

カテゴリ分類と MDS (多次元尺度構成法) に基づく知覚特性に対応した 刺激空間構成法に関する考察

A Study of structuring perceptual space based on category classification and multi-dimensional scaling

永原宙^{*1}
Hirosi Nagahara

渡邊淳司^{*1*2}
Junji Watanabe

東京工業大学大学院総合理工学研究科^{*1}
Interdisciplinary Graduate School of Tokyo Institute of Technology #1

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^{*2}
NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone corporation #2

Abstract-- Many previous studies have used several pairs of adjective words for quantitative assessments of tactile qualities, such as “rough–smooth” and “hard–soft” (i.e., Semantic Differential method). However, this method requires observers to report their perceptual experiences one by one, and it takes substantial efforts of them, when the number of objects and/ or the number of adjectives is increased. We proposed a simple principle for analyzing the relationship of tactile qualities among objects based on human perceptual characteristics (submitted). Our principle asks observers only to classify objects into several groups according to the similarity of their tactile qualities, then calculate similarity matrix and generate a distribution diagram of the objects based on similarity of the tactile qualities. This study aims at establishing the principle.

1. はじめに

私たち人間は、布の風合い、紙の手触り等、ひとつの素材カテゴリに対しても、粗さや硬さ、温度の違いといった触感の微細な違いを感じることができる。このような、提示された刺激を人の感性上で分析・可視化するために、数的評価で得られた結果から、刺激の触感の評価・分析をする目的で刺激がどのような空間配置となるかを、刺激空間を構成して可視化する研究がなされてきた。

これまでの触感研究における刺激空間構成法には主な方法として、SD法、一対比較法、量的推定法、カテゴリ分類法の4つが存在する[Okamoto 2013]。SD法は触感の基本的な性質を表す基準(形容詞対)を複数組用意し、触感の評価対象(以降“触刺激”と呼ぶ)ひとつひとつに対して、全ての基準で直接的に点数化を行い、その点数に対してクラスタ分析や主成分分析を行い触刺激間の関係性の分析及び視覚化を行うものである。一対比較法と量的推定法は、全ての刺激ペアについて評価を行う。一対比較法は、形容詞尺度に従って刺激ペアを比較する。量的推定法は、形容詞尺度ではなく「よく似ている」から「全く似ていない」までの非類似度で評価する。カテゴリ分類法は、フリーソーティング法[Bergmann 2006]に代表される、多数の刺激に対して、「似ている一似ていない」のみを基準に、被験者に刺激群を自由に分類させ、得られた類似度から刺激同士の相対的な関係性を構築するものである。

多数の刺激群を調査する際には、主にカテゴリ分類法が用いられる。その他の方法は、刺激の数や基準の数が増えるにつれ、評価に必要な時間が飛躍的に増加する。たとえば、100個の触刺激に10の基準で評価を行うと1000回の評価が必要になり、20の基準だと2000回の評価が必要になる。刺激対を比較する場合には、約5000回もの評価を必要とする。これは心理物理実験としては許容可能かもしれないが、ものづくりの現場で手軽に刺激の関係性を把握したいという目的においては、過剰な負荷といえる。一方、カテゴリ分類法では、一人の被験者は一度の分類作業を行うだけで評価は終了し、手順としては簡潔に実行することが可能である。ただし、カテゴリ分類法のデメリットとして、得られる評価の情報が少ない点と、間接的な評価である点が挙げられる。たとえば、ある2つの刺激に対して同じグルー

プに分類した被験者の割合を、その2刺激間の類似度とみなして計算を行う場合、一人の被験者から、2刺激間の類似度は1 or 0の2値の回答しか得ることができない。本研究ではカテゴリ分類法のメリットを活かしつつ、分類の個人差を加味した重み付き類似度の利用、または、新しく考案した別の計算方法を用いることで、簡便かつ正確な刺激空間構成することを目指す。

2. カテゴリ分類法の手順

本章では、筆者らが検討している刺激空間の構成方法([Nagahara 2016])では、89枚の刺激片からなる刺激セット3種に対し検討実験を実施した)について、フリーソーティング法の分類から、類似度行列の作成、MDSによる刺激空間作成を経て、クラスタ分析までを行うプロセスの各段階について説明する。

2.1 フリーソーティング法によるカテゴリ分類

フリーソーティング法は、触刺激全てを対象にして、被験者が「触感が似ている」と感じるものを集め、自由にグループに分類していくという分類法である。被験者は触感が「似ている一似ていない」という基準のみで、任意の数のグループに分類する[Bergmann 2006]。

2.2 刺激間類似度・刺激の座標の決定

カテゴリ分類の結果から、各刺激間の類似度を決定する。複数の被験者がフリーソーティングを行い、類似度は任意の触刺激ペアに対して、その二つの触刺激を同じグループに分類した被験者の割合(0~1)が使用される[Bergmann 2006]。この計算から、全ての刺激ペアについて行列形式で類似度が得られる。そして、その値を1から引いたものを刺激間距離とし、得られた距離行列に対して多次元尺度構成法(MDS)[Kruskal 1978]を行い、距離行列での関係を反映するように、各刺激の位置座標を刺激空間上に決定する。

2.3 階層的クラスタリング

MDSによって得られた触刺激の座標値を用いて階層的クラスタリング(Ward法)を行い、デンドログラム(樹形図)を作成し触刺激がグループ化される際の順番と結合距離を得る。

3. 計算方法の再考

検討実験[Nagahara 2016]では、多数の刺激に対してフリーソーティング法での分類を実施し、二つの刺激が似ている場合(同じグループに分類された場合)には類似度を1、似ていないと判定された場合(違うグループに分類された場合)には類似度を0とカウントし、一人の被験者の類似度行列を構成し、その平均の行列を最終的な類似度行列として用いている。

しかし、実際分類結果では、二つの刺激が同じグループとみなされる場合であっても、2~3個程度の極めて少ない個数のグループで同じと判定される場合もあれば、20~30個からなるグループで同じと判定される場合もあった。また、分類結果では被験者ごとに分類するグループ数に個人差があった。これは、フリーソーティング法が、個数やグループ数に制約を課しておらず、個人差と多様度の極めて高い分類であるためである。このように、ある刺激ペアを同じみないした場合でも、その様相は様々である。そこで、本章ではMDSに利用する刺激間距離の計算方法について、再考する。

3.1 重みつき類似度の利用

ひとつの方法として、ある二つの刺激が同じグループに判定されることがどの程度の情報を持っているのか、重みを付けて刺激間類似度を定義することを考える。同じグループに含まれる刺激の個数が少ないほど類似度は高いと仮定して、重みつき類似度を決定する。 k 番目の被験者が、ある2つの刺激を似ていると判断して同じグループとした時に、そのグループに含まれる刺激の個数の情報量 $-\log_N \frac{n}{N}$ をその被験者 k の分類に対する重み w_{ijk} として用いる(ただし、 n :同じグループに含まれる刺激数、 N :全体の刺激数、 \log の底は類似度の要請(0~1)を満たすように N とした)。この重み付き類似度を使用して、 k 番目の被験者がある二つの刺激を同じグループに判定したときの距離(d_{ijk})を計算すると、

$$d_{ijk} = 1 - \left(-\log_N \frac{n}{N} \cdot 1\right) = \log_N n$$

と変形でき、刺激間距離はグループ内に含まれる刺激の個数の対数に対応する。これを被験者群で平均をとった d_{ij} を最終的な刺激間距離として計算することができる。

3.2 累積正規分布の逆関数を用いる方法

検討実験[Nagahara 2016]では、類似度(s_{ij})と距離(d_{ij})の関係として直線関係($d_{ij} = 1 - s_{ij}$)が用いられている。一方で、心理物理実験において、実験結果は累積正規分布を用いてフィッティングされることも多い。累積正規分布は人間の知覚に基づいた判断の割合を刺激のパラメータの変化に応じて表したものである。本研究の目的は、人間の知覚上で同一と判定された割合から距離パラメータを逆算するものであり、心理実験とは逆のプロセスを踏んでいるとみなせる。従って、得られた割合から累積正規分布の逆関数を用いることができると考えられる。すなわち、似ていると判断した被験者の割合 P が

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{x_{\min}}^x e^{-\frac{(x-0.5)^2}{2\sigma^2}} dx$$

となるとき値 x を類似度とみなす。式(1)の直線関係と心理関数のグラフを図1に示す。

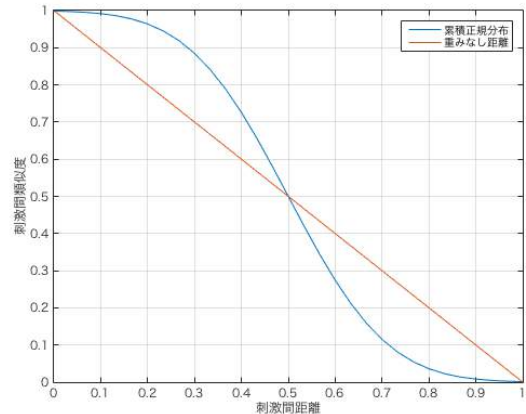


図1 刺激間類似度と刺激間距離

4. 解析結果

図2は、検討実験[Nagahara 2016]の一種類の刺激群に対して各計算方法で作成した刺激空間であり、1-4次元までを図示している。特に累積正規分布では第3、第4次元での分布の様相が顕著に異なっているように見える。それぞれの分布同士の刺激間距離の比較を相関係数によって比較する(図3)。相関係数はそれぞれ、重みなし-情報量間: 0.982, 重みなし-心理関数間: 0.954, 情報量-心理関数間: 0.92 となった。重みなしと情報量とがもっともマップの関係性は類似しており、心理関数は類似性が低くなり、その他二つに比べて異なるデータ傾向であった。

次に、各計算方法でのMDSのストレス値を比較する。ストレス値は、MDSに対するデータの当てはまりの良さを表す指標で、距離行列での刺激間距離とMDSによって決定した座標上での刺激間距離のズレの二乗で決定される。

$$(\text{ストレス値}) = \sqrt{\frac{\sum_{ij} ((d_{\text{MDS}})_{ij} - (d_{\text{matrix}})_{ij})^2}{\sum_{ij} ((d_{\text{matrix}})_{ij})^2}}$$

図4は計算方法ごとのストレス値である。(2-10次元)重みが情報量の場合にはストレス値は0.4以上と悪い値となっている。その他2つに関しては、高次元になるにつれて0.2以下となっている。どの方法でも、ストレス値は望ましい値まではなっておらず、これは、刺激数が多いことの影響が考えられる。心理関数の逆関数では、重みなし類似度に比べてストレスが減少する傾向にあり、特に低次元領域では、大幅な減少が確認された。心理関数を用いる方法が既存の方法よりストレス値は改善されている。

5. 考察

本研究で用いた刺激群においては、今回比較した3つの計算方法のうち心理関数の逆関数を用いる方法でストレスの改善が確認された。情報量で高いストレス値を取っている原因としては、測定した距離データが(0.6-1.0)の範囲に集中しているが、MDSで処理した際に、距離の範囲が(0-1.0)に広がったため、差分の2乗であるストレス値が上昇していると考えられる(図5)。

今回実施した実験の分類時間は一回の分類あたり、7~35分程度であった。また、セッションを重ねるごとに、早い被験者では、10分程度で分類を終えていた。この短時間の分類から、計算方法を改良することで情報を引き出すことを目的としている。

本研究の課題としては、目指すべき正解の刺激空間が判明していないという点が存在する。解決方法としては、知覚上での刺激間距離が判明している刺激群に対して実験と解析を行うことを検討している。

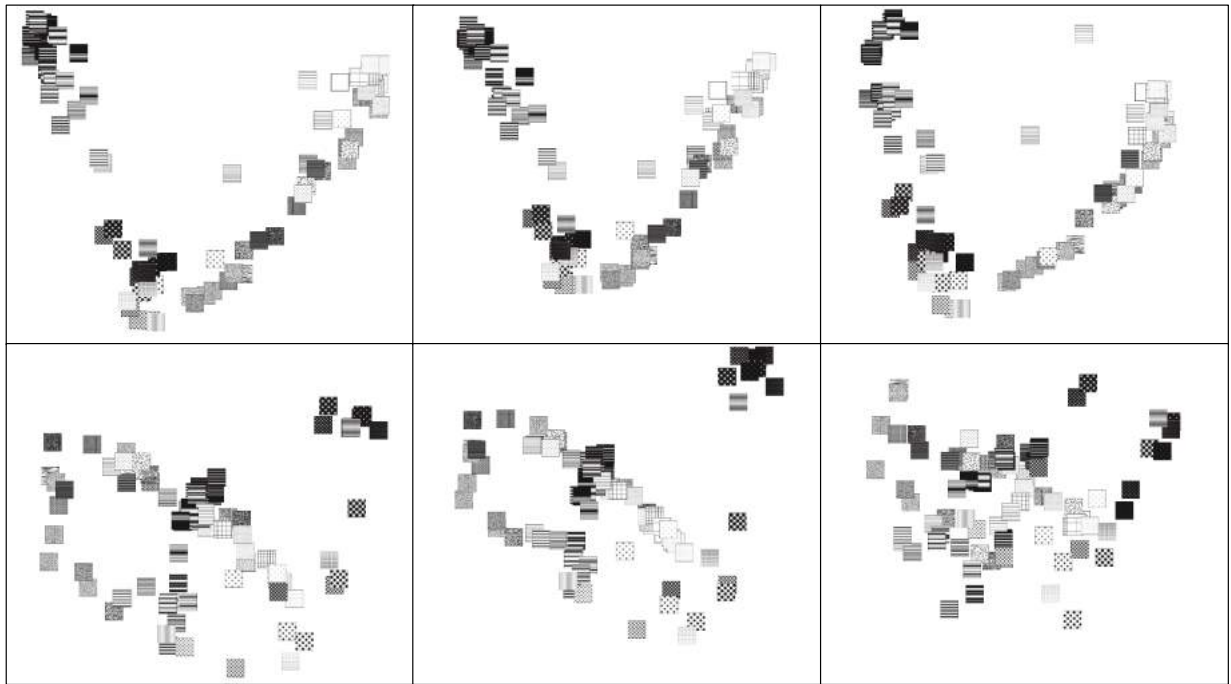


図2 刺激空間での分布 左:(類似度:重みなし), 中央:(類似度:情報量), 右:(類似度:累積正規分布の逆関数)
 上段:(横軸:第1次元, 縦軸:第2次元), 下段:(横軸:第3次元, 縦軸:第4次元)

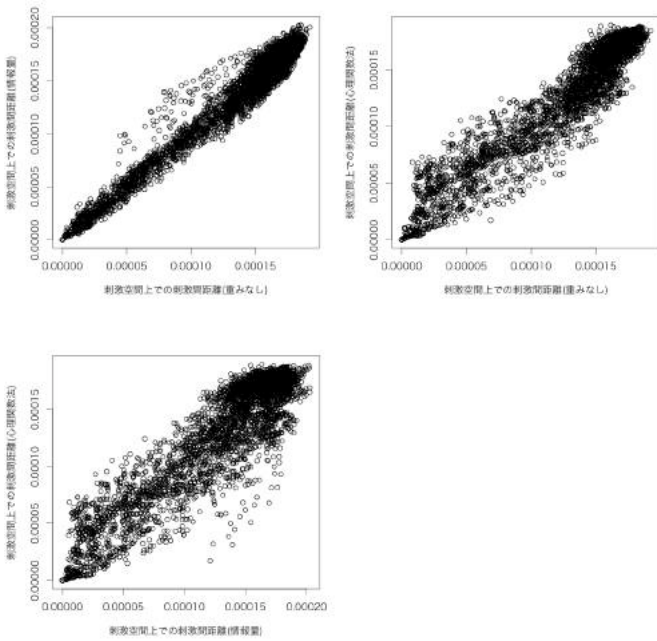


図3 刺激間距離の比較: 左上(横軸:重みなし, 縦軸:情報量),
 右上(横軸:重みなし, 縦軸:心理関数), 左下(横軸:情報量, 縦軸:
 心理関数),

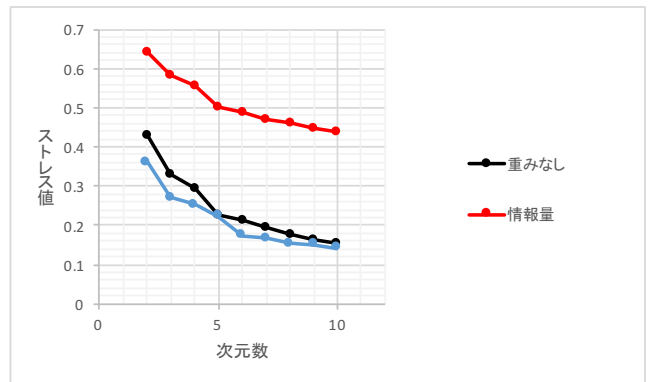


図4 MDSでのストレス

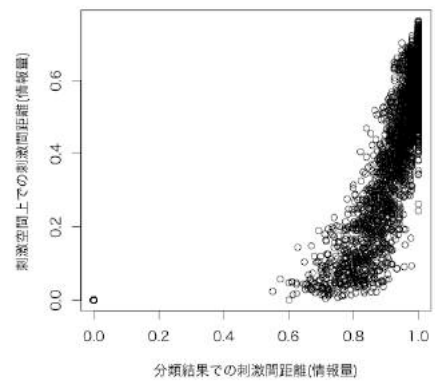


図5 情報量における分類結果での距離と刺激空間上での距離

参考文献

- [Okamoto 2013] S. Okamoto, H. Nagano, & Y. Yamada: Psychophysical dimensions of tactile perception of textures, IEEE Transactions on Haptics, 6(1), 81-93, 2013.
- [Bergmann 2006] W.M. BergmannTiest, & A.M.. Kappers: Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility, Acta Psychologica, 121(1), 1-20, 2006.
- [Kruskal 1978] J. B. Kruskal & M. Wish: Multidimensional scaling. Sage Publications, 1978.
- [Nagahara 2016] 永原宙, 森永さよ, 渡邊淳司: 人間のカテゴリ分類特性を利用した触感選択法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌投稿中