

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350681

研究課題名(和文) マルチモーダル生体信号計測にもとづく義手ソケットの生理学的適合設計

研究課題名(英文) Multimodal biosignal measurement for designing biologically tailored upper limb prosthetic socket

研究代表者

大西 謙吾 (Ohnishi, Kengo)

東京電機大学・理工学部・准教授

研究者番号：70336254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、義手ソケットを切断肢に装着した際の温熱特性を体系化することを目的とする。上肢切断者の筋電義手の使用率の低さの原因として装着の不快感がある。切断肢にソケットを着用した際の不快感を低減するため、周囲温度・湿度の変化に影響を受けにくい筋電義手用ソケットの設計条件を実験により調べた。実験は非切断者を被験者として、体表面を樹脂製模擬前腕ソケットで覆い、周囲温度・湿度を管理した中、体表面温度、体表面接触圧、血流などの生理反応を測定した。さらに、温度調整機能を付加した円筒熱源実験機を作成し、ソケットの厚みや材質などの設計因子が伝熱特性に及ぼす影響について実験により調査した。

研究成果の概要(英文)：This research targets to systematically evaluate the thermal characteristics of donning upper limb prosthetic socket on the residual limb. The discomfort of donning upper limb prosthetic socket is the most popular reason of canceling the use of upper limb prosthesis. To reduce the discomfort, we considered the effect of inner socket temperature and humidity change to be the major indicator and experimentally measured and evaluated the condition in relation to multimodal biological signals. The experiments were conducted with non-amputee subjects and donned a quasi-transradial prosthesis socket and measured under controlled room temperature and humidity. Furthermore, to investigate dimensional and material effect of the socket, cylinder heat source labware was designed and used for evaluation.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：義肢 ソケット 温熱特性 生体信号計測 義手

### 1. 研究開始当初の背景

国内外の義手の研究は、義手ハンドの設計・開発と筋電信号のパターン認識による制御手法に関するものが過去 40 年にわたり数多く報告されているが、センサやハンドを体に装着する上で重要な義手ソケットに関する研究はほとんどない。ソケットの研究は主に体重支持機能が重視される義足に多く、3次元曲面の採型や応力解析、Computer Aided Engineering (CAE) と 3次元プリンタに関する技術開発があるが、切断者の多くが訴える切断端の冷えやしびれ、ソケット内の蒸れ、臭いの問題に対しては抜本的な解決策がない。ソケット装着時のソケット内体表面温度・湿度についての体系的な研究はなく、義肢装具装着状態の伝熱学的かつ生理学的な調査はいまだ極めて初歩段階でしかない。体表面の伝熱特性に関する研究は、被服学、建築・環境学の領域での体温の生理学に関する研究はあるが、いずれも、健常な四肢の体表面から空気や衣類を経由しての伝熱に関するものである。筋電義手においては、筋電センサをソケットに内蔵するにあたり、ソケット装着した切断肢の放射伝熱特性を適切に設計できれば、発汗を抑えつつ、血流量の増加につながると期待され、義手の操作性向上に寄与することの可能性も期待される。

### 2. 研究の目的

本研究は、切断肢ならびに義手ソケット内の温熱特性を調査、体系化することで、切断肢の不快感の低減、外温変化に対しても体温を安定化できる筋電義手用ソケットを提案することを目的とする。上肢切断者や先天的上肢欠損児の筋電義手の使用率の低さの原因として装着の不快感と応答の不安定さがある。ソケット内の切断肢の冷え、しびれ、蒸れといった感覚の機序を、断端の体表面を樹脂等で密着・密封した状態での体表面の伝熱特性の検証、切断端の体内構造にもとづく伝熱特性モデリング、体温調整メカニズムの検証を通じ体系化することで、使われる義肢装具の設計技術、義肢ソケット製作技術の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

次の3つの実験をおこなった。本実験は東京電機大学ヒト生命倫理委員会、ならびに国立障害者リハビリテーションセンター倫理委員会の承認を受け、ソケット製作前に被験者への事前説明を行い、同意を得て実施した。

#### (1) 室内環境制御時における前腕義手ソケット装着時の温度分布

室内温度がソケット内の温・湿度に与える影響を調査することを目的とし、非切断者が着用した模擬義手ソケット内の体表面温度と湿度、ならびにソケット外表面温度の変化を測定した。

前腕部に樹脂製ソケットを装着した際の

温・湿度特性の調査にあたり、評価基準となるデータの蓄積と傾向分析を目的として個体差が少ないと思われる非切断者を対象とした。皮膚に既往歴のない非切断者を被験者とし、右前腕に装着する模擬義手ソケットを被験者毎に製作した。ソケットは、着用時に圧痛が生じないように茎状突起部などには隙間を設ける処理をしつつ自己懸垂できるように内面が体表面と密着するよう真空吸引成形した。さらに、開口部は中・長断端長の前腕切断者用に製作されるU形状とし、内外側上顆の近位側までを覆う形状とした。また、手指部は伸展内転位、手関節は中間位でソケットを装着できる形状とし、脱着が可能ないようにソケット上部にフランジを設けて力を加えると開く構造とした。実験中はフランジをネジで締め、テープで隙間を閉じた。

非切断者を対象とし、手掌部と前腕部に温度センサ、前腕中程と肘部に温湿度センサを設け、異なる室内温度で測定箇所間の温度の変動傾向を確認した。湿度を40%で一定、温度を3条件(20, 25, 30)それぞれで一定に設定、制御された実験室内にて、各被験者2試行の測定データを得た。被験者は実験開始30分前に入室し、安静座位にて待機後、各条件で30分間ソケットを装着した状態で計測を行った。条件間のインターバルは30分間とし、ソケットを外して安静座位にて待機する。温度センサは掌内(T1)の前腕内側(T2)の2か所の体表面に粘着包帯を用いて固定した。また、ソケット内湿度を測定する温湿度センサは前腕内側遠位側(H1)と近位側(H2)の2か所の体表面に粘着包帯で固定した。各センサ信号はサンプリング周期0.01sにて各試行中継続して記録した。

#### (2) マルチモーダル生体信号計測

ソケット内の環境ならびに生理反応の測定として、前述の温度センサ、温湿度センサに加え、表面筋電位をディスポ電極(日本光電工業, Vitrode F-150s)と表面筋電位計測装置(追坂電子機器, PersonalEMG)にて測定した。さらに、ソケット内圧力を圧力センサ(AMI techno, AMI3037-P5)と接触圧変換器(同, AMI3037-2)にて、静脈流速を平型プローブ(Hadeco, BT8M05S8C)と超音波血流計(Hadeco, Smartdop30EX)にて、皮膚血流量をレーザ血流計(ADVANCE, ALF21)にてそれぞれ測定した。

本実験では、ソケット装着により影響を、体表面温度、皮膚血流量、静脈流速、ソケット内圧力、筋電位の相互作用関係を調査するためセンサ信号の同期計測を行う。特に、ソケット装着時かつ筋活動時の皮膚血流量と温度変動への影響に着目し関係を調査する。

実験はソケット装着の有無2条件と筋活動の最大随意収縮(Maximum Voluntary Contraction: MVC)の0%(筋活動なし)、20%、70%の3条件を組み合わせた計6条件で行った。筋活動は活動周期と強度の相乗作

用を考慮し、遅く弱い動作（電子メトロノームにて提示した 60BPM で MVC20%）と速く強い動作（80BPM で MVC70%）を設定した。この各条件で筋収縮を 20 回繰り返した。筋活動は手関節の屈曲・伸展筋を関節角度を変えずに同時に収縮（共縮）させた。

表面筋電位は橈側手根屈筋上の皮膚に電極を貼り付けた。圧力は、筋電電極の位置から内側 40mm の位置のソケット内圧力を測定した。皮膚血流量は、肘正中皮静脈上の皮膚血流量を測定した。静脈流速は、右上腕尺側皮静脈上の皮膚に自作した固定装具で平型プローブを拘束し、測定した。実験は、姿勢による影響を考慮し、ソケット開口部付近の体表面が過剰に圧迫されないように肘の屈曲角度 45° に安静椅子座位にて測定した。空調で室内温度 25 に保つようにした。

### (3) 円筒熱源モデル

義手ソケット装着状態を模した環境を製作するため、前腕と熱伝達的に等価な円筒モデルを前腕の代表円筒寸法を参考に直径 80 mm、日本人の成人平均前腕長より長さ 241 mm、表面温度 32 °C とした。そして、実験装置として直径 76 mm の硬質塩化ビニル管にリボンヒータ(MISUMI, MRBH5)を巻き、ストッキングを被せ、熱電対(MISUMI, MSEW)を用いて PID 温度制御系熱源モデルを構成した。

実験では、ソケット内壁と円筒熱源モデル表面間の隙間が異なる場合の伝熱特性を、円筒熱源モデルを用いて実験的に比較した。実験には、円筒熱源モデルに装着するソケット内径が 0.2mm 大きいものと 2 mm 大きいものをポリエステル樹脂（テルモリン）にて成型した。実験では、ソケット内温度とソケット外表面温度を温度センサ(Texas Instruments, LM35CAZ)を用い測定した。ソケット内は同一直線上に等間隔 22 mm で 10 箇所、ソケット外表面は 66 mm で 4 箇所に医療用粘着包帯で貼付した。センサ信号はサンプリング周期 1 s、収録時間 900 s とし記録した。ソケット周囲温度は、空調で室温 25 に調整し、対流の影響を抑えるため発泡スチロール製箱内へモデルをセンサ位置が水平になうように設置し、各ソケット 3 回測定した。

## 4. 研究成果

### (1) 室内環境制御時における前腕義手ソケット装着時の温度分布

実験は被験者 3 名(男性, 年齢:平均 23±SD0.8 歳)に対し行った。各センサで測定した体表面温度、ソケット内湿度は 100s 毎に平均値を算出した。結果、ソケット内体表面温度、湿度ともに実験終了まで増加傾向が確認され、被験者 A,B,C それぞれのソケット内体表面温度と湿度は、タイミングは一定ではないものの、いずれの結果でも上昇勾配が途中から小さくなる特徴を示した。

部位間を比較すると、室内温度 20, 25 では計測時間中の 1800s 時の掌部温度 T1 と前腕温度 T2 の差の変動は小さいのに対し、30 では徐々に 2 点間の温度差は小さくなった。また、ソケット内湿度は室内温度 20, 25 では部位間の差は非常に小さいまま 1800s で 90% 近傍まで上昇するのに対し、室内温度 30 では 2 点間の湿度差は約 8% 以上ある状態で上昇し、1100s で H1 が、1800s で H2 が 100% に至った。

### (2) 筋電義手操作信号発生時のマルチモーダル生体信号計測

被験者は非切断者 3 名(年齢 22±SD0.8 歳), 各試行回数 3 回とした。実験結果の一部として体表面温度と皮膚血流量の測定結果に関して述べる。体表面温度は、先行実験と同じ、掌、前腕部ともにソケット装着後から測定終了まで継続した増加した。ソケット装着による影響を比較するため、筋活動なしの条件での測定データの内、測定終了前(1700~1800s)の 100 秒間のデータの平均を算出し、筋活動条件では、筋活動終了直後の 100 秒間のデータの平均を算出した。

全条件において前腕部より掌部の温度が高く、ソケット装着による手部の温度上昇が確認された。また、ソケット装着と筋活動による皮膚血流量の減少傾向が確認された。

掌部と前腕部の温度差の要因として掌部は前腕部より皮膚血流量が多いことが理由として考えられる。ヒトは血液により体心部から体表面への熱の移動を増減させ、体温の恒常性を保つが、中性温度域では掌部に動静脈吻合(arteriovenous anastomoses: AVA)が多数存在することで AVA が存在しない前腕より血流量は多く、体表面温度は高い値を示したと考えられる。また、ソケット装着で遅く弱い筋活動動作前と後の条件にて高い温度が確認された。筋活動前後で差がないことから、ソケット装着の効果が大きく、掌、前腕部の周りに密閉された狭い空間が形成され、皮膚から放散された熱がソケット内に蓄積されたことによるものと考えられる。さらにソケット再装着時に温度上昇が確認されないことに関しては、30 分のインターバルにおける発汗の冷却効果が推測される。なお、測定した皮膚血流量は、肘正中皮静脈上にて測定しており、肘正中皮静脈の流量に影響を受ける可能性が高い。よって、ソケット装着による皮膚血管の圧迫で前腕の血流量が減少し、皮膚血流量も減少したと推測される。

### (3) 円筒熱源モデルを用いた前腕義手ソケットの伝熱特性評価

測定終了 900s 時で平均ソケット内温度は隙間の大きなソケットが小さいソケットより 0.8 °C 高かった。温度の上昇傾向をソケット間で比較するため、温度の時系列信号の特定数とゲインを同定した。隙間の大きいソケットは小さいものと比較しソケットの内外

温度変動とも時定数が小さく，ゲインが大きい結果となった．このことより，実験条件の範疇では隙間の大きなソケットは小さいソケットより温度が高くなり易いといえる．

#### 5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) 神田智基, 大西謙吾, 望月哲平, 高見響, 河邊和宏, 大田弥史, 円筒熱源モデルを用いた前腕義手ソケットの伝熱特性評価, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2015, p.12, 2015/12/5, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)
- (2) 大田弥史, 大西謙吾, 三田友記, 中村隆, 自転車エルゴメータを用いた有負荷条件時の前腕義手ソケット内温湿度計測, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2015, p.24, 2015/12/05, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)
- (3) 大西謙吾, 望月哲平, 神田智基, 高見響, ソケットの熱伝達の等価円筒モデルを用いた伝熱特性評価, 第 31 回日本義肢装具学会学術大会, 日本義肢装具学会, p.249, 2015/11/7,8, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
- (4) 大田弥史, 中北麻紀子, 大西謙吾, 河邊和宏, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 室内環境制御時における前腕義手ソケット装着時の温度分布計測, LIFE2015, 1F1-04, 2015/9/7-9, 九州産業大学(福岡県福岡市)
- (5) 河邊和宏, 大西謙吾, 中北麻紀子, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 義手ソケット装着下における筋電義手操作信号発生時のマルチモーダル生体信号計測, LIFE2015, 1F1-05, 2015/9/7-9, 九州産業大学(福岡県福岡市)
- (6) 河邊和宏, 大西謙吾, 中北麻紀子, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 義手ソケット装着下における筋電義手操作信号発生時の生体信号の相関解析, 第 20 回知能メカトロニクスワークショップ, pp.195-198, 2015/7/11,12, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)
- (7) 大田弥史, 中北麻紀子, 大西謙吾, 河邊和宏, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 室内環境制御時における前腕義手ソケット装着時の温度分布変動解析, 第 20 回知能メカトロニクスワークショップ, pp.101-104, 2015/7/11,12, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)
- (8) Kazuhiro Kawabe, Kengo Ohnishi, Tomoki Mita, Takashi Nakamura, Evaluation on the influence of donning myoelectric transradial prosthesis socket by measuring multimodal biosignals -Preliminary experiment with able-body subject-, Proceedings of the 12th International Conference on Ubiquitous Healthcare: u-Healthcare 2015, pp.13-16, 2015/11/30-12/2, Kinki University, Osaka, Japan
- (9) Kengo Ohnishi, Makiko Nakakita, Kazuhiro Kawabe, Teppei Mochizuki, Hibiki Takami, Tomoki Mita, Takashi Nakamura, Inner socket hydrothermal measurement of quasi-transradial prosthetic socket under controlled environmental hydrothermal condition, ISPO World Congress 2015, pp.587-588, 2015/6/22-25, Lyon Congress Centre, Lyon, France
- (10) 河邊和宏, 大西謙吾, 中北麻紀子, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 筋電義手ソケット装着の上肢静脈流速への影響に関する健常者を対象とした基礎実験 - 第 2 報 -, 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, pp.559-560, 2015/1/9,10, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県, 新潟市)
- (11) 中北麻紀子, 大西謙吾, 河邊和宏, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 周囲温湿度環境が義手ソケット内温湿度変動に及ぼす影響, 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, pp.563-564, 2015/1/9,10, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県, 新潟市)
- (12) 河邊和宏, 大西謙吾, 中北麻紀子, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 筋電義手ソケット装着の上肢静脈流速への影響に関する健常者を対象とした基礎実験, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2014, 2014/11/22, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)
- (13) 中北麻紀子, 大西謙吾, 河邊和宏, 望月哲平, 高見響, 三田友記, 中村隆, 隙間の異なる模擬義手ソケット内の温湿度変動の調査, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2014, 2014/11/22, 東

京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)

- (14) 中北麻紀子, 大西謙吾, 大井健太郎, 高見響, 河辺和宏, 三田友記, 中村隆, ソケット内隙間の義手ソケット内温湿度変動に及ぼす影響に関する実験的考察, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 LIFE2013, GS3-1-2, 2013/9/2-4, 山梨大学甲府西キャンパス(山梨県甲府市)
- (15) 大井健太郎, 大西謙吾, 中北麻紀子, 河辺和宏, 三田友記, 中村隆, 義手ソケット装着時の体表面温度変化分布計測, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 LIFE2013, GS3-1-4, 2013/9/2-4, 山梨大学甲府西キャンパス(山梨県甲府市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大西 謙吾 (OHNISHI, Kengo)  
東京電機大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 70336254