

暗所視における運動速度弁別

竹内 龍人*・Karen K. De Valois**

* NTT 基礎研究所 情報科学研究部
〒243-0198 厚木市森の里若宮3-1

** Department of Psychology and Vision Science Group, University of California, Berkeley
Berkeley, CA 94720, USA

1. はじめに

環境光は 10° のオーダーで変化するにも関わらず、視覚系はその高度に適応的な機構により環境の変化に対応している。初期視覚系のフロントエンドにはある特定の時空間周波数成分に選択性を持つ時空間フィルタが備わっており¹⁾、環境光の明るさが変化するとつれて、この時空間フィルタの性質（時空間インパルス応答関数）も変化するとされている²⁾。

さらに、視覚運動の検出メカニズムにおいても、フロントエンドに存在する時空間フィルタが、画像内からの特定の運動成分抽出に関与すると考えられている³⁾。主にマスキングによる心理物理実験から、このようなメカニズムの基礎を成す二種類の時間フィルタの存在が指摘されている。一つは低域通過型であり、もう一つは 8 Hz 付近にピークを持つ帯域通過型の時間フィルタである⁴⁾。

運動検出器を構成する時間フィルタは、環境光の変化に応じていかに変化するのだろうか？例えば、2つのパルス刺激の検出閾から推定される時間インパルス応答関数は、環境光強度が減少し、暗所視レベルに到達するにつれて、二相性から単相性へ変化する⁵⁾。本研究では、運動速度弁別閾の測定を通じて、運動検出に関与する時間フィルタの環境光強

1998 年冬季大会（1月21日）一般講演

度依存性を検討することを目的とした。

運動速度の弁別閾は、刺激の持つ時間周波数成分に依存する⁶⁾。速度弁別閾を表すウェーバー比 ($\Delta V/V$) は、中間時間周波数帯で最も良くなり、低時間周波数あるいは高時間周波数領域で悪化する。この結果は、先に述べた運動検出器を構成する2つの時間フィルタの出力比から説明されている⁶⁾。すなわち、出力比の関数の傾きは中間周波数領域で最大となり、高周波および低周波領域で減少する。この傾きの変化が弁別閾に相当するとされている。そこで本研究ではこのモデルに基づき、視覚運動の弁別閾から時間フィルタの形状を推定し、環境光強度の低下に伴う時間フィルタの形状変化を定量的に検討した。

2. 実験方法

2.1 装置

視覚刺激ジェネレータ VSG2/3 (Cambridge Research Systems) により作成した視覚刺激を 20 インチカラーモニタ (SONY Multiscan 20se) に提示した。フレーム周波数を 120 Hz に設定し、輝度階調を 13 ビットで操作した。空間解像度は 1000×1000 ピクセルとした。視距離は 114 cm とし、右眼単眼視で実験を行った。平均輝度レベル (順応レベル) は人工瞳孔 (2 mm) の前に ND フィルタを設置するこ

とにより操作した。平均輝度は $2.5 \log \text{photopic td (Tp)}$ (30 cd/m^2), $0.5 \log \text{Tp}$ (0.09 cd/m^2), $-1.5 \log \text{Tp}$ (0.009 cd/m^2) の3種類を用いた。最も低い順応レベルでは暗所視システムのみが働いていると考えられる。各被験者は実験の前に30分間の暗順応を行い、最も暗い条件から実験がはじめられた。

2.2 刺激

視覚刺激は、上下方向に運動する水平正弦波（空間周波数 1.0 cpd ）を用いた。刺激サイズは $6.0 \text{ deg} \times 6.0 \text{ deg}$ とし、時空間にガウス窓をかけた ($\sigma_t = 500 \text{ ms}$, $\sigma_s = 1.0 \text{ deg}$)。刺激の提示位置は中心あるいは周辺 10 deg （上方）とした。刺激の提示時間から速度を類推する可能性を避けるために、提示時間を 1.0 s から 1.4 s の間で試行毎にランダム化した。刺激の時間周波数は 0.5 Hz から 32.0 Hz まで変化させた。空間周波数が一定のため、これは 0.5 deg/s から 32.0 deg/s の速度に相当する。

2.3 手続き

各順応レベルにおいて刺激の実効コントラストを統一するために、運動刺激検出のコントラスト閾を事前に測定し、速度弁別実験時

においてはコントラスト ($L_{\text{max}} - L_{\text{min}} / L_{\text{max}} + L_{\text{min}}$) を各条件における閾値の等倍にそろえた。コントラスト閾の測定は、二つのインタバルの内どちらに刺激が出たかを答える強制二種選択により行い、階段法により閾値を決定した。

速度弁別閾の測定では、被験者は強制二種選択方法により、継時的に提示される二つの運動正弦波格子のうち、どちらがより速く動いて見えるかを答えた。刺激は恒常法により提示され、比較刺激の時間周波数は、標準刺激の時間周波数より常に高いものを用いた。比較刺激の時間周波数の取りうる範囲は予備実験により決定した。比較刺激と標準刺激の提示順はランダムであった。各刺激のコントラストは、先に測定したコントラスト閾値の3倍に固定した。1セッションは、運動方向4通り（両インタバルの刺激は上下どちらかの方向にランダムに動く） \times 比較刺激の時間周波数5通り \times 繰り返し4回の計80試行となり、各条件につき2から3セッションの実験を行った。得られた心理測定閾値（各点は32回から48回の繰り返し）をWeibull関数によりフィットし、標準刺激の各時間周波数毎に弁別閾（ウェーバー比）を導出した。

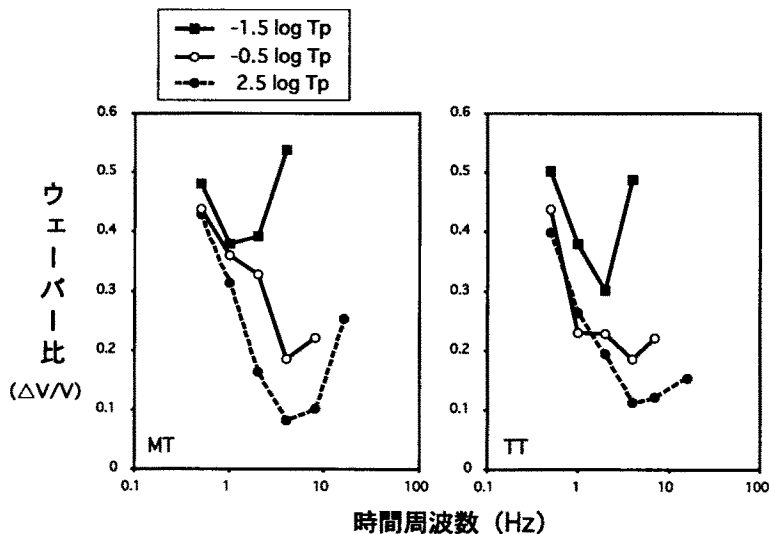


図1 速度弁別閾の結果。横軸は時間周波数、縦軸はウェーバー比を表す。

3. 結果

運動検出のコントラスト閾曲線は以前から知られているように、明所視下 ($2.5 \log T_p$) では 5 Hz から 8 Hz を中心とする帯域通過型を示した。暗順応下 ($-1.5 \log T_p$) では閾曲線のピークが 2 Hz 近辺へとシフトした。カットオフ時間周波数は、約 10 Hz であった。さらに、周辺視における感度が低周波領域を除いて中心視における感度を上回った。以上の結果は、最低平均輝度条件においては、実際に暗所視システムが運動検出に機能していることを示している。

図 1 は被験者 2 名の中心視における運動速度弁別課題の結果である。横軸は時間周波数 (速度)、縦軸は弁別閾 (ウェーバー比) を表している。ウェーバー比が小さいほど速度差に対する感度が良いことを示している。明所視下 ($2.5 \log T_p$) では 5.0 Hz 近辺で弁別閾が最も低くなり、この時間周波数帯から離れるにつれて閾値は増加した。これは過去に報告された結果と一貫している⁹⁾。さらに、暗所視条件 ($-1.5 \log T_p$) においても同様に、中間周波数で最も感度が良く、それ以外の領域で感度が悪化することがわかった。ただし、こ

の最大感度が得られる時間周波数は 2.0 Hz 近辺へシフトした。また高時間周波数領域における弁別閾は順応レベルの低下に伴い増加したが、低時間周波数領域では明所視条件と暗所視条件との間で大きな差はみられなかった。

4. 考察

以上の実験結果に基づき、速度弁別閾の決定に関与すると考えられる時間インパルス応答関数の形状を推定した。時間インパルス応答としては、明所視下で仮定されている帯域通過型および低域通過型の二種類の関数を、 \log ガウス関数とその導関数により定義した⁷⁾。さらに、速度弁別閾を決定するモデルとして出力比モデル⁶⁾、コントラスト閾を決定するモデルとして 2 つのフィルタ出力の時間的確率加重を用い、両実験データにフィットするパラメータ (インパルス応答関数のピーク位置と幅を決定) を推定した。その結果、暗所視下においても明所視下と同様に、低域通過型と帯域通過型二種類の時間周波数応答チャンネルから運動検出器が構成されており、このチャンネル群の出力比から速度弁別精度が決

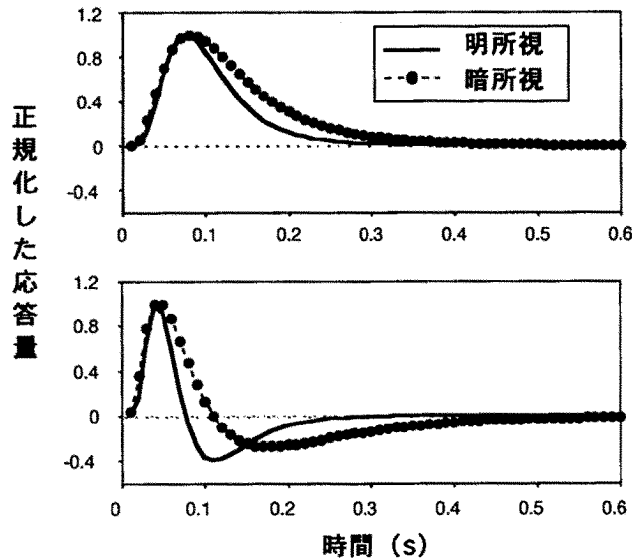


図 2 推定された時間インパルス応答関数。

定されていることがわかった(図2)。ただし、推定された暗所視下における時間インパルス応答関数は、明所視下における関数に弱い低域通過フィルタをかけた形状をしており、これが高周波数領域における選択的な弁別閾の悪化の原因であると考えられる。

網膜レベルにおいては、明所視下と暗所視下では関与する光受容器が異なるという二面性を持つ。しかしながら、対象の運動速度が検出されると考えられる中枢レベルにおいては、時間応答特性は順応レベルに対して大きな変化を示さないことを今回の実験結果は示している。実際に、順応レベルの低下に伴うコントラスト感度の低下量と速度弁別感度の低下量との比較を試みたところ、コントラスト感度の方が速度弁別感度より10倍程度低下することがわかった。これはコントラスト感度が網膜レベルにおける時間分解能により決定されている反面、速度弁別が視覚系のより上位過程で行われていると仮定することで説明できる。さらに、弱い低域通過フィルタによるフィルタリングは、順応レベルの低下によりS/N比の低下した状況においても、時間統合領域を増大させることにより弁別閾の悪化をふせいでいると考えられる。

なお周辺視観察条件では、順応レベルが低下するにつれて、高時間周波数領域以外で弁別閾の増加がみられたが、高時間周波数領域では逆に周辺視条件のほうが中心視より弁別感度が向上する場合もみられた。この結果は、時間インパルス応答関数の順応レベルに伴う形状変化が中心と周辺で異なる可能性を示しており、今後の研究課題である。

運動知覚と順応レベルの関係に関してはまだ明らかでない。しかしながら、今回の結果に加え、運動方向錯視⁸⁾、最小運動閾⁹⁾、運動速度知覚¹⁰⁾などに関する知見を総合すると、

暗所視下においても明所視下と同様の運動検出システムが、入力像にたいしてノイズ耐性を強める形で働いていると考えられる。

文 献

- 1) R. L. De Valois and K. K. De Valois: *Spatial vision*. Oxford University Press, New York, 1988.
- 2) W. H. Swanson, T. Ueno, V. C. Smith and J. Pokorny: Temporal modulation sensitivity and pulse-detection thresholds for chromatic and luminance perturbations. *Journal of the Optical Society of America A*, 4, 1992-2005, 1987.
- 3) E. H. Adelson and J. Bergen: Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 284-299, 1985.
- 4) R. J. Snowden, R. F. Hess and S. J. Waugh: The processing of temporal modulation at different levels of retinal illuminance. *Vision Research*, 35, 775-789, 1995.
- 5) S. P. McKee, G. H. Silverman and K. Nakayama: Precise velocity discrimination despite random variations in temporal frequency and contrast. *Vision Research*, 26, 609-619, 1986.
- 6) A. T. Smith and G. K. Edgar: Antagonistic comparison of temporal frequency filter outputs as a basis for speed perception. *Vision Research*, 34, 253-265, 1994.
- 7) A. B. Metha and K. T. Mullen: Temporal mechanisms underlying flicker detection and identification for red-green and achromatic stimuli. *Journal of the Optical Society of America A*, 13, 1969-1980, 1996.
- 8) T. Takeuchi and K. K. De Valois: Motion-reversal reveals two motion mechanisms functioning in scotopic vision. *Vision Research*, 37, 745-755, 1997.
- 9) K. K. De Valois, D. M. Turner, J. A. Scott and T. Takeuchi: Displacement detection under scotopic adaptation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 38 (ARVO Suppl), S215, 1997.
- 10) D. M. Turner, K. K. De Valois and T. Takeuchi: Speed perception under scotopic conditions. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 38 (ARVO Suppl), S378, 1997.