

令和 2 年 7 月 5 日現在

機関番号：22303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00243

研究課題名(和文)人間の接触温度感覚を模擬・実現する温感センサの開発

研究課題名(英文)Development of a thermal sensor that imitates human thermal sensation

研究代表者

王 鋒 (Wang, Feng)

前橋工科大学・工学部・教授

研究者番号：80323046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人間の接触温度感覚を模擬・実現する温感センサを開発するものである。具体的には、人間の指先接触温度感覚に関する基礎研究とセンサシステムの開発を行った。研究期間中、人間の指先接触温度感覚に関しては、異なる熱特性をもち、異なる温度下の対象物に対して人間の温度感覚の主観評価より、人間の温度感覚と対象物の温度および熱特性との関係を調べた。また、機能性材料PVDFの焦電効果を利用してセンサシステムを開発し、対象物と接触する際のセンサ出力から、対象物の温度のみならず、対象物の熱伝導率等の諸熱特性を同時に計測可能な人間の接触温度感覚を模擬・実現する温感センサを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間は、同じ温度の対象物に触れるとき、対象物の材質により暖かく感じたり、熱く感じたりする。しかし既存の温度センサは、対象物の材質に関係なく、同じ温度しか感じない。すなわち既存の温度センサは、人間の接触温度感覚が実現出来ない。本研究は、初めて人間の接触温度感覚を模擬する温感センサを提案して開発する。このようなセンサは完成実用化し、将来福祉介護ロボットに装着できれば、福祉介護ロボットに人間と同様な温度感覚を持たせることを可能として、被介護者の不快や怪我を防止でき、人間により優しい福祉看護ロボットの実現に期待できる。また福祉介護ロボットのほか、人間と共存協調するロボットの実現にも期待できる。

研究成果の概要(英文)： This research developed a new type of thermal sensor that imitates human tactile temperature sensation. Human tactile temperature sensation was investigated using samples of different thermal properties and under different temperature. Relationships of the subjective evaluation of the sensation and samples' temperature and their thermal properties were studied. A novel thermal sensor was developed using the PVDF (Polyvinylidene difluoride) film as the sensitive receptor by making use of its pyroelectric property. The sensor was testified with above-mentioned samples and compared to human subjective evaluation. The results verified that the proposed sensor can imitate human tactile temperature sensation, that is, it not only evaluates the temperature of an object it touches, but also thermal properties such as thermal conductivity, thermal capacity, etc. of the object.

研究分野：生体医工学

キーワード：温度感覚 センサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温度センサの開発研究は古くから行われており、世の中にさまざまな温度センサが開発され応用されている。しかしながら既存の温度センサは、対象物の材質に関係なく、対象物の温度のみ測る。センサの偏り誤差要素を校正排除すれば、計測対象物は同じ温度であれば、センサの出力は同じになる。一方人間は、同じ温度の対象物に触れるとき、対象物の材質により暖かく感じたり、熱く感じたりする。すなわち既存の温度センサでは、人間の接触温度感覚が実現出来ない。人間の温度感覚を再現する温度センサは存在しない。既存の温度センサをそのままに福祉介護ロボットに装着すると、福祉介護ロボットの温度感覚と被介護者の温度感覚に差があり、非介護者に優しいとは言い難い事は現状である。

2. 研究の目的

本研究は以上を鑑み、将来自立型福祉介護ロボットに、人間と同様な温度感覚を持たせ、人間により優しい福祉介護ロボットの実現を目指して、人間の接触温度感覚を模擬する温感センサをはじめで提案して開発する。すなわち接触対象物の温度情報のみならず、対象物の熱容量・熱伝導率等の材質の熱特性を同時に感知可能、かつ人間のような順応性を持つようなセンサを開発する。このようなセンサは完成すれば、将来福祉介護ロボットに人間と同様な温度感覚を持たせることを可能として、ロボットはより人間らしくなり、人間との協調活動をより円滑化にして、人間により優しい福祉看護ロボットの実現に期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、研究目的を達成するために、人間の温度感覚の再考と温感センサの開発の2つの内容を行った。

(1) 人間の温度感覚の再考

温度感覚と接触対象物の温度および材質の熱特性の関係を明確化するために、鉄、銅、アルミ、真鍮、ステンレス、PVC、PE、アクリル等の異なる熱特性を持つ材料を利用してサンプルを制作し、こちらのサンプルを15[°C]から45[°C]までの安全範囲内に5[°C]刻みに設定し、それに対してビジュアル・アナログ・スケールVAS(Visual Analog Scale)法を利用して人間の接触温度感覚を定量化し、人間の接触温度感覚の主観評価実験を行った。さらに、温度コントローラをもちいて被験者に温度を提示し、対象物と同じ温度感覚の温度を特定して客観的温度感覚を測定した。その結果に基づき、人間の温度感覚と接触対象物の温度および対象物の熱特性を表す諸物性値との関係を検討し、定量化解析を行った。

(2) 温感センサの開発

センサ受感部、センサベース部およびセンサ駆動部の形状、構造、材質の設計と、センサ出力の前処理電子回路の設計などを行い、センサ本体、センサ出力前処理電子回路等のハードウェアを構築し、センサ出力から人間らしい接触温度感覚を定量的に表すパラメータおよび信号処理法を確立する。開発されたセンサを用いて、上記(1)のサンプルを用いて計測実験を行った。センサがサンプルに触れた時の出力から、センサとサンプルとの間の温度差、サンプルの熱容量、熱伝導率等の熱特性を表すパラメータを検討し、対象物の温度のみならず、対象物の熱容量、熱伝導率等の材質の熱特性を同時に計測することを可能とした。

4. 研究成果

(1) 人間の温度感覚の再考

①本研究では、まず人間の接触温度感覚の主観評価を調べた。10種類の材料(アルミ、鉄、純銅、真鍮、ステンレス、銅、PET、PE、PVC、アクリル)を用いて、同じ熱容量(120 J/K)および同じ質量(100 g)のブロックを作成し実験サンプルとして用いて接触温度感覚を測定した。サンプルは恒温器を用いて疼痛感のない範囲の15 [°C]から45 [°C]の範囲で5 [°C]刻みに設定した。サンプルを右手人差し指で約2秒間押し付けVAS (Visual Analog Scale)を用いて直感で接触温度感覚を評価してもらった。その結果を図1に示す。

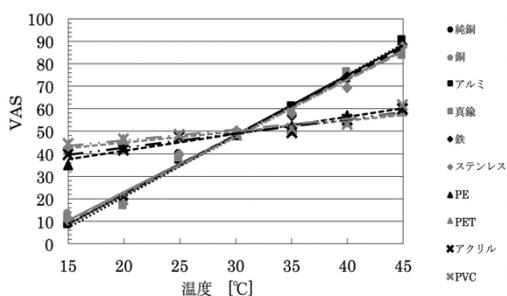


図1. 人間の接触温度感覚の主観評価の

結果

縦軸が主観的評価値、横軸がサンプルの温度である。図より同じ温度の対象物に対して、人間の接触温度感覚は異なることがわかる。また非金属に比べ金属のほうがより温度を感じやすいということがわかった。最小二乗法を用いて図1中の各サンプルの評価結果とサンプル温度間の回帰直線の傾きを求め、その傾きとそれに対応するサンプルの熱伝導率、比熱等の熱特性との関係を求め、図2図3に示す。図2図3より温度感覚評価値の傾き、すなわち人間の温度感覚の感受性が熱伝導率に正の相関関係があり、比熱に負の相関関係があることが分かる。

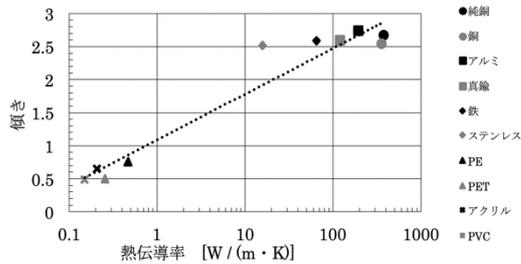


図2. 主観評価の傾きと熱伝導率との関係

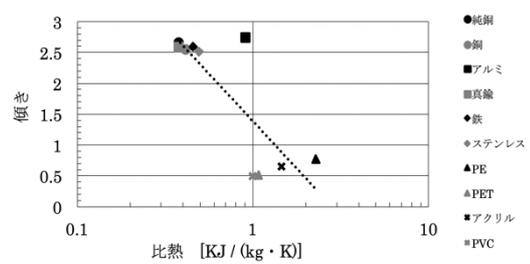


図3. 主観評価の傾きと比熱との関係

②また、温度コントローラを利用して人間の接触温度感覚を客観的に定量化することを試みた。サンプルの温度は15 [°C]から45 [°C]の範囲で2.5 [°C]刻みに設定した。温度コントローラを一定温度に設定し、被験者に提示した。サンプルと温度コントローラの温度提示部を右、左手人差し指で約2秒間交互に押し付け、提示した温度と比較し、サンプルの温度が温かいか冷たいかを回答してもらい、左右の指は同じ接触温度感覚となるように提示温度を調節し、被験者がサンプルと同じ温度を感じるような提示温度を特定した。この温度は感覚温度と呼ぶ、人間の客観的温度感覚とする。その結果を図4に示す。横軸がサンプルの設定温度、縦軸が各サンプルに対しての被験者感覚温度の平均値である。図4より客観的定量評価の結果は主観的評価と同様な傾向が確認できた。また、サンプルの設定温度、熱伝導率、比熱、熱容量等を説明変数として、感覚温度を目的変数として

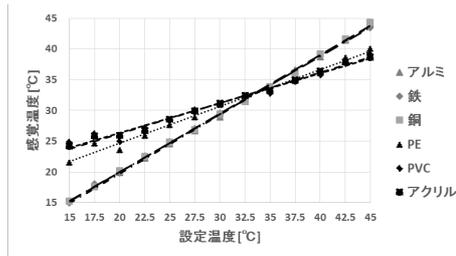


図4. 人間の接触温度感覚の客観評価の結果

重回帰分析を行い、熱特性の関係はサンプルの温度による影響が最も高く、温度ごとに比較すると、熱伝導率と比熱が温度感覚に影響を与えることがわかった。

③さらに、人間の指先接触温度感覚の弁別閾値や、接触温度感覚に及ぼす接触前指の温度バイアスの影響等に関して研究を行った。その結果、人間が日常生活の10°Cから40°Cの範囲に、温度感覚の弁別閾は0.9°Cから0.3°Cに低下し、低温よりも高温のほうの温度感覚が正確であることが確認できた。また、接触前指先に自然の温度より温度バイアスがある場合、指の温度感覚が鈍くなり、指先の温度感覚は指と対象物との温度差に関連するとの通説に問題点があることが確認できた。これらの発見は温感センサのさらなる研究に重要な参考意義がある。

(2) 温感センサの開発

①本研究では、機能性材料の1種であるPVDFの焦電効果に着目し、まずPVDFフィルム(東京センサ、DT1-028K)を使用し温感センサを試作した。センサ構造を図5に示す。センサは2枚のPVDFフィルム(10mm×20mm)を受感材とし、その間に薄いアクリル板(2mm)を挟む構造で、土台としたアクリル板に固定した。センサが対象物に接触する時、対象物側のPVDFフィルムに焦電効果と圧電効果を同時に起こし、センサ出力に圧力変化と温度変化に起因する電圧が含まれる。圧力変化と比較し、温度変化は土台側に伝達に時間がかかることから、土台側のPVDFフィルムの出力電圧は圧電効果に起因するものであり、それを利用して対象物側のPVDFフィルムの出力電圧から圧力に関連する成分を除去し、焦電成分のみ利用する。

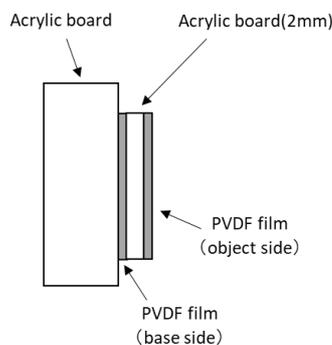


図5. センサ構造

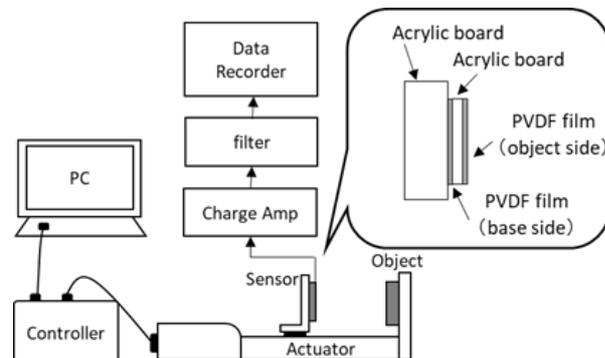


図6. 計測システム

②計測実験を行った。計測システムを図6に示す。PCからコントローラを制御し、センサを取り付けた電動アクチュエータを動作させ、センサを対象物に接触させた。センサから得られる出力はチャージアンプを用いて増幅させフィルタを通し、データレコーダを使用し、サンプリングレート 1kHz で記録した。

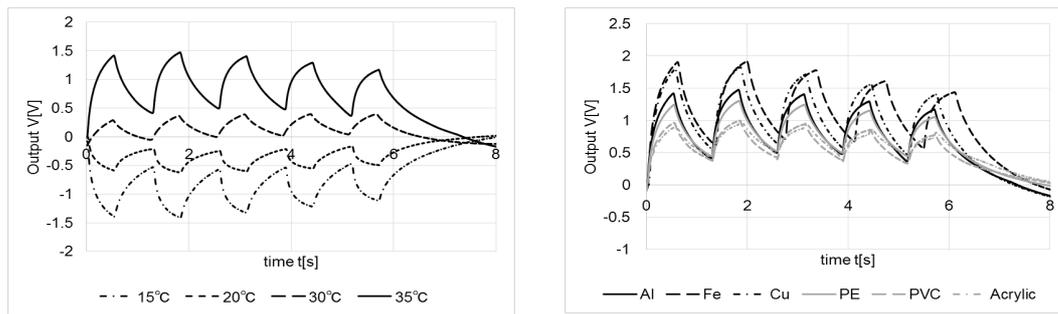


図7. 実験結果。左：異なる温度下同サンプルに対するセンサ出力；右：同温度下異なるサンプルに対するセンサ出力

室温条件下のセンサがサンプルに接触して 0.5 秒後離し、0.5 秒後また接触して離す動作を 5 回繰り返したときセンサ出力の焦電成分(以下簡略にセンサ出力と呼ぶ)波形の例を図7に示す。図の左側は異なる温度下同サンプルに対するセンサ出力であり、右側は同温度下異なるサンプルに対するセンサ出力である。図より同サンプルに対して、サンプルの温度は高ければセンサ出力も高く、温度は低ければセンサ出力も低くことが確認できた。また、同温度の異なるサンプルに対して、センサ出力も異なることも確認できる。センサ出力から温度情報のみならず、対象物の材料熱特性情報も検出可能である事を示唆する。

センサがサンプルに触れた時の焦電出力から、センサとサンプルとの間の温度差、サンプルの熱容量、熱流量等の熱特性を表すパラメータや、人間の順応性を表すパラメータを定量的に検討した。その1例として図8図9に示されているように、これらの計測結果は、人間の接触温度感覚(図1、4)に類似していることが確認できた。

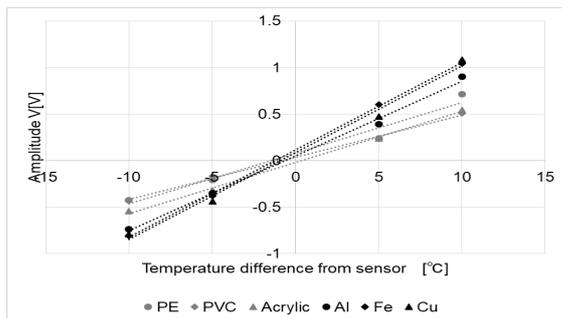


図8. センサ出力振幅とセンサと対象物との温度差との関係

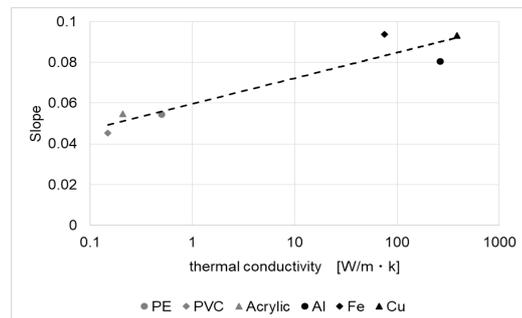


図9. 図8中各回帰直線の傾きと対象物熱伝導率との関係

③さらに人間の体温を持つ恒温動物の特性を模擬し、センサに一定温度を維持できる定温駆動、温度制御システム的设计し試作し、センサ改良を行った。研究の結果、センサ出力から接触する対象物の温度のみならず、対象物の熱容量、熱伝導率等の材質の熱特性を同時に計測することを可能とした人間の接触温度感覚を模擬する温感センサを実現した。

今後センサ実用化を目指し、センサの小型化などの改良を行い、研究を進める予定である。

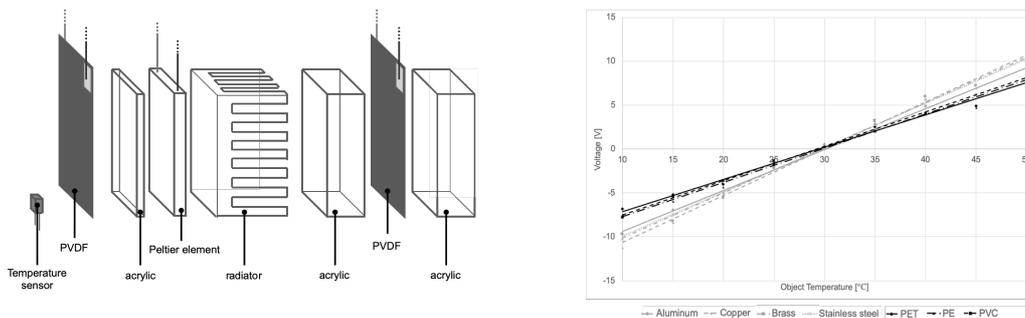


図10. 左：体温を持つ改良センサの構造；右：改良センサを用いた実験結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kosaku Eda, Feng Wang
2. 発表標題 Development of Thermal Sensor to Simulate Human's Contact Temperature Sensation Development of Thermal Sensor to Simulate Human's Contact Temperature Sensation
3. 学会等名 ICMEMIS2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 畑 享佑、王 鋒
2. 発表標題 指先温度感覚に及ぼす接触前指先温度の影響について
3. 学会等名 電気学会群馬支所・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 直貴、王 鋒
2. 発表標題 ヒトの接触温度感覚の識別特性について
3. 学会等名 電気学会群馬支所・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辰川 フェリペ たかし、王 鋒
2. 発表標題 PVDFを用いた温感センサの小型化
3. 学会等名 電気学会群馬支所・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 掛札 拓雅、王 鋒
2. 発表標題 PVDFを用いた義肢制御用センサの開発
3. 学会等名 電気学会群馬支所・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田部井 俊樹、王 鋒
2. 発表標題 曲げ変形を利用したPVDF触覚センサの開発
3. 学会等名 電気学会群馬支所・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千葉 由理、王 鋒、江田 虹咲
2. 発表標題 ヒトの接触温度感覚を模擬する「温感センサ」の開発
3. 学会等名 平成 30 年電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今村宏輝、江田虹咲、王鋒
2. 発表標題 ヒトの接触温度感覚に関する研究
3. 学会等名 第9回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 手塚智也、王鋒
2. 発表標題 触覚センサを用いた義肢操作の試み
3. 学会等名 第9回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Feng Wang, Yuri Chiba, and Nobuaki Nakazawa
2. 発表標題 Development of a Thermal Sensor Imitating Human Tactile Temperature Sensation
3. 学会等名 International Conference on Technology and Social Science 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸田黎香, 江田虹咲, 千葉由理, 王鋒
2. 発表標題 ヒトの接触温度感覚に関する基礎研究
3. 学会等名 第8回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江田虹咲, 岸田黎香, 王鋒
2. 発表標題 ヒトの接触温度感覚を模擬するセンシング技術に関する研究
3. 学会等名 第8回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小田島瑞希, 王鋒
2. 発表標題 触覚センサを用いた義肢操作の試み
3. 学会等名 第8回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 前橋工科大学	4. 発行年 2017年
2. 出版社 上毛新聞社事業局出版部	5. 総ページ数 96
3. 書名 前橋工科大学ブックレット2 命を技術する	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----