

[研究助成 (A)]

高精度カフレス血圧計測のための脈波測定条件の探求

Search for optimal photoplethysmographic measurement conditions for
high-precision cuffless blood pressure estimation

2201015



研究代表者

石川工業高等専門学校
電子情報工学科

講 師

任 田 崇 吾

共同研究者

富山大学 学術研究部医学系
公衆衛生学講座

講 師

松 村 健 太

[研究の目的]

高血圧は心血管疾患の危険因子として、世界的な問題となっており、日常的な血圧計測が大切となる。従来の血圧測定法として、カフ（腕帯）を用いて計測する手法がある。しかし、この手法では、カフの締め付けによる不快感などといった問題がある。そこで、申請者は簡便な脈波センサのみでカフを用いない高精度カフレス血圧推定法の開発を目指している。本研究は、ヘルスケア分野における貢献が期待される。例えば、介護福祉現場において、簡便な脈波センサを取り付けるだけで血圧測定ができれば、現場の負担軽減につながるだけでなく、連続的な血圧測定が可能になることから、病気の早期発見に大いに役立つことが期待でき、QOL 向上に貢献する。本研究では、脈波センサにおける光源と受光素子のセンサ間距離に着目し、その距離が体動アーチファクトに与える影響を明らかにした。さらに、脈波センサの光源波長の違いによる光電脈波を用いたカフレス血圧推定精度を検討した。

[研究の内容、成果]

1. 多波長および複数センサ間距離での光電脈波センサの開発

光電脈波センサは、光源（LED）と受光素子（フォトダイオード、PD）で構成される簡便なセンサである。心拍による血液量の変化を、血管を通過した光の光量に変換した波形が光電脈波である。センサの小型化が可能であることや、指先や手首など様々な部位から計測できることなどから、スマートウォッチなどに搭載されており、広く普及されている。しかし、光電脈波は被験者の体動によるノイズである体動アーチファクトの影響を強く受けることが知られており、その影響を軽減することが大切となる。

我々は、センサの構成に着目し、最適条件を調べている。センサの光源波長に関しては、先行研究より、緑>青>近赤外>赤の順で体動アーチファクトに強いことが分かっている[1]。本研究では、光源と受光素子の距離であるセンサ間距離に着目し、最適条件を検討した。さらに、光電脈波によって得られる情報から血圧を推定する手法において、光源波長が与える影響を調べた。これらの検討において、複数の光源距離、またはセンサ間距離の光電脈波を同時に計測できるセンサを開発する必要があった。

光源波長に関しては4波長（青：470 nm，緑：528 nm，赤：620 nm，近赤外：870 nm），センサ間距離に関しては4種類（4.5 mm, 7.8 mm, 11.1 mm, 14.4 mm）の光電脈波を得られるセンサを開発した。Fig. 1 に複数のセンサ間距離の光電脈波が計測可能なセンサを，Fig. 2 に4波長同時計測可能なセンサを示す。

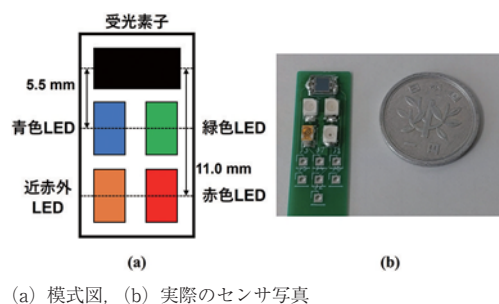


Fig. 1 開発した光電脈波センサ（複数センサ間距離）

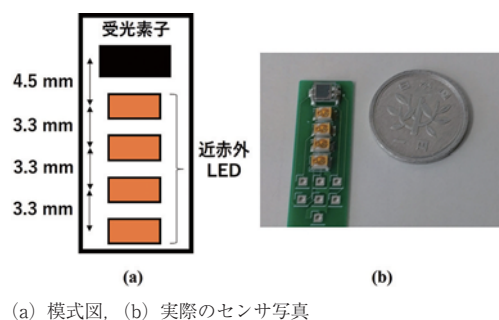


Fig. 2 開発した光電脈波センサ（多波長）

これらのセンサは，各 LED の照射タイミングをマイコンで制御することで，同時計測を実現した。

2. センサ間距離の違いによる体動アーチファクトの影響

センサ間距離が体動アーチファクトに与える影響を検討するために，Fig. 1 のセンサを用いて，被験者による実験を行った。作成した脈波センサを被験者6人の人差し指に取り付け，脈波計測を行なった。測定は，体動ノイズを加えるために，手を5 Hz以上の速さで振った状態（体動時）と手を動かさない状態（安静時）を20秒間行い，これを1セットとし，2回繰り返して光電脈波を計測した。測定の様子を撮影し

たものを Fig. 3 に示す。計測した脈波をFFTによる周波数解析を行なった。1-2 Hzの脈波成分のピークから ± 0.4 Hzを信号成分とし，5-10 Hzの体動ノイズ成分のピークから ± 1.0 Hzをノイズ成分とし，それを基に，各センサ間距離のS/N比を求めた。さらに，そのS/N比からどのセンサ間距離が最も体動ノイズに強いかを調べた。



Fig. 3 体動アーチファクトの影響の実験風景

各センサ間距離におけるS/N比の平均値をTable 1に示す。この表は，6人の被験者で計2回測定した安静時，体動時におけるS/N比の平均値である。安静時では，差が見られなかった。これに対し，体動時は全体に差が生じており，センサ間距離7.8 mmの結果が，体動ノイズの影響が少ないことが統計的に示された。これは，センサ間距離の違いにより，通過する組織に違いが生じたためと考えられる。センサ間距離が長い場合は深部の柔らかい組織を通過した光を多く受光することになるが，柔らかい組織は体動の影響を強く受けるため，S/N比が低下した。センサ間距離が近い場合は，表層の硬い組織を通過した光を受光するため，体動の影響は受けにくい。表層に存在する変化の小さい毛細血管をとらえることになるため，S/N比は低下する。以上のように，トレードオフの関係となり，センサ間距離7.8 mm付近に最適な条件があったと考えられる。

Table 1 センサ間距離の違いによる S/N 比の比較

センサ間距離	4.5 mm	7.8 mm	11.1 mm	14.4 mm
静止状態	4.16 dB	4.76 dB	4.74 dB	4.48 dB
体動状態	-4.18 dB	-3.80 dB	-4.51 dB	-6.71 dB

3. 光源波長が光電脈波によるカフレス血压推定法に与える影響

血压 (BP) は心臓から 1 分間に排出される血液量である心拍出量 (CO) と、動脈中の血液の流れにくさである全末梢血管抵抗 (TPR) の積で表される。また、CO は心拍数 (HR) と、TPR は修正基準化容積脈波 (mNPV) と関連していることが知られている。HR は脈波のピーク間隔から、mNPV は脈波の AC/DC 比から求めることができる生理学的パラメータである。したがって、以下の式が得られる。

$$\ln(BP) = A \ln(HR) + B \ln(mNPV) + C \quad (1)$$

係数 A, B, C は重回帰分析により得ることができれば、単一の光電脈波から血压を推定することが可能となる。

本手法において、高精度で測定できることは先行研究で明らかになっているが、光源波長の影響は検討されていない。光は、その波長によって、生体組織への到達深度が異なり、波長が長いほど、到達深度が深くなるとされている。この違いが、血压の推定精度に影響を与えるのではないかと考えられる。

本研究では、提案手法における波長の影響を検討するために、被験者 12 名に対し、4 種類の波長の光源波長による光電脈波を 180 秒間測定し、同時にカフ式血压計による血压計測を行った。血压測定は脈波測定開始時から 0 秒と 90 秒のタイミングで 2 回行った。計測は安静状態とストレス状態の 2 回実施した。ストレス状態での測定では、暗算課題を行うことで血压の上昇を促した。測定の様子を撮影したものを Fig. 4 に示す。血压測定開始から 10 秒間の脈波波形から HR と mNPV を算出した。式 (1)

に基づいて、各波長で得られた HR と mNPV を説明変数、血压計で測定した最高血压 (SBP)、最低血压 (DBP)、平均血压 (MAP) を目的変数として重回帰分析を行い、最適波長を検討した。得られた結果から、重回帰分析を行い、重相関係数 (R) を求めた。その結果を Table 2 に示す。



(左手：光電脈波センサ，右手：カフ式血压計)

Fig. 4 光電脈波センサによる血压推定実験の様子

Table 2 光電脈波による血压推定における重回帰分析の相関係数の比較

光源波長	青 470 nm	緑 528 nm	赤 620 nm	近赤外 870 nm
SBP	0.607	0.565	0.619	0.644
DBP	0.532	0.485	0.535	0.524
MAP	0.619	0.603	0.616	0.611

Table 2 より、SBP では近赤外が、DBP と MAP では青と赤を光源に用いた脈波による血压推定法の相関係数が高いという結果になり、求める血压の種類によって、最適波長が異なるという結果になった。これは、光源波長の違いにより、生体への到達深度が異なるため、捉える血管が異なったことが原因だと考える。SBP は HR が、DBP は mNPV の影響が強いとされている。HR の検出には、ピーク検出が容易となる、変化の大きな深部血管の脈波をとらえることができる近赤外光が適しているため、SBP の血压推定には近赤外光が最適となった。DBP に関しては、TPR に依存するため、毛細血管を捉えている青色光が最適となった。以上の結果より、光電脈波を用いた血压推定法において、光源波長の影響は非常に大きく、適切な

波長を用いることで高精度な血圧推定が可能となることを明らかにした。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究を通して、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を明らかにした。その結果、センサ間距離には最適距離が存在し、適切な距離を設定することで体動アーチファクトによる影響を低減することができる。

さらに、様々な光源波長による脈波を用いたカフレス血圧推定法の検討を通して、血圧の種類によって、最適波長が異なることを発見した。この知見は、カフレス血圧推定法の精度向上につながることを期待できる。

しかし、本研究において、制約が存在する。それは、被験者の年齢層である。本実験は20代の健康な被験者に協力してもらった。しかし、

年齢層の違いが光電脈波に与える影響を考えると、今後はより幅広い年齢層に協力してもらい、検討結果を深める必要がある。

これらの検討を繰り返すことで、カフを用いない高精度な血圧測定が実現でき、日常の健康観察がより容易になり、QOL向上につながることを期待できる。

[参考文献]

- [1] Matsumura, Kenta, Sogo Toda, and Yuji Kato. "RGB and near-infrared light reflectance/transmittance photoplethysmography for measuring heart rate during motion." IEEE Access 8 (2020): 80233-80242.

[成果の発表, 論文等]

- 1) 任田崇吾, 田町臣悟, 松村健太, "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." 第60回日本生体工学会大会, 2021/6, O3-9-2-4.