

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：63905

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22135007

研究課題名（和文）質感認知の高次脳メカニズム

研究課題名（英文）Higher brain mechanisms of Shitsukan perception

研究代表者

小松 英彦（KOMATSU, Hidehiko）

生理学研究所・生体情報研究系・教授

研究者番号：00153669

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 111,900,000円

研究成果の概要（和文）：視覚的質感を形作る高次元な情報の脳内表現を明らかにするために、高次元空間の分類の問題と、ある次元の識別の問題の2つの方向から研究を進めた。前者に関しては素材識別の脳機構をヒトとマカクザルで主に機能的MRIを用いて調べた。後者に関しては、光沢情報の脳内表現をマカクザルのfMRIと電気生理実験で調べた。いずれにおいても腹側高次視覚野で知覚に関する情報が表現されていることが明らかになった。またマーモセットで、多チャンネル記録法とin vivo線維連絡可視化法を併用して実験を行ったところ、腹側高次視覚野内に光沢情報を表現する複数の小領域が存在し、神経ネットワークを作ることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：To investigate neural representation of high-dimensional space of Shitsukan perception, we studied two problems. One problem is how the high-dimensional space is divided and labelled, and the other is how the different values along a specific dimension is discriminated. With regard to the former problem, we studied how various materials are distinguished in the brain mainly by using functional MRI (fMRI) technique in humans and macaque monkeys. With regard to the latter, we studied how gloss information is represented in the macaque brain by using fMRI and single unit recording technique. We found that, in both cases, information related to Shitsukan perception was represented in higher ventral areas. We also conducted experiments using multi-channel recording technique and in vivo visualization of neural connections, and found that multiple sub-regions existed in the higher ventral visual area of the marmoset and they formed a neural network.

研究分野：視覚と質感の認知神経科学

キーワード：質感 視覚 表面反射特性 素材識別 脳科学

1. 研究開始当初の背景

我々は物体を見たときにその素材や触感、或いは新鮮である、腐っている、錆びているなどといった状態を瞬時に認識できる。そのような質感認知の能力により我々は事物についての情報を得ると共に、世界の豊かさを実感することができる。脳神経科学の発達により、大脳視覚領野における形、色、動き、奥行きなどの要素的情報の脳内表現の理解が進み、また2000年代に入ってから機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を中心としてヒトの脳活動の解析技術が大きく発展した。また高次視覚野において物体画像や顔画像といった複雑な刺激についてもその脳内表現の理解は急速に進んできた。しかし質感認知に関しては、脳神経科学的な理解がほとんど進んでいなかった。その最大の理由は、網膜像に含まれるどのような視覚特徴が質感認知において重要であるかがよく分かっていなかったことである。しかし工学の発展により物理モデルを用いて高度な質感をもつ物体画像の作成が可能になり、また心理物理学研究の進展により質感認知に関わる手掛かりが徐々に明らかにされつつあり、研究開始当初の状況は質感認知に関わる情報の脳内表現の研究を行う環境が整いつつある状況にあったと言える。この研究は工学と心理物理学の発展を踏まえて系統的に質感認知の脳内機構を探る世界的にも初めての試みであった。

2. 研究の目的

質感認知は刺激にもとづいて素材を識別する機能と、特定の質 (例えば光沢) についてその程度を区別する機能が含まれる。この研究では視覚前野および視覚連合野のどの部位がそれらの機能に関わっているか、そしてその部位においてそれぞれの機能に関係する情報がどのように表現されているか、そのような情報表現は脳内のどのような神経情報処理で作りだされているのか、を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

この研究では、質感の神経機構を調べるためにヒトを被験者として機能的磁気共鳴画像法 (functional MRI = fMRI) で脳活動を測定すると共に、ヒトの視覚機能のすぐれたモデル動物であるマカクザルを用いて実験を行った。マカクザルの脳活動の記録は fMRI と微小電極を用いたニューロン活動記録法の両方を用いた。また分担者は脳溝がほとんどなく大脳皮質が脳表面から観察できる利点を生かした実験を行うためにマーモセットを用いて実験を行った。マーモセットでは、多点電極を刺入し同時に複数のニューロン活動の記録を行った。マカクザルは覚醒状態で注視課題を行っている状態で実験を行い、マーモセットは麻酔下で実験を行った。また代表者はヒトを対象にした質感知覚の心理

物理実験も必要に応じて行った。

この研究では、質感認知機能の主な構成要素である素材を識別する機能と、物の表面状態を識別する機能のそれぞれについて神経機構を調べる実験を行った。表面状態に関しては、質感に大きな影響を与え工学や心理物理学の研究も良く進んでいる光沢知覚にテーマを絞って研究を行った。素材識別の神経機構を調べるためには、一般的によく見られる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」の画像刺激を用いた。形状の影響を取り除くために円柱状に形状はそろえ、コンピュータグラフィックス (CG) のプログラムを用いて刺激画像を作成した (図1)。



図1 素材識別実験で使った素材CG画像

その画像をヒトとサルが見ている時の脳活動を計測した。また素材識別に関わる情報処理を調べるために、さまざまな素材の画像からテクスチャ合成に用いられる画像統計量 (PS統計量) を計算により求め、PS画像統計量に基づいて合成した画像刺激も用いた。光沢を見分ける脳活動を調べるための刺激もCGにより作成した。fMRIの実験では、鏡面で光沢の高い物体刺激と艶消しで光沢の低い物体刺激を LiteWave ソフトウェアを用いて作成した。また光沢を見分けるニューロン活動を調べる実験には33種類異なる光沢を持つ物体画像を作成して用いた。そのために33種類の表面反射特性のデータを MERL BRDF データベース(1)から取得し、表面反射の解析的なモデルの一つである Ward-Duer モデルを用いて Radiance (2) によりCG画像を作成した。物体の三次元形状は LiteWave ソフトウェアにより自作したものを、照明環境は Light Probe Image Gallery (3) より、自然照明環境データを選んで用いた。作成した33種類の異なる光沢刺激をサルに呈示し、それぞれの刺激に対するニューロン活動を記録した。また光沢知覚の重要なパラメータである c(contrast gloss) と d (distinctness-of-image gloss) で定義さ

れる平面上に分布する刺激を用いて光沢知覚とニューロン活動の関係を解析した。
 (上記実験方法記載のデータベース URL)
 1. <http://www.merl.com/brdf/>
 2. <http://radsite.lbl.gov/radiance/>
 3. <http://www.pauldebevec.com/Probes/>

4. 研究成果

素材識別

ヒトに9種類の素材のCG画像を見せた時の視覚野の活動をfMRIを用いて解析した。被験者にはあらかじめ、画像を見て素材を高い正答率で識別できることは確認した。また(柔らかい 硬い)などの対照的な12の形容詞対を用いて印象を点数で評価してもらい、それぞれの素材に対してどのような感性的な印象を持っているかも調べた。fMRIで脳活動を調べると、一次視覚野(V1)からV2野、V4野などの視覚前野、その前方に広がる腹側の高次視覚野にわたって活動が認められた。またパターン識別手法のサポートベクターマシンを用いてこれらの活動が素材を識別できるかどうかを定量的に解析したところ、それぞれの領域で有意に識別していることが分かった。つまり、物体認識に関係すると考えられている腹側視覚経路に含まれる初期視覚野から高次視覚野の広い範囲で、素材の識別に関わる情報が表現されているという明らかになった。

次に、そのような活動が素材識別に関わる画像の特徴と知覚的な印象のどちらにより深く関わっているのかを調べた。そのために異なる素材カテゴリの間で各部位毎の脳活動パターンの違いを表す距離と、画像特徴の距離と印象評価の距離を求め、脳活動における素材間の距離が、画像特徴の距離と知覚印象の距離のいずれと対応しているかを距離のパターンの相関係数を求めることで調べた。その結果、初期視覚野の活動パターンは画像特徴と相関が高いのに対して、腹側高次視覚野の活動パターンは知覚印象と相関が高いことが分かった(図2A)。知覚印象を調べる時に用いた形容詞には触覚に関係が深いものも含まれているが、そのような形容詞についても腹側高次視覚野の活動パターンと知覚印象は相関が高く、腹側高次視覚野での素材の表現は視覚のみならず触覚的な印象も含んだ表現になっていると考えられる。さらにクラスタ解析を行った結果、腹側高次視覚野が素材カテゴリを階層的に分類する仕方は、知覚印象における階層的な分類の仕方とよく対応していることも分かった(図2B)。これらの結果から脳内情報処理の過程で素材の識別に関係する情報表現が大きく変化し、腹側高次視覚野で心理的な印象に対応する素材のカテゴリ的表現が形成されることが示された。同じ画像刺激を用いてサルでfMRI計測を行ったところ、ヒトと同様にV1から下側頭皮質にかけての腹側経路の領域の活動が有意に素材を識別していることが

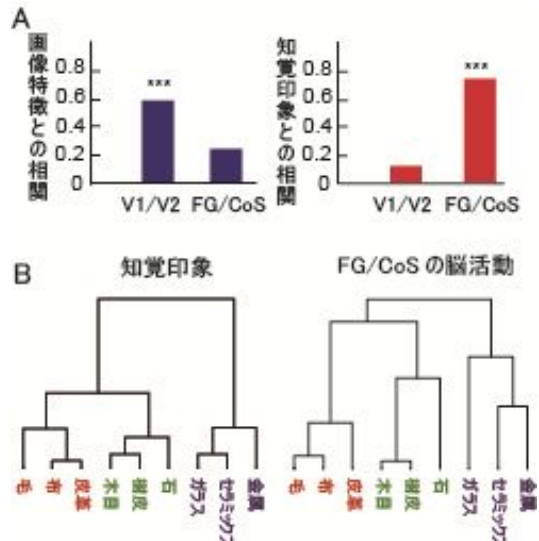


図2 A: 低次視覚野(V1/V2)と腹側高次視覚野(FG/CoS)の活動と画像特徴および知覚印象の相関。B: 素材の分類様式についてのクラスタ解析の結果。

分かった。腹側経路の各領域の活動が素材知覚と関係しているかどうかを調べるためにヒトの知覚印象との相関を求めたところ、後部下側頭皮質の活動が素材知覚と相関が高いことが分かった。またこの領域の活動はヒトで素材知覚と相関が高かった紡錘状回の活動とも相関が高く、ヒトにおいてもサルにおいても腹側高次視覚野が素材知覚と関係していることが明らかになった。

多くの素材は物体表面に特有の微小な凹凸構造が存在するため、それによって陰影パターンが生じ素材固有のテクスチャを持つ。このような自然テクスチャは特定の画像統計量のセットで表されることが知られており、それらの画像統計量のセットを元画像とそろえて新しい画像を作ると、見かけ上元画像と区別できないテクスチャを作ることができる。我々は特に Portilla と Simoncelli

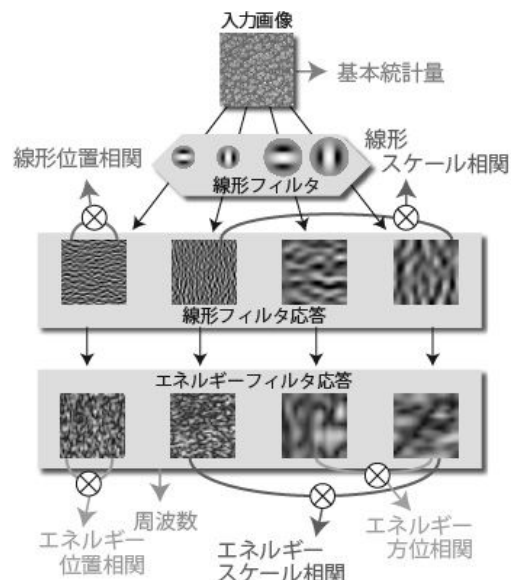


図3 PS 統計量

が見出した統計量（PS 統計量、図 3）が視覚野で実際に観察される局所の方位と空間周波数の特徴を出発点にして作られていることから、PS 統計量で表される画像特徴とニューロン活動の関係を調べることにした。サルの V4 野において、多数のテクスチャ画像に対するニューロンの応答を調べたところ、V4 野の個々のニューロンは特定のテクスチャに強い応答を示した。それらの応答と各画像の PS 統計量の関係を解析した結果、多くのニューロンの応答は比較的少数の PS 統計量の線形和で表されることが分かった。このことは、V4 野で自然テクスチャの表現に重要な画像統計量が表現されていることを示している。またこれらのニューロン集団の応答がどのような画像統計量を良く表現しているかを解析したところ、ヒトのテクスチャ弁別能に關係する画像統計量を良く表現していることが明らかになった。この研究は V1 で検出された方位や空間周波数の情報が、腹側経路でどのように統合されて素材を識別する情報が取り出されるかについて示唆を与えるものと考えられる。

光沢知覚

サルで光沢をもつ物体画像を呈示した時と、光沢の無い同じ形状のコントロール画像を呈示した時の脳活動を fMRI により計測し条件間で比較を行った。また光沢と艶消しの物体画像以外にコントロール画像として画像を構成する基本的な要素である局所的な空間周波数成分のパワーやコントラストを光沢刺激と同じにそろえ、空間周波数成分の位相をでたらめにするによって光沢を無くしたものも用いた。光沢物体画像に対する応答が、他の画像のどれに対する応答よりも強かった場所を求めたところ、V1 から下側頭皮質にかけての腹側視覚経路において光沢画像に強い応答を示すことが分かった。また下側頭皮質では、後部から中部にかけての三か所で活動がみられ光沢に対して選択的に活動する局所領域の存在が示唆された。次に、下側頭皮質中部で上側頭溝内の領域からニューロン活動の記録を行った。この領域は fMRI で光沢画像に強い応答が見られた場所にほぼ対応する場所である。その結果、数ミリ程度の広がりをもつ限局した領域に特定の光沢刺激に強く応答し、他の刺激には応答しないニューロンが固まって存在することが見いだされた。ニューロンによってどのような光沢を持つ刺激に強く応答するかは異なっており、多くは光沢の強い刺激によく応答したが、鈍い光沢の刺激によく反応するニューロンや艶の無い刺激によく反応するニューロンも見られた（図 4A）。これらのニューロンの応答は形の違う物体や異なる照明環境に物体を置いた時の画像を用いても選択性は保たれており、刺激選択性がハイライトの局所のパターンなどによるものではなく、光沢に依存した活動であることを示唆

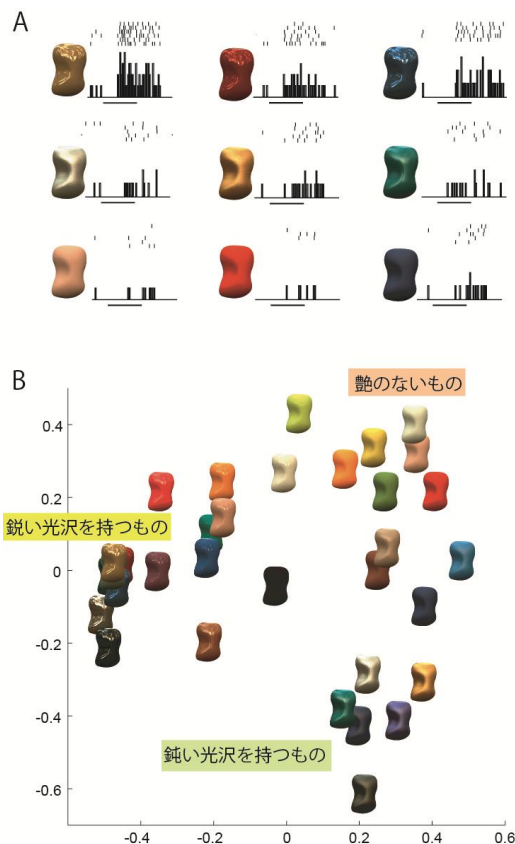


図 4 A: 光沢選択性ニューロンの活動例。9 個の異なる刺激に対する一つのニューロンの活動。B: 光沢選択性ニューロンが集団としてどのように光沢を表現しているかを MDS で調べた結果。

している。この実験で記録された 57 個の光沢選択性ニューロンが、集団としてどのように光沢を表現しているかを調べるために、異なる刺激をニューロン集団がどのように区別しているかを多変量解析の手法（多次元尺度構成法 = MDS）を用いて調べた。図 4B には刺激の間の距離関係がニューロン集団の応答の強さの違いを反映するように、刺激を 2次元に配置した結果を示す。図に見られるように、鋭い光沢を持つ刺激、鈍い光沢を持つ刺激、艶の無い刺激といった異なる刺激が規則正しく配置されており、このことは下側頭皮質の光沢選択性ニューロンが様々な光沢を系統的に表現できる性質を持っていることを示している。また光沢知覚に關係するパラメータである c と d で定義した刺激を用いてこれらの光沢選択性ニューロンの応答を調べ定量的な解析を行ったところ、光沢選択性ニューロンの集団の活動から c と d が非常に正確に推定できることが分かった。この結果は下側頭皮質の光沢選択性ニューロンが光沢知覚のパラメータを表現していることを強く示唆している。一戸らは、麻酔下のマーモセットの上側頭溝の腹側後部から多チャンネル電極を用いて記録を行った結果、CG で作成した多様な材質の画像覚刺激の中から、メタル・ガラスと

いう光沢感のある材質にのみ強く反応し、形態にはほとんど影響を受けない細胞が集積している領域を見出した。この領野は、マカクザルで記録された上側頭溝内の領野と相同と推測され、進化的に光沢反応領野が保存されている可能性が示された。次に逆行性蛍光トレーサー (CTB-Alexa 555) をこの領域に微量注入し in vivo で線維連絡を可視化する独自に開発した手法を用いてこの領野への投射を調べて見ると、注入部位より後部の MTc という領域や、TEO/V4 などの腹側視覚系に属する領野からの投射があることを見出した。そこで、これらの投射元の部位から同様の電気生理記録実験を行った結果、MTc からは上側頭溝腹側後部の注入部位と同様に、光沢刺激に強い反応が見出された。またこれらの部位のニューロンの活動に影響を与える画像統計量を分析したところ、歪度と輝度が重要であることが推定され、この投射を用いて光沢に重要な特徴が上側頭溝付近の領野に伝達されていることが推測された。

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 17 件)

Okazawa G, Tajima S, Komatsu H (2015) Image statistics underlying natural texture selectivity of neurons in macaque V4. Proc Natl Acad Sci USA. 112 (4) E351-E360, doi: 10.1073/pnas.1415146112 査読有

Fujisaki W, Goda N, Motoyoshi I, Komatsu H, Nishida S (2014) Audiovisual integration in the human perception of materials. J Vis 14(4), pii: 12, 1-20. doi: 10.1167/14.4.12 査読有

Goda N, Tachibana A, Okazawa G, Komatsu H (2014) Representation of the material properties of objects in the visual cortex of nonhuman primates. J Neurosci 34:2660-2673. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2593-13.2014 査読有

Nishio A, Shimokawa T, Goda N, Komatsu H (2014) Perceptual gloss parameters are encoded by population responses in the monkey inferior temporal cortex. J Neurosci 34:11143-11151. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1451-14.2014 査読有

Namima T, Yasuda M, Banno T, Komatsu H (2014) Effects of luminance contrast on the color selectivity of neurons in the macaque area V4 and inferior temporal cortex. J Neurosci. 34:14934-14947. doi:10.1523/JNEUROSCI.2289-14.2014. 査読有

小松英彦 (2014) 質感認知の情報学の進

展と将来, 光学, 第 4 3 巻、第 7 号、pp.298 - 306 査読無

Okazawa G, Komatsu H (2013) Image statistics for golden appearance of a painting by a Japanese Edo-era artist Jakuchu Ito, Lecture Note in Computer Science (Computational Color Imaging) 7786: 68-79 査読有

Komatsu H, Nishio A, Okazawa G, Goda N (2013) 'Yellow' or 'Gold'? : Neural processing of gloss information, Lecture Note in Computer Science (Computational Color Imaging) 7786: 1-12 査読無

小松英彦, 西尾亜希子 (2013) 光沢を見分ける脳細胞の活動, O plus E 35 (1): 92-94 査読無

小松英彦 (2013) 質感の科学をめざして, 画像ラボ 24, 6, 72-78 査読無

Nishio A, Goda N, Komatsu H (2012) Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex. J Neurosci 32: 10780-10793 査読有

Okazawa G, Goda N, Komatsu H (2012) Selective responses to specular surfaces in the macaque visual cortex revealed by fMRI. NeuroImage 63: 1321-1333 査読有

小松英彦 (2012) 色と質感を認識する脳と心の働き、「芸術と脳の対話 絵画と文学に表象される、時間と空間の脳による認識」国際高等研報告書 1101, pp,105-114, 査読無

小松英彦 (2012) 質感の科学への展望、映像メディア学会誌 65(5): 332-337 査読無

小松英彦 (2012) 色と質感の知覚、Clinical Neuroscience 30(8): 897-901 査読無

小松英彦 (2012) 質感認知の高次脳メカニズム、生体の科学 vol. 63(4): 284-294 査読無

郷田直一 (2012) 光沢を伝える脳内機構、脳 21 15(4): 137-140 査読無

[学会発表](計 23 件)

Komatsu H, Nishio A, Ichinohe N, Goda N (2015.3.23) Functional architecture of the gloss selective regions in the monkey inferior temporal cortex, 第 9 2 回日本生理学会大会, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)

郷田直一, 横井功, 橘篤導, 南本敬史, 小松英彦 (2014.9.13) サル視覚野における物体素材表現に視触覚経験が及ぼす効果: fMRI 研究, 第 37 回日本神経科学大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

西尾亜希子, 下川丈明, 郷田直一, 小松英彦 (2014.9.12) Anatomical connections of the gloss selective region in the

inferior temporal cortex of the monkey
第 37 回日本神経科学大会, パシフィコ横浜
(神奈川県横浜市)
岡澤剛起, 田嶋達裕, 小松英彦
(2014.9.11) Image statistics explaining
the natural texture selectivity in
macaque V4, 第 37 回日本神経科学大会,
パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
横井功, 橘篤導, 南本敬史, 郷田直一,
小松英彦(2014.9.11) 実物把持課題にお
ける素材カテゴリーに依存したサルの変
動, 第 37 回日本神経科学大会, パシフィ
コ横浜(神奈川県横浜市)
Goda N (2014.7.20) Neural
representation of materials of objects
in human and monkey visual cortex, The
10th Asia-Pacific Conference on Vision
(APCV2014), かがわ国際会議場(香川県高
松市)
西尾亜希子, 下川文明, 郷田直一, 小松
英彦(2014.7.19) Population responses
in the macaque inferior temporal cortex
encode perceptual gloss parameters, The
10th Asia-Pacific Conference on Vision
(APCV 2014), かがわ国際会議場(香川県高
松市)
Okazawa G, Tajima S, Komatsu H
(2013.11.12) Natural texture
selectivity of macaque V4 neurons
examined by adaptive sampling. Society
for Neuroscience annual meeting 2013
(SanDiego, USA)
Nishio A, Shimokawa T, Goda N, Komatsu
H (2013.11.11) Canonical correlation
analysis revealed perceptual gloss
parameters represented in the monkey
inferior temporal cortex. Society for
Neuroscience annual meeting 2013
(SanDiego, USA)
岡澤剛起, 田嶋達裕, 小松英彦
(2013.6.21) Image features determining
texture selectivity of macaque V4
neurons revealed by adaptive sampling.
第 36 回日本神経科学大会, 国立京都国際
会館(京都府京都市)
郷田直一, 橘 篤導, 岡澤剛起, 小松英彦
(2013.6.20) Material information
processing in monkey visual cortex: a
functional MRI study. 第 36 回日本神経
科学大会, 国立京都国際会館(京都府京都
市)
Okazawa G, Komatsu H (2013.3.4) Image
statistics for golden appearance of a
painting by a Japanese Edo-era artist
Jakuchu Ito. The Fourth Computational
Color Imaging Workshop, 千葉大学(千葉
県千葉市)
Komatsu H, Nishio A, Goda N (2012.9.20)
Neural representation of gloss in the
macaque visual cortex. 第 35 回日本神経

科学大会, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋
市)
小松英彦 (2012.9.14) 質感認知の神経機
構へのアプローチ. 第 22 回日本神経回路
学会全国大会, 名古屋工業大学(愛知県
名古屋市) 招待講演
Goda N, Komatsu H(2012.9.3)
Relationship between visuo-tactile and
affective/aesthetic qualities of
natural materials, European Conference
on Visual Perception (Alghero, Italy)
Okazawa G, Goda N, Komatsu H (2012.7.13)
Localizing regions activated by surface
gloss in macaque visual cortex by fMRI.
8th Asia-Pacific Conference on Vision
(Incheon, Korea)
Nishio A, Goda N, Komatsu H (2012.7.13)
Neural representation of gloss in the
macaque inferior temporal cortex. 8th
Asia-Pacific Conference on Vision
(Incheon, Korea)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名 称: 画像データ処理装置、画像処理方法
および画像処理プログラム
発明者: 下川文明・西尾亜希子・佐藤雅昭・
川人光男・小松英彦
権利者: 株式会社国際電気通信基礎技術研究
所、自然科学研究機構
種 類: 特許
番 号: 特願 2014-142252 号
出願年月日: 2014 年 7 月 10 日
国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 英彦 (KOMATSU, Hidehiko)
生理学研究所・生体情報研究系・教授
研究者番号: 0 0 1 5 3 6 6 9

(2) 研究分担者

一戸 紀孝 (ICHINOHE, Noritaka)
独立行政法人 国立精神・神経医療研究セ
ンター・神経研究所・微細構造研究部
部長
研究者番号: 0 0 2 5 0 5 9 8

郷田 直一 (GODA, Naokazu)
生理学研究所・生体情報研究系・助教
研究者番号: 3 0 3 7 3 1 9 5