

[研究助成 (B)]

非装着生体計測による睡眠時血圧変動モニタリングシステムの開発

Development of an unobtrusive measuring system for nocturnal blood pressure monitoring

2181903



研究代表者

筑波大学
システム情報系知能機能工学域

助教

前田 祐佳

[研究の目的]

現在、我が国の死因は、心疾患が第2位、脳血管疾患が第3位と上位を占めており、両疾患を合わせて年間約31万人以上が亡くなっている。また、国民が介護を要する状態となった原因についても、両疾患を合わせた割合が全体の20%を超えている。心疾患や脳血管疾患等の循環器病は、生活習慣の改善等により一定の予防が可能な疾病にもかかわらず、国民の生命と健康にとって重大な問題となっている¹⁾。

これらの疾患の一つの要因として動脈硬化が挙げられる²⁾。動脈硬化とは動脈の内壁にコレステロールなどの脂質が付着し、しだいに線維増殖が起き硬化し、内腔が狭くなる病態のことであり、血液が流れている間は患者に自覚症状がないまま徐々に進行する。特に血圧上昇時は血流に乱れが生じ、動脈壁が損傷を受けて脂質が付着しやすくなり、動脈硬化が促進される。また逆に動脈硬化が進行すれば血管の柔軟性が失われ、高血圧となる。このように高血圧は脳血管障害、心疾患などのリスクファクターとされる一方で、自覚症状無く進行し突然重篤な症状に陥るケースが多いことから「サイレントキラー」とも称される。超高齢社会を迎えた現在において、これらの患者数増加が国民の健康寿命低下や医療介護費増減につながり、我が国の深刻な課題となっている。

そのため日々の血圧モニタリングによる健康状態の確認、食事や運動等の生活習慣の管理により正常域血圧を保つことは疾患の予防となり得る。現在では、カフ式の血圧計を用いた血圧測定が主流となっている³⁾。この測定法は、上腕に計器を固定し、加圧により非観血的に計測を行うことが可能である。特別な技術を要さないため、診察室だけでなく、家庭内においても自身の血圧(家庭血圧)を測定することが可能となる。家庭血圧が高血圧の診断において、大きな役割を果たすことが高血圧治療ガイドライン2014(JSH2014)で明記され、JSH2019においても同様の内容が記載されている⁴⁾。

自律神経機能の制御不良により夜間の副交感優位から日中の交感神経優位の移行が正常に行われないことが、心疾患・脳血管イベント因子である夜間高血圧や早朝高血圧の発生要因の一つとなることが報告されている⁵⁾。

現在、夜間高血圧症の診断には、カフ式血圧計を用いた間欠的に自動測定を行う24時間自由行動下血圧測定法(Ambulatory Blood Pressure Monitoring, ABPM)が主に利用されている。しかし、カフ装着による圧迫感が患者に与えるストレスや睡眠障害につながる恐れがあること、15-30分間隔の間欠測定であるため急な血圧変動を見落とす可能性ことが指摘されている⁶⁾。これらの点を考慮し、患者に与えるストレスを最小限に抑えた低拘束な血圧変動モニタリング

手法が求められている。

そこで本研究は、睡眠中の非装着的な血圧変動モニタリングによる睡眠時血圧変動の簡易スクリーニングを目標に、光電脈波および心音図を用いた寝具組込型の脈波伝播速度システムの開発を行い、その血圧変動検出精度を検討した。

[計測原理]

・脈波伝播速度 (Pulse Wave Velocity : PWV)

脈波伝播速度とは脈波が血管を伝播することである。脈波伝播速度は血管の硬さに依存し、管が硬いほど脈波は早く伝わる。この特性から脈波伝播速度は動脈硬化の指標の1つとして用いられている。また、動脈壁の硬さは血圧値に大きく影響を受けることから、脈波伝播速度による血圧推定が行われている⁷⁾。

・寝具組込型脈波伝播速度システム

脈波伝播速度とは異なる2点間の生体信号の到来時間差より血管の硬度、更には血圧を推定するものであり、従来は心電図と脈波の時間差または、二点の脈波の時間差から算出される。睡眠下の生体信号計測において、装着型の計測機器は使用者の拘束感を招くだけでなく、装着不良による測定精度の低下・継続不可や、長時間測定に伴う電池容量の問題が生じる。そこで本研究では、心音図センサおよび脈波センサアレーを用いて、非装着での生体信号の収集を実現した。図1に示すとおり、ベッド組み込み式の心音図センサ、枕型の光電脈波センサアレーおよび足首クッションの光電脈波センサアレーを寝具に設置した非装着型デバイスによる生体計測システムを開発し、睡眠時の生体信号の収

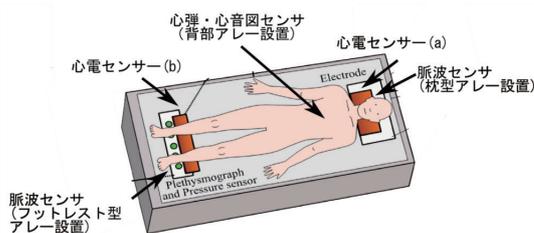


図1 寝具組込型脈波伝播速度システム

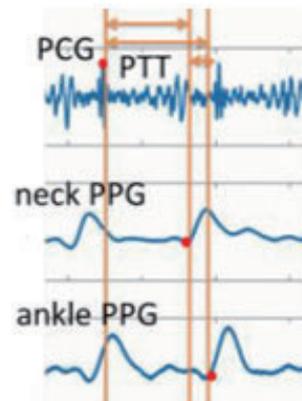


図2 開発システムによる計測信号の典型例

録・精度評価を行った。心音図計測にはコンデンサマイク (DB-C9767, Products Limited) を使用し、聴診器にコンデンサマイクを組み合わせベッドに設置した。光電脈波計測には頸部及び足首にピーク波長 565 nm の脈波センサ (SEN-11574, SparkFun) と圧電センサをアレー設置し、荷重値によるセンサの選択および脈波測定を行った。

図2に開発システムによる計測信号の典型例を示す。上段から心音図 (Phonocardiography, PCG)、枕型の光電脈波センサアレーより収録した頸部脈波 (neck Photoplethysmography, neck PPG)、足首クッションの光電脈波センサアレーより収録した足首脈波 (ankle Photoplethysmography, ankle PPG) であり、心音図とそれぞれの脈波において到来時間差である脈波伝播時間 (Pulse Transit Time, PTT) を求め、各センサの距離から脈波伝播速度を求めた。

[開発システムの測定精度検証]

・実験

被験者 10 名 (22.5 ± 0.7 歳, 身長 171.1 ± 7.2 cm, 体重 62.9 ± 4.8 kg) を対象に開発システムの測定精度の検証を行った。

仰臥位において1分間安静にした後、心音図、頸部光電脈波、足首光電脈波および胸部第II誘導による心電図を5分間の計測した。以下、すべての実験において信号の収録はLabviewお

よび USB-DAQ (USB-6210, National Instruments) を用いてサンプリング周波数 2000 Hz にて行った。

・解析方法

作製した各センサで計測された生体信号の計測精度を検証するため、心電図の RR 間隔 (RR interval, RRI) を真値とし、光電脈波、心音図のピーク間隔 (Peak to Peak interval, PPI) との誤差率 ER を式(1) より求めた。

$$ER [\%] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|PPI(i) - RRI(i)|}{RRI(i)} \times 100 \quad (1)$$

・結果

開発システムによって計測された生体信号の典型例を図3に示した。上段より、心音図、心電図、頸部光電脈波の波形である。また被験者ごとに得られたそれぞれのピーク検出の誤差率と各信号の平均を表1に示した。

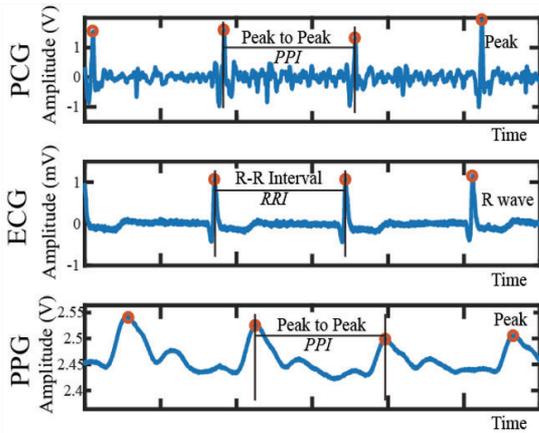


図3 各生体信号の典型例

表1 各生体信号の誤差率

	Error Rate [%]		
	PCG	neck PPG	anle PPG
1	2.8	1.4	1.0
2	0.1	1.1	1.4
3	2.1	1.0	1.5
4	0.7	1.5	1.0
5	1.6	0.9	0.9
6	3.1	1.5	2.4
7	1.7	0.8	1.7
8	4.3	0.8	1.2
9	1.8	7.2	3.9
10	3.5	0.8	2.6
mean	2.2±1.2	1.7±1.8	1.8±0.9

・考察とまとめ

本実験では胸部第Ⅱ誘導心電図を基準として、作製したそれぞれのデバイス (心音図計, 枕型光電脈波センサアレーおよび足首クッション型光電脈波センサアレー) で得られた波形と心電図の RR 間隔を比較し、測定精度の検証を行った。その結果、心音図は 2.2±1.2 [%], 頸部光電脈波は 1.7±1.8 [%], 足首光電脈波は 1.8±0.9 [%] の誤差率であり、最も誤差率の高い被験者においても 7.2 [%] であったことが示された。光電脈波はそれぞれの部位において一部を除いて 2% 以内の高精度にピーク検出が可能であり、ピークの誤検出などにより誤差率が大きい被験者においても、他の信号の誤差率が低いことが明らかとなった。これらの結果より、3つの生体信号のピーク間隔を互いに補完することでより高い精度での計測が期待できることが示唆された。

[血圧上昇タスク実験]

・実験

被験者 8 名 (22.6±0.8 歳, 身長 171.8±5.5 cm, 体重 60.9±4.7 kg) を対象に実験を行った。開発システムにより算出される脈波伝播速度と血圧との相関関係を検証するため、血圧上昇タスクとして昇降運動 100 回を用いた。

血圧上昇タスクの前後 5 分間に開発システムを用いて心音図、頸部光電脈波及び足首光電脈波を計測し、脈波伝播速度を算出した。また血圧上昇タスク前の安静時と、血圧上昇タスク後の 0(s), 150(s), 300(s) 時にカフ式自動血圧計 (CNAP monitor, CNSystem) を用いて血圧を測定した。

・解析方法

血圧と脈波伝播速度との関係を検証するため、心音図-頸部光電脈波、心音図-足首光電脈波、頸部-足首光電脈波間において脈波伝播時間を求め、血圧上昇タスク後の 0-10(s), 145-155(s), 290-300(s) における平均脈波伝播時間を

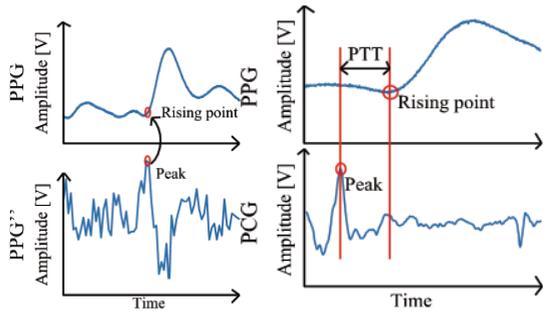


図4 二次微分法による脈波ピークおよび脈波伝播時間の検出

それぞれ算出し、同時刻に測定された血圧との関係を検証した。

脈波伝播時間は2点間の生体信号の到来時間差より求められるが、その時間間隔の検出方法として、ボトム法、一次微分法、二次微分法、接線法などが挙げられる。本稿では最も精度の良かった二次微分法の結果を示す。

図4に二次微分法による脈波ピーク検出と脈波伝播時間の検出例を示す。図4左上段に脈波の典型例、左下段に脈波の二次微分を示す。この二次微分波形のピークを脈波の立ち上がり点として検出する。図4右側に脈波伝播時間の検出例を示す。上段が脈波、下段が心音図であり、心音図のピークから、二次微分法によって求めた脈波の立ち上がり点までの到来時間差を脈波伝播時間 (PTT) として検出した。

・結果

脈波伝播時間と収縮期血圧の関係を図5に示す。横軸を検出した脈波伝播時間、縦軸を収縮期血圧とし、心音図-頸部光電脈波間の結果を

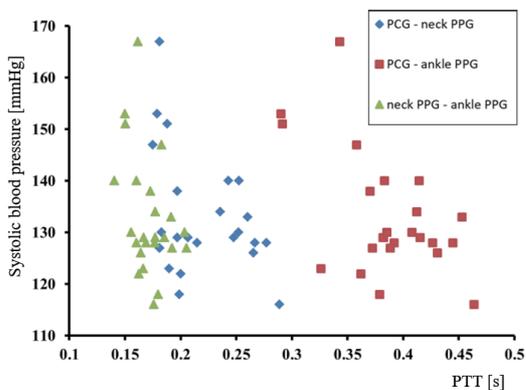


図5 脈波伝播時間と収縮期血圧の関係

青色、心音図-足首光電脈波を赤色、頸部-足首光電脈波を緑色で示した。各脈波伝播時間と収縮期血圧の相関係数はそれぞれ心音図-頸部光電脈波が -0.37 、頸部-足首光電脈波が -0.38 、心音図-足首光電脈波が -0.55 であり、心音図-足首光電脈波間で負の相関が示された。

・考察とまとめ

本実験では、開発システムによる血圧変動検出の可能性を検討するため、血圧上昇タスク時の血圧変動と脈波伝播時間の関係を検証した。

心音図-足首光電脈波で最も相関が得られた要因としては、心音図-頸部光電脈波に比べ伝播距離が長く、脈波伝播時間が延長したため、誤差の影響が小さくなったためと考えられる。

[今後の研究の方向、課題]

開発システムによる非装着での血圧変動検出の可能性が示唆されたことから、夜間高血圧や早朝高血圧のスクリーニングへの適用が考えられる。今後は季節性変動などを考慮した、長期的な検証が課題となる。

[参考文献]

- 1) 厚生労働省 (2018) 「循環器病対策推進基本計画」, <https://www.mhlw.go.jp/content/000688359.pdf>
- 2) 日本動脈硬化学会, 動脈硬化性疾患予防ガイドライン 2017年版, 一般社団法人日本動脈硬化学会, 2017
- 3) 小澤 利男, 新しい血圧測定と脈波解析マニュアル, メジカルビュー社, 2008
- 4) 日本高血圧学会高血圧治療ガイドライン作成委員会, 高血圧治療ガイドライン 2019
- 5) Kario K. et al., Morning surge in blood pressure as a predictor of silent and clinical cerebrovascular disease in elderly hypertensives: a prospective study, *Circulation*, 107(10), 1401-1406, 2003.
- 6) Paolo Verdecchia et al., Ambulatory Blood Pressure and Cardiovascular Outcome in Relation to Perceived Sleep Deprivation, *Journal of American Heart Association*, 49, 777-783, 2007.
- 7) Z Tang et al, A chair-based unobtrusive cuffless blood pressure monitoring system based on pulse

arrival time, IEEE Journal of biomedical and health informatics, 21 (5), 1194-1205, 2016

[成果の発表, 論文等]

1. Maeda Yuka, Sekine Masaki, Tamura Toshiyo, Mizutani Koichi: The Fluctuation of Pulse Transit Time in Continuous Cuff-less Blood Pressure Monitoring, the 41st International Engineering in Medicine and Biology Conference
2. Fujinuma Kohei, Maeda Yuka, Wakatsuki Naoto, Mizutani Koichi: Study of Pulse Wave Velocity Monitoring Obtained from Phonocardiography and Photoplethysmography in a Bed, Proceedings of uHealthcare 2018, 2018-12
3. Sho Takahashi, Maeda Yuka, Wakatsuki Naoto, Mizutani Koichi: Study on Monitoring of Blood Pressure Change using Photoplethysmography during Playing Brass Instrument, Proceedings of uHealthcare 2018, 2018-12
4. 前田 祐佳, 関根 正樹, 田村 俊世, 水谷 孝一: 連続血圧モニタリングにおける脈波伝播時間の検出方法に関する検討, 生体医工学, 57, 2019