

ヒトの質感認知処理に関する視触覚統合の研究

小野, 未琴

<https://hdl.handle.net/2324/6787627>

出版情報：九州大学, 2022, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：



ヒトの質感認知処理に関する視触覚統合の研究

小野 未琴

概要

質感とは、主に視覚・聴覚・触覚の情報によって得られる物体の素材（例：鉄，布）や性質（例：光沢，粗さ）といった様々な属性をまとめた包括的概念を表す。我々はその物体の表面あるいは内部の状態を知り（性質知覚），その物体の素材を識別（素材カテゴリー知覚）し，知覚された様々な属性を通して質感が形成され，対象物がどのような物体なのかを認知する。質感は，物体認識，価値判断，行動決定など様々な活動に役に立つ。質感認知は複数の感覚様相に基づいた統計的推論によって行われ，ヒトは統計的推論を行う機構を持つと考えられている。しかし，この考えを断定できるほどの知見はまだ十分に得られていない。また，我々が外界の対象物に対して行動を起こすには，多くの場合，外界の対象物の存在や変化に気づく必要がある。しかし，質感と気づきの関係については今まで議論されていなかった。

本論文ではヒトの質感情報処理に関する2つの視触覚統合の研究を論じている。研究1では，視触覚の素材カテゴリー知覚，及び性質知覚について調べ，どのような感覚様相の組み合わせでも，共通したメカニズムで処理されている可能性について検討した。その結果，視触覚の素材カテゴリー知覚は，視覚及び触覚の素材カテゴリー知覚の結果の乗算によって得られる事が示唆された。また性質知覚については，各感覚様相の加重平均で行われ，性質の種類によって，重視する感覚情報が異なることが示唆された。質感認知は，特定の感覚様相の組み合わせに限らず，共通した複数の感覚様相の情報に基づいて行われている可能性が大きくなった。

研究2では，現在我々が何を見ているかを意識化している状態，すなわち視覚的気づきが質感による影響を受けるか，視触覚統合場面で調べた。視覚的気づきを調べる方法として，左眼と右眼のそれぞれに非類似の画像を分離して呈示すると，参加者には片方の画像しか知覚されず，時間の経過によって知覚内容が画像間で交替し続ける両眼視野闘争での実験がある。この両眼視野闘争中に，画像の1つに関連する刺激を

非視覚の感覚様相に呈示すると、その画像が知覚されてから交替するまでの時間（優位時間）が長くなる場合がある。研究 2 では、代表的な質感属性である粗さの視触覚相互作用によって、優位時間が変化するか調べ、質感と視覚的気づきの関係について検討した。その結果、視触覚相互作用による両眼視野闘争への影響が、粗さ知覚によって生じることが示され、質感が視覚的気づきに影響を及ぼす可能性が示唆された。

研究 1 の結果は、多くの質感属性が特定の感覚様相に依存せず、複数の感覚様相に基づいて知覚されることを支持する。この結果は、質感認知が感覚様相を超えた共通したメカニズムで行われていることを示している。研究 2 の結果は、対象物の存在や変化に気づく際に、質感情報を利用していることを示唆している。研究 1-2 から、質感が形成されるまで、そして質感が形成されてから行動を移すまでの情報処理に新たな知見が示された。我々は外界の刺激と事前情報を統計的推論に基づいて知覚する。そして、知覚内容と目的に基づいて行動の決定を行い、外界に向けて行動を移すことで、外界に変化が起き新たな刺激を我々は受ける、といったヒトの情報処理モデルが提唱されている。質感認知が統計的推論に基づいて行われているか、統計的推論を行う機構がヒトの情報処理に組み込まれているか、そしてどのような刺激特徴や事前情報によって分布が形成されるのか、といった課題を意識して質感を研究することで、我々が質感認知を統計的推論で行っている可能性について、より深く検討することが出来ると考えられる。更に、我々が質感を形成してから対象物に気づくのか、それとも質感を形成しながら気づきを得ていくのかを検討することで、我々が質感に基づいて行動を移すまでの情報処理の過程を、より詳細に示すことが出来ると考えられ、質感の情報処理及びヒトの情報処理の解明に繋がるだろう。

目次

第1章 序論.....	7
第2章 背景.....	13
2.1 粗さ知覚における多感覚統合について.....	13
2.2 多感覚統合における様々な性質知覚について.....	16
2.3 多感覚の素材カテゴリー知覚について.....	19
2.4 質感の多感覚統合に関するモデル.....	21
2.5 線形統合モデル (linear integration model).....	23
2.6 最尤推定モデル.....	23
2.7 ベイズ推定・アンチベイズ推定.....	26
2.8 視覚的気づきと両眼視野闘争.....	31
2.9 多感覚統合場面での両眼視野闘争.....	32
2.10 本論文での具体的な研究課題.....	36
第3章 研究1: 素材カテゴリー知覚及び性質知覚における視覚情報と触覚情報の相互作用の検討.....	38
3.1 目的.....	38
3.2 実験.....	39
3.2.1 方法.....	39
3.2.1.1 参加者.....	39
3.2.1.2 触覚刺激.....	39
3.2.1.3 視覚刺激.....	40
3.2.1.4 装置.....	40
3.2.1.5 実験手続き.....	42
3.2.1.6 データ分析.....	45

3.2.2 結果	46
3.2.2.1 素材カテゴリー知覚の評定結果	46
3.2.2.2 性質知覚の評定結果	48
3.2.2.3 重回帰分析	48
3.3 考察	52
第4章 研究2：触覚の粗さ情報が及ぼす両眼視野闘争の知覚交替への影響	57
4.1 目的	57
4.2 実験1	58
4.2.1 方法	58
4.2.1.1 参加者	58
4.2.1.2 刺激及び装置	59
4.2.1.3 実験手続き	60
4.2.2 結果	61
4.2.3 考察	62
4.3 実験2	64
4.3.1 方法	64
4.3.1.1 参加者	64
4.3.1.2 刺激と装置	64
4.3.1.3 実験手続き	64
4.3.2 結果	65
4.3.3 考察	67
4.4 実験3	68
4.4.1 方法	68
4.4.1.1 参加者	68

4.4.1.2 刺激と装置	68
4.4.2 結果	69
4.4.3 考察	71
4.5 総合考察.....	71
第5章 結論と展望	75
謝辞	80
参考文献	81

第1章 序論

質感とは、主に視覚・聴覚・触覚の情報によって得られる物体の素材（例：鉄，布）や性質（例：光沢，粗さ）といった様々な属性をまとめた包括的概念を表す。小松 (2012) は「視覚や聴覚や触覚の刺激から物体の素材や表面の状態を推定する機能」を質感認知の機能として記述している。増井 (1994) では、感覚，知覚，及び認知について従来から明確に区別されていたわけではないと記している。その上で増井は「物理的刺激が感覚受容器を経て，求心性神経から大脳感覚中枢に伝達される感覚系のみ活動によって規定される過程」を感覚と説明した。更に，知覚は「感覚の過程を含む，より全体的で総合的な過程」，認知は「過去経験によって規定され，記憶や言語，思考の影響をより受ける過程」とそれぞれ記述しており，認知は知覚よりも複雑かつ高次の処理であるとしている（ただし，増井はこれらの定義を便宜的な区別としている）。本論文では，増井 (1994) の知覚と認知の解説，そして小松 (2012) の質感認知の機能の定義に従って，感覚様相に与えられる刺激に対して“粗い”，“木材で出来ている”といった意味付けをすることを「知覚」，そして複数の知覚内容から“どのような表面の状態や素材である物体なのか”と対象物の様子を認識することを「認知」と扱う。我々は，その物体の表面あるいは内部の状態を知覚したり（性質知覚），その物体の素材を識別したり（素材カテゴリー知覚）することで，得られた複数の属性を通して質感が形成され，対象物の質感を認知していると言える。

質感は，物体の様子を正しく認識することに繋がるだけでなく，商品購入時の価値判断や，物体をどの様に手に取るかといった行動決定など，人間の様々な活動において重要な役割を持つ。質感は様々なアプローチで研究され，日本では2015–2020年に新学術領域「多元質感知」として心理物理学・脳科学・工学の3分野から基礎・応用と幅広く調べられてきた。2021年からは，新学術領域「深奥質感」として新たなブ

プロジェクトが始まっており、現在でも多くの分野で質感が研究されている。近年ではキーワードとして「SHITSUKAN」を入れる国際論文 (Komatsu & Goda, 2018; Spence, 2020) も現れており、世界的にも注目される研究分野の1つとして扱われている。

小松 (2012) では、高級感や好みであるといった価値判断と中立である物体の素材や性質についての質感認知と、価値判断を含めた感性的質感認知の2つを区別して質感認知を説明している。触覚での性質知覚について解説している Okamoto, Nagano, and Ho (2016) では図1のように、物体から受ける物理的刺激 (Material), 粗さや硬さといった物体の状態に関する性質 (Psychophysical layer), 高級感や綺麗といった感性的性質 (Affective layer), 好みや快適といった人間の嗜好に関する性質 (Preferential layer) と質感属性が4つに分類されている。低次の層から高次の層に向けて、物体に関する性質から徐々に人間の感性に関する性質に近づくようになっている。本論文では、小

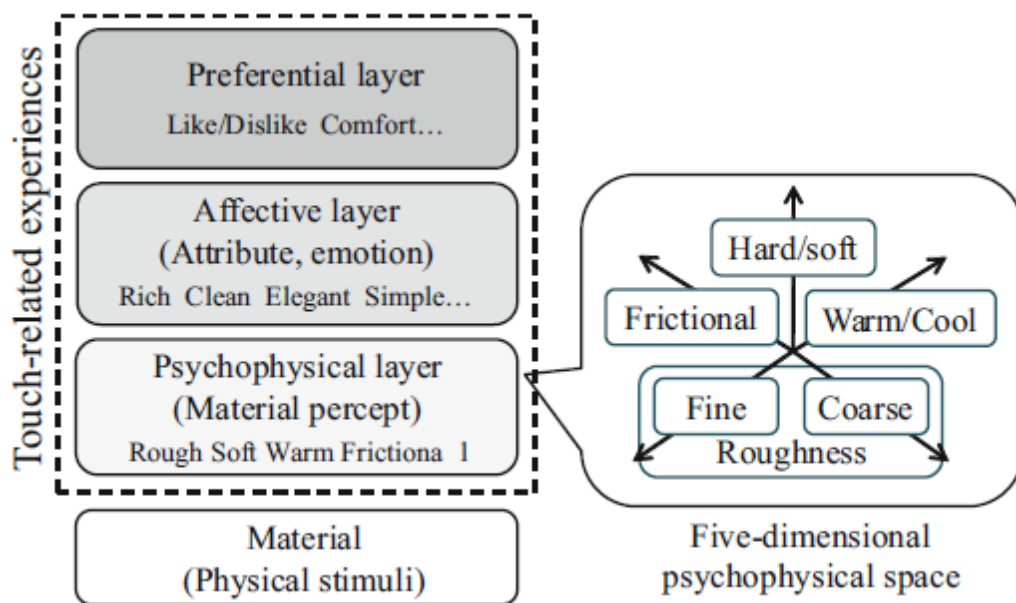


図1 Okamoto et al. (2016) で提唱された触質感の多層モデル。下層は外界の物体に関する感覚を示し、上層になるにつれ人間の感性に関する感覚を表している (Okamoto et al., 2016, p. 4, Fig. 1.1 引用).

松 (2012) や Okamoto et al. (2016) の定義に従って、価値判断とは中立である性質や素材といった質感属性を主に扱う。

我々は多感覚情報を共有・統合することによって、外界をより正確に知覚する機能を持つ (Ernst & Bühlhoff, 2004)。大野・横澤・鳴海 (2022) はクロスモーダル知覚の代表的な概念である、共感覚 (synesthesia), 感覚間協応 (crossmodal correspondences), 多感覚統合 (multisensory integration) について定義を行い (表 1), 各概念の違いについて詳細に解説している。質感研究では、ある質感属性について 1 つの感覚様相から調べるアプローチが多く取られるが、本来であれば、質感は複数の感覚様相の刺激によって形成される。本論文では、大野ら (2022) の定義に従い、質感という 1 つの事象を、複数の感覚様相に呈示される刺激を統合することによって知覚される処理、すなわち多感覚統合を通じて論じる。

質感の多感覚統合研究は多く行われており、それらを解説する文献も存在する。例えば Wintaker, Simoes-Franklin, and Newell (2008) では、視覚・触覚の粗さ知覚に関する行動実験、脳科学の知見について述べており、Wintaker et al. は視触覚の粗さ知覚について、形知覚と異なり、各感覚情報が互いに独立に処理されながらも補完し合う機構を持つことを主張した。Klatzky and Lederman (2010) では粗さの多感覚統合について知見を多くまとめており、Komatsu and Goda (2018) では視覚を中心とした質感に関する脳部位について解説し、後半では多感覚統合部位について触れている。Spence (2020) では質感の多感覚統合の基礎・応用研究の解説が行われている。

以上の知見を統合的に説明するモデルも提唱されている。Lederman and Klatzky (2004) は粗さ知覚における多感覚統合について説明する様々なモデルを解説・提案した。更に、西田・藤崎 (2016) では様々な質感属性の多感覚統合はベイズの定理に基づいた最尤推定、ベイズ推定及びアンチベイズ推定で説明できるとした。最尤推定モデル、及びベイズ推定モデルやアンチベイズ推定モデルについては、多くの知覚の多

表 1 大野ら (2022) によるクロスモーダル知覚の代表的な概念の定義.

項目	定義
共感覚 (synesthesia)	ある感覚や認知的処理を引き起こすような情報 (刺激) の入力により, 一般的に喚起される感覚や認知処理に加えて, 他の感覚や認知処理も喚起される現象.
感覚間協応 (crossmodal correspondences)	異なる感覚モダリティに与えられる刺激の属性や次元の間に適合性が見出される効果.
多感覚統合 (multisensory integration)	異なる感覚モダリティに入力された刺激を 1 つの事象として知覚・認識する処理.

感覚統合を説明し (Brayanov & Smith, 2010; Ernst, 2009; Ernst & Banks, 2002; Gepstein, Burge, Ernst, & Banks, 2005; Helbig & Ernst, 2007; Helbig & Ernst, 2008; Knill & Saunders, 2003; Körding, Beieholm, Ma, Quartz, Tenenbaum, & Shams, 2007; Körding, Ku, & Wolpert, 2004; Körding & Wolpert, 2004; Sato, Toyozumi, & Aihara, 2007), 人間は様々な特徴の知覚を統計的推論に基づいて行っていると考えられている.

質感については, 視覚系が統計的推論によって質感属性の知覚を行う機構を持つ可能性が示唆されている (Hiramatsu, Goda, & Komatsu, 2011; 本吉, 2014). Motoyoshi, Nishida, Sharan, and Adelson (2007) は, 光沢感と画像の輝度のヒストグラム分布の歪度に相関関係があることを示した. この研究結果は, 光沢感と画像に含まれる低次の特徴に関係があることを示すだけでなく, 視覚系が光沢を知覚するために統計的推論を行う機構を持ち合わせていることを示唆する.

質感の多感覚統合研究では, 性質・素材といった様々な質感属性の知覚が, 統計的

推論に基づいて行われていることを示唆する知見が得られている (Fujisaki, Goda, Motoyoshi, Komatsu, & Nishida, 2014; Ho, Iwai, Yoshikawa, Watanabe, & Nishida, 2014; Suzuishi, Hidaka, & Kuroki, 2020; Yanagisawa & Takatsuji, 2015). これらの知見により, 質感認知は複数の感覚情報による統計的推論に基づいて行われており, 我々はそれを実現する機構を持ち合わせている可能性が浮上してきた. ただし, 視触覚の硬軟知覚が最尤推定モデルでは上手く説明出来なかつたり (Cellini, Kaim, & Drewing, 2013; Kuschel, Di Luca, Buss, & Klatzky, 2010), アンチベイズ推定によって行われていると考えられていた錯覚が, ベイズ推定で説明できる, と主張する研究が現れていたりする (Peters, Ma, & Shams, 2016; Peters, Zhang, & Shams, 2018). また, 質感に関して統計的推論を意識した研究もまだ多くはなく, 統計的推論を行う機構がヒトの情報処理に組み込まれている, と断定することはできない.

また先述したように, 質感は物体認識, 行動決定, 価値判断と我々が外界に向けて活動を行う際に重要な役割を持つ. このような活動を行う際, 多くの場合, 外界にある対象物の存在や変化を意識化する, つまり気づくことが重要である. これまで, 質感属性が気づきにどのような影響を及ぼすのか調べられておらず, その関係が議論されたことも殆どない. 質感と気づきの関係を調べることで, 質感を得てから, 外界に向けて活動するまでの一連の情報処理の解明に繋がるであろう.

本論文では, 質感の情報処理解明に向けて, 2つの視触覚統合研究を報告する. 第2章では質感認知のメカニズム, 及び視覚的気づきについて, 多感覚統合の研究を通じて議論を行い, 現在の質感研究の課題を呈示する. 第3章では, 質感認知が感覚様相間で共通したメカニズムによって行われているのかを解明するため, 視触覚の素材カテゴリ知覚・性質知覚について調べた研究1を説明する. 第4章では, 質感と視覚的気づきの関係を多感覚統合場面で調べた研究2を説明する. 第5章では, 第2章から第4章までのまとめとして, 2つの研究によって示された知見と, 質感に関するヒ

トの情報処理の課題について記述し，質感研究の展望を示す．

なお本論文の内容は，筆者が既に報告した研究結果 (Ono, Hirose, & Mori, 2022; 小野・森, 2022; 小野・森, 印刷中) に基づいたものである．

第2章 背景

2.1 粗さ知覚における多感覚統合について

我々は複数の感覚様相の情報に基づいて、素材や性質を知覚していると考えられる。質感研究の目的の1つは、ある質感属性を知覚する際、各感覚情報に対する重み付けが、どのように決まるかを明らかにすることである。触覚的性質である粗さは、質感の代表的な属性の1つであり (Okamoto, Nagano, & Yamada, 2012), 古くから研究対象とされてきた。ここでは多感覚統合での粗さ知覚の知見を解説し、重み付けについて議論する。

Lederman and Abbott (1981) は視触覚における粗さ知覚での視覚と触覚の重み付けを調べた。Lederman and Abbott は、標準刺激として視覚刺激、触覚刺激にそれぞれ異なる粗さのサンドペーパーを用いて、視覚のみ、触覚のみ、視触覚条件で刺激を呈示し、その後、視覚のみ、触覚のみ、視触覚で比較刺激である9つの粗さのサンドペーパーから、標準刺激と一致するサンドペーパーを選ぶマッチング課題を行った。その結果、視触覚条件の評定値は、視覚条件の評定値と触覚条件の評定値の中間を位置するような値となった (図2)。Lederman and Abbott の結果から、視触覚の粗さは、視覚情報と触覚情報に均等な重み付けがされ、知覚されることが考えられる。また Jones and O'Neil (1985) では視覚、触覚、視触覚で粗さ弁別を行い、視覚、視触覚、触覚の順で正答率が高かった。Jones and O'Neil は視触覚の粗さ弁別について、視覚情報と触覚情報の算術平均モデルが一番良く説明出来ると示した。

ただし、視触覚の粗さ知覚の重み付けは常に均等ではない。Lederman, Thorne, and Jones (1986) は点字のような刺激 (raised dot, 以降レイズドドット) の粗さ、または空間密度のマグニチュード評定を行わせ、視覚判断時の触覚による影響 ($H[V]$), 触覚判断時の視覚による影響 ($V[H]$) について調べた。粗さを答えさせると $H[V] = 73.2\%$, $V[H] = 33.2\%$ と触覚による影響が大きく、視覚による影響が小さくなった。一方、空

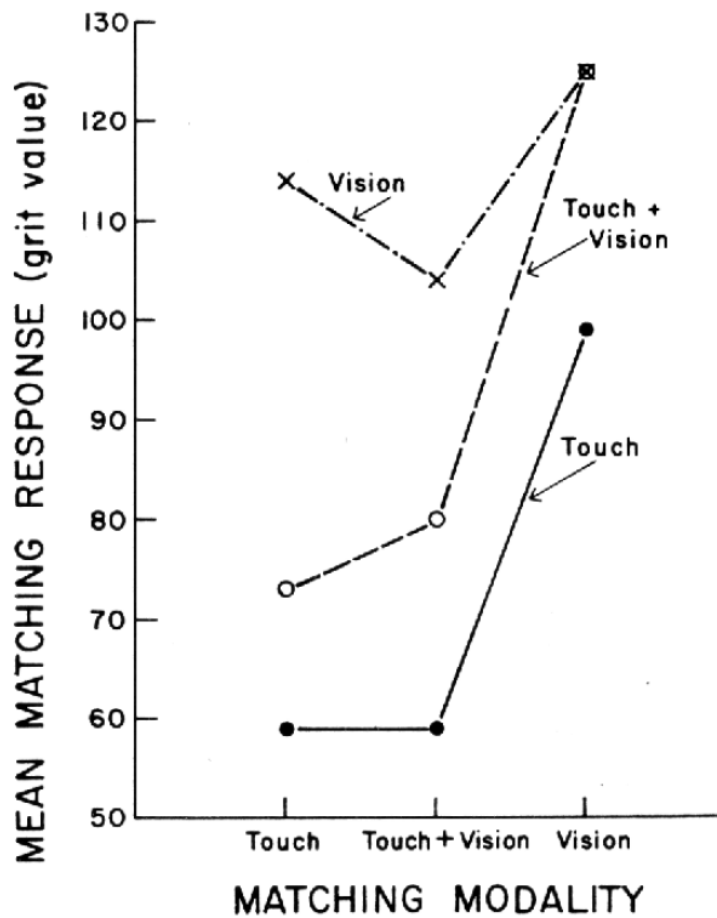


図 2 Lederman and Abbott (1981) のサンドペーパーのマッチング課題の結果。視覚 (Vision)、触覚 (Touch)、視触覚 (Touch + Vision) 条件にて標準刺激を呈示後、視覚、触覚、視触覚条件 (MATCHING MODALITY) で 9 つの比較刺激から選んだ。各折れ線グラフは、矢印に書かれている感覚様相の標準刺激に対する評定値を表す。比較刺激を選ぶ条件に限らず、視覚の標準刺激が一番高く、触覚の標準刺激が一番低く評価され、視触覚の標準刺激は、それらの評定値の中間値を取るよう

に評価された (Lederman & Abbott, 1981, p.907, Fig. 2 引用).

間密度を答えさせると $H[V]=6.8\%$ 、 $V[H]=76.3\%$ と触覚による影響が小さく、視覚による影響が大きくなった。この結果は、答えさせる刺激特徴によって感覚様相に対する重み付けが変化することを示唆する。Eck, Kaas, Mulders, and Goebel (2013) は粒

子を規則的に縦横に並べて統制された刺激を用いて、視覚、触覚、視触覚条件で粗さ評定を行わせた。Eck et al. は視触覚の結果と触覚のみの結果が同様であり、視触覚の粗さ知覚では視覚情報が重視されていないことを示した。Drewing, Ernst, Lederman, and Klatzky (2004) はハーフミラー上に粒子状の視覚刺激を映し、ハプティクスデバイスによって、視覚刺激の粒子を触っているような触覚刺激を呈示する環境を作り、視触覚の粗さ知覚を調べた。視触覚と視覚の粗さ評定が触覚の粗さ評定に比べて高くなり、視触覚の粗さ知覚では視覚情報を重視していることを示す結果になった。ただし各個人の標準誤差の平均を3条件で比較すると、視触覚の標準誤差が他の2条件の標準誤差と比べて小さくなったことから、視覚より視触覚の方が正確に判断出来ると言える。Guest and Spence (2003) は視覚、触覚、視触覚で2区間強制選択による布の粗さ弁別実験を行った。一部の刺激の組み合わせで、視触覚条件の感度が視覚条件の感度より大きくなったが、それ以外の組み合わせで感覚様相の条件間の差は無かった。つまり視触覚での弁別では触覚情報が主に重視されていることを示す結果となった。ただし、視触覚の弁別の精度は、単感覚様相時の精度と比べて向上しているとは言えない結果になった。聴触覚の粗さ知覚については、Lederman (1979) によって触覚刺激の粗さを評価する際、擦った音による粗さ知覚への影響は無いことが示唆された。しかし Lederman, Klatzky, Morgan, and Hamilton (2002) では、プローブを用いて凸凹状の表面を擦りながら聴触覚で粗さ判断をさせた結果、触覚 62.0%、聴覚 38.0%の重み付けであったことが示された。このように粗さ知覚における各感覚様相の重み付けは、研究によって異なる。

研究によって重み付けが異なるのは、タスクの違い、用いる刺激の種類や教示の仕方など実験環境によるものだと考えられる。例えば Lederman and Abbott (1981) では同定課題やマグニチュード評定を、Jones and O'Neil (1985) では異同判断課題 (same-different) などの弁別実験が行われているが、いずれも感覚様相の条件間の差は見られ

なかった。また Lederman et al. (1986) では、サンドペーパーを用いて粗さや密度を答えさせると、レイズドドットを用いた時の結果とは異なる結果が得られた (粗さ: $H[V] = 69.0\%$, $V[H] = 31.0\%$; 密度: $H[V] = 51.0\%$, $V[H] = 49.0\%$)。Lederman et al. はサンドペーパーの方がレイズドドットと比べて粒子が細かく、視覚的に判断するのが難しいことから、刺激間で結果の違いが生じたと考察している。Guest and Spence (2003) で用いられた布も網目が細かいため、視覚情報による影響が生じなかったと考えられる。

また音による粗さの影響 (Lederman et al., 2002) については、指で擦った音よりも道具を用いて擦った音の方が大きいため、粗さ判断時に聴覚情報にも重み付けが生じたと考えられる。音による乾湿感への影響を示した羊皮紙錯覚 (parchment skin illusion, Jousmäki & Hari, 1998) は音圧の増減で乾湿感が変化する錯覚であるが、Guest, Catmur, Lloyd, and Spence (2002) では羊皮紙錯覚と同様の結果がサンドペーパーを用いた粗さ評定で得られている。このように実験環境の様々な要因によって、重み付けの変化は生じていると考えられる。

2.2 多感覚統合における様々な性質知覚について

前節では、刺激に対して1つの質感属性を知覚する場面を述べてきた。しかし我々の身の回りにある物体には粗さだけではなく、硬さや光沢といった様々な性質を持ち、人間は瞬時にそれらを知覚する。多感覚統合場面で複数の性質について同時に調べ、各性質の知覚がどの感覚様相の情報に基づいて行われるか調べる研究が現れている。

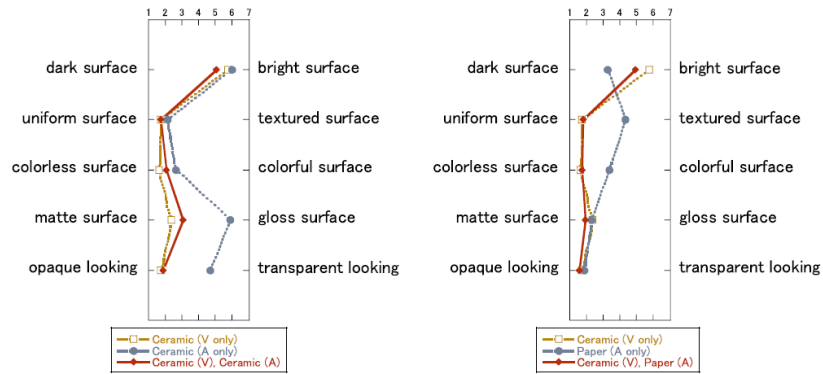
谿・藤原・竹本・飛谷・井村・長田 (2018) は凸凹の模様をつけるシボ加工を施した刺激を用いて、視覚に関連する「規則的な」、触覚に関連する「でこぼこした」、そして視覚と触覚に関連のない「若々しい」という性質項目に対して視覚、触覚、視触覚条件で7段階評価実験を行った。視触覚の評定値を目的変数、視覚のみの評定値と触覚のみの評定値をそれぞれ従属変数とする重回帰分析を各項目で行い、視覚のみの偏

回帰係数を触覚のみの偏回帰係数で割った V/T 比を求めた。その結果、「規則的な」
「若々しい」は視覚情報優位、「でこぼこした」は触覚情報優位であることが示された。
「規則的な」、「でこぼこした」ではそれぞれ関連する感覚様相が優位に参照されてい
る。また「若々しい」では視覚情報が優位であったが、肌の若々しさといったように
見た目から受ける印象を感じさせるため、何かしらの視覚的特徴が用いられた可能性
がある。

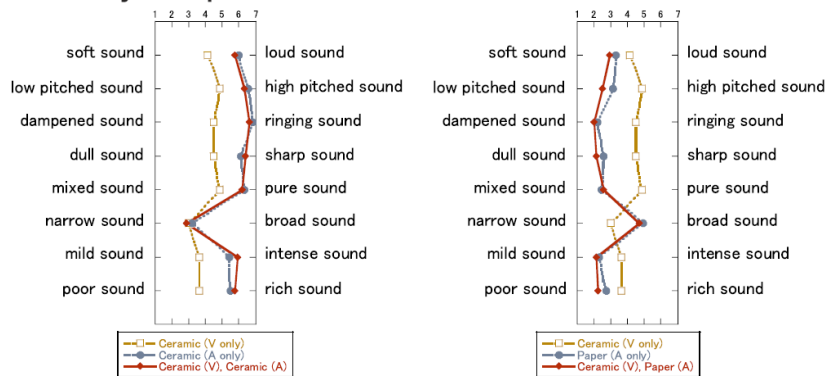
Fujisaki et al. (2014) は、6 種類の素材を打撃する動画と 8 種類の素材の打撃音を用
いて視聴覚における性質知覚を調べた。刺激の組み合わせが自然であるとき、視聴覚
の視覚的性質は視覚情報、聴覚的性質は聴覚情報を主に参照して知覚され、触覚的性
質や感性的性質は、視覚情報と聴覚情報の均等に近い重み付けで知覚された (図 3)。
Martín, Iseringhausen, Weinmann, and Hullin (2015) は触覚的性質 (粗さ, 硬さ, 温度),
視覚的性質 (光沢, 複雑さ, 色合い), 感性的性質 (高級感, 新しさ, 自然さ, 美しさ)
を評定させ、視聴覚での各性質の知覚において、視覚情報と聴覚情報のどちらが優位
であるかを調べた。粗さ, 硬さ, 複雑さ, 新しさ, 美しさについては、視覚情報より
も聴覚情報を優位に参照していることが示された。また、視覚刺激と聴覚刺激が異な
る素材となる場合も含めた様々な素材の組み合わせで、粗さ, 硬さ, 温かさ, 新しさ,
美しさについて評価させた。その結果、粗さと硬さでは、刺激の組み合わせに関係な
く聴覚情報優位であることが示唆された。

谿ら (2018) や Fujisaki et al. (2014) では、特定の感覚様相と関係のある性質につい
て、その感覚様相の情報を重視して知覚されている結果が見られた。一方で Martín et
al. (2015) では視聴覚で視覚的性質であるのにも関わらず聴覚情報に大きく重み付け
されるものもあった。刺激が呈示されていない感覚様相に関する性質や感性的な性質
では、研究間で重み付けが異なっていた。粗さ研究同様に、刺激の呈示方法の違い、
用いた素材の種類や分析の仕方の相違、といった複数の要因によって重み付けの違い

a) Visual Properties



b) Auditory Properties



c) Other Properties

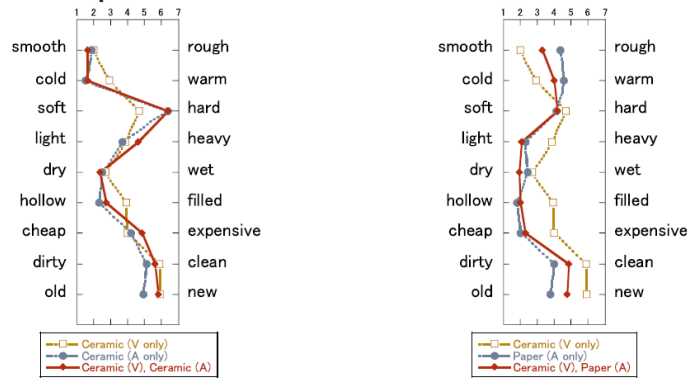


図 3 Fujisaki et al. (2014) の性質知覚の結果。視聴覚条件の結果 (赤線) について、視覚的性質 (Visual Properties) での評定値は視覚条件 (黄線)、聴覚的性質 (Auditory Properties) の評定値は聴覚条件の評定値 (青線) と同様になった。一方、触覚的・感性的性質 (Other Properties) では、視覚・聴覚条件の評定値の中間を位置する値となった (Fujisaki et al., 2014, p. 15, Fig. 12 引用)。

が生じていると考えられる。

2.3 多感覚の素材カテゴリー知覚について

性質と素材カテゴリーには密接な関係があると考えられており (Fleming, Wiebel, & Gegenfurtner, 2013), 我々は様々な性質から素材を識別すると考えられている。Fujisaki et al. (2014) では視聴覚の素材カテゴリー知覚は、視覚及び聴覚の素材カテゴリー知覚に基づいて行われていることが示唆された。例えば「鉄」、「ガラス」、「陶器」の項目の評価が高い聴覚刺激と「陶器」、「プラスチック」の項目の評価が高い視覚刺激を同時呈示すると、両方の刺激で評価の高い「陶器」が高く評価された (図 4 上)。Fujisaki et al. はこの結果を、各感覚様相の結果の乗算を取ったような結果であると表現している。ただし、どのような刺激の組み合わせでも乗算を取ったような結果が得られるわけではなく、「木」の項目の評価が高い視覚刺激と、「ガラス」、「陶器」、「鉄」の評価が高い聴覚刺激を同時呈示すると、「ガラス」、「陶器」、「鉄」の項目が高く評価され、聴覚情報が重視された結果が得られている (図 4 下)。

Fujisaki et al. (2014) は刺激の組み合わせの「自然さ」という項目を各刺激で参加者に評定させた。この「自然さ」の評定値で3つの刺激群に分けて、刺激群ごとに視聴覚の評定値を目的変数、視覚の評定値、聴覚の評定値、及び視覚と聴覚の評定値の積をそれぞれ従属変数とした交互作用モデルによる重回帰分析を行った。その結果、「自然さ」が低い刺激群であると交互作用モデルの説明力が低下することを示した。つまり刺激の組み合わせが自然であるとき、各感覚様相の結果の乗算を取る傾向が見られるが、不自然であるとその傾向があるとは言えない結果になった。

多感覚統合における素材カテゴリー知覚については、Fujisaki et al. (2014) の視聴覚に関する知見しか存在せず、視触覚、聴触覚といった他の感覚様相の組み合わせについては知見が得られていない。Fujisaki et al. (2014) が示した素材カテゴリー知覚・性

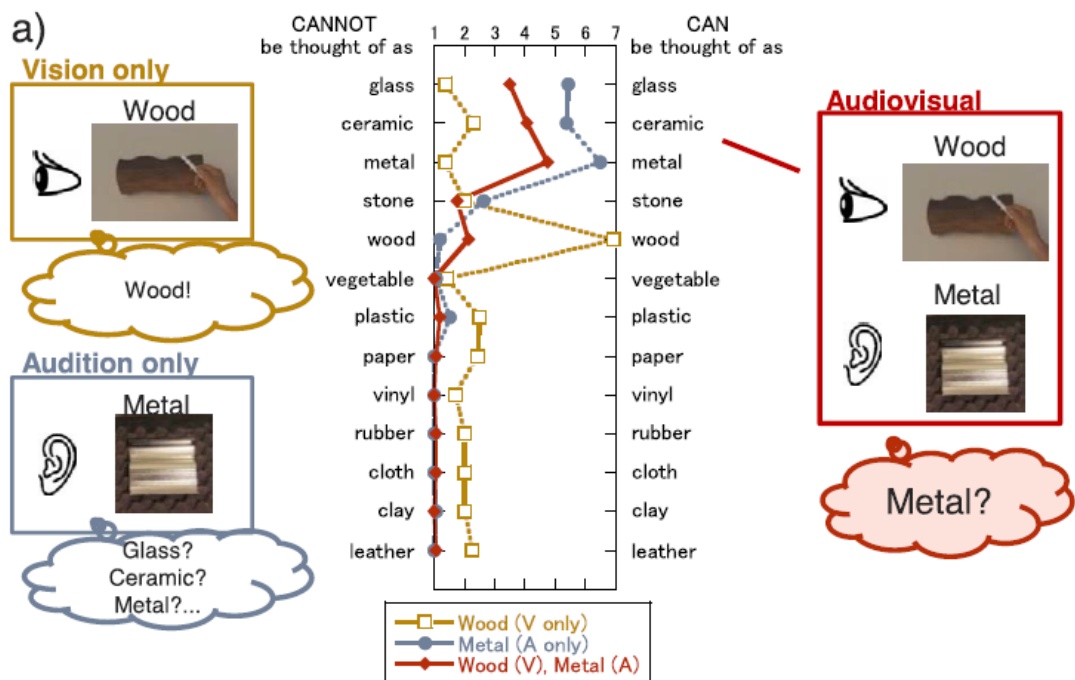
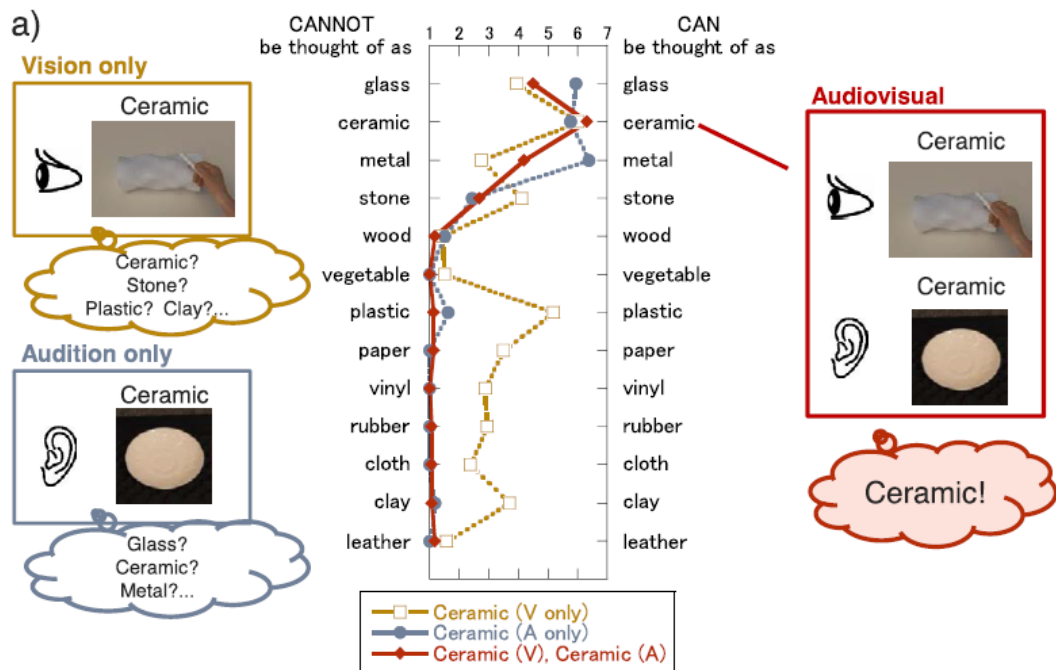


図 4 Fujisaki et al. (2014) の視聴覚の素材カテゴリー知覚の結果。上図では視覚と聴覚の知覚内容の共通項目である「陶器」が高く評価される結果となった。一方、下図の視聴覚の結果は、聴覚の知覚内容が反映されるような結果となった (Fujisaki et al., 2014, p. 9, Fig. 5, p. 12, Fig. 8 一部引用)。

質知覚の結果の傾向が感覚様相の組み合わせに関係なく見られるか調べることで、質感認知が1つのメカニズムで行われているかを明らかにするだろう。

2.4 質感の多感覚統合に関するモデル

Lederman and Klatzky (2004) は多感覚の粗さ知覚研究について解説し、それらを説明するモデルや仮説についても触れている。Lederman and Klatzky (2004) が触れた仮説の1つとして、多感覚統合時のあるタスクに対して適切だと思われる感覚様相が重視される、というモダリティ適切性仮説 (modality appropriateness hypothesis) がある (Welch & Warren, 1980)。例えば、Lederman et al. (1986) のように空間密度を答える際には視覚、粗さを答える際には触覚が重視されるように、タスクによって適切な感覚様相が選ばれる。また用いる刺激によって結果が異なるのも、この仮説で説明可能である。例えばサンドペーパーや布といった細かな粗さの知覚は触覚情報重視、レイズドドットのような凸同士の間隔が大きい粗さの知覚は視覚情報も関わる、と考えられる。谿ら (2018) や Fujisaki et al. (2014) の特定の感覚様相と関係のある性質には、その感覚様相が重視されるという結果も、モダリティ適切性仮説に従えば適切な感覚様相が選ばれたことによって得られたと考察できる。

ただしこの仮説だけでは、音圧増減によって生じる音による粗さ知覚への影響、といった説明できない知見が存在する (Lederman, 1979; Lederman et al., 2002)。Lederman and Klatzky (2004) は、ある知覚におけるその感覚様相の情報の利用しやすさを表す知覚利用可能性 (perceptual accessibility) を用いて重み付けの変化を説明した。例えば、そのタスクに相応しい感覚様相の情報よりも、別の感覚様相の情報の知覚利用可能性が大きい場合、後者の感覚様相に大きく重み付けがされる。Lederman (1979) と Lederman et al. (2002) については、通常粗さ知覚では触覚に大きく重み付けがされるが、プローブのような道具によって擦る音が大きくなることで聴覚情報が目立ち、そ

の結果，聴覚にも重み付けがされたと説明できる．他にも Eck et al. (2013) の視触覚の粗さ知覚が触覚条件の結果と同様であることも，知覚利用可能性によって説明できる．Eck et al. が用いた刺激は，先行研究で用いられたレイズドドットよりも粒子が規則正しく縦横に整列された刺激であった．この規則性によって刺激の空間密度が強調されたため，視覚と触覚の粗さ情報が独立して処理され，視触覚の粗さ知覚で触覚情報が重視された可能性がある．Lederman and Klatzky (2004) は，モダリティ適切性仮説と知覚利用可能性を用いて，実験環境による重み付けの変化を説明するモデルを提唱した (図 5)．このモデルは，質感認知の重み付けの変化が実験環境によって変化することを説明した．

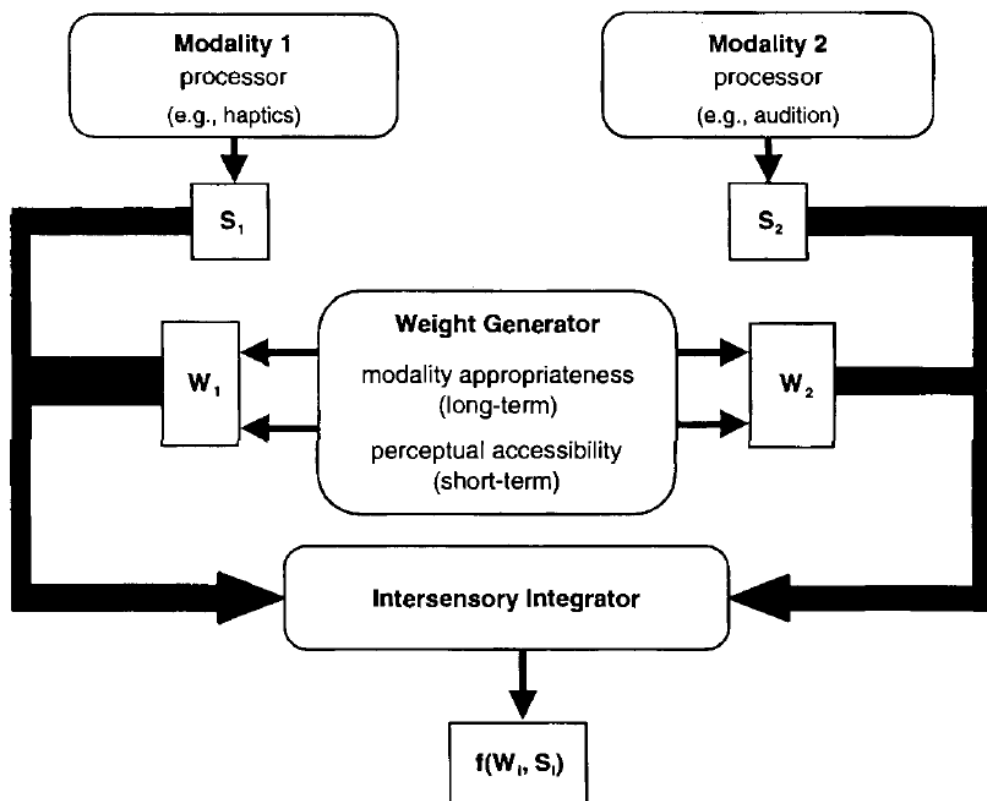


図 5 Lederman and Klatzky (2004) が提唱したモダリティ適切性 (modality appropriateness) と知覚利用可能性 (perceptual accessibility) を組み合わせた多感覚における粗さ知覚のモデル (Lederman & Klatzky, 2004, p.117, Fig. 7.5, 引用).

2.5 線形統合モデル (linear integration model)

前節で述べた Lederman and Klatzky (2004) のモデルには、重み付けを定量的に予測できないという欠点が存在する。定量的に重み付けを表すモデルとして、線形統合モデル (linear integration model) がよく用いられる。

$$\hat{R} = \sum_i R_i W_i \quad (1)$$

式 (1) は、加重平均モデルを示している。 \hat{R} は最終的な推定結果、 i は特定の感覚様相を表し、 R_i はその感覚様相の推定結果、 W_i はその感覚様相の重み係数となる。Jones and O'Neil (1985) では視触覚の弁別の結果が、視覚と触覚の結果の算術平均によってよく説明されると記述されているが、このことは加重平均モデルの重み付けが均等である場合を表していると言える。ただしこのモデルだけでは、重み付けの変化が何故生じるのか説明できない、またその変化を定量的に表すことが出来ない等の欠点がある。

2.6 最尤推定モデル

Lederman and Klatzky (2004) のモデルによって、実験環境で重み付けが定まることを説明し、線形統合モデルによって重み付けを定量的に表すことが可能になった。しかしこれらのモデルには、重み付けの変化を定量的に表せない、という問題点がある。Ernst and Banks (2002) はベイズの定理に基づいた最尤推定モデルによって、重み付けの変化を定量的に表した。 S を感覚様相の刺激、 i を特定の感覚様相、 f_i を関数とすると、推定結果 \hat{S}_i は以下の式で表される。

$$\hat{S}_i = f_i(S) \quad (2)$$

各感覚様相の推定のノイズが互いに独立かつ、正規分布の分散 σ_i^2 とすると、最尤推

定より各感覚様相の重み係数 W_i 、及び最終的な推定結果 \hat{S} はそれぞれ

$$W_i = \frac{\frac{1}{\sigma_i^2}}{\sum_j \frac{1}{\sigma_j^2}} \quad (3)$$

$$\hat{S} = \sum_i W_i \hat{S}_i \quad (4)$$

で表される。また最終的な推定結果 \hat{S} の分散 $\hat{\sigma}^2$ は、以下の式で求められ、各感覚様相の分散よりも小さくなる。

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (5)$$

図 6 は式 (2) ~ (5) を視覚及び触覚で説明した図になる。図 6 (a) では、視覚と触覚の分布の標準偏差が同じであり、各感覚様相の重み係数の比が均等になっている。一方、図 6 (b) では、触覚の分布の標準偏差が、視覚の分布の標準偏差より小さくなっているため、触覚情報の方が視覚情報より信頼でき、触覚の重み係数が視覚の重み係数より大きくなっている。

Ernst and Banks (2002) は視触覚のサイズ弁別を最尤推定モデルによって説明した。視覚、触覚、視触覚でサイズ弁別を行い、視覚刺激上にノイズとなるランダムドットを 4 条件 (0%, 67%, 133%, 200%) で呈示し、視覚刺激に対する信頼度が低下するように設定した。その結果、視触覚条件の閾値はノイズが少ないと視覚条件の閾値に近い値を取り、ノイズが増えるほど触覚条件の閾値に近づくような値になった。視覚の方が触覚に比べて大局的に物を把握出来るため、形の判別に優れているとされる (Baumgartner, Wiebel, & Gegenfurtner, 2013)。そのためノイズが少ないときは視覚情報に大きな重み付けがされていた。しかし、視覚刺激にノイズが増えるほど視覚情報に対する信頼度が触覚情報に比べて低下していき、触覚情報に大きな重み付けがされたと考えられる。各感覚情報に対する重み付けの変化は、各感覚様相への信頼度、つま

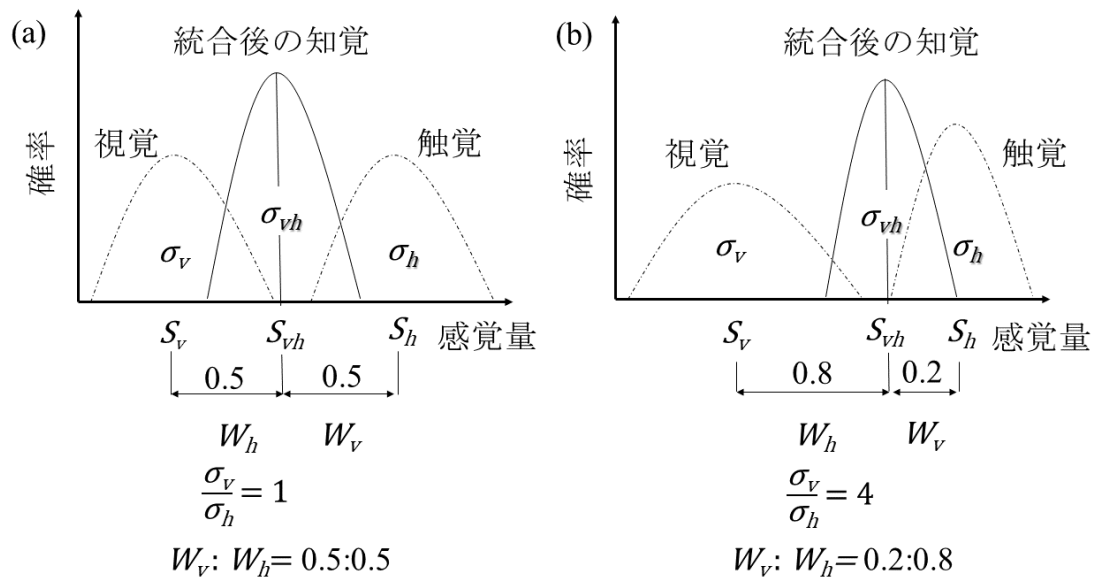


図 6 Ernst and Banks (2002) の最尤推定モデル。視覚刺激及び触覚刺激の閾値（視覚： S_v ，触覚： S_h ）を平均とする視覚及び触覚の分布をかけ合わせると，視触覚の分布が形成される。視触覚の分布の平均値（ S_{vh} ）及び標準偏差（ σ_{vh} ）は，視覚及び触覚の分布の標準偏差（視覚： σ_v ，触覚： σ_h ）によって決まる。(a) と (b) が表すように，視覚と触覚の標準偏差の値の比によって，各感覚情報の重み付けの比（ $W_v : W_h$ ）が変わる（小野・森，印刷中，図 1 引用）。

り標準偏差によって説明がされた。この最尤推定モデルは，サイズ (Ernst & Banks, 2002; Helbig & Ernst, 2008)，形 (Helbig & Ernst, 2007)，傾き (Knill & Saunders, 2003)，近接 (Gepshtein et al., 2005)，定位 (Körding et al., 2007) といった様々な知覚の多感覚統合を良く説明し，我々は様々な特徴の知覚を最尤推定のような統計的推論に基づいて行っていると考えられている。

Fujisaki et al. (2014) の視聴覚の素材カテゴリー知覚で見られた，視覚と聴覚の素材カテゴリー知覚の結果の乗算を取るような処理は，正に最尤推定である。視覚と聴覚の素材カテゴリー知覚の乗算を取り，1つの項目が一意に知覚される結果は，2つの分布の積を取ることで，分散が小さい（ノイズが少なくなる）尤もらしい分布が形成さ

れる最尤推定によって得られた、と考えることは出来る。性質知覚の場合は、直接尤もらしさを答えておらず、その性質の度合いを評価しているため、信頼度（尤もらしさ）によって、各感覚様相の評定値に重み付けが行われ、足し合わせた結果が得られる。このように素材カテゴリー知覚、性質知覚ともに最尤推定モデルを用いて説明することは可能である（西田・藤崎, 2016）。

西田・藤崎（2016）は腹話術錯覚の定位変化が特定の感覚様相によるものではないこと（Alais & Burr, 2004）から、ある質感属性の知覚は特定の感覚様相に依存せず、その時の信頼度の高い感覚様相に大きな重み付けがされると考察している。これまで述べてきた様々な質感研究にこの考え方を当てはめると、実験環境によって各感覚様相の信頼度が決定し、各感覚情報に対する重み付けが決まると言える。

ただし、最尤推定モデルにも欠点が存在する。第一に、Ernst and Banks (2002) の最尤推定モデルは、弁別閾が計算可能なタスクでしか適用できないという点である。各感覚様相への重み付けが信頼度に依存する、という点が様々なタスクの説明にも当てはまりそうではあるが、マグニチュード評定のような弁別閾を求めないタスクであると、Ernst and Banks (2002) のモデルを用いることが出来ない。次に、一部の質感属性の多感覚統合について、最尤推定モデルでは上手く説明できないという点である。視触覚の硬軟弁別で、最尤推定モデルから予測される視覚の重み付けよりも実験の値から求められる視覚の重み付けのほうが高くなり、予測と実験の値が一致しないことが示されている（Cellini et al., 2013; Kuschel et al., 2010）。そのため、質感認知を説明するモデルとして最尤推定モデルが適切かは未だ不明である。

2.7 ベイズ推定・アンチベイズ推定

これまでは、複数の刺激が同時に呈示された場面についての知見とモデルを説明してきた。しかし、我々の日常では物体を見てから触るように、ある感覚様相の刺激が

与えられた後に、別の感覚様相の刺激が与えられて知覚する場面が多い。本節では文脈情報による質感属性の知覚への影響について説明する。Yanagisawa and Takatsuji (2015) は視覚情報から想像される手触りによる触覚刺激の性質知覚への影響（期待効果）が生じることを示した。Yanagisawa and Takatsuji はハーフミラーを用いることで、触覚刺激に視覚刺激を重畳させる環境下で、参加者に視覚刺激を観察させながら、触覚刺激を触らせた。この状況下における様々な刺激の組み合わせで、視覚刺激に対する期待が及ぼす触覚刺激の性質知覚への影響について調べた。その結果、一部の組み合わせで視覚刺激による期待が、触覚刺激の性質知覚に影響を及ぼした事が確認された。期待効果については、予測通りに影響が出る場合と、予測と反対方向に影響が出る場合の2種類の効果があった。

Ho et al. (2014) は温度ディスプレイを用いて、赤や青の色による温度知覚への影響について調べた。Ho et al. は温度ディスプレイに色を付けた場合と、参加者の手に色を投射した場合で、温かいと思える温度の閾値を調べた。温度ディスプレイに色をつけた場合だと、赤の方が青の方よりも閾値が高くなり、手に投射した場合には、青の方が赤の方よりも閾値が高くなった。Suzuishi et al. (2020) は、ディスプレイの画面上部に視覚刺激である正弦格子縞を呈示しながら、参加者にディスプレイの奥にある触覚刺激のサンドペーパーに対する粗さ評定を行わせた。視覚刺激は静止画条件、手の動きと一致する方向に動く条件、手の動きと不一致である方向に動く条件の3条件で呈示された。視覚刺激の動きと手の動きが不一致である時の粗さは、静止画である場合での粗さよりも滑らかに知覚された。この効果は、機械で手に触覚刺激を呈示すると生じないため、手と視覚刺激の動きの相互作用だけではなく、能動的に手を動かしているという情報も関係していることが示されている。

このように参加者が得た文脈情報による質感属性の知覚への影響を説明するモデルとして、ベイズ推定モデルが存在する。文脈情報 E 、感覚情報 S 、及び推定値 x とする

と、ベイズの定理から事後分布 $P(x|S,E)$ は、同時確率 $P(S,E)$ 、及び $P(x,E)$ と条件付き確率 $P(S|x,E)$ から

$$P(x|S,E) = \frac{P(S|x,E)P(x,E)}{P(S,E)} \quad (6)$$

と表される。この時、感覚情報 S は文脈情報 E に依存しないとすると

$$P(x|S,E) = \frac{P(S|x,E)P(x|E)P(E)}{P(S|E)P(E)} = \frac{P(S|x)P(x|E)}{P(S)} \quad (7)$$

と簡単化できる。 $P(S)$ は正規化定数として考えるため、事後分布 $P(x|S,E)$ は、文脈情報による推測から形成される事前分布 $P(x|E)$ と入力ノイズが入った感覚情報に基づく分布 $P(S|x)$ の積によって求められ、文脈情報による知覚への影響を説明することが可能になった。先述した最尤推定は、各感覚様相のノイズが互いに独立であるという仮定がされていた (2.6 最尤推定モデル参照)。しかし本節の最初に説明した通り、事前に与えられたある感覚情報によって別の感覚情報に基づく知覚に影響を及ぼす場面が存在し、各感覚情報が独立でないこともある。Ernst (2006) では、最尤推定モデルは文脈情報の影響を受けない感覚情報に基づく分布によって、事後分布が形成されるベイズ推定モデルと一致することが示唆されている。

Yanagisawa and Takatsuji (2015) の期待効果で、予測と同じ方向に影響が出る場合は、このベイズ推定的に処理が行われていると考えられる。一方で、Yanagisawa and Takatsuji (2015) の予測と反対方向に影響が出る場合や、Ho et al. (2014) や Suzuishi et al. (2020) の結果は、ベイズ推定とは異なる処理が行われていると考えられる。西田・藤崎 (2016) では、この予測とは異なる知覚がされる現象として、大きさ-重さ錯覚 (size-weight illusion) を紹介している (Flanagan & Beltzner, 2000)。形状、表面の素材、質量が同じで、異なるサイズの物体があるとする。参加者は見た目から、大きいサイズの物体の方が小さいサイズの物体より重いと推測する。しかし実際に持つと、2つの物体の重さは同じであるため、大きいサイズの物体の方が、小さいサイズの物体よりも軽く感じるという錯覚である。表面の素材の違いで同様の錯覚が生じる素材-重さ

錯覚 (material-weight illusion) も存在する (Ellis & Lederman, 1999). これらは, ベイズ推定とは反対方向の推定, つまりアンチベイズ推定 (Brayanov & Smith, 2010; Ernst, 2009) という考えで説明されている. Brayanov and Smith (2010) は, 感覚様相の情報にノイズが入っていることを想定したベイズ推定であるカルマンフィルタを用いて, アンチベイズ推定を数式的に説明した. 事前分布と感覚情報に基づく分布をそれぞれ正規分布 $N(\mu_E, \sigma_E^2)$, $N(\mu_S, \sigma_S^2)$ と仮定する. 式 (7) より事後分布 $P(x|S,E)$ は事前分布と感覚情報に基づく分布の積で表され, 事後分布を $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ と仮定した時, μ_x は以下の式で表される.

$$\mu_x = \left(\frac{\sigma_S^2}{\sigma_E^2 + \sigma_S^2} \right) \mu_E + \left(\frac{\sigma_E^2}{\sigma_E^2 + \sigma_S^2} \right) \mu_S \quad (8)$$

ここで感覚情報の予期せぬノイズを ε とする. ε は感覚情報に基づく分布の平均と事前分布の平均の差から求められ,

$$\varepsilon = \mu_S - \mu_E \quad (9)$$

となる. 式 (9) を μ_S の式に変形し, 式 (8) に代入すると以下の式になる.

$$\begin{aligned} \mu_x &= \left(\frac{\sigma_S^2}{\sigma_E^2 + \sigma_S^2} \right) \mu_E + \left(\frac{\sigma_E^2}{\sigma_E^2 + \sigma_S^2} \right) (\mu_E + \varepsilon) = \mu_E + \left(\frac{\sigma_E^2}{\sigma_E^2 + \sigma_S^2} \right) \varepsilon \\ &= \mu_E + K_\varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

K_ε はカルマンゲインと呼ばれ, K_ε が 0~1 の場合は, ベイズ推定のように事前分布と感覚情報に基づく分布の間に事後分布が位置する (図 7(a)). しかし K_ε が 1 より大きい値になると, ノイズによって事後分布が感覚情報に基づく分布を超すように位置する (図 7(b)). 8 歳以下のヒトは, 大人と異なり最適ではない推定を行うと示されており (Gori, Viva, Sandini, & Burr, 2008; Nardini, Bedford, & Mareschal, 2010), 図 7(b) の推定方法も一見, 最適ではない推定方法のように思える. しかし, 飽くまで最適な推定を行おうとして, 感覚情報のノイズによりベイズ推定で得られる結果とは反対となる

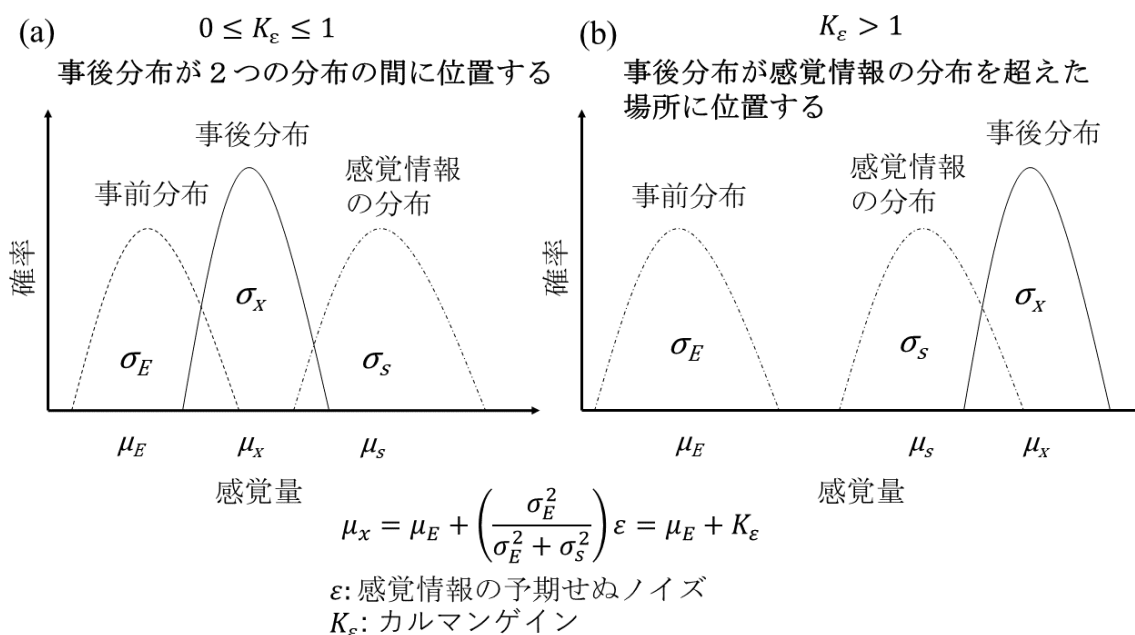


図 7 Brayanov and Smith (2010) のカルマンフィルタを用いたベイズ推定・アンチベイズ推定の説明. (a) K_ε が 0~1 取る場合は, 2つの分布の間に分布が形成される. (b) K_ε が 1 より大きい値を取る場合は, 感覚情報に基づく分布を超える位置に分布が形成される. (b) のような推定方法を, アンチベイズ推定と呼ぶ (小野・森, 印刷中, 図 2 引用).

結果となっているため, 図 7 (b) の推定方法も最適な推定方法の 1 つである. この推定方法をアンチベイズ推定と呼ぶ.

Suzuishi et al. (2020) の結果は, アンチベイズ推定で説明が可能であると考えられる. 手が視覚刺激と対立する方向に動いているため, 手に摩擦がかかると参加者は推測する. しかしサンドペーパーの粗さは変化しないので, 参加者は実物の粗さよりも滑らかであると評価したと言える. また西田・藤崎 (2016) は Ho et al. (2014) の結果を, アンチベイズ推定を用いて説明している. 温度ディスプレイに色をつけた場合, 赤の物体は温かく青の物体は冷たいと予想し, 予想に反して青に比べ赤の方が高い温度で反応したと考えられる. 一方, 手に色を投射した場合, 温度知覚が手と物体の相対的な温度差による熱伝導に依存するため, 赤を手に投射すると手が温かいので, 物体が

ある程度温かくないと熱が伝わらないと予測する。そのため予想に反して、青を投射した場合よりも低い温度で反応した、と考えられる (西田・藤崎, 2016)。

このように質感認知において、最尤推定モデル、ベイズ推定モデルやアンチベイズ推定モデルに関する知見が得られている。そのため、我々は質感を複数の感覚様相の情報に基づいた統計的推論によって認知し、統計的推論を行う機構を持つ可能性がある。ただし、素材カテゴリー知覚・性質知覚の統計的推論に関する知見は十分でなかったり、質感研究において最尤推定モデルやアンチベイズ推定モデルを否定する知見 (Cellini et al., 2013; Kuschel et al., 2010; Peters et al., 2016; Peters et al., 2018) が現れたりするため、統計的推論を行う機構が存在すると断定できないのが現状である。

2.8 視覚的気づきと両眼視野闘争

認知された質感は、物体認識、行動決定、価値判断など我々の活動に役に立つ。そのような活動を行うには、多くの場合、その対象物の存在や変化に気づく必要がある。例えば、物体の見た目がざらざらしていると認識した時、我々はその物体の表面をなぞるように触ろうとする。性質と手の動かし方には関係がある (Lederman & Klatzky, 1987) と示唆されており、我々は質感を基に行動をしていると言えるだろう。しかし、この触る動作に移るためには、我々が現在見ている対象物に気づくことが重要である。この何を見ているかを意識化する状態を視覚的気づき (visual awareness) と呼ぶ。

この視覚的気づきを調べる手法の1つとして、両眼視野闘争と呼ばれる現象を用いた実験がある (Crick & Koch, 1998)。両眼視野闘争とは、非類似の視覚刺激を左眼と右眼にそれぞれ分離して呈示した際に、片方の画像のみが知覚され、時間が経つと知覚内容が交替する現象のことである。このような非日常的な状況を敢えて作り、知覚内容に対応するボタンを押す、といった実験を行うことで、視覚的気づきの脳内処理メカニズムを調べることが可能になる (Alais, 2012)。

1980年代、両眼視野闘争は眼間抑制によるものだと考えられていた (Blake, 1989; Lehky, 1988; Varela & Singer, 1987; Wolfe, 1983; for a review, see Blake & Wilson, 2011). 眼間抑制は視覚経路の初期 (外側膝状体や第一次視覚野) で生じているとされ、多くの研究で両眼視野闘争の知覚交替はこれらの脳部位の活動と関連していると示された (Bartels & Logothetis, 2010; Haynes, Deichmann, & Rees, 2005; Polonsky, Blake, Braun, & Heeger, 2000; Quinn & Arnold, 2010; Stuit, Paffen, Van Der Smagt, & Verstraten, 2014).

しかし両眼視野闘争の知覚交替は眼間抑制だけでは説明できない。例えば、Logothetis, Leopold, and Sheinberg (1996) は両眼に分離呈示された刺激が 333 ms 毎に交替されても、知覚内容は刺激の呈示位置の交替とは関係なく、時間経過によって交替されたことを示した。また Kovács, Papathomas, Yang, and Fehér (1996) は2種類の画像の断片から作られた2つのパッチワークを両眼に分離呈示しても、両眼視野闘争は断片化する前の2種類の画像間で生じたことを示した。更に、行動実験 (Wolf & Hochstein, 2011) や脳研究 (Lumer, Friston, & Rees, 1998; Tong, Nakayama, Vaughan, & Kanwisher, 1998) で、両眼視野闘争は高次視覚野や前頭頂部の活動と関連することが示された。現在では、両眼視野闘争の知覚交替は複数の脳部位の活動と関連がある、と考えられている (Alais & Blake, 2014; Blake & Logothetis, 2002; Blake & Wilson, 2011)。

2.9 多感覚統合場面での両眼視野闘争

両眼視野闘争については、非視覚の感覚情報が知覚交替に影響を及ぼすことが複数の研究で示されている。例えば Chen, Yeh, and Spence (2011) は、聴覚刺激による知覚交替への影響を示した。Chen et al. は、鳥と車の画像を視覚刺激として用いた両眼視野闘争中に聴覚刺激を呈示し、優位に知覚される画像 (優位画像) を答えさせた (図8左)。聴覚刺激は画像の1つと関係する鳥の声や車のエンジン音と、2つの画像に関連のないレストランの環境音であった。図8右は、60秒の呈示時間中に各画像が優位

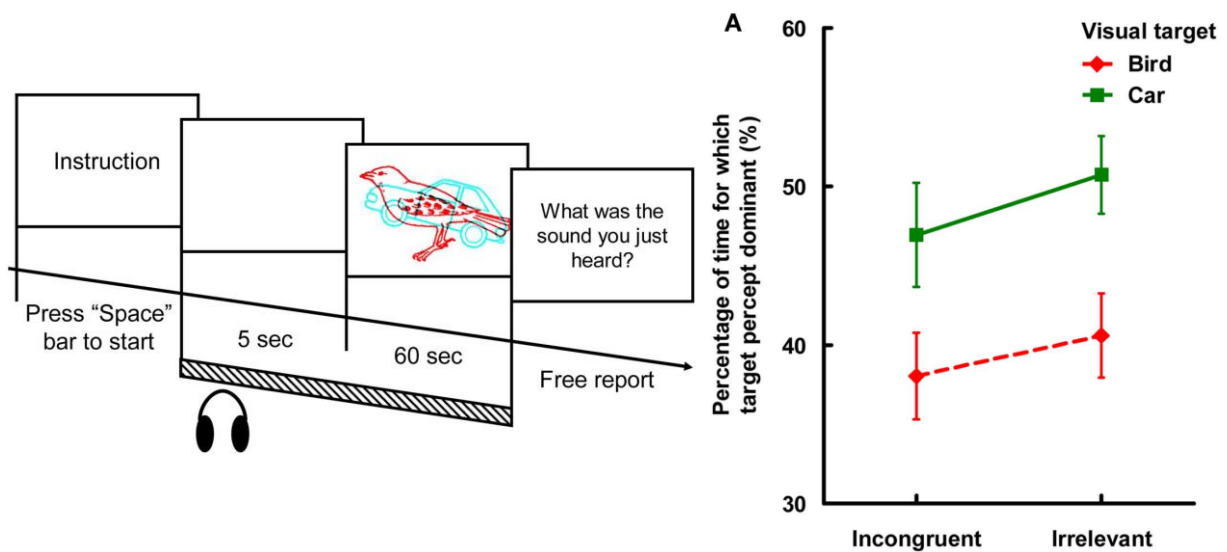


図 8 Chen et al. (2011) の両眼視野闘争の視聴覚相互作用実験. 左図は 1 試行の流れを表す. 右図は各画像で不一致 (incongruent, ターゲット画像ではない画像と関連する聴覚刺激を呈示した) 条件と無関係 (irrelevant, 視覚刺激に関係ない聴覚刺激を呈示した) 条件での 60 秒間で優位に知覚された時間の割合を比較した結果である. 画像に関係なく, 不一致条件の優位時間は, 無関係条件のそれと比べて短くなった (Chen et al., 2011, p.2, Fig. 1, p. 3, Fig. 2 一部引用).

に知覚された時間 (優位時間) の割合を, ターゲット画像と不一致である聴覚刺激を呈示した不一致条件 (incongruent) と, 2つの画像と関連しない聴覚刺激を呈示した無関係条件 (irrelevant) で比較した結果である. 不一致条件でのターゲット画像の優位時間の割合は, 無関係条件でのそれと比較して有意に小さくなった. このことから, 視覚刺激と一致する聴覚刺激を与えた時, 優位時間が長くなると言える. 同様の結果が, 音 (Conrad, Bartels, Kleiner, & Noppeney, 2010; Conrad, Kleiner, Bartels, O' Brien, & Bülthoff, 2013; Pápai & Soto-Faraco, 2017; Plass, Guzman-Martinez, Ortega, Suzuki, & Grabowecy, 2017), 匂い (Zhou, Jiang, He, & Chen, 2010; Zhou, Zhang, Chen, Wang, & Chen, 2012), 手の動き (Maruya, Yang, & Blake, 2007) など, 様々な非視覚の感覚様相

の情報によって得られている。

多感覚の相互作用による両眼視野闘争への影響について、触覚を用いた研究も存在する。van Ee, van Boxtel, Parker, and Alais (2009) は2つの視覚パターン（徐々に広がっていくリング状の円が定期的に呈示されるルーミング刺激と、円形の画像が時計回りに回転するローテーション刺激）の両眼視野闘争中に、ルーミング刺激の周期に一致した触覚振動刺激を呈示すると、ルーミング刺激の優位時間が増加したことを示した。van Ee et al. は振動刺激が両眼視野闘争を制御するための注意を促進すると主張した。Lunghi, Binda, and Morrone (2010) は参加者に直交する2つの正弦格子縞を分離呈示し、視覚刺激の片方に方位・空間周波数が一致する、表面が正弦格子縞状で円形のプラスチック素材で出来たプレキシガラスを触らせた。180秒間視覚刺激を観察させ、時々触覚刺激を呈示し、触覚刺激が呈示されてから呈示が終わるまでの間、知覚内容が維持されている割合、また交替する割合を求めた。その結果、視覚刺激の1つと、方位・空間周波数が一致する触覚刺激を呈示すると、その視覚刺激の知覚が維持される割合が上昇し、もう片方の視覚刺激に交替する割合が減少した（図9）。また空間周波数を変えて同様の実験を行い、触覚刺激による視覚刺激の抑制効果が視触覚の空間周波数に対して選択的であったことを示した。Lunghi and Alais (2013) は視触覚間の方位のずれが7.5°以上あると、視触覚相互作用による両眼視野闘争への影響が生じないことを示しており、触覚刺激による知覚交替への効果は方位に対して非常に選択的であると主張している。Lunghi and Morrone (2013) は視覚刺激と触覚刺激の呈示位置に水平方向30cmのずれがあると、触覚刺激の効果が現れないと示した。Lunghi and Alais (2015) や Lunghi, Lo Verde, and Alais (2017) は両眼視野闘争や連続フラッシュ抑制（片眼に短時間で激しく変化する画像を呈示し続けると、もう片方の刺激が抑制され続ける現象, Tsuchiya & Koch, 2005）中に、知覚が抑制されている視覚刺激と方位が一致する触覚刺激が、視覚刺激の抑制度合いを減少させることを示した。Lunghi

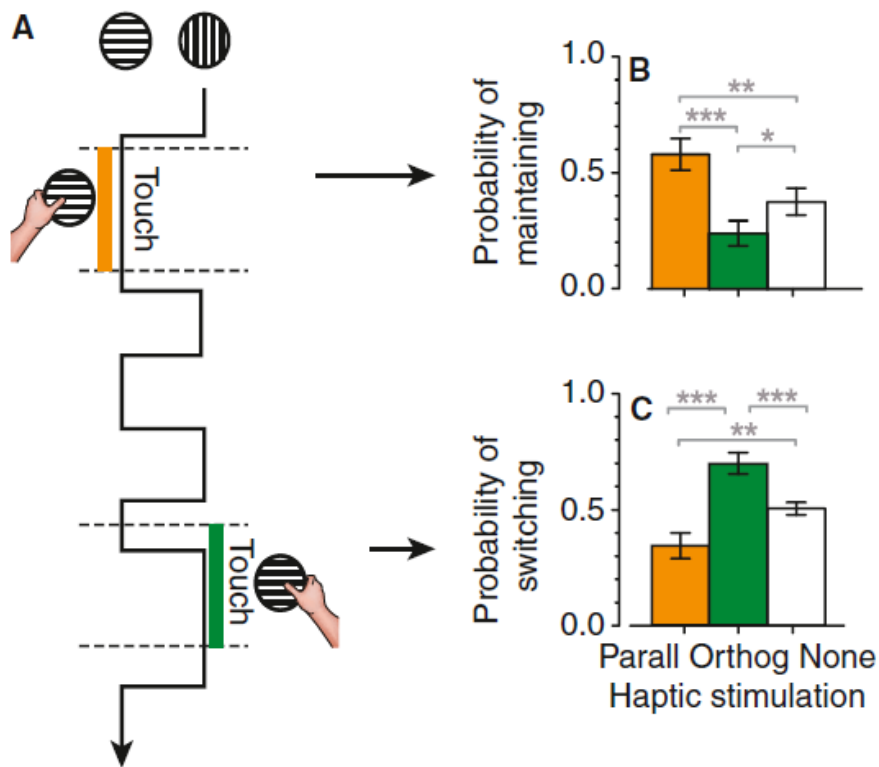


図 9 Lunghi et al. (2010) の実験結果. 180 秒間の両眼視野闘争中に, 触覚刺激が時々呈示される. 触覚刺激が呈示されてから呈示が終わるまで, 知覚内容が維持されている割合と, 交替する割合をターゲット画像の方位に対して, 視覚刺激と触覚刺激の方位が一致する条件 (Parallel), 視覚刺激と触覚刺激の方位が不一致である条件 (Orthogonal), 触覚刺激の呈示開始から 3 秒前をデータとして扱う条件 (None) の 3 条件で比較した (Lunghi et al., 2010, p.143, Fig.1 一部引用).

et al. の一連の研究は, 両眼視野闘争中の視触覚相互作用が, 初期の視覚野, 特に方位・空間周波数の選択性を持つ第一次視覚野 (V1) で生じていることを示唆している.

このように, 多感覚統合場面での両眼視野闘争実験によって, 非視覚の様々な情報が視覚的気づきに影響を及ぼす事が示されており, 一部の研究ではどのような情報の相互作用によって気づきやすくなるのか, ということが調べられている.

2.10 本論文での具体的な研究課題

本節では、これまで述べてきた先行研究から 2 つの問題点について説明をする。1 つ目は、Fujisaki et al. (2014) が示した視聴覚の素材カテゴリー知覚や性質知覚の結果が、その他の感覚様相の組み合わせでも見られるのか不明である、という点である。素材カテゴリー知覚については、Fujisaki et al. (2014) の視聴覚の結果しか示されておらず、それ以外の感覚様相の組み合わせでも同様の結果が得られるのか不明である。また Fujisaki et al. は、性質知覚が素材カテゴリー知覚とは異なる処理がされていることを示した。しかし、視触覚や聴触覚といった感覚様相の組み合わせでも同様の結果が得られるのか不明である。本論文の第 3 章では、研究 1 として視触覚での素材カテゴリー知覚、及び性質知覚について調べ、Fujisaki et al. と同様の結果が得られるのかを検討した内容を記述する。

2 つ目は、質感が視覚的気づきにどのような影響を及ぼすのか不明である、という点である。先述したように、質感に基づいて我々は様々な行動を行うことができる。我々の活動において、多くの場合、対象物に気づくことが重要であり、質感と視覚的気づきの関係を調べることは、質感を認知してから行動に移すまでの情報処理の解明に繋がる。Lunghi et al. (2010) によって、視覚刺激の特徴である方位・空間周波数の視触覚相互作用が、視覚的気づきに影響を及ぼす事が示された。本論文の第 4 章では、Lunghi et al. の研究を発展させ、研究 2 として触覚刺激の特徴の 1 つである粗さを用いて、質感属性が視覚的気づきに影響を及ぼすかを検討した内容を記述する。両眼視野闘争中に、画像の見た目の粗さと一致する触覚刺激を呈示することによって、優位時間が長くなれば、質感属性が視覚的気づきに影響を及ぼしたと言える。

これら 2 つの研究によって、質感が認知されるまでの情報処理、そして質感が認知されてから、我々が行動を移すまでの情報処理について、新たな知見を示すことが出来ると考えられる。本論文の第 5 章では、これらの研究を通して、明らかになった点

と今後の課題について記すことで、ヒトの情報処理の解明に向けた質感研究の展望を示す。

第3章 研究1：素材カテゴリー知覚及び性質知覚における視覚情報と触覚情報の相互作用の検討

3.1 目的

研究1では、視触覚の素材カテゴリー知覚及び性質知覚について、視聴覚同様の結果 (Fujisaki et al., 2014) が得られるか調べた。Fujisaki et al. (2014) では視聴覚の素材カテゴリー知覚が、各感覚様相の知覚内容を乗算したような処理によって得られていることが示唆された。ただし、交互作用モデルの重回帰分析によって、刺激の組み合わせが自然である時はその乗算の傾向が見られるが、自然でない時はその傾向が見られないことが示された。また性質知覚については、視覚的・聴覚的な性質では、それぞれ視覚情報や聴覚情報が重視され、それ以外の性質では、各感覚情報に対し均等に近い重み付けがされた。

素材カテゴリーと性質には密接な関係があると示されており (Fleming et al., 2013)、視触覚、聴触覚での性質知覚で統合処理が確認されているため、素材カテゴリー知覚でも何かしらの統合処理が確認される可能性がある。特に視覚と触覚の素材表象は生得的に類似しているため (Baumgartner et al., 2013; Baumgartner, Wiebel, & Gegenfurtner, 2015)、視覚と触覚の素材カテゴリー知覚は共通したメカニズムで処理されている可能性がある。また視触覚の性質知覚については、谿ら (2018) で特定の感覚様相に関する性質は、その感覚様相の情報を重視して知覚されることが示されている。ただし、谿ら (2018) では1つの素材を用いた実験が行われているため、複数の素材を用いて、異なる素材の組み合わせも含めた様々な刺激の組み合わせでも、その傾向が現れるかは不明である。

研究1では、視覚刺激と触覚刺激それぞれ6種類の素材の刺激を組み合わせ、視覚、触覚、視触覚において後述する13の素材カテゴリー項目、及び12の性質項目の7段階評価実験が行われた。それらの評価値を用いた交互作用モデルによる重回帰分

析を全刺激や、刺激の組み合わせの自然さで分けた刺激群ごとに行った。刺激の組み合わせや質感属性の種類，といった様々な観点から行った重回帰分析で，視触覚の素材カテゴリー知覚や性質知覚がどのようにして行われているかを明らかにした。

なお本章の内容は，筆者らが既に報告している研究成果（小野・森, 2022）に基づいている。

3.2 実験

3.2.1 方法

3.2.1.1 参加者

実験参加者は正常な視力もしくは矯正視力，及び正常な色覚を有した 24 名の九州大学の学生・大学院生（男性 7 名，女性 17 名，平均年齢 21.17 歳）であった。1 名の参加者を除いて全員，右利きであった。本実験は九州大学大学院システム情報科学研究院実験倫理審査委員会の承認を受けて行われた。また参加者には，実験前に実験内容の説明をし，同意を得た状態で実験を行った。

3.2.1.2 触覚刺激

触覚刺激は先行研究（Baumgartner et al., 2013; Fujisaki et al., 2014）を参考にして選んだ 6 種類の素材（木，布，石，プラスチック，革，鉄）の試験片であった。試験片は 1 辺 10cm の正方形であり，後述する触覚刺激呈示装置の台上に設置された。柔らかい素材である布，革は呈示中，参加者の指と試験片の表面の間に生じる摩擦によって動かないようにするために，それぞれ試験片の裏に両面テープを貼って台に固定された。

3.2.1.3 視覚刺激

視覚刺激は触覚刺激 6 種類の動画（試験片の視角：1 辺 28.07°，フレームレート：30 fps）であった。図 10 は、各視覚刺激の 1 フレーム目の画像である。図 10 のように、触覚刺激呈示装置の台に設置した試験片に実験者の左手人差し指を置き、台を動かしているところを視覚刺激呈示用のディスプレイの設置場所（図 11 (a)）から約 30 cm 離れた位置で動画を撮影した。動画は 7 秒間呈示され、最初の 1 秒では台が静止しており、残りの 6 秒では台が円形状に右回りで 2 秒に 1 回転した。



図 10 各視覚刺激の 1 フレーム目の画像 (小野・森, 2022, p. 415, 図 1 引用).

3.2.1.4 装置

実験プログラムは 2 つのパーソナルコンピュータ (Mouse Computer: LM-iG413XN-SH2; HP: L1G77AV) 上で、MATLAB 及び Psychtoolbox-3 (Kleiner, Brainard, & Pelli, 2007) により制御された。視覚刺激は図 11 (a) のように視覚刺激呈示用のディスプレイ

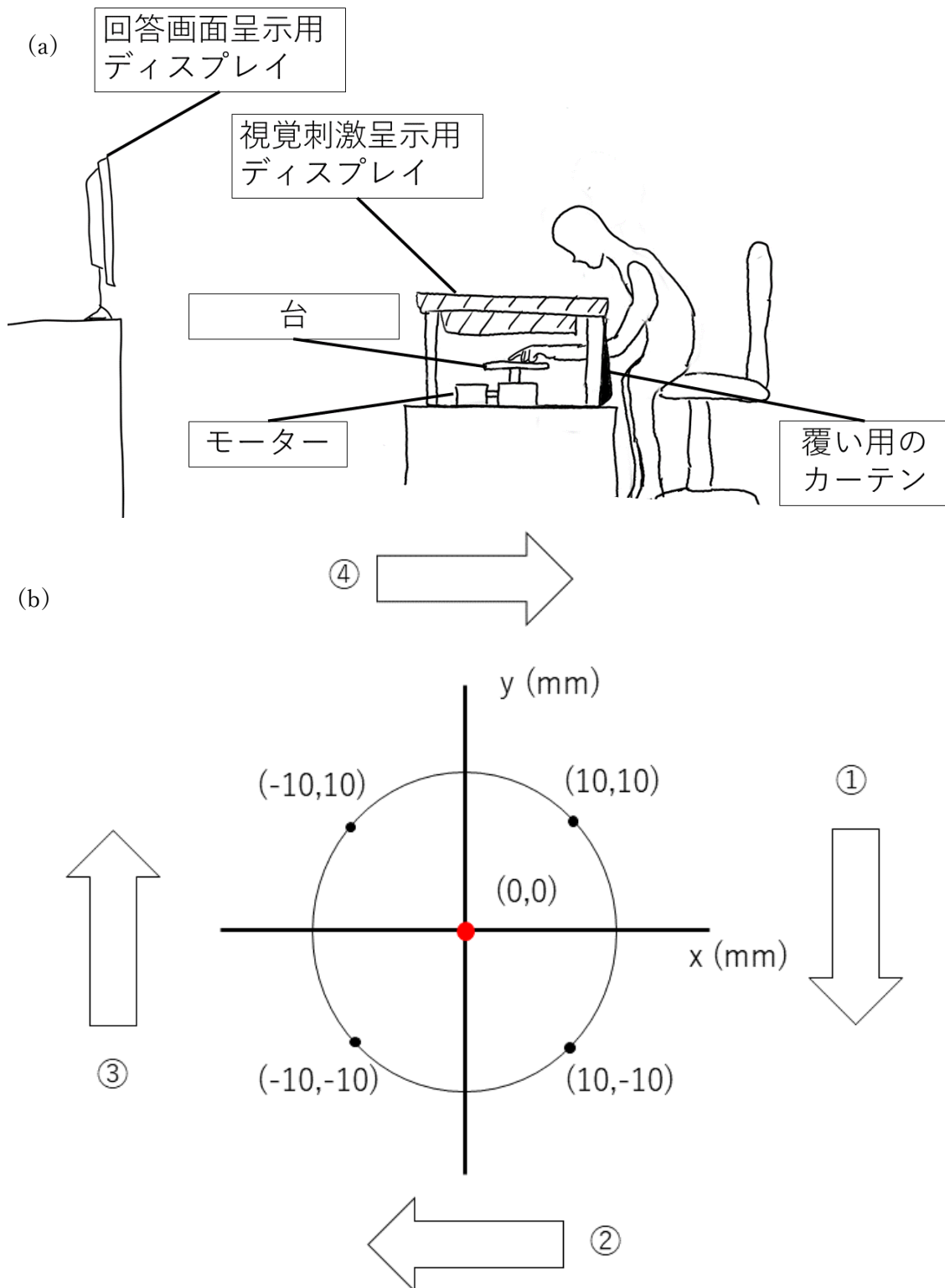


図 11 (a) 実験環境. (b) 触覚刺激呈示装置の台の動き (小野・森, 2022, p. 415, 図 2 引用).

(BenQ, 1920 × 1080 ピクセル, 60 Hz) 上に呈示され, 参加者は無線マウスを用いて回答を行った.

参加者の手の動かし方や触る速さに違いがないように, 特注の触覚刺激呈示装置を用いて参加者間で触覚刺激の呈示方法を統一した. 視覚刺激呈示用のディスプレイの真下に触覚刺激呈示装置は設置され, 2 軸のモータとそれにより水平方向に動く台から構成された. 図 11 (b) は台の 1 回転の動きを表している. 触覚刺激呈示装置の中心を原点 (0, 0) としたとき, (10, 10), (10, -10), (-10, -10), (-10, 10) と台の中心が半径 10 mm の円周上を移動するように台を動かし, 止まるまでこの動きを繰り返した. 参加者の左手人差し指は原点に置かれた. 参加者と台の間には覆いがあり, 参加者はカーテンの隙間から手を入れることで触覚刺激を見ることなく触った. また台と試験片の間には, 圧力センサ (FSR402) を設置した. 圧力センサのデータは, Arduino を介してパーソナルコンピュータ (Mouse Computer: LM-iG413XN-SH2) に送られ, 実験者は参加者が 0.4 ± 0.1 N で試験片を押していることを確認した.

視覚刺激と触覚刺激の時間的呈示と縦横の空間的呈示のずれについて, 事前に本研究とは無関係で知識が全くない学生 3 名に意見を貰い, 全員がずれを感じなかったことを確認した.

3.2.1.5 実験手続き

本実験は暗室内で 2 日に分けて行われた. 1 日目には視覚刺激のみを呈示する視覚条件と触覚刺激のみを呈示する触覚条件を行った. 2 日目には視覚刺激と触覚刺激を同時呈示する視触覚条件を行った. 視触覚条件を 2 日目に行った理由は, 参加者に長時間実験を行わせることによるパフォーマンス低下や, 予期せぬ組み合わせも含めた視触覚刺激を先に呈示することによって生じる視覚刺激や触覚刺激それぞれの評価への影響を防ぐためであった. また呈示する刺激の内容や, 2 日目に用いる視触覚刺激

の中には異なる素材の組み合わせがある事を参加者には一切知らせなかった。これについては、知らせることによって生まれる推測が結果に影響を及ぼすのを防ぐためであった。視覚条件と触覚条件の実施順序について、参加者間でカウンターバランスを取った。

視覚条件では、図 11 (a) のように参加者に対して垂直に置かれた黒背景 (輝度: 0.079 cd/m^2) の視覚刺激呈示用ディスプレイの中央に呈示された注視点 ($0.95^\circ \times 0.95^\circ$) を観察するように教示した。実験者がボタンを押してから 7 秒間、参加者は全画面に呈示された視覚刺激を観察した。その後、参加者は奥にあるディスプレイに呈示された回答画面を用いて、13 の素材カテゴリー項目 (ゴム, ガラス, 鉄, 布, 毛, 革, 木, 石材, プラスティック, 粘土, 陶器, ビニール, 紙) と 5 つの視覚的性質項目 (明暗, テクスチャ, 色合い, 光沢, 透明) 及び 7 つの触覚的性質項目 (粗さ, 乾湿, 温度, 凸凹, 摩擦, 重さ, 硬さ) にそれぞれ 7 段階評価で回答した。素材カテゴリー項目及び性質項目は先行研究 (Baumgartner et al., 2013; Fujisaki et al., 2014) を参考にして決められた。素材カテゴリー項目や性質項目の回答基準は、表 2 のように設定された。参加者には右手でマウスを操作してもらい、回答画面に呈示された各項目の隣に設置されているスライダーを動かすことで数字を変えて答えてもらった。1 刺激の呈示回数は 1 回であり、全試行数は 6 試行であった。刺激の呈示順序はランダムであった。

触覚条件では、実験者が試験片を触覚刺激呈示装置の台に置いた後、参加者に左手人差し指を試験片の上に置くように教示した。圧力センサで指の圧力が一定になったのを確認した後、実験者がボタンを押して台を動かし、参加者の左手人差し指に触覚刺激を 7 秒間呈示した。台の動きは、視覚刺激の台の動きと同様であった。台が動き出すまで視覚条件同様に注視点が呈示されており、参加者には注視点を観察するように教示した。装置が動いている間、ディスプレイには背景と同じ画面が呈示された。

表 2 素材カテゴリー項目及び性質項目の評価方法 (小野・森, 2022, p. 416, 表 1 一部改変).

回答項目		判定							
		非常に	やや	どちらでもない	やや	非常に			
素材カテゴリー	その素材に感	1	2	3	4	5	6	7	その素材
項目	じない								に感じる
性質項目									
明暗	暗								明
色合い	モノクロ								カラフル
粗さ	つるつる								ざらざら
乾湿	乾								湿
温度	冷								温
凸凹	平坦								凸凹
重さ	軽								重
自然さ	不自然								自然
それ以外の項目	なし								あり

触覚刺激について参加者は視覚条件同様に、素材カテゴリー項目と性質項目を右手によるマウス操作で回答した。回答終了後、実験者が試験片を取り替えて次の試行へと移った。1 刺激の呈示回数は 1 回であり、全試行数は 6 試行であった。刺激の呈示順序はランダムであった。

視触覚条件では、参加者にディスプレイ上の視覚刺激を観察させ、触覚刺激呈示装置によって左手人差し指に触覚刺激を呈示した。実験者がボタンを押すことで、視覚刺激と触覚刺激が同時に呈示され、7 秒間呈示された。呈示終了後、視触覚刺激に対

して 13 の素材カテゴリー項目と 12 の性質項目、及び 2 つの刺激の組み合わせが同一の物体と思えるか調べる「自然さ」の項目を追加した計 26 項目に対して、それぞれ 7 段階評価で右手によるマウス操作で回答してもらった。回答終了後、実験者が触覚刺激の入れ替えを行い、次の試行へと移った。1 刺激の呈示回数は 1 回であり、全試行数は 36 試行であった。刺激の呈示順序はランダムであり、同じ視覚刺激もしくは触覚刺激が 2 試行以上連続して呈示されることもあった。

触覚条件と視触覚条件では、台の動きが停止したら左手人差し指を台から離すように教示した。参加者が回答中に刺激の再呈示を求めた場合、その刺激の再呈示を何度でも行った。回答画面の素材カテゴリー項目と性質項目の並び順、及び各項目の評定用のスライダーの初期位置は各刺激でランダムに決められた。実験時間は視覚条件と触覚条件ではそれぞれ約 30 分であり、視触覚条件では 18 試行行った後、10 分の休憩を取り、残り 18 試行を行い、約 1 時間半であった。

3.2.1.6 データ分析

各刺激の項目ごとに 24 名分の評定値を平均し、素材カテゴリーでは 468 のデータ (36 刺激 × 13 項目)、性質知覚では 432 のデータ (36 刺激 × 12 項目) を用いて、視触覚の素材カテゴリー知覚及び性質知覚について、以下の交互作用モデルで重回帰分析を行った。

$$VH = \beta_0 + \beta_1 V_{only} + \beta_2 H_{only} + \beta_3 V_{only} \times H_{only} + e \quad (11)$$

VH は視触覚条件の評定値、 V_{only} は視覚条件の評定値、 H_{only} は触覚条件の評定値、 $V_{only} \times H_{only}$ は視覚と触覚の評定値の積を表す。 β_1 、 β_2 、 β_3 はそれぞれ視覚情報、触覚情報、視覚情報と触覚情報の交互作用の偏回帰係数、 e は誤差項になる。 β_3 に 0 との有意差があれば、視覚と触覚それぞれの評定値の乗算によって結果が得られていると言える。一方、 β_3 の値が 0 付近であれば評定値の乗算によって結果が得られている

とはいえ、加重平均で説明できることを意味する。この分析方法は Fujisaki et al. (2014) を参考にしており、分析に用いた評定値は $V_{only} \times H_{only}$ を他の変数と同じスケールで扱うために 0 ~ 1 の範囲に正規化した。また多重共線性の有無を確認する指標として VIF (Variance Inflation Factor) を用いて、 $VIF \geq 10$ であった変数は排除し再度分析を行った。

3.2.2 結果

3.2.2.1 素材カテゴリー知覚の評定結果

図 12 は刺激ごとに、24 名分の素材カテゴリー知覚の評定値を平均した結果を示している。各行が各視覚刺激、各列が各触覚刺激に対応しており、交差している要素は視触覚刺激として、対応する視覚刺激と触覚刺激を呈示した際の結果を表している。視触覚刺激の結果の多くが、対応する触覚刺激のみの結果と類似している。そのため、多くの視触覚刺激では、触覚情報を優位に参照して素材が知覚されていると考えられる。ただし「自然さ」の評定値によっては、触覚情報と視覚情報ともに参照されている結果を示す刺激の組み合わせも見られた。例えば、「自然さ」の評定値が小さい組み合わせである視覚刺激が木、触覚刺激が布での結果は（図 12 の上から 2 行目、左から 3 列目の赤枠のグラフ）、触覚刺激である布の結果と同様であった。同じく、「自然さ」の評定値が小さい組み合わせである視覚刺激が布、触覚刺激が木での結果は（図 12 の上から 3 行目、左から 2 列目の赤枠のグラフ）、触覚刺激である木の結果と同様であった。一方、「自然さ」の評定値が大きい組み合わせである視覚刺激がプラスチック、触覚刺激が鉄では（図 12 の上から 5 行目、左から 7 列目の赤枠のグラフ）、「ガラス」の評定値が高くなった。触覚刺激では「ガラス」、「プラスチック」、「陶器」の評定値が高く、視覚刺激では「ガラス」の評定値が高かった。そのため、共通項である「ガラス」の評定値が高くなったのではないかと考えられる。また同様に「自然

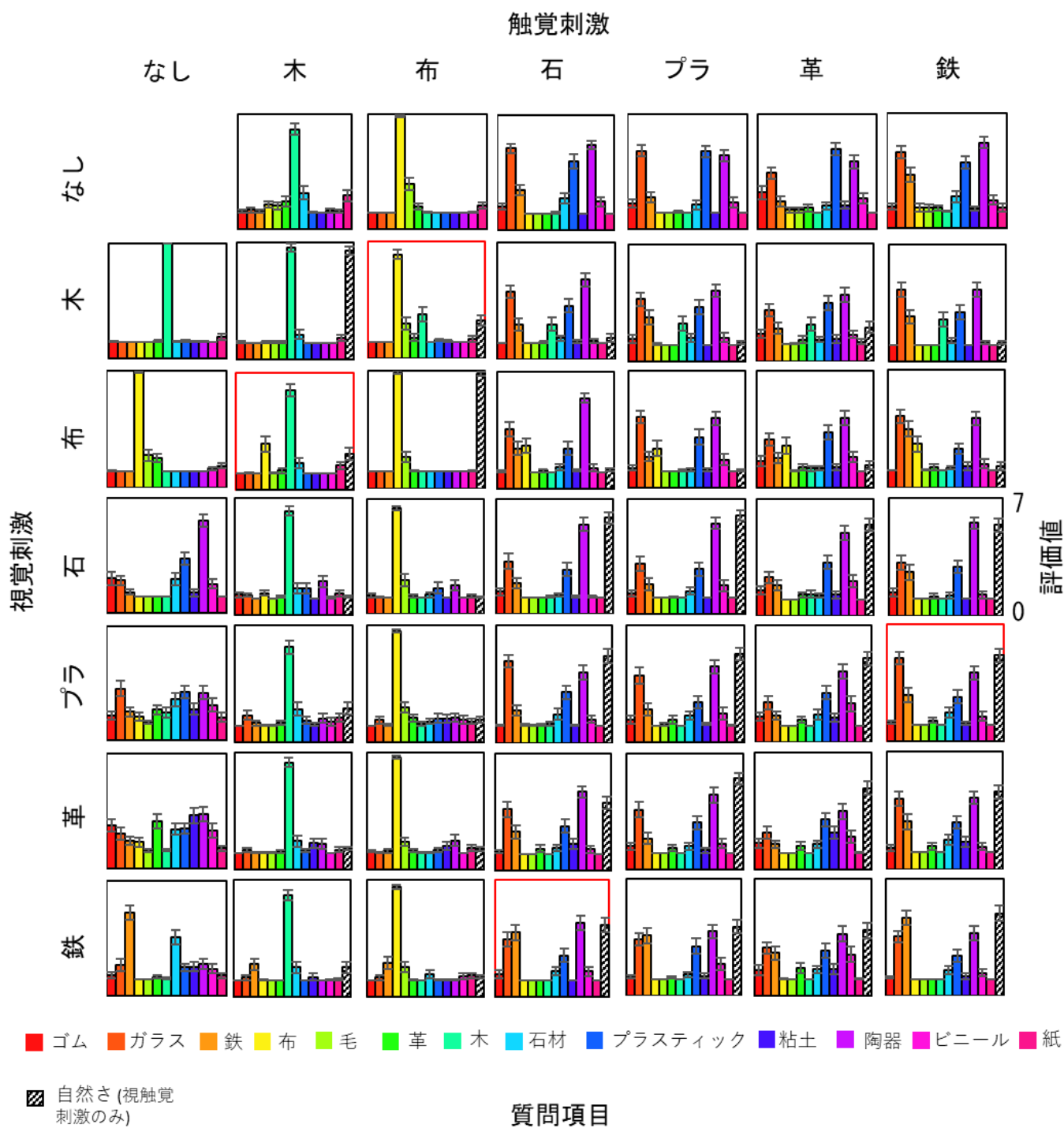


図 12 各刺激の素材カテゴリー知覚にて、24名の評定値を平均したグラフ。エラーバーは、 ± 1 SEM を表す (小野・森, 2022, p.418, 図3 引用)。

さ」の評定値が高い視覚刺激が鉄、触覚刺激が石の組み合わせであると、「ガラス」、「鉄」、「陶器」の評定値が高くなった。「ガラス」、「陶器」は触覚刺激で高く評価されており、「鉄」は視覚刺激で高く評価されている。この刺激の組み合わせでの視触覚の結果は、2つの刺激を参照して得られたことを表している。

3.2.2.2 性質知覚の評定結果

図 13 は刺激ごとに、24 名分の性質知覚の評定値を平均した結果を示している。図 12 同様に、各行が各視覚刺激、各列が各触覚刺激に対応しており、交差している要素は視触覚刺激として対応する視覚刺激と触覚刺激を呈示した際の結果を表している。多くの視触覚刺激で触覚情報が優位に参照されるような結果になった。ただし視覚刺激が石、触覚刺激が革のように（図 13 の上から 4 行目、左から 6 列目の赤枠のグラフ）、視覚的性質では視覚情報が優位に、触覚的性質では触覚情報が優位に参照された結果を示す組み合わせも見られた。

3.2.2.3 重回帰分析

視触覚の素材カテゴリー知覚と性質知覚に対して交互作用モデルでの重回帰分析を行った。表 3 は全刺激での各知覚の重回帰分析の結果を示しており、素材カテゴリー知覚と性質知覚の β_3 は 0 と有意に異なっていないため、視覚情報と触覚情報の相互作用が生じているとは言えない。

視覚刺激と触覚刺激の組み合わせの「自然さ」と視触覚刺激の評定値の関係性を調べるために、Fujisaki et al. (2014) 同様に正規化した「自然さ」の評定値が 0.4 未満の刺激群（不自然）、0.4 以上から 0.6 未満の刺激群（やや自然）、0.6 以上から 1 の刺激群（自然）に分けて、素材カテゴリー知覚と性質知覚について重回帰分析を行った。素材カテゴリー知覚の不自然な刺激群のデータ数は 234、やや自然な刺激群のデータ数は

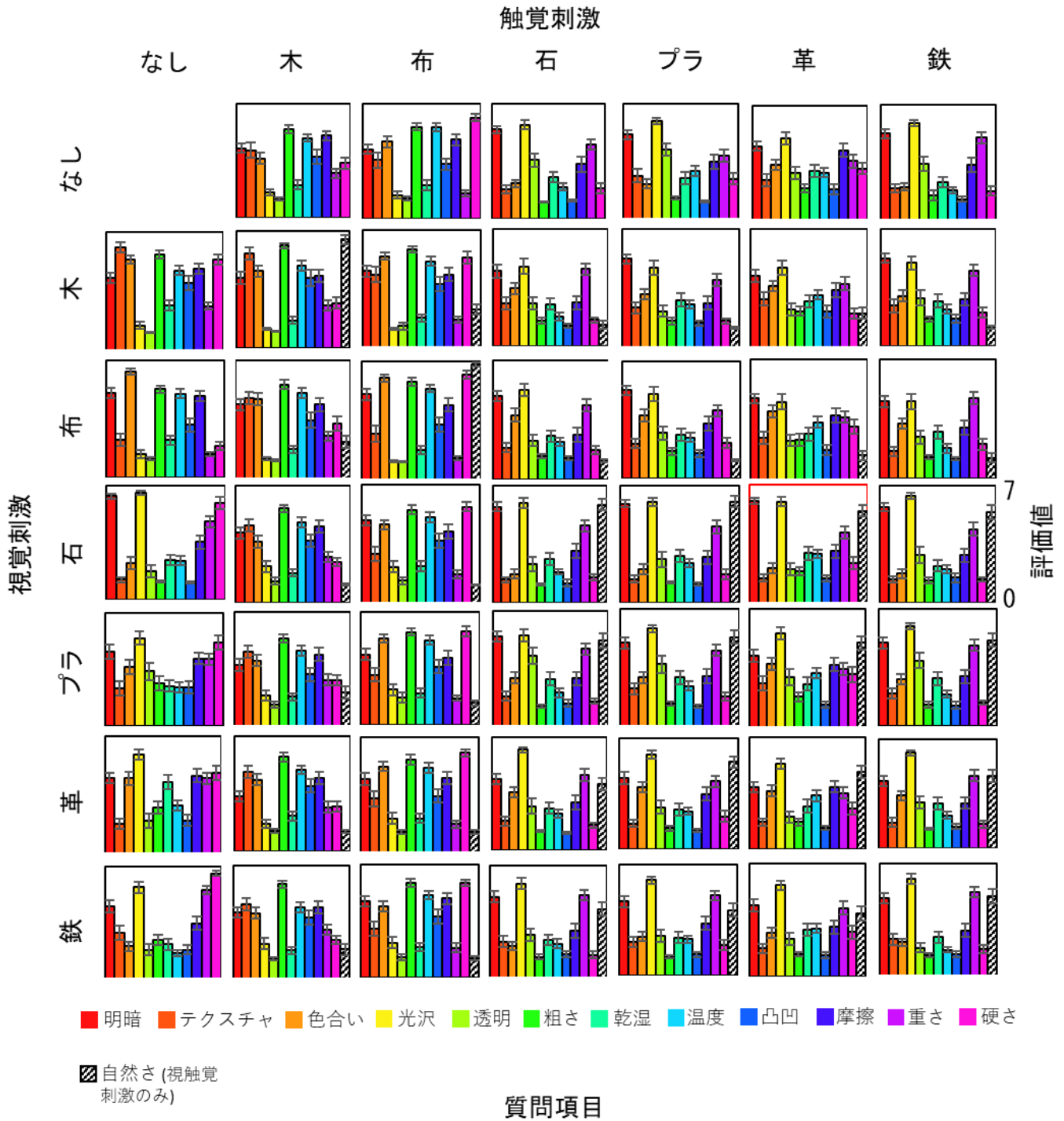


図 13 各刺激の性質知覚にて、24名の評定値を平均したグラフ。エラーバーは、 ± 1 SEM を表す (小野・森, 2022, p. 419, 図 4 引用)。

表 3 全刺激及び不自然 (0 - 0.4), やや自然 (0.4 - 0.6), 自然 (0.6 - 1) な刺激群での素材カテゴリー知覚 (左表) 及び性質知覚 (右表) の重回帰分析の結果. カッコ内の値は *VIF*, ** は $p < .05$ を表す (小野・森, 2022, p. 420, 表 2 一部改変).

	素材カテゴリー知覚			性質知覚			
	独立変数			独立変数			
	β_1	β_2	β_3	β_1	β_2	β_3	
全刺激	0.236**	0.785**	-0.081	全刺激	0.097**	0.851**	0.095
($R^2 = 0.895$)	(1.457)	(1.518)	(2.058)	($R^2 = 0.883$)	(3.247)	(3.589)	(6.828)
不自然	0.260**	0.897**	-0.365	不自然	0.145**	0.936**	-0.138
($R^2 = 0.934$)	(1.231)	(1.240)	(1.248)	($R^2 = 0.884$)	(3.435)	(3.532)	(5.272)
やや自然	0.175**	0.436**	1.103**	やや自然	0.161**	0.847**	
($R^2 = 0.885$)	(2.140)	(3.911)	(5.663)	($R^2 = 0.865$)	(1.398)	(1.398)	
自然	0.226**	0.500**	0.387**	自然	0.204**	0.862**	
($R^2 = 0.923$)	(4.24)	(2.736)	(5.825)	($R^2 = 0.891$)	(1.825)	(1.825)	

52, 自然な刺激群のデータ数は 182 であった. また性質知覚の不自然な刺激群のデータ数は 216, やや自然な刺激群のデータ数は 48, 自然な刺激群のデータ数は 168 であった.

表 3 の素材カテゴリー知覚について自然な刺激群, やや自然な刺激群では β_3 に 0 との有意差が確認された. 一方, 不自然な刺激群では β_3 に 0 との有意差は確認されなかった. このことから「自然さ」が低くなるほど, 交互作用モデルでの説明力が低下することが示唆された. 次に性質知覚と「自然さ」の関係について記述する. 表 3 の性質知覚から, どの刺激群でも β_3 に 0 との有意差は確認されなかった (自然な刺

刺激群，やや自然な刺激群については β_3 の *VIF* がそれぞれ 13.096 と 11.534 であり 10 以上であったため，交互作用の項を排除して再度重回帰分析を行った). このことから「自然さ」に限らず，性質知覚は視覚情報と触覚情報の加重平均にて説明できると考えられる.

更に視覚的性質と触覚的性質 (3.2.5 実験手続き参照) が，それぞれ視覚情報と触覚情報のどちらを参照しているのかを重回帰分析によって調べた. 性質知覚の交互作用モデルにおける重回帰分析において，全刺激の場合と「自然さ」を用いて 3 つの刺激群に分けた場合で，どちらも β_3 と 0 に有意差が無かったため，視覚的性質と触覚的性質については，交互作用の項を排除して重回帰分析を行った. 表 4 は視覚的性質，触覚的性質でそれぞれ全刺激での重回帰分析，そして「自然さ」の評定値に基づいて分けた 3 つの刺激群での重回帰分析を行った結果である. 視覚的性質の不自然な刺激群のデータ数は 90，やや自然な刺激群のデータ数は 20，自然な刺激群のデータ数は 70 であった. また触覚的性質の不自然な刺激群のデータ数は 126，やや自然な刺激群のデータ数は 28，自然な刺激群のデータ数は 98 であった. まず全刺激の場合，視覚的性質ではどちらの感覚情報も参照され，触覚的性質では触覚情報のみが参照されたような結果を示した. 次に視覚的性質の「自然さ」による 3 つの刺激群の重回帰分析の結果から，「自然さ」に限らず視覚的性質には視覚情報及び触覚情報が参照されることが示唆された. ただし，不自然な刺激群では β_1 が β_2 より小さく，やや自然な刺激群では β_1 と β_2 はほぼ同じ値になり，自然な刺激群になると β_1 が β_2 より大きくなる結果になった. 触覚的性質については，不自然な刺激群では視覚情報と触覚情報がそれぞれ参照されており，やや自然，自然な刺激群では触覚情報のみが参照されていることを示唆する結果となった.

表 4 全刺激及び不自然 (0 - 0.4), やや自然 (0.4 - 0.6), 自然 (0.6 - 1) な刺激群での視覚的性質 (左表) 及び触覚的性質 (右表) の重回帰分析の結果. カッコ内の値は *VIF*, ** は $p < .05$ を表す (小野・森, 2022, *p.420*, 表 3 引用).

	視覚的性質		触覚的性質		
	独立変数		独立変数		
	β_1	β_2	β_1	β_2	
全刺激 ($R^2 = 0.892$)	0.290** (1.099)	0.801** (1.099)	全刺激 ($R^2 = 0.926$)	-0.028 (1.033)	0.940** (1.033)
不自然 ($R^2 = 0.868$)	0.215** (1.022)	0.844** (1.022)	不自然 ($R^2 = 0.943$)	-0.061** (1.016)	0.895** (1.016)
やや自然 ($R^2 = 0.956$)	0.592** (2.332)	0.463** (2.332)	やや自然 ($R^2 = 0.839$)	0.022 (1.274)	0.989** (1.274)
自然 ($R^2 = 0.973$)	0.654** (2.820)	0.404** (2.820)	自然 ($R^2 = 0.920$)	-0.049 (1.441)	1.004** (1.441)

3.3 考察

本研究では異なる素材の刺激を組み合わせ、視触覚の素材カテゴリー知覚及び性質知覚で、視覚情報と触覚情報がどのように参照されているか調べた。多くの視触覚刺激の素材カテゴリー知覚・性質知覚で、触覚情報が優位に参照されているように見えた。しかし刺激の組み合わせが自然であると、視覚情報も参照されたと見られる結果も存在した。

素材カテゴリー知覚における重回帰分析の結果、「自然さ」が低いと視覚条件と触覚条件の評定値の乗算によって、視触覚の評定値が得られたとは言えなかった。しかし、「自然さ」が高いとそれらの乗算によって視触覚の評定値が得られた、と考えられる。

「自然さ」が小さくなると交互作用モデルの説明力が低下する傾向は、Fujisaki et al. (2014) でも見られた。交互作用モデルで良く説明されたと考えられる組み合わせは、鉄と石、といったように似た性質を持つ素材の組み合わせであった。視覚と触覚の素材表象は類似しており (Baumgartner et al., 2013; Baumgartner et al., 2015), 視覚と触覚の間で性質の情報を共有し、素材をより正確に識別しようとするメカニズムが存在すると考えられる。

性質知覚については刺激に関わらず、視覚情報と触覚情報の加重平均で説明が可能であると考えられる。更に視覚的性質, 触覚的性質に分けて重回帰分析を行った結果, 視覚的性質では視覚情報と触覚情報を参照し, 触覚的性質では不自然な刺激群以外, 触覚情報を優先的に参照する結果であった。Fujisaki et al. (2014) や谿ら (2018) では特定の感覚様相に関する性質において, その感覚様相の情報が反映される結果が得られている。本研究の触覚的性質の結果は, それらの結果と類似していると言える。一方, 視覚的性質は視覚情報と触覚情報の加重平均であり, 先行研究 (Fujisaki et al., 2014; 谿ら, 2018) の結果とは違う傾向が見られている。しかし Adams, Kerrigan, and Graf (2016) では視覚刺激の光沢感が, 触覚刺激の硬さ情報によって変化する結果が確認されているため, 触覚情報が視覚的性質に影響を及ぼすこともある。Martín et al. (2015) では一部の視覚的性質の知覚が, 視覚情報よりも聴覚情報に大きく重み付けされることが示されており, 「2.4 質感認知における多感覚統合の様々なモデル」でも述べたように, 実験環境や刺激の種類によって, 性質知覚の感覚様相の重み付けは変化すると考えられる。

視覚的性質では「自然さ」が向上するほど, 視覚情報が触覚情報よりも大きく重み付けされる傾向が見られた。また触覚的性質も不自然な刺激群では視覚情報の影響が確認されたが, 「自然さ」が上がると視覚情報の影響も見られなかった。これらについては, 感覚情報に対する信頼度によって重み付けが変化した可能性がある。Ernst and

Banks (2002) では、視触覚でのサイズ弁別について、視覚刺激上にノイズを呈示し、視覚刺激が認識しにくくなるようにすると、触覚情報に大きく重み付けされることが示唆されている (2.6 最尤推定モデル参照)。本研究の参加者の多くは、主に触覚情報を優先して参照し、刺激の組み合わせが自然であれば、視覚情報も参照して答えたと実験後の内省報告にて答えている。Ernst and Banks (2002) に従えば、「自然さ」の向上に伴って、その性質に相応しい感覚様相が重視されるようになったと考えられる。

多くの視触覚刺激で素材カテゴリー知覚・性質知覚ともに、触覚情報を優位に参照している傾向がある。この原因として、視覚刺激に含まれる2つの問題点が影響していると考えられる。1つ目は、視覚刺激が触覚刺激に比べて大きく見えた点である。本研究では、視覚刺激と触覚刺激の時間的ずれや、縦横の空間的ずれが生じないように調整を行った。一方で、奥行方向のずれについては考慮しておらず、参加者からの指摘は無かったものの、視覚刺激が触覚刺激よりも大きく見えてしまい、視覚刺激に対する違和感を生じさせた可能性がある。2つ目は、視覚刺激が真上から撮影された動画であることと、ディスプレイに呈示されたことから、平面的になり奥行き情報が欠落していた点である。これらの2つの問題点によって、参加者は視覚刺激から3次元情報を得られず視覚刺激に違和感を覚えたため、視覚情報が触覚情報に比べて積極的に用いられなかった可能性がある。

本研究では、視覚刺激の表面から素材や性質を判断させるようにするために、先行研究 (Baumgartner et al., 2013; Baumgartner et al., 2015) 同様に、視覚刺激の表面が映るように真上から実物を撮影した動画を用いた。しかし、本研究の視覚刺激は試験片の表面に指を置く場面を用いており、参加者が奥行きを感じるような刺激であった。奥行きを感じさせる場面でありながら、視覚刺激の奥行き情報が欠落するという不自然な状況によって、全体的に視覚刺激に対する信頼度が低下したり、「自然さ」の評定に影響を及ぼしたりした可能性がある。

奥行き情報の欠落を解決する方法として、複合現実技術 (Mixed reality, 家崎・杣田・木村・柴田・田村, 2008) のように触覚刺激を触っている場面に、リアルタイムで様々な素材の画像を重畳させる方法を取る必要がある。刺激同士の大さを合わせるだけでなく、様々な角度から物体を見ても違和感がないため、奥行き情報の欠落を防ぐことが出来ると考えられる。また、本研究では触覚刺激呈示装置によって、参加者には受動的に刺激を触らせた。これは視覚刺激と触覚刺激の手の動きを一致させるためであった。手の動きと触覚について解説した岩村 (2007) では、手を能動的に動かした場合と、機械などを用いて刺激を受動的に触らせた場合で粗さ知覚に違いはない、もしくは後者の方が前者に比べて精度が高くなると記述されている。その一方で、手の動きと性質知覚に関係があることが複数の研究で示されている (Callier, Saal, Davis-Berg, & Bensmaia, 2015; Lederman & Klatzky, 1987; Nagano, Okamoto, & Yamada, 2014; Yokosaka, Kuroki, Watanabe, & Nishida, 2017; 横坂・渡邊, 2017)。特に素材カテゴリー知覚については、手の動きの有無が結果に影響を及ぼすか未だ調べられていない。これについても、複合現実技術を用いることで調べることが可能になると考えられる。本研究では受動的に刺激を触らせた場合の結果を示したことになるが、今後の課題として、能動的に手を動かした場合での視触覚の素材カテゴリー知覚・性質知覚を調べ、手の動きの有無によって結果に違いが生じるか検討する必要があるだろう。

本研究でのデータ分析では、Fujisaki et al. (2014) との結果の比較をするために、交互作用モデルでの重回帰分析を行った。しかし重回帰分析では、質問項目間、刺激間、参加者間の差といった評定値以外の要因による影響を考慮できないという問題点がある。この問題点を解決する方法として、線形モデルに個体差などのランダムな影響 (変動効果) を変数として組み込むことが出来る一般化線形混合モデル (generalized linear mixed model) での分析がある。様々な変数を組み合わせることで、複数のモデルを提案することが出来るため、今後、素材カテゴリー知覚、及び性質知覚を説明する最適

なモデルについて検討し、知覚がどのような要因による影響を受けているか調べる必要があると考えられる。

最後に、本研究及び Fujisaki et al. (2014) では「自然さ」を用いた分析によって、刺激の組み合わせで素材カテゴリー知覚の処理や、性質知覚の重み付けが変化することが示唆されている。しかし、本研究及び Fujisaki et al. では、それらの変化と「自然さ」の関係について定量的に表すことは出来ていない。Yanagisawa and Takatsuji (2015) の期待効果でも、刺激の組み合わせによって、予測通りに影響が出る場合と、予測と反対方向に影響が出る場合の2種類の効果があると示唆されているが、効果の切り替わりと刺激の組み合わせの関係については明らかになっていない。今後、刺激の組み合わせと質感認知のメカニズムの関係について定量的に示すような研究もしていく必要があるだろう。

第4章 研究2：触覚の粗さ情報が及ぼす両眼視野闘争の知覚交替への影響

4.1 目的

研究2では、触覚の粗さ情報が両眼視野闘争の知覚交替に及ぼす影響について調べた。Lunghi et al. (2010) の結果から、視覚刺激の特徴である方位・空間周波数の視触覚相互作用によって、視覚的気づきへの影響が生じることが示唆されている。Lunghi et al. の研究を発展させ、触覚刺激の特徴である粗さによって、質感が視覚的気づきに影響を及ぼすか調べた。

粗さは、主に体性感覚野などの触覚の低次部分で処理されている特徴であり (Sathian, 2016; Sathian, Lacey, Stilla, Gibson, Deshpance, Hu, LaConte, & Glielmi, 2011; Servos, Lederman, Gati, & Wilson, 2001), 近年では触覚の粗さ知覚は視覚野高次の活動と関連があることや (Eck, Kaas, Mulders, Hausfeld, Kourtzi, & Goebel, 2016), 視触覚のテクスチャの判別課題時に第一次視覚野, 前頭前皮質, 高次視覚野の内側側頭葉の活動が方位判別課題よりも活発であることが示唆されている (Kitada, Sasaki, Okamoto, Kochiyama, & Sadato, 2014). Kitada et al. (2014) では更に長期記憶に密接に関連する内側側頭葉と繋がりがあがる楔前部の活動が, 視触覚のテクスチャ不一致の時に, 方位不一致の時と比べて活発であることが示されている。Kitada et al. はこのことから, 楔前部が高次視覚野の情報を用いてテクスチャ比較を行っている部位ではないかと考察している。

上記の知見より, 視触覚の粗さの相互作用によって, 両眼視野闘争の知覚交替に影響が生じる可能性はある。粗さ知覚研究では, 基本的にサンドペーパーやレイズドドットといった統制された刺激が用いられる (Connor, Hsiano, Phillips, & Johnson, 1990; Eck et al., 2016; Kahrmanovic, Bergman Tiest, & Kappers, 2009; Lederman, 1974; Lederman, 1981; Meftah, Belingard, & Chapman, 2000). 本研究の実験前に, 予備的にサンドペーパー

一を用いて両眼視野闘争が起こるか調べたが、表面に違いが無いため両眼視野闘争が生じなかった。そのため、本研究では粗さが異なる 2 つの人工物（実験 1-2：人工芝とバスマット、実験 3：大理石と布）を刺激として用いた。

実験 1 では粗い人工芝と滑らかなバスマットを触覚刺激及び視覚刺激として用いて、触覚情報によって両眼視野闘争の知覚交替に影響が生じるか調べた。実験 2 では実験 1 で「人工芝」と「バスマット」という物体名で回答させたことから、参加者の物体の知識と触覚刺激の手触りの相互作用による回答のバイアスによって結果が得られた、という可能性があったため、そのバイアスを排除した実験を行った。物体の知識による回答のバイアスを排除するために、2 つの視覚刺激をそれぞれ時計回り、反時計回りに回転させ、現在見えている知覚内容の回転方向を答えさせるようにした。実験 3 では人工芝とバスマット以外の刺激対でも、実験 1-2 同様の結果が得られるか調べるために、粗い布と滑らかな大理石を用いて、実験 2 同様の実験を行った。

なお本章の内容は、筆者らが既に報告している研究成果 (Ono et al., 2022) に基づいている。

4.2 実験 1

4.2.1 方法

4.2.1.1 参加者

実験参加者は実験の知識がない 22 名の九州大学の大学生・大学院生 (男性 13 名, 女性 9 名, 平均年齢 20.4 歳) であった。参加者は全員, 正常な視力, あるいは矯正視力を有していた。また 1 人を除いて全員, 右利きであった。本実験は九州大学大学院システム情報科学研究院実験倫理審査委員会の承認を受けて行われた。また参加者には, 実験前に実験内容の説明をし, 同意を得た状態で実験を行った。

4.2.1.2 刺激及び装置

触覚刺激は人工芝とバスマットであった (1 辺約 25cm, 図 14 (a)). 参加者に刺激を見せないようにするため, 触覚刺激を参加者の前方左にある箱に入れて呈示した. 参加者は左手を箱の中に入れて, 刺激の表面を触った.

視覚刺激は黒背景の CRT ディスプレイ (FMV-DP97X1, 0.04 cd/m², 1024 × 768 ピクセル, リフレッシュレート : 75 Hz) 上に隣り合うように呈示された触覚刺激の 2 つの画像であった. 各画像のサイズは視角 9.53° × 9.53° であり, 平均輝度については, 人工芝が 36.17 cd/m², バスマットが 40.50 cd/m² であった. 本研究の視覚刺激のサイズは大きく, 画像の領域の一部で交替が生じる現象 (piecemeal rivalry) が生じる可能性がある (Blake, O'Shea, & Mueller, 1992). ただし粗さを認識する上で画像がある程度の大きさを持つ必要があるため, 自然画像を用いた先行研究 (Alais & Melcher, 2007) に従って, 本実験ではこのサイズに設定した.

実験プログラムは MATLAB と Psychtoolbox-3 (Kleiner et al., 2007) によって制御された. 参加者は図 14 (b) のようにディスプレイから約 36cm 離れたところでステレオ

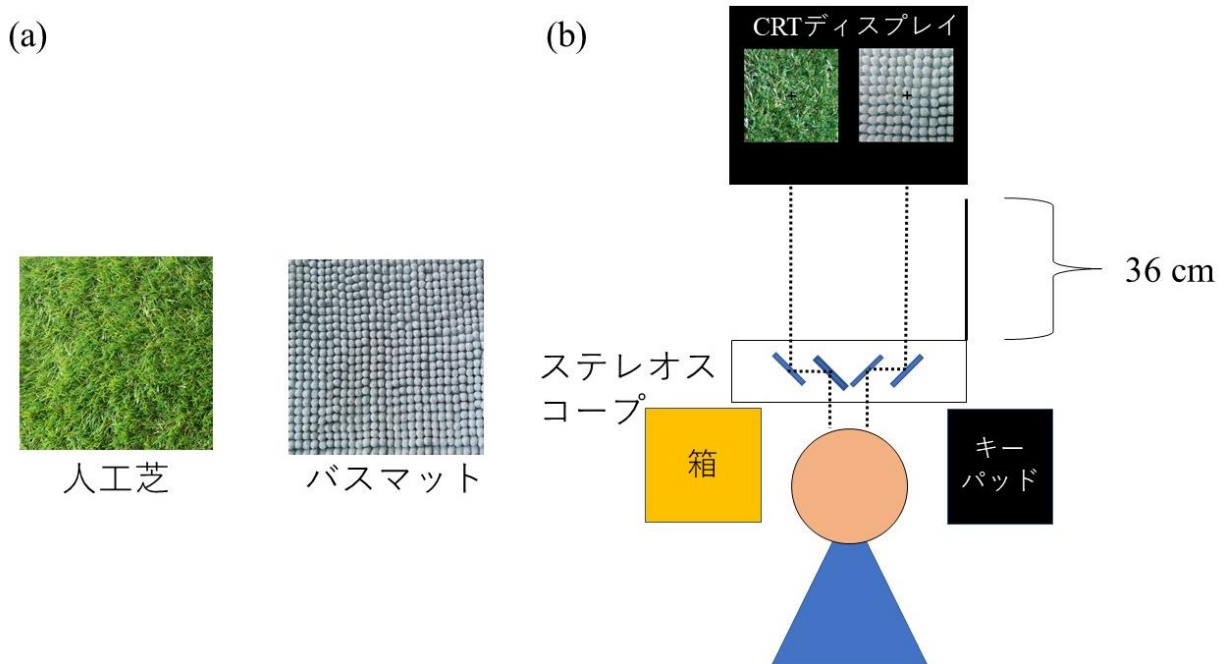


図 14 (a) 触覚刺激の図. (b) 実験環境 (Ono et al., 2022, p. 3, Fig. 1 一部改変).

スコープを通して刺激を観察し、頭部を固定するために顎台が用いられた。

4.2.1.3 実験手続き

実験は暗室内で行われた。触覚刺激を触ることによって生じる音を遮断するために、参加者は耳栓とヘッドフォンを装着した。実験開始時、各参加者は3分間暗順応した後、1分間CRTディスプレイ上に呈示される白画像 (96.4 cd/m^2) を見つめ順応した。図15は1試行の流れを示している。各試行で、参加者はステレオスコープを通してCRTディスプレイを観察して、両眼にノニアスラインと注視点 ($1.59^\circ \times 1.59^\circ$) が呈示された。ノニアスラインと注視点の距離は 7.94° であった。参加者はステレオスコープの左と右の鏡の角度を調整することで、2つのノニアスラインが1つの正方形になるようにした。参加者はノニアスラインを正しく融合出来たら、ボタンを押した。ボタンを押してから5秒間、ディスプレイには黒背景が呈示され、参加者はその間に箱に左手を入れて、触覚刺激の表面を時計回りに触り始めた。参加者には、1試行が終了するまで触り続けるように教示した。5秒後、参加者の両眼に視覚刺激が60秒間分離呈示され、参加者は2つのキーのうち画像と対応するキーを右手で押すことで、優位に知覚されている画像を答えた (左キー：バスマット、右キー：人工芝)。知覚領域の50%以上を占める画像を優位画像として定義し、参加者はその優位画像が見えている間、画像に対応するキーを押し続けるように教示した。各画像の優位時間は、60秒間で対応するキーが押されていた時間として定義した。

触覚条件は、バスマット、人工芝、触覚刺激なしの3条件であった。触覚刺激なし条件では、視覚刺激が呈示されている間、触覚刺激が呈示されなかった。参加者は各触覚刺激条件に対して、2試行を1ブロックとし3ブロックずつ行い、全試行数は18試行であった。視覚刺激の呈示位置はブロック内の2試行間で交換された。3条件の順序及び、各ブロックの1試行目の視覚刺激の呈示位置はランダム化された。実験時

間は約 1 時間であった。

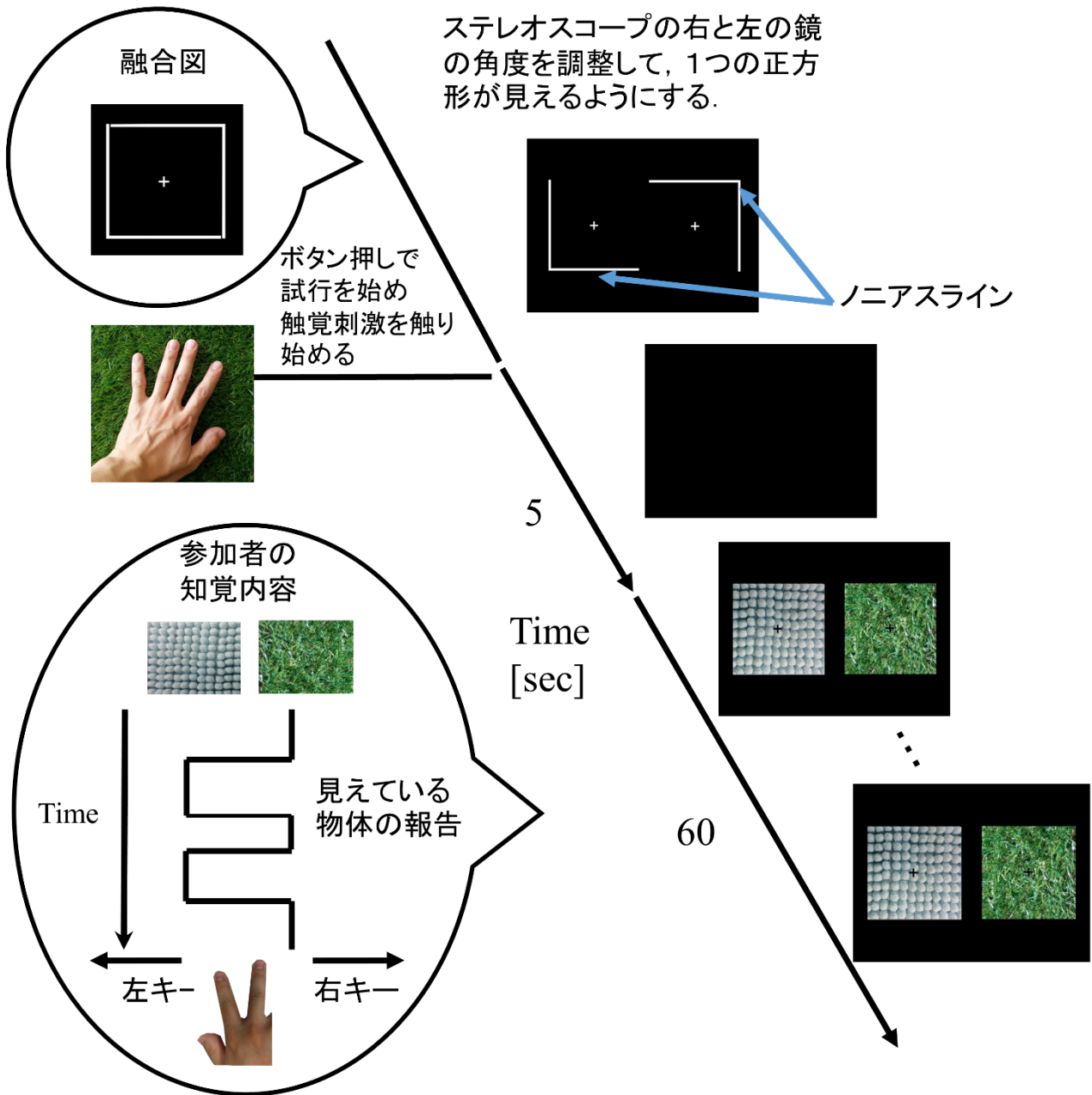


図 15 実験 1 の 1 試行の流れ (Ono et al., 2022, p.5, Fig. 2, 一部改変).

4.2.2 結果

22 名中 2 名の参加者のデータは試行中, 知覚交替が報告されなかったもので以降の分析から除外された. 各参加者で, 試行ごとの各画像の優位時間を合計しそれらを合計

優位時間 (Total dominant time) とした。図 16 (a) は視覚刺激条件 (Visual stimulus), 図 16 (b) は優位画像に対する触覚刺激の条件 (Tactile stimulus re dominant image percept) などの 20 名分のデータを平均した合計優位時間をそれぞれ表している。参加者が試行中にキーを押し替える時間があったため, 図 16 (a) の 2 つの視覚刺激の平均優位時間を合計しても 60 秒にはならない。視覚刺激条件 (人工芝 : Artificial turf, バスマット : Bathmat) と優位画像に対する触覚刺激条件 (一致 : Congruent, 刺激なし : No-stimulus, 不一致 : Incongruent) で 2 要因の反復測定分散分析を行った。視覚刺激条件の主効果は有意であり ($F(1, 19) = 30.834, p < .001, \eta_p^2 = .619$), 優位時間についてはバスマットの方が人工芝よりも有意に長くなった。また触覚条件の主効果は有意であった ($F(2, 38) = 12.739, p < .001, \eta_p^2 = .401$)。2 条件の交互作用は有意でなかった ($F(2, 38) = .015, p = .861, \eta_p^2 = .008$)。触覚条件の主効果が有意であったため, 触覚条件に対して比較全体の有意水準 α を 0.05 に限定したボンフェローニ法による多重比較を行った。合計優位時間は一致条件の時, 刺激なし条件 ($p < .05$) や不一致条件 ($p < .01$) の時と比べて有意に長くなった。また不一致条件の合計優位時間は, 刺激なし条件の合計優位時間よりも有意に短くなった ($p < .01$)。

4.2.3 考察

粗い人工芝と滑らかなバスマットを用いて, 触覚情報による両眼視野闘争への影響があるか調べた。各視覚刺激の合計優位時間は, 刺激なし条件に比べて一致条件の時に有意に長くなり, 不一致条件の時に有意に短くなった。図 16 (a) より, バスマットの合計優位時間が人工芝のそれよりも有意に長くなった。これは, バスマットの輝度が人工芝の輝度より高かったことが原因だと考えられる。先行研究では, 両眼視野闘争中, より輝度の高い画像の方が優位に知覚されやすくなることが示唆されている (Levelt, 1965)。しかし, この結果は触覚刺激による両眼視野闘争への影響に直接影響

を及ぼさない。

実験 2 では、この相互作用が刺激の知識による回答のバイアスによって生じたもの

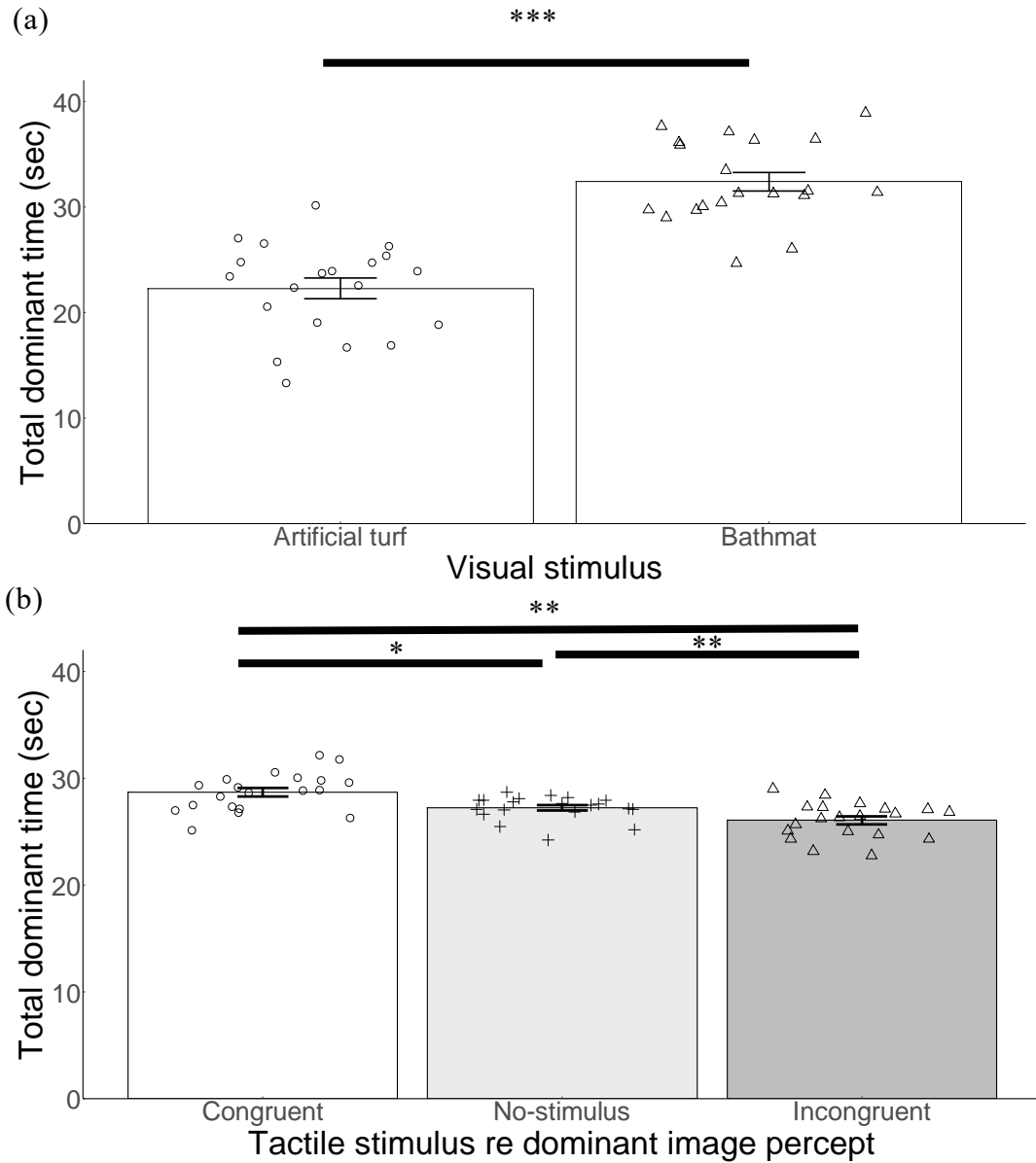


図 16 (a) 視覚刺激条件 (Visual stimulus) の合計優位時間 (Total dominant time). (b) 優位画像に対する触覚刺激条件 (Tactile stimulus re dominant image percept) での合計優位時間. エラーバーは、 ± 1 SEM, *, **, *** は $p < .05$, $p < .01$, $p < .001$ をそれぞれ表している (Ono et al., 2022, p.6, Fig. 3 一部改変).

かを調べる。実験 1 と同じ刺激を用いて、視覚刺激をそれぞれ時計回りと反時計回りに回転させて、参加者には見えている画像の回転方向を答えさせるようにした。

4.3 実験 2

4.3.1 方法

4.3.1.1 参加者

実験参加者は実験 1 に参加していない 21 名の九州大学の大学生・大学院生（男性 11 名，女性 10 名，平均年齢 19.6 歳）であった。参加者は全員，正常な視力，あるいは矯正視力を有していた。また 2 人を除いて全員，右利きであった。本実験は九州大学大学院システム情報科学研究院実験倫理審査委員会の承認を受けて行われた。また参加者には，実験前に実験内容の説明をし，同意を得た状態で実験を行った。

4.3.1.2 刺激と装置

視覚刺激は実験 1 で用いた視覚刺激を円形に切り抜いた画像（直径 6.4° ）であり，平均輝度については人工芝が 14.90 cd/m^2 ，バスマットが 16.09 cd/m^2 であった。エッジ検出による影響を防ぐために，2 次元ガウス窓を各刺激にかけてエッジを滑らかにした（ $\sigma=20$ ピクセル）。2 つの視覚刺激は，黒背景の CRT ディスプレイ上に横並びで呈示され（図 17），各刺激は 60 秒間，1 つは時計回り（clockwise，以降 CW），もう一方は反時計回り（counter clockwise，以降 CCW）に 1 フレームに 1° の割合で回転し続けた。触覚刺激や装置は実験 1 と同様であった。

4.3.1.3 実験手続き

参加者は 60 秒間，両眼に分離呈示された回転する視覚刺激を観察し，知覚領域の 50%以上を占める優位画像の回転方向に対応するキー（左キー：CCW，右キー：CW）

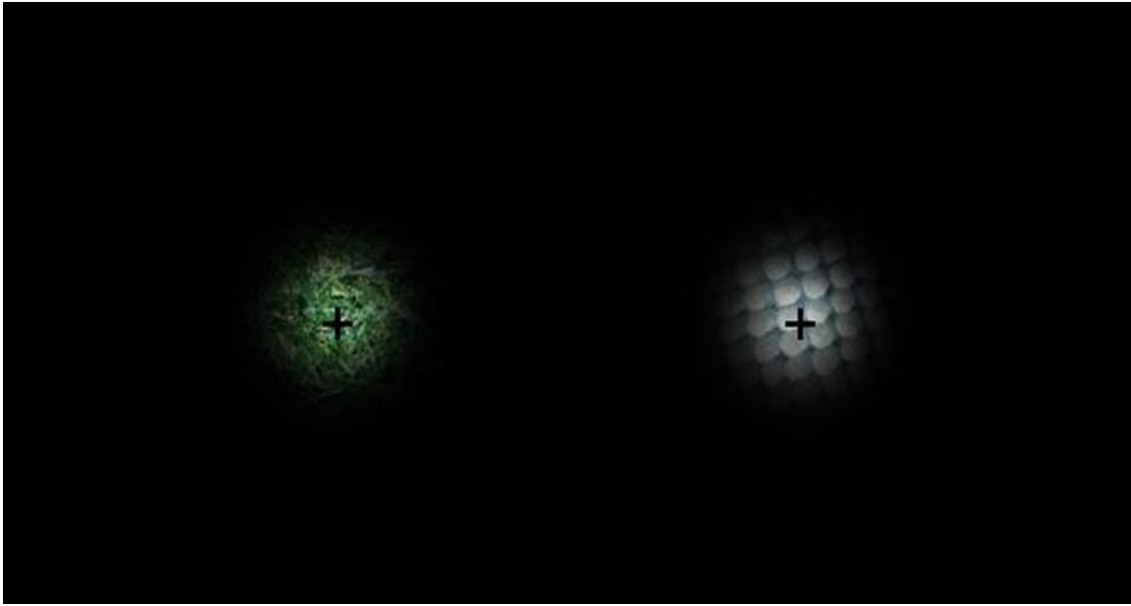


図 17 実験 2 で用いる視覚刺激を CRT ディスプレイ上に呈示した図 (Ono et al., 2022, p. 7, Fig.4 引用).

を押し続けるように教示された。キーが押され続けた時間を各視覚刺激の優位時間として定義した。

実験 1 同様に、触覚条件はバスマット、人工芝、触覚刺激なしの 3 条件であった。参加者は 2 試行を 1 ブロックとして、各触覚条件で 6 ブロックずつ行い、全試行数は 36 試行であった。各ブロック内で、2 つの回転方向は固定されており、2 つの視覚刺激の呈示位置は 2 試行間で交換された。ブロックごとの 1 試行目の刺激呈示位置はランダム化されたが、各視覚刺激の回転方向は 3 ブロック同じであった。6 ブロックの順序 (視覚刺激の回転方向ごとに 3 ブロック) は各触覚刺激条件内でランダム化された。その他の手続きは実験 1 と同様であった。実験時間は約 1 時間であった。

4.3.2 結果

21 名中 1 名の参加者のデータは試行中、知覚交替が報告されなかったため以降の分析から除外された。図 18 (a), (b), (c) はそれぞれ、視覚刺激条件 (Visual stimulus), 優

位画像の回転方向条件 (Rotation direction of dominant image), 優位画像に対する触覚刺激条件 (Tactile stimulus re dominant image percept) での 20 名分の合計優位時間の平均を表している. 視覚刺激条件 (人工芝: Artificial turf, バスマット: Bathmat), 優位画像に対する触覚条件 (一致: Congruent, 刺激なし: No-stimulus, 不一致: Incongruent),

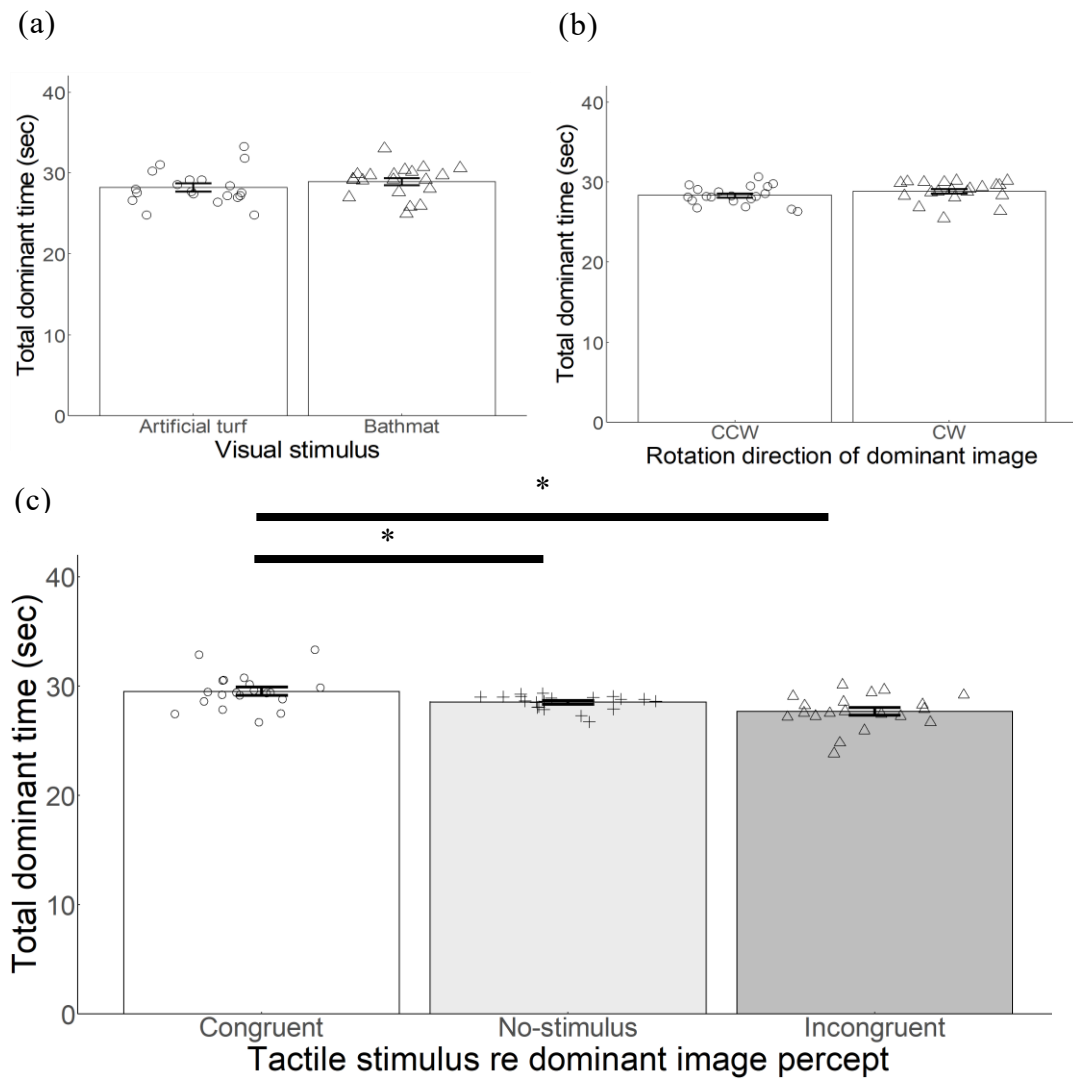


図 18 (a) 視覚刺激条件 (Visual stimulus) の合計優位時間 (Total dominant time). (b) 回転方向条件 (Rotation direction of dominant image) の合計優位時間. (c) 優位画像に対する触覚刺激条件 (Tactile stimulus re dominant image percept) での合計優位時間. エラーバーは, ± 1 SEM., * は $p < .05$ を表している (Ono et al., 2022, p.8, Fig. 5 一部改変).

優位画像の回転方向条件（反時計回り：CCW，時計回り：CW）の3要因の反復測定分散分析を行った。視覚刺激条件の主効果 ($F(1, 19) = 0.745, p = .399, \eta_p^2 = .038$)，及び優位画像の回転方向条件の主効果 ($F(1, 19) = 1.102, p = .307, \eta_p^2 = .055$) は有意でなかった。優位画像に対する触覚刺激条件の主効果は有意であった ($F(2, 38) = 7.411, p < .005, \eta_p^2 = .281$)。また3要因の交互作用は有意であった ($F(2, 38) = 5.530, p < .01, \eta_p^2 = .218$)。

単純2要因交互作用と単純単純主効果検定を行い，全ての有意水準 α はボンフェローニ法によって 0.05 とした。一致条件の優位画像における回転方向条件と視覚条件の交互作用 ($F(1, 19) = 4.603, p < .05, \eta_p^2 = .195$)，及び不一致条件のそれらの交互作用 ($F(1, 19) = 5.899, p < .05, \eta_p^2 = .237$) は有意であった。その他の交互作用は全て有意でなかった。一致条件の人工芝条件，及び不一致条件のバスマット条件で優位画像に対する回転方向の単純単純主効果はそれぞれ有意であった（両方 $p < .05$ ）。

触覚刺激条件の主効果が有意であったため，比較全体の有意水準 α を 0.05 に限定したボンフェローニ法による多重比較を行った。合計優位時間は一致条件の時，不一致条件や刺激なし条件の時に比べて有意に長くなった（両方 $p < .05$ ）。一方，不一致条件と刺激なし条件の合計優位時間の有意差は無かった ($p = .083$)。

4.3.3 考察

実験2では，実験1で得られた結果が刺激の知識によって生じた回答バイアスによるものか調べた。そのため2つの視覚刺激をそれぞれ時計回り，反時計回りに回転させて，参加者には優位画像の回転方向を答えさせた。この設定は，物体の知識による回答のバイアスを防ぐものであった。実験1同様に，一致条件の合計優位時間は他の2つの触覚条件のそれらに比べて有意に長くなった。一方で，不一致条件の合計優位時間は，刺激なし条件のそれに比べて短くなったが，2つの条件間で有意差は確認さ

れなかった。

実験 3 では、この結果が他の刺激対でも得られるか検討するため、人工芝とバスマットの代わりとなる刺激を用いて実験 2 と同様の設定で調べた。

4.4 実験 3

4.4.1 方法

4.4.1.1 参加者

実験参加者は前の 2 つの実験に参加していない 23 名の九州大学の大学生・大学院生及び博士研究員（男性 12 名，女性 11 名，平均年齢 19.84 歳）であった。参加者は正常な視力，あるいは矯正視力を有していた。また 1 人を除いて全員，右利きであった。本実験は九州大学大学院システム情報科学研究院実験倫理審査委員会の承認を受けて行われた。また参加者には，実験前に実験内容の説明をし，同意を得た状態で実験を行った。

4.4.1.2 刺激と装置

触覚刺激は布とスライスされた大理石で両方のサイズは約 20×20 cm であった (図 19 (a))。大理石の厚さは 1 cm であり，表面は平面で滑らかに研磨されていた。布は約 0.1 cm の網目のコットン製であり，表面は凸凹状で粗かった。図 19 (a) にあるように，実験 1-2 の用いた刺激と違って両方の表面は殆ど白黒であった。これらの設定は，色による両眼視野闘争への影響の可能性を取り除くためであった。視覚刺激は触覚刺激の表面を円形に切り取った画像 (直径 6.4°) であり，平均輝度について大理石は 16.39 cd/m²，布は 16.26 cd/m² であった。エッジによる影響を防ぐために，二次元ガウス窓を各刺激にかけてエッジを滑らかにした ($\sigma = 20$ ピクセル)。視覚刺激は黒背景の CRT ディスプレイ上に横並びで呈示され (図 19 (b))，60 秒間 1 フレーム 1° で 1 つは時計

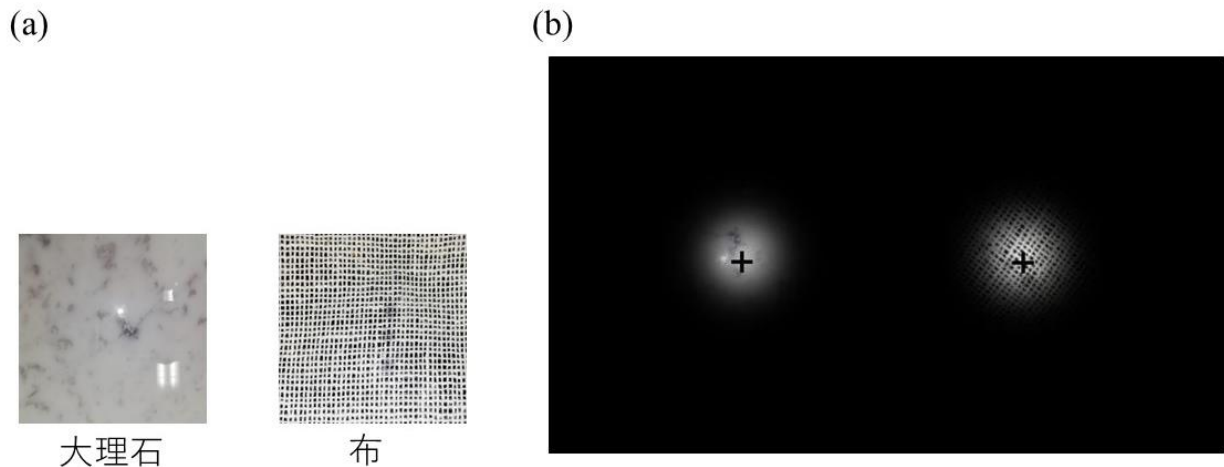


図 19 (a) 触覚刺激の図. (b) CRT ディスプレイ上に呈示した視覚刺激の図 (Ono et al., 2022, p.8, Fig.6 一部改変)

回りに,もう一方は反時計回りに回転された (フレームレート:75Hz). 手続きや装置は実験 2 と同様であった.

4.4.2 結果

23 名中 2 名の参加者のデータは試行中, 知覚交替が報告されなかったもので以降の分析から除外された. 図 20 (a), (b), (c) はそれぞれ視覚刺激条件 (Visual stimulus), 優位画像の回転方向条件 (Rotation direction of dominant image), 優位画像に対する触覚刺激条件 (Tactile stimulus re dominant image percept) の 21 名分の合計優位時間の平均を示している. 視覚刺激条件 (大理石: Marble, 布: Fabric), 優位画像に関する触覚条件 (一致: Congruent, 刺激なし: No-stimulus, 不一致: Incongruent), 優位画像の回転方向条件 (反時計回り: CCW, 時計回り: CW) の 3 要因の反復測定分散分析を行った. 視覚刺激条件の主効果 ($F(1, 20) = 42.352, p < .001, \eta_p^2 = .679$), 優位画像に対する触覚刺激条件の主効果 ($F(2, 40) = 4.487, p < .05, \eta_p^2 = .183$) は有意であった. 優位画像に対する回転方向条件の主効果は有意で無かった ($F(1, 20) = 4.228, p = .053, \eta_p^2 = .175$). これらの交互作用は有意でなかった.

優位画像に対する触覚刺激条件に対して、比較全体の有意水準 α を 0.05 に限定したボンフェローニ法による多重比較を行った。その結果、全ての条件間で有意差が見られなかった。

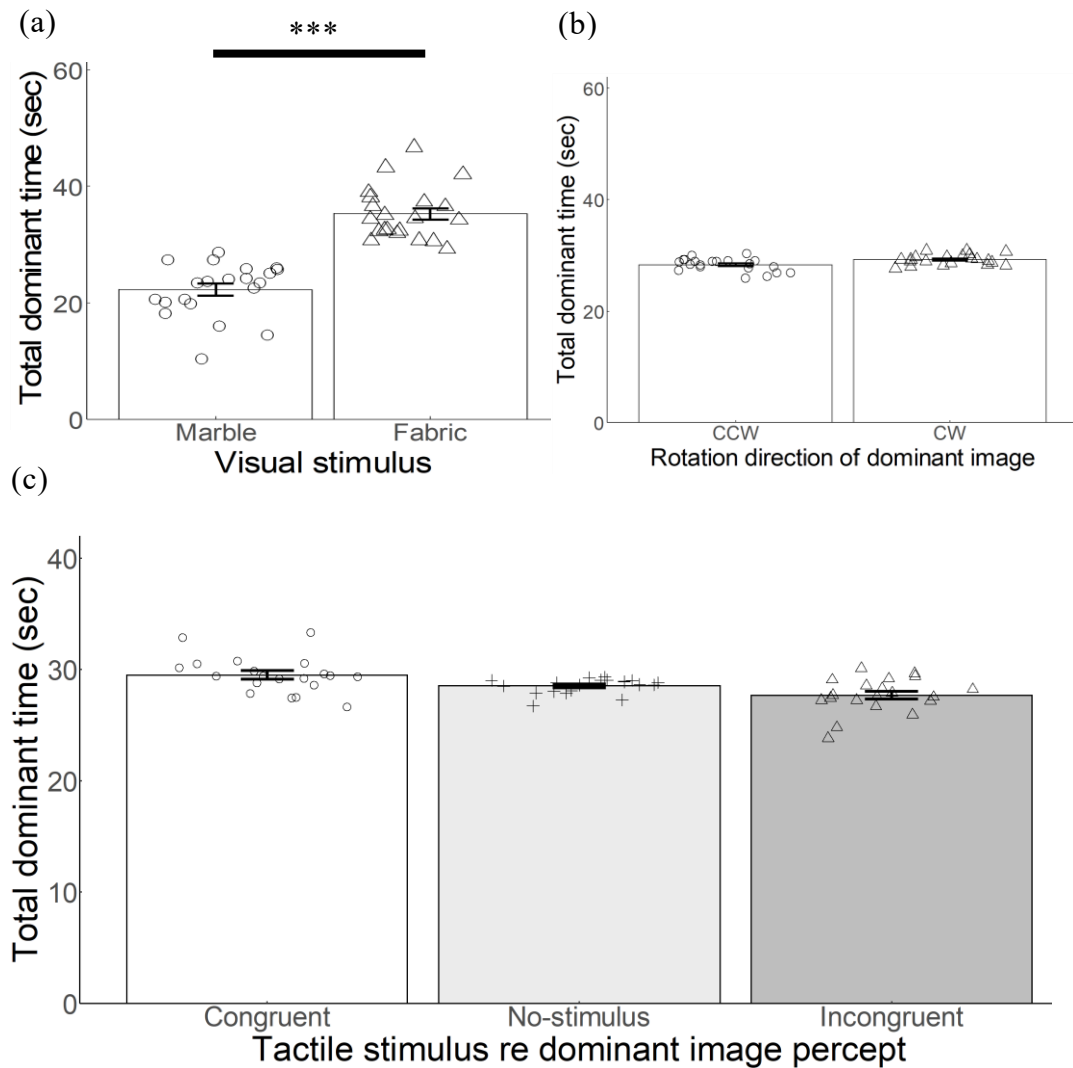


図 20 (a) 視覚刺激条件 (Visual stimulus) の合計優位時間 (Total dominant time). (b) 回転方向条件 (Rotation direction of dominant image) の合計優位時間. (c) 優位画像に対する触覚刺激条件 (Tactile stimulus re dominant image percept) での合計優位時間. エラーバーは、 ± 1 SEM., *** は $p < .001$ をそれぞれ表している (Ono et al., 2022, p.10, Fig. 7 一部改変).

4.4.3 考察

実験 3 では、大理石と布という新しい刺激を用いて、実験 1-2 同様の結果が得られるか調べた。優位画像に対する触覚刺激条件の有意な主効果は、前の 2 つの実験と同じように触覚情報が両眼視野闘争に影響を及ぼすことを示唆した。しかし、優位画像に対する触覚刺激条件間の有意差は無かった。このことについて、2 つの触覚刺激の粗さの違いは分かりやすくなっているが、2 つの視覚刺激の粗さの違いは画像にかけた 2 次元ガウス窓によって分かりにくくなっていることで、視覚刺激と触覚刺激で粗さの違いの明瞭さが一致しておらず、条件間の有意差が生じなかった可能性がある。

図 20 (a) のように、布の合計優位時間は大理石のそれに比べて有意に低くなった。布の表面が大理石の表面に比べて分かりやすく、目立っているように見えるため、刺激の表面の違いによって合計優位時間の違いが生じた可能性がある。しかし、この結果は視触覚相互作用が知覚交替に及ぼす影響と関係しない。

4.5 総合考察

研究 2 では、両眼視野闘争の視触覚相互作用が自然物の粗さによって生じているかを調べた。実験 1 では、人工芝 (粗い) とバスマット (滑らか) を刺激として用いて、優位画像と一致する触覚刺激は優位時間を増加させ、不一致である触覚刺激は優位時間を減少させる結果が得られた。実験 2 では、刺激の意味情報による回答のバイアスを排除するため、2 つの視覚刺激をそれぞれ時計回り、反時計回りに回転させ、参加者には優位画像の回転方向を答えさせるように教示した。実験 2 の結果は実験 1 の結果と同様で、回答バイアスによる影響はなく、触覚の粗さ情報が両眼視野闘争に影響を及ぼしたことを示唆した。実験 3 では、滑らかな大理石と粗い布を新たな刺激として用いて、実験 1-2 と同様の結果が得られるか調べた。その結果、特定の刺激の組み

合わせに限らず、触覚情報が両眼視野闘争に影響を及ぼしたことを示唆した。3つの実験から、両眼視野闘争の視触覚相互作用が粗さによって生じることを示した。

一致条件の優位時間が、刺激なし条件のそれに比べて長くなったのは、刺激なし条件の時に手の動きが無かったためである、という可能性が考えられる。もし手の動きの有無によって結果に違いが生じているのであれば、一致条件と不一致条件の優位時間が同じ傾向で変化すると考えられる。しかし3つの実験で、一致条件と不一致条件の優位時間は、刺激なし条件の優位時間に比べてそれぞれ長くなった、あるいは短くなった。そのため、手の動きが結果に影響を及ぼしたとは考えづらい。

自然物や人工物での両眼視野闘争中の神経発火の増加は、腹側野で確認されている (Sheinberg & Logothetis, 1997; Tong et al., 1998)。Sheinberg and Logothetis (1997) はサルを用いた両眼視野闘争を行い、知覚交替によって腹側経路にある下側頭回の神経細胞の反応が変化することを示した。Tong et al. (1998) は両眼視野闘争中、ヒトの顔の画像と家の画像がそれぞれ優位に知覚されると、腹側経路である紡錘状回顔領域 (human fusiform face area) や海馬傍回場所領域 (parahippocampal area) が活動することを示した。質感認知における多感覚統合は腹側野の活動と関連している可能性がある (Komatsu & Goda, 2018)。また Kitada et al. (2014) では、テクスチャ不一致である時の楔前部の活動は、方位不一致である時よりも活発であり、楔前部は長期記憶と関連する高次視覚野の内側側頭葉と連携して、視触覚のテクスチャ比較を行っている部位ではないかと考察されている。以上の知見から、触覚の粗さ情報が腹側経路で処理されることで、両眼視野闘争の知覚交替に影響を及ぼしている可能性がある。

研究2の結果は、先行研究 (Lunghi et al., 2010) で示された空間周波数や方位の視触覚相互作用が両眼視野闘争に影響を及ぼした可能性を否定しない。Lunghi et al. (2010) や Lunghi et al. (2013) での両眼視野闘争中の触覚情報による知覚交替の影響は、視触覚間で空間周波数や方位が一致している時に生じる。Lunghi et al. は、視触覚相互作

用は視覚経路の初期の方、特に方位や空間周波数に選択性を持つ第一次視覚野で生じていると主張している。

しかし本研究の両眼視野闘争での触覚刺激の影響は、そのような特徴ではなく粗さの視触覚相互作用によって生じていると考えられる。Lunghi and Morrone (2013) は視触覚相互作用が生じるためには、視覚刺激と触覚刺激の空間的接近が重要であると主張している。Lunghi and Morrone の研究では、触覚刺激が視覚刺激から水平方向 30cm の位置にある時、触覚刺激による両眼視野闘争への影響は生じなかった。本研究では、視覚刺激の呈示位置は触覚刺激の呈示位置と空間的に揃っていなかった。しかし、本研究では視覚刺激と触覚刺激の呈示位置を実験的に設定しておらず、これらの呈示位置が粗さの視触覚相互作用に影響を及ぼすか調べていない。今後の研究では、視覚刺激と触覚刺激の呈示位置が空間的に一致していることと、両眼視野闘争下での粗さの視触覚相互作用の生起が関係しているか調べる必要があるだろう。

また実験 2-3 において、刺激の物体の知識による回答バイアスを排除するために、視覚刺激を回転させ、参加者には優位画像の回転方向を答えさせた。回答者には刺激についての知識を伝えておらず、また物体名を意識させないように回転方向を答えさせていたが、視触覚刺激の意味情報による相互作用を排除できたとはいえない。粗さの視触覚相互作用によって、視覚的気づきへの影響が生じたことを示すためには Chen et al. (2011) のように、刺激の物体名や粗さの形容詞句の文字列 (例: 「bathmat」と「artificial turf」, 「rough」と「smooth」) を視覚刺激として呈示し、触覚情報が知覚交替に影響を及ぼすか検討する必要があると考えられる。Chen et al. (2011) では、文字列の視覚刺激を用いた場合、聴覚刺激の条件間で優位時間の差が無いと示されており、本研究においても文字列の視覚刺激を呈示し、Chen et al. と同様の結果が得られれば、意味情報による相互作用による影響が無いと示すことが出来るだろう。

また本研究では、サンドペーパー等の統制された刺激では両眼視野闘争が生じない

ため、人工物を用いて実験を行った。しかし人工物では粗さの影響について、定量的に示すことが出来ないという問題点がある。この問題点を解決するために、3Dプリンタで統制された刺激を作成する方法が考えられる。近年では3Dプリンタで、マイクロメートル単位でドット間隔を変化させたレイズドドット刺激を作成して、粗さ知覚について調べる研究も現れている(相澤・上條, 2019)。3Dプリンタを用いて粗さが異なる2つの触覚刺激を作成し、それらの画像に赤や青の色フィルタをかけた視覚刺激での両眼視野闘争実験を行うことで、粗さと気づきへの影響についてより詳細に調べることが出来ると考えられる。ドットスペースの距離によって、粗さ知覚のメカニズムが切り替わることが示唆されており(Hollins, Bensmaïa, & Washburn, 2001)、3Dプリンタで作成した刺激を用いることで、粗さの処理のメカニズムによって気づきへの影響に違いが生じるかという点についても調べることが出来るだろう。

本研究の結果は、粗さ知覚が視覚的気づきに影響を及ぼす事を示した。視覚刺激の1つと一致する触覚刺激を呈示すると優位時間が増えたことは、触覚刺激の粗さ情報によって対応する視覚刺激に気づきやすくなったことを表す。つまり外界の対象物を見ていることに気づく際に、質感情報を用いている可能性が示唆された。本研究では粗さでの影響しか検討していないが、様々な質感属性で同様の結果が得られる可能性がある。また両眼視野闘争の知覚交替は様々な脳部位の処理と関連していると先述した(2.8 視覚的気づきと両眼視野闘争参照)。しかし、本研究の結果だけでは粗さ知覚に関する情報処理が行われた後に視覚的気づきが生じているのか、もしくは粗さ知覚に関する情報処理が行われている間に視覚的気づきが徐々に生じているのか、粗さと視覚的気づきの情報処理過程を明らかにすることが出来ない。視覚的気づきと関係がある質感属性や、質感と視覚的気づきの情報処理過程について明らかにしていく必要があるだろう。

第5章 結論と展望

本論文では、2つの問題点に関する研究を行い、質感の情報処理の解明に新たな知見を呈示した。研究1では、Fujisaki et al. (2014) が示した視聴覚の素材カテゴリー知覚、及び性質知覚の結果が、その他の感覚様相の組み合わせでも見られるのか不明である、という問題点に関する実験を行った。研究1の重回帰分析の結果から、視聴覚だけではなく、視触覚でも素材カテゴリー知覚は、各感覚様相の評定値の乗算で得られており、性質知覚は各感覚様相の評定値の加重平均によって得られていることが示唆された。また性質知覚については、刺激の組み合わせの「自然さ」によって、重み付けが変化することを示した。この結果は、多くの質感属性が特定の感覚様相に依存せず、各感覚様相に基づいて知覚が行われることを支持する。質感認知においては、複数の感覚情報に基づいた統計的推論によって行われており、それらを実現する機構を我々が持ち合わせているという考えがある。近年の質感の脳研究では、高次視覚野が質感における多感覚統合処理を担っている可能性が浮上している (郷田, 2018; Komatsu & Goda, 2018; Sathian, 2016; Sathian et al., 2011; Stilla & Sathian, 2008)。また視覚・聴覚・触覚それぞれの質感認知が、共通のメカニズムで行われていることが行動実験で示唆されている (Baumgartner et al., 2013; Baumgartner et al., 2015; Bergmann Tiest & Kappers, 2007; Fujisaki, Tokita, & Kariya, 2015)。各感覚様相で共通したメカニズムを持つのは、特定の経路で複数の感覚情報を用いた統計的推論によって、質感認知が行われていることを表すのかもしれない。

一方で、質感認知において統計的推論が行われていることを否定するような知見も得られている。例えば、視触覚の硬軟弁別で、最尤推定モデルから予測される視覚の重み付けよりも、実験の値から求められる視覚の重み付けの方が大きくなり、予測と実験の値が一致しないことが示されている (Cellini et al., 2013; Kuschel et al., 2010)。そのため、一部の質感属性では、最尤推定モデルでの説明が上手くいかないことが示唆

されている。また、「2.7 ベイズ推定・アンチベイズ推定」で述べたアンチベイズ推定モデルも、先行研究 (Peters et al., 2016; Peters et al., 2018) によって否定されている。Peters et al. (2018) では、素材-重さ錯覚について、2つの物体の密度の比を変数として用いたベイズ推定モデルでシミュレーションを行ったところ、素材-重さ錯覚を良く説明することが示唆された。Peters et al. の研究は、過去の質感研究の結果を否定はしないが、アンチベイズ推定によって行われているという考えと対立する結果を示している。質感認知が統計的推論によって得られており、それらを実現する機構がヒトの情報処理に存在するか明らかにしていくためには、今後も統計的推論を意識した研究を行っていく必要があるだろう。

研究2では、質感が視覚的気づきにどのような影響を及ぼすのか不明である、という問題点に関する実験を行った。研究2の結果から、触覚の粗さ情報が両眼視野闘争の知覚交替に影響を及ぼすことが示された。この結果は、質感情報が視覚的気づきに影響を及ぼす事を示唆する。質感が外界の物体に対する気づきに影響を及ぼしたことを示した他の研究として、素材情報がラバーハンド錯覚に及ぼす影響を示した研究 (Tsakiris, Carpenter, James, & Fotopoulou, 2010) がある。ラバーハンド錯覚とは、観察者が義手しか見えないように観察者の片腕の隣に義手を並べた状況で、義手と実際の腕に同期するように刺激を与え続けると、観察者の腕の感覚が義手の方向に移動する現象のことである (Botvinick & Cohen, 1998)。ラバーハンド錯覚は、観察された物体が自分の身体の一部であると気づく感覚 (自己所有感) を調べる方法として扱われている。Tsakiris et al. (2010) では義手の素材が木の場合、人肌のような義手と比べて錯覚の大きさが小さくなることが示された。このように、質感属性の一部が視覚的気づきや自己所有感といった、外界の対象物の存在や変化を意識化する気づきに影響を及ぼすと言える。

Ernst and Bühlhoff (2004) では図 21 のような、感覚刺激から外界に向けた行動、そし

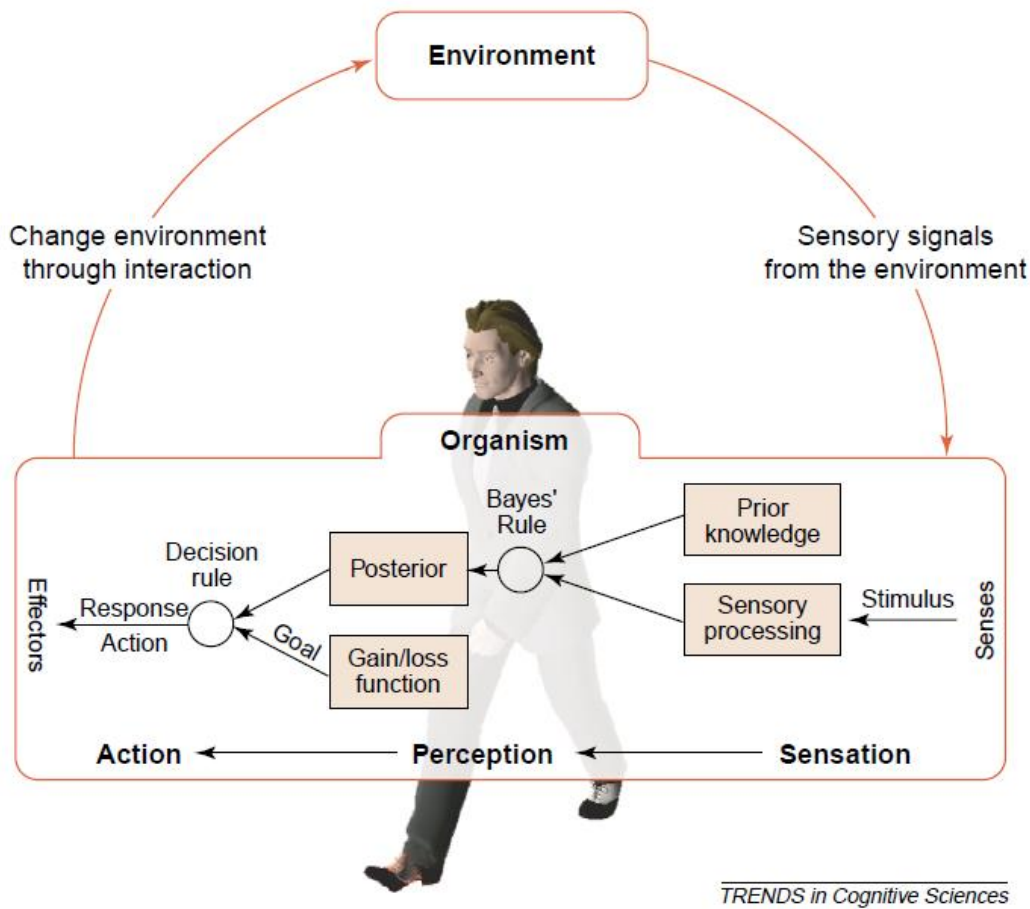


図 21 Ernst and Bühlhoff (2004) のヒトの情報処理モデル (Ernst & Bühlhoff, 2004, p. 164, Fig.1 引用).

て行動によって変化した環境からの感覚刺激という、ヒトの情報処理に関するループ図を示している。感覚様相の刺激と、事前情報のベイズ推定によって知覚がされ、その知覚結果と、目的に基づいて知覚結果を補正する利得・損失関数 (gain / loss function) を組み合わせた結果から最終的な判断をし、外界に行動を移す。その行動によって外界に変化が起き、また感覚様相への刺激が生じるという流れである。この Ernst and Bühlhoff (2004) のループ図を質感の情報処理に当てはめると、感覚情報と事前情報による統計的推論によって質感が認知され、その認知された質感と目的によって、物を触る、価値判断をする等の行動を行い、更にそこから刺激を受けて、新たな質感を

認知するといった一連の流れが生じると考えられる。

山本・崔・三浦 (2014) では、触覚刺激を呈示しながら自然画像の触覚的性質を評価させる行動実験にて、視覚刺激の評価が、触覚刺激に順応していない場合だと触覚刺激に対する評価に近づく結果が得られ、順応した場合だと触覚刺激に対する評価から離れる結果が得られた。山本らは、順応前と後で異なる結果が得られたことから、質感認知における統合処理が判断レベルではなく感覚情報処理レベルで行われていると主張している。この考えは、質感が Ernst and Bühlhoff (2004) のモデルの感覚情報処理 (Sensation) によって得られている可能性を支持する。

また、Hohwy, Roepstorff, and Friston (2008) では両眼視野闘争の知覚交替について、ベイズ推定を用いて説明をしている。Hohwy et al. では家の画像と人の画像での両眼視野闘争を例に、2つの視覚刺激の各推論 (尤度) と、経験などの事前知識から来る外界の推論 (事前確率) の予測誤差が小さい画像が知覚され、抑制されている画像の大きな予測誤差について解決しようとする事で知覚交替が起こると解説されている。ベイズ推定的に両眼視野闘争が行われているとするならば、気づきも Ernst and Bühlhoff (2004) のモデルの感覚情報処理によって生じている可能性がある。更に、研究2を含めた両眼視野闘争の多感覚統合の知見においては、非視覚の感覚情報と一致する画像の尤度が向上することで、その画像に気づきやすくなり、優位時間が長くなる、または抑制時間が短くなると考える事が出来る。ただし両眼視野闘争のメカニズムについて、ベイズ推定に関する行動実験での知見は未だ無い。

質感研究を通してヒトの情報処理を解明するには、質感形成が統計的推論に基づいて行われるのか、そのような機構がヒトの情報処理に組み込まれているのか、統計的推論であるとしたら、どのような情報を用いて分布が形成されるのか、という課題を意識する必要があるだろう。特に分布の形成に関しては、Motoyoshi et al. (2007) の結果から、我々が統計的推論を行う際に、刺激に含まれる低次の特徴を用いていること

が示唆されている。これは単一の感覚様相だけではなく、多感覚統合時にも考慮する必要がある。例えば音による粗さの影響は、音圧だけではなく周波数帯域 (Suzuki, Gyoba, & Sakamoto, 2008; Suzuki, Suzuki, & Gyoba, 2006) や変調周波数 (Altinsoy, 2008) も関連する。粗さ知覚は皮膚に伝わる振動の振幅や周波数に依存する、という考えがあり (Okamoto et al., 2016), 行動実験で聴触覚の周波数相互作用 (Crommett, Pérez-Bellido, & Yau, 2017; Wilson, Reed, & Braidia, 2010; Yau, Olenczak, Dammann, & Bensmaia, 2009) や音の周波数に選択的に反応する第一次聴覚野で、触覚の振動刺激に対する反応が確認されている (Fuxe, 2009; Fuxe, Morocz, Murray, Higgins, Javitt, & Schroeder, 2000; Nordmark, Pruszynski, & Johansson, 2012)。質感認知の情報処理の解明に、感覚様相間の刺激特徴の相互作用を考慮することによって、分布の形成の過程をより明確にできるだろう。

さらに、質感と気づきの関係を調べることによって、質感に基づく判断や行動の情報処理の解明に繋がる。先行研究 (Ono et al., 2022; Tsakiris et al., 2010) では多感覚統合場面を通じて、視覚的気づきや自己所有感といった外界の対象物に対する気づきに、質感が影響を及ぼすことが示された。Kitada et al. (2014) では楔前部は長期記憶に関連する内側側頭葉と連携して、視触覚のテクスチャ比較を行っている部位ではないかと考察されている。研究2の結果や Tsakiris et al. (2010) の結果は、高次視覚野と繋がりがある楔前部のテクスチャ比較によって得られている可能性がある。ただし現在の知見だけでは、一部の質感属性でしか気づきへの影響が確認されていなかったり、質感が認知された後気づきが生じるのか、それとも質感が認知されながら徐々に気づきが生じるのか、といったように質感と気づきの情報処理過程が不明であったりする。今後このような研究が増えることによって、質感を認知してから、判断や行動を移すまでの情報処理過程の解明に繋がり、ヒトの情報処理を明確にすることが出来るだろう。

謝辞

本論文の執筆にあたり，学部時代から7年間ご指導を頂きました森周司先生に深く感謝を申し上げます。研究テーマの決定や学術雑誌論文の執筆など，様々な場面で多くのご助言を頂きました。元研究室助教の廣瀬信之先生には，日頃の研究室活動について手厚いサポートをしていただくと共に，議論を通じて研究に関する貴重なご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。また研究室のスタッフの方々や学生の皆様の助けがあり，研究活動及び博士論文の執筆が出来たと考えております。誠に感謝いたします。

九州大学大学院システム情報科学研究院の志堂寺和則先生には本論文の主査，及びアドバイザー委員を引き受けて頂きました。認知科学研究室の合同ゼミ，アドバイザー委員会など通じて，研究課題に関するアドバイスを数多く頂きました。九州大学大学院人間環境学研究院の光藤宏行先生，熊本大学大学院人文科学研究部の寺本涉先生には本論文の副査，及びアドバイザー委員を引き受けて頂き，本論文の研究課題に対して貴重なコメントを頂きました。大変感謝いたします。

本研究の実験参加者として参加していただきました九州大学の学生の皆様には心より感謝いたします。学生の皆様が実験に参加してくださったことで，研究 1-2 を進めることが出来たと考えております。

本研究の一部は，JSPS 特別研究員奨励費 (21J12549, 研究代表者：小野 未琴) の補助を受けました。日本学術振興会の特別研究員として採用されたことによって，研究に集中することができました。また科学研究費によって，必要な実験刺激や設備を購入でき，より良い環境で研究することが出来ました。大変感謝いたします。

最後に，長い学生生活を支えてくれた家族，そして博士論文執筆の間応援をしてくれた田中詩織さんに感謝を申し上げます。

参考文献

1. Adams, W. J., Kerrigan, I. S., & Graf, E. W. (2016). Touch influences perceived gloss. *Scientific Reports*, 6, 1-12.
2. 相澤淳平・上條正義 (2019). ドットパターンにおける凸点の形状・間隔と粗さ感の関係. 日本感性工学会論文誌, 18, 171-178.
3. Alais, D. (2012). Binocular rivalry: competition and inhibition in visual perception. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 3, 87-103.
4. Alais, D., & Blake, R. (2014). Binocular rivalry and perceptual ambiguity. In J. Wagemans (Ed.), *The Oxford Handbook of Perceptual Organization*. Oxford University Press. 775-798, <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199686858.013.034>
5. Alais, D., & Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current Biology*, 14, 257-262.
6. Alais, D., & Melcher, D. (2007). Strength and coherence of binocular rivalry depends on shared stimulus complexity. *Vision Research*, 47, 269-279.
7. Altinsoy, M. E. (2008). The effect of auditory cues on the audiotactile roughness perception: Modulation frequency and sound pressure level. In: Pirhonen, A., Brewster, S. (Eds.). *International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design* (pp. 120-129). Berlin, Heidelberg: Springer.
8. Bartels, A., & Logothetis, N. K. (2010). Binocular rivalry: A time dependence of eye and stimulus contributions. *Journal of Vision*, 10(12), 1-14.
9. Baumgartner, E., Wiebel, C. B., & Gegenfurtner, K. R. (2013). Visual and haptic representations of material properties. *Multisensory Research*, 26, 429-455.
10. Baumgartner, E., Wiebel, C. B., & Gegenfurtner, K. R. (2015). A comparison of haptic material perception in blind and sighted individuals. *Vision Research*, 115, 238-245.

11. Bergmann Tiest, W. M., & Kappers, A. M. (2007). Haptic and visual perception of roughness. *Acta Psychologica, 124*, 177-189.
12. Blake, R. (1989). A neural theory of binocular rivalry. *Psychological Review, 96*, 145-167.
13. Blake, R., & Logothetis, N. K. (2002). Visual competition. *Nature Reviews Neuroscience, 3*, 13-21.
14. Blake, R., O'Shea, R. P., & Mueller, T. J. (1992). Spatial zones of binocular rivalry in central and peripheral vision. *Visual Neuroscience, 8*, 469-478.
15. Blake, R., & Wilson, H. (2011). Binocular vision. *Vision Research, 51*, 754-770.
16. Braynov, J. B., & Smith, M. A. (2010). Bayesian and “anti-Bayesian” biases in sensory integration for action and perception in the size–weight illusion. *Journal of Neurophysiology, 103*, 1518-1531.
17. Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature, 391*, 756-756.
18. Callier, T., Saal, H. P., Davis-Berg, E. C., & Bensmaia, S. J. (2015). Kinematics of unconstrained tactile texture exploration. *Journal of Neurophysiology, 113*, 3013-3020.
19. Cellini, C., Kaim, L., & Drewing, K. (2013). Visual and haptic integration in the estimation of softness of deformable objects. *i-Perception, 4*, 516-531.
20. Chen, Y. C., Yeh, S. L., & Spence, C. (2011). Crossmodal constraints on human perceptual awareness: auditory semantic modulation of binocular rivalry. *Frontiers in Psychology, 2*, 1-12, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00212>
21. Connor, C. E., Hsiao, S. S., Phillips, J. R., & Johnson, K. O. (1990). Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates. *Journal of Neuroscience, 10*, 3823-3836.

22. Conrad, V., Bartels, A., Kleiner, M., & Noppeney, U. (2010). Audiovisual interactions in binocular rivalry. *Journal of Vision, 10*(10), 1-15. <https://doi.org/10.1167/10.10.27>
23. Conrad, V., Kleiner, M., Bartels, A., Hartcher O'Brien, J., Bülthoff, H. H., & Noppeney, U. (2013). Naturalistic stimulus structure determines the integration of audiovisual looming signals in binocular rivalry. *Plos One, 8*(8), e70710. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070710>
24. Crick, F., & Koch, C. (1998). Consciousness and neuroscience. *Cerebral Cortex, 8*, 97-107.
25. Crommett, L. E., Pérez-Bellido, A., & Yau, J. M. (2017). Auditory adaptation improves tactile frequency perception. *Journal of Neurophysiology, 117*, 1352-1362.
26. Drewing, K., Ernst, M. O., Lederman, S. J., & Klatzky, R. (2004). Roughness and spatial density judgments on visual and haptic textures using virtual reality. In M., Buss, & M., Fritschi (Eds.). *Proceedings of the 4th International Conference EuroHaptics 2004* (pp. 203-206). Munich: Herbert Hieronymus.
27. Eck, J., Kaas, A. L., Mulders, J. L., & Goebel, R. (2013). Roughness perception of unfamiliar dot pattern textures. *Acta Psychologica, 143*, 20-34.
28. Eck, J., Kaas, A. L., Mulders, J. L., Hausfeld, L., Kourtzi, Z., & Goebel, R. (2016). The effect of task instruction on haptic texture processing: the neural underpinning of roughness and spatial density perception. *Cerebral Cortex, 26*, 384-401.
29. Ellis, R. R., & Lederman, S. J. (1999). The material-weight illusion revisited. *Perception & Psychophysics, 61*, 1564-1576.
30. Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature, 415*, 429-433.

31. Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 162-169.
32. Ernst, M. O. (2006). A Bayesian view on multimodal cue integration. In G. Knoblich, I. M. Thornton, M. Grosjean, & M. Shiffrar (Eds.), *Human Body Perception from the Inside Out* (pp. 105-131), Oxford: Oxford University Press.
33. Ernst, M. O. (2009). Perceptual learning: Inverting the size–weight illusion. *Current Biology*, 19, 23-25.
34. Flanagan, J. R., & Beltzner, M. A. (2000). Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size–weight illusion. *Nature Neuroscience*, 3, 737-741.
35. Fleming, R. W., Wiebel, C., & Gegenfurtner, K. (2013). Perceptual qualities and material classes. *Journal of Vision*, 13(8), 1-9.
36. Foxe, J. J. (2009). Multisensory integration: frequency tuning of audio-tactile integration. *Current Biology*, 19, R373-R375.
37. Foxe, J. J., Morocz, I. A., Murray, M. M., Higgins, B. A., Javitt, D. C., & Schroeder, C. E. (2000). Multisensory auditory–somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Cognitive Brain Research*, 10, 77-83.
38. Fujisaki, W., Goda, N., Motoyoshi, I., Komatsu, H., & Nishida, S. Y. (2014). Audiovisual integration in the human perception of materials. *Journal of Vision*, 14(4), 1-12. <https://doi.org/10.1167/14.4.12>
39. Fujisaki, W., Tokita, M., & Kariya, K. (2015). Perception of the material properties of wood based on vision, audition, and touch. *Vision Research*, 109, 185-200.
40. Gepshtein, S., Burge, J., Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2005). The combination of vision and touch depends on spatial proximity. *Journal of Vision*, 5, 1013-1023.

41. Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology*, *18*, 694-698.
42. Guest, S., Catmur, C., Lloyd, D., & Spence, C. (2002). Audiotactile interactions in roughness perception. *Experimental Brain Research*, *146*, 161-171.
43. Guest, S., & Spence, C. (2003). What role does multisensory integration play in the visuotactile perception of texture?. *International Journal of Psychophysiology*, *50*, 63-80.
44. 郷田 直一 (2018). 質感認知の神経基盤を探る 日本画像学会誌, *57*, 197-206.
45. Haynes, J. D., Deichmann, R., & Rees, G. (2005). Eye-specific effects of binocular rivalry in the human lateral geniculate nucleus. *Nature*, *438*, 496-499.
46. Helbig, H. B., & Ernst, M. O. (2007). Optimal integration of shape information from vision and touch. *Experimental Brain Research*, *179*, 595-606.
47. Helbig, H. B., & Ernst, M. O. (2008). Visual-haptic cue weighting is independent of modality-specific attention. *Journal of Vision*, *8*(1), 1-16.
48. Hiramatsu, C., Goda, N., & Komatsu, H. (2011). Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway. *Neuroimage*, *57*, 482-494.
49. Ho, H. N., Iwai, D., Yoshikawa, Y., Watanabe, J., & Nishida, S. Y. (2014). Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object. *Scientific Reports*, *4*, 1-5.
50. Hohwy, J., Roepstorff, A., & Friston, K. (2008). Predictive coding explains binocular rivalry: An epistemological review. *Cognition*, *108*, 687-701.

51. Hollins, M., Bensmaïa, S. J., & Washburn, S. (2001). Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures. *Somatosensory & Motor Research*, *18*, 253-262.
52. 家崎明子, 柚田明弘, 木村朝子, 柴田史久, & 田村秀行. (2008). 複合現実型視覚刺激による触印象への影響 (「複合現実感 4」 特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, *13*, 129-139.
53. 岩村吉晃. (2007). 能動的触知覚 (アクティヴタッチ) の生理学. *バイオメカニズム学会誌*, *31*, 171-177.
54. Jones, B., & O'Neil, S. (1985). Combining vision and touch in texture perception. *Perception & Psychophysics*, *37*(1), 66-72.
55. Jousmäki, V., & Hari, R. (1998). Parchment-skin illusion: sound-biased touch. *Current Biology*, *8*, 190-191.
56. Kahrmanovic, M., Bergmann Tiest, W. M., & Kappers, A. M. (2009). Context effects in haptic perception of roughness. *Experimental Brain Research*, *194*, 287-297.
57. Kitada, R., Sasaki, A. T., Okamoto, Y., Kochiyama, T., & Sadato, N. (2014). Role of the precuneus in the detection of incongruity between tactile and visual texture information: a functional MRI study. *Neuropsychologia*, *64*, 252-262.
58. Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (2010). Multisensory texture perception. In *Multisensory Object Perception in the Primate Brain* (pp. 211-230). Springer, New York, NY.
59. Kleiner, M., Brainard, D., & Pelli, D. (2007). What's new in psychtoolbox-3? *Perception*, *36*, 1.
60. Knill, D. C., & Saunders, J. A. (2003). Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgments of surface slant?. *Vision Research*, *43*, 2539-2558.

61. 小松英彦 (2012). 1. 質感の科学への展望. 映像情報メディア学会誌, 66, 331-337.
62. Komatsu, H., & Goda, N. (2018). Neural mechanisms of material perception: Quest on Shitsukan. *Neuroscience*, 392, 329-347.
63. Kovács, I., Papathomas, T. V., Yang, M., & Fehér, Á. (1996). When the brain changes its mind: Interocular grouping during binocular rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93, 15508-15511.
64. Körding, K. P., Beierholm, U., Ma, W. J., Quartz, S., Tenenbaum, J. B., & Shams, L. (2007). Causal inference in multisensory perception. *Plos One*, 2(9), e943.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000943>
65. Körding, K. P., Ku, S. P., & Wolpert, D. M. (2004). Bayesian integration in force estimation. *Journal of Neurophysiology*, 92, 3161-3165.
66. Körding, K. P., & Wolpert, D. M. (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature*, 427, 244-247.
67. Kuschel, M., Di Luca, M., Buss, M., & Klatzky, R. L. (2010). Combination and integration in the perception of visual-haptic compliance information. *IEEE Transactions on Haptics*, 3, 234-244.
68. Lederman, S. J. (1974). Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro-and microsurface structure. *Perception & Psychophysics*, 16, 385-395.
69. Lederman, S. J. (1979). Auditory texture perception. *Perception*, 8, 93-103.
70. Lederman, S. J. (1981). The perception of surface roughness by active and passive touch. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18, 253-255.
71. Lederman, S. J., & Abbott, S. G. (1981). Texture perception: studies of intersensory organization using a discrepancy paradigm, and visual versus tactual psychophysics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 902-915.

72. Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, *19*, 342-368.
73. Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2004). Haptic identification of common objects: Effects of constraining the manual exploration process. *Perception & Psychophysics*, *66*, 618-628.
74. Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Morgan, T., & Hamilton, C. (2002, March). Integrating multimodal information about surface texture via a probe: relative contributions of haptic and touch-produced sound sources. In *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002* (pp. 97-104). IEEE.
75. Lederman, S. J., Thorne, G., & Jones, B. (1986). Perception of texture by vision and touch: multidimensionality and intersensory integration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *12*, 169-180.
76. Lehky, S. R. (1988). An astable multivibrator model of binocular rivalry. *Perception*, *17*, 215-228.
77. Levelt, W. J. (1965). On binocular rivalry (Doctoral dissertation, Van Gorcum Assen).
78. Logothetis, N. K., Leopold, D. A., & Sheinberg, D. L. (1996). What is rivalling during binocular rivalry?. *Nature*, *380*, 621-624.
79. Lumer, E. D., Friston, K. J., & Rees, G. (1998). Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain. *Science*, *280*, 1930-1934.
80. Lunghi, C., & Alais, D. (2013). Touch interacts with vision during binocular rivalry with a tight orientation tuning. *Plos One*, *8*(3), e58754.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058754>

81. Lunghi, C., & Alais, D. (2015). Congruent tactile stimulation reduces the strength of visual suppression during binocular rivalry. *Scientific Reports*, 5(1), 1-9.
82. Lunghi, C., Binda, P., & Morrone, M. C. (2010). Touch disambiguates rivalrous perception at early stages of visual analysis. *Current Biology*, 20, 143-144.
83. Lunghi, C., Lo Verde, L., & Alais, D. (2017). Touch accelerates visual awareness. *i-Perception*, 8(1), 1-14.
84. Lunghi, C., & Morrone, M. C. (2013). Early interaction between vision and touch during binocular rivalry. *Multisensory Research*, 26, 291-306.
85. Martín, R., Iseringhausen, J., Weinmann, M., & Hullin, M. B. (2015). Multimodal perception of material properties. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, 33-40.
86. Maruya, K., Yang, E., & Blake, R. (2007). Voluntary action influences visual competition. *Psychological Science*, 18, 1090-1098.
87. 増井 透 (1994). 8. 知覚と認知 大山 正・今井 省吾・和気 典二 (編). 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック (pp. 223-245) 誠信書房.
88. Meftah, E. M., Belingard, L., & Chapman, C. E. (2000). Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch. *Experimental Brain Research*, 132, 351-361.
89. 本吉勇 (2014). 視覚認知と画像統計量. *認知科学*, 21, 304-313.
90. Motoyoshi, I., Nishida, S. Y., Sharan, L., & Adelson, E. H. (2007). Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature*, 447, 206-209.
91. Nagano, H., Okamoto, S., & Yamada, Y. (2014). Haptic invitation of textures: Perceptually prominent properties of materials determine human touch motions. *IEEE Transactions on Haptics*, 7, 345-355.

92. Nardini, M., Bedford, R., & Mareschal, D. (2010). Fusion of visual cues is not mandatory in children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*, 17041-17046.
93. 西田 眞也・藤崎 和香 (2016). 多感覚の接点としての質感 小松 英彦 (編) 質感の科学 ——知覚・認知メカニズムと分析・表現の技術—— (pp. 52-72) 朝倉書店
94. Nordmark, P. F., Pruszynski, J. A., & Johansson, R. S. (2012). BOLD responses to tactile stimuli in visual and auditory cortex depend on the frequency content of stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*, 2120-2134.
95. Okamoto, S., Nagano, H., & Ho, H. N. (2016) Psychophysical dimensions of material perception and methods to specify textural space. In: Kajimoto, H., Saga, S., Konyo, M. (Eds.). *Pervasive Haptics* (pp. 3-20). Tokyo: Springer.
96. Okamoto, S., Nagano, H., & Yamada, Y. (2012). Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*, *6*(1), 81-93.
97. Ono, M., Hirose, N., & Mori, S. (2022). Tactile information affects alternating visual percepts during binocular rivalry using naturalistic objects. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *7*, 1-12.
98. 小野 未琴・森 周司 (2022). 素材カテゴリー知覚及び性質知覚における視覚情報と触覚情報の相互作用の検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, *27*, 413-423.
99. 小野 未琴・森 周司 (印刷中). 多感覚統合研究から考える質感認知. 認知心理学研究.
100. 大野雅貴・横澤一彦・鳴海拓志 (2022). 多感覚の統合的認知の基礎と感覚提示インタフェースへの応用可能性. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, *27*, 18-28.

101. Pápai, M. S., & Soto-Faraco, S. (2017). Sounds can boost the awareness of visual events through attention without cross-modal integration. *Scientific Reports*, 7, 1-13.
102. Peters, M. A., Ma, W. J., & Shams, L. (2016). The Size-Weight Illusion is not anti-Bayesian after all: a unifying Bayesian account. *PeerJ*, 4, e2124.
<https://10.7717/peerj.2124>
103. Peters, M. A., Zhang, L. Q., & Shams, L. (2018). The material-weight illusion is a Bayes-optimal percept under competing density priors. *PeerJ*, 6, e5760.
<https://10.7717/peerj.5760>
104. Plass, J., Guzman-Martinez, E., Ortega, L., Suzuki, S., & Grabowecky, M. (2017). Automatic auditory disambiguation of visual awareness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79, 2055-2063.
105. Polonsky, A., Blake, R., Braun, J., & Heeger, D. J. (2000). Neuronal activity in human primary visual cortex correlates with perception during binocular rivalry. *Nature Neuroscience*, 3, 1153-1159.
106. Quinn, H., & Arnold, D. H. (2010). Binocular rivalry and multi-stable perception: Independence and monocular channels. *Journal of Vision*, 10(10), 1-9.
107. Sathian, K. (2016). Analysis of haptic information in the cerebral cortex. *Journal of Neurophysiology*, 116, 1795-1806.
108. Sathian, K., Lacey, S., Stilla, R., Gibson, G. O., Deshpande, G., Hu, X., & Glielmi, C. (2011). Dual pathways for haptic and visual perception of spatial and texture information. *Neuroimage*, 57, 462-475.
109. Sato, Y., Toyoizumi, T., & Aihara, K. (2007). Bayesian inference explains perception of unity and ventriloquism aftereffect: identification of common sources of audiovisual stimuli. *Neural Computation*, 19, 3335-3355.

110. Servos, P., Lederman, S., Wilson, D., & Gati, J. (2001). fMRI-derived cortical maps for haptic shape, texture, and hardness. *Cognitive Brain Research*, *12*, 307-313.
111. Sheinberg, D. L., & Logothetis, N. K. (1997). The role of temporal cortical areas in perceptual organization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *94*, 3408-3413.
112. Spence, C. (2020). Shitsukan—The multisensory perception of quality. *Multisensory Research*, *33*, 737-775.
113. Stilla, R., & Sathian, K. (2008). Selective visuo-haptic processing of shape and texture. *Human Brain Mapping*, *29*, 1123-1138.
114. Stuit, S. M., Paffen, C. L., Van Der Smagt, M. J., & Verstraten, F. A. (2014). Image-based grouping during binocular rivalry is dictated by eye-of-origin. *Plos One*, *9*(7), e95327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095327>
115. Suzuki, Y., Gyoba, J., & Sakamoto, S. (2008). Selective effects of auditory stimuli on tactile roughness perception. *Brain Research*, *1242*, 87-94.
116. Suzuki, Y., Suzuki, M., & Gyoba, J. (2006). Effects of auditory feedback on tactile roughness perception. *Tohoku Psychologica Folia*, *65*, 45-56.
117. Suzuishi, Y., Hidaka, S., & Kuroki, S. (2020). Visual motion information modulates tactile roughness perception. *Scientific Reports*, *10*, 1-10.
118. 谿雄祐, 藤原大志, 竹本敦, 飛谷謙介, 井村誠孝, & 長田典子. (2018). テクスチャの印象における視触覚情報統合様式に関する検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, *23*, 115-118.
119. Tong, F., Nakayama, K., Vaughan, J. T., & Kanwisher, N. (1998). Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex. *Neuron*, *21*, 753-759.
120. Tsakiris, M., Carpenter, L., James, D., & Fotopoulou, A. (2010). Hands only illusion:

- multisensory integration elicits sense of ownership for body parts but not for non-corporeal objects. *Experimental Brain Research*, 204, 343-352.
121. Tsuchiya, N., & Koch, C. (2005). Continuous flash suppression reduces negative afterimages. *Nature Neuroscience*, 8, 1096-1101.
122. Van Ee, R., Van Boxtel, J. J., Parker, A. L., & Alais, D. (2009). Multisensory congruency as a mechanism for attentional control over perceptual selection. *Journal of Neuroscience*, 29, 11641-11649.
123. Varela, F. J., & Singer, W. (1987). Neuronal dynamics in the visual corticothalamic pathway revealed through binocular rivalry. *Experimental Brain Research*, 66, 10-20.
124. Welch, R. B., & Warren, D. H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychological Bulletin*, 88, 638-667.
125. Whitaker, T. A., Simões-Franklin, C., & Newell, F. N. (2008). Vision and touch: Independent or integrated systems for the perception of texture?. *Brain Research*, 1242, 59-72.
126. Wilson, E. C., Reed, C. M., & Braida, L. D. (2010). Integration of auditory and vibrotactile stimuli: Effects of frequency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 3044-3059.
127. Wolf, M., & Hochstein, S. (2011). High-level binocular rivalry effects. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00129>
128. Wolfe, J. M. (1983). Influence of spatial frequency, luminance, and duration on binocular rivalry and abnormal fusion of briefly presented dichoptic stimuli. *Perception*, 12, 447-456.
129. 山本 健太郎・崔 原齊・三浦 佳世 (2014). 視覚的触感に触覚情報が及ぼす影響 基礎心理学研究, 33, 9-18.

130. Yanagisawa, H., & Takatsuji, K. (2015). Effects of visual expectation on perceived tactile perception: An evaluation method of surface texture with expectation effect. *International Journal of Design*, 9, 39-51.
131. Yau, J. M., Olenczak, J. B., Dammann, J. F., & Bensmaia, S. J. (2009). Temporal frequency channels are linked across audition and touch. *Current Biology*, 19, 561-566.
132. Yokosaka, T., Kuroki, S., Watanabe, J., & Nishida, S. Y. (2017). Estimating tactile perception by observing explorative hand motion of others. *IEEE Transactions on Haptics*, 11, 192-203.
133. 横坂拓巳, & 渡邊淳司. (2017). 手の動きと結びついた触質感認知の研究. 人工知能学会全国大会論文集 第 31 回 一般社団法人 人工知能学, 2L2OS09a4-2L2OS09a4
134. Zhou, W., Jiang, Y., He, S., & Chen, D. (2010). Olfaction modulates visual perception in binocular rivalry. *Current Biology*, 20, 1356-1358.
135. Zhou, W., Zhang, X., Chen, J., Wang, L., & Chen, D. (2012). Nostril-specific olfactory modulation of visual perception in binocular rivalry. *Journal of Neuroscience*, 32, 17225-17229.