動画像信号のコマ送りはなぜ可能なのか

Why is Sampled Motion Possible?

名誉会員 吹抜敬彦[†]

Takahiko Fukinuki[†]

Abstract Although sampled motion in TV and movies has been considered to be self-evident, it does not seem to satisfy the sampling theory. Here, the fundamental properties of TV signals in the spatio-temporal domain are rather different from those in the horizontal-vertical domain. By analyzing the motion in the spatio-temporal frequency domain with assumption of these properties and those of an eye system, it is made clear that the motion satisfies the theorem.

キーワード：コマ送り，時空間領域，剛体仮定，マルコフ過程，標本化定理

1. ま え が き

動画像を連続する静止画の系列によって表現するコマ送り (Sampled Motion) はすでに19世紀末に映画で始り，さらにテレビでも使われ，足掛け3世紀を経ている。したがって，多くの方は本稿の題に「今さらなぜ？」と思われると思う。しかし，これは，標本化定理からはほど遠く，永らく画像工学の不思議³⁾であった。例えば60コマ/secの場合，標本化定理を単純に考えると，基底信号の帯域幅は30Hz未満に限られるべき筈だが，実態は大いに異なり60Hz近くまである。脳の高次の機能に解を求めたこともある。

テレビ信号の統計的性質としては，マルコフ過程を想定した静止画の自己相関係数測定が有名である。しかし，時間領域の性質は，「水平-垂直」領域とまったく異なり，これは成立たない。筆者は，提唱中の視知覚信号処理工学¹⁾の中でもこれまでImplicitに論じてきた。本稿では，改めてExplicitに明確にすることによって，「深遠な不思議」に迫る。

標本化定理に基いて厳密に設計された音声/音響と，実用化されているものを100年以上経って改めて紐解くコマ送りの対比が面白い。

また，近年，液晶テレビの動領域ボヤケや，「超高精細テレビは60P (60コマ/secの順次走査) で良いのか」等，コマ送りやフレームレイトに関心が高まっているが，その前に「なぜコマ送りが可能か」の解明が必須である。このような背景からここで検討する。

2. コマ送りの不思議

動画像をコマ送りの信号に変換するには，まずフレーム化，すなわち，時間領域において標本化する。ここで，このコマ送り (簡単のため60P) の場合を周知の1次元標本化と対比させて検討する。信号としては両者ともマルコフ過程を仮定する。

後者の1次元標本化における周波数スペクトルを図1 (a) に示す。周知なので詳細な説明は略すが，この図の下段に示すように，基底帯域の成分と標本化によって派生した成分が，相互に重なり合うことなく並んでいる。

一方，60Pの場合の時空間周波数スペクトルを図1 (b) に示す。時間周波数を上向きにとっている。

60P信号は60Hz標本化であり，標本化定理に従えば，基底帯域は前述のように30Hz未満に帯域制限すべきである。現に，このように記述した成書 (含：ハンドブック) も多い。

しかし，現行テレビカメラでの帯域制限機能は1/60secの光蓄積によるアバーチャ効果のみであり，これではとても不十分である³⁾。すなわち，30Hzでの利得は0であるべきであるが，実際には，

$$\begin{aligned} \text{sinc}(\pi f/fs) &= (\sin(\pi f/fs))/(\pi f/fs) \Big|_{f=30\text{Hz}} \\ &= 2/\pi \approx 0.64 \end{aligned} \quad (1)$$

である (ここにfs=60Hz)。このため，基底成分と派生成分が完全に重なってしまう。しかも，シャッタ機能を付けて蓄積時間を短縮すると利得→1.0となる。この結果，さらにエイリアシングが激しくなって画質劣化する筈である。しかし，事実は逆で，画質は大幅向上する。

さらに，復調側の補間低域濾波器である視覚系にも不思議がある。1次元標本化では基底成分のみを補間低域濾波器で取出すが，コマ送りではそうは行かない。すなわち，

2007年4月，電子情報通信学会画像工学研究会で発表
2009年3月13日受付，2009年7月8日再受付，2009年7月29日採録
[†] イメトピア研究室
(〒189-0012 東村山市萩山町3-28-1-813, TEL 042-392-0804)
[†] Imetopia Institute
(3-28-1-813 Hagiya Higashi-Murayama Tokyo 189-0012, Japan)

(a) 周知の1次元標本化

(b) コマ送りのスペクトル (従来の考え方)

図1 標準化によるスペクトル

あくまで説明用に模型的に描いた。(b)は(a)下段に対応する。時間周波数は、(a)では右方、(b)では上方である。

Spectra in sampling.

通過帯域は30Hzを大きく超えて臨界フリッカ周波数50数Hzまでである。このため、標準化による派生成分も知覚され、フリッカなどになる筈である。しかし、なぜか基底信号のみが知覚されている。

これらの原因は、従来の標準化定理では説明できず、永らく「自然の不思議」と片付けられてきた³⁾。ちなみに、一般には、滑らかに動くのは「残像による」や「仮現運動²⁾による」との考えがある。「不思議」のままで放置されてきた理由の一つは、判らない現象があると、仮現運動という「数学的には解明が難しい脳の領域」へと逃込んだことに依るものかもしれない。

3. 時間特性を考える上の剛体仮定

時間領域には、マルコフ確率過程に代って剛体仮定が重要である。これは、画面中で動物体の領域毎にみれば一つの剛体(固まり)として動いていることを言う。代表例は、平行移動である。これによって上記の「不思議」が解ける^{*1}。

剛体が画面内で速度(v_x, v_y)で移動する時、この領域の信号 $g(x, y, t)$ を式で表すと、

$$g(x, y, t) = g_1(x - v_x t, y - v_y t) \quad (2)$$

と置ける。これを3次元フーリエ変換すれば、

$$G(\mu, \nu, f) = G_1(\mu, \nu) \cdot \delta(f + v_x \mu + v_y \nu) \quad (3)$$

ここに、 μ : 水平周波数、 ν : 垂直周波数、

図2 スペクトルが存在する平面

他の表現との関係から時間周波数 f 軸を下方にとる論文も多いので、注意を要する。

Plain where spectrum exists.

A+ と A- : 標準化によって派生した成分

図3 標準化によるスペクトルと動体に対する視覚の解像度特性

Spectra in sampling and resolution of the eye system for moving objects.

f : 時間周波数、 $\delta(\cdot)$ はデルタ関数。

となる。したがって、そのスペクトル $G(\mu, \nu, f)$ は、

$$f + v_x \mu + v_y \nu = 0, \quad (4)$$

すなわち、原点を通る平面にのみ存在する。3次元で表示するのは大変なので、 $\nu=0$ の断面を図2に示す。このようにスペクトルが平面上にのみ存在することは、マルコフ過程を想定する[水平-垂直]の2次元空間の性質にはなかった大きな特徴である。

ちなみに、H.261やMPEGで動き補償フレーム間符号化が成功したのは、この剛体仮定による。液晶テレビのフレーム内挿表示や方式変換でも同様である。

4. 時間領域の標準化：なぜコマ送りは可能なのか

コマ送りの不思議を考察する。図3示すように、標準化により成分(A+, A-)が派生するが、図2に示す剛体仮定を仮定する限り、基底信号Bと重なることはない。ちなみに、もしマルコフ過程を想定する場合は図1(b)の通りであり、標準化定理が成立しない。

標準化の後置補間濾波器である視覚系の通過帯域も $-30 \sim +30$ Hzに帯域制限されている訳ではないが、付図1(b)の◇型特性を想定する限り、派生成分は視覚系出力でも混入しない。さらに、付図2(a)に示す変形◇型の追従視特性も有利に働く。

このようにして、基底帯域成分(原信号)が滑らかな動きとして出力(知覚)される。

ちなみに、上記の後置補間濾波器を図1(b)や付図1(a)の□型特性を仮定すると、A+, A-成分がこの通過帯域に

*1 運動としては、この平行移動の他、拡大/縮小、回転、オクルージョン、湧出、消失などがある。後3者を除くと、局所的に見れば、平行移動と見なせる。

入り、エイリアシングとなる。これは現象と反する。

このように剛体仮定と◇型視覚特性を導入することにより、時空間周波数領域で標本化定理が綺麗に満足されており、前述の「不思議」は「不思議」でないことがわかる*2。

ただ、剛体仮定が成立しない動物体の境界（継ぎ目）等では複雑な値を示すので、スペクトルも複雑である。

5. む す び

「動画のコマ送りがなぜ可能なのか」という極めて原理的な所から出発して、動画像信号の基本的解明を行った。[水平－垂直]領域におけるマルコフ過程に対して、時間領域における剛体仮定を考察した。

この結果、古くから広く用いられてきた映画やテレビのコマ送りは、「脳の高次な機能による不思議」に依ることなく、標本化定理を時空間周波数領域で綺麗に満足していることを明らかにした。また、これまで触れてきた剛体仮定と◇型視覚特性がこのための重要な条件となっており、重みを増したと思う。

〔文 献〕

- 1) 吹抜：“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～”，信学技報SIP2008-8&IE2008-8（Apr. 2008）
- 2) 吹抜：“TVの見え方の説明に仮現運動は要るのか”，映情学誌，60，12（Dec. 2006）
- 3) 吹抜：“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（東京，Oct. 2002）

<付録> 視覚の低域通過特性

繰返し述べてきたので、簡単に触れる。空間として水平で代表させる。

[水平－時間]の特性をモデル的に付図1に示す。付図1(a)の□型特性は、「時間的変化に関係なく視覚の解像度が一定である」として描いた。本文の図1(b)もこう考えた。

*2 査読者は、Takeuchiらのある論文を例示し、「心理学的観点から視覚の時空間特性について論じた先行論文との関係について記述する」ことを採録の条件とされた。本例示論文は、本誌2009年4月号の研究速報「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」(Vol.64, No.4, pp.549-552)の文獻5)である。この速報は「鋭/鈍画像を繰返すと、全体としては鋭画像に見える現象」を時空間周波数領域で解明したもので、本稿と同様な視覚特性を想定して解明している。例示論文は、これを心理学の立場から視覚評価した結果などを紹介している。このように、いろいろの現象において、本稿における解析手法や視覚特性の共通性があり、その手法の重要性が納得される。

付図1 視覚の解像度特性（時空間低域濾波特性）

Resolution of the eye system (low-pass filtering in the spatio-temporal frequency domain).

付図2 動体に対する視覚の解像度特性

Resolution of the eye system for moving objects.

付図1(b)の◇型特性は、「時間的に変化している場合、解像度が低下する」として描いた。時間領域を含む3次元特性については、大面積フリッカや動体視力が周知となっている。前者は、空間周波数の高い領域ではフリッカを感じる時間周波数が急速に低下するというものである。歴史的にもNTSCカラー方式の色差成分多重に活用された³⁾。なお、本稿では単純化して考えた。実態は、（誇張すれば）中位周波数にピークのある帯域通過特性である。

ちなみに、動体に視線が追従していると、網膜上には静止画像が得られているので、付図2(a)のような特性になる。

しかし、動体の速度が大き過ぎる等の理由で正しく追従できない場合には、例えば、付図2(b)のように十分な静止解像度が得られず、動体視力（の低下）となる。

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(fukinuki@m.ieice.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。