鋭/鈍繰返し画像の解明とフレーム内挿倍速表示 (TFI) などへの応用

～視知覚信号処理工学の発展～

Repetition of Sharp/Blurred TV Pictures and Its Application to Frame Interpolation (TFI)

-Extension of Signal Processing of Visual Perception-

名誉会員 吹 抜 敬 彦[†]

Takahiko Fukinuki[†]

Abstract If sharp and blurred TV pictures (or sampled motion) are repeated, they look still sharp. This mechanism is made clear by analyzing motion visual perception in the spatio-temporal frequency domain. On the basis of this mechanism, two applications are proposed: enabling pictures to be more efficiently coded, and frame interpolation with blurred pictures in a doubled frame rate display.

キーワード：鋭/鈍画像繰返し，視知覚信号処理，符号化効率，フレーム内挿，TFI

1. ま え が き

筆者は，すでに「コマ送り画像（テレビや映画など）が滑らかに動いて見える理由¹⁾や関連現象²⁾³⁾」や「色と運動の interaction⁴⁾」など，心理学で扱われてきた多くの「視知覚現象」を時空間周波数領域⁶⁾で解明し，「視知覚信号処理工学」を提唱した⁴⁾¹³⁾。

心理学では他にも多くの不思議な現象が知られている。その一つが「鋭/鈍画像の繰返し錯視」である⁵⁾。すなわち，例えば，60P画像（60コマ秒の映画や順次走査画像）において，1コマおきに鋭画像（高解像度画像，30コマ/秒）と鈍画像（低解像度画像，30コマ/秒）を繰返す（これを60/30と記す）と，全体が鋭画像に見える。心理学では，「周辺運動により上昇する見掛けのコントラスト」の一環として「脳の働きとしてシャープさが回復する錯視」との説明がある⁵⁾。

本稿ではまず，この錯視を視知覚信号処理工学の立場から，時空間周波数領域で解明する⁷⁾⁸⁾。その意味では，これを錯視ということには難があると思う。

次に，符号化やディスプレイへの応用を述べる。

前者は，60/30を直接応用するフレーム伝送である。

後者は，120/60などのフレーム内挿倍速表示への応用である。液晶テレビ等の動領域ボヤケの防止やPAL等50Hz系のフリッカ防止などの倍速表示では，従来，完全なフレーム内挿が要求されてきたが，これは容易でない¹¹⁾。そこで上記を発展させて，「鈍画像のフレーム内挿」を提案する⁹⁾。

すなわち，NTSC系では120/60を，PAL系では100/50を適用する。この方法を，「低解像度ながら全体として精細な内挿」の意味から本論文ではTFI (Totally Fine Interpolation) 法と仮称する。

2. 鋭/鈍繰返し画像の解明

前記の錯視を時空間周波数領域で解析する⁷⁾⁸⁾。ここでは，まず，60 (50) フレーム秒の順次走査信号（あるいは順次走査化された信号），すなわち，60P信号（50P信号）を想定する。上記条件を60P信号に適應すると，各成分の時間標本化周波数は次のようになる。

鈍画像成分：60Hz

鋭画像成分：30Hz

[水平周波数 μ - 垂直周波数 ν - 時間周波数 f] の時空間周波数スペクトルを， $\nu = 0$ で切った断面の $[\mu - f]$ で図1に示す。これから明らかなように，視覚の通過帯域¹⁾である図の◇内（付録参照）で見れば，鈍画像の最高空間周波数を適当に選ぶことにより，30Hz成分は減衰して帯域外であり，目には見えない。その結果，「すべてが60Hz高解像度画像（鋭画像）の場合」と等価になる。このように，上記の錯視が時空間周波数領域で説明できる。

なお，空間高域成分は1/2の時間間引きになるので，復調すると振幅が1/2に減衰する。このため，解像度は変わらないが鮮鋭感は低下する。したがって，振幅補償（×2の空間高域強調）が望ましい。

以上のように，適切な帯域制限と振幅補正による鋭鈍画像繰返しの視覚効果を時空間周波数領域で解明した。視覚特性が絡む鈍画像の帯域制限については，視覚評価が必要である。なお，後述（3.3節）のように，ディスプレイの非線形特性が絡む場合もある。

2007年9月14日，電子情報通信学会ソサイエティ大会，
2007年10月30日，ピクチャコーディングシンポジウム2007，
2008年3月20日，電子情報通信学会総合大会で発表。
2008年6月18日受付，2009年2月2日最終受付，2009年2月10日採録
[†] イメトピア研究室

(〒185-0003 国分寺市戸倉1-12-8, TEL 042-324-2207)

[†] Imetopia Institute

(1-12-8 Tokura, Kokubunji, Tokyo 185-0003, Japan)

図1 鋭/鈍画像のスペクトルと伝送周波数特性

*◇の横軸 μ の限界は空間解像度限界周波数

Spectrum of sharp/blurred pictures and transmission characteristics.

3. シミュレーションによる追実験

心理学の世界ではよく知られた現象⁵⁾であるが、問題点を探るため静止画像と動画で追実験を行った^{7) 8)}。実験では鈍画像の空間周波数帯域幅はいろいろ試みた。最も厳しい場合は、水平 μ 、垂直 ν とともに1/4に制限した。

3.1 静止画像：

図2に示す鋭/鈍2種の画像を作り、60Pで交互に表示した。表示に際して、前記の振幅補償 ($\times 2$) を行った。使用するディスプレイにもよるが、図2の画像では、上記の最も厳しい場合にも鋭画像が確認された。

3.2 動画像

対象が平行移動し視覚系がその動きを追従できる範囲では、時空間スペクトルは図3のように傾斜する^{1) ~ 3)}。60P画像 (映情学会標準) 1秒分を用いて、上記同様に実験し、同様の結果を確認した。

3.3 画質と実験から得られた問題点

上記の追実験は、筆者自身の確認のほか講演^{7) 8)}などで多くの方に確認して頂いた。

この際、ディスプレイによってはこれに絡む画質の問題点があった。周知のように、この輝度特性に強い非線形性 (特にガンマ特性など) があると、鋭画像の空間周波数高域成分の存在する領域で直流レベルが微量変化する。60/30系の場合、ディスプレイによっては30Hz成分が微量発生するので、これがフリッカとして感じられることがある。

ディスプレイの高度な特殊な機能*¹⁾がマイナスに効くこともある。その他の課題を5.4節 (2) に述べる。

4. 伝送や符号化効率向上などへの応用

符号化方式の基本技術は飽和したとの見方が強い⁶⁾。現在の模索は、高度な数学への期待、あるいは複雑な手法の組合せ、等にあるようである。しかし、本稿の視覚特性は効率向上に有効に活用できる。ただし、表示系と画質に関しては、前記3.3節と同様である。

*1 ある学会講演で用いた液晶プロジェクトに、「フレーム間に大きな差があると、動きを滑らかにする機能」があり、これによるチラチラが見られた。

図2 静止画像 (映情学会標準画像) と拡大図
Still picture used for simulation (ITE).

図3 動く鋭/鈍画像のスペクトル

Spectrum of moving sharp/blurred pictures and transmission characteristics

図4 動画像の1 frame
One frame of a moving picture.

(1) 走査における解像度

60Pの場合、一つおきのframeは低解像度でよい。
60Iの場合、一方のfieldは少なくとも水平低解像度で良い。垂直方向の低解像度化の可能性は未検討である。

(2) motion JPEGやJPEG2000 (motion) での応用

上記60Iや60Pと同様、高/低解像度を繰返せばよい。

(3) 60Pを対象とするMPEGにおける現象と応用

I, P, Bの各符号化モードで解像度が異なるとフリッカになることが知られている。モード周期が (例) $MN=12$ の時 5Hzや20Hzとなるためであろう。一方、本稿の結果を利用すれば (例) 「 $M=4$ の時、B画像の前後2枚」や「 $M=2$ のB画像」は低解像度に抑えることにより効率化が期待できる。

(4) 60Iを対象とするMPEG

現在は水平垂直等方のDCTが主流であるが、上記と同様、水平解像度を低下を前提とした処理が可能である。

図5 低解像度画像内挿におけるスペクトル
Spectrum of interpolated pictures with blurred pictures.

5. フレーム内挿倍速駆動表示への応用

これには二つの場合がある(双方に関係することもある)。一つは、液晶テレビのようなホールド型表示における動領域でのボヤケ抑圧である。このため、例えば、60P信号に対してフレーム内挿倍速120Hz駆動が広く行われている。すなわち、受信した信号の前後のフレームから動きを探索して新しいフレームを生成して、フレーム周波数を倍増させる^{*2}。

他の一つは50Hz系(PAL等)表示におけるフリッカ防止である。この場合には、フレーム内挿倍速100Hz駆動が望まれる。60Hz系でも明るい領域で観察されることもあると言われる。

ただし、まえがきで述べたように、いずれの場合も、内挿フレームを作るための動きベクトル探索は、動き補償フレーム間符号化の場合と異なって難しく¹¹⁾、特に剛体仮定が成立しない場合や周期的なパタンが反復する画像で、困難な問題が発生する。

5.1 低解像度画像の内挿

前記の鋭/鈍画像における60/30の関係を100/50(あるいは120/60)に置換すれば、フレーム内挿に应用できる。すなわち、内挿するのは低解像度画像で良い⁹⁾。このとき、時間周波数は、

低解像度成分：100(あるいは120) Hz

高解像度成分：50(あるいは60) Hz

となる。これを図1と同様に図5に示す。これから判るように、フリッカの原因になる低解像度50(60) Hz成分は穴が空いたように消失して視覚の通過帯域外となり、フリッカは観察されず、かつ高解像度画像を100(120) Hz表示したのと等価になる。内挿する画像が低解像度内挿で良ければ、動きベクトル探索の要求精度は緩和される。

5.2 さらに発展：動き補償不要なフレーム内挿

さらに、動き補償内挿をせずに、「前後のフレームの平均の空間低域成分のみ」とすることが考えられる⁹⁾。

図6 表示におけるインパルス応答
Spatio-temporal impulse responses in display.

ここで、比較のため、表示を「フレームという時間標本の復調」と考え、時間方向インパルス応答を図6に示す。100%ホールド(図6(a))を基準に考える。50%ホールド(図6(b))で等しい輝度とするには、表示の輝度を2倍にする必要がある。動き補償フレーム内挿100(120) Hz駆動(図6(c))では、内挿フレームを点線で示した。本節で提唱する平均低域挿入法では、空間低域と高域の応答は「平均値である」ことから図6(d)のようになる。

なお、筆者には原理説明の妥当性が理解できていないが、本方法と関係深い方法がある¹⁰⁾。これは、鈍成分の「内挿」ではなく、「外挿」とするものである。この場合、鋭と鈍の画像成分の間に時間差が生じるという問題がある。

5.3 画質に関する考察

(1) 画質実験

設備の関係で、5.1節および5.2節の実験は行っていない。しかし、この場合より遙かに視覚的に難しい60/30の場合については、多くの実験⁵⁾が行われており、筆者も3.3節に述べたように確認した。このことと、さらに下記(2)から判るように、120/60(あるいは100/50)の場合は問題もないと考える。帯域制限も、60/30では1/2(あるいは1/4)程度が限度であるが、120/60等では図5から判るように大幅な帯域制限が許される。

(2) ディスプレイの輝度の非線形性とフリッカ

すでに3.3節で述べたように、ディスプレイに大きな非線形性があると、フリッカが感じられることがある。しかし、120/60系(あるいは100/50)の場合には、その成分は60(50) Hzであり、臨界フリッカ周波数以上(近く)なので見え難く、実用上問題にならない。60/30系とは異なり、極めて有利な点である。

(3) 2重像

通常、連続する2フレームの平均からなる画像を挿入すると、ズレに依る2重像が問題となるが、第5.2節の2フレーム平均の場合には、低域成分のみなので目立たない。

5.4 設計/検討事項

下記は、今後、シミュレーション等によりパラメータの最適化を行うことが望ましい。

(1) 高域/低域の遮断空間周波数

100/50(あるいは120/60)の場合、遮断空間周波数は全帯域幅に比べてかなり低く(例：<1/20)できようが、低くし過ぎれば、鋭成分電力が大きくなり、次項の上下限の可能性が増す。一方、高過ぎれば、動領域での劣化が危惧され

*2 1/120secホールド表示の場合、毎秒60フレームでも120フレームでも解像度に差はないことがよく知られている。代って、120Hz駆動の主目的は明るさ増強である。

よう。なお、図1の実験ではシャープな遮断にしたが、図5のフレーム内挿の場合は、高/低の境界が目立たないように緩やかな方がよい。

(2) クリップの影響

振幅の上下限 (255/255, 0/255) を超えれば通常クリップされる。鈍画像の周波数制限を厳しく(狭く)すれば、高域強調する成分が大きくなり、クリップされる頻度が多くなる。これが鮮鋭度に影響する危険性はある。

6. む す び

本稿では、心理学の分野でよく知られた「鋭鈍繰返し画像錯視」は時空間周波数領域で解析できることを示した(したがって「錯視」ではない)。そして、この「鋭/鈍繰返し」を符号化など広義の伝送方式の効率化やフレーム内挿倍速表示に広く応用することを提案した。

その中でも、表示系の輝度の非線形性があまり問題にならない「フレーム内挿倍速表示」を液晶テレビやPAL系受像機に適用することが期待される。特に「動き補償しないフレーム内挿倍速表示」を適用すれば、動きベクトル探索は不要になるため回路は著しく簡単化され、高速回路も不要になって、低電力化に役立つ。また、画質向上に有効であろう。

提唱中の「視知覚信号処理工学」¹³⁾は、新研究分野として興味深い、さらに、単なる科学的興味から出発して工業製品への応用へと発展した。感無量である。

〔文 献〕

- 1) 吹抜敬彦ほか：“テレビ撮像系や表示系におけるシャッタ機能の時間標準化からの考察”，映情学誌，59，12，pp.1841-1846 (Dec. 2005)
- 2) 吹抜敬彦：“FPD時代の「感性のテクノロジー」～ダイナミズムから生れる映像表現～”，信学技報/映情技報EID2006-14（合同）(Oct. 2006)
- 3) 吹抜敬彦：“仮現運動への疑問～時空間信号処理による動画像の解明～[講演論文]”，日本基礎心理学誌，26，1，pp.89-96 (Sep. 2007)
- 4) 吹抜敬彦：“動視知覚現象の時空間信号処理による解明～動視知覚信号処理工学の提唱～”，A4-34，信学総大（Mar. 2007）
- 5) T. Takeuchi et al. "Sharpening Image Motion Based on the Spatio-temporal Characteristics", SPIE-IS&T, 5666, pp.83-88 (2005)
- 6) 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
- 7) 吹抜敬彦：“高/低解像度繰返し画像の時空間信号処理による解明”，映情学年大，A4-48 (Sep. 2007)
- 8) 吹抜敬彦：“鋭/鈍繰返し画像の時空間信号処理による解明”，PCSJ 2007, P3-03 (Oct. 2007)
- 9) 吹抜敬彦：“低解像度内挿によるフレーム倍速TFI法～視知覚信号処理工学の展開～”，信学総大CS-8-5 (Mar. 2008)
- 10) H-F Chen, et al. "Smooth Frame Insertion Method for Motion-Blur Reduction in LCD", 2005 EuroDisplay P-44
- 11) 例えば、伊藤剛ほか：“フレーム変換表示技術”，信学総大DS3-9 (Mar. 2008)
- 12) 例えば、樋渡潤二：“伝送系末端器としての視覚特性（図6（d））”，テレビ誌，23，10，pp.755-764 (Oct. 1969)
- 13) 吹抜敬彦：“視知覚信号処理工学のすすめ～視知覚心理現象の時空間周波数領域で解く～[招待講演]”，信学技報，SIP2008-8&IE2008-8 (Apr. 2008)

<付録> □型視覚特性と◇型視覚特性

これまでも度々述べてきたが^{1)~4) 7)~9)}，視覚系の時空間通過周波数帯域について触れておく。これを、図1のように、横軸：空間解像度，例えば，水平解像度 μ （正負の周波数），縦軸：時間解像度 f （正負の周波数）で考える。

網膜における錐体の密度や水晶体の光学的特性などから視覚系の空間解像度には限界がある。横軸 μ の最大値はこれで決まる。これは、最適視距離から観視する場合の表示系の解像度にも近い。さらに、視覚系における光電変換の周波数限界もあって、これが縦軸方向の限界を決める。この単位としては、単位視角（例えば1°）当たりの解像度や、テレビの伝送周波数帯域幅（MHz）や走査線数（TV本/2）で表現される場合もある。これらの最大値が作る4辺から、□特性が納得される。

現実の視覚系では、画面が時間的に変化すると識別できる空間解像度が変化する¹²⁾ことがよく知られている。時間周波数が段々と上がってある周波数（臨界フリッカ周波数）に達すると、識別できる空間解像度は極端に低下し、大面積パタンの時間的変化のみが感じられる（大面積フリッカ）。また、動いている物に対しては解像度が下がるという動体視力も知られている。すなわち、縦軸が高くなると横軸の範囲が小さくなる。これを模型的に示すと図1および図5に示す◇特性になる。

厳密にはこのように単調ではないが、1次近似としてこれを想定した。因みに、視覚系は、静止画像の場合、中間の空間周波数で敏感であり、極端に言えば帯域通過特性を示す。しかし、時間周波数が高くなるにつれてその空間周波数は低域に移行しかつ低域濾波特性になる¹²⁾。上記の臨界フリッカ周波数はその極限である。

視知覚信号処理工学で扱う多くの視知覚現象では、□特性でも◇特性でもほぼ同様に解明できるが、本稿の「錯視」の場合は◇特性が重要な意味を持つ¹³⁾。

なお、視覚通過帯域の[水平周波数 μ - 垂直周波数 ν]空間特性は、視覚特性が等方的な場合は円形○になるが、現実には斜め方向の特性が劣ることからダイヤモンド型◇に近いと言われている⁶⁾。以上を纏めて、時空間周波数特性はこの空間特性◇型を底面とする角錐（時間周波数 f の正負を考えると、対称の角錐も加わり、8面体）を考える。

吹抜 敬彦 1959年、京都大学電子工学科卒業。1961年、同大学修士課程修了。1961年～1995年、日立製作所中央研究所。技師長を最後に、1995年～2006年、私大工学部教授。現在、同名誉教授、画像信号処理技術コンサルタント（イメトピア研究室，fukinuki@m.iejce.org）。1968年より、画像信号処理（高能率符号化，高精細化，視知覚信号処理工学，テレビ方式）の研究に従事。本会功績賞，業績賞，著述賞，論文賞，信学会業績賞，著述賞，科技厅長官功労賞，東京都功労賞，発明協会特賞などを受賞。IEEE Life Fellow，信学会フェロー，工学博士，名誉会員。