

令和 6 年 4 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12024

研究課題名（和文）アクティブタッチの快・不快を決定づける視・聴・触覚の物理的因子の解明

研究課題名（英文）Study on physical factors of visual, auditory and tactile sensations that determine comfortness/discomfortness of active touch

研究代表者

秋山 庸子 (Akiyama, Yoko)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50452470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）： 加速度センサを被験者の指先に配置して触対象を触ってもらい、そのなぞり動作の加速度の時間変化を短時間フーリエ変換したデータを元に機械学習を行うことで、加速度データのみによって触感の推定ができるかどうかを検討した。その結果、素材と指の相互作用に基づく触動作から、機械学習を用いて粗滑、摩擦、乾湿、硬軟、温冷、快不快の6つの官能評価項目を7段階に識別できる可能性が示された。次に、ヒトの指先と機械のプロープに加速度センサを設置し、得られたパワースペクトルを用いた触感の推定の可能性について検証した。その結果、ヒト指先の加速度データが機械のプロープに比較して高精度に触感を推定できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、これまでの触感の測定が、それぞれの触対象や触感の官能評価項目に依存して異なる物理特性を測定する必要があったのに対し、本研究の成果により、アクティブタッチを加速度センサによって計測し、周波数解析することで測定できる可能性が示されたことである。さらに、快不快という高次な情動も、物理的な手指の振動によって推定できる可能性が示されたことである。

社会的意義は、触感を遠隔伝達するために、加速度センサにより指先の振動の情報を数値化することが有効である可能性が示されたことである。また、加速度センサの指先への設置のみで触感が推定できたことは、官能評価を自動化できる可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）： We examined whether tactile sensation could be estimated using acceleration data alone, by placing an accelerometer at the fingertips of subjects and having them touch a tactile object, and then performing machine learning based on short-time Fourier transform data of the time variation of acceleration of their tracing motions. The results showed the possibility of discriminating six sensory evaluation items (rough and smooth, friction, dry and wet, hard and soft, warm and cold, and pleasant and unpleasant) into seven levels using machine learning, based on the tactile movements based on the interaction between the material and the finger. Next, the possibility of estimating tactile sensation using the power spectra obtained by placing acceleration sensors on human fingertips and machine probes was examined. The results suggested that acceleration data from the human fingertip could estimate tactile sensation with higher accuracy than that from the machine probe.

研究分野：感性工学

キーワード：触覚 アクティブタッチ なぞり動作 加速度センサ 快・不快 主成分分析 周波数解析 機械学習

1. 研究開始当初の背景

ヒトの感覚は、五感を中心とする低次感覚が基本となり、それらが複合することで、高次感覚さらには情動を引き起こす。低次感覚・高次感覚・情動の相互関係、および低次感覚どうしの相互影響に関して、脳科学、生理学、心理学、言語学、情報工学、それらの学際領域である認知科学の分野で研究が行われてきた。しかし、対象を触るときに視・聴・触覚が同時に刺激されて快・不快情動が引き起こされるメカニズムは未だ明らかにされていない。

一方、情報工学の分野では、視聴覚が先行している情報メディアに触覚が取り入れられようとしており、触覚受容器の機械的、電気的刺激により触覚を伝達・提示する技術が検討されている。しかし、視聴覚のようにモニターやスピーカーに対応する触覚の提示装置の汎用化、標準化には至っていない。この理由の一つとして、視聴覚が非接触な受動的感覚であるのに対し、触覚が触動作による接触をとる能動的感覚であるということにある。しかし、能動的触動作における触覚と視聴覚との関係を明らかにすることができれば、複数感覚の同時刺激による触覚の効果的な提示や、感覚間相互作用を利用した錯覚の利用により、この障壁を克服できる可能性があると考えられる。そこで、アクティブタッチにおける視・聴・触覚の快・不快の物理的メカニズムの解明を行うという着想に至った。

2. 研究の目的

ヒトが対象を触ると、対象の物理的性質に基づく刺激を受ける。このとき、触覚刺激と同時に視覚的、聴覚的刺激も受けている。これらの情報を統合して快・不快情動が引き起こされる。対象を触った際の感覚を表す形容詞やオノマトペには、「なめらか」、「ざらざら」、「ごつごつ」、「ごわごわ」、「かさかさ」、「がたがた」など、視・聴・触覚に共通して用いられる言葉が存在する。さらに、これらの言葉は快・不快に明確に分かれるものが多い。このことは、視・聴・触覚刺激が物理的な共通性を持つ可能性と、アクティブタッチの快・不快が人種、性別、年齢等に依存しない普遍的な要素を持つ可能性を示している。

上記に基づき、本研究では、対象を見ながら触ったときに起こる視・聴・触覚に関する物理現象の特徴の把握と、その快・不快への寄与を明らかにすることを目的とした。さらに、その結果を用いて、視・聴・触覚に関わる対象の物理特性から、アクティブタッチの快・不快の度合いや基本的な触感を数値として推定するツールを構築し、官能評価と生体計測により妥当性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

図1に示すように、被験者の指先に加速度センサを取り付け、繊維製品、金属などの20種類の素材をなぞるときの加速度を6軸センサを用いて取得した。加えて被験者は素材をなぞった後の粗滑「ざらざら-なめらか」、摩擦「べたつく-滑る」、乾湿「乾いた-湿った」、温冷「冷たい-温かい」、硬軟「硬い-柔らかい」、快不快「不快-快い」の6つの項目を素材ごとに、触感の度合いを7段階に分けたSD(Semantic Differential)法に基づいて官能評価した。被験者は22歳から24歳の男性10名、女性1名の合計11名であった。

(2) データ解析方法

①機械学習

上記の実験によって得られたデータを、図2に概要を示した短時間フーリエ変換により、時間・周波数・強度の3次元で表されるスペクトログラムに変換し、機械学習により、各官能評価項目を7段階に識別できるかどうかを調べた。まずそれぞれの加速度、角速度情報に対して短時間フーリエ変換(Short-Time Fourier Transform: STFT)を行い、スペクトログラムを作成した。このスペクトログラムに1~7

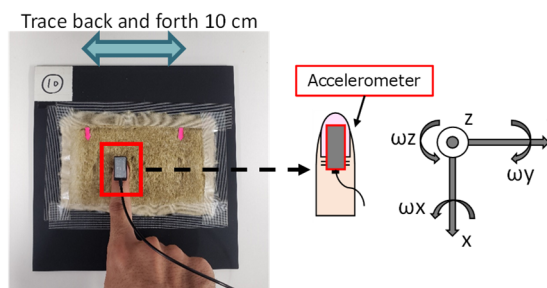


図1 加速度センサによるアクティブタッチの計測

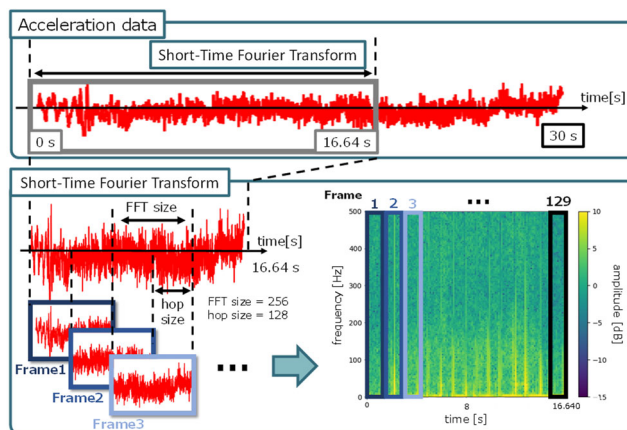


図2 加速度センサのデータの短時間フーリエ変換

点の官能値がラベル付けされたデータセットを CNN（畳み込みニューラルネットワーク）に入力して、7 段階の官能値のクラス分類を行った。これを粗滑、摩擦、乾湿、硬軟、温冷、快不快の 6 つの項目すべてについて行った。

②主成分分析

得られた加速度データを高速フーリエ変換 (FFT) によりパワースペクトルに変換し、このパワースペクトルを主成分分析により縮約して、主成分得点を説明変数、官能値を目的変数とした重回帰分析を行うことで、触感を決定づける因子を明らかにすることを試みた。また、ヒトのなぞり動作と機械のなぞり動作の特徴の違いを調べるため、機械（摩擦感テスター）のプロープでなぞる時の加速度データについても図 3 の方法で取得し、ヒトの指先のデータと同様の処理を行い、ヒトのなぞり動作と比較した。

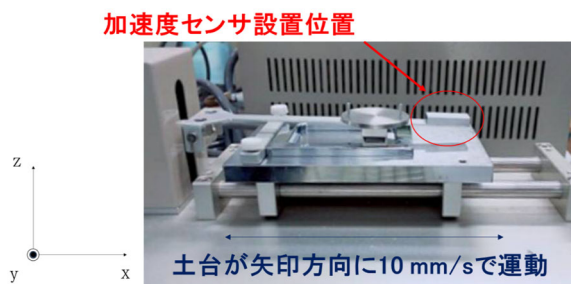


図 3 機械のプロープのなぞり動作の加速度測定

得られた加速度データを高速フーリエ変換 (FFT) によりパワースペクトルに変換し、このパワースペクトルを主成分分析により縮約して、主成分得点を説明変数、官能値を目的変数とした重回帰分析を行うことで、触感を決定づける因子を明らかにすることを試みた。また、ヒトのなぞり動作と機械のなぞり動作の特徴の違いを調べるため、機械（摩擦感テスター）のプロープでなぞる時の加速度データについても図 3 の方法で取得し、ヒトの指先のデータと同様の処理を行い、ヒトのなぞり動作と比較した。

4. 研究成果

(1) 機械学習による触感の推定

実験によって得られたデータセットを用いて、粗滑、摩擦、乾湿、硬軟、温冷、快不快の 6 項目それぞれの触感の度合いについて 7 段階に識別するためのネットワークの学習を行った。どの官能評価項目においても学習が進行するにつれて、訓練データ、検証データでの官能値の識別精度が増加し、どちらも 100% 近くに達することが分かった。また、どの官能評価項目においても学習が進行するにつれて、訓練データ、検証データでの損失関数の値が小さくなった。つまり、2 つの異なるデータセットでの損失関数の値に差がなく、どちらも 0 に収束していることから、過学習を引き起こさずに正しく学習できたことが確認された。

訓練データを 50 epoch 学習済みの CNN を用いて、テストデータでの官能値の識別結果を表 1 に示す。

表 1 テストデータにおける触覚識別精度の結果

官能評価項目	粗滑	摩擦	乾湿	硬軟	温冷	快不快
識別精度 [%]	96.9	97.8	97.1	97.7	97.1	96.6

テストデータでの官能値の識別結果は、どの官能評価項目においても 96% 以上の識別精度が得られた。テストデータは 50 epoch 学習済みのネットワークにとって未知のデータであるが、高い識別精度が得られたため、本研究で用いた CNN モデルは 6 項目それぞれの触感を 7 段階に識別する上で汎化性能が高いといえる。ただし、今回被験者数が少ないため、同じ被験者に 3 回評価してもらい、そのデータをランダムに学習データ、訓練データ、検証データに分けており、本モデルは今回参加した 11 名の被験者に限られるものであることから、汎用化のためには、別の被験者や触対象のデータをテストデータとして検証する必要がある。

(2) 主成分分析による触感の因子の推定

ヒト及び機械のそれぞれの場合の x, y, z 方向の加速度、およびそれぞれの角速度の 20 種類のパワースペクトルに対して行った主成分分析の 1 例を図 4 に示す。ここでは、累積寄与率が 80% を超えるまでの主成分を用いて主成分にのみ着目した。図 4 は、(a) が指先、(b) が機械のプロープに加速

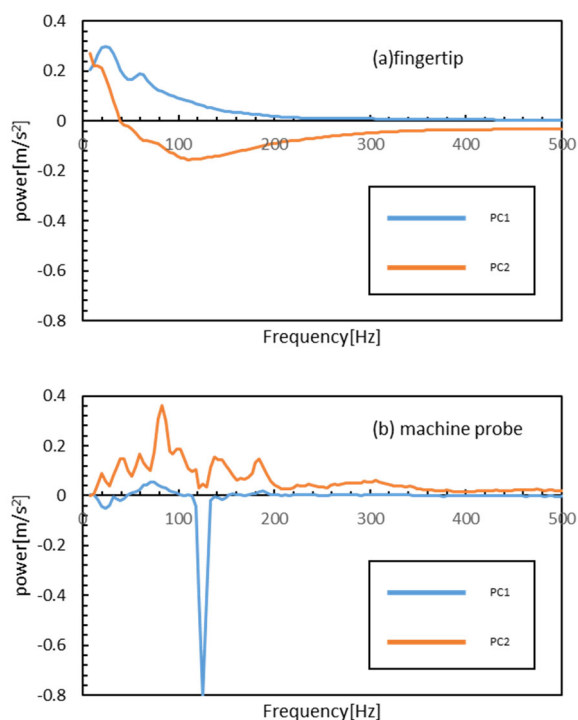


図 4 加速度の各周波数の因子負荷量の一例、(a)ヒトの指先、(b)機械のプロープ

度センサを取り付けた場合の、なぞり動作の加速度データの周波数解析によって得られたパワースペクトルに対する主成分分析の結果である。図4の因子負荷量において、ヒト、機械どちらの場合においても200 Hz以下の周波数帯域で正または負のピークが見られた。これらのピークは、正または負の高い因子負荷量を示しており、その周波数帯域が触覚に強く関わっていることを示している。人の指先、機械のプロープは、ともに100~200 Hzと、100 Hz以下にピークを示した。200 Hz付近で得られたピークはパチニ小体の感度が高い周波数帯域に対応しており、100 Hz以下の周波数帯域で得られるピークはマイスナー小体の感度が高い周波数帯域に対応している可能性があると考えられる。

また、上記で得られた主成分得点を説明変数、官能値を目的変数とした重回帰分析を行い、官能値を推定した結果を図5に示す。ヒト指先の場合と機械の場合の結果を比較した際、ヒトの場合は乾湿以外の項目で0.5を超える決定係数を得ることができたが、機械の結果ではいずれの項目も高い決定係数を得ることができなかった。この要因として、ヒト指先の場合と機械の場合の主成分の因子負荷量を比較した際に、図4に見られるように、機械の場合の方がヒトの指先の場合よりも鋭いピークが見られることが考えられる。これはピークに着目した際に、ヒト指先の場合の方が機械の場合に比べてピークがなだらかであり、その分情報量が多くあると考えられ、ヒト指先の加速度データの方が触感の推定に適していると考えられる。また、乾湿の項目において、高い決定係数は得ることができなかったが、本実験ではサンプルの湿度を変化させずに自然な状態で計測していることが原因の一つであると考えられた。

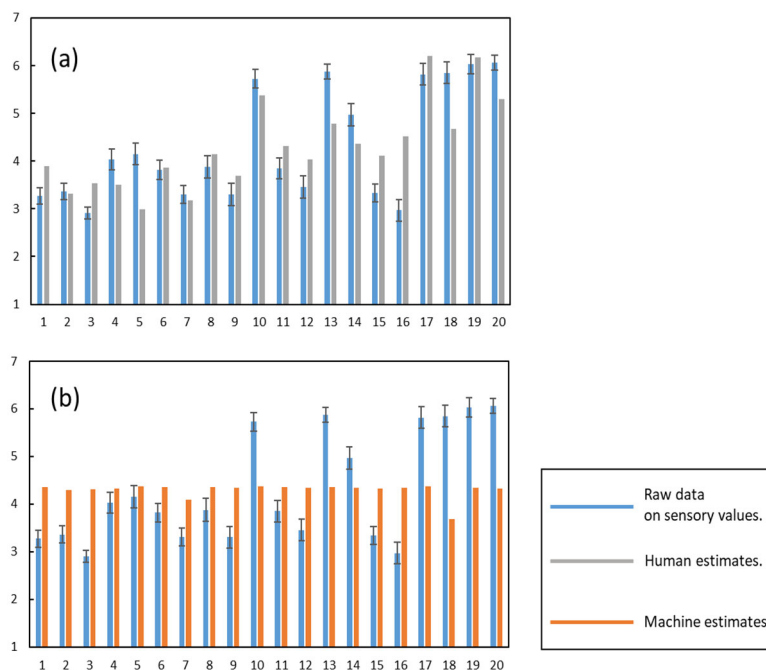


図5 触対象サンプル20種類についての被験者の評価と、(a)ヒトの指先、(b)機械のプロープの加速度の周波数によって推定した官能値の比較の一例

(3) まとめ

本研究では、対象を見ながら触ったときに起こる物理現象の特徴の把握と、その快・不快への寄与を明らかにすることを目的とした。さらに、その結果を用いて、視・聴・触覚に関わる対象の物理特性から、アクティブタッチの快・不快の度合いや基本的な触感を数値として推定するツールを構築し、官能評価と生体計測により妥当性を検証することを目的とした。

まず、加速度センサを被験者の指先に配置して触対象を触ってもらい、そのなぞり動作の加速度の時間変化を短時間フーリエ変換したデータを元に機械学習を行うことで、加速度データのみによって触感の推定ができるかどうかを検討した。その結果、素材と指の相互作用に基づく触動作から、CNNを用いて粗滑、摩擦、乾湿、硬軟、温冷、快不快の6つの官能評価項目を7段階に識別できることが示された。本来、乾湿や温冷は水分量や温度に関係すると考えられ、また快不快の感覚はこれらの条件も含めた総合的な感覚であると考えられていたが、本研究の結果から、これらの官能値が指先の加速度のみから推定可能であることが示された。このことから、水分量や温度、快不快が指先の動きに反映されていることが推察される。

次に、加速度センサから得られたパワースペクトルを用いて主成分分析及び重回帰分析を行うことで、ヒトと機械の触感の推定の可能性について検証した。ヒトの指先、および機械のプロープのなぞり動作のどちらの場合においても、主成分得点と全ての官能値の間に相関が見られた。また、主成分得点を説明変数、官能値を目的変数とした重回帰分析の結果では、ヒトの場合でのみ高い決定係数が得られた。この結果から、機械による加速度データから触感の推定は困難であり、ヒトの加速度データの方が触感の推定に適していることが示唆された。

以上の結果から、視覚のある状態でヒトが対象物をなぞるアクティブタッチにおいて、触覚と聴覚に関係すると考えられる、指先の振動が、主要な触感や、触感の快不快に密接に関わっていることが明らかになり、この振動を解析することで触感を推定できる可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 秋山 庸子	4. 巻 17
2. 論文標題 風合い・肌触りの機器を用いた測定法とその数値化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 COSMETIC STAGE	6. 最初と最後の頁 7-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋山 庸子	4. 巻 Annual60
2. 論文標題 シャンプーの“きしみ”を測るには？ ～触感の物理現象をさぐる～	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 生体医工学	6. 最初と最後の頁 69_2～69_2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11239/jsmbe.Annual60.69_2	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mutsuko TANIGUCHI, Akira HARASHIMA, Tatsuya ISHIHARA, Shimpei USHIO, Yoko AKIYAMA	4. 巻 49
2. 論文標題 Dynamic Temporal sensory Transition during Skin Application of Oligosaccharides: Correlation Analysis between sensation and Physical Properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本レオロジー学会誌	6. 最初と最後の頁 241-246
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1678/rheology.49.241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 10.秋山 庸子	4. 巻 93(2)
2. 論文標題 界面相互作用の観点からとらえた触感	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 色材協会誌	6. 最初と最後の頁 37-41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4011/shikizai.93.37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山口真輝, 秋山庸子, 真鍋勇一郎, 佐藤文信
2. 発表標題 加速度データの主成分分析による触感の推定に関する研究
3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部 若手研究者発表会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山庸子
2. 発表標題 サンプルの“きしみ”を測るには？ ～触感の物理現象をさぐる～
3. 学会等名 第 61 回日本生体医工学会大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田英仁, 秋山庸子, 真鍋勇一郎, 佐藤 文信
2. 発表標題 機械学習を用いた 触感識別法の開発
3. 学会等名 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 真輝, 秋山 庸子, 真鍋 勇一郎, 佐藤 文信
2. 発表標題 触動作解析による触感の定量化に関する研究
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 井上勝雄、中務亜紀、稲葉隆、坂本真樹、田中由浩、佐伯光哉、秋山庸子、神宮英夫、佐藤孝、橋田規子、秋元英郎、長田典子、飛谷謙介、桐谷佳恵、服部守悦、山本義政、福井信行、安岡義彦、川澄未来子、吉田茂、添田喜治、岩宮眞一郎、吉田準史	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)R & D支援センター	5. 総ページ数 290
3. 書名 高級感を表現する要素技術と評価法	

〔産業財産権〕

〔その他〕

生体と材料の相互作用から触感の物理的メカニズムを探る（大阪大学 研究シーズ集 准教授版） http://www.cfi.eng.osaka-u.ac.jp/seeds/seeds_list_2/akiyama_yoko_asso/ 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 量子線生体材料工学領域 福祉工学グループの紹介 http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeqb/seeqb/study/wlf.html
--

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
---------	---------