

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870230

研究課題名(和文)超高速情報に対するヒト視覚系の処理限界に関する心理物理学的検討

研究課題名(英文)Human visual processing for the high-speed temporal information

研究代表者

中嶋 豊(Nakajima, Yutaka)

電気通信大学・その他の研究科・研究員

研究者番号：90513036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最大5000 Hzの時間解像度を持つDLP高速プロジェクタを用いることによって、従来検討することが困難であった超高速時間情報に対するヒト視覚系の処理限界について検討した。その結果、明滅が知覚されなくなる限界の周波数(臨界融像周波数：60 Hz)を超えた時間情報に対しても、明滅の知覚(瞬き知覚)やパタンの知覚が生じることを見出した。また、従来以上の時間解像度で高速連続運動を提示することで、運動が滑らかに知覚される限界が臨界融像周波数以上の周波数に存在することが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The visual processing for the high-speed temporal information was investigated by using the high-speed DLP projector (maximal refresh rate: 5000 Hz). The results showed that the temporal information above critical fusion frequency (CFF: 60 Hz) could induce the transient twinkle perception and the transient pattern perception. In addition, the temporal limit for perception of motion smoothness would be higher than the temporal frequency above CFF.

研究分野：実験心理学

キーワード：高速情報処理 高速プロジェクタ フリッカ 運動知覚

1. 研究開始当初の背景

映像ディスプレイ技術の発展は、従来よりも高時間周波数、高速度での画像提示を可能とし、より滑らかな動画の提示、両眼立体視(3D)映像の提示を容易にした。一方、ヒト視覚系の時間周波数に対する限界は約60 Hzであり、これ以上の速さで明滅する光は時間的に一様輝度として知覚される。この時間限界は臨界融像周波数(Critical Fusion Frequency: 以下 CFF と表記)として知られる。

一方、近年、CFF以上の時間周波数(<100 Hz)で明滅する光に対しても、ヒト視覚系が応答特性を持つことを示す報告がなされており、我々の視覚系がCFF以上の時間情報を符号化できることを示すものである。ただし、先行研究では、基本的には明滅光からヒト視覚系の時間特性を検討しており、空間的な特徴と時間情報との関係についての検討は不十分である。特に、従来ディスプレイでは、CFF以上の高速時間情報の提示が困難であった。

こうした問題の解決にあたり、本研究ではDMD(Digital Micromirror Device)技術を用いたDLP(Digital Light Processing)高速プロジェクタに着目した(図1)。この装置では1 bit バイナリ画像で最大5000 Hzまでの高速提示が可能であり、これまでは検討すること自体が困難であった超高速時間情報に対するヒトの視覚特性を検討できると考えた。



図1. DLP 高速プロジェクタ

2. 研究の目的

ヒト視覚系の超高速情報処理について検討し、時間情報処理の限界を明らかにすることを目的とした。この時、情報を高速提示することにより初めて見出すことのできた知覚現象を手がかりとした。

(1) CFF以上の周波数を持つ明滅刺激と定常刺激(もしくはCFF以上の異なる周波数を持つ明滅刺激)を連続提示すると、その切り替わり時に一瞬の瞬きが知覚される(Transient Twinkle Perception: TTP)。この現象は、刺激切り替わり時の輝度平均値の変化によって引き起こされるものと仮定し、移動平均モデルを適用することによって現象の生起要因について検討した。

(2) CFF以上の周波数で明滅する一様明滅面と、矩形波パタンの位相反転明滅を連続提示すると、これらの切り替わり時に一様面と矩形波パターンを時間的に平均した一過的なパ

タンが知覚されることを見出した。この現象から、時間平均が生じる時間幅について検討した。

(3) 高時間解像度提によって、運動物体は滑らか(連続的)に知覚されることが予測される。また、各画像提示フレームにおける光の出力割合(Duty比)が低いほど、「動きぼやけ」が少ないことも報告されているが、その効果については議論の余地がある。これらの点について、1秒あたりの画像の提示枚数、Duty比を操作することによって連続性の知覚が生じる時間限界について検討した。

3. 研究の方法

(1) TTPに関する検討

刺激は直径4 deg(幅1 deg)の黒色(B, OFF)と白色(W, ON)のリング刺激が交互に提示される明滅刺激を用い(図2a)、異なる周波数の明滅刺激を連続して提示した。プロジェクタのリフレッシュレートは400, 600, 800, 1000, 1200 Hzに設定し、高周波数の明滅刺激(HTF)100, 150, 200, 250, 300, Hz, 低周波数の明滅刺激(LTF)は、HTFの1/2の周波数になるように設定した(例: 100 HzのHTFと50 HzのLTFの組み合わせ)。従ってHTFの1サイクルは4フレーム、LTFの1サイクルは8フレームで構成されることとなる。1サイクル内の白色リングと黒色リングの構成比率はそれぞれ3:1であった(図2b)。また、LTF-HTFもしくはHTF-LTFの刺激の切り替わりに追加の黒色リングの画像を挿入することで、切り替わり時の輝度平均の値を操作した(図2c, 図2d)。

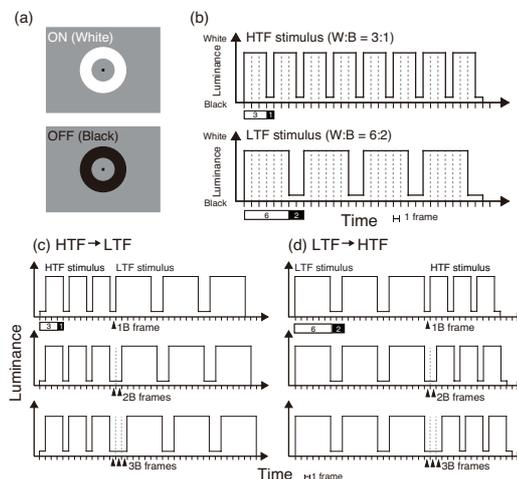


図2. TTPの検討で用いた刺激の模式図

実験参加者4名の課題は、HTFのみで構成した刺激が提示されるフェイズと、HTF,LTFが連続提示されるフェイズ(ターゲットフェイズ)を続けて観察し、TTPが知覚されたフを回答することであった。各フェイズにおいて刺激は320 ms提示した。明滅刺激の周波数ごとにブロックを分け(6ブロック)、各ブロックでは12条件(ターゲットフェイズの順序2条件×HTF-LTFの提示順序2条件×切り替わり時のフレーム挿入枚数3条件)をそれぞれ

れ 10 回ランダムな順序で提示した。

(2) 明滅誘導パターンに関する検討

白と黒の一樣輝度の明滅面（一樣明滅）と 1.5 cycle/window (0.75 cycle/deg) の白と黒の輝度を持つ矩形波パターンが位相反転して明滅する刺激（パターン明滅）を、一樣明滅 (250 ms)、パターン明滅、一樣明滅の順で提示した。この時、パターン明滅の提示時間を 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 25.0, 50.0, 100.0, 200.0 ms に設定した。刺激全体の提示時間を 950 ms に固定したため、後半の一樣輝度の提示時間はパターン明滅の条件に伴い変化した。プロジェクタのリフレッシュレートは 800 Hz (明滅の周波数 400 Hz) に設定したため、それぞれ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 40, 80 cycle のパターン明滅が提示されることになる。明滅の切り替わり時は、黒の一樣面と中心が黒の矩形波（黒転換）、もしくは白の一樣面と中心が白の矩形波（白転換）となるように設定した。前半の一樣明滅とパターン明滅の切り替わり、パターン明滅と後半の一樣明滅の切り替わりでは、切り替わり時の輝度極性を反転させた (図 3)。明滅を提示した領域は 2 deg 四方であった。

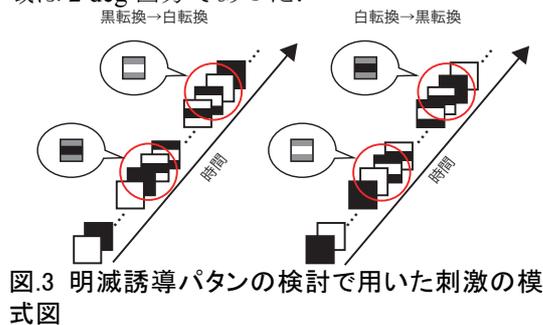


図 3 明滅誘導パターンの検討で用いた刺激の模式図

参加者 (8 名) の課題は、刺激観察中に一過的に知覚されるパターンの方位（垂直もしくは水平）を判断することであった。実験は 2 ブロック行ない、各ブロックでは 36 条件（転換時の輝度極性の順序 2 条件×パターンの方位 2 条件×パターン明滅の提示時間 9 条件）をランダムな順序で 5 回提示した。また、別のブロックにおいて、一過的に知覚されるパターンの知覚回数について 1 回、2 回、もしくは 0 回（知覚されなかった）の中から選択して回答する課題を行なった。刺激の提示条件は方位の判断と同じとした。

(3) 運動の連続性に関する検討

直径 1.3 deg の円の中心が、半径 3.35 deg の円周上を運動する刺激を用いた (図 4)。刺激の運動速度はいずれの条件においても同一とした (1440°/s, 4 rounds/s)。1 周あたりの円刺激の提示枚数は 180, 90, 60, 45, 30, 15 枚のいずれかに設定し、ISI (inter-stimulus interval) は挿入しなかった。プロジェクタのリフレッシュレートは 720 Hz に設定したため、上記条件での提示枚数を刺激のリフレッシュレートに換算すると、720, 360, 240, 180, 120, 60 Hz に相当する。また 1 フレームあた

りの光の出力割合 (Duty 比) を操作し、10, 20, 40, 100 % に設定した。LED 出力割合は Duty 比 100% の時には 50 %, Duty 比 10, 20, 40% では、それぞれ 100, 50, 25 % とし 1 フレームあたりの輝度の積分値が同じ値となるよう設定した。

1 試行の始めに背景上に注視点のみを提示した画像を 500 ms 提示したのちに、刺激を 500 ms 提示した (2 rounds/trial)。参加者 (8 名) には、異なる時間に提示された画像フレームが同時に知覚され、離散的な運動としての知覚が生じたか否かを回答するよう教示した。実験は Duty 比の条件ごとにセッションを分け、1 セッションは 2 ブロックで構成し、1 ブロック内では 12 条件 (刺激のリフレッシュレート 6 条件×回転方向 2 条件 (時計回りもしくは反時計回り)) をランダムに提示し、それぞれ 5 回繰り返し提示した。

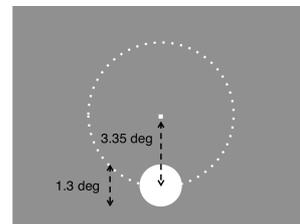


図 4 滑らかさの検討で用いた刺激の模式図 (円状の点線は実際には提示していない)

4. 研究成果

(1) TTP に関する検討

刺激のリフレッシュレートの違いごとに、参加者がターゲットフェイズを選択した割合 (TTP が知覚された割合: TTP ratio) を算出し、ターゲットフェイズの順序、HTF-LTF の順序を考慮せず平均値を求めた (図 5)。HTF100, 150, 200 Hz の条件では、切り替わり時に挿入されたフレーム数によらず頑健に TTP が知覚された。一方、250, 300 Hz の条件では、挿入フレームが 1, 2 枚の場合では TTP の知覚割合は 75% 程度となった。こうした傾向は、刺激の切り替わり時の輝度平均の値に着目することで説明が可能であり、比較的単純な移動平均モデルによって、心理実験の結果を説明することができた。推定された移動平均窓の幅はおよそ 120 ms であった。

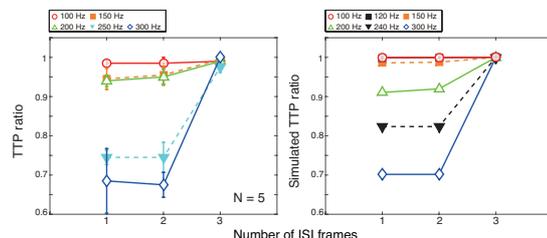


図 5. TTP 知覚割合(左)と計算モデルによる推定結果(右)

(2) 明滅誘導パターンに関する検討

① 方位判断

条件ごと、参加者ごとに、回答したパターンの方位と明滅パターンの方位が一致した比率を

求め（正答率）、パタンの方位、転換時の輝度極性を考慮せず、参加者の平均を求めた（図 6a）。この結果、パタン明滅の提示時間がおよそ 10 ms 程度となると方位判断の正答率がチャンスレベル（75 %）となり、10 ms 以上ではパタンの方位がほぼ正確に判断できることが示された。

② 知覚回数判断

条件ごと、参加者ごとに、各知覚回数を回答した比率を求め、パタンの方位、転換時の輝度極性を考慮せず、参加者の平均を求めた（図 6b）。この結果、パタン明滅の提示時間がおよそ 10 ms 程度まではパタンは知覚されず、10 ms から 50 ms 程度の間では 1 回、それ以上の提示時間ではパタンが 2 回知覚されることが示された。

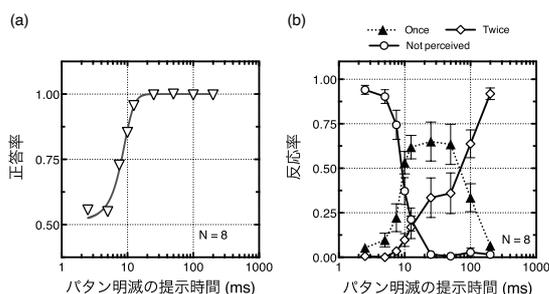


図 6. 明滅誘導パタンに対する方位判断の結果 (a)とパタンの知覚回数判断の結果 (b)

(3) 運動の連続性に関する検討

刺激のリフレッシュレートの違いごとに、各参加者が離散的な運動を知覚した比率を算出し、求めた比率を 1.0 から減算することで「動画が滑らかに知覚された比率 (Smoothness ratio)」と定義し、運動方向の違いを考慮せず参加者間の平均値を求めた（図 7）。実験の結果、提示枚数の増加に伴い Smoothness ratio が上昇する傾向が見られた。Smoothness ratio が 0.5 の値をとる刺激のリフレッシュレートを動画の連続性の知覚閾値として定義し、心理測定関数を求めることができた 5 名のデータから閾値を推定し平均を求めた。その結果、Duty 比 10, 20, 40, 100% に対してそれぞれ 140.9, 155.4, 143.1, 167.4 Hz であった。この数値は動画像が滑らかに知覚されるための最低限の刺激のリフレッシュレート（提示画像枚数）と捉えることができることから、連続性の閾値の結果は、Duty 比 100%と比較して Duty 比が低い方がより低いリフレッシュレートであっても動画像が連続的に知覚されることを示唆する。

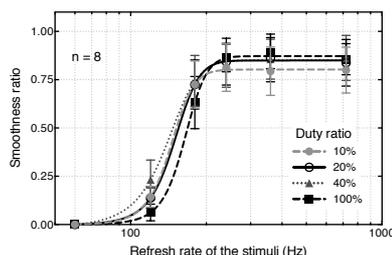


図 7. 運動の連続性の検討の実験結果

従来、CFF はヒト視覚系の時間限界と考えられていたが、本研究の一連の結果は、CFF 以上の時間情報が提示され、それらの間の知覚を比較した場合においても、差分を見出すことができることを示している。(1)では、200 から 250 Hz の間に TTP の知覚限界が存在すること、(2)では最短で 10 ms 未満の時間範囲で輝度の時間平均が行なわれ、一過的なパタンの知覚が生じていること、(3)では、150 Hz 前後の時間情報の違いにより、運動物体の見えが異なることを示唆している。従って、少なくとも 10 ms (100 Hz) 程度までの時間情報については、それぞれの違いを考慮して処理が行われていることが示唆され、こうした時間処理の限界は、高速プロジェクタを適用した検討によってはじめて明らかとなったものである。

本研究の一連の成果は、ヒト視覚系の高速情報処理の新たな側面を見出し、従来の知見を更新した点、また高速情報処理研究における新たなアプローチを提案した点において意義があるものと言える。さらに今後益々の発展が見込まれる高速情報提示技術に対しての貢献が期待できるものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① 中嶋 豊, 阪口 豊, 視覚心理実験に対する高速プロジェクタの適用, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(1), 2016, 7-14. (査読有)

② Nakajima, Y., Sakaguchi, Y., Transient twinkle perception is induced by sequential presentation of stimuli that flicker at frequencies above the critical fusion frequency. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77(8), 2015, 2711-2727. (査読有) doi: 10.3758/s13414-015-0962-x

[学会発表] (計 7 件)

① 中嶋 豊, 阪口 豊, 連続運動としての知覚が生じる時間限界について. 第 49 回知覚コロキウム (仙台市, 宮城県, 2016/3)

② Nakajima, Y., & Sakaguchi, Y. Perception of transient pattern at the transition between high-speed flickering stimuli. Vision Science Society 15th annual meeting, (St. Pete Beach, FL, USA, 2015/5/15-20) *Journal of Vision*, 15(12), 811. doi: 10.1167/15.12.811

③ 中嶋 豊, 阪口 豊, Pattern perception brought by a transient switch of high-speed flicker stimuli. 第 48 回知覚コロキウム

(日田市, 大分県, 2015/3)

- ④ 中嶋 豊, 阪口 豊, 高速フリッカ刺激の連続提示により生じるパタン知覚. 日本視覚学会冬季大会 (工学院大学, 東京都, 2015/1)
- ⑤ 中嶋 豊, 阪口 豊, Perceptual shrinkage of motion path observed in one-way high-speed motion. 日本神経回路学会第24回全国大会 (はこだて未来大学, 北海道, 2014/8)
- ⑥ Nakajima, Y., Sakaguchi, Y., Perceived speed of apparent motion in high-speed conditions. Asia-Pacific Conference on Vision 2014 annual meeting, (Takamatsu, Kagawa, 2014/7/19-22)
- ⑦ Nakajima, Y., Sakaguchi, Y., Abrupt transition between an above-CFF flicker and a stationary stimulus induces twinkle perception: Evidence for high-speed visual mechanism for detecting luminance change. Vision Science Society 13th annual meeting, (Naples, FL, USA, 2013/5/10-15) Journal of Vision, 13(9) article 311. doi: 10.1167/13.9.311

[図書] (計1件)

- ① Ishikawa, M., Ishii, I., Sakaguchi, Y., Shimojo, M., Shinoda, H., Yamamoto, H., Komuro, T., Oku, H., Nakajima, Y., Watanabe, Y., Chapter 5. Dynamic Information Space Based on High-Speed Sensor Technology. In T. Nishida (Ed.), Human-Harmonized Information Technology Volume1: Vertical Impact, Springer Japan, 2016, 97-136. doi: 10.1007/978-4-431-55867-5_5

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/ytknakajima/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中嶋 豊 (NAKAJIMA Yutaka)

電気通信大学大学院情報システム学研究科・研究員

研究者番号 : 90513036