

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 触覚探索運動に含まれる触り心地情報に関する研究                                                                                                                                                                     |
| Title(English)    |                                                                                                                                                                                             |
| 著者(和文)            | 横坂拓巳                                                                                                                                                                                        |
| Author(English)   | Takumi Yokosaka                                                                                                                                                                             |
| 出典(和文)            | 学位:博士(学術),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第11007号,<br>授与年月日:2018年9月20日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:渡邊 淳司,金子 寛彦,小池 康晴,長谷川 晶一,吉村 奈津江                                                                   |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Academic),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第11007号,<br>Conferred date:2018/9/20,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                        |
| Type(English)     | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                             |

博士論文

触覚探索運動に含まれる  
触り心地情報に関する研究

東京工業大学 大学院総合理工学研究科  
物理情報システム専攻

横坂 拓巳

## 概要

我々人間は日常生活において、手や指などを能動的に動かすことによって身の周りのものの豊かな触り心地を得ることができ、このような触り心地の知覚を通して、外界に対して適切に働きかけたり、触れた対象の価値判断を行っている。このような触り心地を、物体に触れている観察者に直接回答させるのではなく、外部から推定できるようになれば、効率的にバイアスの小さいデータを大量に収集できるため、科学的にも工学的にも大きな貢献が期待される。対象に触れている人の感じる触り心地を推定する方法として、触れた対象の物性計測や、皮膚接触面における微細振動や変形の計測、触覚受容器の応答計測、脳活動の計測が考えられるが、いずれも計測にコストや大きな手間がかかり、行動制限も大きい。

そこで、本研究では、触り心地を得るときに行う手などの能動的な身体運動、すなわち触覚探索運動を触り心地の情報源として利用することを提案する。これまでの研究でも、粗さや硬さなどの判断したい触り心地に応じて触覚探索運動が変化することが明らかにされており、触覚探索運動を触り心地の情報源として用いることができることが示唆される。しかしながら、これまでの触覚研究の多くは、静止状態の腕や手、指に触覚刺激を提示したり、実験参加者に単純運動を行うよう教示したりと、手の動きを統制すべきノイズとして扱ってきた。そのため、そもそもどのような触覚探索運動が、どのような状況下で、どのような触り心地の情報を持っているのかについてほとんどわかっていないのが現状である。

また、行為者の感じる触り心地を推定だけでなく、外部観察者の推定についても取り上げる。前者は触覚探索運動の行為者が実際に物体に触れたときに、どのような触り心地を感じたのかを推定することを目的とする。一方、後者は、外部の観察者が、実際に物体に触れるのではなく、行為者の触覚探索運動を見ることによって触れられている対象に関する情報や行為者の触り心地知覚に関する情報をどれだけ得られるのかを調べることを目的とする。歩行などの全身運動の視覚観察による運動意図や個性の推定能力についてはこれまでも調べられてきたが、行為者の手の動きの視覚観察による触れた対象の推定能力を調べた先行研究はほとんど存在しない。

まず、行為者の知覚する触り心地と触覚探索運動の関係について、多様な触覚刺激に触れているときの実験参加者の触覚探索運動を計測し、得られた触覚探索運動の特徴量が、実験参加者による触質感の評価値に関する情報をどのくらい持っているのかを多変量解析を用いて調べた。その結果、手の速度や加速度、押付力、更には目の動きのような触覚探索運動の特徴量によって、粗さや硬さ、好ましきなどの触り心地評価値の 40-80% を説明できることが明らかになった。加えて、触覚刺激や判断したい触り心地、実験設定、パーソナリティといった要因が、触覚探索運動に含まれる触り心地の情報量に影響する可能性も示した。

外部観察者の知覚する触り心地と触覚探索運動の関係については、行為者が触覚刺激に触れているときの手の動きを光点運動として異なる実験参加者に視覚提示し、その手がどのような触り心地の刺激を

触れているかを推定させることで、外部観察者がどのような運動特徴を元に触り心地情報を見出しているのかを検討した。その結果、行為者がどのようなものに触れていたかを高い成績で推定することはできなかったが、外部観察者間での触り心地評価値はかなり一貫していることがわかった。このことは、必ずしも行為者と同じ触り心地を推定するわけではないが、外部観察者間では共通した触覚探索運動の特徴量を用いて触り心地を評価していることを示唆する。また、他者の手の動きのうち手の速度のような運動特徴量を変調させた映像を観察させると触り心地推定値が変化することを示した。更に、行為者にそれぞれの触覚素材に適した触り方を演じてもらい、強調もしくは誇張された手の動きを解析することで、視覚推定に有用な特徴量を抽出する試みも行った。

これらの結果から、触覚探索運動が触り心地の情報を持つ原因として、触覚刺激の物理特性による影響や行為者の触覚探索戦略による影響があることを整理した。また、本研究の知見を元に、触り心地情報と触覚探索運動の関係に影響を与えうる要因を整理した上で、触覚探索運動による触り心地推定技術実装の設計指針をまとめ、科学、工学、産業へ知見を共有するための枠組みについて考察した。

以上を要するに、本論文では、より日常に近い環境の中で起きている人間の触知覚に着目した研究を行い、その結果、日常で見られるような様々な物体との動的触覚探索という状況においては、これまでノイズと捉えられることが多かった触覚探索運動が、実は行為者や外部観察者の感じる触り心地の情報源として利用できることを示した。本論文は、従来の要素還元的研究における制限された状況で触知覚の構成要素を理解する視点ではなく、人間を取り巻く環境との結びつきの中で触り心地を理解するという全体論的な視点から触覚探索運動の価値を見出したものであり、触覚研究における新たな視点を与えるものと考えられる。

# 目次

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論                      | 1  |
| 1.1   | 本論文の背景                  | 1  |
| 1.1.1 | 触り心地の知覚とそのデコーディング       | 1  |
| 1.1.2 | 現状の触り心地デコーディングの限界       | 2  |
| 1.1.3 | 触り心地の情報源としての触覚探索運動      | 3  |
| 1.1.4 | 本論文の研究姿勢                | 4  |
| 1.2   | 本論文の目的と意義               | 5  |
| 1.3   | 本論文の構成                  | 6  |
| 第 2 章 | 触覚探索運動に含まれる行為者の触り心地情報   | 8  |
| 2.1   | 触覚属性評価                  | 8  |
| 2.1.1 | 実験                      | 10 |
| 2.1.2 | 結果：触覚属性の評価              | 13 |
| 2.1.3 | 結果：運動特徴量のクラスタ分析         | 14 |
| 2.1.4 | 結果：全運動クラスタによる触覚属性評価値の説明 | 15 |
| 2.1.5 | 結果：各運動クラスタと触覚属性評価値の間の相関 | 16 |
| 2.1.6 | 結果：眼球運動の寄与              | 18 |
| 2.1.7 | 結果：課題と触覚刺激による触覚探索運動への影響 | 21 |
| 2.1.8 | 考察                      | 23 |
| 2.1.9 | 本実験のまとめ                 | 25 |
| 2.2   | 価値評価                    | 27 |
| 2.2.1 | 実験                      | 28 |
| 2.2.2 | 結果：触り方が好ましさを評価に与える影響    | 30 |
| 2.2.3 | 結果：手の動きの特徴量と好ましさを評価の関係  | 30 |
| 2.2.4 | 結果：好ましさを評価を予測するモデル      | 31 |
| 2.2.5 | 結果：運動特徴量の時間推移           | 31 |
| 2.2.6 | 結果：刺激による説明力             | 34 |
| 2.2.7 | 考察                      | 36 |
| 2.2.8 | 本実験のまとめ                 | 36 |
| 2.3   | 価値評価の時間ダイナミクス           | 37 |
| 2.3.1 | 解析方法                    | 37 |

|        |                                                                     |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.2  | 結果：特徴量と好ましき評価の相関 . . . . .                                          | 39 |
| 2.3.3  | 結果：特徴量の分類 . . . . .                                                 | 43 |
| 2.3.4  | 結果：特徴量間の類似性 . . . . .                                               | 44 |
| 2.3.5  | 結果：手が動かない時間を特徴づけるパラメタ . . . . .                                     | 46 |
| 2.3.6  | 結果：TREND と結びついた手の動き . . . . .                                       | 48 |
| 2.3.7  | 考察 . . . . .                                                        | 49 |
| 2.3.8  | 本解析のまとめ . . . . .                                                   | 50 |
| 2.4    | 触覚意思決定行動 . . . . .                                                  | 51 |
| 2.4.1  | 実験 . . . . .                                                        | 52 |
| 2.4.2  | 結果 . . . . .                                                        | 55 |
| 2.4.3  | 考察 . . . . .                                                        | 58 |
| 2.4.4  | 本実験のまとめ . . . . .                                                   | 59 |
| 2.5    | 個人差と触覚パーソナリティ . . . . .                                             | 60 |
| 2.5.1  | 実験 . . . . .                                                        | 60 |
| 2.5.2  | 実験手続き . . . . .                                                     | 61 |
| 2.5.3  | 結果 . . . . .                                                        | 62 |
| 2.5.4  | 考察 . . . . .                                                        | 66 |
| 2.5.5  | 本実験のまとめ . . . . .                                                   | 69 |
| 2.6    | 本章のまとめ . . . . .                                                    | 70 |
| 第 3 章  | 触覚探索運動に含まれる外部観察者の触り心地情報                                             | 71 |
| 3.1    | 外部観察者による触り心地の推定能力 . . . . .                                         | 71 |
| 3.1.1  | 実験：行為者セッション . . . . .                                               | 73 |
| 3.1.2  | 実験：外部観察者セッション . . . . .                                             | 74 |
| 3.1.3  | データ解析 . . . . .                                                     | 75 |
| 3.1.4  | 結果：行為者と外部観察者の触り心地評価の相関 [Po, Pt] . . . . .                           | 76 |
| 3.1.5  | 結果：外部観察者間での触り心地評価の類似度 [Po, Po] と行為者間での触り心地評価の類似度 [Pt, Pt] . . . . . | 77 |
| 3.1.6  | 結果：行為者の運動特徴量による行為者と外部観察者それぞれの触り心地評価の説明 [Po, M], [Pt, M] . . . . .   | 79 |
| 3.1.7  | 結果：行為者のそれぞれの運動特徴量と触り心地評価の間の相関 . . . . .                             | 81 |
| 3.1.8  | 結果：外部観察者の知覚、行為者の知覚、手の動きの間の関係 . . . . .                              | 84 |
| 3.1.9  | 外部観察者による触覚刺激の推定能力 . . . . .                                         | 84 |
| 3.1.10 | 考察 . . . . .                                                        | 88 |
| 3.1.11 | 本実験のまとめ . . . . .                                                   | 91 |
| 3.2    | 動画変調による外部観察者の戦略の推定 . . . . .                                        | 92 |
| 3.2.1  | 実験 . . . . .                                                        | 92 |
| 3.2.2  | 結果 . . . . .                                                        | 93 |
| 3.2.3  | 考察 . . . . .                                                        | 94 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 3.2.4 | 本実験のまとめ                     | 96  |
| 3.3   | 触り心地伝達実験                    | 97  |
| 3.3.1 | 実験：行為者セッション                 | 97  |
| 3.3.2 | 実験：外部観察者セッション               | 98  |
| 3.3.3 | 結果                          | 99  |
| 3.3.4 | 考察                          | 100 |
| 3.3.5 | 本実験のまとめ                     | 103 |
| 3.4   | 本章のまとめ                      | 104 |
| 第4章   | 総合考察                        | 105 |
| 4.1   | 触覚探索運動と触り心地知覚の体系的関係         | 105 |
| 4.1.1 | 触覚探索運動の分類と、それらが持つ行為者の触り心地情報 | 105 |
| 4.1.2 | 触覚探索運動と行為者の触り心地の関係に影響する諸要因  | 107 |
| 4.1.3 | 触覚探索運動と行為者の触り心地が相関を持つ原因     | 110 |
| 4.1.4 | 行為者と外部観察者の違い                | 112 |
| 4.2   | 触覚探索運動による触り心地デコーディングに向けて    | 114 |
| 4.2.1 | 触覚探索運動計測                    | 114 |
| 4.2.2 | 触覚探索運動解析                    | 115 |
| 4.2.3 | 触り心地推定                      | 115 |
| 4.2.4 | 行為者の触り心地デコーディングの限界          | 115 |
| 4.2.5 | 外部観察者の触り心地デコーディングの限界        | 116 |
| 4.2.6 | デコーディングの応用方法                | 116 |
| 4.3   | 学際的貢献：知見の共有に向けて             | 118 |
| 4.3.1 | 本研究の知見を様々な分野に適用する           | 118 |
| 4.3.2 | 触覚探索運動データベース                | 118 |
| 4.3.3 | 個人情報としての触覚探索運動              | 118 |
| 4.4   | 今後の課題・展望                    | 120 |
| 4.4.1 | 行為者の感じる触り心地                 | 120 |
| 4.4.2 | 外部観察者の感じる触り心地               | 120 |
| 第5章   | 結論                          | 122 |
|       | 謝辞                          | 124 |
|       | 参考文献                        | 125 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 本論文の背景

#### 1.1.1 触り心地の知覚とそのデコーディング

我々は能動的に手や腕、指を動かすことで、身の回りのものの豊かな触り心地を判断することができる。ものに触れることで得られる触り心地は多様であり、触れた対象の摩擦や弾性、粘性のような物理特性に関する情報や、その対象がどのような材質からできているかに関する情報、更には、その対象が自分にとってどのような意味をもつかという感性や価値に関する情報まで得ることができる。そして得られた触り心地の情報を利用することで、外界にうまく働きかけたり、自身にとって価値のあるものを選び取ったりすることができる。例えば、触れたコップの表面の摩擦の大きさを推定することで、コップを落とさないようにどのくらいの力で掴んで持ち上げれば良いかを判断したり、触れた衣服の表面の心地よさを推定することで、着用したときに最も快適な服を選び購入したりというように、我々は生きていく上で触り心地の知覚に大きく恩恵を受けている。

このような重要性から、触り心地の知覚や認知は研究の対象としても広く扱われている。これまでの研究のアプローチ方法としては、大きくサイエンスアプローチとエンジニアリングアプローチに分けられる。サイエンスアプローチでは、触覚刺激要素や皮膚面の物理変化、触覚受容器の活動や脳活動との関係から人間がどのように触り心地の知覚や認知を作り出すのかについて調べる。一方で、エンジニアリングアプローチでは、振動や摩擦、圧、電気などの刺激をどのように設計・提示することで特定の触り心地を実現することができるかを調べる。これら両方のアプローチにおいて、人間が感じた触り心地は、主に直接人間に回答させることで評価される。サイエンスアプローチであれば、触覚刺激が変わったときに回答された触り心地評価がどのように変わるかを調べたり、触り心地評価と関係する触覚受容器の応答を調べたりするように、人間の主観的な触り心地を構成する要因を探ろうとする。一方で、エンジニアリングアプローチであれば、触覚刺激提示装置によって引き起こされた触り心地の知覚を評価させることで、どの程度実際の触り心地の感覚を再現できているのかを評価する。ただし、人間に触り心地を回答させる場合には、実験者の教示の仕方や実験参加者の回答方法など実験環境の僅かな違いが回答される触り心地にバイアスをかけてしまう可能性がある。また、試行数が多くなればなるほど実験参加者の負担も大きくなる。

本論文はこのような人間の感じる主観的な触り心地を人間に回答させるのではなく、外部から推定するためにどのようにしたらよいかを考える。視覚においては、人間の主観的な経験や心的状態を外部

から推定しようとするデコーディング技術に関する研究が注目を集めているが [1, 2, 3]、触覚におけるデコーディング技術はまだ確立されていない。人間の感じる主観的な触り心地をデコードする技術を確認できれば、実験者の教示などに起因する実験参加者の回答バイアスを弱めることができ、さらに実験参加者の負担も減るため、サイエンスとエンジニアの両方の研究を大きく促進させることが期待される。また、研究を促進するだけでなく、日常生活における触り心地の知覚を継続的にトラッキングすることによって、実験室の外での人間の触知覚メカニズムを解明することや、周囲の触覚環境をその人にとって最適なものになるように自動的に調整することなど、これまでに実現できなかった革新的研究にも繋がることが期待される。

### 1.1.2 現状の触り心地デコーディングの限界

触り心地のデコーディング技術を考える上で重要なことは、そもそも計測対象としてどのような信号源を採用することで触り心地の情報を得られるのかを明らかにすることである。このような触り心地の情報源について考えるために、まず触覚処理プロセスについて簡単に触れておく (図 1.1.1)。一般的な触覚処理のプロセスでは、まず外界の物理刺激と身体の皮膚面が接触することで、皮膚の接触面に振動や変形が生じる。そして皮膚の内側に多数存在する触覚受容器が皮膚振動や皮膚変形を検出し、脊髄から脳へと神経信号を伝えることで、最終的な触り心地の知覚が生じる。この触覚処理プロセスから、大別して 4 種類の触り心地情報源が期待される。1 つ目は弾性や粘性、摩擦、熱伝導率といった触れた物体の持つ物理特性である。例えば、触覚刺激の弾性が柔らかさ知覚と相関があることや [4, 5]、表面の摩擦係数が粗さ知覚と相関があること [6, 7, 8]、熱拡散率が冷たさの知覚と相関があること [5] などが知られている。そこで触れている対象の物理特性を計測すれば、触れている人間がどのような触り心地を感じているのかを推定できる可能性がある [9]。ただし、触れられる可能性がある全ての物体の、触り心地と相関しうる全ての物理特性を計測するには多大な労力を必要とする。また、刺激表面をなでるときの押し込む力の強さを変えるとその刺激に対する粗さ評価値が変わることが知られているように [10, 11]、触り方が変わったときには物理特性が計測できたとしても触り心地知覚を正確に推定できない可能性がある。更に、現状の物性計測装置は限定された材質や形状に限られており、我々が日常で遭遇するような様々な形状を持った素材表面の多くに適用できる汎用性のある計測手法は未だ確立されていない。2 つ目の触り心地情報源は、皮膚接触面における変形や振動である。皮膚振動に関しては、爪上の皮膚振動や手全体の振動を計測する研究は非常に多く、触覚刺激のカテゴリを推定する試みもなされている [12, 13, 14]。また、皮膚変形もなめらかかつ透明なプレートの上では計測されている [15, 16, 17, 18]。しかし、多様な形状・素材の触覚刺激に対する皮膚接触面での変形と振動の計測はまだ難しく、どの研究も限定的な状況下でのみ行われているのが実情である。3 つ目の触り心地情報源は、触覚受容器の活動である。これまで皮膚振動や皮膚変形に対する触覚受容器の応答が明らかにされており [19]、触覚受容器の活動を計測することによって触り心地が予測できることが期待されるが、触覚受容器の活動計測には皮膚に電極を挿入せねばならず、行動が制限される上に、心理的抵抗も大きい。最後の触り心地情報源は、脳活動である。これまで、粗さや好ましさなどの触り心地を感じているときの脳部位や脳波を測定する試みが行われており [20, 21, 22, 23, 24]、脳活動計測によって触り心地の予測ができることが期待される。しかしこちらも同様に fMRI や脳波計測、脳血流計測などの行動制限が大きい装置を用いなければならない。

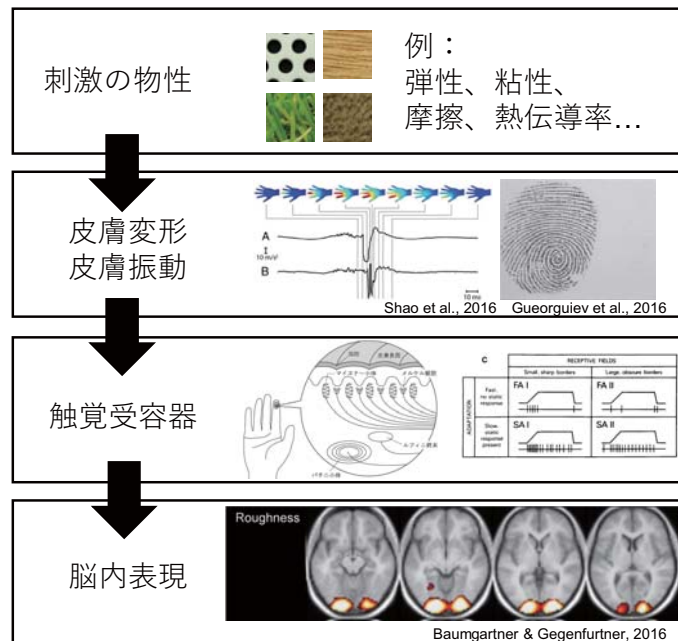


図 1.1.1 一般的な触覚処理の流れ

### 1.1.3 触り心地の情報源としての触覚探索運動

本研究では、ものに触れるときの能動的な手などの身体運動、すなわち触覚探索運動 [25] を触り心地の情報源として用いることを提案する。これまでの先行研究でも、触覚刺激やどのような触り心地を判断するかに応じて、触覚探索運動が変化することが示されてきた [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]。これらの研究は、触覚探索運動が、触れた対象に対して知覚された触り心地の情報を持っていることを示唆するものである。このような能動的な触覚探索運動は、到達運動や物体操作のための運動に比べて、バリエーションが大きく、また可動部の自由度も大きいため、研究対象として扱うのが困難であった。そのため、これまでの多くの触覚の研究では、触覚探索運動はノイズとしてみなされることが多く、静止時の手に触覚刺激を提示したり、単純運動を行わせたりというようにコントロールされてきた。このような理由により、そもそも触覚探索運動が触り心地についてどの程度の情報を持っているのかについてはほとんどわかっていない。本研究では、触覚探索運動をノイズとしてみなすのではなく、触り心地に関する情報源としての可能性を検証することを目的とする。これまでの視覚のデコーディング研究の場合でも、眼球探索運動の計測によって実験参加者がどのような情景を観察しているのかを推定できることが調べられており [36, 37]、アナロジーとして触覚探索でも同様のことができる可能性がある。もし、触覚探索運動から触り心地を推定できるのであれば、触れる可能性のある触覚刺激全てを計測する必要はなく、腕や手などの身体運動さえ計測すればよい。近年のバーチャルリアリティ技術の発展に伴い、手の運動や眼球運動を非接触で計測できる装置が 1 万円以下で利用できるようになっており\*1、簡易かつ安価に、小さい運動制限で触覚探索運動を計測できる強みもある。

ここで、触り心地の知覚には行為者の感じる触り心地と、外部観察者の感じる触り心地の 2 種類存在

\*1 例えば 2018 年 6 月 20 日時点で Leap motion が\$79.99、Tobii eyeX が\$99 で利用可能である。

することを整理する。図 1.1.2 に示すように、行為者とは触覚探索運動を行う行動主体であり、自身の身体部位で触れた対象に対して触り心地を知覚する。一方で、触り心地を感じるのは行為者だけではなく、行為者の触覚探索運動を外部から観察した他者、すなわち外部観察者も触り心地を知覚し得る。このような他者の触覚探索運動の観察によって想起される触り心地は、決して特殊な状況ではない。例えば商品広告などでも図 1.1.3 のように、髭剃りや除毛剤の使用後の肌の滑らかさをなでる動きで表現したり、柔軟剤を用いたタオルの柔らかさを押し込む動きで表現したり、洗剤によって油を落とした食器の摩擦感をこする動きで表現したりと、他者の触覚探索運動を利用する場面が多い。よって、本研究では、行為者の触覚探索運動が、行為者の感じる触り心地や外部観察者の感じる触り心地の情報を持っているかどうか、持っているならばどの程度持っているのかを調べることを目的とする。

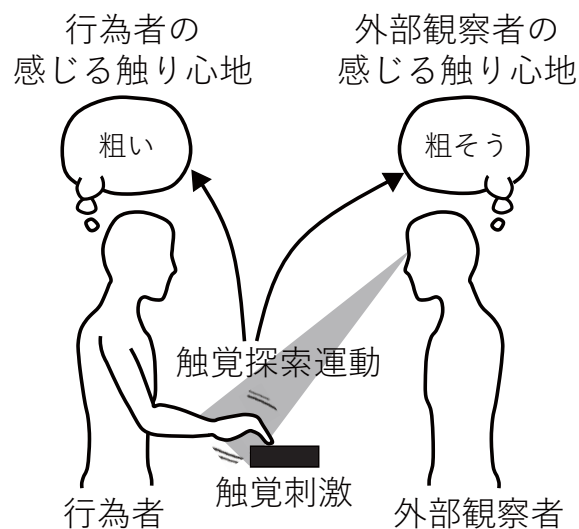


図 1.1.2 触り心地には、物体に触れる行為者自身が感じる触り心地だけでなく、行為者の触覚探索運動を観察する外部観察者が感じる触り心地も存在する。

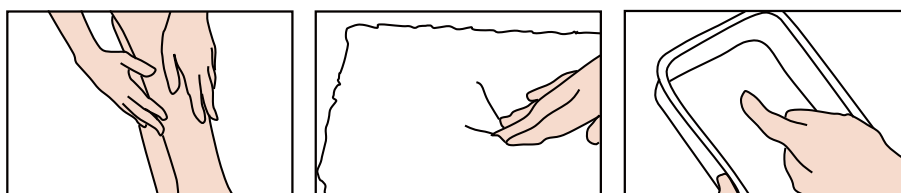


図 1.1.3 他者の触覚探索運動から感じられる触り心地の例。(左)シェービング後の肌の滑らかさ。(中)柔軟剤使用後のタオルの柔らかさ。(右)洗剤使用後の食器の摩擦感。

#### 1.1.4 本論文の研究姿勢

日常生活における人間の触り心地知覚や触覚探索運動を調べたり、または日常生活で適切に作動する触覚情報提示システムを設計したりする上では、日常生活において人間がどのように感じ、どのように応答するかを調べることが重要である。この立ち位置において本研究のアプローチは、これまでの触覚科学研究におけるアプローチとはやや異なる。触覚科学研究では精密な仮説検証のために考慮の対象と

しない要因を極力排除した環境で実験を行う。この手法は、限定された状況で行われているがために、研究対象とする人間の性質の特定要因の理解に有用である一方で、日常環境の中での我々の触覚処理過程の理解を損ないかねない。本研究では、日常での人間の触覚処理過程を反映した知見を得ることを目指し、従来の実験制限の中で特定要因を調べるアプローチを行うというよりは、これらの実験制限を緩和したより自然な条件下で触覚探索運動と触り方がどのように結びつくのかを調べるアプローチを行いたい。次章以降の研究では、従来研究における触覚探索運動に対する制限（静止動作や単純動作などの運動教示）や触覚刺激に対する制限（特定の物理特性を調整した人工刺激）、実験状況に対する制限（判断課題を課す、視覚情報を制限するといった特殊な状況）などを緩和しながら、日常生活で起こりうる我々の触覚探索運動がなぜ、どのように触り心地知覚の情報を持ちうるのかについて理解を深めていく。

この立ち位置は、人間の触覚処理過程は人間を取り巻く日常環境と切り離せないものであるという考え方に基づいている。例えば、日常生活での一人称視点映像を学習したディープニューラルネットワークが、人間と同様に錯視画像に対して錯視を生じることが明らかにされており [38]、我々の視覚システムの処理機構が日常生活での一人称視点映像に基づいていることを示唆する。同様に我々の触覚システムの処理機構も身の回りの日常物体との触れ合いの中で確立されてきたものであり、日常環境の中で適切に振る舞うことに特化したものであると考えられる。よって、日常環境から程遠い状況では、人間の触覚システムがどのような振る舞いをするかはわからず、得られた知見が確かに研究対象とする人間の性質を反映しているものなのか、それとも実験状況に依存するものなのかに関する判断が困難である。そこで、これらの環境から切り離した還元主義的視点の中で人間の触覚を理解するのではなく、触覚探索運動を通じて身の回りの環境と動的に相互作用する触覚システムという全体論的視点の中で人間の触覚を理解することが重要であると考え（図 1.1.4）。本研究のアプローチは、全体論的視点の足場づくりのための一つの糸口になりうる。

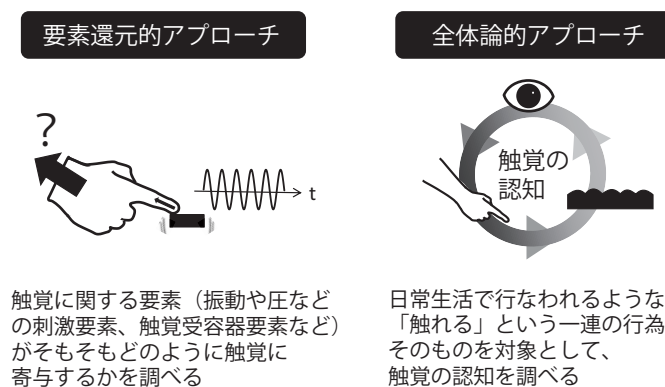


図 1.1.4 要素還元的アプローチと全体論的アプローチ

## 1.2 本論文の目的と意義

本論文では、触覚探索中の行為者が感じている触り心地や、その行為者の触覚探索を眺めている外部観察者が感じている触り心地を外部から推定する方法として、触覚探索運動を利用することを提案し

た。そのために、そもそも触覚探索運動がどのくらい行為者や外部観察者が感じる触り心地の情報を持っているのか、持っているならば、どのような触覚探索運動がどの程度触り心地の情報をもっているのかを、心理物理実験と多変量解析を通じて調べることを目的とする。

本研究を通じて、触覚探索運動が行為者の感じる触り心地や外部観察者の感じる触り心地の情報源として利用できることが明らかになれば、触覚探索中に行為者や外部観察者が感じる触り心地を外部から推定するデコーディング技術を確立することができると期待される。これにより、なるべく小さいバイアスで実験参加者の負担の少ない実験を行うことや、より小さい計測コストで触覚情報提示装置の評価や製品の評価を行うことができるようになる。また、本研究による知見はデコーディング技術だけでなく、人間の触覚処理メカニズムについて新たな仮説を与えることや、腕や手に取り付ける触覚情報提示装置の設計指針を与えることも期待され、サイエンスとエンジニアリングの両分野への貢献が可能である。

## 1.3 本論文の構成

ここでは、各章について詳細に述べる。

### 第1章 序論

我々は日常生活で身の回りの物体に触れることで、物体に対する豊かな触り心地を知覚することができる。物体に触れた人間がどのような触り心地を感じているかを、触覚探索運動の計測・解析によって外部から推定することができれば、触り心地知覚メカニズムを調べる際や触覚情報提示装置を評価する際に有用である。しかし、これまでの多くの触覚研究では触覚探索運動はノイズと見なされコントロールされてきたため、触覚探索運動が触り心地の情報源をもつのか、持つとしたらどのような状況下でどのような情報を持つのかについてはほとんどわかっていないのが現状である。そこで、触覚探索運動が触り心地の情報を持つのかを調べ、触り心地推定のための情報源としての可能性を検討することを本論文の目的として定めた。また、触り心地について、物体に触れている行為者が感じる触り心地だけでなく、行為者の触覚探索運動を外部から眺めている外部観察者が感じる触り心地も存在することを指摘し、それぞれの触り心地を触覚探索運動から推定することが必要であると述べた。

### 第2章 触覚探索運動に含まれる行為者の触り心地情報

第2章では、触覚探索運動について、行為者の感じる触り心地の情報源としての可能性を調べた。行為者の感じる触り心地としては、粗さや硬さのような物体表面の物理特性に関する触り心地、心地よさや好ましさのような感性・価値に関わる触り心地、更には触り心地に基づいた意思決定行動が考えられ、これらを触覚探索運動から推定することを試みた。それぞれの研究では、実験参加者に触覚刺激に触れてもらい、その刺激について触り心地の評価もしくは刺激の選択を行ってもらうという心理物理実験を行った。その際の触覚探索運動を計測し、多変量解析によって触覚探索運動と触り心地評価の間の関係を調べた。その結果、刺激表面上における手指の移動や押付力、更には眼球運動といった触覚探索運動の特徴量によって、これらの触り心地を 40-80% 説明できることを明らかにした。またこの説明力は、実験参加者が何を判断するように教示されているかや、どのような触り方で触覚刺激に触れるか、個々人が日常でどの程度触覚を活用する傾

向があるかによって変動すること、触覚刺激の物性と密接に結びついていること、触れ始めてからの時間経過によって推移することも明らかにした。これらの結果は、触覚探索運動の計測・解析によって行為者の感じる触り心地を推定できる可能性とともに、それを取り巻く諸要因を示唆するものであり、行為者の触り心地推定技術の設計に関する指針を与えた。

### 第3章 触覚探索運動に含まれる外部観察者の触り心地情報

第3章では、触覚探索運動について、外部観察者の感じる触り心地の情報源としての可能性を調べた。まず、そもそも行為者の触覚探索運動を見た外部観察者がどのくらい触り心地について推定できるのかを調べるために、行為者の触覚探索運動のみを光点運動として実験参加者に提示し、観察不可能な触覚刺激の触り心地を推定させた。その結果、外部観察者は行為者の感じた触り心地を高い成績では当てることができなかった一方で、外部観察者間では共通した回答を行っていた。このことから、外部観察者も行為者の触覚探索運動から触り心地を推定することができるが、必ずしも行為者の感じる触り心地とは一致しないことが示唆される。更に、外部観察者の触り心地評価との高い相関をもつ触覚探索運動の特徴量のうち、手の移動速度を再生速度を変えることで変調し、外部観察者に提示する実験を行った。その結果、再生速度に影響を受ける触り心地評価があったことから、外部観察者は手の速度情報を元に触り心地を推定している可能性を示唆した。最後に、他者への情報伝達の際には特徴を強調・誇張して伝達する傾向があることを利用して、行為者が外部観察者に触り心地を触覚探索運動で伝達する実験を通じて、外部観察者が触り心地推定に用いている運動特徴量を推定する試みも行った。これらの結果は、触覚探索運動は外部観察者が感じる触り心地の情報源として利用できること、また触覚探索運動を変調させることで外部観察者の触り心地知覚を変調させることができることを示している。

### 第4章 総合考察

第2章、第3章での結果をもとに、触覚探索運動の特徴量を分類し、それぞれが持つ触り心地情報について整理した。また、触覚探索運動がもつ触り心地情報の量に影響しうる要因についても整理した。これらの知見をもとに、なぜ触覚探索運動が触り心地の情報を持つのかを考察し、触覚探索運動による触り心地推定技術（デコーディング技術）の実装のための設計指針や限界について議論した。最後に、触覚探索運動と触り心地の関係に関する知見が触覚の科学・工学・産業にどのように貢献しうるかについて議論し、これらの知見を広い分野に共有するための枠組みについて言及した。

### 第5章 結論

本論文を通して、行為者の感じる触り心地の情報と外部観察者の感じる触り心地の情報は必ずしも一致しないものの、触覚探索運動がそれら両方の情報源となりうることを明らかにした。本論文の知見から、触覚探索運動の計測・解析によって、外部から行為者や外部観察者の触り心地知覚を推定・予測することが可能であると期待される。

## 第2章

# 触覚探索運動に含まれる 行為者の触り心地情報

本章では、触覚刺激に触れている実験参加者（行為者）の手などの身体部位の能動的運動（触覚探索運動）が、その行為者の感じる触り心地の情報をどの程度、またどのように含んでいるのかを調べることを目的とする。触り心地情報として、刺激の物理特性と関係する触り心地（2.1 節）、感性的・価値的な触り心地（2.2 節）、選択行動に関わる触り心地（2.4 節）を対象に扱った。また手の動きの時間変動に関する特徴量を用いた解析や（2.3 節）、触覚におけるパーソナリティがどの程度個々人の触覚探索運動の持つ情報量に影響するのかを調べる試みも行った（2.5 節）。

### 2.1 触覚属性評価

本節では、これまでの触覚研究でもよく取り上げられ、基本的な触覚属性であるとされる硬さ感、粗さ感、粘つき感、温かさ感について取り上げる。触覚探索を行う行為者にこれらの触覚属性を評価してもらい、行為者の触覚探索行動から、これらの基本触覚属性の評価値をどの程度、またどのように推定できるのかを調べることを目的とする。

行為者の触覚探索行動が、行為者による触覚属性評価値と関係があることはこれまでの研究でも報告されていた。例えば粗さ感については、触覚刺激をなぞっている最中の押付力が大きいほど粗さ感が大きくなること [10] や、粗い紙やすりよりもなめらかな紙やすりをなぞっているときのほうが押付力やなぞり速度が大きくなること [27] が報告されている。また、せん断方向における指先の力の一次微分や、押付力の割合（鉛直方向の押付力/せん断方向の押付力）が触覚刺激の粗さの評価値と相関をもつことも示されている [28, 39]。粘つき感に関しては、どのような触覚属性を実験参加者に判断するように教示したかによらず、手の移動速度が評価された粘つき感と高い相関を持つことが報告されており [29]、これはおそらく皮膚表面と触覚刺激の間の物理的相互作用に起因する、すなわち、高い摩擦係数をもった刺激表面が粘つくと評価され、かつ、なめらかな手の移動を妨げるためと考えられる [40, 41]。押付力の割合（せん断方向の押付力/鉛直方向の押付力）もまた、粘つき感の評価値と高い相関をもつことが示されている [40]。硬さ感については、実際に硬いと評価された刺激や硬いことが予想される刺激ほど、押し付ける力が大きくなることが知られている [42, 43, 44]。

これらの知見は、行為者の知覚する触覚属性の評価値を触覚探索運動から推定できることを示唆する

ものである。しかし、これらの知見はそれぞれ制限された実験条件下で行われており、日常生活に適用するには追加の検討の余地がある。第一に、これらの研究は実験者によって特定の触覚属性、例えば粗さ感や粘つき感を評価するように教示されたときの触覚探索運動を対象としている。しかし、日常生活で我々がものを触るときには外部の人間からこういった触覚属性を判断するように教示されることはない。また、判断課題のように明確な目的を持って触れるときと、目的を持たずに触れるときでは手の動きが異なるパタンを示すことも示唆されている [27]。よって、先行研究で報告された触覚探索運動と触覚属性評価値の関係が、明確な目的を持たないときでも観察されるのかどうかは議論の余地がある。第二に、ほとんどの先行研究において、実験参加者は触覚刺激やそれに触れる手の動きを視覚的に観察することはできなかった。我々が普段ものに触れる際にはその対象を見ながら触れるため、手の動きだけではなく、実験参加者の目の動きも触覚属性評価値の情報源であることが示唆される。これらを踏まえ、本節では、実験参加者が明確な目的を持たずに触覚刺激に触れている場合であっても、手の動きや目の動きといった触覚探索運動が実験参加者の触覚属性評価値の情報をどの程度持つのか、またどのような動きの特徴量が情報を持つのかについて、体系的に調べることを目的とする。ここで得られた知見から、実際の日常生活において触覚探索運動から触覚属性評価値を推定するデコーディングシステムに必要な要件を整理できることが期待される。

実験では、実験参加者に様々な触覚刺激に触れてもらい（図 2.1.1a）、その最中の手の運動と眼球の運動を計測した。実験参加者は、特定の触覚属性を判断する必要がなく自由に触覚刺激に触れるか（自由探索課題）、もしくは、4 項目の触覚属性のうちいずれか 1 つを判断するために触覚刺激に触れる（図 2.1.1b; 硬さ、粗さ、粘つき、温かさ判断課題）ように求められた。計測された手と眼球の運動から 6 種類の運動クラスタを取り出し（図 2.1.1c）、重回帰分析を用いることで判断課題時の触り心地評価（図 2.1.1d）をその判断課題時の運動クラスタ、もしくは異なる課題時の運動クラスタによってどれくらい説明できるのかを調べた。

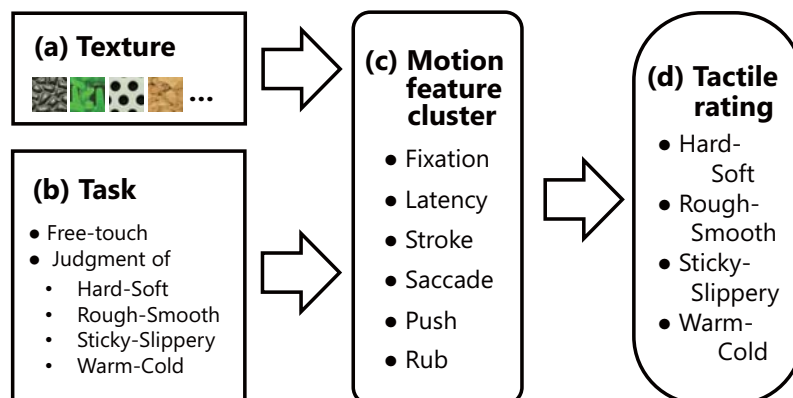


図 2.1.1 実験変数間の関係

### 2.1.1 実験

#### 実験参加者

実験目的を知らない6名の女性と5名の男性（21-39歳）が実験に参加した。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）と運動機能を有していた。本実験のプロトコルはNTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験装置

実験装置を図2.1.2に示す。実験参加者はテーブルの前に座り、図2.1.2に示すようにアクリル板に反射して映り込んでいるモニタスクリーン（DELL, U2312HM, 1920×1080, 60Hz）を見下ろした。モニタまでの視距離は500mmであり、モニタの水平方向視野角は32°、鉛直方向視野角は54°であった。触覚刺激はアクリル板の下に傾斜板上に提示された。触覚刺激として、布や革、金属、木材などの日常生活でよく目にする35種類の素材を採用した（図2.1.3）。これらの触覚刺激は全て、100mm×100mmの正形状の表面をもち、傾斜板から刺激表面までの高さが15mmになるように調整された。滑り止めマットを用いて、それぞれの触覚刺激が動かないように固定された。

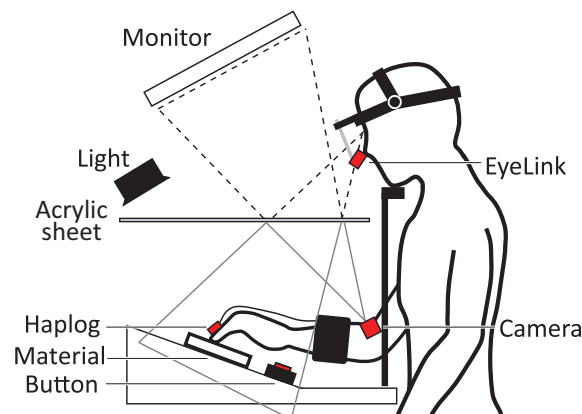


図 2.1.2 実験装置

遮光カーテンを用いることで、実験装置以外の周囲の視覚情報を遮断した。実験参加者が触覚刺激や彼らの手を視覚的に観察できる時間を制御するため、また、触覚刺激に触れている最中や評価を行っている最中の眼球運動や頭部運動を減らすために、2つの視覚モードを切り替えるシステムを用意した。1つ目の視覚モードは、触覚探索のためのシースルーモードであり、このモードではアクリル板上の照明を点灯させる一方、モニタの描画を切ることで、実験参加者は自身の右手と触覚刺激を視覚的に観察することができる。もう1つの視覚モードは、触覚評価のためのモニタモードであり、照明を切り、モニタの描画をすることで、モニタスクリーンのみを観察することができる。PCプログラムによって照明の電源を制御することによって、これらのモードを切り替えた。

実験参加者は顎台の上に頭を固定し、右手で触覚刺激の表面を探索するように求められた。眼球運動計測装置（SR Research Ltd., EyeLinkII）で実験参加者の左の眼球運動を、爪上マウント型触覚センサ（Kato Tech Co. Ltd., Haptics Skill Logger）で実験参加者の右手人差し指の押付力を計測した。ま

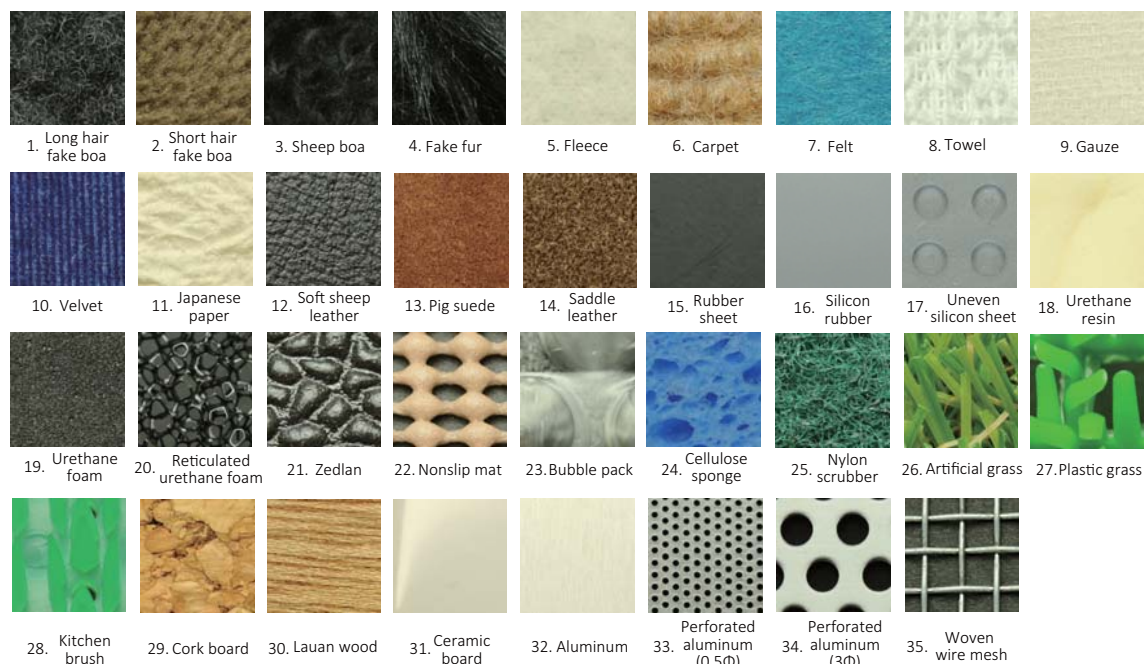


図 2.1.3 実験で用いた 35 種類の触覚刺激

た、顎台に取り付けたビデオカメラ（Point Grey Research, Firefly MV, 752×480, 60Hz）を用いて実験参加者の手の動きを録画した。実験終了後に画像処理を用いて動画中の爪上マウント型触覚センサに取り付けられた赤いマーカーを検出することで、実験参加者の爪の位置を算出した。加えて、触覚刺激と実験参加者の間に置かれたボタンスイッチが Arduino Uno (Arduino) を介して実験 PC に繋がれており、実験参加者に試行開始までボタンを押し続けるように教示することで、ボタンが離されたタイミングを用いて、押付力、眼球運動、人差し指の位置のデータを同期させた。

#### 実験手続き

本実験は 5 つのセッションからなる。実験手続きを図 2.1.4 に示す。最初のセッションは自由探索課題であり、実験参加者は特定の触覚属性を判断することなしに、自由に触覚刺激の表面を触るように教示された。残りの 4 つのセッションは触覚判断課題であり、実験参加者は、硬い-柔らかい、粗い-なめらか、粘つく-滑る、温かい-冷たい、の 4 つの触覚属性の形容詞対のうちいずれか 1 つを判断するように教示された。これらの触覚属性は触覚知覚における基本的な属性であることが知られているため [45]、これらの形容詞対を採用した。5 つ全てのセッションで、実験参加者は右手人差し指で触覚刺激の表面を触るように教示された。それぞれのセッションにおいて 35 種類の触覚刺激がランダムな順番で一度ずつ提示された。また、触覚判断課題セッションのそれぞれで判断する触覚属性の形容詞対もランダムに提示された。

各試行の開始前はモニターモードであり、実験参加者は自身の右手も触覚刺激も観察することができなかった。触覚判断課題では、試行開始前に判断すべき触覚属性の形容詞対がモニタスクリーンに提示された。その後、実験参加者がモニタスクリーン中央の固視点を注視し、かつ、右手人差し指でボタンスイッチを押しているときにシースルーモードに切り替わり、1 試行を開始した。実験参加者は、自身の

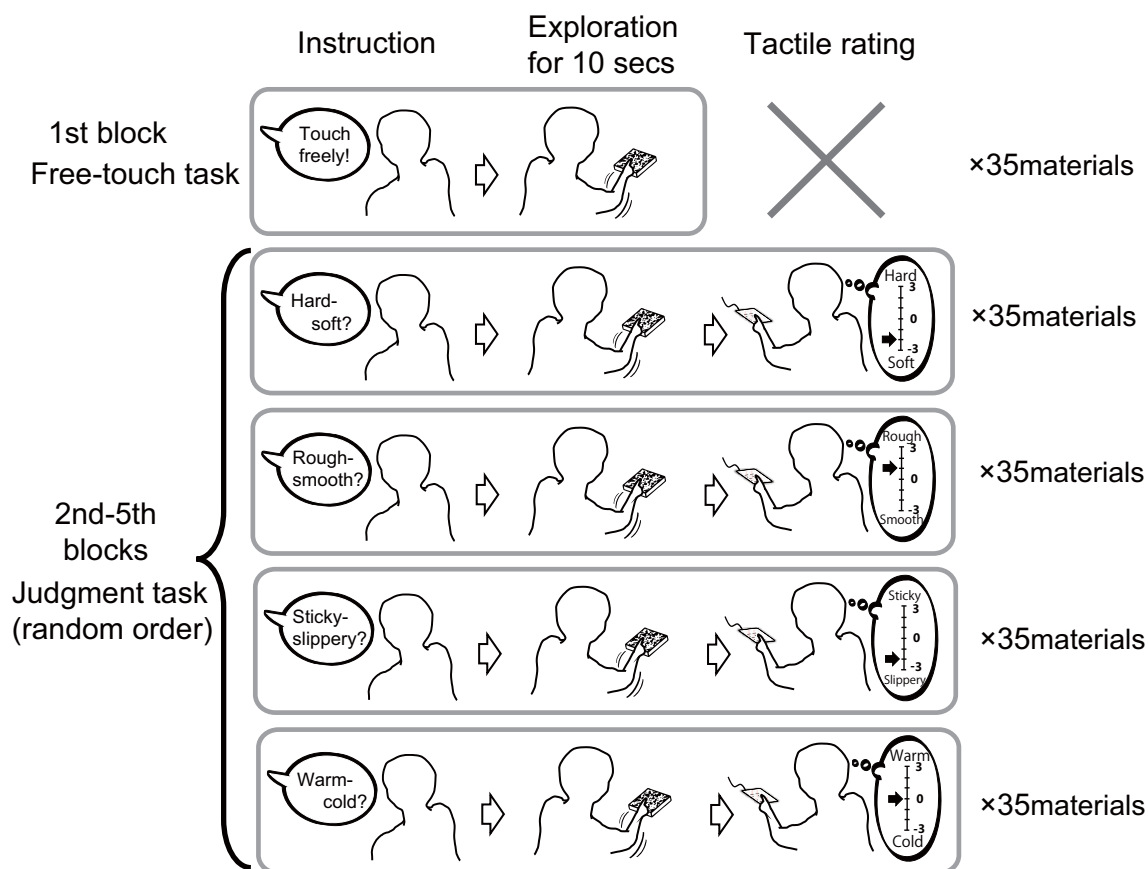


図 2.1.4 実験手続き

右手と触覚刺激を観察することが可能になると同時に触覚刺激に触れるように教示された。10 秒後に再びモニタモードに切り替わり、実験参加者は右手を元の位置に戻した。触覚判断課題の場合は、手元のキーボードを用いて教示されていた触覚属性について 7 段階で回答した。

## データ解析

ある実験参加者の 1 試行における、前後方向 (y 方向) の眼球と人差し指の運動データと、押付力のデータを図 2.1.5 に示す。実験参加者が探索を始めた直後に、まず触覚刺激の方向へと大きな眼球運動が生じ、そのあとに続くように人差し指が到達運動を始める様子がわかる。押付力はボタンスイッチを離すことでいったん小さくなり、そのあと触覚刺激との接触を始めることで再び大きくなる。

眼球運動、人差し指の運動、押付力のデータから、26 種類の運動特徴量を抽出した。眼球運動データからは、固視時間長やサッカードの大きさといった 11 種類の運動特徴量を計算した (表 2.1.3 を参照)。本研究では、眼球運動の速さが 15deg/sec を超える区間をサッカード区間、それ以外の区間を固視区間と定義した。また各試行におけるサッカード潜時を、試行開始から最初のサッカードが生じるまでの時間として定義した。その他の眼球運動に関する運動特徴量は全て、最初のサッカード以降の区間のデータを対象として解析した。人差し指の運動データからは、7 種類の運動特徴量を計算した (表 2.1.4 の上 7 項目を参照)。手運動潜時を、試行開始から指がボタンを離れるまでの時間として定義した。その

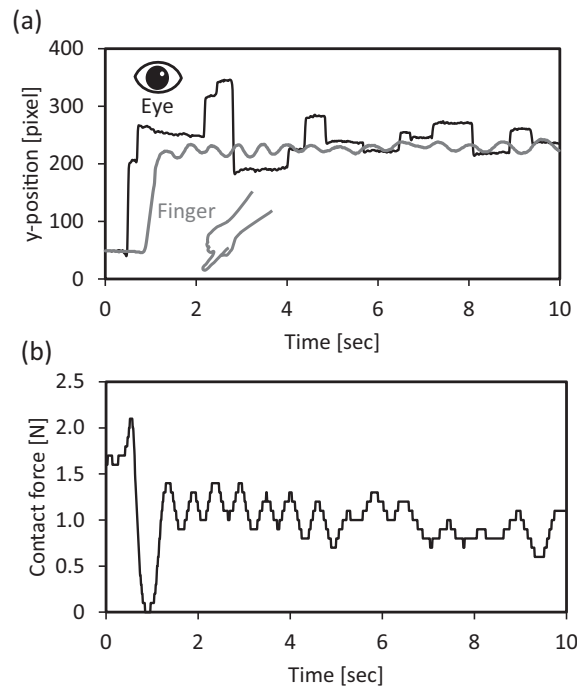


図 2.1.5 ある試行における計測運動データ：(a) 眼球運動と手の運動、(b) 押付力

他の人差し指の運動に関する運動特徴量は全て、ボタンを離れたあとの区間のデータを対象として解析した。また、ボタンから指が離れたあとの眼球運動データと人差し指の運動データの両方を用いて、注視位置と指先位置の間の距離に関する 2 つの運動特徴量を計算した。最後に、爪上マウント型触覚センサから計測された押付力と指先加速度のデータから、ボタンから指が離れたあとの区間のデータを対象として、6 種類の運動特徴量を計算した（表 2.1.4 の下 6 項目を参照）。これらの運動特徴量は 1915 試行全て（35 触覚刺激 × 5 課題（自由探索課題と 4 つの触覚判断課題）× 11 実験参加者、ただし実験参加者の眼球位置が計測範囲から外れた 10 試行は解析から除外した）について計算された。それぞれの運動特徴量は各実験参加者について平均が 0、標準偏差が 1 になるように標準化された後、実験参加者間で平均された。

## 2.1.2 結果：触覚属性の評価

各判断課題における触覚属性の評価値を図 2.1.6 に示す。例えば、硬さ-柔らかさの評価では、布刺激が柔らかいと評価される傾向があり、金属刺激が硬いと評価される傾向がみられた（図 2.1.6a）。粗さ-なめらかさの評価においては、人工芝刺激が粗いと評価される一方、セラミックやアルミ刺激がなめらかであると評価される傾向が見られた（図 2.1.6b）。粘つき-滑りの評価においてはシリコン刺激が粘つくと評価される一方、金属刺激が滑ると評価される傾向が見られた（図 2.1.6c）。温かさ-冷たさの評価においては、布刺激が温かいと評価される一方、金属刺激が冷たいと評価される傾向が見られた（図 2.1.6d）。それぞれの触覚評価値は各実験参加者において全刺激で平均が 0、標準偏差が 1 になるように標準化されたあと、被験者間で平均された。この値を以降の重回帰分析や相関分析に用いた。

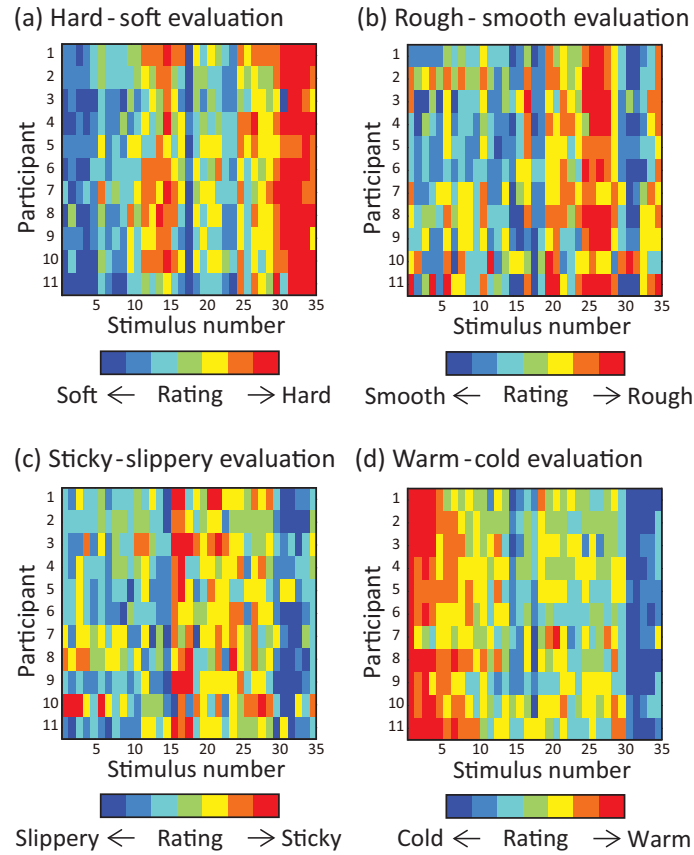


図 2.1.6 各実験参加者による各触覚刺激の評価値。刺激番号は図 2.1.3 の番号に対応する。

### 2.1.3 結果：運動特徴量のクラスタ分析

重回帰分析における多重共線性や過学習を避けるために、階層クラスタ分析を用いて 26 種類の運動特徴量を、より少ないグループ（運動クラスタ）に分類した。まず、175 条件（35 触覚刺激 × 5 課題）それぞれの標準化された運動特徴量の値に対し、Ward 法を用いて運動特徴量間のユークリッド距離を算出した。次に、このユークリッド距離を非類似度とし、最小の非類似度を持つ 2 つの運動特徴量をひとつの新たな運動クラスタとして統合した。この手続きを運動クラスタ数が 6 になるまで繰り返した。つまり、この研究におけるクラスタ分析は、課題や触覚刺激が変わったときに似た変化を示す運動特徴量同士が同じクラスタに分類されやすいことを意味する。

26 運動特徴量を 6 運動クラスタに分類した結果を図 2.1.7 に示す。それぞれの運動クラスタ内の運動特徴量の重心（平均値）をそのクラスタの代表値として採用し、各運動クラスタを図 2.1.7 の上から順に fixation クラスタ、latency クラスタ、stroke クラスタ、saccade クラスタ、push クラスタ、rub クラスタと名付けた。

Stroke クラスタは指先の移動や速度に関連する運動特徴量からなり、これらの特徴量は粗さや滑りやすさの知覚と関係することが知られている [26, 27, 28, 29, 46, 47, 48]。Push クラスタは、粗さやコンプライアンスの知覚と関係することが知られている押付力に関する運動特徴量からなる [27, 28, 30, 31, 40, 42, 43, 44]。Latency クラスタは指や目が動くまでの時間（運動潜時）に関する運

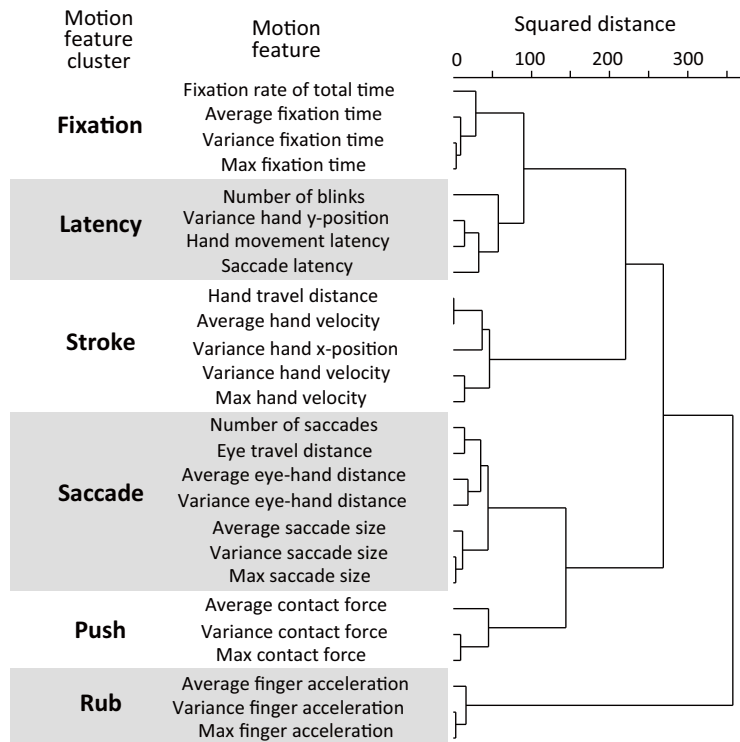


図 2.1.7 階層クラスタ分析による 26 種類の運動特徴量の 6 種類の運動クラスタへの分類

動特徴量を含み、先行研究では刺激に触れるまでの時間が、実験参加者に推定された細かい粗さや硬さと確率的関係を持つことが報告されている [28]。Rub クラスタは指先加速度に関する運動特徴量からなり、このことは押付力とは異なる力、例えばせん断方向の力に関するクラスタであることを示唆する。Fixation クラスタと saccade クラスタはそれぞれ、固視状態に関連する運動特徴量と、大きな眼球運動に関連する運動特徴量からなるクラスタであるが、これまでの研究の触覚属性の知覚の研究においては用いられてこなかった運動特徴量である。

運動クラスタ同士の相関を表 2.1.1 に示す。Fixation クラスタと saccade クラスタ、fixation クラスタと push クラスタ、saccade クラスタと push クラスタ、stroke クラスタと rub クラスタの間に、統計的に有意な相関が見られる。重回帰分析においては相関の高い説明変数が複数存在すると正しい結果を推計できなくなる問題が生じるが（多重共線性）、この多重共線性の程度の指標となる variance inflation factors を計算したところ、いずれの運動特徴量も多重共線性を引き起こすほど大きくはなかった（表 2.1.2）。

#### 2.1.4 結果：全運動クラスタによる触覚属性評価値の説明

はじめに、各課題において重回帰分析を用いて、全ての運動クラスタ（説明変数）によって、触覚判断課題中に評価された触覚属性値（目的変数）がどの程度説明できるのかを調べた。

触覚属性の評価値をどれくらい説明できるかを表す決定係数  $r^2$  を図 2.1.8 に示す。比較のために、触覚評価値の順序をランダムにシャッフルすることで、触覚評価値と運動クラスタの間の対応をなくしたとき（シャッフル条件）の重回帰における決定係数  $r^2$  を求め、その手続きを 10000 回繰り返すことで

表 2.1.1 運動クラスタ間の相関係数。アスタリスクはその相関が有意であることを示す ( $p < 0.05$ )。

|          | Latency | Stroke | Saccade | Push   | Rub    |
|----------|---------|--------|---------|--------|--------|
| Fixation | 0.02    | -0.02  | -0.60*  | -0.37* | 0.02   |
| Latency  |         | 0.05   | -0.09   | -0.09  | -0.06  |
| Stroke   |         |        | 0.13    | -0.09  | -0.27* |
| Saccade  |         |        |         | 0.30*  | 0.12   |
| Push     |         |        |         |        | -0.13  |

表 2.1.2 それぞれの運動クラスタの多重共線性の危険度を示す variance inflation factor

| Fixation | Latency | Stroke | Saccade | Push | Rub  |
|----------|---------|--------|---------|------|------|
| 1.68     | 1.02    | 1.17   | 1.72    | 1.25 | 1.18 |

95% 信頼区間を計算した (図 2.1.8 における灰色の長方形)。6 種類の運動クラスタである触覚評価値を重回帰分析した際の決定係数  $r^2$  がシャッフル条件における 95% 信頼区間よりも大きい場合は、運動クラスタによってその触覚評価値をチャンスレベル以上に説明可能である、と結論付けることができる。

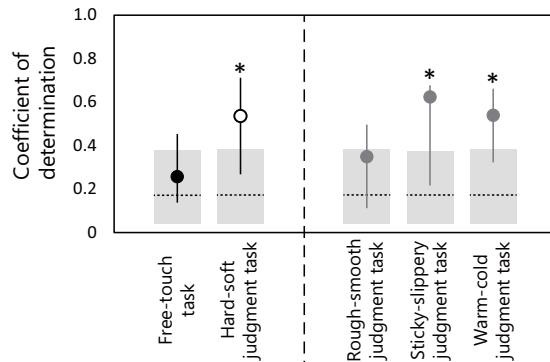
対応する判断課題におけるすべての決定係数  $r^2$  (例えば、硬さ判断課題時の運動から計算された運動クラスタで、硬さ評価値を説明した場合の決定係数  $r^2$ ) は 0.47-0.81 であり、シャッフル条件における 95% 信頼区間よりも大きかった。更に、実験参加者が特定の触覚属性を判断する必要がなかった自由探索課題であっても、粘つき-滑りの評価値と温かさ-冷たさの評価値に対する決定係数  $r^2$  はシャッフル条件における 95% 信頼区間よりも大きかった。対応する判断課題時と自由探索課題時の間の違いを調べるために、ブートストラップ法 [49] を用いて、各評価値における対応する判断課題時と自由探索課題時の決定係数  $r^2$  の差の 95% 信頼区間を作成した。その結果、粘つき-滑りの評価値においてのみその 95% 信頼区間が 0 と重ならなかったことから、粘つき-滑り判断課題時の運動クラスタは自由探索課題時の運動クラスタよりも粘つき-滑り評価値の情報を多く持っていると言える。加えて、対応しない判断課題時の決定係数  $r^2$  の多くも、シャッフル条件における 95% 信頼区間よりも大きかった。

### 2.1.5 結果：各運動クラスタと触覚属性評価値の間の相関

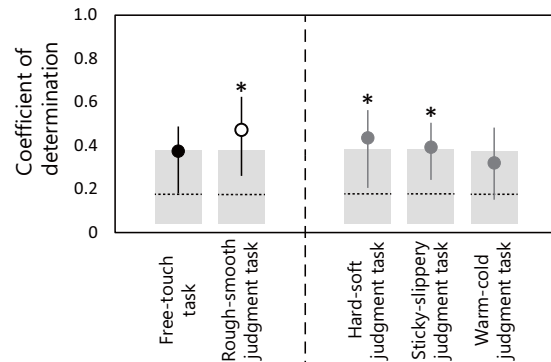
次に検討すべき課題は、どの運動クラスタがどのくらい触覚評価値を説明するために貢献したのか、ということである。このことを調べるために、対応する判断課題時の各運動クラスタ、もしくは自由探索課題時の各運動クラスタと、触覚評価値の間の相関を調べた (図 2.1.9)。

得られた結果の傾向は些か複雑ではあるが、例えば自由探索課題であったとしても、統計的に有意な相関をもつ運動クラスタが存在すること、そして、眼球運動に関連した運動クラスタも有意な相関をもつことがあることを示している。硬さ-柔らかさの評価値においては (図 2.1.9a)、自由探索課題時の fixation クラスタが柔らかさ評価値と相関し、rub クラスタが硬さ評価値と相関することが明らかになった。一方で硬さ-柔らかさ判断課題時の saccade クラスタと push クラスタは硬さの評価値と相関することが明らかになった。粗さ-なめらかさの評価値においては (図 2.1.9b)、自由探索課題時でも粗

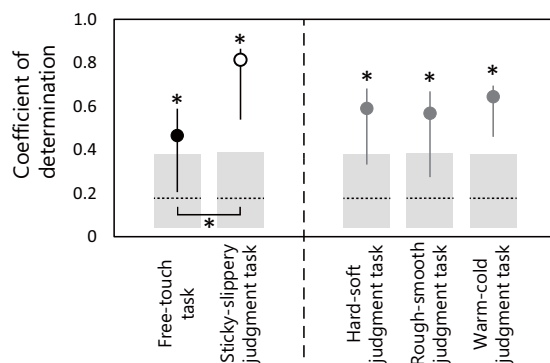
(a) Hardness rating



(b) Roughness rating



(c) Stickiness rating



(d) Warmth rating

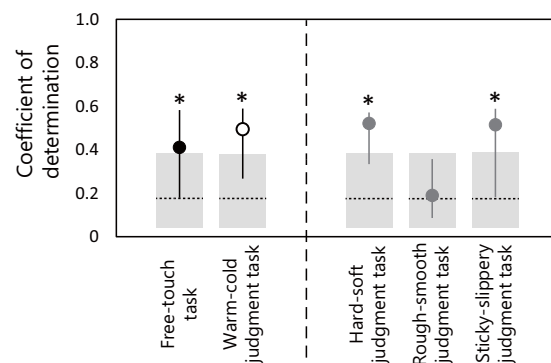
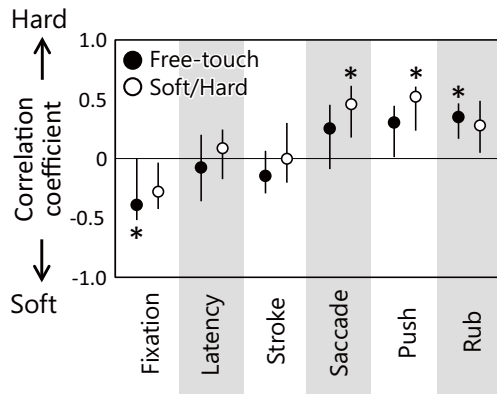


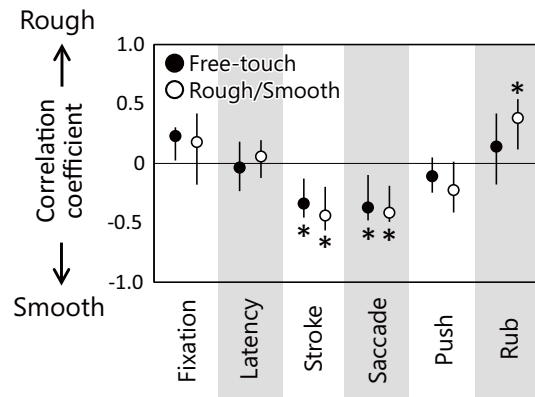
図 2.1.8 重回帰分析における決定係数  $r^2$ 。黒丸と白丸はそれぞれ、自由探索課題における決定係数と、対応する判断課題における決定係数を表す。灰色の丸は対応しない判断課題における決定係数を表す。エラーバーはブートストラップ法によって求められた 95% 信頼区間である。点線と灰色の長方形は、触覚評価値の順序をランダムにシャッフルすることで触覚評価値と運動クラスタ間の対応をなくしたとき（シャッフル条件）の重回帰分析における決定係数の平均値と 95% 信頼区間である。各決定係数の上のアスタリスクは、その決定係数がシャッフル条件における 95% 信頼区間よりも大きいことを表す。決定係数間のアスタリスクは、ブートストラップ法によってその決定係数間の差が有意に大きいと判定されたことを意味する。

さ-なめらかさ判断課題時でも stroke クラスタと saccade クラスタが滑らかさの評価値と相関を持つこと、また、粗さ-なめらかさ判断課題時における rub クラスタが粗さの評価値と相関をもつことが明らかになった。粘つき-滑りの評価値においては（図 2.1.9c）、粘つき-滑り判断課題時の stroke クラスタと saccade クラスタが滑り評価値と、rub クラスタが粘つき評価値と相関することが明らかになった。一方で自由探索課題時は、stroke クラスタのみが滑り評価値と相関した。温かさ-冷たさの評価値においては（図 2.1.9d）、自由探索課題時においても温かさ-冷たさ判断課題時においても saccade クラスタが冷たさの評価値と相関した。また、自由探索課題時には stroke クラスタが温かさ評価値と、rub クラスタが冷たさ評価値と相関した一方で、温かさ-冷たさ判断課題時には latency クラスタが温かさ評価値と、push クラスタが冷たさ評価値と相関した。

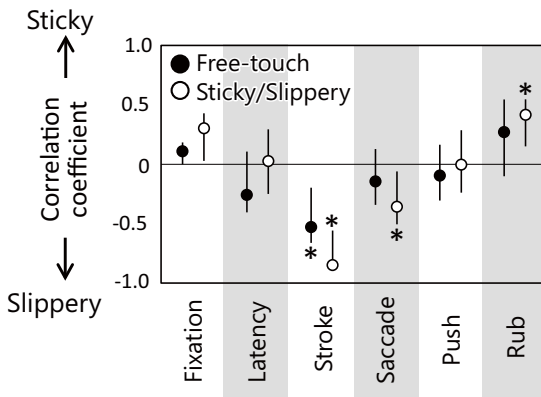
(a) Hardness rating



(b) Roughness rating



(c) Stickiness rating



(d) Warmth rating

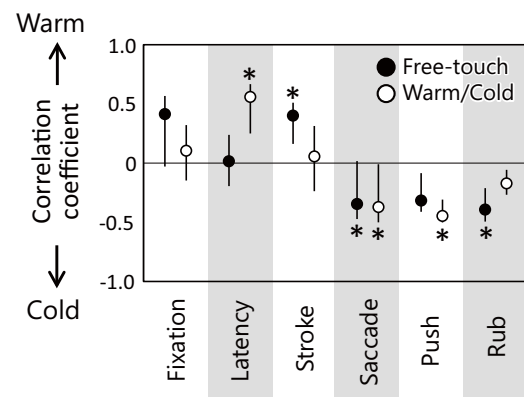


図 2.1.9 それぞれの運動クラスターと触覚評価値の相関。エラーバーはブートストラップ法によって計算された相関係数の 95% 信頼区間を表す。相関係数の上のアスタリスクは、その相関係数が、シャッフル条件における相関係数の 95% 信頼区間の外にあることを表し、その相関係数がチャンスレベルよりも大きいことを示唆する。

## 2.1.6 結果：眼球運動の寄与

図 2.1.9 の結果から、saccade クラスターや fixation クラスターのような眼球運動に関連する運動特徴量が、いくつかの触覚属性の評価値と相関をもつことがわかる。ここで、これらの眼球運動は図 2.1.8 における重回帰分析に貢献したのか、また、眼球運動は手の運動とは異なる触覚属性の評価値の情報を持っていたのか、という疑問が生じる。このことを調べるために、重回帰分析において、眼球運動の特徴量だけを用いた場合（眼球のみ条件）、手運動の特徴量だけを用いた場合（手のみ条件）、すべての特徴量を用いた場合（眼球 + 手条件）のそれぞれの条件における説明力を調べた。

はじめに、多重共線性を防ぐために、運動特徴量に対して主成分分析 (Principal component analysis) を行った。眼球のみ条件、手のみ条件、眼球 + 手条件のそれぞれにおける主成分分析の結果を表 2.1.3, 表 2.1.4, 表 2.1.5 に示す。全ての条件において累積寄与率 (Cumulative contribution) が 75% を超える第 6 主成分までを説明変数として採用した。それぞれの触覚属性評価値をこれらの主成分を用いて説明を試みた結果を図 2.1.10 に示す。

表 2.1.3 眼球運動特徴量の主成分分析における因子負荷量。0.30 以上、もしくは-0.30 以下の因子負荷量を太字で表している。

| Movement parameters         | PC1          | PC2         | PC3          | PC4         | PC5         | PC6         |
|-----------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Fixation rate of total time | -0.26        | 0.18        | <b>-0.35</b> | 0.09        | <b>0.75</b> | <b>0.45</b> |
| Average fixation time       | <b>-0.38</b> | 0.27        | 0.13         | 0.01        | -0.07       | -0.13       |
| Variance fixation time      | <b>-0.34</b> | 0.30        | 0.28         | -0.18       | -0.25       | 0.27        |
| Max fixation time           | <b>-0.35</b> | 0.27        | 0.25         | -0.22       | -0.14       | 0.24        |
| Number of blink             | 0.10         | -0.24       | <b>0.76</b>  | -0.05       | <b>0.52</b> | -0.10       |
| Number of saccade           | <b>0.36</b>  | -0.15       | -0.05        | -0.16       | -0.22       | <b>0.62</b> |
| Average saccade size        | <b>0.31</b>  | <b>0.41</b> | -0.16        | 0.13        | 0.02        | -0.21       |
| Variance saccade size       | 0.27         | <b>0.53</b> | 0.14         | -0.04       | 0.07        | -0.12       |
| Max saccade size            | <b>0.32</b>  | <b>0.45</b> | 0.06         | -0.07       | 0.11        | -0.02       |
| Eye travel distance         | <b>0.38</b>  | 0.03        | 0.20         | -0.13       | -0.01       | <b>0.36</b> |
| Saccade latency             | -0.01        | 0.07        | 0.24         | <b>0.92</b> | -0.16       | 0.25        |
| Eigenvalue                  | 5.15         | 1.98        | 1.11         | 1.05        | 0.65        | 0.40        |
| Cumulative contribution     | 0.47         | 0.65        | 0.75         | 0.84        | 0.90        | 0.94        |

表 2.1.4 手の運動特徴量の主成分分析における因子負荷量。0.30 以上、もしくは-0.30 以下の因子負荷量を太字で表している。

| Movement parameters          | PC1          | PC2          | PC3         | PC4         | PC5          | PC6          |
|------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Hand travel distance         | <b>0.42</b>  | -0.11        | 0.16        | 0.02        | 0.09         | <b>-0.32</b> |
| Average hand velocity        | <b>0.43</b>  | -0.11        | 0.16        | 0.01        | 0.09         | -0.29        |
| Variance hand velocity       | 0.29         | -0.11        | <b>0.44</b> | 0.02        | -0.16        | -0.06        |
| Max hand velocity            | <b>0.31</b>  | -0.09        | <b>0.31</b> | 0.03        | <b>-0.60</b> | <b>0.40</b>  |
| Variance hand x-position     | <b>0.34</b>  | -0.19        | 0.04        | 0.09        | <b>0.63</b>  | <b>0.55</b>  |
| Variance hand y-position     | 0.15         | -0.16        | -0.23       | <b>0.61</b> | 0.16         | -0.07        |
| Hand movement latency        | -0.02        | -0.12        | -0.25       | <b>0.65</b> | <b>-0.34</b> | -0.06        |
| Average contact force        | 0.12         | <b>0.49</b>  | 0.19        | 0.15        | 0.15         | <b>-0.37</b> |
| Variance contact force       | -0.20        | <b>0.34</b>  | <b>0.32</b> | <b>0.30</b> | 0.06         | <b>0.33</b>  |
| Max contact force            | -0.10        | <b>0.45</b>  | <b>0.33</b> | 0.24        | 0.09         | 0.01         |
| Average finger acceleration  | -0.28        | <b>-0.34</b> | 0.28        | 0.05        | 0.11         | <b>-0.31</b> |
| Variance finger acceleration | -0.30        | <b>-0.32</b> | <b>0.32</b> | 0.11        | 0.09         | -0.03        |
| Max finger acceleration      | <b>-0.30</b> | <b>-0.32</b> | <b>0.32</b> | 0.09        | 0.07         | 0.02         |
| Eigenvalue                   | 4.69         | 2.85         | 2.31        | 1.55        | 0.55         | 0.34         |
| Cumulative contribution      | 0.36         | 0.58         | 0.76        | 0.88        | 0.92         | 0.95         |

結果から、手のみ条件と眼球 + 手条件のそれぞれにおける主成分は、全ての触覚判断課題時と、一部

表 2.1.5 手と眼球の運動特徴量の主成分分析における因子負荷量。0.30 以上、もしくは-0.30 以下の因子負荷量を太字で表している。

| Movement parameters         | PC1          | PC2         | PC3          | PC4         | PC5          | PC6         |
|-----------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Fixation rate of total time | -0.23        | 0.00        | 0.09         | 0.11        | 0.10         | 0.05        |
| Average fixation time       | <b>-0.32</b> | -0.02       | 0.10         | 0.10        | 0.23         | 0.20        |
| Variance fixation time      | -0.28        | 0.04        | 0.12         | 0.08        | 0.29         | 0.22        |
| Max fixation time           | -0.29        | 0.05        | 0.11         | 0.03        | 0.30         | 0.20        |
| Number of blink             | 0.08         | 0.08        | -0.02        | -0.19       | -0.20        | -0.10       |
| Number of saccade           | <b>0.32</b>  | -0.03       | -0.03        | -0.17       | -0.07        | -0.04       |
| Average saccade size        | 0.26         | -0.05       | 0.14         | <b>0.33</b> | 0.17         | -0.06       |
| Variance saccade size       | 0.23         | -0.01       | 0.21         | <b>0.30</b> | <b>0.33</b>  | -0.03       |
| Max saccade size            | 0.28         | -0.01       | 0.18         | 0.26        | 0.27         | -0.07       |
| Eye travel distance         | <b>0.34</b>  | 0.04        | 0.10         | 0.00        | -0.04        | -0.07       |
| Average eye-hand distance   | 0.19         | -0.02       | 0.08         | 0.15        | -0.09        | 0.12        |
| Variance eye-hand distance  | 0.24         | 0.05        | 0.11         | 0.26        | 0.03         | 0.03        |
| Hand travel distance        | 0.04         | <b>0.42</b> | 0.12         | -0.07       | -0.04        | 0.08        |
| Average hand velocity       | 0.04         | <b>0.42</b> | 0.12         | -0.06       | -0.03        | 0.08        |
| Variance hand velocity      | 0.15         | 0.29        | 0.21         | -0.21       | -0.01        | 0.21        |
| Max hand velocity           | 0.11         | <b>0.31</b> | 0.17         | -0.10       | 0.03         | 0.15        |
| Variance hand x-position    | -0.06        | <b>0.34</b> | 0.16         | -0.01       | -0.08        | 0.13        |
| Variance hand y-position    | -0.08        | 0.14        | 0.05         | <b>0.34</b> | <b>-0.46</b> | 0.18        |
| Saccade latency             | -0.02        | -0.11       | -0.06        | <b>0.34</b> | -0.24        | 0.07        |
| Hand movement latency       | -0.11        | -0.02       | 0.03         | <b>0.37</b> | <b>-0.41</b> | 0.23        |
| Average contact force       | 0.17         | 0.11        | <b>-0.37</b> | -0.04       | 0.12         | <b>0.33</b> |
| Variance contact force      | 0.18         | -0.21       | -0.18        | -0.04       | 0.04         | <b>0.48</b> |
| Max contact force           | 0.20         | -0.11       | -0.29        | -0.09       | 0.10         | <b>0.48</b> |
| Average finger acceleration | -0.01        | -0.26       | <b>0.37</b>  | -0.23       | -0.11        | 0.12        |
| Average finger acceleration | 0.04         | -0.28       | <b>0.38</b>  | -0.16       | -0.11        | 0.17        |
| Max finger acceleration     | 0.04         | -0.29       | <b>0.39</b>  | -0.17       | -0.10        | 0.16        |
| Eigenvalue                  | 6.54         | 4.81        | 2.97         | 2.11        | 1.81         | 1.61        |
| Cumulative contribution     | 0.25         | 0.44        | 0.55         | 0.63        | 0.70         | 0.76        |

の自由探索課題時において、統計的に有意に触覚属性評価値を説明できた。このことは、手の運動に関連した運動特徴量の貢献が大きいことを示唆する。加えて、硬さ-柔らかさ判断課題時の眼球のみ条件は硬さ-柔らかさ評価値を、自由探索課題時の眼球のみ条件は粗さ-なめらかさ評価値を有意に説明することができた。しかしながら、眼球運動が手運動よりも触覚属性評価値の情報を多く含んでいることを示す強い証拠は見つからなかった。

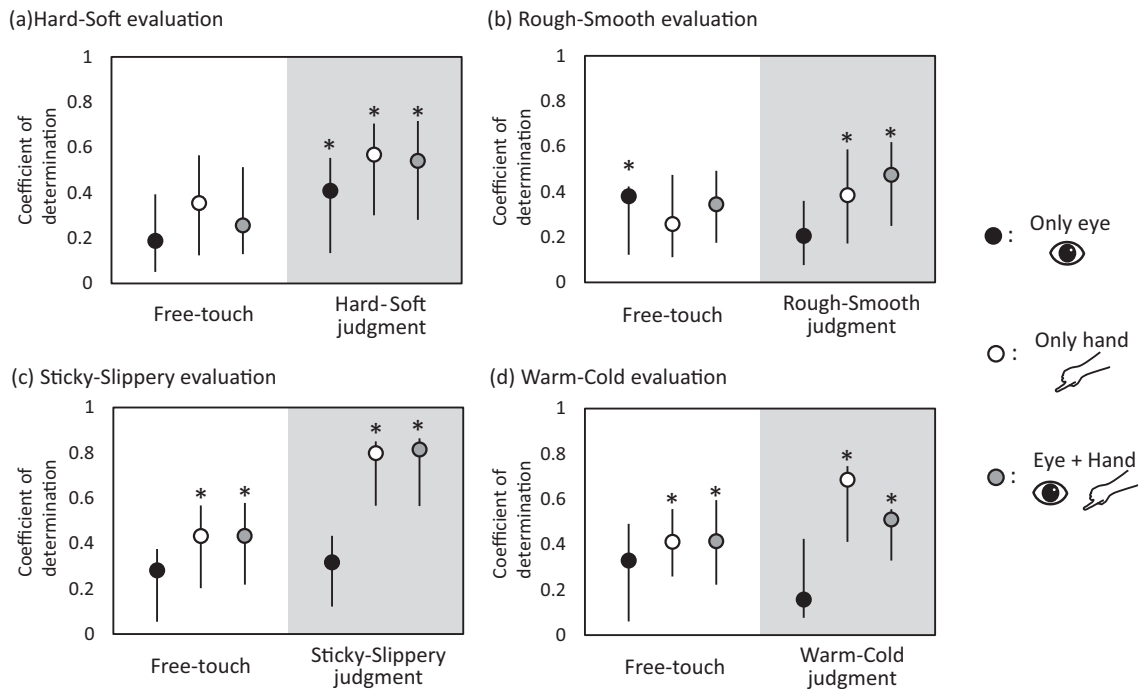


図 2.1.10 眼球のみ条件、手のみ条件、眼球 + 手条件における重回帰分析の決定係数  $r^2$ 。各パネルにおいて、左の 3 つのデータは自由探索課題における決定係数  $r^2$  を、右の 3 つのデータは対応する判断課題における決定係数  $r^2$  を示している。エラーバーはブートストラップ法によって求められた決定係数  $r^2$  の 95% 信頼区間である。データの上のアスタリスクはその決定係数がシャッフル条件における決定係数の 95% 信頼区間よりも大きいことを表しており、その決定係数がチャンスレベルよりも大きいことを示唆する。

## 2.1.7 結果：課題と触覚刺激による触覚探索運動への影響

図 2.1.1 に示すように、触覚探索運動は課題からも触覚刺激からも影響を受けることが知られているので [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 50]、本実験における 6 種類の運動クラスタが課題や触覚刺激によってどのように変化するかを調べた。このために、各実験参加者内でそれぞれの運動クラスタを 0-1 の範囲に正規化した上で、被験者間で平均した。はじめに、これらの運動クラスタを触覚刺激間で平均することで、それぞれの運動クラスタが課題によってどのように変わるのかを調べた (図 2.1.11 左側のパネル)。また、課題間で平均することで、それぞれの運動クラスタが触覚刺激によってどのように変わるのかを調べた (図 2.1.11 右側のパネル)。先行研究で報告されていたように、本実験での結果も探索運動が課題によっても触覚刺激によっても変調することを示している。

まず fixation クラスタ (図 2.1.11(a)) について、1 要因分散分析の結果、課題の効果は統計的に有意であった ( $F(4, 170) = 3.73, p < 0.01, \eta^2 = 0.01$ )。硬さ-柔らかさ判断課題時の fixation クラスタの値は、粗さ-なめらかさ判断課題や粘つき-滑り判断課題よりも大きかった。加えて、1 要因分散分析の結果、触覚刺激の効果もまた統計的に有意であった ( $F(34, 140) = 2.33, p < 0.01, \eta^2 = 0.34$ )。フェイクファーやゼドラン、キッチンブラシにおける fixation クラスタの値はソフトシープレザーやサドルレザー、シリコンラバーよりも大きかった。

続いて latency クラスタ (図 2.1.11(b)) について、1 要因分散分析の結果、課題の効果は統計的に有

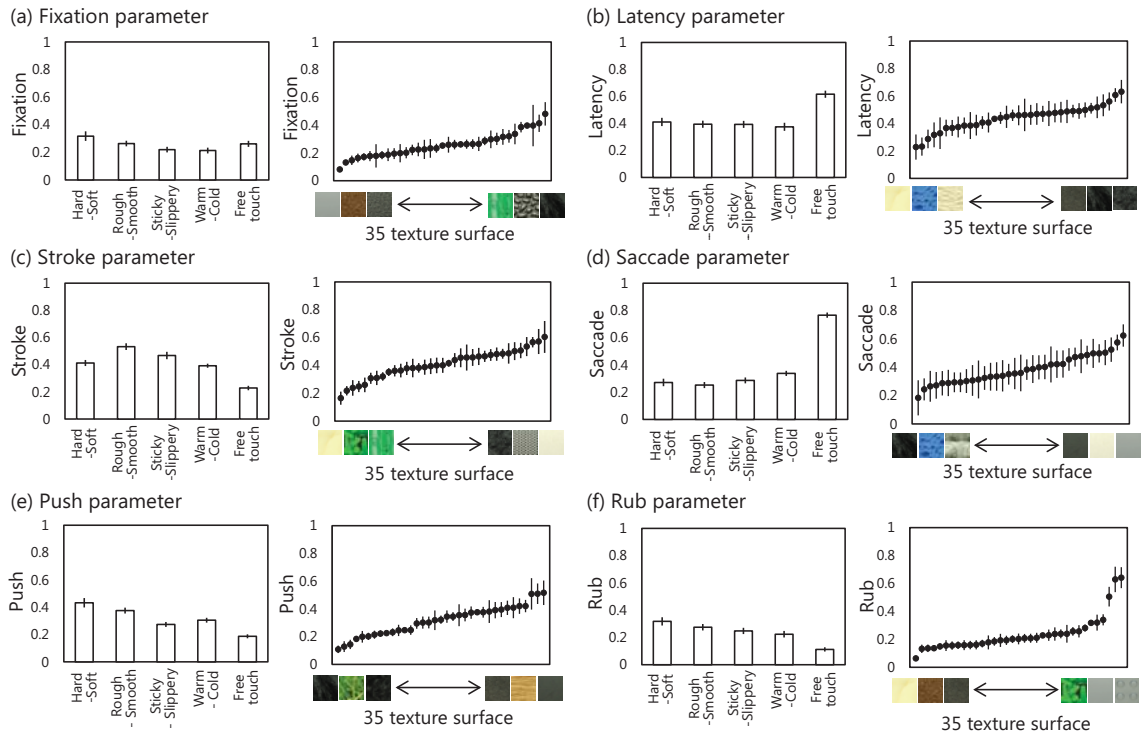


図 2.1.11 課題と触覚刺激が運動クラスターに与える影響。各パネルにおいて、左側が課題による運動クラスターの変化（35 触覚刺激について平均されたもの）であり、右側が触覚刺激による運動クラスターの変化（5 課題について平均されたもの）である。エラーバーは標準誤差を示している。

意であった ( $F(4, 170) = 14.99, p < 0.01, \eta^2 = 0.23$ )。自由探索課題時の latency クラスターの値は、他の判断課題時よりも大きかった。加えて、1 要因分散分析の結果、触覚刺激の効果もまた統計的に有意であった ( $F(34, 140) = 1.76, p < 0.05, \eta^2 = 0.23$ )。ショートヘアフェイクボアやフェイクファー、ウレタンフォームにおける latency クラスターの値は和紙やセルローススポンジ、ウレタンレジンよりも大きかった。

次に stroke クラスター (図 2.1.11(c)) について、1 要因分散分析の結果、課題の効果は統計的に有意であった ( $F(4, 170) = 62.83, p < 0.01, \eta^2 = 0.39$ )。粗さ-なめらかさ判断課題時や粘つき-滑り判断課題時の stroke クラスターの値は、自由探索課題時よりも大きかった。加えて、1 要因分散分析の結果、触覚刺激の効果もまた統計的に有意であった ( $F(34, 140) = 7.56, p < 0.01, \eta^2 = 0.40$ )。アルミ、穴あきアルミ、ロングヘアフェイクボアにおける stroke クラスターの値はキッチンブラシや人工芝、ウレタンレジンよりも大きかった。

続いて saccade クラスター (図 2.1.11(d)) について、1 要因分散分析の結果、課題の効果は統計的に有意であった ( $F(4, 170) = 183.73, p < 0.01, \eta^2 = 0.69$ )。自由探索課題時の saccade クラスターの値は、他の判断課題時よりも大きかった。加えて、1 要因分散分析の結果、触覚刺激の効果もまた統計的に有意であった ( $F(34, 140) = 5.63, p < 0.01, \eta^2 = 0.18$ )。シリコンゴムやアルミ、ゴムシートにおける saccade クラスターの値は気泡緩衝材やセルローススポンジ、フェイクファーよりも大きかった。

次に push クラスター (図 2.1.11(e)) について、1 要因分散分析の結果、課題の効果は統計的に有意であった ( $F(4, 170) = 41.56, p < 0.01, \eta^2 = 0.30$ )。硬さ-柔らかさ判断課題時の push クラスターの値は、

自由探索課題時よりも大きかった。加えて、1 要因分散分析の結果、触覚刺激の効果もまた統計的に有意であった ( $F(34, 140) = 7.58, p < 0.01, \eta^2 = 0.46$ )。ゴムシート、ラワン木材、ウレタンフォームにおける push クラスタの値はシープボアや人工芝、フェイクファーよりも大きかった。

最後に rub クラスタ (図 2.1.11(f)) について、1 要因分散分析の結果、課題の効果は統計的に有意であった ( $F(4, 170) = 41.56, p < 0.01, \eta^2 = 0.30$ )。硬さ-柔らかさ判断課題時の push クラスタの値は、自由探索課題時よりも大きかった。加えて、1 要因分散分析の結果、触覚刺激の効果もまた統計的に有意であった ( $F(34, 140) = 44.36, p < 0.01, \eta^2 = 0.20$ )。凹凸シリコンシートやシリコンゴム、プラスチック人工芝における rub クラスタの値はウレタンフォームやサドルレザー、ウレタンレジンよりも大きかった。

硬さ-柔らかさ判断課題において push クラスタが大きく、stroke クラスタが小さくなる傾向は、先行研究とも一致する [26, 29, 46]。硬さ-柔らかさ判断課題においては、押し込み動作によって皮膚変形を作り出すことが、なで動作によって皮膚振動を作り出すことよりも重要なためと考えられる。また、粗さ-なめらかさ判断課題や粘つき-滑り判断課題において stroke クラスタが大きくなる傾向もまた先行研究と一致する [26, 29, 46]。粗さ知覚と関連する皮膚振動 [51] や、粘つき知覚を作り出す表面摩擦と関連する皮膚振動 [40] をつくりだすなで動作が、これらの判断において有用なためであると考えられる。温かさ-冷たさ判断課題において、stroke クラスタと push クラスタが小さくなる傾向も先行研究と一致する [26, 46]。能動的な手の運動は温度知覚を抑制することが知られていることから [52, 53]、実験参加者はなで運動や押し付け運動を控えた可能性がある。自由探索課題においては、stroke や push、rub といった動作が小さい一方で、latency や saccade といった動作が大きくなる傾向がみられた。

## 2.1.8 考察

### 触覚探索運動による触覚属性評価値の説明力

本実験の結果は、触覚属性の判断課題時における触覚探索運動はその触覚属性の評価値を 47-81% 説明できることを示している (図 2.1.8)。更に、自由探索課題時 (実験参加者が特定の触覚属性を判断する必要がない課題) における触覚探索運動であっても、粘つき-滑りの評価値や温かさ-冷たさの評価値を 41-47% 説明できることがわかった ( $r^2 = 0.41 - 0.47$ , 図 2.1.8)。自由探索課題中の触覚探索運動であっても、これら二つの触覚属性の評価値と相関を持った理由について考察する。その理由の 1 つとして、触覚探索運動が触覚刺激表面の物理特性に直接影響されることが挙げられる。図 2.1.1 に示したように、触覚探索運動は課題だけでなく [26, 27, 29, 31, 32, 33, 34]、触覚刺激のテクスチャ表面にも影響を受ける [27, 28, 29, 30, 35]。もし、触覚属性の評価に影響する触覚刺激表面の物理特性が触覚探索運動にも影響するならば、実験参加者がどんな課題を行っていたかに関係なく、触覚探索運動は触覚属性の評価値と相関するであろう。実際、2.1.7 における実験結果は、それぞれの運動クラスタが課題によらず触覚刺激によって影響を受けることを示しており、触覚刺激による触覚探索運動の直接変調を支持するものである。一方で、他に考えられる理由として、自由探索課題の初期段階において得られた何かしらの触り心地が、その触り心地をもっと得るために特定の触覚探索運動を誘発させた可能性も考えられる。

先行研究では、粗さ評価と押付力の間に 0.80-0.95 の相関係数  $r$  (0.64-0.90 の決定係数  $r^2$  に相当すると考えられる) が報告されている [39]。また、粘つき評価となで速度の間に 0.94 の相関係数  $r$  (0.89

の決定係数  $r^2$  に相当すると考えられる) が報告されている [29]。一方で、今回の実験においては、全ての運動クラスタを用いても粗さ-なめらかさ評価値と粘つき-滑り評価値の決定係数  $r^2$  はそれぞれ 0.42 と 0.81 であり、先行研究で報告されているものよりも説明力が低い。この理由の 1 つとして、実験参加者が触覚刺激や自身の手運動に関する視覚情報を使うことができたことが挙げられる。人間は触覚刺激の見た目のみを用いてもある程度その触覚属性が推定できることが知られており [54, 55, 56, 57]、視覚情報を用いることができた今回の実験参加者は、先行研究での視覚情報を使うことができなかった実験参加者よりも触覚探索運動を能動的に行わなかった可能性がある。実際、形状判断においては視覚情報を使える場合には触覚探索が抑制されることが報告されており [58]、同様のことが今回の実験でも生じた可能性がある。

異なる判断課題における運動クラスタも、触覚属性評価値を説明できることが多かった。この結果は、触覚判断課題中の手の動きは概して触覚属性評価値の情報を持っていることを示唆する。いくつかの例外としては、温かさ-冷たさ判断課題における運動クラスタは粗さ-なめらかさ評価値を説明できず (図 2.1.8(b))、その逆もまた然りであった (図 2.1.8(d))。このことから、粗さの判断と温かさの判断に用いられる戦略が互いに大きく異なっていることが示唆される。

#### 手の運動クラスタの貢献

本研究で示された触覚属性評価値と手の運動クラスタの間の関係は、先行研究での知見とよく一致する。硬さ-柔らかさ判断課題時の push クラスタと、硬さ評価値の間の相関 (図 2.1.9(a)) は先行研究でも報告されている [42, 43, 44]。自由探索課題においてはその相関が観察されなかったという結果も判断課題においては押し込み運動が戦略的に行われるという知見と一致するものである [43]。また、自由探索課題と粗さ-なめらかさ判断課題の両方において、stroke クラスタと粗さ評価値が負の相関を持つという結果 (図 2.1.9(b)) も先行研究で報告された知見と共通する [27]。粗さ-なめらかさ判断課題における rub クラスタ (本実験では指先の力を意味する) が粗さの評価値と有意な相関を持った。本実験における rub クラスタは、先行研究 [10, 27, 28, 39] で報告されてきた接触力と粗さ-なめらかさ評価値の間の関係を反映している可能性がある。自由探索課題と粘つき-滑り判断課題の両方において、stroke クラスタが粘つき評価値と有意な負の相関を持つという結果 (図 2.1.9(c)) もまた、先行研究における知見と一致する [29]。加えて、粘つき-滑り判断課題における rub クラスタもまた粘つき評価値と有意に相関した。刺激表面の摩擦の推定において rub 運動が貢献する可能性が考えられる [40]。温かさ-冷たさ評価値と有意に相関する運動特徴量は、温かさ-冷たさ判断課題時と自由探索課題時とで異なっていた (図 2.1.9(d))。しかしながら全体的に、温かいと評価された刺激よりも冷たいと評価された刺激に対して、大きな力を加える一方手の動きは小さくなる傾向があった。押し込み運動やこすりつけ運動によって接触領域を増やすことで、冷たさの精確な判断に貢献する可能性がある。別の可能性としては、これらの相関は冷たさというよりは硬さの特性を反映していることが考えられる。実際、硬さと冷たさの評価値は今回の実験においては高い相関を持っていた ( $r = 0.73$ )。また、食品パッケージや家具に用いられるテクスチャの触覚デザインの研究においても、素材表面の硬さと冷たさ、コンプライアンスと熱伝導率の間に相関が報告されている [59]。手の触覚探索運動と温かさ-冷たさ評価値の間の関係を明らかにすることが今後の研究において必要である。

## 目の運動クラスタの貢献

これまでの研究において触覚探索における眼球運動は調べられて来なかったが、今回の実験から saccade クラスタと fixation クラスタが触覚属性評価値と有意な相関を持つことがあることを示した。これらのクラスタは、触覚評価値と正負反対方向に相関する傾向があり、これは saccade クラスタと fixation クラスタが負の相関を持つことに起因するものであろう（表 2.1.1）。特に、対応する判断課題時における saccade クラスタは、fixation クラスタよりも触覚属性評価値と相関することが多かった。

今回の結果では、saccade クラスタは滑らかさ評価値や粘つき評価値と滑り評価値と相関した。これは、stroke クラスタが同様にこれらの評価値と相関し、また実験参加者の眼球は手の運動を追うことが多いことが知られている [60, 61] ことから、眼球-上肢間の運動協調によるものである可能性がある。

加えて、saccade クラスタは硬さ評価値や冷たさ評価値と相関した。これらの評価値においては、push クラスタや rub クラスタが saccade クラスタと同じ方向に相関する傾向が見られた。硬さや冷たさと関係する材質（例えば金属など）が眼球運動にも影響する可能性がある。例えば、表面の摩擦と光沢感が相関することが報告されているように [62]、硬さや冷たさと関係する物理特性が、視覚的質感にも影響を与えることで、結果として眼球運動に影響することが考えられる。

## 触り心地デコーディングへの示唆

本実験は、触覚探索中の手や眼球の運動の客観的計測から、主観的な触り心地評価をデコードできる可能性を検討するものである。しかしながら、より実践的には、今回の実験で用いたような 26 種類の運動特徴量全てを計測するのは現実的でない。これらの特徴量のうち、いくつかの特徴量が他の特徴量よりも有用である。触覚属性評価値と運動クラスタの間の相関分析の結果（図 2.1.9）から、全ての触覚属性評価値が、saccade クラスタ（もしくは saccade クラスタと負の相関をもつ fixation クラスタ）と stroke クラスタの両方もしくはどちらか一方と相関することがわかる。つまり、硬さ評価値は fixation クラスタと負の相関を持ち（図 2.1.9(a)）、粗さ評価値は stroke クラスタ、saccade クラスタと負の相関を持ち（図 2.1.9(b)）、粘つき評価値は stroke クラスタと負の相関を持ち（図 2.1.9(c)）、そして温かさ評価値は stroke クラスタと正の相関を、saccade クラスタと負の相関を持つ。これらの関係を図にしたものが図 2.1.12 である。この知見に基づけば、saccade クラスタと stroke クラスタに含まれる探索運動特徴量のみを計測することが、これら主観的な触り心地知覚を推定するための有用な方略となることが期待される。

また、先行研究でもよく示されてきた、硬さと冷たさの間の相関や、粗さと粘つきの間の相関が、これらの stroke クラスタや saccade クラスタとの相関の上でもよく再現されていることがわかる。前者については、高密度な刺激ほど熱伝導率が高いため、より冷たく、またより硬く知覚されと考えられる。後者については、表面摩擦が大きい刺激ほど、より粗く、またより粘つくと思われ知覚されと考えられる。これらの刺激の密度や表面摩擦と結びついた触覚探索運動が、冷たさと硬さ、粗さと粘つきの間の相関を再現していると考えられる。

### 2.1.9 本実験のまとめ

本実験では、触覚探索運動と基本的な触覚属性の評価値の間の体系的関係を調査した。その結果は、実験参加者が特定の触覚属性を判断する必要があった先行研究の結果を再現しただけでなく、例えば実験

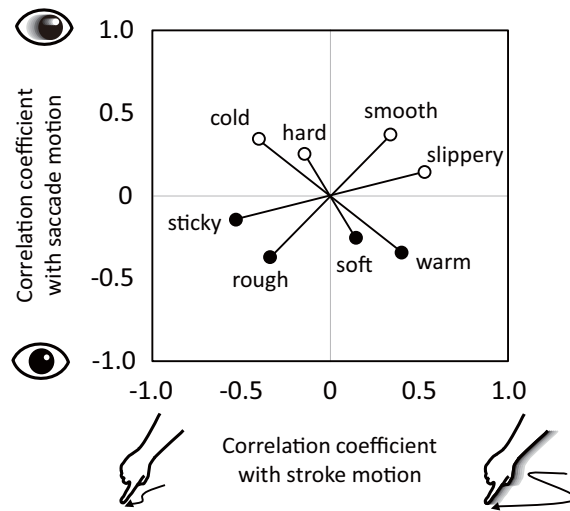


図 2.1.12 自由探索課題における、触覚属性評価値と saccade クラス、stroke クラスの間の相関

参加者が触覚属性を判断する必要がなかったとしても触覚探索運動が触覚属性評価値の情報をもつことがあることを示している。更に、これまでも調べられてきた手の運動だけでなく、眼球運動も触覚属性評価値の情報を持つことがあった。今後の研究では、より詳細な実験でこれらの関係の裏に潜むメカニズムが調べることが期待される。最後に、大きく速い眼球運動や撫でようとする手の運動が、デコーディングのように実験参加者が課題を判断する必要のない状況であっても、彼らの触り心地知覚を推定するのに役立つと議論した。本実験における結果は、より日常に近い状況において、触覚探索運動から触り心地の知覚をデコードするための実践的な手法について検討するにあたって重要な知見となるものである。

## 2.2 価値評価

我々が能動的に手を動かして物体の表面に触れるときには、粗さや硬さのような基本的触覚属性に関する触り心地だけではなく、その物体が自身にとってどれくらい好ましいかという価値に関する情動的・選好的な触り心地も生じる。このような情動的・選好的な触り心地知覚は情動的触覚 (emotional touch) と呼ばれ、粗さや硬さのような弁別的触覚 (discriminative touch) とは異なるメカニズムに基づくと考えられている [63, 64]。触覚探索中において、物体に触れた人がどのような情動的・選好的反応を生じたかを外部から推定することができれば、日常生活における我々の情動的・選好的反応の形成過程の理解や、消費者の購買意欲に訴えかける製品の触覚デザインに役立つことが期待される。

これまでの感性的判断と結びついた手の動きについては、特にコミュニケーションにおける情動的触覚の研究で調べられてきた。実験参加者にパートナーの腕や赤ちゃんの肌を触らせたときは 3-10 cm/sec の速さで触るのに対し、プラスチックマネキンの腕を触らせたときはそれよりも大きい速さでなぞることが多かった [65]。この 3-10 cm/sec の速さで実験参加者の腕を筆でなぞったときに、実験参加者のなぞりに対する「心地よさ」の評価が最大になることも知られていることから [66]、親しい人とのスキンシップと関連する手の動きと考えられる。また、C 触覚繊維 (C-tactile afferent) という有毛部の機械受容器の応答も同じなぞり速さにおいて最大になることが知られており [66]、C 触覚繊維が手のなぞり動作と心地よさの評価を結びつけていると予想される。同様に、触り方ではなく、触られ方ではあるものの、刺激で腕をなぞるときの押付力が小さいほど、また、なぞる速度が遅いほど好ましき評価が高くなるという報告もある [64, 67, 68]。しかし、心地よさの評価と C 触覚繊維の応答が 3cm/sec で最大になるという傾向は、腕をなぞる刺激が 32 °C の肌程度の温度で生じ、18 °C や 42 °C のときには心地よさ評価は速さに対して単調増加する [69] ことから、ここでの手のなぞり動作は人間同士の肌の接触に特化したものと考えたほうが良さそうである [70]。

人間の肌以外の材質に対して、これまでの触覚における情動反応や選好反応を調べた研究では、刺激表面の物理特性が様々な物体表面における好ましき・心地よさ評価と関連することが報告されている。例えば、紙やすりや段ボールのような刺激や、布やアルミホイルのような刺激に対しては、滑らかさ評価値が高い刺激ほど、好ましき (preference) 評価値も高い傾向があった [8, 71]。食品パッケージや家具に用いられるテクスチャ刺激においては、好ましき (liking) 評価が柔らかさ評価値やコンプライアンス計測値、粘つき評価値と相関した [59]。粘りのある対象は嫌悪感 (disgust) を惹起することも知られている [72]。0.52mm の突起が 0.72mm-0.98mm の間隔で並んだプラスチック刺激においては、間隔が広くなるほど粗さ評価値と不快さ (unpleasantness) 評価値が相関し、またなぞるときの手の速度が大きくなるほどどちらの評価値も大きくなることが示されている [73]。受動的に刺激に触れているときには、刺激の粗さ評価値や、表面摩擦が心地よさ評価と負の相関を持つ一方で、刺激表面の温度や刺激を指に押し付ける力の強さは心地よさ (pleasantness) 評価と相関を持たなかった [74]。主成分分析 (principal component analysis) を用いた解析では、情動的触覚は、触覚刺激の流動性、粗さ、変形しやすさ、繊維性、重さ、粒度が重要であるということが示されている [75]。やや変則的な研究としては、乳児は他の物体よりも植物を触りたがらない傾向 (reluctance) があることも報告されており、植物に対する先天的な忌避の存在も示唆される [76]。

これらの柔らかさや粗さ、粘つきが選好と関連する知見と、前節での実験で得られた柔らかさ評価、粗さ評価、粘つき評価が触覚探索運動で説明できるという知見に基づけば、触覚探索運動を計測・解析

することで触れた触覚刺激に対する好ましき評価も説明できる可能性がある。先行研究では、能動的に好ましさを判断するときの手の速度や垂直方向への押付力は好ましき評価と相関がないが、せん断方向への押付力や動摩擦（指先のせん断方向の力/垂直方向の力）、せん断方向の力の空間周波数分布といった触覚刺激の物理特性に関連するパラメタが好ましき評価と相関することが報告されている [77]。しかし、この実験で用いられた触覚刺激は長さ 77mm、幅 32mm と小さく、触り方が限定されてしまう。そこで、実際の触覚探索運動との関係を調べるためには、制限の小さい状況下で調べる事が重要である。

この実験では、手の動きが好ましき評価の客観的計測手法としてどの程度有用なのかを検証するために、そもそも手の動きがどれくらい触った対象の好ましき評価の情報を持っているのかを調べることを目的とする。実験では、実験参加者たちは 3 つの異なる触り方条件下で様々な触覚刺激を触り、触った刺激の好ましき度合いを評価した。はじめに、そもそも触り方によって好ましき評価が変わるのかどうかを調べた。もし変わるのであれば、好ましき知覚の客観評価において、触覚刺激の物理特性のみの計測に対する、手の動きの計測のアドバンテージが示されるであろう。次に、手の動きをもとに実験参加者による好ましき評価値を予測する統計モデルを作成し、このモデルの予測性能を評価することで、どのような手の動きの特徴が、触れた対象に対する好ましきの情報をどのくらい持っているのかを調べた。またこのモデルが、異なる触り方条件に適用したときにどれくらいロバストに説明できるか、このモデルがどれくらい触覚刺激の効果を介しているのかを調べた。最後に、実際の客観計測手法への適用にあたって、どのくらいの時間手の運動を計測すればよいのかを検討するために、好ましき予測モデルを手の動きの時系列データに適用することで、説明力の時間推移を解析した。

### 2.2.1 実験

#### 実験参加者

本実験には、5 名の女性と 5 名の男性（20-37 歳）が実験に参加した。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）、触覚、運動機能を有していた。全員、心理物理実験に関する専門知識を有せず、実験の目的も知らされなかった。本実験のプロトコルは NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験装置と刺激

実験装置は図 2.2.1 に示すとおりである。実験参加者は触覚刺激が置かれたテーブルの前に座った。実験参加者は黒いプラスチック板によって手元と触覚刺激を視覚的に観察することができなかった。図 2.2.2 に示すような、布、革、金属、木などの 30 種類の材質を触覚刺激として採用した。全ての触覚刺激の表面は 100 mm × 100 mm の正方形に、厚みは 30 mm になるように調整された。右手の人差し指の爪上に取り付けた再帰性反射材マーカーを OptiTrack システム（OptiTrack, Flex13, 120 Hz）によって計測することで、人差し指の位置を記録した。また、触覚刺激を押し込む力を触覚フォースプレート（テック技販, 1000Hz）によって記録した。

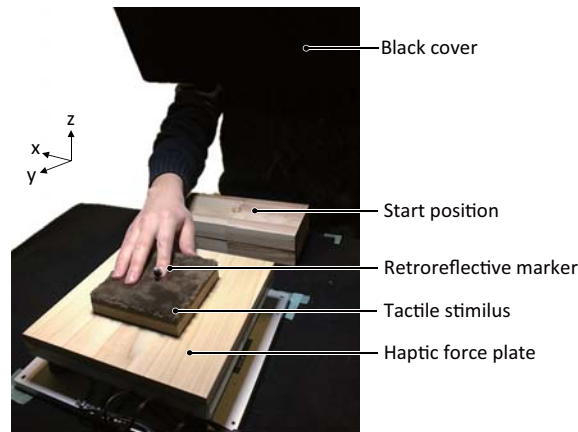


図 2.2.1 実験のセットアップ



図 2.2.2 実験で用いた触覚刺激

## 実験手続き

この実験は2つのセッションからなる。最初のセッションでは実験参加者は、触覚刺激の好ましさの度合いを判断するために自由に触覚刺激に触れるように教示された（非制限探索条件）。実験参加者は右手の人差し指を開始位置に置いた状態で待機し、ビーブ音が提示されたら触覚探索を開始した。視覚刺激や聴覚刺激における選好を調べた研究では、提示時間が長い刺激や提示回数が多い刺激などより馴染みのある刺激をより好ましく評価しやすいという単純接触効果（Mere exposure effect）が知られており [78, 79, 80, 81]、この効果が触覚刺激においても生じることが報告されているため [82]、探索時間の違いによる実験参加者の判断への影響をコントロールする狙いで、触覚探索時間を5秒間に固定した。5秒後にもう一度ビーブ音が提示され、そのビーブ音を聞いたら開始位置に右手を戻した上で、触覚刺激がどの程度好ましかったかを7段階でキーを押して回答するように教示した。30種類の触覚刺激をランダムな順番で提示し、それを7回繰り返した。

2つ目のセッションは、実験参加者が触覚刺激表面を「なで動作のみ」を用いて好ましさを判断する（なで条件）、もしくは「押し込み動作のみ」を用いて好ましさを判断する（押し込み条件）ように教示された以外は1つ目のセッションと同じである。その際の手の速度や押し付ける力については一切教示し

なかった。これら 2 つの触り方条件を 30 種類の触覚刺激を提示し終えるごとに交互に行った。実験参加者一人あたりのトータルの試行回数としては、実験条件 3 条件（非制限探索条件、なで条件、押し込み条件）× 触覚刺激 30 種類 × 繰り返し 7 回の 630 回を、1 日 8 時間 × 2 日間の合計 16 時間で行った。

### 2.2.2 結果：触り方が好ましさ評価に与える影響

はじめに、触覚的好ましさが触り方に影響を受けるのかどうかを評価するために、各条件における好ましさ評価を比較した。その結果を図 2.2.3 に示す。この結果から実験参加者は一般的にそれぞれの触覚刺激の好ましさレベルを区別して判断できることが示唆される。触り方条件（非制限探索条件、なで条件、押し込み条件）と触覚刺激を要因とした、繰り返しのある二要因分散分析の結果によると、触覚刺激の効果 ( $F(29, 261) = 21.5, p < 0.01, \eta^2 = 0.59$ ) と交互作用 ( $F(58, 522) = 5.22, p < 0.01, \eta^2 = 0.04$ ) が有意であった一方、触り方条件の効果は有意でなかった ( $F(2, 18) = 2.94, p = 0.08, \eta^2 = 0.00$ )。交互作用について、下位検定の結果、なで条件における好ましさ評価は非制限探索条件における好ましさ評価と変わらない一方、押し込み条件においていくつかの刺激で好ましさ評価が変化し、中央くらいの評価に寄っていく傾向がみられた。これらの結果から、好ましさ評価の判断は触覚刺激の表面をどう探索するかによって影響を受けることが示唆され、好ましさ反応の予測においては触覚刺激表面の物理計測だけでなく、どのような触覚探索運動を行っているかを考慮することが重要であることを意味している。

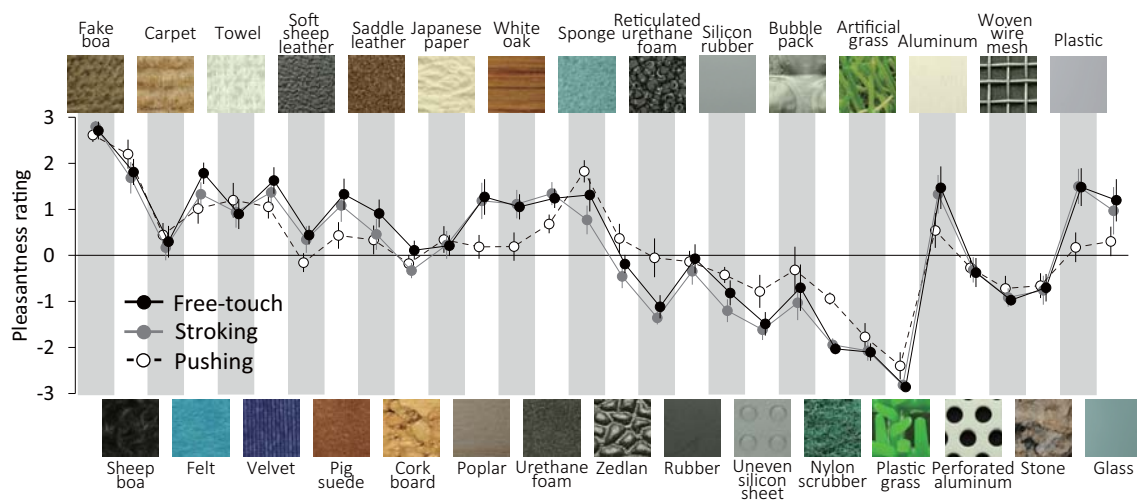


図 2.2.3 各触覚刺激に対する好ましさ評価。黒丸が非制限探索条件、灰色の丸がなで条件、白丸と点線が押し込み条件である。エラーバーは標準誤差を表している。

### 2.2.3 結果：手の動きの特徴量と好ましさ評価の関係

次に、予測モデルを構築するために、非制限探索条件における実験参加者の手の動きを解析した。計測された指の動きと押付力のデータから 33 種類の手の動きの運動特徴量を計算した（図 2.2.4 参照）。これらは、手が刺激に触れた時点から 1 試行が終わるまで（5 秒経過のピープ音が鳴るまで）の全時間に関する運動特徴量である。例えば、総移動距離（Travel distance）は手の移動距離に触れ始めてから

1 試行が終わるまでに対して合計したものであり、速度や加速度の平均 (Average of speed, Average of acceleration) は手の移動速度や移動加速度を触れ始めから 1 試行の終わりまでについて平均したものである。刺激の触れ始めの時点は、Z 方向 (押し込み方向) の手の移動速度が、最小値を示したあとに最初に 0 になる時点と定義された。それぞれの運動特徴量は各実験参加者で触覚刺激に対して標準化 (平均が 0、標準偏差が 1 になるように正規化) した後に、実験参加者間で平均した。重回帰分析における多重共線性と過学習を防ぐために、Ward 法を用いた階層クラスタ分析を用いて、これらの運動特徴量をいくつかの運動クラスタに分類した。Pseudo-F の指標 [83] が最も大きくなるクラスタ数を調べたところ、4 クラスタへの分類が最適 (最もクラスタ間が疎かつクラスタ内が密) であるとわかった。クラスタ分析の結果を図 2.2.4 の上部に示す。4 つの運動クラスタは、それぞれ X-Y 平面における手の動きの特徴量 (なで動作に関連するクラスタと予想できる)、Z 軸方向の運動特徴量 (叩き動作関連するクラスタと予想される)、指の加速度や接触力の微分値 (これまでの研究から摩擦と関連するパラメータである [40])、そして接触力に関する特徴量 (押し込み動作関連するクラスタと予想される) である。これらの運動特徴量と好ましき評価の間の相関を Spearman 相関分析を用いて調べた (図 2.2.4 の下部)。X-Y 平面上でのなで動作と関連すると期待される 1 つ目の運動クラスタは、好ましき評価と有意な正の相関を持つ傾向があった。Z 軸上の叩き動作と関連すると期待される 2 つ目のクラスタと、表面摩擦に関連すると期待される 3 つ目のクラスタは、好ましき評価と負の相関をもつか、もしくは相関しない傾向があった。押し込み動作と関連すると期待される最後のクラスタは好ましき評価との相関を持たなかった。これらの結果は、なで動作が押し込み動作よりも好ましき判断において有用であることを示唆するものである。

#### 2.2.4 結果：好ましき評価を予測するモデル

続いて、非制限探索条件における各運動クラスタから代表的な運動特徴量を取り出し、組み合わせることで好ましき評価を予測するモデルを作成した。4 つの運動特徴量の代表値の組み合わせを総当たりで重回帰分析の説明変数として用いて、3 分割交差検定によって最も説明力の高い運動特徴量の組み合わせを調べた。その結果、指先速度の平均 (X 軸)、総移動距離 (Z 軸)、押付力の変化率 (Y 軸)、押付力の分散 (3 次元空間) が説明変数として採用された (表 2.2.1)。非制限探索条件における、これら 4 種類の運動特徴量を用いた重回帰分析によって、好ましき評価を説明したときの決定係数は 0.67 であり、この決定係数はチャンスレベルよりも大きかった (図 2.2.5 A)。非制限探索条件で構築されたこの重回帰モデルの頑健性を検証するために、なで条件のデータや押し込み条件のデータに適用し、評価した。このモデルをなで条件における手の動きに適用したときの好ましき評価の決定係数は 0.52 ( $p < 0.01$ ) であり、押しつけ条件における手の動きに適用したときの好ましき評価の決定係数は -0.32 ( $p = 0.67$ ) であった。これらの結果は、触覚探索中の手の動きの解析から、非制限探索条件やなで条件における好ましき評価を 52-67% の成績で説明することができる一方で、押し込み条件における好ましき評価は説明できないことを示している。

#### 2.2.5 結果：運動特徴量の時間推移

実際に手の動きから好ましき評価を予測することを考えると、触れ始めてからどのくらいの時間までのデータを解析すれば十分な予測性能が得られるのかを調べることは重要である。そこで、先程非制限

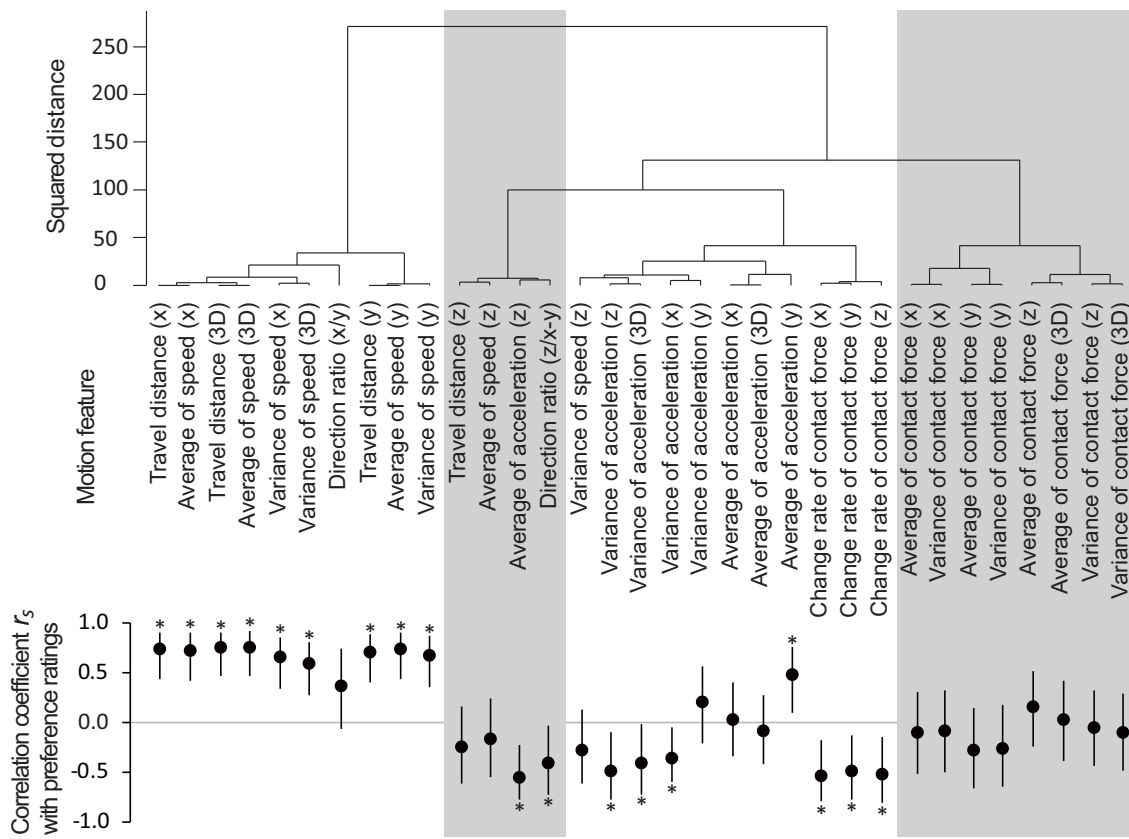


図 2.2.4 手の動きの特徴量の分類（上）と、好ましき評価との相関（下）。手の動きの特徴量の分類には階層クラスタ分析を用いており、それらの特徴量クラスタ間の距離を樹形図として示している。手の動きの特徴量と好ましき評価の間の相関は、実験参加者間で平均された値をプロットしている。エラーバーはブートストラップ法 [49] によって求められた 95% 信頼区間を示している。アスタリスクはランダム化検定（次章を参照）により相関係数がチャンスレベルよりも大きいと判断されたことを表している。

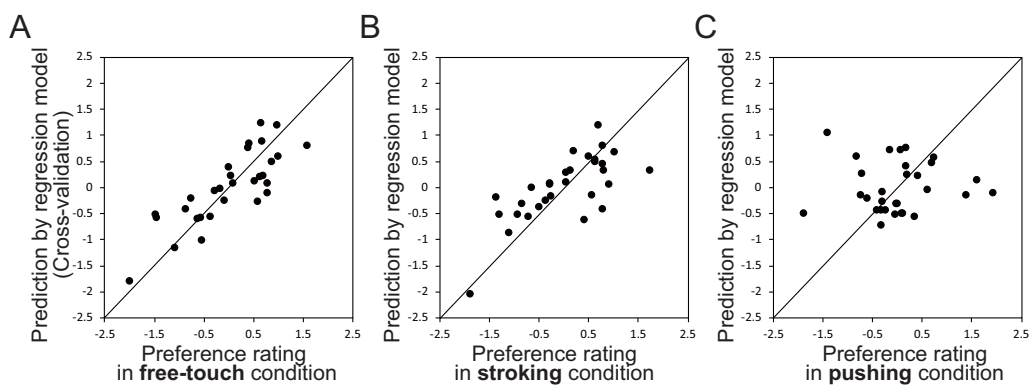


図 2.2.5 4 運動特徴量を説明変数とした重回帰モデルによる、好ましき評価の予測成績。 A: 非制限探索条件における手の動きに重回帰モデルを適用したときの予測値（縦軸）と、実際の好ましき評価。 B: なで条件における手の動きに重回帰モデルを適用したときの予測値（縦軸）と、実際の好ましき評価。 C: 押し込み条件における手の動きに重回帰モデルを適用したときの予測値（縦軸）と、実際の好ましき評価。

表 2.2.1 4 種類の運動特徴量を用いて好ましき評価を重回帰分析した結果。アスタリスクは統計的に有意な予測子であることを意味する。

| $F(4, 25)$ | $p$  | $r^2$ | Coefficients         |                     |                                  |                                | Intercept |
|------------|------|-------|----------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|
|            |      |       | Average of speed (x) | Travel distance (z) | Change rate of contact force (y) | Variance of contact force (3D) |           |
| 12.68      | 0.00 | 0.67  | 0.95*                | -0.24               | -0.06                            | 0.52*                          | 0.00      |

探索条件において得られた好ましき評価の予測モデルを、先程の解析のように手の動きの特徴量の全時間平均値に対して適用するのではなく、探索中の各時刻について適用することで好ましき評価の予測値の時間推移を得た。具体的には、指先速度の平均（X 軸）、総移動距離（Z 軸）、押付力の変化率（Y 軸）、押付力の分散（3 次元空間）のそれぞれの時間推移を計算し、それらの値を標準化した上で、それぞれにモデルの重みをつけて、時点ごとに和をとった（図 2.2.6）。このようにして得られた各刺激の好ましき評価の時間推移が図 2.2.7 A のようになる。各時点における刺激 30 種類の好ましき予測値が、実際の実験参加者によって回答された好ましき評価値をどれくらい説明できるかを解析した結果（すなわち各時点における重回帰分析の決定係数）を図 2.2.7 B に示す。この結果から、0.35 秒を超えたところで手の動きによる決定係数はランダム区間より大きくなり、0.5 程度に向かって緩やかに上っていくことがわかる。触り始めてから 2 秒間データを計測、解析すれば、好ましき評価値を 45% 説明できることがわかる。

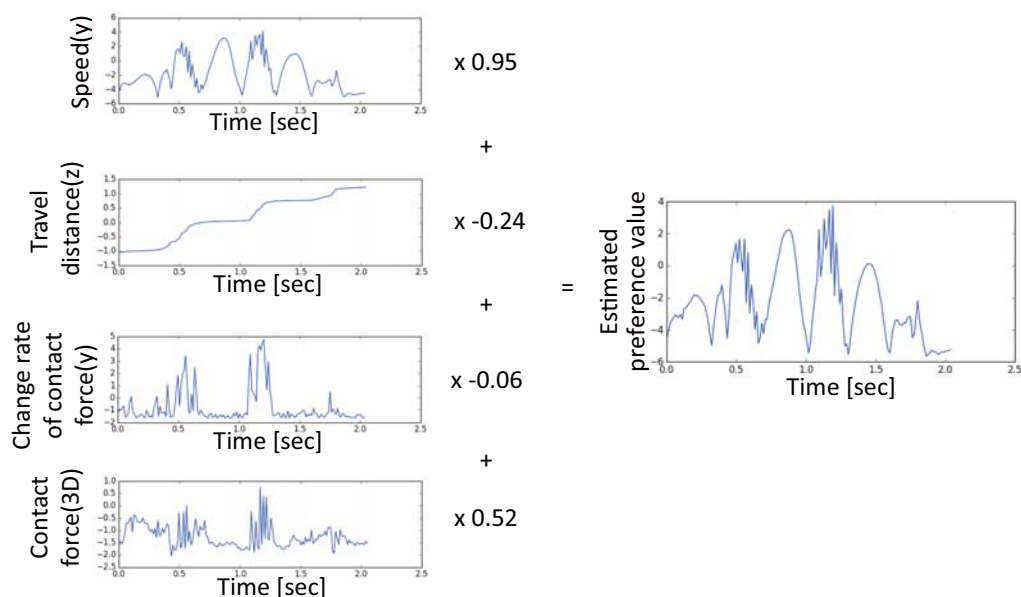


図 2.2.6 4 運動特徴量の時系列データを求め、モデル式に代入することで、好ましき評価値の時系列予測値を求める。

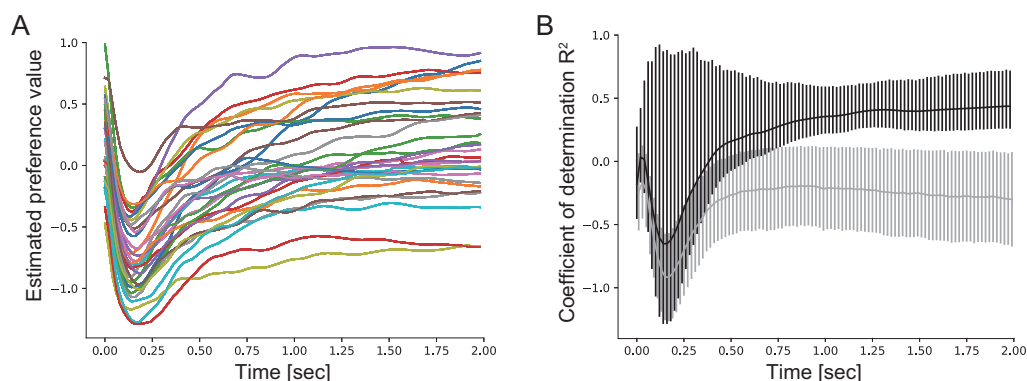


図 2.2.7 4 運動特徴量による時系列データ解析。 A : 30 触覚刺激それぞれの好ましき評価の予測値の時間推移。 B : 各刺激の実際の好ましき評価を A における 30 触覚刺激の好ましき評価値がどれだけ説明できているかを決定係数を算出した。黒線が決定係数の時間推移を、黒線のエラーバーが bootstrap 法で計算された決定係数の 95% 信頼区間を示している。灰色の線は、決定係数を求めるためのデータセットをランダムシャッフルして対応関係をなくした上で求められた決定係数の平均と 95% 信頼区間を表しており、チャンスの範囲を表している。

## 2.2.6 結果：刺激による説明力

これまでの解析を通して、手の動きが好ましき評価に関する情報を持っていることを明らかにしてきた。ここでは、一般化線形混合モデルを用いて、なぜこのような手の動きが好ましき評価に関する情報を持っているのかについて考察する。重回帰分析や分散分析ではなく、一般化線形混合モデルを採用する理由は、大きく分けて 2 つある。1 つは、重回帰分析や分散分析のように、データの分散として正規分布を、回帰方法として直線回帰を採用する必要がないことである。本実験における 7 段階評定課題のように、上限下限が存在するデータに対しては、上限下限付近でデータの分散として正規分布を仮定したり、回帰方法として直線回帰を採用したりすると、回帰モデルからの予測値が上限や下限を超えた値になってしまうことがある。一方で、一般化線形混合モデルにおいては、データの分散として二項分布を、回帰方法としてロジットリンク関数を用いることができ、より自然な仮定のもとで解析を行うことができる。そして、もう 1 つ、本解析において特に重要な理由としては、一般化線形混合モデルでは変量効果 (random effect) を指定できることである。全ての実験参加者のデータと全ての触覚刺激のデータをひとまとめにして重回帰分析を行ってしまうと、好ましき評価と手の運動特徴量の間に相関が見出されたときに、実験参加者による効果 (つまり、手をよく動かす人ほど好ましいと答える傾向) や触覚刺激による効果 (つまり、手の動きが大きくなる刺激ほど好ましいと回答される傾向) と、手の動きそのものの効果 (つまり、ある実験参加者の中で、同じ刺激を触っていても、触り方が変わると好ましきが変わるという効果) を分離することができない。一方で、触覚刺激と実験参加者を変量効果として扱うことで、手の動きそのものの効果がどの程度存在するのかを調べることができる。なお、先の重回帰分析では各実験参加者でデータの範囲を標準化した上で平均していたため、実験参加者による効果はないものとみなせる。そこで、本解析では、実験参加者よりも触覚刺激の効果の有無が論点となる。

本解析では、一般化線形混合モデルに用いる説明変数として、図 2.2.4 に示した手の運動特徴量のうち、図 2.2.8 に示す 12 種類の運動特徴量を採用した。それ以外の 3 次元空間上でのパラメータや分散パラメータ、積分パラメータのようなパラメータは全て他のパラメータとの重複が大きいことがわかったため除外し

た（例えば、3次元空間上での移動速度は、各軸での移動速度を足し合わせたものと高い相関を持つ）。まず、実験参加者と触覚刺激を変量効果とした上で、全ての運動特徴量の組み合わせによる一般化線形混合モデルを総当たりで行い、予測性能の高さを表す AIC（Akaike's information criteria）を計算した。その結果、図 2.2.8 に示す運動特徴量を組み合わせたモデルが最も AIC が小さい（予測性能が高い）モデルであると判定された。続いて比較のために、運動特徴量を 1 つも採用しないミニмумモデル（すなわち、実験参加者と触覚刺激の変量効果のみを考慮したモデル）と、全ての運動特徴量を採用したフルモデルについて一般化線形混合回帰を行った。それらの結果を、図 2.2.9 に示す。AIC としては図 2.2.8 に示した運動特徴量を用いたモデルが一番良い予測性能を示している一方で、 $r^2$  としてはミニмумモデルが一番良い説明性能を示している。これらの値にはほとんど違いがないことから、図 2.2.8 の運動特徴量を採用したモデルとミニмумモデルに差がない、すなわち、運動特徴量を採用することによって新たに説明できる部分は少ないことを示している。よって、運動特徴量によって好ましき評価を説明できるモデルは、触り方の効果そのものというよりは、触覚刺激の効果によるところが大きいと考えられる。

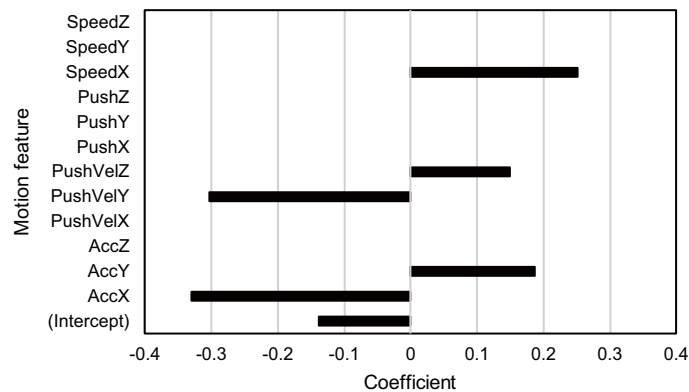


図 2.2.8 実験参加者と触覚刺激を変量効果と指定した一般化線形混合モデルにおける各運動特徴量の係数。

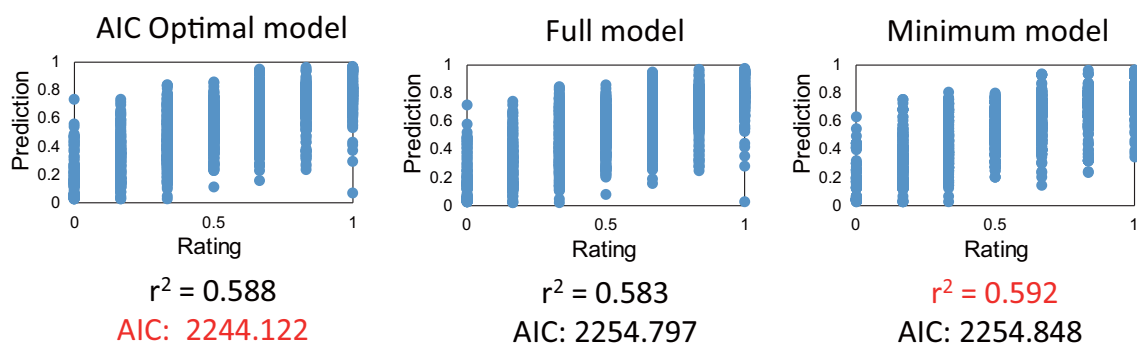


図 2.2.9 AIC が最小になるように運動特徴量を採用したモデル（左）、全ての運動特徴量を採用したモデル（中央）、実験参加者と触覚刺激を変量効果として指定しただけのモデル（右）のそれぞれによる、好ましき評価の予測性能（AIC）と説明性能（ $r^2$ ）。

### 2.2.7 考察

実験結果から、非制限探索条件において、指先の移動速度や摩擦に関連する運動特徴量が好ましき評価と有意な相関を示した。指先の速度はなぞり動作と密接に関連していると期待され、なぞり動作や摩擦は肌の表面上における振動を作り出すことに貢献すると考えられる。よって好ましき評価には皮膚振動が重要であることが示唆される。一方で、先行研究では好ましき評価と手の移動速度の間には相関がないことを報告しているものがある [77]。この先行研究では、刺激サイズが小さくかつ長方形である上、10 回の連続往復運動を行うように教示しているため、触覚探索運動が大きく制限されていると考えられる。対象的に、本実験では刺激は大きく正方形であり、非制限探索条件では触り方に関する教示がないため、制限の少ない触覚探索が可能である。このことが、好ましき評価との相関に関する先行研究との結果の差異につながったと考えられる。またこのことは、好ましき評価と相関するなぞり速度の変化は、刺激の物理特性によって否応無しに誘発されるものではなく、実験参加者自身が能動的に行っているものであると期待される。

一方で、非制限探索条件において、押し込み動作に関連する運動特徴量は好ましき評価と相関を持たなかった。更に、押し込み条件において触覚刺激の好ましき評価が、中央（どちらでもない）に近づく傾向が見られた。押し込み動作は硬さ調査と関係があることを考えれば [26, 42]、少なくとも本実験においては、触覚刺激の硬さは好ましき評価と相関しない可能性がある。実際、ウレタンスポンジのような柔らかい触覚刺激にも、アルミニウムのような硬い触覚刺激にも、好ましいと評価された触覚刺激が存在する。物理特性の影響を検討するためには、今回実験に用いた触覚刺激について、物理特性と触り心地知覚の間の関係を調べる必要がある。

### 2.2.8 本実験のまとめ

本実験では、触覚探索運動が触れた触覚刺激に対する情動的反応に関する情報を持っているかどうかを調べるために、触覚探索運動と好ましき評価の間の関係を多変量解析を用いて調べた。その結果、なぞり動作が好ましき判断にあたって有用であり、なぞり動作を計測・解析することで好ましき評価を推定できる可能性を示した。

## 2.3 価値評価の時間ダイナミクス

前節の実験において、触覚探索運動と好ましき評価の関係を探るために、1 試行内の手の動きを全時間にわたって平均、和、もしくは分散を計算することで特徴量を求めた。このような 1 試行内の触覚探索運動の要約統計量を算出する手法は本研究だけでなく、触り心地と触覚探索運動の関係を調べる研究で広く用いられており、触り心地とのロバストな相関があることが示されてきている [27, 28, 29]。一方で、手の動きが 1 試行を通してずっと同じ状態にあるとは考えにくい。実際、先行研究において、人間が触れたものの触り心地を判断する際にはいくつかの触り方のモードを順番に使用すること（例えば、全体を抱え持つようにして触れることでおおまかなテクスチャを判断したあとに、なで動作や押し込み動作のような詳細なテクスチャを調べる手の動きを行う）[84, 85, 86, 87] が知られている上に、この触り方モードの切り替えをロボットアームに行わせると触覚刺激分類が高い成績で達成できるというように構成論的検証も行われている [88, 89]。触り方のモードだけでなく、1 試行内でなぞり速度や押付力が変化することも示されている [27, 29, 40, 48, 90]。そこで、要約統計量ではなく、触り方の時間変化ダイナミクスがどのように好ましき評価の情報をもつことを調べることは、好ましきのデコーディングに有用な知見を与えてくれるだけでなく、好ましき知覚の形成過程を明らかにするためのヒントを与えてくれる可能性がある。そこで本解析では、前節で得られた実験データに対して時系列解析を行い、好ましき評価との相関を調べることで、時間変化ダイナミクスがどのように好ましき評価とかわ変わっているのかを調べることができる。

ここで時系列解析として、リカレンスプロットとそれを定量化する解析、すなわちリカレンス定量化解析（Recurrence quantification analysis）を採用する。リカレンスプロットは時系列データの視覚化手法としてよく確立されている手法である [91, 92]（図 2.3.1）。リカレンスプロットでは、時系列の自己相関を調べることで、その時系列データがカオティックかどうか、決定論的挙動かどうか、予測可能かどうか、定常的かどうかなどを調べることができる。リカレンスプロットの定量化解析は、探索運動解析でも用いられてきた実績がある。例えば、レントゲン技師の専門家と学生それぞれがレントゲン写真を診断するときの探索眼球運動の違いをリカレンス定量化する試みや [93]、棒の長さを推定するときの棒の振り回し方に判断課題がどう影響するかをリカレンス定量化によって調べる試み [33] が行われている。そこで本解析では、前節の好ましき評価実験において好ましき評価と高い相関を示した指先の速度についてリカレンスプロットを作成し、指先速度のどのようなダイナミクスが好ましき評価の情報を保持のかについて、理解を深めることを目的とする。

リカレンス定量化解析によって、時系列のカオティックさ、決定論的挙動、定常性、予測可能性を調べることができる。これらは確かに時系列を特徴づける一方で、具体的な手の動作について理解するにはやや抽象的である。そこで、本解析では、まずこれらの時系列を特徴づける量を算出し、好ましき評価と相関をもつ特徴量を調べる。その特徴量が大きい手の動きと小さい手の動きを抽出し、その時系列パターンを観察することで、どのような手の動きの時系列が好ましき評価と関係するのかを考察していく。

### 2.3.1 解析方法

まず、手の動きの速さの時系列データの  $i$  番目の状態を  $v(i)$  とする。リカレンスプロットは図 2.3.1 に示すように、縦軸、横軸ともに時間である。縦軸上の時点  $i$ 、横軸上の時点  $j$  におけるリカレンスプ

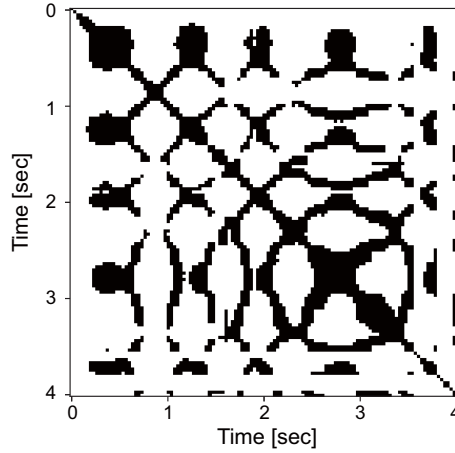


図 2.3.1 リカレンスプロットの例。ある時系列データについて、 $i$  時点と  $j$  時点の値が閾値よりも小さい場合、 $(i, j)$  は黒で示されている。

ロットを  $R(i, j)$  のように表すと、二点間の距離  $d$  を用いて、

$$R(i, j) = \begin{cases} 1 & (d(v(i), v(j)) < r) \\ 0 & (d(v(i), v(j)) \geq r) \end{cases}$$

と表現できる。ここで、 $r$  は閾値であり、全ての  $i$  と  $j$  について求めた  $d(v(i), v(j))$  の最小値と最大値がそれぞれ 0 と 1 になるようにスケーリングした上で、閾値  $r$  を 0.1 に設定した。また、手の運動データのサンプリングレートは 120Hz であるが、あまり高すぎると対角線近傍がほとんど 0 になってしまうため、サンプリングレートを 30Hz に落とした上でリカレンスプロットを作成した。本研究では、手の速度の時系列について理解を深める目的でリカレンス定量化解析を行っていることから、次元の再構成は行わなかった。得られたリカレンスプロットを特徴づけるために、次の 6 つの特徴量を計算した。

#### %RECUR

全ての点のうち、閾値を下回る点の割合を %RECUR と呼ぶことにする。閾値を下回る点が多いほど、速度が同じである時点が多い時系列であると解釈できる。一方で、これは偶然速度が同じになったのか、それとも予測可能かつ決定論的な時系列であるため閾値を下回る点が多かったのかは区別できない。

#### DET

上述の %RECUR について、偶然速度が同じになったため %RECUR が大きくなった場合は、リカレンスプロット上に小さな黒点がたくさん生じる。一方で、予測可能かつ決定論的な時系列に基づいて %RECUR が大きくなった場合は、ある程度の期間高い類似度をもった速度軌跡が生じるため、リカレンスプロットの対角線方向に黒い斜め線がたくさん生じる。DET は、この黒い斜め線の多さを特徴づけるものであり、全ての閾値以下の点（黒点）のうち、対角線方向の長さ 2 以上の斜め線をなす点の割合である。よって時系列が決定論的であるとき、DET は大きな値を示す。

#### $L_{max}$

$L_{max}$  はリカレンスプロットの対角線方向において、もっとも長い斜め線の長さである。もっと

も長い斜め線は、それだけの期間異なる時間における 2 つの速度軌道が似た挙動を示すことを表しており、時系列システムの安定性の指標となるものである。よって  $L_{max}$  が大きいほど、その時系列システムは安定である（摂動に対して頑健である）と解釈できる。

### ENTR

それぞれの長さ ( $l$ ) の斜め線がどれくらいあるかに関する確率分布を  $p(l)$  としたとき、その情報論的エントロピー  $ENTR$  を

$$ENTR = - \sum p(l) \ln p(l) \quad (2.3.1)$$

として定義する。特定の長さ ( $l$ ) の斜め線のみが生じる確率が高いとき  $ENTR$  は小さくなり、全ての長さの斜め線が等しく生じうるとき  $ENTR$  は大きくなる。そこで、 $ENTR$  は決定論的構造の複雑さを表していると考えられる。

### TREND

時系列システムがずっと同じ挙動をしているのか、それとも時間が経つにつれて挙動も変化するか、という時系列システムの定常性を表す指標として  $TREND$  を導入する。まず、対角線方向と平行なそれぞれの斜め列に対して  $\%RECUR$  を計算する（図 2.3.2 A）。これにより、対角線からの距離  $k$  と、 $\%RECUR$  の関係をプロットすることができる（図 2.3.2 B）。このプロットされた点について直線回帰を行い、その回帰直線の傾きを  $TREND$  と定義する。すなわち、時系列システムが定常であるとき、どれだけ対角線から離れても（どれだけ遠い時点の比較を行っても）、閾値を下回る点の割合は変化しないため、 $TREND$  は 0 に近くなる。一方で、時系列システムが非定常であるとき、一般に対角線から離れれば離れるほど閾値を下回る点の割合は減っていくため、 $TREND$  は大きな負の値を取る（例を図 2.3.2 C, D に示す）。

### SPEED

前節の実験では、指先速度が好ましき評価と高い相関を示すことが明らかになった。今回の解析において、上記の 5 種類の特徴量が指先速度と直接的、もしくは間接的に相関を持つかどうか、すなわち指先速度とは独立な特徴量かどうかを調べることは重要である。そこで、指先速度の試行内平均値を  $SPEED$  として扱う。

リカレンスプロットは対角線に対して対称であることから、これらのリカレンス特徴量は上三角行列に対してのみ計算を行った。

## 2.3.2 結果：特徴量と好ましき評価の相関

はじめに、それぞれの特徴量と好ましき評価の間の相関を、スピアマンの相関分析を用いて調べる。まず、 $\%RECUR$  と好ましき評価の間のスピアマン相関係数は図 2.3.3 に示すように -0.70 であり、それらのデータをランダム化したときの相関係数の 95% 信頼区間よりも小さかった（つまり、この相関係数の値は偶然では起こりにくいと解釈できる）。このことから、閾値を下回る点が多い、すなわち手の移動速度が似ている時点が多いほど、好ましき評価は低くなる傾向があることがわかる。実験参加者 10 名の  $\%RECUR$  と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を表 2.3.1 に、散布図を図 2.3.4 に示す。10 番目の実験参加者のように高い負の相関を示す実験参加者もいれば、1 番目の実験参加者のようにほとんど 0 の相関を示す実験参加者もいるものの、全ての実験参加者が負の相関を示していた。

続いて、 $DET$  と好ましき評価の間のスピアマン相関係数は図 2.3.3 に示すように -0.44 であり、それ

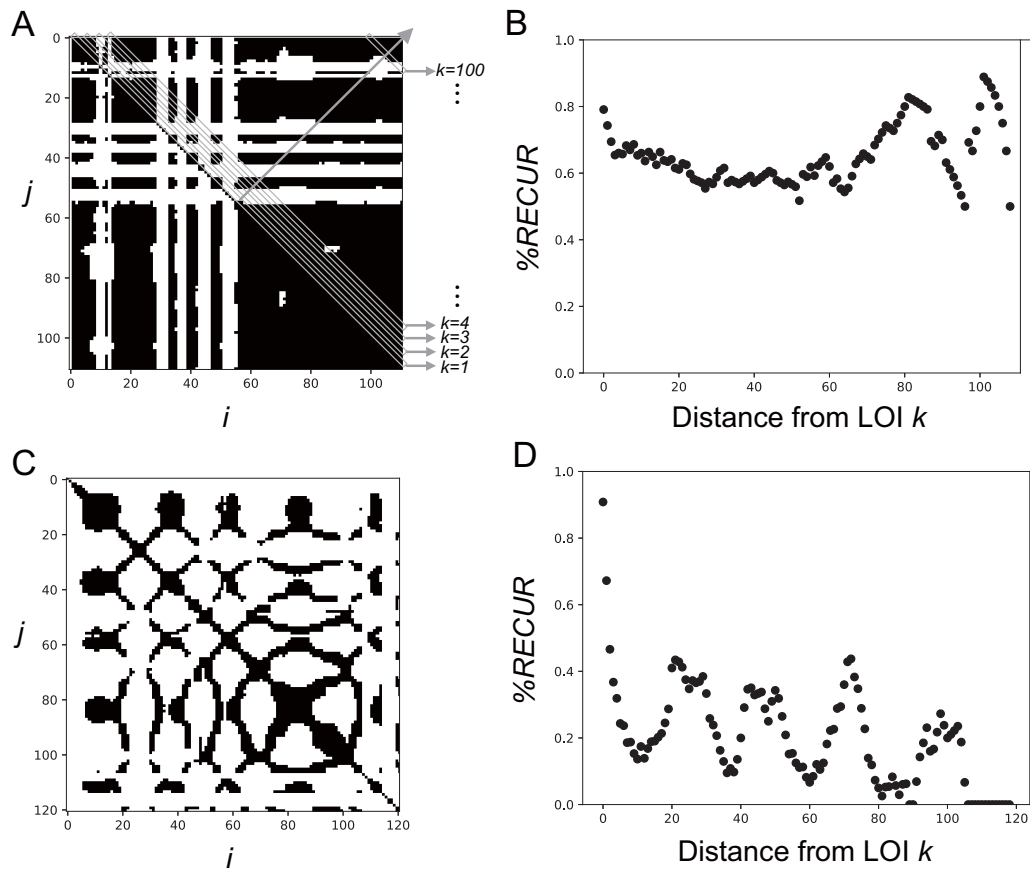


図 2.3.2 *TREND* の計算方法の解説図。A : ある時系列データのリカレンスプロット。対角線から  $k$  だけ離れた線分に対して  $\%RECUR$  を計算する。B : A における対角線からの距離  $k$  と  $\%RECUR$  の関係を図示している。C : 異なる時系列データのリカレンスプロット。D : C における対角線からの距離  $k$  と  $\%RECUR$  の関係を図示している。

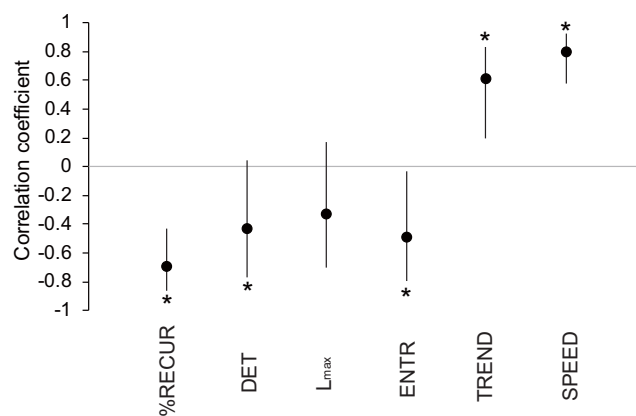


図 2.3.3 リカレンス特徴量と好ましき評価のスピアマン相関係数。エラーバーは bootstrap 法で計算された、スピアマン相関係数の 95% 信頼区間を表す。アスタリスクは、ランダム化検定によって、そのスピアマン相関係数がチャンス以上であると判定されたことを表す。

表 2.3.1 実験参加者毎の特徴量と好ましき評価のスピアマン相関係数。

|             | %RECUR | DET   | Lmax  | ENTR  | TREND | SPEED |       |
|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Participant | 1      | -0.09 | -0.04 | 0.18  | -0.02 | -0.19 | -0.04 |
|             | 2      | -0.44 | 0.61  | 0.63  | 0.55  | 0.21  | 0.80  |
|             | 3      | -0.25 | -0.26 | -0.16 | -0.22 | 0.28  | 0.28  |
|             | 4      | -0.21 | -0.21 | -0.33 | -0.26 | 0.46  | 0.52  |
|             | 5      | -0.33 | -0.13 | -0.10 | -0.19 | 0.19  | 0.79  |
|             | 6      | -0.68 | -0.21 | -0.17 | -0.24 | 0.58  | 0.81  |
|             | 7      | -0.45 | -0.03 | 0.02  | -0.19 | 0.17  | 0.55  |
|             | 8      | -0.45 | -0.28 | -0.35 | -0.26 | 0.17  | 0.48  |
|             | 9      | -0.28 | -0.18 | -0.06 | -0.25 | 0.06  | 0.10  |
|             | 10     | -0.80 | -0.78 | -0.72 | -0.79 | 0.39  | 0.82  |

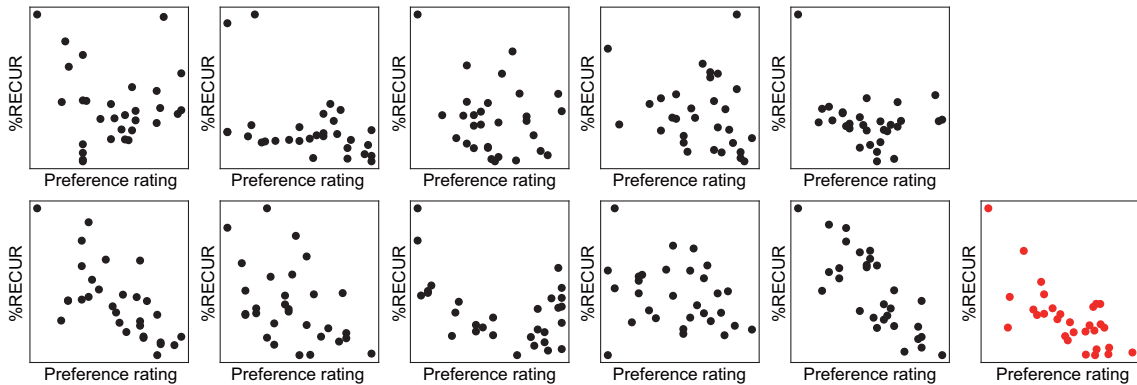


図 2.3.4 実験参加者 10 名の好ましき評価と %RECUR の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

らのデータをランダム化したときの相関係数の 95% 信頼区間よりも小さかった（つまり、この相関係数の値は偶然では起こりにくいと解釈できる）。このことから、予測可能もしくは決定論的な手の動きのときほど、好ましき評価は低くなる傾向があることがわかる。実験参加者 10 名の *DET* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を表 2.3.1 に、散布図を図 2.3.5 に示す。2 番目の実験参加者が高い正の相関を示しているものの、それ以外の全ての実験参加者は負の相関を示す傾向があった。

*L<sub>max</sub>* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数は図 2.3.3 に示すように -0.34 であった。この値は、それらのデータをランダム化したときの相関係数の 95% 信頼区間の中に含まれており、偶然の範囲内の相関値である可能性を否定できない。実験参加者 10 名の *L<sub>max</sub>* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を表 2.3.1 に、散布図を図 2.3.6 に示す。これらの結果から、好ましき評価と負の相関を示したり、ほとんど相関がなかったりと実験参加者によってまちまちであることがわかる。

*ENTR* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数は図 2.3.3 に示すように -0.50 であった。この値は、それらのデータをランダム化したときの相関係数の 95% 信頼区間よりも小さかったことから、偶然では起こりにくい値であると解釈できる。このことから、特定の長さの斜め線が生じやすいときよりも様々な長さの斜め線が生じやすいときのほうが、好ましき評価が低くなる傾向があることがわかる。実験参加者 10 名の *ENTR* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を表 2.3.1 に、散布図を図 2.3.7

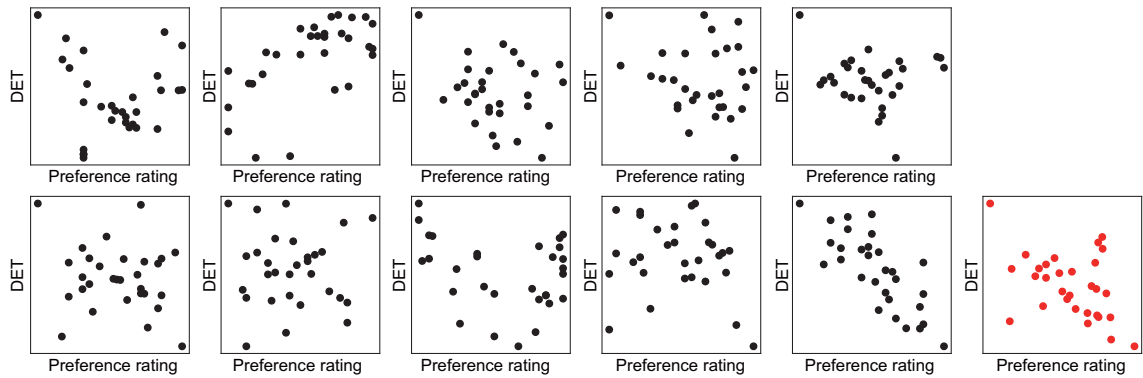


図 2.3.5 実験参加者 10 名の好ましき評価と  $DET$  の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

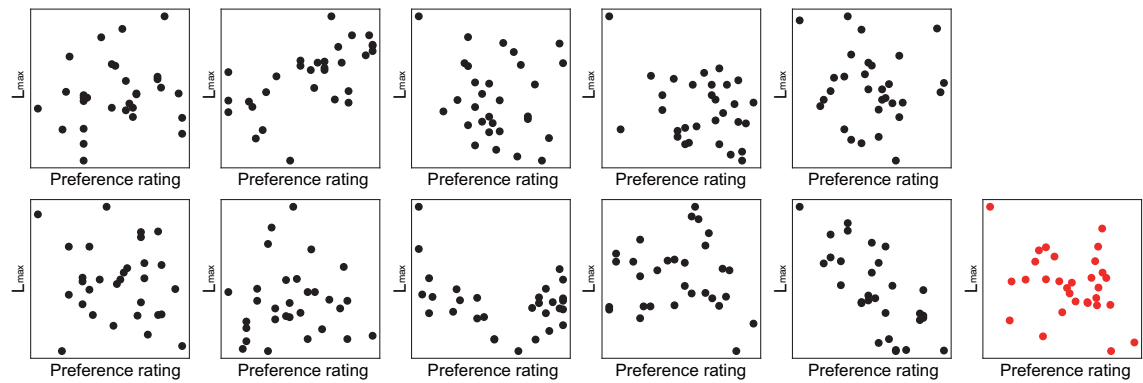


図 2.3.6 実験参加者 10 名の好ましき評価と  $L_{max}$  の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

に示す。2 番目の実験参加者が高い正の相関を示しているものの、それ以外の全ての実験参加者は負の相関を示す傾向があった。

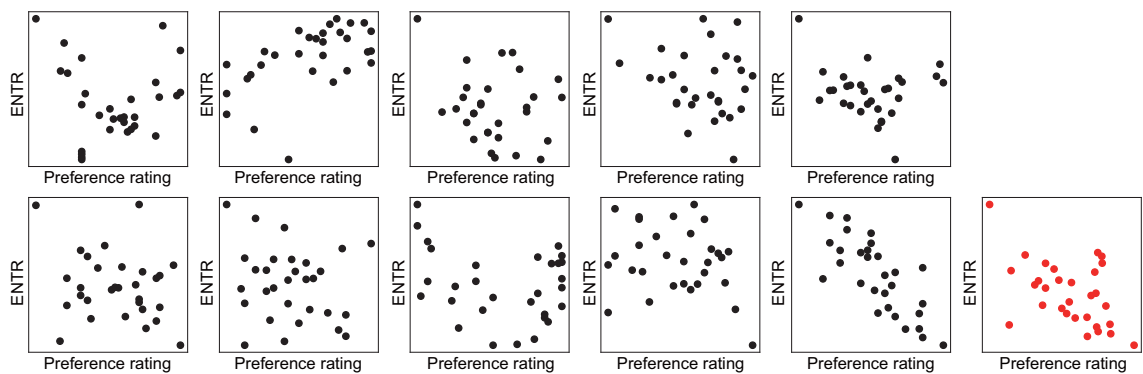


図 2.3.7 実験参加者 10 名の好ましき評価と  $ENTR$  の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

$TREND$  と好ましき評価の間のスピアマン相関係数は図 2.3.3 に示すように -0.61 であった。この値は、それらのデータをランダム化したときの相関係数の 95% 信頼区間よりも大きかったことから、偶

然では起こりにくい値であると解釈できる。このことから、時系列システムが定常的であるときのほうが、好ましき評価が低くなる傾向があることがわかる。実験参加者 10 名の *TREND* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を表 2.3.1 に、散布図を図 2.3.8 に示す。1 番目の実験参加者が負の相関を示しているものの、それ以外の全ての実験参加者は正の相関を示す傾向があった。

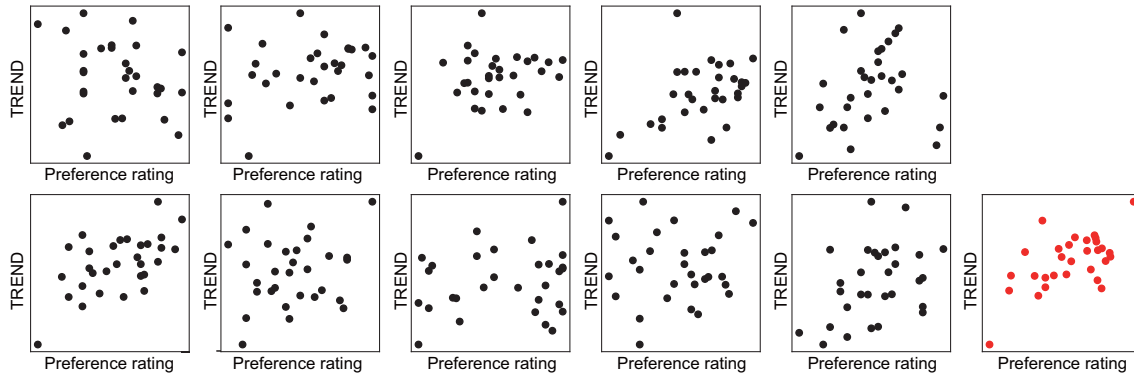


図 2.3.8 実験参加者 10 名の好ましき評価と *TREND* の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

参考として、手の速度の試行内平均 *SPEED* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を図 2.3.3 に示す。スピアマン相関係数は 0.79 であり、それらのデータをランダム化したときの相関係数の 95% 信頼区間よりも大きかったことから、偶然では起こりにくい値であると解釈できる。実験参加者 10 名の *SPEED* と好ましき評価の間のスピアマン相関係数を表 2.3.1 に、散布図を図 2.3.9 に示す。1 番目の実験参加者が負の相関を示しているものの、それ以外の全ての実験参加者は正の相関を示す傾向があった。

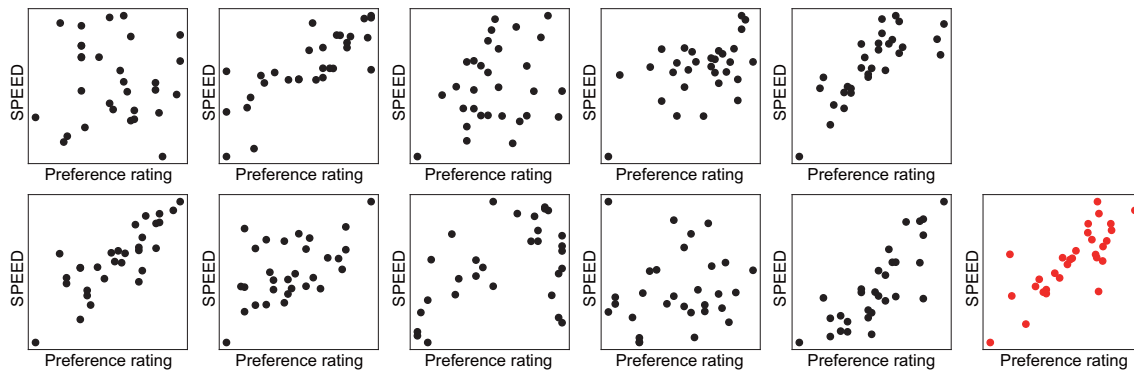


図 2.3.9 実験参加者 10 名の好ましき評価と *SPEED* の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

### 2.3.3 結果：特徴量の分類

これらのリカレンス特徴量の意味するところを理解するにあたって、まずリカレンス特徴量と試行内速度平均値 *SPEED* の間の相関係数を求めた。その結果を、表 2.3.2 に示す。これらの特徴量におい

表 2.3.2 特徴量間の相関係数

|                        | <i>DET</i> | <i>L<sub>max</sub></i> | <i>ENTR</i> | <i>TREND</i> | <i>SPEED</i> |
|------------------------|------------|------------------------|-------------|--------------|--------------|
| % <i>RECUR</i>         | 0.57       | 0.46                   | 0.63        | -0.29        | -0.71        |
| <i>DET</i>             |            | 0.65                   | 0.97        | -0.29        | -0.47        |
| <i>L<sub>max</sub></i> |            |                        | 0.60        | -0.39        | -0.37        |
| <i>ENTR</i>            |            |                        |             | -0.27        | -0.52        |
| <i>TREND</i>           |            |                        |             |              | 0.38         |

て、*ENTR*と*DET*が0.97、%*RECUR*と*SPEED*が-0.71の高い相関を示すことがわかる。これらの特徴量は、直接的、もしくは間接的に関係をもつ特徴量であると予想される。

続いて、これらの特徴量を Ward 法をもちいた階層クラスタ分析によって分類した。階層クラスタ分析では、負の相関をもつ特徴量は異なるクラスタに分類される傾向があるので、距離行列として特徴量間の相関値の絶対値を1から引いたものを与えた。その結果を図 2.3.10 に示す。クラスタ間の最大距離の 70% 点を基準としてクラスタを分けると、3 クラスタに分類することができた。この分類法においては、*TREND* は他の特徴量から独立な特徴量であると判定された。一方で %*RECUR*と*SPEED*は同じクラスタに分類されたことから、よく似た特徴量であるとみなせる。また、*L<sub>max</sub>*、*DET*、*ENTR*も同じ特徴量に分類されたことから、これらもよく似た特徴量であるとみなせる。

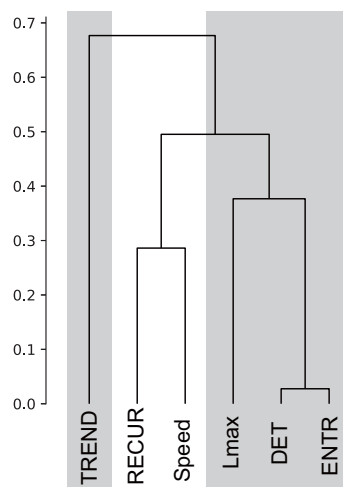


図 2.3.10 リカレンス特徴量の階層クラスタ分析。最大の距離の 70% の点で、クラスタを決定した。

#### 2.3.4 結果：特徴量間の類似性

クラスタ解析によって、%*RECUR*と*SPEED*、また、*L<sub>max</sub>*、*DET*、*ENTR*が同じクラスタに分類された。ここでは、これらの特徴量がなぜ似ているのかについて、分析を行う。

はじめに高い負の相関を示した %*RECUR*と*SPEED*について、ともに好ましき評価と高い相関を示した 10 番目の実験参加者について、それぞれの特徴量が最も低い 9 試行、中間の 9 試行、最も高い 9 試行のリカレンスプレットを図 2.3.11 に示す。この図からわかるように %*RECUR* 最大の 9 試行

では、リカレンスプロットのほとんどが連続した黒領域であり、ほとんど手が動いていない試行であると予想される。一方で、*SPEED* 最小の 9 試行のリカレンスプロットも黒領域が多く、これらの試行の *%RECUR* は大きくなると予想される。すなわち、*%RECUR* と *SPEED* の間の高い負の相関は、手がほとんど動いていない試行では、閾値以下になる領域が多く、また、平均速度も小さくなりやすいことに起因すると考えられる。

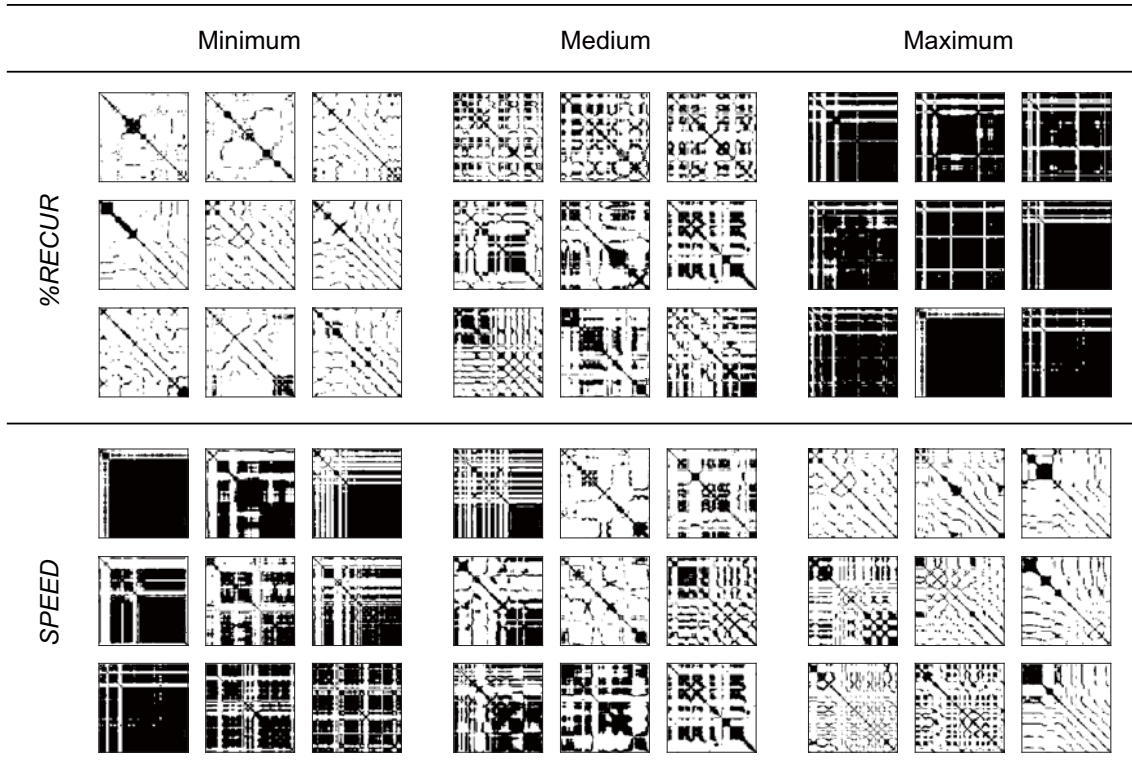


図 2.3.11 10 番目の被験者における、*%RECUR* の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のリカレンスプロット（上段）と、*SPEED* の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のリカレンスプロット（下段）。

続いて、 $L_{max}$ 、 $DET$ 、 $ENTR$  の類似度について調べる。それぞれの特徴量が最も低い 9 試行、中間の 9 試行、最も高い 9 試行のリカレンスプロットを図 2.3.12 に示す。いずれの特徴量も、大きくなるほど黒領域が多くなることが見て取れる。ただし、 $L_{max}$  が大きい試行の中には、さほど黒領域が多いわけではなく、対角線近傍の黒い斜め線が長い試行もいくつか存在する。ここでの疑問は、黒領域の多さで特徴づけられるわけではない  $ENTR$  がなぜ  $L_{max}$  や、特に  $DET$  と高い相関をもつのかである。ここで、図 2.3.12 の下段に示した  $ENTR$  の各試行について、線の長さの確率分布を図 2.3.13 に示す。このグラフから、黒い領域が少ないときは短い長さの線の生起確率のみが大きくなり  $ENTR$  が小さくなる一方で、黒い領域が多いときは線の長さのバリエーションが増えることで確率分布が正方向に広がりを持つようになり、 $ENTR$  が大きくなる傾向があることがわかる。

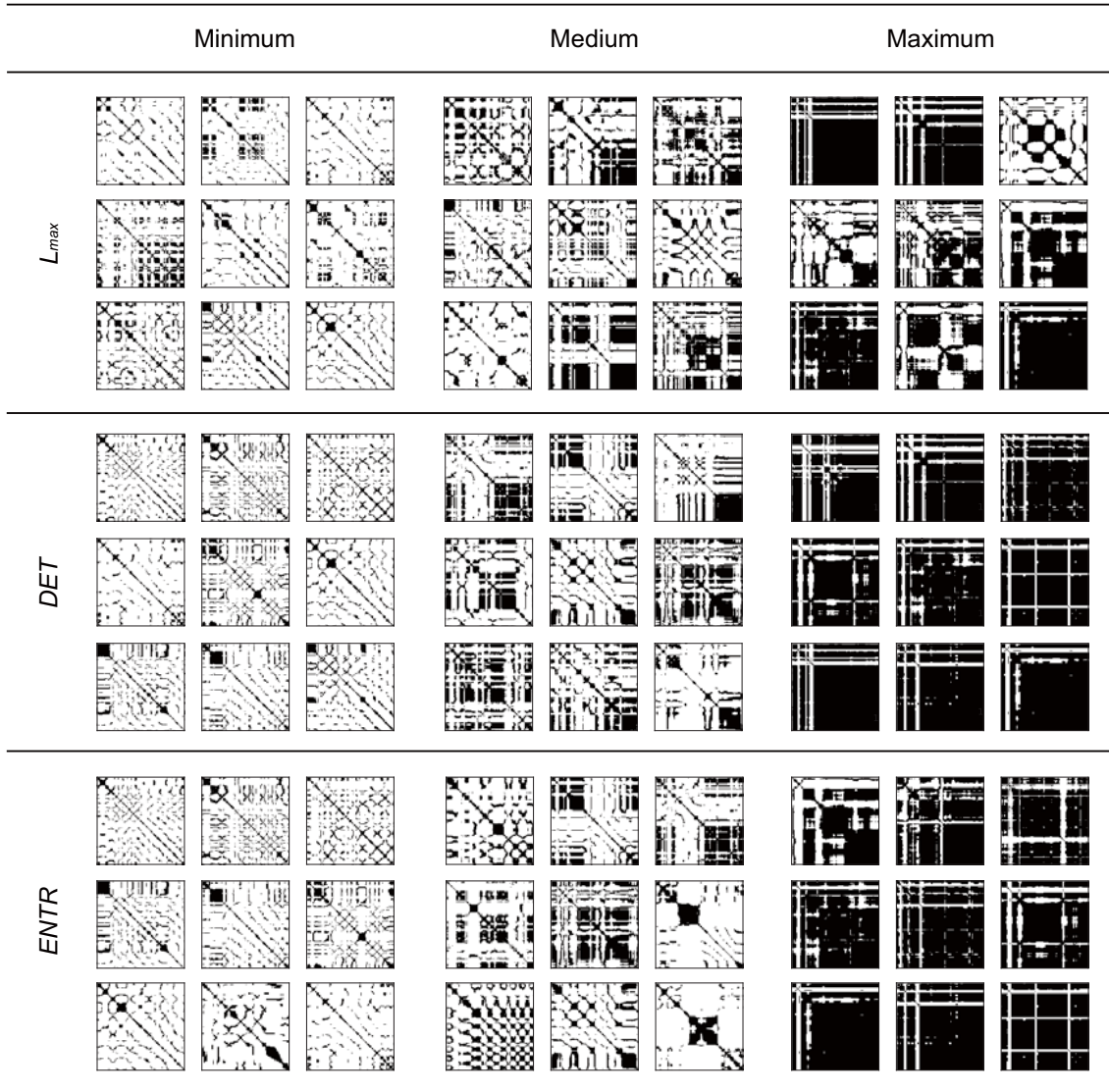


図 2.3.12 10 番目の被験者における、 $L_{max}$  の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のリカレンスプロット（上段）、 $DET$  の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のリカレンスプロット（中段）、 $ENTR$  の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のリカレンスプロット（下段）。

### 2.3.5 結果：手が動かない時間を特徴づけるパラメタ

ここまでの結果から、 $\%RECUR$  や  $L_{max}$ 、 $DET$ 、 $ENTR$  はそれらの値が大きくなるほど、 $SPEED$  は値が小さくなるほど、閾値以下の領域（リカレンスプロット中の黒い領域）が多くなる傾向があることがわかった（例えば、図 2.3.14(a)）。特に閾値以下の領域が多くなる手の動きの原因として、ほとんど手が動いていないことに起因するケースがあることが示唆された。しかし、本来  $L_{max}$  や  $ENTR$  などの特徴量は、手がよく動いている場合であっても大きくなりうるものである（例えば、手が周期的な往復運動を行っている場合、その指先速度のリカレンスプロットは図 2.3.14(b) のようになり、 $L_{max}$  は大きくなることが期待される）。

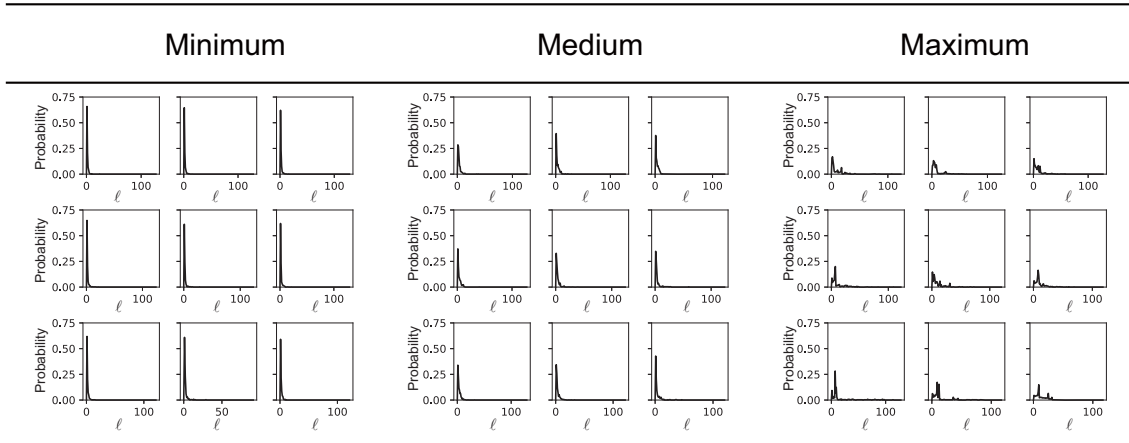


図 2.3.13 10 番目の被験者における、ENTR の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のそれぞれの線の長さの確率分布  $p(l)$ 。

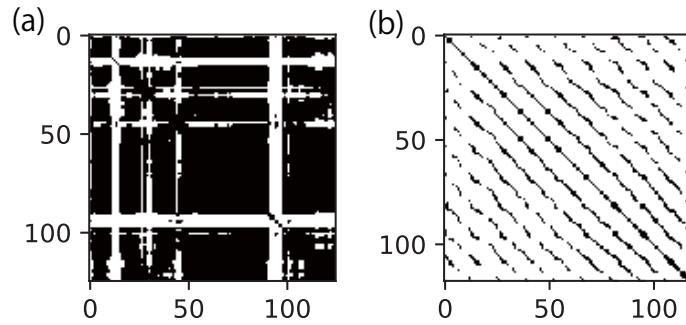


図 2.3.14 リカレンスプロットの例。(a) 手が動いていない期間が多い試行。(b) 手が周期的な往復運動を行っている試行。

表 2.3.3  $T_{max}$  と好ましき評価の間の相関。数字は実験参加者の番号を、all は 10 名の実験参加者のデータを平均した結果を示している。

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | all   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0.05 | -0.49 | -0.25 | -0.41 | -0.22 | -0.58 | -0.54 | -0.37 | -0.07 | -0.78 | -0.67 |

ここで、手が動かない時間を特徴づける新たな特徴量  $T_{max}$  を導入する。この特徴量は、リカレンスプロットにおける黒領域の縦の線の最大長である。図 2.3.14 からわかるように、手がほとんど動いていない場合には、黒い縦線の最大長は長くなる傾向があり、周期的往復運動を行っている場合には短くなる傾向がある。はじめに、 $T_{max}$  が最小の試行、中間の試行、最大の試行の例を図 2.3.15 に示す。この図から、黒い連続領域が大きい試行ほど、 $T_{max}$  が大きくなる傾向があることがわかる。

次に、このようにして求めた  $T_{max}$  と好ましき評価の間の相関を図 2.3.16 と表 2.3.3 に示す。 $T_{max}$  は、有意に好ましき評価と-0.67 の相関を示した。このことから、手が動かない時間が大きくなるほど、好ましき評価は小さくなることがわかる。

最後に、ここまで求めてきた特徴量がどの程度、手の静止度合いを表す  $T_{max}$  と相関を持つのかを調

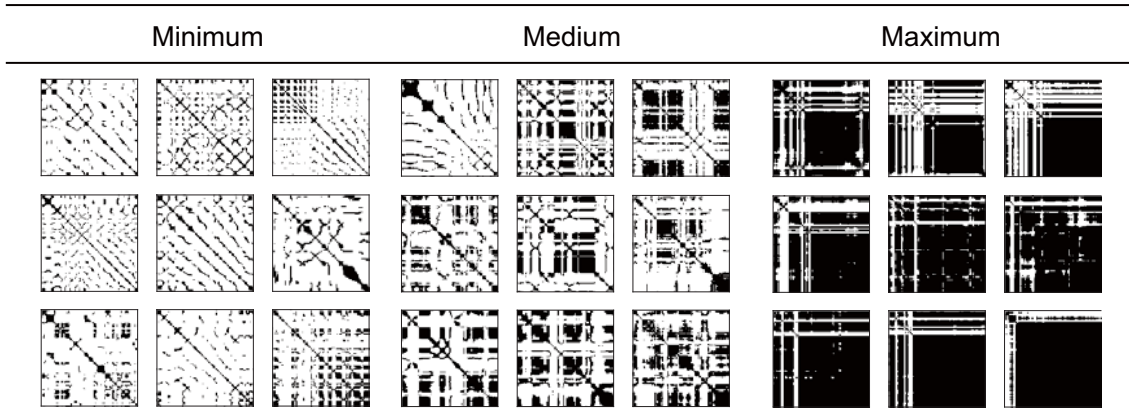


図 2.3.15 10 番目の被験者における、 $T_{max}$  の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のリカレンスプロット。

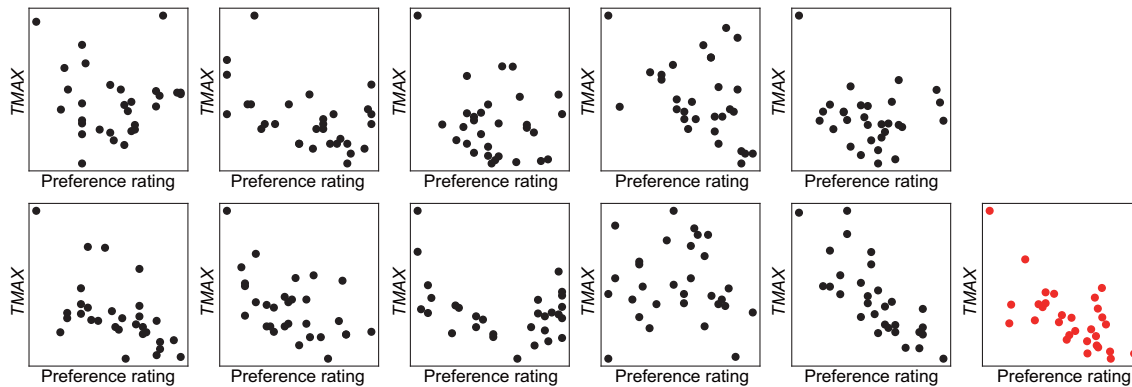


図 2.3.16 実験参加者 10 名の好ましき評価と  $T_{max}$  の相関。最後の赤点による相関プロットは、10 名の実験参加者の結果を平均したものである。

表 2.3.4  $T_{max}$  と各特徴量の間の相関係数

| $\%RECUR$ | $DET$ | $L_{max}$ | $ENTR$ | $TREND$ | $SPEED$ |
|-----------|-------|-----------|--------|---------|---------|
| 0.83      | 0.60  | 0.56      | 0.61   | -0.43   | -0.61   |

べた結果を表 2.3.4 に示す。この結果から、特に  $\%RECUR$  が  $T_{max}$  と高い相関を持つことがわかり、 $\%RECUR$  も手の動きの小ささで特徴づけられている可能性が示唆される。また、それ以外の特徴量との相関は高くても 0.60 前後にとどまり、 $T_{max}$  と同一の特徴量である可能性は否定できない。

### 2.3.6 結果 : $TREND$ と結びついた手の動き

ここまでの結果から、定常性の指標である  $TREND$  は他の特徴量と独立であり、 $T_{max}$  との相関も高くはなく、なおかつ好ましき評価と相関を持っていることが明らかになった。そこで、定常性の具体的な挙動を調べるために、詳細な分析を行う。まず、最も  $TREND$  と好ましき評価の間の相関が高かった 6 番目の実験参加者について、 $TREND$  が最小の試行、中間の試行、最大の試行のそれぞれのリカレンスプロットを図 2.3.17 に示す。 $TREND$  の高い試行のリカレンスプロットはパターンが一樣である

(繰り返が多い) のに対し、 $TREND$  の低い試行のリカレンスプロットは黒い領域と白い領域が明確に隔てられているところが多い(手が動いている期間、止まっている期間が明確に別れている) ことがわかる。このことを明確にするために、 $TREND$  を計算するための、対角線からの距離  $l$  と  $\%RECUR$  の関係を図 2.3.18 に示す。この図からもわかるように  $TREND$  が大きくなるほど、 $\%RECUR$  が周期的に増減を繰り返していることがわかる。これは往復運動のような繰り返し運動をずっと行っていることを示唆する。

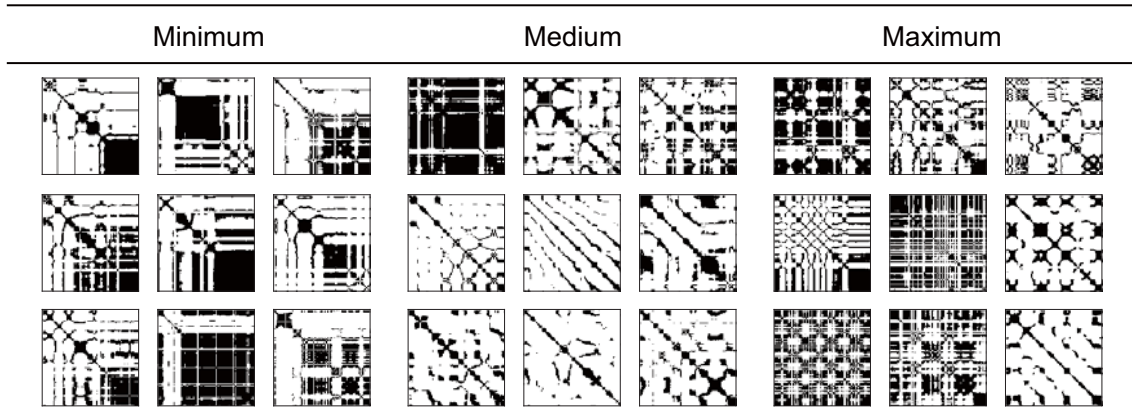


図 2.3.17 6 番目の被験者における、 $TREND$  の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のそれぞれのリカレンスプロット。

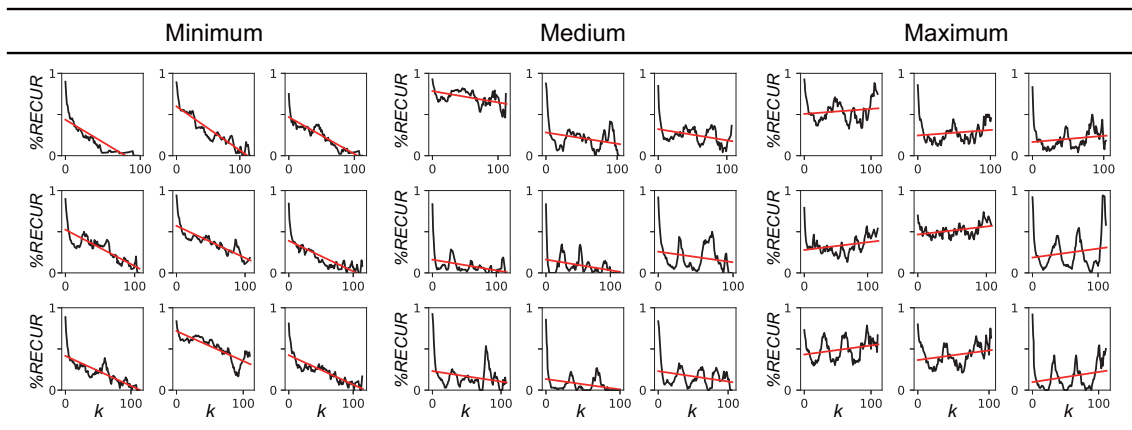


図 2.3.18 6 番目の被験者における、 $TREND$  の最小 9 試行、中間 9 試行、最大 9 試行のそれぞれの、対角線からの距離  $k$  と  $\%RECUR$  の関係。赤線は回帰直線(傾きが  $TREND$ )を表している。

### 2.3.7 考察

本解析の結果から、触覚探索運動に対してカオス時系列解析を行うことで得られた特徴量が、触れた触覚刺激に対する好ましき評価の情報を持つことがわかる。各特徴量の定義に従えば、非決定論的な動作であるほど、また決定論的構造の複雑さが低いほど、そして定常的な動作ほど、好ましき評価が高くなると解釈できる。ただし、今回の決定論的構造に関する  $DET$  や  $ENTR$  の特徴量は、手が動かない

ときにも大きくなってしまいう傾向が見られたため、ここでは、定常度合を表す *TREND* についてのみ言及することにする。本解析では、定常度合は手の動きのモードが切り替わるほど小さくなると解釈できる。すなわち、ずっと同じ手の動き（例えば往復なぞり運動）を繰り返しているほど好ましき評価が高く、一方で手の動きのモードが頻繁に切り替わる場合に（例えば、しばらく静止接触を行った後に、なぞり動作を始めるなど）好ましき評価が低くなる傾向がみられた。この理由の1つとしては、刺激表面特徴の把握の容易さが関わっていることが考えられる。刺激表面の特徴が把握しにくい場合には、複数の触り方を用いて、その刺激表面特徴に関する曖昧さを解消する必要がある。また、顔知覚などにおいてカテゴリが曖昧な分類しにくい画像刺激はネガティブに知覚されることが知られており [94]、このアナロジーとして、把握しにくい触覚刺激も好ましくないと評価される可能性がある。更には、曖昧な顔の眼球探索においては、曖昧でない顔よりも目や口などの特徴に眼球運動が停留するというように刺激の探索処理が強化されることも知られている [95]。これらのことから、把握の難しい触覚刺激ほど、詳細な触覚探索を探索モードが切り替わりやすくなり（定常性が低くなり）、好ましきの評価も低くなるという可能性が考えられる。

### 2.3.8 本解析のまとめ

本解析では、時間要約的な運動特徴量だけでなく、手の動きの時間的なダイナミクスを特徴づける運動特徴量を算出し、触れた刺激に対する好ましき評価との関係を調べた。その結果、非決定論的かつ定常的な動作で触れた触覚刺激ほど好ましき評価が高くなることがわかった。詳細な解析によれば、触覚探索における触り方のモードの切り替わりの多さが、手の動きの非定常性を招いている可能性を示した。

## 2.4 触覚意思決定行動

触れたときに最も心地よさを感じる生地やデザインの服を買う、抱いたときに最もしっくりくるぬいぐるみを買う...、というように、我々人間は能動的に手を動かして身の回りのものに触れることで、触れた対象の好ましさを評価に基づいて、もっとも好ましいものを選び出すことができる [96, 97] (図 2.4.1)。このように最も好ましいものを選び出す行為は主観的価値に基づく意思決定行動 (Value-based decision-making) と呼ばれ、消費行動研究の観点からも注目されている [98, 99, 100, 101]。また、複数の材質や形状の触覚刺激の中から、1つの触覚刺激を選び取り、製品の触覚デザインを行うプロセスの理解や言語化においても、主観的価値に基づく意思決定行動を調べることは重要である。これまでの研究ではどのようなテクスチャを持った刺激が好まれやすいかということはよく調べられてきている一方で [28, 71, 102, 103]、触覚における主観的価値に基づく意思決定行動のプロセスそれ自体や、触覚意思決定行動に通常伴う触覚探索運動がそのプロセスとどのように関係するのかについては、ほとんど理解されていないのが現状である。



図 2.4.1 人間は触れることで、触覚的好ましさに基づいて、最も欲しいものを選び出すことができる。

主観的価値に基づく意思決定行動の研究は、主に視覚刺激に対してよく行われてきており [104, 105]、ドリフト拡散モデル (Drift diffusion model) [106, 107] によって、2つの視覚刺激 (ターゲット刺激とリファレンス刺激) からより好ましいほうを選択する意思決定行動をよく説明できることが知られている [108, 109, 110, 111]。ドリフト拡散モデルは、図 2.4.2 に示すとおり、時々刻々と刺激に関する情報を積み重ねていく過程をランダムウォーク過程として表現したもので、ターゲット刺激側の境界 (図 2.4.2 の  $a$  の高さの線) に到達するとターゲット刺激が選択され、リファレンス刺激側の境界 (図 2.4.2 の  $0$  の高さの線) に到達するとリファレンス刺激が選択される。各時刻にどれだけ移動するかを、単位時間あたりのドリフト率 (drift rate)  $v$  で表現し、この数値は刺激から抽出された価値に関する証拠の量と解釈される。 $v$  が正のときターゲット刺激が選択されやすく、負のときリファレンス刺激が選択されやすい (図 2.4.3 (a), (c))。また、 $v$  が  $0$  に近いほど、両刺激を選ぶ確率が等しくなる (図 2.4.3 (b))。通常、人間が刺激から抽出する情報にはノイズが乗り、そのノイズを平均  $0$ 、標準偏差  $\eta$  のガウシアン分布で表現する。開始位置  $z$  は  $a/2$  のとき両刺激に対して中立であり、 $a$  か  $0$  かのどちらかに寄っているときターゲット刺激もしくはリファレンス刺激へとバイアスがかかっていると解釈できる。開始位置  $z$  はバラツキを持ち、 $z - s_z/2$  から  $z + s_z/2$  の中に等確率で存在する。また、刺激が提示されてからそれを符号化して処理を始めるまでに時間がかかるとされ、これを符号化時間  $T_{er}$  で表す。この符号

化時間  $T_{er}$  も  $s_z$  同様にバラツキを持ち、 $T_{er} - s_t/2$  から  $T_{er} + s_t/2$  の中に等確率で存在する。このようにドリフト拡散過程ではノイズ項  $\eta$ ,  $s_z$ ,  $s_t$  を含むので、いずれかの境界に到達した時点を実応時間 (reaction time, RT) としたとき、実応時間にバラツキが生じる。そのため、ドリフト拡散モデルによって得られる値は単一の値ではなく、ターゲット刺激とリファレンス刺激それぞれの広がりを持った分布となる (図 2.4.2 の灰色部分)。このモデルは、二つの選択肢の価値の類似度が似ているほど、証拠を蓄積する速さが遅くなる (図 2.4.2 のドリフト率  $v$ )、すなわち実応時間が長くなることを予測する。また、一方の選択肢の価値が他方の選択肢の価値よりも高いほど、その選択肢を選ぶ確率が上がる。視覚における主観的価値に基づいた意思決定のアナロジーとして、触覚においてもドリフト拡散モデルで説明できるかもしれない。

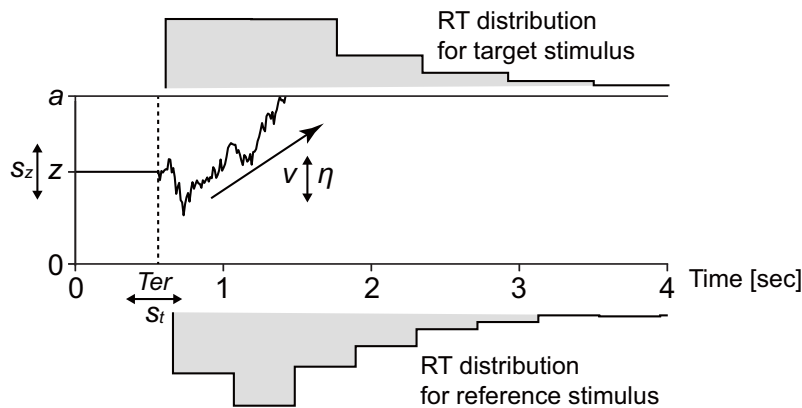


図 2.4.2 2 刺激間のドリフト拡散モデル。

この研究では、手による特定の触覚探索運動が触覚刺激から抽出される証拠 ( $v$ ) を反映していると仮説を立てる。なぜならば、これまでの本論文の結果から、我々がどのように手を動かすかが、触覚刺激から得られる情報と関係していることが明らかになってきたからである。このことを検証するために、実験参加者が二つの触覚刺激 (リファレンス刺激とターゲット刺激) を触り比べてより好ましい方を選択する実験を行い、そのときの実験参加者の選択、実応時間、手の動きを計測した。そして、ドリフト拡散モデルが、触覚における主観的価値に基づいた意思決定の結果を説明できるかどうかを調べた。最後に、各触覚刺激におけるドリフト率  $v$  を計算し、ドリフト率と手の動きの特徴量の間の統計的相関を調べた。

## 2.4.1 実験

### 実験参加者

6 名の女性と 4 名の男性 (23-48 歳) が実験に参加した。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚 (矯正含む) と触覚機能、運動機能を有していた。実験参加者の中に心理物理実験に関する専門知識を有する者はおらず、実験の目的も知らされていなかった。本実験のプロトコルは NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

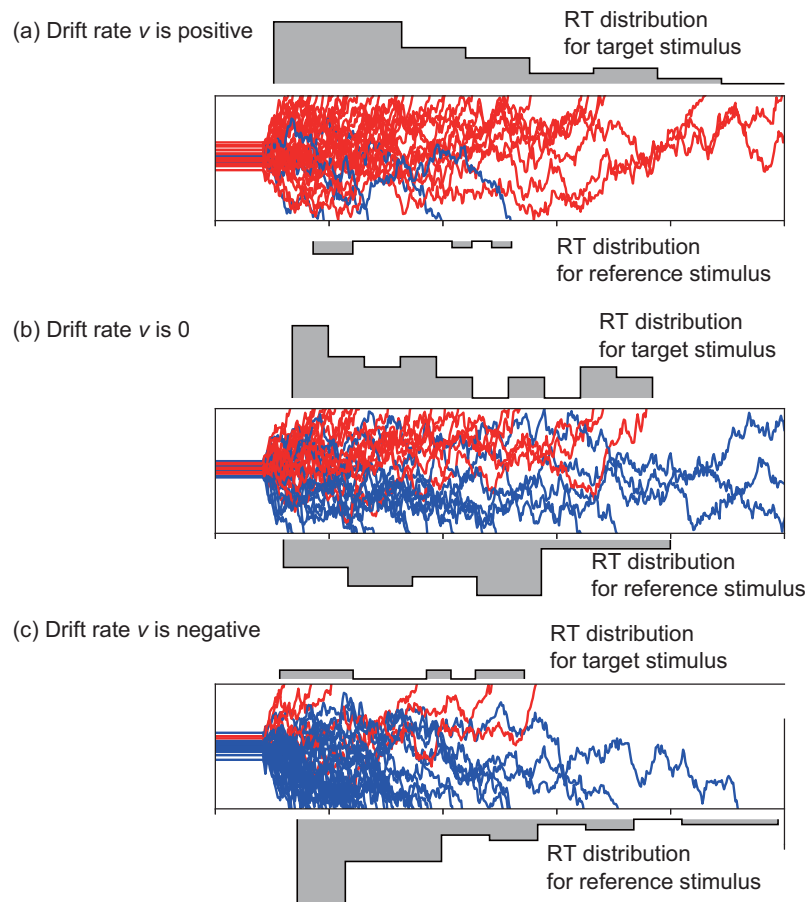


図 2.4.3 ドリフト拡散モデルにおけるドリフト率  $v$  の効果。この図では、 $v$  が正、0、負の値のときのそれぞれについて、50 回シミュレーションを行い、得られた反応時間分布を示している。赤線はターゲット刺激を選んだ試行で、青線はリファレンス刺激を選んだ試行である。

#### 実験装置と刺激

実験装置は好ましき評価実験で使用されたもの（図 2.2.1）と同じである。実験参加者は触覚刺激が置かれているテーブルの前に着座した。黒いプラスチックボードによって、実験参加者は触覚刺激と自身の触覚探索運動を視覚的に観察することができなかった。好ましき評価実験で用いられた布や革、金属、木といった 30 種類の触覚刺激（図 2.2.2）を本実験でも用いた。それぞれの触覚刺激は表面サイズが 100 mm × 100 mm に揃えられており、厚みが 30 mm になるように調整された。人差し指の爪の上に取り付けられた再帰性反射材マーカーを OptiTrack システム (OptiTrack, Flex13, 120 Hz) によって計測することで、人差し指の位置を計測した。また、触覚フォースプレート (テック技販, TF-2020-G, 1000Hz) の上に触覚刺激を置くことで触覚刺激に加えられた接触力を計測した。

## 実験手続き

本実験の実験手続きを図 2.4.4 に示す。実験参加者の課題は、リファレンス刺激とターゲット刺激の二つの触覚刺激を順番に触ってもらい、どちらの刺激のほうが触っていたいかをなるべく早く、かつ、なるべく正確に回答することであった。各比較試行において、まず、実験参加者は、リファレンス刺激を 5 秒間触るように求められた。スタート位置に人差し指を置き、ビープ音が鳴ったら手を前に伸ばしてリファレンス刺激を触り始め、5 秒後にもう一度ビープ音が鳴ったら手をスタート位置に戻した。その次のターゲット刺激探索では、手をスタート位置に置いた状態で待機し、ビープ音が鳴ったらターゲット刺激を触り始め、触りながら「ターゲット刺激とリファレンス刺激のどちらを触っていたいか」を判断できた時点ですぐに回答した。

ターゲット刺激として、好ましさ評価実験で用いた 30 種類の触覚刺激全てを採用し、これらの刺激をそれぞれ 16 回ずつ提示した。リファレンス刺激としては、好ましさ評価実験における各刺激の好ましさ評価値をもとに算出された中央値に最も近い紙刺激とタオル刺激の 2 つをランダムに提示した（図 2.4.5）。リファレンス刺激とターゲット刺激が同じ刺激にならないように調整した（つまり、ターゲット刺激がタオル刺激のときは、リファレンス刺激は紙刺激になるようにした）。触覚刺激の好ましさ評価値に基づいて触覚刺激を順番に並べ、その順番をもとにこれらの刺激を 6 つずつ分類することで、ターゲット刺激の 5 段階の好ましさレベルの刺激群を作った（図 2.4.5）。つまり、各好ましさレベル条件において、96 試行（6 種類の刺激 × 16 回の繰り返し）行われたことになる。

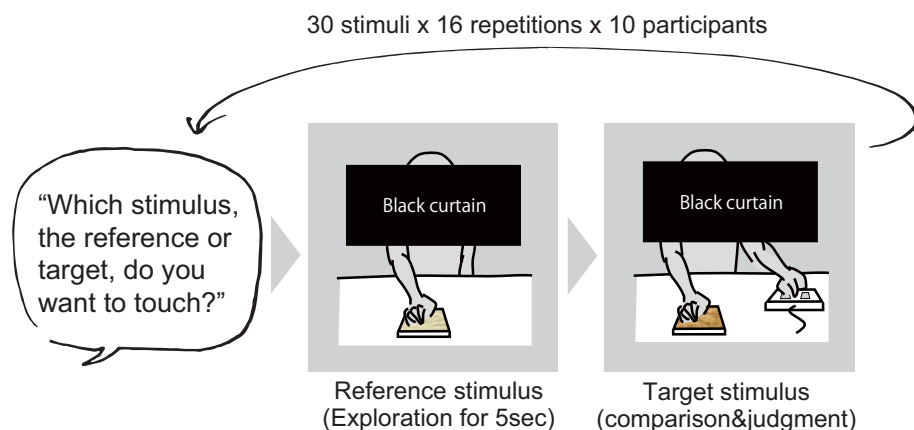


図 2.4.4 実験手続き。

## データ解析

Ratcliff らによる 7 つのパラメータを用いたドリフト拡散モデルのフィッティングには、モンテカルロ・シミュレーションを用いた [109, 112, 113, 114, 115]。ドリフト拡散モデルの 7 つのパラメータに適切な初期値を与え、20 秒間のランダムウォークを 10000 回シミュレーションすることで、ターゲット刺激を選んだときの反応時間分布と、リファレンス刺激を選んだときの反応時間分布を得た。これらのシミュレーション反応時間分布と、実験によって得られた反応時間分布のそれぞれについて、5 つの分位（下から 10% 点、30% 点、50% 点、70% 点、90% 点）における反応時間を求め、それらの反応時間

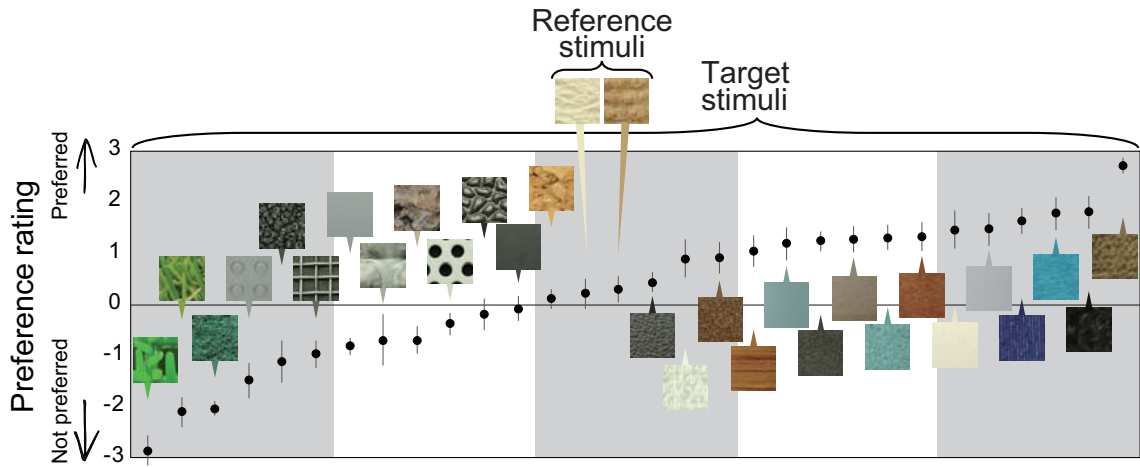


図 2.4.5 好ましき評価実験で得られた好ましき評価値をもとに、触覚刺激を並び替え、5 段階の好ましきレベル刺激群を作った。

の差を求めて和を取ることでカイ二乗値 (chi-square value) を求めた [106, 107]。このカイ二乗値が小さくなるように、DDM の 7 つのパラメタを調整していくことで、観察された反応時間分布を最もよく説明できるパラメタを得た。カイ二乗値の最小化には、Python の scipy ライブラリにおける微分進化法 differential\_evolution を用いた [116]。シンプレクス法 (Simplex algorithms) [117] や修正 powel 法では収束しなかった。

それぞれの被験者について、ターゲット刺激の好ましきレベル 5 条件それぞれにおけるドリフト率  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$  と、 $a, z, \eta, s_z, s_t, T_{er}$  を推定した。ドリフト率  $v$  のみ好ましきレベル条件ごとに求める理由は、これまでの研究で刺激の難易度が変わるとドリフト率  $v$  が変わることが知られており [107]、刺激値に依存するパラメタと考えられているからである。一方で、実験参加者への教示が速さ重視か正確さ重視かによって間隔  $a$  が変わり [107, 118]、運動方向弁別課題のように右方向刺激と左方向刺激の提示割合を変えると開始位置  $z$  が変わる。今回の実験では、実験参加者への教示は全て共通である上、5 つの好ましきレベルの刺激はすべて混ぜて行っているなので、間隔  $a$  と開始位置  $z$  は全条件で共通とみなせる。

また、ドリフト拡散モデルの比較条件としてレースモデルも同様にモンテカルロ・シミュレーションを行った。好ましきレベル 5 条件のそれぞれに対する、リファレンス刺激へのドリフト率  $v_r$  とターゲット刺激へのドリフト率  $v_{t1}, v_{t2}, v_{t3}, v_{t4}, v_{t5}$ 、そして  $\eta, a, s_t, T_{er}$  の 10 パラメタを推定した。

## 2.4.2 結果

まず、好ましきレベル 5 条件のそれぞれにおける実験参加者の反応時間とターゲット刺激選択確率を調べた。ある実験参加者の反応時間平均を図 2.4.6 A (黒線) に、ターゲット刺激選択確率を図 2.4.6 B (黒線) に示す。一般的な傾向として、ターゲット刺激とリファレンス刺激の好ましき評価が近いほど実験参加者は回答により時間をかけるようになり、また、ターゲット刺激の好ましき評価がリファレンス刺激の好ましき評価よりも大きいほどターゲット刺激を選ぶ確率が高くなった。この実験参加者の応答パターンは視覚研究における主観的価値に基づく意思決定での応答とよく一致するものである。ド

ドリフト拡散モデルがどれくらい触覚における意思決定応答を説明できるのかを調べるために、実験参加者ごとに反応時間分布にドリフト拡散モデルを当てはめ、最もよく説明できるモデルパラメタを推定した。各実験参加者のモデルパラメタを表 2.4.1 に示す。図 2.4.6 に示した実験参加者について、最もよく当てはまったパラメタでドリフト拡散過程を 10000 回シミュレートすることで得られた反応時間分布について、その反応時間平均とターゲット刺激選択確率を同じく図 2.4.6 の白丸黒破線に示している。比較のために、意思決定における古典的モデルであるレースモデル (Race model) [119, 120] をシミュレートした。図 2.4.7 に示すように、レースモデルでは、リファレンス刺激とターゲット刺激に対する証拠の蓄積は独立に行われるとされる。リファレンス刺激とターゲット刺激のドリフト率は別々に設定されており、それぞれ  $v_r$  と  $v_t$  で表現される。どちらか一方が先に境界  $a$  に到達すると、その時点でその刺激が選択される。このレースモデルの予測としては、ターゲット刺激の価値がリファレンス刺激よりも高いほどターゲット刺激の選択確率が上がる一方で、どちらか 1 つでも価値が高い刺激が存在すると反応時間は短くなる。ドリフト拡散モデル同様、レースモデルも実験参加者のデータに当てはめ、最もよく当てはまったパラメタで 10000 回シミュレーションを行った。図 2.4.6 に示した実験参加者について、レースモデルでシミュレートされた反応時間分布から、反応時間平均とターゲット刺激選択確率を白丸灰色破線で示した。ドリフト拡散モデルの結果と比べると、レースモデルよりもドリフト拡散モデルのほうがよく実験結果を再現していることがわかる。それぞれのモデルの当てはまりを定量化して比較するため、それぞれのモデルから得られた反応時間分布をもとにモデルの予測能力を表す AIC (Akaike's Information Criterion) を算出した。その結果を図 2.4.8 に示す。AIC は小さいほど予測能力が高いとされる。各実験参加者におけるドリフト拡散モデルの AIC とレースモデルの AIC の差分を求め、実験参加者間で bootstrap 法を用いて AIC の差分の 95% 信頼区間を求めたところ、95% 信頼区間は 0 よりも小さかった。つまり、ドリフト拡散モデルのほうが予測能力が高いことを示している。

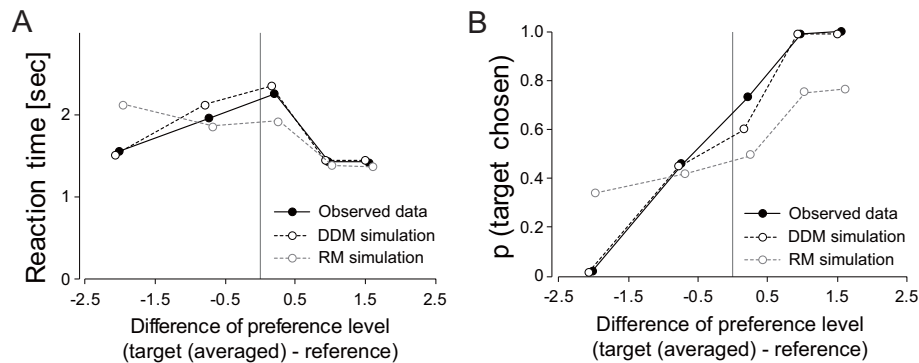


図 2.4.6 ある実験参加者における反応時間平均 (A) とターゲット刺激選択確率 (B)。黒丸黒線は実際の実験参加者から得られた反応時間分布について計算されたもの、白丸黒点線はドリフト拡散モデルのシミュレーションから得られた反応時間分布について計算されたもの、白丸灰色点線はレースモデルのシミュレーションから得られた反応時間分布について計算されたものである。

次に、手の動きと証拠を蓄積するプロセスの間の関係を調べるために、実験参加者全員のデータをプールし、触覚刺激ごと (10 人の実験参加者  $\times$  16 回の繰り返し = 160 試行) にドリフト率  $v$  を求めた。ドリフト率  $v$  以外のパラメタ  $a, z, \eta, s_z, s_t, T_{er}$  は共通として計算した。30 種類の触覚刺激について求められたそれぞれのドリフト率  $v$  は、実験参加者による各触覚刺激の選択確率と高いスピアマン相関を

表 2.4.1 各実験参加者のドリフト拡散モデルにおける推定パラメータ一覧。

|               | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $a$   | $z$  | $\eta$ | $s_z$ | $s_t$ | $T_{er}$ |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|-------|----------|
| Participant 1 | -3.96 | 0.58  | 1.13  | 3.48  | 5.00  | 10.05 | 4.87 | 0.29   | 2.00  | 0.02  | 1.56     |
| 2             | -4.61 | -0.20 | 0.40  | 4.63  | 4.86  | 7.62  | 4.06 | 0.31   | 0.76  | 0.05  | 0.64     |
| 3             | -0.15 | 0.18  | 0.59  | 2.99  | 4.60  | 6.89  | 3.62 | 0.27   | 0.09  | 0.00  | 0.57     |
| 4             | -3.53 | -2.19 | -0.06 | 1.04  | 1.96  | 18.87 | 8.50 | 0.51   | 0.64  | 0.19  | 0.56     |
| 5             | 0.26  | 0.81  | 1.45  | 4.60  | 4.73  | 6.32  | 3.12 | 0.26   | 0.15  | 0.01  | 0.77     |
| 6             | -4.17 | -0.65 | 0.63  | 0.07  | 0.86  | 17.75 | 8.44 | 0.44   | 1.76  | 0.30  | 0.50     |
| 7             | -3.14 | -0.30 | 0.69  | 3.96  | 4.72  | 3.55  | 1.80 | 0.17   | 0.21  | 0.01  | 0.70     |
| 8             | -2.14 | -0.64 | 0.21  | 1.45  | 4.71  | 15.97 | 7.50 | 0.43   | 0.43  | 0.24  | 0.37     |
| 9             | -4.06 | -3.56 | 2.14  | 3.69  | 3.87  | 17.49 | 9.59 | 0.77   | 0.52  | 0.05  | 0.49     |
| 10            | -1.41 | 0.68  | 1.52  | 4.92  | 4.80  | 7.45  | 3.21 | 0.28   | 0.13  | 0.11  | 0.42     |

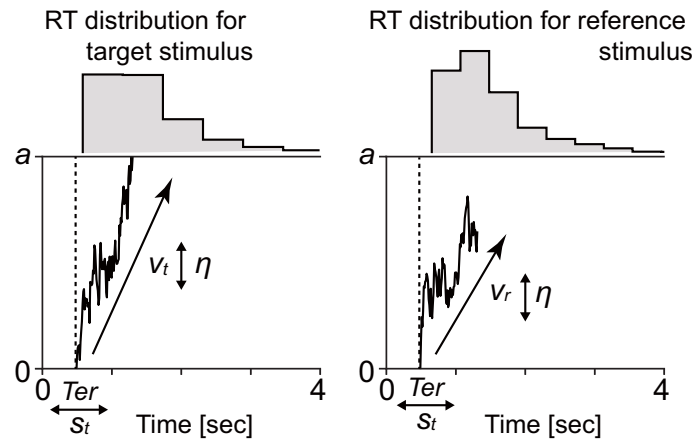


図 2.4.7 2 刺激間のレースモデル。

示した ( $r_s = 0.96$ )。続いて、計測された実験参加者の手の位置データと接触力データから、図 2.4.9 に示すように 12 種類の手の運動特徴量を算出した。そしてこれまでの実験同様、これらの運動特徴量間の関係を明らかにするために Ward 法を用いた階層クラスタ分析を用いて、いくつかの運動クラスタに分類した。クラスタ間が疎かつクラスタ内が密になるほど大きくなる Pseudo-F の指標は、分類クラスタ数が 6 のときに最大になった。階層クラスタ分析の結果を図 2.4.9 の左側に示す。上から、刺激表面上での指の速度（なぞり運動と関連すると期待される）、鉛直方向の押し込み力（押し込み運動と関連する期待される）、鉛直方向の指の動き（叩き運動と関連すると期待される）、刺激表面上での指の加速度、接触力の微分値（表面摩擦と関連すると期待される）、刺激表面における接触力（こする動作と関連すると期待される）であると解釈できる。そしてドリフト率と手の運動特徴量間のスピアマン相関を計算した結果を図 2.4.9 の右側に示す。その結果、刺激表面平面における指先速度と前後方向の指先加速度がドリフト率  $v$  と正の相関を持つことがわかり、このことは、これらの運動特徴量がターゲット刺激に対する正方向の証拠蓄積と関連があることを示している。また、押し込み方向の加速度と接触力の微分値がドリフト率  $v$  と負の相関を持つことがわかり、このことは、これらの運動特徴量がターゲット刺激に対する正方向の証拠蓄積と関連があることを示している。

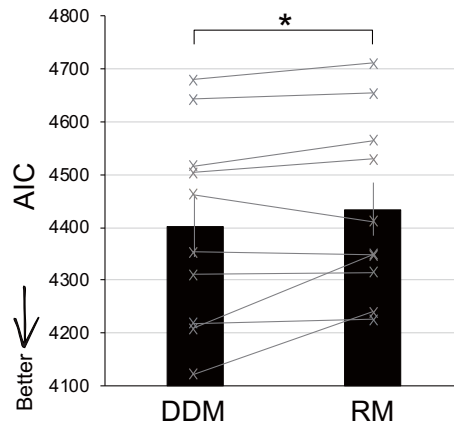


図 2.4.8 実験から得られた反応時間分布に対するドリフト拡散モデルとレースモデルの AIC を求めた。アスタリスクは、モデル間で AIC が有意に異なることを示している。

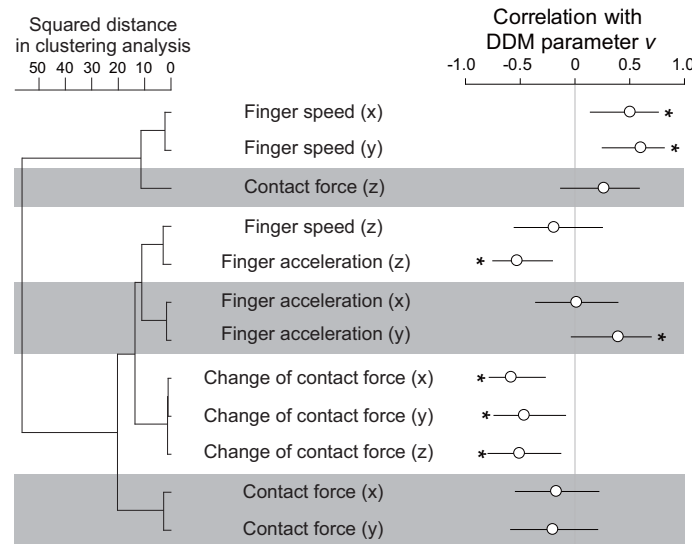


図 2.4.9 12 運動特徴量の階層クラスタ分析の結果（左）と、ドリフト率  $v$  とのスピアマン相関係数の結果（右）。エラーバーは bootstrap 法によって計算された。

### 2.4.3 考察

本実験の結果から、ドリフト拡散モデルのような証拠を蓄積していくプロセスが主観的価値に基づく触覚意思決定をよく説明できることがわかった。特に、2つの触覚刺激の価値を独立に処理するレースモデルよりも、2つの触覚刺激の価値の差分に基づいて処理を行うドリフト拡散モデルのほうが予測能力が高かった。このことから、人間は2つの触覚刺激の価値を比較する処理プロセスに基づいて、触覚意思決定を行っていることが期待される。このドリフト拡散モデルは、視覚における主観的価値に基づいた意思決定についてもその応答をよく説明してきたことから、刺激間価値比較プロセスは感覚モダリティによらず普遍的な意思決定プロセスである可能性がある。

また、ドリフト拡散モデルにおけるドリフト率  $v$  と相関する手の運動特徴量がいくつか見出された。このような相関を示した理由の1つとして、表面摩擦のような刺激の物理特性がその相関を仲介してい

る可能性が考えられる。例えば、ドリフト率と負の相関を示した接触力の微分値は触覚刺激の表面摩擦に影響を受けることが知られており [40]、また、高い表面摩擦を持った触覚刺激（つまり粗い刺激や粘つく刺激）はその刺激に対するポジティブな証拠を減らすであろう。結果として、表面摩擦が仲介することによってドリフト率と接触力の微分値の間に有意な相関が生じた可能性がある。一方で、前後方向の指先加速度のように、同じく表面摩擦と相関することが期待される運動特徴量がドリフト率と正の相関を示したことから、単純に触覚刺激の物理特性だけでは説明できない可能性もあり、手の動きと刺激の物理特性、証拠蓄積プロセスの間の関係を明らかにするために更なる詳細な検討が要求される。

ドリフト率は触覚刺激選択確率とも非常に高い相関を示したこと、また今回扱った運動特徴量とドリフト率の間の相関は、図 2.2.4 における運動特徴量と好ましき評価の関係をよく再現している。このことから、それぞれの実験で得られた相関の結果は、好ましき評点課題か刺激選択課題かのような実験課題に起因する結果ではなく、触覚刺激そのものの価値と手の動きの頑健な関係であることが示唆される。

先行研究では、運動が意思決定に影響を与えうる可能性を示したものも存在する [104, 121]。今回、ドリフト率と相関を示した運動特徴量を変調したときに、ドリフト率がどのように変化することを観察することで、これらの間の因果関係を調べるのが可能であろう。また、触覚探索運動から実験参加者の選択や反応時間をどの程度予測できるのかを調べる必要もある。

#### 2.4.4 本実験のまとめ

本実験から、触覚における主観的価値に基づいた意思決定のプロセスは、二刺激間の証拠を蓄積するモデルでよく表現できることが明らかになった。更に、触覚探索運動がこのような証拠蓄積プロセスの情報を持つことを明らかにした。これらのことから、触覚における主観的価値に基づいた意思決定のメカニズムを理解するために、手の動きを計測・解析することが役に立つと期待される。

## 2.5 個人差と触覚パーソナリティ

ここまでの結果から、ものに触れているときの手の動きが、様々な触り心地の情報をある程度説明できることを明らかにしてきた。ただしこれまでの解析では、実験参加者のデータを平均することで、多くの人間に共通の傾向を調べることに主眼を置いてきた。本実験では、実験参加者ごとの説明力の違い、すなわち個人差に焦点を当てる。例えば、2.3 におけるリカレンスプロットの解析では、ある手の動きのリカレンス特徴量が好ましき評価と高い相関する実験参加者もいれば、そうでない実験参加者もいることがわかった。このような実験参加者間の違いは何に由来するのであろうか。

本研究では、実験参加者ごとの触覚探索運動による説明力の 1 つの原因として、それぞれの実験参加者がどの程度能動的に触覚を活用するかというパーソナリティを提案する。触覚探索運動が触り心地評価の情報を持つためには、手の動きに十分バリエーションがなければならない。そこで、触覚刺激に触れることに消極的な実験参加者では十分な手の動きのバリエーションが期待できないため、実験参加者が能動的に触覚を利用しようとするかどうかは重要な説明要因になると考えられる。このような触覚探索運動の説明力においてパーソナリティは重要な要因となりうるにも関わらず、これまでの研究では、そもそもパーソナリティによって触覚探索運動自体がどう変わるかすら検討した研究はほとんどない。

これまでの研究では、指の乾き具合や摩擦係数、弾性などが触覚弁別能力に影響するなど、個々人の手の物理状態との関連を調べた研究がある [17, 122] 一方で、“Need for Touch” 尺度という消費行動における触覚の活用度合いを測る指標 [123] を用いて、消費行動や触覚的価値評価との関係を調べた研究も存在する [82, 99, 100, 124]。“Need for Touch” 尺度は消費行動状況における触覚の活用度合いを問う、12 項目からなるアンケートである。そのうち 6 項目は購買意思決定において触覚をどれほど重要視するかを問う目的志向的次元 (instrumental) であり、残りの 6 項目はどれだけ製品に触れることを好むかを問う快楽的志向次元 (autotelic) である。特に快楽的志向次元に関する項目は、その人間が購買だけでなく日常的にどの程度能動的に触覚を用いているかを特徴づける項目と考えられるため、この尺度を用いることで個々人の能動的な触覚活用度合いと手の動きが持つ情報量の関係を調べることができると期待される。

本研究では、実験参加者ごとに、触覚探索運動の解析からどれくらいその実験参加者による触り心地評価が説明できるかを調べ、実験参加者の説明力のばらつきがどの程度存在するかを調べる。その上で、個々人の“Need for Touch” 尺度がどの程度決定係数と相関があるのかを調べる。

### 2.5.1 実験

#### NFT アンケート

本実験では、日本人の実験参加者を対象として、消費行動における“Need for Touch” アンケートの日本語版を作成した。日本語版アンケートの 12 質問項目を表 2.5.1 に示す。実験中に実験参加者は、各質問項目を「かなり当てはまる」から「全く当てはまらない」の間を 7 段階尺度で評価した。

#### 実験参加者

本実験には 8 名の女性と 2 名の男性 (21-45 歳) が参加した。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚 (矯正含む) と運動機能を有していた。これらの実験参加者は、心理物理実験に関する専門知

表 2.5.1 日本語版”Need for Touch” 尺度

| 項目 No. | 質問文                                       | 分類           |
|--------|-------------------------------------------|--------------|
| Q1.    | 店内を歩いているとき、あらゆる種類の製品をつい触ってしまう。            | Autotelic    |
| Q2.    | 製品に触れると楽しく感じることもある。                       | Autotelic    |
| Q3.    | 購入前に触ることのできる製品のほうが信頼できる。                  | Instrumental |
| Q4.    | 製品を実際に手にとってから購入するほうが快適である。                | Instrumental |
| Q5.    | 店内を探索するとき、あらゆる種類の製品を手にとることが重要である。         | Autotelic    |
| Q6.    | 実際のお店で製品に触ることが出来ない場合、その製品を買うことは気乗りがしない。   | Instrumental |
| Q7.    | 製品を購入するつもりがない場合でも、製品に触れるのが好きだ。            | Autotelic    |
| Q8.    | 製品に触れたあとのほうが自信をもって購入できる。                  | Instrumental |
| Q9.    | 店内を探索する時、たくさんの製品に触りたい。                    | Autotelic    |
| Q10.   | 製品に購入する価値があるかどうか決める唯一の方法は、実際にそれに触れることである。 | Instrumental |
| Q11.   | 買う前に実際に手に取れるのであれば、買うであろう製品がたくさんある。        | Instrumental |
| Q12.   | 店内にある、あらゆる種類の製品に触れている自分に気付く。              | Autotelic    |

識を持たず、また、実験目的を知らなかった。本実験のプロトコルは NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験装置と刺激

実験装置は 2.2 の実験と同じであった。触覚刺激として、布や革、金属、木材などの日常生活でよく目にする 24 種類の素材を採用した（図 2.5.1）。これらの触覚刺激は全て、100 mm×100 mm の正方形状の表面をもち、傾斜板から刺激表面までの高さが 30 mm になるように調整された。触覚刺激は、100 mm×100 mm のスリットを持ったプレートに設置することで動かないように固定された。黒いプラスチック板によって、実験参加者は自身の手の動きも触覚刺激も視覚的に観察することはできなかった。右手の人差し指の爪上に取り付けた再帰性反射材マーカーを OptiTrack システム（OptiTrack, Flex13, 120 Hz）によって計測することで、人差し指の位置を記録した。また、触覚刺激を押し込む力を触覚フォースプレート（テック技販, 1000Hz）によって記録した。判断すべき課題は実験参加者の左側のモニターで表示し、回答は実験参加者の左手の手元のボタンを押すことで行われた。

#### 2.5.2 実験手続き

実験参加者の課題は、触覚属性を判断するために目の前に置かれている触覚刺激に触れ、判断できた時点なるべく早く、かつ、なるべく正確に回答することであった。各試行において、実験参加者はスタート位置に右手の人差し指を置き、ビープ音が鳴ったら手を前に伸ばして触覚刺激を触り始めた。触覚属性に関する評価ができ次第、左手の手元に置かれた 7 つのボタンのうちどれか 1 つを押すことで回答を行った。

実験参加者に判断するよう求めた触覚属性は、硬い/柔らかい、粗い/なめらか、粘つく/滑る、温かい/冷たい、好ましい/好ましくない、の 5 種類であった。これらの触覚属性値を 7 段階で評価するように求めた。実験で用いた触覚刺激は 24 種類であり、1 セッションの中で 24 種類の触覚刺激をランダム



図 2.5.1 実験で用いた 24 種類の触覚刺激

な順番で 1 回ずつ提示した。はじめに、触覚刺激のバリエーションを学習してもらうため、触覚刺激を一通り 5 秒ずつ触ってもらった。その次に、「触覚刺激に触れ、どんな触覚刺激か理解できた時点でキーを押す」という課題（自由探索課題）を 1 セッション行った。その後に、5 判断課題（硬さ判断課題、粗さ判断課題、粘つき判断課題、温かさ判断課題、好ましき判断課題）をそれぞれ 4 セッション行った。判断課題の提示順はランダムであった。実験参加者は、合計 504 試行（自由探索課題を 1 セッション（24 触覚刺激） + 5 判断課題 × 4 セッション × 24 触覚刺激）を 1 日、8 時間以内に行った。

### 2.5.3 結果

これまでの実験同様に、実験参加者の手の動きを説明変数として、実験参加者の触り心地評価を説明するモデルを重回帰分析によって求めた。ただし本実験では、実験参加者間でデータを平均するのではなく、個々の実験参加者において重回帰モデルを求め、その説明力を調べる。

今回の実験はこれまでの 4 基本触覚属性評価課題（2.1 節）や、好ましき評点課題（2.2 節）と異なり、定められた時間だけ触り続けるのではなく、判断できた時点ですぐに回答を行う課題である。そこで、まずはじめに触れ始めてから回答にかかる時間（反応時間）を解析した。まず判断課題によって反応時間が変わるのかどうかを調べた結果を図 2.5.2 に示す。この結果から、判断課題によって反応時間は大きく変わらないことがわかる。続いて、各判断課題において触覚刺激によって反応時間が変わるのかどうかを調べた結果を図 2.5.3 に示す。この結果から、中間程度に評価された刺激ほど反応時間が大きくなることを調べる。

続いて、本実験の位置データと接触力データから図 2.5.4 に示すような 30 種類の運動特徴量を計算した。そして、これらの手の動きの関係を解釈しやすいように、また、そのあとの重回帰分析における多重共線性を防ぐために、手の動きを類似度に基づいて Ward 法による階層クラスタ分析を行った。Pseudo-F の指標はクラスタ数が 5 のときに最大になり、5 つのクラスタのときに最もクラスタ間が疎でクラスタ内が密であると解釈できる。よって、続く重回帰分析では説明変数としてそれぞれのクラス

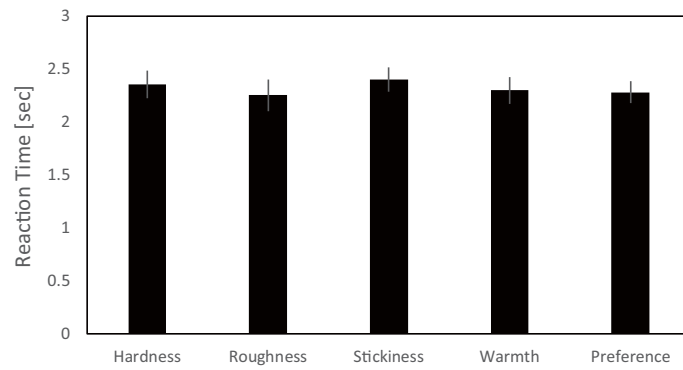


図 2.5.2 判断課題ごとの平均反応時間。

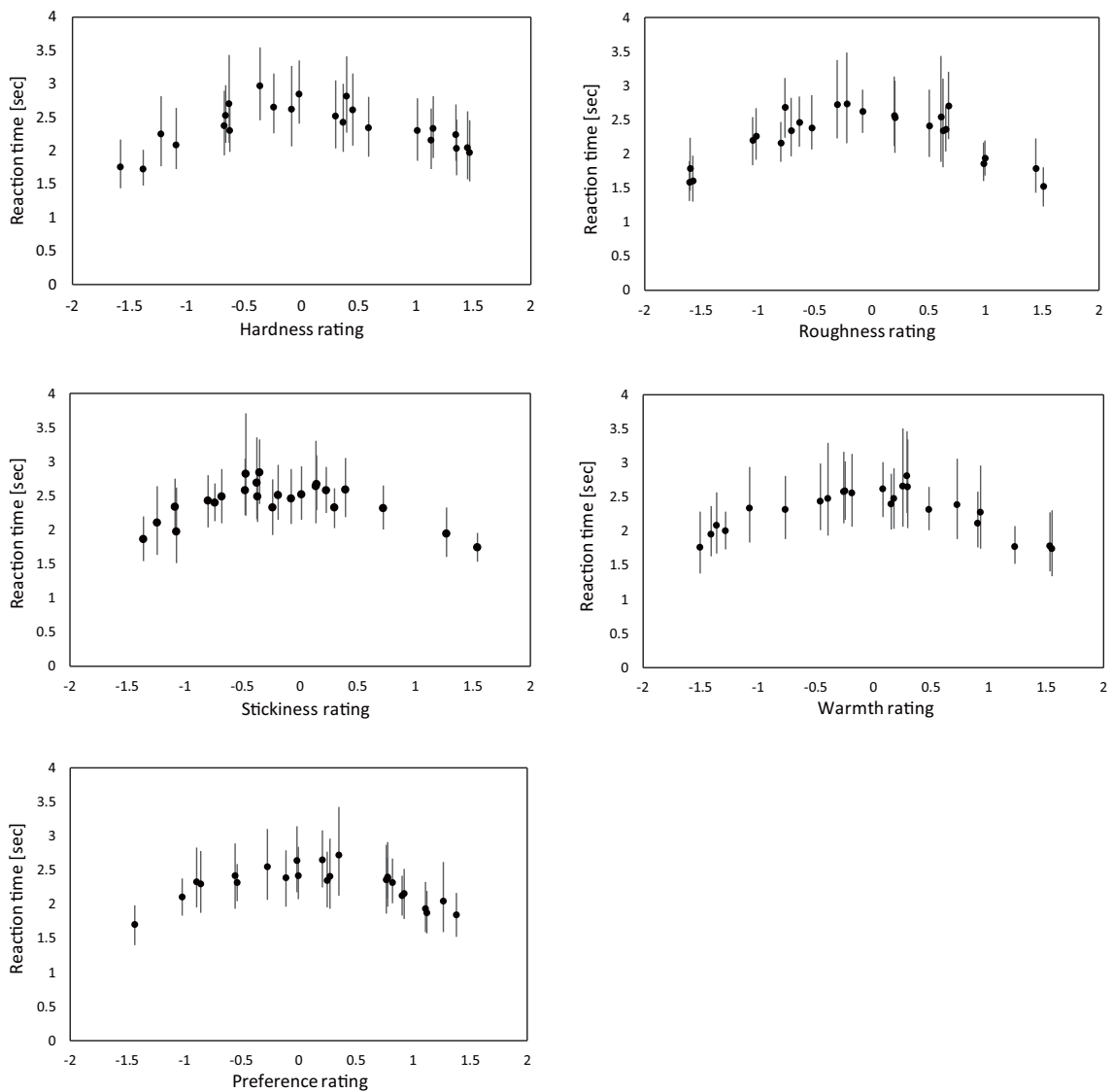


図 2.5.3 各判断課題における触覚刺激ごとの平均反応時間。各触覚刺激の評価値は実験参加者内で標準化された後に、実験参加者間で平均している。

タから一つずつ、合計 5 つの運動特徴量を採用する。5 クラスタを上から順に見ていくと、1 つめは水平方向における手の動き、2 つめは押し込む手の動き、3 つめは鉛直方向の手の動き、4 つめは指先加速度、5 つめは押し込む力の微分値に関連するクラスタであるといわれる。

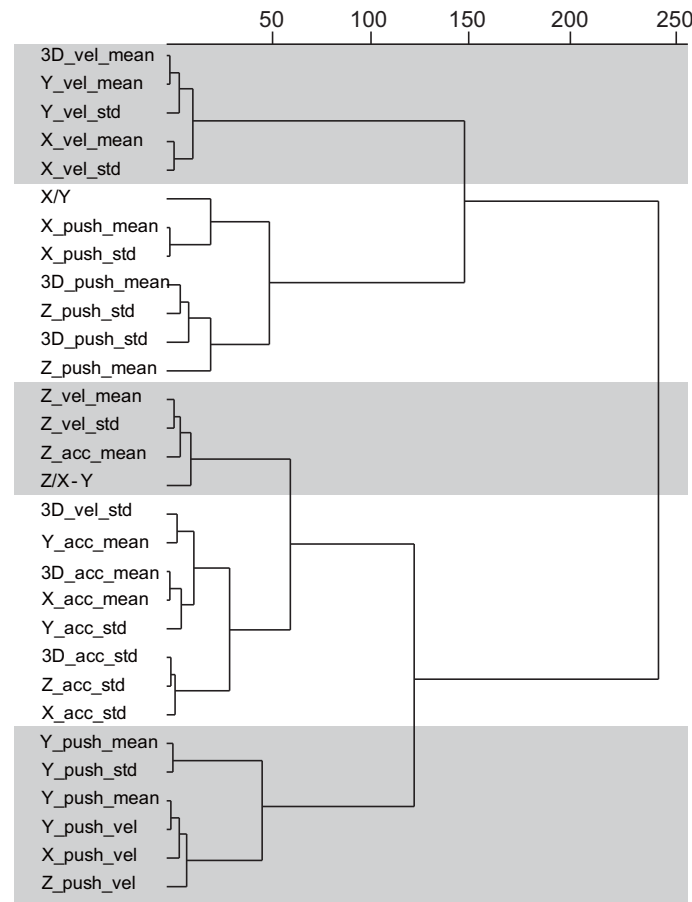


図 2.5.4 運動特徴量とそのクラスタ分析の結果。

続いて、これまでの解析と同様に、各運動特徴量がそれぞれの触り心地評価とどのように相関しているかを図 2.5.5 に示す。まず硬さ評価との相関については、y 方向（前後方向）の押付力が正の相関を持つこと、方向比（左右/前後）が負の相関を持つことがわかる。前者については、実験参加者は手を前に伸ばして触覚刺激を押そうとするとときに触覚刺激に前後方向へ力が加わることから、硬いものほど強い力で押すという性質 [42, 43, 44] が現れていると考えられる。また後者については、先行研究 [29] と一致する結果で、硬いものほど押す動作が大きく、左右と前後の方向の運動比が小さくなるためと考えられる。粗さ評価との相関については、水平面における指先移動速度が負の相関を持つこと、前後方向における指先加速度が正の相関を持つことがわかる。粘つき評価との相関においては、これら粗さ評価と相関するパラメタに加えて、鉛直方向の指先加速度が正の相関をもつことがわかる。粗さや粘つきはともに表面摩擦と関係があると考えられており、摩擦が大きくなるほど粗さや粘つきが大きくなり、かつ指先速度が小さくなるため、速度と粗さ評価や粘つき評価が相関すると考えられる。また、粗いものや粘つくものはなぞり方が左右方向へのストロークになることで前後方向への指先加速度が相対的に

小さくなる可能性がある。そして、粘つく刺激ほど皮膚への粘着度合いが高まるために鉛直方向の加速度が粘つき評価と相関を持つと予想される。温かさ評価との相関については、水平面方向の指先速度が正の相関を持つこと、前後方向の押付力が負の相関をもつことがわかる。これらは 2.1 の結果と一致する。最後に、好ましき評価との相関については、粘つき評価や粗さ評価の結果を正負反転させた結果となっており、好ましき評価と粗さ・粘つき評価の間の負の相関を示唆するものである。

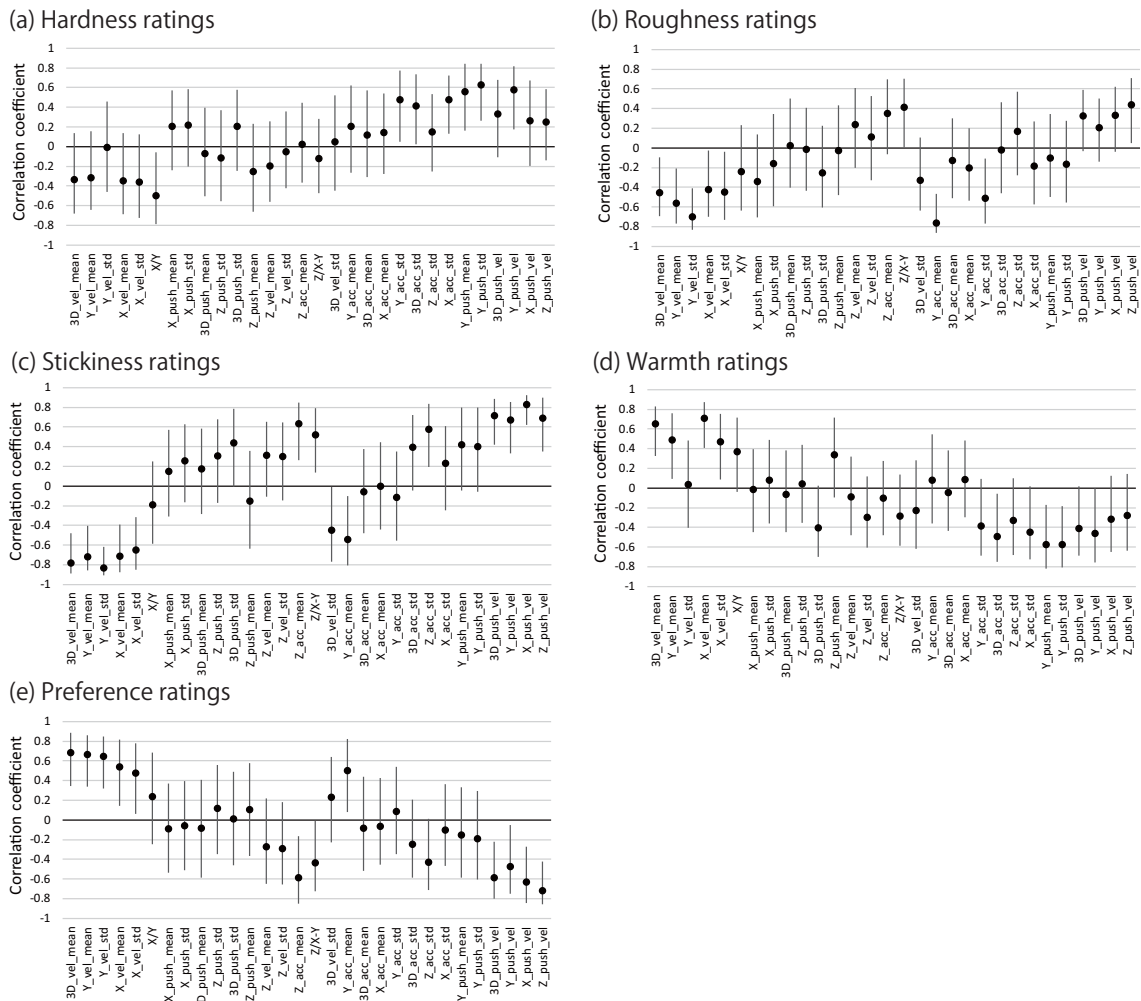


図 2.5.5 各触り心地評価と運動特徴量の Spearman 相関係数。エラーバーは bootstrap 法による相関係数の 95% 信頼区間を表している。

そして、実験参加者ごとに 5 つの運動クラスタそれぞれから 1 つずつ運動変数を取り出し、ある触り心地評価を重回帰分析によって最も説明できる運動変数の組み合わせを総当たりで調べた。その結果の実験参加者ごとの決定係数を図 2.5.6 に示す。この結果から、実験参加者ごとに説明力は異なるものの、全員 0.5 以上の決定係数を示しており、全体的に説明力が高いことがわかる。この決定係数のばらつきが、能動的な触覚の利用度合いを表す”Need for Touch” 尺度と関係があるかどうかを調べるために、実験参加者 10 人分の決定係数と”Need for Touch” 尺度の間の相関を調べた。硬さ評価、粗さ評価、粘つき評価、温かさ評価、好ましき評価を説明する際の決定係数と”Need for Touch” 尺度の関係

を、それぞれ図 2.5.7、図 2.5.8、図 2.5.9、図 2.5.10、図 2.5.11 に示す。これらの結果から、触覚探索運動による粗さ評価の個々人の説明力は Q2 の質問項目と負の相関を、触覚探索運動による好ましき評価の個々人の説明力は Q12 の質問項目と正の相関をもつことが明らかになった。質問項目から、「製品に触れると楽しく感じることもある」と回答した実験参加者ほど、手の動きによる粗さ評価の説明力が低いこと、また、「店内にある、あらゆる種類の製品に触れている自分に気づく」と回答した実験参加者ほど、手の動きによる好ましき評価の説明力が高いことがわかる。

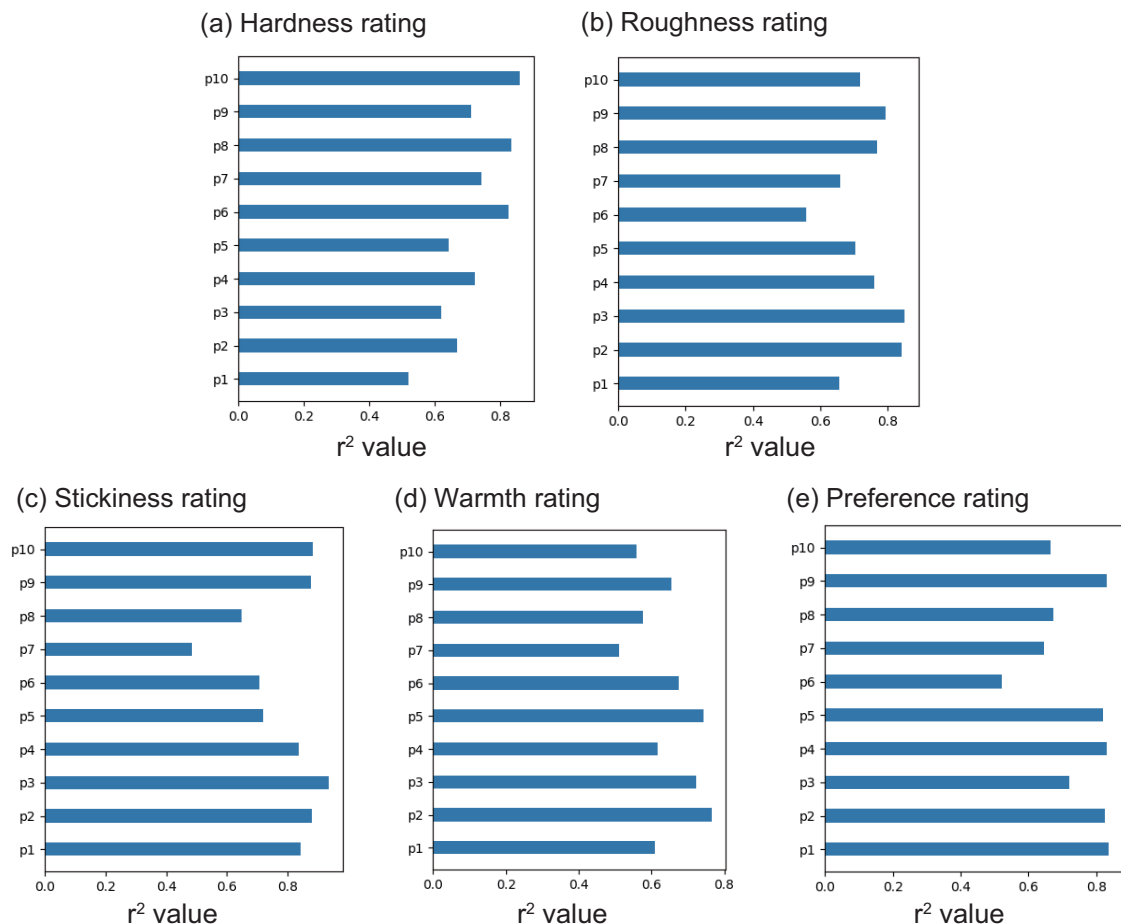


図 2.5.6 実験参加者ごとに求められた重回帰モデルによる説明力の高さ。縦軸が各実験参加者を、横軸が重回帰分析の決定係数を表している。

#### 2.5.4 考察

はじめに、本実験における個々人の重回帰分析の説明力について、これまでの 2.1 や 2.2 における実験における重回帰分析の説明力よりも全体的に高い点について考察をおこなう。本実験とこれまでの実験の大きな違いは、実験課題にある。これまでの実験においては一定の時間（10 秒間、もしくは 5 秒間）ずっと触覚刺激に触れるように指示をしていた一方で、本実験では判断でき次第回答を行わせて触覚探索運動を中止させた。本実験の解析結果から、判断時間は 2.0-2.5 秒程度であることからこれらの時間だけ物体に触れば判断が行えると考えられる。一方で、これまでの実験では、5 秒もしくは 10 秒

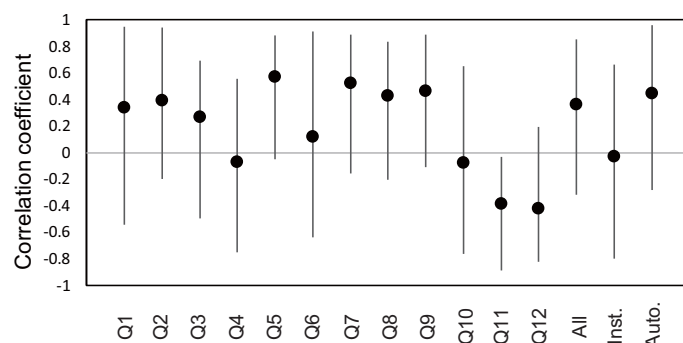


図 2.5.7 各実験参加者における、NFT アンケートへの回答値と、手の動きによる硬さ評価の説明力の間の相関係数。エラーバーは、bootstrap 法による相関係数の 95% 信頼区間を表している。

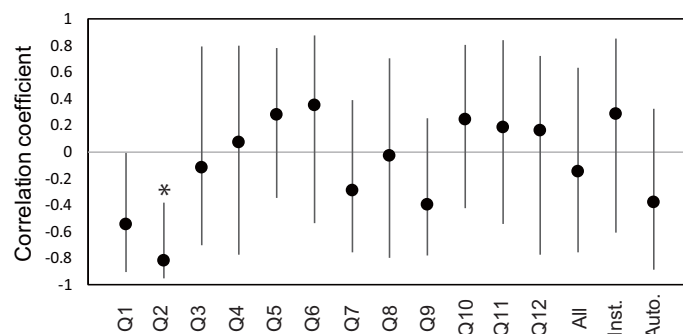


図 2.5.8 各実験参加者における、NFT アンケートへの回答値と、手の動きによる粗さ評価の説明力の間の相関係数。エラーバーは、bootstrap 法による相関係数の 95% 信頼区間を表している。アスタリスクは、その相関係数が、ランダムシャッフルされた決定係数と NFT アンケートの評価値との相関係数の 95% 信頼区間の外にある（その相関係数の値が偶然には起こりえないと解釈できる）ことを表す。

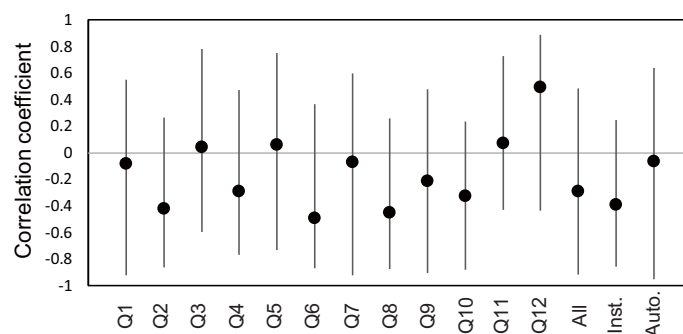


図 2.5.9 各実験参加者における、NFT アンケートへの回答値と、手の動きによる粘つき評価の説明力の間の相関係数。エラーバーは、bootstrap 法による相関係数の 95% 信頼区間を表している。

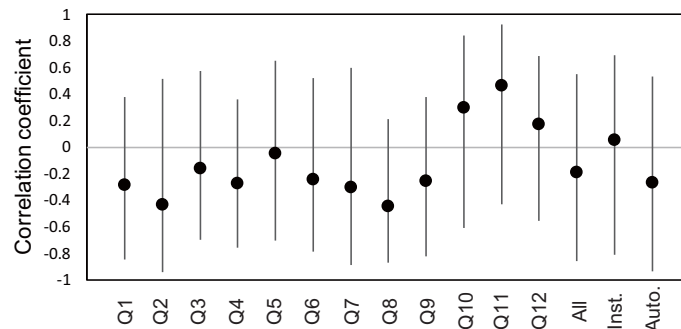


図 2.5.10 各実験参加者における、NFT アンケートへの回答値と、手の動きによる温かさ評価の説明力の間の相関係数。エラーバーは、bootstrap 法による相関係数の 95% 信頼区間を表している。

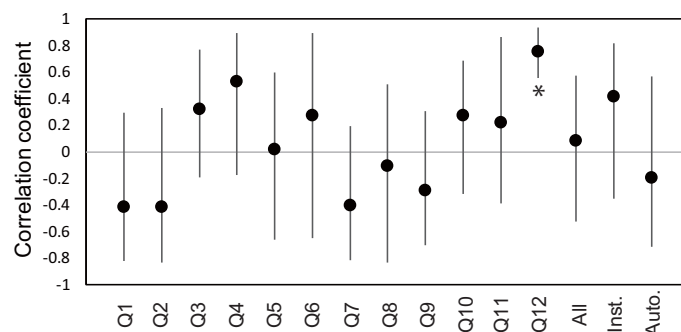


図 2.5.11 各実験参加者における、NFT アンケートへの回答値と、手の動きによる好ましき評価の説明力の間の相関係数。エラーバーは、bootstrap 法による相関係数の 95% 信頼区間を表している。アスタリスクは、その相関係数が、ランダムシャッフルされた決定係数と NFT アンケートの評価値との相関係数の 95% 信頼区間の外にある（その相関係数の値が偶然には起こりえないと解釈できる）ことを表す。

触らせていたため、開始 2 秒くらいで判断が終わり、以降は無目的に触り続けた可能性がある。2.1 の実験の結果から、無目的に触れるよう教示したときのほうが説明力が低かったため、判断終了後の無目的な触り方が触り心地評価の説明力を下げた可能性がある。

次に、触覚探索運動による触り心地評価の説明力と、“Need for Touch” 尺度による触覚の活用度合いの関係について述べる。触覚探索運動による粗さ評価の説明力が高い実験参加者ほど「製品に触れると楽しく感じることもある」という項目を低く評価すること、触覚探索運動による好ましき評価の説明力が高い実験参加者ほど「店内にある、あらゆる種類の製品に触れている自分に気づく」という項目を高く評価することが明らかになった。これらの質問項目はともに快楽志向的次元に関するものであり、冒頭で述べたように、その人間が日常的に触覚を能動的に用いようとするかどうかの説明力に関わる、という仮説を支持するものである。特に後者の「店内にある、あらゆる種類の製品に触れている自分に気づく」傾向の大きい実験参加者ほど触覚探索運動が好ましき評価の情報をよく持っていることから、快楽志向の大きい実験参加者ほど能動的に好ましいものと好ましくないものの触り方を使い分けている可能性が考えられる。一方で、前者については、「製品に触れると楽しく感じることも」ない実験参加者ほど触覚探索運動が粗さ評価の情報をよく持っていることから、快楽志向の小さい実験参加者ほど触覚探索運動が一樣になることで粗さと関連する表面の物理特性から受ける影響が大きくなる可能性がある。

る。これらはまだ仮説に過ぎず、全ての快樂志向に関する項目が相関するわけではないため、実験参加者を増やした新たな実験を行うなど更なる検証が必要であるが、物理特性に影響された手の動きが粗さの情報をもつ一方、実験参加者による能動的な手の動きの変化が好ましさの情報をもつ可能性が示唆される。

#### **2.5.5 本実験のまとめ**

本実験の結果から、個々の実験参加者の触覚探索運動がどれだけ粗さ評価の情報や好ましさ評価の情報をもつかは、その実験参加者がどれだけ快樂志向に触覚を用いようとするかというパーソナリティと関わっている可能性が示唆された。

## 2.6 本章のまとめ

本章では、心理物理実験と多変量解析を通して、行為者、すなわち能動的に手を動かして触覚刺激に触れた実験参加者が感じた触り心地の情報が、行為者自身の触覚探索運動にどれくらい含まれているかを調べた（図 2.6.1）。その結果、行為者の手の移動速度や加速度、接触力、更には眼球運動が、粗さや硬さのような物理特性と関連する触り心地や、好ましさのような価値的・感性的な触り心地、選択行動と結びついた触り心地に関する情報を持っていることを明らかにした。また、このような触覚探索運動が持つ触り心地の情報は、実験参加者が判断すべき対象（無目的に触るか、特定の触覚情報を判断するか）や、実験参加者の触り方のモード、視覚情報の有無、触覚刺激、個々の実験参加者のパーソナリティ、さらにはその時間的変動にも影響されることを明らかにした。

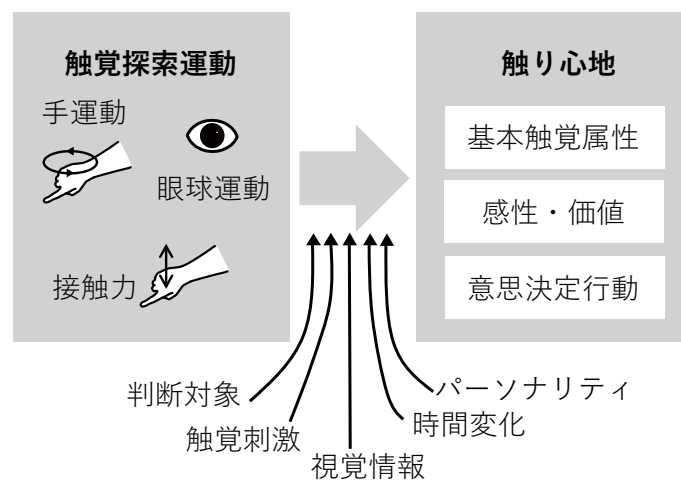


図 2.6.1 本章の実験のまとめ

## 第 3 章

# 触覚探索運動に含まれる 外部観察者の触り心地情報

第 2 章では、触覚探索運動を行っている実験参加者、すなわち行為者を対象として、行為者の触覚探索運動がどの程度、またどのように行為者が感じる触り心地の情報を持っているのかを調べてきた。一方で本章では、行為者の触覚探索運動を外から眺めた外部観察者は行為者の感じる触り心地を推定することができるのか、また、触覚探索運動がどのくらい外部観察者によって推定された触り心地の情報を持つのかを調べた。

### 3.1 外部観察者による触り心地の推定能力

まず本実験では、外部観察者がそもそも他者の触覚探索運動を視覚的に観察することで他者の感じている触り心地を推定できるのか、を調べることを目的とする。

これまでの研究では、物体と相互作用する手の動きではなく、物体そのものの運動を視覚観察することで、観察者が物体の特性を推定できるかどうかを調べるものが多かった。例えば、物体同士の線形衝突からの柔らかさ推定 [125, 126]、物体が震えている動画からの柔らかさや硬さ、粘性の推定 [127, 128]、布の変形動画からの布のスティフネスや密度の推定 [129, 130]、2 次元ベクトル運動からの粘性の推定 [131] が対象として調べられてきた。また一方で、行為者の動きを光点運動として提示したバイオロジカルモーション研究では、その行為者の性別の推定や [132, 133]、アイデンティティの推定 [134, 135, 136]、感情状態の推定 [137]、物体を引っ張る労力の推定 [138] などを調べているが、物体の特性を推定する能力を調べたものではない。指や棒で物体を押し込んだときの押し込み運動と物体変形の両方を視覚的に観察することでコンプライアンスを推定できるかどうかを調べた研究もあるが [139, 140, 141]、物体変形のない押し込み運動そのものの貢献は評価されていない。本実験と似た方向としては、物体を持ち上げるバイオロジカルモーションの観察からその物体の重さが推定できるかどうかを調べた研究があるが [142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149]。しかしながら、その重要性にもかかわらず、触覚刺激表面の触り心地については調べられてこなかった。

本実験では、他者（行為者）が触覚刺激表面を探索しているときの手の動きを見た観察者が、行為者の感じた触り心地を推定できるかどうかを調べ、どのような手の動きの特徴を推定に用いているのかを解析することを試みる。このために、二つのセッションからなる心理物理実験を行った（図 3.1.1）。行

為者セッションでは、行為者は触覚刺激の表面を探索し、触覚評価を行った。この際の行為者の手の動きが計測・記録された。外部観測者セッションでは、行為者セッションで得られた手の動きを、指の皮膚の変形といった視覚変形のような重要でない要因を除外するために、光点運動としてレンダリングした。そして、別の実験参加者（外部観測者）に手の光点運動を観察してもらい、行為者によって触られている見えない触覚刺激について触覚評価を行ってもらった。行為者と外部観測者で触覚評価は共通であり、7項目の材質カテゴリ（ガラス、石、布、木、ゴム、紙、プラスチック）と4項目の材質属性（硬さ、粗さ、粘つき、温かさ）からなる。解析では、行為者と観測者の評価を比較した。

図 3.1.1(b) は触り心地推定能力の解析における変数間関係を表している。この解析では、はじめに外部観測者が行為者がどのように感じたかを推定できるかどうかを調べるために、外部観測者と行為者の触覚評価の間の相関  $[Po, Pt]$  を評価した。次に、外部観測者間での触覚評価の相関  $[Po, Po]$  を求めることでどの程度観測者の推定が一貫していたのかを評価し、それを行為者間の触覚評価の相関  $[Pt, Pt]$  と比較した。もし全員の外部観測者が同じように評価を行っていた場合  $[Po, Po]$  の相関が高かった場合、行為者の手の動きと触覚知覚の間の結びつきについて外部観測者間共通の戦略を用いていることを示唆するものである。更に、外部観測者の推定戦略を調べるために、どの程度外部観測者が行為者の手の動きに頼っていたかを評価したあと、外部観測者の触覚評価と行為者の手の運動特徴量の間の相関  $[Po, M]$  を計算し、それを行為者の触覚評価と行為者の手の運動特徴量の間の相関  $[Pt, M]$  と比較した。

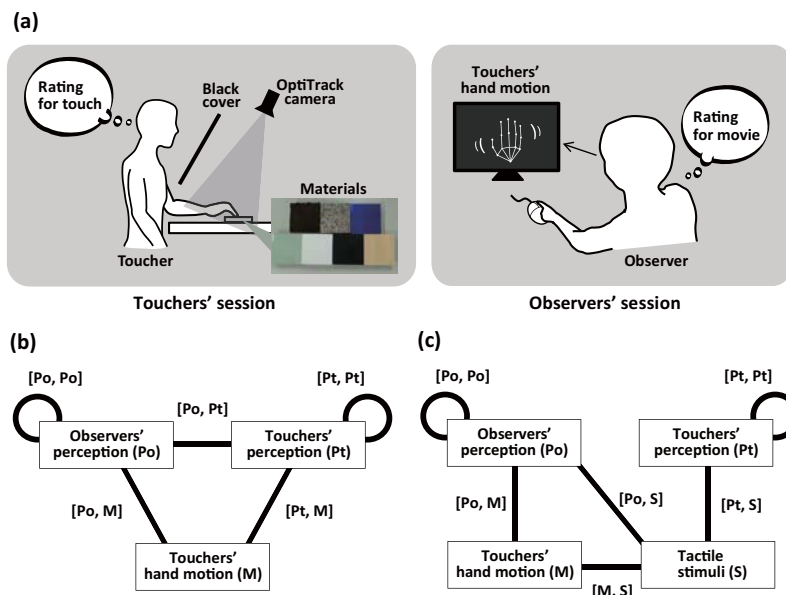


図 3.1.1 実験のアウトライン。(a) 行為者セッションと外部観測者セッション。(b) 触り心地推定における実験変数間関係。(c) 刺激推定における実験変数間関係。"Observers' perception (Po)" は、外部観測者の触覚評価を表す。"Touchers' perception (Pt)" は行為者の触れた刺激に対する触覚評価を表す。"Touchers' hand motion (M)" は行為者の手の動きのデータから抽出された運動特徴量を表す。"Tactile stimuli (S)" は行為者によって触られている触覚刺激を表す。それぞれの線は、実験変数間の相関を表す。例えば、 $[Po, Pt]$  は外部観測者の知覚（外部観測者による触覚評価）と行為者の知覚（行為者の触れた刺激に対する触覚評価）の間の相関を表す。

### 3.1.1 実験：行為者セッション

#### 実験参加者（行為者）

本実験には3名の女性と3名の男性（21-39歳）が参加した。これらの実験参加者を行為者と呼ぶことにする。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）と運動機能を有していた。これらの実験参加者は、心理物理実験に関する専門知識を持たず、また、実験目的を知らなかった。本実験のプロトコルはNTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験装置と刺激

実験装置は図3.1.2に示すとおりである。行為者は触覚刺激が置かれたテーブルに座った。ガラス、石、布、木、ゴム、紙、プラスチックの7種類の素材を触覚刺激として用いた。これらの素材は、材質知覚における先行研究でもよく採用されてきた素材である[150, 151]。それぞれの触覚刺激は100mm×100mmの大きさに成形された。黒いプラスチック板を用いて、行為者から自身の腕と触覚刺激が視覚的に観察できないようにし、行為者には黒いプラスチック板の中央の注視点を見るように教示した。16個の再帰性反射材マーカータ行為者の手の甲に取り付け（図3.1.2）、OptiTrackシステム（OptiTrack, Flex13, 120Hz）によって全てのマーカータ位置を計測した。このようにして計測された行為者の手の動きのデータはcsvファイルとして出力された。

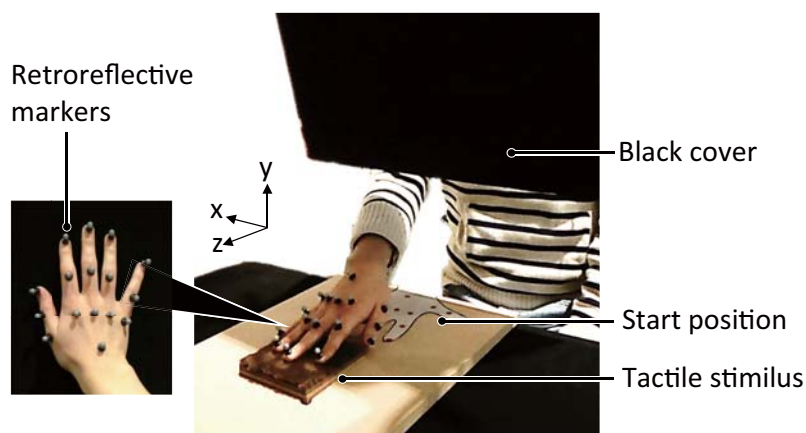


図 3.1.2 行為者セッションにおける実験のセットアップ

#### 実験手続き

行為者は、5秒間触覚刺激の表面を自由に探索し、そのあと質問表に答えるように教示された。各試行の開始前には、行為者は黒いプラスチック板の中央の注視点を見て、右手を開始位置（図3.1.2を参照）に置いていた。ピープ音になった後、行為者は触覚探索を開始した。もう一度5秒後にピープ音になったら触覚探索を終了した。行為者の左側に設置されたモニタに質問表が表示された。質問表は、7種類の材質カテゴリ評価項目と、4種類の触覚属性評価項目の、合計11種類の評価項目からなる。7種類の材質カテゴリ評価としては、行為者に触れた物体がどの程度ガラスらしかったか、石らしかったか、

布らしかったか、木らしかったか、ゴムらしかったか、紙らしかったか、プラスチックらしかったかを回答させた。これらの材質カテゴリは、実際にこの実験で使用された材質を採用している。4種類の触覚属性評価としては、硬さ/柔らかさ、粗さ/なめらかさ、粘つき/滑り、温かさ/冷たさの形容詞対を評価させた。これらの触覚評価は、触覚知覚における主要な次元であることが知られていることから採用された [45]。全 11 項目について 11 段階でマウスをクリックすることによって回答させた。11 項目の提示順は各試行でランダム化された。本実験は 20 ブロックからなり、各ブロックでは行為者が 7 種類の触覚刺激を一通り触った（すなわち各ブロックは 7 試行からなる）。各ブロックにおいて、触覚刺激の提示順はランダムであった。実験が始まる前に、行為者は実験手順に慣れるため、また触覚刺激のバリエーションを知るために、練習として 1 ブロック行った。それぞれの行為者は全てのブロックを 8 時間以内（休憩を含む）に終えた。

### 3.1.2 実験：外部観察者セッション

#### 実験参加者（外部観察者）

本実験には 7 名の女性と 3 名の男性（20-46 歳）が参加した。これらの実験参加者を外部観察者と呼ぶことにする。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）と運動機能を有していた。これらの実験参加者は、心理物理実験に関する専門知識を持たず、また、実験目的を知らなかった。本実験のプロトコルは NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験装置と刺激

視覚刺激（以下、タッチムービーと呼ぶ）はコンピュータモニタ（HP, ProDisplay P232, 1980 × 1080, 60Hz）に提示された。タッチムービーの例を図 3.1.3 に示す。タッチムービーはコンピュータモニタの左側に提示され、質問表が右側に提示された。タッチムービーは、行為者セッションで記録された csv ファイルにおける行為者の手の動きのデータを元に、Processing で記述された 3D レンダリングプログラムを用いて生成した。行為者の手の甲に取り付けられたそれぞれの再帰性反射マーカークの位置を見下ろす視点から描画した。この視点を採用した理由は、我々は普段我々の手の動きを上から見下ろすことが多いからである。各タッチムービーの長さは 5 秒であり、外部観察者が質問表を回答し終えるまで何度も繰り返し再生された。

#### 実験手続き

外部観察者はそれぞれのタッチムービーを見るように教示された。タッチムービーでは、行為者が 7 種類の触覚刺激のうちどれか 1 つを触っており、外部観察者は見えない触覚刺激について評価する必要があった。外部観察者は実験が始まる前に全ての触覚刺激を見て触ることができた。質問表は行為者セッションで用いられたものと同じである。外部観察者がマウスクリックで全ての質問項目への回答を完了したあと、次のタッチムービーの再生に進むことができた。全質問項目への回答が終わるまでは、タッチムービーを観察しただけ観察することができた。外部観察者は 3 日間で 840 タッチムービー（6 人の行為者 × 7 種類の触覚刺激 × 20 試行）を評価し、各日 280 動画を評価し終えるのに 8 時間を買した。タッチムービーの行為者が変わるときには、観察者はそのように伝えられた。各行為者のタッチ

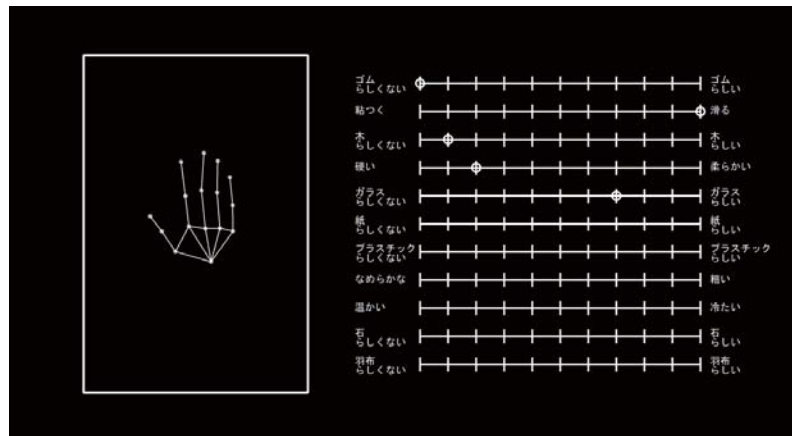


図 3.1.3 外部観察者セッションにおけるタッチムービーと質問表

ムービーの提示順序はランダム化されず、行為者が試行を行った順番に提示された（すなわち 7 種類の刺激からなる合計 20 ブロックが提示された）。それぞれの行為者のタッチムービーにおける最初と 2 つ目のブロックは、手順に慣れるためのトレーニングブロックであり、視覚刺激のバリエーションに慣れる必要があった。これらのブロックは解析から除外された。行為者の提示順序はランダム化された。

### 3.1.3 データ解析

#### 手の運動の分析

外部観察者の推定戦略を調べるために、行為者の手の運動を計測・分析した。行為者の手の動きから、13 種類の運動特徴量を計算した。人差し指の指先がもっとも手による探索において用いられる一方で手のそれ以外の部分はあまり関わらないことから [152]、ほとんどの運動特徴量は人差し指先端のマーカーについて解析された。X 軸、Y 軸、Z 軸、そして 3 次元空間（各軸については、図 3.1.2 を参照）のそれぞれにおける総移動距離は、先行研究と同様の方法で、人差し指の位置データを積分することによって計算された [28, 29]。先行研究 [28] でも用いられている潜時は、各試行において初めて人差し指の先端の速さが 10mm/sec を超えた時点と定義した。その他の運動特徴量は最初の到達運動の後に計算された。最初の到達運動の終了時点は、Y 軸における人差し指の指先速度が最小速度になった後に 0 になる時点（すなわち、人差し指が触覚刺激に置かれた時点；図 3.1.4 を参照）と定義された。指先速度の平均と分散、指先加速度の平均と分散 [28, 29] は、最初の到達運動の後の人差し指の運動データに対して計算された。運動方向比 (X/Z) [29] は、X 軸方向（左右方向）の総移動距離を Z 軸方向（前後方向）の総移動距離で割ることで計算された。運動方向比 (X-Z/Y) は、X-Z 方向（水平方向）の総移動距離を Y 軸方向（鉛直方向）の総移動距離で割ることで計算された。また、触覚探索運動における手の開閉度合いや、指の間の独立度合いの寄与を調べた研究 [153] に習い、これらの特徴量も算出する。手の平がどれくらい開いているのかを定量化するために、全てのマーカーの 3 次元位置を平均することで重心を計算し、各マーカー位置と重心の間の距離を平均した値を開閉度合いとして求めた。指の運動の協調具合を定量化するために、全てのマーカーの速度を平均することで速度重心を計算し、各

マーカーの速度ベクトルと重心の速度ベクトルの差分を平均した値を協調度合いとして求めた。

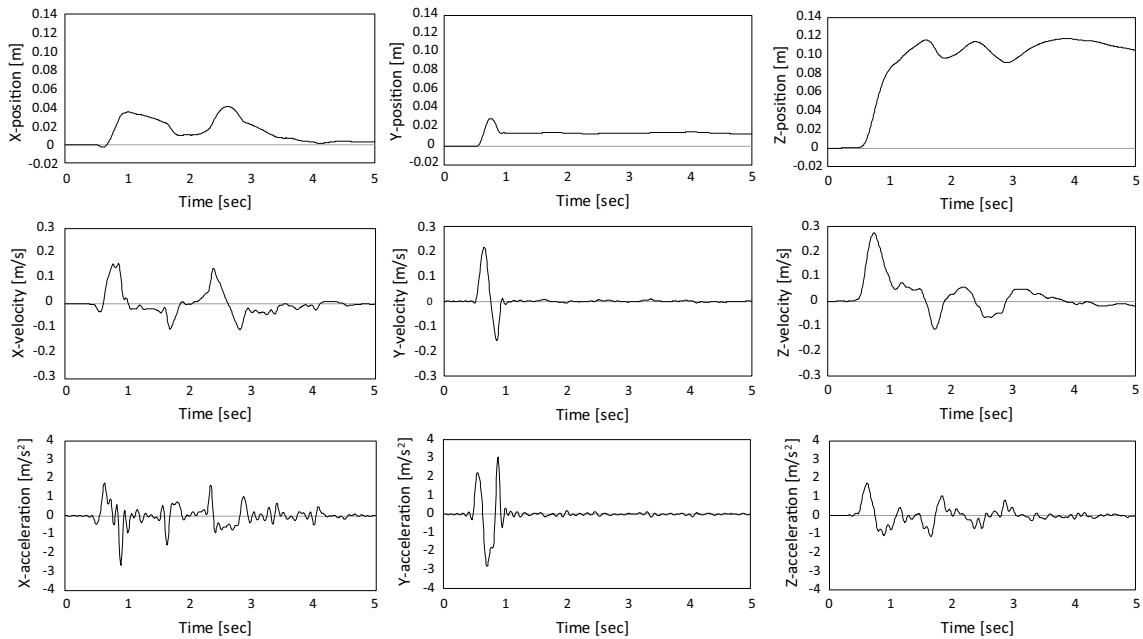


図 3.1.4 計測された人差し指の位置、速度、加速度の例

13 種類の運動特徴量をいくつかのクラスターに分類するためにクラスター分析を行った。42 条件における運動特徴量（6 人の行為者 × 7 種類の触覚刺激；18 回の繰り返しを平均）の標準化された値（平均が 0、標準偏差が 1 に標準化）をもとに、運動特徴量間のユークリッド距離を求めた。ユークリッド距離から非類似度マトリクスを計算するために Ward 法を採用し、最小の類似度をもつ運動特徴量同士を新たなクラスターとして統合していった。

#### ランダムイゼーション検定

データから計算された相関係数や決定係数がチャンス以上かどうかを検定するために、ランダムイゼーション検定を用いたこの分析では、Spearman の相関分析や重回帰分析に用いられるデータの順序をランダムにシャッフルすることで無関係なデータセットを作成し、そのデータセットに対して相関係数や重回帰分析を行う。この手順を 10000 回繰り返すことで、データに対応がないときの相関係数もしくは決定係数の信頼区間を得ることができる。元のデータから計算された相関係数や決定係数が、この 95% 信頼区間と重なっていないのであれば、その相関係数もしくは決定係数は偶然では起こりにくい値であると推定することができる。

#### 3.1.4 結果：行為者と外部観察者の触り心地評価の相関 [Po, Pt]

はじめに、外部観察者はどのくらい行為者の触り心地評価を推定することができたのかを調べるために、外部観察者と行為者の触り心地評価の間の Spearman 相関を計算した（図 3.1.1(b) [Po, Pt]）。外部観察者と行為者の材質カテゴリ評価に関する相関は 0.15、外部観察者と行為者の触覚属性評価に関する相関は 0.27 であった（図 3.1.5、相関の様子については図 3.1.6 も参照）。それぞれの評価における相

関を見ていくと、布、ゴム、硬さ、粘つきの評価に関する相関係数は全ての評価の中で比較的高いことがわかる（図 3.1.5、相関の様子については図 3.1.6 も参照）。これらの結果は、外部観察者はチャンス以上で、行為者が触覚刺激表面に対してどのように感じたかを当てられるが、その正確さは高くなく、また評価によって異なることを示している。

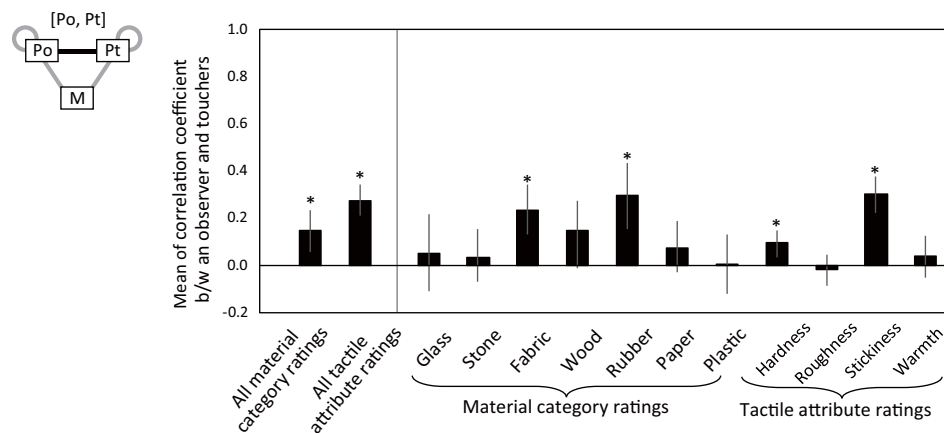


図 3.1.5 外部観察者と行為者の間の Spearman 相関係数。このグラフでは、それぞれの外部観察者について全ての行為者との相関係数を計算した上で、外部観察者間で相関係数を平均した。エラーバーはブートストラップ法 [49] によって計算された 95% 信頼区間である。アスタリスクは、エラーバーが 0 と重ならない（すなわち、相関係数が 0 ではないとみなせる）ことを意味する。

### 3.1.5 結果：外部観察者間での触り心地評価の類似度 [Po, Po] と行為者間での触り心地評価の類似度 [Pt, Pt]

外部観察者はチャンス以上に行為者が感じていることを推定できること [Po, Pt] を示した。しかしながら、外部観察者の正確さ（すなわち [Po, Pt] の相関）は低かったため、外部観察者は適当に回答しており、かつサンプルサイズが大きかったために検定力を上げてしまった可能性も考えられる。そこで外部観察者がどのくらい同じように評価をしていたのかを調べるために、ある外部観察者と他の 9 人の外部観察者の間の触り心地評価の Spearman 相関を計算し、全ての外部被験者間で平均した値を計算した。材質カテゴリ評価に対する外部被験者間の相関係数は 0.38、触覚属性評価に対する外部被験者間の相関係数は 0.52 であった（図 3.1.7、相関の様子については図 3.1.8 も参照）。ブートストラップ法 [49] によれば、外部観察者間の触り心地評価の相関係数は、外部観察者と行為者の触り心地評価の相関係数（図 3.1.5）よりも、材質カテゴリ評価 ( $p < 0.005$ )、触覚属性評価 ( $p < 0.001$ ) ともに有意に大きかった。

[Po, Po] の値の大きさを評価するために、相関が高いことが予想される、行為者間の相関係数 [Pt, Pt] と比較した。ある行為者とその他 5 人の行為者の間の触り心地評価の Spearman 相関係数を計算した上で、全ての行為者間で平均した。材質カテゴリ評価における相関係数は 0.67 であり、触覚属性評価における相関係数は 0.82 であった（図 3.1.9、相関の様子については図 3.1.10 も参照）。ブートストラップ法 [49] によれば、これらの行為者間の触り心地評価の相関係数は、外部観察者間の触り心地評価

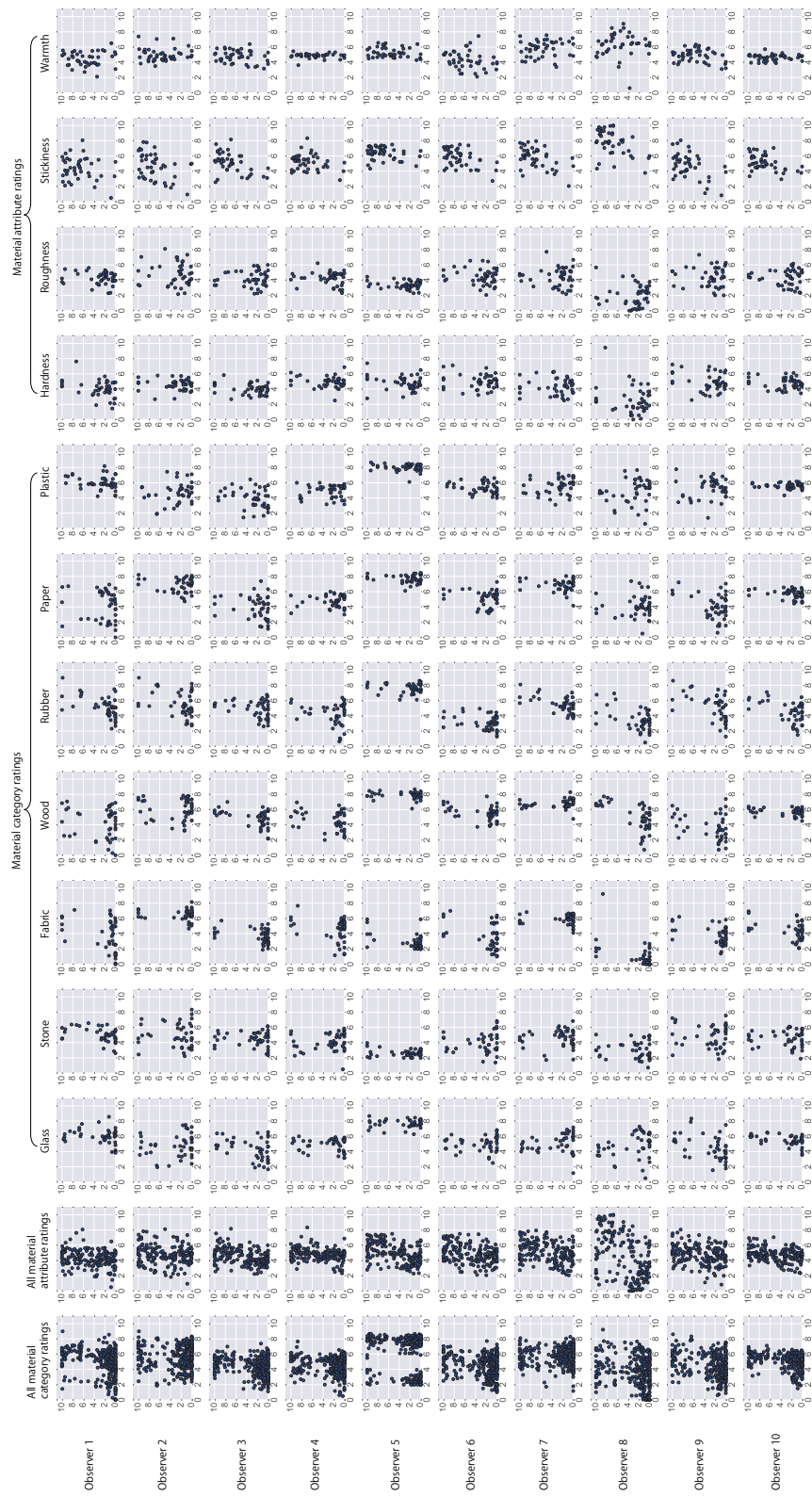


図 3.1.6 外部観察者の評価 (x 軸) と行為者の評価 (y 軸) の相関

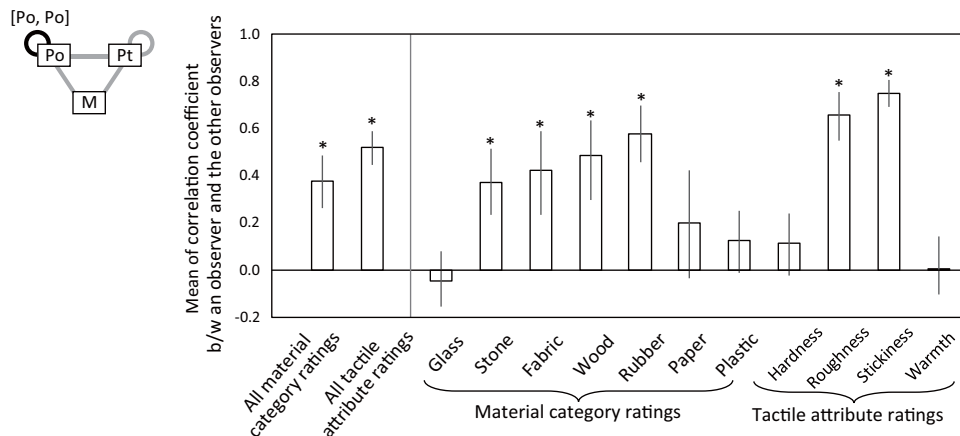


図 3.1.7 外部観察者間の触り心地評価の Spearman 相関係数。その他は図 3.1.5 と同じである。

の相関よりも、材質カテゴリ評価 ( $p < 0.001$ )、触覚属性評価 ( $p < 0.001$ ) ともに有意に大きかった。一方で、それぞれの評価をみていくと、外部観察者間の相関係数は、行為者間の相関係数よりも、粘つき評価において高く ( $p < 0.001$ )、また布らしき評価 ( $p = 0.23$ ) やゴムらしき評価 ( $p = 0.35$ )、粗さ評価 ( $p = 0.96$ ) において差がなかった。このことは観察者間におけるこれらの評価の相関は行為者間の相関と匹敵するものであることを示唆する。以上のことから、外部観察者は正確さこそ高くはないものの、行為者の感じた触り心地の推定においては共通した戦略を用いて評価していることを示すものである。

### 3.1.6 結果：行為者の運動特徴量による行為者と外部観察者それぞれの触り心地評価の説明 [Po, M], [Pt, M]

外部観察者の一貫した戦略にもかかわらず、彼らの触り心地評価値は行為者の触り心地評価値とあまり似ていなかった。このことは、2つの可能性を示唆する。1つは、外部観察者は触り心地推定において行為者の手の動きを用いることができなかったという可能性（すなわち、[Po, M] の相関が低い）であり、もう1つは、行為者の手の動きがそもそも行為者の触知覚の情報を十分に持っていなかったという可能性（すなわち、[Pt, M] の相関が低い）である。これらの可能性を検証するために、行為者の手の動きが、外部観察者と行為者のそれぞれの触り心地評価とどのように相関するかを調べた（[Po, M] と [Pt, M]）。

はじめに、指の運動データから 13 種類の運動特徴量を求め（データ解析の節を参照）、重回帰分析における多重共線性とか学習を避けるために、それらの運動特徴量をクラスター分析によって分類した（図 3.1.11）。Pseudo-F[83] を求めたところ、これら 13 種類の運動特徴量を分類するにあたり最も適したクラスタ数は 4 であった。例えば、総移動距離（3 次元）、指先速度の平均、総移動距離（X 軸）、総移動距離（Z 軸）が同じクラスタに分類され、このグルーピングは指先速度が大きいときに移動距離も大きくなることからもっともらしい。どの程度行為者の手の動きが外部観察者の触り心地評価をよく説明できるのか（図 3.1.1(b)[Po, M]）を調べるために、各運動クラスタの代表的な運動特徴量を用いて、重回帰分析を行った際の説明力を計算した。今回の重回帰分析では、外部観察者の触り心地評



図 3.1.8 ある外部観察者の評価 (x 軸) とその他の外部観察者の評価 (y 軸) の相関

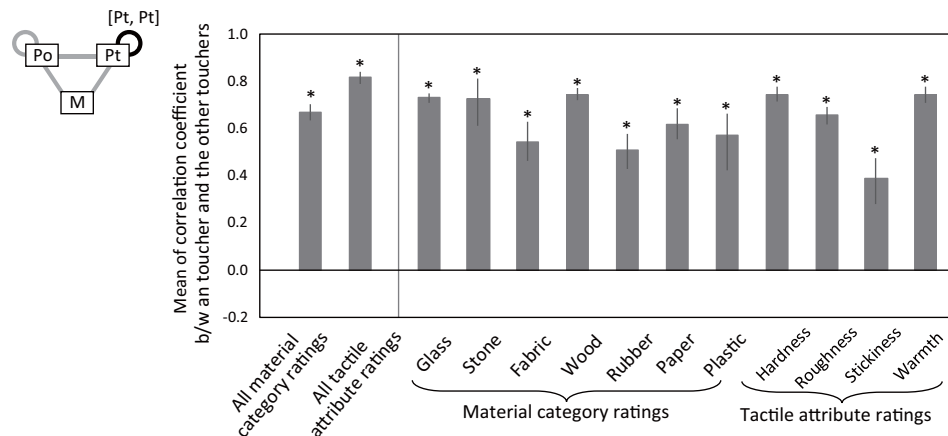


図 3.1.9 行為者間の触り心地評価の Spearman 相関係数。その他は図 3.1.5 と同じである。

価も行為者の触り心地評価も間隔尺度として扱った。指先速度の平均、運動方向比 (X-Z/Y)、運動方向比 (X/Z)、指先加速度の分散、の 4 つの運動特徴量の組み合わせが、全ての組み合わせの中でもっとも大きい説明力を持っていたため (ここでの説明力は、外部観察者の 11 触り心地評価と行為者の 11 触り心地評価それぞれにおける決定係数  $r^2$  を平均したものである)、これらの運動特徴量がそれぞれの運動クラスターの代表値として選ばれた (重回帰分析の結果については表 3.1.1 を参照)。

その結果は、4 つの運動特徴量は外部観察者の材質カテゴリ評価と触覚属性評価をそれぞれ 0.25 と 0.26 の決定係数で説明できることを示している (図 3.1.12 の黒い棒)。これらの決定係数の値は、0.50 と 0.51 の相関係数に対応する。一方で、これら 4 つの運動特徴量は行為者の材質カテゴリ評価と触覚属性評価をそれぞれ 0.13 と 0.12 の決定係数で説明した (図 3.1.12 の白い棒)。これらの決定係数は、0.37 と 0.34 の相関係数に対応し、これらは外部観察者の値よりも小さい。これらの結果は、外部観察者と行為者の触り心地評価の間の低い相関 [Po, Pt] は、外部観察者が行為者の手の動きに依存せざるを得なかったのに対し [Po, M]、行為者の手の動きがそもそも行為者の触り心地評価に関する十分な情報を持っていなかった [Pt, M] ことが原因だったと考えられる。

### 3.1.7 結果：行為者のそれぞれの運動特徴量と触り心地評価の間の相関

外部観察者が一貫した方法で行為者の触り心地評価を推定していたこと ([Po, Po])、外部観察者は推定においてかなり行為者の手の動きに頼っていたこと ([Po, M]) から、行為者の手の動きと触覚知覚の間の結びつきに関する共通知識を使っていたことが示唆される。その戦略を調べるために、外部観察者の触り心地評価と行為者の手の運動特徴量の間の Spearman 相関係数を計算し、行為者の触り心地評価と行為者の手の運動特徴量の間の相関係数と比較をした。外部観察者の触り心地評価と行為者の手の運動特徴量の間の相関を図 3.1.13 (a) に示す。例えば、総移動距離 (3 次元) が大きくなるほど、外部観察者の布らしさ、木らしさ、紙らしさの評価が大きくなる。一方で、総移動距離 (3 次元) が小さくなるほど、外部観察者の石らしさ、ゴムらしさ、硬さ、粗さ、粘つきの評価が大きくなる。比較のために、行為者の触り心地評価と行為者の運動特徴量の間の相関を図 3.1.13 (b) に示す。これらの相関は、外部観察者の触り心地と行為者の運動特徴量の間の相関と多くの共通点を持つ。例えば、外部観察者の

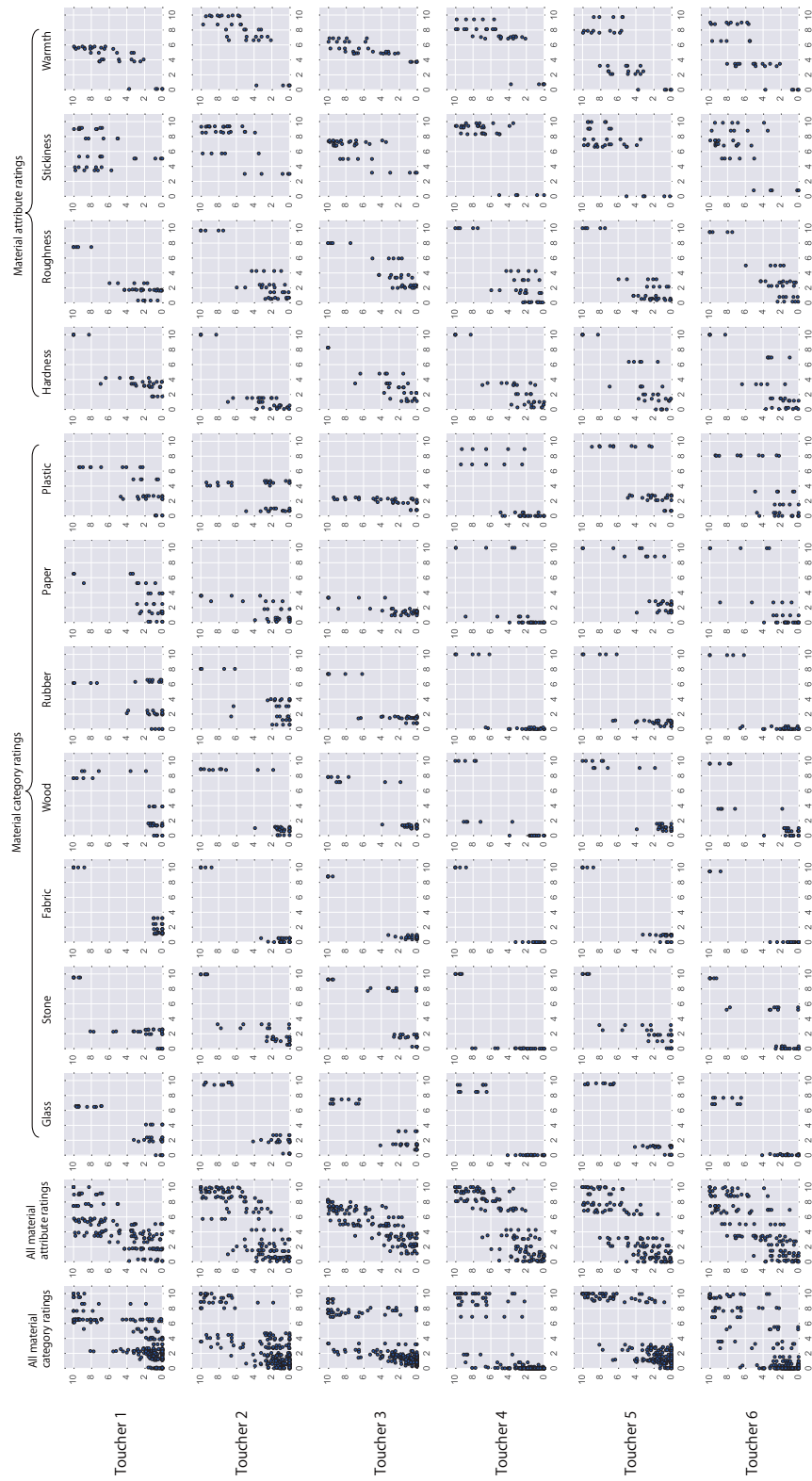


図 3.1.10 ある行為者の評価 (x 軸) とその他の行為者の評価 (y 軸) の相関

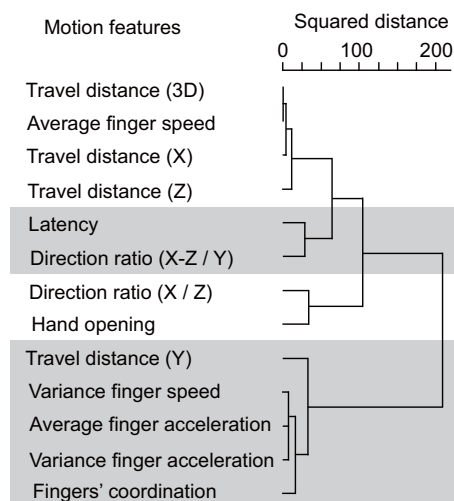


図 3.1.11 手の運動特徴量のクラスター分析

表 3.1.1 行為者の手の運動特徴量を用いて外部観察者の触り心地評価や行為者の触り心地評価を重回帰分析した結果。アスタリスクは統計的に有意な予測子であることを意味する。

| Rating    |            | <i>F</i> (4, 751) | <i>p</i> | <i>r</i> <sup>2</sup> | Coefficients         |                         |                       |                                 | Intercept |
|-----------|------------|-------------------|----------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------|
|           |            |                   |          |                       | Average finger speed | Direction ratio (X-Z/Y) | Direction ratio (X/Z) | Variance of finger acceleration |           |
| Observers | Glass      | 14.90             | 0.00     | 0.07                  | 0.02                 | 0.03*                   | -0.08*                | -0.02                           | 0.00      |
|           | Stone      | 68.90             | 0.00     | 0.27                  | -0.20*               | -0.02                   | -0.02                 | 0.16*                           | 0.00      |
|           | Fabric     | 63.10             | 0.00     | 0.25                  | 0.18*                | -0.01                   | 0.10*                 | -0.09*                          | 0.00      |
|           | Wood       | 107.49            | 0.00     | 0.36                  | 0.21*                | 0.09*                   | 0.02                  | -0.15*                          | 0.00      |
|           | Rubber     | 139.43            | 0.00     | 0.43                  | -0.27*               | -0.10*                  | -0.07*                | 0.15*                           | 0.00      |
|           | Paper      | 59.34             | 0.00     | 0.24                  | 0.13*                | 0.07*                   | 0.03*                 | -0.08*                          | 0.00      |
|           | Plastic    | 22.62             | 0.00     | 0.11                  | 0.05*                | 0.07*                   | -0.06*                | -0.03*                          | 0.00      |
|           | Hardness   | 20.71             | 0.00     | 0.10                  | 0.09*                | -0.03                   | 0.07*                 | -0.05*                          | 0.00      |
|           | Roughness  | 135.74            | 0.00     | 0.42                  | -0.27*               | -0.06*                  | -0.04*                | 0.22*                           | 0.00      |
|           | Stickiness | 162.63            | 0.00     | 0.46                  | 0.33*                | 0.09*                   | 0.05*                 | -0.21*                          | 0.00      |
|           | Warmth     | 9.50              | 0.00     | 0.05                  | -0.04*               | 0.02                    | -0.06*                | 0.04*                           | 0.00      |
| Touchers  | Glass      | 24.52             | 0.00     | 0.12                  | 0.00                 | -0.14*                  | -0.28*                | 0.18*                           | 0.00      |
|           | Stone      | 6.29              | 0.00     | 0.03                  | -0.07                | 0.12*                   | -0.11*                | 0.01                            | 0.00      |
|           | Fabric     | 56.88             | 0.00     | 0.23                  | 0.22*                | -0.27*                  | 0.37*                 | -0.26*                          | 0.00      |
|           | Wood       | 43.73             | 0.00     | 0.19                  | 0.03                 | 0.36*                   | 0.06                  | -0.14*                          | 0.00      |
|           | Rubber     | 37.19             | 0.00     | 0.17                  | -0.27*               | -0.01                   | -0.16*                | 0.34*                           | 0.00      |
|           | Paper      | 24.51             | 0.00     | 0.12                  | -0.03                | 0.28*                   | 0.05                  | -0.12*                          | 0.00      |
|           | Plastic    | 19.18             | 0.00     | 0.09                  | -0.11*               | -0.06                   | -0.24*                | 0.16*                           | 0.00      |
|           | Hardness   | 26.85             | 0.00     | 0.13                  | 0.14*                | -0.20*                  | 0.28*                 | -0.16*                          | 0.00      |
|           | Roughness  | 9.49              | 0.00     | 0.05                  | -0.16*               | 0.16*                   | -0.05                 | 0.02                            | 0.00      |
|           | Stickiness | 36.45             | 0.00     | 0.16                  | 0.15*                | 0.10*                   | 0.19*                 | -0.34*                          | 0.00      |
|           | Warmth     | 27.82             | 0.00     | 0.13                  | -0.18*               | 0.07                    | -0.27*                | 0.27*                           | 0.00      |

ゴムらしさ評価も行為者のゴムらしさ評価も、総移動距離（X 軸）、運動方向比（X/Z）、指先加速度の分散と相関する。加えて、外部観察者と行為者の間には違いも存在する。例としては、プラスチックらしさ評価の列もしくは総移動距離（Z 軸）の行が該当する。これらの結果は、外部観察者は実際に行

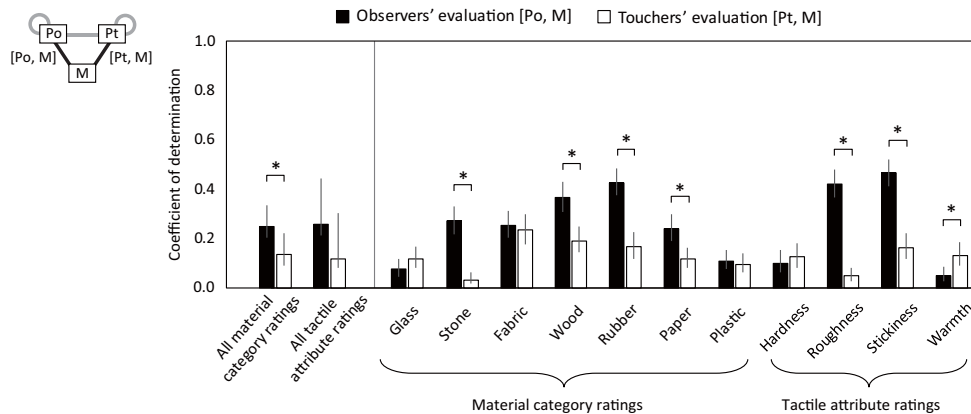


図 3.1.12 4つの運動特徴量を用いた全てのデータ（6人の行為者 × 7種類の触覚刺激 × 18試行）に対する重回帰分析における、外部観察者の触り心地評価の決定係数  $r^2$ （黒）と行為者の触り心地評価の決定係数  $r^2$ （白）。ランダム化検定の結果、全ての決定係数  $r^2$  が 0 よりも大きいと判断された。エラーバーはブートストラップ法 [49] から計算された決定係数  $r^2$  の 95% 信頼区間である。アスタリスクは外部観察者の決定係数  $r^2$  と行為者の決定係数  $r^2$  の間の差分の 95% 信頼区間が 0 と重ならないことを意味する。

者の触り心地評価と関係する行為者の運動特徴量を使うだけでなく、その他の情報も同様に用いていることを示唆する。

### 3.1.8 結果：外部観察者の知覚、行為者の知覚、手の動きの間の関係

まとめとして、材質カテゴリ評価と触覚属性評価の全ての相関係数を図 3.1.14 に示した。これらの相関係数について単純比較はできないものの、相対的な違いから示唆を得ることはできるだろう。外部観察者と行為者の触り心地評価の間の相関はそれぞれ  $r_s = 0.15$  (図 3.1.14 (a) [Po, Pt])、 $r_s = 0.27$  (図 3.1.14 (b) [Po, Pt]) であった。外部観察者の成績は低く見えるかもしれないが、外部観察者は適当に評価をしていたわけではない。むしろ、外部観察者間の触り心地評価の相関は高かった (図 3.1.14 (a) [Po, Po] における  $r_s = 0.38$ 、もしくは図 3.1.14 (b) [Po, Po] における  $r_s = 0.52$ ) ことから、外部観察者は共通の戦略を用いていたと考えるのがもっともらしい。行為者の手の運動特徴量は行為者の触り心地評価と  $r = 0.37$  (図 3.1.14 (a) [Pt, M]) もしくは  $r = 0.34$  (図 3.1.14 (b) [Pt, M]) で相関していたのに対し、外部観察者の触り心地評価とはより高い相関を持っていた (図 3.1.14 (a) [Po, M] における  $r = 0.50$ 、もしくは図 3.1.14 (b) [Po, M] における  $r = 0.51$ )。これらをあわせると、外部観察者は行為者の手の動きに頼っていたのに対し、この実験における行為者の手の動きは行為者の知覚に関する十分な情報を持っていなかったことが示唆される。

### 3.1.9 外部観察者による触覚刺激の推定能力

これまでの研究から手の動きが触覚知覚だけでなく触覚刺激の物理特性と関係があることも知られていることから [28, 27, 29] (例えば、大きな空間周波数の突起表面をもつ触覚刺激は、指の速度を小さくし、押し込む力を増加させる [35, 30, 90])、外部観察者は行為者が触れていた触覚刺激のカテゴリを同

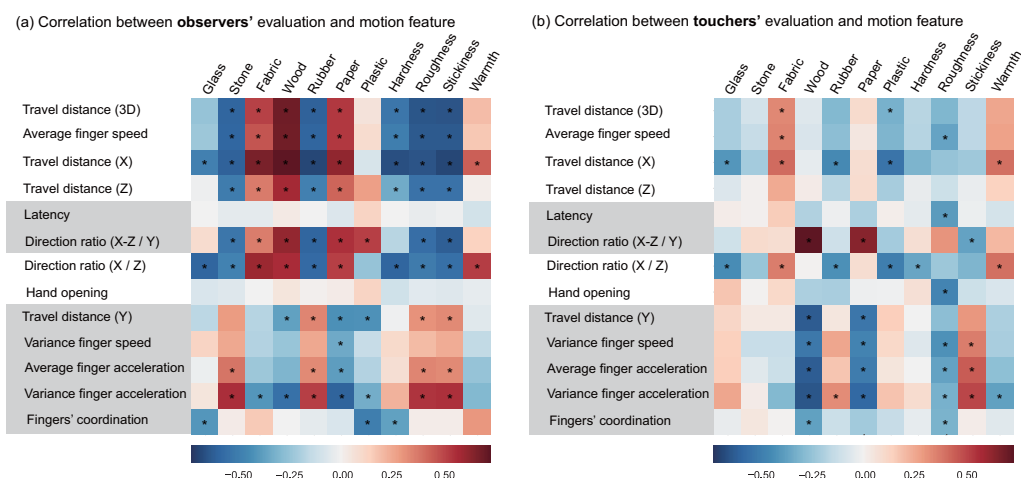


図 3.1.13 外部観察者の触り心地評価と運動特微量の相関 (a) を行為者の触り心地評価と運動特微量の相関 (b) と比較した。相関係数は 42 データサンプル (6 人の行為者 × 7 種類の触覚刺激) に対して計算された。左側のパネルでは、それぞれの値は外部観察者ごとに標準化 (平均が 0、標準偏差が 1 になるように正規化) したあとに、外部観察者間で平均している。右側のパネルでは、それぞれの値は行為者ごとに標準化 (平均が 0、標準偏差が 1 になるように正規化) したあとに、行為者間で平均している。アスタリスクは、その相関係数が統計的に有意であることを示している (ランダム化セッション検定)。

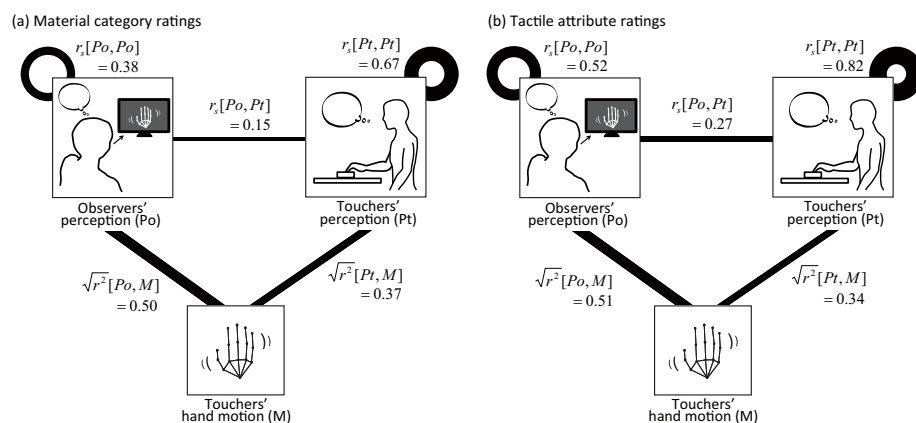


図 3.1.14 触り心地推定能力分析の相関マップ。線の太さは、相関の強さを表している。(a) 材質カテゴリ評価における相関マップ。(b) 触覚属性評価における相関マップ。 $[P_o, P_t]$  外部観察者と行為者の触り心地評価の間の相関 (図 3.1.5)。 $[P_o, P_o]$  外部観察者間の触り心地評価の相関 (図 3.1.7)。 $[P_t, P_t]$  行為者間の触り心地評価の相関 (図 3.1.9)。 $[P_o, M]$  外部観察者の触り心地評価を行為者の運動特微量で説明したときの決定係数の根 (図 3.1.12 の黒棒)。 $[P_t, M]$  行為者の触り心地評価を行為者の運動特微量で説明したときの決定係数の根 (図 3.1.12 の白棒)。

定できた可能性がある。このことを確かめるために、外部観察者の材質カテゴリ評価と行為者によって触られた実際の触覚刺激のカテゴリ（グラウンド・トゥールース）の間の相関を分析した。

図 3.1.1 (c) は、触覚刺激の推定能力における変数間の関係を示している。ここまでの  $[Po, M]$  の相関の結果から、外部観察者は推定において行為者の手の動きに頼っていることが明らかにされたので、もし行為者の手の動きが触覚刺激の材質カテゴリについて十分な情報を持っているならば（図 3.1.1 (c) の  $[M, S]$ ）、外部観察者は行為者の手の動きを観察することで触覚刺激の材質カテゴリを同定することができるかもしれない（図 3.1.1 (c) の  $[Po, S]$ ）。このことを調べるために、どの程度行為者の手の運動特徴量が触覚刺激の情報を持っているのか  $[M, S]$  を調べたあとで、外部観察者の材質カテゴリ評価と行為者が実際に触れていた触覚刺激の材質カテゴリの間の相関  $[Po, S]$  を分析し、それを行為者の材質カテゴリ評価と行為者が触れていた材質カテゴリの間の相関  $[Pt, S]$  と比較した。

#### データ解析：行為者の手の運動による材質カテゴリ推定能力 $[M, S]$

行為者の手の運動特徴量がどのくらい強く触覚刺激と関連しているのか  $[M, S]$  を評価するために、Python の scikit-learn パッケージを用いて線形判別分析を行った。それぞれの材質カテゴリにおける線形判別関数は、全ての手の動きのデータ（7 種類の触覚刺激  $\times$  6 人の行為者  $\times$  18 回の繰り返し）に対してフィッティングすることで得られた。3.1.6 節で選ばれた 4 つの運動特徴量の代表値を説明変数として採用した。その後、全ての手の動きのデータをそれぞれの判別関数に代入することで、全てのデータにおける信頼スコア（超平面からの符号付き距離；どの程度その材質らしいとみなせるかを意味する）を計算した。行為者の手の運動特徴量と触覚刺激の間の関係を相関係数の形で表現できればその後の比較において有用であるため、信頼スコアとグラウンド・トゥールースの間の相関を Spearman の相関分析を用いて調べた（例えば、ガラスカテゴリの判別分析においては、もしその手の動きのデータがガラス刺激を触れているときの手の動きのデータであればグラウンド・トゥールースの値は 1 になり、他の刺激を触れているときの手の動きのデータであればグラウンド・トゥールースの値は 0 になる）。もしある触覚刺激に触れているときの手の動きのデータが、他の触覚刺激に触れているときの手の動きのデータから区別できるのであれば、相関係数は大きくなることが期待される。

#### データ解析：外部観察者と行為者による材質カテゴリ推定能力 $[Po, S]$ , $[Pt, S]$

外部観察者と行為者のそれぞれの材質カテゴリ同定成績（図 3.1.1 (c)  $[Po, S]$ ,  $[Pt, S]$ ）も、相関の形で表現できると今後の比較に有用なので、Spearman の相関分析を用いて解析した。行為者が触覚刺激に触れているタッチムービーを見た外部観察者は、7 項目の材質カテゴリ評価に回答する。例えば、ガラスに触れているときのタッチムービーを見た外部観察者は [ガラスカテゴリ評価, 石カテゴリ評価, 布カテゴリ評価, ..., プラスチックカテゴリ評価] を  $[8, 0, 2, ..., 3]$  と評価するかもしれない。この 7 項目の材質カテゴリ評価の回答フォーマットからは相関係数を求めることができず直接推定成績を計算するのは難しいので、ここで正解マトリクスを導入した。正解マトリクスも同じように 7 項目の材質カテゴリ評価からなり、正解となる（実際に触れられていた）材質カテゴリの評価が最も高く (10)、それ以外の材質カテゴリの評価は最も低い (0)。例えば、ガラスに触れているときのタッチムービーに対する正解マトリクスは、[ガラスカテゴリ評価, 石カテゴリ評価, 布カテゴリ評価, ..., プラスチックカテゴリ評価] が  $[10, 0, 0, ..., 0]$  のようになる。正解マトリクスと、外部観察者もしくは行為者の材質カテゴリ

評価の間の Spearman 相関を計算することで、外部観察者と行為者のそれぞれの評価がどの程度高いかを示す指標とした。

## 結果

まず、判別分析と Spearman の相関分析を組み合わせることで、行為者の手の動きがどの程度触覚刺激に関する情報を持っているのかを調べた。行為者の手の運動特徴量と触覚刺激の間の結びつきを表す相関係数は 0.31 であった（図 3.1.15）。このように行為者の手の動きと触覚刺激の間の関係は、行為者の触り心地評価との関係（図 3.1.12 [Pt, M]）と同様に高くはないことがわかった。

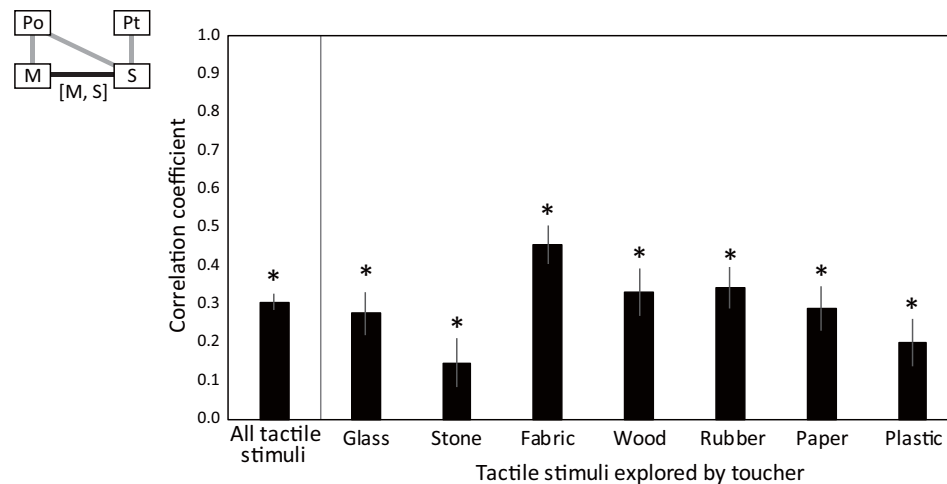


図 3.1.15 行為者の手の運動特徴量と触覚刺激の間の関係を、判別分析と Spearman の相関分析を組み合わせることで調べた。高い正の相関係数を持つほど、その触覚刺激が手の運動特徴量空間で他の触覚刺激から区別可能であることを意味する。エラーバーはブートストラップ法によって求められた 95% 信頼区間である。ランダム化検定によって、全ての相関係数は有意に 0 より大きいと判断された。

[M, S] が低いという結果から、手の動きがあまり触覚刺激の情報を持っていないので、外部観察者にとって触れられている触覚刺激を推定するのは困難であることを予測する。どのくらい外部観察者が行為者によって触れられた触覚刺激を同定できたかを、正解マトリクスと外部観察者の材質カテゴリ評価の間の Spearman 相関係数を求めることで調べた。その結果、全ての触覚刺激に対する相関係数は 0.21 であった（図 3.1.16 の黒棒）。比較のために、行為者がどの程度触覚刺激を同定できたか ([Pt, S]) も調べた。その結果、全ての触覚刺激に対する相関は 0.57 であった（図 3.1.16 の白棒）。外部観察者の材質カテゴリ評価との相関は統計的に有意ではあったものの、行為者の材質カテゴリ評価との相関に比べるとかなり低いことがわかる。各触覚刺激における外部観察者の相関を見ていくと、木刺激、ゴ

ム刺激、紙刺激が大きな相関を示している一方で、石刺激が負の相関を示していることがわかる（図 3.1.16 の黒棒）。これらの結果を図 3.1.17 にまとめた。以上の結果から、行為者の知覚は確かに触覚刺激に基づいていた（[Pt, S]）にも関わらず、行為者の手の動きは触覚刺激に関する十分な情報を持っていなかったこと（[M, S]）、そのためか外部観察者は行為者の手の動きを観察することでどの触覚刺激が触られていたかをチャンス以上に同定できたものの、その正確さは低く、触覚刺激に依存していたこと（[Po, S]）が示唆される。

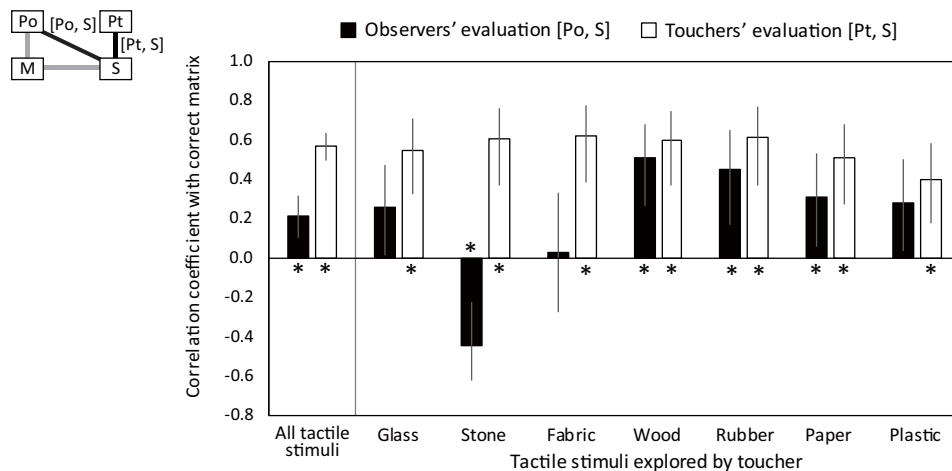


図 3.1.16 正解マトリクスと外部観察者の間の Spearman 相関 [Po, S]（黒棒）と、正解マトリクスと行為者の間の Spearman 相関 [Pt, S]（白棒）。高い正の相関ほど、外部観察者もしくは行為者が正しい触覚刺激を他の触覚刺激から区別することができたことを意味する。エラーバーはブートストラップ法によって求められた 95% 信頼区間である。アスタリスクは、その相関係数が有意に大きい/小さいことを意味する（ランダム化検定）。

### 3.1.10 考察

この研究の主な目的は、他者が触れている触覚刺激に対してどう感じているのかを、その他者の手の動きを観察した人間が推定できるかどうかを調べることであった。実験参加者を二つのグループ、行為者と外部観察者に分け、行為者に触覚探索によって触覚刺激の材質カテゴリと触知覚を回答させる一方で、外部観察者には行為者の手の動きを観察させることで同じ項目を回答させた。そして、外部観察者の評価、行為者の評価、行為者の手の動き、触覚刺激の関係を分析した（図 3.1.14、図 3.1.17）。その結果は外部観察者は行為者の手の動きを共通戦略として用いることで行為者の知覚や触覚刺激を推定しようとしていたが、その成績は高くはないことを示している。

#### 外部観察者の推定能力

結果から、外部観察者による行為者の評価の推定成績 [Po, Pt] は高くはないことが明らかになった。しかしながら、外部観察者間での相関 [Po, Po] が [Po, Pt] よりも高いことから、外部観察者はランダムに回答をしていたというよりは共通の戦略に基づいて推定を行っていたといえる。加えて、外部観察者の

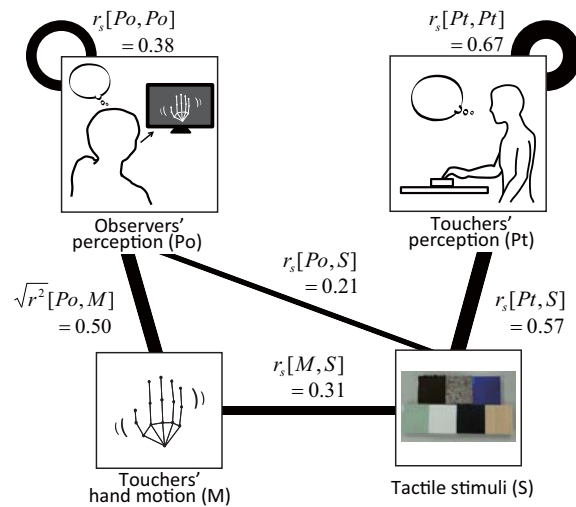


図 3.1.17 触覚刺激推定能力分析の相関マップ。線の太さは、相関の強さを表している。[Po, S] 正解マトリクスと外部観察者の評価の間の相関（図 3.1.16 の黒）。[Pt, S] 正解マトリクスと行為者の評価の間の相関（図 3.1.16 の白）。[Po, M] 外部観察者の触り心地評価を行為者の運動特徴量で説明したときの決定係数の根（図 3.1.12 の黒棒）。[Po, Po] 外部観察者間の触り心地評価の相関（図 3.1.7）。[Pt, Pt] 行為者間の触り心地評価の相関（図 3.1.9）。[Po, M] 外部観察者の触り心地評価を行為者の運動特徴量で説明したときの決定係数の根（図 3.1.12 の黒棒）。[Pt, M] 行為者の触り心地評価を行為者の運動特徴量で説明したときの決定係数の根（図 3.1.12 の白棒）。[M, S] 行為者の手の動きと正解マトリクスの間の相関（図 3.1.15）。

評価と行為者の手の動きの間の相関（[Po, M]）は、行為者の評価と行為者の手の動きの間の相関（[Pt, M]）よりも大きかった。

外部観察者の成績が低かった理由として考えられるのは、行為者の手の動きが含んでいる情報が限定されていたことである。外部観察者が行為者の手の動きから行為者の評価について良い推定を行うためには、行為者の手の動きは行為者の評価に関する情報を十分に含んでいなければならない。しかしながら、行為者の手の動きは行為者の評価と低い相関 [Pt, M] ( $r = 0.37$ ) を示したことから、外部観察者は不十分な情報に基づいて推定を行わねばならなかったことを意味する。この研究における [Pt, M] の情報の量は、前章 2.1 節の結果 ( $r = 0.69 - 0.90$ ) よりかなり低かった。行為者の手の動きにおける情報量の不足は、従来研究における触り方とやや異なる触り方を行っていたことに起因する可能性がある。1 つの触覚属性を判断するときには行為者はかなり典型的な手の動きを行う傾向があり [26]、また 2.1 節の結果から 1 つの触覚属性を判断するときには行為者の触知覚と手の動きと相関する。これらのことは、高度に典型的な手の動きが触知覚の情報を持っていることを示唆するものである。一方で今回の実験においては、行為者は 5 秒間で 11 項目の触覚評価を行うために情報を集めなければならなかった。この課題の難しさが、複雑な手の動きの切り替えを誘発してしまった可能性があり、結果として行為者の評価に関する低い情報量につながったことが考えられる。この問題を検討するためには、単一判断課題を用いた更なる研究が必要であろう。

触覚刺激推定能力を調べた結果から、行為者の触り心地知覚の推定同様に、行為者の手の動きの観察

による触覚刺激の推定 [Po, S] は難しいことが明らかになった。これは、行為者の手の動きが触覚刺激に関する情報も十分に含んでいなかった [M, S] ためと考えられる。行為者の触り心地評価の推定の場合と同様に、本実験における課題の複雑さが、行為者の手の動きに含まれる情報量を限定させてしまい、触れられた触覚刺激の推定成績を下げる原因となってしまった可能性がある。

触覚刺激同定における外部観察者と行為者の成績の違い ([Po, S] と [Pt, S]) は、それぞれが利用できる情報の違いに起因する可能性がある。外部観察者は材質カテゴリ同定において、行為者の手の動きの視覚情報しか利用できないのに対し、行為者は皮膚感覚信号、固有受容感覚信号、運動生成信号（例えば、遠心性コピー）といった豊富な情報を利用することが可能であった。加えて、手の動きは触覚刺激表面に影響されるだけでなく [27, 29, 30, 35]、実験参加者が判断するように求められた触覚属性にも影響されることや [26, 32, 34, 46, 154]、手の状態（例えば、肌の湿り具合 [15, 155]）によっても影響されることが知られている。今回の実験では、行為者は 11 項目のどれを判断するかを自由に切り替えることができた上、自分自身の肌の状態にも気づいていたと考えられるため、行為者は上記のような手の動きに影響しうる要因を把握できるはずである。一方で、外部観察者は、これら全ての要因が組み合わさった結果としての手の動きの情報しか用いることができなかった。そのため、外部観察者にとって、他者の手の動きから触覚刺激の表面特性に関連した情報だけを取り出すことが困難であったと考えられる。

タッチムービーの中の行為者が変わったときに、外部観察者が推定のための戦略を変えたのではないかと考えることもできるかもしれない。しかしながら、外部観察者が戦略を変えたかどうかに関する証拠は現時点では存在しないため、この点を明らかにするための更なる実験が必要であろう。

#### 外部観察者が用いた、手の動きと触知覚の関係

前章の結果や先行研究でも、行為者のなぞり運動の特徴量と、行為者の硬さ、粗さ、粘つき、温かさの評価の間の関係が示されている。今回の実験では、これらの研究で報告されてきた関係が、行為者の評価と行為者の運動特徴量の間にも（図 3.1.13 の右側）、外部観察者の評価と行為者の運動特徴量の間にも（図 3.1.13 の左側）見出された。このことは、外部観察者は手の動きと触知覚の間の合理的かつ一般的な関係を理解していて、推定に用いることができたことを示唆するものである。これらの関係の獲得と利用によって、我々人間は未知の材質の触り心地を、他者が触れているのを観察することで推定できるようになったのかもしれない。自分自身の触覚探索の経験を通じて、物体と他者の触り心地の間の関係を学習し、利用しているのではないかと予想されるが、このことを調べるには更なる研究を必要とする。神経生理学手法や脳画像手法と組み合わせることで、観察による推定と触覚探索による推定が同じ表象を利用しているのかどうかの手がかりを得ることができると可能性がある。また、今後の研究の方向としては、パントマイムのような高度に強調された手の動きを用いることも可能であろう [156, 157]。

#### それぞれの触覚刺激の結果の違い

材質ごとの結果にいくつか差異が見られ、その分析が外部観察者の推定能力に関する考察を与えてくれそうである。触り心地推定能力分析において、外部観察者間の回答の類似度 [Po, Po] は石刺激、布刺激、木刺激、ゴム刺激において比較的高く（図 3.1.7）、行為者間の回答の類似度 [Pt, Pt] は全ての触覚刺激において高かった（図 3.1.9）。一方で、外部観察者による行為者の触り心地知覚の推定成績 [Po,

Pt] は、布刺激、木刺激、ゴム刺激において比較的高い一方で、石刺激はほぼ 0 であった (図 3.1.5)。石刺激における結果の違いは [Po, M]、[Pt, M] においても同様に観察されている (図 3.1.12)。これらの結果は、石刺激について外部観察者は外部観察者間で、行為者は行為者間でそれぞれ共通の表象を持っているのだが、外部観察者と行為者の間では異なっていることを示唆するものである。つまり、外部観察者の石という材質の表象は行為者の手の動きに基づいているのだが、行為者の表象はそうではない。総合すると、これらの結果は、外部観察者は行為者と布刺激、木刺激、ゴム刺激については同じ表象を共有していた一方で、それ以外の材質については共有されていなかったと考えることができる。特に、石刺激については外部観察者と行為者の間で表象が食い違っていたようである。

触覚刺激推定能力分析においても、行為者の手の動きは石刺激について最低レベルの情報量 [M, S] を提示しており (図 3.1.15)、石刺激に対する外部観察者の評価と正解マトリクスの間の相関 [Po, S] も負であった (図 3.1.16)。この石刺激における結果は、外部観察者が正しくない判断を行っていたことを示しており、触り心地推定能力分析における議論と一致している。一方で、行為者の手の動きは布刺激について最も多い情報を提示していたのに対し [M, S] (図 3.1.15)、布刺激に対する外部観察者の評価と正解マトリクスの間の相関 [Po, S] はほとんど 0 であった (図 3.1.16)。このことは、外部観察者は布刺激を他の刺激から区別することができなかったことを意味する。まとめると、外部観察者は、木、ゴム、紙刺激をある程度区別することができたのに対し、ガラス、布、プラスチック刺激を区別することができなかった。特に、石刺激の推定については正しくない推定を行っていたようである。

本実験では、硬い表面を持った石刺激、ガラス刺激、プラスチック刺激に対する推定成績があまり良くなかった。硬さの判断は押し込み運動 (y 軸方向の運動) や接触力と関係することが知られている [26, 42, 43, 44]。本実験におけるタッチムービーは上から見下ろす視点でレンダリングされており、押し込み運動に関する情報をあまり提供していないと考えられる。そのことが、石刺激、ガラス刺激、プラスチック刺激に対する低い推定成績の原因になった可能性がある。一方で、粘つきの判断はなぞり運動 (x-z 平面) と関連することが知られており [29]、そのため外部観察者は粘つきの大きいゴム刺激を高い成績で推定することができたのだろう。

### 3.1.11 本実験のまとめ

以上の結果から、人間は他者の触覚探索行為を観察することによって、他者がどのように感じているか (そして何を触っているか) を推定しようとすることを示唆する。今回の実験では手の動きが触知覚 (と触覚刺激) とあまり相関しなかったため外部観察者の推定成績はそれほど高くなかったが、この能力は合理的なものであり、外部観察者間で一般的なものである。我々の結果は人間の推定能力を理解するにあたって有用であるだけでなく、触覚探索運動を重畳することでより効果的に物体表面の触り心地が伝わるようなタッチムービーを設計する際にも有用であろう。

## 3.2 動画変調による外部観察者の戦略の推定

3.1 の結果から、行為者の触覚探索運動特徴量の中に、外部観察者の触り心地評価と相関をもつものが存在することがわかった。しかしこれはあくまで相関であり、外部観察者が実際にこれらの特徴量を利用して推定していたのかどうかは明らかでない。本実験では、3.1 で記録された行為者のタッチムービーを変調して外部観察者に提示することで、外部観察者が利用していた特徴量を調べることを目的とする。

3.1 の結果から、手の移動速度が外部観察者による多くの触り心地評価と相関を持ち、なおかつ動画の再生速度を変えることで実現しやすいことから、本実験ではタッチムービーの中の手の移動速度を変えたときに外部観察者の評価が変わるかどうかを調べる。このような動画再生速度が外部観察者の知覚にどのような影響を与えるかを調べた研究はいくつか存在するが [158, 159, 160, 161]、触覚探索運動の再生速度の変調が触り心地評価に影響するかどうかについては全くわかっていないのが現状である。このようなアプローチを通じて、外部観察者がどのような特徴量を利用しているかを調べることで、手の動きの変調によって触り心地評価を変調する手法の設計にもつながることが期待される。

### 3.2.1 実験

#### 実験参加者（外部観察者）

本実験には 5 名の女性と 4 名の男性（30-48 歳）が参加した。これらの実験参加者は 3.1 の実験における行為者セッションに参加していなかった。本実験における実験参加者を 3.1 同様、外部観察者と呼ぶことにする。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）と運動機能を有していた。これらの実験参加者は、心理物理実験に関する専門知識を持たず、また、実験目的を知らなかった。本実験のプロトコルは NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験装置と刺激

実験環境はいくつかの例外をのぞき、3.1 と同様である。以下では、3.1 との差異について述べる。

本実験では、タッチムービーの再生速度条件として、slow 条件、original 条件、fast 条件の 3 条件を導入した。slow 条件と fast 条件については、csv 形式で保存されている行為者の手の動きのデータ（つまり、original 条件）を、編集することによって作成した。Slow 条件における手の動きのデータは、original 条件のリーチング直後の手の動きを 4/3 倍に伸張し、120 Hz にサンプリングし直すことで作成した。Fast 条件における手の動きのデータは、original 条件のリーチング直後の手の動きを 3/4 倍に縮小し、120 Hz にサンプリングし直すことで作成した。リーチング直後の手の動きに対してのみ再生速度を変える理由は、外部観察者が刺激に触れていない時間帯の手の動きについて判断を行うことを避けるためである。全ての条件のタッチムービーの長さが同じになるようにするために、全てのタッチムービーを 456 点（120Hz × 3.8 seconds）に切りそろえた。それぞれの行為者におけるそれぞれの触覚刺激について、リーチングまでの時間がもっとも短い 5 試行を採用した。なぜならば、リーチングまでの時間が短い動画ほど、手の動きが変調されている時間が長くなるからである。

## 実験手続き

実験手続きは、タッチムービーの再生速度条件を除いて、3.1における外部観察者セッションと同じである。この実験では、外部観察者は合計で 630 タッチムービー（6 人の行為者 × 7 種類の触覚刺激 × 3 種類の速度条件 × 5 回の繰り返し）を観察した。外部観察者はこの実験に 2 日間参加し、各日、315 タッチムービー（3 人の行為者 × 7 種類の触覚刺激 × 3 種類の速度条件 × 5 回の繰り返し）を観察し、触り心地評価を行った。最初のブロックは実験手順に慣れるため、また、手の動きのバリエーションを学習するためのトレーニングブロックであった。タッチムービー中の行為者の提示順は、観察者ごとにランダム化された。それぞれの実験参加者は合計 16 時間以内（休憩を含む）で実験を終えた。

## データ解析

本実験の結果を、3.1 における行為者セッションの結果や外部観察者セッションの結果からの予測と比較するために、指先平均速度の特徴量による外部観察者の単回帰モデルを計算した。行為者セッションにおける行為者の指先平均速度を説明変数、外部観察者セッションにおける外部観察者の触り心地評価を被説明変数とすることで、それぞれの触り心地評価における指先平均速度の単回帰モデルにおける係数と切片を求めた。そして、本実験における各再生速度条件における変調されたタッチムービー中の平均指先速度を求め、そこに単回帰モデルを適用することで、外部観察者の触り心地評価の予測値を計算した。

### 3.2.2 結果

3.1 における外部観察者の触り心地評価と行為者の運動特徴量の間の相関の結果（図 3.1.17 左）から、タッチムービー中の運動特徴量を変調させることで、外部観察者の触り心地評価に影響する可能性がある。もし、指先速度や総移動距離が触り心地評価に用いられるのであれば、これらの特徴量がより大きくなるようにタッチムービーを変調した場合、外部観察者による布、木、紙カテゴリの評価ならびに温かさ評価は大きくなると期待され、一方で外部観察者によるガラス、石、ゴムのカテゴリの評価ならびに硬さ、粗さ、粘つきの評価は小さくなると期待される。この仮説を調べるために、タッチムービー中の指先速度と総移動距離を再生速度を変えることで変調し、外部観察者に提示する実験を行った。再生速度条件として、slow 条件、original 条件、fast 条件の 3 条件を導入した。これら再生速度 3 条件の効果と、再生速度条件と触覚刺激の間の交互作用を調べるために、再生速度条件（slow, original, fast）と触覚刺激（ガラス、石、布、木、ゴム、紙、プラスチック）による繰り返しのある二要因分散分析を行った。その結果を、表 3.2.1 に示す。

表からわかるように、木カテゴリ評価、ゴムカテゴリ評価、硬さ評価、粘つき評価に対しては再生速度条件が統計的に有意な効果を示している。これらの触り心地評価における再生速度条件について多重比較検定（Ryan's method,  $p < 0.05$ ）を行った結果を図 3.2.1 に示している。予想されたように、再生速度 fast 条件における木カテゴリらしさの評価は slow 条件よりも大きかった。また、再生速度 fast 条件におけるゴムカテゴリらしさの評価と粘つき評価は、slow 条件よりも小さかった。一方で、予測とは反対に、再生速度 original 条件と fast 条件における硬さ評価は、slow 条件よりも小さかった。これらの結果は、指先速度や総移動距離の変調が外部観察者による触り心地評価に影響する可能性を示している。

表 3.2.1 繰り返しのある二要因分散分析の結果。アスタリスクは、 $p$  値が 0.05 よりも小さかったことを示している。

|                  | Speed     |       |                | Tactile stimuli |       |                | Interaction |       |                |
|------------------|-----------|-------|----------------|-----------------|-------|----------------|-------------|-------|----------------|
|                  | F(2, 106) | $P$   | $\hat{\eta}^2$ | F(6, 318)       | $P$   | $\hat{\eta}^2$ | F(12, 636)  | $P$   | $\hat{\eta}^2$ |
| Glass category   | 1.34      | 0.27  | 0.01           | 2.48            | 0.02* | 0.02           | 0.50        | 0.91  | 0.00           |
| Stone category   | 0.56      | 0.57  | 0.00           | 10.32           | 0.00* | 0.07           | 1.46        | 0.13  | 0.01           |
| Fabric category  | 2.31      | 0.10  | 0.01           | 8.34            | 0.00* | 0.05           | 1.68        | 0.07  | 0.01           |
| Wood category    | 3.39      | 0.04* | 0.01           | 15.05           | 0.00* | 0.11           | 1.35        | 0.19  | 0.01           |
| Rubber category  | 3.31      | 0.04* | 0.01           | 19.37           | 0.00* | 0.13           | 2.01        | 0.02* | 0.01           |
| Paper category   | 1.51      | 0.23  | 0.00           | 13.73           | 0.00* | 0.10           | 1.02        | 0.43  | 0.01           |
| Plastic category | 2.06      | 0.13  | 0.01           | 1.82            | 0.09  | 0.01           | 0.93        | 0.52  | 0.01           |
| Hardness         | 5.28      | 0.01* | 0.02           | 4.02            | 0.00* | 0.02           | 0.94        | 0.51  | 0.01           |
| Roughness        | 1.94      | 0.15  | 0.01           | 16.43           | 0.00* | 0.10           | 1.30        | 0.21  | 0.01           |
| Stickiness       | 4.58      | 0.01* | 0.02           | 21.73           | 0.00* | 0.14           | 1.41        | 0.16  | 0.01           |
| Warmth           | 1.50      | 0.23  | 0.01           | 1.86            | 0.09  | 0.01           | 1.58        | 0.09  | 0.01           |

### 3.2.3 考察

本実験の結果から、タッチムービーの再生速度を変えることで、木カテゴリ評価、ゴムカテゴリ評価、硬さ評価、粘つき評価が影響を受けることが明らかになった。そのうち、木カテゴリ評価、ゴムカテゴリ評価、粘つき評価の3項目に関しては、3.1の結果による指先速度に基づいた触り心地評価予測値と同じ方向に影響を受けていたことから、これらの項目の触り心地評価において外部観察者は指先速度を判断材料として用いていたことが示唆される。

一方で、硬さ評価に関しては、3.1の結果による指先速度に基づいた触り心地評価予測値と反対の方向への影響を示している。この結果の原因として大きく2つの可能性が挙げられる。1つは動画の再生速度を変えることによって、指先速度や総移動距離とは独立した、硬さと正の相関を持つ運動特徴量を操作した可能性が挙げられる。その場合は、3.1の実験結果では硬さと正の相関を持つ運動特徴量は見いだせなかったことから、今回解析対象としなかった運動特徴量と考えられる。2つ目は、再生速度を変えることによって、これまで目立たなかった手の動きが顕著になる可能性である。3.1の実験も今回の実験も、手の動きを上から見下ろす視点からタッチムービーを観察しているため、押し込み方向の手の動きを検出しにくい設定になっている。しかし、動画の再生速度を上げることにより押し込み方向の手の移動速度が大きくなり、外部観察者が検出できるようになったことから、硬さの評価が変容した可能性がある。

また、木カテゴリ評価やゴムカテゴリ評価、硬さ評価、粘つき評価以外の評価は動画の再生速度によって影響を受けなかった。特に、布カテゴリ、紙カテゴリ、ガラスカテゴリ、石カテゴリ、粗さ、温か

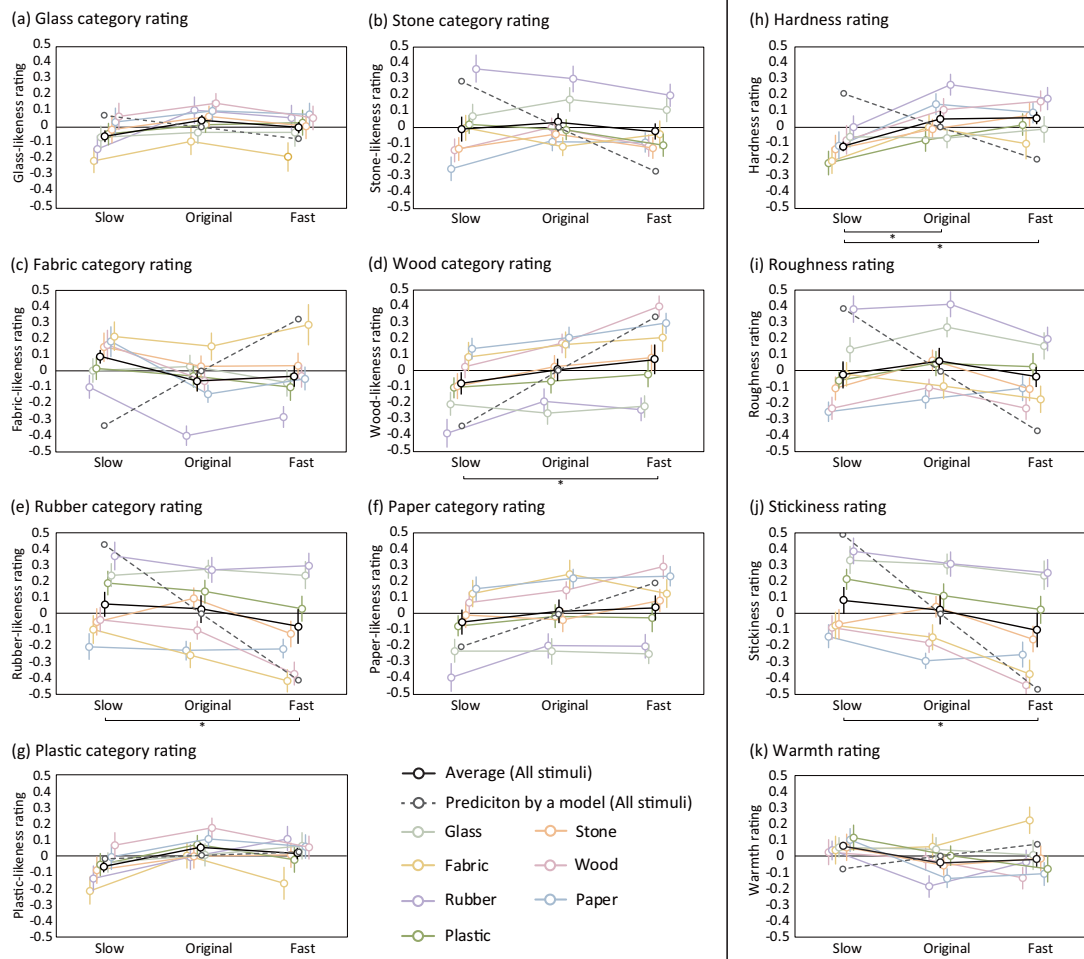


図 3.2.1 外部観察者による触り心地評価における再生速度条件の影響。黒丸と黒線は、全ての触覚刺激で平均した触り心地評価値を示している。破線は 3.1 における結果から作成された単回帰モデル（本節”データ解析”の項を参照）による触り心地評価の予測値である。その他の色の丸と線は、それぞれの触覚刺激に対する触り心地評価値を表している。それぞれの触り心地評価値はそれぞれの実験参加者内で標準化（平均が 0、標準偏差が 1 になるように正規化）した後、6 人の行為者と 9 人の外部観察者平均した。エラーバーは、標準誤差を示している。アスタリスクは、多重比較検定による p 値が 0.05 よりも小さかったことを表している。

さの触り心地評価は 3.1 の結果から、指先速度や総移動距離の影響を受けると予想された特徴量であったが、有意な変動は観察されなかった。これらのことから、これらの材質カテゴリ評価や触覚属性評価においては、外部観察者は指先速度や総移動距離といった情報を用いて判断していない可能性が示唆される。もしくは、動画を変調することによって、手の動きに不自然さや違和感を抱いた可能性もある。この可能性を検討するためには、再生速度変調実験において実験参加者に触り心地評価だけでなく、手の動きの自然さも評価させることが必要となろう。

#### 3.2.4 本実験のまとめ

本実験では、行為者の運動特徴量を変調させたタッチムービーを外部観察者に観察させることによって、外部観察者による触り心地評価が影響を受けるかどうかを検証した。その結果、手の速度や総移動距離のような運動特徴量を変調させることで、影響を受ける触り心地評価がある可能性が示された。

### 3.3 触り心地伝達実験

本章の 3.1 の結果において、我々人間は他者がものに触れているときの手の動きを観察することで、どんな触り心地のものに触れているのかを推定できる可能性を示した。続く 3.2 では、動画を変調して提示する実験手法を用いることで、外部観察者は指先移動速度のような特徴量を手がかりに、触り心地を推定している可能性を示した。一方で、この実験手法では、ある特徴量のみを数段階に変調したタッチムービーを提示せねばならず、ひとつの特徴量あたりの実験試行数が大きくなってしまうという短所が存在する。そのため、ある程度有力な運動特徴量を特定していないと、ひとつひとつの特徴量の効果を調べるにあたり大変な労力を要する。

ここで、本実験では、外部観察者が触り心地評価を特定するために重要な特徴量を、実験参加者に教えてもらうことができないかを検討したい。具体的には、行為者に触覚刺激に触れてもらう際に、外部観察者が触り心地を推定できるように触り方を演じるように教示する。このような身体運動による他者への情報伝達過程は、コミュニケーションにおいてよく見られるものである。このような動作は、把持動作や到達運動のような目標志向運動と異なり、パントマイム動作のように身体運動を誇張・強調する動作が見られる [162]。先行研究から、任意の物体を表現するパントマイムは実験参加者間でよく似ていたことが報告されており [163]、触覚刺激の触り心地についても同様に実験参加者間で共通性の高い演技ができる可能性がある。

本実験では、行為者に触り心地判断課題と演技課題を行わせ、その際の手の動きを解析・比較することによって、演技課題ではどのような手の動きが強調・誇張されているのかを解析した。また、この手の動きがどれくらい外部観察者にとって情報を持っているのかを明らかにすることも試みた。

#### 3.3.1 実験：行為者セッション

##### 実験参加者（行為者）

本実験には 3 名の女性と 3 名の男性（40-46 歳）が参加した。本実験における実験参加者を 3.1 同様、行為者と呼ぶことにする。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）と運動機能を有していた。これらの実験参加者は、心理物理実験に関する専門知識を持たず、また、実験目的を知らなかった。本実験のプロトコルは NTT コミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

##### 実験装置と刺激

実験環境はいくつかの例外をのぞき、3.1 と同様である。以下では、3.1 との差異について述べる。

本実験では、触覚刺激として、アルミニウム、人工芝、フェイクファー、シリコンゴム、発泡スチロール、コンクリート、ウレタンスポンジの 7 種類の触覚刺激を用いた。これらの触覚刺激の表面は 200 mm × 200 mm の大きさに成形された。行為者は黒いカーテンによって、触覚刺激と自身の手の動きを視覚的に観察することはできなかった。

##### 実験手続き

実験手続きはいくつかの例外をのぞき、3.1 と同様である。以下では、3.1 との差異について述べる。

行為者の実験課題は、硬さ判断課題、粗さ判断課題、粘つき判断課題、温かさ判断課題、演技課題の5課題であった。各判断課題において、7種類の触覚刺激がそれぞれ6回提示された。はじめに、硬さ判断課題、粗さ判断課題、粘つき判断課題、温かさ判断課題を全て行い、最後に演技課題を行った。硬さ判断課題においては、その刺激がどれくらい硬いか/柔らかいかを7段階で評価した。粗さ判断課題においては、その刺激がどれくらい粗いか/なめらかかを7段階で評価した。粘つき判断課題においては、その刺激がどれくらい粘つくか/滑るかを7段階で評価した。温かさ判断課題においては、その刺激がどれくらい温かい/冷たいかを7段階で評価した。21試行（7触覚刺激×3繰り返し）で1セッションとし、同一セッションの中では課題は同じであった。まず判断課題についてのみ8セッション（4判断課題×2セッション）行い、各セッションにおいて判断すべき触覚属性はランダムに決められた。その後演技課題を2セッション行った。演技課題において行為者は、「別の実験参加者に行為者の手の動きをタッチムービーとして観察してもらい、この行為者がどのような触り心地の触覚刺激に触れているのかを評価してもらう」こと、また、「そのため、別の実験参加者に最も触り心地が推定しやすくなるように手の動きを演じてほしい」ことを知らされた。演技課題を始める前に行為者は十分な練習を行い、納得できる手の動きができると自身が判断した時点で、演技課題を始めた。

この実験では、行為者は合計で210試行（5課題×7種類の触覚刺激×6回の繰り返し）を行った。それぞれの行為者は合計8時間以内（休憩を含む）で実験を終えた。

### 3.3.2 実験：外部観察者セッション

実験環境は、外部観察者の隣に行行為者セッションで使われた触覚刺激が常に並べられていたこと以外は、3.1と同様であった。

#### 実験参加者（外部観察者）

本実験には5名の女性と5名の男性（23-45歳）が参加した。これらの実験参加者は行為者セッションに参加していなかった。本実験における実験参加者を3.1同様、外部観察者と呼ぶことにする。全ての実験参加者は右利きであり、正常な視覚（矯正含む）と運動機能を有していた。これらの実験参加者は、心理物理実験に関する専門知識を持たず、また、実験目的を知らなかった。本実験のプロトコルはNTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会によって承認された。実験開始前に全ての実験参加者から実験の参加について同意を得た。

#### 実験手続き

実験手続きはいくつかの例外をのぞき、3.1と同様である。以下では、3.1との差異について述べる。

外部観察者は全てのタッチムービーに対し、タッチムービー中の手が触れている刺激について、硬さ/柔らかさ、粗さ/なめらかさ、粘つき/滑り、温かさ/冷たさの4項目をそれぞれ7段階評価で回答した。これら4項目の並び順は毎試行ランダムにシャッフルした上で提示された。外部観察者にはそれぞれのセッションで行為者が異なる課題を行っていることは知らされなかった。本実験では、外部観察者は実験を行っている間、いつでも好きなきに行為者セッションで用いられた触覚刺激を視覚的・触覚的に観察することができた。

この実験では、外部観察者は合計で1260タッチムービー（6人の行為者×5種類の行為者の課題×7

種類の触覚刺激×6回の繰り返し)を観察した。外部観察者はこの実験に3日間参加し、各日、420タッチムービー(2人の行為者×7種類の触覚刺激×3種類の速度条件×5回の繰り返し)を観察し、触り心地評価を行った。タッチムービーの行為者が変わるときには、観察者はそのように伝えられた。各行為者のタッチムービーは5セッションから構成された。1セッションは、42タッチムービー(7触覚刺激×6ブロック)からなる。はじめの4セッションで硬さ判断課題、粗さ判断課題、粘つき判断課題、温かさ判断課題のいずれかを、ランダムな順番で提示した。そのあとに、5セッション目として演技課題中のタッチムービーが提示された。それぞれのセッションにおける最初のブロックは実験手順に慣れるため、また、手の動きのバリエーションを学習するためのトレーニングブロックであった。タッチムービー中の行為者の提示順は、外部観察者ごとにランダム化された。それぞれの合計24時間以内(休憩を含む)で実験を終えた。

### 3.3.3 結果

はじめに、今回の実験における行為者の手の動きが、そもそも外部観察者にとってどれくらい触り心地の情報をもっていたのかについて調べる。3.1と同様に、外部観察者と行為者の触り心地評価の間のSpearman相関を計算した。Spearman相関係数を10人分平均した結果を図3.3.1に示す。この結果から、まず、行為者の課題によらず、外部観察者と行為者の間の粘つきの触り心地評価はかなり高いことがわかる。また、硬さ判断課題や温かさ判断課題中の行為者の手の動きから、外部観察者は行為者の硬さ評価や温かさ評価も有意に推定できることがわかる。最後に、演技課題中の行為者の手の動きからのみ唯一、外部観察者は粗さ評価を推定することができた。また、演技課題中の行為者の手の動きから推定された粘つき評価の成績は触り心地判断課題中よりも良い傾向があった。これらのことから、演技課題においては、特に触覚刺激の粗さ情報や粘つき情報が、強調されていることが示唆される。

また、3.1と同様に、外部観察者がどのような運動特徴量をもとに触り心地を推定しようとしていたのかを調べるために、外部観察者による触り心地評価と関連する行為者の手の動きの特徴量を調べた。手の動きの特徴量として、ここでは、x方向(左右方向)、y方向(前後方向)、z方向(鉛直方向)のそれぞれにおける指先速度と指先加速度、運動方向比(X/Y)、運動方向比(X-Y/Z)、手の開閉度合い、手の開閉速度、指間協調度合いを計算した。外部観察者は行為者が異なる課題を行っていることを知られていなかったため、今回は全ての課題を混ぜて解析を行った。相関を調べた結果を図3.3.2に示す。この結果から、特に運動方向比(X-Y/Z)と指間協調度合いが、全ての触り心地評価と高い相関をもつ運動特徴量であった。このことから、これらの運動特徴量が外部観察者の触り心地推定において重要な特徴量であることが示唆される。

そして、行為者による触覚探索運動が演技課題とそれ以外の課題とでどのくらい異なっていたのかを調べた。行為者の手の動きの特徴量を各試行ごとに計算し、各行為者内で標準化(平均が0、標準偏差が1になるように正規化)を行ったあとに、課題ごとに行為者間平均を行った。まず、X軸(左右方向)、Y軸(前後方向)、Z軸(鉛直方向)における指先速度が課題間でどのように異なっているかを図3.3.3に示す。この結果において特に特徴的なのはZ軸方向(鉛直方向)における指先速度が演技課題で最も大きくなることである。よって行為者は外部観察者に触り心地を伝える際に押し込み方向の動き(叩き動作)を大きく表現していることが考えられる。次に、X軸(左右方向)、Y軸(前後方向)、Z軸(鉛直方向)における指先速度が課題間でどのように異なっているかを図3.3.4に示す。この結果においては、Y軸方向(前後方向)における指先加速度が演技課題において最も大きくなることがわかる。こ

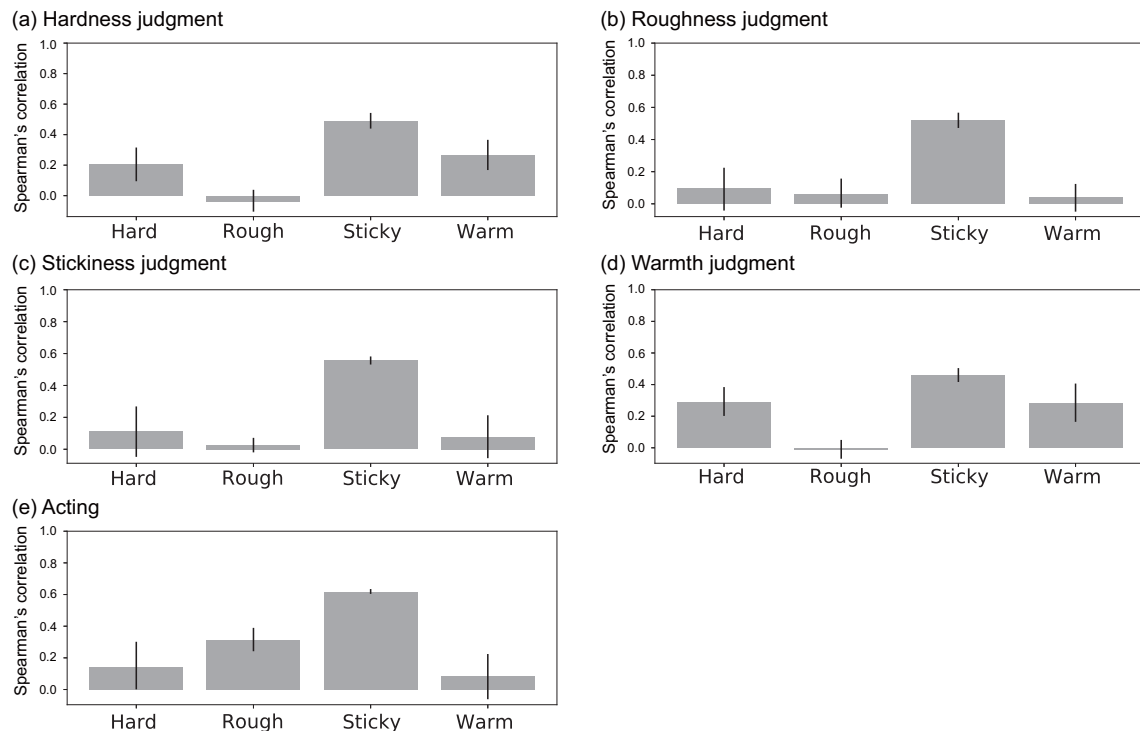


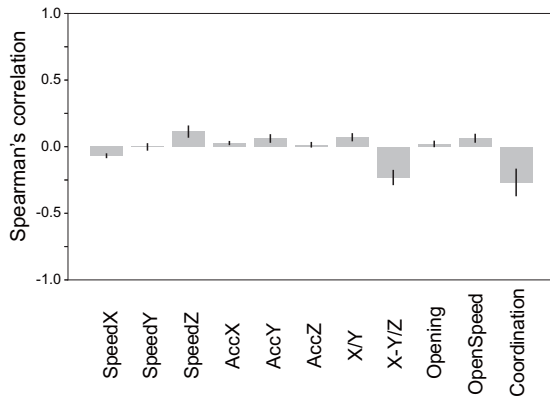
図 3.3.1 外部観察者の触り心地評価と行為者の触り心地評価の間の Spearman 相関係数。(a)-(d) は、触り心地評価課題における行為者の手の動きのタッチムービーについて、(e) は演技課題における行為者の手の動きのタッチムービーについて計算している。このグラフでは、それぞれの外部観察者について全ての行為者との相関係数を計算した上で、外部観察者間で相関係数を平均した。エラーバーはブートストラップ法 [49] によって計算された 95% 信頼区間である。アスタリスクは、エラーバーが 0 と重ならない（すなわち、相関係数が 0 ではないとみなせる）ことを意味する。

の運動特徴量は前章の実験から、粗さや粘つきと負の相関を持つことが示されているため、実験参加者は粗さや粘つきを表現するために、前後方向への力を大きく変えていたことが考えられる。続いて、運動方向比（左右/前後）、運動方向比（水平/鉛直）が課題間でどのように異なっているかを 3.3.5 に示す。演技課題におけるこれらの運動特徴量のうち突出して大きいものはないため、行為者はこれらの手の動きを協調・誇張していないと考えられる。最後に、手の開閉度合い、開閉速度、指間協調度合いが課題間でどのように異なっているかを図 3.3.6 に示す。この結果から、特に手の開閉速度が演技課題においてももっとも大きく、行為者は手の開閉動作を用いて外部観察者へ触り心地情報を伝えようとしていると考えられる。

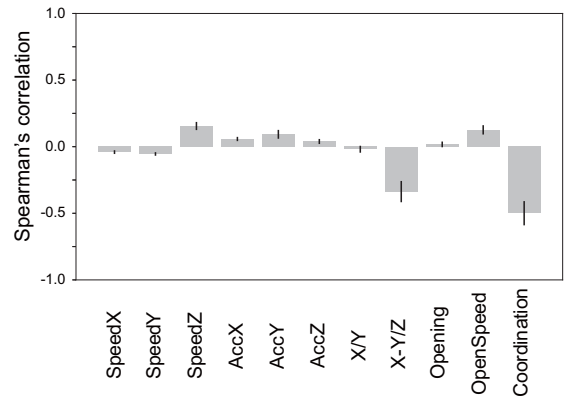
### 3.3.4 考察

はじめに、本実験における外部観察者の推定成績を 3.1 の実験における外部観察者の推定成績と比較する。3.1 における外部観察者の硬さ評価、粘つき評価の推定成績は相関にしてそれぞれ 0.1, 0.3 程度であり、粗さ評価、温かさ評価については有意に推定することができなかった。一方で本実験では、外部観察者による粘つき評価の推定成績は行為者の課題によらず、相関にして 0.4-0.6 程度であった。また、硬さ評価と温かさの推定成績は、行為者が硬さ評価課題もしくは温かさ評価課題を行っているとき

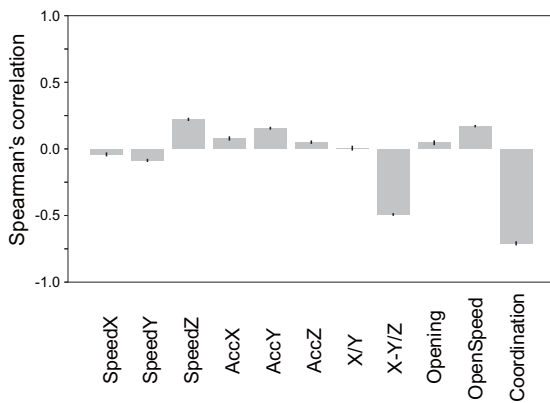
(a) Hardness rating



(b) Roughness rating



(c) Stickiness rating



(d) Warmth rating

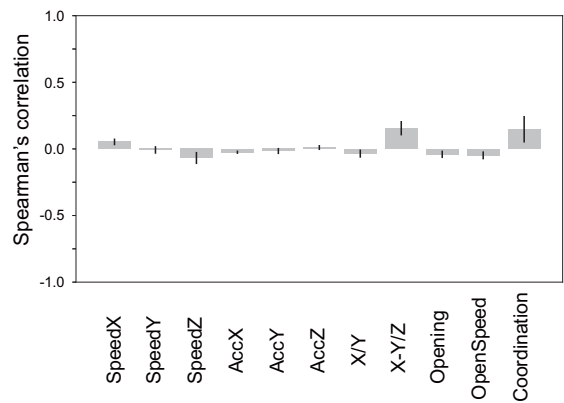


図 3.3.2 外部観察者の触り心地評価と行為者の手の動きの特徴量との Spearman 相関係数。エラーバーはブートストラップ法 [49] によって計算された 95% 信頼区間である。

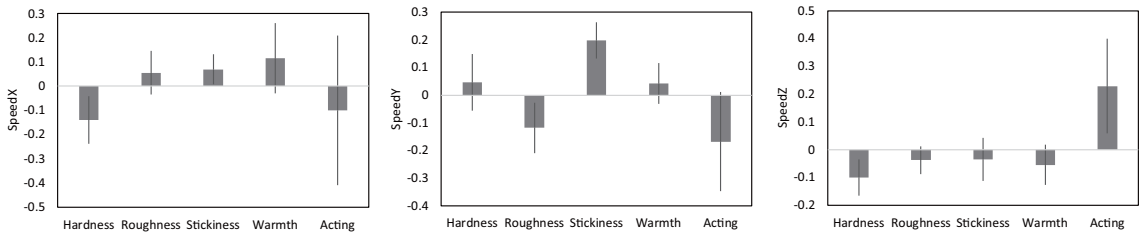


図 3.3.3 行為者による X 軸、Y 軸、Z 軸における指先速度の課題による違い。エラーバーは標準誤差である。

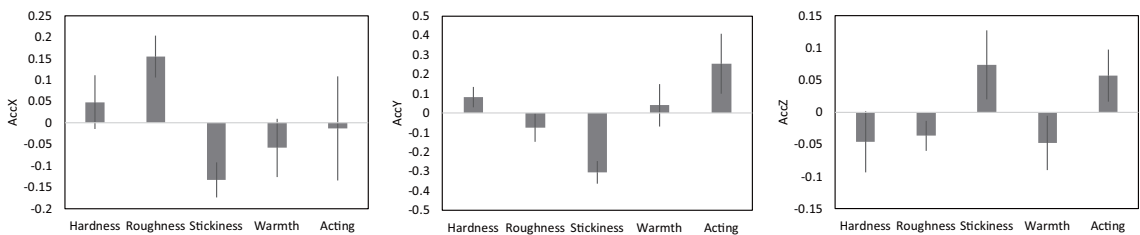


図 3.3.4 行為者による X 軸、Y 軸、Z 軸における指先加速度の課題による違い。エラーバーは標準誤差である。

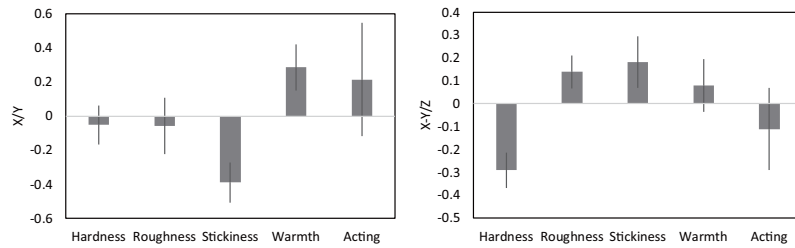


図 3.3.5 行為者による運動方向比 (X/Y)、運動方向比 (X-Y/Z) の課題による違い。エラーバーは標準誤差である。

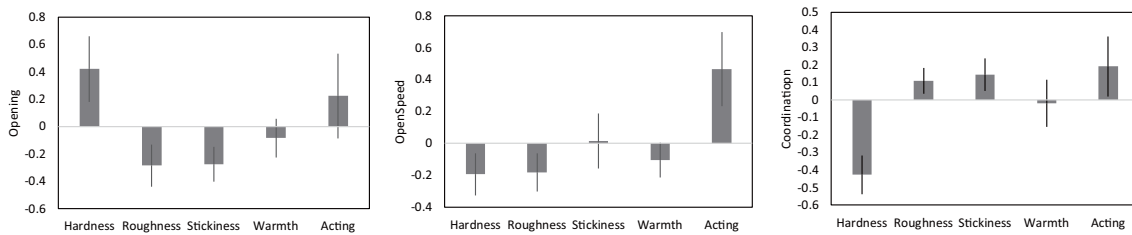


図 3.3.6 行為者による手の開閉度合い、手の開閉速度、指間協調度合いの課題による違い。エラーバーは標準誤差である。

の手の動きに対してのみ、相関係数が 0.2 を超える成績を示した。演技課題における手の動きを観察しているときのみ、粗さ評価の推定成績も相関係数 0.3 を超えた。3.1 の実験と本実験の大きな違いは、3.1 の実験では行為者は 5 秒間に 11 種類の触覚情報を判断せねばならなかった一方で、本実験では 5 秒間にただ 1 つの触覚情報を判断する、もしくは触り心地を伝えるよう演じるという課題の違いである。3.1 で考察したように、限られた時間で多くの触覚情報を判断しようとする行為者の手の動きが触り心地に関する情報を持たなくなり、外部観察者による推定成績も低下させてしまうと考えられる。また、今回の実験の触覚刺激は 3.1 の実験の触覚刺激の面積の 4 倍と行動制限が小さく、外部観察者が推定において大きな手の動きを用いることができたことも可能性として考えられる。

次に、演技課題で強調・誇張された手の動きについて考える。演技課題では他の課題よりも、Z 軸方向（鉛直方向）における指先速度、Y 軸方向（前後方向）における指先加速度、手の開閉速度が大きいことが明らかになった。Z 軸方向（鉛直方向）における指先速度は、物体の硬さを調べる際の叩き動作に関連すると考えられる。Y 軸方向（前後方向）における指先加速度は、これまで粗さや粘つきの評価と相関を持ってきたことから摩擦を表現する動作に由来すると考えられる。手の開閉速度は、人工芝やフェイクファーのような毛束をもつものを表現するための動作であると考えられる。これらの動作を強調もしくは誇張することで、行為者は外部観察者へ物体のもつ触り心地を伝えようとしていた可能性が示唆される。

これらの運動特徴量が、どの程度外部観察者による触り心地評価値と相関を持つのかをみると、ほとんどの運動特徴量よりはわずかに相関が高いものの、運動方向比（水平/鉛直）や指間協調度合ほど相関は高くなかった。このことから、これらの動作は確かに触り心地評価の情報を持っているものの、行為者による伝達意図を持った運動特徴量と外部観察者が実際に用いた運動特徴量は必ずしも一致しないことを示唆するものである。

### 3.3.5 本実験のまとめ

本実験では、行為者に触れているものの触り心地情報が他者に伝わるような触り方を行うよう教示をした際の触覚探索運動に着目し、解析した。その結果、いくつかの触覚探索運動が単に触り心地判断課題を行っているときの触覚探索運動よりも強調もしくは誇張されている可能性を示した。これらの触覚探索運動が、外部観察者の触り心地推定にとって有用な運動特徴量であるかどうかを調べることが今後の課題であろう。

### 3.4 本章のまとめ

本章では、心理物理実験と多変量解析を通して、行為者による触覚探索運動が、外部から視覚観察をした外部観察者が感じた触り心地の情報をどれくらい含んでいるのかを調べた（図 3.4.1）。その結果、外部観察者は行為者の手の動きに含まれる情報をもとに、材質カテゴリや触覚属性を推定できることを示した。また、動画変調実験や演技課題を用いて、外部観察者にとって判断に有用な触覚探索運動の特徴量をいくつか推定した。重要なことに、触覚探索運動と行為者における触り心地評価の間の関係と、触覚探索運動と外部観察者における触り心地評価の間の関係は必ずしも一致しないことも明らかにした。

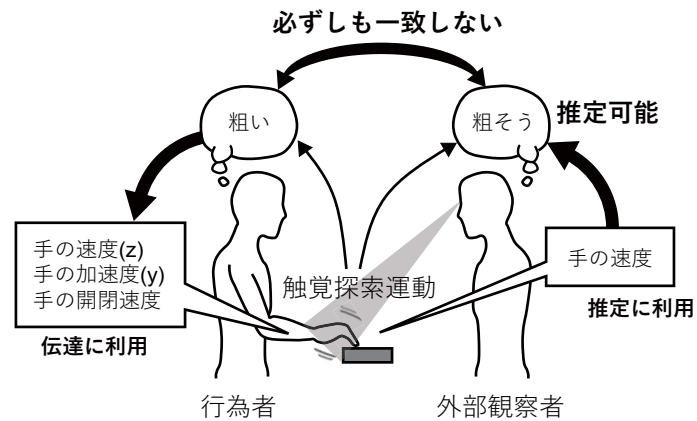


図 3.4.1 本章の実験のまとめ

## 第 4 章

# 総合考察

第 2 章、第 3 章の実験や解析を通して、ものに触れている行為者の触覚探索運動が行為者の触り心地評価の情報を持つこと、また、行為者の手の動きを視覚的に観察した外部観察者の触り心地評価の情報も持つことを明らかにしてきた。これらのことは、これまでの触覚研究でノイズとしてみなされることの多かった触覚探索運動が、実は触り心地の情報源として利用可能であることを意味するものである。また、実験設計における様々な要因が触覚探索運動の持つ触り心地情報の量に影響しうることも明らかにしてきた。本章では、これらの関係について体系的にまとめた上で、これらの知見から、なぜ触覚探索運動が触り心地の情報を持つのかを議論し、触り心地を触覚探索運動からデコードする際に必要な要件を整理する。また、本研究の知見を科学・工学・産業など広い分野に共有するための枠組みについて展望を述べる。

### 4.1 触覚探索運動と触り心地知覚の体系的関係

#### 4.1.1 触覚探索運動の分類と、それらが持つ行為者の触り心地情報

第 2 章、第 3 章の実験を通じて、手の運動や、接触力、眼球運動を計測し、運動特徴量を算出してきた。またこれらの運動特徴量をクラスタ分析によって類似度に基づき分類してきた。その分類結果は、第 2 章、第 3 章の実験間でよく似ていた。ここでは、これら全ての運動特徴量と、典型的な分類についてまとめる。また、これらの運動特徴量が、粗さや硬さのような触覚刺激の物理特性と結びついた触り心地から、布や金属といった材質レベルの触り心地、好ましさのような感性的・価値的な触り心地、更には選択意思決定のような行動レベルの触り心地までの情報を持っていることを明らかにした。これらの触り心地情報との結びつきについてもまとめる。本実験や先行研究の結果を踏まえると、触覚探索運動は表 4.1.1 に示すように 9 種類に分類されることがわかった。以下ではそれぞれの分類項目について解説する。

まず、1 つ目は手の運動に関する特徴量のうち、水平方向の移動速度や総移動距離である。この運動特徴量は、触覚刺激表面に対するなぞり動作やなで動作と関連すると考えられる。本研究の結果から、粗さ評価や粘つき評価、ガラスらしき評価、ゴムらしき評価、プラスチックらしき評価と負の相関を、温かさ評価や好ましき評価、意思決定における正方向の証拠蓄積、布らしき評価と正の相関を持つことが明らかになった。

2 つ目は手の運動に関する特徴量のうち、鉛直方向の移動速度や総移動距離、移動加速度、運動方向

表 4.1.1 触覚探索運動の特徴量の分類。(正)と(負)はそれぞれ正方向の相関と負方向の相関を表す。触り心地情報の右下の節番号や引用番号は、これらの実験で手の動きとの関係が見出されたことを表す。また、右上の－マークは逆数を表す。

| 運動特徴量                                                  | 関連する動作や物理現象                 | 含まれる触り心地情報                          |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 移動速度 (左右、前後)<br>総移動距離 (左右、前後)                          | なぞり動作<br>なで動作               | 粗さ評価 (負) 2.1,2.5,3.1                |
|                                                        |                             | 粘つき評価 (負) 2.1,2.5,3.1,[29]          |
|                                                        |                             | 温かさ評価 (正) 2.1,2.5,3.1               |
|                                                        |                             | 好ましき評価 (正) 2.2                      |
|                                                        |                             | 正方向の証拠蓄積 (正) 2.4                    |
| 移動速度 (鉛直)<br>総移動距離 (鉛直)<br>移動加速度 (鉛直)<br>運動方向比 (鉛直/水平) | 叩き動作<br>指への吸い付き             | 布感 (正) 3.1                          |
|                                                        |                             | ガラス感、ゴム感、プラスチック感 (負) 3.1            |
|                                                        |                             | 粘つき評価 (正) 2.5,3.1                   |
|                                                        |                             | 好ましき評価 (負) 2.2                      |
|                                                        |                             | 正方向の証拠蓄積 (負) 2.4                    |
| 移動加速度の平均、分散 (左右)                                       | こすりつけ                       | 木感、紙感 (負) 3.1                       |
|                                                        |                             | 硬さ評価 (正) 2.1,2.5                    |
|                                                        |                             | 粗さ評価 (負) 2.5,3.1                    |
|                                                        |                             | 粘つき評価 (負) 2.5                       |
|                                                        |                             | 好ましき評価 (正) 2.2,2.5                  |
| 移動加速度の平均 (前後)                                          | 表面摩擦－                       | 正方向の証拠蓄積 (正) 2.4                    |
|                                                        |                             | 好ましき評価 (負) 2.3                      |
|                                                        |                             | 手の開閉度合                              |
|                                                        |                             | 手の開閉速度                              |
|                                                        |                             | 指間協調度合                              |
| 運動方向比 (前後/水平)<br>押付力 (前後)                              | 触り方モードの切替<br>指全体の動作<br>押し込み | 粗さ評価、木感 (負) 3.1                     |
|                                                        |                             | 硬さ評価 (正) 2.1,2.5,3.1,[29],[42],[43] |
|                                                        |                             | 温かさ評価 (負) 2.1,2.5,3.1               |
|                                                        |                             | ガラス感、ゴム感、プラスチック感 (正) 3.1            |
|                                                        |                             | 布感 (負) 3.1                          |
| 押付力の微分値                                                | 刺激表面の摩擦                     | 硬さ評価 (正) 2.5                        |
|                                                        |                             | 粘つき評価 (正) 2.5                       |
|                                                        |                             | 好ましき評価 (負) 2.2,2.5                  |
|                                                        |                             | 正方向の証拠蓄積 (負) 2.4                    |
|                                                        |                             | 硬さ評価 (正) 2.1                        |
| 眼球の移動速度<br>固視時間－                                       | 眼球運動の<br>大きさ                | 粗さ評価 (負) 2.1                        |
|                                                        |                             | 粘つき評価 (負) 2.1                       |
|                                                        |                             | 温かさ評価 (負) 2.1                       |
|                                                        |                             |                                     |
|                                                        |                             |                                     |

比 (鉛直/水平) である。この運動特徴量は、刺激と直行する方向の手指の移動であることから、叩き動作 [164, 165, 166, 167]、もしくは刺激の指への吸い付きと関連すると考えられる。本研究の結果から、これらの特徴量は粘つき評価と正の相関を持つ一方、好ましき評価や正方向の証拠蓄積、木らしき評価、紙らしき評価と負の相関を持つことが明らかになった。

3 つ目は手の運動に関する特徴量のうち、左右方向の移動加速度の平均と分散である。この特徴量は、

こすりつけ動作、もしくは刺激表面とのスティックスリップを表している可能性がある。本研究では、実験により有意な相関方向が揺らぐ傾向があるが、硬さ評価と正の相関を持つ傾向があるようである。

4 つ目は手の運動に関する特徴量のうち、前後方向の移動加速度の平均である。本研究では、粗さ評価、粘つき評価と負の相関を、好ましき評価や正方向の証拠蓄積と正の相関を示した。このことから表面の摩擦と負の相関を持つ特徴量であると予想される。

5 つ目は手の動きの定常性である。この特徴量は、手の動きが 1 試行内で動きのモードの切り替えに対応すると考えられ、好ましき評価と負の相関を示した。

6 つ目は、指の開閉動作や、開閉速度、指間の協調動作である。本研究の結果から、粗さ評価や木らしき評価と負の相関を持つ可能性が示唆される。

7 つ目は手の運動や押付力に関する特徴量のうち、運動方向比（前後/水平）、前後方向の押付力である。これらの特徴量は、押し付け動作を表している可能性がある。本研究では、硬さ評価、ガラスらしき評価、ゴムらしき、プラスチックらしきと正の相関を、温かさ評価、布らしきと負の相関を持つ傾向があるようである。

8 つ目は押付力に関する特徴量のうち、全方向への押付力の時間微分値である。先行研究からこれらの特徴量は表面摩擦と関係があると考えられる [40]。本研究では、硬さ評価や粘つき評価と正の相関を、好ましき評価や正方向の証拠蓄積と負の相関を示した。

9 つ目は眼球運動に関する特徴量のうち、眼球運動の移動速度やサッカードサイズ、もしくは固視時間の逆数といった眼球運動の大きさに関する特徴量である。本研究では、硬さ評価と正の相関を、粗さ評価、粘つき評価、温かさ評価と負の相関を示した。

#### 4.1.2 触覚探索運動と行為者の触り心地の関係に影響する諸要因

また、このような触覚探索運動が持つ触り心地の情報量には様々な要因が影響することが明らかになった。ここでは、その要因について整理した結果を図 4.1.1 に示す。以下では、これらの要因について解説する。

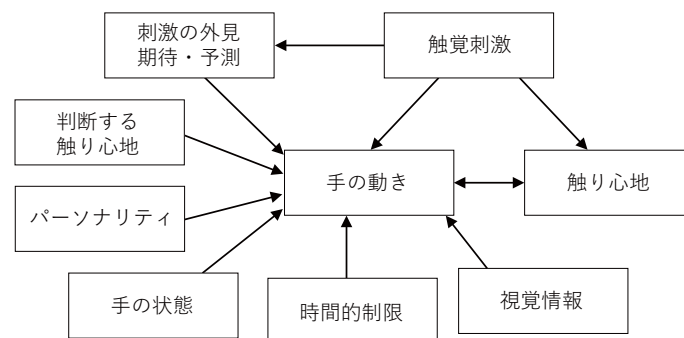


図 4.1.1 本研究や先行研究から、触覚探索運動や、触覚探索運動の持つ触り心地情報に影響すると考えられる要因。

## 判断すべき触り心地情報による影響

2.1 の実験からは、どのような触覚属性を判断するかによって触覚探索運動が持つ触り心地の情報は異なること、更に目的を持たないで触る場合には触覚探索運動が持つ触り心地の情報は小さくなること  
が明らかになった。一方で、好ましき評点課題（2.2）と価値に基づく選択課題（2.4）の結果の共通点  
から、課題が異なっても判断に用いる情報が同じであれば、触覚探索運動が持つ触り心地との関係も同  
じになることが示唆される。なお、判断課題は多ければ多いほど手の動きの持つ触り心地評価の情報量  
が増えるわけではなく、5 秒間で 11 項目を判断する課題（3.1）と 5 秒間で 1 つの項目を判断する課題  
（3.3）の結果の比較から、判断項目が多すぎると触覚探索運動のもつ触り心地情報量は小さくなること  
が示唆される。

## 時間的制限による影響

判断する触覚属性やその数が同じであったとしても、時間的制限が触覚探索運動の持つ触り心地情報  
に影響する。2.1 における触覚探索運動による硬さ、粗さ、粘つき、温かさ評価の説明力よりも、2.5  
における触覚探索運動による硬さ、粗さ、粘つき、温かさ評価の説明力のほうが大きい傾向があった。  
これらの実験の違いとして、2.1 の実験では実験参加者は 10 秒間触り続けてから判断するように求めら  
れていたのに対し、2.5 の実験では実験参加者は判断でき次第回答するように求められた。2.5 における  
平均解答時間は 2-2.5 秒程度であった。2.2 における説明力の時間推移解析からも 2 秒もあれば説明力  
は横ばいになることがわかる。これらのことから 2.5 秒もあれば触り心地が判断できるため、残りの時  
間は無目的に触ってしまい、結果として説明力が下がってしまった可能性がある。この時間的制限に  
よる触覚探索運動のもつ情報量への影響は、2.1 の実験の粘つき評価の説明力が先行研究 [29] における  
手の速度と粘つき評価の間の相関に比べて小さかったという結果にも辻褄の合う説明を与えることがで  
きる。先行研究 [29] では粘つきを判断でき次第回答させており、さら触り心地に触り始めてから 2 秒ま  
でのデータを解析対象としている。そのため、先行研究における触覚探索運動のほうが粘つき評価の情  
報量が多かったと解釈できる。

## 触覚刺激による影響

2.1 における実験結果から、触覚刺激によって手の動きが変化することが明らかになった。また、2.2  
における一般化線形混合モデルによる解析から、触覚刺激が仲介することによって、触覚探索運動が触  
り心地情報を多く含むことができることも示唆された。このような触覚刺激の仲介する原因として、2  
つの可能性が考えられる。1 つは、触覚刺激表面における物理特性の影響である。例えば、触覚刺激表  
面の弾性や粘性、摩擦係数や熱伝導率など触り心地評価に影響すると考えられている物理特性が、触り  
方にも影響し、結果として触覚探索運動と触り心地評価が関係を持つといった状況が考えられる。もう  
1 つの可能性としては、実験参加者による刺激ごとの戦略である。例えば、布特有の触り方、金属特有  
の触り方、というように材質に応じた触り方が存在する場合にも、触覚刺激を介することで手の動きが  
触り心地情報を含みうる。

## 触り方のモードによる影響

2.2の実験において、なぞり動作のみで好ましさを判断する条件と、押し込み動作のみで好ましさを判断する条件を行ったところ、前者における触覚探索運動のほうが多く好ましき評価の情報を含んでいた。このことから、どのような触り方で触覚刺激を触ろうとするか、についても触覚探索運動が持つ情報の量に影響しうる。

## 視覚情報の有無による影響

2.1における実験でも考察したように、視覚情報が利用可能であった本研究の実験の説明力は、視覚情報が利用できない先行研究の説明力よりも低かった。おそらく、触覚刺激の視覚情報が利用可能な場合、見た目からある程度触覚刺激の触り心地が推定できてしまうために、触覚探索運動が小さくなり、触り心地に関する情報量を多く持たなかったと予想される。

## 触覚パーソナリティによる影響

2.5の解析結果から、実験参加者がどの程度触覚を能動的に活用するかどうか、快楽を得るために触覚を用いようとするか、という個々人のパーソナリティが手の動きが持つ触り心地情報量に影響する可能性が示された。本研究では、あくまで触覚に関連するパーソナリティしか扱っておらず、性格に関わるもの（例えば、内向的/外向的）や社会性に関わるもの（例えば、他者への共感度合）、能力に関わるもの（例えば、マインドフルネス）といったパーソナリティが関わるかどうかを調べるには更なる研究が必要である。

## 本研究では扱わなかった要因による影響

本研究では調査の対象としなかったが、先行研究で触覚探索運動、または触覚探索運動が持つ触り心地情報に影響しうる要因を整理する。1つは触覚刺激に対する事前情報である。我々が日常でもものに触れるとき、その対象の視覚情報が予め得られるのが普通であり、その外見を元に、触る対象の触覚的質感を予測して触ると考えられる。実際、見た目が粗いと評価されたものほど手の移動距離が長くなること、見た目が凸凹しているか、もしくは柔らかいと評価されたものほど押付力の比（鉛直方向の力/せん断方向の力）が大きくなること、見た目が温かい、もしくは粘つくと評価されたものほど鉛直方向の押付力が大きくなること、見た目の光沢感が高いと評価されたものほどせん断方向の押付力が大きくなることなどが示されている [28]。また、見た目ではなく刺激の提示順を変えることで刺激の硬さが予測できる実験設定では、硬いと期待されるものほど押付力が大きくなることが示されている [43]。

指の状態や探索スタイルのような個人間の違いが手の動きの違いとなって現れることがある。指先が汗などで湿っているときには、プラスチックの滑らかな表面上をなぞっても指は滑らかに動かないはずである。このように手の湿り気も手の動きに影響を与えることが知られている [155]。グレーティング刺激の空間周波数弁別において、時空間手がかりを使う実験参加者は、時間手がかりのみを使う実験参加者に比べて手の速さのばらつきが小さくなる [35]。また後者のタイプの実験参加者がグローブを装着した状態で課題を行うと、装着していない状態に比べて手の速さのばらつきが小さくなる [35]。触覚弁別課題において高い成績が求められる課題では、成績に応じた報酬がもらえる場合に、より良い成績の得られる方向に手を動かす戦略を行うことが示されているように、報酬も手の動きに影響を与え得る

[168]。触覚刺激ではないが、タッチパネルを操作しているときの指のストローク運動から、操作者の感情状態（ポジティブかネガティブかニュートラルか）が推定できることも示されており、感情状態も手の動きに影響する可能性がある [169]。

#### 4.1.3 触覚探索運動と行為者の触り心地が相関を持つ原因

第2章や第3章の実験を通じて、触覚探索運動と触り心地評価が相関を持つ原因を考察してきた。本研究の実験では、触覚刺激を数種類や実験参加者を数人、繰り返しを数試行というように、これらの要因にバリエーションがある。このことや、各実験の結果から、相関の原因として大きく3種類が考えられる。1つ目は、触覚刺激の物理特性による影響である。本研究ではデータ解析上、触覚刺激を平均していないため、触覚探索運動と触り心地評価がそれぞれ触覚刺激の物理特性に影響されることで、結果として触覚探索運動と触り心地評価の間に相関が生じたという解釈が可能である。実際、2.2の解析において、好ましき評価と触覚探索運動の間の説明力について、触覚刺激による効果が大きい可能性を示した。2つ目は、実験参加者の個人差による影響である。例えば、手の動きが早い人ほどより好ましいと評価するといった傾向が考えられる。本研究では、実験参加者内で触覚探索運動の特徴量を正規化した上で実験参加者間で平均しているため、このような影響がどれくらい存在したかは判断が難しく、今後の実験で検討されるべき課題である。3つ目は、実験参加者自身の触覚探索戦略による影響である。例えば、2.5の実験から、どのくらい触覚を活用しようとするかの度合いが触覚探索運動の持つ好ましき評価の説明力に影響することが明らかになった。この理由として、能動的に触覚を得ようとする人ほど、ひとつひとつの触覚刺激の触り方が異なる可能性を提案した。このように、実験参加者による能動的な触り方の変化が相関の原因となっている可能性がある。以下では、本研究で扱ったそれぞれの触り心地について、1つ目の触覚刺激の物理特性と、3つ目の行為者による触覚探索戦略の影響が、触覚探索運動と相関を持つ原因となりうるかを議論する（表4.1.2）。

硬さについては、硬いものほど強く押し込むことや、前後方向と左右方向の移動量の比が等しくなることが明らかになった。まず、硬いものほど強い力で押し込む理由については、過去の研究 [43] より、硬い刺激に対する弁別成績を上げるには柔らかい刺激の弁別時よりもより大きな力が必要になることが知られている。また、前後左右方向の移動比については、硬さに関連する物理情報を取り出すために硬い刺激を叩いて調べる傾向があることが知られており [165, 166, 167]、鉛直方向の動きが大きくなることで相対的に前後左右方向の動きが小さくなったためと考えられる。これらのことから、硬さ評価と相関する触覚探索運動は、物理刺激依存というよりは、実験参加者の戦略的な動きによるものと考えられる。

粘つきについては、刺激平面上での手の移動速度や加速度と相関を持つことが明らかになった。更に、2.1の実験のように行為者の触覚判断課題が変わっても、触覚判断課題がなかったとしても、触覚探索運動から粘つき評価を高い成績で推定できた。また、3.3の実験のように、行為者がどの触覚判断課題を行っているときの触覚探索運動であっても、その観察から外部観察者は粘つき評価を高い成績で推定することができた。これらのことは、触覚探索運動と粘つき評価の相関は、実験参加者の戦略的な動きというよりは、触覚刺激の物理特性、つまり表面摩擦に依存していると考えられる。粘つき知覚は表面摩擦に大きく依存し、また、表面摩擦が大きくなると滑らかな触覚探索運動を阻害するため、結果として手の動きが粘つきの触り心地情報を持ったと考えられる。

粗さについては、粘つき同様に表面摩擦に基づく知覚と考えられており、相関を持つ触覚探索運動の

表 4.1.2 触り心地評価が触覚探索運動と相関する原因について、触覚刺激の物理特性と、行為者による運動変化の観点からまとめた。○はその要因が原因であること、△はその要因が原因である可能性があること、空欄はその要因が原因であることを示唆する証拠が本研究では見出されていないことを表す。

|              | 刺激の物理特性 | 行為者による運動の変化 |
|--------------|---------|-------------|
| 硬さ評価         |         | ○           |
| 粗さ評価         | ○       | △           |
| 粘つき評価        | ○       |             |
| 温かさ評価        |         | ○           |
| 好ましき評価、ドリフト率 | ○       | ○           |

特徴量も粘つきのケースとよく似ている。しかし、実験によっては刺激平面上の指先加速度が粗さと負の相関を示す一方で、粘つきと正の相関を示したり（3.1）、前後方向の速度や左右方向の加速度など粗さ判断と粘つき判断で大きく異なる動作も見られる（3.3）。更に、粘つき評価と異なり、課題が変わると手の動きがもつ情報量が有意でなくなることもあった（2.1）。外部観察者も、どんな課題の最中の行為者の手の動きであろうと粘つき評価を推定できたのに対し、粗さ評価については演技課題中の行為者の手の動きに対してのみ推定できた（3.3）。これらのことから、粗さの触り心地と触覚探索運動の相関は、表面摩擦のような物理特性が仲介する可能性も強いが、それとは異なる要因が仲介する可能性も高い。特に行為者の判断課題によって相関が変化する傾向から、実験参加者による能動的な触り方の変化が仲介する可能性も考えられる。

温かさについては、相関をもつ触覚探索運動特徴量が、硬さ評価とよく似ている（2.1, 2.5）。また、外部観察者も硬さ判断課題か温かさ判断課題においてのみ、硬さと温かさを有意に推定できた（3.3）。硬さと冷たさは相関が高いことが知られているので、硬さ判断に対する実験参加者の戦略的な触り方が仲介している可能性がある。一方で、2.1 や 2.5, 3.1 の実験のように、温かさ評価が手の速度と大きく相関を持つ点は硬さ評価とは異なる。熱伝導率のような触覚刺激の物理特性が直接触覚探索運動に影響するとは考えにくいので、手の速度との相関も実験参加者による戦略によるものである可能性がある。温冷知覚は、触覚刺激に触れたときの接触皮膚部分の温度の減少・増加の度合いに依存するところが大きいと考えられている [170, 171]。今回の実験に用いられた触覚刺激は室温の刺激であり、すべて皮膚温より温度が低いと考えられ、冷たい刺激では皮膚面の急激な温度低下を引き起こす一方で、温かい刺激ではゆっくりな温度低下を引き起こすと考えられる。そこで、温かい刺激に対する温度判断は皮膚温からの区別が難しいため、指を能動的にスライドして温められていない面に絶えず触れ続けることで、温かさ情報に対する信頼度を高めているのではないかと予想される。

好ましき評価（2.2）やドリフト率  $v$ （2.4）については、相関する触覚探索運動特徴量が全く同じであったことから、ほとんど同じものと考えられる。好ましき評価については、粗さや粘つきと相関の仕方が似ていること（2.5）から、表面摩擦が仲介している可能性がある。一方で、2.3 におけるリカレンス特徴量の解析より、手のモードの切り替えのような特徴量が相関を持ったり、2.5 における解析より触覚に能動的な実験参加者ほど相関を持つなど、実験参加者による戦略と関連することを示唆する証拠もある。よって好ましきの触り心地と触覚探索運動の相関は、物理特性要因と実験参加者の戦略の両方の要因が関わっていることが示唆される。

#### 4.1.4 行為者と外部観察者の違い

ここまでで触覚探索運動が行為者の感じる触り心地の情報をどのように含んでいるのかについて議論してきた。一方で、3章で触覚探索運動は外部観察者の感じる触り心地をも含んでいることを明らかにしてきたものの、まだこれらの研究は萌芽的な段階にあり、その体系的な関係を議論するのは難しい。そこでここでは、本研究の結果から、行為者と外部観察者それぞれの触り心地情報と触覚探索運動の関係がどのように異なっているかを調べることで、触覚探索運動のもつ外部観察者の触り心地情報について理解を深めることを目的とする。

まず、3.1の実験における結果(3.1.13)、行為者と外部観察者それぞれの触り心地評価と触覚探索運動の関係は、有意差こそ出ていないものの相関の方向はかなり似ていることがわかる。例外として、指先加速度に対しては行為者と外部観察者とで明確に粗さの解釈が異なっている。また、外部観察者のほうが触覚探索運動との有意な相関が多い上に、外部観察者の触り心地評価のほうが触覚探索運動による説明力が行為者の触り心地評価よりも高いことから、触覚探索運動は外部観察者が感じる触り心地情報を多く含んでいると考えられる。加えて、3.3の触り心地伝達実験の結果からは、行為者が外部観察者に伝えるために強調もしくは誇張した触覚探索運動は、必ずしも外部観察者の触り心地評価と関連しないことも明らかになった。

このように外部観察者による触り心地の推定が大きく行為者の触覚探索運動に依存している一方で、行為者の感じる触り心地や意図する触り心地と必ずしも一致しない原因として、4.1.2で議論した行為者の触覚探索運動、もしくは触覚探索運動がもつ行為者の触り心地情報に影響しうる要因が説明を与えるかもしれない。4.1.2では、行為者が何を判断しようとするか、どのような課題を行っているか、手の状態はどうか、パーソナリティはどうかといった要因が行為者の触覚探索運動やその情報量に影響しうることを整理した。3.1の実験でも考察したとおり、行為者はそれらの要因にアクセスできる一方で、外部観察者がアクセスできるのは最終産物としての行為者の手の動きのみである。行為者を取り巻く情報にアクセスできるか否かが、外部観察者と行為者の間の異なる触り心地評価の原因と鳴っている可能性がある。例えば、行為者自身の手が湿っていてガラス表面に対して指のスティックスリップが生じる場合、行為者は自身の手が湿っていることに気がついているため滑らかと評価できるが、外部観察者はスティックスリップの原因を刺激表面に帰属し、表面摩擦の大きい刺激を触っていると推定しうる。このことが、行為者と外部観察者それぞれの粗さ評価値と指先加速度の相関の相違の原因となっている可能性が考えられる。また、自身の触覚探索運動に影響しうる要因を把握している行為者と違い、外部観察者は完全に手の動きのみに頼るしかいないため、触覚探索運動がもつ外部観察者の触り心地情報は、行為者の情報よりも多くなる。そして、行為者が強調・誇張した運動特徴量が必ずしも外部観察者によって使われない理由も、行為者は自身の置かれた課題や手の状態の中で手の状態を演出しているのに対し、外部観察者は行為者が置かれた状況を理解できないためであると考えられる。

以上のことは、触覚探索運動による外部観察者の触り心地情報のデコードの容易さをも表している。行為者の触り心地情報をデコードする場合には、行為者をとりまく様々な要因を考慮せねばならない。一方で、外部観察者の触り心地情報をデコードする場合には、行為者を取り巻く様々な要因はむしろ考慮してはならず、触覚探索運動の特徴量を解析するだけで、外部観察者がどのような触り心地を見出しているかを推定することが可能であると期待される。

ここで、触り心地の情報を多く持つ触覚探索運動を行う行為者は、他の行為者の感じた触り心地を高

い成績で推定できる外部観察者になれるのかどうかについて議論をする。本実験では、触覚探索運動に関する記憶の要因を統制するため、行為者と外部観察者は必ず異なる実験参加者を起用した。そこで、行為者の説明力と外部観察者の推定能力の関係を直接解析することはできない。ただし、外部観察者は日頃の触覚経験、すなわち触り心地と結びついた自身の触覚探索運動に関する知識に基づいて推定を行っているであろうことを考えると、触覚探索運動と触り心地の間の結びつきが強い人ほど、推定が得意であると予想される。そこで、高い説明力を持つ触覚探索運動を行う実験参加者が、触り心地を高い成績で推定できるかどうかを調べることで、この仮説を検証することができると期待される。

## 4.2 触覚探索運動による触り心地デコーディングに向けて

ここでは、本研究の結果を踏まえて、触覚探索運動の計測・解析による行為者および外部観察者の触り心地デコーディング手法の実装方法について考察する。

### 4.2.1 触覚探索運動計測

本研究の実験結果から、表 4.1.1 に示すような 9 種類の触覚探索運動が行為者の触り心地情報を持つことが明らかになった。これらの運動特徴量は少なくとも、指の運動、押付力、眼球運動の 3 種類の計測が必要になる。

指の運動の計測について、本研究で計測した全ての運動データを計測する場合、左右、前後、鉛直それぞれの方向について有用な特徴量が得られること、また、指の開閉や協調も有用な特徴量であることから、3 次元 (x, y, z) 全ての軸について、少なくとも 5 本指と重心（手の甲）の 6 箇所位置の時間推移を計測する必要がある。この場合には、OptiTrack や OPTOTRAK、LeapMotion のような光学計測<sup>\*1</sup>、Polhemus や trakSTAR のような磁気計測が有用である。ただし、表 4.1.1 から、木らしさ評価や紙らしさ評価のような材質カテゴリ評価のデコーディングが必要ない場合には、左右・前後方向の二次元の人差し指の運動計測だけで他の全ての触り心地評価をカバー可能である。よって、この場合にはカメラ 1 台で水平面上の人差し指の指先のマーカー 1 枚の位置トラッキングさえ行えば、大抵の触り心地情報は推定可能である。

押付力は、硬さ評価を推定するために最適な触覚探索運動である。本実験では、触覚刺激の下に設置する力センサ（フォースプレート）と指先に取り付ける力センサ（Haplog）の 2 種類を使用した。触覚刺激の下に力センサを設置する場合は手や指に拘束がない状態で 3 軸方向の高精度な計測が可能であるが、デコーディングの際には全ての触りうる触覚刺激の下に力センサが備わっていなければならない現実的でない。一方で Haplog は、指腹の変形具合と指にかかる力の関係を学習し、指腹変形から指にかかる力を推定するセンサである。そのため、指に取り付けるだけで良いという点でデコーディング向きではあるが、指先形状に干渉しやすく、キャリブレーションもやや面倒であるという欠点がある。その他の爪先の血流を計測し押付力を推定する爪上取り付け型力センサなども含め、装置側の発展が期待される。

眼球運動は、本研究の結果から硬さ、粗さ、粘つき、温かさの主要な触り心地評価の情報を持ちうるということが明らかになった。眼球運動計測は心理物理実験だけでなく、消費行動やウェブブラウジングの挙動解析まで多様なニーズに応えられるようにウェアラブルで安価な計測装置が開発されている。手の運動や押付力に比べると決して触り心地評価の説明力は高くないものの、現時点で簡易に触り心地をデコードするのであれば、最も現実的な方法であると言える。更に眼球運動は、視覚情報が与えられていないときでも眼球と手の間の協調運動が生じることが知られているため [172]、行為者が自身の手元や触覚刺激を観察していないときでさえも触り心地の情報を持つ可能性がある。視覚情報が与えられていないときの眼球運動の持つ触り心地情報を調べることで、眼球運動の応用範囲が広がることが期待される。

---

<sup>\*1</sup> ただし、2018 年 6 月 20 日時点では Leap motion によって様々な物体表面に触れているときの手の骨格を取得するのは容易ではない。物体表面が赤外線光に干渉することで手の形状取得を妨げてしまうためである。

#### 4.2.2 触覚探索運動解析

次に、計測された触覚探索運動から実際に触り心地評価を推定するための運動特徴量を計算することを考える。最も多くの触り心地情報を推定するにあたって有用な特徴量は左右方向の移動速度である。2.2 の結果より移動速度を累積平均することで、2.5 秒もすれば十分な触り心地推定ができると期待される。一方で、総移動距離は現実のデコーディング場面では探索時間が変わった場合に試行間で正規化しにくい、運動方向比は一時的に値が無限大を取りうる、手の動きの定常性 (*TREND*) は運動が終わるまで待たねば解析できない、というように科学的理解に有用な一方で、デコーディングには向かない特徴量も存在する。

#### 4.2.3 触り心地推定

デコーディングの前には、予め行為者の手の運動特徴量の上限下限を把握しておく必要がある。そのためには、行為者自身に静止時と最大運動時の運動を行ってもらいか、もしくは特徴的な触覚刺激（例えば、最も硬い材質と最も柔らかい材質）に触れてもらい、それらの運動と触り心地の軸を対応付ける必要がある。4.1.2 における議論から、2.5 秒程度をすぎると無目的な運動が始まり、説明力が下がってしまう可能性があるため、デコーディングを行う場合は触れ始めから 2.5 秒までのデータを対象に解析を行うべきである。

#### 4.2.4 行為者の触り心地デコーディングの限界

4.1.2 でまとめた触覚探索運動に影響しうる諸要因は、触覚探索運動による行為者の触り心地デコーディングにおける限界を 2 つ示唆する。

1 つ目は、行為者が何を判断しようとしているかによって触覚探索運動が持つ触り心地の情報量が変わってしまい、また、デコーディングシステム側で触り心地の情報量の低下を検出できないことである。例えば、2.1 の結果より、粗さを判断しようとしているときの触覚探索運動は粗さの情報を持っているが、温かさを判断しようとしているときの触覚探索運動は粗さの情報を持っていない。これは、何を判断しようとしているかによってなぞりや押し込みといった触り方のモードが変わってしまい [26]、また 2.2 で示したように触り方のモードが変わると説明力が変わってしまうためであると考えられる。この場合にデコーディングシステムは手の動きしか計測しておらず、行為者が何を判断したいかを推定できないため、触り心地の情報量が低下したかどうかを判断することはできない。ただし、指の運動データや押付力から触り方のモードを推定する先行研究が知られており [46, 154, 173]、この手法と組み合わせることで触覚探索運動の持つ触り心地情報の信頼度を推定することができる可能性がある。

2 つ目は、手の状態やパーソナリティといった個人差が、触覚探索運動の持つ触り心地の情報量に影響を与えることである。指先の湿り気のような手の状態が触覚探索運動や触り心地の知覚に影響することが知られているほか [17, 122, 155]、2.5 では快楽を得るために触覚を利用しようとするかどうか触覚探索運動の持つ触り心地の情報量と関係する可能性が示された。運動計測のみではこれらの個人の特性を把握できないため、それぞれの行為者にとって触覚探索運動による触り心地デコーディングシステムが有用であるかどうかを判断することができない。この場合には、使用前にパーソナリティテストを設けたり、手の運動から手の状態を推定したりする工夫が必要である可能性がある。

#### 4.2.5 外部観察者の触り心地デコーディングの限界

一方で、外部観察者はデコーディングシステム同様に、行為者が置かれた状況や行為者の状態は把握できないため、ただ行為者の触覚探索運動のみをもとに判断することになる。よって、外部観察者の感じる触り心地をデコードする場合には、行為者の触覚探索運動そのものを処理するだけで達成できると期待される。ただし、外部観察者のこれまでの触覚経験やパーソナリティなどが、外部観察者による推定に影響するかどうかは検討の余地があり、もしこの影響が存在する場合には、行為者の触覚探索運動の解析による外部観察者の触り心地推定の精度が下がってしまう可能性がある。このような場合には、典型的な外部観察者の推定する触り心地評価をデコードできるととどまると考えられる。

#### 4.2.6 デコーディングの応用方法

ここでは、触覚探索運動による触り心地デコーディングシステムの応用方法について簡単に触れる。

行為者の触り心地デコーディングシステムの有力な応用先は冒頭で述べた通り、人間の触り心地知覚メカニズムを調べる心理物理実験や、実装した触覚情報提示システムの評価実験である。前者の心理物理実験においては、口頭やボタン押しによる触り心地判断課題を課すことなく触り心地情報が推定できることが期待され、より日常に近い状態での人間の触り心地知覚が調べられることが期待される。更には、実験参加者の報告の場合は1試行に1つの触り心地評価が得られるだけだが、触覚探索運動によるデコーディングでは、手の動きの時間変化から触り心地評価の時間推移を調べることができる。そのため、触覚探索運動によるデコーディングによって触り心地知覚の形成過程を調べることができることが期待される。また、日常生活における実験参加者の触り心地の知覚を継続的に追跡することで、実験室の外での人間の触知覚メカニズムを解明することも期待される。後者の触覚情報提示システムの評価実験では、提示した触り心地の感覚が現実の物体に触れたときに生じる触り心地の感覚をどれくらいよく再現できているかを評価するにあたって触覚探索運動によるデコーディングが有用と考えられる。このような状況においては、触覚探索運動から推定された触り心地だけでなく、触覚探索運動そのものが、現実の物体に対する触覚探索運動と似ているかどうかを評価するのも有用と考えられる。

研究目的だけでなく、商業目的や日常生活における応用も可能であると期待される。例えば、2.2や2.4で扱ったように、ぬいぐるみや服などを触覚的好ましさに基づいて選ぶような消費行動において、消費者がどのような材質や製品を好むのかを解析したり、どのように製品に触れたときに購入するのかを分析することが可能になる。また、日常生活における行為者の触覚探索運動を観察することで、粘つきや冷たさの触り心地を検出したら部屋の湿度・温度を調整するなど、触覚環境を行為者好みに調整することが可能になると期待される。バーチャルリアリティ空間において、行為者の触覚探索行動をモニタリングすることで、行為者の望む触覚フィードバックを推定し、提示するといったことも可能であろう。

次に、外部観察者の触り心地デコーディングシステムの応用先について述べる。1つは、第1章の冒頭で言及したように、商品広告における行為者の触覚探索運動が、消費者の製品の知覚とその後の消費行動にどう影響を及ぼすかを推定するために有用であると考えられる。また、最も消費者に触り心地が伝えられるように、本研究の知見に基づいて触覚探索運動を最適化するということも可能であろう。加えて、このデコーディングシステムを利用することで、製品の触り心地だけでなく、アニメーションや俳優の演技など、通常触覚を付与できないメディアに効果的に触り心地を想起するシーンを取り入れることもできる可能性がある。更には、オンラインショッピングのように製品の触り心地がわからないよ

うな状況でも、どのような触覚探索運動を重畳して表示すれば触り心地を伝えられるかを判断するのに役立つことが期待される。

## 4.3 学際的貢献：知見の共有に向けて

### 4.3.1 本研究の知見を様々な分野に適用する

本研究で得られた触覚探索運動と触り心地の結びつきに関する知見は、触り心地デコーディングだけでなく、様々な分野に貢献しうる。例えば、まだ解明されていない触知覚メカニズムについて、触覚探索運動と触り心地の結びつきをもとに、その触り心地が生じる際の皮膚への触覚入力や、触覚入力や運動入力の統合処理方法を特定することができるかもしれない。また、ベルベットハンドイリュージョン (Velvet hand illusion) [174] など、未だメカニズムが明らかになっていない触覚の錯覚現象についても、その効果が最大になるような触覚探索運動を観察することで、どのような物理刺激が重要な要因なのかを推定することができる可能性がある。触覚の心理物理だけでなく、触覚提示装置の設計においても貢献しうる。例えば、所望の触り心地を提示する装置において、その触り心地知覚に重要な触覚探索運動を妨げないようなシステムを構築する必要がある。逆に、ある触り心地を知覚するための触覚探索運動が水平方向のなぞり運動のみしか生じないのであれば、その触り心地提示装置は水平方向への刺激のみを提示できるように単純化するといったこともできる可能性がある。更にプロダクト表面の触覚デザイナーが他者と触り心地を共有する際に、本研究の知見に基づいて、触覚探索運動を行うことで他者に直感的な触り心地を伝えることが可能になるかもしれない。この際に生じる行為者の伝達意図と外部観察者の解釈のギャップを埋めるような機構も、本研究の知見に基づいて作ることができる可能性がある。

### 4.3.2 触覚探索運動データベース

このように本研究の知見は、触り心地のデコーディングだけでなく、科学、工学、産業など様々な分野にも貢献しうる。重要なことは、本研究並びに今後の研究において得られた触覚探索運動と触り心地の関係の知見を広い分野に共有する枠組みを作ることである。

このような枠組みとして、触覚探索運動データベースの構築が有用である。これまでの研究でも、人間同士の接触といった社会性のある触覚動作については、行動主体の感情や人間同士の距離の近さといった情報を持っているという重要性から [175]、社会性接触動作のデータベースを構築する試みが行われている [176]。同様に、触覚探索運動と触り心地の関係についてデータベースを構築することで、万人がこれらの知見を科学的・工学的・産業的に利用できるようになるほか、機械学習などによって大規模データから新たな知見を見出すことも可能になると期待される。

触覚探索運動データベースの構築にあたって、4.1.2 に示したような、触覚探索運動やその触り心地情報との関係に影響しうる要因を併記する必要がある。例えば、手の動きのデータと対応する触り心地評価だけでなく、その触覚探索運動を行った行為者の判断目的やパーソナリティ、手の状態などといった情報を記録するというようにである。また、手の運動特徴量は生データとともに、その行為者の運動の平均と分散を併記することで、正規化できるようにしておくとうりである。

### 4.3.3 個人情報としての触覚探索運動

最後に、触覚探索運動データの共有を考える上で、触覚探索運動を個人情報としてどう扱うべきかについて議論する。本研究でも示した通り、パーソナリティのような個性や手の状態などが触覚探索運動

や、触覚探索運動と触り心地の関係に影響を与え得る。このことは、触覚探索運動によって、行為者の性格や嗜好といった個人情報と推定できる可能性を示唆する。歩行時の全身運動については、歩行者の性別や性格、知人かどうかを推定できる可能性があるとの報告があり [132, 133, 134, 135, 136, 137]、平成 28 年の個人情報の保護に関する法律及び行政手続における特定の個人を識別するための番号の利用等に関する法律の一部を改正する法律の施行に伴う関係政令の整備及び経過措置に関する政令において、歩行様態は個人識別符号であると定められた。時勢と触覚探索運動のもつ個人識別符号としてのポテンシャルから、触覚探索運動データベースの安易な公開は控える必要がある。ただし、本研究の知見に基づけば、個人情報の特定の可能性の少ない、より安全な運用ができることが期待される。例えば、本研究の結果から、触覚探索運動には多くの要因が影響しうることが明らかになった。よって産業利用などにおいて触覚データベースのうちこれらの要因の複数を非表示にすることにより、その触覚探索運動がパーソナリティに起因するものなのか、その他の要因に起因するものなのかを推定しにくくなり、セキュリティレベルをある程度高めることができると期待される。

## 4.4 今後の課題・展望

### 4.4.1 行為者の感じる触り心地

第2章を中心とする、触覚探索運動が持つ行為者の感じる触り心地の情報量の研究では、時間要約的な統計量の算出が主であった。しかし、なぜこれらの触覚探索運動の特徴量が行為者の感じる触り心地の情報を持つのかを理解するにあたっては、触覚探索運動の時間的な変動に関する理解が必要である。例えば指先運動の時間変動の現象としてスティックスリップ (stick-slip) がよく知られており [177, 178, 179]、これは刺激表面の静止摩擦により大きく指先皮膚面が引っ張られたあと (スティック)、指先のせん断方向力が静止摩擦力を超えることで急激に指先が刺激面を滑る (スリップ) という現象である。指先の加速度の特徴量が粘つき評価と相関する理由として、この静止摩擦を超える瞬間の大きな滑りが大きな平均指先加速度につながっている可能性が考えられる。そこで、時間要約的統計量ではなく、時系列データに対しスティックスリップのような粘つきに関連する時間変動を見出すことができれば、なぜ触覚探索運動特徴量が粘つき評価の情報を持つのかを明らかにすることができるだけでなく、より多くの粘つき情報を持った新たな特徴量の算出にも繋がると期待される。

また、物理現象と結びついた指先運動の時間変動だけでなく、なぞり動作や押し込み動作のような触り方のモードの時間推移を検出できれば、4.1.3 節で述べたような行為者による触覚探索運動戦略による影響を調べることが可能であると考えられる。現状、触り方のモードの計算機による推定はまだ精度が低く、また1試行毎での推定を対象としているが [46, 154, 173]、触り方のモードの時間推移を解析によって推定できるようになれば、2.3 の解析によって得られた、触り方モードの頻繁な切り替えが好ましき推定に関わるといった仮説を解析的に検討することも可能であろう。

いずれにしても、どのような原因で触覚探索運動が触り心地評価の情報を持ったのかを調べ、より有効な触覚探索運動の特徴量の推定を行っていくことが今後の方針になると考えられる。

### 4.4.2 外部観察者の感じる触り心地

第3章における、行為者の触覚探索運動を外から眺めた外部観察者が触り心地を推定できるかを調べた研究では、まず純粋な外部観察者の推定能力を研究対象とした。今後の研究としては大きく分けて2つの方向があり得る。1つは人間の触り心地推定メカニズムについてより詳細な解明を行う方向 (すなわち、科学的解明) であり、もう1つは他者へより正確な触り心地を伝えられるような触覚探索運動を調べる方向 (すなわち、工学的応用) である。

人間の触り心地推定メカニズムの科学的解明の方向性としては、3.1 での考察で議論したように、外部観察者が自身の触覚経験、すなわちそれまでに獲得してきた自身の触覚探索運動と触り心地の関係に基づいて推定を行っているのかどうかを調べるのがテーマとして考えられる。このテーマを調べるための方略としては、触覚探索運動を行った行為者が、他の行為者の触覚探索運動から触り心地をどれほど推定できるかを調べる (行為者と外部観察者として同じ実験参加者を採用する) アプローチが考えられる。他者の触覚探索運動観察による触り心地推定に自身の触覚探索経験を用いているのであれば、より情報量の大きい触覚探索を行う行為者ほど、より良質な触覚探索運動-触り心地間の関係に関する知識を触り心地推定に用いることができると予想される。更に、2.5 における実験で調べたように、個々人の触覚探索運動が触り心地の情報をどれだけ含むかは、個々人の触覚パーソナリティにも影響されうる

ため、外部観察者の推定能力と触覚パーソナリティの関係を調べることも考えられる。また、行為者として触覚探索運動を行っているときに活動する脳部位と、外部観察者として他者の触覚探索運動を観察しているときに活動する脳部位の比較から、触覚探索運動計画とその結果の予測に関する脳部位 [180] の活動を調べるというアプローチもあり得る。

一方で工学的応用を見据えて、外部観察者に触り心地がより正確に伝わるような触覚探索運動を探るためには、本研究のように計測した行為者の触覚探索運動すべてを外部観察者に視覚提示するのではなく、例えば行為者自身がはじめに自身の触覚探索運動のバイオリジカルモーションを観察して触り心地の情報を持っていると期待される運動を選び出すなど、スクリーニングを行う方法が考えられる。また、この方向性での応用例として先述したとおり、オンラインショッピングのような物体の触り心地が視覚的にしか推定できない状態で触覚探索運動を重畳提示することで、触り心地をより伝えられるようにする手法が考えられる。この手法の実現可能性を検討するために、触覚探索運動だけでなく、素材表面も併せて視覚提示したときにどのように触り心地が知覚されるのか、すなわち触覚探索運動の視覚情報と触覚刺激の視覚情報の統合過程を調べる必要がある。

## 第 5 章

# 結論

本研究では、触覚探索中の行為者が感じている触り心地や、その行為者の触覚探索を眺めている外部観察者が感じている触り心地を外部から推定する方法として、触覚探索運動を計測・解析することを提案した。そのために、そもそも触覚探索運動がどの程度行為者や外部観察者が感じる触り心地の情報を持っているのか、またどのような触覚探索運動が触り心地の情報を持っているのかを、心理物理実験と多変量解析を通じて調べた。

第 2 章では、触覚探索運動が持つ行為者の感じる触り心地の情報について調べた。行為者の感じる触り心地として、硬さや粗さのような物体表面の物理特性に関連する触り心地から、好ましきのような感性・価値に関する触り心地、更には触覚的価値に基づいた意思決定のような行動レベルでの触り心地を対象とした。実験では、実験参加者に触覚刺激に触れてもらい、触り心地の評価もしくは刺激の選択を行わせる課題を行った。その際の触覚探索運動を計測し、多変量解析によって触覚探索運動と触り心地評価の間の関係を調べた。その結果、手指の触覚刺激上での移動や、刺激に対する接触力、更には眼球運動に関連する触覚探索運動の特徴量によって、様々な触り心地を 40-80% 説明できることを明らかにした。またこの説明力は、実験参加者が何を判断しようとしていたかや、どのように触るか、何秒間触るか、といった実験設定によって変動すること、更には日常でどれくらい触覚を活用しようとするかという触覚パーソナリティによっても変動する可能性を示した。

第 3 章では、触覚探索運動が持つ外部観察者の感じる触り心地の情報について調べた。そもそも行為者の触覚探索運動を見た外部観察者がどの程度行為者の感じる触り心地を推定できるのかを調べるために、行為者の触覚探索運動のみを光点運動として実験参加者に提示し、触れられていた触覚刺激の触り心地について推定させた。その結果、外部観察者は行為者の感じた触り心地を高い成績では推定することはできなかったが、外部観察者間では共通した回答をしていたことを明らかにした。このことは、外部観察者は行為者の触覚探索運動から触り心地を推定することができるが、必ずしもその触り心地は行為者の感じる触り心地とは一致しないことを示している。続いて、外部観察者の触り心地推定に関連すると考えられる行為者の運動特徴量のうち、移動速度を変調した動画を作成して提示したところ、影響を受ける外部観察者の触り心地評価が影響を受けることを明らかにした。また、行為者が外部観察者に触り心地を伝達しようとする際に強調・誇張する運動特徴量と、外部観察者が推定に用いる運動特徴量の間の乖離も示した。

これらの結果をもとに、第 4 章では、触覚探索運動の特徴量を分類し、それぞれの特徴量群が持つ触り心地の情報をまとめた。また、触覚探索運動と触り心地情報の関係に影響しうる要因を整理し、また、

行為者と外部観察者それぞれの感じる触り心地の間の相違について議論を行った。これらの結果から、触覚探索運動が触り心地の情報を持つ原因として、触覚刺激の物理特性による影響と、行為者による触覚探索運動戦略の影響が存在することが明らかになった。これらの知見に基づいて、触覚探索運動による触り心地情報のデコーディング技術の設計指針をまとめた。最後に、触覚探索運動と触り心地情報の関係に関する知見がどのように科学・工学・産業において影響を与えうるかを議論し、これらの知見を広い分野に共有するための枠組みについて言及した。最後に、より詳細な時間推移分析を行っていくことで、触覚探索運動が行為者の触り心地の情報を持つ原因を明らかにしていくこと、また、触覚探索運動観察による触り心地推定のメカニズムを明らかにしていくことを今後の研究の展望として述べた。

以上を要するに、本論文では、より日常に近い環境の中で起きている人間の触知覚に着目した研究を行い、その結果、日常で見られるような様々な物体との動的触覚探索という状況においては、これまでノイズと捉えられることが多かった触覚探索運動が、実は行為者や外部観察者の感じる触り心地の情報源として利用できることを示した。本論文の視点は、従来の要素還元的研究という視点ではなく、触り心地を取り巻く環境や触覚探索運動との結びつきの中で触り心地を理解するという全体論的な触知覚研究の新たな方法論を示唆するものである。

# 謝辞

指導教官である渡邊淳司 特任准教授には、在学中のみならず日本電信電話株式会社入社以来、多大なご指導をいただきました。ここに謹んで深謝の意を表します。また、副指導教官である金子寛彦教授には、研究におけるご指導だけでなく学内事務など様々な面でお世話になりました。深く感謝申し上げます。東京工業大学工学院情報通信系 小池康晴 教授、長谷川晶一 准教授、吉村奈津江 准教授には、本論文をまとめるにあたり有益なご指導ご助言を承りました。心より感謝の意を表します。

本研究は、著者が日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所 人間情報研究部 感覚表現研究グループに在籍中に行われたものであります。特に、西田眞也 上席特別研究員/グループリーダーと黒木忍 研究主任には、同研究所で研究を開始したおりから、終始有益なご議論およびご指導を賜りました。深く感謝いたします。

また、大阪大学基礎工学部の犬伏正信 助教には、共同研究を通して多くの議論をしていただきました。心より謝意を申し上げます。ジュネーブ大学の田嶋達裕 博士研究員には、実験手続きの議論や有益な資料やシミュレーションプログラムのご提供など様々な面でお世話になりました。心より謝意を申し上げますとともに、ご冥福をお祈りいたします。

その他にも、日本電信電話株式会社の皆様や家族など多くの方々に支えられました。厚くお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] Y. Kamitani, and F. Tong, “Decoding the visual and subjective contents of the human brain,” *Nature Neuroscience*, Vol.8, pp.679-685, 2005.
- [2] K. N. Kay, T. Naselaris, R. J. Prenger, and J. L. Gallant, “Identifying natural images from human brain activity,” *Nature*, Vol.452, pp.352-355, 2008.
- [3] Y. Miyawaki, H. Uchida, O. Yamashita, M. A. Sato, Y. Morito, H. C. Tanabe, N. Sadato, and Y. Kamitani, “Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders,” *Neuron*, vol.60, pp.915-929, 2008.
- [4] R. Harper, and S. S. Stevens, “Subjective hardness of compliant materials,” *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 16, pp. 204-215, 1964.
- [5] S. Wongsriruksa, P. Howes, M. Conreen, and M. Miodownik, “The use of physical property data to predict the touch perception of materials,” *Materials and Design*, vol. 42, pp. 238-244, 2012.
- [6] L. A. Stone, “Subjective roughness and smoothness for individual judges,” *Psychonomic Science*, vol. 9, pp. 347-348, 1967.
- [7] R. T. Verrillo, S. J. Bolanowski, and F. P. McGlone, “Subjective magnitude of tactile roughness,” *Somatosensory and Motor Research*, vol. 16, pp. 352-360, 1999.
- [8] G. Ekman, J. Hosman, and B. Lindstroem, “Roughness, Smoothness, and Preference: A Study of Quantitative Relations in Individual Subjects,” *Journal of Experimental Psychology*, vol. 70, pp. 18-26, 1965.
- [9] M. Strese, C. Schuwerk, A. Iepure, and E. Steinbach, “Multimodal Feature-Based Surface Material Classification,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 226-239, 2017.
- [10] S. J. Lederman and M. M. Taylor, “Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch,” *Perception Psychophysics*, vol. 12, pp. 401-408, 1972.
- [11] S. J. Lederman, “Tactile roughness of grooved surface: The touching process and effects of macro- and microsurface structure,” *Perception and Psychophysics*, vol. 16, pp. 385-395, 1974.
- [12] B. Delhay, V. Hayward, P. Lefevre, and J. L. Thonnard, “Texture-induced vibrations in the forearm during tactile exploration,” *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol.6, 37, 2012.
- [13] L. R. Manfredi, H. P. Saal, K. J. Brown, M. C. Zielinski, J. F. 3rd Dammann, V. S. Polashock, and S. J. Bensmaia, “Natural scenes in tactile texture,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 111, no. 9, pp.1791-1802, 2014.
- [14] Y. Shao, V. Hayward, and Y. Visell, “Spatial patterns of cutaneous vibration during whole-

- hand haptic interactions,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 113, no. 15, pp. 4188-4193, 2016.
- [15] T. Andre, V. Levesque, V. Hayward, P. Lefevre, and J. L. Thonnard, “Effect of skin hydration on the dynamics of fingertip gripping contact,” *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 8, no. 64, pp. 1574-1583, 2011.
  - [16] B. Delhay, P. Lefevre, and J. L. Thonnard, “Dynamics of fingertip contact during the onset of tangential slip,” *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 11, no. 100, 20140698, 2014.
  - [17] D. Gueorguiev, S. Bochereau, A. Mouraux, V. Hayward, and J. L. Thonnard, “Touch uses frictional cues to discriminate flat materials,” *Scientific Reports*, vol. 6, 25553, 2016.
  - [18] A. Barrea, B. P. Delhay, P. Lefevre, and J. L. Thonnard, “Perception of partial slips under tangential loading of the fingertip,” *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 7032, 2018.
  - [19] A. I. Weber, H. P. Saal, J. D. Lieber, J. W. Cheng, L. R. Manfredi, J. F. 3rd Dammann, and S. J. Bensmaia, “Spatial and temporal codes mediate the tactile perception of natural textures,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 110, no. 42, pp. 17107-10112, 2013.
  - [20] R. Kitada, T. Hashimoto, T. Kochiyama, T. Kito, T. Okada, M. Matsumura, S. J. Lederman, and N. Sadato, “Tactile estimation of the roughness of gratings yields a graded response in the human brain: an fMRI study,” *Neuroimage*, vol. 25, no. 1, pp. 90-100, 2005.
  - [21] J. Kim, Y. G. Chung, J. Y. Park, S. C. Chung, C. Wallraven, H. H. Bülthoff, and S. P. Kim, “Decoding Accuracy in Supplementary Motor Cortex Correlates with Perceptual Sensitivity to Tactile Roughness,” *PLoS One*, vol. 10, no. 6, e0129777, 2015.
  - [22] A. Mounou, J. L. Thonnard, and A. Mouraux, “EEG frequency tagging to explore the cortical activity related to the tactile exploration of natural textures,” *Scientific Reports*, vol. 6, 20738, 2016.
  - [23] E. Baumgartner, and K. R. Gegenfurtner, “Image Statistics and the Representation of Material Properties in the Visual Cortex,” *Frontiers in Psychology*, vol. 7, 1185, 2016.
  - [24] R. Hernández-Pérez, L. V. Cuaya, E. Rojas-Hortelano, A. Reyes-Aguilar, L. Concha, and V. de Lafuente, “Tactile object categories can be decoded from the parietal and lateral-occipital cortices,” *Neuroscience*, vol. 352, pp. 226-235, 2017.
  - [25] M. J. Hartmann, “Active touch, exploratory movements, and sensory prediction,” *Integrative and Comparative Biology*, vol. 49, no. 6, pp. 681-690, 2009.
  - [26] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, “Hand movements: A window into haptic object recognition,” *Cognitive Psychology*, vol. 19, pp. 342-368, 1987.
  - [27] Y. Tanaka, W. M. Bergmann Tiest, A. M. Kappers, and A. S. Sano, “Contact force and scanning velocity during active roughness perception,” *PLoS One*, vol. 9, 2014, Art. no. e93363.
  - [28] H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Haptic invitation of textures: Perceptually prominent properties of materials determine human touch motions,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 3, pp. 345-355, Jul.-Sep. 2014.
  - [29] T. Callier, H. P. Saal, E. C. Davis-Berg, and S. J. Bensmaia, “Kinematics of unconstrained

- tactile texture exploration,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 113, pp. 3013-3020, 2015.
- [30] H. T. Nefs, A. M. Kappers, and J. J. Koenderink, ”Frequency discrimination between and within line gratings by dynamic touch,” *Perception & Psychophysics*, vol. 64, pp. 969-980, 2002.
  - [31] A. M. Smith, G. Gosselin, and B. Houde, ”Deployment of fingertip forces in tactile exploration,” *Experimental Brain Research*, vol. 147, pp. 209-218, 2002.
  - [32] V. van Polanen, W. M. Bergmann Tiest, and A. M. Kappers, ”Target contact and exploration strategies in haptic search,” *Scientific Reports*, vol. 4, Art. no. 6254, 2014.
  - [33] M. A. Riley, J. B. Wagman, M. V. Santana, C. Carello, and M. T. Turvey, ”Perceptual behavior: Recurrence analysis of a haptic exploratory procedure,” *Perception*, vol. 31, pp. 481-510, 2002.
  - [34] M. A. Plaisier, W. M. Bergmann Tiest, and A. M. Kappers, ”Haptic pop-out in a hand sweep,” *Acta Psychologica*, vol. 128, pp. 368-377, 2008.
  - [35] E. Gamzu and E. Ahissar, ”Importance of temporal cues for tactile spatial-frequency discrimination,” *Journal of Neuroscience*, vol. 21, pp. 7416-7427, 2001.
  - [36] S. A. Brandt, and L. W. Stark, ”Spontaneous eye movements during visual imagery reflect the content of the visual scene,” *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol.9, pp. 27-38, 1997.
  - [37] M. Cerf, J. Harel, A. Huth, W. Einhuser, and C. Koch, ”Decoding what people see from where they look: Predicting visual stimuli from scanpaths,” *Attention in Cognitive Systems: Lecture Notes in Computer Science*, vol.5395, pp.15-26, 2009.
  - [38] E. Watanabe, A. Kitaoka, K. Sakamoto, M. Yasugi, and K. Tanaka, ”Illusory Motion Reproduced by Deep Neural Networks Trained for Prediction,” *Frontiers in Psychology*, vol. 9, 345, 2018.
  - [39] A. M. Smith, C. E. Chapman, M. Deslandes, J. S. Langlais, and M. P. Thibodeau, ”Role of friction and tangential force variation in the subjective scaling of tactile roughness,” *Experimental Brain Research*, vol. 144, pp. 211-223, 2002.
  - [40] A. M. Smith and S. H. Scott, ”Subjective scaling of smooth surface friction,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 75, pp. 1957-1962, 1996.
  - [41] T. Yoshioka, S. J. Bensmaia, J. C. Craig, and S. S. Hsiao, ”Texture perception through direct and indirect touch: An analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration,” *Somatosensory & Motor Research*, vol. 24, pp. 53-70, 2007.
  - [42] L. Kaim and K. Drewing, ”Exploratory movement parameters vary with stimulus stiffness,” in *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, M. Ferre, ed. Berlin, Germany: Springer, 2008, pp. 313-318.
  - [43] L. Kaim and K. Drewing, ”Exploratory strategies in haptic softness discrimination are tuned to achieve high levels of task performance,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 4, no. 4, pp. 242-252, Oct.-Aug. 2011.
  - [44] A. C. Zöller, A. Lezkan, V. C. Paulum, R. W. Fleming, and K. Drewing, ”Influence of different types of prior knowledge on haptics exploration of soft objects,” in *Haptic Interaction: Science,*

Engineering and Design, Pisa, Springer, 2018, pp. 413-424.

- [45] S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada, "Psychophysical dimensions of tactile perception of textures," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 1, pp. 81-93, Jan.-Mar. 2013.
- [46] S. E. Jansen, W. M. Bergmann Tiest, and A. M. Kappers, "Identifying haptic exploratory procedures by analyzing hand dynamics and contact force," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 6, no. 4, pp. 464-4722, Oct.-Dec. 2013.
- [47] X. Libouton, O. Barbier, L. Plaghki, and J. L. Thonnard, "Tactile roughness discrimination threshold is unrelated to tactile spatial acuity," *Behavioural Brain Research*, vol. 208, pp. 473-478, 2010.
- [48] W. Morley, A. W. Goodwin, and I. Darian-Smith, "Tactile discrimination of gratings," *Experimental Brain Research*, vol. 49, pp. 291-299, 1983.
- [49] B. Efron and R. J. Tibshirani, *An Introduction to the Bootstrap* (Monographs on Statistics and Applied Probability). New York, NY, USA: Chapman & Hall, 1994.
- [50] el-M. Meftah, L. Belingard, and C. E. Chapman, "Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch," *Experimental Brain Research*, vol. 132, no. 3, pp. 351-361, 2000.
- [51] M. Hollins, S. R. Risner, "Evidence for the duplex theory of tactile texture perception," *Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 4, pp. 695-705, 2000.
- [52] G. H. VanDoorn, B. L. Richardson, D. B. Wullemmin, and M. A. Symmons, "Active and passive movements give rise to different judgments of coldness," *Perception*, vol. 35, no. 4, pp. 573-575, 2006.
- [53] B. G. Green, "Temperature perception on the hand during static versus dynamic contact with a surface," *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 71, no. 5, pp. 1185-1196, 2009.
- [54] W. M. Bergmann Tiest and A. M. Kappers, "Haptic and visual perception of roughness," *Acta Psychologica*, vol. 124, pp. 177-189, 2007.
- [55] M. A. Heller, "Texture perception in sighted and blind observers," *Perception Psychophysics*, vol. 45, pp. 49-54, 1989.
- [56] E. Baumgartner, C. B. Wiebel, and K. R. Gegenfurtner, "Visual and haptic representations of material properties," *Multisensory Research*, vol. 26, pp. 429-455, 2013.
- [57] B. Xiao, W. Bi, X. Jia, H. Wei, and E. H. Adelson, "Can you see what you feel? Color and folding properties affect visual-tactile material discrimination of fabrics," *Journal of Vision*, vol. 16, 2016, Art. no. 34.
- [58] R. L. Klatzky, S. J. Lederman, and C. Reed, "There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision," *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 116, pp. 356-369, 1987.
- [59] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, and B. Henson, "Exploring relationships between touch perception and surface physical properties," *International Journal of Design*, vol. 3, pp. 67-76, 2009.
- [60] J. L. Vercher, S. Lazzari, and G. Gauthier, "Manuo-ocular coordination in target tracking.

- II. Comparing the model with human behavior,” *Biological Cybernetics.*, vol. 77, pp. 267-275, 1997.
- [61] G. Ariff, O. Donchin, T. Nanayakkara, and R. Shadmehr, “A realtime state predictor in motor control: Study of saccadic eye movements during unseen reaching movements,” *Journal of Neuroscience*, vol. 22, pp. 7721-7729, 2002.
- [62] W. J. Adams, I. S. Kerrigan, and E. W. Graf, “Touch influences perceived gloss,” *Scientific Reports*, vol. 26, no. 6, 21866, 2016.
- [63] F. McGlone, A. B. Vallbo, H. Olausson, L. Loken, and J. Wessberg. “Discriminative touch and emotional touch,” *Canadian Journal of Experimental Psychology*, vol. 61, no.3, pp. 173-83, 2007.
- [64] G. K. Essick, F. McGlone, C. Dancer, D. Fabricant, Y. Ragin, N. Phillips, T. Jones, and S. Guest, “Quantitative assessment of pleasant touch,” *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 34, no.2, pp. 192-203, 2010.
- [65] I. Croy, A. Luong, C. Tricoli, E. Hofmann, H. Olausson, and U. Sailer, “Interpersonal stroking touch is targeted to C tactile afferent activation,” *Behavioural Brain Research*, vol. 297, pp. 37-40, 2016.
- [66] L. S. Löken, J. Wessberg, I. Morrison, F. McGlone, and H. Olausson, “Coding of pleasant touch by unmyelinated afferents in humans,” *Nature Neuroscience*, vol. 12, no. 5, pp. 547-548, 2009.
- [67] G. K. Essick, A. James, and F. P. McGlone, “Psychophysical assessment of the affective components of non-painful touch,” *Neuroreport*, vol. 10, no. 10, pp.2083-2087, 1999.
- [68] C. Cascio, F. McGlone, S. Folger, V. Tannan, G. Baranek, K. A. Pelphrey, and G. Essick, “Tactile perception in adults with autism: a multidimensional psychophysical study,” *Journal of Autism and Developmental Disorders*, vol. 38, pp. 127-137, 2008.
- [69] R. Ackerley, H. Backlund Wasling, J. Liljencrantz, H. Olausson, R. D. Johnson, J. Wessberg, “Human C-tactile afferents are tuned to the temperature of a skin-stroking caress,” *Journal of Neuroscience*, vol. 34, no. 8, pp. 2879-2883, 2014.
- [70] I. Morrison, M. Björnsdotter, and H. Olausson, “Vicarious responses to social touch in posterior insular cortex are tuned to pleasant caressing speeds,” *Journal of Neuroscience*, vol. 31, no. 26, pp. 9554-9562, 2011.
- [71] R. Etzi, C. Spence, and A. Gallace, “Textures that we like to touch: An experimental study of aesthetic preferences for tactile stimuli,” *Consciousness and Cognition*, vol. 29, pp. 178-188, 2014.
- [72] R. E. Oum, D. Lieberman, and A. Aylward, “A feel of disgust: tactile cues to pathogen presence,” *Cognition & Emotion*, vol. 25, no. 4, pp. 715-725, 2011.
- [73] R. Kitada, N. Sadato, and S. J. Lederman, “Tactile perception of nonpainful unpleasantness in relation to perceived roughness: effects of inter-element spacing and speed of relative motion of rigid 2-D raised-dot patterns at two body loci,” *Perception*, vol.41, no. 2, pp. 204-220, 2012.
- [74] A. Klöcker, C. M. Oddo, D. Camboni, M. Penta, and J. L. Thonnard, “Physical factors

- influencing pleasant touch during passive fingertip stimulation,” *PLoS One*, vol. 9, no. 7, e101361, 2014.
- [75] K. Drewing, C. Weyel, H. Celebi, and D. Kaya, “Systematic relations between affective and sensory material dimensions in touch,” *IEEE Transactions on Haptics*, DOI: 10.1109/TOH.2018.2836427.
  - [76] A. E. Wertz, and K. Wynn, “Thyme to touch: Infants possess strategies that protect them from dangers posed by plants,” *Cognition*, vol. 130, pp. 44-49, 2014.
  - [77] A. Klöcker, M. Wiertlewski, V. Théate, V. Hayward, and J. L. Thonnard, “Physical factors influencing pleasant touch during tactile exploration,” *PLoS One*, vol. 8, no. 11, e79085, 2013.
  - [78] R. B. Zajonc, “Attitudinal effects of mere exposure,” *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 9, pp. 1-27, 1968.
  - [79] R. F. Bornstein, “Exposure and affect - Overview and meta-analysis of research, 1968-1987,” *Psychological Bulletin*, vol. 106, no. 2, pp. 265-289, 1989.
  - [80] R. G. Heyduk, “Rated preference for musical compositions as it relates to complexity and exposure frequency,” *Perception & Psychophysics*, vol. 17, pp. 84-91, 1975.
  - [81] S. L. Tan, M. P. Spackman, and C. L. Peaslee, “The effects of repeated exposure on liking and judgments of musical unity of intact and patchwork compositions,” *Music Perception*, vol. 23, pp. 407-421, 2006.
  - [82] M. Jakesch, and C. C. Carbon, “The mere exposure effect in the domain of haptics,” *PLoS One*, vol. 7, no. 2, e31215, 2012.
  - [83] T. Caliński, and J. Harabasz, “A dendrite method for cluster analysis,” *Communications in Statistics*, vol.3, pp.1-27, 1974.
  - [84] S. J. Lederman, and R. L. Klatzky, “Haptic classification of common objects: Knowledge-driven exploration,” *Cognitive Psychology*, vol. 22, no. 4, pp.421-459, 1990.
  - [85] S. J. Lederman, and R. L. Klatzky, “Extracting object properties through haptic exploration,” *Acta Psychologica*, vol. 84 no. 1, pp. 29-40, 1993.
  - [86] E. L. Klatzky, and S. J. Lederman, “Stages of manual exploration in haptic object identification,” *Perception & Psychophysics*, vol. 52, no. 6, pp. 661-670, 1992.
  - [87] R. L. Klatzky, and S. J. Lederman, “Toward a computational model of constraint-driven exploration and haptic object identification,” *Perception*, vol. 22, no. 5, pp. 597-621, 1993.
  - [88] J. A. Fishel, and G. E. Loeb, “Bayesian exploration for intelligent identification of textures,” *Frontiers in Neurorobotics*, vol.6, 4, 2012.
  - [89] G. E. Loeb, and J. A. Fishel, “Bayesian action & perception: representing the world in the brain,” *Frontiers in Neuroscience*, vol. 8, 341, 2014.
  - [90] S. Mueller, S. Martin, M. Schwarz, and M. Grunwald, “Temporal Modulations of Contact Force during Haptic Surface Exploration,” *PLoS One*, vol. 11, no. 4, e0152897, 2016.
  - [91] J. P. Eckmann, S. Oliffson Kamphorst, and D. Ruelle, “Recurrence Plots of Dynamical Systems,” *Europhysics Letters*, vol. 5, pp. 973-977, 1987.
  - [92] N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, and J. Kurths, “Recurrence plots for the analysis of

complex systems,” *Physics Reports*, vol. 438, no. 5-6, pp. 237-329, 2007.

- [93] D. Assaf, E. Amar, N. Marwan, Y. Neuman, M. Salai, and E. Rath, “Dynamic Patterns of Expertise: The Case of Orthopedic Medical Diagnosis,” *PLoS One*, vol. 11, no. 7, e0158820, 2016.
- [94] Y. Yamada, T. Kawabe, and K. Ihaya, “Categorization difficulty is associated with negative evaluation in the “uncanny valley” phenomenon,” *Japanese Psychological Research*, vol. 55, issue. 1, pp. 20-32, 2013.
- [95] M. Cheetham, I. Pavlovic, N. Jordan, P. Suter, and L. Jancke, “Category processing and the human likeness dimension of the uncanny valley hypothesis: eye-tracking data,” *Frontiers in Psychology*, vol. 4, 108, 2013.
- [96] T. Mitsuda, and Y. Yoshioka, “Taken last, selected first: the sampling bias is also present in the haptic domain,” *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 77, no. 3, pp. 941-947, 2015.
- [97] T. Mitsuda, and Y. Yoshioka, “Final Sampling Bias in Haptic Judgments: How Final Touch Affects Decision-Making,” *Perception*, vol. 47, no. 1, pp.90-104, 2018.
- [98] J. Peck, and T. L. Childers, “To Have and to Hold: The Influence of Haptic Information on Product Judgments,” *Journal of Marketing*, vol. 67, no. 2, pp. 35-48, 2003.
- [99] J. Peck, and J. Wiggins, “It Just Feels Good: Customers’ Affective Response to Touch and Its Influence on Persuasion,” *Journal of Marketing*, vol. 70, no. 4, pp. 56-69, 2006.
- [100] B. Grohmann, and E. R. Spangenberg, “The influence of tactile input on the evaluation of retail product offerings,” *Journal of Retailing*, vol. 83, no. 2, pp. 237-245, 2007.
- [101] J. Hornik, “Tactile Stimulation and Consumer Response,” *Journal of Consumer Research*, vol. 19, no. 3, pp. 449-458, 1992.
- [102] R. Klatzky, and J. Peck, “Please touch: object properties that invite touch,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 5, no. 2, pp. 139-147, 2012.
- [103] H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Visual and sensory properties of textures that appeal to human touch,” *International Journal of Affective Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 375-384, 2013.
- [104] S. Shimojo, C. Simion, E. Shimojo, and C. Scheier, “Gaze bias both reflects and influences preference,” *Nature Neuroscience*, vol. 6, no. 12, pp. 1317-1322, 2003.
- [105] T. Mitsuda, and M. G. Glaholt, “Gaze bias during visual preference judgments: Effects of stimulus category and decision instructions,” *Visual Cognition*, vol. 22, pp. 1-29, 2014.
- [106] R. Ratcliff, and F. Tuerlinckx, “Estimating parameters of the diffusion model: approaches to dealing with contaminant reaction times and parameter variability,” *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 9, no. 3, pp. 438-481, 2002.
- [107] R. Ratcliff, and G. McKoon, “The diffusion decision model: theory and data for two-choice decision tasks,” *Neural Computation*, vol. 20, no. 4, pp. 873-922, 2008.
- [108] I. Krajibich, C. Armel, and A. Rangel, “Visual fixations and the computation and comparison of value in simple choice,” *Nature Neuroscience*, vol. 13, pp. 1292-1298, 2010.
- [109] M. Milosavljevic, J. Malmaud, A. Huth, C. Koch, and A. Rangel, “The drift diffusion model

- can account for the accuracy and reaction time of value-based choices under high and low time pressure,” *Judgment and Decision Making*, vol. 5, pp. 437-449, 2010.
- [110] I. Krajbich, and A. Rangel, “Multialternative drift-diffusion model predicts the relationship between visual fixations and choice in value-based decisions,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, pp. 13852-13857, 2011.
  - [111] S. Tajima, J. Drugowitsch, and A. Pouget, “Optimal policy for value-based decision-making,” *Nature Communications*, vol. 7, 12400, 2016.
  - [112] A. R. Teodorescu, and M. Usher, “Disentangling decision models: from independence to competition,” *Psychological Review*, vol. 120, no. 1, pp. 1-38, 2013.
  - [113] A. Gopal, and A. Murthy, “Eye-hand coordination during a double-step task: evidence for a common stochastic accumulator,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 114, no. 3, pp. 1438-1454, 2015.
  - [114] A. Gopal, P. Viswanathan, and A. Murthy, “A common stochastic accumulator with effector-dependent noise can explain eye-hand coordination,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 113, no. 7, pp. 2033-2048, 2015.
  - [115] G. E. Hawkins, B. U. Forstmann, E. J. Wagenmakers, R. Ratcliff, and S. D. Brown, “Revisiting the evidence for collapsing boundaries and urgency signals in perceptual decision-making,” *Journal of Neuroscience*, vol. 35, no. 6, pp. 2476-2484, 2015.
  - [116] R. Storn, and K. Price, “Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces,” *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.
  - [117] J. A. Nelder, and R. Mead, “A simplex method for function minimization,” *Computer Journal*, vol. 7, pp. 308-313, 1965.
  - [118] B. A. J. Reddi, and R. H. S. Carpenter, “The influence of urgency on decision time,” *Nature Neuroscience*, vol. 3, pp. 827-830, 2000.
  - [119] A. R. Pike, “Stochastic models of choice behavior: response probabilities and latencies of finite markov chain systems1,” *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, vol. 19, no. 1, pp. 15-32, 1966.
  - [120] D. Vickers, “Evidence for an accumulator model of psychophysical discrimination,” *Ergonomics*, vol. 13, no. 1, pp. 37-58, 1970.
  - [121] N. Hagura, P. Haggard, and J. Diedrichsen, “Perceptual decisions are biased by the cost to act,” *Elife*, vol. 6, e18422, 2017.
  - [122] L. Skedung, C. El Rawadi, M. Arvidsson, C. Farcet, G. S. Luengo, L. Breton, and M. W. Rutland, “Mechanisms of tactile sensory deterioration amongst the elderly,” *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 5303, 2018.
  - [123] J. Peck, and T. L. Childers, “Individual Differences in Haptic Information Processing: The “Need for Touch” Scale,” *Journal of Consumer Research*, vol. 30, no. 3, pp. 430-442, 2003.
  - [124] S. Overmars, and K. Poels, “A touching experience: Designing for touch sensations in online retail environments,” *International Journal of Design*, vol. 9, no. 3, pp. 17-31, 2015.

- [125] J. T. Todd, and W. H. Jr. Warren, "Visual perception of relative mass in dynamic events," *Perception*, vol.11, pp.325-335, 1982.
- [126] W. H.Jr. Warren, E. E. Kim, and R. Husney, "The way the ball bounces: visual and auditory perception of elasticity and control of the bounce pass," *Perception*, vol.16, pp.309-336, 1987.
- [127] T. Masuda, K. Sato, T. Murakoshi, K. Utsumi, A. Kimura, N. Shirai, S. Kanazawa, M.K. Yamaguchi, and Y. Wada, "Perception of elasticity in the kinetic illusory object with phase differences in inducer motion," *PLoS One*, vol.8, e78621, 2013.
- [128] T. Masuda, K. Matsubara, K. Utsumi, and Y. Wada, "Material perception of a kinetic illusory object with amplitude and frequency changes in oscillated inducer motion," *Vision Research*, vol.109, pp.201-208, 2015.
- [129] K. L. Bouman, B. Xiao, P. Battaglia, and W. T. Freeman, "Estimating the Material Properties of Fabric from Video," In 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1984-1991, 2013. IEEE. doi:10.1109/ICCV.2013.455
- [130] W. Bi, and B. Xiao, "Perceptual constancy of mechanical properties of cloth under variation of external forces," In E. Jain and S. Joerg (Eds.), Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception - SAP '16 (pp. 19-23), 2016. New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/2931002.2931016
- [131] T. Kawabe, K. Maruya, R. W. Fleming, and S. Nishida, "Seeing liquids from visual motion," *Vision Research*, vol.109, pp.125-138, 2015.
- [132] L. T. Kozlowski, and J. E. Cutting, "Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display," *Perception & Psychophysics*, vol.21, pp.575-580, 1977.
- [133] L. T. Kozlowski, and J. E. Cutting, "Recognizing the gender of walkers from point-lights mounted on ankles: Some second thoughts," *Perception & Psychophysics*, vol.23, pp.459, 1978.
- [134] L. T. Kozlowski, and J. E. Cutting, "Recognition of friends by their walk: Gait perception without familiarity cues," *Bulletin of the Psychonomic Society*, vol.9, pp.353-356, 1977.
- [135] N. F. Troje, C. Westhoff, and M. Lavrov, "Person identification from biological motion: Effects of structural and kinematic cues," *Perception & Psychophysics*, vol.67, pp.667-675, 2005.
- [136] F. Loula, S. Prasad, K. Harber, and M. Shiffrar, "Recognizing people from their movements," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, vol.31, pp.210-220, 2005.
- [137] W. H. Dittrich, T. Troscianko, S. E. Lea, and D. Morgan, " "Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance," *Perception*, vol.25, pp.727-738, 1996.
- [138] C. F. Michaels, and M. M. de Vries, "Higher and lower order variables in the visual perception of relative pulling force," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, vol.24, pp.526-546, 1998.
- [139] C. Cellini, L. Kaim, and K. Drewing, "Visual and haptic integration in the estimation of softness of deformable objects," *i-Perception*, vol.4, pp.516-531, 2013.

- [140] K. Drewing, and O. Kruse, "Weights in Visuo-Haptic Softness Perception are not Sticky," In M. Auvray and C. Duriez (Eds.), *Proceedings of EuroHaptics 2014* (Vol. 8618, pp. 68-76). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [141] E. Fakhourny, P.R. Culmer, and B. Henson, "The effect of indentation force and displacement on visual perception of compliance," In J. E. Colgate (Ed.), *Proceedings of 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015.
- [142] S. Runeson, and G. Frykholm, "Visual perception of lifted weight," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, vol.7, pp.733-740, 1981.
- [143] S. Runeson, and G. Frykholm, "Kinematic specification of dynamics as an informational basis for person and action perception expectation, gender recognition, and deceptive intention," *Journal of Experimental Psychology: General*, vol.112, pp.585-615, 1983.
- [144] G. P. Bingham, "Kinematic form and scaling: further investigations on the visual perception of lifted weight," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, vol.13, pp.155-177, 1987.
- [145] J. Shim, L.G. Carlton, and J. Kim, "Estimation of lifted weight and produced effort through perception of point-light display," *Perception*, vol.33, pp.277-291, 2004.
- [146] A. Hamilton, D. Wolpert, and U. Frith, "Your own action influences how you perceive another person's action," *Current Biology*, vol.14, pp.493-498, 2004.
- [147] A. Hamilton, D.W. Joyce, R. Flanagan, C.D. Frith, and D.M. Wolpert, "Kinematic cues in perceptual weight judgement and their origins in box lifting," *Psychological Research*, vol.71, pp.13-21, 2007.
- [148] M. Auvray, T. Hoellinger, S. Hanneton, and A. Roby-Brami, "Perceptual weight judgments when viewing one's own and others' movements under minimalist conditions of visual presentation," *Perception*, vol.40, pp.1081-1103, 2011.
- [149] C. Maguinness, A. Setti, E. Roudaia, and R.A. Kenny, "Does that look heavy to you? Perceived weight judgment in lifting actions in younger and older adults," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.7, 795, 2013.
- [150] R. W. Fleming, C. Wiebel, and K. Gegenfurtner, "Perceptual qualities and material classes," *Journal of Vision*, vol. 13, no. 8, 2013.
- [151] W. Fujisaki, N. Goda, I. Motoyoshi, H. Komatsu, and S. Nishida, "Audiovisual integration in the human perception of materials," *Journal of Vision*, vol. 14, no. 4, 2014.
- [152] F. Gonzalez, F. Gosselin, and W. Bachta, "Analysis of hand contact areas and interaction capabilities during manipulation and exploration," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, pp. 415-429, 2014.
- [153] V. Morash, "Systematic Movements in Haptic Search: Spirals, Zigzags, and Parallel Sweeps.," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 9, no. 1, pp. 100-110, 2016.
- [154] S.E. Jansen, W.M. Bergmann Tiest, and A.M. Kappers, "Haptic exploratory behavior during object discrimination: a novel automatic annotation method," *PLoS one*, vol.10, e0117017, 2015.

- [155] S.M. Pasumarty, S.A. Johnson, S.A. Watson, and M.J. Adams, "Friction of the human finger pad: Influence of moisture, occlusion and velocity," *Tribology Letters*, vol.44, pp.117-137, 2011.
- [156] C. Ansuini, A. Cavallo, C. Campus, D. Quarona, A. Koul, and C. Becchio, "Are we real when we fake? Attunement to object weight in natural and pantomimed grasping movements," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.10, 471, 2016.
- [157] J. Podda, C. Ansuini, R. Vastano, A. Cavall, and C. Becchio, "The heaviness of invisible objects: Predictive weight judgments from observed real and pantomimed grasps," *Cognition*, vol.168, pp.140-145, 2017.
- [158] D. M. Eagleman, "Time perception is distorted during slow motion sequences in movies," *Journal of Vision*, vol. 4, pp. 491-491, 2004.
- [159] E. M. Caruso, Z. C. Burns, and B. A. Converse, "Slow motion increases perceived intent," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 113, no. 33, pp. 9250-9255, 2016.
- [160] J. Spitz, K. Put, J. Wagemans, A. M. Williams, and W. F. Helsen, "Does slow motion impact on the perception of foul play in football?," *European Journal of Sport Science*, vol. 17, no. 6, pp. 748-756, 2017.
- [161] S. Kashiwakura, and I. Motoyoshi, "Relative time compression for slow-motion stimuli through rapid recalibration," *Frontiers in Psychology*, vol. 8, 1195, 2017.
- [162] P. Gärdenfors, "Demonstration and Pantomime in the Evolution of Teaching," *Frontiers in Psychology*, vol. 8, 415, 2017.
- [163] K. Van Nispen, W. M. E. van de Sandt-Koenderman, and E. Krahmer, "Production and Comprehension of Pantomimes Used to Depict Objects," *Frontiers in Psychology*, vol. 8, 1095, 2017.
- [164] R. M. Friedman, K. D. Hester, B. G. Green, and R. H. LaMotte, "Magnitude estimation of softness," *Experimental Brain Research*, vol. 191, no. 2, pp. 133-142, 2008.
- [165] K. Higashi, S. Okamoto, H. Nagano, M. Konyo, and Y. Yamada, "Perceived hardness by tapping: The role of a secondary mode of vibration," in *Haptic Interaction: Science, Engineering and Design*, Chiba, Springer, 2016, pp. 27-32.
- [166] K. Higashi, S. Okamoto, Y. Yamada, H. Nagano, and M. Konyo, "Hardness perception by tapping: Effect of dynamic stiffness of objects," *Proceedings of IEEE World Haptics Conference (WHC'17)*, pp. 37-41, Munich, 2017, Jun.
- [167] K. Higashi, S. Okamoto, Y. Yamada, H. Nagano, and M. Konyo, "Hardness perception through tapping: Peak and impulse of the reaction force reflect the subjective hardness," in *Haptic Interaction: Science, Engineering and Design*, Pisa, Springer, 2018, pp. 321-332.
- [168] K. Drewing, "After experience with the task humans actively optimize shape discrimination in touch by utilizing effects of exploratory movement direction," *Acta Psychologica*, vol. 141, pp. 295-303, 2012.
- [169] S. Shah, J. N. Teja, and S. Bhattacharya, "Towards affective touch interaction: predicting mobile user emotion from finger strokes," *Journal of Interaction Science*, vol. 3, 6, 2015.

- [170] L. E. Marks, and J. C. Stevens, "Perceived warmth and skin temperature as functions of the duration and level of thermal irradiation," *Perception and Psychophysics*, vol. 4, pp. 220-228, 1968.
- [171] L. E. Marks, and J. C. Stevens, "Perceived cold and skin temperature as functions of stimulation level and duration," *American Journal of Psychology*, vol. 85, pp. 407-419, 1972.
- [172] K. C. Dieter, B. Hu, D. C. Knill, R. Blake, and D. Tadin, "Kinesthesia Can Make an Invisible Hand Visible," *Psychological Science*, vol. 25, pp. 66-75, 2014.
- [173] M. Nakao, M. Senoo, and T. Matsuda, "Fingertip-based Feature Analysis for the Push and Stroke Manipulation of Elastic Objects," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 523-532, 2017.
- [174] H. Mochiyama, A. Sano, N. Takesue, R. Kikuuwe, K. Fujita, S. Fukuda, K. Marui and H. Fujimoto, "Haptic illusions induced by moving line stimuli," *Proceedings of IEEE World Haptics Conference (WHC'05)*, pp. 645-648, 2005.
- [175] M. J. Hertenstein, D. Keltner, B. App, B. A. Bulleit, A. R. Jaskolka, "Touch communicates distinct emotions," *Emotion*, vol. 6, no. 3, 528, 2006.
- [176] H. Lee Masson, and H. Op de Beeck, "Socio-affective touch expression database," *PLoS One*, vol. 13, no. 1, e0190921, 2018.
- [177] S. Derler, and G. M. Rotaru, "Stick-slip phenomena in the friction of human skin," *Wear*, vol. 301, no. 1-2, pp. 324-329, 2013.
- [178] M. Janko, R. Primerano, and Y. Visell, "On Frictional Forces between the Finger and a Textured Surface during Active Touch," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 9, no. 2, pp. 221-232, 2016.
- [179] C. Schwarz, "The Slip Hypothesis: Tactile Perception and its Neuronal Bases," *Trends in Neurosciences*, vol. 39, no. 7, pp. 449-462, 2016.
- [180] H. C. Sun, A. E. Welchman, D. H. F. Chang, and M. Di Luca, "Look but don't touch: Visual cues to surface structure drive somatosensory cortex," *NeuroImage*, vol. 128, pp. 353-361, 2016.