

様々な圧縮映像を利用した非接触心拍数推定の精度検証

新井茉優¹ 金井謙治² 甲藤二郎¹

概要: 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の発生後, 人々の生活様式は大幅に変化している. 特に, Zoom, Cisco Webex, Microsoft Teams などのクラウドベースのビデオ会議ツールが広く普及していることから, 物理的な接触を避けながら, 仮想的に対面し, 共同することが可能となった. このリモートワークスタイルの確立に触発されて, 人々の健康をリモートで確認する遠隔医療の需要が高まっている. 本稿では, クラウドベースのビデオ会議ツールに非接触心拍数推定手法を採用し, リモートビデオを使用して心拍数の推定精度を評価する. さらに, さまざまな圧縮映像を用いて, 非接触心拍数推定に対する動画圧縮の影響を検証する.

キーワード: 心拍数推定, rPPG, 映像圧縮

Accuracy Validation of Non-contact Heart Rate Estimation Using Variety of Compressed Videos

MAYU ARAI^{†1} KENJI KANAI^{†2} JIRO KATTO^{†1}

Abstract: After the outbreak of COVID-19, the people's lifestyle is drastically changed. In particular, thanks to the wide spread of cloud-based video conference tools, such as Zoom, Cisco Webex and Microsoft Teams, we can meet each other virtually and work together without physical contact. Inspired by this remote work style, the demand for checking the people's health remotely is increasing. In this article, we adopt the non-contact heart rate estimation method to the cloud-based video conference tool and evaluate the estimation accuracy of heart rate using remote videos. In addition, we validate the impact of video compressions to the non-contact heart rate estimation using variety of compressed videos

Keywords: Heart rate estimation, rPPG, Image processing

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の発生によって人々は物理的な接触を可能な限り避けることが求められ, 人々の生活様式や勤務形態は大きく変化している. その中でも特に, Zoom, Cisco Webex, Microsoft Teams に代表されるクラウド型のビデオ会議ツールは, 私たちの日常生活において欠かせないツールになりつつある. このような新たな生活様式が求められる中, 情報通信技術を活用した遠隔医療サービスの需要が高まっている. 日本遠隔医療学会では, 2006 年 7 月に遠隔医療を「通信技術を活用した健康増進, 医療, 介護に資する行為[1]」と定義している.

筆者らは, このような遠隔医療における健康増進への技術への貢献として, ビデオ会議ツールと非接触型の心拍推定技術の連携を進めている. 非接触型の心拍推定技術の代表例として, リモートフォトプレチスモグラフィ (rPPG: remote photoplethysmography) が挙げられる. rPPG は, 可視光カメラによってキャプチャされた映像フレームから, 脈波に伴う皮膚表面の画素値の変化量を捉え心拍を推定する技術である.

ビデオ会議ツールに対して rPPG を適用させるうえで,

動画圧縮に起因する心拍推定精度への影響を明らかにすることが重要と言える. ビデオ会議ツールのように, インターネットを介して動画を配信する際, H.264/AVC や H.265/HEVC に代表される動画圧縮技術によって, 動画は圧縮されて伝送される. 特に, rPPG の場合において, この動画圧縮に起因する動画の劣化が rPPG の精度に悪影響を与える可能性がある. 例えば, [2]では, x264 および x265 で動画を圧縮したときに, ビットレートを小さくするにつれ, 線形的に心拍推定精度が悪化していくことを報告している. これを受けて, 同筆者は, [3]において, 深層学習ベースの超解像手法 (DRCN[4]) が心拍推定精度向上に貢献することも明らかにしている.

このように, 先行研究において, 動画圧縮が心拍推定精度へ与える影響を検証している例はあるが, 筆者の知る限り非常に少ない. また, [2]や[3]で検証している手法は, ICA (Independent Component Analysis) [5]と POS (Plane-Orthogonal-to-Skin) [6]に限られており, また, 利用している動画の解像度も 658×492 のみとなっている.

そこで, 本稿では, これらの関連する研究成果の信頼性向上を目的とし, ビデオ会議ツール (Zoom など) によって取得された動画シーケンスを含め, コーデックや圧縮率

1 早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻
Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University
2 早稲田大学理工学術院総合研究所
Waseda Research Institute of Science and Engineering

が異なるさまざまな圧縮映像シーケンスと、8種類のrPPG手法を検証可能なフレームワークpyVHR (python framework for Virtual Heart Rate) [7, 8]を使用して、心拍推定手法の推定精度を評価する。この実験を通じて、rPPGに対する動画像圧縮の影響を検証する。

2. 関連研究

これまでに多くの研究者が非接触心拍数推定手法を提案してきた。例えば、[9]では、顔のカラー画像からヘモグロビン濃度を分析することによって生理学的信号 (RR 間隔) を遠隔測定する手法を提案し、心拍数と心拍変動を推定することを可能にした。また、[10]では、2つの推定手法 (独立成分分析 (ICA) ベース手法とオイラービデオ倍率 (EVM: Eulerian Video Magnification) ベース手法) の推定精度を比較し、固有行列の結合近似対角化 (JADE: Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices) アルゴリズムを使用した新たなICAベースの推定手法を提案した。最近では、[7]では、rPPG手法のオープンフレームワークpyVHRを開発し、GitHubで8つの異なるrPPG手法を含むソースコードを公開している[8]。

以下に、pyVHRで実装されている8種類のrPPG手法ICA, PCA, GREEN, CHROM, POS, SSR, LGI, PBVについて紹介する。

- ① **ICA[5, 11]** : ICAは、独立性及び非ガウス性を前提として、入力信号の線形混合を分解することを目的とした統計手法である。本手法では、JADEとFastICAの両方のICAの反復実装を行っている。ICAによって3つに分解された信号の中から、rPPG信号として最も強い血液量パルス (BVP) 波形を含む信号を選択するために、各信号の正規化されたパワースペクトル密度 (PSD) を計算し、40~220bpmの範囲内で最大の周波数ピークもしくは信号対雑音比 (SNR) を持つ信号を選択する。
- ② **PCA[12]** : 主成分分析 (PCA) は、分散を最大化するとともに共分散を最小化し、データの次元を減らすことを目的としている。PCAによって信号を3次元に減らし、ICAと同じように各信号からPSDを計算して最も強いBVP波形を含む信号を検出する。
- ③ **GREEN[13]** : RGB色空間におけるGチャンネルがオキシヘモグロビンによる吸収ピークに対応する最も強いPPG信号を与えることが知られている。そこで、Gチャンネルの平均値を計算し、Region Of Interest (ROI) 領域内のスペクトルを抽出して最高周波数成分を求める。
- ④ **CHROM[14]** : rPPG信号の弱点である皮膚表面での鏡面反射に起因する予測不可能な誤差に対処するために提案された手法である。皮膚から反射される光は、変化が心周期に関連する拡散反射成分と、光源の色を

示し、パルス信号がない鏡面反射成分の2つの成分で構成される。CHROMでは、色差、つまりクロミナンス信号を使用して鏡面反射成分を除去する。

- ⑤ **POS[6]** : CHROMと同じ目的を持っており、時間的に正規化されたRGB色空間で肌の色調に直交する平面を定義する。この平面へ信号を射影することで鏡面反射成分を除去する。
- ⑥ **SSR[15]** : スキンピクセルの部分空間の構築と、後続のフレーム間の部分空間の回転角の計算という2つの段階で構成されている。スキンピクセルの部分空間は皮膚を表すRGB色空間の固有ベクトルによって表され、時間領域で起こる部分空間の変化を瞬間的な回転とスケーリングとしてモデル化したものを、パルス信号の抽出のために用いる。
- ⑦ **LGI[16]** : 前処理された信号から新しい特徴空間を見つけ、この新しい空間へ信号を射影する。LGIによって求められるrPPG信号は、人間の動きや明度の変化などの妨害要因に対してよりロバストになる。
- ⑧ **PBV[17]** : 皮膚の血液量の変化によって引き起こされる光吸収の変化は正規化された色空間の特定のベクトルに沿って発生することが知られている。このベクトルをパルス血液量 (PBV) ベクトルとし、PBVベクトルを用いてBVP信号を求める。

本稿の筆者らもまた、[18]において、4Kネットワークカメラを使用して[10]で紹介されているICAベースの手法 (JADE) を利用して、地下鉄の駅構内といった、より現実的な環境下において、カメラと被写体との距離をパラメータとして、rPPG手法の推定精度について検証を行った。

しかしながら、1章にて述べたように、動画像圧縮がrPPG手法の精度に与える影響について検証した先行事例は少ない。そこで、これら先行研究を踏まえて、本稿にて、pyVHRを利用し、コーデックや圧縮率を変化させた様々な圧縮動画像シーケンスにおけるrPPG手法の精度評価検証を行う。

3. rPPG手法の精度評価実験

3.1 実験環境とシナリオ

(1) 映像撮影と映像圧縮

rPPGの推定精度を検証するために、2つの異なる環境で顔映像を取得する。1つは、Zoomデスクトップクライアントを使用して録画を行い、もう1つは、FFmpegを使用して非圧縮動画を録画する。

まず、Zoomを用いた場合においては、顔映像を約64秒間、1588フレーム取得した。取得された映像の解像度は640×360で、ビットレートは388kbpsである。また、Zoomは、映像コーデックとしてH.264/AVCを採用している。デスクトップクライアントから映像エンコードパラメータを指定

や変更することはできなかったため、Zoom 録画を利用した実験は、現状のテレビ会議ツールをそのまま採用した場合の rPPG 手法の性能把握を目的とする。

次に、FFmpeg を用いた場合、解像度の異なる 2 種類の非圧縮の顔映像をそれぞれ約 64 秒間取得した。解像度に関しては、精度を比較するために、Zoom 録画に近い 640×480 と、それよりも解像度の高い 1920×1080 を採用した。これらの非圧縮映像から FFmpeg を利用してさまざまな圧縮映像を生成した。映像コーデックとしては H.264/AVC と H.265/HEVC を利用し、解像度 640×480 の場合は $30 \sim 5000\text{kbps}$ の範囲内で 9 種類のターゲットレートを、解像度 1920×1080 の場合は $50 \sim 5000\text{kbps}$ の範囲内で 8 種類のターゲットレートをそれぞれ選択した。以上をまとめると、解像度ごとに、ビットレートとコーデックが異なる 18 種類及び 16 種類の映像シーケンスを用意し、rPPG 手法の精度評価実験を行い、rPPG 手法に対する動画像圧縮の影響を検証することとする。

可視光カメラ (Web カメラ) としては、解像度 640×480 の場合は Logitech C920n を、解像度 1920×1080 の場合は Logitech BRIO C1000eR をそれぞれ利用した。顔映像の記録中は、座りながら Web カメラと顔の距離を約 30cm に保ち、顔はカメラの正面から可能な限り動かないようにしている。なお、被験者は 20 代の成人女性 1 名である。

(2) rPPG 手法

前述したように、rPPG 手法として pyVHR と呼ばれる rPPG メソッドのオープンフレームワーク[エラー! ブックマークが定義されていません。]を利用した。pyVHR は、ICA, PCA, GREEN, CHROM, POS, SSR, LGI, PBV の 8 種類の rPPG 手法を利用することができ、本評価実験でも、8 種類の rPPG 手法全てを適用し精度評価を行う。なお、pyVHR では、rPPG 手法を適用する領域として、顔検出手法によって推定された顔の皮膚領域全体や矩形領域を指定することができるが、本実験では、顔の皮膚領域全体を利用している。

(3) 評価指標

評価指標に関しては、rPPG 手法の精度評価として、心拍数の真値と推定値における二乗平均平方根誤差 (RMSE) を使用し、映像圧縮の客観画質評価として、非圧縮動画像と圧縮動画像との間のピーク信号対雑音比 (PSNR) を使用する。

また、心拍数の真値を収集するために、映像録画中にウェアラブルデバイスである Polar OH1[19]を使用して心拍数を測定した。Polar OH1 は、アームバンド型の光学式心拍数センサで、1 秒ごとの心拍数を出力する。

4. rPPG 手法の精度評価結果

4.1 Zoom を用いた場合

まず、表 1 に、Zoom を用いた場合の各 rPPG 手法における心拍数推定精度の結果を示す。RMSE の算出には、Polar OH1 の値を真値として採用している。表からわかるように、すべて rPPG 手法において RMSE が非常に高くなっている。これは、現時点での Zoom で録画した圧縮映像から心拍数を推定するには、大きな誤差を含む場合があることを意味する。現在の Zoom が選択している圧縮レートは、主に通信帯域やクライアント PC の CPU 負荷を考慮したものであると予想され、Zoom ユーザ側でより柔軟に圧縮レートを選択することができない。今後、rPPG 手法を適用し高精度な推定を行うためには、rPPG に適した圧縮レートを選択する必要があると言える。

表 1 Zoom によって記録された映像を使用した心拍数推定の精度

Table 1 Accuracy of heart rate estimation using video recorded by Zoom.

メソッド	RMSE
ICA	19.76
PCA	23.84
GREEN	23.84
CHROM	30.14
POS	32.56
SSR	34.48
LGI	28.17
PBV	26.97

4.2 FFmpeg を用いた場合

前節の Zoom 録画による精度評価結果を受けて、本節では、rPPG 手法の精度と動画像の圧縮率 (あるいは劣化度合い) の関係を明らかにする。表 2 と表 3 に解像度 640×480 の場合、表 4 と表 5 に解像度 1920×1080 の場合における圧縮時の客観画質評価 (PSNR) と各 rPPG 手法の心拍数推定精度の結果をそれぞれ示す。前節と同様に、RMSE の算出には、Polar OH1 の値を真値として採用している。

これらの表からわかるように、映像コーデックや解像度に関係なく、映像品質が高くなると RMSE が大幅に低くなることがわかる。特に、ほとんどすべての手法において、PSNR が 45dB を超えると、RMSE を 10 未満に抑えられることとなる。したがって、これらの結果から映像品質が十分に高い (例えば PSNR が 45dB 以上) 場合において、心拍数はある程度の精度で推定できることを示唆している。

次に、映像コーデックの違いに注目すると、H.264/AVC と比較して H.265/HEVC は、映像のビットレートを明らかに抑制できており、より高い映像品質を実現できている。

表 2 解像度 640×480 の映像に対する映像品質と心拍数推定精度の結果 (H.264/AVC) (10 未満の RMSE を強調表示)

Table 2 Results of video quality and heart rate estimation accuracy for video with a resolution of 640x480 (H.264/AVC) (RMSEs less than 10 are highlighted).

ビットレート (kbps)	PSNR	心拍数推定に対する RMSE							
		ICA	PCA	GREEN	CHROM	POS	SSR	LGI	PBV
28	35.12	19.48	18.00	25.44	32.88	36.39	35.11	41.84	31.25
49	37.65	23.63	23.55	24.53	36.81	29.53	27.68	27.05	30.01
69	39.00	16.56	19.61	34.27	30.08	29.55	26.40	30.54	27.71
99	40.43	15.51	17.88	31.87	22.59	36.08	19.99	31.83	24.62
200	42.83	19.65	11.12	19.17	26.24	29.28	11.74	26.55	25.91
602	44.86	25.41	20.85	7.26	8.92	12.42	6.56	10.56	28.23
1002	45.40	7.84	9.14	4.91	6.47	8.70	5.08	7.68	11.79
3003	46.47	7.98	19.96	5.01	5.26	5.56	5.33	5.18	9.63
5002	47.19	13.64	11.67	5.13	4.96	5.76	5.32	5.14	17.38

表 3 解像度 640×480 の映像に対する映像品質と心拍数推定精度の結果 (H.265/HEVC) (10 未満の RMSE を強調表示)

Table 3 Results of video quality and heart rate estimation accuracy for video with a resolution of 640x480 (H.265/HEVC) (RMSEs less than 10 are highlighted).

ビットレート (kbps)	PSNR	心拍数推定に対する RMSE							
		ICA	PCA	GREEN	CHROM	POS	SSR	LGI	PBV
30	39.27	22.57	23.40	25.75	28.15	31.82	28.28	26.56	27.58
51	41.49	14.74	16.00	29.45	31.66	31.49	33.92	30.42	32.70
71	42.49	16.75	15.36	20.43	30.48	30.85	23.96	20.70	21.73
101	43.36	13.61	14.93	18.40	21.09	19.07	18.63	18.35	18.09
202	44.50	10.02	18.00	13.88	25.59	30.59	19.33	24.22	20.86
600	45.65	9.50	12.57	5.89	12.43	11.58	6.70	9.87	9.77
999	46.13	7.52	6.60	6.05	8.35	5.72	5.34	5.04	5.86
2999	47.24	28.00	15.17	6.19	6.04	5.65	5.61	5.33	9.21
5004	48.00	9.18	6.08	5.08	5.14	5.40	5.29	5.08	5.22

表 4 解像度 1920×1080 の映像に対する映像品質と心拍数推定精度の結果 (H.264/AVC) (10 未満の RMSE を強調表示)

Table 4 Results of video quality and heart rate estimation accuracy for video with a resolution of 1920x1080 (H.264/AVC) (RMSEs less than 10 are highlighted).

ビットレート (kbps)	PSNR	心拍数推定に対する RMSE							
		ICA	PCA	GREEN	CHROM	POS	SSR	LGI	PBV
40	29.49	17.10	23.73	19.80	41.96	44.68	52.84	38.82	30.09
64	33.18	17.95	27.07	17.60	38.44	25.42	25.28	22.49	22.71
95	35.40	26.62	26.35	16.22	30.19	32.55	32.05	29.61	37.25
195	38.49	25.26	19.10	13.64	21.48	35.30	32.23	27.13	25.60
596	41.91	8.21	17.01	12.55	27.77	19.85	10.40	11.52	20.28
996	43.14	25.84	6.49	11.10	8.46	8.41	6.90	7.70	12.89
2994	45.34	5.33	15.18	9.29	5.43	3.97	3.71	3.55	11.90
4991	46.18	6.08	6.33	8.49	4.50	3.90	3.73	3.37	11.41

表 5 解像度 1920×1080 の映像に対する映像品質と心拍数推定精度の結果 (H.265/HEVC) (10 未満の RMSE を強調表示)
Table 5 Results of video quality and heart rate estimation accuracy for video with a resolution of 1920x1080 (H.265/HEVC) (RMSEs less than 10 are highlighted).

ビットレート (kbps)	PSNR	心拍数推定に対する RMSE							
		ICA	PCA	GREEN	CHROM	POS	SSR	LGI	PBV
40	33.46	22.67	22.38	21.69	25.54	45.64	35.72	38.20	18.91
64	36.62	19.05	25.68	24.48	30.54	40.75	29.33	33.76	30.39
95	39.38	20.32	13.89	18.68	29.05	41.95	40.99	42.90	24.53
198	42.07	15.51	10.71	12.96	30.50	14.73	11.64	29.10	17.08
599	44.31	8.99	7.95	10.45	8.46	7.78	4.41	6.00	12.66
999	45.05	5.22	6.82	10.34	6.77	4.31	4.01	4.67	12.96
3004	46.45	5.54	5.48	9.34	5.47	3.96	3.68	3.49	10.60
5013	47.24	6.08	4.91	9.39	4.62	3.84	3.66	3.36	11.13

前段落で述べたように、rPPG 手法はある一定以上の品質に動画を圧縮する必要があると言え、H.265/HEVC を利用することで、より高い rPPG の推定精度を維持しながら、映像データ量 (通信量) の削減に貢献できることが期待される。例えば、今回の評価実験より、H.265/HEVC を利用することで、同一程度の rPPG 手法の精度 (約 10 の RMSE 未満) を達成するために、H.264/AVC と比較して、ビットレートを 1000kbps から 600kbps へ抑えることが示唆されている。

上記に示されている傾向は、解像度の違いに対しても同様のことが言える。ただし、ある程度以上のビットレート (映像品質) を確保できると、より解像度を高くすることで、rPPG 手法の精度も高くなる傾向を示している。

以上より、今回の結果からは、ある程度の映像品質 (例えば PSNR が 45dB 以上) を確保し、かつ、より高解像度な映像であれば、より高精度な rPPG の実現に貢献しうることが期待できる。

5. 結論

本稿では、遠隔医療における健康増進への技術貢献として、ビデオ会議ツールと非接触型の心拍推定技術の連携を目的に、2 つの実験を通して rPPG 手法の精度検証を行った。1 つ目の実験において、現行の Zoom を用いて録画した映像を使用して様々な rPPG 手法を適用した際の心拍数推定精度の評価を行い、より柔軟な動画圧縮制御の必要性を示した。先の 1 つ目の実験を踏まえて、2 つ目の実験において、さまざまな圧縮映像を使用して、動画圧縮が rPPG 手法に与える影響を検証した。評価実験の結果より、映像品質が十分に高く (例えば PSNR が 45dB 以上)、かつより高解像度の映像であるほど、多くの rPPG 手法において高精度な心拍数推定を実現できる可能性を示した。今後は、より被験者を増やすことや、様々な状況下において

rPPG 手法の精度検証を行っていくと共に、テレビ会議ツールと rPPG 手法を連携させ、顔映像の撮影から配信、rPPG 処理までのエンドツーエンド遅延を測定し、rPPG のリアルタイム性についての評価も行っていく予定である。

参考文献

- [1] 日本遠隔医療学会 “図説・日本の遠隔医療 2017” 2017 年 7 月.
- [2] D. J. McDuff, E. B. Blackford, J. R. Stepp, “The impact of video compress on remote cardiac pulse measurement using imaging photoplethysmography,” IEEE Int. Conf. on Automatic Face & Gesture Recognition 2017, Jun. 2017.
- [3] D. J. McDuff, “Deep Super Resolution for Recovering Physiological Information From Videos,” IEEE CVPR Workshop, 2018.
- [4] J. Kim, J. Kwon Lee, and K. Mu Lee, “Deeply-recursive convolutional network for image super-resolution,” IEEE CVPR, 2016.
- [5] D. McDuff, S. Gontarek, and R. Picard, “Improvements in remote cardio-pulmonary measurement using a five band digital camera,” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.61, Issue: 10, pp.2593-2601, 2014.
- [6] W. Wang, A. Den Brinker, S. Stuijk, and G. De Haan, “Algorithmic Principles of Remote-PPG,” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.64, Issue:7, pp.1479-1491, 2017.
- [7] G. Boccignone, D. Conte, V. Cuculo, A. D’Amelio, G. Grossi, and R. Lanzarotti, “An Open Framework for Remote-PPG Methods and Their Assessment,” IEEE Access, Vol.8, pp.216083-216103, 2020.
- [8] pyVHR [online]: <https://github.com/phuselab/pyVHR>
- [9] G. Okada, T. Yonezawa, K. Kurita, and N. Tsumura, “Monitoring emotion by remote measurement of physiological signals using an RGB camera,” ITE Transactions on Media Technology and Applications Vol.6, No.1 pp.131-137, 2018.
- [10] K. Alghoul, S. Alharthi, H. A. Osman, and A. E. Saddik, “Heart Rate Variability extraction from videos signals: ICA vs. EVM comparison,” IEEE Access, Vol.5, pp.4711-4719, 2017.
- [11] M.-Z. Poh, D. J. McDuff, and R. W. Picard, “Non-contact automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation,” Optics Express, Vol.18, Issue: 10, pp.10762-10774, 2010.
- [12] M. Lewandowska, J. Ruminski, T. Kociejko, and J. Nowak, “Measuring pulse rate with a webcam – A non-contact method for

- evaluating cardiac activity,” 2011 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FebCSIS), pp.405-410, 2011.
- [13] W. Verkruysse, L. O. Svaasand, and J. S. Nelson, “Remote plethysmographic imaging using ambient light,” *Optics Express*, Vol.16, Issue: 26, pp.21434-21445, 2008.
- [14] G. de Haan and V. Jeanne, “Robust Pulse Rate From Chrominance-Based rPPG,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.60, Issue: 10, pp.2878-2886, Oct. 2013.
- [15] W. Wang, S. Stuijk, and G. de Haan, “A Novel Algorithm for Remote Photoplethysmography: Spatial Subspace Rotation,” *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, Vol.63, Issue: 9, pp.1974-1984, Sep. 2016.
- [16] C. S. Pilz, S. Zaunseder, J. Krajewski, and V. Blazek, “Local Group Invariance for Heart Rate Estimation from Face Videos in the Wild,” 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), pp.1335-1343, Jun. 2018.
- [17] G. de Haan and A. van Leest, “Improved motion robustness of remote-PPG by using the blood volume pulse signature,” *Physiological Measurement*, Vol.35, No.9, pp.1913-1926, Aug. 2014.
- [18] M. Yasumaru, Z. Cheng, R. Yokoyama, K. Kanai, and J. Katto, “Accuracy evaluations of contact-free heart rate measurement methods using 4K facial images,” *IEEE ICCE* 2019.
- [19] Polar OH1 [online]:
<https://www.polar.com/ja/products/accessories/oh1-optical-heart-rate-sensor>