

# 視覚運動反応時間と始動局面の smooth pursuit 応答との共通性

## Consistency between visual motion reaction time and smooth pursuit initiation

宮本 健史<sup>†</sup>, 小野 誠司<sup>‡</sup>  
Takeshi Miyamoto, Seiji Ono

<sup>†</sup>名古屋大学, <sup>‡</sup>筑波大学  
Nagoya University, University of Tsukuba  
miyamoto@i.nagoya-u.ac.jp

### 概要

移動物体を追跡する眼球運動 (smooth pursuit) と物体運動の知覚との間には、部分的に共通したプロセスが関与することが示唆されている。本研究では、標的速度と独立して網膜像運動を操作可能な視覚刺激により、始動局面の smooth pursuit と移動物体検出の早さとの関係、個体間と個体内のいずれにおいても高い相関関係にあることを見出した。これらは、少なくとも網膜像運動処理の段階で、両者に共通したプロセスが存在していることを示唆している。

キーワード：物体運動知覚 (object motion perception), 眼球運動 (eye movement), 1 次運動刺激 (1st-order motion), 2 次運動刺激 (2nd-order motion)

### 1. はじめに

空間を移動する物体の知覚 (物体運動知覚) は、生物の行動を支える重要な機能の 1 つである。これと関連する眼球運動として、ヒトを含む霊長類は両眼視と網膜中心窩の発達により、移動物体を滑らかに視線追跡する滑動性眼球運動 (smooth pursuit) の能力が備わっている。これらはいずれも視覚運動検出に基づいた機能であり、両者が網膜像の動きの処理を担う大脳皮質領域である MT 野/MST 野の神経活動によってサポートされることが明らかになっている [1]。

心理物理学実験においては、smooth pursuit と物体運動知覚との間に関連があることを示す知見 [2] と関連がないことを示す知見 [3] の両方が報告されている。この不一致は、両者に共通および独立した 2 つの異なるプロセスが関与することを示している [4]。他方で、両者に共通したプロセスが視覚運動処理のどの段階に存在するかについては十分な理解が得られていない。そこで本研究では、MT 野/MST 野で行われる網膜像運動の処理に焦点を当て、網膜像運動を主な信号源とする smooth pursuit と物体運動知覚との共通性を明らかにすることを目的とした。

本研究の目的を達成するため、smooth pursuit の始動局面に着目した。Smooth pursuit は眼球運動が開始し速

度が增大する始動局面 (initiation) と眼球速度が物体速度に達したあとの定常局面 (steady-state) に大別できる。このうち、始動局面の smooth pursuit は主に網膜信号に基づいて調節される [5]。実際、サルを対象とした実験では、smooth pursuit 開始から 125 ms までの眼球運動の試技間変動のうち、90%以上が MT 野の神経活動から説明できることが報告されている [6]。つまり、始動局面の smooth pursuit を評価することで、網膜像運動処理を反映した眼球運動を評価することができる。同様に刺激呈示直後の網膜像運動処理を反映すると考えられる物体運動知覚の指標として、視覚運動検出の早さを評価する視覚運動反応時間 (RT) 課題を採用した [7]。網膜像運動によって駆動される smooth pursuit と物体運動知覚とが視覚運動信号を共有していた場合、(1) 始動局面の smooth pursuit 応答が優れている者は視覚運動 RT が短い (被験者間での相関)、および (2) 視覚刺激に応じた始動局面の smooth pursuit 応答と視覚運動 RT の変動は同じパターンを示す (被験者内での相関) ことが予想される。これらを検証するため、本研究では網膜像運動を実験的に操作可能な視覚刺激を用いた心理物理学実験を実施した。

本発表はすでに出版された研究 [8] に新たな解析と考察を加えたものである。

### 2. 方法

#### 2.1. 観察者

正常な視覚機能を有する成人 12 名が実験対象者として参加した (うち女性 4 名, 23.3 ± 1.0 歳)。

#### 2.2. 視覚刺激

Smooth pursuit および視覚運動 RT の評価に用いる標的として、0.4 deg の標準偏差を持つガウス窓によってコントラストが変調された、50%の密度を持つランダムドットキネマトグラム (RDK) を用いた (図 1)。RDK で与えられる輝度は一次運動情報と呼ばれ、網膜像運

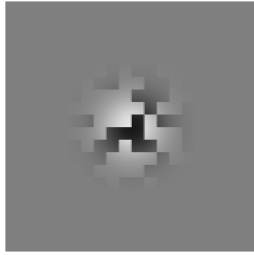


図1 標的.

動を引き起こす。一方で、ガウス窓で与えられるコントラストは二次運動情報と呼ばれ、網膜像運動と独立した標的の運動を引き起こす [9]。これらのうち、RDKの呈示パターンを操作することで、ガウス窓で定義される標的の移動を統一したうえで異なる網膜像運動を誘発することが可能となる。本研究では、一次運動情報が標的の移動方向と一致している条件を含め、以下の5種類の視覚刺激を設定した。すべての視覚刺激において、標的は 18.5 deg/s の速度で水平方向に移動した。

1st-order 刺激では、RDK はガウス窓と同速度で同方向に移動した (図 2A)。1st-order+刺激では、RDK はガウス窓の 2 倍の速度で同方向に移動した (図 2B)。2nd-order-static 刺激では、静止した RDK 上をガウス窓が移動した (図 2C)。2nd-order-dynamic 条件では、RDK は 1 フレーム毎に再配置され、その上をガウス窓が移動した (図 2D)。Theta-motion 刺激では、RDK はガウス窓と同速度で逆方向に移動した (図 2E)。これらの視覚刺激のうち、1st-order 刺激は網膜像運動 (一次運動刺激) と標的 (二次運動刺激) の速度および方向が一致していた。それ以外の視覚刺激では、正味の一次運動刺激が存在しない (2nd-order-static 刺激, 2nd-order-dynamic 刺激), あるいは網膜像の速度 (1st-order+刺激) または移動方向 (Theta-motion 刺激) が標的と一致しないため, smooth pursuit 応答と MT 野/MST 野の神経活動が低下することが報告されている [10][11]。

視覚刺激は Matlab (Mathworks) と Psychophysics Toolbox を用いて作成し、観察者の正面 70 cm に設置した CRT モニタ (Diamond Pro 2070SB, Mitsubishi. 22 inch) に 100 Hz で呈示した。

### 2.3. 実験課題

後述する視覚運動 RT 課題中の眼球運動を記録したところ、眼球運動を単独で記録した場合と比較して、始動局面の smooth pursuit 応答が小さかった。これは、視覚運動 RT 課題に含まれるボタン押し動作に多くの注意資源が割かれるためであると考えられる。両者を

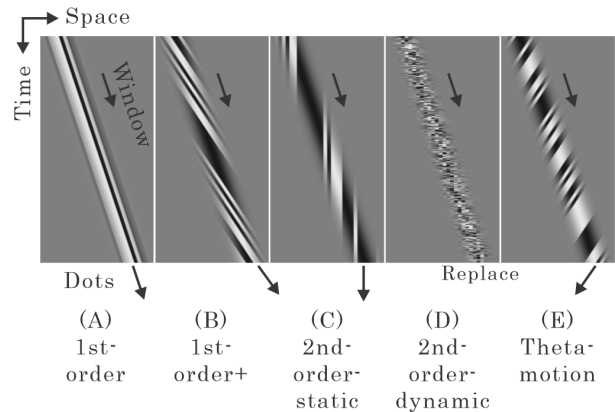


図2 視覚刺激パターン.

(A) 1st-order 刺激. (B) 1st-order+刺激. (C) 2nd-order-static 刺激. (D) 2nd-order-dynamic 刺激. (E) Theta-motion 刺激. パネル内の矢印はガウス窓 (Window), パネル下の矢印はドット (Dots) の移動方向を示す。

適切に評価するため、smooth pursuit と視覚運動 RT はそれぞれ独立した課題で評価した。

Smooth pursuit 課題では画面中央に固視点が 3 秒間呈示された後、5 種類の標的のいずれかが画面中央から左右どちらかへ 1.4 deg オフセットした位置に出現し、その後逆方向へ移動した。この手続きはステップランパラダイムと呼ばれ、smooth pursuit 初期のサッカードを抑制することで、比較的少数の試技で始動局面の smooth pursuit を評価することを可能とする [12]。観察者はできるだけ正確に標的を視線で追跡するよう指示された。各視覚刺激に対し、左右方向への刺激がそれぞれ 10 回となるように試技を行った。

視覚運動 RT 課題では画面中央に固視点が 1-3 秒間呈示された後、5 種類の標的のいずれかが画面中央に出現し、左右どちらかに移動した。観察者は標的の移動方向と対応した側の手に持ったボタンをできるだけ早く押すよう指示された。各視覚刺激に対し、左右方向への刺激がそれぞれ 10 回となるように試技を行った。

### 2.4. データ処理

眼球運動は赤外線カメラ (GS3-U3-41C6NIR, FLIR) を用いた角膜反射法で右眼から記録し、サンプリング周波数 1 kHz で A/D 変換した後 (CED-Micro 1401, Cambridge Electronic Designs), PC に記録された。眼球位置データにデジタル微分を適用することで眼球速度、加速度を算出し、80 Hz の FIR フィルタで平滑化した。眼球運動と視覚運動 RT に左右差が認められなかったため、いずれも左右方向のデータ (各視覚刺激で 20

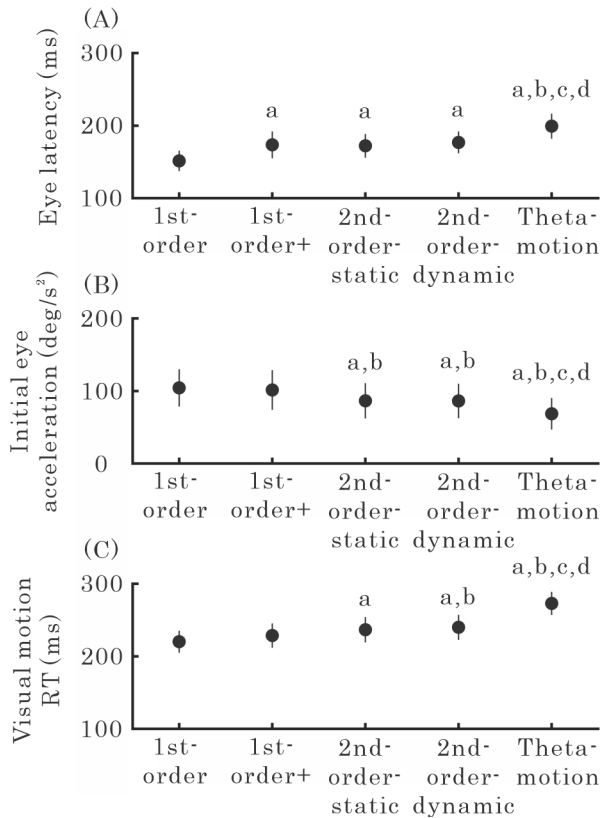


図3 Smooth pursuit の潜時 (A), 初期加速度 (B), および視覚運動 RT (C) の平均値と 95%信頼区間。

データ点上のアルファベットは多重比較検定

(Bonferroni 法) にて有意差が認められた組み合わせを表す (a: vs. 1st-order 刺激; b: vs. 1st-order+刺激; c: vs. 2nd-order-static 刺激; d: vs. 2nd-order-dynamic 刺激)。

試技) を集計して解析を行った。眼球速度と加速度は、標的の移動方向が正となるように符号を揃えたうえで加算平均した。刺激呈示 0.2-0.3 秒前の眼球速度の平均値に標準偏差の 3 倍を加えた値を閾値とし、眼球速度が閾値を超えた時点を smooth pursuit の潜時と定義した。また、得られた潜時から 0.1 秒間の眼球加速度を smooth pursuit の初期加速度と定義した。視覚運動 RT は各視覚刺激において全試技の平均値を代表値とした。

### 3. 結果と考察

Smooth pursuit の潜時 ( $F_{4,44} = 51.39, p = 5.01 \times 10^{-16}, \eta_p^2 = 0.82$ , 図 3A) および初期加速度 ( $F_{4,44} = 13.25, p = 3.64 \times 10^{-7}, \eta_p^2 = 0.55$ , 図 3B) に視覚刺激の主効果が認められた (反復測定一元配置分散分析)。先行研究と同様、これらの始動局面の smooth pursuit 応答の抑制は、2nd-order-static 刺激や 2nd-order-dynamic 刺激、および Theta-motion 刺激で顕著であった [10]。同

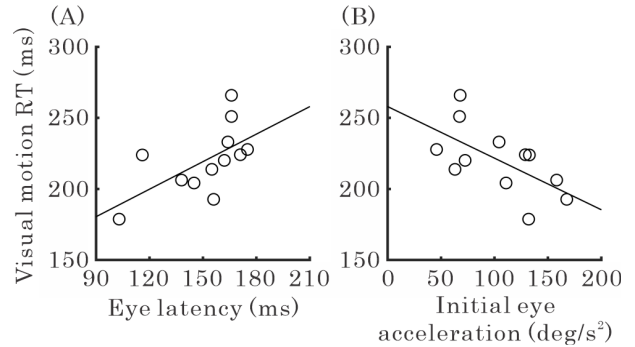


図4 1st-order 刺激に対する始動局面の smooth pursuit 応答と視覚運動 RT との関係。

(A) Smooth pursuit の潜時と視覚運動 RT との関係。

(B) Smooth pursuit の初期加速度と視覚運動 RT との関係。

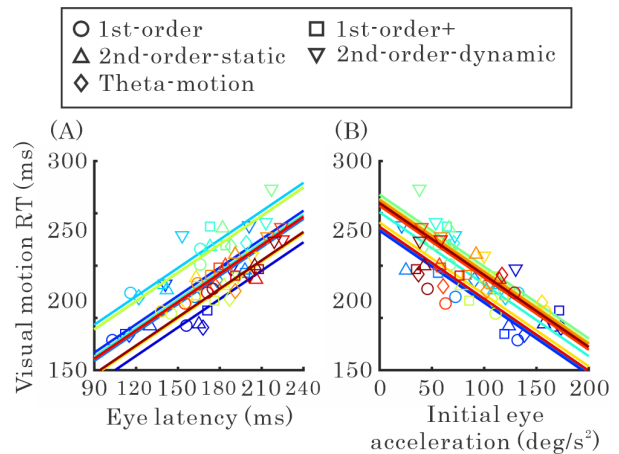


図5 5つの視覚刺激に対する始動局面の smooth pursuit 応答と視覚運動 RT との関係。

(A) Smooth pursuit の潜時と視覚運動 RT との関係。

(B) Smooth pursuit の初期加速度と視覚運動 RT との関係。点と線の色は各観察者を表す。

様の効果は視覚運動 RT にも認められ ( $F_{4,44} = 69.32, p = 2.02 \times 10^{-18}, \eta_p^2 = 0.86$ , 図 3C), 移動物体検出の早さも視覚刺激に応じて遅延することが明らかになった。

続いて、始動局面の smooth pursuit と視覚運動 RT との関連を評価するため、以下の 2 つの相関係数を算出した。まず被験者間における両者の関係を明らかにするため、1st-order 刺激に対する視覚運動 RT と smooth pursuit の潜時、および視覚運動 RT と初期加速度との関係について Pearson の積率相関係数を算出した。その結果、視覚運動 RT と smooth pursuit の潜時との間に正の相関 ( $r_{10} = 0.60, p = 0.04$ ), 視覚運動 RT と初期加速度との間に負の相関が認められ ( $r_{10} = -0.62, p = 0.03$ ), 始動局面の smooth pursuit 応答

が優れている者は物体運動検出も早いことが示された。続いて被験者内における、視覚刺激に応じた視覚運動 RT と smooth pursuit の潜時、および視覚運動 RT と初期加速度との共変関係を明らかにするため、within-subjects correlation coefficient を算出した [13]。Within-subjects correlation coefficient は視覚運動 RT と smooth pursuit の潜時との間で  $r_{10} = 0.82$  ( $p = 8.12 \times 10^{-7}$ )、視覚運動 RT と初期加速度との間で  $r_{10} = -0.74$  ( $p = 1.85 \times 10^{-5}$ ) であった。この結果は、始動局面の smooth pursuit 応答と視覚運動 RT における潜在的な個体差に関わらず、両者が同様のパターンで変動していることを示している。

以上の結果は、少なくとも網膜像運動処理の段階で smooth pursuit と物体運動知覚との間に共通したプロセスが存在することを示唆している。これは、始動局面の smooth pursuit と短時間の刺激に対する物体運動知覚とが分散を共有していることを示す心理物理学実験や [14]、MT 野の損傷による smooth pursuit と物体運動知覚の障害に関する知見と一致する [15]。他方で、smooth pursuit の調節に重要な役割を担う前頭眼野 (FEF) においても、物体運動知覚に関する知覚的意思決定の情報が符号化されていることを踏まえると [16]、より下流の脳領域においても両者に共通するプロセスが存在する可能性がある。

#### 4. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 16K01592, 22KJ0454, 23K16671 の助成を受けたものである。

#### 文献

- [1] Spering, M. and Montagnini, A., (2011) "Do we track what we see? Common versus independent processing for motion perception and smooth pursuit eye movements: A review", *Vision Research*, Vol. 51, No. 8, 836–852.
- [2] Matsumiya, K. and Shioiri, S., (2015) "Smooth pursuit eye movements and motion perception share motion signals in slow and fast motion mechanisms", *Journal of vision*, Vol. 15, No. 11,.
- [3] Tavassoli, A. and Ringach, D. L., (2010) "When your eyes see more than you do", *Current Biology*, Vol. 20, No. 3,.
- [4] Spering, M. and Carrasco, M., (2015) "Acting without seeing: Eye movements reveal visual processing without awareness", *Trends in Neurosciences*, Vol. 38, No. 4, 247–258.
- [5] Lisberger, S. G., (2010) "Visual guidance of smooth-pursuit eye movements: Sensation, action, and what happens in between", *Neuron*, Vol. 66, No. 4, 477–491.
- [6] Osborne, L. C., Lisberger, S. G. and Bialek, W., (2005) "A sensory source for motor variation", *Nature*, Vol. 437, No. 7057, 412–416.
- [7] Ono, S., Miura, K., Kawamura, T. and Kizuka, T., (2019) "Asymmetric smooth pursuit eye movements and visual motion reaction time", *Physiological Reports*, Vol. 7, No. 14, 1–8.
- [8] Miyamoto, T., Miura, K., Kizuka, T. and Ono, S., (2020) "Properties of smooth pursuit and visual motion reaction time to second-order motion stimuli", *PLOS ONE*, Vol. 15, No. 12, e0243430.
- [9] Lindner, A. and Ilg, U. J., (2000) "Initiation of smooth-pursuit eye movements to first-order and second-order motion stimuli", *Experimental Brain Research*, Vol. 133, No. 4, 450–456.
- [10] Hawken, M. J. and Gegenfurtner, K. R., (2001) "Pursuit eye movements to second-order motion targets", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 18, No. 9, 2282–2296.
- [11] Churan, J. and Ilg, U. J., (2001) "Processing of second-order motion stimuli in primate middle temporal area and medial superior temporal area", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 18, No. 9, 2297–2306.
- [12] Rashbass, C., (1961) "The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements", *The Journal of Physiology*, Vol. 159, No. 2, 326–338.
- [13] Bland, J. M. and Altman, D. G., (1995) "Statistics notes: Calculating Correlation coefficients with repeated observations: Part 1—correlation within subjects", *BMJ*, Vol. 310, No. 6977, 446.
- [14] Mukherjee, T., Battifarano, M., Simoncini, C. and Osborne, L. C., (2015) "Shared sensory estimates for human motion perception and pursuit eye movements", *Journal of Neuroscience*, Vol. 35, No. 22, 8515–8530.
- [15] Cooper, S. A., Joshi, A. C., Seenan, P. J., Hadley, D. M., Muir, K. W., Leigh, R. J. and Metcalfe, R. A., (2012) "Akinetopsia: Acute presentation and evidence for persisting defects in motion vision", *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, Vol. 83, No. 2, 229–230.
- [16] Ding, L. and Gold, J. I., (2012) "Neural correlates of perceptual decision making before, during, and after decision commitment in monkey frontal eye field", *Cerebral Cortex*, Vol. 22, No. 5, 1052–1067.