

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03461

研究課題名(和文) 視聴覚情報の時空間統計量の把握に関わる脳情報処理機構

研究課題名(英文) Human information processing of spatiotemporal statistics in visuo-auditory signals

研究代表者

本吉 勇 (Motoyoshi, Isamu)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：60447034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、画像や文字などで与えられるデータの時間的・空間的な統計量の把握や予測、意思決定に関わる脳情報処理を一連の心理物理学実験により検討した。主要な結果として、動的に変化する視覚特徴(数字を除く)の時間的な平均トレンドの推定および未来の予期の両面において、人間は直近の情報に強く依存して意思決定をすることが明らかになった。これらの結果は入力情報の一次(過去トレンドの推定の場合)・二次微分(未来の予期の場合)を時間統合する単純なメカニズムにより説明された。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated human information processing underlying the estimation of spatiotemporal statistics of visual information given as image feature and symbols and the prediction of future states based on these statistics. A series of psychophysical analyses showed that in both estimation of past trends and prediction of future states, human judgements strongly depend on recent inputs, except for numerical information given as digits. These results were explained by a simple computational model that integrates 1st-order or 2nd-order derivatives of inputs.

研究分野：実験心理学

キーワード：視覚 統計量 意思決定

## 1. 研究開始当初の背景

私たちは眼や耳などの感覚器を通して膨大な感覚データを受け取り生活している。画像と音声のデータはノイズと曖昧さに満ちているが、私たちはそこから外界のモノや人、出来事などを容易に認識することができる。この驚くべき能力は外界の構造復元を含む非常に複雑な情報処理に支えられるとみなされてきたが、そうした「重い」計算は現実世界における人間の素早い認知をうまく説明できない。

しかし近年、人間の視覚系はデータの集合がもつ統計量を巧みに利用することで、素早く効率的に、外界の複雑な事物を認識できることが明らかになってきている(本吉, 2014, 認知科学)。例えば、人間は物体表面の質感や出来事の音色を画像や音声の単純な統計量に基づき知覚することが知られている(Motoyoshi et al., 2007; McDermott et al., 2013)。他にも、人間は複雑なシーンのカテゴリを画像統計量から即座に認識できること(Thorpe et al., 1995; Oliva & Torralba, 2003)が報告されている。むしろ統計量のみから質感やシーンを認識する能力には限界があることも知られており(e.g., Marlow et al., 2012)、そのような場合、人間は時間をかけてデータを吟味し意思決定することになる。だが、それも瞬間ごとの統計的処理の累積により説明できる可能性が指摘されている(Toscani et al., 2013)。

以上の研究から、人間の認知システムは空間・時間に分布する感覚データの統計量を計算し、それを利用して与えられた課題をおこなうマシンである、という一つの視点が導かれる(c.f., Rosenholtz et al., 2012)。原理的には、この視点は画像や音声のみならず文字や数値など多様なデータに対する意思決定にも共通に当てはまるだろう。行動経済学と知覚の諸原理の相似性(e.g., Kahneman, 2003)を考えると実際そうである可能性が高い。では人間の脳はどのようにして統計量を把握しているのか? その仕組みを解明することは、人間の認知システムの統一的な理解とその応用につながると考えられる。

しかし、統計量計算の具体的なメカニズムについては不明な点が多に多い。申請者が長く携わってきたテクスチャ知覚研究(e.g., Motoyoshi & Nishida, 2001, 2002; Motoyoshi & Kingdom, 2007, 2010)や、近年の要約統計量知覚に関する研究(Alvarez & Oliva, 2009)は、視覚系が刺激特徴の空間的な平均や分散などの統計量をコードするメカニズムを部分的に明らかにするのみである。また、資格情報の時間的な統計量の計算メカニズムについては、ほとんど研究対象にすらなっていなかった。

そこで我々は、単純化された視覚刺激の時間的および空間的な統計量弁別のメカニズ

ムを明らかにするための予備的な研究を進めてきた(佐藤ら, 2013; Sato et al., 2013; 石井ら, 2013; Kamachi et al., 2013)。しかし、これらの知見はいずれも断片的であり、より大規模かつ系統的な研究が強く望まれた。

## 2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究計画では、画像や音声、文字で与えられるデータの統計量の把握に関わる脳の情報処理の原理を、心理物理学実験、非侵襲脳活動計測(脳波)、計算モデリングを組み合わせた手法により、総合的に理解することを目的とした。特に、本研究では「時間」- データの時間統計量および認知システムのダイナミクス - を特に重要な分析軸として、以下の点を組織的に検討することを計画した。

- ・ 時間統計量の弁別機構
- ・ 統計量に基づく意思決定のダイナミクス
- ・ 統計量に基づく未来の予期的意思決定
- ・ 情報メディアによる処理の違いと共通項
- ・ 空間統計量の弁別機構

これらの研究を通して、人間の認知システムが画像や数値データのどのような統計量をどのように計算し、どのように意思決定をしているのか、その神経基盤は何か、なぜその計算が適応的であるのか、を明らかにすることをめざした。

## 3. 研究の方法

### 研究課題 A

特定の確率分布にしたがい特徴が時間変動する一つの視覚刺激(例えば格子パタンの方位がゆらゆらと動く刺激、図 1)を用いて、時間的な統計量に対する人間の弁別特性と、その計算機構を明らかにする。

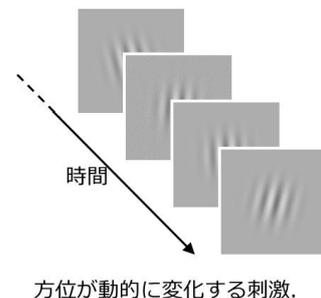


図 1 視覚特徴刺激の例

- (1) 弁別閾の測定により弁別性能の限界を調べる。
- (2) 時間統計量は時間とともに変化するという特色に着目して、刺激がまだ変動している最中に弁別させる実験をおこない、その成績を分析する。
- (3) 上記の実験で得られたデータについて、

ロジスティック逆相関法を用いて時間統計量の判断に用いられた情報の時間帯や周波数帯域を解析する。

(4) 複数の動的刺激で構成されるテクスチャ刺激を用いて、その「時空間統計量」の弁別を検討し、それが時空間で一括して計算されるのか、それとも別個に計算されるのか、などを調べる。

(5) 時間統計量や空間統計量の弁別における注意の効果を検討する。

#### 研究課題 B

単純な視覚特徴の代わりに、顔画像、物体画像、文字などを刺激に用い、その空間統計量や時間統計量の弁別特性を調べ、データのモダリティによる処理の違いと、共通する原理をさぐる。

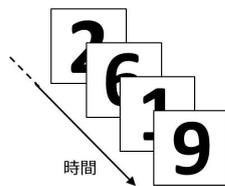


図 2 数字刺激の例

(1) 刻々と変化する数字の時間的な平均(図 2)の認知を、単純な視覚特徴の実験と同様の手法で検討し比較する。

(2) 複雑な構造にもかかわらず瞬時に認識できることが知られている顔の画像を、モーフィング技術を用いて時間的に変化させ、表情などの時間平均の弁別特性を解析する。

#### 研究課題 C

人間は現在までに知覚したデータの統計量を使って未来におけるデータの出現やその統計量を予期できるか、を検証する。行動経済学の研究から、人間は(言語的に与えられた)出来事の確率の推定において種々のバイアスを示すことがわかっている(プロスペクト理論など)。この不確定状況下における意思決定の問題を極めて単純化された事態において検討する。

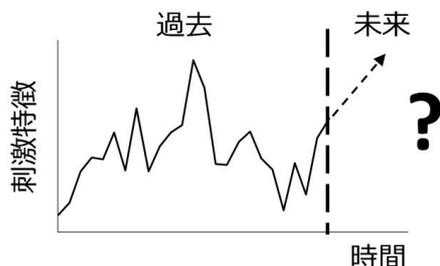


図 3 予期的意思決定課題

(1) ある確率分布にしたがいランダムに特

徴が変動する視覚刺激のある時点で停止あるいは消失させ、その時点から例えば 2 秒後における刺激の特徴を回答させる(図 3)。この予期判断が、過去の刺激に含まれるどのような情報を利用してなされるかを分析する。

#### 研究課題 D

特定の空間・時間統計量をもつ刺激を長時間観察することにより、その統計量に対する弁別感度や知覚そのものがどのように変化するかを調べる。

(1) 空間統計量の判断に対する順応の効果を調べる。古典的な知覚順応実験のロジック(e.g., Regan & Beverly, 1985)にしたがい、順応前後の弁別閾の違いや残効(aftereffect)を調べ、それぞれの空間統計量がどのようにコードされるかについて洞察を得る。

(2) 時間統計量の判断はそれじたいが短期的な学習あるいは適応のプロセスであるといえる。この点に着目し、時間とともに時間統計量がゆっくりと変動する刺激を作成し、それを観察中の統計量の判断が時間とともにどのように遷移するかを調べる。

#### 4. 研究成果

##### 研究課題 A

時間統計量の推定メカニズムについて、大規模な心理物理学の実験とデータ分析を進めた結果、主に以下のことが明らかになった。(1) 方位や運動など単純な視覚特徴の時間平均を判断するとき、観察者は刺激末尾の情報を重点的に用いる(新近効果)。(2) 判断に利用する時間範囲は変動(分散)が大きいほど短い傾向がある。(3) 方位の判断では常に刺激末尾の数百ミリ秒の情報が重視され、運動の判断では最初の約 1 秒以降の情報がモニタされる。(4) 変動が比較的遅い時間帯の情報が重視される。(5) 刺激観察中に反応する場合、反応直前の 300 ミリ秒近傍の情報を重視する。

これらの結果に基づき、われわれは作業記憶の容量限界や感覚エビデンスの蓄積に応じた意思決定の調整に基づく時間平均判断の定性的なモデルを考案した。しかし、研究課題 B において、数字やドット列のドット数の時間平均の判断においては親近効果が全く認められないという結果が得られ(Sato & Motoyoshi, 2016, 2017)、このモデルはそれらを全く説明できないことが判明した。そこで、方位や運動といった視覚特徴と、数字などの抽象的な情報の表現の違いに着目し、視覚系が初期レベルで符号化された画像特徴の時間微分の情報をほぼ完全に統合し時間平均を判断しているとする単純な計算モデルを提案した。そして、この差分統合モデルは、これまでに得られた様々なタイプの視覚情報における時間平均判断のダイナミクス

を統一的に説明することができることを発見した(佐藤・本吉, 2017; Sato & Motoyoshi, 2017). さらに, このモデルと数学的に類似の関係にある意思決定の利得制御モデルによっても, 多くのデータを説明可能であることを確認した. これら一連の成果は原著論文としてまとめられた.

空間統計量の知覚については, 運動の時空間的な平均(全体運動)の知覚が不注意により逆説的に促進されることを示す研究成果を国際誌に原著論文として公刊した(Motoyoshi et al., 2015). また, 運動刺激に限らず, 動的なテクスチャ刺激の空間平均の判断では数秒以上にわたり観察時間に比例して成績が向上することを見出した. この時間加算効果は知覚系の時間統合のレンジを明らかに超えており, 時空間統計量の推定が非常に長い時間にわたり情報を統合する機構に基づくことを示唆している.

#### 研究課題 B

時間統計量の推定において数字を刺激として用いた場合は, 他の視覚特徴を用いた場合と大きく異なり, 意思決定直前の情報を重視するという新近効果が認められず, 観察者は提示された全ての時間の情報を等しく用いることが明らかになった. これは, 数字のように言語化しやすい情報の平均の判断には単純な視覚特徴の平均の判断とは異なる処理過程が関与することを示唆している(Sato & Motoyoshi, 2016). 一方, 数字と同様に複雑な空間パターンである顔の表情の時間平均の判断においては, 方位や運動の場合と同様に親近効果が明白に認められた(Sato & Motoyoshi, 2016). その後, いわゆる視覚的な「数覚」の根拠の一つとして注目されているドット列の時間平均の推定においても同様に親近効果が欠如することを見出した(Sato & Motoyoshi, 2017). これらの結果は「数」の時間統計量の推定には他の視覚特徴の時間平均の推定とは異なる機構が関与する可能性を示唆しており, 研究課題 A における結果の解釈と時間平均判断の理論化にも影響を与えた.

#### 研究課題 C

人間が動的な情報の不確定な未来の状態をどのように推測するかを理解するため, 左右にランダム運動する視覚刺激を T 秒間提示し, 消失してから T 秒後に刺激がどちらに移動したかを予期させる実験をおこない, ロジスティック逆相関解析により回答に対する各時刻の速度情報などのインパクトを算出した. その結果, 観察者は刺激消失直前の速度, 特に運動方向の反転後の速度に強く依存し回答する傾向が見いだされた(八代・本吉, 2018).

研究課題 A における成果を参考にしたところ, これらのデータは, 過去に観察した情報の変化の変化(つまり加速度)を時間的に統

合して未来の状態を予測する加速度統合モデル(もしくは実質的に類似した計算に基づく利得制御モデル)により定量的に説明できることがわかった(Yashiro & Motoyoshi, 2018). このモデルは, 統合するのが入力情報の一次微分(過去平均)か二次微分(未来予測)かという点を除くと, 時間平均の推定モデルと本質的には同じである. このことは, 非常に単純な処理方略に基づいて, これまでに受け取ってきた情報の総括と未来の予期を同様に行っている可能性を示唆している.

#### 研究課題 D

テクスチャ状の視覚刺激の高次の空間統計量の知覚において生じる新たな残効錯視を発見し, その解析から, 空間統計量の知覚において co-circularity と呼ばれる方位情報の幾何学的構成が格別に重要な意味をもち, かつ異なるタイプの co-circular 構造が知覚的な対立関係にあることを見出した(佐藤ら, 2018; Sato et al., 2018).

また, 様々な心的状態に依存して変動することの知られている「時間長」の知覚を題材とすることにより, 過去の情報分布の統計的性質が現在の知覚に及ぼす影響を検討した. 様々な時間長(0.2-0.9 秒)で提示される正弦波縞の見かけの提示時間を時間再生法で測定し, 現試行の刺激に対する再生時間と i 試行前における刺激の時間長および再生時間との相関関係を分析した. その結果, 現試行における再生時間は, 過去の再生時間(反応)と強い正の相関をもち, 過去の時間長(刺激)とは負の相関をもつことがわかった. これらの結果は, 知覚系には過去の意思決定との一貫性を保持しようとするベイズ的な更正機構と, 過去の知覚表象との差異を強調しようとする反ベイズ的な更正機構が存在する可能性を示唆している(柏倉・本吉, 2017; Kashiwakura & Motoyoshi, 2018). この前駆段階に当たる研究も原著論文として公刊された(Kashiwakura & Motoyoshi, 2017).

#### その他の研究成果

本研究計画を含むこれまでの心理物理学実験を通して蓄積された技術的ノウハウを結集し, 初学者でも容易に視覚心理学の実験を行うことを可能にするプログラム・パッケージを開発した(中山・本吉, 2018). この成果は, 原著論文として投稿するとともに, 研究代表者の研究室のホームページ上でも公開する予定である.

本研究計画で大きな役割を果たしたロジスティック逆相関分析から着想を得て, 多数の視覚刺激についての任意の心理尺度(明るさ, 光沢, 魅力など)を少数の試行の比較判断反応に基づき効率的に推定することを可能にする新たな心理物理学的手法を開発した. この成果は国際会議で発表された(Motoyoshi & Kashiwakura, 2018).

また, 視覚探索における視覚運動座標系の

重要性に関する研究成果 (Nakayama et al., 2016), および背景ノイズのもとでの視覚刺激の検出の色・形状・運動選択性に関する研究成果 (Kondo & Motoyoshi, 2016)を, それぞれ国際誌に原著論文として公刊した.

## 5. 主な発表論文等

### 〔論文〕(計4件)

- Kashiwakura, S. & Motoyoshi, I. (2017). Relative time compression for slow-motion stimuli through rapid recalibration. *Frontiers in Psychology*, 8:1195 (査読有り).
- Nakayama, R., Motoyoshi, I. & Sato, T. (2016). The roles of non-retinotopic motions in visual search. *Frontiers in Psychology*, 7, 1-8 (査読有り).
- Kondo, D. & Motoyoshi, I. (2016). Spatiotemporal properties of multiple-color channels in the human visual system. *Journal of Vision*, 16(9):14, 1-13 (査読有り).
- Motoyoshi, I., Ishii, T. & Kamachi, M.G. (2015). Limited attention facilitates coherent motion processing. *Journal of Vision*, 15(13):1, 1-11 (査読有り).

### 〔学会発表〕(計18件)

- Motoyoshi, I. (2016). Role of image statistics in the perception of objects, materials, and their values. International workshop "Vision over vision: man, monkey, machine and network models"(招待講演), 脳情報通信融合研究センター, 大阪府吹田市
- Motoyoshi, I. & Kashiwakura, S. (2018). MaxFind: an efficient method for psychological scaling of large stimulus sets. *Journal of Vision*, Florida, USA
- Kashiwakura, S. & Motoyoshi, I. (2018, oral). Differential recalibrations of perception and decision underlying the central tendency of time perception, (Student Travel Awards), Florida, USA
- Yashiro, R. & Motoyoshi, I. (2018). Prospective decision making for dynamic visual stimuli, *Journal of Vision*, Florida, USA
- Sato, H., Kingdom, F.A.A. & Motoyoshi, I. (2018). Co-circularity after effect in texture perception, *Journal of Vision*, Florida, USA
- Sato, H. & Motoyoshi, I. (2017). How do humans estimate temporal trend? Annual Meeting of Psychonomic Society, Vancouver, Canada

Sato, H. & Motoyoshi, I. (2017). Estimating visual average and numerical average across time. *Fechner Day 2017: The 33rd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, Fukuoka, Japan

Sato, H. & Motoyoshi, I. (2017). Estimating temporal average of numerical information: digits and textures. *Journal of Vision*, 17(10):1374, Florida, USA

Sato, H. & Motoyoshi, I. (2016). Distinct process for perceptual and numerical estimation of average across time. *Perception*, 45, 224, Barcelona, Spain

Sato, H., Motoyoshi, I. & Sato, T. (2016). Separate process for perceptual and numerical estimation of temporal average. *Journal of Vision*, 16(12):594, Florida, USA

八代龍門・本吉勇 (2018). 不規則な視覚情報の未来に関する展望的意思決定. 日本視覚学会 2018 年冬季大会. 工学院大学, 東京都新宿区

中山遼平・本吉勇 (2018). Vision Tool Box: PsychToolBox ベースの視覚実験パッケージの開発. 共同プロジェクト研究会「視覚的な物体質感の認知メカニズムに関する研究」(平成 29 年度第 2 回 質感・色覚研究会), 東北大学, 仙台.

佐藤弘美・本吉勇 (2017). 時間トレンドに対する意思決定の差分統合モデル. 日本基礎心理学会第 36 回大会.(優秀発表賞), 大阪府.

柏倉沙耶・本吉勇 (2017). 時間長判断における知覚と反応の異なる更正機構. 日本視覚学会 2017 年夏季大会.(ベストプレゼンテーション賞), 島根大学, 島根県

佐藤弘美・本吉勇 (2017). 動的刺激に対する時間統計量の知覚的判断と数覚的判断. 日本視覚学会 2017 年冬季大会. NHK 放送技術研究所, 東京都世田谷区

近藤大佑・本吉勇 (2016). 多重色チャンネルのパターン・運動選択性. 日本視覚学会 2016 年冬季大会.(ベストプレゼンテーション賞), 工学院大学, 東京都新宿区

### 〔図書〕(計2件)

- 本吉勇 (印刷中)画像統計学, 実験心理学ハンドブック (項目執筆), 朝倉書店
- 本吉勇 (印刷中)心理物理学の実験パラダイム, 実験心理学ハンドブック (項目執筆), 朝倉書店

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

本吉 勇 (MOTOYOSHI, Isamu)  
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授  
研究者番号：60447034

(2);連携研究者

中山 遼平 (NAKAYAMA, Ryohei)  
東京大学・大学院総合文化研究科・特任研  
究員  
研究者番号：00817489

(3)研究協力者

佐藤 弘美 (SATO, Hiromi)  
八代 龍門 (YASHIRO, Ryuto)  
柏倉 沙耶 (KASHIWAKURA, Saya)