

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04429

研究課題名(和文) 結合畳み込み型辞書学習によるクロスモーダル信号推定と非接触センシングへの応用

研究課題名(英文) Cross-modal signal estimation by coupled dictionary learning and its application to non-contact sensing

研究代表者

中静 真 (Makoto, Nakashizuka)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：10251787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、異なる複数のセンサ信号を用いる畳み込み型辞書学習の非接触センシングへの応用を提案した。畳み込み型辞書学習は、信号にスパース性を仮定することで、観測された信号を、係数列と辞書の畳み込みから生成される部分信号へ分解する方法である。本研究では、この分解法に対して、接触型センサ信号、非接触型センサ信号を用いることで辞書の学習を行い、接触型センサのための辞書を学習する、および、非接触型センサ信号から接触型センサ信号を推定する方法を提案した。提案法を、遠隔光電脈波およびドップラーセンサによる呼吸推定に適用し、既存の畳み込み型辞書学習より高い精度で信号を推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した結合畳み込み型辞書学習および部分空間スパース辞書学習により、複数の信号を同時に取り扱うことで、信号間に共通した特徴を取り出すことが可能になった。この特長により、従来までは、センサ信号から、目的とする生体信号などの特徴を示す信号を取り出すために経験的な後処理が必要であったが、ノイズの少ない接触型センサの信号を利用する事前学習により、自動的に精度よく信号が分離できるようになった。これを既存の脈拍、呼吸などの遠隔センシングに利用することで、既存のセンサからの推定精度を向上させることができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, applications of convolutional dictionary learning for non-contact sensing of human activities. The convolutional dictionary learning decomposes a signal into a set of component signals under sparsity prior. In this study, the dictionary learning is simultaneously applied to the contact sensor and the non-contact sensor. By using the proposed combined dictionary learning, the signal from the contact sensor signal is estimated from the non-contact sensor by using the combined dictionary that is prior trained. The proposed group sparse dictionary learning can obtain the pair of the dictionary that are correlated. By using this the signal that is highly correlated to the contact-sensor can be estimated from the non-contact sensor. We apply the proposed method to the remote PPG(photo-plethysmography) and the micro-wave Doppler sensor for detection of breathing. By these application, we demonstrate the estimation results can be improved by using two-different sensors.

研究分野：信号処理

キーワード：教師なし学習 信号分離 光電脈波 生体信号 信号推定 スパース信号処理 辞書学習

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人体に接触するセンサを利用せず、離れた位置にあるセンサから人の脈拍、呼吸、瞬きなどの情報を得る遠隔センシングの方法がヘルスケア分野で注目を集めている。接触センサに比べて、遠隔センシングから得られる情報は、周囲からの外乱や人体そのものに発生する振動などの影響により信頼度が低い情報となる。そこで本研究では、接触型センサからの信号を参照、また、推定の対象とすることで、遠隔センシングの精度を向上させることを目標とした。本研究では、異なるセンサを使う意味から、このセンシング法をマルチモーダル信号推定と呼んでいる。

脈拍、呼吸、瞬きなど、人に関する現象は、時間領域でまばらに発生する。脈拍と呼吸は、変動する時間間隔で繰り返し発生する波形から構成されている。また、瞬きは、時間を空けながら不規則に発生する現象である。これらの性質から、疎性、すなわちスパース性を仮定した信号分解法である畳み込み型辞書学習を適用することで、効果的な信号解析を実現する。

### 2. 研究の目的

本研究では、畳み込み型辞書学習を拡張し、接触型、非接触型の異なるセンサ信号からの情報を基に辞書を構成することで、非接触型センサからの信号から、精度良く対象となる信号を分離し解析することである。そのために、基本となる畳み込み型辞書学習による信号分離を実現、それに基づき接触型センサの信号を非接触型センサから推定する結合畳み込み型辞書学習、接触型センサからの信号をもとに、分離のための辞書を学習する部分空間畳み込み型辞書学習を提案する。

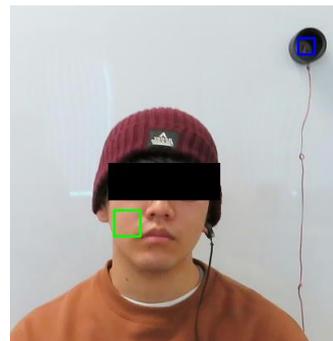


図1. 対象とした動画像の例

### 3. 研究の方法

本研究では、2種類の非接触型センサ信号からの生体信号分離を検討した。一つは一般のカメラであり、もう一つはマイクロ波帯のドップラーセンサである。カメラは、顔動画像の皮膚領域の輝度変化を捉え、脈拍を検出することに利用した。これは遠隔 PPG (photo-plethysmography) と呼ばれる手法である。具体的には、カメラで顔の動画像を撮影し、画像処理ライブラリである OpenCV により顔領域を検出、その後、頬の領域で輝度の平均値を求め、解析対象とした。図1に画像例を示す。また、撮影の際には、同時に耳につけた接触型センサからの出力に応じて発光する LED を同時に撮影し、これを接触型センサ出力として利用した。いずれの信号に対しても、高周波の雑音を除去するために3点の移動平均フィルタを適用し、さらに直流分とトレンドの除去を適用している。また、これと同じ顔動画像を用い、顔全体の平均値から畳み込み型辞書学習による瞬き検出の検討も行っている[1]。

もう一つの非接触型センサは、マイクロ波帯のドップラーセンサである。このセンサは、測定対象の微小な座標変化を捉えることができ、本研究では、呼吸の検出を目的として使用した。さらに、呼吸を検出する接触型センサとして、鼻孔の近くに置いた温度センサを利用し、流れる呼吸気の温度変化から呼吸を検出した。

以上、2種類の非接触型センサを用いて、脈拍および呼吸を検出するために畳み込み型辞書学習を拡張したアルゴリズムを提案し、これらを用いて計算機上で処理を行った。

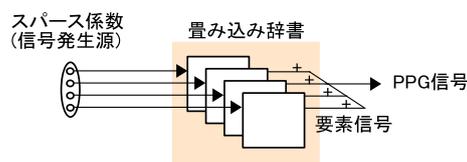


図2. 畳み込み型辞書学習による信号分離

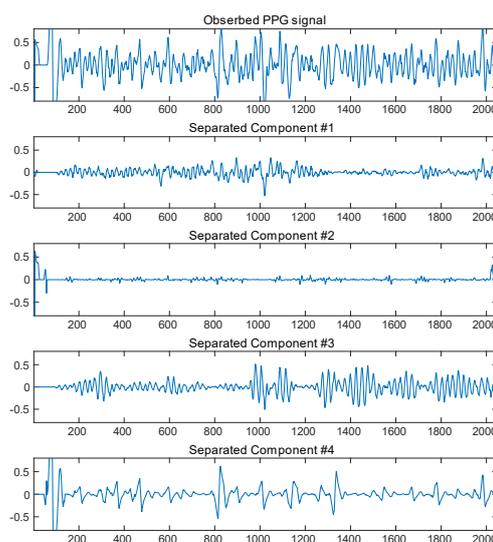


図3. 畳み込み型辞書学習による信号分離の例

#### 4. 研究成果

##### (1) 結合辞書学習による遠隔 PPG

カメラの動画像からの脈拍検出(遠隔 PPG)に畳み込み型辞書学習および結合畳み込み型辞書学習を適用した結果を示す。畳み込み型辞書学習は、いくつかの波形が疎らに発生し、合成されて信号として現れることを仮定し、観測された信号から、個々の波形を辞書として学習、個々の信号へ分解する方法である。この分解の概要を図 2 に示す。これを実際に撮影された信号(PPG 信号)に対して適用した例を図 3 に示す。図 3 では、1 行目に観測された信号、2 行目から 4 行目までに分解された要素信号を示している。3 番目の要素信号が脈拍を表す信号であるが、他の信号成分からの干渉が起こり、振幅に大きな変化が発生している。さらに学習される辞書および要素信号の順番は、辞書の学習における初期値に依存するため、いずれの要素信号が脈拍を表すかを判定する後処理が必要となる。そこで雑音成分が小さい接触型センサを利用して辞書を学習、その後、PPG 信号のみから接触型センサの信号を推定する結合型畳み込み型辞書学習による信号分離法を適用した。この方法の概要を図 4 に示す。事前学習では、結合辞書を学習し、その後、推定のフェーズで接触型センサからの信号を推定する。図 5 に 4 つの畳み込み基底から推定した信号の例を示す。この例では、1 段目に PPG 信号、3 段目に真値である接触型センサの信号である。PPG 信号を分解する過程で得られたスパース係数を用いることで、接触型センサと同じ時間間隔でピークを発生する推定信号(4 段目)を、途切れることなく得ることができた。また、この信号から脈拍を推定することで、原信号、また、畳み込み型辞書学習のみで推定した結果よりも高い精度で心拍数を推定できることがわかった。さらに動画像のカラーチャンネルによる混合を検討し、精度の高い信号分離・脈拍の検出法を提案した[2].

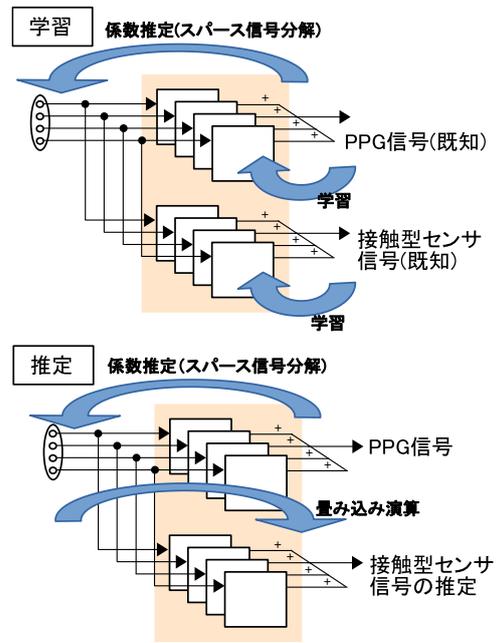


図 4. 結合辞書学習による信号推定

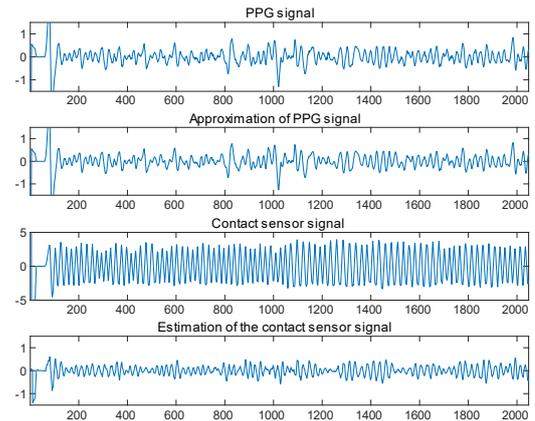


図 5. 結合型辞書学習による信号推定結果

##### (2) 部分空間辞書学習による呼吸検出

遠隔 PPG では、信号は実数値であったが、ドップラーセンサからの出力は、2 チャンルの位相が異なる信号となる。呼吸の発生と信号の位相に関しては相関が無いため、個々の呼吸を示す波形は、呼吸の度に位相が異なるものとなる。そのため、結合型辞書学習をそのまま適用することはできない。呼吸検出においても、接触型センサを利用し、信号分離性能を向上させるために、位相を無視し、ドップラー信号からの 2 チャンルの信号および接触型センサからの信号の 3 つに対応する係数を部分空間へ拡張し、時間軸上で、係数の部分空間の発生にスパース性を課すことで辞書学習を行う方法を検討した[3]。この方法では、接触型センサ、ドップラーセンサで同時に現象が発生するが、位相については制約を課さないことになる。図 6 に部分空間辞書学習の概要を示す。実験では、回転体による外乱が発生している中で、接触型センサを用いてドップラーセンサに含まれる呼吸成分と相関が高い畳み込み基底を学習した。学習の結果、得られた辞書を図 7 に示す。図からわかるとおり、緩く変化する呼吸成分に対応するドップラー信号の畳み込み基底が学習されている。さらに、この基底を使って、ドップラー信号を分離した例を図 8 に示す。図 8 では、1 段目に混合信号を、2 段目に分離された信号、および 3 段目に分離した信号を示している。事前に呼吸信号を参照することで、呼吸と相関の強い辞書を学習することができ、これらの実験例では接触センサを使わずに辞書を学習した場合よりも SN 比で 1.5dB 程度、高い精度で信号分離を実現することができた[3].

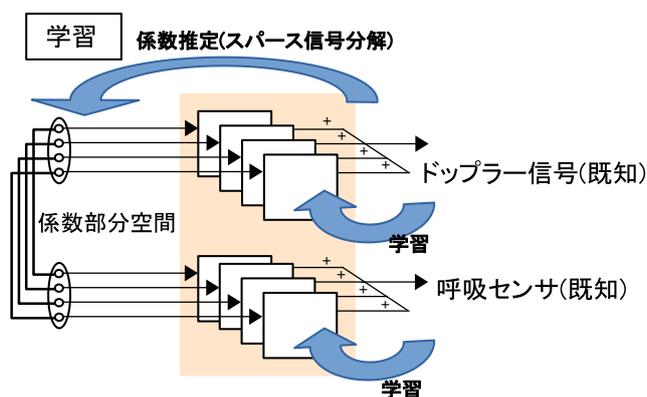


図 6. 部分空間辞書学習

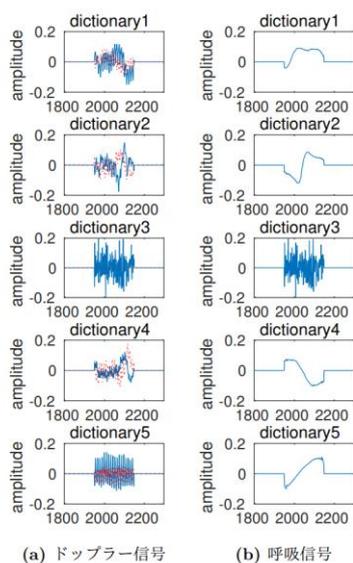


図 7. 部分空間辞書学習により学習された基底

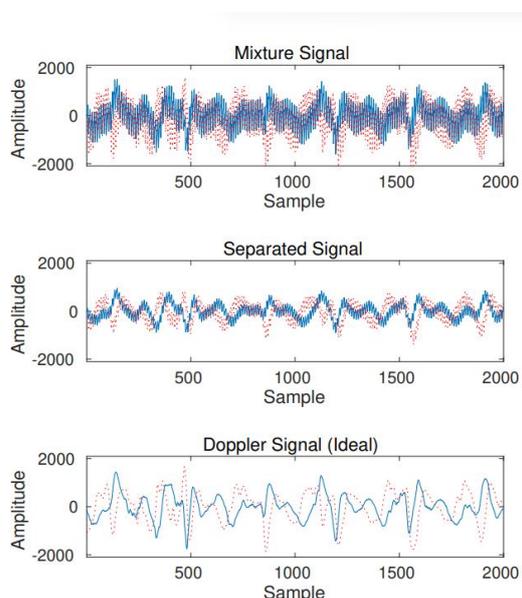


図 8. 分離結果

### (3) 平滑化 L0 ノルムによる辞書学習

(1) および (2) の研究例では、信号のスパース性に注目して信号モデルを推定している。今までの研究例では、係数列のスパース性の尺度として、係数の絶対値の総和である L1 ノルムを利用している。理想的には非零の係数の個数 (L0 ノルム) をスパース性の尺度とすることが望ましいが、最適化の観点から尺度とすることは困難であった。そこで、L0 ノルムを、指数関数を利用して連続微分可能な関数で近似した平滑化 L0 ノルムを導入した。平滑化 L0 ノルムを辞書学習のスパースコーディングの部分に適用することで、分離精度が向上することを確認した [4]。提案した平滑化 L0 ノルムによる辞書学習を検討したセンシング問題へ適用することは、今後の課題である。

以上、本研究では、二つのセンサからの信号を利用して、結合辞書を学習、片方から片方を推定する結合型辞書学習による信号推定法、ならびに雑音の少ないセンサ信号を参照することで、精度の高い分離結果を得ることができる部分空間畳み込み型辞書学習を提案し、実際の信号に適用、効果を確認した。さらに、平滑化 L0 ノルムによるスパースコーディングを辞書学習へ適用し、分離精度の向上を図った。今後、収集するデータの数を増やし、より確度の高い推定法とすることが課題として挙げられる。

### 参考文献

- [1] 中静 真, 丸山宗一郎, 熊崎智文, “畳み込み型辞書学習を用いた平均顔画像信号からの瞬き検出” 電子情報通信学会技術報告, SIS2021-30, pp. 52-56, 2022 年 3 月
- [2] 川野直輝, 中静 真, “遠隔 PPG のための畳み込みスパース信号分解に基づく心拍信号の分離” 第 35 回信号処理シンポジウム講演予稿集, 2020 年 11 月
- [3] 川野直輝, 中静 真, “グループスパース畳み込み型辞書学習によるドップラー信号からの呼吸成分の分離” 第 32 回回路とシステムワークショップ講演予稿集, pp. 245-255, 2019 年 8 月
- [4] 飯塚生吾, 中静 真, “平滑化 L0 ノルムによる畳み込み型辞書学習” 第 32 回回路とシステムワークショップ講演予稿集, pp. 256-257, 2019 年 8 月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hikaru Fuijsaki, Makoto Nakashizuka
2. 発表標題 Deep Morphological Filter Networks For Gaussian Denoising
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川野直輝, 中静 真
2. 発表標題 遠隔PPGのための畳み込みスパース信号分解に基づく心拍信号の分離
3. 学会等名 第35回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川野 直輝, 中静 真
2. 発表標題 グループスパース畳み込み型辞書学習によるドップラー信号からの呼吸成分の分離
3. 学会等名 第32回回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯塚 生吾, 中静 真
2. 発表標題 平滑化10ノルムによる畳み込み型辞書学習
3. 学会等名 第32回回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中静 真, 丸山宗一郎, 熊崎智文
2. 発表標題 畳み込み型辞書学習を用いた平均顔画像信号からの瞬き検出
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤波来夢, 中静 真
2. 発表標題 ディープ : 反復雑音成分推定に基づく雑音除去ネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2022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
---------	---------