

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01391

研究課題名(和文) 自転車走行のふらつきを予測する数理モデルの構築とパラメータ同定

研究課題名(英文) Mathematical modeling and parameter identification of human-bicycle balance fluctuations

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) 7,500,000円

研究成果の概要(和文)：自転車の走行運動について、ロール運動、前輪接地点変位、操舵角からなる3自由度の測定実験に成功した。そのダイナミクスを再現する数理モデルを提案してパラメータ同定を行い、モデル適合度97%超の高精度モデルを得た。次に、予測処理のリアルタイム化に向けて、伊藤確率解析を駆使した新しい同定手法を提案し、計算効率の悪いモンテカルロ法をショートカットすることに成功した。さらに、同定計算の高速化に向けて、本研究で用いた粒子群最適化法を、新しい原理で独自に拡張し、複数のパラメータ探索結果を、1回の実行で得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、自転車のふらつき振幅が及ぶ範囲を予測するための動的モデルと、これを実験データに適合させるパラメータ同定アルゴリズムが確立した。得られたモデルは、自転車のふらつき振幅を予測するためのキーテクノロジーとなり、対自転車の事故を防止する自動運転自動車の実現に寄与する。また、もう1つの成果として、提案手法の効率化や高速化に資する独自アルゴリズムの開発にも、それぞれ成功した。これは、提案手法を車載コンピュータ上にリアルタイム実装する際の基盤技術となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we successfully measured the roll angular displacement, wheel's lateral displacement, steering angular displacement, and each velocity. Next, using their probability density functions (PDFs) as training data, the model parameters were accurately identified. The resulting PDF fitnesses were over 97% for all participants, indicating that our simulated PDFs reproduced the human PDFs. Moreover, we successfully developed a new algorithm based on Ito's stochastic analysis and achieved faster calculations without Monte-Carlo methods. Furthermore, we successfully developed an expanded version of particle swarm optimization (PSO) reduces the number of trials of the optimization.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：自転車 ふらつき走行 動的モデル パラメータ同定 ゆらぎ 確率密度関数

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高齢化する我が国においては、対自転車の事故防止が急務である。なぜなら、自転車乗車中の死者数は、高齢者が大半を占める(平成 28 年警察庁交通事故統計では、70 歳以上が全体の 51%、60~69 歳が 20%)。このような高齢者事故を防止する交通強者側の新技術として、自動車の自動運転が有望視されている。こうしたなかで、自転車との事故を回避するには、自転車の進路を予測する技術が不可欠である。

問題となる自転車の進路変更には、随意的なもの、不随意的なものがある。随意的な進路変更とは、交差点の右左折のような意識下の進路変更であり、不随意的な進路変更とは、自転車のふらつき運動のような、意識外の進路変更である。

2. 研究の目的

本研究では、上述の自転車事故の原因は、主に、不随意のふらつき運動にあると考え、これを予測するために不可欠な、次の課題に取り組んだ。

- 自転車のふらつき振幅の確率分布を、高精度に予測可能な動的モデルを構築する。
- 提案モデルのパラメータ値を、自転車の実走行データに基づいて同定する。
- 予測処理のリアルタイム化に向けて、必要な計算を効率化・高速化する。

3. 研究の方法

本研究の実験環境を、図 1 に示す。実験協力者は、3 本ローラー型のサイクルトレーナー上で自転車を走行させる。被検者には走行速度 $V = 12 \text{ km/h}$ を教示し、1 人あたり、250 秒の測定を 3 回行った。取得した測定データは、図 2 に示すような、自転車のロール角 θ [rad]、前輪接地点の横変位 y [m]、操舵角 ϕ [rad] の各時系列である。各自由度の速度成分は、数値微分により推定した。このようにして、6 次元の測定時系列 $x(t) = (\theta(t), \dot{\theta}(t), y(t), \dot{y}(t), \phi(t), \dot{\phi}(t))^T$ (T は転置) を得た。

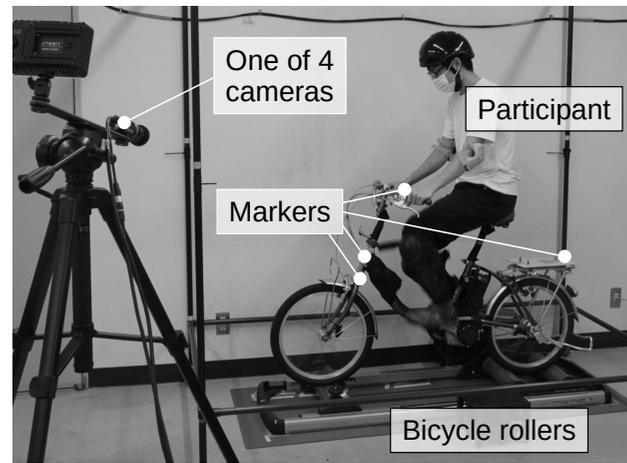


図 1 Our experimental device and a human participant.

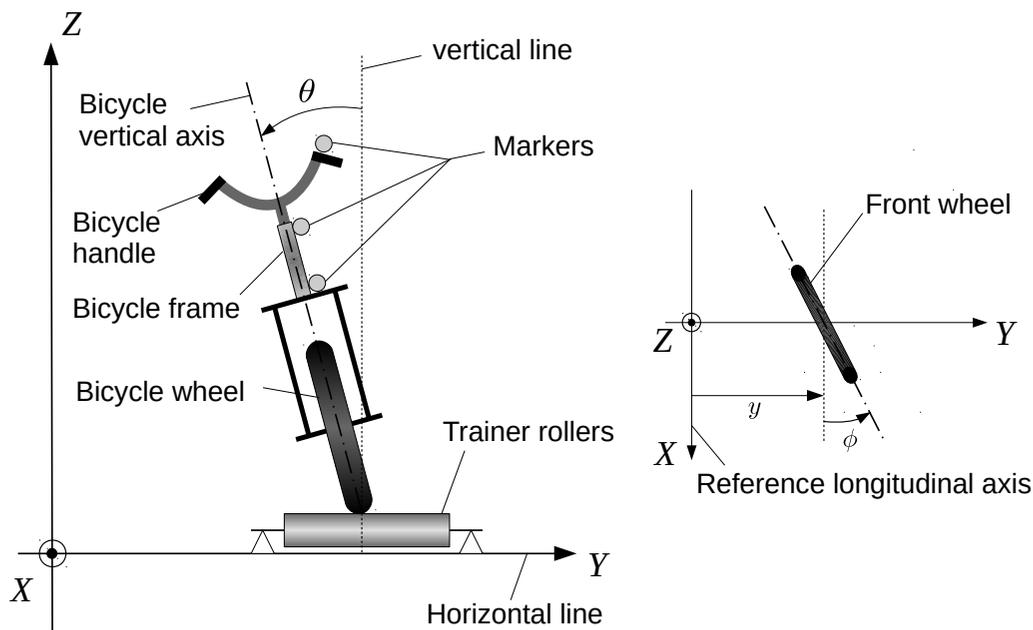


図 2 Our proposed model.

以上に得られた実験データのダイナミクスを、本研究では、次のような状態空間モデルで表した。 V

は所与の走行速度, $g = 9.8$ は重力加速度である.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -Vx_6 \cos x_1 \cos x_5 + c_y x_4 \cos x_1 + g \sin x_1 - c_\theta x_2, \\ \dot{x}_3 = V \sin x_5, \\ \dot{x}_4 = Vx_6 \cos x_5 - c_y x_4 - c_\phi x_6, \\ \dot{x}_5 = x_6, \\ \dot{x}_6 = u(t). \end{cases} \quad (1)$$

このモデルは, x_1 を倒れ角, x_3 を台車変位とする一般的な倒立振り子モデルと力学的に等価である. ただし, 台車速度 \dot{x}_3 は, 操舵角 x_5 と所与の走行速度 V から定められる. また, 人間の操舵入力 $u(t)$ は, 操舵角加速度 \dot{x}_6 を直接操作すると仮定する.

次に, 本研究独自のアプローチとして, 操舵入力 $u(t)$ は, 次のようなランダム状態フィードバック制御器としてモデル化した.

$$u(t) := F_1 x_1 + F_2 x_2 + F_3 x_3 + F_4 x_4 + F_6 x_6 + \mu(1 + \sigma_1 \xi_1(t))x_5 + \sigma_2 \xi_2(t) \quad (2)$$

ここで, $\xi_1(t), \xi_2(t)$ は独立なガウス白色雑音であり, σ_1, σ_2 はそれらの印加強度を表す.

最後に, 提案モデル (2) が有する 11 個のモデルパラメータ $q := (F_1, F_2, F_3, F_4, F_6, c_y, c_\theta, c_\phi, \mu, \sigma_1, \sigma_2)$ の値を, 実験データから同定した. 具体的には, 提案モデル (1) の数値解のヒストグラムから確率密度関数を構成し, これと実験データの確率密度関数の残差二乗和を, 粒子群最適化法により最小化した.

4. 研究成果

図 3 は, 本研究のパラメータ同定結果の一例である. 図中の 印は, 実験データの確率密度関数を表し, 実線は, 提案モデルによる推定結果を表す.

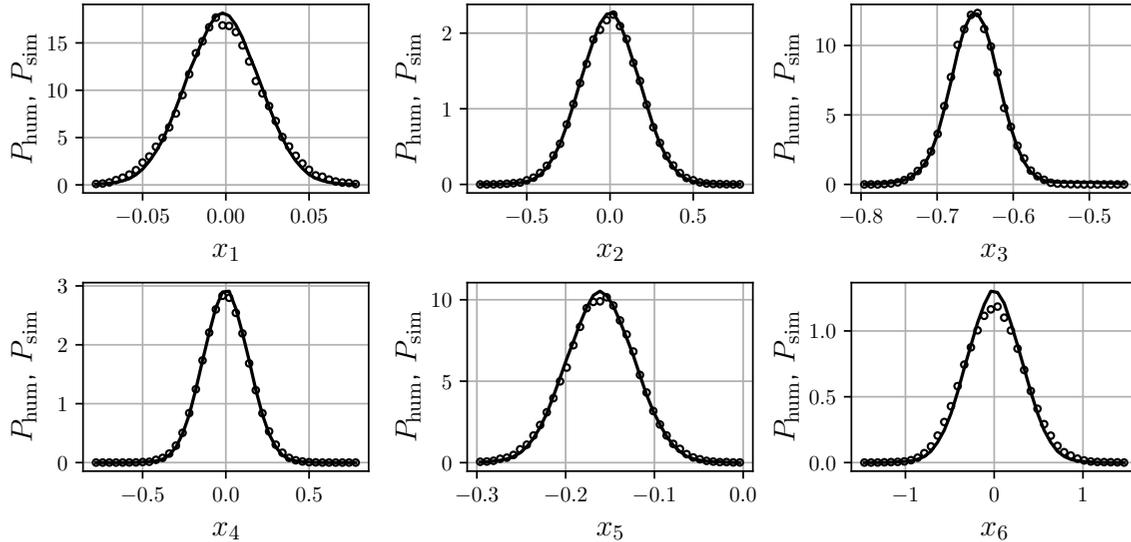


図 3 Experimental (circles) and simulated (curves) marginal PDFs.

この結果において, 提案モデルの適合度 (確率密度関数の残差二乗和による) は, 全ての実験協力者について 97% を超えた. このように, 提案モデルによれば, 実験の確率密度関数を高精度に再現できる. 以上の成果は, 下記の論文 [1, 2] として発表した.

その他, 本研究に必要な要素技術の成果として, 確率密度関数の残差二乗和の数値計算を高速化した研究 [3, 4], 確率密度関数データからシステムの過渡特性を予測した研究 [5], 粒子群最適化法を多解問題に拡張した研究 [6, 7] を発表した.

主な発表論文等

- [1] 【雑誌論文】 Katsutoshi Yoshida, Keishi Sato and Yoshikazu Yamanaka, Simple Degree-of-Freedom Modeling of the Random Fluctuation Arising in Human Bicycle Balance, Applied Sciences, Vol.9, Issue 10, (2019-5), p.2154 (12 pages).

- [2] 【国際会議論文】Katsutoshi Yoshida, Yoshikazu Yamanaka, Three degree-of-freedom stochastic modeling of human-bicycle balance fluctuations, Proceedings of SSS'20: The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Osaka, Japan, (2021), pp.73-78.
- [3] 【雑誌論文】Katsutoshi Yoshida and Yoshikazu Yamanaka, Stochastic modeling of nonlinear random vibrations using heavy-tailed mixture distribution, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol.33, No.1, (2020-1), pp.9-15.
- [4] 【国際会議論文】Katsutoshi Yoshida, Yoshikazu Yamanaka, Parameter Estimation via Fokker-Planck Type Residual: Application to Linear Stationary Random Vibration, Proceedings of MoViC2020: The 15th International Conference on Motion and Vibration Control, Japan, (2020), Paper ID:10055 (6 pages).
- [5] 【国際会議論文】Katsutoshi Yoshida, Yoshikazu Yamanaka, Stochastic modeling of nonlinear random vibrations using heavy-tailed mixture distribution, Proceedings of SSS'18: The 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Kyoto, Japan, (2019), pp.13-18.
- [6] 【雑誌論文】Yoshikazu Yamanaka and Katsutoshi Yoshida, Monte Carlo analysis of gathering and scattering behavior generated by gravitational particle swarm algorithm, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol.33, No.1, (2020-1), pp.16-23.
- [7] 【国際会議論文】Yoshikazu Yamanaka, Katsutoshi Yoshida, Monte Carlo analysis of gathering and scattering behavior generated by gravitational particle swarm algorithm, Proceedings of SSS'18: The 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Kyoto, Japan, (2019), pp.167-171.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshida Katsutoshi、Sato Keishi、Yamanaka Yoshikazu	4. 巻 9
2. 論文標題 Simple Degree-of-Freedom Modeling of the Random Fluctuation Arising in Human-Bicycle Balance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2154 ~ 2154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9102154	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 Yoshida Katsutoshi、Yamanaka Yoshikazu	4. 巻 33
2. 論文標題 Stochastic Modeling of Nonlinear Random Vibrations Using Heavy-tailed Mixture Distribution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 9 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.33.9	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 Yamanaka Yoshikazu、Yoshida Katsutoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Monte Carlo Analysis of Gathering and Scattering Behavior Generated by Gravitational Particle Swarm Algorithm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 16 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.33.16	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 Katsutoshi Yoshida、Yoshikazu Yamanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Three degree-of-freedom stochastic modeling of human-bicycle balance fluctuations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SSS ' 20: The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 73 ~ 78
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 Katsutoshi Yoshida, Yoshikazu Yamanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Parameter Estimation via Fokker-Planck Type Residual: Application to Linear Stationary Random Vibration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of MoViC2020: The 15th International Conference on Motion and Vibration Control	6. 最初と最後の頁 Paper ID: 10055
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 Katsutoshi Yoshida and Yoshikazu Yamanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Stochastic modeling of nonlinear random vibrations using heavy-tailed mixture distribution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SSS'18: the 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS2018)	6. 最初と最後の頁 13~18
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 and Katsutoshi Yoshida	4. 巻 -
2. 論文標題 Monte Carlo analysis of gathering and scattering behavior generated by gravitational particle swarm algorithm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SSS'18: the 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS2018)	6. 最初と最後の頁 167~171
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0件

〔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)	

6. 研究組織（つづき）

	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	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