

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01270

研究課題名（和文）重心動揺検査を刷新するモデルベース特性パラメータの構築

研究課題名（英文）Construction of model-based characteristic parameters for the renovation of center of gravity sway tests

研究代表者

吉田 勝俊 (Yoshida, Katsutoshi)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：20282379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,600,000円

研究成果の概要（和文）：ヒト静止立位の重心動揺（足圧中心動揺）の動的モデル表現を得るために、倒立振り子の力学構造と、不感帯特性およびランダムな揺らぎを有する制御構造とからなるモデルを提案した。実験で得られた確率密度関数を教師データとして、これに提案モデルの確率密度関数を適合させるパラメータ同定問題を解いた。その結果、ヒト立位平衡に特有の双峰性PDF（ピークが2つ）についても、実験結果をよく再現する同定結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界に先駆けて、重心動揺検査の世界に、現代的な確率解析を導入し、その枠組みを利用しながら、重心動揺を制御モデル化し、実測データからモデルパラメータを同定することで、重心動揺データのシステムパラメータ表示を実現した。得られたパラメータ表示は、医療分野における重心動揺検査の高度化のみならず、スポーツ科学分野における身体安定性の客観的な評価などへの貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：To obtain a dynamic model of center of pressure (COP) sway in human quiet standing, we proposed a new model that consists of a pendulum-type mechanical structure and a control structure with deadband characteristics and random fluctuations. We then solved a parameter identification problem to fit the probability density function (PDF) of the proposed model to the experimentally obtained PDF. Our identified model well reproduced the experimental results, including the bimodal PDF (two peaks) typical of human postural balance.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：重心動揺 ランダム制御系 パラメータ同定

1. 研究開始当初の背景

重心動揺検査は、医学・理学療法学等の分野で広く実用されている。本来、平衡機能の異常は、人体というシステムの異常として捉えるべきだが、従来技術では、人体が出力する重心動揺のピーク・トゥ・ピークや、スペクトル密度など、出力の異常値のみを評価対象としている。その結果、傷病の種類によっては、健常との有意差が出ない等の問題点が報告されている。

2. 研究の目的

次の手順により、静止立位姿勢の重心動揺の特徴を、モデルベースでパラメータ表示することを目的とした。

- ① 重心動揺の実測データを、確率密度関数 (PDF) で表す (確率過程と捉える)。
- ② 測定 PDF を再現可能な、動的モデルを構築する。
- ③ 測定 PDF を教師データとして、パラメータ同定問題を解く。
- ④ 特に、ヒト立位平衡に特有の双峰性 PDF (ピークを2つ有する) の再現に挑戦する。

さらに、必要な要素技術開発として、現代的な確率過程論 (Fokker-Planck 方程式) を駆使したパラメータ同定の高速化や、最適化計算法の改良にも取り組んだ。

3. 研究の方法

3-1. 重心動揺の測定実験

図1に示すように、フォースプレートを用いて、被験者の重心動揺 (足圧中心動揺) を測定し、本研究では、前後方向の足圧中心変位を測定量とした。図2は、ある被験者から実測した測定時系列の一例である。このような測定時系列を、被験者1名につき10回測定し、それらの和集合のPDFを、本研究のPDFデータとした (研究の目的①)。図3に一例を示す。

図3のPDFは、2つのピークを有しており、ヒト立位平衡に特有の双峰性PDFが実測されたことが分かる。この双峰性は、被験者の姿勢が、前後方向の2か所で安定する傾向を示唆し、それらがランダムに切り替わる様子を表している。

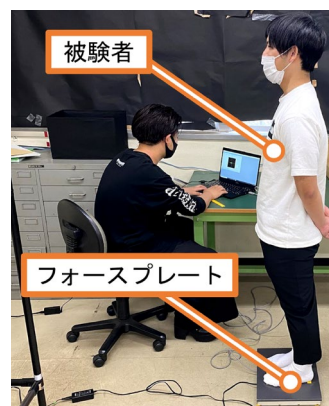


図1 測定実験

3-2. 動的モデルの構築

研究の目的②の動的モデルとして、本研究では、次のようなランダム制御系タイプのモデルを提案した。

$$\dot{x} = Ax + Bu(t): \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (1)$$

$$u(t) := -\mu x \cdot H(x; \beta) - \dot{x} + \sigma \cdot w(t), \quad H(x; \beta) := \begin{cases} 0 & |x_1| \leq \beta \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

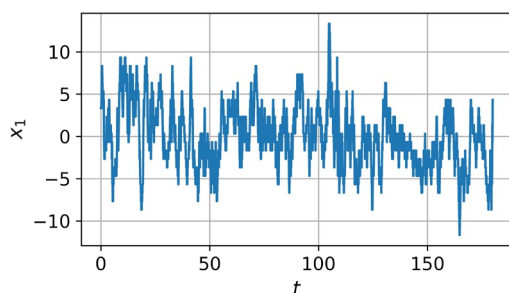


図2 実測された測定時系列の一例

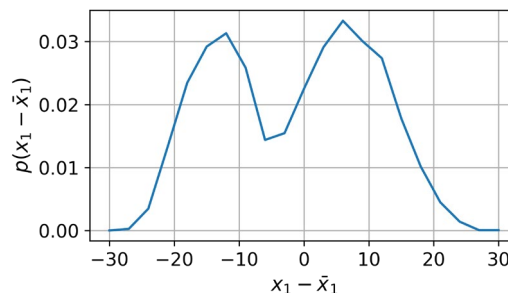


図3 図2の被験者のPDFデータ

提案モデル(1) (2)は、倒立振子を線形化し無次元化した力学構造に、PD 制御と不規則外乱を印加し、特にP制御に不感帯を設けたものである。 x は足圧中心の前後方向変位、 $\gamma = 9.8$ は無次元化した重力項の係数である。 $u(t)$ は、不感帯特性と、ランダムな揺らぎを有する人間特有の立位姿勢制御を表す制御入力であり、 μ は比例ゲイン、 $H(x; \beta)$ は不感帯関数、 β は不感帯の幅、 $w(t)$ は正規白色雑音、 σ は不規則外乱の標準偏差である。

3-3. パラメータ同定

前節の提案モデルは、3成分のモデルパラメータ $\mathbf{p} := (\mu, \sigma, \beta)$ を有する。実測したPDFデータを $P_{\text{human}}(x)$ とし、提案モデルの数値解から構成したPDFデータを $P_{\text{model}}(x; \mathbf{p})$ とする。本研究では、実測した $P_{\text{human}}(x)$ を教師データとして、これに提案モデルの $P_{\text{model}}(x; \mathbf{p})$ を適合させるために、次のようなパラメータ同定問題を解いた (研究の目的③)。

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_{\mathbf{p}} C(\mathbf{p}) &:= \left(\int_{-\infty}^{\infty} \{P_{\text{model}}(x; \mathbf{p}) - P_{\text{human}}(x)\}^2 dx \right) \left(\int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{human}}(x)^2 dx \right)^{-1} \\ \text{Subjected to } &\gamma > \mu \text{ and } \beta > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、付帯条件 $\gamma > \mu$ は、パラメータの不安定領域を探索しないための条件、 $\beta > 0$ は、不感帯の幾何学的な矛盾をさけるための条件である。

最適化計算には、高性能かつ勾配計算を要しないParticle Swarm Optimization (PSO) [1]を基本として、これを申請者らが独自拡張したGravitational Particle Swarm Algorithm (GPSA) [2]と、同じく申請者らが独自提案した残差計算法[3]を活用した。

4. 研究成果

成果の一例として、図3の $P_{\text{human}}(x)$ を教師データとして、式(3)の同定問題を解いた結果を示す。図4は、最適化計算によるコスト $C(\mathbf{p})$ の変化である。計算の反復回数(横軸)とともに、 $C(\mathbf{p})$ 値(縦軸)が減少しており、最適化計算の妥当性が確認できる。十分に収束をした終端値 $C(\mathbf{p}^*) = 0.0182$ において、同定されたパラメータ値は、 $\mathbf{p}^* = (13.95, 27.67, 8.71)$ であった。

得られた \mathbf{p}^* をモデル(1) (2)に代入して得た $P_{\text{model}}(x; \mathbf{p})$ を、図5の破線で示す。実線は、図3の教師データ $P_{\text{human}}(x)$ である。この結果において、PDFの二乗平均誤差に基づくモデル適合率は $100(1 - C(\mathbf{p}^*)) > 98\%$ となり、全サンプルの最悪ケースでも95%超を達成した。

このように、本研究の提案モデルは、実測されたPDFの双峰性をよく再現しており、本研究の目的④は達成されたと思われる。ただし、PDFの詳細な形状(この例では左のピークと中央の谷の位置など)については、実測とモデルとの相違がみられ、今後の課題が残された。

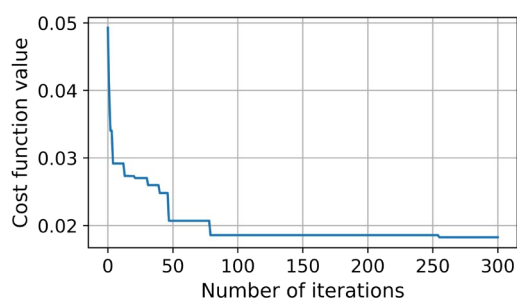


図4 コスト $C(\mathbf{p})$ の収束

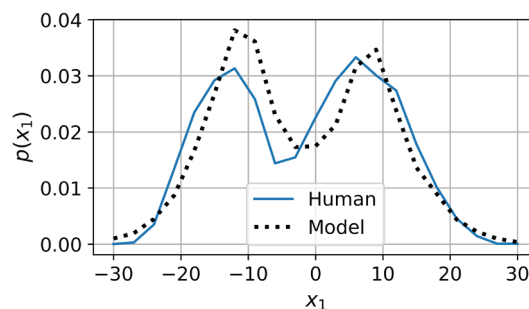


図5 同定された $P_{\text{model}}(x; \mathbf{p})$

参考文献

- [1] Kennedy J., Eberhart R.: Particle swarm optimization, Proceedings of the International Conference on Neural Networks, (1995), pp.1942-1948.
- [2] Yoshikazu Yamanaka and Katsutoshi Yoshida, Simple gravitational particle swarm algorithm for multimodal optimization problems, (2021), PLoS ONE 16(3): e0248470.
- [3] Katsutoshi Yoshida and Yoshikazu Yamanaka, Nonlinear stochastic parameter estimation of a random Duffing-van der Pol oscillator using Fokker-Planck type residual, ISIC Trans., vol.36, no.5, (2023), pp.130-135.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoki Hirose, Katsutoshi Yoshida and Yoshikazu Yamanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-solution tracking in shifting sphere function using gravitational particle swarm algorithm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 54th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'22)	6. 最初と最後の頁 81-86
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 Satoshi Wakahara, Katsutoshi Yoshida and Yoshikazu Yamanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Simultaneous design of two-stage gearboxes: an application of multimodal optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 54th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'22)	6. 最初と最後の頁 87-92
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 Yoshikazu Yamanaka, Shoki Hirose, and Katsutoshi Yoshida	4. 巻 -
2. 論文標題 A tracking performance comparison of different particle swarms using tolerance update	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'22)	6. 最初と最後の頁 p.535, Online
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 無
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 Katsutoshi Yoshida and Yoshikazu Yamanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Parameter estimation of a random Duffing-van der Pol system via Fokker-Planck type residual	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 53rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications Kusatsu, Oct. 30-31, 2021	6. 最初と最後の頁 24-28
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中山 響, 中村 友哉, 山仲 芳和, 吉田 勝俊
2. 発表標題 状態フィードバックモデルに基づくバランス運動のパラメータ表示（1自由度非線形モデルの提案）
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告（信学技報）
4. 発表年 2023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
研究分担者	山仲 芳和 (Yamanaka Yoshikazu) (00804238)	宇都宮大学・工学部・助教 (12201)	
研究分担者	嶋脇 聡 (Shimawaki Satoshi) (10344904)	宇都宮大学・工学部・教授 (12201)	

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