と、これに基づく対応策を検討できるようになった。

研究成果の概要(英文)：For the fall risk assessment, the study have established an evaluation method for human posture stabilization performance. This is the basis of the ability to recover from posture fluctuations due to mechanical disturbance without falling. The method calculates a stability performance index based on an identified mathematical model, which is obtained by the postural response input / output data. The experimental device to get the input / output data is also proposed.

Furthermore, this study measures muscle activity during postural changes. Using the measured data, it is found that there is a close relationship between the quantitative evaluation value of postural stability and the muscle activity of the main muscles that contribute to postural stability.

研究分野：福祉工学

キーワード：立位姿勢安定性 転倒リスク評価 線形同定手法

1. 研究開始当初の背景と研究概要

高齢化社会において転倒による骨折とその後の QOL の低下が社会的に大きな問題となっている。転倒現象は歩行中の躓きや、滑りによる力学的な外乱や心理的な外乱などによりバランスを失い、歩行姿勢回復不能となった時に生じる。従って、転倒リスク低減のための主要な方法は姿勢回復能力を維持し向上させることである。

転倒リスクの低減のためには、まずは個人がどの程度の転倒リスクがあるかを正確に把握し、問題があれば転倒を防ぐために対応策を示すことが重要となる。従来、転倒リスクを評価する方法としては、転倒履歴調査や、日常生活動作(ADL)能力、運動機能度合(TUG スコア、GUG スコア、BBS など)による評価が行われていたが、転倒に至る本質的なメカニズムに基づく信頼性の高い定量評価手法とは程遠いものであった。また、これら従来の転倒リスク評価結果による転倒リスク低減のための具体策提案には、必ずしも結びつかないものであった。

そこで、本研究では転倒リスクを定量的に評価し、リスク低減の対応策を検討するため、特に重要と考えられる、ヒト姿勢制御性能を定量評価する手法を開発することを目的とし、また転倒のメカニズムに基づく考察により、その定量評価値により転倒リスクの主要因を明らかにすることとした。

2. 研究の目的

本研究では転倒リスクで重要となる転倒回避性能に大きく関与すると考えられる、力学的外力が印加される場合の姿勢回復制御性能を定量的に評価し、これに基づいて転倒リスクを低減するための姿勢安定化のメカニズムを考察する。

従来、姿勢安定性の評価手法に関連して、市販の重心動揺計(図1)を用いる方法では、転倒に関連する力学外乱を印加することができなかった。

そこで本研究では、転倒リスクに大きく関与する転倒回避能力と密接に関連する姿勢安定化性能を定量評価するため、力学外乱に対する姿勢変動を測定可能な望ましい実験手法を提案し、これを用いた姿勢安定性の定量評価手法を検討する。この研究ではさらにこの評価手法を基礎として、力学外乱からの姿勢安定化のシステムが発動される筋骨格系や安定化ダイナミクスから明らかにする。

ここで考えている力学的外乱によるヒトの姿勢応答は、筋骨格系と感覚神経系からなる安定化システムが総合的に発動した結果として、ヒト姿勢安定化システム全体の安定性を総合的に評価できるとこと、実験結果から同定した数理モデルに基づく信頼性の高い定量評価が実現できることが特徴となっている。

3. 研究の方法

3.1 ヒト姿勢安定性能の評価 力学的外乱印加による姿勢安定化性能を実験的に計測するため、これまで信頼できる定量評価手法が確立していなかったこと、市販の計測機器が存在していなかったため、適切な力学外乱を静止状態の下肢に印加する装置と、このときの外乱印加力とその

結果のヒト重心動揺を計測する装置を新たに開発した。図2に示すこのための装置は斜板落下



図1：臨床で用いられている姿勢安定性を評価するための重心動揺計



図2：下肢に力学外乱を印加して重心動揺応答を得るために開発した斜板落下式外乱印加装置

式外乱印加装置と呼んでおり、人が立位した斜板の落下時における下肢への力学外乱入力と同時に、斜板表面に設置した面圧測定シートによりヒトの姿勢を表す重心変動を測定できるものとなっている。重心変動測定は従来は力センサを内蔵したフォースプレート式が用いられてきたが、この斜板落下のような衝撃力を伴う場合は、力センサが破損するため、この方法は適用できなかった。しかしながら、ここで開発した測定装置では、静電容量式の圧力分布センサを使用しており、衝撃力の問題を解決できていることが特徴となっている。

これにより下肢に作用する衝撃的な力学外乱を入力として立位姿勢に印加し、そのときの立位姿勢揺動である COP (Center of Pressure) をシステムの時間応答出力として測定した。力学外乱を印加し、そのときの姿勢揺動を計測するこの実験手法は安定した力学外乱を印加できる特徴があり、また外乱入力を定量的に測定するため、このあとのシステム同定による評価手法とともに、入力の大きさや多少の変動に対して評価結果に影響しない手法となっている。

次にこの測定結果から、ヒト立位制御システムを線形システムとして、入出力データからその立位制御システムを同定し、同定された伝達関数の極に基づいて立位安定化能力を定量的に評

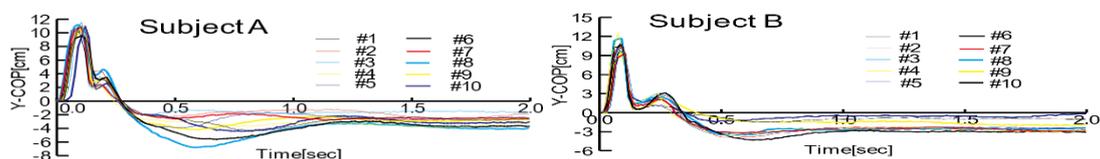


図 3：提案した斜板落下式府外乱印加装置により得られた姿勢変動応答。被験者が同じであれば何回実験してもほとんど同じ応答が得られるが、被験者が異なれば（図の A と B）被験者ごとの異なる応答が得られ、被験者ごとの姿勢安定化能力を信頼性高く検出できる方法であることがわかる。

価した。

この外乱印加実験によるヒト姿勢安定化の数理モデル化においては、図 3 に示すように同じ被験者であれば何度実験をおこなっても、外乱印加実験の COP 応答はほとんど同じ結果となり、特に 0.5 秒以内における応答は再現性が極めて高く、また、被験者が異なれば異なった応答を示すことから、この方法によりシステム同定して得られた姿勢安定化数理モデルは、被験者の本質的な姿勢安定化性能を表現するきわめて信頼性の高い方法であると言える。

離散時間系での伝達関数の極の原点からの距離は、半径 1 の円に近いほど定常状態への収束が遅くなり、また原点からの距離が 1 以上なら、不安定なシステムとなることがわかっている。このことを用いて、同定システムの伝達関数の極の位置から、立位安定性指標の計算手法を提案した。

これまでの先行研究では、このような入出力データ計測に基づきシステム同定による立位安定化ダイナミクスを評価する手法は例がなく、また提案したこの線形システム同定による手法は信頼性の高い評価手法となっている。ここで同定される伝達関数はヒト姿勢安定化ダイナミクスを反映したものとなっている。

3.2 筋活動評価による姿勢安定化メカニズムの解明

姿勢安定化に主として寄与する筋骨格系を明確化することは、転倒防止のための立位姿勢安定性向上の観点から重要であると考えられる。そこで、本研究では、立位安定化ダイナミクスの違いが生じる原因を下肢筋肉の筋活動の測定により明らかにし、立位安定化ダイナミクスのメカニズムを考察した。この結果、ヒトの転倒リスクを左右する姿勢安定化は個人により異なる筋骨格系発動戦略により実現されており、従ってこのことを考慮した総合的な定量化指標が必要であることがわかった。

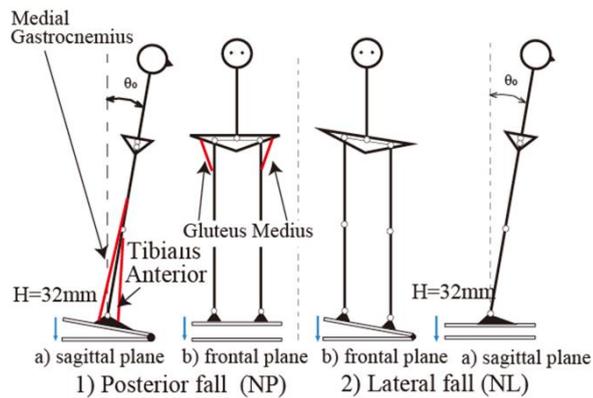


図4：姿勢安定化に寄与する筋骨格系を調べるための測定した下肢筋と外乱印加の方向（1は前後方向に落下，2は左右方向に落下して力学外乱を印加）

転倒防止のための姿勢安定化に主に寄与すると考えられる筋活動計測のため、重要と考えられる前後方向落下条件（Posterior fall）と左右方向落下条件（Lateral fall）（図4参照）による姿勢安定化性能と、このときの姿勢安定化メカニズムに関わる重要な筋として腓腹筋、前脛骨筋、中殿筋を選んで、姿勢安定化時の筋活動を計測した。

4. 研究成果

4.1 斜板落下式外乱印加装置によるヒト姿勢安定化性能評価実験結果

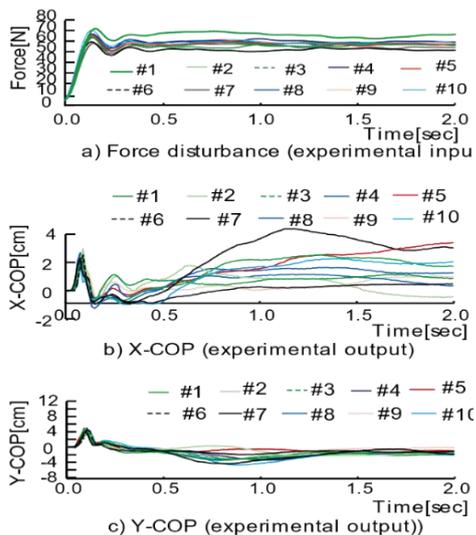


図5：入出力データの例。上から下肢への衝撃力入力，COP-X方向応答出力データ，COP-Y方向応答出力データ。

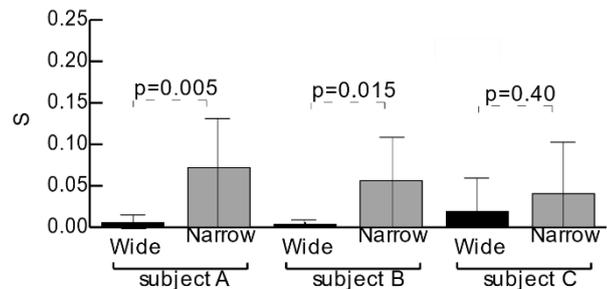


図6：安定化度合指標値を異なる足位置条件（広幅平行足，狭幅平行足）と異なる被験者A, B, Cで計算した結果。

提案した斜板落下式外乱印加装置により入力を落下時の下肢に加わる衝撃力，出力として姿勢を表す COP 軌跡としてシステム同定をおこない、ヒト姿勢安定化ダイナミクスの数理モデル（伝達関数）を獲得した。このときの入出力データの例

を図5に示す。このデータを用いて線形同定をおこない、伝達関数モデルを計算する。この伝達関数の極の平均的な値から安定化度合指標を計算した。ここでは特定の被験者に対して複数の足裏配置条件での安定化度合指標値を計算した結果の例を図6に示す。これらから、同じ被験者で、これまで安定性が高いことが知られていた広幅平行足が最も指標値が小さい(安定性が高い)こと、また不安定と知られていた狭幅平行足配置では明瞭に指標値が大きい(安定性が低い)ことが確認され、また提案手法によりこれまで定量評価が困難であったヒト姿勢安定化性能を明確に、かつ高い信頼性で定量評価できることがわかった。

4.2 姿勢安定化に寄与する筋活動

異なる実験条件での下肢筋の使われ方と姿勢安定性評価値を調べることで、安定化のメ

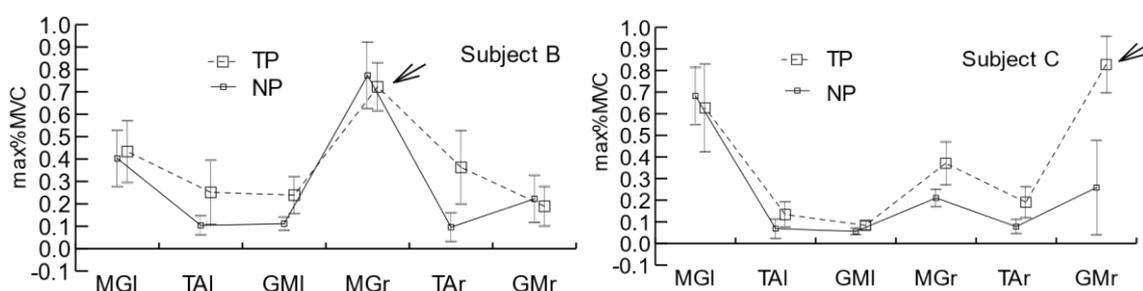


図7：2名の被験者（Subject B と Subject C）で通常足配置 NP とタンデム足配置 TP での外力印加応答実験における下肢筋の筋活動。被験者 B では腓腹筋 MGr が、被験者 C では中殿筋 GMr が顕著に活動していることがわかる。

カニズムを検討した（図7参照）。この結果、被験者ごとで実験条件の違いにより安定化に関与する下肢筋発動が異なることがわかった。このことは、同じ実験条件でも、姿勢安定化に寄与する筋骨格系は異なることを示しており、また被験者により、同じ実験条件でも姿勢安定化メカニズムが異なることを示している。これは同じ実験条件でも被験者により姿勢安定性の指標が異なることとも対応しており、本質的に姿勢安定化に寄与するダイナミクスが異なることがわかった。

4.3 まとめと今後の課題

本研究では、転倒リスク評価のために、信頼性が高く定量評価可能な姿勢安定化性能評価手法を確立した。しかしながら、この評価値は実験条件や、姿勢変動の状態によっては値が異なることもわかった。一方で、本研究実施者などにより既に、転倒時（転倒直前時）の状況により、また被験者により転倒を回避する戦略、すなわちこの筋骨格系を主に働かせるかが異なることが分かっている。従って、転倒に至る要因を整理して、その要因（転倒直前での種々の条件）ごとに、実験条件を設定したうえで力学刺激応答実験を実施し、これにより、被験者の転倒回避戦略を考慮した重みづけをおこなって、転倒リスク指標値を計算する必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 戸越勉, Pham Hoang Tung, 中島康貴, 山本元司	4. 巻 ONLINE
2. 論文標題 斜板落下式外乱印加によるヒト立位安定性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 ONLINE
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shanghai Jin, Xiaogang Xiong, Dejin Zhao, Changfu Jin and Motoji Yamamoto	4. 巻 9(9)
2. 論文標題 Long-Term Effects of a Soft Robotic Suit on Gait Characteristics in Healthy Elderly Persons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 applied science	6. 最初と最後の頁 1/13-13/13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9091957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsutomu Togoe, Pham Hoang Tung, Koki Honda, Yasutaka Nakashima, and Motoji Yamamoto	4. 巻 Vol. 33, No.4
2. 論文標題 Evaluation of Muscle Activity and Human Standing Stability Index Using the Swash Plate in a Disturbance Application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 868-876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 北村 孝寛, 中島 康貴, 生野 岳志, 山本 元司
2. 発表標題 バランスボール座位時の強制動作における腰部周辺の筋活動解析と認知試験評価
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジウム (計測自動制御学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田 功輝, 山本 元司, 木口 量夫
2. 発表標題 連続肘関節屈曲・伸展動作時の振動刺激による肘関節動作変更量制御に関する研究
3. 学会等名 ROBOMECH2020 ロボティクスメカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsutomu Togoe, Pham Hoang Tung, Yasutaka Nakashima, Motoji Yamamoto
2. 発表標題 Identification of human standing stabilizing dynamics by experiment of disturbance application using swash plate fall
3. 学会等名 The Twenty-Sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林太一, 中島康貴, 田原健二, 山本元司
2. 発表標題 両足支持での滑り転倒回避戦略における安定性指標の提案
3. 学会等名 第20回SICEシステムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島康貴, 松尾泰志, Pham Hoang Tung, 戸越勉, 山本元司
2. 発表標題 斜板落下式外乱印加によるヒト立位安定性評価
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------