

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19784

研究課題名（和文）マイクロ波ドップラーセンサを用いた非接触生体認証技術

研究課題名（英文）Non-Contact Biometric Identification and Authentication Using Microwave Doppler Sensor

研究代表者

和泉 慎太郎（Izumi, Shintaro）

神戸大学・システム情報学研究科・准教授

研究者番号：60621646

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では非接触で計測された心臓拍動の個人差を利用して生体認証を行う方法を提案した。マイクロ波ドップラーセンサを用いて体表面の微小な振動を計測することで、非接触で心臓の拍動を計測することができる。心臓拍動のパターンには個人差があり、これを機械学習を用いて学習することで個人を識別できることを示した。また、データの前処理に時間周波数解析を用いることでノイズの影響を低減できることを示した。実測評価を行い、96.15%の精度を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物理的なIDやパスワードを必要としない生体認証は盗難やなりすましによる不正アクセスの危険性の低い優れた認証方法である。顔や指紋、虹彩、静脈、掌紋、耳介など様々な生体情報が利用され、実用化も進んでいる。しかしこれらの認証方法にはそれぞれ長所と短所が存在する。認証精度とセキュリティを高めるためには多様な生体認証方式を組み合わせることが有効であり、新しい原理に基づく認証方式が求められている。そこで、本研究では非接触かつ非侵襲で計測可能な生体情報を用いた新しい生体認証方式を提案した。提案手法では生成モデルを用いた機械学習を導入することで、従来の課題であった精度を向上できた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a method for biometric authentication using individual differences in heartbeats measured without contact. A microwave Doppler sensor was used to measure minute vibrations on the body surface to extract heartbeat. Because there are individual differences in the pattern of heartbeats, the proposed method can identify individuals using a machine learning approach. We also showed that the effect of noise can be reduced by using time-frequency analysis. The evaluation results show that 96.15% accuracy was achieved.

研究分野：生体医工学

キーワード：生体認証 マイクロ波ドップラー 非接触心拍計測

1. 研究開始当初の背景

近年、腕時計型や貼付け型のウェアラブルデバイスを用いた生体情報の常時計測が注目されている。このようなデバイスでは、ユーザビリティ（重量やバッテリー寿命、装着性）と可用性（ノイズ耐性と個人差の排除）が普及に向けた大きな課題となっている。

研究代表者はこれまでに、センサと信号処理回路の低消費電力化技術と、ノイズ耐性向上を目的とした信号処理アルゴリズムの開発を行っている。特に複数方式のセンサを組合せた非接触での生体信号計測に注目しており、その一環としてマイクロ波ドップラーセンサを用いた心拍変動の解析を行ってきた。その研究の中で、センサ出力の周波数特性に大きな個人差が見られることが判明し、汎用的な信号処理アルゴリズムの開発に向けた課題となっている。

この周波数特性の個人差を生体認証に応用できるのではないかと考え、本申請課題の研究構想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非接触で計測可能な生体情報を使った新たな生体認証方式の実現である。近年、顔や指紋のような生体情報から特徴量を抽出し、その特徴から個人を識別する生体認証が注目されている。生体認証はパスワードを記憶して入力する手間がなく、物理的なID情報を持ち運ぶ必要もないため、利用者の負担が少ない。さらに、他人にパスワードを盗まれる危険が少なく、成りすましも難しいため安全な認証が可能である。認証精度とセキュリティを強化するためには様々な生体認証方式を組み合わせることが有効であり、新しい原理に基づく認証方式が求められている。

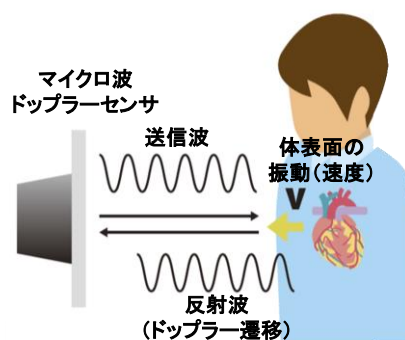


図1 非接触生体計測の概要

本研究では特に、心臓の拍動に着目する。心筋の厚みや柔軟性、電気刺激の伝わり方、血管の弾性等には個人差があるため、例えば心電図を使ってその特徴量を抽出し、個人を識別する技術がこれまでに提案されている。同様の情報をマイクロ波ドップラーセンサによって非接触で計測し、生体認証に利用可能な特徴量を抽出する手法を開発する点に本研究の新規性がある。マイクロ波ドップラーセンサは、マイクロ波を計測対象物に照射し、反射波の周波数が対象物の速度に応じてドップラー遷移することを利用して、非接触で速度を計測する。速度分解能の高いマイクロ波ドップラーセンサを用いることで、心臓の拍動に合わせて微小に振動している体表面の速度を詳細に捉えることができる（図1）。

3. 研究の方法

本研究ではまず、マイクロ波ドップラーセンサの出力から心臓拍動の特徴量を抽出するアルゴリズムの開発を行う。図2は心電図(a)と、同時に計測したマイクロ波ドップラーセンサの出力(b)、及びその周波数解析結果(c)を示している。心電図と同期した拍動波形が得られていることがわかる。また、心臓の収縮・拡張に伴う体表面の振動を精度良く計測できていることがわかる。センサの特性として、速度に応じた周波数が正弦波として出力される。周波数解析を行うことで体動等のノイズから心拍成分を分離することができる。ただし、図2に示したような細粒度で解析するためには、100ミリ秒程度の計測データに対して50 Hz以下の成分を解析する必要がある

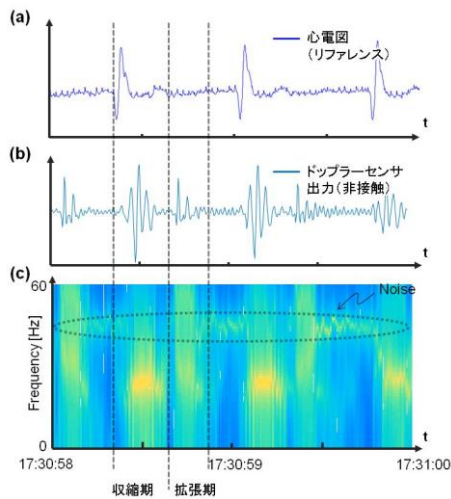


図2 心電図とドップラーセンサ出力の比較、及び周波数解析結果例

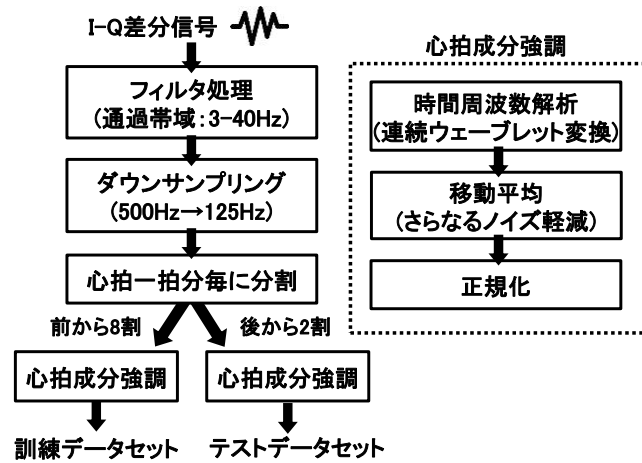


図3 データセット生成フローチャート

ため、フーリエ変換ではなくARモデル等に基づく解析を行う。また、研究開始当初はノイズの分離が不十分であったため、複数センサを用いたノイズ削減手法も検討する。次に、認証精度を向上させるための手法を検討する。センサと人体との位置関係や、時間経過に伴う体格や心血管状態の変化、心拍数の変動などが特徴量を変化させることが懸念されるため、その影響を明らかにし、対策手法を提案する。

4. 研究成果

本研究では非接触かつ非侵襲で計測可能な生体情報を用いた新しい生体認証方式の実現を目的として、24GHz帯マイクロ波ドップラーセンサを用いた心拍計測による個人の識別手法を提案した。研究開始当初に10名の実測データを用いた検討を行い、ドップラー波を用いた場合にも心電図を用いた先行研究と同様に個人の識別・認証が可能であることを示した。しかし、体動ノイズによる影響は解消されておらず、人手で設定・調整された基準によってノイズが大きいデータを排除する必要があった。そこで本研究ではディープラーニングに注目し、Conditional Variational Autoencoder (CVAE)を用いた手法の検討を行った。

4.1. データの前処理とデータセットの構築

データは体表面から一定の距離に配置したマイクロ波ドップラーセンサを用いて計測する。また、計測時にはドップラー波に加え、光電式容積脈波センサ (PPGセンサ) を用いて脈波を指先で計測し、リファレンスとして使用する。計測した時系列波形を用いて機械学習を行うために、データセットを作成する。一連の処理フローを図3に示す。

計測により得られた時系列波形には、胸壁変位によるドップラー波の他にも、ハムノイズ等の環境ノイズや、体動ノイズが含まれている。I波とQ波の両方に含まれたコモンモードノイズを軽減するために、I波とQ波の差分をとる。また、胸壁変位には呼吸による変位と拍動による変位の2つが含まれており、前者は本研究においては必要ない。そこで、バンドパスフィルタによってノイズや呼吸の影響を減衰させる。フィルタリング後は、高周波成分が十分に減衰されているので、信号のサンプリングレートを125Hzにダウンサンプリングする。

次に、PPGセンサで計測した脈波のピークを基準に、ドップラー波を心拍一拍分ずつに分割する。ここで、指先で脈波を計測しているために計測脈波のピークと心拍には時間差があることを

考慮して分割する範囲を決める。本研究では収縮期と拡張期の両方の特徴を捉えるために、一回の拍動に対応するドップラー波の期間を脈波のピークの0.5秒前からピークの0.1秒後に設定した。また、分割範囲を前後に1から4サンプルずらして同様に分割することでデータ数を9倍に水増しした。これはData Augmentationと呼ばれるテクニックの一例であり、学習時のデータ不足の解消に加え、入力的时间軸方向のずれに対するロバストネスを獲得できる。

分割後はそれぞれのドップラー波について時間周波数解析によるパワースペクトル密度(PSD)の推定を行ったのち、8:2の割合で訓練データとテストデータに分ける。その後、ノイズの影響をさらに減らすために連続している5つの心拍間で移動平均をとる。最後に得られたPSDを最大値1、最小値0に正規化する。マイクロ波ドップラーセンサを用いた心拍計測は、ノイズ耐性が低いという課題があった。ノイズは、センサ回路内部で発生するものと外部からセンサ回路に影響を及ぼすもの、その他の原因によって発生するものの3つに大別できる。心拍計測においては特に、計測対象者の体動によるノイズとセンサに加わる機械的な振動によって生じるノイズが含まれており、時間軸上で拍動を検出することが困難である。従って、非定常な信号からパワースペクトルの時間変化を求める時間周波数解析が必要である。時間周波数解析として有名な手法のひとつに短時間フーリエ変換(STFT)がある。しかしSTFTでは、フーリエ変換の不確定性原理により、周波数分解能と時間分解能を両立させることが難しい。そこで本研究ではより短いウィンドウ長で分解能の高いアルゴリズムとしてARモデルを用いる方法と連続ウェーブレット変換による方法の検討を行った。後述する学習推論結果から精度を評価し、最終的に連続ウェーブレット変換を選択し、Morletウェーブレットを用いて時間周波数解析を行った。実測データとウェーブレット変換によって得られたPSDの一例を図4に示す。

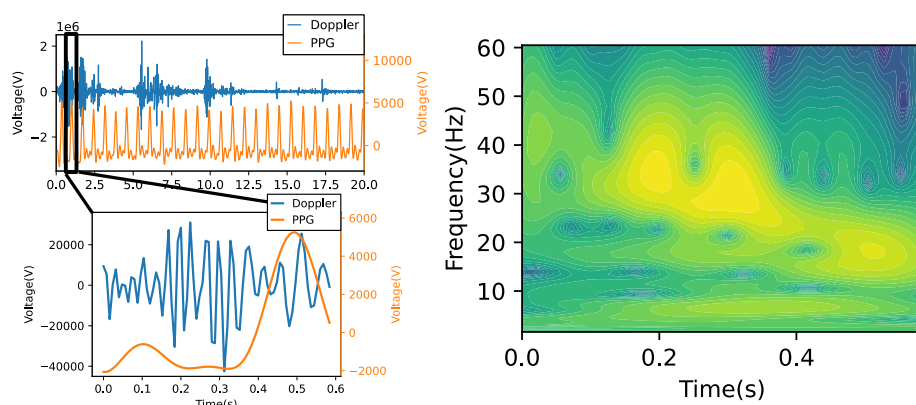


図4 実測したドップラー波と時間周波数解析結果の一例

4.2. 機械学習を用いた個人識別

機械学習を用いた個人識別は、学習データに含まれる人物であるかどうかを判定する、多クラス分類問題として捉えることができる。ドップラーセンサを用いた生体認証に関しては、サポートベクターマシン(SVM)やナイーブベイズ(NB)、Deep Convolution Neural Networks(DCNN)などを用いる手法が提案されている。

本研究では、確率的深層生成モデルである Conditional VAE(CVAE)を用いた教師あり学習に着目する。Auto Encoder(AE)は、入力を Encoder で畳み込みを行って潜在変数に次元圧縮し、Decoder で圧縮されたベクトルから入力を再現した出力を生成するニューラルネットワークである。この時、潜在変数に確率分布を導入したものが VAE (Variational

Autoencoder, VAE)であり、さらに Encoder と Decoder の入力にラベルを追加して、確率分布に条件を与えたものが CVAE (Conditional VAE) である。CVAE を用いた個人識別の手順を以下に示す。

1. 作成した PSD に、被験者を識別するラベルを紐づけた訓練データセットで CVAE を訓練する。
2. 訓練済み推論モデルを用いて、訓練データとは異なる PSD(ラベルなし)からラベルを推論する。

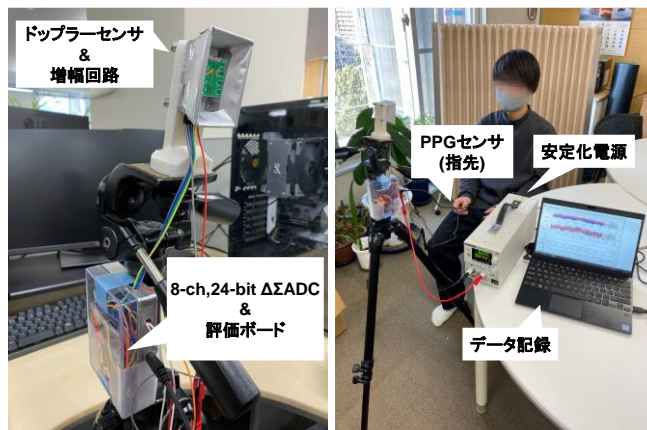


図 5 測定の様子

4.3. 性能評価

計測では 22 歳から 60 歳の男女 20 人(男性 15 人、女性 5 人)を対象に、60 秒間、通常通り呼吸をしながら座っている状態の心拍を計測した(図 5)。被験者とセンサの距離は 50cm、75cm、1m の 3 種類に設定した。計測した 20 人のドップラー波から作成した PSD のデータセットを用いて、CVAE を用いた提案手法の分類精度評価を行う。

本研究では、センサと被験者間の距離を 50cm、75cm、100cm で計測した 3 種類のデータセットを作成している。これらのデータセットを用いて、同じ距離で計測したデータのみを使った検証に加え、すべての距離のデータを混合して学習、推論する検証を行なった。各手法によって得られた 20 人の被験者の分類精度(accuracy)を表 1 に示す。同じ距離で計測されたデータ同士で認証を行った場合には、提案手法に優位性は認められなかったが、3 種類全てを学習・推論に用いた提案手法は、同じ条件下での従来手法よりも大幅に高い認証精度を示した。これは、複数の距離で計測したデータを学習時に用いることで、認証時のセンサと被験者間の距離のばらつきにロバストな分類器を訓練できることを示している。

また提案手法において、分類対象人数を変更した場合の accuracy を表 2 に示す。5 人から 20 人の範囲では、人数の増減と accuracy の間に相関関係は見られなかった。

表 1 提案手法(CVAE)と従来手法の精度(%).

手法	測定距離			
	50cm	75cm	100cm	混合
CVAE	95.56	99.81	96.17	96.15
従来手法	99.44	100.00	96.11	73.33

表 2 被験者数と精度 (%).

被験者数	測定距離			
	50cm	75cm	100cm	混合
5	96.54	100.00	92.84	95.14
10	96.79	99.51	94.94	96.21
20	95.56	99.81	96.17	96.15

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yoshida Seiya, Izumi Shintaro, Kajihara Koichi, Yano Yuji, Kawaguchi Hiroshi, Yoshimoto Masahiko	4. 巻 66
2. 論文標題 Energy-Efficient Spectral Analysis Method Using Autoregressive Model-Based Approach for Internet of Things	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers	6. 最初と最後の頁 3896 ~ 3905
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCSI.2019.2922990	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7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 真鍋歩夢, 和泉慎太郎, 落合拓光, 川口 博
2. 発表標題 マイクロ波ドップラーセンサを用いた心拍計測における個人差の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会MICT研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Watanabe, Y. Yano, S. Izumi, H. Kawaguchi, K. Takeuchi, T. Hiramoto, S. Iwai, M. Murakata, M. Yoshimoto
2. 発表標題 An Architectural Study for Inference Coprocessor Core at the Edge in IoT Sensing
3. 学会等名 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 落合拓光, 和泉慎太郎, 矢野裕二, 川口博, 吉本雅彦
2. 発表標題 マイクロ波ドップラーセンサを用いた心拍計測技術の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 聖也, 和泉 慎太郎, 矢野 祐二, 川口 博, 吉本雅彦
2. 発表標題 ARモデルを用いた心拍変動解析のための低消費電力アーキテクチャの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 聖也, 和泉 慎太郎, 矢野 祐二, 川口 博, 吉本雅彦
2. 発表標題 ユールウォーカー法を用いたIoTセンサ向け低消費電力周波数解析手法
3. 学会等名 LSIとシステムのワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和泉 慎太郎
2. 発表標題 心拍変動解析に向けたウェアラブル生体センサの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会ICD研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野 孝昭, 和泉 慎太郎, 川口 博, 吉本 雅彦
2. 発表標題 マイクロ波ドップラーセンサを用いた非接触生体認証
3. 学会等名 電子情報通信学会MICT研究会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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