

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：52101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06205

研究課題名（和文）ウェアラブル非侵襲型生体制御系モニタリング装置の開発

研究課題名（英文）Development of Wearable Non-invasive Biological Control Systems Monitoring Devices

研究代表者

菊池 誠（KIKUCHI, Makoto）

茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・教授

研究者番号：20270217

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）：ウェアラブル技術のパラダイムシフトが進行する中で、本研究は健康管理を目的とした非侵襲型生体制御系モニタリング装置の開発を目指した。開発では特に筋骨格系や神経系のむだ時間や時定数など、生体制御系の機能の特徴付ける主要な物理量を短時間で推定するアルゴリズムの提案や検証及び問題点を抽出した。新たに提案した推定法は従来のパラメトリックな同定法をCNNs(Convolutional Neural Networks)で補強するハイブリッドな手法である。研究では今回得た知見が、推定装置の性能向上に貢献する技術の一つとなることを示した。また本推定法の問題点に言及して、その使用範囲が限定的であることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は健康管理を目的としたウェアラブル非侵襲型生体制御系モニタリング装置に限らず、モデルベースでシステム同定を行う信号処理系に共通して応用することが可能であると考えられる。ものづくりをハードウェア、ソフトウェアと大別して、さらにソフトウェアをプログラミング技術とアルゴリズム開発に分けた場合、ものづくりの核となる技術の1つを提供したという点では社会的な意義があり、ものづくり全般に波及効果が期待できる。また、システム同定を実用面に応用するという観点から言えば、学術的な正確さと工業的な実用性の双方を鑑みた選択肢の一つを提供したという意味で学術的及び社会的な意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：While the paradigm shift of wearable technology progressed, this research aimed to develop a wearable non-invasive biological control system monitoring device for health management. In the development, we proposed and verified an algorithm for estimating significant physical quantities that characterize the functions of biological control systems such as delay time and time constant of the musculoskeletal system and nervous system in a short time, and extracted the problems. The newly proposed estimation method is a hybrid method that supplements the conventional parametric identification method with CNNs (Convolutional Neural Networks). Also, in the research, it was shown that the knowledge obtained this time is one of the technologies that contribute to the performance improvement, downsizing, and cost reduction of the estimation device. We also pointed out the problem of this estimation method and showed that its application field is limited.

研究分野：制御工学

キーワード：生体制御系 モニタリング ニューラルネットワーク システム同定 モデリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

疾病予防に関する研究は国内・国外の大学、企業、研究所等で研究され、実用的な成果やその応用製品も数多く生み出されている。このような研究開発は高齢化が進む日本の社会で必要とされている。一般的に日常手軽に使用できる多機能でウェアラブルな健康管理機器は疾病予防の観点から重要であり、高齢者だけでなく、中高年の健康をサポートする社会に貢献できるものである。この研究は近年増加傾向にある循環器や神経系の疾病を意識しながら、まず最初に、身体の姿勢制御や歩行機能などに代表される生体制御系のモニタリングに着目した。例えば血圧測定は医療機関で行われる測定の一つであるが、数十年前から疾病予防のために家庭で手軽に使用できる簡易的な製品も普及している。この例のように、身体の内部状態を調べる方法は時代と共に一般的な測定となりつつある。しかし、血圧を例にとってみても、その値は体内の各部位または測定時刻によって異なり、厳密に捉えると、血圧は時々刻々変化する連続的な物理量である。就寝中、早朝、早朝後1時間、日中、夕方、就寝前の平均血圧は異なり、その値は心理的な影響によっても変化するとされている。つまり、一般的に測定される最高血圧と最低血圧は血圧の断片的な値であり、血圧を制御する仕組みの状態を段階的に知る1つの目安にはなるが、それ以上のことは推測するしかない。この例から類推して例えば、身体の姿勢を制御する仕組みが時々刻々、どのように変化しているのか？その情報を日常的に把握することができれば、筋肉や足腰の異常を早期に察知することができるかもしれない。さらに、察知するその仕組みは他の物理量にも応用できるかもしれない。そのためにもウェアラブルなモニタリング装置を支える計測技術とその生体情報を処理する計算アルゴリズムや計測対象の数学モデルの研究は必要となる。また、数学モデルを基礎に、身体内部の制御系の機能を決定付ける主要な物理量を利用して、生体制御系内の状態を推定する試みは従来から研究されているが、推定に失敗する場合は少なくない。このような推定を確実に実行するためにはシステムの構造に合わせた推定方法やそれに適した入力信号が必要となる。また、その推定に必要な出力信号の測定時間も数秒単位ではなく、数分単位の時間が必要となる。

2. 研究の目的

本研究は健康管理を目的としたウェアラブル非侵襲型生体制御系モニタリング装置の開発を目指した。ここでは一般的で専門知識の有無を問わない使用者を想定して、ヒトの健康状態と相関が強いとされる体内の制御系の主要な情報、例えば筋骨格系や神経系のむだ時間、時定数や反応の強度など、その制御系の機能を決定付ける主要な物理量を、身体の各部位の動きの軌跡、外部刺激に対する反応速度、脈拍数や血流量のデータから推定する手法を開発する。また、これらの身体情報に筋電位や心電位などの情報を加え、生体制御系の状態を連続的に把握できるシステムの構築を目指した。そして、この研究では従来から利用されている数理分析的な推定方法をCNNs(Convolutional Neural Networks)で補強するハイブリッドな推定法を提案して、その方法の有効性を確認するために、ヒトの立位姿勢制御時の重心動揺から対象者の制御パラメータを推定する。

3. 研究の方法

(1) 生体制御系の数学モデルの作成とその数値解析

生体制御系内の状態パラメータを推定するには、そのシステムの数学モデルが非常に重要である。このため、神経・筋骨格制御系について、従来の研究で用いられた手法や既に得られている生理学的な知見を基にモデルを構築して、モデルの検証を試行錯誤しながら実験レベルでモデル誤差の抑制を目指した。さらに、状態パラメータの精度向上を図った。

(2) 生体情報を用いた同定アルゴリズムの開発とその改良

生体情報を利用した測定法を一般的な環境に適用するために、信号から雑音を除去する仕組みや信号を計算処理するシステムを提案して、数学モデルの特性を決定付けるパラメータを推定した。さらに、その仕組みを改良しながら処理系の動作実験を行い、その性能を検証した。

(3) 推定法

本研究では生体制御系の一例として全身運動の一つでもある立位姿勢制御系を題材として、特にその中でも重心動揺に着目して生体制御系内部の状態を推定した。図1において、表示装置からの動作指示を入力、重心動揺を出力とおき、線形化した数学モデルを時不変系と仮定して対象となるシステムを設定した。ここで、立位姿勢制御系は基本的に時変系であるため、仮に数秒で正確な同定が可能であれば、制御パラメータの値は時々刻々と変化することがわかる。しかし、現実にはパラメトリック同定は数秒では実行できないため、実際には数秒から1秒以下の短い時間で生じる変化

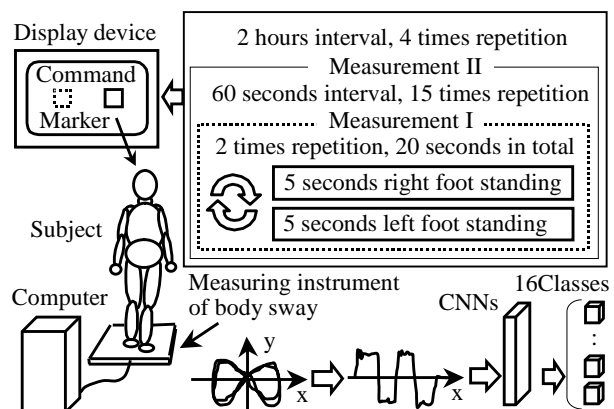


図1 測定手順と測定システム

をとらえることはできない。つまり、制御の結果として表面に現れる物理量は短時間で計測できたとしても、短い時間で起こる生体制御系内部のパラメータの変化は推定できない。

本研究の推定法では ARMAX モデル (Autoregressive moving average model with exogenous inputs model) を前提としたシステム同定を用いて、基準点となるパラメータの値を事前に複数個準備する。また、基準点を含む複数の入力パターンと機械学習を利用した学習済み CNNs(Convolutional Neural Networks)も準備する。その後、これまで同定したことがない未知の系(ここでは以後、未同定系と記す)の入力パターンを用いて学習済み CNNs の出力を求める。図 2 に未同定系の CNNs 出力から制御パラメータの値を推定するアルゴリズムの幾何学的イメージを示す。尚、実際の幾何学的空間は十数次元の多次元空間になるため、正確な幾何学的イメージを紙面上に記述することはできない。つまり、図 2 は説明用の架空の空間である。まずここでは推定対象となる未同定系の CNNs 出力(大円)と基準点の CNNs 出力(たとえば O_2 軸近傍の大点)との距離 d_2 、同様に CNNs 出力軸で張られる 16 次元の出力空間内で距離 $d_1, d_3 \sim d_{16}$ を求める。そして、距離の最小値 d_2 と最短距離にある O_2 クラスの構成要素(測定された事象のデータ)の分布状態から推定対象となる未同定系の制御パラメータの値を算出する。このように、この推定方法では、未知のデータを従来のパラメトリック同定を逐次実行するのではなく、予め実行して得られている基準点のようなデータと未知のデータを CNNs で比較する。そして、比較した際に得られる出力値を利用して、未知のデータがどの程度基準点と離れているのかを評価する。この評価値を利用して、基準点における制御系パラメータの値を補正して、未知データでの制御パラメータの値を近似値として算出する。この方法を利用すると CNNs による機械学習やパラメトリック同定を実行する際に避けがたい繰り返し計算が発生しないため、比較的短時間で近似値を求めることができる。一方、この方法の問題点は、推定した値が過去の測定や同定に基づいた近似値であるため、学習に利用されていない、もしくは前例のない事象については、精度よく推定できない。

4. 研究成果

以下の 4 項目の結果を得た。

(1) 実験と検証

CNNs の入力パターンは周波数分析とアトラクタパターン処理を複合的に組み合わせた特徴抽出アルゴリズム(図 3 の方法(Method)A 参照)を重心動揺の実測データに適用して生成した。分類するクラス数は 16 と設定して、AlexNet の最終の 3 層を本研究の転移学習用に開放する。入力パターンは学習用に 10240 個、検証用に 5120 個、合計 15,360 個とした。学習の結果、検証損失

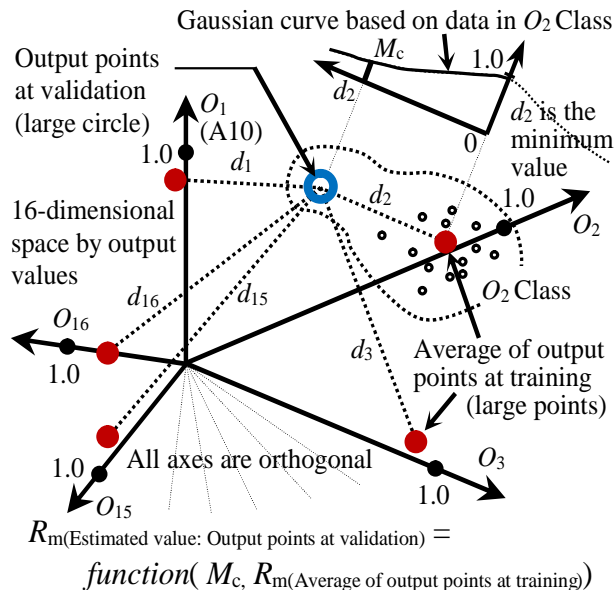


図 2 推定アルゴリズムの幾何学的イメージ

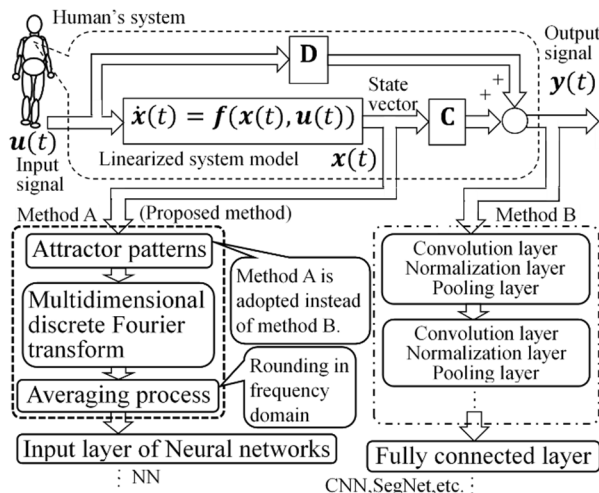


図 3 特徴抽出の概念

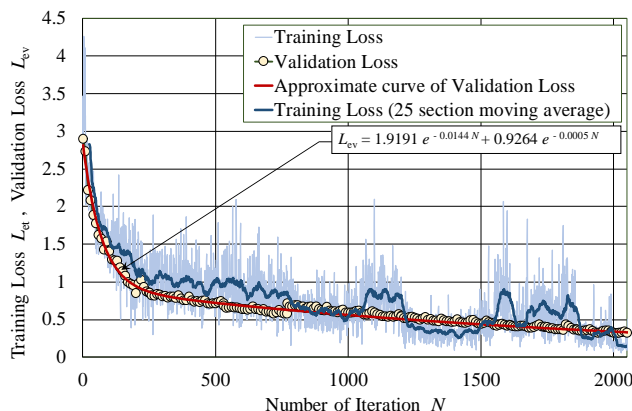


図 4 転移学習過程における検証損失

を Lev 、反復数を N とおき、図 4 に示すように、近似式 $Lev = 1.9191 e^{-0.0144 N} + 0.9264 e^{-0.0005 N}$ を得た。この式によると例えば反復数が 2000 回で Lev は 0.35 以下となる。また筋骨格系の筋肉の時定数の逆数を τ とおき、筋肉の反応速度に関して筋肉応答係数を $R_m = 20 \log(\tau)$ と定義して、この R_m 値を図 5 に示す推定アルゴリズムを使用して求めた。また、この推定 R_m 値と ARMAX モデルによるシステム同定から求めた R_m 値を利用して誤差率 Er を求めた。その結果を図 6 に示す。図 6 によると全体的には R_m 値が大きくなるほど集合 C、B、A の順で誤差率が小さくなる傾向があり、推定 R_m 値は集合 A、B の 45~75 [dB] で変動していることがわかる。また、集合 C の領域ではばつきが大きいことから、本手法では対応できない事象が存在するということが予想できる。加えて集合 A、B の中間領域にはデータ点が比較的少ないことから、この制御系には A と B の 2 種類の安定状態が存在する可能性がある。また、ARMAX モデルによる同定時間は数分から数十分であり、一方、事前準備を除く本推定法の推定時間は 1 秒未満である。ただし、事前準備には数時間を要するという欠点がある。以上、本研究からは上記の知見が得られた。

(2) ハイブリッド推定法のまとめ

本推定法は従来から利用されているパラメトリックな同定法を CNNs で補強するハイブリッドな推定法であり、ここでは、その主要なアルゴリズムを紹介した。さらに本推定法の一例としてヒトの立位姿勢制御時の重心動揺から系内部の制御パラメータを推定した。例では ARMAX モデルによる同定時間が数分から数十分であるのに対して、その推定時間を数秒以下に短縮できることを示した。また、制御パラメータの推定値とその誤差率の関係を示すことで、対象となる制御系に 2 種類の安定状態が存在することや本推定法で対応できない事象が存在することを示した。さらに本推定法の問題点に言及することで、その使用範囲が限定的であることを示した。

(3) まとめ

本研究では生体制御系内のパラメータを短時間で推定するために有効な手法・アルゴリズムの提案、検証および問題点の抽出を実施した。これらの知見は、推定装置の小型化やコスト低減を支える有効な手法と位置付けられ、アルゴリズムに特化した現在の技術動向を踏まえると、本研究内容には、ウェアラブル非侵襲型生体制御系モニタリング装置の開発を後押しする技術の一つとしての波及効果が期待できる。

(4) 補足

パラメトリックな同定を CNNs で補強する推定法を試行した結果、制御パラメータが従来よりも短時間で推定できるという新たな知見を示した。ただし、この実験結果は一例であり、選択する基準点がシステム同定の信頼性に依存するという問題を考慮すると、その使用範囲は限定的である。

< 引用文献 >

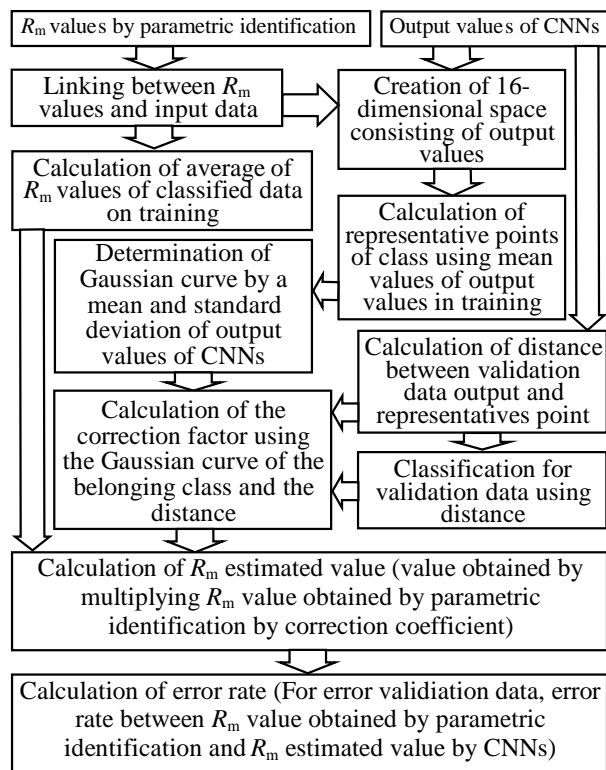


図5 R_m の推定アルゴリズム

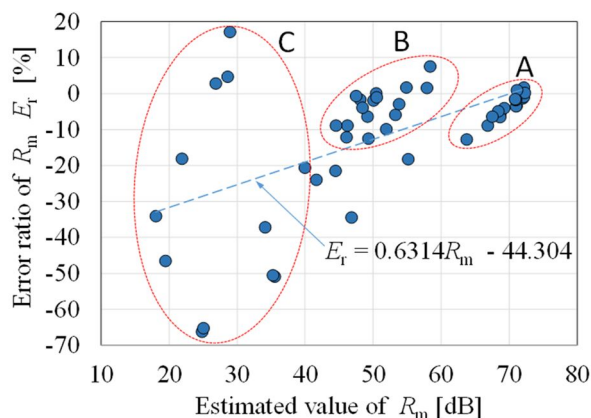


図6 R_m 推定値と誤差率 Er との関係

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

菊池誠, CNNs と ARMAX モデルを使用した生体制御系のパラメータ推定, 2020IEICE 年電子情報通信学会総合大会学術講演会講演論文集, 基礎・境界/NOLTA 講演論文集, A-18-3, p152.
M.Kikuchi, Estimation of Control Parameters in Neuro-muscular Skeletal Systems Combined with CNNs and Parametric Identification, ICAIIC2019, Okinawa, 2019, pp.355-359.

M.Kikuchi, Proposal for Feature Enhancement of Bio-information Using Attractor Pattern and Frequency Analysis, ISMICT 2018, Sydney, 2018, pp.10-15.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Makoto KIKUCHI
2. 発表標題 Estimation of Control Parameters in Neuromuscular Skeletal Systems Combined with CNNs and Parametric Identification
3. 学会等名 The 1st International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication(ICAIIIC 2019), Co-sponsored by IEEE Communications Society and IEICE Communications Society, pp.355-359. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto KIKUCHI
2. 発表標題 Proposal for Feature Enhancement of Bioinformation Using Attractor Pattern and Frequency Analysis
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Medical Information and Communication Technology(ISMICT 2018), Sydney, Australia, 26-28 March 2018, Co-sponsored by IEEE Communications Society, pp.10-15. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池 誠
2. 発表標題 CNNsとARMAXモデルを使用した生体制御系のパラメータ推定
3. 学会等名 2020IEICE年電子情報通信学会総合大会学術講演会講演論文集, 基礎・境界/NOLTA講演論文集, A-18-3, p152
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----