

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04366

研究課題名(和文) 水平揺動によるバランス運動における感覚器および関節戦略の機能評価

研究課題名(英文) Evaluation of sensory weighting and joint strategy in balance control for horizontal sway of the support surface

研究代表者

園部 元康 (Sonobe, Motomichi)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：50455169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、感覚器や関節戦略の検査のために、支持面の一定周波数揺動における立位人体のバランス応答の基礎的な知見を得ることを目的とした。周波数に応じた戦略に関する知見を得るために、健常者を対象とした確認実験を行ったところ、約0.7Hzを境界として低周波数側は足関節戦略のみ、高周波側は股関節戦略が徐々に増えることや、0.3～0.4 Hz付近を境界にして、高周波側では前庭感覚重視、低周波では体性感覚重視の戦略であることがわかった。体性感覚の問題が生じやすい糖尿病患者を対象として0.3Hzで一定周波数揺動を行ったところ、定常応答における重心と圧力中心の位相差が健常者よりも大きい傾向がみられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感覚器重みづけというテーマで多くの研究が行われてきたが、特に前庭感覚と体性感覚の重みづけを正確に測る手法は発泡材上での立位といった原始的な方法に限られており、動作の正確な計測も困難であった。本研究では、一定周波数揺動の周波数を変えることで感覚器の重みづけを変化させて、その機能を評価することを試みている。このアプローチは、体性感覚障害が起こる糖尿病患者、頸髄症患者や、前庭感覚障害が起こるめまい患者における感覚器障害の程度を詳しく知りたいときに活用できる可能性が高く、糖尿病患者の計測では健常者との違いがみられた。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to obtain basic knowledge for utilizing the differences in subjects' responses to constant-frequency sway for checking the sensory re-weighting and joint strategies. To clear the findings on frequency-dependent strategies, we conducted our experiments on healthy subjects. The results showed that subjects used only the ankle joint strategy at lower frequencies, bounded by approximately 0.7 Hz, and the hip joint strategy gradually increased at higher frequencies. Regarding sensory weighting, at frequencies higher than around 0.4 Hz, the dominant strategy was a vestibular sensation, which controls the head acceleration, while at lower frequencies, the dominant strategy was somatosensory, which controls the center of mass. To investigate the somatosensory perception of diabetic patients, the result of the constant frequency test at 0.3 Hz showed that the phase difference between the center of pressure and the center of mass was larger than that of healthy subjects.

研究分野：ヒューマンダイナミクス

キーワード：バランス 検査 感覚器重みづけ 制御戦略 フォースプレート 慣性センサ 体性感覚 前庭感覚

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人体の立位バランス制御は、複数の感覚器からの情報に対し、遅延を含む中枢神経系で処理し、様々な筋群の協調による関節戦略を行っていると考えられ、複雑な組み合わせであるためにその評価が難しい。現在は、足裏の圧力中心と呼ばれる着点の変動を計測・評価する方法が広く用いられているが、力の情報のみでは不十分と考えられる。圧力中心の計測に基づくバランス評価法は広く用いられてきたが、十分な評価法が確立されないまま現在に至っている。

バランス評価における本質的な課題は以下の3つである。1つ目は実用的な計測法の課題で、力学的な評価の観点では力だけでなく重心の変動を計測する必要があるが、そのためには光学式モーションキャプチャを用いる必要がある。しかし、このような装置を導入することは、コスト、スペース、可搬性、計測の手間、検査者の専門技術等の観点から非現実的である。光学式モーションキャプチャに代わる簡単かつ正確な重心推定法が必要である。2つ目は、人間の立ち方の多様性の課題である。比較的健康な被験者にとって、立位のバランスを保つことは容易であり、そのために多様な立ち方が可能である。この結果、評価時の被験者の意識によって評価結果が大きく左右される問題があった。3つ目は、結果の解釈の課題である。現状では、揺れの大小は評価できるものの、その原因が感覚器の不調や、特異な関節戦略によって生じているといったメカニズムに関する情報が得られない問題がある。

2つ目と3つ目の課題に対するアイデアとして、一定周波数揺動に関する応答がある。これは支持面を任意の一つの周波数で前後に小さく揺動するときの応答を計測する方法で、揺れが単調で予測できるため、大きくバランスを崩すことなく検査が可能で、予測によって遅延の影響を受けにくいことが報告されている。揺れに対して動的にバランスをとる必要があるため、応答の再現性が高まるとともに、揺動する周波数に応じてバランス戦略が異なることが知られている。これによって、特定の周波数では特定の感覚器や関節戦略が支配的である可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、人体の立位バランスを対象として、特定の感覚器や関節戦略に焦点を当てるための検査法として支持面の一定周波数揺動をベースとする手法を開発し、患者を対象とした検証を行う。まず、実用的な計測方法で重心位置と関節力を推定するために、台車上にフォースプレートを設置し、その上に立つ被験者の頭部に慣性センサを設置することで、重心の推定法を開発する。次に、一定周波数揺動の周波数に応じた支配的な感覚器や制御戦略を力学的合理性に基づいて明らかにする。最後に、糖尿病患者に本手法を適用し、健常者との違いを確認する。

3. 研究の方法

計測法の開発については、図1に基づく二重倒立振り子モデルをベースとする推定法を構築し、重心位置・重心加速度・頭部加速度・上半身重心加速度・下半身重心加速度の計測精度を光学式モーションキャプチャとの比較によって検証した。周波数別のバランス戦略については、戦略として「重心の相対位置制御」と「頭部の空間位置制御」が想定されるため、健常者を対象とした様々な周波数での実験を行い、各周波数における重心位置と頭部位置を計測した。同時に、単一倒立振り子モデルと二重振り子モデルを用いて関節戦略の使い分けに関する力学的合理性を調べ、重心位置や頭部位置の変化のメカニズムを検討した。また、患者に本手法を適用した事例として糖尿病患者に対する0.3Hzの揺動に対する計測を行い、健常者との違いを調査した。

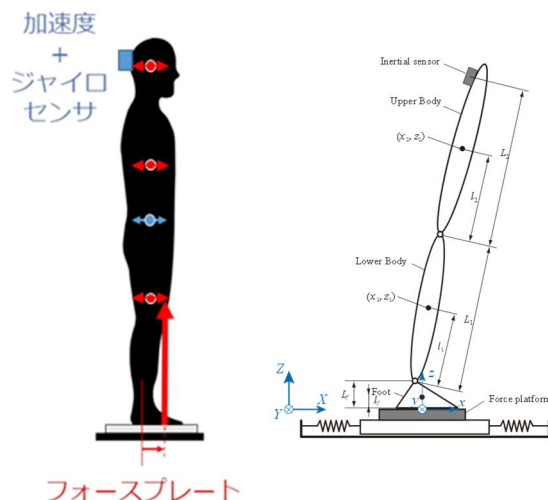


図1 フォースプレートと慣性センサ計測に基づく重心推定モデル

4. 研究成果

研究期間内に得た本研究の成果を以下にまとめる．

(1) フォースプレート計測に基づく重心と関節戦略の推定

図1の二重振り子モデルを用いると，フォースプレートの計測値(水平力 R_x ，モーメント N_y) から重心変位 x_b ，下半身重心加速度 \ddot{x}_1 ，上半身重心加速度 \ddot{x}_2 は次式で求められる．

$$\begin{bmatrix} m_1 & m_2 & 0 \\ J_{x1} & J_{x2} & -m_b g \\ (l_2 - L_2)L_1 / l_1 l_2 & L_2 / l_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M\ddot{X}_s(t) - R_x(t) \\ -M(L_f + l_b)\ddot{X}_s(t) - N_y(t) \\ \ddot{X}_{hd}(t) - \ddot{X}_s(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

支持面を様々な周波数を重ね合わせて前後に揺動した場合の重心変位(左上)，重心速度(左下)，上半身重心加速度(右上)，下半身重心加速度(右下)について，提案手法(青線)と光学式モーションキャプチャ(黒線)の結果を比較したものを図2に示す．12名の被験者で比較した結果，重心変位の平均的な揺れの大きさが10.9 mmであったのに対し，推定誤差は1.6 mmで十分に小さい結果であった．また，図3のように関節戦略モードを定義すると，次式によって上半身と下半身の重心加速度を足関節戦略モードと股関節戦略モードに分解することが可能となる．

$$\ddot{x} \equiv \bar{V} \ddot{\xi} \quad (2)$$

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{L_1 + L_2} & -\frac{J_2 l_1 + m_2 l_1 l_2 (L_1 + l_2)}{d} \\ \frac{L_1 + l_2}{L_1 + L_2} & \frac{J_1 l_2 - J_2 L_1 + m_1 l_1^2 l_2}{d} \end{bmatrix}$$

$$d = L_2 (J_1 + m_1 l_1^2) - L_1 \{ J_2 + m_2 (L_1 L_2 + L_2 l_2 - l_2^2 - L_1 l_2) \}$$

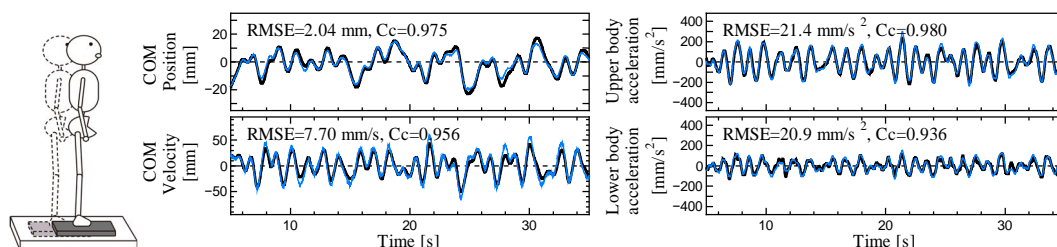
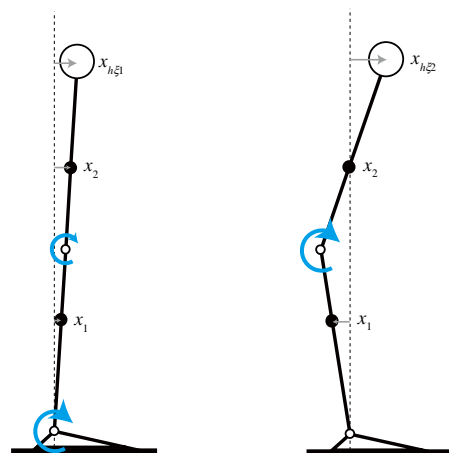


図2 フォースプレートと慣性センサの計測に基づく重心推定の例



(a) 足関節戦略モード (b) 股関節戦略モード

(2) 一定周波数揺動におけるメカニズムの解明

関節戦略については，図4の1リンクモデルの運動方程式に基づいて検証したところ，足関節トルクを使わずに頭部の揺れを抑制できる周波数が0.7 Hzであることを確認した．また，図4に示すように，この周波数以下では足関節戦略(図4上段)のみの運動となり，この周波数以上で

は徐々に股関節戦略（図4下段）を付加することが示された。

制御戦略については、図5に示すように、0.4 Hz 付近を境界として低周波側では重心の位置制御，高周波側では頭部加速度の制御を行っていることが確認された。ただし、低周波側については、明確に重心変位を抑制しているわけではなく、エネルギー抑制とのトレードオフの関係になり、その重みづけは個人によって異なっていた。

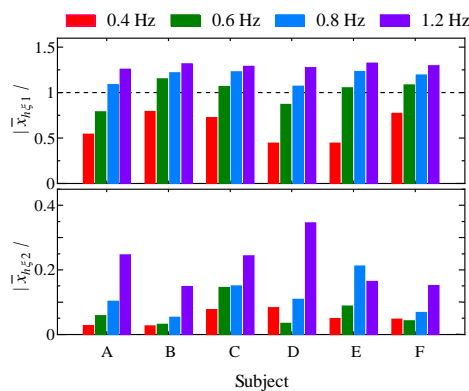


図4 各周波数における関節戦略モードの大きさ

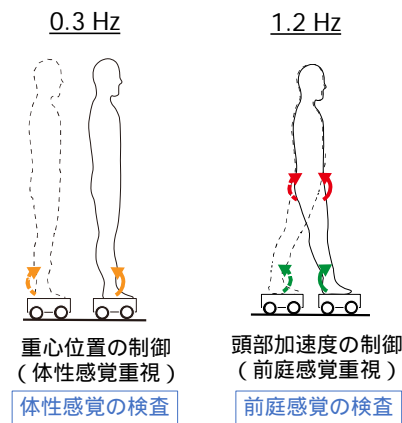


図5 周波数によるバランス戦略の違い

(3) 糖尿病患者に対する本検査手法（0.3 Hz）適用

体性感覚の有効性を調べるために、糖尿病患者1名と健常者5名に対し、0.3 Hz の一定周波数揺動実験を行った。重心変位と圧力中心変動の振幅と位相の関係を複素平面上に表したものを図6に示す。この図では、(1,0)が正規化した支持面の静止座標系の変位であり、○印がそれを基準にした重心(COM)と圧力中心(COP)の支持面からの相対変位の振幅と位相差を複素平面上に表したものである。橙色の糖尿病患者の結果は、健常者と比較してCOMの位相が進み、COPの位相が遅れる傾向があり、その結果COMとCOPの位相差が最も大きくなっていた。これはエネルギーを流入させて頭部を留めようとする戦略、すなわち、0.3 Hz という低い周波数にもかかわらず前庭感覚重視の戦略を取っている可能性を示唆するものであるが、患者数が少ないため、今後の検証にてより多くのデータ取得が必要となる。

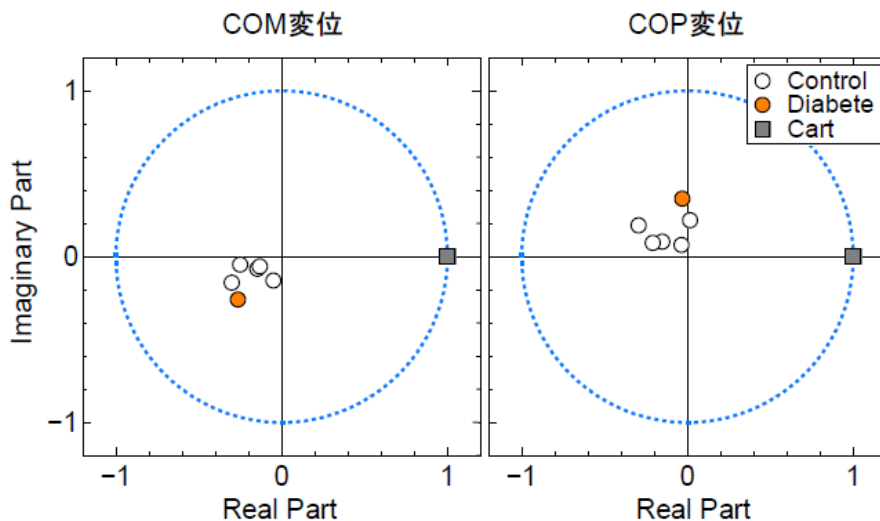


図6 0.3Hz の一定周波数揺動における糖尿病患者と健常者の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 SONOBE Motomichi、INOUE Yoshio	4. 巻 87
2. 論文標題 Balance response of human standing on a cart at constant frequencies (Interpretation of the steady-state response based on mechanical models)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 21-00020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00020	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 -

1. 著者名 Sonobe Motomichi、Inoue Yoshio	4. 巻 23
2. 論文標題 Center of Mass Estimation Using a Force Platform and Inertial Sensors for Balance Evaluation in Quiet Standing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4933 ~ 4933
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23104933	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 園部 元康，井上 喜雄
2. 発表標題 調和振動で揺動する台車における人体のバランス制御戦略
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園部元康，和田佳郎，塩崎智之，北原 紘
2. 発表標題 フォースプレートを用いた重心推定に基づく身体バランス評価法の重力感受性障害を持つめまい患者への適用
3. 学会等名 第81回日本めまい平衡医学会総会・学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 常田仁, 園部元康
2. 発表標題 遅延を含む人の立位バランスシステムにおける状態推定
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 状態推定システム	発明者 園部元康, 瀧澤俊昭	権利者 高知県公立大学 法人, 株式会社 テック技販
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-175194	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	池内 昌彦 (Ikeuchi Masahiko) (00372730)	高知大学・教育研究部医療学系臨床医学部門・教授 (16401)	
研究分担者	永野 靖典 (Nagano Yasunori) (30380372)	高知大学・教育研究部医療学系臨床医学部門・助教 (16401)	

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
---------	---------