

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01782

研究課題名（和文）心理物理学的・神経学的逆相関解析による知覚的意思決定機構の解明

研究課題名（英文）Psychophysical and physiological reverse-correlation analysis of perceptual decision mechanisms

研究代表者

本吉 勇（Motoyoshi, Isamu）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60447034

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、系列的にサンプリングされた情報に基づく知覚的意思決定のメカニズムを理解するため、刺激への反応時刻にロックした逆相関解析により観察者がいつ・どこか・どのような情報を利用して意思決定をしたかを分析した。ノイジーな時間変動をする視覚刺激に関する方位弁別やコントラスト検出を対象とした一連の心理物理学実験を実施し同分析を適用した結果、観察者の意思決定を決定づける情報は行動反応の約400ミリ秒前を頂点とする組織的な変動を示し、また空間的注意により増幅されることがわかった。これらの結果に基づき、低次視覚系の時間応答関数と感覚エビデンスの累積に基づく知覚的意思決定の計算モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の視覚系は、画像全体を並列分析して得られる特徴量に基づき複雑な物体や情景を認識することができるが、画像中の様々な側面の情報を繰り返し系列的にサンプルすることにより深く詳しい認識結果を得ることもできる。深層学習を含む現行の視覚認知の理論は前者の素早い認知しか説明できない。本研究で得られた実験結果と計算モデルは、後者の系列的な視覚認知を説明するための理論に向けた基礎的な知見と有益な研究の枠組みを提供するものである。

研究成果の概要（英文）：To understand the mechanism of perceptual decision-making based on serially sampled information, the present study applied the reverse-correlation analysis locked to the observer's response to examine when, where, and what information they use to make decisions. A series of psychophysical experiments on orientation discrimination and contrast detection for noisy time-varying visual stimuli showed that the information that determines observers' decision-making shows a systematic temporal profile that culminate approximately 400 ms before the response and that the overall profile are amplified by spatial attention. Based on these results, we proposed a computational model of perceptual decision-making based on the temporal response function of the early visual system and the accumulation of sensory evidence.

研究分野：実験心理学

キーワード：知覚 意思決定 注意

## 1. 研究開始当初の背景

近年、視覚系は画像に含まれる単純な特徴量を巧みに利用して外界の光景や物体や材質を素早く認識できることが明らかになってきた。だが、低次の画像特徴のみに基づく処理には限界がある。では、人間の脳は、限られた処理資源に基づきどのようにして高度な認知判断に必要な情報を得ているのだろうか？

選択的注意に関する膨大な研究から、人間はある種の視覚特徴の分布を「ひと目」で区別するが、刺激が複雑だったりより正確な判断が求められたりする場合には、じっくり見てから判断を下すことが知られている。「ひと目」では難しい視覚課題を遂行するとき、視覚系は入力情報(や中間表現)を何度もサンプリングしなおして判断に必要な情報を集め、意思決定していると考えられる。この系列的なサンプリングと情報の統合という図式は、いわゆる「知覚的意思決定」に関する多くの神経科学的研究のなかで採用されている。最も代表的な数理モデルである drift-diffusion model では、脳は刺激入力に含まれる課題関連情報を(ノイジーな)エビデンスとして累積し、それがある境界を越えたときに意思決定をすると仮定される。このように高次の視覚認知を知覚的意思決定の枠組みで捉え直すと、そのメカニズムを実験的に検討することが可能になる。

任意の課題と刺激入力において、人間の視覚系はどのような情報をどのような時間ダイナミクスで累積し意思決定するのか？ この問いを、エビデンスを表現する神経応答を直接記録できるわけでもない人間の観察者について実験的に検討するのは難しく見える。しかし、我々は過去数年の研究において、心理物理データと刺激変数の逆相関解析の手法を用いることによりそれが可能であることを見出しつつあった[5-9, 14, 15]。

## 2. 研究の目的

上記の背景に基づき、本研究では、複雑な視覚刺激に対する意思決定のメカニズムを理解するため、様々なタイプの刺激に対する反応時刻にロックした逆相関解析により観察者がいつ・どこ・どのような情報を利用して意思決定をしたかを分析するとともに、同時計測された脳波からその神経相関を探ることを目指した。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、本研究では、視覚刺激のなかでノイジーに時間変動する特徴に対する観察者のバイナリな反応を大量の試行にわたり測定し、各試行における反応時間を基準として反応と刺激の変動波形との相関を分析する、という一連の実験研究を実施した。

(1) われわれ自身が過去に行なった、多くの方位要素が時空間の二次元で特定の平均と分散をもって分布する刺激を観察し、観察後に、その時空間的な平均方位(右あるいは左)を弁別させる心理物理学実験[8, 16]を改変し、刺激の提示中にできるだけ早く弁別させる実験を行った。そして、各時刻の各要素の方位、各時刻の平均方位、および特定の時定数において時間平均された各時刻の平均方位、と反応とのあいだの相関を分析した[13]。

(2) 時空間の二次元で特定の平均と分散をもって分布する一次元輝度ノイズのなかで緩やかに輝度コントラストが増加するターゲット刺激を観察している最中に、標的の有無をできるだけ刺激の観察中に検出させる実験を行った[4, 12]。

(3) 上記の視覚刺激において、ターゲット刺激の近傍に様々なタイミングで空間的注意の手がかり刺激をフラッシュさせることによりターゲット刺激に対する反応時間がどのように変動するかを分析するとともに、上記の逆相関分析の結果が手がかりのタイミングや位置によりどのように変化するかを分析した[1, 11]。

(1-3)のいずれの実験についても、観察者の反応時刻にロックした逆相関解析を用いて、各時刻・各位置における刺激変数が観察者の反応選択に寄与したインパクトを定量化し可視化した。それらの結果をもとに、注意の移動をともなう系列的なサンプリングに基づく知覚的意思決定に関する、総合的な神経計算モデルを提案することを目指した。

また上記の主要な実験研究と並行して、スパースモデリングなどを適用して逆相関解析そのものを効率化する方法を探るとともに、本研究計画の開始前に収集していた脳波データの分析を進めた。

## 4. 研究成果

上記の方法に基づいて、またそれを応用して、以下の成果を得た。

線分要素の方位の平均と分散が時間的に変動しつつ高速に提示される動的なテクスチャ刺激の平均方位をできるだけ早く回答させる実験をおこない、観察者の意思決定を決定づける各時刻の刺激情報を反応時間にロックした心理物理学的逆相関解析により導出した。その結果、反応の 400-500 ms における、100-200 ms の範囲における平均方位が意思決定に最大の寄与をもつことが明らかになった[13]。

空間一次元の動的輝度ノイズ中に緩やかに提示される輝度バーに対するコントラスト検出課題とし、反応にロックした逆相関解析により動的な意思決定を決定づける Classification Image(CI)を可視化した。その結果、反応の 400-500 ms をピークとする biphasic な時空間プロファイルをもつ CI が導出された。ただし、CI のプロファイルは反応時間に依存して複雑に変化した。これらの結果は複雑な CI の変動も含めて、古典的な時空間フィルタに近似される知覚過程とドリフト拡散機構に基づく伝統的な意思決定過程で構成される単純な知覚・決定ハイブリッドモデルにより定量的に説明されることが明らかになった。この成果は、国内外の学会で発表され[12]、国際誌に原著論文として公刊された[4]。これらの成果により、反応時間データのみを対象とした分析(多くの注意研究)や、刺激提示後の反応に基づいた分析(多くの知覚研究)を超えて、現実場面に即した動的な知覚的意思決定のメカニズムを心理物理学的に解析する基盤を確立することができた。

以上の研究により確立された実験プラットフォームを基盤として、動的な知覚的意思決定における空間的注意の効果を検討した。具体的には、空間一次元の動的輝度ノイズ中に緩やかに提示される輝度ターゲットに対するコントラスト検出課題において、ターゲット位置あるいは非ターゲット位置にランダムなタイミングで提示される空間手がかり刺激が、ターゲットに対する反応時間や、反応にロックした Classification Image(CI)解析の結果にどのような影響を及ぼすかを検討した。その結果、注意手がかりは、特に反応前の 500-1000 ms に提示されたときにターゲットへの反応時間を最大で 100 ms 短縮させること、CI は時空間二相性のプロファイルを示したが、その全体的な振幅は反応前の 500-1000 ms に提示された注意手がかりにより約 1.2 倍増加すること、が明らかになった。これらの結果は、古典的な時空間フィルタに近似される知覚過程とドリフト拡散機構に基づく伝統的な意思決定過程で構成される単純な知覚・決定ハイブリッドモデルにおいて知覚過程のゲインが注意手がかりにより増幅される、と仮定することにより定量的に説明された。この成果は、国内の学会で発表され発表賞を授与されるとともに[11]、国際誌に原著論文として公刊された[1]。

加えて、複数の研究を通して収集した総計数万試行の刺激・反応データを利用して、これまでの分析では見いだせなかった CI の振る舞いやその反応時間との関係などについての追加分析をおこなった。

また、本計画における膨大な観察と実験の途上において新たに発見されたいくつかの現象の解析も進めた。一つは、近接する運動信号により運動刺激が停止して見える新錯視の発見である。この現象を精密な心理物理学実験により分析したところ、運動信号・運動知覚・空間定位に関わる過去の様々な現象(フラッシュラグ、フラッシュドラッグ、サッカーに伴う空間知覚の変容、など)を統一かつ定量的に説明できる、視覚的空間定位の計算モデルを構築することができた。本成果は、次年度に開催予定の国際会議に投稿された。もう一つは、動的刺激の運動知覚が周期的に振動する現象における周期リズムに予想外の大きな個人差がある事実の発見である。この個人差の神経基盤を探るため錯覚を体験中の脳波解析を進め、知覚的な周期リズムと関連する脳波成分が存在することを見出した。これは、観察された周期的知覚が個々人の脳のリズムと関連することを示唆している。

以上に加えて、線分要素の平均方位に対する反応に対する意識的知覚の役割を検討した。その結果は、国内外の学会で発表されるとともに[10,16]、国際誌に原著論文として公刊された[3]。また、単純な視覚ターゲットの有無に関する意思決定を自覚的な行動反応に頼らず眼球運動や瞳孔反応などの他覚的生体データのみから判別する試みも行い、その成果は国際誌に原著論文として公刊された[2]。

## 参考文献

- [1] Sano, H. Ueno, N., Maruyama, H. & Motoyoshi, I. (2022). Spatial attention in perceptual decision making as revealed by response-locked classification image analysis. *Scientific Reports*, 12, 20992 (査読あり原著論文)
- [2] Nakayama, R., Bardin, J-B., Koizumi, A., Motoyoshi, I. & Amano, K. (2022) Building a decoder of perceptual decisions from microsaccades and pupil size, *Frontiers in Psychology*, 13, 942859. (査読あり原著論文)
- [3] Sekimoto, T. & Motoyoshi, I. (2022). Ensemble perception without phenomenal awareness of elements. *Scientific Reports*, 12: 11922(査読あり原著論文)
- [4] Maruyama, H., Ueno, N. & Motoyoshi, I. (2021). Response-locked classification image

- analysis of the perceptual decision making in contrast detection. *Scientific Reports*, 11: 23096(査読あり原著論文)
- [5] Yashiro, R. & Motoyoshi, I. (2020). Peak-at-end rule: adaptive mechanism predicts time-dependent decision weighting. *Scientific Reports*, 10: 17822. (査読あり原著論文)
- [6] Sato, H. & Motoyoshi, I. (2020). Distinct strategies for estimating the temporal average of numerical and perceptual information. *Vision Research*, 174, 41-49. (査読あり原著論文)
- [7] Motoyoshi, I. (2020). Adaptive comparison matrix: An efficient method for psychological scaling of large stimulus sets. *PLoSOne*, 15(5): e0233568. (査読あり原著論文)
- [8] Yashiro, R., Sato, H., Oide, T. & Motoyoshi, I. (2020). Perception and decision mechanisms involved in average estimation of spatiotemporal ensembles. *Scientific Reports*, 10: 1318. (査読あり原著論文)
- [9] Yashiro, R., Sato, H., & Motoyoshi, I. (2019). Prospective decision making for randomly moving visual stimuli. *Scientific Reports*, 9: 3809. (査読あり原著論文)
- [10] Sekimoto, T. & Motoyoshi, I. (2022). Ensemble perception with invisible elements. *Journal of Vision*, 22(14): 3812. [Annual Meeting of Vision Sciences Society 2022]. (査読あり国際会議)
- [11] 佐野宏伸・上野夏生・丸山玄德・本吉勇 (2022). 知覚的意思決定における注意の効果: 遡及的 classification image 解析. 日本視覚学会 2022 年夏季大会. (国内学会)
- [12] Maruyama, H., Ueno, N. & Motoyoshi, I. (2021). A response-locked classification image analysis of the perceptual decision making in contrast detection. The 43rd meeting of the European Conference on Visual Perception. (査読あり国際会議)
- [13] Maruyama, H., Sato, H., Yashiro, R. & Motoyoshi, I. (2020). Reverse correlation analysis of a reaction time task for stochastic stimuli. *Journal of Vision*, 20(11):934. [Annual Meeting of Vision Sciences Society 2020] (査読あり国際会議)
- [14] Maruyama, H., Yashiro, R., Sato, H. & Motoyoshi, I. (2019). Reverse-correlation analysis of real-time perceptual decision for dynamic visual stimuli. *Vision*, 31, 32 [Asia-Pacific Conference on Vision 2019]. (査読あり国際会議)
- [15] Sato, H., Oide, T., Yashiro, R. & Motoyoshi, I. (2019). Visual discrimination of spatiotemporal average orientation. *Journal of Vision*, 19(10); 48b. [Annual Meeting of Vision Sciences Society 2019] (査読あり国際会議)
- [16] 関本大勢・本吉勇 (2022). アンサンブル知覚における現象的意識の役割. 日本視覚学会 2022 年冬季大会.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sano Hironobu, Ueno Natsuki, Maruyama Hironori, Motoyoshi Isamu	4. 巻 12
2. 論文標題 Spatial attention in perceptual decision making as revealed by response-locked classification image analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20992
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-24606-7	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 Nakayama Ryohei, Bardin Jean-Baptiste, Koizumi Ai, Motoyoshi Isamu, Amano Kaoru	4. 巻 13
2. 論文標題 Building a decoder of perceptual decisions from microsaccades and pupil size	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 942859
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2022.942859	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 Sekimoto Taisei, Motoyoshi Isamu	4. 巻 12
2. 論文標題 Ensemble perception without phenomenal awareness of elements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-15850-y	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 Ryuto Yashiro & Isamu Motoyoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Peak-at-end rule: adaptive mechanism predicts time-dependent decision weighting.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-74924-x	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 Hironori Maruyama, Natsuki Ueno & Isamu Motoyoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Response-locked classification image analysis of perceptual decision making in contrast detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-021-02189-z	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7件(うち招待講演 3件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Sekimoto, T. & Motoyoshi, I.
2. 発表標題 Ensemble perception with invisible elements
3. 学会等名 Annual Meeting of Vision Sciences Society 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野宏伸・上野夏生・丸山玄徳・本吉勇
2. 発表標題 知覚的意思決定における注意の効果: 逆及的classification image解析
3. 学会等名 日本視覚学会2022年夏季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hironori Maruyama, Ryuto Yashiro, Hiromi Sato & Isamu Motoyoshi
2. 発表標題 Reverse correlation analysis of a reaction time task for stochastic stimuli.
3. 学会等名 Annual Meeting of Vision Sciences Society 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hironori Maruyama, Natsuki Ueno & Isamu Motoyoshi
2. 発表標題 A response-locked classification image analysis of the perceptual decision making in contrast detection.
3. 学会等名 The 43rd meeting of the European Conference on Visual Perception (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本吉 勇
2. 発表標題 視野の中心と周辺における 異質な視覚皮質情報処理II.
3. 学会等名 第6回視覚生理学基礎セミナー(日本視野学会). (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本吉 勇
2. 発表標題 「見える」を作り上げる脳のメカニズム (特別講演).
3. 学会等名 第62回日本視機能矯正学会. (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本吉 勇
2. 発表標題 知覚研究の動向と展望: 1995-2020.
3. 学会等名 日本基礎心理学会40周年記念事業. (招待講演)
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------