テレビ信号の見え方の説明に仮現運動は要るか

Is Apparent Motion Necessary to Explain TV Signals?

名誉会員 吹 拔 敬 彦[†]

Takahiko Fukinuki[†]

Abstract The so-called apparent motion for sampled motion in TV signals can be clearly analyzed as real motion, using the theory of spatio-temporal sampling. The reason is examined why the "apparent motion" was introduced to explain the phenomenon that the sampled motion looks like a smooth one.

キーワード：仮現運動，実験心理学，コマ送り動画像，時空間標本化，視覚系， β 運動

1. ま え が き

映画やテレビなどのコマ送り動画像 (Sampled Motion : 断続画像^{*1}) において像が滑らかに動く理由が，いわゆる仮現運動¹⁾によって説明されている^{*2}。多くの教科書²⁾でもこれが定説になっている。ただし，テレビの画質の根幹に深く絡むにも関わらず，神秘的現象として片付けている。

その存在は，実験心理学を中心に19世紀前半から信じられている。Wertheimerは適切なタイミングで継時的に提示すると現れる仮現運動を β 運動と命名した(1912年)¹⁾。筆者は半世紀以上昔，大学一般教養の心理学でこのデモを見た。二つのランプを切替えると，その間を光が移動するように見えた。

実験心理学では，このような現象に言及した後，「仮現運動の応用例は映画やテレビである」と説明する¹⁾。

筆者はコマ送り動画像における「仮現運動」の存在に否定的である。それは，時空間標本化(厳密には「時空間信号の

時間標本化」)で綺麗に説明できるからである³⁾。さらにこの考え方を発展させ，液晶テレビ(LCD)の動領域のボヤケ等の諸事項を解明できた^{4)~6) 10)~12)}。因みに，自然科学では，このようにして原理を証明することが多い。

現在，このボヤケが家電業界の問題になっている。「感性のテクノロジー」と題して，暗闇(0レベル)を重要視する考え方¹³⁾もあるが，テレビ信号の生命の一つは動きのキレである。テレビにおける滑らかな動きが，脳の神秘さに絡むのか，あるいは，単に視覚系の物理的な要因に依るのかは，根元的な問題である。

本稿では，上記の考え方を振り返り，何故「仮現運動」の考えが生れたかを推察する。なお， β 運動にも触れる。

2. コマ送り動画像の時空間標本化からの解明

本章では，まず多次元標本化を適用する基本を述べ，解明された多くの現象例を述べる。ただし，すでに度々述べた^{3)~6) 10)~12)}ので簡単に触れ，要約を付録に述べる。

2.1 時空間標本化による解析(要約)

原理説明によく用いられるのは，図1に示す「水平方向に速度 v で動く垂直輝線 $\delta(x-vt)$ 画像信号」である³⁾。

これを60Hzで撮像(すなわち，時間標本化)すれば，もと

図1 2次元画像における垂直輝線の水平移動
Horizontal movement of a vertical line in 2-dimensional image.

*1 「テレビ映像のように空間的に走査する場合と，映画のように静止画のコマ送りの場合で異なると思われるので説明を要する」という意見(採録の条件)があるが，この点の考慮の必要はないと考える。まず，1コマで見れば，どちらも静止画である。因みに，テレビの場合の撮像でも，電子管の場合の1コマ1/60秒に対して，近年のCCDではそのさらに1/10程度以下で取込む場合もあり，映画の1コマと変るところはない。また，これら各種の信号を同様に扱えることから，納得される。なお，通常，映画ではコマ数が少ないため，フリッカ抑圧のために1コマを繰返して表示するが，テレビでも30Pを60Pにして表示する場合と同様である。何れにしても，「空間的な走査」と「静止画のコマ送り」を区別しなくても良いと考える。

*2 Sampled Motionは，断続画像と訳すことが多いようであるが，「時間標本化された動画像信号系列」の感じが出ないため，本論文では「コマ送り動画像」と称する。

2006年8月25日受付，2006年10月16日再受付，2006年11月1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)

の信号（基底帯域信号）の他に標本化周波数の整数倍の所に新しい成分が発生する。周知の標本化定理²⁾に依れば、これを後置補間濾波器に通せば、もとの信号が得られる。

テレビ走査系ではこの濾波器は積極的には置いていない。代って、視覚系（目）が濾波器として機能し、もとの滑らかな画像信号が知覚される。このように、“仮現運動”ではなく、時空間標本化で説明できる。

2.2 時空間標本化で説明できた諸現象と画質

上記の解析を発展させ、下記の諸現象を説明した。

(1) “仮現運動”の成立条件^{4) 5)}

時空間標本化が成立する条件は、標本化によって派生した成分が前記の後置濾波器の通過帯域に入らないことから説明できる。逆に、成立しない条件がエイリアシング（派生成分がこの通過帯域に入る）として説明される。

(2) 撮像系シャッタ効果と画質改善^{4) 5)}

標本値が点から運動方向に幅 $v\tau$ （ τ ：時間開口率）の矩形波形になる。これが前記の $\delta(x-vt)$ の単位インパルス応答である。これにより、動画像の解像度が時空間標本化の変調側のアパーチャ効果としてボヤケになる。

(3) ホールド型表示系における動領域のボヤケ^{5) ~7)}

ホールド率 η が高い液晶テレビなどの動領域のボヤケも、時空間標本化の復調側のアパーチャ効果として説明できる。すなわち、上記の標本値系列が時間方向に η に拡がり、これが運動方向に幅 $v\eta$ の矩形波形に拡がる。これが動領域のボヤケになる。因みに、現在では「追従視+積分」^{8) 9)}で理解される場合が多いようである。

(4) 開口率とホールド率による総合インパルス応答⁵⁾

撮像系開口率と表示系ホールド率による総合インパルス応答は、上記二つのインパルス応答の畳込みConvolutionにより求められる。結果は台形波形になる。

(5) 表示系のホールド率の開口率による測定^{10) 11)}

表示系ホールド率 η を撮像系開口率 τ によって等価的に測定する方法（TF（Twin Frames）法）を説明した。

3. 何故「仮現運動」の考え方が生れたのか

前章で述べたように、従来、脳の神秘的な現象と考えられてきた現象が標本化定理で説明された。

一方、CD音楽や電話PCM音も標本化された音声信号であるが、「仮現音」とは言わない。これは何故なのか。以下、音と対比させながら考察する¹²⁾。

3.1 歴史的要因

音の場合、1949年（異説あり）に標本化定理が確立された後に、60年代から実用化が始った。

一方、動画像の場合、ストロボ効果や映画は19世紀に始ったが、多次元標本化の理論は1世紀を経て1960年頃に生れた。しかも、当初は「水平-垂直」領域の2次元が主対象であり、「空間-時間」領域に拡大発展したのは80年代あるいは90年代以後である（3.4で補足する）。このように、基本原理の解明と実用化の順序が逆になった。

実験心理学では	断続画像	仮現運動
本稿の考え方	断続画像	実際運動

(c) コマ送り画像の場合

* 音響系や表示系の特性も、後置濾波器の特性に加味される。

図2 音と動画像における標本化
Sampling of audio and that of moving image.
(c) の表にある二つの「考え方」は、3.3で述べる。

したがって、この不思議な現象を説明するのに、「仮現運動」という「神秘的な理由付け」をせざるを得なかったのではないだろうか。

3.2 構成上の問題

音の場合、図2(a)に示すように、標本化定理にしたがって、厳密に「前置濾波器→標本化→後置補間濾波器」という経路を辿る。すなわち、電気回路からなる後置低域濾波器(LPF)で復調され、耳に入り、脳に伝えられる。

もっとも、原理的には、極端に標本化周波数を高くすれば、図2(b)のように、後置濾波器の機能の一部または大部分は聴覚系で代行できる²⁾。

これに対して、時間（垂直）の標本化である画像のコマ送りでは、図2(c)のように前置濾波器や後置濾波器は通常は置かない。僅かに機器の不完全さがこの機能に関係する程度である²⁾。

すなわち、走査の重要チェーンとして視覚系が入っており、その時空間解像度限界が補間濾波機能を行う。これが通常の音の場合（図2(a)）との基本的な違いである。前置濾波については3.4で補足する。

3.3 「知覚」と「実際運動」

実験心理学¹⁾によれば「実際運動とは、ヒトの知覚（意識内容や脳内処理）に関係なく、物理次元での運動刺激をいう。一方、仮現運動はヒトの知覚の問題である」と言う。このように「脳の高度の働きでコマ送り画像を実際画像に再現する」と考え、この過程を仮現運動と名付けた。

一方、本稿では、図2(c)のように視覚系と脳を明確に区別し、「（表示系と）視覚系からなる後置補間濾波器で復調して、実際画像を得る」と考えることができる。脳はこれを素直に受取る。仮現運動を考える余地はない。

3.4 時空間領域における標本化の特異性

空間（水平-垂直）における2次元信号処理は、時空間（空間-時間）のそれに容易に展開できると考え勝ちであるが、

かなりの違いがある。一番大きいのは、対象とする信号の周波数スペクトルである^{2) 14)}。

空間信号は2次元マルコフ過程で近似できるのに対し、時空間信号では「剛体仮定」(動物体は固まりとして動くこと)が近似的に成立つ²⁾。これが標本化定理の適用に大きな影響を与える。

通常の標本化では、前置濾波を行って標本化定理を満足させる。テレビ信号における時間標本化では、この機能は僅かに光電変換の蓄積機能(アパーチャ効果)が担う²⁾。しかし、これは極めて不完全である。

例えば、60Hzの時間標本化周波数(フィールド周波数)に対し、その1/2の30Hzでの利得は0.64である。画質向上のためシャッタ機能を働かせれば、これが一層不完全になる⁵⁾。因みに、フリッカから判るように、視覚系は50Hz程度までは解像度(通過帯域)がある。

しかし、剛体仮定があるため、もとの信号(基底帯域信号)のスペクトルは、付・図1に示すように輝線スペクトル(δ 関数)となる。このため、前置濾波を行わないのに、標本化定理のエイリアシングが発生し難い。すなわち、60Hzの時間標本化でも大きな問題にならない。

このようなことが認識され始めたのは1990年代以降である。この遅れが「仮現運動」という“逃場”を生み出したのではないか。

4. β 運動における仮現運動の解明

テレビ画像との直接の関係は薄いが“仮現運動”には、 β 運動など過渡的な変化に対する現象がある。

β 運動で仮現運動最適時相となる条件(刺激間距離、休止期間)をコマ送り動画像に適用すると、いろいろ矛盾がある¹³⁾。この説明として「動きを追従して見ているが、毎秒コマ数が十分に密なので、実際と同じ動きのように見える」ということが挙げられている¹³⁾。

この説明には「追従視が前提であり、これがなければ β 運動の同時時相となって何枚かのコマが重なって見える」という補足が付いている¹³⁾。これでは、複数個の動きがあって追従視が成立しないときには説明できない。このように、 β 運動からコマ送り動画像を説明するには、矛盾がある。これらにおける仮現運動と、コマ送り画像における動画像再生は別のメカニズムによるのであろうか。

因みに、付・図2にこれに関連して、視覚系の時空間濾波特性を仮定して行ったシミュレーション結果を示すが、必ずしもこれでエレガントに解決されたわけではない。

5. 画質との関連

暗闇(信号レベル0)の重要性¹³⁾を謳う向きもある。走査線数で訴求することもある。しかし、これらに代って、「テレビの本質たる動きのキレの重要性」を訴えたい。

すでに動領域のボヤケに関して、撮像系の時間開口率 τ

と表示系ホールド率 η は同様に作用することを明らかにした。しかし、現在、ボヤケのみが問題視されている。これは、撮像系 $\tau=1.0$ は当然とされるのに対し、表示系では歴史的に、

$$\eta = 0.0 \text{ (CRT)} \rightarrow 1.0 \text{ (LCD)}$$

と推移したためであろう。不可解かつ面白い。

CCDでは開口率 τ が比較的自由に選べる。この「CCDとLCD(またはFPD)の時代」には、画像も、時空間標本化を軸に、撮像系と表示系を併せて議論すべきである。

6. む す び

テレビ画像は、コマ送りされた動画像が滑らかに見えることから出発する。本稿では、視覚系を「コマ送り動画像という時空間標本化における後置補間濾波器」と考え、実際画像が得られることを述べた。これらを踏まえ、何故過去に仮現運動の考え方を導入したのかを推察した。

なお、過渡的現象(β 運動)を考察し、シミュレーションも行った。両者は仮現運動として一括されているが、共通原因に基づくのだろうか。明快な解明は今後の課題である。

本稿が、実験心理学や画質の検討に新たな視点を提供できれば幸いである。

〔文 献〕

- 1) 吉村浩一: “運動現象のタキソノミー ～心理学は‘動き’をどうとらえてきたか～”, ナカニシヤ出版 (2006)
- 2) 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 (Oct. 2002)
- 3) A.B. Watson, et. al: "Window of Visibility: A Psychophysical Theory of Fidelity in Time Sampled Motion Displays", J. Opt. Soc. Am. A 3, 3, pp.300-307 (Mar. 1986)
- 4) 吹抜敬彦, 北村彰規: “‘仮現運動’の時空間標本化からの考察～シャッタ付きカメラの画質など～”, 2005年映情学年大, 21-1 (Aug. 2005)
- 5) 吹抜敬彦, 北村彰規: “テレビ撮像系や表示系におけるシャッタ機能の時空間標本化からの考察”, 映情学誌, 59, 12, pp.1841-1846 (Dec. 2005)
- 6) 吹抜敬彦: “画像表示におけるホールドによるボヤケー時空間標本化からの考察”, 2005年映情学冬大, 2-4 (Dec. 2005)
- 7) M.A. Klompenhouwer, L.J. Velthoven: "LCD Motion Blur Reduction with Motion Compensated Inverse Filtering", 2004SID, 48.1, pp.1340-1343 (2004)
- 8) T. Kurita, A. Saito: "A Characteristic of the Temporal Integrator in the Eye Tracing Integration Model of the Visual System on the Perception of Displayed Moving Images", Proc. IDW, pp.1279-1282 (2002)
- 9) 大塚電子, http://www.photal.co.jp/product/mpirt_1.html
- 10) 吹抜敬彦: “時空間標本化の考えに基づく表示系ボヤケ特性測定の提案～表示系ホールド率と撮像系等価開口率～”, 信学総大, CS-8-3 (Mar. 2006)
- 11) 吹抜敬彦: “表示系ボヤケ特性(‘TF法’)の時空間標本化からの考察～表示系ホールド率と撮像系等価開口率～”, 映情学誌, 60, 9, pp.1435-1438 (Sep. 2006)
- 12) 吹抜敬彦: “仮現運動は実在するのか～液晶TV動画像改善のための撮像系と表示系の解明～”, 映情学年大, 2-5 (Aug. 2006)
- 13) 宮原 誠: “感性のテクノロジー～暗闇から生れる映像表現～”, アスキー, (2005)
- 14) 鈴木教彦, 吹抜敬彦: “動きに関する二つの基本定理の等価性”, 信学論, J70D, 9, pp.1828-1829 (Sep. 1987)

付図1 水平移動 $[x, t]$ と時空間スペクトル

Horizontal movement $[x, t]$ and its spatio-temporal spectrum.

水平 x の単位：画素間隔

時間 t の単位：フィールド (1/60s)

速度 v の単位：単位時間 (フィールド) 当りの移動画素数

A：基底帯域のスペクトル

BとC：標準化することによって生じたスペクトル

◇：(理想化された) 視覚的な「時間-水平」通過帯域

変形◇(太線)：追従視を考慮した視覚的な「時間-水平」通過帯域

限界は、水平：0.5 (標準化定理から)

垂直：大面積フリッカから決まる値 (50Hz/60Hz)

<付録1> 仮現運動の時空間標準化による解析^{(3)~(6) 10)~12)}

図1 (水平 x -垂直 y) や付図1 (a) (水平 x -時間 t) に示すように動く垂直輝線 $\delta(x-vt)$ を考える。これ、60Hz、かつ時間開口率 $\tau=0.0$ で撮像 (すなわち、時間標準化) すれば、付図1 (c) のように点からなる信号系列となる。

付図1 (a) を2次元フーリエ変換して周波数スペクトルを求め、[水平周波数 μ - 時間周波数 f] 領域で付図1 (b) に示す¹⁾。また、点系列 (付図1 (c)) のスペクトルを付図1 (d) に示す。走査により付図1 (b) に対応する基底成分Aのほか、標準化によって成分B, Cが発生する。これらの意味や、時間軸や位置軸の正規化は付図1に示す^{4) 5)}。

主として視覚系からなる時空間濾波器 (付図1 (d) の◇^{4) 5)}、

付図2 2点A, Bの切替え時の見え方

How to look like when two light points, A and B, are switched.

(a)：光点がA→Bと切替る (距離=9画素) と、(b) のように連続して見える。残像の存在を仮定した。視覚特性を考慮して振幅値を対数値に変換して表示した。

または追従視を想定した通過帯域である変形◇^{10) 11)} を経て観視すると、BとCの成分は知覚されず、基底成分Aのみが知覚される。すなわち、付図1 (c) の点系列はほぼ元の図形 (付図1 (a)) に復調され、滑らかに動く。このように、“仮現運動”ではなく時空間標準化で説明できる。

<付録2> β 運動における仮現運動のシミュレーション

本稿では、上記の β 運動をシーンチェンジと捉え、「大きな変化ある場合は視覚解像度が大幅に低下する」ことを想定して、シミュレーションを行う。具体的な考えられる特性には下記があろう。

- (1) 十文字型³⁾時空間低域濾波器 (時間:直線位相)
- (2) 十文字型時空間低域濾波器 (非直線位相)
- (3) シーンチェンジで視覚解像度が大幅に低下する

ここでは、(3) で行った。この結果を付図2に示す。上下に並ぶ二つの点A, Bの間に光が繋がっているのが判る。ただし、上記のコマ送り画像ほどエレガントには解けていない。

*3 十文字型：付・図1の◇特性をさらに強調したもの。

ふきぬき たかひろこ
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.ieice.org)。1968年より、画像信号処理 (高効率符号化、高精細化、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、科技庁長官功労賞、東京都功労賞、発明協会特賞などを受賞。信学会およびIEEE各フェロー、工学博士、名誉会員。