

周期成分分析を用いた 偏光カメラ映像からの映像脈波抽出

Imaging Photoplethysmogram Extraction from Polarization Images via Periodic Component Analysis

○小林重穂*, 田中明*, 吉澤誠**

○Kazuho Kobayashi*, Akira Tanaka*, Makoto Yoshizawa**

*福島大学, **東北大学

*Fukushima University, **Tohoku University

キーワード: 映像脈波(imaging photoplethysmogram), 周期成分分析(periodic component analysis),
偏光カメラ(polarization camera), 心拍数推定 (heart rate estimation)

連絡先: 〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地
福島大学共生システム理工学類 物理・システム工学コース
E-mail: s2210074@ipc.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

映像脈波 (imaging photoplethysmogram, iPPG) は、皮膚の微小な色変化から脈波成分を非接触で抽出できる技術であり、対象に複数の関心領域 (Region of Interest, ROI) を設定することで、多点同時計測可能である。そのため、近年、装着式センサの代用として医療・ヘルスケア・生体認識などへの応用が期待されている。顔や掌では皮下の血流の変化が肌色に表れており容易に脈波を抽出できるが、背中や腕など、部位によっては脈波成分が微弱であり、体動に起因するアーチファクトや照明条件の変動によりノイズの影響を受けやすく、安定した映像脈波の抽出は容易ではない。

ここで、皮膚に入射した光は、皮膚表面で反射する表面反射光と、組織内部で散乱した後再び外部に出射する内部散乱光に大別される。脈波成分は主として内部散乱光に含まれるが、表面反射光は強度が大きく血液量の変化に乏しいだけでなく、体動などの外乱の影響を強く反映する。したがって、精度よく映像脈波を抽出するためには、表面反射光を効果的に抑制し、内部散乱光成分を強調することが重要である。

通常のカラーカメラでは、偏光フィルタを用いて

表面反射光を低減することが可能であるが、一方のみ反射光を抑制するため、複数光源下や反射条件が複雑な場合では十分な反射光の除去は困難である。Cao ら¹⁾は、60fps で解像度 1920×1080pixel におけるスマートフォン撮影において、照明条件や表面反射が脈波抽出に大きく影響することを報告している。

一方、偏光カメラは、撮像素子の上に異なる方向の偏光子 (0°, 45°, 90°, 135°) が並んでおり、それぞれの偏光の映像が同時に得られる。また、ある方向の直線偏光成分を含む光を直線偏光フィルタに通過させた場合、偏光の角度に対して輝度値が正弦波状に変化するという性質を利用し、0°, 45°, 90°, 135°の輝度値から RGB 各色について偏光度や偏光角度などの偏光情報を得ることが可能である。これらから表面反射光をある程度除去できる可能性があり、内部散乱光をより強調できる可能性がある。本研究では、偏光カメラを用いて脈波抽出を行い、その有効性を検討することを目的とする。

2. 皮膚映像からの脈波抽出方法

2.1 容積脈波計測

脈波とは、心臓から駆出された血液が細動脈や毛

細血管などの末梢へと伝播する際の血流量および圧力の周期的変動を指す。脈波には血管内あるいは組織の血液容積の時間変化を反映する容積脈波と血管内圧の時間変化を示す圧脈波とがある。

容積脈波は、血液中に含まれるヘモグロビンの吸光特性を利用して計測される。一般に、皮下組織に細動脈や毛細血管が豊富である指尖や耳朶などに光を照射し、その後方散乱光あるいは透過光の時間的変化から脈波信号（PPG）が得られる。

近年、この吸光特性に基づき、皮膚領域をカメラで撮影して RGB 値のわずかな変化を解析することで映像脈波(iPPG)を抽出する手法が提案されている。非接触計測が可能である一方で、照明環境や体動によるノイズの影響を受けやすく、その抑制が課題となっている。

2.2 繰り返し周期成分分析(repeated Periodic Component Analysis, rPiCA)

Gerard de Hann ら²⁾は RGB 信号の線形変換により皮膚の色変化成分を強調する方法(以下 Chrom 法)を提案している。しかし、Chrom 法は体動など非線形かつ周期性の不安定な外乱に弱いことが知られている。そこで我々の研究グループでは、脈波の周期性に着目し、周期成分分析 (PiCA) を用いた脈波抽出方法を提案している。

PiCA とは同時に記録された複数チャンネルの信号に含まれる周期成分を位相の一貫性に基づいて分離する手法であり、心周期のように周期が一定ではない信号にも適用可能である。

Reza³⁾らは PiCA を用いて妊婦から得た複数チャンネルの心電図波形から母体と胎児の心電図波形を分離できること、独立成分分析を用いた JADE 法と比較して分離信号の順序の不定性を回避できることを報告している。

PiCA では、複数の観測信号 $\mathbf{X}(t)$ に対し変換行列 $\mathbf{U}$ を適用することで分離信号 $\mathbf{Y}(t)$ を得る。

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{U}^T \mathbf{X}(t) \quad (1)$$

ここで、変換行列 $\mathbf{U}$ は、 $\mathbf{Y}(t)$ の周期性が最大になるように決定される。このとき、信号の周期性 φ は式(2)のように表すことができる。

$$\varphi = \frac{\mathbf{U}^T \mathbf{C}_\tau \mathbf{U}}{\mathbf{U}^T \mathbf{C}_0 \mathbf{U}} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{C}_0$ と $\mathbf{C}_\tau$ はそれぞれ、自己共分散行列と共分散行列であり、時刻 $\tau(t)$ を用いて以下の式(3)ように計算される。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_0 &= E_t[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}(t)], \\ \mathbf{C}_\tau &= E_t[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}(\tau(t))^T] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\tau(t)$ は、観測信号の時刻 t における値に対して、次の拍で同位相となる時刻であり、心周期の情報から算出される。

以上のように PiCA は波形の位相情報を基に抽出したい信号と外乱とを分離することが出来るが、事前に目的とする信号の周期の情報が必要である。心電図に適用した先行研究では周期情報として心電図の RR 間隔を利用しているが、映像脈波の場合 R 波のような心周期を明確に分ける成分が存在しないこと、ノイズが多い場合には脈波から正確な心周期の算出が難しいことなどから、真の心周期に近い値をあらかじめ得ることは困難である。本研究では、心周期を更新しながら PiCA を繰り返し、心周期が安定した後に得られる脈波を採用する rPiCA を用いて、映像脈波の抽出を行う。

2.3 偏光カメラ映像からの脈波抽出方法

Fig.1 に偏光カメラの撮像素子の概略を示す。撮像素子の一つを cell と定義すると、図のように記録される偏光は 4 方向であるため 1 色あたり $2 \times 2 \text{ cell}$ で構成され、撮像素子のカラーは RGGB で構成されるため $4 \times 4 \text{ cell}$ が一単位となるが、bayer 変換を用いると、周りの RGB 値も利用して $2 \times 2 \text{ cell}$ ごとに RGB 値が算出され、1pixel を構成する。しかし、本研究では $4 \times 4 \text{ cell}$ を 1pixel として画像を作成し、 $8 \times 8 \text{ pixel}$ 、すなわち $32 \times 32 \text{ cell}$ を 1 つの ROI とする。

本研究では偏光カメラ映像から映像脈波抽出する方法として、以下の 3 つを比較した。

(1) 表面反射低減画像の G チャンネルからの抽出

表面反射低減画像における ROI 内の G 成分の平均値を時系列信号として取り出し、心拍帯域 (0.8-1.1Hz) のバンドパスフィルタ (BPF) を適用して脈波成分を抽出する。

(2) 表面反射低減画像に対して rPiCA を適用

表面反射低減画像を用い、ROI を 4 分割(subROI)し、各 subROI における RGB の平均値から合計 $3(\text{RGB}) \times 4 (\text{subROI}) = 12$ チャンネル

(3) 4 方向偏光画像に対して rPiCA を適用

表面反射で低減を行わず、撮像素子で取得される 4 偏光方向 $\times$ RGGB 色配置に対応する 16 チャンネルの平均輝度時系列信号を校正し、これらに対して rPiCA を適用し、脈波成分を抽出する。

なお、rPiCA には心周期の初期値が必要であるが、本研究では、掌全体の RGB 信号に対し Chrom 法を適用することで算出した脈波に狭帯域の BPF を適用した波形から算出した心周期を用いた。

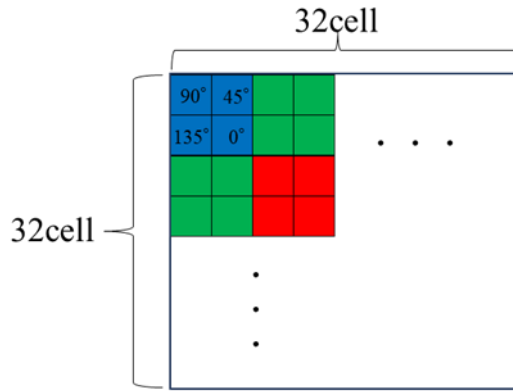


Fig. 1 偏光カメラの撮像素子の概略

3. 実験および評価方法

3.1 実験方法および脈波の抽出

偏光カメラを用いた脈波抽出手法の有効性を確認するために実験を行った。

対象は健康成人6名(平均年齢 22.2 ± 1.0 歳)である。実験者は暗室内で手掌を安定させた状態で撮影を行い、照明には3方向から光が照射されるように遮光したリングライトを用いた。右手掌を15秒間撮影すると同時に、小指に装着した指尖容積脈波センサによりPPGを取得した。PPGのサンプリング周波数は1kHzとした。使用したカメラは、偏光カメラ(DMK 33UX250, The Imaging Source 社)とカラーカメラ(DMK 33UP1300, The Imaging Source 社)の2種類であり、フレームレートは60fps、動画の解像度は 640×480 pixel で記録した。

ROIは手掌の親指付け根に設定し、偏光カメラについては前章で述べた以下の3種類の抽出方法を比較した。

- (P1) 表面反射低減画像のG成分にBPFを適用
- (P2) 表面反射軽減画像に対してrPiCAを適用
- (P3) 4方向偏光×RGGBにrPiCAを適用

さらに比較対象として、カラーカメラ映像に対して以下の2種類の方法で抽出した脈波を用いた。

- (C1) ROIのRGB平均値にChrom法を適用
- (C2) ROIを4分割×RGBにrPiCAを適用

3.3 評価方法

PPGから算出される心拍間隔RRIを真値として、映像脈波から得られたRRIの二乗平均平方根誤差(RMSE)と映像脈波とPPGとの相関係数によって評価を行った。これらの指標について偏光カメラを利用して得られる3種類とカラーカメラから得られる

2種類の計5種類の脈波について比較した。ただし、RMSEと相関係数は得られた脈波の10拍分で算出した。

4. 実験結果と解析

4.1 映像脈波から算出した心周期の精度

映像脈波から算出した心周期のRMSEの結果をFig.2に示す。また、分散分析とBonferroniの多重比較を実施し、有意水準5%で有意検定を行った。方法P3が最もRMSEが小さく、その次が方法P2であった。いずれも偏光カメラ映像に対してrPiCAを適用したアルゴリズムであるため、偏光カメラの利用およびrPiCAによる脈波抽出の効果が示唆された。方法P3は表面反射低減映像を用いずにカメラのRAWデータに対してrPiCAを適用していることから、rPiCAによって表面反射除去よりも効果的に脈波の抽出ができる可能性がある。

4.2 映像脈波とPPGとの相関

映像脈波とPPGとの相関係数の結果をFig.3に示す。また、分散分析とBonferroniの多重比較を実施し、有意水準5%で有意検定を行った。カラーカメラにおいてはChrom法(C1)とPiCAによる方法(C2)の間で有意差はなかった。すなわち、ROIを設置した場所において表面反射が比較的強く、rPiCAであっても脈波形状を精度よく抽出できていない可能性が考えられる。一方で、偏光カメラについては、RMSEと同様に、RAWデータに直接rPiCAを適用した方法(P3)が最も相関が高く、次が表面反射低減画像にrPiCAを適用した方法(P2)であった。

以上の結果から、偏光カメラのRAWデータに直接rPiCAを適用する方法P3によって、表面反射がある部位においても比較的精度よくPPGに近い脈波を抽出できる可能性が示唆された。

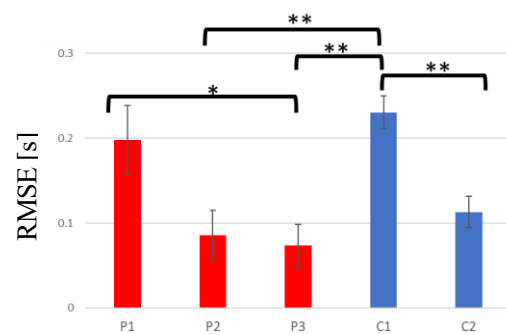


Fig. 2 映像脈波から算出された心周期の精度比較
(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

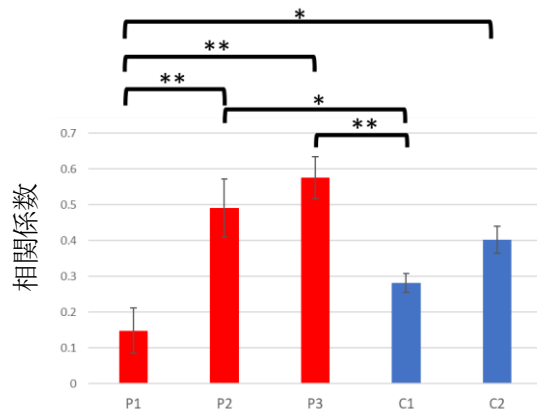


Fig. 3 映像脈波と PPG との相関係数
(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

5. 結言

本研究では、偏光カメラを利用することで映像脈波の抽出を妨げる表面反射光を低減し、脈波抽出の精度を上げることを目的として、カラーカメラおよび従来法と精度を比較した。PPG から算出した RRI を真値とした、映像脈波から算出した心周期の精度は、偏光カメラ映像の RAW データに rPiCA を適応する方法で最も高い結果となり、偏光カメラ利用の有効性および rPiCA の有効性が示唆された。

今後は、被験者数を増やし検証を続けるとともに、ROI サイズの最適化などを行う予定である。また、得られた脈波を利用した血行動態解析についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) M. Cao et al: Remote Photoplethysmography with a High-Speed Camera Reveals Temporal and Amplitude Differences between Glabrous and Non-Glabrous Skin, *sensors*, 23-2, 10 (2023)
- 2) Gerard de Haan, Vincent Jeanne: Robust Pulse-rate from Chrominance-based rPPG, *IEEE Trans. on Biomedical Eng.*, 60-10, 2878/2886 (2013)
- 3) Reza S, et al.: Multichannel Electrocardiogram Decomposition Using Periodic Component Analysis, *IEEE Trans. on Biomedical Eng.*, 55-8, 1935/1940 (2008)