

# ウェアラブルデバイスによる血圧脈波と心電図の同時計測とその相関

## Simultaneous measurement of blood pressure pulse wave and electrocardiogram by wearable device and its correlation

精密工学専攻 24号 佐藤翔吾  
Shogo Sato

### 1. 研究の背景と目的

日々の健康管理には日常的な生体情報の計測が重要とされている<sup>(1)</sup>。中でも Fig. 1 に示すように、脳疾患や心疾患などの循環器系の疾患は急病時の救急車の出動において最も割合が多いとされている<sup>(2)</sup>。脳疾患や心疾患の診断には血圧脈波や心電図の計測が重要であり、日常的な計測を行うことで疾病の予期や早期発見が可能であると考えられる。そこで我々は、日常的な血圧脈波計測のためのウェアラブルデバイスの研究を進めている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、詳細な疾病の診断には12誘導心電図が多く用いられ、血圧脈波による診断はあまり行われていない。

血圧脈波と疾病との関係として、血圧脈波の脈圧と心筋梗塞に相関があるという報告がある<sup>(5)</sup>。脈圧とは収縮期血圧と拡張期血圧の差である。心筋梗塞は心臓に血液が送られなくなり、心臓が壊死する疾患である。また、心筋梗塞の進行に応じて心電図においてT波の増高、ST上昇、異常なQ波、冠性T波などの変化が生じる<sup>(6)</sup>。そこで、心筋梗塞にそれぞれ関連のある血圧脈波の脈圧と心電図のT波、S波、Q波には類似した情報が含まれているのではないかと考えた。類似した情報を血圧脈波から取得できるようになれば、心電図で診断していた疾病が、血圧脈波でも診断できるようになる。血圧脈波はウェアラブルデバイスにより24時間計測が可能なので、日常的に疾病の予防や早期発見が可能となる。

本研究では、血圧脈波と心電図をウェアラブルデバイスにより同時に計測を行い、それらの相関を求め、血圧脈波と心電図には類似した情報が含まれているか、その共通性の確認を目的とする。

### 2. 血圧脈波と心電図

本研究では、血圧脈波の計測をトノメトリ法により行い、心電図の計測は双極誘導により行う。トノメトリ法とは Fig. 2 に示すように動脈の血管直上を圧力センサで押し付け、血管上部を平坦にすることで、押し付け力を血圧として計測する手法である<sup>(7)</sup>。トノメトリ法は低負荷で連続的な血圧計測

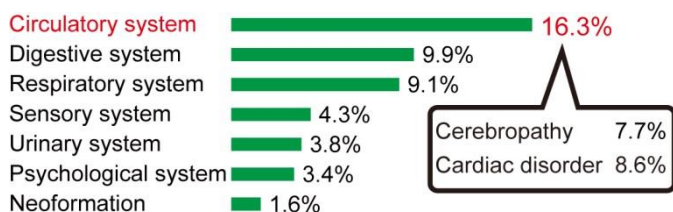


Fig. 1 Disease classification of sudden illness at ambulance<sup>(2)</sup>.

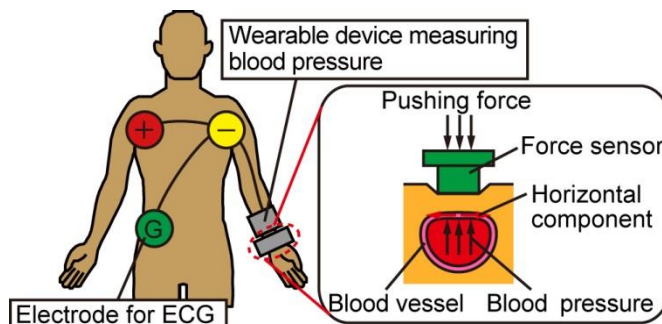


Fig. 2 Principle of the arterial tonometry method and electrocardiogram.

手法で、日常的な血圧計測が可能である。使用する動脈は手首の腱から親指側に1~2cm程度の場所にある橈骨動脈を主に使用し、心電図の計測は右肩、左肩、右腹部の3か所からなる双極誘導にて行う。心電図とは、心臓の電気的活動を記録したものであり、様々な疾病の診断に用いられている。

Fig. 3 に示すように心電図はP波、Q波、R波、S波、T波から構成されており、拡張期と収縮期を一定のリズムで交互に繰り返している。そのとき、大動脈圧は収縮期に上昇し、拡張期に下降する。QRS波は心室の動きを示し、心室が血液を動脈へ押し出している。拡張期から収縮期へ変化するタイミングであり、これにより、血圧も急激に上昇する。

### 3. デバイスの設計と試作

本研究で設計・試作したデバイスを Fig. 4 に示す。デバイスはシナノケンシ(株)と共同開発した、MEMS 3軸力セン

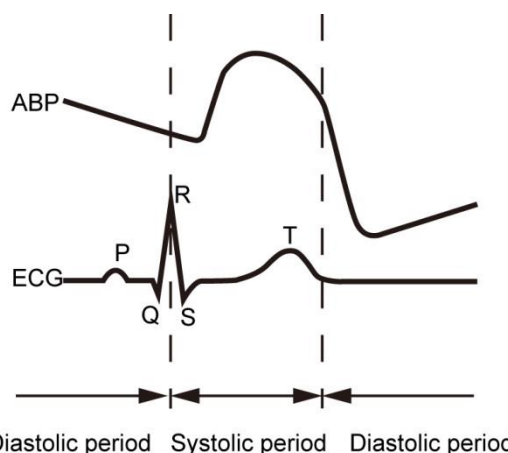


Fig. 3 ECG (Electrocardiogram) and ABP (Arterial Blood pressure).

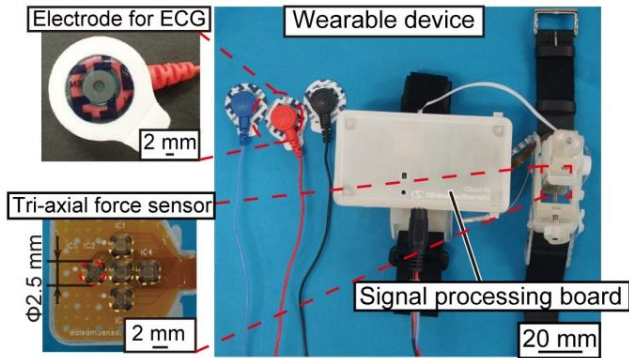


Fig. 4 Photograph of wearable device for measuring blood pressure pulse wave and electrocardiogram.

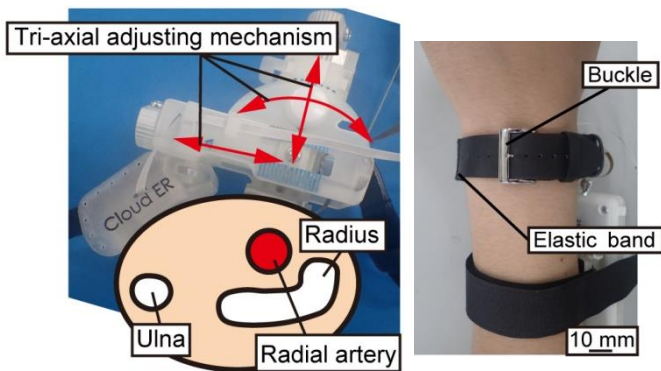


Fig. 5 Tri-axial adjusting mechanism and fixing band.

量は本体が 130.6 g, バッテリーが 177.4 g である。血圧脈波計測と心電図計測をすることができ、血圧脈波はトノメトリ法による非観血かつ連続的な計測が可能で、心電図は信号処理基板へ電極を接続することで計測することができる。電極(ケンドール電極アルボ, H124)は直径 24 mm で粘着ゲルにより、皮膚とのインピーダンスの低減とともに患部へ長時間接着をすることができる。電極は黒、青、赤の 3 色があり、それぞれマイナス、プラス、基準電圧となっている。血圧脈波の計測には、タッチエンス(株)とシナノケンシ(株)と共同開発した MEMS 3 軸力センサを使用したトノメトリ法を用いている。力センサは受圧面の直径は 2.5 mm, 高さ 1 mm の台形の突起状になっていて、センサ間隔 3 mm で十字に 5 つ配置されている。センサが取得した出力は信号処理基板へ配線され、力へと校正し、パソコン等に通信される。試作デバイスには力センサの他に、加速度センサ、角速度センサ、温度センサが取り付けられている。

Fig. 5 に示すように、試作したデバイスは 3 軸調節機構を持つ。可動範囲は血管の押し付け方向に約 10 mm, 血管との直行方向に 12 mm, 押し当て角度は  $\pm 15^\circ$  となっている。血管と直行方向には 1 mm ごとに目盛りがあり、押し当て角度には  $5^\circ$  ごとの目盛りがある。これらを用いることで動脈直上の適切な位置にセンサを配置し、適切な押し付け力で押し付けることができる。また、固定用バンドは伸縮性のある素材が含まれているため適切な押し付けを補助することがで

きる。信号受信基板のバンドの内側には滑り止めが設置しており、血圧脈波計測部位に接触しにくくなっている。バッテリーの容量は 10000 mAh となっていて十分な時間、計測が可能となっている。

## 4. 実験・結果

### 4.1 実験のセットアップ

実験のセットアップを Fig. 6 示す。デバイスを左手首に装着し、3 つの電極を右肩、左肩、右腹部あたりに張り付ける。この時、エタノールを含ませたワイパーで電極張り付け部位を拭くことで皮膚の汚れや皮脂を取り除き、皮膚と電極間のインピーダンスを下げ、安定した心電図を記録することができる。各実験の被験者は健康な二十代男性 1 名とした。

相関計測実験にあたっては血圧脈波と心電図に変化を与える。デバイスを装着した後、軽い運動をすることで、心拍数と血圧を上昇させる。その後、安静座位の体勢で血圧脈波と心電図の同時計測を行い、心拍数、血圧が安定するまで計測し続ける。計測したデータはパソコンへ伝送され、シナノケンシ(株)と共同開発したソフトウェアにより記録、解析を行う。

### 4.2 血圧脈波と心電図の同時計測

試作したウェアラブルデバイスで血圧脈波と心電図を安静座位にて同時に計測する実験を行った。Fig. 7 に実験結果を示す。安静状態で 10 s 計測し、血圧脈波は 11 拍、心電図も 11 拍分の波形を取得することができた。波形より、血圧脈波、心電図を同時に計測することができ、ともに鮮明な波形が取得できていることを確認した。また、血圧脈波の最大点や最小点、心電図の P 波や R 波、T 波が大きく変化せずに計測出来ていることを確認した。この時、電源ノイズの低減のため、カットオフ周波数 5 Hz のローパスフィルタを使用した。

Fig. 3 にある心電図と大動脈の関係と比較すると、R 波のすぐ近くに血圧脈波の最大点が見受けられる。これは、心臓より離れた位置で血圧を計測したために、血圧脈波の波形が遅れて計測されているからだと考えられる。脈波速度(PWV: Pulse Wave Velocity) は男性で 1.07 m/s とされている<sup>(8)</sup>。心臓から手首までの距離は約 75 cm なので、0.70 s の遅れが生じている。

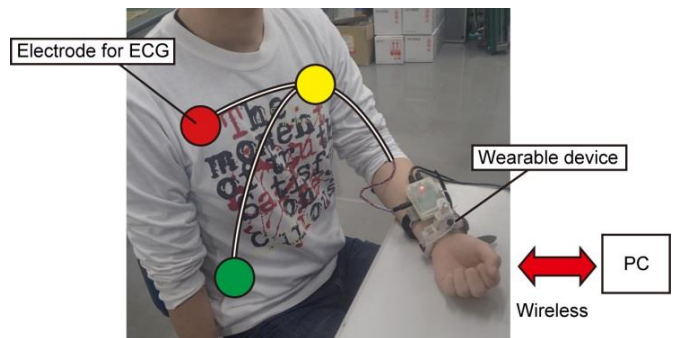


Fig. 6 Experimental setup of measuring blood pressure pulse wave and electrocardiogram by wearable device.

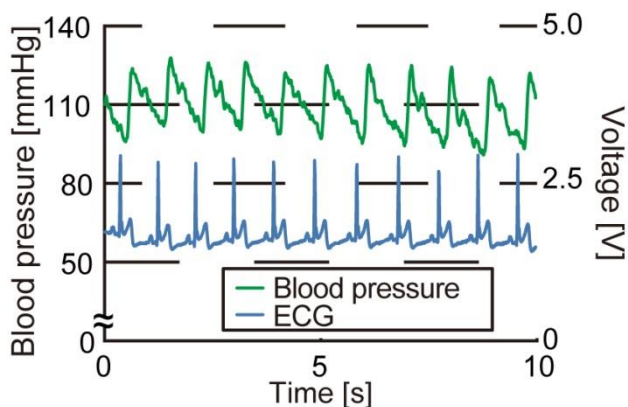


Fig. 7 Simultaneous measurement of blood pressure pulse wave and ECG.

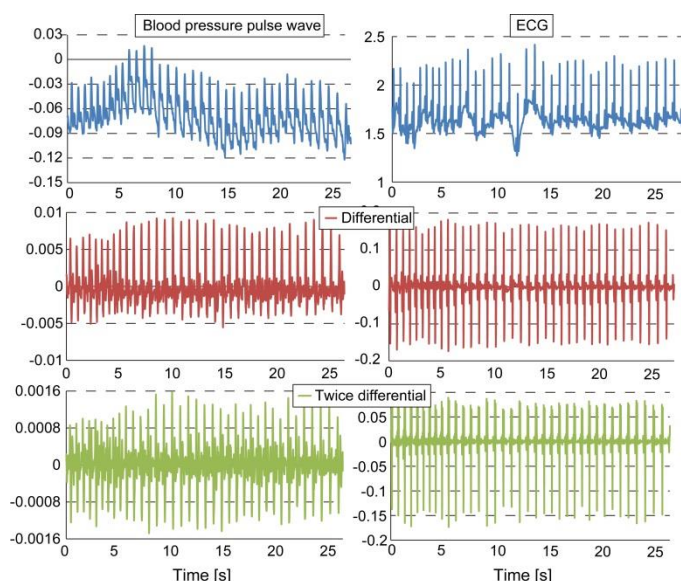


Fig. 8 Blood pressure pulse wave and ECG, differentiation, twice differentiation.

#### 4.3 特徴量の抽出とその相関

次に、血圧脈波と心電図の相関計測のため、軽い運動をしたのちに同時計測を行った。Fig. 8 に計測結果と血圧脈波、心電図それぞれに対して微分、2 回微分を行った結果を示す。左側が血圧脈波のグラフで、計測始めの 0~10 s と 15~25 s を比較すると、血圧が低下しているのが確認できる。これは軽い運動を行い、血圧と心拍数が上昇したのちに安静座位で計測を行ったため、徐々に血圧が低下しているからである。右側は心電図となっていて、途中で波形が乱れてしまっているが、これは筋電が乗ってしまったためと考えられる。

次に相関計測のため、血圧脈波、心電図それぞれの波形より特徴量を抽出する。血圧脈波、心電図の特徴量をそれぞれ Fig. 9, Fig. 10 に示す。血圧脈波からは 10 箇所の特徴量を抽出した。血圧脈波の①拡張期血圧と②収縮期血圧、脈波の反射によって生み出される④反射波、収縮期血圧と反射波の間の③極小点を特徴量として抽出する。血圧脈波の微分から、⑤最大点、⑥0 点、⑦最小点を抽出する。血圧脈波の 2 回微

分からは、⑧最大点、⑨0 点、⑩最小点を特徴量として抽出した。心電図からは 8 箇所の特徴量を抽出した。心電図の① P 波頂点、② Q 波頂点、③ R 波頂点、④ S 波頂点を特徴量として抽出する。T 波については冠性になるなど、頂点が多分に分りにくい場合があるため除外した。心電図の微分からは、QRS 波付近の⑤最大点、⑥最小点、2 回微分からは、⑦最大点、⑧最小点を特徴量として抽出する。これらの特徴量を Fig. 8 よりそれぞれのグラフの 1~6 s から 6 拍分と 20~25 s から 6 拍分を抽出した。抽出した特徴量の相関を計測し、Table 1 に示す。血圧脈波、心電図それぞれの番号は Fig. 9, Fig. 10 の特徴量を示す。また血圧脈波の②-①は脈圧を示している。Table 1 の中でも相関の絶対値が 0.5 以上の特徴量が 3 箇所確認できた。1 つ目は血圧脈波の最小点と心電図の P 波の頂点である。P 波は拡張期の終わりに作られるので、拡張期血圧との相関が高くなったと考えられる。2 つ目は血圧脈波の最大点と心電図を微分した時の最小点である。3 つ目は血圧脈波の脈圧と心電図を微分した時の最大点である。脈圧は心筋梗塞との相関があると言われているので S 波との相関が高いと思われたが相関係数 0.24 とあまり高い数値にはならなかった。しかし、脈圧は心電図の微分の最大点や、R 波頂点と高い相関を持っている。これらのことより、血圧脈波は心

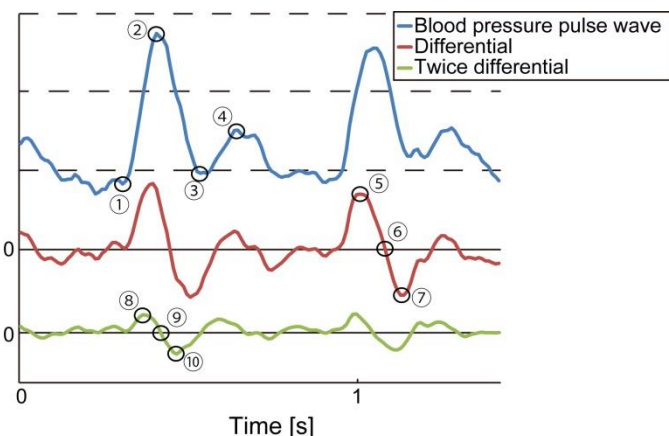


Fig. 9 Features of blood pressure pulse wave.

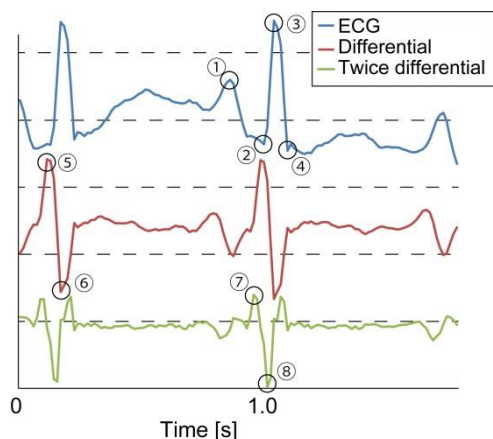


Fig. 10 Features of electrocardiogram.

Table 1 Correlations between blood pressure pulse wave and electrocardiogram.

|                   |         | Blood pressure pulse wave |           |                |                 |       |                    |
|-------------------|---------|---------------------------|-----------|----------------|-----------------|-------|--------------------|
|                   |         | ①Diastolic                | ②Systolic | ③Minimal value | ④Reflected wave | ⑤Max  | ②-① Pulse pressure |
| Electrocardiogram | ①P wave | 0.51                      | 0.45      | 0.45           | 0.44            | -0.30 | -0.13              |
|                   | ②Q wave | -0.13                     | 0.13      | 0.15           | -0.05           | 0.22  | 0.25               |
|                   | ③R wave | -0.28                     | 0.18      | 0.18           | -0.07           | 0.40  | 0.45               |
|                   | ④S wave | -0.24                     | -0.06     | 0.006          | -0.14           | 0.23  | 0.24               |
|                   | ⑤Max    | -0.34                     | 0.19      | 0.18           | -0.01           | 0.45  | 0.53               |
|                   | ⑥Min    | -0.19                     | -0.50     | -0.38          | 0.29            | -0.02 | -0.14              |

電図と複数の箇所に関連があることを確認できた。また、心電図のP波の頂点は、血圧脈波の多くと高い相関を持っていることが分かった。血圧脈波の微分の最大値が脈圧と似たような相関を持っていて、血圧脈波の立ち上がり時間と脈圧にも相関があるのではないかと考えられる。

## 5. 結論

血圧脈波と心電図が同時計測可能なウェアラブルデバイスを試作した。血圧脈波と心電図の同時計測実験を行い、鮮明な波形を取得可能なことを確認した。血圧脈波と心拍数に変化を与え、相関計測実験を行った。血圧脈波、心電図をそれぞれ微分、2回微分を行い、血圧脈波からは特徴量を10箇所、心電図からは特徴量を8箇所抽出し、それぞれの相関を算出した。相関の絶対値が0.5以上の特徴量が3箇所あった。血圧脈波の最小点と心電図のP波の頂点、血圧脈波の最大点と心電図を微分した時の最小点、血圧脈波の脈圧と心電図を微分した時の最大点である。

以上より、ウェアラブルデバイスによる血圧脈波と心電図の同時計測を行い、血圧脈波と心電図について相関を求め、関連性の高い特徴量を確認することができた。

## 参考文献

- (1) 桑島巖, 総説 24 時間血圧変動, 心臓, **25-5** (1993) pp. 491-502.
- (2) 消防庁, 平成 29 年版救急救助の現況, 総務省報道資料 (2017).
- (3) Dohi T. and Waki K., Blood pressure pulse wave measurement using a wristband type device with 3-axis force sensor, International Symposium on Micro-Nano Science and Technology2016 (2016) p.SuA1-B-8.

- (4) 土肥徹次, 3 軸調節機構を持ったウェアラブル血圧脈波計測デバイス, マイクロメカトロニクス学術講演会論文集 (2016) pp.1-2.
- (5) Mitchell F. G., Moyé A. L., Braunwald E., Rouleau J., Bernstein V., Geltman M. E., Flaker C. G., Pfeffer A. M., Sphygmomanometrically Determined Pulse Pressure Is a Powerful Independent Predictor of Recurrent Events After Myocardial Infarction in Patients With Impaired Left Ventricular Function, *Circulation*, **96-12** (1997) pp. 4254-4260.
- (6) 土居忠文, イラストレイテッド心電図を読むー鑑別に迷わないために(改訂第2版), 南江堂, 東京 (2016).
- (7) 剣物修, トノメトリ法による血圧測定, 呼吸と循環, **42-12** (1994) pp. 1173-1179.
- (8) 細谷志帆, 佐藤洋一郎, 河口明人, 青年期における脈波速度と交感神経活動との関連およびその性差, 理学療法科学, **32-2** (2017) pp. 273-278.