

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18680

研究課題名（和文）オートエンコーダによる触察時振動データからの触感知覚特徴量の抽出

研究課題名（英文）Feature extraction from vibrotactile data using autoencoder

研究代表者

竹村 研治郎（Takemura, Kenjiro）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：90348821

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：触感センサを用いて触対象サンプルをなぞった際の振動情報を取得し、ディープオートエンコーダを使用して特徴量を抽出した。つぎに、官能評価実験によって被験者が同様のサンプルを触察した際の触感スコアを取得し、取得した特徴量と官能評価スコアを繋ぐ触感推定モデルを構築した。さらに、特徴量抽出法を発展させ、往復運動を含めて速度が変化する触察条件での振動計測を行い、ウェーブレット変換を導入して時間空間および周波数空間を同時に扱った上で畳み込みニューラルネットワークによって特徴量ベクトルを抽出した。7段階SD法による官能評価による平均値と1点以内の誤差で触感スコアを予測できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、機械学習を援用することにより、触感センサから得られた機械的データに適した特徴量の抽出が触感推定に有効であることを示した。これにより、多くの研究では見逃されていた振動データに内在した潜在的な特徴量を顕在化でき、触感研究を変革する可能性を秘めている。すなわち、1990年代から長く研究され、触感研究の根幹を成すにも関わらず、未だに確立されていない定量的触感計測を可能にする意義は大きい。また、社会実装が加速する機械学習の適用範囲拡大の挑戦としても意義深い。すなわち、本研究の成果は画像データに広くて適用される機械学習を触感データへの適用に拡張する可能性を示している。

研究成果の概要（英文）：Vibration information was obtained when a tactile sensor traced on a sample. Then, features were extracted from the obtained vibration data using the deep autoencoder. Next, we obtained tactile scores when a subject touched the same samples in a sensory evaluation experiment with a seven-scale semantic differential method, followed by constructing a tactile estimation model with the acquired features as input and the sensory evaluation scores as output. In addition to this model, feature vectors were extracted from the vibration data by using a convolutional neural network. In this case, we introduced wavelet transformation in order to obtain a scalogram, two-dimensional image, of the vibration data. Note that a convolutional neural network is suitable for extracting features from two-dimensional image. As a result, it is shown that the tactile score can be predicted with an error of less than one point from the average value of sensory evaluation.

研究分野：機械工学

キーワード：触感センシング 機械学習 オートエンコーダ 畳み込みニューラルネットワーク ウェーブレット変換

1. 研究開始当初の背景

我々が外界を認識する上で視覚や聴覚と同様に重要な役割を果たしているのが触覚である。この感覚をターゲットとするハプティクス産業は 2030 年には 400 億ドル市場に成長するとも言われている。このため、モノの触り心地である触感の工学的な計測および呈示方法の確立が求められている。こうした触感レンダリングの第一歩は触感の正確な計測であり、多くの触感センサが開発されてきた。我々の皮膚直下に存在する 4 種類の機械受容器の特性を工学的に解釈すると、各機械受容器は周波数帯を分担して触察時の振動を検出している振動センサである。このため、多くの触感センサが触察時の振動を計測している。これは生理学的な理解からも妥当である。

一方、取得した振動データの利用方法は大きく 2 つある。1 つ目は振動データそのものをヒトの官能評価実験（アンケート）の結果と結びつける方法であり、振動学習を含めたニューラルネットワークを用いる研究も行われている。しかし、膨大な振動データの処理には課題があった。2 つ目は研究代表者が行って来たように、触覚受容器の生理学的特性に基づいて振動データを極端に（4次元に）圧縮する方法である。これは、生理学的知見を導入している反面、触察子であるヒトの指と触感センサの本質的な違いに課題があった。

こうした課題をクリアすることはハプティクス産業の発展に不可欠な課題であり、特に、触感センサで取得したデータを如何に扱うかは重要な研究課題である。すなわち、ヒトが触覚受容器による次元圧縮を通して触察動作から適切な信号を取り出しているように、機械には機械に適した次元圧縮フィルタを構築する全く新たなアプローチを試みることによって、多くの研究では見逃されていた振動データに内在した潜在的な特徴量を顕在化させる可能性がある。また、社会実装が加速する機械学習の適用範囲拡大の挑戦が各分野で進んでおり、画像データに広くて適用される機械学習を触感データへの適用に拡張することにより、視聴覚に続くサイバー空間を介した感覚情報の利用を促進し、機械学習の新たな価値を開拓する必要がある。

2. 研究の目的

我々はモノの触り心地を指先で確かめることが多いが、これは他の部位に比べて指先に機械受容器が多く存在しているためである。このため、多くの触感センサが触察時の振動を計測していることは妥当な戦略である。本研究では、多くの振動センサが存在しているにもかかわらず触感の計測技術が確立していないことに疑問を抱き、振動データの取り扱いを抜本的に見直す必要があると考えた。そこで、本研究は触感センサで計測した振動データから触感の違いを表す潜在的な特徴量を抽出し、ヒトが知覚する触感を精度よく計測する手法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) オートエンコーダによる触察時の振動データからの潜在的触感要因の抽出と官能評価値の推定モデルの構築 (図 1)

指とモノの相対運動で生じる振動刺激から想起される触感は、モノの表面性状だけでは説明できない。このため、プラスチック板を例として触感センサで触察した際の振動データを取得した。つぎに、取得した振動データに対してオートエンコーダを用いた次元圧縮を実施した。一般的には類似サンプルを触察した際の振動データに大きな差はないが、適切な学習が行えれば振動データを中間層のニューロン数に次元圧縮できるはずであり、ここに、異なるサンプルを触察した時の差異が顕在化された特徴量が抽出されると考えた。なお、オートエンコーダへの入力 (=出力) は時間空間の振動データである。

つぎに、オートエンコードで抽出された潜在的触感要因を入力として、サンプルの触感を推定する触感推定モデルを構築した。このために、サンプルを用いた 7 段階 SD 法

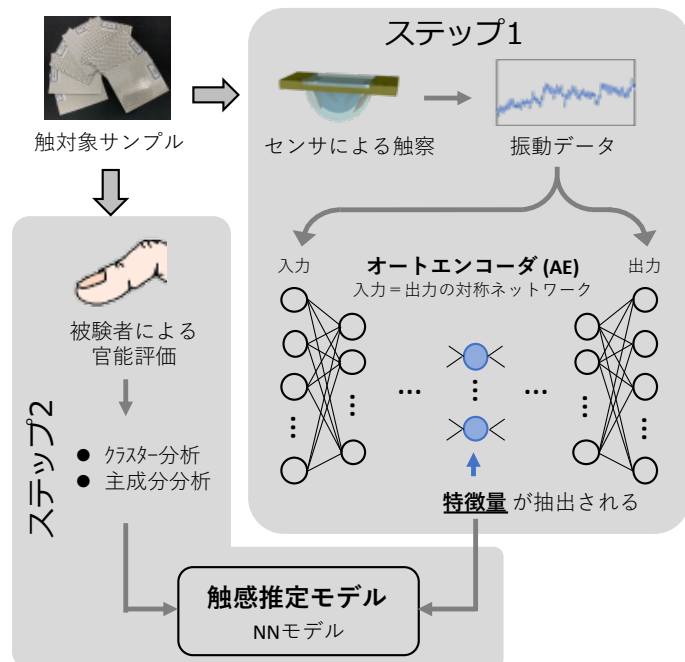


図1 オートエンコーダを用いた官能評価値推定モデルの構築手順
 サンプルの違いを表す振動データ特徴量をオートエンコーダで抽出、
 特徴量で官能評価結果を推定。

による官能評価実験を実施し、被験者が感じる触感をデータ化した。オートエンコーダで抽出した振動データの特徴量（潜在的触感要因）によって、官能評価結果の主成分を説明する触感推定モデルを、3層ニューラルネットワークを用いて構築した。

(2) ウェーブレット変換と畳み込みニューラルネットワークを用いた時系列周波数空間からの特徴量の抽出と官能評価値推定モデルの構築 (図2)

ヒトの触察行動が速度が変化する往復運動であることを考慮して、触感センサによる触察の際にも往復運動を含めて速度が変化する測定条件での計測を行い、ウェーブレット変換を導入して時間空間および周波数空間を同時に扱った上で畳み込みニューラルネットワークによって特徴量ベクトルを抽出した。抽出した特徴量ベクトルを用いて、SD法による官能評価実験で得られた触感スコアを推定する回帰モデルを構築した。

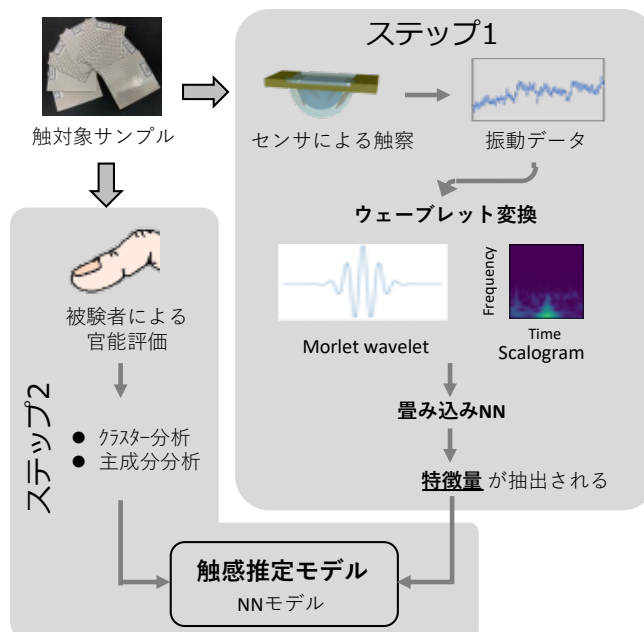


図2 ウェーブレット変換と畳み込みニューラルネットワークを用いた官能評価値推定モデルの構築手順 サンプルの違いを表す振動データ特徴量をウェーブレットとCNNで抽出。特徴量で官能評価結果を推定。

4. 研究成果

(1) オートエンコーダによる触察時の振動データからの潜在的触感要因の抽出と官能評価値の推定モデルの構築

歪みゲージを包含する硬さの異なる2層のシリコーンゴム層によって形成された触感センサを開発し、エンボス加工された7種類のサンプルをなぞった際の振動情報を取得した。つぎに、ディープオートエンコーダを使用してセンサで取得した振動情報から特徴量を抽出した。並行して、官能評価実験によって被験者が同様のサンプルを触察した際の評価語に対する触感スコアを取得し、振動情報から抽出した特徴量と官能評価スコアを繋ぐ触感推定モデルを構築した。振動データから抽出された特徴量を入力とし、官能評価で得られた被験者の触感スコアを出力として、全結合ニューラルネットワークを用いてその関係をモデル化した結果、7サンプル中4サンプルの触感が推定可能であることが明らかとなった。サンプルに対する触感スコアのクラスター分析の結果、推定が成功するかどうかは、準備したサンプル群の触感の特徴の違いに依存することが示唆された。

(2) ウェーブレット変換と畳み込みニューラルネットワークを用いた時系列周波数空間からの特徴量の抽出と官能評価値推定モデルの構築

革、ビニル、木材など15種類のサンプルについて、触感を表す16語に対する官能評価実験を7段階SD法を用いて行い、触感スコアを取得した。触感センサを用いて同サンプル上を往復を伴う6種類の触察動作によってなぞり、振動データを取得した。その後、振動データに連続ウェーブレット変換を施すことによって2次元画像であるスカログラムとし、畳み込みニューラルネットワークを用いて、各画像の特徴を抽出した。また、材質が異なるサンプルを用いたことから、触れた際の温冷感にも差異があるため、各サンプルの最大熱流速を測定した。さらに、力覚の情報としてサンプルをシリコーン触察子でなぞった際の平均動摩擦係数も測定した。この結果、振動データからウェーブレット変換と畳み込みニューラルネットワークを経て抽出した特徴量ベクトル、最大熱流速および平均動摩擦係数を入力として、触感スコアを推定する回帰モデルを構築した。構築した回帰モデルは、モデルの学習に用いていない未知のサンプルに対して、7段階SD法による官能評価による平均値と1点以内の誤差で触感スコアを予測できることを示した。官能評価実験において、被験者の触感スコアの分解能は1点である。このため、構築した触感に関する官能評価値の推定モデルは十分に高い推定精度を有していると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fumiya Ito, Kenjiro Takemura	4. 巻 21
2. 論文標題 A Model for Estimating Tactile Sensation by Machine Learning Based on Vibration Information Obtained while Touching an Object	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 7772
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21237772	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Momoko Sagara, Kenjiro Takemura
2. 発表標題 Texture classification model based on temporal changes in vibration using wavelet transform
3. 学会等名 IEEE SENSORS 2022（国際学会）
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
---------	---------