



トレイグジスタンスの研究 (第 9 1 報)

—振動／力／温度を触原色とした 触感の機械学習手法の提案—

加藤史洋¹⁾, 井上康之¹⁾, 田島優輝¹⁾, 舘暲¹⁾

1) 東京大学 高齢社会総合研究機構 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1,
{fumihiko.kato, y-inoue, tajima, tachi}@tachilab.org)

概要: 触感分類のための触感の録取システムを構築し評価した。本提案は触原色原理に基づいており、力・振動・温度センサーを用いた触感プローブにより、特徴的な触感を持つ複数種類の物体表面を計測し、三触情報を得られる。計測した力と振動の変動波形を周波数解析により画像化した。また試料を加熱して熱伝導の変動の生じやすさを得ることで、表面形状とは別の視点での物体識別の示唆を得た。力と振動と温度の三触独立の触感情報から Neural Network (NN) を用いた特徴抽出や分類をめざす。

キーワード: 触原色, 機械学習, テレイグジスタンス

1. はじめに

近年、トレイグジスタンスのためのバーチャルリアリティ技術の重要性が高まっている。視聴覚に加え触覚などの身体感覚の高品質な伝送・提示が実現すれば、遠隔就労の現実味は増すと考えられる。触覚情報の提示が VR シミュレータの効率よい操作に有効であるとする報告[1,2]があり、遠隔就労システムでも必要と考えられる。

触覚情報の伝送では、物体に触れて得られる触感情報を直接伝送する方法がまず考えられる。触感情報を一定時間で蓄積し連続する触感情報のまとまりとして伝送することで、遠隔ユーザーに連続的な触感の提示ができると考えられる。触覚情報を取得するセンサの種類と特性が、触感を提示するアクチュエータの種類と特性と適切に適合していれば、高品質な触感情報が提示できると考えられる。しかし、普及のためには異種センサ・異種アクチュエータの組み合わせにおいても、高品質に触感情報を提示可能であることが理想であると考えられる。

触覚センサや触覚アクチュエータを構成する触原色の種類や組み合わせの架け橋となる触感情報の中間表現としてのメディアが必要であると考えられる。触覚センサは、触原色原理[3]に基づけば、力・振動・温度の三原触情報を取得する必要がある。物体の表面にセンサが触れて得る触感情報は、三、二、一触センサでは物理量の数や組み合わせが異なるが各々が示す物体は同一である。同

一の触感情報の提示でも、提示するアクチュエータの触数が三、二、一触と違いがある場合にも、ヒトが感じる触感が同じものと同定されることが理想である。

遠隔地へ伝送された触感の提示では、提示してすぐに触感から材質が想像されることもあれば、なかなか思いあたりにくい場合もある。提示された触感から材質を想像することが難しい場合には、似かよった触感を提示可能な材質クラスタから、材質を想像しやすい典型的な触感情報を提示すれば解決できると考えられる。さらに体験者が想像しやすい触感を提示できるように、触感イコライズも考えられる。提示される触感への効果を高めるために材質を示す情報を編集することで実現できると考えられる。あらかじめ多くの材質から得られる触感情報をクラスタに分けて関係性を整理しておくことで実現可能になると考えられる。

本研究では、触覚センシングで得る触感を分類することで一定の触感特徴を有するクラスタを抽出し、クラスタに分類された触感特徴を提示するためのシステムを機械学習手法を用いて実現することをめざす。触感の機械学習には大量の触感情報が必要なため、触感の録取システムを構築する。物体を摺動時の触感の振動成分を、3種の材料について取得し、積層自己符号化器を用いた特徴の抽出と分類をした報告[4]では、分類性能は84[%]程度であった。本研究では、触数を増やしサンプリング周波数を向上

することにより、より多くの物体の識別精度の向上をめざす。

2. 触感の録取システムと分類システム

触感とは、ヒトの体性感覚の一種である触覚より得られた情報から感じる感覚と考えられる。皮膚表面にて触情報を受容する受容体には、マイスナー小体、パチニ小体、メルケル触盤、ルフィニ終末があり、機械的な刺激を触覚として受容する。皮膚の振動検出域の測定のため1～500 [Hz]程度の正弦波振動刺激により振動検出域を測定する実験が行われており、触感情報のセンシングではおおむね1 k[Hz]程度の機械的振動刺激を測定できる必要がある。温覚受容器は40～45 [°C]付近で、冷覚受容器は30 [°C]付近でよく神経発射し、15 [°C]以下では冷痛覚に移行する。おおむね0～50 [°C]の温度範囲での温度センシングが必要であると考えられる。

上記要求をみたす触感の録取システム、分類システムについて述べる。触覚と温度感覚についての触感情報を取得するために、触原色原理に基づき、力・振動・温度を録取するシステムを構築する。力は触覚の直流成分、振動は交流成分である。力・加速度・温度の3センサを用いて触感を取得する触感プローブ(図1)を構築する。プローブはヒトの指先を模しており、試料の表面を摺動やタップ操作をすることで触感を取得することを想定する。

2.1 三触センサを内蔵する触感プローブ

力の取得にはピエゾ抵抗型3軸力覚センサ μ DynPick MAF-3 (1 k [Hz], ワコーテック社製)を用いて鉛直方向の力と水平2軸のモーメントの計3軸の力を取得する。加速度の取得では、LIS3DH (1.6 k[Hz], 3軸, ST Microelectronics 社製)と、非接触温度センサには赤外線サーモパイル TMP-007 (Texas Instruments 社製)をそれぞれFPC 接続コネクタで、接触温度の取得にはサーミスタ 56A1002-C3 (Alpha Technics 社製)をどちらも組込みコントローラ Arduino Due (32bit, Arm Cortex-M3 搭載, 84M[Hz])へ接続する。組込みコントローラや力センサからはUSBにてPCにシリアル通信で接続し触感センシング情報を記録し時系列の変動を保存する。

触感プローブの構成を図1(a)に示す。触感プローブ形状は3DCADで設計し、立体印刷器により三次元造形(図1(b))した。触感プローブの指腹部は振動しやすくするために厚み1 [mm]の中空とし、柔軟性があるが硬い素材 (FLX9995)を用いて造形した。遠隔作業のためにロボットの指先などに搭載する想定では、軟らかさによる物体のつかみやすさは大事だが軟らかすぎると指腹部では取得できる振動や力は鈍ってしまうためである。力センサの基部(図1(a))は硬いプラスチック (ABS樹脂)で造形する。力取得のために、基部は硬いほうが良いと考えられるためである。力センサのアームは基部とは反対側にあり、指腹チューブ(図1(a))の背面・外側に触れている。力センサは図1内の鉛直方向の力と指腹チューブ背面での

2軸のモーメントを計測可能である。指腹部が物体を押さえつける力をセンサまで伝達しやすくするために、指腹部から支柱(図1(a))を力センサのアーム部までのばした。また、振動が生じる指腹部の腹側の物体との接触部位から近いほうが、振動をより測定しやすいためと考えられるため、加速度センサは指腹チューブの腹側内部に配置(図1(b):加速度センサが透けて見える)した。



図1: 触感プローブの構成 (a) と実製作物 (b)

接触温度センサは指腹チューブの腹側の表面・外側に、非接触温度センサは指腹チューブの腹側に開けた計測用の穴から、被接触対象の物質表面の温度を計測する向きに取り付ける(図1(a))。接触温度センサには、計測部位の体積が小さく反応性が良いサーミスタ (56A1002-C3, Alpha Technics 社)を用いる。非接触温度センサはセンサ面を頂点としてコーン形状の底面領域の温度を測定可能であり、指が物体へ接触直前から温度を計測可能であるが、被測定物の熱放射率や環境の影響を受けやすく安定して精度良く温度を計測することは難しい。そのため主としてサーミスタを温度測定に用いる。

ヒトが物体の材質を識別するには、接触時に指のごく表面の温度の変動を取得していると考えられる。温度軸での物体の識別のためには、触感プローブがヒトと同様に体温を持てば、主に室温となっている物体との温度差により熱の授受が生じることで、物体の温度変動の特性を計測しやすくなると思われる。指腹チューブの腹側表面には、指腹部の温度保持のためにペルチェ素子を配置(図1(a),(b))する。接触物体の温度変動から材質を識別することをめざす。

2.2 触感の録取システム

触感プローブを用いて、物体の表面材質のテクスチャを採取する録取システムを構築(図2)した。録取システムは、直動シリンダとサーボモータとを結合して、PCから動作を指令する。直動シリンダである高精度ボールねじ SG2605-A300P-A3CS-NN-PSR (黒田精工社製)とサーボモータ MSMF5AZL1A2 (アンプ共にパナソニック社製)とをカップリング SCIW-19-5-8 (ミスミ社製)で結合し、サーボアンプ MADLT01SF への指令値をPCから出力することで動作させる。録取対象である触感を取得する試料をシリンダのワークに取り付けて往復動作させる。触感プローブは直動シリンダでは動かさない。摺動による加速度をのせないためである。シリンダ上方には両持ちの橋柱を配置し、触感プローブをはめ込むが上下に可動(図2青字)と

する。触感プローブには、0.1[kg]の分銅を装着し、0.1[N]の力で押さえつける。シリンダ位置はモータ内臓の光学式エンコーダにより常時計測される。報告[4]で用いられている録取システムでは、往復移動により振動が励起されてしまっていたが、本録取システムではボールねじを用いたシリンダにより低減できると考えられる。

2.3 触感情報の画像化

録取システムでは、触感情報として力や加速度の波形を得る。時間方向で区切った単位時間内で高速フーリエ変換し、力や振動の周波数の強度が経時的に変動する画像を生成する。画像には含まれる周波数の強度分布が生成される。触感プローブや接する試料の温度変動から熱伝導率などを画像化する。力・振動・温度を1つの画像にまとめて、試料の触感を示す画像とする。

2.4 触感の分類システム

画像化した触感情報の分類にはコンピュータビジョン分野で検討がすすめられているニューラルネットワーク(NN)を用いた機械学習手法を用いる。3原触のうちの振動について、2層からなる積層自己符号化器からなるNNによって特徴量の抽出をし、触感の分類をした報告[4]があり、3種の材質(発泡ウレタン、エイの皮、アルミ板)に対する摺動での振動の分類性能は82[%]であった。本研究では、振動・力・温度の三原触から得た画像の分類を試みる。力と振動については報告[4]と同様に反応する周波数の分布や近隣の周波数との関連について画像中から特徴の抽出をめざす。温度については温度の変動の生じやすさ、熱伝導のしやすさなど熱物理的な物性の特徴の抽出をめざす。三触の情報を用いることで触感分類のための手がかりが増えることが期待できる。

3. 触感情報の取得実験

触感プローブと、録取システムを用いて複数種類の材料表面の摺動とタップ操作から三触情報を取得した。力と加速度波形の周波数解析の結果を画像化した。

触感情報のサンプリング周波数は、力センサが1k[Hz]、加速度センサは1.6k[Hz]である。ストローク距離20[cm]で反復動作させる試料の上に触感プローブを0.1[N]で押さえつけて摺動での触感情報を取得した。録取した力と加速度の波形と周波数解析した結果を図3と図4に示す。試料にはゴツゴツだが摩擦の小さいエイの皮、スベスベな畳の表生地、ガサガサな麻袋生地、カサカサなMDF板を用いた。本システムで録取した力に含まれる周波数成分は主に50[Hz]以下の低周波に集中していることが示されている。加速度に含まれる周波数成分は特に摺動方向では800[Hz]にせまる振動も含まれる。特定の周波数に集中することで帯状の特徴も確認できる。力と加速度では取得可能な周波数成分が異なるため、得られる周波数成分の組み合わせにより素材の識別の手がかりが独立に得られると考えられる。

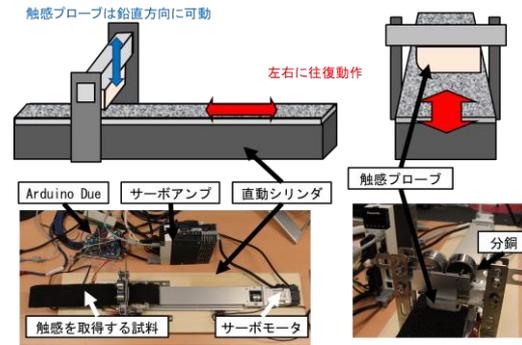
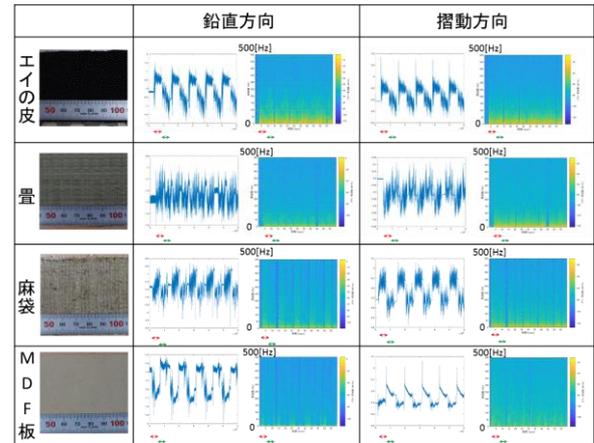


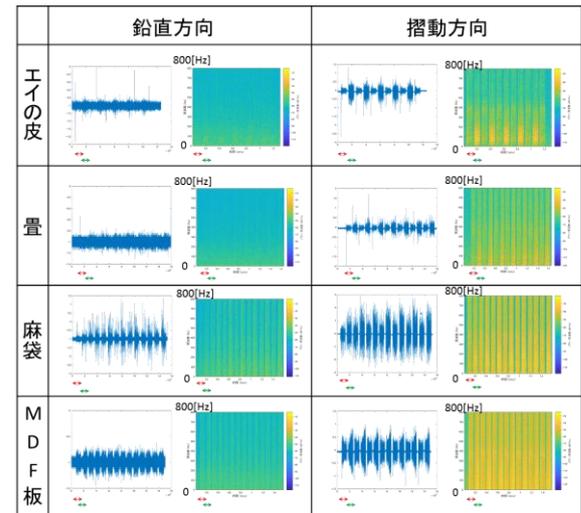
図2： 触感プローブを用いた表面材質の録取システム



図中の ← : 往路 復路 での摺動で得た波形と周波数解析画像

図3： 力の波形と周波数解析後の画像

エイの皮、畳、麻袋、MDF板を往復させて摺動した時の力の鉛直方向や摺動方向での波形(左)と周波数解析(～500[Hz])結果(右)



図中の ← : 往路 復路 での摺動で得た波形と周波数解析画像

図4： 加速度の波形と周波数解析後の画像

エイの皮、畳、麻袋、MDF板を往復で摺動した時の加速度の鉛直方向や摺動方向での波形(左)と周波数解析(～800[Hz])結果(右)

触感プローブをタップ操作により試料表面に押し付けて加熱し、温度変化を記録した。試料にはアルミ板とエイの皮を用いた。触感プローブ内蔵のペルチェ素子を人肌の上限 $42\text{[}^\circ\text{C]}$ となるよう 5[V] , 0.5[A] で制御し、指腹部サーミスタ(ペルチェ素子から指腹部先端へ 5[mm] に位置する)の温度が室温より高い $28.9\text{[}^\circ\text{C]}$ となつてから、タップ操作により試料へ 5 分間接触させた。指腹部サーミスタと、ペルチェ素子の高温側に接着したサーミスタでの温度変化を記録した。図 5 (a) に温度変化の様子を示す。アルミ試料では、指腹部が試料に接触後に室温に向けて $1.5\text{[}^\circ\text{C]}$ ほど温度低下後に、温度が上昇しているのに対し、エイの皮では指腹部温度がほぼ単調増加している。アルミは熱伝導率がエイの皮よりも高いために、指腹部の温度が周囲の材料に拡散して温度が低下したが、高温のペルチェ素子からの熱伝導により温度が上昇していると考えられる。一方で、エイの皮は熱伝導率が小さく指腹部周囲への熱伝導は遅いため温度低下の幅が小さかったと考えられる。以上より、人肌に加熱した触感プローブを物体に触れさせることで、材質の熱伝導率の大きさの傾向をつかむことのできたことから物質の性質の違いが見極められると考えられる。温度の変動は、試料表面の凹凸ではない物質固有の性質であるため、触感の分類に温度を用いることで材質を見極める手がかりとして力や振動とは独立に利用できると考えられる。

図 5 (b) に三触の触感を 1 つの画像にまとめる案を示す。各試料の力・加速度・温度変動を結合した画像である。今後、試料の触感の性質を示す画像を用いて特徴の抽出や分類をすすめる。

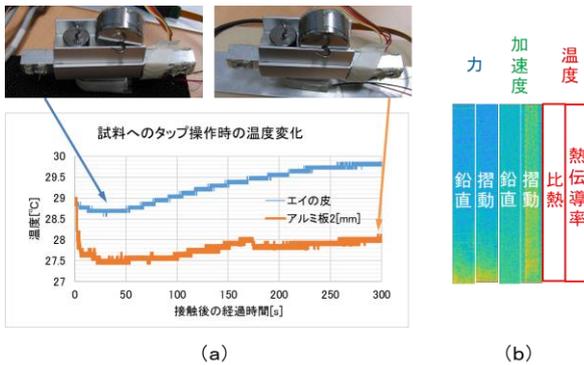


図 5 : 試料へのタップ操作時の温度変化 (左) と三触で構成する学習画像案 (右)

4. まとめ

三触の触感情報を取得する触感プローブと録取システムを構築した。力/加速度のサンプリング速度は $1\text{ k} / 1.6\text{ k [Hz]}$ と皮膚の受容体が知覚するに十分に高速である。摺動時の力と加速度やタップ時の温度の変動は独立して物体の特徴を示す特徴であることが示唆された。今後、実験で得られた三触の触感情報を用いて多様な触感の分類手法を確立し、レイグジスタンス環境で高品質な触覚提示の実現をめざす。

謝辞 本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (ACCEL) 「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] B. Frohlich, H. Tramberend, A. Beers, M. Agrawala and D. Baraff. : Physically-based manipulation on the Responsive Workbench, Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048), New Brunswick, NJ, 2000, pp. 5-11.
- [2] 加藤史洋, 小野原覚, 三武裕玄, 長谷川晶一: 加熱調理の VR での再現のためのリアルタイム伝熱シミュレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 163-172, 2016.
- [3] S. Tachi, K. Minamizawa, M. Furukawa, and C. L. Fernando.: Haptic media construction and utilization of human-harmonized "tangible" information environment. In 2013 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp 145-150, 2013.
- [4] Fumihiro Kato, Charith Lasantha Fernando, Yasuyuki Inoue, Susumu Tachi : Classification Method of Tactile Feeling using Stacked Autoencoder Based on Haptic Primary Colors, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2017, Los Angeles, California, pp.391-392, 2017