

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20191

研究課題名（和文）皮膚 - 心電用ドライ電極間の接触圧力変化が心電図波形に与える影響の解明

研究課題名（英文）Effect of changes in contact pressure between the skin and dry electrodes for ECG waveform

研究代表者

竹下 俊弘 (Toshihiro, Takeshita)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：90784124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では皮膚ファントムを用いたMA定量評価装置を作製し、接触圧力と心電図に発生するMAの再現を行い、その関係性の解明に取り組んだ。皮膚ファントム-電極面の接触圧力が500Pa、相対変位量が呼吸程度の動きである200um、深呼吸程度の動きである500um、それ以上の動きである1000umにおいて、MA定量評価を行ったところ、それらの波形とMAのない波形の相関係数が、0.92、0.74、0.53となった。この結果から変位量200um接触圧力500Pa以上において、呼吸程度の動きに対してMAなく心電図計測可能であるという知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果の社会的意義は、衣類型心電図計測ウェアにおいて、MAを考慮した電極構造設計により、医療機器と同等の心電図計測が可能であることを示した点にある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed an MA quantitative evaluation device using a skin phantom. When the contact pressure of the electrode surface was 500 Pa, the relative displacement was 200 um, which was a movement of about breathing, 500 um, which was a movement of deep breathing, and 1000 um, which was a movement of more than that, MA quantitative evaluation was performed. The correlation coefficients between the waveform and the waveform without MA were 0.92, 0.74, and 0.53. From this result, it was found that ECG can be measured without MA for movements of the degree of respiration at a displacement of 200 um and a contact pressure of 500 Pa or more.

研究分野：生体計測

キーワード：ウェアラブルデバイス ECG モーションアーティファクト

1. 研究開始当初の背景

ウェアラブルセンサを用いた生体情報モニタリングは日常生活における健康管理を可能にする。特にコロナウイルスの流行により日常生活において体調管理を行う技術の注目度が増している。例えば脈拍数、相対血圧、血流、SpO₂、体温、筋電など様々なウェアラブルセンサの報告があり、特に心電図計測のウェアラブル測定の高い。これは世界における死因の第一位が心疾患であるためである。例えばAsahikasei Zoll メディカルでは、衣類型心電図計測ウェアと電気ショック機能を一体化したLife vestの開発を発表している。このLife vestは睡眠中に心室細動が発生した際に、心室細動を検知し、自動的にその場で電気ショックを与えることで、患者の命を救うことができる。このように心電図計測ウェアラブルデバイスは健康管理用途から医療機器用途まで幅広く普及している。

12誘導心電図計測を行う場合、四肢に4個、胸部に6個の計10個の電極を体の正しい箇所配置する必要があり、その観点からデバイスの形態は衣類型が最適である。また装着面や衛生面の観点からゲルを用いないドライ電極を使用する方が好ましい。これらの課題をクリアするために、衣類上に多数のドライ電極を一括形成可能な静電植毛技術を用いたドライ電極の開発を行った。静電植毛技術とは、接着剤が塗布された衣類に対して、帯電させた短繊維を電気力線に沿って吹き付けることで、短繊維を起毛状態で衣類上に形成する技術である。我々は銀メッキ加工を施した短繊維を静電植毛することで、導電性繊維が起毛した状態で植毛された構造を有するドライ電極の作製に成功し、これを「起毛電極」を名付けた(図1)。この技術を用いることで、多数の電極を一括形成可能であり、製造コストの低減効果などが期待できる。

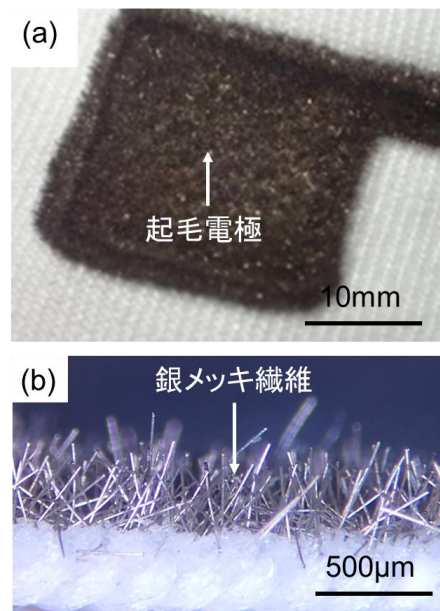


図1. (a)起毛電極写真
(b)断面図

2. 研究の目的

一方で、起毛電極に限らず、衣類上にドライ電極を配置した心電図ウェアで心電図を計測する際の最大の課題は体動による心電図の揺らぎであるモーションアーティファクト(MA)である。ドライ電極はゲルを有していないため、皮膚-電極間の機械的接触が不安定である。そのため、呼吸や身じろぎなどの小さな動きでも皮膚-電極間のインピーダンス変化、静止電位変化、皮膚電位変化などが生じ、心電図の基線をひずませる。つまりこのMA対策がドライ電極を用いた心電図計測における重要な課題となる。そこで、本研究では、ドライ電極を用いた心電図計測におけるMAの定量評価技術の開発を目的とした研究を行った。

3. 研究の方法

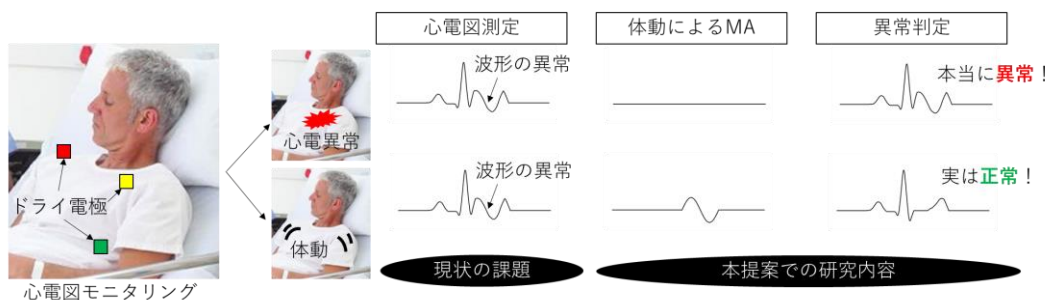


図2:心電図モニタリングにおけるMAの影響概要図

上述の通りドライ電極を用いた心電図測定においては、皮膚-電極間の接触圧変化によって発生する接触インピーダンスの変化が心電図波形に影響を与える、いわゆる MA が問題となる。MA が発生すると、心電図波形の変形が体動によるものか実際の心電異常によるものか判別が困難となる(図 2)。一方で、実際に被験者実験により MA と接触圧力の関係性を評価しようとする、被験者ごとの特性の違いや、動きの再現性の点で、定量的な評価が困難である。そこで、本研究では人間の皮膚と同等の機械特性を有する皮膚ファントムを用いた MA 定量評価装置を作製し、皮膚-電極界面の接触状態を再現することで、接触圧力と心電図に発生する MA の再現を行い、その関係性の解明に取り組んだ。なお MA の大きさ (V_{ma}) は下記の計算式で与えられる。

$$V_{ma} = 2 \left[\Delta V_{dc-offset} + \Delta Z_{skin-electrode} \left(\frac{V_{ECG} + V_{dc-offset}}{Z_{in}} + I_{bias} \right) \right] \quad (1)$$

$V_{dc-offset}$ 、 $Z_{skin-electrode}$ 、 V_{ECG} 、 I_{bias} はそれぞれ、皮膚-電極界面に生じるオフセット電圧、皮膚-電極間の接触抵抗、心電信号電圧、増幅器の入力インピーダンスである。この式から $\Delta V_{dc-offset}$ 、 $\Delta Z_{skin-electrode}$ が変動成分であり、MA の大きな原因となる。本研究ではこれらの電気的な変動成分を抑制し、MA を低減することを目的とし、MA 定量評価実験を実施した。具体的には皮膚を模擬した皮膚ファントム、心電図信号を出力可能な ECG 波形発生器、フォースゲージ、自動ステージを用いた実験系を作製し、皮膚-電極間の接触状態変動を疑似的に再現し、接触圧力が MA に与える影響の定量的に評価した。

図 3 に実験系を示す。生理食塩水を含侵させた皮膚ファントムにテキスタイル上に形成した起毛電極を接触させ、皮膚ファントムに ECG 波形発生器から心電信号を入力する。心電信号は起毛電極を介して増幅回路に入力され、心電図としてオシロスコープで測定される。皮膚ファントムは起毛電極と並行方向に変位可能な自動ステージに固定されており、この自動ステージを動作させることで、体動及び MA を再現する。本研究では安静時に多誘導心電図計測ウェアを着用すると仮定し、呼吸及び深呼吸の体動において安定した心電図を得るための接触圧力の推定を目的とした。そのため、ステージ移動量は一般的な呼吸時の皮膚の動きから算出し、 $200\mu\text{m}$ (呼吸と同等)、 $500\mu\text{m}$ (深呼吸と同等)、 $1000\mu\text{m}$ (深呼吸以上の体動) とした。また往復速度は 14 往復/min であり一般的な呼吸頻度と同等である。接触圧力は 200Pa 、 500Pa 、 1000Pa 、 2000Pa 、 4000Pa とし、その際の心電図計測を行った。

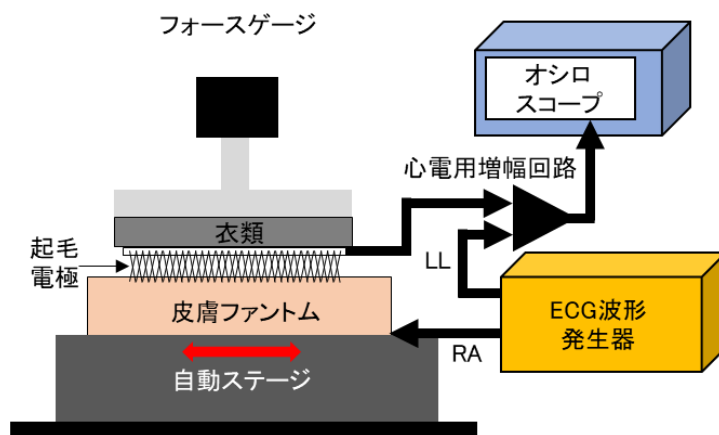


図 3: MA 定量評価装置概要図

4. 研究成果

図 4 に変位量が $200\mu\text{m}$ (a)、 $500\mu\text{m}$ (b)、 $1000\mu\text{m}$ (c) 時における心電波形を示す。変位量が增大するにつれて心電図のゆらぎ (MA) は大きくなる一方、接触圧力の上昇にともない MA が減少することが確認できる。得られた心電図の MA を評価するために、変位量が $0\mu\text{m}$ 時の心電波形との相関係数を用いた評価を行った。図 4 (d) に接触圧力 500Pa 、変位量 $0\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、 $1000\mu\text{m}$ 時の一波形分の心電図及び変位量 $0\mu\text{m}$ 時 (体動が発生していない心電波形) との相関係数算出結果を示す。変位量 $0\mu\text{m}$ の心電波形では同一波形であるので相関係数 1 であるが、変位量 $200\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ 、 $1000\mu\text{m}$ となるにつれて、相関係数が 0.92、0.74、0.53 と減少する。この計算を全ての変位量、接触圧力に対して算出した結果を図 4 (e) に示す。なおこれらの心電波形及び相関係数の結果を共同研究者である医師が確認し、相関係数 0.9 以上の波形を MA 非発生の閾値として設定した。変位量 $200\mu\text{m}$ では接触圧力 500 Pa 以上で、変位量 $500\mu\text{m}$ では接触圧力 1000Pa 以上で、変位量 $1000\mu\text{m}$ では接触圧力 2000Pa 以上で相関係数 0.9 を超えた心電図が得られた。以上の結果から、通常の呼吸と同等の体動に対して MA の影響の小さな心電図測定を行うためには、接触圧力 500Pa 以上が必要であるという指標が得られた。

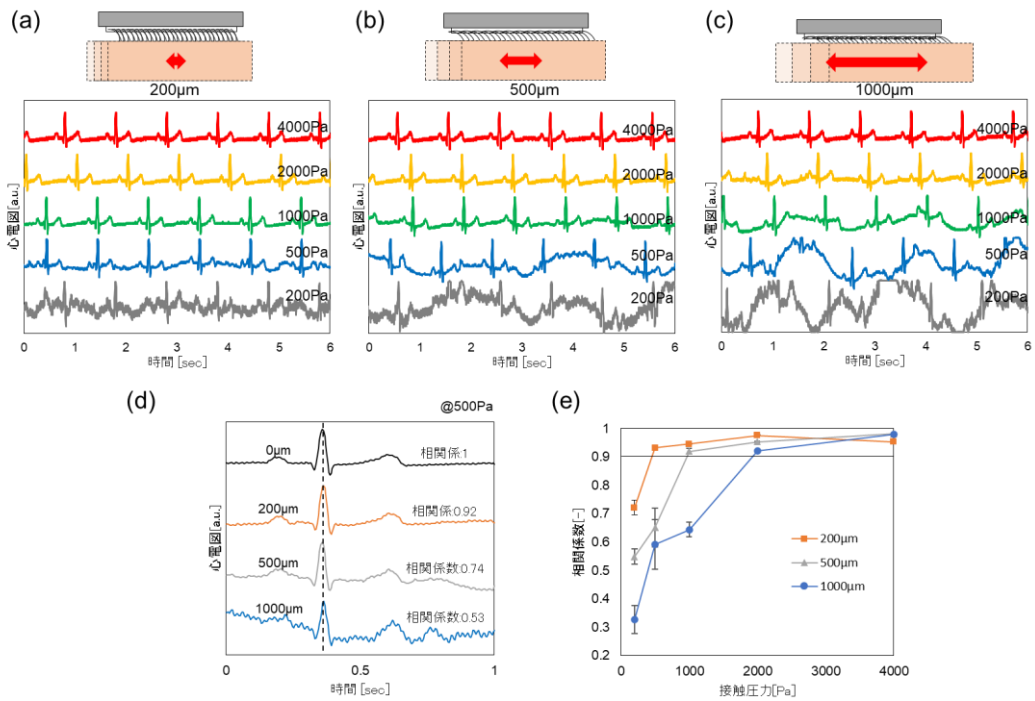


図 4.変位 200 μ m(a),500 μ m(b),1000 μ m(c)時における各接触圧力における心電図波形, 接触圧力 500Pa 時における心電図波形(d),接触圧力と相関係数の関係(e)

上記の実験結果より、呼吸と同等の動きに対して、500Pa 以上の接触圧力が必要であるという指標が得られた。この指標を元に、多誘導心電図計測ウェアの開発を行った。まず高い接触圧力を実現するためにコンプレッションウェアを多誘導心電図計測ウェアの基材として選定した。さらに起毛電極を立体化し、全ての電極が人体に対して垂直方向に変動しない構造とした。胸部に 18 個、四肢に 4 個の起毛電極が形成されている。胸部の 18 個の電極は、上部 6 電極、中央 6 電極、下部 6 電極の計 18 個であり、中央 6 電極の位置は、12 誘導心電図における V1-V6 電極に相当する位置に配置されている。また上部及び下部 6 電極は、中央 6 電極から 20mm ずつ上下の位置に配置し、着衣時の上下方向のずれの影響を低減する配置とした。なお V1-V6 の電極に関して、V1~V2 間の中心が人体の前正中線上に、V6 の中心が中腋窩線上に配置されるように、衣類上の電極位置調整を行った。また四肢電極はそれぞれ左肩 (LA)、右肩 (RA)、左脇腹 (LL)、右脇腹 (RL) に配置されており、LA、RA、LL 電極はウィルソン中央電極として、また RL 電極はグラウンド電極として使用する。各電極は衣類上に縫製した導電糸及び金属スナップボタンを介して心電増幅回路に接続されており、作動増幅・フィルタリング・A/D 変換を行う。その後心電信号をス

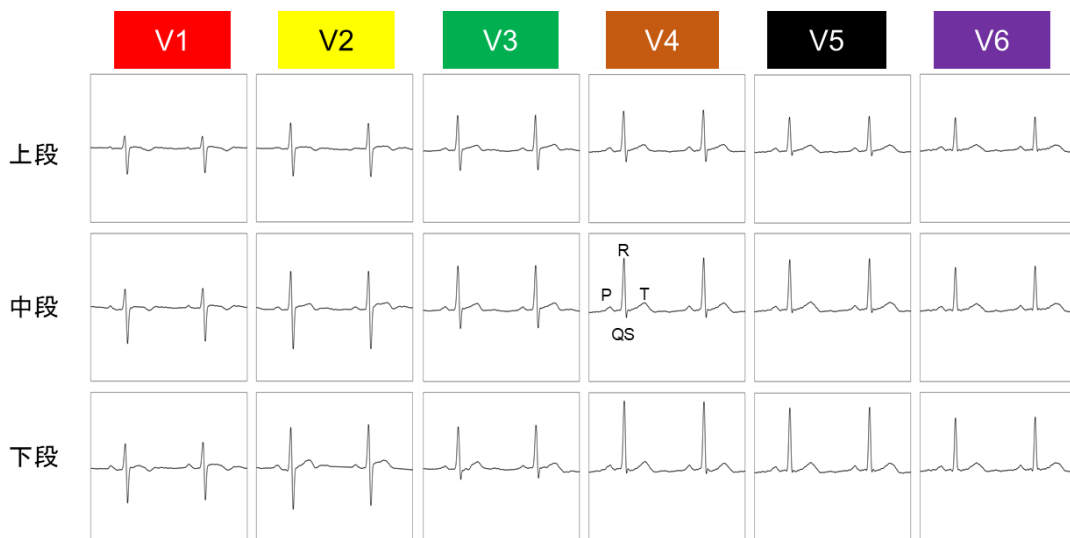


図 5.胸部 18 誘導分の心電図計測結果

スマートフォンで処理し、18 誘導の心電図として表示する。なお心電用増幅回路の電源はスマートフォンより供給する。

作製した多誘導心電図計測ウェアを用いた実証試験(医工学応用実験倫理審査第 71120030-A-20181002-001 号)を行った。作製したウェアを着用した実験協力者に仰臥位で2分間安静状態になってもらい、その間の心電図計測を行った。図5に胸部18個とウィルソン中央電極の作動増幅によって得られた心電図計測結果(2秒分)を示す。それぞれ胸部V1~V6の心電図がそれぞれ上段中段、下段の3波形ずつ得られており、合計18点の心電図の同時計測に成功した。また得られた心電図にはMAが観察されず、すべての波形でP,Q,R,S,T波の識別が可能である。中段のV4-V6のR波に関して、上段は減高し、下段は増高している。以上の結果から多誘導心電図計測ウェアを用いて医療機器と同等の心電図計測が可能であることを示した。

以上、本研究では静電植毛技術及びMA定量評価技術を用いた多誘導心電図計測スマートウェアの設計・作製について述べた。特に多誘導心電図計測ウェアの着用状況として安静状態と仮定し、呼吸におけるMAを低減可能な電極構造及びウェア全体の設計指標を見出すことで、医療機器と同等の心電図計測が可能な多誘導心電図計測スマートウェアの開発に成功した。一方でさらなるスマートウェアの普及のためには、安静状態に限らず、日常生活における一般的な動作中(歩行・家事・デスクワークなど)におけるアーティファクト対策が求められる。これらの動作時は、衣類の伸縮による配線ノイズ、筋肉から発せられる筋電ノイズが、皮膚-電極界面の変動に起因するアーティファクトに重畳するため、ハード的な対策を行うと同時に信号処理による高度なソフト的対策も行う必要があると考える。今後ハード・ソフト的なアーティファクト対策を講じながら、装着者が「着てみたい」と思えるようなスマートウェア開発に取り組む。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹下俊弘
2. 発表標題 多誘導心電図計測用立体起毛電極開発とその応用
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------