PAL テレビ信号に関する高品質化処理の検討

正会員 工 藤 功 二[†], 正会員 阿 知 葉 征 彦^{††}, 正会員 小 野 田 純^{†††}

Study on High Quality Conversion for PAL Television Signals

Koji Kudo[†], Masahiko Achiha^{††} and Jun Onoda^{†††}

Abstract A new motion detection scheme that extracts one-frame differences in PAL signals is described. A high-precision motion-adaptive luminance-chrominance (YC) separation and motion-adaptive field rate up-conversion using this motion information are also described.

It is determined that a conventional field rate up-conversion scheme causes two harmful effects: ghost images and jagged motion images. These images can be reduced by using a motion-adaptive filter in the field rate up-conversion.

The developed enhanced-PAL decoder provides high-quality pictures without cross-component degradation or large-area flicker.

1. ま え が き

現行のカラーテレビ映像には、YC分離方式と走査方式に起因した画質妨害がある。前者にはクロスカラーやクロスルミナンスがあり、NTSCおよびPALに共通した妨害である。他方、後者にはラインフリッカや大面積フリッカ等があり、特にNTSCではラインフリッカが、PALでは大面積フリッカが目につく。

しかしながら、NTSCテレビ映像の画質は、動き

情報を適用した3次元(水平-垂直-時間)のデジタル信号処理により急速に向上した¹⁾³⁾。また、3次元の処理アルゴリズムはLSIチップ化されており、これがテレビ受像機の中にすでに組み込まれている⁴⁾⁵⁾。

一方、PALテレビ映像の画質は、動き検出器の性能不足により、十分な改善効果が得られていない。PALテレビ信号は後述のように、同一位相のコンポジット信号は4フレーム周期となるため、画像の動き情報は4フレーム差から検出することになる⁶⁾。この

キーワード: PAL, 動き検出, YC分離, フィールド倍密化

1993年1月28日受付, 1993年5月12日再受付

[†] 株式会社日立製作所 中央研究所(〒185 国分寺市東恋ヶ窪1-280, TEL 0423-23-1111)

^{††} 日立電子株式会社 開発研究所(〒187 小平市御幸町32, TEL 0423-22-3111)

(現在, 三重大学工学部電気電子工学科)

^{†††} 日立小金井電子株式会社(〒187 小平市回田町393番地, TEL 0423-24-6111)

[†] Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd. (1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185, Japan)

^{††} Research & Development Laboratory, Hitachi Denshi, Ltd. (32 Miyuki-cho, Kodaira-shi, Tokyo 187, Japan)

(Now, Dept. Electrical and Electronics Eng., Faculty of Engineering, Mie University)

^{†††} Hitachi Koganei Denshi Ltd. (393 Megurita-cho, Kodaira-shi, Tokyo 187, Japan)

そこで本稿では、PAL テレビ映像の高品質化を達成するに不可欠な技術として、はじめに PAL 信号の 1 フレーム差から正確な動き情報を抽出する動き検出方法について述べ、次に、これを適用した動き適応 YC 分離方式⁷⁾、そして大面積フリッカを除去する動き適応フィールド倍密化アルゴリズム⁸⁾、ならびにその検討結果を記述する。

2.1 PAL 信号の主な性質

$$P = Y + u \sin 2\pi f_{sc}t \pm V \cos 2\pi f_{sc}t \quad (1)$$

$$f_{sc} = \{284 - (1/4) + (1/625)\} f_H \quad (2)$$

 f_H : 水平走査周波数

t : 時間

(1)式の右辺第2項および第3項は搬送色信号(C 信号)であり、符号 $\pm$ は v 信号の極性が走査線毎に反転することを示す。また、カラーバーストの位相は図1に示すように、 u 信号(軸)に対して $\pm 135^\circ$ と定められており、その極性は v 信号に対応している¹⁰⁾。

図 1 PAL 色信号ベクトル図
PAL color modulation phase diagram.

2.2 色差軸オフセット標本化を用いた動き検出

一方、テレビ信号を標本化する際、標本化位相に工夫を加えることにより、画像の1フレーム差から正確な動き情報を得ることができる⁹⁾。図2(a)はその様

図 2(a) 色差軸オフセット標本化と動き検出
Fixed phase sampling and motion detection.

図 2(b) フレーム差の動き検出回路
Motion detection circuit of frame difference.

図 3 PAL 信号の時間周波数特性とフレーム差フィルタ
Temporal frequency characteristics of PAL signals
and frame difference filter.

子を示すもので、連続する3フレームの同じラインの u および v 信号を表している。いま、 $4f_{sc}$ の周波数で、かつカラーバーストの位相と一致した位相 (u 軸に対して 45° だけオフセットした位相) のクロック信号を用い、 P 信号を標本化すると、同図に示す黒点の位置が標本点となる。これを『色差軸オフセット標本化』と呼ぶ。

色差軸オフセット標本化を適用した P 信号の 1 フレーム差を形成すると、標本点で同極性関係となる画素から動き信号 (M_{D1}) が得られる¹¹⁾。この場合、得られる M_{D1} 信号は 1 画素おきとなるので、信号に欠落している動き情報は前後のデータより補間して求め、画素対応 ($4f_{sc}$) の動き信号を生成する。

以上を回路で実現すると、図2(b)の構成になる。まず、標本化回路により、特定の周波数と位相を有するクロック信号で P 信号の標本化を行い、その出力信号から1フレーム差を形成する。次に、その差分信号をサブサンプルすることにより、1画素おきの M_{D1} 信号のみを抽出する。その後、 M_{D1} 信号を絶対値信号に変換し、信号に欠落している動き信号 (M_{D1}') を補間処理で求め、同図に示す画素対応の動き制御信号 k' を生成する。

テレビ信号は時間方向にフィールド単位で標準化されているため、図 3 に示すように、動き情報はフレーム周波数 (25 Hz) までの成分を含んでおり、上述の 1 フレーム間の演算だけでは動き情報を網羅して検出することはできず、例えば、速い動きを静止に誤判定する場合もある。

このような動きの検出漏れは、抽出した動き信号を時空間へ伸張することで救済する¹²⁾。図4は時空間積分フィルタの構成図である。同図の方式は、まず、前フィールドの動き信号(k')を2つの画素遅延(D)を用いることにより、水平方向への拡大を行う。次に、これを $312H$ および $1H$ の遅延を介すことにより、

図 4 時空間積分フィルタの構成
Block diagram of spatio-temporal integrator.

図 5 時空間積分フィルタの応答例
Impulse response of temporal-vertical integrator.

時間・垂直(空間)方向に伸張する。その後、伸張された信号(k'')の一部から定数 a を差し引いて帰還させる巡回方式である。図5はインパルス的に発生した動きの信号が図4の時空間積分フィルタによって、時間の経過と共に減衰しながら垂直方向へ拡大される様子(濃淡が動き信号の大きさ)を示す。

以上のように，抽出した k' 信号は時空間積分により動き領域の拡大が図られ，動きが生じた隣接フィールドでの動きの検出漏れが救済できるようになった。

なお、 k' 信号から作られる動き制御信号 k は、静止モードと動きモードをスムーズに切り替えるパラメータであり、8~16 レベルに場合分けされる。そして、次に述べる動き適応の YC 分離やフィールド倍密化処理で、「静」と「動」の境界が不自然になることを防止する。その値は $0 \leq k \leq 1$ にあり、 $k=0$ は静止を意味する。

3. 動き適応型 YC 分離方式

3.1 YC 分離の基本構成

PAL 方式では、C 信号の位相は 2 フレームおよび

図 6 動き適応 YC 分離の基本構成
Motion-adaptive YC separator.

2 ライン周期で反転する。したがって、 P 信号の 2 フレーム間および 2 ライン間の演算を行い、かつその演算パラメータを動き情報を用いて制御することにより、高精度な YC 分離が実現できる。

図 6 は動き適応 YC 分離の基本構成を示す。同図において、まず 2 フレーム (1250 H) 間の差 (フレーム間演算) から搬送色信号 C_F を抽出する。フレーム間演算は、静止画像部分に対して YC 間のクロストークのない理想的な分離特性を得ることができる。しかし、動画像部分に対しては正しい YC 分離が行えず、分離特性は著しく劣化する。

これと同時に 2 ライン (2 H) 間の差 (フィールド内演算) から搬送色信号 C_L を抽出する。フィールド内演算は、動きによる特性劣化は生じないが、絵柄により特性が劣化し、水平エッジや斜め縞模様ではクロスカラーやクロスルミナンス等が生じる。

以上のことから、静止画像では C_F 信号が、動画像では C_L 信号が選択されるように制御する。そこで、クロスカラーの極めて少ない高品質な C 信号を得るためには、前述の動き制御係数 k を用い、 C_F 信号と C_L 信号を次式に従って適応的に合成する。

$$C = kC_L + (1-k)C_F \quad (3)$$

一方、ドット妨害の極めて少ない Y 信号は、複合信号から (3) 式の C 信号を差し引くことにより得られる。

3.2 高精度 YC 分離方式

フレーム間 YC 分離は、現フレームと 2 フレーム前の信号を利用する。これに対し、2.2 節で述べた動き検出は、現フレームと 1 フレーム前の信号を利用し、2 フレーム前の信号は使用しない。このような YC 分離方式と動き検出の組合せでは、必ずしも満足のいく

図 7 動き検出と YC 分離の関係
Relationship between motion detection and YC separation.

分離特性は得られないことがわかった。

図 7 はその一例であり、動き検出と YC 分離の関係を表している。いま、明暗のある被写体像が移動する場合を想定する。動き情報は格子状に示した A の範囲が動き領域であり、B の範囲は本来動き領域であるが、静止領域として検出される。よって動き制御では、B の範囲はフレーム間 YC 分離で処理されるため、画質劣化を生じる⁷⁾。

このような不合理を引き起こさないためには、動き適応処理される信号と動き検出に利用する信号とが同一時刻の信号であることが要求される。すなわち、静止モードでの YC 分離が 2 フレーム間の演算ならば、動き情報の中には、これに対応した 2 フレーム間の差分情報が含まれていなければならない。

図 8(a) 改良型動き検出(その 1)

Improved motion detector with LPF of two frame difference(1).

図 8(b) 改良型動き検出(その 2)

Improved motion detector with cascaded frame subtractors(2).

以上のことを踏まえ、3次元処理におけるYC分離と動き出の「相性」という観点から、特に動き検出器の改良を検討した。

図8(a)は改良した第1の検出器の構成である。これは2.2節で述べた1フレーム差分の動き情報 M_{D1} に、さらに2フレーム差分の動き情報 M_{D2} を取り入れるため、破線の囲みで示す回路を付け加えたことが特徴となっている。ただし、同図の構成から得られる2フレーム差分信号には、 M_{D2} の他に動き情報とは無関係にC成分も混入されている。そのため、2フレーム差分信号を低域通過フィルタ(LPF)に通し、C成分を取り除いた低周波のY成分だけを動き情報(M_{D2L})とし利用する。よって、動き情報は M_{D1} と M_{D2L} を合成して形成する。

図8(b)は改良した第2の動き検出器の構成である。本構成も同じく動き情報に2フレーム差分 M_{D2} を取り入れるために考案したもので、破線の囲みで示す回路を付け加えたことが特徴となっている。これは現フレーム前の差分 M_{D1} を利用して動きを検出する方式である。 M_{D1} と M_{D2} は共に1画素おきに得られる動き情報であり、補間処理が必要となっている。

次に、図8(a)と(b)の動き検出器の優劣を比較する。(a)の場合、2フレームの差分信号をLPFに通すため、C信号帯域の動き情報は2フレーム差分からは検出できない。これは動き検出漏れの要因となる。他方、(b)の場合、1画素おきに得られる動き情

報 M_{D2} はY成分、C成分の2フレーム差分に相当する動き情報を含んでおり、(a)のような動き検出漏れの要因はない。このことから、動き検出器は(b)の構成の方が多少優位であると判断し、これを採用した。

よって、図6でのYC分離に上述の動き検出器を適用することにより、P信号から高精度にY信号とC信号の分離ができるようになった。

3.3 動き領域におけるYC分離の改善

画像の高品質化の観点から、ここではフィールド内の信号処理を改善し、特に動き領域に生ずる画質妨害の軽減策について述べる。

前述のように、動き領域では2ライン間の演算によりYC分離が行われるため、水平解像度は確保されるが、垂直方向に相関のない絵柄では、その部分にドット状の妨害(クロスルミナンス)が発生する。NTSC信号では1ライン間の演算でYC分離を行うので、ドット妨害は1ライン幅ですむが、PAL信号では2ライン幅となり、より目立つ。

この問題を解決する手法として、動き領域においてYC分離を行う際、ライン相関がある場合には2ライン間の演算から形成するYC分離方式を適用し、無関係の場合には1次元の帯域通過フィルタ(BPF)から形成するYC分離方式を適用する。そして、2つのYC分離方式を制御するためのライン相関情報は、すでに図6に示してあるように、2ライン間の差分をLPFに通して検出する。同図の e_0 が相関情報であ

写真 1 エッジ処理を施さない画像
Picture without edge processing in moving-mode
YC separation.

写真 2 エッジ処理を施した画像
Picture using edge processing in moving-mode YC
separation.

る。

動きモードにおける以上のような信号処理の有効性(ドット妨害の除去)は、実験を通して確認した。

写真 1 と写真 2 はその効果(比較)を示している。写真 1 はライン相関の有無により、YC 分離の BPF 処理を行わないときのテレビ画像であり、写真 2 は BPF 処理を施したときの画像である。絵柄の水平エッジに着目すると、ドット妨害が顕著に改善されていることがわかる。

4. フィールド倍密化方式

4.1 アルゴリズム

PAL テレビ信号に生じる大面積フリッカは、画像の補間処理を行い、単位時間のフィールド数を 2 倍に増加させて表示(フィールド倍密化)することにより改善できることが知られている¹³⁾。ここでは筆者らの提

図 9 フィールド倍密化のアルゴリズム
Algorithm of field rate up-conversion.

案方式⁸⁾について述べる。

図 9(a)~(c)にフィールド倍密化信号を得る手順を示す。はじめに、同図(a)に示した 2:1 インタレースの実走査信号に対し、走査線の補間処理を行うことにより、同図(b)に示す 1:1 順次走査対応の信号(50 フレーム/s 相当の画像データ)に変換する。ここでの補間信号は、静止モードでは前フィールドの信号(X_t)をそのまま補間信号として用い、動きモードでは同一フィールド内から上下ラインの平均値($X_{v1} + X_{v2}$)/2 を補間信号として使用する。動き適応型の補間信号(X_a)は、 X_t と ($X_{v1} + X_{v2}$)/2 を画像の動き情報 k を用い、次式に従って適応的に合成して求める。

$$X_a = k\{(X_{v1} + X_{v2})/2\} + (1-k)X_t \quad (4)$$

動き係数 k は動き適応型 YC 分離に適用したものと同じ値である。

次に、順次走査変換された 1 フレーム画像を 2 つのフィールド画像に分離する。ひとつは奇数ラインの走査信号群で構成される奇数フィールドであり、他は偶数ラインの走査信号群で構成される偶数フィールドである。分離した 2 つのフィールド画像は、共に 1/2 に時間圧縮し、フィールド単位の時間多重を行い、イン

タレース信号とする．表示はフィールド倍密化されたフィールド画像のうち，はじめに奇数フィールド，次に偶数フィールドという順番で，2倍速度の時分割で行うインタレースである．これによって，同図(c)に示すように，フィールド周波数が100 Hzに増加するので，大面積フリッカは改善される．

4.2 フィールド倍密化の影響

放映されるテレビ画像は動き適応処理の観点から，静止領域($k=0$)，中間領域($0 < k < 1$)，動き領域($k=1$)の3つに分類できる．上述したフィールド倍密化処理を行うことにより，画像の中間領域と動き領域に副作用が発生し(写真3の原画像に対して，後述の写真4および写真5が副作用の画像である)，画質を劣化させることがわかった．

まず第1に，画像の中間領域に発生する副作用は，

u : 移動速度 11 ドット/フレーム v : 移動速度 8 ドット/フレーム

写真3 原画像(基準)
Original image(Basic).

u : 移動速度 11 ドット/フレーム v : 移動速度 8 ドット/フレーム

写真4 フィールド時間反転の画像
Ghost image with time reversal.

補間信号を動き適応処理で作るために生じる．図10は補間信号処理からフィールド倍密化信号を生成するまでの経過を示している．いま，フィールド n で補間信号 b_2 が生成される過程に着目する． b_2 は動き適応処理により前述の(4)式に従って求められ，その中には前フィールド($n-1$)の信号成分 A_2 も含まれている．また， b_2 は時間軸上では，フィールド n に存在すべき信号であるが，フィールド倍密化を行う関係で， n' の時間軸上へシフトして表示させている．その結果，画像の表示時刻に矛盾(n より前のフィールド情報が n より後に表示される)が生じる．この現象は残像として映出され，画質劣化となる．視覚的には写真4のようなになる．

第2に，画像の動き領域に発生する副作用は，順次対応の画像信号を時分割で表示することから，ほぼ同

図10 補間信号処理から倍密化信号の生成経過
Processing of from interpolation signals processing to rate up-conversion signals.

図11 フィールド倍密化に伴う画像の動き
Motion with field rate up-conversion.

図 12 副作用を考慮したフィールド倍密化
Improved field rate up-conversion using motion-adaptive LPF.

u : 移動速度 11 ドット/フレーム v : 移動速度 8 ドット/フレーム

写真 5 動きの不連続性を伴う画像
Jagged motion image.

u : 移動速度 11 ドット/フレーム v : 移動速度 8 ドット/フレーム

写真 6 本方式による画像
Improved field rate up-conversion image.

一の画像が 2 フィールドにわたって表示されるためにひき起こされるもので、動く被写体の連続性に影響を与える。

図 11 にフィールド倍密化に伴う画像の動きを示

す。いま、被写体が等速度で左から右へ移動する場合を想定する。フィールド倍密化された映像は同図①→②→③→④→…の順番で表示される。ここで、被写体像は等速度で動いているので、②および④における画像の空間位置は本来、破線で示すところとなる。しかし、①と②の画像は画面の同一空間位置に表示され、被写体は静止に認識される。一方、画像が動いていると認識されるのは②と③が連続表示されたときである。このことから、被写体像は不連続な動きをすることがわかる。写真 5 は動きの不連続性を視覚的に捕らえたときの画像である。

4.3 動き適応型フィールド倍密化方式

フィールド倍密化に伴う副作用の発生状況(見え方)は、被写体の絵柄や動く速度・方向などで異なるが、画像の高周波成分、特に輪郭や細かい絵柄が動く場合に副作用が認識(強調)されやすい。これは縁辺対比¹⁴⁾による影響であると考えられる。また、フィールド周波数の大面積フリッカは画像の低周波で顕著であり、高周波では視覚的に目立たない。

以上 2 つの見地から、人間の目の視覚的な性質を利用し、副作用を軽減することを検討した。図 12 にフィールド倍密化を実行しつつ、副作用の緩和が可能な信号処理のブロック図を示す。同図において、実走査信号 X は複合テレビ信号から分離される Y 、 u 、 v

信号を代表したインタレースの映像信号である。動き適応処理により補間走査信号 X_a を生成し、順次走査対応の映像信号を形成する。ここでは信号処理をしやすくするため、信号を奇数および偶数フィールドに分

けてメモリーに格納している。

各メモリーからはフィールド信号 S_1 および S_2 の時間を $1/2$ に圧縮し、入力時の 2 倍の走査速度で出力する。ここで副作用を緩和するため、信号 S_2 を帯域制限フィルタへ通し、かつ動き情報によってフィルタの特性を適応的に変化させる。動き検出により大きな信号が得られたときに、狭帯域特性の LPF が選択されるようにする。写真 6 は副作用の抑圧効果を示したものである(写真 4 および写真 5 と比較)。

なお、帯域制限により解像度の低下が懸念されるが、帯域制限されるのはフィールド倍密化信号の片方のフィールドのみであり、動き領域に限定されるため、その影響は軽微である。また、この処理において、帯域制限により除去される細かい絵柄部分は、50 フレーム/s の表示となるためフリッカが生じるが、小面積なフリッカであり視覚上の妨害は少ない。

5. む す び

現行 PAL テレビ映像の高品質化を実現するためには、画像の動き情報を適用した高精度な YC 分離とフィールド倍密化の処理が必要である。以下に提案方式をまとめる。

- (1) 画像の動き情報は、 P 信号に色差軸オフセット標準化を適用した 1 フレーム差、および信号処理との相性を考慮した 2 フレーム差から検出する。
- (2) YC 分離は基本的に 2 フレーム間および 2 ライン間の演算結果を動き適応処理するが、動き領域に関しては、絵柄に応じて 1 次元処理の分離も行う。
- (3) フィールド倍密化は動き適応補間処理により順次対応の画像信号に変換し、これを 2 つのフィールドに分離し、2 倍速の時分割表示で実現する。
- (4) フィールド倍密化では副作用を伴うことがあるので、動きに応じて片方のフィールドに対し、適応的に帯域制限を施す。

以上の信号処理により、静止領域では YC のクロス成分と大面積フリッカのない鮮明な画像が、また、動き領域ではフィールド倍密化の効果が顕著な高品質な画像を実現できた。

最後に、本研究にご協力頂いた当社情報映像メディア事業部の窪田部長、ならびに西瀬戸主任技師に感謝致します。

〔参 考 文 献〕

- 1) 阿知葉、石倉：“カラーテレビ信号の動き適応形高精度化信号変換方式の提案”，テレビ大全，7-2(1982)
- 2) 阿知葉、石倉、斎藤：“IDTV 受像機のための動き適応型信号処理”，テレビ誌，41，7，pp. 655-662(July 1987)
- 3) 吹抜：“EDTV，IDTV における信号処理”，テレビ誌，40，5，pp. 357-364(May 1986)
- 4) 吉沢、松永：“高画質テレビ受像機 IDTV が市場に；各社 LSI を自社開発”，日経エレクトロニクス，451，pp. 169-175(July 11, 1988)
- 5) 阿知葉：“ED・IDTV 受像機における応用”，テレビ誌，43，12，pp. 1340-1348(Dec. 1989)
- 6) D. Teichner：“Adaptive Filter Techniques for Separation of Luminance and Chrominance in PAL TV Signals”，IEEE Trans. Consum. Electron., CE-32，3，pp. 241-250(Aug. 1986)
- 7) 工藤：“PAL 及び NTSC 信号の動き適応型 YC 分離”，テレビ大全，24-1(1991)
- 8) M. Achiha, K. Kudo & Y. Oki：“Motion-Adaptive Enhanced Decoder and Up-Converter for PAL Signals”，Symp. Record, ITS, Broadcast Session, pp. 197-208(June 1991)
- 9) 阿知葉、石倉、工藤、杉山、勝又：“複合カラーテレビ信号の動き検出”，テレビ誌，43，1，pp. 60-68(Jan. 1987)
- 10) 林、日下：“カラーテレビ方式の比較(1)”，放送技術，pp. 103-110(Apr. 1973)
- 11) 工藤、阿知葉：“PAL 方式における動き適応 YC 分離方式”，テレビ大全，10-9(1989)
- 12) 工藤、阿知葉、勝又、斎藤：“2 フレーム差と巡回形動領域補間による NTSC 信号の動き検出”，テレビ大全，13-1(1987)
- 13) Sandbank, Moffat：“High Definition Television and Compatibility with Existing Standards”，SMPTE Journal, 92，5，pp. 552-561(May 1983)
- 14) 応用物理学会：“色の性質と技術”，朝倉書店(1986)

くどう こうじ
工藤 功二 昭和 52 年，青森県立弘前工業高等学校電気科卒業。同年，(株)日立製作所に入社。中央研究所に勤務し，現在に至る。HDTV カメラ，IDTV の研究開発に従事。正会員。

あち は まさひこ
阿知葉 征彦 昭和 38 年，名古屋大学工学部電子工学科卒業。同年，(株)日立製作所に入社，中央研究所に勤務。平成 2 年，日立電子(株)に転属。平成 4 年，三重大学に転じ，現在，同大工学部電気電子工学科教授。テレビ信号処理の研究に従事。工学博士。正会員。

おのだ じゅん
小野田 純 昭和 33 年，早稲田大学大学院修士課程修了。同年，日立電子(株)に入社。テレビ放送機器の開発，電子計算機による訓練用シミュレータ，模擬視界装置の開発推進に従事。昭和 60 年より，日立小金井電子(株)取締役となり，主に画像のデジタル処理開発・指導に従事。現在，技師長。正会員。