

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01783

研究課題名（和文）視覚情報へのマグニチュード理論の検証

研究課題名（英文）Investigation of magnitude theory to visual processing

研究代表者

久方 瑠美（Hisakata, Rumi）

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：30588950

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円

研究成果の概要（和文）：マグニチュード理論は、空間的・時間的な量という概念が共通の脳領域で処理されるという考えである。本研究では「量」処理が、視覚の低次処理や順応現象とどのように関係するのかを検討した。研究1では、高密度テクスチャへの順応から引き起こされるサイズ縮小知覚に関してfMRIを計測した。fMRI実験では、左右縁上回、左角回といういずれも頭頂連合野に対して有意な活動がみられた。研究2では、低次視覚特徴量に対する処理と時間長といった高次情報処理の関連性を調べ、視聴覚刺激のタイミングの差を判断する課題において、直前に観察した時間差に現在の時間順序判断が引きずられる系列依存性が位置特異的に生じることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

密度順応とサイズ知覚のfMRI実験、および低次特徴量と時間長判断の実験の結果は、ともに密度順応による知覚サイズ変調や、視覚低次特徴量の変化による時間長の変化が、刺激の低次特徴量に依存しない高次情報処理に依拠するものであることを示している。先行研究では、線分の長さや刺激の呈示時間の長さ、数の判断課題時に頭頂葉、特に頭頂間溝が活動することが知られている。輝度や色など低次特徴量で定義される時間長でも、密度など2次特徴量で定義される空間サイズでも、視覚野を超えた高次処理が関与するという本研究の成果は、概念的な「量」の推定が脳内の同一箇所で行われているというマグニチュード理論の知見に一致している。

研究成果の概要（英文）：Magnitude theory is the idea that the concept of spatial and temporal quantity is processed in a common brain region. In the present study, we examined how "quantity" processing is related to visual lower-order processing and density adaptation. In Study 1, we used fMRI to examine size reduction perception induced by the adaptation to dense texture. fMRI experiments showed significant activity in the parietal association cortex of both the left and right supramarginal gyri and the left angular gyrus. In Study 2, we investigated the relationship between the processing of lower-order visual features and higher-order information processing such as time length, and found that in a task to judge differences in the timing of audiovisual stimuli, there is a position-specific serial dependence in which judgments of current temporal order are pulled to the immediately preceding observed temporal difference.

研究分野：認知科学

キーワード：量知覚 fMRI サイズ知覚 時間長 密度順応

1. 研究開始当初の背景

視覚系の主な機能は、物体の空間的な位置関係をすばやく把握することである。空間視に関する視覚情報処理の機能属性としては、運動・奥行き・形処理などさまざまなものがあるが、近年注目を集めているのが「数」に対する推定処理である。例えば、われわれは日常生活の中で、電車に乗る時にその車両が混んでいるのか空いているのか乗客の過多を瞬時に見分けられるし、都会の交差点でどれくらいの人がひしめいているのか、多いのか少ないのかを一瞥して推測することができる。このように人は空間の中にものが「どのくらいあるのか」を瞬時に、“数える”という行為なしに大まかに把握する能力をもつ。また、物体の数だけでなく、物体の大きさ・長さの推定も一瞬で行える。

この視覚情報の「量」に対する処理に関して、Walsh(2003) はマグニチュード理論を提案した。この理論は、空間的な長さ・時間的な長さ・数といった高次の「量」という概念は共通のメカニズム(領野)で処理されているというものである。そしてこの責任中枢の候補が、頭頂間溝(right Intraparietalsulcus: rIPS)である。実際に、線分の長さや刺激の呈示時間の長さ、数の判断課題時にはIPS領野が活動することが知られている(e.g. Dormal, Andres & Pesenti, 2012; Faillenot et al., 2001; Fias et al., 2003; Tudusciuc & Nieder, 2007)。また Harvey, Klein, Petridou & Dumoulin (2013) は fMRI を用いて、V1 が方位に対して持つようなコラム構造を、IPS が視覚的な“数”に対して持つことを明らかにした。彼らは、数に選択性を持つ細胞群の活動は刺激のサイズや要素の形を統制した場合でも、一貫して抽象的な数に対して反応していることを示した。特にこの選択性は右半球の頭頂間溝に顕著であった。

近年、研究代表者はこのマグニチュード理論に大いに関係すると思われる現象を発見した。それは、高密度のテクスチャに順応すると、その後に表示される物体間の距離や刺激のサイズの見えが縮小するという現象である(Hisakata, Nishida & Johnston, 2016)(図 1)。この「密度-距離順応」は、従来の密度順応や距離知覚モデルを覆すものであり、従来のモデルでは説明できない。たとえば、密度順応とは高密度に順応した後はテクスチャが実際よりも“まばら”に見える現象であるが、今回発見された密度-距離順応では、順応の後ドット間の距離が近くなる、つまり単位空間あたりの密度が高くなっていること

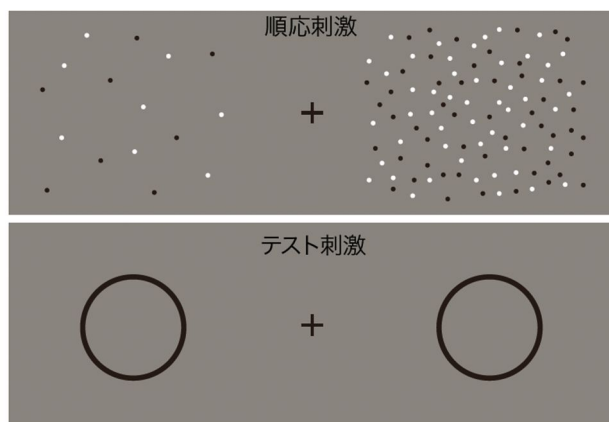


図 1: 密度-距離順応の例. 真ん中の十字が注視点. 下図の2点間のドットの距離は左右で同じだが, 上図の注視点をしばらく凝視した後, 下図の注視点を見ながら左右のサークルのサイズを観察すると高密度順応した場所ではサークルのサイズが小さくみえる.

ことから、密度順応とは全く逆の現象である。この現象について、Hisakata らは長さを推定する際に用いられる内部の密度表現が順応することによって、推定値が少なくなってしまうと説明した。この現象の生理学的な基盤として、視覚的な密度は視覚領野で処理されているが、密度表現を「定規」として大きさや長さを「推定」しているのはIPSなどの感覚処理を統合する高次領野であることが考えられる。さらに、申請者はこの現象について、行動実験を繰り返すうち、さらに興味深い事実を発見した。それは順応刺激の位置や輝度を時間的にリフレッシュすると、順応後のサイズ縮小効果が強まるということである (Hisakata & Kaneko, 2019, 国際学会発表)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、行動実験および磁気共鳴機能画像法(functional magnetic resonance imaging: fMRI)による脳活動計測により、マグニチュード推定と視覚処理の関係を総合的に検討することである。研究対象は2つに分けられる。

[研究 1] 視覚情報のあらゆる“密度”が、時間・空間・数などの量推定に影響するか？

[研究 2] 各視覚属性の感度(情報の確信度)と量推定の精度について

研究 1 では、視覚情報のあらゆる“密度”が、時間・空間・数などの量推定に影響する、という仮説を基に、量推定に関わる脳部位を fMRI 実験および行動実験にて詳細に検討する。

研究 2 では、各視覚処理情報、特に空間的な視覚処理情報の感度が量推定にどのように影響するのかを主に行動実験を用いて検討する。

3. 研究の方法

研究 1 では、テクスチャ刺激への順応から引き起こされる知覚時間・知覚サイズ・知覚的数の

圧縮に共通して反応する脳部位の特定（心理物理・fMRI 実験）を明らかにすることが目的であった。Event related fMRI で記録し、[(順応なし・テスト刺激観察)-(順応あり・テスト刺激観察)]/[(順応なし・サイズテスト刺激観察)-(順応あり・サイズテスト刺激観察)]のように、それぞれの組み合わせでコントラストを算出し、各組み合わせに共通して賦活される部位を特定することを試みた。

研究2では、低次視覚特徴量の処理が、時間長やサイズ、数といった量推定の情報処理に与える影響を心理物理学手法を用いて調べた。一般に時空間周波数や速度を処理する視覚野の神経細胞は、「受容野」と呼ばれる視野上の特定の場所における情報のみを符号化する一方で、高次領野ではそのような空間特異性は少なくなると考えられている。実際、速度や空間周波数といった初期視覚情報は、視野上の異なる場所で感度に差があることが知られているが(Levine & McAnany, 2005)サイズや時間長といった比較的高次の特徴量に対する視野特異性を調べた研究は殆どない。ところが、密度と大きさ(Hisakata et al., 2016) や時間周波数と時間長(Johnston et al., 2006)の相互作用では、低次視覚特徴に対する視野特異的な順応がそのまま大きさや時間長といったより高次の量推定に影響を与えることを示唆している。そこで研究2では、こうした知見を拡張し、位置や運動、輝度・色といった様々な低次視覚特徴量を変化させたときの量推定の変化を心理物理学的に測定した。

4. 研究成果

研究1では、テクスチャ刺激への順応から引き起こされる知覚サイズ圧縮およびテクスチャ知覚に関する、fMRI 実験を行った。用いられた順応刺激は、白と黒で定義される100個/9個のドットで構成されるテクスチャ刺激で、順応刺激提示時間は1秒とした。テスト刺激として、黒いエッジのみのサークル刺激と、49個のテクスチャ刺激を順応刺激が提示された視野に続けて提示した。実験デザインはRapid event relatedであり、TRは1秒、順応刺激とテスト刺激の時間間隔は1~4秒とした。被験者は注視点が青色に変化する数を数えるというタスクを、セッションを通じて行っており、注意は視覚刺激に対しては向いていなかった。パラメータ調整を行ったあと、5名分の予備実験を行い、各被験者についてボクセルごとの単変量解析、マルチボクセルパターン解析(MVPA)、全被験者データを用いた平均活動パターンに対するMVPAを行った。

計11名の被験者に対してfMRI計測と行動実験を実施した。被験者の平均活動データを対象に行ったマルチボクセルパターン解析では、高密度テクスチャに順応後に特異的に観られるサイズ縮小現象に付随する活動パターンは特定できなかった。次に、単一ボクセル解析に切り替えて解析を行った。その結果、左右縁上回、左角回といういずれも頭頂連合野に対して有意な活動がみられた。これは、数長さ・大きさに対する量推定は、脳内の同一箇所で行われており、空間的な量に関しては頭頂連合野の頭頂間溝に観られるという知見と親しいといえる(図2)。

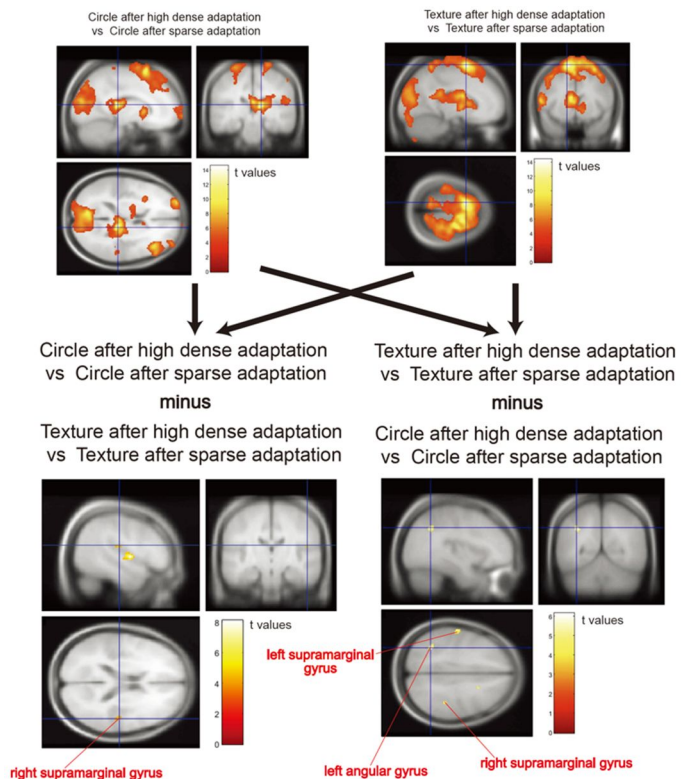


図2: fMRI 実験の単一ボクセル解析の結果。左上が、高密度-低密度順応の後に円刺激を観察した際の脳活動。右上が、高密度-低密度順応の後にテクスチャ刺激を観察した際の脳活動。下の2つの図は上2つの条件の差分で、密度順応後に円刺激を観察する際に特異的な活動を示す場所が、左右縁上回・左角回にあることを示している。

しかし、fMRI 実験と全く同じパラダイムの知覚計測実験では、サイズ縮小現象を確認することはできなかった。別の行動実験で順応刺激とテスト刺激の呈示時間に関する検討を行い、行動実験で知覚現象が確認されないのはfMRI計測時に順応刺激とテスト刺激に対する活動を切り分けるために必要な刺激間のブランクが数秒と長いためであると推測された。これらの成果は、European Conference on Visual Perception 2022, 日本視覚学会において発表された。

この結果を受けて、時間解像度の高い脳波計測に切り替えて、高密度順応後に知覚サイズが縮小する現象に対応する脳活動を計測した。順応刺激とテスト刺激の間のブランクが数秒程度あ

ると効果が急速に減衰してしまうため、Hisakata, Nishida & Johnston (2016)通りの呈示パラダイムで脳波を被験者1名に対して計測した。まず行動応答では、左右の円のサイズが物理的にもかわらず、高密度順応後に観察された方が低密度順応後に観察したときよりも円サイズを小さく判断する確率が高まった。しかし、密度順応条件によるERPの差は見られなかった。先行研究から、この現象は左右視野により効果量に差がみられることが知られており、この被験者では左視野で順応効果が顕著に大きくなっていった。そのため高密度順応後・円刺激が呈示された場所を条件として比較した。知覚サイズが縮小する条件では、事象関連電位のうち両後頭部のN1やP300に差がみられた。N1の信号源は高次視覚野に存在すると考えられており、この差は課題の難易度に関係している可能性がある。さらに時間周波数解析により、潜時400ms付近で右頭頂の振幅、位相一貫性も有意に増加していた。刺激オンセットから400ms後に観られる頭頂の信号同期の増加は、高次領野からのフィードバックの重要性を示唆しているかもしれない。この可能性を検討するため、同じ課題に対し信号源推定を行うことが必要となるだろう。

研究2では、低次視覚情報が量推定のような高次視覚処理にどのような影響を及ぼすかという観点から心理物理研究を行った。

まず第一の研究では、位置の知覚や副尺視力（低次処理）と物体サイズの知覚（量推定・高次処理）に密接な関連があることを明らかにした。位置知覚に関する先行研究では、視野上の様々な場所に瞬間呈示した視覚刺激の位置を答えさせるようなごく単純な課題でも、被験者ごとに正確に答えられる場所と答えられない場所が異なり、この誤差パターンは長期的に極めて安定していることがわかっている。本研究では、この定位の誤差パターンが副尺視力や物体のサイズといった異なる視覚属性の知覚の精確性とも高く相関していることを示し、副尺視力のような低次処理から物体サイズのような量推定に至るまで空間情報のバイアスが保存されていることを明らかにした(Wang, Murai, & Whitney, 2020, Proc R Soc B; 図3)。

次に、関連する研究として視野上の様々な場所で刺激時間長の知覚を計測する実験を行っている際に、視覚刺激のタイミングの差を判断する時間順序課題において、直前に観察した時間差に現在の時間順序判断が引きずられる系列依存性と呼ばれる現象が、位置特異的に生じることを発見した。具体的には、直前試行の視覚刺激の位置と現在の試行の刺激位置が近いときには現在の時間判断が直前の判断に引きずられるが、直前と現在の試行で刺激距離が遠いときには事前に観察した事象が現在の知覚判断に影響を及ぼさないという空間チューニングがあることを示した。この研究は、視覚研究の代表的国際専門学会であるVision Science Societyにおいて発表し、現在投稿準備中である(Murai & Whitney, in prep)。

さらに、視覚刺激の時間周波数という低次特徴による時間長知覚の変化に関する研究を行った。従来から、明滅する刺激は定常的な刺激に比べ長く感じられることが知られている。一方、明滅刺激に順応した後に同じ位置に呈示した刺激は実際より時間が短く感じられることも知られている。研究では両錯視が色変調に比べ輝度変調でより大きく生じる一方、輝度変調による効果量と色変調による効果量が相関していることも明らかにした。つまり、時間長という量推定は、輝度選択的な低次情報処理と輝度非依存な高次情報処理の両方が関与していることが示唆される(Yoshimatsu, Murai, & Yotsumoto, 2022, Vis. Res.)。

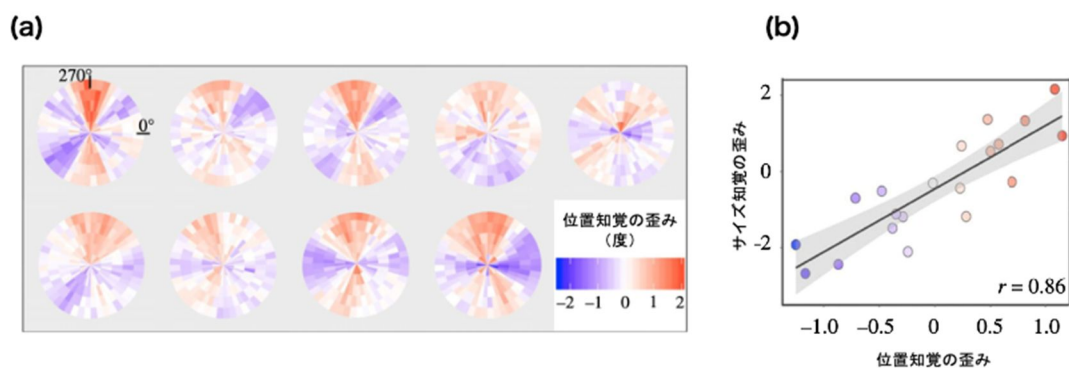


図3: (a) 視野上の様々な場所で瞬間提示させた刺激の位置を答えさせると、被験者ごとに全く異なった誤差パターンを示す(図は全9名の被験者の結果)。 (b) 同様に物体サイズを視野上の様々な場所で答えさせると、位置知覚の歪みパターンとサイズ知覚の歪みパターンが相関する(図は代表的被験者の結果)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshimatsu Hiroshi, Murai Yuki, Yotsumoto Yuko	4. 巻 198
2. 論文標題 Effect of luminance signal and perceived speed on motion-related duration distortions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vision Research	6. 最初と最後の頁 108070 ~ 108070
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.visres.2022.108070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Hisakata, H. Kaneko	4. 巻 11
2. 論文標題 Temporal enhancement of cross-adaptation between density and size perception based on the theory of magnitude	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1167/jov.21.11.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wang Zixuan, Murai Yuki, Whitney David	4. 巻 287
2. 論文標題 Idiosyncratic perception: a link between acuity, perceived position and apparent size	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20200825
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rspb.2020.0825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Murai Y. & Whitney D.
2. 発表標題 Spatial and feature tuning of serial dependence in audiovisual timing perception
3. 学会等名 Vision Science Society Virtual Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rumi Hisakata, Xiaofei Hu, Yuki Murai
2. 発表標題 Neural correlates of density-size cross adaptation: An fMRI study
3. 学会等名 43rd European Conference on Visual Perception (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久方瑠美
2. 発表標題 錯視研究から考えるこれからの認知科学
3. 学会等名 東京工業大学創立140周年記念講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久方瑠美, 金子寛彦
2. 発表標題 空間間隔に対する密度順応効果の空間特性
3. 学会等名 日本視覚学会2020年夏季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	村井 祐基 (Murai Yuki) (60847309)	大阪大学・生命機能研究科・特別研究員 (SPD) (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------