

カラーワゴンホイール効果の動き誘導信号による抑圧 ～視知覚信号処理工学の展開～

吹抜 敬彦

イメトピア研究室

〒189-0012 東京都東村山市萩山町3-28-1-813

fukinuki@m.ieice.org

1. はじめに

筆者はかつて画像信号処理に関して3冊を著した。その都度、「TV等の画像信号には通信理論で解けない不思議がある。それが画像の面白さだ」と書いた¹⁾。その神秘を解き証するのが知覚心理学とっていた。

こういうこともあってか、心理学では多くの不思議な動視知覚現象（動錯視）が研究されてきた^{2,3)}。典型的な例はTVや映画におけるコマ表現 sampled motion である。

1980～90年代、次世代TV（EDTVなど）の開発とともに、時空間3次元信号処理が進展した。これをベースに、近年、筆者の考えは変わった。すなわち、従来の1次元理論に代わる時空間3次元（水平-垂直-時間）領域での通信理論（付録1）によって、その多くの現象が解明できる^{4,5)}ようになった。筆者はそれらを視域運動（可視周波数帯域運動）と仮称することにした⁶⁾。

さらに、同様手法により多くの新現象を導き出した。これらを総称して視知覚信号処理工学を提唱中である⁵⁾。

本稿では、その一環として行った解明、すなわち、周知のワゴンホイール（以下、WWと記す）効果を抑圧する方法^{7,8)}を述べる。

2. 先行関連研究と筆者の解明

心理学を中心に研究されてきた動錯視には各種ある。本稿に関係深いものとして、瞬時の網膜像は同様な縞模様のはずなのに異なった見え方を呈するいくつかの現象が研究されてきた。例えば「運動による色知覚の変調」である。筆者はこれらを時空間周波数領域で解明した⁴⁾。

筆者はこれらの検討から、動錯視を、(i) 単なる物理現象⁹⁾、(ii) (前記の) 視域運動、(iii) 仮現運動、の3種に分類している⁶⁾。

筆者の研究の中心はこの(ii)である。ここでは、「時空間周波数領域における視覚の可視周波数特性（濾波器の通過帯域）を考えれば、これらの多くの現象は当然である」ことを明らかにしてきた^{4,6,10)}。

最も身近な現象はTVや映画におけるコマ表現¹⁰⁻¹²⁾であるが、このほか、動き鮮鋭化¹³⁾、高解像度/低解像度画像の繰返し¹⁴⁾、さらに本稿に関係する縞模様にも多くの現象がある。

縞模様の関連では、筆者は画像に動き誘導信号を付加挿入することを試みた。これにより、追従視によって可視時空間帯周波数域を変更させる。これによって「現れる縞模様/消える縞模様」を見出した¹⁵⁻¹⁷⁾（付録2）。さらにこの考えを発展させ、本稿の「WW効果の抑圧」に到った。

3. WW効果とその抑圧

3.1 概要

WW効果とは、「幌馬車は西に車輪は東に」

2013年冬季大会。

注：大会では図2の動画像のデモを行った。

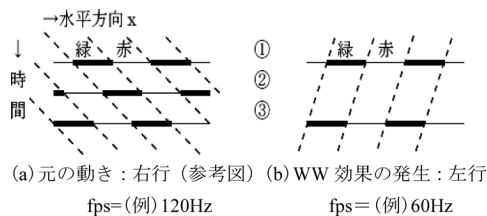


図1 WW効果の発生（時空間領域における説明図）
図(b)のように、例えば偶数フレームを取除くと、WW効果が発生する。

等で周知の現象である。映画やTVのコマ表現のコマ間(1/24あるいは1/60s)に周期パターンが大きく移動すると、これが起きる¹⁸⁾。

筆者は、「WW効果はコマ表現（60Hz標準化）におけるaliasing（折返歪）である」ことに着目した。そして、aliasingを解消することを目的に、視対象に対して追従視を誘導することにより可視周波数帯域を変更させ、これによりWW効果を抑圧して、本来の動きを視覚的に再生する方法を見出した⁷⁾。

なお、汎用の「表示fps (frame/s)=60HzのPC」では、周波数特性の関係で白黒画像の実験に若干の制約がある⁷⁾。一方、空間/時間遮断周波数が輝度より低い色差信号では、より現象が明瞭に観視できると期待される。本稿の実証はこの観点から色縞について行われた⁸⁾。

3.2 時空間領域におけるWW画像

以下、解析の便などを考え、実験は円形（車輪）ではなく、縦縞で行った。

図1には、水平移動する縞パターンを「水平x-時間t」領域で示す。図1(a)の参考図では、十分なフレーム周波数(fps=120Hz)があり、縞パターンは右行する。

図1(b)では、偶数コマ（この図では②）が欠落しておりfps=60Hzとなる。このためフレーム周波数が足りず、WW効果が発生して、縞パターンは左行する。本稿の目標は、現実には図1(b)の画像でありながら、視覚的には図1(a)のように右行させることである。

3.3 画像例

図1(b)に対応する動画像の画像例の1コマを図2に示す。赤と緑の縞パターンは、6画素を1



図2 赤緑縞の画像例（左上部：拡大図）
（印刷の際、モアレが発生する危険性がある）
・水平x: 640画素, 垂直y: 480走査線（画素）
・時間：コマ番号（0～17繰返し）、
・赤緑縞パターン：6画素周期の正弦波。2画素／フレームで左行する。
・デモ観視の際、少なくとも初めは適当に何かで遮って、上半部あるいは下半部のみを観るようにするとよい。

周期とし、中央黒帯を跨いで上下は垂直方向に連続している。2画素／フレームで左行する。fps=60Hzであり、他の諸元は図2下注の通りである。

この動画像の上半部を観視すると、図1(b)に対応しているので、WW効果により左行する。なお、念のため、小さな誘導信号（黒点）を付加した。本質ではなく、なくてもよい。

一方、下半部を見ると、ここでは黒い大きな誘導信号が付加されて4画素／フレームで右行する。視線はこれに誘導されて追従視する結果、WW効果が抑圧されて、あたかも図1(a)のように右行して見える。

4. 時空間周波数領域における解明

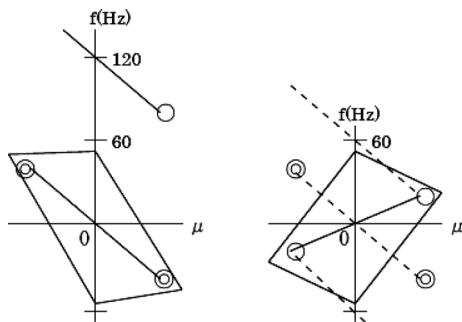
図2の動作を時空間3次元周波数領域で解明する。解析には視覚特性（追従視を含む変形◇特性）と画像の剛体仮定を仮定する。

4.1 時空間周波数スペクトル

まず、赤R、緑Bの各信号を数式的に、

$$R = (R+B)/2 + (R-B)/2 = Y_e + C,$$

$$B = Y_e - C$$



(a) 例 fps=120Hz の場合 (b) fps=60Hz の場合

図3 時空間周波数スペクトル

μ : 水平周波数, f : 時間周波数.

◎: 基底帯域 C 信号成分.

○: 標本化により派生した C 信号成分.

変形◇特性: 追従視を考慮した可視周波数帯域.

と変形する. ここに $Y_e = (R+G)/2$, 黄, (=輝度成分) は, 時間的/空間的に一定値である. C (=色差信号) は時間的/空間的に変化する.

図3(a)には, 図2(a)のfps=120Hzの場合のスペクトルを示す¹⁸⁾. Y_e 信号は上記のように一定であり図3の原点にあるが, 略記する. 図から明らかのように, 右方に移動する縞パターンを正しく観視できることがわかる.

図3(b)は, 図2(b)のfps=60Hzの場合を示す. このように, aliasing が起きており, これにより左行成分となる. すなわち, 標本化によって派生した成分(○印)が原点に近いため, これを基底帯域成分と誤認識している. この結果, 本来の動きとは逆の左方に移動する成分に化けてしまう. これがWW効果である.

4.2 WW効果の抑圧

前述のように, 図1(b)や図3(b)では, WW効果が発生する. この抑圧には, 基底帯域成分と標本化派生成分の関係を正しく認識する必要がある.

動き誘導信号として付加した図2の画像下半部で黒点は, 図4で●と示した周波数成分を持つ. 視線はこれに追従し, 可視周波数領域は図4に示す太い点線のようにになる. これにより基底信号成分の関係は正しく認識されて観視され

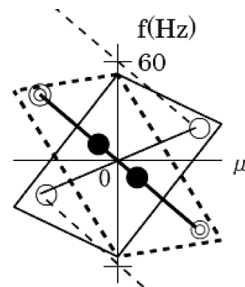


図4 動き誘導信号による可視時空間周波数帯域の変更

●: 動き誘導信号の周波数成分.

太い点線で示す変形◇: 誘導された可視周波数帯域.

る. この結果, 右行する「本来の画像成分」が正しく観視される.

5. むすび

筆者は心理学で動錯視とされた多くの現象を時空間周波数領域で解析してきた. その一環として, 新しい視知覚現象「動き誘導によってワゴンホイール効果を抑圧する」現象を導き出し, 視覚的にも実証した.

今後もこのような事例を一つ一つ増やし, 新しい学術分野としての「視知覚信号処理工学」を固めて行きたい.

文 献

初期の拙稿(*印など)には, 筆者の基本的な考え方が未熟な場合も見られる. 特に「仮現運動」や「コマ送り(コマ表現)」の用語の使い方など.

- 1)* 吹抜敬彦: 画像・メディア工学 (電子情報通信学会レクチャシリーズ), コロナ社, 2002.
- 2) 西田真也: 画像符号化技術を意識した人間の視覚系の研究, ピクチャコーディングシンポジウム日本 特別講演, Nov. 2006.
- 3) 吉村浩一: 運動現象のタキソノミー, ナカニシヤ出版, 2006.
- 4)* 吹抜敬彦: 仮現運動への疑問—時空間信号処理による動画の解明— (講演記録), 基礎心理学研究, **26**, 89-96, 2007.
- 5)* 吹抜敬彦: 視知覚信号処理工学のすすめ~視知覚心理現象を時空間周波数領域で解く~, 電子情報通信学会技術報告(IE+SIP) 2008-8,

- 2008.
- 6) 吹抜敬彦：仮現運動と視域運動～視知覚信号処理工学の礎～，映像情報メディア学会誌，**63**，1467-1469，2009
 - 7) 吹抜敬彦：動き誘導信号によるワゴンホイール効果の抑圧～視知覚信号処理工学の展開～，電子情報通信学会技術報告No. IE2012-04，Apr. 2012.
 - 8) 吹抜敬彦：カラーワゴンホイール効果の動き誘導信号による抑圧～視知覚信号処理工学の展開～，日本視覚学会冬季大会 1o02 2013.
 - 9) 吹抜敬彦：Barber Pole 効果の時空間周波数スペクトルからの考察～視知覚信号処理工学に関連して～，映像情報メディア学会技術報告 HI2012-40，Oct. 2012.
 - 10) 吹抜敬彦：イメージメディアクォリティを科学する～視知覚信号処理工学の教えるもの～，電子情報通信学会イメージ・メディア・クォリティー研究会発足記念講演会，No. 1，2011.
 - 11)* 吹抜敬彦：動画像信号のコマ送りは何故可能なのか，映像情報メディア学会誌，**63**，1470-1472，2009.
 - 12) 吹抜敬彦：映像信号のフレームレイトに関する考察～視知覚信号処理工学の展開～，映像情報メディア学会技術報告No. HI2011-67，Oct. 2011.
 - 13) 吹抜敬彦：動き鮮鋭化や超解像度としての“TFA”運動～視知覚信号処理工学の進展～，映像情報メディア学会年次大会，1-20，2009.
 - 14) 吹抜敬彦：鋭／鈍繰返し画像の解明とフレーム倍速内挿（TFI）等への応用～視知覚信号処理工学の発展～，映像情報メディア学会誌，**63**，549-552，2009.
 - 15) 吹抜敬彦：動きに誘発されて現れる動パターンと消える静パターン～視知覚信号処理工学の礎と実証～，映像情報メディア学会技術報告No. HI2011-55，2011.
 - 16) 吹抜敬彦：動き誘導信号で出現／消失するカラーパターン～視知覚信号処理工学の展開～，映像情報メディア学会年次大会No. 2.1，Aug. 2011.
 - 17) 吹抜敬彦：縞パターンは追従視によってどう見えるか～視知覚信号処理工学の立場と心理学の立場～，映像情報メディア学会技術報告No. HI2012-62，Mar. 2012.
 - 18) 吹抜敬彦：Wagon wheel 効果の時空間標本化による解明，映像情報メディア学会冬季大会，No. 4-4，Dec. 2006.
 - 19) 米村朋子，中溝幸夫：シグマ運動の知覚速度に及ぼすパーシュート眼球運動と刺激要因の効果，*Vision*，**16**，209-221，2004.
 - 20) 吹抜敬彦：シグマ運動の時空間3次元周波数領域における解明～視知覚信号処理工学の展開～，映像情報メディア学会技術報告 HI2013-47，Mar. 2023.

付録1 視知覚信号処理の基盤：時空間3次元信号処理

従来の通信の主対象は，1次元の音声信号であった。これを対象に，通信理論が構築された。一方，動画像は[水平-垂直-時間]の時空間3次元信号である。しかし従来，3次元理論はあまり普及していなかったため，無理に1次元信号に焼き直して考える場合が多かった。しかし，こうすると，うまく説明できなかつたり，矛盾を生じたりすることが多々あった。

1980年頃以後，EDTVなど次世代TVの開発が進み，通信理論，特に時空間周波数領域の信号処理が大いに発展した。これを動錯視の解明に適用することにより，いろいろな不思議が解けてきた。数多くの応用例もある。

なお，縦縞模様や水平移動の場合には，垂直方向は一定なので無視出来る。したがって，[水平-時間]の2次元で考えれば充分である。本稿もこの場合である。

付録2 現れる／消える縞パターン

縞パターンを対象に，多くの解明が行われてきた。筆者が解明を試みた現象には，動きが現れる縞パターンや消える縞パターンなどがある¹⁵⁻¹⁷⁾。これには，動画像信号自体にこのような性質がある場合，動き誘導信号を付加する場合，さらに，複数の画像が合体して同様な性質が観られる場合などがある¹⁷⁾。

本稿の WW 効果の抑圧は、この 2 番目の付加する場合の一例である。WW を起こす成分が消えて、もとの成分が現れる複合的な場合である。

縞パターンが水平と垂直の積になるチェッカ模様に関連したシグマ運動¹⁹⁾もこの一例であり、

時空間周波数領域で解明した²⁰⁾。

なお、縞パターンについて多くの検討を行ったのは、これの周波数スペクトルが単純であるため、時空間周波数領域での解析が容易であるからである。