

## 学位論文審査の結果の要旨

|         |                                        |    |                |
|---------|----------------------------------------|----|----------------|
| 報告番号    | 先端科学技術甲第 183 号                         | 氏名 | 新井 正樹          |
| 論文題目    | ベッド上の布電極による複数生体信号の非接触・同時計測と血圧関連指標の連続推定 |    |                |
| 論文審査委員会 | 委員 (主査) D○合 植野 彰規                      | 教授 | (電気電子システム工学専攻) |
|         | 委員 (副査) D○合 安達 雅春                      | 教授 | (電気電子システム工学専攻) |
|         | 委員 (副査) D○合 陶山 健仁                      | 教授 | (電気電子システム工学専攻) |
|         | 委員 (副査) D○合 平栗 健二                      | 教授 | (電気電子システム工学専攻) |

### 研究の背景

近年、世界的に心不全患者数が増加しており、心不全パンデミックと呼ばれる状態に陥っている。心不全は、悪化を繰り返し最終的に死に至る（5年死亡率が約50%）疾患で、発症後の再入院・死亡の回避が重要となる。在宅療養中の悪化の兆候を早期に発見し、再入院や死亡のリスクを低減するには、患者の体重に加えて複数生体信号、特に心電図、血圧、呼吸を毎日、観測し続けることが有効と考えられている。また、血圧関連指標である末梢血管抵抗や心拍出力の変動確認も、死亡リスクの低減に寄与すると期待されている。しかしながら、これらの信号計測や指標算出には体表への電極接着とセンサ装着が必要であり、在宅で長期にわたって観測を続けることが現実には難しい。そのため、電極接着やセンサ装着が不要でかつ煩わしくない方式にて、複数生体信号の計測と血圧関連指標の算出を実現する手法の提案が望まれている。特に血圧については、短時間内に急上昇と急下降を生じる血圧サージ現象が、心不全のトリガとなるとの報告もあり、連続（一拍毎の）推定に対するニーズが高い。血圧の連続推定に関しては、心弾動図と呼ばれる心臓拍動由来の振動信号の利用に注目が集まっているが、立位での計測に留まっているほか、誤差が大きいなどの課題がある。

### 研究の目的

本論文では、毎日の就寝中に観測することを想定し、ベッド上の布状電極にて非接触・同時計測した心電図と心弾動図の信号情報を用いて、平均血圧を連続的に推定することを第一の目的としている。次いで、心電図・心弾動図に加えて呼吸運動もベッド上の布状電極にて非接触・同時計測すること、更に平均血圧を連続推定するとともに、血圧関連指標である末梢血管抵抗・心拍出力の相対値を連続推定すること、を第二の目的としている。

### 研究の内容

本研究では、平均血圧が心拍出量と末梢血管抵抗の積として定義されることに着目し、要素分解と指数近似モデリングを試みることにより、一拍毎の平均血圧（相対値）を、観測が比較的容易な3つの特徴量（①心拍数、②心弾動図振幅、③心電図と心弾動図の時間差）を用いて、累乗と積の組み合わせにより定式化している。導出した関係式は、平均血

圧の対数値を、前記の3特徴量の対数値の線形和にて一拍毎に推定できることを意味する。推定式の有効性を実測データにて検証するために、ベッド上の布状電極にて衣類を介して同時計測された心電図と心弾動図の信号から、3特徴量を一拍毎に算出するとともに、参照信号として同時に計測された一拍毎の平均血圧との関係性を調査した。その結果、全被験者において両者が高い相関関係を示すこと、また提案法にて推定した平均血圧値は、従来の推定式を用いた場合と比べて、有意に誤差が小さいことを確認している。その成果は、下記の学術誌論文、

- [1] Masaki ARAI, Tomokazu TAKEUCHI, and Akinori UENO, Cuffless Continuous Estimation of Relative Mean Arterial Pressure Using Unrestrained and Noncontact Ballistocardiogram and Electrocardiogram: Evaluation in Short Time In-bed Experiments, *Advanced Biomedical Engineering*, Vol. 10, pp. 36-50 (2021).

としてまとめられている。

ここで、提案した平均血圧推定法を適用した心弾動図信号は被験者の踵部にて計測されたもので、心電図との時間差情報の確度が高い。一方で、心弾動図計測用の電極にて呼吸運動も検出するには、計測位置を踵部から肩部に変更し、かつ心電図用電極と統合することが望ましい。そこで、新たな布状シート電極を設計・試作し、心電図・心弾動図・呼吸運動の非接触・同時計測を実現するとともに、肩部の心弾動図と心電図からの平均血圧推定を試みた。踵部の場合よりも信号振幅が小さい肩部の心弾動図に対しては、振幅の指数係数を0とし寄与度を下げることで、参照の平均血圧との高い相関関係を被験者全員から得られることを確認した。また、参照平均血圧との誤差も、踵部での計測結果と同等程度に低値であった。更に、平均血圧の推定式を変形改良し、血圧推定用の指数係数と3特徴量を併用することで、末梢血管抵抗と心拍出力の相対値についても一拍毎に算出できることを導出した。その有効性を検証し、1例を除き高い相関関係が得られることを確認した。

このように、著者が定式化し提案した平均血圧推定法は、非接触・同時計測された心電図と心弾動図から一拍毎の平均血圧を高精度で推定可能であり、また、平均血圧推定式の拡張により、血圧関連指標である末梢血管抵抗と心拍出力の相対値についても、推定に有用であると結論付けている。

以上、本論文において著者が検討して得た結論に記された事柄は、非接触計測信号からの平均血圧の推定を高精度で実現している点に加えて、血圧関連指標の相対値の連続推定を通じて手法としのて拡張性を提示している点、異なるモダリティの生体信号を非接触的に同時計測するシステムの原型を提示している点で極めて有用であると判断できることから、本論文の価値は工学的、工業的な観点からも十分に評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。