

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K12070

研究課題名(和文) 可視光容積脈波の体動アーチファクト耐性の高さを引き出す至適測定法の探求

研究課題名(英文) Exploring optimal measurement methods to exploit the high motion artifact tolerance of visible light photoplethysmographs

研究代表者

松村 健太 (Matsumura, Kenta)

富山大学・学術研究部医学系・講師

研究者番号：30510383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：波長、測定モード(反射型と透過型)の異なる計10種類の光電式容積脈波のモーションアーチファクト耐性を、計3つの実験を通して調べた。参加者として、健康な若年層だけでなく、様々な病歴を持つ中高年層もリクルートした。その結果、どの層を対象としても、緑色光および青色光、次いで反射型の近赤外光を用いるのが最適であること、近赤外光では、ある程度離れたセンサー間隔で測定するのが最適であることが分かった。一連の実験により、脈波測定波長およびセンサー間隔とモーションアーチファクト耐性に関する知識が、測定需要の高い人口を対象として一般化可能ということが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、体動アーチファクトの研究は、限られた条件下でしか行われてこなかった。これに対し、本研究では、波長を可視光から近赤外光にまで拡張し、反射型だけでなく透過型の測定モードも追加し、さらに同一部位での同時測定も行った。実験参加者も、健康な学生だけでなく、さまざまな病歴を持つ中高年も対象とした。その結果、一般化可能性の高い知見を得ることができた。本研究の成果は、ウェアラブルデバイス開発の際に役立つ基礎資料になると期待される。

研究成果の概要(英文)：The motion artifact tolerance of 10 different photoplethysmographs with different wavelengths and measurement modes (reflective and transmissive) was investigated through a total of three experiments. Healthy young adults as well as middle-aged and older adults with various medical histories were recruited as participants. The results showed that regardless of the population, green and blue light followed by near-infrared light in reflectance mode is best used and that near-infrared light is best measured at some distance between sensors. A series of experiments revealed that the knowledge of wavelength and sensor-to-sensor interval and motion artifact tolerance in photoplethysmography can be generalized to populations with high measurement demand.

研究分野：生体医工学

キーワード：光電式容積脈波 心拍数 脈拍数 生体センサー 体動アーチファクト 血圧

1. 研究開始当初の背景

光電式容積脈波とは、心臓の拍動によって生じる動脈内の容積変化を、光電的手法を用いて経時的に表した波形 (= グラフ) のことをいう。光電式容積脈波は、光源、たとえば発光ダイオード (LED) と、受光器、たとえばフォトダイオード (PD) を用いて容易に計測可能であり、ここから、心拍 (脈拍) 数や修正基準化脈波容積、心拍 (脈拍) 変動性、動脈血中酸素飽和度、血管年齢、血圧といった、多様かつ重要な生理指標を算出、あるいは、推定可能である。光電式容積脈波は、現在、生体医工学、心理生理学、健康科学などに渡る幅広い研究分野で有効利用されているだけでなく、スマートフォンや腕時計に搭載されて日常生活中でも測定可能になるなど、益々、活躍の場を広げつつある。

こうした幅広い利用の一方で、光電式容積脈波の最大の弱点は、極めて体動アーチファクトの影響を受けやすいことである。しかしながら、近年、この最大の弱点は、これまで脈波測定で頻繁に用いられてきた近赤外光ではなく、可視光を用いることで、かなりの部分まで克服できることが分かってきた。例えば、ある研究によると、緑色光脈波が近赤外光脈波と比べ、被測定者のジャンプ動作から受ける波形の乱れが小さいという。また、別の研究では、赤色光脈波と比べ緑色および青色光脈波において、測定部位の揺さぶりから受ける波形の乱れが小さいことが明らかにされた。この現象の背景としては、可視光の方が生体への透過深度が浅いため、生体深部にある脂肪組織などの柔らかい領域、つまり体動による影響を受けやすい領域、からの情報をあまり含んでおらず、従って、体動による影響を受けづらいという機序が考えられている。

このように、可視光脈波の体動アーチファクト耐性の高さは徐々に明らかにされつつあるが、問題は、現時点において、この有益かつ興味深い現象に関する基礎的検討がまだ十分に行われていない点である。第1に、そもそも、各可視光、より具体的には青、緑、赤色光と、近赤外光の体動アーチファクト耐性とを、同時に比較する研究が存在しない。存在するのは、可視光内での比較、あるいは、緑色光と近赤外光の比較という、不完全な比較のみである。そのため、これらを全てひっくるめて比較した場合、可視光、特に、青色光と緑色光は、近赤外光と比較して、どれくらい体動アーチファクトに強いのだろうか？

第2に、光電容積脈波には、センサー (LED と PD) の配置によって、透過型 (向かい合わせに置く) と反射型 (同一平面上に置く) という区分がある。しかしながら、これらの中で体動アーチファクト耐性の比較を行う研究は存在しない。透過型と反射型では、光の経路および探索深度が違うのは明らかだが、どちらの方がどれだけ、体動アーチファクトに強いのだろうか？

第3に、反射型センサーの場合、体動アーチファクト耐性と関連する透過深度は、LED-PD 間のセンサー間隔が狭いほど、浅いことが知られている。これらを踏まえ、体動アーチファクトから最も影響を受けづらいような、センサー間隔の組み合わせは、どういったものであろうか？

第4に、ヒト側の要因として、年齢と共に表皮が厚く硬くなることが知られている。これまでの知見は、若者を対象とするものがほとんどであったが、中年、高齢者を対象とした場合も、青色と緑色光は、近赤外光と比較して、体動アーチファクトに強いのだろうか？

これらの問いに答えられる研究は、まだ存在しない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以上に挙げた4つ全ての問いに対し、直接的な回答となる実験結果を得ることを通して、可視光脈波の体動アーチファクト耐性の高さについての詳細な検討を行うと共に、この耐性の高さを引き出せる至適測定法を見出すことである。

3. 研究の方法

(1) 実験1

目的：青色光と緑色光脈波は近赤外光脈波と比較して、どれくらい体動アーチファクトに強いのか？ 透過型脈波と反射型脈波では、どちらが体動アーチファクトに強いのか？ という点を明らかにする。

参加者：12名の健康な大学生を対象とした。女性は5名、男性は7名であり、平均年齢 22.8 ± 1.1 (標準偏差: SD) 歳であった。実験2時間前から、タバコ、食事、カフェイン入り飲料、激しい運動を控え、女性は生理中を外して参加した。

装置：青色 (470 nm)、緑色 (525 nm)、赤色 (660 nm)、近赤外 (810 nm) 発光ダイオード (LED) と受光ダイオード (PD) を同一平面上に配置した4波長 LED 反射型一体型センサーと、これと組み合わせて使う透過型センサー (PDのみ配置) を開発した (図1)。これを、参

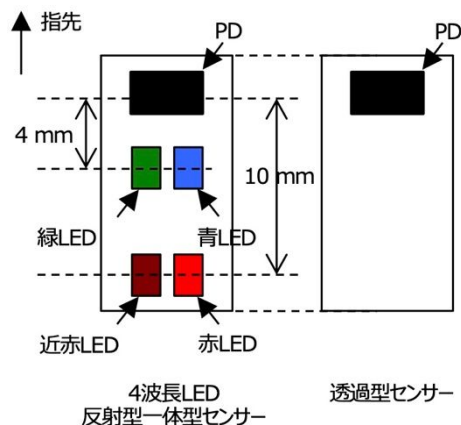


図1. 開発したセンサー

加者の右人差し指に向かい合わせで取り付けた(図2)。LEDはパルス発光するように設計されており(0.5 ms 発光、3.5 ms 消光のサイクル)、LED オン時からオフ時の受光強度を引くことで、環境光からの潜在的影響をキャンセルした。また、順次パルス発光により、複数波長脈波の同時測定を可能にした。開発した装置では、4光源(青、緑、赤、近赤外)×2測定モード(反射、透過)の計8種類が測定できるが、生体組織の高い吸光特性により、青色透過型と緑色透過型脈波は測定できなかったため、以降の分析からは除外し、6種類(青反射、緑反射、赤反射、赤透過、近赤反射、近赤透過)の脈波計測値を対象とした。

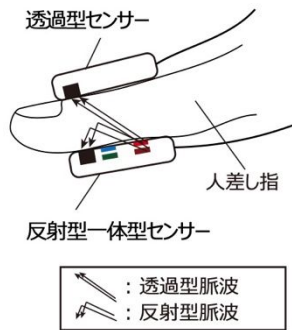


図2. センサーの装着



図3. 体動アーチファクト

手順: 18秒間の安静、垂直方向指振り、水平方向指振り条件を1セットとして設定し(図3)これを2セット実施した。実施順番はカウンターバランスした。安静時では、腕置き台から約10cmの高さでセンサーを装着した指を静止して貰った。垂直、水平方向指振り条件では、6 Hz以上の早さになるように、指を含む手のひら全体を、出来るだけリズムカルに小刻みに振って貰った。6 Hzという基準は、心拍成分の主要帯域である5 Hz以下との区別を容易にするために設定した。

S/N比の算出: 各条件における各脈波信号を高速離散フーリエ解析にて周波数帯域に変換した。これを元に、信号である心拍成分のパワー(PS)を、同時計測した心電図から算出した心拍数(Hz換算)の基本および二倍高調波における区間積分値(バンド幅: 0.8 Hz)の和として算出した。ノイズである体動アーチファクトのパワー(PN)は、体動周波数の基本周波数における区間積分値(バンド幅: 1.6 Hz)として求めた。S/N比は、 $10 \times \log(PS / PN)$ の式を用いて算出した(図4)。

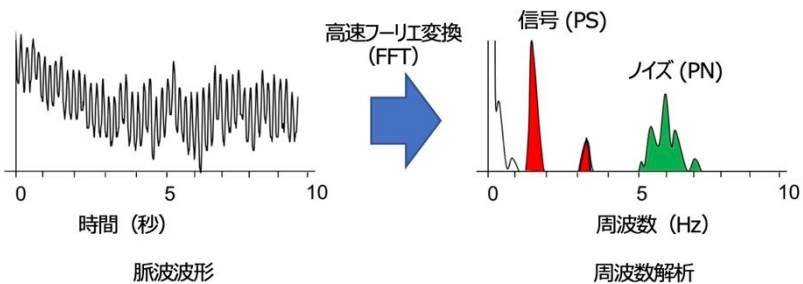


図4. データ解析法

統計解析: 6種類の脈波それぞれのS/N比を、繰り返し2回で平均化し、6種類(青反射、緑反射、赤反射、赤透過、近赤反射、近赤透過)×3条件(安静、垂直方向指振り、水平方向指振り)で算出した。その上で、S/N比を、Kolmogorov-Smirnov検定を用いた正規性の確認の後、2要因反復測定分散分析を用いて解析した。球面性の仮定が担保されない場合には、Greenhouse-Geisser補正を用いた。主効果が有意であった場合には、その下位検定として、Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Q (REGWQ)の多重比較を実施した。

(2) 実験2

目的: 反射型近赤外光脈波センサーにおいて、体動アーチファクトの影響を最も受けづらいのセンサー間間隔は何mmか? という点を明らかにする。

参加者: 6名の健康な成人(20歳代: 5名、40歳代: 1名)を対象とした。女性は2名、男性は4名であった。

装置: 4つの近赤外(810 nm)発光ダイオード(LED)と受光ダイオード(PD)を一列に並べ(センサー間距離: 4.5、7.8、11.1、14.4 mm)異なる4つのセンサー間隔における脈波を同時測定可能な4近赤LED反射型一体型センサーを開発した(図5)。これを、参加者の人差し指に取り付けた。

手順: 20秒間の安静、垂直方向指振り条件を1セットとして設定し、これを2セット実施した。実施順番はカウンターバランスした。安静時では、腕置き台から約10cmの高さでセンサーを装着した指を静止して貰った。垂直方向指振り条件では、5 Hz以上の早さになるように、指を含む手のひら全体を、出来るだけリズムカルに小刻みに振って貰った。

S/N比の算出: 各条件における各脈波信号を高速離散フーリエ解析にて周波数帯域に変換した。これを元に、信号である心拍成分のパワー(PS)を、同時計測した心電図から算出した心拍数(Hz

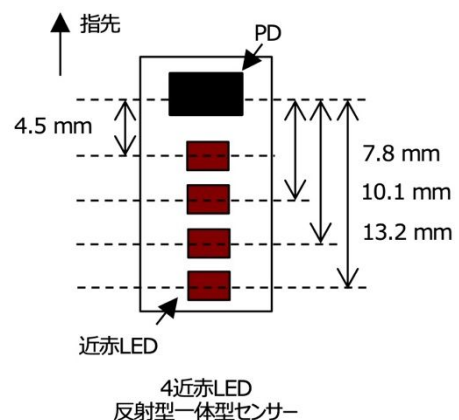


図5. 開発したセンサー

換算)の基本調波における区間積分値(バンド幅: 0.8 Hz)の和として算出した。ノイズである体動アーチファクトのパワー(PN)は、体動周波数の基本周波数における区間積分値(バンド幅: 2.0 Hz)として求めた。S/N比は、 $10 \times \log(PS / PN)$ の式を用いて算出した。

統計解析: 4種類の脈波それぞれのS/N比を、繰り返し2回で平均化し、条件(安静、垂直方向指振り)毎に算出した。その上で、S/N比を、条件毎に1要因反復測定分散分析を用いて解析した。主効果が有意であった場合には、その下位検定としてTukey法による多重比較を実施した。

(3) 実験3

目的: 健康若年層以外を対象としても、青色光および緑色光脈波は近赤外光脈波と比較して体動アーチファクトに強いのか? 近赤外光脈波における最適なセンサー間隔は同一か? という点を明らかにする。

参加者: 11名の一般成人(20歳代: 1名、30歳代: 3名、40歳代: 4名、50歳代: 3名)を対象とした。女性は4名、男性は7名、全員右利きであり、高血圧5名(うち1名は降圧薬内服)、高血圧家族歴7名、花粉症薬内服3名、子宮内膜症1名、既往歴は大腸ポリープ、盲腸、脳動脈瘤(コイル塞栓術)、子宮頸がんが1名ずつであった。

装置: 実験1の4波長LED反射型一体型センサーを右手人差し指に、実験2の4近赤LED反射型一体型センサーを左手人差し指に取り付けた。

手順: 最初の20秒間は、右手のみ水平方向指振りをを行い左手は安静、次の20秒間は左手のみ水平方向指振りをを行い右手は安静、という条件を1セットとして設定し、これを3セット実施した。すなわち、参加者は、右手を最初として、交互に手のひらを振った。実施順番と左右のセンサーの装着は固定とした。手を振る際には、5 Hz以上の早さになるように、指を含む手のひら全体を、出来るだけリズムカルに小刻みに振って貰った。

S/N比の算出: 各条件における各脈波信号を高速離散フーリエ解析にて周波数帯域に変換した。これを元に、信号である心拍成分のパワー(PS)を、1.0~4.5 Hz区間における区間積分値として算出した。ノイズである体動アーチファクトのパワー(PN)は、4.6~10.0 Hz区間における区間積分値として求めた。S/N比は、 $10 \times \log(PS / PN)$ の式を用いて算出した。

統計解析: 各脈波のS/N比を、同一条件繰り返し3回で平均化し、右手は、4種類(青、緑、赤、近赤)×2条件(安静、垂直方向指振り)、左手は、4種類(4.5、7.8、11.1、14.4 mm)×2条件(安静、垂直方向指振り)毎に算出した。その上で、S/N比を、手毎に2要因反復測定分散分析を用いて解析した。主効果が有意であった場合には、その下位検定としてTukey法による多重比較を実施した。

(4) 追加実験

目的: これまでに脈波のみを用いた血圧推定を行ってきたが、2波長の同時測定までしか行えていなかったため、今回開発した4波長同時測定センサーを有効活用し、4波長を同時測定して血圧推定した。

参加者: 14名の学生を対象とした。女性は6名、男性は8名であり、平均年齢は 22.8 ± 1.1 (SD)歳であった。

装置: 実験1の4波長LED反射型一体型センサーを右手人差し指に、左腕に市販の上腕血圧計を装着した。

手順: 3分の安静後、3分の暗算課題を実施し、各2回ずつ血圧を測定しながら4種類の反射型脈波(青、緑、赤、近赤)を同時計測した。

統計解析: Bland-Altmanプロットを描き、4種類の脈波それぞれから推定した血圧と、上腕血圧計から得られた基準血圧との一致度を評価した。

4. 研究成果

(1) 実験1

体動の条件間で、安静(23.4dB) > 水平指振り(3.1dB) > 垂直指振り(-2.4dB)という有意差が認められた。また、脈波の種類の中に、青色光反射(12.0dB) > 緑色光反射(11.9dB) > 近赤光反射(8.5dB) > 赤色光反射(6.6dB) > 赤色光透過(5.0dB) > 近赤外光透過(4.2dB) > 赤色光透過(4.2dB)という有意差が認められた(図6)。一方、交

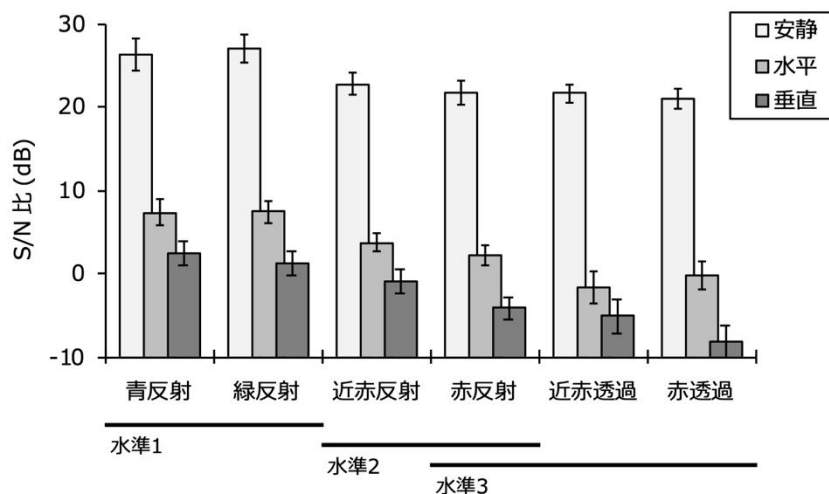


図6. 実験結果 (同一水準下線の間に有意差なし)

相互作用は有意でなかった。青色光脈波と緑色光脈波は、反射型近赤外光脈波と比較して 3.5dB、透過型近赤外光脈波との比較では 7.0dB、体動アーチファクトに強いと分かった。また、同一波長で比較可能な近赤外光、赤色光脈波に注目すると、反射型は透過型と比較して 3.5dB 体動アーチファクトに強いと分かった。

以上の結果より、従来言われていた緑色光脈波だけでなく、青色光脈波も体動アーチファクトに強いことが確認された。また、反射型近赤外光脈波が、緑色光および青色光脈波に次ぐ体動アーチファクト耐性を示したことから、特段の理由がない限り、近赤外光脈波測定においては透過型より反射型の使用が良いことが分かった。一方で、赤色光脈波の体動アーチファクト耐性の低さが明らかになったため、パルスオキシメーターなどで必要な場合を除き、脈波測定に赤色光は用いない方が良いことも分かった。

(2) 実験 2

安静条件では、4.5 mm (4.2dB) 7.8 mm (4.8dB) 11.1 mm (4.7dB) 14.4 mm (4.5dB) と、有意差は認められなかった。一方、垂直指振りでは、7.8 mm (-3.8dB) 4.5 mm (-4.2dB) 11.1 mm (-4.5dB) > 4.5 mm (-4.2dB) 11.1 mm (-4.5dB) 14.4 mm (-6.7dB) と、2 番目と 4 番目に近いセンサー間で有意差があった。そのため、センサー間隔により、体動アーチファクト耐性が変わることが実証された。

従来、反射型センサーは、センサーの小型化という点からも近い位置で測定するのが常識であったが、本研究より、体動アーチファクトを考慮に入れないといけぬ測定では、あえて距離を離すことで良い結果が得られる可能性が示唆された。

(3) 実験 3

4 波長 LED 反射型一体型センサー：体動の条件間で、安静 (10.9dB) > 水平指振り (3.0dB) という有意差が認められた。また、脈波の種類の中に、緑色光反射 (10.6dB) 青色光反射 (8.5dB) > 青色光反射 (8.5dB) 近赤光反射 (5.2dB) > 近赤光反射 (5.2dB) 赤色光反射 (3.5dB) という有意差が認められた (図 7)。

4 近赤 LED 反射型一体型センサー：体動の条件間で、安静 (10.7dB) > 水平指振り (2.3dB) という有意差が認められた。また、センサー間隔の間に、11.1 mm (7.2dB) 14.3 mm (6.7dB) 7.8 mm (6.5dB) > 14.3 mm (6.7dB) 7.8 mm (6.5dB) 4.5 mm (5.5dB) という有意差が認められた (図 8)。

本実験より、年齢が高い参加者、必ずしも健康でない参加者を対象としても、より、緑色光および青色光脈波、次いで近赤外光を用いることが良く、赤色光脈波は必要な場合を除き使用を避けた方が良い、より、ある程度離れたセンサー間隔で近赤外光脈波を測定するのが良い、ということが明らかとなった。これにより、脈波測定波長およびセンサー間隔と体動アーチファクト耐性に関する知識が、測定需要の高い人口を対象として一般化可能ということが明らかとなった。本研究により、スマートウォッチや、その他のウェアラブルデバイス開発の際に役立つ知見を提供できたと評価できるだろう。

(4) 追加実験

解析の結果、収縮期血圧推定には近赤外光脈波、拡張期血圧と平均動脈圧には青色光脈波が最適であることが分かった。従来、緑色光と近赤外光脈波の比較から、近赤外光脈波の方が高精度と考えられていたが、以上の知見により、複数波長を組み合わせることでむしろ良い結果が得られる可能性が示唆された。本研究の結果は、カフレス血圧推定の精度向上に向けた新たなアプローチにつながるかもしれない。

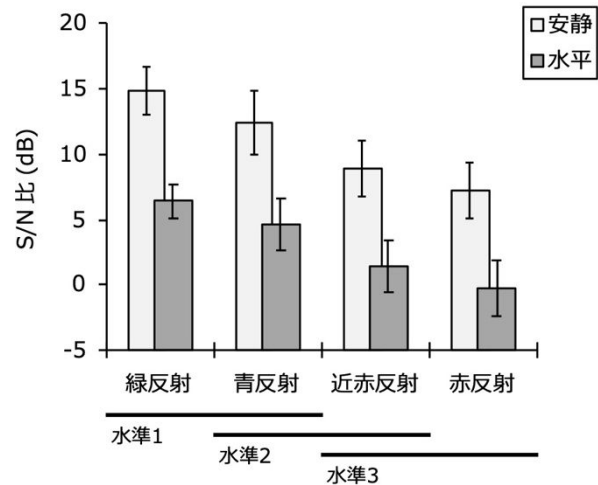


図 7. 実験結果 (同一水準下線の間には有意差なし)

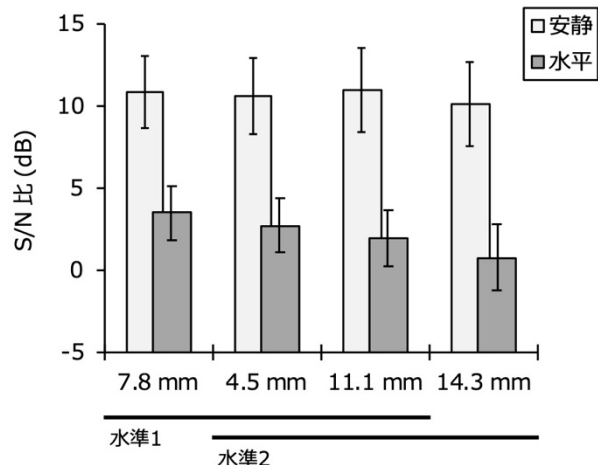


図 8. 実験結果 (同一水準下線の間には有意差なし)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsumura Kenta, Toda Sogo, Kato Yuji	4. 巻 8
2. 論文標題 RGB and Near-Infrared Light Reflectance/Transmittance Photoplethysmography for Measuring Heart Rate During Motion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 80233 ~ 80242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.2990438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Toda Sogo, Matsumura Kenta	4. 巻 23
2. 論文標題 Investigation of Optimal Light Source Wavelength for Cuffless Blood Pressure Estimation Using a Single Photoplethysmography Sensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3689 ~ 3689
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23073689	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 任田 宗吾、田町 臣悟、松村 健太
2. 発表標題 光電脈波計測におけるセンサ間距離が体動アーチファクトに与える影響
3. 学会等名 第60回日本生体医工学学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村 健太、任田 宗吾、加藤 祐次
2. 発表標題 体動アーチファクトが波長および測定モードの異なる光電容積脈波に与える影響
3. 学会等名 MEとバイオサイバネティクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Matsumura, Sogo Toda, Yuji Kato
2. 発表標題 The optimal light color and measuring mode for photoplethysmography in the presence of motion artifacts
3. 学会等名 9th Mind-Body Interface International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	任田 崇吾 (Toda Sogo) (50847382)	石川工業高等専門学校・電子情報工学科・講師 (53301)	
研究分担者	加藤 祐次 (Kato Yuji) (50261582)	北海道大学・情報科学研究院・助教 (10101)	
研究分担者	山越 健弘 (Yamakoshi Takehiro) (70444205)	福岡工業大学・情報工学部・准教授 (37112)	科研費受領資格喪失により、実施期間中に研究分担者から削除

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
---------	---------