

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12700

研究課題名（和文）生体情報の無意識・非接触・常時測定の研究

研究課題名（英文）Unconscious, non-contact, and continuous vital sensing

研究代表者

佐藤 高史（Sato, Takashi）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：20431992

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）：ユーザが特別の意識をせずに情報を取り込み、また情報を入力する無意識コンピューティング環境において、生体情報は最も代表的であり最も重要なデータとなる。本研究では、電界センサやカメラ等により無意識、非接触での連続的な生体情報の取得を目指し、その要素技術の開発に取り組んだ。近接導体の位置や形状の変化を静電容量の変化として求めるセンサを開発し、脈波データを得た。また、体動等によるノイズを含む脈波データをもとに、加速度センサデータを援用して心拍数を精度よく推定する信号処理手法を開発した。さらに、カメラにより撮影された動画像から疾病やストレス状態の推定に有効な心拍間隔の抽出を行う手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Vital information is representative and important information in the unconscious computing environment, in which information is sensed and recorded without users' attention. In this project, sensing and signal processing techniques are developed for enabling accurate data acquisition through an electric field sensor or through a camera. An electric field sensor has been developed that senses pulse wave as the change of the position or the shape of nearby conductor. A signal processing flow that accurately extracts heart rate from the measured pulse wave, which is contaminated with motion artifacts, is developed. In addition, heart rate interval that is useful to estimate disease or stress condition, is estimated from video images.

研究分野：集積回路工学

キーワード：心拍数推定 心拍間隔推定 非接触測定 生体情報 信号処理

## 1. 研究開始当初の背景

無意識コンピューティングの時代が目前となっている。Google glass に代表される新たなプラットフォームにより、一般ユーザが特別の意識をせずに情報を取り込み、また出力する環境が我々の身の回りに整えられつつある。生体情報はその中で主要な情報となるが、無意識、かつ非接触で生体情報を常時取得し続けることができるシステムは未だ存在しない。

このような状況において、上記を可能とする新たなプラットフォーム創出とそれによる新市場の確保は、わが国の将来の情報産業において重要である。加えて、収集される膨大な情報は、健康管理や予防医学への貢献に留まらず、人間と人間の心理的な結びつきや、行動の分析等、今後の心理学、社会学、脳科学等、様々な分野に活用される貴重なデータとなり得る。

我々はこれまで、微細化の著しい集積回路分野において、回路方式やセンシング技術に関する成果を挙げてきた。これらの技術を微細化とは逆に、広い空間、広い面積でのセンシングに応用する。生活空間スケールでのセンシング技術によりデータ取得範囲を広げ、これまで為し得なかった空間全体の常時センシングの実現を狙う。

## 2. 研究の目的

例えば現在、活動量や心拍、血圧などの生体情報を連続的に取得するには、胸部や手首に専用機器を装着する必要がある。機器を装着して日常生活を行うことは快適であるとは言えず使用者にとっての負担が大きだけでなく、体動による測定精度の低下や電池動作による観測時間の制約などの様々な課題がある。

これに対し我々は、世界のいたるところに存在する「居住空間」をプラットフォームとして、その中にいる者の生体情報を被験者に意識させることなく、常時観測するセンシングシステムを開発する。特に、床や壁などの大面積を覆うことのできる電磁界センサや、天井等に取り付けられたカメラ等の映像を用いることにより、非接触で生体情報を取得する方法について検討する。生体情報としては、心拍数や、血圧等と相関があるとされる指標を取得することを目的とする。

本研究では上記のような常時観測を可能とするセンシングシステムの実現を目指し、主に、(1)生体情報取得に効果的な電磁界センサの構造、(2)電磁界センサの駆動回路、(3)センサデータから生体情報を取得する信号処理技術、および、(4)非接触での生体情報取得に必要な信号処理、のそれぞれについて検討を行いその可能性と効果的な実現方法を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 電磁界センサの構造については、電磁界シミュレーションにより、人体に対する検出感度の高い構造を決定する。本研究で対象とする電磁界センサは、基板上に規則的な形状の電極パターンが形成された構造を基本とし、平面に構成でき、かつ印刷技術での形成が容易であることを特徴とする。センサ性能の指標として、感度、浸透深さ(人体内へ電磁界が到達可能な深さ)等を用いるが、これらはセンサとその周辺環境を電気的な等価回路として表現し、その回路パラメータの変化として捉えることが出来る。事前検討により、上記センサ性能はトレードオフの関係にあることが分かっている。複数の電極パターンについて電磁界シミュレーションを実施し定量的に性能を比較、評価することで、用途に応じた適切なセンサ構造を探る。

また、既存の電磁界センサでは大面積化が考慮されておらず、センサ面積に対するスケラビリティに乏しいものが多い。さらに、生活空間全体でのセンシングを実現するためには複数人の同時検出についても検討が必要となるが、複数物体の検出に対応した電磁界センサは少ない。本研究では大面積化および多人数検出への拡張性を持ったセンサ構造を検討し、その性能について評価を行う。

(2) 電磁界センサの駆動回路については、シリコン集積回路の製造プロセスを用いて作成することはもちろん可能であるが、センサと同様の印刷プロセスにより構成することが可能となれば、チップをセンサシートへ貼付け、配線する実装の手間を不要とすることが出来る。またセンサ表面の凹凸をなくすることが出来る。製造自体も一層容易となることから、コストを削減し、製作時間を大幅に短縮できる可能性がある。

印刷プロセスで作成可能な半導体デバイスとしては有機トランジスタが有力な候補として挙げられる。有機トランジスタは現在活発に研究が進められている新たなデバイスであり、その回路設計手法は未だ確立されていない。本研究では有機トランジスタを用いた駆動回路の実現に向け、デバイスの物理特性に基づく回路シミュレーションモデルの構築、およびそれを用いた回路構成方法について検討を行う。

(3) センサデータの信号処理方式としては、まず、人体近接によるセンサ値の時間的変化から、血流の周期性を抽出する信号処理方式を検討する。取得したデータは、ノイズフィルタにより S/N 比を向上させた後、フーリエ変換等の周期信号を抽出する信号処理技術や、機械学習技術を応用して心拍情報を抽出する。

さらに、複数のセンサを同期動作させることにより、複数個所で抽出される心拍のタイ

ミング差として定義される脈波伝播速度を求め。脈波伝播速度は血圧と相関がある、との報告があり、本研究においては、血流、および血流に伴う血管の膨張収縮を高精度に検出し、これをもとに血圧等の生体情報を推定する方法について検討する。

(4) 完全非接触での生体情報の取得を行うため、カメラにより撮影された動画像から心拍間隔推定を行うことを検討する。血液が特定波長（緑色）の光をよく吸収することに注目して、血流に伴う画像の輝度変化から心拍情報を抽出する方法について検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 人体の非接触センシングに向け、格子状電極を持つ電界センサを提案した。電界センサは、センサ近傍の電界の変化を計測できるセンサであり、その電界変化の観測値から人体等の導電体の接近を検知することができる。既存の電界センサは図 1(a)のように 4 方に電極を持つ構造のものが一般的であり、4 つの電極の観測値からセンサ上空の導電体の位置を検出することができる。しかし、この方式では単一物体の位置検出しか行うことができず、またセンサを大面積化すると電極間距離が増大し精度が悪化するという課題があった。

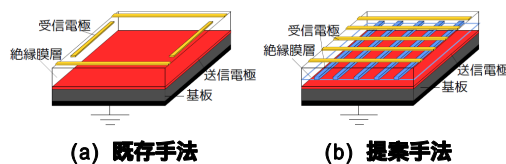


図 1 電界センサの電極構造

そこで本研究では図 1(b)に示す格子状の電極構造を新たに提案した。提案電極構造は、縦横  $N$  本の電極が格子状に交差するように配置されており、合計  $2N$  本の電極からの観測値を得ることができる。本構造によりセンササイズに対する拡張性が得られるため、本研究で狙う大面積センサへの適用が可能となる。また、既存手法では 4 本であった電極が  $2N$  本に増加しているため、複数物体の位置検出および位置推定精度の向上が見込まれる。今回は提案手法による位置推定精度の向上効果を確認するため、電磁界シミュレーションを用いた評価実験を行った。

実験結果を図 2 に示す。(a), (b)はそれぞれ既存手法と提案手法による、単一接地導体の位置推定誤差の分布を示している。既存手法では誤差の大きい領域が存在するが、提案手法ではそれが改善していることが確認できる。位置推定精度は平均で 24%向上する結果となった。

本研究成果により、人体検出に向けた電界センサの大面積化に有用な電極構造が明ら

かとなった。本センサ構造を床や壁等に適用することにより、居住空間全体の覆うセンサの実現が期待される。

(2) 床や壁を覆う大面積センサを実現する際、そのセンサ電極および周辺回路を実装する基板はフィルムのような柔軟性を持つ材料が好ましい。柔軟な素材上へのセンサおよびその周辺回路の実装に向け、有機トランジスタに着目し回路実現のための基礎検討を行った。

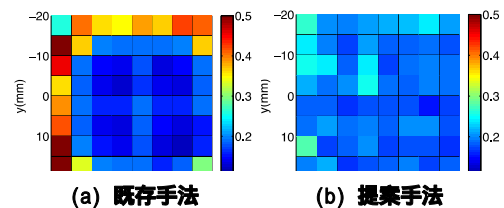


図 1 位置推定精度の比較

有機トランジスタは有機材料からなる半導体を利用したトランジスタであり、その軽さ、柔軟性、製造コストの低さ等の観点で期待が集まっている新しいデバイスである。しかしこれらの利点の反面、通常シリコン半導体とは異なるデバイス特性を示すため、既存のシリコン向けの回路設計手法やシミュレーション環境をそのまま利用することができない。本研究では有機トランジスタを用いた回路設計を支援するため、有機トランジスタの回路シミュレーションモデルの構築を行った。

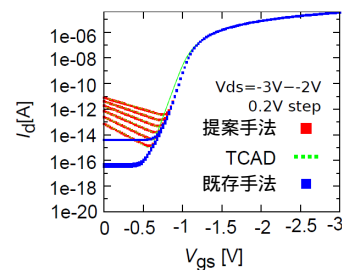


図 2 有機トランジスタモデルの電流電圧特性

有機トランジスタの特徴の 1 つに低電圧領域での漏れ電流特性があるが、既存の回路シミュレーションモデルでは十分に考慮されていなかった。そこで本研究では物理シミュレーション(TCAD)を元に上記の特性を解析し、電流特性を正確に再現できるシミュレーションモデルを新たに提案した。提案モデルの電流電圧特性を図 3 に示す。図中の緑線は物理シミュレーションにより得られた特性を示している。既存手法(青点)は低電圧領域で物理シミュレーション結果と大きく乖離しており、またドレイン-ソース間電圧の依存性を表現できていないが、提案手法(赤点)は全領域でよく一致することが確認できた。本成果として得られたトランジスタモデ

ルを用いることで、有機トランジスタを用いた大規模な回路のシミュレーションを正確に行えるようになる。これにより、大面積センサの周辺回路をセンサ電極と共に、柔軟な素材上に構成できるようになると期待される。

(3) センサから得られた信号から生体情報を取得する信号処理技術として、粒子フィルタを用いた心拍数推定アルゴリズムの提案を行った。前節までにおいて検討を行った電界センサおよび測定回路を用いたセンシングシステムにより生体情報を取得することが当初の目的であったが、観測される信号には大きなノイズが含まれることが検討により明らかになった。特に被験者の体動による影響が非常に大きく、これらによるノイズを効率的に除去するための信号処理アルゴリズムについて検討を行った。

まず、非接触センシングの前段階として、接触型センサである光電式容積脈波計 (PPG) から得られた信号から心拍数を正確に推定することを目標とし、アルゴリズムの検討を行った。PPG は腕等に取り付けたバンド型のセンサデバイスにより計測することができるが、体動の影響による大きなノイズが混入する。本研究では粒子フィルタと呼ばれる統計的手法を用い、時系列情報の相関を利用してノイズに頑健な心拍数推定を行う手法を提案した。提案手法では心拍数の推定値を確率分布として表現し、各時刻での推定値候補を複数考慮する。これにより、ノイズにより一時的な推定誤りが発生した場合でも、他の候補値を手掛かりとして正しい推定値に復帰することが可能となる。また、体動ノイズをより効果的に低減するため、加速度センサのデータも活用して確率分布を計算する。

12 人の被験者データを含むデータセットを用い、提案手法を用いて心拍数推定を行った結果を図 4 に示す。既存手法と比較して誤差を平均 8.6%低減することができた。また、提案手法は既存手法に比べて簡易なアルゴリズムを用いており、実行速度についても約 20 倍の高速化を達成した。

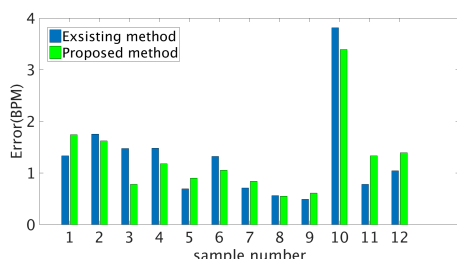


図 2 提案手法による心拍数推定精度

本研究成果により、ノイズを多く含むセンサデータからも生体情報を頑健に取得できることが明らかとなった。近年利用が広がっているスマートウォッチ等の機器での、正確かつ低消費電力な心拍数推定に有用である。また本アルゴリズムを用いることで、電界セ

ンサ等を用いた場合にも生体情報の取得精度が向上することが期待される。

(4) 非接触で得られた信号からの生体情報の取得に向け、カメラにより撮影された動画画像から心拍間隔推定を行う手法を検討した。また心拍間隔に加え、血圧等との相関があるとされる脈波伝播時間を取得する方法についても併せて検討を行った。

カメラにより手や顔等の肌が露出している部分の撮影を行うと、皮下の血流の変化を微小な輝度変動として観測することができる。カメラを用いることにより非接触で生体情報を取得できる利点がある反面、接触型センサに比べ、より外乱等によるノイズの影響を受けやすいという課題がある。ここで、取得したい生体情報として心拍間隔を考える。心拍間隔は心拍の一拍毎の時間間隔であり、心拍間隔を算出できれば心拍数が計算できるだけでなく、心拍間隔の変動パターンから疾病やストレス状態を推定できるとされている。これらの用途に用いるためには正確な心拍間隔の測定が要求される。カメラ画像のようなノイズの多いデータから所望の情報を得るためには信号処理アルゴリズムを工夫する必要がある。

本研究では、脈波信号に周期性があることを利用し、相関係数を用いることで正確に心拍間隔を推定する手法を提案した。提案手法により、手の動画画像から心拍間隔を推定した結果を図 5 に示す。青線が提案手法による結果であり、赤線が同時に測定した接触型センサ (PPG) のデータから求めた値である。実験結果より、提案手法を用いることで非接触センシングにおいても接触型センサを用いた場合と同等の精度で心拍間隔が測定できることが分かった。

また、手と顔を同時撮影することにより、脈波伝播時間を推定する手法の提案も行った。脈波伝播時間は人体中の血管を脈波が伝わるのに要する時間であり、異なる 2 点での脈波を観測し、その差を計測することで脈波伝播時間差 (PTTD) を得ることができる。本研究では手と顔を同時撮影した動画画像からそれぞれの脈波を検出し、それらの相関を計算することで PTTD を求める手法を提案した。提案手法により PTTD を求めた結果を図 6 に示す。実験では安静状態から一定時間息を止め、その後呼吸を再開する動作を行った。呼吸停止時には PTTD が増加することが知られており、実験結果においても同様の傾向を確認することができた。

本研究成果により、カメラを用いた非接触センシングでも、心拍間隔や脈波伝播時間等の有用な生体情報が取得できることが明らかとなった。本成果を活用することで、屋内等のカメラが設置可能な生活空間で、常時かつ非接触での生体センシングの実現が期待される。



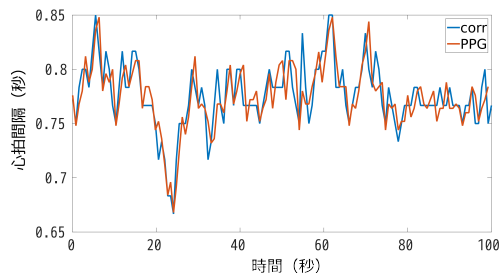


図 3 心拍間隔の推定結果

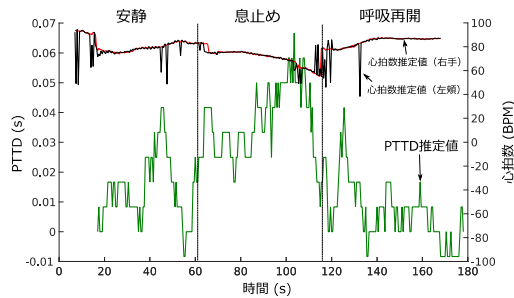


図 4 脈波伝播時間差(PTTD)の推定結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### 〔雑誌論文〕(計1件)

Yuya Fujita, Masayuki Hiromoto, and Takashi Sato, “PARHELIA: Particle Filter-Based Heart Rate Estimation from Photoplethysmographic Signals During Physical Exercise,” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 査読有, 印刷中, 2017.  
DOI: 10.1109/TBME.2017.2697911

### 〔学会発表〕(計8件)

藤田 雄也, 廣本 正之, 佐藤 高史, “手の動画像からの心拍間隔推定に関する一検討”, 電子情報通信学会総合大会, p.555, 2017年3月22日, 名城大学(愛知県名古屋市).

小西 慧, 廣本 正之, 佐藤 高史, “動画のフレーム間相関を利用した圧縮センシングの高速復元手法”, 電子情報通信学会スマートインフォメディアシステム研究会, Vol.116, No.482, pp.77-82, 2017年3月3日, 神奈川工科大学(神奈川県横浜市).

藤田 雄也, 廣本 正之, 佐藤 高史, “顔と手の連続静止画からの脈波伝播時間推定に関する一検討”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.431, 2016年9月20日, 北海道大学(北海道札幌市).  
齊藤 成晃, 新谷 道広, 小笠原 泰弘,

廣本 正之, 佐藤 高史, “有機トランジスタにおける漏れ電流特性のモデル化”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.94, 2016年9月21日, 北海道大学(北海道札幌市).

藤田 雄也, 廣本 正之, 佐藤 高史, “粒子フィルタを用いた光電脈波信号からの運動時心拍数推定手法”, 第29回回路とシステムワークショップ, pp.351-356, 2016年5月13日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市).

岸野 瞬士, 廣本 正之, 佐藤 高史, “格子状電極を用いたジェスチャ認識向け電界センサによる導電体位置推定精度の評価”, 電子情報通信学会総合大会, p.282, 2016年3月15日, 九州大学(福岡県福岡市).

藤田 雄也, 廣本 正之, 佐藤 高史, “粒子フィルタを用いた運動時ノイズに頑健な心拍数推定アルゴリズム”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.420, 2015年9月9日, 東北大学(宮城県仙台市).

小西 慧, 廣本 正之, 佐藤 高史, “圧縮センシング向けイメージセンサにおける省電力な観測行列生成回路”, 第28回回路とシステムワークショップ, pp.243-248, 2015年8月4日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県淡路市).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.pass.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 高史 (SATO, Takashi)  
京都大学・大学院情報学研究科・教授  
研究者番号: 20431992

### (2) 研究分担者

廣本 正之 (HIROMOTO, Masayuki)  
京都大学・大学院情報学研究科・助教  
研究者番号: 60718039

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし