



Title	光電容積脈波による血流の流量と抵抗指標に基づく血圧の推定に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	川上, 健
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15088号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85570
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ken_Kawakami_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 川上 健

審査担当者 主 査 教 授 長谷山 美紀
副 査 教 授 荒木 健治
副 査 教 授 坂本 雄児
副 査 教 授 土橋 宜典
副 査 准教授 小川 貴弘

学位論文題名

光電容積脈波による血流の流量と抵抗指標に基づく血圧の推定に関する研究
(A Study on Estimation of Blood Pressure Based on Indexes of Blood Flow Rate and Resistance by Photoplethysmogram)

本論文は、光電容積脈波による血流の流量と抵抗指標に基づく血圧の推定に関する研究成果をまとめたものである。

近年、高血圧として現れる疾患のリスクが注目され、健康の保持増進のために血圧を知る頻度を高め、高血圧症を発症する前の対策を実施することが求められている。本邦における高血圧性疾患での外来患者数は、厚生労働省が3年ごとに発表している患者調査で、2017年に64万人をこえ、2019年の死因順位は、心疾患と脳血管疾患が各2位、4位であり、双方で全体の22.7%を占める。心疾患には、心臓に血液を供給する冠動脈の血流が阻害されることで発症する冠状動脈性心臓病があり、高血圧症に関係することが報告されている。他方、脳血管疾患の脳梗塞は、血管が完全に詰まる虚血性の脳血管疾患なので、血流のなくなった脳細胞は壊死してしまう。脳の壊死する部分で症状が異なり、意識障害、言語障害だけではなく命にかかわることもある一方で、無症候の場合もある。無症候性脳梗塞を持つ人が、予後に脳血管疾患を発症するか否かの研究では、合併症の高血圧症に有意差が認められている。

血圧は、聴診法で正確に測定する安静時の値が正常でも、ストレスなどが原因で日常生活において値が高い時間帯が現れる仮面高血圧の問題がある。高血圧の期間が長ければ高血圧症に近づく。血圧は睡眠中にも夜間から早朝にかけて変動することが知られているが、血圧の急変は、心血管疾患の発症リスクとなる。そこで、日常生活での高血圧や血圧の急変を見つけるために、ABPM(Ambulatory blood pressure monitoring) が用いられる。ABPMは、一般の家庭に普及している自動電子血圧計(自己の上腕血圧を測定するオシロメトリック法に基づく血圧計)と同様の機構を有し、測定を断続的に自動実行する。オシロメトリック法は、血流が止まるようにカフの圧力を高め、その後、圧力を徐々に下げて、カフ圧中の微小な心拍に同期する信号を測定し、血圧を推定する。ABPMは、家庭向けの自動電子血圧計に比べて高価でカフによる締め付けが睡眠の妨げになることがある。本邦で医療機器認証を受けた自動電子血圧計に代表される機器は、測定部位の血管に対して加える圧力の制御が必要である。そして、圧力の低さでは、血管内の血流を止める必要がないトノメトリ法が有利である。トノメトリとは、測定対象物が持つ圧力に均衡する圧力を作用させて対象物の圧力を知る原理のことで、体表に近い動脈の圧力を感圧素子で得る手段である。素子の接触圧力を動脈の圧力に均衡させる必要はあるが、血流を止めるまで圧力を高める必要はなく、一拍ごとの圧力波形および血圧の測定ができる。そのほかに、オシロメトリック法よりも人体に加える圧力が低い方式に、容積補償法が知られている。容積補償法は、指などで血管内圧の変動で生じる容積変化を打ち消すようにカフに圧力を与え、その際の圧力で血圧を推定する。トノメトリ法および容積補償法は、感圧素子を表皮に押し当

てる機構と血管の圧力を感知する素子の位置を定める手法, 感圧素子と表皮を液体で満たして圧力を得る手法などを実現する複雑な機構が必要なために, 機器が高価になることもあり, 双方ともオシロメトリック法のように普及していない。

以上に示す背景から, 機構がシンプルな LED とフォトディテクタを組み合わせたセンサーで, 容易に得られる光電容積脈波 (PPG:Photoplethysmogram) を用いて血圧を推定する光電脈波法の研究が進んでいる。光電脈波法には, PPG センサーと ECG(Electrocardiograph) センサーの双方, または複数の PPG センサー, あるいは一つの PPG センサーだけを利用する血圧推定方式が提案されている。複数のセンサー, 具体的に ECG センサーと PPG センサーの併用あるいは 2 つの PPG センサーを利用する主な理由は, 血管スティフネスの情報を示す PWV(Pulse wave velocity) を得て, 血管壁の弾性率と圧力の関係に基づいた血圧推定を行うためである。PWV は, 日本高血圧学会の高血圧治療ガイドラインで血管の機能評価の手段に活用されている情報である。一方, 一つの PPG センサーで得た信号を利用する方式は, 血流の流量と抵抗の情報を得る生理的あるいは数学的なモデルに基づく方式と, PPG 信号の輪郭と機械学習を用いる方式が提案されている。手首などの 1 カ所で得た信号で血圧値を推定する手法は, 自己の健康管理で血圧を知る機会を増やす目的で, 低コストかつ測定準備が容易な血圧推定機器への応用が期待されている。しかしながら, 一つの PPG センサーでは PWV を得られないので, 血管スティフネスの情報, 流量および抵抗の情報, 三つの全てに基づいた血圧推定は困難であった。

そこで本論文では, 一つの PPG センサーで, 流量と抵抗の情報から演繹的に血圧を推定する先行研究, 血管スティフネスとの相関が認められた情報を得る先行研究に着目し, 三つの情報に基づいて血圧値の推定精度を向上させる手法を提案する。具体的に, 1) 抵抗の情報を, 先行研究の最大容積変化量ではなく, 拡張期に対する収縮期の抵抗を血流の相対流速に基づいて得る指標として定義する。2) 拡張期流量の情報を, 先行方式の脈拍数ではなく, 抵抗指標と血管スティフネスの情報を時定数とするウィンドケッセルモデルで得る流量指標とする。3) 収縮期血圧推定値を, 各指標で高精度に得る拡張期血圧推定値と脈圧推定値との和で得る。以上のように, 本論文では, PPG 信号で得る流量および抵抗の情報に加えて, 血管コンプライアンスの情報を含む血圧の推定モデル式を構築する。

以下に本論文の構成を示す。第 1 章では, 本論文の研究背景および目的を述べる。第 2 章では, 先発医療機器として基準適合性認証を受けた血圧計の種類および規格について述べる。そして, 本研究の光電脈波法が含まれるカフを利用しない血圧計に対する認証要件の動向を整理し, 考慮すべき機能と性能の要件について述べる。第 3 章では, まず, PPG 信号の測定原理を述べる。そして, 先行研究の流量, 抵抗の情報および血圧推定方式について述べる。第 4 章では, 提案する血圧推定モデル式において, 拡張期血圧の推定に利用する血管のコンプライアンスの情報を得る先行研究について述べる。第 5 章では, 一つの PPG センサーで得る流量と抵抗の情報に基づく先行研究のモデル式を改良し, 血圧の推定精度を高める血圧推定方式を提案する。第 6 章では, 安静状態および運動中に取得された PPG 信号と自動電子血圧計の同時測定データを用いて, 先行研究の方式と提案方式の血圧推定精度を比較し, 提案方式の有効性を示す。最後に第 7 章では, 本研究の成果を要約し, 論文全体のまとめとする。

以上を要約すると, 本論文は, 一つの光電容積脈波 (PPG) センサーで得る信号で血圧値を推定する先行研究の方式を改良し, 先行研究が示した血流の流量と抵抗の情報に基づいて演繹的に血圧を推定するコンセプトのままに, 血圧を高精度に推定する血圧推定モデル式を提案している。さらに, 本手法をエルゴメータを用いて人為的に血圧変動を誘引した際の PPG 信号に適用した実験により, その有効性を示しており, 本研究を通じて, 情報科学の分野の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は, 北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与されるものと認める。