

Temporal Phase Shift: 時間位相差を持つプロジェクションシステムによる錯視現象とそのモデル化

Temporal Phase Shift: Visual Illusion by Phase Shifted Light Projection

暦本 純一*

Summary. 人間の視覚情報処理の解明はインタラクティブシステム構築の基礎として重要である。本研究ではデジタルマイクロミラープロジェクターを改造し、同一色・同一輝度・同一明滅周波数の光の位相をわずかにずらして照射するという構成を持つプロジェクターを試作した。このプロジェクターで図形を描画すると、一見にも見えない投影面から、眼球固視微動にともなう位相変化境界が明確なエッジとして知覚されるという現象を発見した。これを時間位相差錯視と呼ぶことにする。本論文では、本錯視現象の特性について報告し、発生原理を考察し、またインタラクティブシステムとしての応用可能性について検討する。

1 はじめに

視覚情報は人間が外界を認識するもっとも主要な手段であり、インタラクティブシステムの構成原理としても当然極めて重要である。また、生物の視覚情報処理メカニズムの解明そのものが、広範囲の工学的応用や新しいインタラクティブシステムの発明につながる場合もある。本研究では、視覚系の中で、眼球の微細運動（固視微動）に特に注目し、固視微動と深く関連すると予測される、今回発見した新しい錯視現象について報告する。またその発生機構について考察し、モデルを提案する。

視点が同じ場所にとどまっていると我々が思っている時にも、眼球は常に動き続けている。このような微細な眼球の動きは、通常の視点移動と対比させて「固視微動」と呼ばれている [3, 6, 1]。固視微動には複数種類の運動である。直線上に動くマイクロサッカド、波上に動くドリフト、さらに微細なトレモアが組合わさっている (図 1)。図に示すように、固視微動により活性化される網膜上の光受容器が次々と変化することが視覚系にとって必要なのではないかと予測されているが、その全容はいまだに解明されていない。さらに、固視微動の発生頻度と、人間の高次の状態、たとえば疲労／興味／集中度との関係なども勢力的に研究されている [6]。

固視微動の結果、網膜に映る映像は常に「跳躍している」ことになる。網膜映像の跳躍が、なぜ我々の通常の認知では気にならないのか（つまりどうやって「ブレ」が補正されているのか）は、必ずしも明らかではない。逆に、この機構の解明がカメラのブレ防止などに代表される画像処理技術の新しい構成原理に応用できるかもしれない。

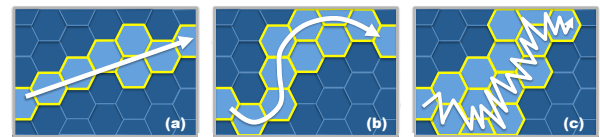


図 1. 眼球固視微動: 直線的に運動するマイクロサッカド (a), ゆるやかに変化するドリフト (b), 細かな振動のトレモア (c) の三種類がある。([6] から再構成)

視覚情報処理メカニズムを解明するために有効な手段として「錯視 (visual illusion)」がある [11]。錯視現象の原因を追求することで、人間の視覚情報処理と、人工物であるカメラとの共通点、相違点を明らかにすることができる。また錯視現象そのものも、古くから「だまし絵」として親しまれており、インタラクティブアートやエンターテインメントを構成する重要な基盤要素となっている。

固視微動に関連する錯視として「ジッター錯視 (visual jitter illusion)」が知られている [7]。これは、ランダムドットを順次変化したダイナミック・ノイズパターンを一定時間眺め、ノイズに順応した眼で静止画像を見ると、それが揺れてみえるという現象である。ダイナミック・ノイズに順応することで、固視微動による網膜イメージの揺れを補正する機能が一時的に抑制され、静止画イメージが揺れて見えるのが原因だと考えられている。ジッター錯視の発生は順応が消える数秒間と短い。本研究では、順応の過程が必要なく、固視微動の発生回数などを計測するのに適していると思われる新しい錯視現象「時間位相差錯視」について報告し、その発生機構について考察する。

Copyright is held by the author(s).

* Jun Rekimoto, 東京大学大学院情報学環/ソニーコンピュータサイエンス研究所

2 Temporal Phase Shift 機器構成

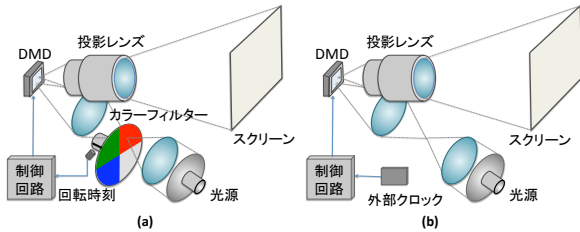


図 2. DLP 型プロジェクターの構成 (a) と Temporal Phase Shift プロジェクター構成 (b)

図 2 に本研究で用いた、Temporal Phase Shift プロジェクションシステムの機器構成を示す。このシステムは既存のデジタルマイクロミラー (DMD) [4] プロジェクターを改造したものである。従来の DMD 型プロジェクターは、光源・カラーフィルター・マイクロミラー・光学系から構成されている。カラーフィルターは回転する色フィルターであり、光源からの光 (白色光) を周期的な RGB の 3 原色に変換する。DMD は各ピクセルに対応した微小なミラーがアレイ状に並んだものであり、MEMS 技術によって実現されている。各マイクロミラーの鏡面をカラーフィルターの回転と同期して傾斜させると、三原色を自由に混合した光をピクセルごとに発生させることができる。傾斜させる時間を調整することで、輝度や色の混合比を各色における発光時間比 (PWM) として制御できる。照射の点滅周期はカラーフィルターの回転速度によって決まり、通常 120Hz 程度である。RGB 色の最大発光時間は図 3 に示すように 2ms 程度である。

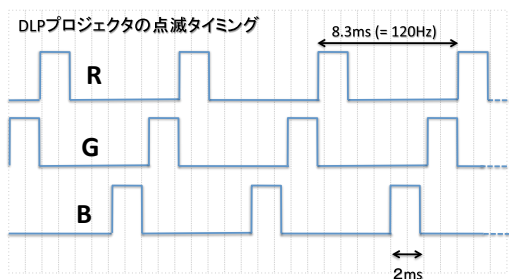


図 3. DLP プロジェクターの発光タイミング (実験に使用した BenQ MP610 の例)。マイクロミラーの変位により、図に示したタイミングで各ピクセルの輝度値が変化する。Temporal Phase Shift ではカラーフィルターを取り外してあるので、照射光はすべて白色になる。

Temporal Phase Shift では、まずカラーフィルターをとりはずし、常に白色光のみを照射するようにした。またカラーフィルターの回転軸から得られていた同期信号の代わりに、外部からクロックを供

給することでピクセルの照射時間を精密に制御できるようにした。外部トリガー信号をカメラの同期信号として使うと、特定の色の照射時のみを撮影するカメラが構成できる。これは、たとえば [8] のような、カメラと同期した発光画像を用いたジェスチャー認識システムの構成要素として用いることができる。

3 時間位相差錯視

このシステムを用いると、以下で説明するような興味深い錯視現象が発生することがわかった。Temporal Phase Shift を利用すると、RGB のピクセルは、点滅周期が同一で輝度の積分値は全く同じ、位相のみ異なる白色光として表示されることになる。通常の画像を表示すれば、単に白黒の映像として表示される。以下では説明の都合上 RGB により投影すると記述するが、実際にはこのような、(色のない) グレイスケールのピクセルとして投影される。

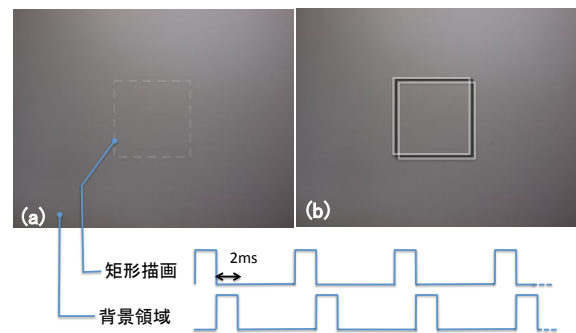


図 4. 時間位相差錯視現象。臨界融合周波数を超える同じ点滅周期 (120Hz) で、背景と図形を描画する。その輝度積分値も同じだが、位相がわずかにずれている。(a) マイクロサッカド非発生時 (低速シャッターカメラ撮像でシミュレーション) では図形を知覚することはできない。(b) マイクロサッカド発生時 (画像編集でシミュレーション) : 図形輪郭が強調されて見える。

ここで、背景を R 色で、図形を G 色で表示したとする。輝度の積分値は同一で、点滅周波数は臨界融合周波数¹を充分に超える 120Hz なので、どちらも同一輝度の白色として知覚され、その差は認知できないはずである (図 4 (a))。しかし実際には、不定な間隔で図形のエッジが際立って見える (図 4 (b))。このように、周波数も輝度も同一であるが位相のみがごくわずか (2ms) ずれた表示の境界が知覚できるのが今回が新たに発見した時間位相差錯視現象である。この現象を図版やビデオで再現することは困難だが、非常に顕著に図形のエッジが際立って見え、視

¹ 臨界融合周波数 (Critical Flicker Frequency; CFF): 光の点滅を分離できずに連続した光として認識しだすときの周波数で、通常は 50Hz 程度。

覚体験として強烈な印象を残す。この現象は、サッケードによってLED残像を作り出すサッケードディスプレイ [10] と関連するが、位相差がある二種類の照射があるときに始めて知覚される点で、発生原理が異なっていると考えられる。

4 時間位相差錯視の原理考察

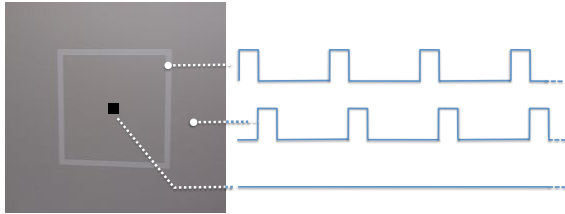


図 5. 眼球運動と時間位相差錯視の関係。中央の黒点（輝度ゼロ）を凝視すると、眼球運動が抑制され、時間位相差錯視が発生しなくなる。

5名の被験者にこの現象を体験してもらった。全員錯視現象を明確に認識した。現象が起きる頻度は毎秒1～数回程度であった。中央の黒点を凝視するとエッジの知覚が抑制された(図5)。知覚できる図形は、単一のエッジではなく、複数の白・黒の線として認識されると感じた被験者が多かった。一方で、位相差なくそれぞれの周波数で単独で図形を提示した場合、錯視現象は発生しなかった。位相差を持つ提示領域の間に黒色のバンドを置いた場合、エッジのちらつきが軽減されることわかった。また、改造を施さない通常のDMDプロジェクターで異なる色で表示した場合には現象は生じなかった。

これらの観測結果から、本錯視現象の発生原因について考察する。まず、現象の発生頻度や黒点凝視の実験結果から、本現象が固視点微動のなかでも特にマイクロサッカードに関連するものであると予測される。マイクロサッカードは眼球の微小かつ直線的な動きであり、網膜の光受容器が視覚イメージ上を移動する。サッカードによる眼球移動中は、光受容器の働きが抑制されることが知られている(跳躍時抑制 [2])。このことから、マイクロサッカード開始前と、終了後で、同じ光受容器に異なる位相の光が当たったときに、本錯視現象が発生するのではないかと予測する(図6)。これについては現在2種類の原因(仮説)を検討している。

第一の仮説は、光受容器そのものが位相の変化を検知しているというものである。位相が異なった同一周波数の光が、同一光受容器に照射された場合の神経出力について考えてみる。入射光と神経出力の間には多くの研究が行われているが、単純には光受容器を高域カットフィルターとしてモデル化できる。これにより、一定以上の明滅周波数を持つ光は、独立した光の強弱ではなく、その直流成分としての輝

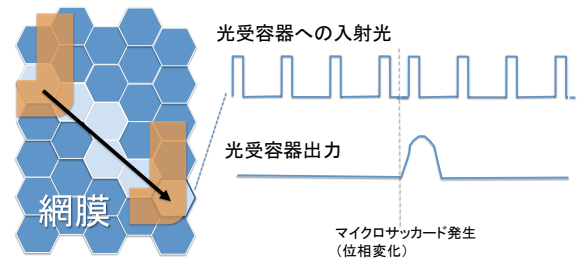


図 6. 時間位相差錯視のモデル化。マイクロサッカードに伴い、光受容器への入射光の位相が変化する。

度として知覚される。

一方、同一周波数だが、位相の異なる光が連続して照射された場合の出力は、図6(右)のようになる。つまり、高域カットフィルターとしてモデル化された光受容器では、臨界融合周波数(CFF)以上の周波数を持つ光の周期的な強弱を認識したり、その周波数を直接感ずることもできないが、位相の変化を認識することができるのではないかと、あるいはサッケード直後の時間分解能が瞬間的に高まっているのではないかと、という仮説である。

第2の仮説は、跳躍時の網膜映像の揺れを補正している機構が、位相の変換により混乱する、というものである。通常マイクロサッカードでは、跳躍前後の網膜上に投影された映像の移動方向を推定し、補正しているのではないかと予想されている。ところが、今回のように、背景と図形で位相がずれていると、跳躍前後で画像が反転し、その結果、跳躍時の映像の移動方向を対応づける機構が混乱し、ちらつきが発生するのではないかと、というモデルである。

以上の考察から、その全容は明らかではないが、本錯視現象が眼球運動(固視微動)のなかでもとくにマイクロサッカードに対応して発生するものであり、その発生原理は視覚情報処理機構と関連しているものと予測される。眼球移動前後で、跳躍した視覚情報がなぜ連続なものとして知覚されるのか(つまり、どうやって網膜像の「ぶれ」が補正されるのか)は、完全には解明されていない視覚系の大きな謎である。本錯視現象のさらなる解析によって、その謎の解明に貢献できると期待している。

5 インタラクティブシステムへの応用

Temporal Phase Shift は、インタラクティブシステムの構成要素としても応用価値がある。位相ずれと同期したカメラで撮影することで、ジェスチャー認識に適用可能であるし [8]、固視微動の発生頻度が測定できれば、利用者の集中度や疲労度を測定する機器としての発展可能性もある。また、固視微動とは直接関係しないが、以下のようなインビジブルバーコードを構成することもできる。

5.1 インビジブルバーコード

一見なにもないような照明に、バーコードやARのマーカー情報のようなパターンを重畳する。点滅位相のみが異なった光でバーコードやマーカーを描画することで、マーカーなどを貼付けることができない場面でも情報を提示することが可能になる。これらのマーカーは、点滅周期より短いシャッター時間で撮影することで通常のカメラでも情報を読み取ることができる。

通常の携帯電話のCMOSセンサーでは高速度撮影はできないが、CMOSセンサーの性質によりエンコードされた情報を読み出すことができる。携帯電話のCMOSセンサーは、全画面を同時に読み出すものではなく、スキャンラインごとに順次に読み出す機構を採用している。その結果、撮像する各スキャンラインごとに時間のずれが生じる。この結果、Temporal Phase Shiftにより投影された情報を撮影すると、図7に示すような縞模様が表れる。この縞模様はピクセルの点滅に対応しているので、時間位相の異なるピクセルは異なった位相の縞模様を発生させる。この縞模様を画像処理することでコード情報を認識することができる。

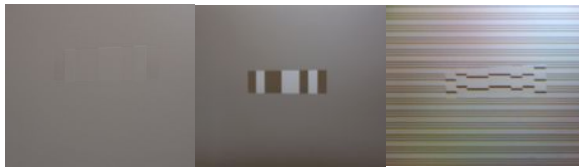


図7. インビジブルバーコードの例 (左:肉眼(低速シャッター画像映像として再現), 中:点滅周期以下の1/200秒で撮像した場合, 右:携帯電話のCMOSカメラで撮像した場合)

関連研究として、可視光通信を応用して各ピクセルに独自の情報を重畳するPVLCプロジェクタがある[5]。PVLCでは読み取りに特別な受信装置が必要であったが、Temporal Phase Shiftでは、携帯電話のCMOSセンサー／カメラでもバーコード情報を読み取ることができる。赤外線プロジェクタの見えないプロジェクション光でマークを表示することも考えられるが、高輝度の赤外線プロジェクタを製作する必要がある。また読み取り側(たとえば携帯電話)のカメラに内蔵されている赤外線カットフィルターを取り外すなどの改造が必要になる。本研究の方法は既存プロジェクタにわずかな改造を施すだけで構成でき、読み取り側のハードウェア構成を変更することなく実現できる。

6 まとめと今後の課題

本論文では時間位相のあるピクセル投影によってマイクロサッカドの認知が可能な新しいプロジェ

クション原理 Temporal Phase Shift について、その原理、人間の視覚情報処理過程との関連について主に述べた。またインタラクティブシステムとしての利用可能性について考察した。

一方、今回の実験に用いたプロジェクションシステムは既存DMDプロジェクタを改造したもので、照射周波数や位相ずれの設定が固定されている。今後は、DMDを精細に制御できる機器構成[9]を利用して、

- 時間位相差錯視が発生する位相差の最小／最大値、また照射周波数との関係
- 位相差が徐々に拡大／縮小するような照射パターンでも時間位相差錯視が発生するか
- 固視微動と同期した位相の変化による影響
- それらの可変パラメータと、被験者の身体情報(疲労度／集中度)等との関連

などを分析し、本錯視現象の原理説明と工学的応用の可能性検討を進めて行きたい。

参考文献

- [1] A. Bharath and M. Petrou. *Next Generation Artificial Vision Systems*. Artech House, 2008.
- [2] D. C. Burr, M. C. Morrone, and J. Ross. Selective suppression of the magnocellular visual pathway during saccadic eye movements. *Nature*, (371):511–513, 1994.
- [3] J. M. Findlay and I. D. Gilchrist. *Active Vision*. Oxford University Press, 2003.
- [4] L. Hornbeck and W. Nelson. Bistable Deformable Mirror Device. *OSA Technical Digest Series Spatial Light Modulators and Applications*, 8:107, 1988.
- [5] S. Kimura, R. Oguchi, H. Tanida, Y. Kakehi, K. Takahashi, and T. Naemura. PVLC Projector: Image Projection with Imperceptible Pixel-Level Metadata. In *ACM SIGGRAPH 2008 Posters*, p. B177, 2008.
- [6] S. Martinez-Conde and S. L. Macknik. Windows on the Mind. *Scientific American*, 297(2):56–63, 2007.
- [7] I. Murakami and P. Cavanagh. A jitter after-effect reveals motion-based stabilization of vision. *Nature*, (395):798–801, 1998.
- [8] J. Rekimoto. BrightShadow: shadow sensing with synchronous illuminations for robust gesture recognition. In *CHI '08 extended abstracts*, pp. 2769–2774. ACM, 2008.
- [9] Texas Instruments. DLP® Discovery™. <http://focus.ti.com/dlpdmd/docs>.
- [10] 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 日章. サッケードを利用した新しい情報提示手法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 6(2):79–87, 2001.
- [11] 北岡 明佳. 北岡 明佳の錯視のページ. <http://www.ritsumeit.ac.jp/~akitaoka/>.