

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：63905

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12133

研究課題名(和文)立体物への画像投影技術を用いた質感脳情報処理の解明

研究課題名(英文)Understanding material perception using projection technique

研究代表者

小松 英彦(KOMATSU, Hidehiko)

生理学研究所・システム脳科学研究領域・教授

研究者番号：00153669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：プロジェクションマッピング技術の脳科学実験への応用可能性を探るため、さまざまな素材の実物刺激とそれを模擬したプロジェクションマッピング刺激に対して2頭のニホンザルに把持課題を行わせ行動を比較した。実物とプロジェクションマッピング刺激で行動に違いが見られ、サルは何らかの手がかりで両者を区別していた。しかし接触を避ける素材ではいずれの場合でも顔面温度の低下が見られた。また興味深いことに、プロジェクションマッピングによる実験開始後、実験前には触ることを避けていた素材への接触の増加が観察された。これらの結果は、プロジェクションマッピング刺激が実物に近い質感で知覚されていたことを示唆する。

研究成果の概要(英文)：To explore the potential of projection mapping technique in the studies of neuroscience, we trained two macaque monkeys an object grasping task, and compared their behaviors between the conditions when real objects with various materials were presented and when the images of objects were presented by projection mapping. In both conditions, when objects which the monkey tended to avoid touching were presented, lowering of the facial temperature was observed. In addition, after exposure to the projection-mapped object, this monkey became to touch materials which it avoided to touch before the experiment. These results suggest that the object stimuli presented by the projection mapping technique were perceived to have high level of reality, and that this technique has potential to be applied for the behavioral experiments in neuroscience in which use of real objects are needed as the stimuli while it is difficult to prepare real objects.

研究分野：認知神経科学

キーワード：質感知覚 プロジェクションマッピング 素材認知 リアリティ

1. 研究開始当初の背景

素材識別は日常生活においてきわめて重要な情報を与える知覚・認知機能である。われわれのグループはこれまで視覚による素材識別の神経機構を調べるために、ヒトやサルを対象として実験を行ってきた。その結果、いずれの種においても腹側高次視覚野においてさまざまな素材の質感の区別が行われていることが明らかになってきた。さらに、サルを用いて実物素材の視触覚経験の前後で脳活動を比較した研究の結果から、腹側高次視覚野の活動は経験の影響を受けて変化することも示された。この実験では、9種類の素材(金属、ガラス、セラミック、石、木目、樹皮、革、布、毛)について、ほぼ同じ大きさの円柱状の物体を用意し、実物呈示装置を用いてそれらの物体を一つずつサルの眼前に呈示し、サルが手を伸ばしてそれをつかむことを繰り返し行わせた。これを合計4頭のサルで行ったが、そのうち2頭のサルでは毛の物体(毛皮を塩化ビニールのパイプに巻いて作った円柱状の物体)に対しては触ろうとしない興味深い行動が観察された。注目すべきことは、サルはどの素材の物体に対しても把持すれば報酬が得られるにもかかわらず特定の素材を忌避したことである。このことは、実物体が持つリアルな質感が行動選択に強い影響をもたらすことを示す。

近年心理物理学や脳科学の発展により視覚情報処理機構の解明が進み、形、色、動き、両眼視差、テクスチャなどの特徴が視覚野でどのように表現され、どのように物体知覚が生み出されているかについての理解が深まっている。これらの研究では、ある特徴を操作した刺激を画像呈示デバイスに表示して、動物や被験者の行動を観察したり脳の応答を解析することが基本的な方法である。それらの研究では通常CRT(ブラウン管による画像呈示装置)や液晶ディスプレイなどの二次元のデバイスに画像を提示して実験を行っている。三次元的な刺激を提示する場合は両眼視差をつけた刺激を用いるが、その場合両眼の輻輳や目のレンズの調節といった眼光学系の状態は、実物体を見る時とは異なる不自然な状態におかれる。そのためこれらの刺激呈示方法では、必然的に実物体の持つリアルな質感がある程度失われているものと考えられる。一方、さまざまな素材の実物体を実験のためにそろえることは多大な困難を伴う。そのような実験を行うためには、さまざまな素材を集めるだけではなく、実験条件を統制するために一定の形状に加工する必要がある。しかしさまざまな種類の素材を集めること自体が困難であるとともに、素材を加工するためには素材ごとに専門的な加工技術を要し、この点においても困難を伴う。

近年プロジェクション・マッピング技術の開発や改良が進み、立体物に複雑なテクスチャや色を投影したり、さらにはそれらの時間的な変化まで再現することが可能になり、極

めてリアルな立体画像を生成することができるようになった。この方法の場合には、三次元形状自体は現実に存在する物体が持っている属性であるため、上でのべたようなこれまでのステレオ画像刺激の持つ問題は生じない。また物体の形状をあらかじめ計測して、投影画像を計算することで、任意の視点から見たリアルな画像を立体物上に再現することができると考えられる。さまざまな素材の画像をプロジェクションマッピングで呈示するためには、さまざまな素材の画像を集める必要があるが、これは実物を集めて加工することに比較して容易であると想像される。しかし、プロジェクションマッピング技術を心理物理や行動の実験に応用した事例や、実物体に対する行動と比較した事例は知る限り存在しない。そこで本研究では、プロジェクションマッピング技術を素材認知を調べるための行動実験に応用する可能性を探る試みを行った。

2. 研究の目的

本研究では、近年技術革新が著しいプロジェクション・マッピング技術を用いて作られた刺激が、どの程度現実感をもって知覚されているかを客観的な指標で評価するために、統制された行動実験をニホンザルに行わせ、行動反応を実物刺激を用いた場合とプロジェクションマッピングで呈示した刺激を用いた場合の間で比較する。サルはすでにさまざまな素材の実物体を見て触る実物把持課題を訓練されており、素材による行動の違いが明らかになっている。具体的には毛で覆われた物体を触ることを強く忌避する傾向が一頭のサルで見られた。この実物把持課題では、それぞれの物体をほぼ同じ大きさの円柱状の形状にそろえて、それをサルが見て把持すると報酬が得られる。本研究ではそれらとほぼ同じ大きさの単一の白い円柱状の物体に、プロジェクションマッピングにより実物把持課題で用いたのと同じ種類のさまざまな素材の画像を投影し、サルに同じ行動課題を行わせる。その時の行動反応と、実物把持課題での行動反応を比較することで、サルがプロジェクションマッピングで呈示した刺激をどの程度現実感のある刺激と認知していたかを評価する。

3. 研究の方法

(1) 実物把持課題

2頭のニホンザル(RLとYK)に実物把持課題の訓練を行った。実物刺激は9種類の素材(金属、ガラス、セラミック、石、樹皮、木目、皮革、布、毛)で直径約2センチの円柱状の物体を用いた。それぞれの素材の物体は4つのサンプルを用いた。物体は実物呈示装置にセットした。物体ホルダーはストレーンゲージと接続しており、サルが実物体を把持して力をかけると、力を検知して電圧信号に変換し、制御用コンピュータに力の大きさ

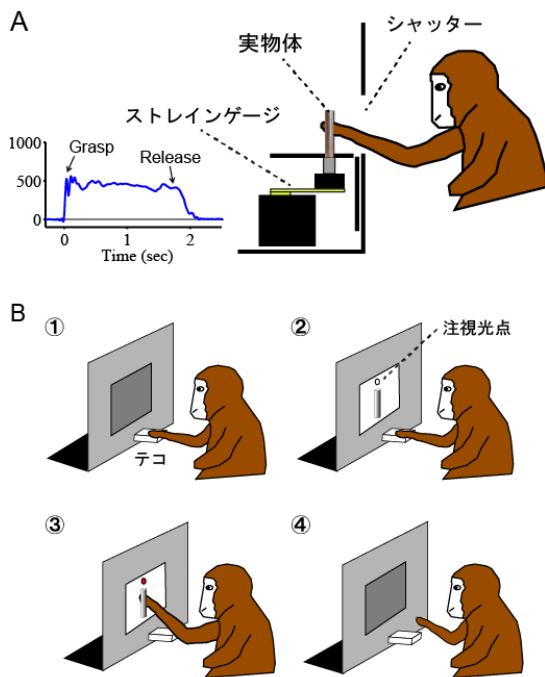


図1 実物刺激呈示装置と把持課題の概略図の信号として入力された(図1A)。この装置の前にモンキィチェアに乗せたサルを連れてきて課題を行わせた。

実物把持課題の試行はサルがモンキィチェア上のテコを押すことで開始した。テコを押すと実物呈示装置のシャッターが開いて、サルは実物体を見ることができた。また実物体のすぐ上に注視光点が点灯し、サルは注視光点を見ることが求められた。一定期間後、注視光点の色が白から赤に変化した。それをトリガーとしてサルは一定時間以内にテコを離し、実物体に手を伸ばし把持を行い、一定強度以上の力をかけて合計1.2秒間引くと液体報酬が与えられた(図1B)。サルはこの課題を約2カ月行った。その結果、1頭のサル(RL)は毛の素材に全く触ろうとせず、強く忌避する傾向が見られた。もう1頭のサル(YK)は最初は触ろうとしない傾向が見られたが、その後は把持を行うようになった。2頭のサルはこの課題の前後に機能的MRIで脳活動の計測を行った。機能的MRI実験の終了後、約2年半後にプロジェクションマッピングを用いた実物把持課題の実験を行った。この実験では9種類の実物刺激をランダムに呈示できるように改良した実物呈示装置を用いた。この実物呈示装置は、回転円板部

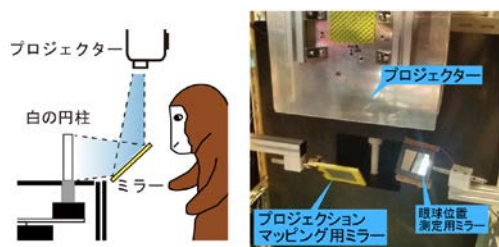


図2 プロジェクションマッピング刺激呈示装置の概略図と写真

に9個の物体ホルダーが等間隔で円環状に配列しており、9種類の実物刺激を1サンプルずつ装着した。9種類の内訳は以下の通りである。9個の物体ホルダーのうち8個には実物素材(金属、セラミック、石、樹皮、木目、皮革、布、毛)を装着した。残りの1個のホルダーには、白いマットのペイントで塗装した塩化ビニールの棒(直径2cm)を装着し、これに対してプロジェクションマッピングで素材の画像を投影した。投影した素材の画像は7種類の素材(金属、セラミック、石、樹皮、木目、皮革、布)については実物呈示したサンプルの写真を用いた。毛については実物呈示したサンプル以外の毛の実物の写真もしくはCGで作成した毛の画像を用いた。また毛のみ実物呈示と異なるサンプルを用いているので、そのことが行動に影響した可能性を排除するために木目についても実物呈示したサンプル以外の写真を追加した。したがってプロジェクションマッピングで呈示した素材は合計9種類(金属、セラミック、石、樹皮、木目、皮革、布、毛、追加した木目)となり、各種類について4サンプルの画像を呈示した。

(2) プロジェクションマッピング

プロジェクションマッピングはモンキィチェア上方に設置したDLPプロジェクタを用いて投影し、光線をサルの視線を妨げない位置に設置したミラーで反射して塩化ビニールの棒に呈示した(図2)。プロジェクションマッピングのプログラムは岩井が独自に開発したものをを用いて行った。このプログラムでは、画像が投影される範囲を投影対象の物体の3次元形状に合わせて調整することが可能となっており、事前に投影範囲を決めるキャリブレーションを行った。素材画像を投影しない状態の塩化ビニール棒の様子と、素材画像をプロジェクションマッピングで投影した状態の棒の様子を図3に示す。3次元物体表面に正確に投影が行われており、一見実物と遜色の無い質感が得られていることが分かる(図3)。サルの行動課題の試行でサルが行う行動は上で記載したものと同じである。実験はブロック単位で行い、1ブロックには実物素材刺激(8種類)とプロジェクション刺激(9種類)をランダムに混ぜて呈示した。1ブロックでは実物素材刺激は10回繰り返して呈示し、プロジェクシ

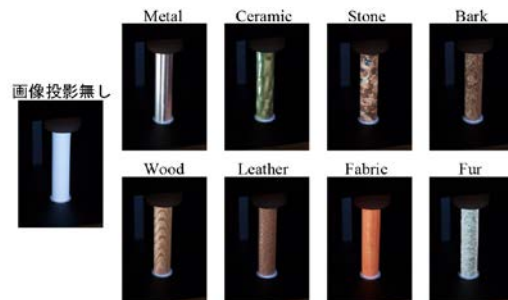


図3 素材画像を投影した様子

ン刺激はそれぞれの種類について5回呈示した。したがって1ブロックの試行数は125試行(8*10+9*5)であった。1日に2ブロックをサルに行わせ、ブロックごとに新しいサンプルに交換した。そのため2日間(4ブロック)で実物素材刺激とプロジェクション刺激のすべてのサンプルを呈示した。これを1セッションとして、実験は5セッション(のべ10日間)行ってデータを集めた。プロジェクション刺激で用いた画像は、同じブロック内では実物素材で用いたサンプルとは重複しないようにした。

その後プロジェクションマッピングのプログラムを改良すると共に、プロジェクタの設置位置を変えることで、より高解像度の画像を正確に物体表面に呈示できるように実験システムを変更し、再び行動課題実験を行った。したがってプロジェクションマッピングを用いた実験(およびそれに並行して行う実物素材刺激を用いた課題)は合計2回行った。2回目の実験は1回目の実験が終了して約5カ月後に行った。結果では1回目と2回目の実験の結果は分けて記載する。

(3) 生理反応の計測

実物呈示装置を用いた行動課題の正答率および力の強さの測定以外に、さまざまな素材に対して生成される情動反応の指標を得る目的で、生理反応の計測を行った。計測した内容は、瞳孔サイズ、心拍変動、および顔面の温度である。瞳孔サイズは赤外線アイカメラシステム(ISCAN)を用いて計測した。心拍変動はBIOPACに接続したパルスオキシメータを用いて測定した。また顔面の温度は赤外線サーモグラフィ(FLIRA655SC)を用いて計測し、顔面の皮膚の動きが小さく温度変化が大きい鼻上の領域を対象に解析を行った。

4. 研究成果

1頭のサル(YK)については、実物を用いた行動課題およびプロジェクションマッピングによる行動課題のいずれにおいても素材の種類にかかわらず正しく反応し、素材間で明瞭な行動の差が見られなかった。そこで以下では素材間で行動に差が見られたもう1頭のサル(RL)についての結果を述べる。

(1) プロジェクションマッピング開始前の実物行動課題

サルRLにおいては実物の素材刺激に対しては、毛と布に触らない傾向が顕著にみられた。これは以前にこのサルで行った実物行動課題の成績と対応しており、一貫して毛には触ることを忌避する傾向が続いている。布については実物行動課題の訓練初期に忌避する傾向が見られその後正しく把持をするようになっていたが、今回の実験では忌避する傾向が再び現れていた。

(2) 1回目のプロジェクションマッピング実験の結果

プロジェクションマッピングにより9種類の素材画像(うち2種類は木目)を呈示した結果、いずれの素材に対してもサルは把持を行い報酬を得ることができた。しかし、反応を詳細に分析した結果、素材による違いが

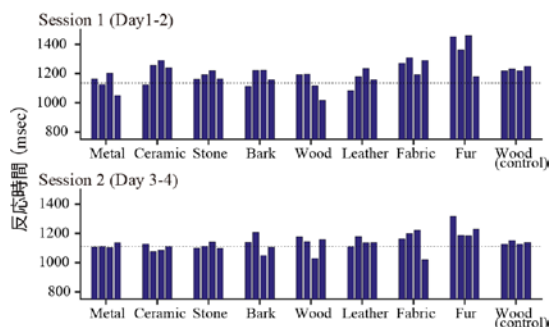


図4 プロジェクションマッピングで呈示した各素材刺激に対する反応時間

見られた。図4はプロジェクションマッピングで呈示した各素材刺激に対する反応時間を示したものである。反応時間は注視点が赤に変化してから物体を把持して力が閾値を超えるまでの時間である。これを見ると毛の刺激の4つのサンプルのうち3つに対してセッション1で反応時間が他の素材に比べて長いことが分かる。毛に対する反応時間の平均は布を除く他の素材に比べて有意に長かった(Tukey's test, $p < 0.05$)。布に対する反応時間もやや長い傾向がみられるが、金属と木目に対してのみ有意に違っていた。このように毛のプロジェクションマッピング刺激に選択的に反応時間が増大していたことは、実物刺激に対する忌避と対応している。しかし実物刺激に対しては全く触らなかったのに対して、プロジェクションマッピング刺激に対しては把持を行っていることから、両者は区別されていたと考えられる。

最初のセッションで見られた毛のプロジェクションマッピング刺激に対する反応時間の延長は、セッション2では減少し、セッション3では明らかでなくなった。全5回のセッションにおける金属と布と毛の3種類のプロジェクションマッピング刺激に対する反応時間の変化を図5にまとめた。いずれの素材においてもセッション回数が増えるにしたがって反応時間が短縮する傾向が見られると共に、毛と他の素材の間の差がなく

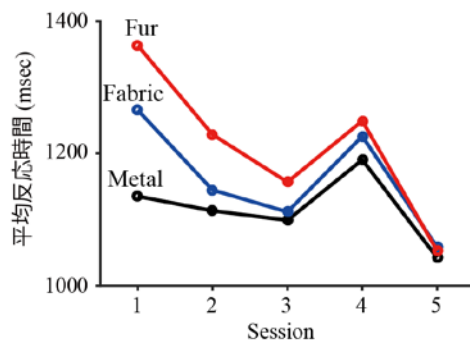


図5 プロジェクションマッピング刺激に対する反応時間の変化

なっていたことが分かる。

(3) 2回目のプロジェクションマッピング実験の結果

2回目のプロジェクションマッピング実験においても1回目同様、サルはプロジェクションマッピングで呈示したいずれの素材の刺激に対して正しく把持を行い報酬を得た。また反応時間についてはどのセッションにおいても素材間で有意な差は見られなかった。しかし、この実験では実物素材に対して興味深い反応が観察された。まず実物素材ではそれまで全く触らなかつた毛の実物刺激に対して、サルが触れることが観察された(図6)。触れる力は弱くかつ短時間で手

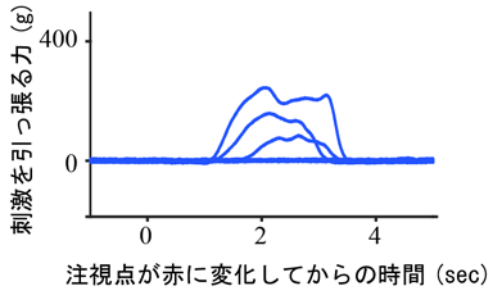


図6 毛の実物刺激に対する行動反応

を離れたためほとんどの場合正しい反応とはカウントされず1試行を除いてサルは報酬を得られなかった。また実物の布刺激に対する行動においても変化が見られた。セッション1では4サンプルのうち2つには触らず、残りの一つのサンプルに対しても正答率がやや低かったが、セッション2ではいずれのサンプルに対しても高い正答率で反応を行うようになった(図7)。この結果はプロジェクションマッピング刺激と実物刺激の間で何らかの手がかりを用いて区別はできたものの、サルに混乱が生じていた可能性を示唆する。プロジェクションマッピングでは、視覚的な見えと触覚フィードバックの間にミスマッチが生じる。実物と遜色の無い質感を持つ物体に触った時に得られる触覚のフィードバックは実物とは非常に異なるものである。何らかの手がかりで実物とプロジェクションマッピング刺激の区別ができたにしても、サルの認知判断に混乱が生じた可能性がある。実物とプロジェクションマッピングを区別する手がかりとしては、物体表面の微小な凹凸がプロジェクションマッピングでは作れないこと、特に毛の場合の細かい織

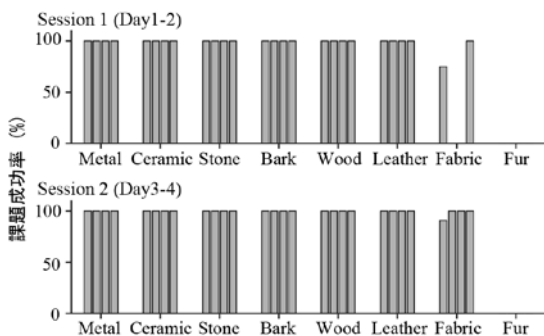


図7 実物の布に対する行動反応

維がつくる凹凸が再現できないことがまず考えられる。しかし、2回目のプロジェクションマッピング実験では解像度の向上と共に画像の周囲に黒い領域を設けたことで繊維が物体周囲に存在するかのよう見えの再現にも成功している。DLP プロジェクタを用いたために目の動きにともない色ずれが生じて不自然な知覚が生じた可能性はあるが、プロジェクションマッピング実験では実物素材刺激の照明にもDLPプロジェクタからの白色光を用いており、これが手がかりになったとは考えにくい。可能性のある要因としては、サルが物体を把持する時にプロジェクタからの光線が手に映りこんだり、手の移動時に物体への投影光が遮蔽されたりすることにより実物と異なる光の当たり方が生じて、それによって区別ができたことが考えられる。この場合、刺激の質感としてはプロジェクションマッピングの刺激は実物素材刺激と遜色の無いもので区別が付きづらかったが、投影光の映りこみや遮蔽によって区別が生じた可能性が考えられる。

(4) 生理反応計測の結果

サル RL において顔面(鼻領域)の体温測定、心拍変動測定、瞳孔サイズ計測を行った。その結果、毛に対して実物素材刺激においてもプロジェクションマッピング刺激においても他の素材に比べてやや低い傾向が見られた(図8)。この図では各素材に対する

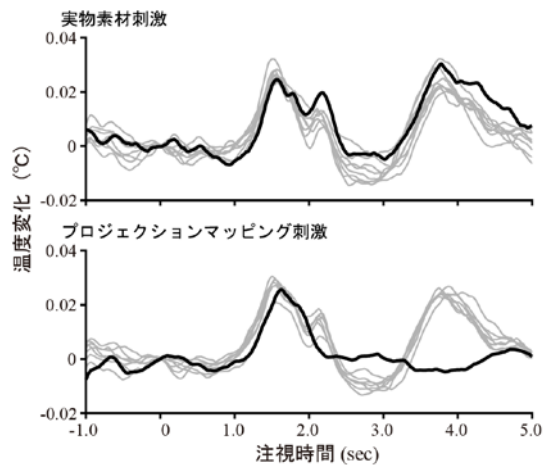


図8 素材刺激を呈示したときの鼻部の温度変化

鼻の温度を示しており、上が実物素材刺激、下がプロジェクションマッピング刺激に対するすべての試行の平均を示している。毛の刺激に対する反応は黒い線で示している。実物呈示装置のシャッターが開いて、サルが物体付近への注視を開始してから時間を横軸に示している。注視後1秒から2秒あたりの期間で毛が呈示された時の温度が、他の素材に比べて相対的に低いことが分かる。実物素材刺激に対する応答で、2秒以降で他の素材に比べて平坦で大きな差が見られるが、これは把持運動の有無による違いを反映した可能性が考えられる。瞳孔サイズは毛の素材に対してやや大きい傾向が見られたが体温変化に比べて顕著ではなかった。また心拍変

動については明瞭な差は見られなかった。

(5) 遮蔽の除去の検討

成果の(3)で述べたようにサルの手による遮蔽によって対象上に影が生じると、プロジェクションマッピングの効果が損なわれる可能性がある。そこで、岩井は複数台のプロジェクタを用いて影を投影結果から除去する研究を進めた。投影対象の部位毎に投影すべきプロジェクタを計算し、各プロジェクタからの投影像の接続部分を目立たないよう処理した投影画像を1台のコンピュータで生成することは計算コストが高く、サルの手のように遮蔽物が動くケースではオンラインでの影除去が困難であった。これに対して、分散協調最適化を採用し、各プロジェクタに1台のコンピュータを割り当て、それらが独立に投影画像を計算する手法を開発し、それが動的な遮蔽物による影除去に有効であることを明らかにした。このような方法を用いることで、将来的にはプロジェクションマッピング技術をより有効に行動実験や生理実験に応用する道が開かれるものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Okazawa G*, Tajima S, Komatsu H (2017) Gradual development of visual texture-selective properties between macaque areas V2 and V4, Cerebral Cortex, in press (印刷中) DOI : 10.1093/cercor/bhw282 査読有
- ② 杉森順子 (2017) 創作したオブジェへのプロジェクションマッピング—《私の左眼は何を見ている》を事例として—, 愛知工科大学紀要, 第14巻, pp.9-17 査読有
- ③ Tsukamoto J, Iwai D, Kashima K (2017) Distributed optimization framework for shadow removal in multi-projection systems, Computer Graphics Forum, in press (印刷中) DOI:10.1111/cgf.13085 査読有
- ④ Goda N*, Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Komatsu H (2016) Crossmodal association of visual and haptic material properties of objects in the monkey ventral visual cortex, Current Biology, 26(7):928-934, DOI: 10.1016/j.cub.2016.02.003 査読有
- ⑤ 小松英彦 (2015) 質感がなぜ重要か, Brain and Nerve, 67(6): 663-668, DOI:無, 査読無

[学会発表] (計5件)

- ① 横井功, 岩井大輔, 小松英彦 (2016. 11. 30) プロジェクションマッピングによる画像

素材刺激を用いたサルの行動実験, 質感のつどい第2回公開フォーラム, 千葉大学(千葉県千葉市)

- ② Komatsu H (2016. 10. 22) Exploring neural mechanisms of Shitsukan, PRISM6, (Ebsdorfergrund, Germany) 《招待講演》
- ③ Tsukamoto J, Iwai D, Kashima K (2016. 9. 19 ~ 2016. 9. 23) Distributed optimization for shadow removal in spatial augmented reality, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (Merida, Mexico)
- ④ 杉森順子, 川崎宏典 (2016. 9. 14) 技術と文化の融合からみたプロジェクションマッピングの調査, 第21回日本バーチャリアリティ学会大会, つくば国際会議場(茨城県つくば市)
- ⑤ 横井功, 橘篤導, 南本敬史, 郷田直一, 小松英彦 (2015. 11. 25) 実物体刺激によって引き起こされる素材カテゴリーに依存したサルの行動反応, 質感のつどい第1回公開フォーラム, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区)

[図書] (1件)

- ① 小松英彦, 郷田直一 (2017) 触り心地の制御、評価技術と新材料・新製品開発への応用, 第1章第1節 質感は脳でどのように処理されているのか? pp.3-9, 技術情報協会

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)
- [その他] 該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 英彦 (KOMATSU, Hidehiko)
生理学研究所・システム脳科学研究領域・教授
研究者番号: 00153669

(2) 研究分担者

岩井 大輔 (IWAI, Daisuke)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 90504837

杉森 順子 (SUGIMORI, Junko)
愛知工科大学・工学部・准教授
研究者番号: 00559891

(3) 連携研究者

横井 功 (YOKOI, Isao)
生理学研究所・システム脳科学研究領域・助教
研究者番号: 50592747