

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330178

研究課題名(和文)3次元物体表面の脳内表現様式と表面内外の知覚特性の解明

研究課題名(英文)Elucidation of intracerebral representation of three dimensional object surface and perceptual characteristics for inside and outside of the surface

研究代表者

菊池 眞之(KIKUCHI, Masayuki)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・講師

研究者番号：20291437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では凹凸のある3次元物体の表面が脳内でどのような様式で情報処理されているのかを解明すべく、心理物理実験、脳活動計測実験、ニューラルネットワークのモデリングに取り組んだ。その結果、2次元刺激を用いて解明されてきた図地分離の脳内表現であるborder-ownershipを3次元拡張した概念が成り立つことが示唆された。それに基づき3次元物体表面の幾何学的特徴から物体内部領域を特定するモデルの検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify how the information is processed for the surface of three dimensional object with convex and concave parts the brain, this study performed psychophysical experiments, brain activity measurement experiments and modeling of neural networks. As a result, it was suggested that the concept of three dimensional extension of the concept of two dimensional border-ownership, which is the internal representation of figure/ground separation in the brain. Based on this finding, we considered to construct a model to identify the internal region of the object from the geometric features of the three dimensional object surface.

研究分野：神経情報科学，視覚情報処理

キーワード：視覚系 脳情報処理 3次元物体認知 図地分離 心理物理実験 脳活動計測実験 ニューラルネットワークモデル

1. 研究開始当初の背景

人間へ情報を呈示するデバイスの代表であるディスプレイでは、2次元表示のみならず奥行き知覚を伴う3次元表示が加えられるものが増えた。それらに表示させるコンテンツはステレオカメラによる撮影でなくとも、コンピュータにより写実的かつリアルタイムに作成・描画することも可能となってきた。さらには生成された物体を3次元プリンタで出力する「モノとしての表示」も可能となってきた。このような3次元表示のインフラの確立・普及に伴い、それらの表示を目にするヒトに効果的な印象を与える物体表現をするためにもヒトの3次元物体の認知特性を把握する必要性が高まってきていた。一方、3次元世界の様相を瞬時に認知する人間同様に、環境を認識し衝突回避する自動車や、危険区域で作業を行うロボットなどをはじめとする人工システムにもリアルタイムに3次元世界を認知させることの需要も高まりつつあった。そのようなシステムの設計原理として、ヒトの3次元視覚情報処理は1つの実例としての示唆を与える。

上記のような社会的要請に対し、視覚科学における3次元物体認知の研究は必ずしも必要とされる知見を直ちに提供できる状況にはなかった。従来の研究で蓄積された知見の多くは2次元視覚刺激を用いて行われた2次元物体認知に関するものであった。一方でランダムドットステレオグラム等を用いた両眼立体視の性質を調べる研究も多く行われているものの、特殊な刺激を用いた極限状況での知覚特性についてのものが多く、通常我々が実世界の中で目にする、凝集性を有し体積を持った塊としての3次元物体の認知特性についての知見を得ることが必要な状況であった。

2. 研究の目的

本研究では3次元物体の表面が脳内でどのようにエンコードされているのかを解き明かすとともに、物体の内部と外部とで認知特性がどのように違うのかも解明し、3次元物体認知のメカニズムの包括的理解へと繋げることを目的とする。実験は心理物理実験により3次元物体認知成立時の性質を調べるほか、脳波計を用いた実験により認知の時空間的ダイナミクス的一端も調べ、さらに諸実験の結果を統一的に説明し得る神経回路モデルの構築・シミュレーションも行う。

(1) 心理物理実験

ゲシュタルト心理学以来の研究で、2次元イメージから物体領域と背景領域とを区分する図地分離の視覚機能に関して、輪郭が接する2領域のうち、輪郭は物体領域の側のみ所有されるという“境界所有性”(Border-Ownership, 以下 BO)の性質の存在が示されている。神経生理学的にも Zhou ら(2000)が初期～中期視覚領野において輪郭の特定の

側に物体がある際に強く反応する細胞を見出しており、これが脳内での図地表現であると考えられている。これら境界所有性についての議論は従来2次元についてのもののみであったが、ヒトが両眼を用いて立体視を行うことを考慮すると、物体領域は3次元となり、物体領域の境界は3次元空間中の面に拡張できるので、境界所有性は3次元的な面が接する2つの空間領域のうち一方のみ所有されるという“3次元表面所有性”(Surface-Ownership, 以下 SO)とも呼べる性質の存在を仮定できることに本研究は着目した。この仮説が成り立つか否かを、SOの極性の一致・不一致時の2つの表面同士の奥行き次元形状のマッチング課題のパフォーマンスを比較する実験、3次元物体境界面の主観的位置がSO方向にシフトするか否かの検証実験、の2種類の実験を通して調べる。は2次元物体刺激を用いた先行研究の実験でBOが形状マッチングの精度に影響することが報告されている(Baylis & Driver, 1995)、も本研究代表者が以前取り組んだ2次元刺激を用いた実験(Kikuchi et al., 2010)で、輪郭の主観的位置はBO方向にシフトすることを報告している。これらの先行研究の知見に対し、3次元視覚刺激を用いた実験を行うことで奥行き次元方向のSOが物体知覚に与える影響の有無、そして影響を与える場合の様相について解き明かす。

(2) 脳波計測実験

3次元物体認知時の時空間的な特性について脳波計を用いて解き明かす。3次元物体の表面の点同士や物体内部の点同士が細胞群の同期発火により結び付けられているか否か、そして物体内外の領域同士の同期度についてはどうかを調べる。さらに、物体表面/内/外に与えるフリッカー刺激に対する定常状態視覚誘発電位を測定し、周波数に応じた刺激と脳波の同期の度合いを調べる。

(3) モデリング

上述の心理物理実験や脳波計測実験の結果として得られた知見を一通りコンシステントに説明可能な神経回路モデルを構築する。先行研究として発表している任意の閉曲線に沿った曲率積分値・頂点外角総和が正の一定値になることに着目した2次元図地分離モデル(Kikuchi & Akashi, 2001)をベースに、3次元に拡張したモデルが成り立つかを吟味する。一方でモデリングを行う研究者の経験と勘によらずにモデル構築を行えるようにすべく、進化的計算による神経回路モデルの生成も行い、人間の発想の限界に捕らわれないモデル獲得を目指す。

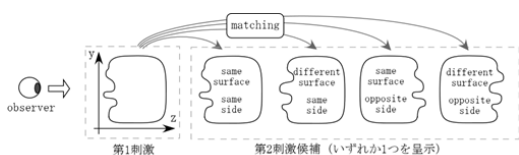
3. 研究の方法

以下では、(1)心理物理実験、(2)脳活動計測実験、(3)モデリングの3つのアプローチでの各サブテーマの研究の方法についてそ

れぞれ述べる。

(1) 心理物理実験

S0 の極性が面の凹凸形状認識に与える影響の有無を調べる心理物理実験についてまず説明する。ランダムドットステレオグラム(RDS)閉曲面により表現される凹凸のついた局所的な面を含む物体をコンピュータのディスプレイに呈示する。刺激はステレオシャッターメガネを用いて立体視させるものとする。その後、同一の奥行次元凹凸局所特徴を含み S0 が同じ側/反対側にある刺激, S0 が同一であり局所特徴が一致/相違する刺激, の計 4 種類の刺激のうちのいずれか 1 つを第 2 刺激として呈示し, 第 1 刺激と第 2 刺激の局所凹凸面は同じか否かを回答する課題を実施した。4 タイプそれぞれの刺激の正答率と反応時間を求めて比較し, 3 次元での境界面所有性の傍証が得られるか調べた。



S0 の一致・不一致時の奥行形状マッチング課題模式図

次に 3 次元物体表面ならびに内外の点の知覚的シフトを調べる心理物理実験について述べる。呈示刺激として, 奥行き方向に対称な閉曲面状の 3 次元物体表面を RDS により表現したものを 2 個用意し, 1 つの物体には被験者から見て手前側の面上に, 他方は奥側の面上にそれぞれプローブ(目印点)が表示される。被験者は物体奥側・手前側両プローブの奥行を比較し, どちらが手前にあるように見えるかを回答する。一方の物体と点は同化し奥行変化可能となっており, 階段法によりコントロールして主観的に等価な奥行を求める。同様に 2 つの物体の内部にそれぞれプローブがある場合や, 2 つの物体のいずれも外部にプローブがある場合などについて, 物体表面との奥行を多段階に設定してそれぞれの主観的に等価な奥行を求める。このようにして物体表面や内外の奥行変調マップを求めた。

(2) 脳活動計測実験

3 次元物体内部と外部それぞれにおける SSVEP の周波数ごとの同期度の相違を調べる実験を以下のように実施した。RDS による 3 次元物体刺激を用い, その物体の表面上/物体内部/物体外部のいずれかの位置に点滅する大き目の点刺激を呈示した。その際の脳波を計測し, 点滅刺激との同期の度合いを測った。これを物体表面・内部・外部それぞれにつき, それぞれ数段階の刺激点滅周波数で実験を行った。これにより物体表面と内部, 外部での SSVEP の様相の相違を調べた。

(3) モデリング

2 次元図地分離モデル(Kikuchi & Akashi, 2001)を 3 次元に拡張したモデルを構築し, 3 次元物体表面上の各位置につき S0 極性に選択的な細胞の存在を仮定したモデルを構築する。初期値として面の曲率に比例する値を湾曲の内側に対応する側の S0 細胞に与える。同一面サイド同士で局所的に信号を平滑化しつつ伝搬し, 反対サイド同士では競合するものとする。十分な時間経過後には物体内部側に対応する側の S0 細胞のみに反応が残ることが期待される。モデルが機能することが明らかになったなら表面とその内部領域との時空間的相互作用のメカニズムについても検討する。

上記研究が立脚する Kikuchi & Akashi (2001)のモデルは, ゲシュタルト心理学における閉合性の要因に基づき任意の閉曲線の内部を図として検出する機能をもったものであったが, 現実には輪郭の幾何学的状況次第では閉曲線の内部が穴として知覚されることがある(Nelson & Palmer, 2001, 他)。この現象を説明するには, 頂点や曲率の高いカーブ区間など, モデルで大きな信号が付与される箇所の信号を低減させることで対応できると考えられる。モデルニューロンの出力関数を飽和特性のあるものに置き換えることで対処できると考えられる。

また, ベースとする Kikuchi & Akashi のモデルが採用していた層内局所結合による信号伝播の方法は原理的にネットワーク全体の反応が定まるまで時間の掛かるものであり, 現実の脳内 B0 細胞が刺激呈示後数十ミリ秒程度という短い時間で図地に応じた反応をすることが困難と指摘されていたが, 本研究では局所伝播の原理は維持させつつ階層構造を導入することで大幅な反応時間短縮化を施す。

一方, 脳内の神経ネットワークには small world 性とよばれる性質があることが報告されている。規則的な局所結合ネットワークをベースとしつつ, 少数のショートカットのリンクを設けることで, 任意の 2 つのノード間を少数のリンクの経由で到達できるような性質のネットワークである。本研究で構築してきた図地分離ネットワークが局所結合を基本とするネットワークであったので, そこにショートカットを設けることで, 現実の脳内ネットワークをよりよく近似するようにした。この変更に伴うネットワークの機能変化についてシミュレーションにて調べた。特に, B0 の反応が生じる前の時間が短いという生理学的報告を模擬できるかの観点に着目した。時間的に忠実なシミュレーションとすべく, モデルニューロンにスパイクニューロンを用いてシミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 心理物理実験

奥行次元において S0 が一致・相違する 2

つの3次元物体表面の形状マッチング課題については、多数名の被験者を対象に実験を実施し、得られた結果に対し、S0が一致する場合と不一致である場合との正答率や反応時間等に関して2元配置分散分析を行ったところ、S0一致の場合のほうが不一致の場合より優位に正答率が高いことがわかった(Ishizaki & Kikuchi, 2017)。この結果は2次元輪郭形状マッチング課題におけるB0の影響と符合するもので、2次元B0の概念を3次元S0に拡張した性質が視覚系に備わること示唆するものである。

当該実験は常に固視点上に境界が呈示される条件で実施されたが、マッチングすべき2物体の固視点を物体内部、境界上、物体外部にそれぞれ置いたときのマッチング課題正答率・リアクションタイムを計り、空間的注意がS0や物体認知に与える影響について検討できるようにした。視線計測機を併用し、被験者の視点を厳密に扱える工夫も施した。

2次元物体においてborder-ownershipの方向に応じた知覚的位置の変調が空間に生じることを以前突き止めている。同様の知見が3次元物体の奥行方向にも生じるかを調べる心理物理実験を実施したが、結果はS0に応じた顕著な傾向は見出されなかった。ただし、微妙な知覚の差を比較する2刺激を経時的に順次呈示する形にしたため、知覚の精度が低かった可能性もあり、今後の検証が必要である。

(2) 脳活動計測実験

3次元物体認知時の点滅プローブ呈示箇所を物体の内部、表面、外部に設定したときのSSVEP計測実験をEEGを用いて実施したが、プローブ点滅と脳波との間の高い相関を見出すには至っていない。ただしプローブの点滅周波数や呈示位置、EEG電極位置等に関し調整の余地があり、それらを調整の上実験を行う必要がある。また、相関を計算する関数を時間的シフトを許容する適応的なものに置き換えた解析も行う必要がある。一方、物体内部、境界、外部の様々な箇所同士の細胞反応の同期の調査については実験のデザインを詰めた段階で、本格展開は今後の課題となる。

(3) モデリング

3次元曲面刺激からのS0特定モデルの構築の前提となる、2次元閉曲線からのB0特定のモデルにつき、幾つかの進展があった。まず、ベースとなるKikuchi & Akashi (2001)のモデルを発展させ、閉曲線内部が穴として知覚されるケースもモデルで説明できるようにすべく、使用していたモデルニューロンの出力関数を半端整流型(ReLU)からシグモイド関数に変更した。その結果、ヒトの視知覚で報告されている穴知覚の閉曲線パターンも説明できるようになった(菊池, 2014, Kikuchi, 2016)。

また、ベースとするKikuchi & Akashiのモデルへの階層構造の導入による反応時間短縮化については、凹凸のある勾玉状入力パターンに対し、様々な階層数での反応収束時間を計ったところ、階層数の増加に伴って所要時間が大幅に減少することがシミュレーションで示された。ただしこの高速化は層数の増大に対し頭打ちになるという飽和特性があることもわかった。この特性が複雑ネットワークにおける平均頂点間距離の観点で説明し得ることも示した(菊池, 2015, Kikuchi, 2016)。

一方、Kikuchi & Akashiのモデルにsmall world性を導入し、Izhikevich型のニューロンを用いつつ、規則的局所結合を様々な割合で遠く離れた細胞同士を繋ぐショートカットに置き換えてシミュレーションした。その結果、small world性の現れる条件の際に反応収束までの時間が短くなることがわかった(米山 & 菊池, 2016)。

3次元曲面刺激からのS0特定モデルに関し、シミュレーションに必要なハードウェアの導入を行った。シミュレーション技法についても検討を進め、ニューロン群による曲面の情報表現形式を策定するに至った。今後本格実施するシミュレーションの基盤が整った。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 7 件)

Tomonori Ishizaki, Masayuki Kikuchi, "The effect of border-ownership on perception of three dimensional object", CNS2017 (The Cognitive Neuroscience Society Annual Meeting), 2017年3月26日、San Francisco(USA)

Masayuki Kikuchi, "Hierarchical Neural Network Model of the Visual System Determining Figure/Ground Relation", ABBII2016 (The 2nd International Symposium on Artificial, Biological and Bio-Inspired Intelligence), 2016年9月21-22日、Rhodes(Greece)

Masayuki Kikuchi, "A Model of Border-Ownership Assignment Accounting for Figure/Hole Perception", ECVP2016 (European Conference on Visual Perception), 2016年8月28日-9月1日、Barcelona(Spain)

米山明宏、菊池眞之、` 図地分離モデルにおける複雑ネットワーク効果の解析`、電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会(第21回)講演論文集、p.150、2016年3月5日、東海大学高輪キャンパス(東京都・港区)

菊池眞之、` 階層的ネットワークによる物体領域検出`、SSI2015(計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会)、pp.744-746、

2015年11月18日、函館アリーナ(北海道・函館市)

石崎智紀、荻谷光晴、菊池眞之、“三次元物体における境界所有性が知覚に与える影響について”、JNNS2015(日本神経回路学会第25回全国大会)講演論文集、p.77、2015年9月2日、電気通信大学(東京都・調布市)

菊池眞之、“輪郭の幾何的特徴に基づく図地分離の神経回路モデル”、FSS2014(ファジィシステムシンポジウム)、pp.312-317、2014年9月1日、高知城ホール(高知県高知市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 眞之 (KIKUCHI, Masayuki)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・講師

研究者番号：20291437