

令和元年9月3日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01568

研究課題名(和文) 動的な体表面温湿度制御系を搭載した義手ソケットの開発研究

研究課題名(英文) Development of Upper Limb Prosthetic Socket with Dynamic Inner-socket Body Surface hygrothermal control

研究代表者

大西 謙吾 (OHNISHI, Kengo)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：70336254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、義手ソケット内の快適性問題の解決のため、温度制御系を提案し、前腕円筒熱源モデルを用いた検証実験を行った。多因子により定まるソケット装着状態の快不快の制御に周囲環境と生体の影響を受ける状態量であるソケット内温度を用いて制御する。ソケット内の目標温度の算出と送風制御に快適性指標PMV値とファジィ制御を導入したフィードバック温度制御系を構築、検証した。熱源モデルに温湿度センサ、ファン、送風路、マイコンを備えたアクリル製模擬ソケットを製作し、マイコンに制御アルゴリズムを実装した。PID制御系と、PMV-ファジィ制御系でPMV値の応答特性で比べ、PMV値推奨範囲近傍に収束することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来力学的要因にのみ着目し設計、適合する義手ソケットに対し、伝熱工学にもとづく快適性が制御可能な設計法を提案している点が新しく、学術的な意義がある。提案のシステムは、義手使用の中断・中止の要因であり温湿度による不快さ低減に寄与し、切断者の生活の改善につながることから社会的な意義も非常に高い。人体の温度調整系と環境温度系とに介在する装着デバイスの温度制御系は、デジタル造形技術とネットワーク型計算機を用いることで、義手に限らず、生活支援機器、さらには、身体表面を覆う身体拡張を目的としたウェアラブル・ロボティクスにおける体調管理システムの一環として応用可能である。

研究成果の概要(英文)：To improve the comfort of donning upper limb prosthesis, this research proposes a socket temperature controller and confirms the advantageous effect by experiments on simulator with artificial forearm heat source. The comfort of upper limb socket is a quantity governed by multifactor, yet inner socket temperature being state quantities influenced by biological body and environment make them appropriate regulator for control. The inner socket target temperature is computed from the amenity index PMV and blast volume is computed with fuzzy algorithm to compose a feedback temperature control system. Simulation and experiment was conducted on a cylindrical heat source model representing a residual forearm temperature control system covered with a 3-D printed acrylic socket equipped of duct, blast fan, hygrothermal sensor and microcontroller. Experiments confirmed that the PID and PMV-Fuzzy controls' PMV converge toward the ideal range, yet with residual error.

研究分野：義肢装具の知的システム設計

キーワード：義手 ソケット 温度制御 快適性指標 義肢装具 福祉工学 人間医工学 リハビリテーション科学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多機能義手の開発は数多くあるものの、その課題は義手ハンドの運動機能、とりわけ把持と筋電位センサと信号処理の生体インタフェースの操作性に限られている。感覚機能については、体内埋め込み式神経電極やヴァーチャルリアリティなどの視覚と組み合わせたクロスモーダル研究があるが、まだ実用化の段階にはない。これに対し、義肢の使用継続を左右するソケットの快適性に関する研究は力学の問題に限られ、温熱の問題については、義手では研究代表者が進めたソケット内温湿度状態、ならびに筋活動とソケット内環境と生理信号との関係調査以外にはなく、義足でも体系的な研究は蜂須賀らや Klute らによるソケット用材料別の伝熱特性調査に限られている。義手使用者の生活の質の改善効果は、ハンド単体の把持機能の向上では限られており、要素技術から臨床に近い環境下での評価方法までの総合的な研究が必要である。電動義手においては、生活環境下で安定して筋電位センサや慣性センサからの操作信号がリアルタイムで処理され、作業性が高く、かつ生理学的に操作負荷が小さいことが必要である。このためには、義肢を装着した状態での運動負荷が小さいとともに、生体のもつ運動による熱排出と体温調整機能が阻害されないことないシステムが必要である。

2. 研究の目的

本研究は、義手の装着快適性を向上するため、ソケット内温度を動的に制御しうるセンサネットワーク、温冷却器、感覚情報提示器、そしてコントローラからなる義手ソケットシステムの提案を目的とする。上肢切断者の義手の使用率の低さの原因として、装着の不快感、動作する関節の少なさに伴う体幹に近い関節での代償動作の負担や応答の不安定さからくる煩わしさがある。本研究では先行研究で調査したソケットと前腕の温湿度、接触圧、血流の関係の調査結果を参考に、快適性の優れた義手のソケット設計法を提案する。操作用・温湿度センサ等、温冷却器、温度感覚情報提示器を統合する電動義手用コントローラを構築し、快適性、操作性、作業性を備えた多自由度電動義手システムの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、伝熱特性を考慮し、ソケット内の温度上昇抑制を第一の課題として、冷却手法の基礎実験を行う。そして、CAD で送風路を内蔵するソケットの内外層の樹脂部品を形状設計し、CAE ソフトで熱流体解析シミュレーションを行い、ファンの選定等の仕様設定と快適性指標 PMV 値の設定値を求める。さらに、光造形装置で製作した模擬ソケットを組み立て、前腕円筒熱源モデルに装着し、机上の周囲環境-ソケット-人体のモデルを用いた実験環境を構築する。温湿度センサ、送風ファン、模擬ソケットに実装し、義手用ネットワーク型 (PDCP-RTM) コントローラ上にソケット内温度制御系を実装した。状態量として快適性指標 PMV 値を用いるファジィ制御系を実装し、効果検証のため、速度 PID 制御系を比較対象にした応答特性実験を行う。

4. 研究成果

(1) システム構成

本研究では、電動義手用のネットワーク型コントローラ (RTM-PDCP コントローラ) 上にソケット温度制御系を実装する。PIC マイクロコンピュータを搭載した PDCP ボードをセンサ系、アクチュエータ系でそれぞれ 1 台ずつ用い、データを記録するために RT-Middleware (以下、RTM) を PC に実装、接続した。センサ系 PDCP ボードは I²C 通信式の温湿度センサ (Texas Instruments, HDC1000) でソケット内空気温湿度を測定し、アナログ出力式温度センサ (UL Recognized Component, LM61C1Z) でソケット外層内壁温度を測定する。ソケット内温度上昇抑制のためアクチュエータ系 PDCP ボードにファン (ETS, N31UB) を取り付け回転数を制御する。快適性指標 PMV (Predicted Mean Vote) 値算出アルゴリズムを実装した。また、RTM と PDCP のブリッジとして PDCP_Wrapper RT-Component (以下、RTC) を Raspberry Pi 3 (Raspberry Pi, MODEL B) に実装した。PDCP ボード間ならびに Raspberry Pi 3 は PDCP に則り、温湿度、温度、快適性指標 PMV 値のデータの送受信を CAN 通信にて行う。また、データ記録用 RTC を PC (Dell, Latitude 3340, Win7) に実装し、Raspberry pi 3 が取得したデータを Wi-Fi 通信にて受信、記録する。またアクチュエータ系 PDCP ボードに搭載した快適性指標 PMV 値算出アルゴリズムは、空気温度、相対湿度、平均放射温度、風速、着衣量、代謝量の 6 つのパラメータから 1 つの快適性指数 PMV 値を導出する。本研究では、ソケット内空気温湿度、ソケット外層内壁温度を取得、他のパラメータは入力値として設定し、提案するアルゴリズムにより制御温度を算出、ファンを制御する。

(2) 快適性指標 PMV とファジィアルゴリズム

前述の快適性指標 PMV 値算出システムで導出された快適性指数からファンを制御するための制御温度算出アルゴリズム (以下、PMV-ファジィ制御) を作成した。体表面温度の変動は義手ソケットと周囲環境温度との関係で定まり、温度そのものを制御するよりも、より人間の快不快の感覚に近い温度制御を目指す。そこで、快適性指標 PMV 値と人間のあいまいな温熱感覚を数値で評価するファジィ理論を組み合わせた制御アルゴリズムを用いる。Pervez らの快適性指標 PMV 値とファジィ制御を組み合わせた室内温熱環境制御系を参考にしつつ、本研究ではソケット内の空気温湿度およびソケット外層内壁温度を入力とし、快適性指標 PMV 値を導出、この値と予め設定した快適温度からファジィ推定により制御温度を算出することとした。快適性指標

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

PMV 値導出のためのパラメータを風速 0 m/s, 着衣量 1 clo, 代謝量 1 W/m²とした。また, ソケット内の快適温度を 26 と仮定してメンバーシップ関数を作成し, ファジィルールを定めた。制御温度を算出するための非ファジィ化には, 制御温度メンバーシップ関数にて台形重心法を使用し, 制御温度を算出する。導出された制御温度は-3~3 の間で変位し, ファンの回転数を定めるために, この制御温度とモータドライバへの PWM 信号の Duty 比の関係を段階的に変化させる関係を定めた。

(3) 模擬義手ソケット内温度シミュレーション

冷却効果の検証の基礎実験のために, 熱源モデルに装着する 2 重構造の模擬ソケットを CAD で設計し, 送風時と非送風時を比較する熱流体シミュレーションを行った。流体はソケットの内層と外層の間を末梢側から中枢側へ流れるとし, 内層の末梢側は層流となるよう円錐とした。ソケット材料の主材であるアクリル樹脂の比熱, 熱伝導率を用い, 流体は空気とし, 初期周囲温度 20.1, 湿度 15 %, 熱源モデルは, 放熱温度を 30.0 を維持することとした。この条件より送風時の体積流量を 1.67 × 10⁻³ m³/s, 流入口径を 572 mm²とした。そして, 強制対流熱伝達効果によるソケット内温湿度変動を求めるにあたり, ソケット内層の熱源モデルと接触していない面の末梢側から 70 mm の位置での送風時と非送風時のソケット内空気温度と流速, ソケット外層内壁温度を算出した。結果, 送風時に定常状態にいたった際にソケット内空気温度の上昇は 4, ソケット外層内壁温度は 8 抑制された。さらに 設定条件と計算結果から快適性指標 PMV 値の変動を算出した。非送風時の PMV 値は 1.46 に対し送風時の PMV 値は推奨値である絶対値 0.5 内の -0.02 に収束した。

(4) 模擬義手ソケット内温度抑制制御実験

熱源モデルに 2 重構造の模擬ソケットを装着し, 送風した際の温度上昇抑制効果を実験とシミュレーションとで比較する。条件は 熱流体シミュレーションと同様とし, 最大風量 0.1 m³/min, 最大静圧 36 Pa であるファン(シコー技研, F3010ES)を使用した。温度上昇抑制効果の評価には, 送風時と非送風時のソケット内空気温湿度, ソケット外層内壁温度, 快適性指標 PMV 値の変動を計測, 算出した。ソケット周囲温度, 気流の影響を防ぐためソケットの末梢側と中枢側が解放された形状の断熱材で囲い実験を行った。結果, 送風時の PMV 値は -0.18 近傍に 697 s 程度で収束するのに対し, 非送風時は 0.55 近傍に 857 s 程度で収束した。ソケット内の収束空気温度は送風時に 24.7 近傍であったのに対し, 非送風時には 29.0 近傍であり, ソケット外層内壁温度も送風時には 22.2, 非送風時に 24.0 となり, 送風により温度調整機能のある熱源モデルにおいても PMV 値を安定させ, 温度の上昇抑制効果を確認した。さらに, PMV-ファジィ制御系を実装した効果の検証を, 速度型 PID 制御を用いた制御温度推定アルゴリズム(以下, 速度型 PID 制御)と比較する。ソケット内空気温度の目標値を 26 とし, 速度型 PID 制御は, 比例, 積分, 微分ゲインを各々 0.1, 0.2, 0.1, サンプリング周波数 1 Hz とし, ファン風量の制御には制御温度と現在温度との差分から PWM 出力を定めた。ソケット内空気温湿度, ソケット外層内壁温度をセンサで 3 データのみ取得し, PMV 値, ファン印加電圧の Duty 比を算出した。PMV 値算出時の風速は 0 m/s とした。結果, 測定終了間際(400~600 s 間)の PMV 値の平均値と標準偏差, 最大値は, PMV-ファジィ制御が(0.93 ± SD 0.02, 0.95), 速度型 PID 制御が(0.90 ± SD 0.04, 0.95)であり。PMV-ファジィ制御は, 快適性指標 PMV 値のオーバーシュートが小さく, PMV 値の推奨絶対値 0.5 以下に近づくことを確認した。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 13 件)

森田智久、大西謙吾、快適性指標 PMV を用いた義手ソケット内温度制御コントローラの開発、ライフサポート学会 第 28 回フロンティア講演会、2019

大西謙吾、神田智基、義手ソケット冷却法の体表面温度上昇抑制効果の比較、第 57 回日本生体医工学会大会、2018

森田智久、大西謙吾、RTM-PDCP 連携技術による快適性指標 PMV を用いた義手ソケット内温度上昇抑制、2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics/ROBOMECH 2018 in KITAKYUSHU、2018

神田智基、大西謙吾、義手ソケットの体表面温度上昇に対する対流と気化熱冷却を用いた抑制効果、日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2017、2017

大西謙吾、大田弥史、河辺和宏、中北麻紀子、高見響、三田友記、中村隆、室内温度湿度変更時における前腕義手ソケット内環境調査、第 33 回日本義肢装具学会学術大会、2017

神田智基、大西謙吾、前腕義手ソケット装着による体温上昇の気化熱冷却の特性、LIFE2017、2017

大田弥史、大西謙吾、神田智基、三田友記、中村隆、前腕義手ソケット装着時における運動の有無による温湿度変動計測 室内湿度変更時におけるソケット内環境調査、第 26 回 ライフサポート学会 フロンティア講演会、2017

大田弥史、大西謙吾、神田智基、三田友記、中村隆、運動負荷試験時における前腕義手ソ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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 2016、2016
神田智基、大西謙吾、大田弥史、高見響、円筒熱源モデルを用いた前腕義手ソケット装着下のペルチエ素子による冷却特性評価、日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2016、2016
大田弥史、大西謙吾、三田友記、中村隆、室内環境制御時の湿度条件変更による模擬義手ソケット内温湿度変動傾向調査、LIFE2016、2016
神田智基、大西謙吾、大田弥史、高見響、円筒熱源モデルを用いた前腕義手ソケット内冷却実験、LIFE2016、2016
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(第2報)、第55回日本生体医工学会大会、2016
K.Ohnishi, Multimodal measurement and evaluation on the influence of donning myoelectric transradial prosthesis socket by measuring hygrothermal influence, ISPO UK Trent International Prosthetic Symposium 2016, 2016

〔その他〕

大西謙吾、義手ソケット内の体表面温湿度と生理学的適合性、地域ケアリング、2017、19(5)、pp.68-71

6. 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 森田 智久
ローマ字氏名： (MORITA, Tomohisa)

研究協力者氏名： 神田 智基
ローマ字氏名： (KANDA, Tomoki)

研究協力者氏名： 大田 弥史
ローマ字氏名： (OHTA, Yasushi)

研究協力者氏名： 高見 響
ローマ字氏名： (TAKAMI, Hibiki)

研究協力者氏名： 三田 友記,
ローマ字氏名： (MITA, Tomoki)

研究協力者氏名： 中村 隆
ローマ字氏名： (NAKAMURA, Takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。