

顔の動画像解析による脈波の多点抽出と 皮下の血行動態の評価法の開発

福島大学共生システム理工学類

田 中 明

In recent years, video plethysmography (vPPG) which is pulse wave derived from the skin video image has attracted attention as a non-contact heart rate measurement technique. vPPG may be used to evaluate not only heart rate but also local hemodynamics by simultaneously obtaining vPPG from multiple regions. In this study, a two-dimensional evaluation of facial subcutaneous hemodynamics was performed by means of the features of vPPG. The facial video and ear PPG were measured before and after facial massage in experiments. The facial video was divided into small grid regions of interest (ROI), and vPPGs were extracted at each ROI using repetitive periodic component analysis (r-PiCA). PiCA is a technique to extract the most periodic components from a set of multichannel recordings. The three features which were crest time, the time to reach 50% of the pulse wave area and lag of vPPG from PPG were calculated from vPPG of each ROI. The feature values wave changed significantly with facial massage. The results indicate the possibility to evaluate of subcutaneous hemodynamics aspects of face using vPPG.

1. 緒 言

近年、通常のカラーカメラで撮影された顔などの人の肌の映像から、皮膚の色の変化を解析することによって脈波成分(映像脈波; Video Plethysmography (vPPG))が抽出可能であり、そこから心拍数や脈波伝播時間などの生理指標を得る手法が提案され、様々な応用が期待されている。これは、皮下の光の吸収量の特性を利用したものであり、特にRGB成分のうち、ヘモグロビンによる吸収量の多い緑成分(G)は皮下の血液容積の変化の影響を強く受けて変化するため、緑成分の時間変化に対して簡単な帯域通過フィルタを適用するだけで平均心拍数などの情報を得ることが可能である¹⁾。

vPPGはその計測の原理から、臨床や健康分野で利用されている接触式の容積脈波に近い情報を含んでいることが期待できることから、もし映像脈波が精度よく得られれば、脈波から得られる様々な生理指標が非接触で得られ、血行動態の評価に利用できる可能性がある。また、vPPGの利点は、非接触計測が可能だけでなく、映像に写っている複数の部位の脈波を同時に得られることであり、心拍数だけでなく、複数の関心領域(ROI)間の脈波の伝播特性や脈波形状の部位による違いといった血行動態に関する新たな情報が抽出できる可能性もある。

しかし、肌の皮下の血行動態を面で評価するためには、

評価対象の肌表面内を細かく分割してそれらの部分で脈波を抽出する必要があるが、抽出が比較的容易な顔であっても、内部散乱光の状態は部位によって異なり、信号のSN比も場所によって大きく異なる。さらに、脈波の抽出精度は、照明、カメラの性能や体動などの影響を大きく受けることなど、血行動態を解析するためには、脈波の形を維持した安定的な抽出法の開発が必要である。

本研究では、周期成分分析(PiCA)を応用した、vPPG抽出方法を顔の映像に適用し、得られたvPPGの特徴量を利用した顔表面の皮下の血行動態解析を目的とした。

2. 方 法

2.1. 周期成分分析を利用した脈波抽出

上述したように、RGB信号で記録された肌の映像には脈波成分が含まれており、それを抽出することによって容積脈波に近い情報を得られる可能性がある。それはあたかも無数の脈波センサを皮膚表面に設置していることに相当し、異なる部位の脈波を同時に得られることで、脈波の伝播特性や部位の違いを積極的に活用した新たな血行動態解析の可能性もある。

しかし、vPPGはその撮影環境や部位、さらには体動などのアーチファクトの影響を大きく受けるため、ノイズ除去などの信号処理は不可欠であるが、狭帯域の帯域通過フィルタなどのように過度なフィルタ操作は波形を歪ませてしまい、脈の立ち上がり点の位置や波形そのものに含まれる有用な情報が失われてしまう可能性がある。したがって、脈波解析に利用できる精度でvPPGを得るためには、脈波の高調波成分をできる限り維持して抽出する必要がある。帯域通過フィルタ以外の脈波抽出法として、これまでに、クロミナンスに着目しRGB信号に対する線形変換を用いるもの²⁾、RGB信号に対して独立成分分析を適用して脈波



Extraction of multipoint pulse wave and evaluation of subcutaneous hemodynamics by analysis of facial videos

Akira Tanaka

Faculty of Symbiotic Systems Science,
Fukushima University

成分を抽出する方法³⁾などが報告されている。

本研究では、周期成分分析を利用した方法を用いて vPPG を抽出する。周期成分分析 (PiCA) とは、既知の位相情報を基に、同時に記録された多チャンネルの信号に対して適当な変換行列を適用させることによって、既知あるいは想定される周期に近い周期成分を多く含む信号から順に分離する手法である⁴⁾。Reza 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双方の心電図波形を分離できること、ICA (JADE 法) における一般的な問題である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⁵⁾。

周期成分分析は疑似周期信号に対して適用可能ではあるが、あらかじめ位相情報、すなわち拍毎の心周期の情報が必要である。そこで本研究では、初めに仮の心周期を算出し、PiCA による脈波抽出と心周期情報の更新を繰り返し実行することによって最終的に vPPG を得る、繰り返し周期成分分析 (r-PiCA) を用いて抽出する⁵⁾。

本手法の手順を図 1 に示す。まず、関心領域 (ROI) の平均 RGB 信号について、G 信号のパワースペクトルから推定される平均心拍数を中心周波数とする帯域通過フィルタによって脈波信号を抽出し、心周期を拍毎に求め、それを仮の心周期とする。次に、ROI を複数の領域 (subROI) に分割し、それぞれの subROI における RGB 信号で観測信号ベクトルを構成する。したがって信号のチャンネル数は subROI の数 $\times$ 3 となる。初めに求めた仮の心周期を利用して PiCA を行い、得られた変換信号の中から心周期の成分を最も多く含む系列を選択し、それを vPPG とする。得られた脈波を基に再計算された心周期情報を用いて再び PiCA によって脈波を更新する。これを心周期のばらつきがある程度収束するまで繰り返して最終的な vPPG を算出する。

2. 2. 顔の映像脈波による皮下の血行動態の評価方法

顔表面の血行動態を評価するために、まず、顔の映像を格子状に分割し、その中の肌の部位に関心領域 (ROI) とし、各 ROI の RGB 信号について繰り返し PiCA を使用して vPPG を抽出する。

得られた脈波は輝度情報に含まれる脈動成分から抽出されるため、その振幅は照明、肌の吸光特性、肌の表面反射やカメラの感度などの影響を受ける。したがって、vPPG の波高値の情報を用いて血行動態を評価する場合には注意が必要である。本研究では脈波の形状における時間情報に着目する。すなわち、図 2 に示す vPPG の各拍の脈の立ち上がり点を結んだ基線を除去した波形について、以下の 3 つの特徴量を算出する。

(1) 立ち上がり時間 (T_C)

脈波の立ち上がりから最初の極大点までの時間 (crest

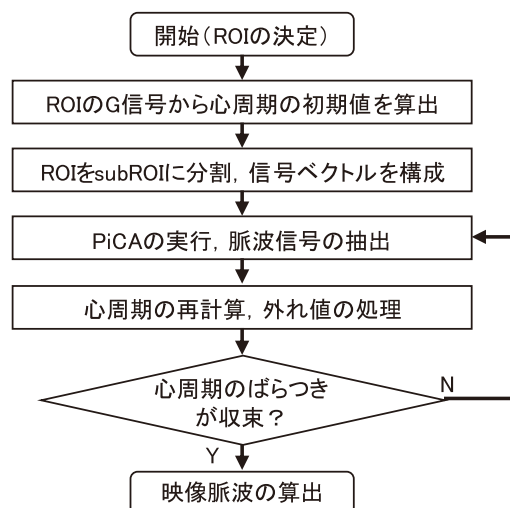


図1 繰り返しPiCAによる映像脈波抽出手順

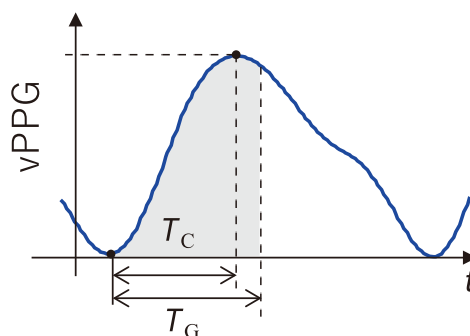


図2 基線を除した映像脈波と特徴量

time)。

(2) 脈波面積が半分になる時間 (T_G)

図 2 に示す脈波において、立ち上がりから脈波の積分値が一拍の脈波面積の半分に達するまでの時間。

(3) 耳朶の脈波との伝播時間差 (ΔT)

耳朶に取り付けた接触式の光電容積脈波 (PPG) と vPPG との相互相関関数から算出される映像脈波の遅れ時間。

2. 3. 顔のマッサージを利用した検証実験

実験対象は 21 歳から 22 歳までの健康者 10 名 (男性 4 名、女性 6 名、平均年齢 21.6 ± 0.5 歳) であり、それぞれに左頬をマッサージする試行と右頬をマッサージする試行の 2 種類の実験を実施した。実験の概要を図 3 に示す。被験者は椅子に座り、顔を顎台に乗せて安静にしてもらい、12 秒を 1 セットとして計測を行った。計測量は、マッサージ側の耳朶容積脈波 (PPG) および顔映像であり、PPG はサンプリング周波数 1 kHz で記録した。顔映像はカラーカメラを用いて、フレームレート 100fps で撮影した。

まず、実験当日の体調確認のため上腕で血圧を計測し、センサを装着した後、マッサージ前の安静状態を計測した。その後、図 4 に示すように、片側の頬のみをマッサージロ

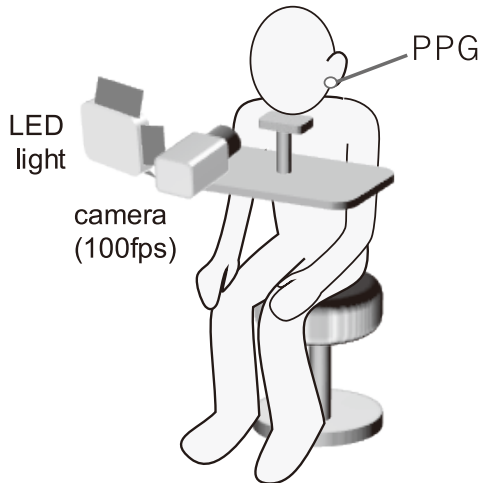


図3 実験の概要

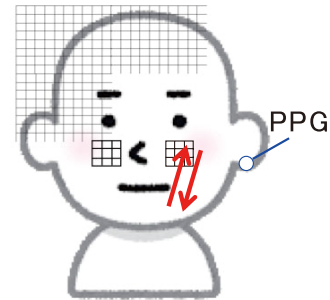


図4 マッサージ位置と特徴量の左右比較をしたROI の位置

ーラで、口元から目の下の位置を上下に2分間マッサージを行った。マッサージは強さ(押圧)を任意とし、一往復当たりおよそ2秒で行うよう指示した。マッサージ後、再び顎台に顔を乗せてもらい、マッサージ終了後1分から1分おきに5回の計測を行った。さらに、異なる日に反対側の頬をマッサージする同様の実験を行った。

得られた映像の格子状の各ROIで上述の特徴量を算出し、各セット(12秒間)の平均値を求めた。また、マッサージの効果を明確にするために、図4に示すように、左右の目の下方に約3cm×3cmのROIを設け、特徴量の平均値を算出し、マッサージをした側からしていない側の値を減じた左右差を計算し、この値のマッサージ前からの変化量を評価した。

3. 結果

図5はある被験者のマッサージ前後の T_c 、 T_g および ΔT の顔表面の分布を示したものである。マッサージ前の結果では、 T_c 、 T_g および ΔT は両頬のあたりで値が低く、額で大きな値になっており、脈が各ROIに至るまでの血管インピーダンスおよび脈波伝播時間が反映されている。特に ΔT は心臓からの距離にも依存するため、額で高値となっていると考えられる。また、本被験者では、マッサージ前であってもすでに左右差や局所的な指標の違いが見て取れることから、各ROIの支配血管の特性や組織の血管床の特性の違いが現れていると考えられる。

マッサージ後はそれぞれの特徴量がマッサージ側で減少しており、特にあご付近で減少量が大きい結果となった。これは、あご付近でマッサージローラの押圧が最も高くなっていること、骨と顔表面との間の組織の厚みなどの影響であると考えられる。また、マッサージ後数分経っても変化は元に戻らない、あるいはさらに変化が大きくなる傾向が見てとれる。

図6(a)～(c)は各特徴量の頬の部分の平均値の左右差(マッサージしていない方を基準とした差)の変化を示したものである。マッサージ終了直後から時間の経過とともに減少傾向を示しており、マッサージ直後よりも数分後のほうがマッサージ前に比べて優位に値が減少している。これは、マッサージが皮下の血行動態を変化させたこと、血行動態がマッサージ終了後も変化し続けていることを示している。しかし、本実験結果からは、この変化がどの程度継続するかは不明であった。

4. 考 察

図5の結果は、顔の皮下の局所的な血行動態が捉えられていることを示しており、マッサージ前の安静状態であっても特徴量は局所的に異なる値になっており、もともとの皮下の血流の偏りなどを捉えられる可能性がある。マッサージの効果では、マッサージローラの押圧などの違いと思われる変化も現れており、適切なマッサージとその効果の評価が行える可能性がある。

図5および図6の結果から、マッサージによって、 T_c 、 T_g および ΔT の減少が生じた。一般にマッサージの効果として血行が良くなることが挙げられるが、脈の伝播特性をRC回路による集中定数型の電気回路モデル(ローパスフィルタ)で表現できると仮定すると、本結果が、末梢組織に至る血管抵抗が減少し、立ち上がり時間の減少(時定数の減少)とカットオフ周波数の増加によって生じたと考えられることと矛盾しない。

一方、本研究で採用した特徴量は、末梢の血行動態だけでなく、心機能や血圧などの影響も受けることから、顔内の相対的な違いは末梢の血行動態の違いとして評価できるが、特徴量の絶対値から組織の血行動態を表することは困難である。今後、脈波の2階微分値である加速度脈波解析による反射波の解析の応用や、姿勢変化などなんらかの刺

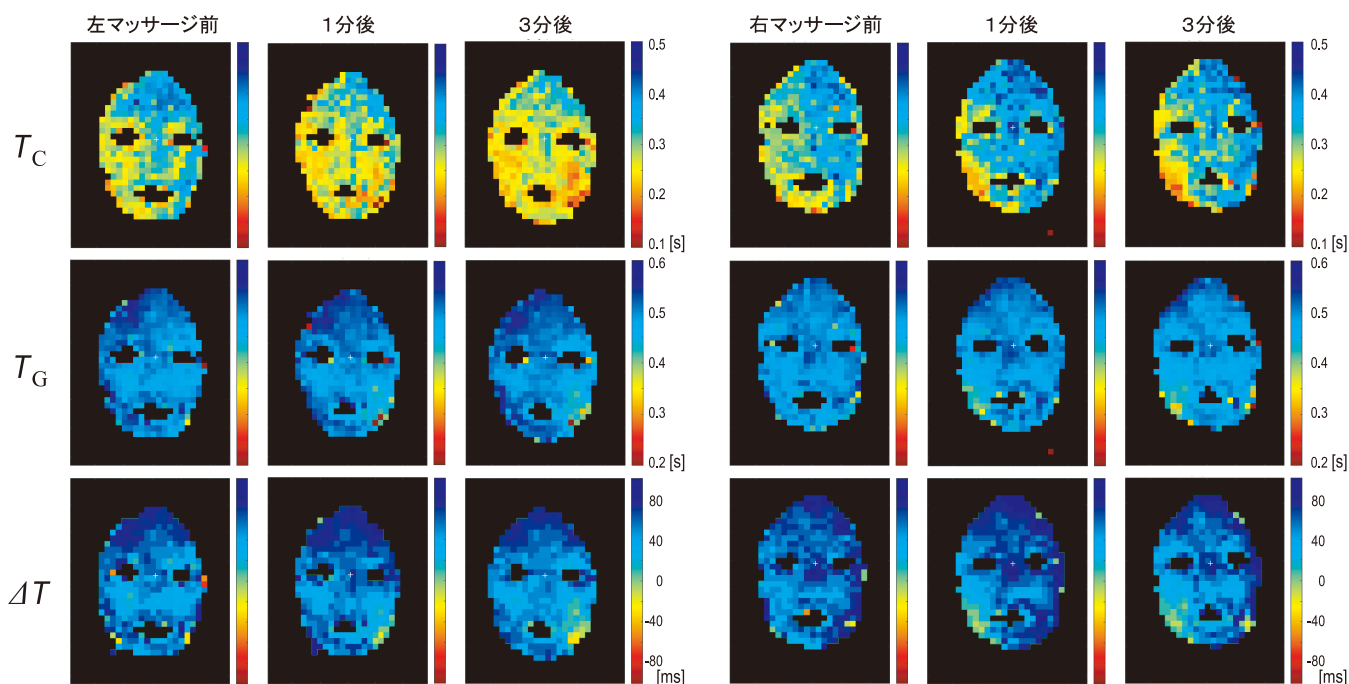


図5 顔の映像脈波から算出された特徴量のマッサージ前後の変化

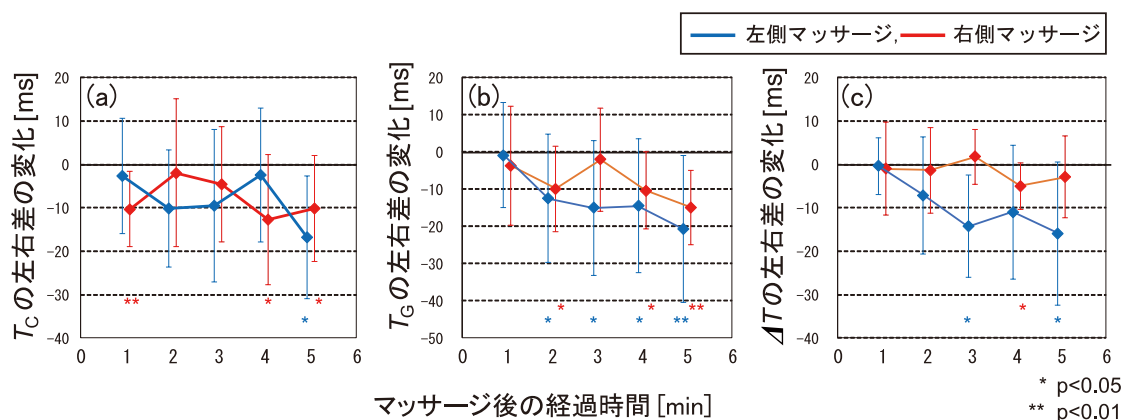


図6 顔の特徴量の左右差の経時的変化 ((a) T_c , (b) T_g , (c) ΔT)

激あるいは負荷に対する応答で評価するなどの工夫が必要である。

5. 総 括

本研究では、顔を対象とした映像脈波 vPPG による 2 次元的な皮下の血行動態解析を目的とし、顔のマッサージによる血行動態の変化を、顔を細かい ROI に分割し、r-PiCA を用いて抽出した vPPG の脈波波形から皮下の血行動態を評価した。評価指標として、vPPG の立ち上がり時間、脈波面積の 50 % となる時刻、耳朶の容積脈波との脈波伝播時間差を用いて評価したところ、マッサージによって各特徴量が有意に減少し、vPPG 解析によって皮下の血管抵抗の変化を評価できる可能性が示唆された。また、マッサー

ジ前であっても顔の部位によって指標に特徴的な違いがあり、血管の支配や特性の違いも評価できる可能性も示された。しかし、脈波形状は末梢血管特性だけでなく、心機能、組織までの血管性状および血圧なども影響すると考えられるため、今後、値の相対的な評価だけでなく、脈の伝播の物理モデルを考慮した解析が必要である。

(引用文献)

- 1) M. Yoshizawa, N. Sugita, et al.: Blood perfusion display based on video pulse wave, *Proc. 38th Annual Conference of IEEE Engineering in Medicine Biology Society* 2016, 4763-4767 (2016).
- 2) G. de Haan and V. Jeanne: Robust Pulse Rate From

- Chrominance-Based rPPG, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (10), 2878-2886 (2013).
- 3) M. Poh, et al.: Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation, *Optics Express*, 18(10), 10762-10774 (2010).
- 4) L. K. Saul and J. B. Allen: Periodic component analysis: An eigenvalue method for representing periodic structure in speech, *Proc. Advances in Neural Information Processing Systems 13 (NIPS 2000)*, 807-813 (2000).
- 4) S. Reza, et al.: Multichannel Electrocardiogram Decomposition Using Periodic Component Analysis, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55 (8), 1935-1940 (2008).
- 5) A. Tanaka, M. Kumagai and M. Yoshizawa: Non-contact Assessment of Peripheral Hemodynamics by Using Video Plethysmography, *Proc. IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 131-133 (2019).