

MPEG-2 映像のポスト処理によるフリッカ低減方式

Flicker Reduction Schemes in MPEG-2 Video by Post-Processing

大塚 吉道

Yoshimichi Otsuka

あらまし テレビジョン信号はカメラ側でガンマ補正が施されており、その電気信号は線形ではない。このため、電気信号では起こり得ない画質劣化が光信号で起こることがある。その例が、MPEG-2 符号化映像をディスプレイで表示するときに発生するフリッカである。ここではフリッカの発生する原因を紹介するとともに、MPEG-2 映像のポスト処理によりフリッカを低減する方法について述べる。

Abstract Television signals are not linear in an electrical domain because of gamma encoding inside a video camera. It is quite possible that picture degradation is caused in an optical domain but never done in an electrical one. An example is the flicker caused by the gamma decoding when MPEG-2 decoded pictures are displayed. This paper introduces the mechanism of flicker generation and describes flicker reduction schemes by post-processing the MPEG-2 decoded video signals.

キーワード：MPEG-2，フリッカ，ガンマ補正，フレーム間補正，フレーム内補正，フリッカ低減効果

1. まえがき

ガンマ補正とは、CRT が電気入力レベルと光出力レベルが線形でないことにより、受像機を廉価にするため、放送局側で CRT の電気 - 光特性の逆変換を行う補正である。2000 年 12 月 1 日に BS デジタル放送、2003 年 12 月 1 日に地上デジタル放送が始まり、世界的にも放送のデジタル化の波が押し寄せ、ディスプレイも CRT から PDP や LCD などフラット型に変わりつつある。放送が変わり、ディスプレイが変わろうとしている今日であるが、ガンマ補正はテレビジョン創立の時代から変わっていない。

人の視覚特性は輝度に対して、その刺激が対数的であることで、ガンマ補正は別の意味で人

の視覚特性にマッチした補正であるといえる。放送波は、伝送路ノイズや符号化歪みの影響を受けるが、ガンマ補正を施すことによって、暗部から明部、そして、低彩度から高彩度に渡って、人の視覚は、これらをほぼ一様に感ずることができる。すなわち、ガンマ補正は伝送という面からも優位な補正であるといえる。

一方で、電気信号が線形でないことによる問題点もある。この点を 2 節で述べるが、符号化によってフレームごとに高域成分の歪みの態様が異なると、電気信号では変化しない直流変動がディスプレイに表示したとき、光信号となって現れる。このことによって、MPEG-2 映像符号化伝送では、高域成分の多い映像でフリッカを

生ずることがある⁽¹⁾。

ここでは、ガンマ補正の問題点とフリッカ発生メカニズムを紹介した上で、MPEG-2 符号化映像で現れるフリッカを低減する方式⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾について述べる。

2. ガンマ補正

テレビジョン放送では、スタジオにおける映像の加工や編集、放送局間の映像素材交換など、これらの映像の輝度や色調を統一するため、テレビジョン信号にはスタジオ規格が定められている。そのひとつに、光電変換特性、いわゆる、ガンマ特性が規定されている。例えば、HDTVのスタジオ規格では、ガンマ特性を次のように規定している⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} V &= 4.500L && \text{for } 0 < L < 0.018 \\ &1.099 L^{0.45} - 0.099 && \text{for } 0.018 < L < 1 \\ &\dots && (1) \end{aligned}$$

または、

$$\begin{aligned} L &= V/4.5 && \text{for } 0 < V < 0.081 \\ &((V+0.099)/1.099)^{1/0.45} && \text{for } 0.081 < V < 1 \\ &\dots && (2) \end{aligned}$$

ただし、Vは電気信号レベル、Lは光出力レベルで、ともに、基準白色を1に正規化している。

ガンマ補正は、テレビジョン放送の開始以来、よく知られた補正であるが、この結果、電気信号は線形ではなくなり、電氣的に著しい歪み(帯域制限や符号化歪み、ノイズなど)があるとき、ディスプレイに表示した場合、次のような画質劣化を生ずる。

(1) 高域成分が失われると暗くなる。

(2) 色信号の歪みが輝度信号に変換される。

(2)については、本題の主旨と関係がないため、ここでは省略し、(1)の理由について述べる。図1にガンマ特性による電気・光信号の輝度変化を示す。ここで、

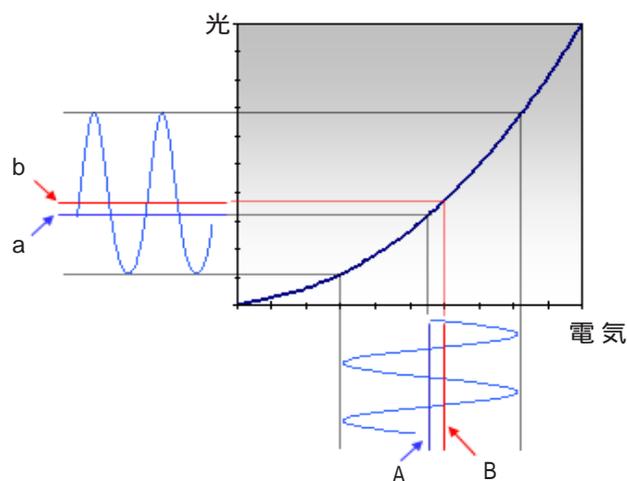
A. 電気信号の平均レベル

a. 高域成分がない場合の光信号レベル

b. 高域成分がある場合の光信号平均レベル

B. bの電気信号への換算レベル

今、ディスプレイに電気信号で、ある直流レベルAを入力すると、光信号はaのレベルで出力される。次に、電気信号に正弦波を重畳すると、光信号ではディスプレイのガンマ特性のため、正弦波の正の半サイクルが伸び、負の半サイクルが縮む。このため、光出力の平均値は、図中のbのレベルになる。すなわち、ディスプレイには(b-a)だけ明るく表示される。これを



A. 電気信号の平均レベル

a. 高域成分がない場合の光信号レベル

b. 高域成分がある場合の光信号平均レベル

B. bの電気信号換算レベル

図1 ガンマ特性による電気・光信号の輝度変化

逆に言えば、光信号では、正弦波(一般には高域成分)が失われると暗く表示されることを意味する。

次に、B は高域成分がある場合の光信号平均レベル b を電気信号に換算したレベルである。これは、フリッカ低減方式を考えると、B のレベルを検出して、高域成分による輝度の増加分、 $B-A$ を得るもので、詳細は4節で述べる。

図2に電気信号レベルで50%の直流に振幅を可変した正弦波を重畳したときの「光平均」レベル(図1のb)と、この光平均レベルを電気レベルに換算したときの「換算値」(図1のB)を示す。ただし、横軸は重畳する正弦波の振幅で、p-p値(peak to peak)で表す。このように、重畳する正弦波の振幅が大きくなるにしたがって、光平均レベルは上昇する。逆に、正弦波の振幅が小さくなれば、光平均レベルは小さ

くなり、視覚的には画面が暗く見える。この輝度変化の最大値は、図からおおむね12%、8ビット表現で30/256である。

3. MPEG-2 映像符号化

MPEG-2 映像符号化では、高い符号化効率を得るために、図3に示す予測方式を用いる。現在、実用化されているBSデジタル放送や地上デジタル放送でも、この予測方式が用いられ、Bピクチャ、すなわち、双方向予測を用いることを特徴とする。Bピクチャを用いることで、隠れていた物体が動いたことにより見えてくる背景においても高い予測効率が得られる。

MPEG-2 映像符号化は、動き補償フレーム間符号化を基幹技術とする方式で、一般に、フレーム間符号化では、符号化誤差が次に符号化するフレームに伝搬する欠点がある。しかしなが

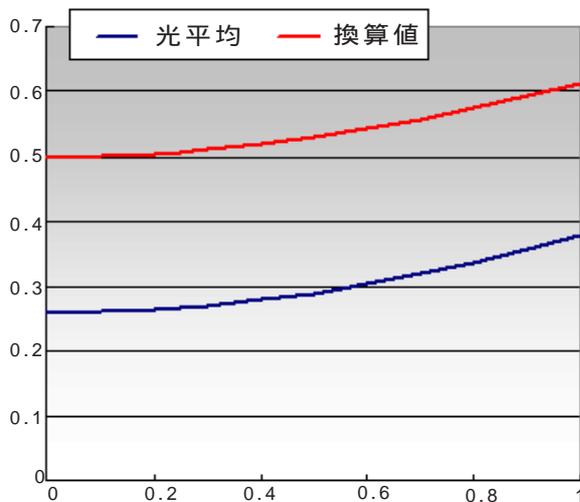


図2 直流に重畳した正弦波と光出力の平均

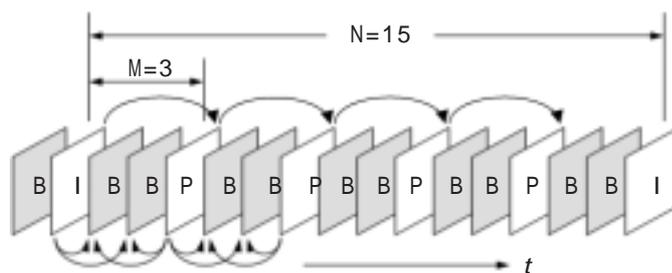


図3 MPEG-2 映像符号化における予測方式

ら，Bピクチャでは，符号化がそのフレームで完結し，符号化誤差が次のフレームに伝搬しない特長がある。この特長を生かして，レート制御（フレームごとに目標ビット数を決定し，所望のビットレートを得る制御）では，BピクチャをIピクチャやPピクチャより目標ビット数を低く設定する。その結果，Bピクチャの量子化特性は粗くなり，IピクチャやPピクチャに比べて高域成分が大きく失われることがある。

一般に，人の視覚特性は，空間的な画質劣化に対しては敏感で，時間的な画質劣化に対しては鈍感である。さらに，IピクチャやPピクチャで画質劣化の復元を行うため，なおさら，人の視覚特性は，時間的な画質劣化に対して鈍感になる。このように，Bピクチャは，視覚特性からいっても優れた予測方式であるといえる。

しかしながら，Bピクチャの導入で新たな画質劣化を引き起こす要因が発生する。MPEG-2では，予測は時間的（動き補償フレーム間差）であるが，符号化は空間的(DCT)である。また，空間的な符号化では，人の視覚特性から，低域成分は細かく量子化するが，高域成分は粗く量子化する。このことによって，高域成分が失われる方向に符号化され，目標ビット数の小さいBピクチャでは，IピクチャやPピクチャより高域成分が失われる傾向にある。言い換えれば，フレームごと，周期的に高域成分の大き

が変化する。

このピクチャタイプの違いによる高域成分の変化は，フリッカになってディスプレイに表示される。このフリッカは，決して電気信号で直流レベルが変化しているわけではない。テレビジョン映像がガンマ特性という非線形な信号処理を施すことに起因して，ディスプレイで電気信号を光信号に変換するとき，生ずるものである。

図4にフリッカが出やすい映像の例を示す。この映像では，画面の大半を樹木が占めており，大面積に渡り高域成分が多い映像である。フリッカはこの樹木の部分に生ずる。小面積であれば，フリッカを感ずることはないが，大面積のフリッカに対する人の視覚特性は非常に敏感である。画面全体のフリッカであれば，僅かな輝度変化もフリッカとして感ずる。このフリッカ低減対策を次節で述べる。

4. フリッカ低減対策

大面積フリッカは，画面に近づく方が少しは小さく感ずるものの，視距離にはほとんど依存しないと考えるよい。したがって，ディスプレイのサイズには依存しない。依存するとしたら，ディスプレイのガンマ特性やディスプレイの周波数特性が考えられる。しかしながら，符号化で生ずるフリッカは，もともと，それほど大きなものではないため，ガンマ特性の違いに



図4 フリッカが目立つ映像の例

よる影響はほとんどない。むしろ、ディスプレイの周波数特性の方が大きく影響するが、現在のディスプレイは、高域成分を十分表現できる性能をもつため、このフリッカの発生はより深刻な問題となる。また、フリッカは、ディスプレイの走査線数や水平画素数に大きく影響するため、フリッカ対策、すなわち、フリッカ低減回路は、映像信号の走査方式をディスプレイのネイティブな走査方式に変換したところで行った方がよい。

4.1 補正方式1，フレーム間での補正

高域成分は、I ピクチャやP ピクチャよりB ピクチャの方が大きく失われるため、B ピクチャの方が光出力は暗くなる。本補正方式では、この暗くなった明るさの変化を検出し、B ピクチャのみ補正を行う。

図5に補正方式1のブロック図を示す。構成は、逆ガンマ補正により、電気入力信号から光出力をシミュレートし、狭帯域LPFによって、光の直流レベルを得る。その後、ガンマ補正を行い、光の直流レベルを電気信号に変換する。このレベルが、図1におけるBに相当する。一方、入力の電気信号を同じ帯域をもつ狭帯域LPFをかけ、電気信号での直流レベルを得る。このレベルが図1のAに相当する。そして、電気信号に換算された光出力の直流レベルBと、電気信号で得られた直流レベルAとの差をとる。この差が、「高域成分が存在することによる輝度の増加分」(以下、輝度増加値という)であり、図1において、 $B - A$ に相当する。

この輝度増加値は、I ピクチャ、P ピクチャのみがフレームメモリに書き込まれる。B ピクチャのとき、フレームメモリからI ピクチャまたはP ピクチャの輝度増加値を読み出し、B ピクチャの輝度増加値を引いて、この値がフリッカを低減する補正信号となる。最後に、この補正信号を入力信号に加算することによって、フリッカを低減した映像が得られる。

本構成では、輝度増加値が高域成分の大きさで変化するため、物体が動いたことによって、

見えてくる背景の高域成分が異なると、誤補正を生ずる。この対策は、補正信号は大きくないと考えられるため、補正信号を振幅制限することで、誤補正を抑えることができる。また、必ず明るくなる方向に補正するため、負の補正信号はゼロにクリップさせる。

次に、狭帯域LPFの通過帯域は、高域成分を十分除去し、直流成分を得るものであれば、その通過帯域はフリッカ低減性能に大きく影響しない。具体的には、DCTの直流相当からマクロブロックの直流相当の範囲が適当と思われる。また、輝度増加値はフレームメモリに蓄えられるため、フレームメモリの容量削減のため、狭帯域LPF後の信号は粗いサブサンプルを行ってもかまわない。

ここでは、ガンマの値はディスプレイの実測値を用いたが、この値も厳密である必要はない。例えば、ガンマを2乗としても問題はないと思われる。このようにすると、電気信号は振幅、光信号は電力と考えられ、入力波形に依存して振幅平均と電力平均の差が生ずることは、周知の事実である。すなわち、振幅平均が同じでも高域成分の大小によって電力平均が変化し、この変化がフリッカの原因となる。

4.2 補正方式2，フレーム内での補正

高域成分が存在することにより、ディスプレイ上では平均輝度が増加する。輝度増加値とは、ディスプレイ上での輝度増加分をそれと等価な電気信号レベルに置き換えたものである。この値ごとにフレーム内で算出される。そこで、常に入力映像から輝度増加値を引き算することにより、高域成分の大小によらない光の平均値を得ることができる。このことによって、光出力上の輝度の平均レベルは、高域成分の大小によらず、常に電気平均の輝度レベルに補正することができる。

図6にこの補正方式のブロック図を示す。構成は、フリッカ低減方式の前半の部分と同じであり、輝度増加値(図1の $B - A$)を入力映像から減算するだけである。この方式は、ピクチャタ

タイプによらず各フレームに対して一律な処理を行うため、ピクチャタイプの情報が不要であるばかりか、フレームメモリも不要である。また、補正方式1で見られた動画像に対する誤補正も排除できる。欠点があるとすれば、高域成分の大きい領域で、僅かな輝度低下を生ずる。しかしながら、この輝度低下は、ディスプレイの調整誤差範囲と考えられ、これにより画質劣化を感じることはいない。

4.3 フリッカ低減効果

ここでは、フリッカの発生しやすいITE標準動画像を選び、計算機シミュレーションによりMPEG-2による映像符号化を行い、デコード画像に本フリッカ低減方式を適用し、そのフリッカ低減効果を検証する。なお、放送用映像素材は、RGB画像に対してガンマ補正が施されており、厳密にはRGBに変換した上で検証実験を行うべきであるが、フリッカの輝度変化は小さい

ことにより、近似的に輝度信号のみをフリッカ低減の対象としても、効果はRGBを対象としたものと比べて、画質的な誤差は少ないと判断した。実験条件を表1に示す。

図7にITE標準動画像における「並木道」のシミュレーション結果を示す。横軸は、フレーム番号、すなわち、時間軸である。縦軸は、ディスプレイに表示される映像のフリッカが発生している部分をスポット輝度計で測定した実測値であり、これを黒0%～白100%に正規化した値である。

最も上の曲線は原画像の輝度変化、矩形状の曲線は符号化画像の輝度変化を示す。原画像と比較して符号化画像は平均1%の輝度低下があることが分かる。また、符号化画像は、I、PピクチャとBピクチャの輝度差が3フレーム周期にはっきりと現れており、その輝度変化は0.3～0.5%である。この周期的な輝度変化が

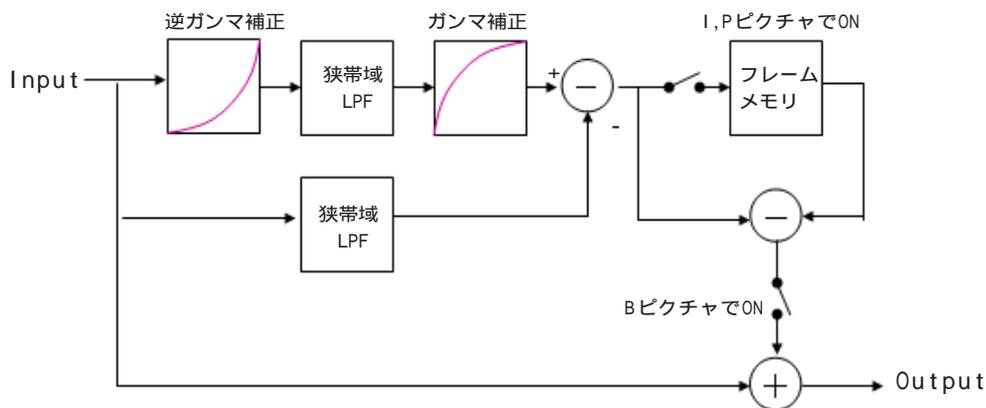


図5 フリッカ補正方式1

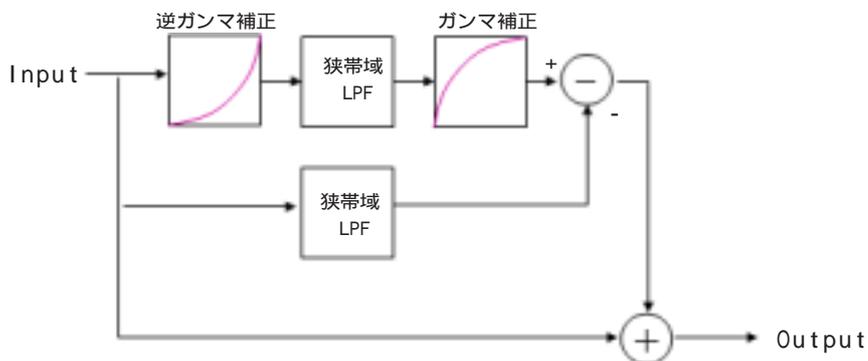


図6 フリッカ補正方式2

フリッカである。

矩形状の波形に接するようがあるのが、補正方式1で補正した映像の輝度変化である。3フレーム周期の輝度変化が消え、フリッカが低減しているのが分かる。一番下の曲線は、補正方式2で補正した映像の輝度変化である。こちらでも、周期的な輝度変化は現れず、フリッカが低減しているのが分かる。しかしながら、補正方式1と比較して3%ほどの輝度低下が見られるが、視覚的には、この輝度低下は僅かであり、これにより色調が崩れることはない。それよりも、簡単な方式でフリッカ劣化をほぼ完全に抑えられる効果の方が大きい。

ITE 標準動画像「並木道」以外のテスト画像でも、同様のシミュレーションを行い、フリッカ低減に対して効果的な結果が得られることを

確認した。また、もともと、フリッカを生じない映像においても、本低減方式を「入れっぱなし」でも画質的な影響がないことを確認した。

5. まとめ

ここでは、ガンマ補正とガンマ補正が映像信号に及ぼす影響について述べた。また、MPEG-2 映像符号化において、ピクチャごとの予測方式の違いによるフリッカ発生の原因を紹介し、その低減法の開発を行った。そして、計算機シミュレーションを実施し、フリッカをほぼ完全に抑えられることを確認した。また、フリッカを生じない映像においても、画質的な影響がないことを確認した。

ガンマ補正は、人の視覚特性において、暗部から明部にかけて刺激がほぼ一様である特長を

表 1 実験条件

テスト画像	HDTV	SDTV
	入場行進 並木道 ブランコ シャチのジャンプ	並木道
エンコーダ	MPEG-2 Test Model 5(TM5)	
GOP 構造	M=3, N=15	
ビットレート	22 Mbps	6Mbps
ディスプレイガンマ	2.45(実測値)	
LPF	9 × 9(平均値)	
補正值の振幅制限	8(8ビット表現)	

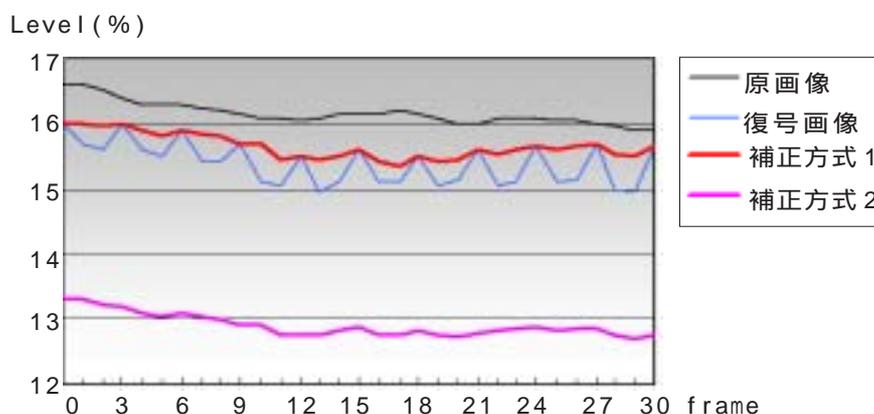


図 7 フリッカ低減効果

有する反面，信号処理において，線形でないことによる新たな副次劣化を生ずる問題点を合わせ持っている。これらの特長，欠点をわきまえた上で，テレビジョン信号の信号処理を行うべきと考える。

6. 謝辞

この研究は，筆者が日本放送協会在職中に行われたものである。当時，ご指導，ご鞭撻いただいたNHK放送技術研究所・研究主幹の下田茂様，同所映像情報・副部長の西田幸博様，また，方式の開発にあたって実際に検討，議論，実験をご一緒させていただいた同所映像情報・研究員の原直弘様，市ヶ谷敦郎様，黒住正顕様，特に原直弘様からは本稿に対して資料提供をいただいた。これらの方々に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 鹿喰・青木・中須：“動画像符号化における両方向予測の効果の検証 - 画質の評価と検証 -”，テレビ誌，50，3，pp.391（1996）
- (2) 原他：“MPEG-2映像のポスト処理によるフリッカ劣化の低減”，映情学技報，28，22，pp.17，BCT2004-70（2004）
- (3) 原ほか：“画面内ポスト処理によるMPEG-2映像のフリッカ劣化の低減”，映情学年大5-5（2004）
- (4) Hara N., et. al: “Flicker Reduction in MPEG-2 Video by Post-Processing”，IEEE Trans. on Consumer Electronics, 51, 1, pp.210（2005）
- (5) BTA S001：“1125/60方式高精細度テレビジョン方式スタジオ規格”，ARIB標準規格(放送)，1987年8月公布

筆者紹介

大塚 吉道 (おおつか よしみち)

技術開発本部 PDP 開発センター