

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K15016

研究課題名(和文)心電-脈波信号のカオス時空間解析と局所決定性解析による心循環器系診断支援システム

研究課題名(英文)Spatio temporal chaos and local determinism of ECG-PPG

研究代表者

酒井 憲司 (Sakai, Kenshi)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40192083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：心電-脈波の心電信号を利用して脈化のポアンカレ断面を生成した。当該手法によって、脈波のみから生成した場合よりもよりゆらぎが少なく、より鮮明な構造を観測することができた。心電のQS間隔に着目し、その1/4に時間遅れを設定することによって、心電による明瞭なダイナミクスが再構成された。心電信号に対して推移誤差、正規化決定論的非線形予測などの非線形時系列解析手法が適用可能となり、高い決定性の存在を検出することができた。一方、心電-脈波を対象に開発した位相同期抽出法の汎用性を明らかにした。RGB画像列、アレルギー花粉飛散量、感染症時空間分布などのメタデータに対しても有効であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農作業においては強い労働負荷過程の下でのリアルタイムでの計測が必要である。本研究は、ウェアラブルの心電脈波センサーを用いて、農作業下データにおいても信号データからのダイナミクス同定をより高精度で行うことを可能とした。ここで得られた解析手法は汎用性が高く、生体情報への応用だけでなく、RGB画像列、生態系データなどへの汎用性も確認できた。

研究成果の概要(英文)：ECG-Pulse wave ECGc signals were used to generate pulsating Poincare sections. With this method, it was possible to observe a clearer structure with less fluctuation than in the case of generating only from the pulse wave. By focusing on the QS interval of ECG and setting a time delay to 1/4 of that, the clear dynamics of the electrocardiogram were reconstructed. Nonlinear time series analysis methods such as transition error and normalized deterministic nonlinear prediction can be applied to ECG signals, and the existence of high determinism can be detected. On the other hand, the versatility of the phase synchronization extraction method developed for electrocardiogram-pulse wave was clarified. It was also effective for metadata such as RGB image sequences, allergic pollen dispersal amounts, and spatio-temporal distribution of infectious diseases.

研究分野：農業環境工学

キーワード：心電 脈波 カオス解析 位相解析 ヒルベルト変換 ポアンカレ断面

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

農業機械の普及に伴って、農作業における身体的な負荷は低減されてきているが、高度な機械システム導入によって、精神的な負荷の増大が懸念されている。農作業時の生体信号による精神的な負荷の評価指標の検討は十分でない。近年進んでいるウェアラブルな生体情報計測システムにより心電図・脈波・血圧・加速度等など農作業中の作業者の運動情報と生体情報が同時計測できるようになってきたため、農作業という特殊な環境下で適切に精神的負荷も反映するような生体信号の解析手法確立が期待される。これは、農作業死亡事故が一般の老像災害に対して10倍程度と極めて高い状況が継続しており、そのような社会問題解決のためにも重要である。従来、農作業中の疲労度の検出のために用いられてきた心電計や脈波計のデータ解析手法は周波数分析、一般的な心電図解析法のRR比分析、もしくはRR比の相空間プロットなど既存の手法にとどまっている。一方、心循環系はペースメーカ(洞結節)によって駆動されるが、呼吸系、交感神経系、動脈内血圧応答のフィードバックにより複雑な非線形力学系による変動現象であるため(Ivanov, P, Nature, 1999)、非線形時系列解析などの適用によって、現象を支配するダイナミクスに関連したより多くの情報抽出法開発の試みが長年にわたってなされてきた。津田ら(Int. J. Bif. & Chaos, 1992)の業績はその先駆である。しかし、現実の心電や脈波データは、内的・外的な様々な揺らぎや外乱によってカオス解析手法が確立されたとは言えない状況であった(Glass, Chaos 19, 2009)。

2. 研究の目的

本研究では心循環器系が高次の強制入力非線形力学系であると捉え、線形解析と非線形時系列解析の融合による心電-脈波同時計測信号の解析手法を提案する。心電-脈波計を身体各部に配置して取得した時間空間変動による生体情報の可視化・定量化を目指す。特に、心電と脈波を同時計測することによって、入力としての心電と出力としての脈波としてこれらの相互関係に着目し、適切な時間遅れの設定など、心電と脈波を相補的に用いることの有効性を明らかにし、心電

脈波の解析に有効な非線形時系列解析・カオス解析の適用方法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

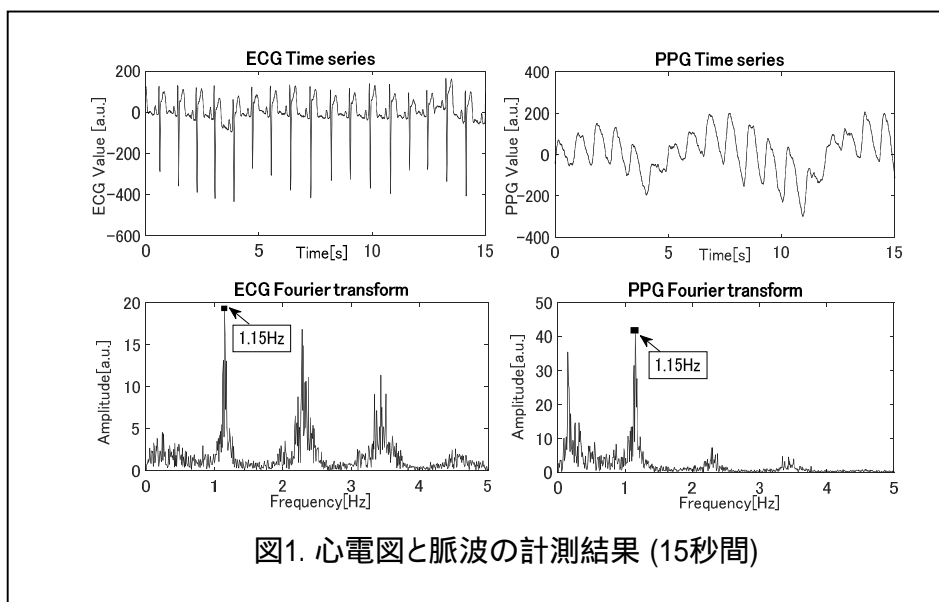
(1) 生体計測

心電-脈波信号の同時計測実験は、騒音の少ない研究室において座位安静状態で5人の被験者に対して実施した。被験者は、健康状態が良好で年齢が21~24歳の男性である。各試行における計測時間は5分間とし、各被験者に対して3試行の計測を実施した。なお、各試行の間には30秒程度のインターバルを設けている。各被験者に対して、Silmee™ Bar type を動の影響の少ない胸部の鎖骨下約3cmの付近にゲルパッドを用いて貼り付け、BACS デテクターを人差し指に装着した。Silmee™ Bar type では、胸部付近の心電信号と脈波信号を、BACS デテクターで指尖部の脈波信号をそれぞれ計測している。また、サンプリング間隔はSilmee™ Bar type では心電信号と脈波信号ともに0.008秒、BACS デテクターでは0.005秒に設定した。

(2) 解析手法

複雑な挙動を示す観測時系列信号である心電信号と脈波信号に対して、適切に包括的非線形時系列解析を実施するため、特にダイナミクスの再構成における時間遅れの設定方法に着目した。得られた心電-脈波信号に対して、(1)心拍間隔の変動、(2)信号の位相間隔の変動、(3)心電波形の特性に基づいて、主に3つの異なる時間遅れを用いた場合の非線形時系列解析の精度向上や適用範囲の拡張可能性を明らかにした。非線形時系列解析においては、時間遅れ埋め込み、誤り近傍点(false nearest neighbors)による埋め込み次元推定、実験的ポアンカレ断面、遷移誤差、正規化決定論的非線形予測、サロゲーション、を包括的に適用した。それに先立って、フーリエスペクトル、相互相関

関数を求めた。ヒルベルト変換を用いた解析的位相解析法(Analytical Phase Analysis: APA)による位相検出も採用した。



関数を求めた。ヒルベルト変換を用いた解析的位相解析法(Analytical Phase Analysis: APA)による位相検出も採用した。

4. 研究成果

(1) 脈波の実験的ポアンカレ断面の精度向上

脈波のポアンカレ断面解析においては、心電波形から抽出した心拍間隔を用いて脈波信号のアトラクタの再構成における埋め込みの時間遅れを心拍毎に算出した(提案法)。脈波信号の基本周期の1/4に固定して実施した場合(従来法)よりも心拍のゆらぎによる影響を除去できる可能性を示した。また、脈波のヒルベルト変換によって得られた位相信号を用いて、埋め込みの時間遅れ算出することによっても、従来法より精度よく脈波のポアン

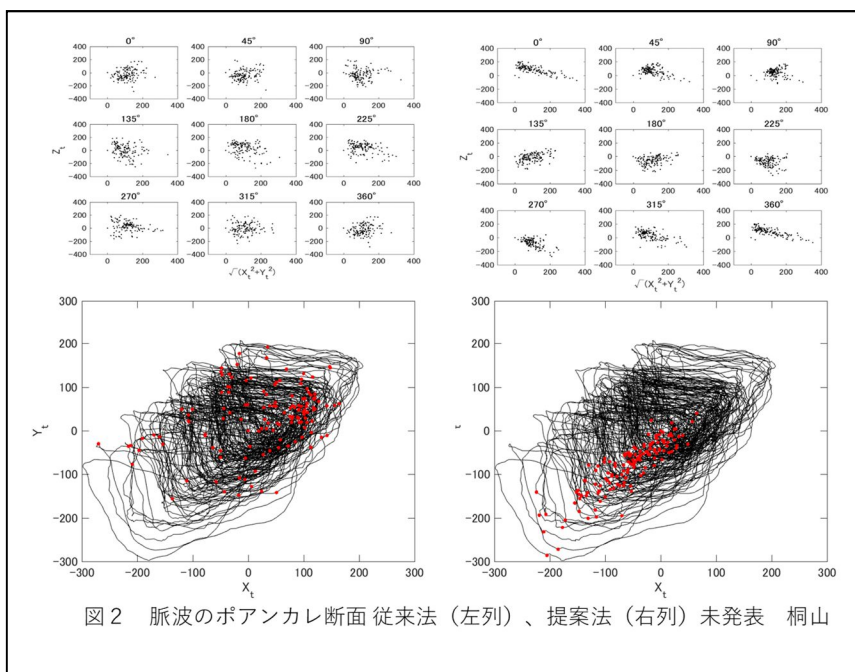


図2 脈波のポアンカレ断面 従来法(左列)、提案法(右列) 未発表 桐山

カレ写像の推定が可能となった。心電時系列では、従来法の時間遅れ(ラグ)では明瞭なダイナミクスが再構成できないため、これまでは相空間上の相軌道の定性的な観察もしくは従来からのRR間隔の時系列に対する揺らぎ部分を解析対象とするにとどまっていたが、本研究では心電図の特有の時間遅れ(ラグ)設定法を明らかにすることにより、より明瞭に位相軌道を再構成できた。また、瞬時位相を用いた埋め込みの有効性も確認できた。

(2) 心電図と脈波の時間遅れ同定

心電図と脈波の相互相関関数を計算し、両者のタイムラグ(心電-脈波タイムラグ)を求めた。心電-脈波タイムラグは被験者による影響が5%の危険率で有意であった。そのため、生体情報の統計量として利用可能性を示した。

(3) 再構成ダイナミクスにおけるノイズ局所鋭敏性

脈波の再構成ダイナミクスに対してノイズ局所鋭敏性の存在を明らかにした。時間遅れ埋め込みによってダイナミクスを再構成し、局所遷移誤差を計算した。その際、時系列データに対してノイズ滴定を行い、再構成されたアトラクタにおいてノイズに対して感度の高い部分とそうでない部分が明確に示された。ノイズ局所鋭敏性は、生体情報の抽出に有用な方法と考えられる。また、サロゲートアルゴリズムによる決定性の確認を行った。

(4) 集合時系列における周期成分検出

ヒルベルト変換を用いた解析的位相解析法(Analytical Phase Analysis: APA)の非線形振動子集団への適用するために汎用的なMatlabアルゴリズムで実装した。特に、時系列からのヒルベルト変換を用いた位相検出の有効性が期待出来ることが明らかとなった。これを集合時系列に適用することによって、周期成分割合とともに、要素時系列間の位相同期の検出が可能であることを示した。

(5) QS 間隔に着目した心電ダイナミクス再構成

心電図のQS間隔に着目し、その1/4に時間遅れを設定することによって、心電においてより滑らかに構造が明瞭なダイナミクスが再構成できることを示した。これによって、推移誤差、正規化決定論的非線形予測などの非線形時系列解析手法が効果的に適用できることになる。

(6) RGB画像による脈波計測

一般的なシリコン素子を用いたカメラによるRGB画像演算により画素の集合領域を単位とした脈波検出システムを試作した。空間的な非線形時系列解析が可能となったデータセットの取得が可能となった。

(7) 受賞等

2019年度農業食料工学会論文賞(研究論文): 桐山水響・酒井憲司, 脈波ポアンカレ断面における心電信号の活用

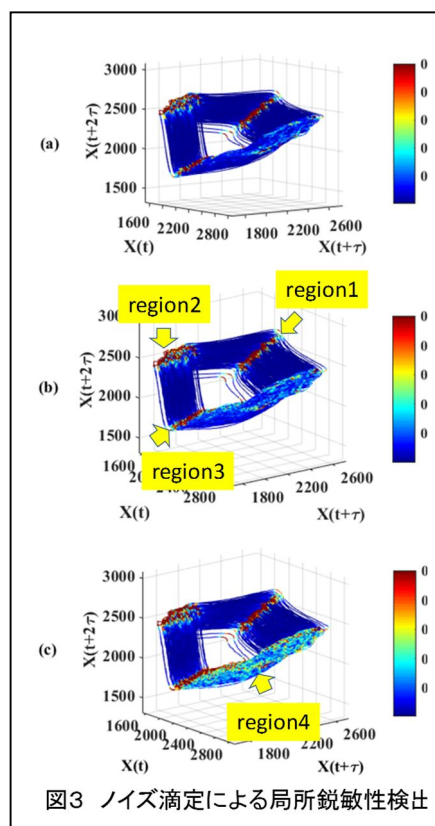


図3 ノイズ滴定による局所鋭敏性検出

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 桐山水響・酒井憲司	4. 巻 80(3)
2. 論文標題 脈波ポアンカレ断面形成における心電信号の活用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 192-199
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 Nina Sviridova, Kenshi sakai	4. 巻 -
2. 論文標題 Local Noise Sensitivity in Human Photoplethysmogram	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applicatio	6. 最初と最後の頁 427-430
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 該当する

1. 著者名 Akira Ishibashi, Kenshi Sakai	4. 巻 11479
2. 論文標題 Dispersal of allergenic pollen from <i>Cryptomeria japonica</i> and <i>Chamaecyparis obtusa</i> : characteristic annual fluctuation patterns caused by intermittent phase synchronisations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1038/s41598-019-47870-6	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 Kenshi Sakai, Yoshinobu Hoshino, Awadhesh Prasad, Atsuko Sugawara Fukamachi & Akira Ishibashi	4. 巻 15568
2. 論文標題 Period-3 dominant phase synchronisation of <i>Zelkova serrata</i> : border-collision bifurcation observed in a plant population	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1038/s41598-019-50815-8	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

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kenshi Sakai
2. 発表標題 Agricultures and Nonlinear Dynamics :Phase synchronizations of perenial crops, modeling and analysis.
3. 学会等名 The Conference of Nonlinear Systems and Dynamics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenshi Sakai
2. 発表標題 Nonlinear time series analysis on short noisy ensemble data
3. 学会等名 IMI一般研究_研究集会(II)「数理農学における時系列データのモデル化と解析」(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桐山水響, 酒井憲司
2. 発表標題 心電 脈波信号への包括的非線形時系列解析
3. 学会等名 農業食料工学会 年次大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenshi Sakai
2. 発表標題 Introduction to Nonlinear Dynamics-Synchronization, Networks and Pattern Emergence -
3. 学会等名 Intelligent Agriculture Production Technology Alliance, Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒井憲司
2. 発表標題 カオス農学展望
3. 学会等名 京都大学数理解析研究所研究集会 数理農学の基盤づくりに向けて（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenshi Sakai
2. 発表標題 Noise Induced Phase Synchronization of Pistachio Productions in California
3. 学会等名 Symposium on Nonlinear Dynamics and its Application to Agriculture 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桐山水響・酒井憲司
2. 発表標題 心電 脈波同時計測信号の解析手法の検討 - 農作業中の疲労状態の可視化に向けて -
3. 学会等名 日本農作業機学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 周期推定装置，方法，及びプログラム	発明者 酒井憲司	権利者 東京農工大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-30728	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

東京農工大学 研究者一覧
<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/1/0000021/profile.html>
東京農工大学 研究者プロフィール
<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/1/0000021/profile.html>
東京農工大学 研究者プロフィール
<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/1/0000021/theses1.html>

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