

コンシューマ・デバイス論文

動き補償型フレームレート変換における 視覚特性を考慮した映像処理技術

荻野 昌宏^{1,a)} 高野橋 健太¹ 福田 伸宏¹ 中嶋 満雄¹ 浜田 宏一²

受付日 2013年12月19日, 採録日 2014年6月24日

概要: 動き補償型フレームレート変換では, 高品位な動画画質を得るための鍵となる高精度な動きベクトル検出の演算量を減らすことが大きな課題となっている. 本論文では, 動きベクトル検出高精度化アプローチに加えて, 動きベクトル誤検出による映像ノイズ (破綻) の抑圧に焦点をあて, 人間の動画視聴シーンにおける効果的な破綻抑圧手法を検討する. 提案手法により, 演算量の増大を抑え, 高品位な動画表示を実現することが可能となる. 実験において, PSNR, SSIM, および動画の主観評価において, 本技術の優位性を確認した.

キーワード: 画像処理, 動きベクトル, 動き補償, フレームレート変換

Image Processing Technology in Consideration of the Visual Characteristics in Motion Compensated Frame Rate Conversion

MASAHIRO OGINO^{1,a)} KENTA TAKANOHASHI¹ NOBUHIRO FUKUDA¹ MITSUO NAKAJIMA¹
KOUICHI HAMADA²

Received: December 19, 2013, Accepted: June 24, 2014

Abstract: In motion compensated frame rate conversion, how to realize the high quality motion image in low computational complexity is one of the big issues. In this paper, we focus the suppression of image artifacts by false motion vector detection and propose the effective image artifacts suppression method in motion image viewing in consideration of human property in addition to the approach of high accuracy of estimating motion vector. The proposed technology realizes coexistence with the low computational complexity and the high quality motion image. In examination, the proposed technology realizes better PSNR, SSIM and subjective picture quality than the conventional method.

Keywords: image processing, motion vector, motion compensation, frame rate convertor

1. はじめに

動き補償処理とは, 動画像におけるフレーム間の動き情報を同定する技術である. たとえば符号化やフレームレート変換 (Frame Rate Conversion: FRC) へ応用されており, DTV やカメラ等多くのアプリケーション [1], [2], [3] に

活用されている. 動きの検出方法としては, ブロックマッチング法, 画素マッチング法, 階層型マッチング法等多くの手法が提案 [4], [5], [6] されているが, 共通する課題は, 二律背反の関係にある精度と処理量 (回路規模) である. つまり, システムを組む場合には, この2つのバランスを十分に考えた処理が重要となる. 本論文では, 動き補償型フレームレート変換 (Motion Compensated FRC: MC-FRC) において, 視覚特性の観点から好適な映像補償により, このバランスの最適化を試みる. 具体的には, 処理量を抑えた MC-FRC における動きベクトル検出高精度化アプローチに加えて, 動きベクトル誤検出による映像ノイズ (破綻)

¹ 株式会社日立製作所横浜研究所
Yokohama Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Yokohama,
Kanagawa 244-0817, Japan

² 株式会社日立製作所中央研究所
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Kokubunji,
Tokyo 185-8601, Japan

^{a)} masahiro.ogino.qk@hitachi.com

の抑圧に焦点をあて、特に動き物体の周囲に発生する映像破綻を軽減させることにより、人間の動画視聴シーンにおける効果的な破綻抑圧手法を検討する。つまり、必要な領域は高精度化、視覚特性上クリティカルでない領域は抑圧という考え方を重視することで、低処理量、かつ高視認な動画表示を実現する。

以下、2章では、関連する研究について述べ、3章では解決すべき課題を説明する。4章で提案アルゴリズムを詳説し、5章で画質に関する評価、および実験結果について述べる。最後に6章でまとめる。

2. 関連研究

MC-FRC では、高精度な動きベクトル検出をいかに少ない演算量で実現するかという研究が行われている。

1つは MPEG, H.264 等の映像圧縮時に求められる動きベクトル情報を利用するというアプローチ [7] がある。映像圧縮時に用いる動きベクトルは本来の動きを表していない(表す必要がない)場合があるが、最も演算量に影響する動き探索範囲をある程度最初から絞ることができるメリットが考えられる。また、階層型マッチング法の研究も進化しており、Gaussian や Laplacian Pyramid を用いてより高精度な Coarse-to-Fine 探索を実現する取り組み [5] が研究されている。ただし、一般的に映像圧縮は複数フレームから動きベクトルを検出するが、MC-FRC では映像処理の遅延時間を最小化するために前後 2 フレームの情報から補間フレームを作り出すその原理上から、正確な動きベクトルを求めることが難しい映像シーンが存在する。そうしたシーンに対しては、ベクトルメディアンフィルタ [8] や、周囲ベクトルによる補正処理 [7] 等が研究されている。

また補間フレーム画質評価には、オリジナルフレームとの PSNR, SSIM [9] の測定が一般的である。

3. 解決すべき課題

MC-FRC では、ある特定の映像シーンにおける動きベクトル誤検出が映像破綻を引き起こす。この映像破綻の見え方が MC-FRC の性能指標の 1 つである。そのような映像シーンの代表的なものを表 1 にまとめる。これらの映像破綻への一般的な対応方法は、① 動きベクトル探索範囲を広げる、② 双方向や階層型検出を行う、といった動きベクトルの精度を高めることである。しかしこれらの手法は処理量増大につながり、加えて画質的にも改善の見込めないシーンや、逆に映像破綻が増加するシーンが出てくると考えられる。

一般的な MC-FRC の処理構成を図 1 に示す。現在と過去の 2 フレーム画像から動きベクトル検出を行う動き検出部 (Motion Estimation)、得られた動きベクトルを平滑化する等の処理で特異点を除去する動きベクトル補正部 (Motion Correction)、動きベクトルを用いて補間フレームを生成する補間フレーム生成部 (Interpolation) である。

表 1 映像破綻シーン

Table 1 Scenes of image artifacts.

No.	内容	対応方法
1	複数の動きが混在	動きベクトル探索精度向上
2	物体交差(オクルージョン)	動きベクトル探索精度向上
3	高速な(大きな)動き	動きベクトル探索範囲拡大

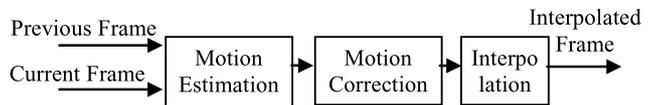


図 1 MC-FRC 処理構成

Fig. 1 Processing flow of MC-FRC.

従来手法では、映像破綻への対応として、上記した動きベクトルの精度向上のために、動き検出部の高精度化へ向けた工夫がなされている。表 1 の No.1 に関しては様々な Coarse-to-Fine 探索のアプローチ [5], No.2 に関しては、双方向動きベクトル探索 [10], No.3 に関してはサブサンプルを利用した探索範囲拡大 [6], 3 フレーム以上による探索 [7], 等があげられる。しかしどのアプローチも処理量は増大する方向であり、映像シーンによっては必ずしも改善ができる保証はなく破綻可能性が残る。

本提案では、表 1 の映像シーンを解析し、No.1 に関しては、効率的な動きベクトル探索手法と、動きベクトルヒストグラム解析による破綻抑圧処理による対応を検討する。No.2 に関しては、オクルージョン領域を抽出し、破綻抑圧処理を検討する。No.3 に関しては、人間の視覚特性上とらえられないような速い動きには追従せず、映像破綻抑圧方法に注力する。以上のような戦略により、低処理量で評価に用いたすべての映像シーンに対して安定的に高視認な動画画質を実現する MC-FRC 処理を目的とする。

4. 提案アルゴリズム

本章では、提案手法の詳細について述べる。

4.1 全体処理構成

本提案による MC-FRC の処理構成を図 2 に示す。図 2 に示すように、本提案では、独自の高精度な動きベクトル検出部 (Motion Estimation) に加え、従来の補間フレーム生成部を動的に制御するマイコン (Microcomputer) を配置し、また破綻抑圧部 (Artifacts Suppression) を装備している点が特徴である。本構成により、最適な破綻抑圧方法を実現し、高視認動画画質を得ることができる。以下、それぞれの処理における本提案の特徴部分について説明する。

4.2 動きベクトル検出処理

先に述べたように、MC-FRC で最も重要な処理である。ただし、最も処理量を必要とする部分でもあり、高性能、

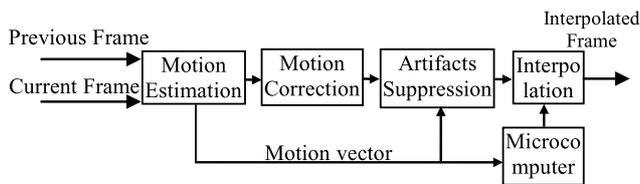


図 2 提案処理構成

Fig. 2 Processing flow of proposed method.

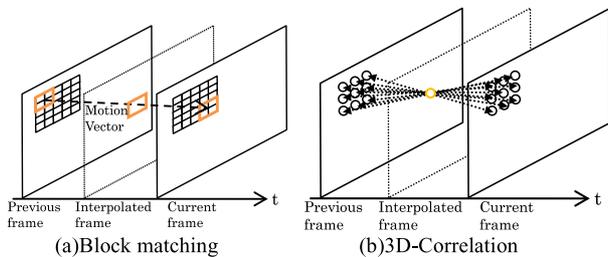


図 3 従来手法

Fig. 3 Conventional method.

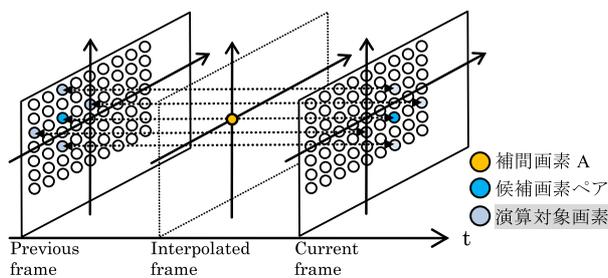


図 4 ブロック 3次元相関手法

Fig. 4 Proposed method.

低処理量を両立する手法が望まれる。本提案では、ブロック 3次元相関手法を考案し、採用した。動きベクトル検出の一般的な手法としては、ブロックマッチング法 [6] が知られている。また、我々はピクセル単位でマッチング処理を行う独自の 3次元相関手法を考案しており、図 3 にそれぞれの概念図を示す。特徴として、図 3(a) では、たとえば 5×5 pixel といったブロック単位でマッチングを行うため、周囲情報を含めた動きをとらえることができ、精度が高い。ただし、ブロック歪みの発生や、ブロック化処理が必要等により回路規模が大きくなるといった課題がある。一方、3次元相関手法 (図 3(b)) は精度の高い動き情報を得ることができ、ブロックマッチング法と比較し回路規模を小さく抑えることが可能であるが、画素単位でマッチングを行っているため、ノイズ等に弱いという課題がある。本提案のブロック 3次元相関手法は、これら 2つを組み合わせさせた手法である。図 4 に示すように、補間画素を中心として点対称の位置に存在する画素間の絶対値差分に加え、1画素おいた上下左右の画素を演算対象画素として絶対値差分をとり、これらの合計によって相関を求める手法である。

補間画素 $A(i, j)$ に対して、前フレームにおいて (p, q) だけずれた (現フレームにおいては $(-p, -q)$) 候補画素ペア

相関演算値 $(\text{Corr}(p, q))$ は、式 (1) によって表される。

$$\text{Corr}(p, q) = \sum_{i=1}^5 D_i \tag{1}$$

$$D_1 = |f_{t-1}(i+p, j+q) - f_t(i-p, j-q)|$$

$$D_2 = |f_{t-1}(i+p+2, j+q) - f_t(i-p+2, j-q)|$$

$$D_3 = |f_{t-1}(i+p, j+q+2) - f_t(i-p, j-q+2)|$$

$$D_4 = |f_{t-1}(i+p-2, j+q) - f_t(i-p-2, j-q)|$$

$$D_5 = |f_{t-1}(i+p, j+q-2) - f_t(i-p, j-q-2)|$$

ここで、 f_t, f_{t-1} はそれぞれ現フレーム、前フレームにおける輝度値を表す。動き探索範囲を R とし、 $\text{Corr}(p, q)$ が最小となる (p, q) を (pm, qm) とするとき、求める動きベクトル (pm, qm) は以下の式 (2) で表される。

$$(pm, qm) = \arg \min_{(p, q) \in R} \text{Corr}(p, q) \tag{2}$$

本手法によって、3次元相関手法 (図 3(b)) と比較し、大幅に性能が向上する。図 5 に同一シーンでのブロック 3次元相関手法 (c)、 5×5 画素ブロックマッチング手法 (b)、3次元相関手法 (a) それぞれでの動きベクトルヒストグラムを示す。対象シーンでは、 x 方向 ± 5 画素、 y 方向 ± 5 画素内エリア内での動きベクトルを有する画素が支配的であるが、一方で本エリア外の動きベクトルを有する画素も存在する映像である。ここで支配的な動きとは異なる、点 A で示す動き $(-29, -5)$ がとれているかどうか注目すると、ブロックマッチング法 (b) と、本手法 (c) ははっきり検出できているが、3次元相関手法 (a) では検出できていない。

また、1回のマッチング処理の演算量を考えた場合、 5×5 画素ブロックマッチング手法では、 $5 \times 5 = 25$ 回 (画素) の相関演算が必要になるが、本手法では図 4、および式 (1) に示すように、5回 (画素) の相関演算で済む。つまり、本手法は、マッチング処理の演算量を $1/5$ に抑えながら、 5×5 画素のブロックマッチング同等の動きベクトル検出精度を得ることができている。次に図 6 の映像に対する上記 3手法による補間結果を図 7 にそれぞれ示す。なお、図 7 は図 6 の黄色で囲った歩行者の手の部分の補間映像を拡大した図である。本手法 (c) では指の爪もしっかり再現できており、3手法の中で最も良い画質が得られていることが分かる。

4.3 破綻抑圧・フレーム補間処理

次にフレーム補間処理について説明する。

前節で求められた動きベクトルを用いて、補間フレームを作成する処理である。本提案においては、ローカルベクトル、オクルージョンマスク処理による精度の高い補間フレームを生成する。以下順に詳述する。

4.3.1 ローカルベクトル

補間フレーム生成の際に、周囲や前フレームの動き情報

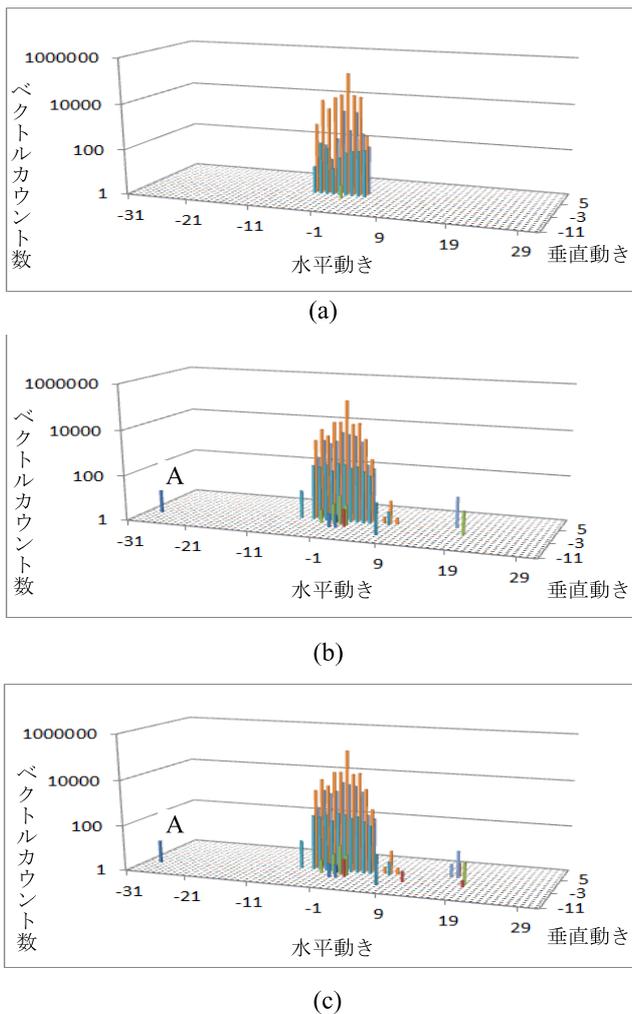


図 5 同一シーンでの動きベクトルヒストグラム. (a) 3次元相関手法, (b) ブロックマッチング手法, (c) ブロック3次元相関手法
Fig. 5 Vector histogram. (a) 3D-correlation, (b) Block matching, (c) Block 3D-correlation.



図 6 対象映像 (Crowded_Crosswalk)
Fig. 6 Target image.

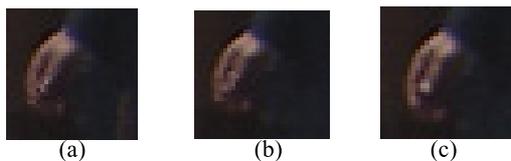


図 7 補間映像. (a) 3次元相関手法, (b) ブロックマッチング手法, (c) ブロック3次元相関手法
Fig. 7 Interpolated image (Crosswalk). (a) 3D-correlation, (b) Block matching, (c) Block 3D-correlation.



図 8 グローバルベクトルによる破綻
Fig. 8 Image artifact by global vector.

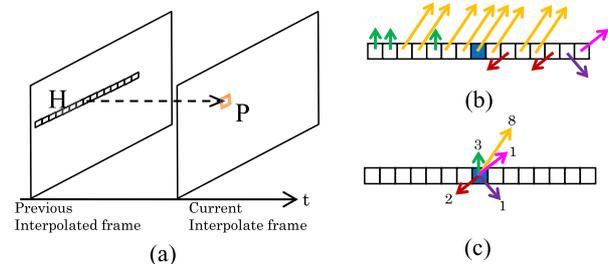


図 9 ローカルベクトル (a) ローカルベクトルエリア, (b)(c) ローカルベクトル生成
Fig. 9 Local vector. (a) Local Vector Area, (b)(c) Process of Local Vector generating.

を考慮した処理は多く研究されている [7], [11] が, 本提案では, それらに加えて, 前フレームの動き情報を 1 フレーム全体 (一般的にフレーム内で支配的な動きベクトル: グローバルベクトル) ではなく, 補間対象画素の周囲に限定するローカルベクトルを採用した. グローバルベクトルを用いる手法では, 映像の大部分が同じような方向に動いているケースでは効力を発揮するが, 映像中に複数の動きが存在する場合には, 破綻を引き起こすことが多い. たとえば図 6 のシーンでは, 背景の動き (動き 0) に対して人物が異なる動きをしているが, 背景の動き方向に重みがかかり, 橙色で囲った女性の足付近で図 8 に示すように映像破綻が発生する.

提案手法を図 9 で説明する. 図 9(a) に示すように対象補間画素 P に対して, 前フレームの同一ライン上水平 ± 7 画素のエリア H を設定する. 上下ライン方向にエリアを拡張する方法も考えられるが, 本提案においては, ローカルベクトル算出用の SRAM (Static Random Access Memory) を極力減らすため, 上記のようなエリアに選定している. 上下ライン方向にエリア拡張した場合との動きベクトルヒストグラムの分散傾向比較と動画主観評価により, ほとんど差がないことを確認のうえ, 性能に大きな差がないと判断し, 今回は回路規模を優先した.

図 9(b) に示すように前フレーム上のエリア内動きベクトルをカウントし, 図 9(c) を得る. 前記カウント値で所定閾値以上であるベクトルに対して重みを加える構成とする. 具体的には, 図 9(c) においてたとえば閾値を 5 とした場合には, 動きベクトル検出部 (4.2 節) で得られる候補ベクトルのうち, 図 9(c) の黄色の動きベクトルを優先選択するような処理を行う. 図 10 は図 8 と同一シーンに対



図 10 ローカルベクトルによる改善
Fig. 10 Improvement by local vector.

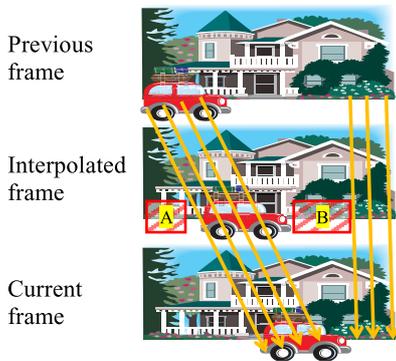


図 11 オクルージョン領域
Fig. 11 Occlusion area.

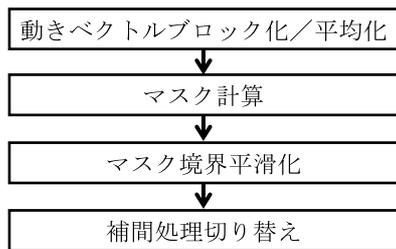


図 12 オクルージョンマスク処理フロー
Fig. 12 Flow of occlusion mask.

して本提案のローカルベクトルを使用した映像である。破綻が軽減されていることが分かる。

4.3.2 オクルージョンマスク

映像中、動いている物体の周囲が破綻することが多い。この原因を図 11 を用いて説明する。補間フレームに対して時間的に前後の 2 枚のフレームを用いて動き補償を行う場合、動き物体の周囲には、片方のフレームにしか現れない領域（オクルージョン領域 A, B）があることが分かる。オクルージョン領域は、図 11 を見ても分かる通り、正確な動きベクトルが存在しないため、映像が破綻する。

本提案では、オクルージョン領域を検出してその領域の動き補償処理をやめることで破綻を解決する。オクルージョン領域は物体が交差する領域であるため、その付近の動きベクトルには必ず差分が発生することに着目する。隣接する動きベクトルの差分が大きい領域をオクルージョン領域と見なし、非動き補償処理（具体的には前後フレームによる線形フィルタ補間）に切り替える。本処理のフローを図 12 に示す。以下、各処理ステージを簡単に説明する。

① ブロック化/平均化：画素単位に求められた動きベク



図 13 ブロック化
Fig. 13 Blocking.

表 2 ブロックサイズ検討
Table 2 Block size.

ブロックサイズ (水平×垂直)	使用 SRAM [bit]	性能 (主観画質)
8×4	365k	◎
8×2	209k	○
8×1	65k	○

トルを所定ブロックサイズに分割し、ブロックごとに動きベクトルを平均化する。

② マスク計算：図 13、式 (3) に基づき、動きベクトルの差分であるマスクを計算する。

$$Mask(x, y) = norm(|C_x - T_x| + |C_x - B_x| + |C_x - L_x| + |C_x - R_x| + |C_y - T_y| + |C_y - B_y| + |C_y - L_y| + |C_y - R_y|) \quad (3)$$

式 (3) において、下付添字は動きベクトルの成分、 $norm$ は正規化関数である。図 11 で説明したとおり、オクルージョン領域では正確な動きベクトルが検出できないため、検出される動きベクトルはその周囲のベクトルとは異なるものが検出される。マスクはその周囲との差分をとらえるものである。

③ マスク境界平滑化：ブロック歪み対策として、マスクをピクセル単位で平滑化し、破綻マスクとする。

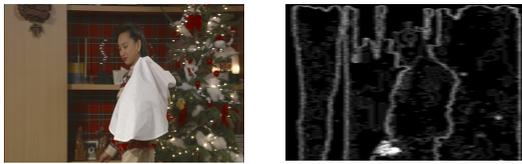
④ 補間処理切替え：破綻マスクに応じて、動き補償/非動き補償を切り替える。

本処理において、① におけるブロック単位は大きすぎると使用メモリサイズが大きくなり、かつ、正しく補間された領域まで非動き補正処理されてしまう。逆に小さければメモリ消費は減らせるが、小領域のベクトルの乱れに敏感に反応してしまう。我々は、表 2 に示す 3 種類のブロックサイズに対して、数種類のオクルージョンシーンで効果を比較検討した。その結果、水平 8 画素、垂直 1 画素のブロックサイズで、主観画質評価でその効果を十分に確認することができ、かつ実装面積の観点においても優位であることから、本ブロックサイズを採用することとした。

また、ブロック単位で求めたマスクをそのまま用いた切替えを行うと、その境界部分においてブロック歪みが発生してしまう。そこで、ブロック境界に関しては、図 14、および式 (4) に示すように、対象画素を含めた周囲 16 画素で移動平均処理による平滑化を行うことにより、ブロック歪みを軽減している。

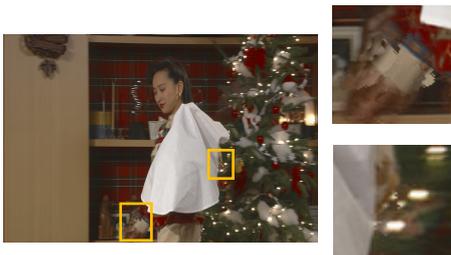


図 14 ブロック境界平滑化
Fig. 14 Boundary smoothing.



(a)入力画像 (b)オクルージョン領域抽出結果

図 15 オクルージョン領域抽出
Fig. 15 Detect of occlusion area.



(a)オクルージョンマスク適用前



(b)オクルージョンマスク適用後

図 16 オクルージョンマスク効果
Fig. 16 Effect of occlusion mask.

$$P1 = \frac{\sum_{i=1}^{16} Si}{16} \quad (4)$$

図 15 に本処理の適用例を示す。図 15 (b) は、図 15 (a) の入力画像に対して、動きベクトルの差分からオクルージョン領域を推定した結果である。差分が大きいくほど白く表示している。図 15 は中央女性が画面右から左へ歩いているシーンであり、女性の周囲を中心に、オクルージョン部分が推定できていることが分かる。次に、マスクに応じてピクセル単位で非動き補償処理へ切替えを行った結果を図 16 に示す。図 16 (a) は本処理適用前、(b) が適用後である。右側の図は、それぞれ橙色で囲った部分の拡大図である。図 16 (b) では周囲との輝度差が平滑化され、(a) で発生している映像破綻が視認されなくなっていることが分かる。また、図 15 (b) を見ても分かる通り、背景部分等へは本処理が適用されないため、MC-FRC による動画のなめらかさの効果は維持されている。

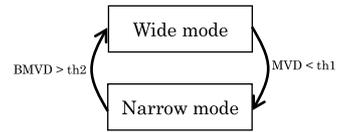


図 17 探索範囲適応切替え
Fig. 17 Adaptive switching of search area.

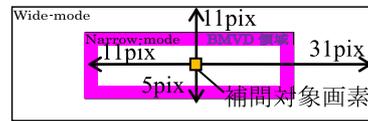


図 18 BMVD
Fig. 18 BMVD.

4.4 時間方向制御処理

次に、MC-FRC におけるフレーム補間処理を時間方向に制御することによって破綻を抑圧する処理（以下、動的制御）に関して説明する。

本処理では、図 2 に示した構成で動きベクトル検出部からの動きベクトル情報をマイコンへ渡し、マイコン側で動きベクトル情報を解析、判定したのち、各映像に適したフレーム補間処理をフレーム単位に動的に切り替える。上記動きベクトル情報の解析には、動きベクトルヒストグラムを利用した。

4.4.1 探索範囲適応可変

動きベクトル探索範囲について、広範囲モード (Wide-mode) と狭範囲モード (Narrow-mode) を設け、動きベクトルヒストグラムの分散傾向に応じて、図 17 のように遷移させる。映像中小きな動きしかない場合には、Narrow-mode とすることで、動きベクトル検出時のマッチングミスを軽減する。一般的に MC-FRC では対象画素の動きベクトル決定の際に、周囲や前フレームの動きベクトル情報に重みをつける処理がされるため、1 度誤検出が起ると広範囲に影響が及ぶ可能性がある。本処理により、こうした動きベクトル誤検出を軽減し、映像破綻の伝搬を回避することが可能となる。

なお、動きベクトルの分散量 (Motion Vector Distribution: MVD) は、所定閾値以上のカウント数を持つ動きベクトルの数で定義する。MVD の値が所定閾値 $th1$ 以下の場合には、小さな動き (Narrow-mode) へと遷移する。また、図 18 に示す Narrow-mode の周囲四方境界部分の MVD (Boundary MVD: BMVD) を定義し、BMVD の値が所定閾値 $th2$ 以上となった場合に大きな動き (Wide-mode) へと遷移する。

本研究においては、ニュースやスポーツ、映画、バラエティ等いくつかのテレビ放送ジャンルに分けて約 200 種類の映像解析による動きベクトルヒストグラムの分散傾向に基づき、図 18 に示すように Wide-mode: 水平 ± 31 , 垂直 ± 11 , Narrow-mode: 水平 ± 11 , 垂直 ± 5 の探索範囲を

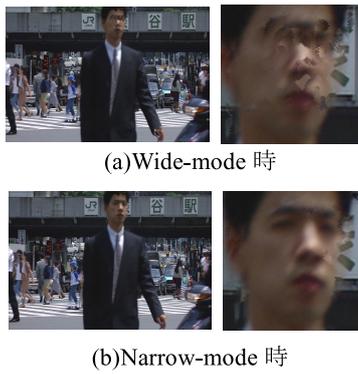
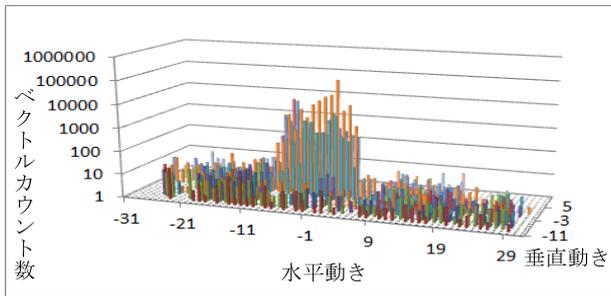
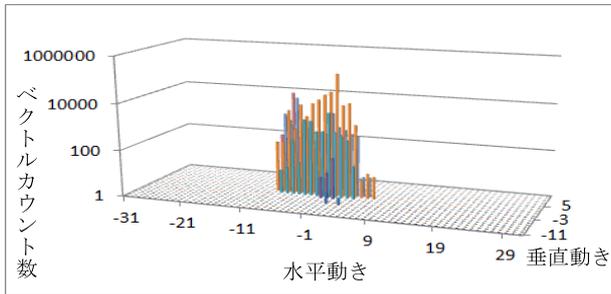


図 19 Wide-mode と Narrow-mode の比較
Fig. 19 Comparison of wide-mode and narrow-mode.



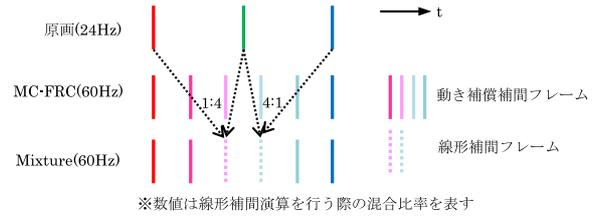
(a)Wide-mode 時



(b)Narrow-mode 時

図 20 動きベクトルヒストグラム
Fig. 20 Vector histogram.

設定した。また、BMVD は Narrow-mode 範囲の内側 1 画素領域とし、Wide-mode と Narrow-mode の切替えを行うマイコン上プログラムを構成した。また、Wide-mode と Narrow-mode の遷移にはヒステリシスを持たせる構成とし、頻繁な切替えが起こることを防止している。図 19 に本手法の効果の一例を示す。また、図 20 にそれぞれの動きベクトルヒストグラムを示す。本シーンにおいては、特に大きな動きはないが、Wide-mode で探索をした場合、マッチングミスや周囲情報影響により、図 20 (a) に示すように動きベクトルが大きく分散してしまう。その結果図 19 (a) のように男性の顔の部分で目立つ映像破綻が発生する。本手法適用により、Narrow-mode 探索によって動きベクトルの分散を抑制 (図 20 (b)) することで、図 19 (b) に示すように顔の破綻を改善している。



※数値は線形補間演算を行う際の混合比率を表す

図 21 混合補間モード

Fig. 21 Mixture mode.

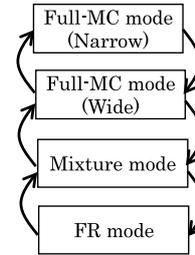


図 22 動的制御

Fig. 22 Dynamic control.

表 3 遷移状態

Table 3 Status.

状態	説明
Full-MC mode (Narrow)	全ての補間フレームを動き補償型で生成 (狭範囲探索モード)
Full-MC mode (Wide)	全ての補間フレームを動き補償型で生成 (広範囲探索モード)
Mixture mode	補間フレームの所定フレームを線形補間で生成
FR mode	同一フレーム繰り返しによる FRC

4.4.2 混合補間モード

混合補間モードについて、図 21 に示す 24 Hz→60 Hz (2.5 倍) MC-FRC 処理を例に説明する。24 Hz→60 Hz MC-FRC 処理では、3 枚のキーフレームから 4 枚の補間フレームを生成する。混合補間モードでは、この 4 枚の補間フレームのうち、2 枚を線形補間フレーム (時間方向重心位置を考慮) に置き換えて構成する。つまり、設定した探索範囲ではとらえきれないような巨大な動き、高速な動きを含む映像の場合に本モードを適用することで、破綻の見え方を軽減させる。動き補償による補間フレームも 2 枚は残していることにより、すべての補間フレームを線形フィルタ処理で生成した画像と比較して、動画画質改善効果を保つことが可能である。図 21 において、線形補間フレームを挿入する位置に関しては、時間方向の重心ずれが少なくなる位置に挿入することで、より視覚的に違和感のない動画画質を得ることに貢献している。

4.4.3 動的制御

4.4.1 項、4.4.2 項で説明した制御を動的に切り替える。状態遷移ダイアグラムを図 22 に、またそれぞれの状態説明を表 3 に示す。

Full-MC mode においては、4.4.1 項記載の Narrow と

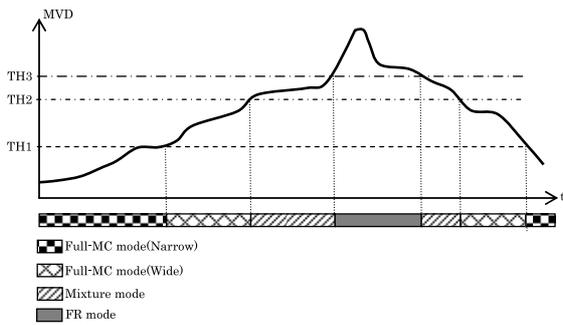


図 23 状態遷移例

Fig. 23 Status example.

Wide の 2 モードが存在する。

状態遷移の一例を図 23 を用いて説明する。図 23 において、横軸は時間、縦軸は動きベクトル分散量 (MVD) である。図の下部には FRC の動作状態を示している。本例では、BMVD の記載を省略している。MVD が閾値 TH1 未満の場合、つまりあまり大きな、もしくは複雑な動きがないシーンでは Full-MC mode の Narrow-mode で動作する。MVD が TH1 以上、もしくは BMVD が所定閾値以上の場合 (図示せず)、つまり大きな動き、複雑な動きが見られるシーンにおいては Full-MC mode の Wide-mode へ移行する。MVD が閾値 TH2 を超える、大きな、高速な動き物体が多数存在する場合には混合補間モードへ移行する。さらに MVD が閾値 TH3 を超える、探索範囲を大きく超える動き、シーンチェンジ等においては FR-mode (フレームリピート) へ遷移する。閾値 TH1~TH3 を独立に設定することで、映像破綻の少ない最適な動画画質を実現することができる。

なお、状態遷移の際には、時間ヒステリシスを持たせており、各モード間の頻繁な切替わりを抑制している。

5. 実験結果

5.1 画質に関する評価

本手法を用いて、複数のサンプル画像 [12] による以下の評価を行った。

- (1) PSNR 測定
- (2) SSIM [9] 測定
- (3) 動画画質評価

(1), (2) は生成された補間フレームと基準画像との PSNR 値, SSIM 値をそれぞれ算出する。(3) に関しては, MC-FRC の効果である動画画質の指標化を試みる。一般的な 5 段階尺度主観評価を実施し, (1), (2) との相関性を検証する。

5.1.1 PSNR, SSIM 測定

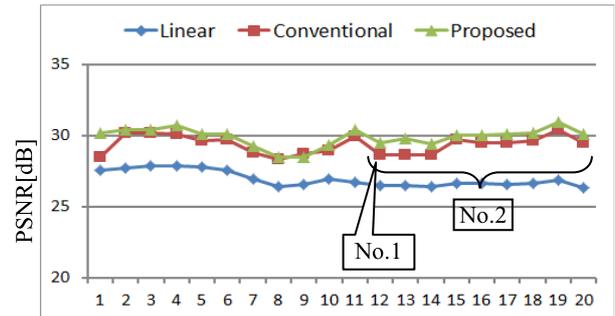
表 1 に示した代表的な破綻シーンに該当するサンプル画像 3 種類に関して、本提案と従来手法 (動きベクトル検出にブロックマッチングを用いた図 1 の構成) の算出値を表 4 に示す。なお、値は 100 フレームの平均値である。

従来手法と比較して微差であるが上回っている (平均で PSNR : 0.63 dB, SSIM : 0.003 向上)。

表 4 PSNR, SSIM 測定値

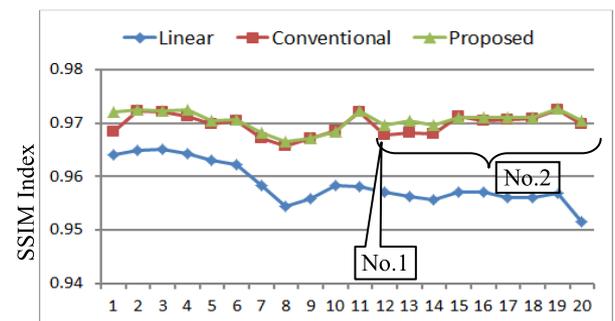
Table 4 PSNR, SSIM performance comparison.

Contents	PSNR[dB]		SSIM	
	Conventional	Proposed	Conventional	Proposed
Crowded_Crosswalk	29.36	29.90	0.969	0.970
Streetcar	31.69	32.19	0.970	0.976
Woman_with_Bird_Cage	33.67	34.52	0.976	0.977



フレーム No.

(a)PSNR 測定.



フレーム No.

(b)SSIM 測定.

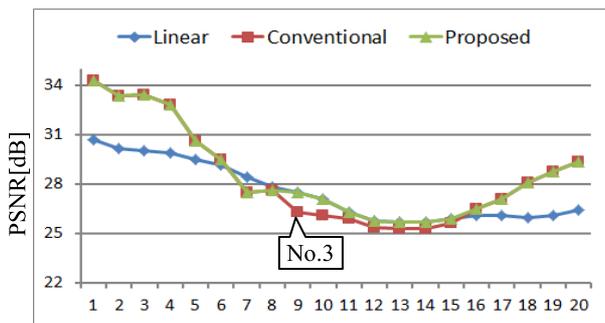
図 24 時系列データ (Crowded_Crosswalk)

Fig. 24 Time-series data.

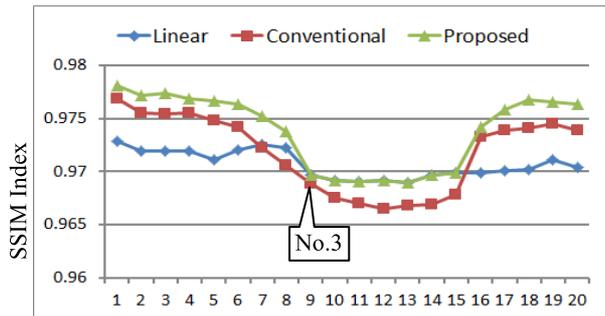
5.1.2 動画画質評価

次に図 24, 図 25 に、5.1.1 項で測定した 2 つのシーンに対し、PSNR, SSIM 値を時系列 (20 フレーム分) に並べたものを示す。線形フィルタ処理による結果も併記している。また、本シーンを動画で評価した際の主観評価 (被験者 5 名) 結果を図 26 に示す。主観評価の際には映像に違和感のある部分を別途コメントいただく形式とした。主観評価尺度は表 5 に、評価コメントは表 6 にそれぞれ示す。図 24, 25 に、表 6 で示した 3 つの破綻シーンの発生フレーム個所を併記する。

まず、図 26 の主観評価の結果より、表 4 の結果と比較し、提案手法の優位性がより明らかとなっている。被験者からのコメントと時系列データ図 24, 25 を見ると、映像



フレーム No.
(a)PSNR 測定.



フレーム No.
(b)SSIM 測定.

図 25 時系列データ (Streetcar)

Fig. 25 Time-series data.

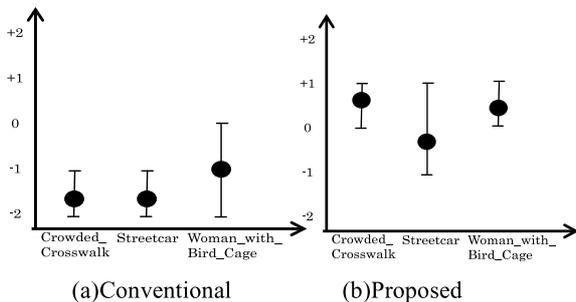


図 26 主観評価結果

Fig. 26 Subjective evaluation.

表 5 5段階尺度評価

Table 5 Evaluation words.

尺度値	映像品質 (破綻の見え方)
+2	分からない
+1	目立たない
0	やや目立つ
-1	目立つ
-2	非常に目立つ

の中で動きの変化があった場合における見え方の差が出ていることが分かる。たとえば図 24 のシーン No.1 付近は、表 6 に示すように女性が手を振りながら画面中央に入ってくるシーンである。実際このシーンにおいては、提案手

表 6 映像破綻シーンに関するコメント例

Table 6 Comments of image artifacts scenes.

No.	Contents	映像破綻が目立つシーン
1	Crowded_Crosswalk	手前女性が入ってくる時
2		手前女性の周囲
3	Streetcar	横切っていく車

表 7 VA 値の比較

Table 7 VA performance comparison.

Contents	Conventional	Proposed
Crowded_Crosswalk	0.521	0.455
Streetcar	0.874	0.674

法では Full-MC mode (Wide) で動作しており、主にオクルージョンマスク機能の効果が表れていると考えられる。

つまり、図 24, 25, 表 6 により、主観評価において映像に違和感を感じる部分は、オリジナルフレームとの差分値が前後フレームと比較して大きくなる瞬間のシーンと一致する傾向が見えることに着目し、式 (5) で表す変動率平均 (Volatility Average : VA) という新たな指標を導入する。式 (5) において、N は補間フレーム数、PSNR(i) とは i 番目の補間フレームの PSNR 値を表す。本指標はオリジナルフレームとの差分のばらつきを示すものである。本提案手法においては、表 7 に示すようにこの VA の値が従来手法よりも優れた値を示しており、主観評価と一致する。ばらつきの少ない安定的な画質表現が、人間の目で感じられる動画画質の差を生み出しているものと考えられる。

図 25 のシーン No.3 付近は、高速に横切る車が複数台現れるシーンである。この車の動きは探索範囲を超えており、従来手法では映像破綻が非常に目立つ。本提案では、このシーンにおいては線形補間処理へ動的制御されており、結果的に VA の値を低く抑えることに成功している。

$$VA = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |PSNR(i-1) - PSNR(i)|}{N} \quad (5)$$

5.2 演算量に関する評価

本手法においては、4.2 節で述べた動きベクトル検出部における演算量削減に加え、4.4 節で述べたように大きな動きに対しては動き補償を行わず、線形補間フレームを採用することにより、大きな動きをカバーするような動きベクトル探索範囲は不要としている。たとえば表 6 の No.3 で記載したシーンの車は、水平 117 画素の動きをしており、この動きをカバーするためには、水平 ±60 画素程度の探索範囲が必要となる。垂直の探索範囲を 4.4.1 項で述べたように ±11 画素とし、5×5 ブロックマッチング法を用いた場合、1つの動きベクトルを算出するために必要な相関演算量は、(5×5)×(23×121) = 69575 回となる。それに対

表 8 回路実装結果

Table 8 Circuit implementation.

項目	内容
回路規模	ロジック:3Mgate, SRAM 3.9Mbit
LSI プロセス	90nm
動作速度	150MHz
対応解像度	RGB 4:4:4 1920×1080

し、本手法では、 $5 \times (23 \times 63) = 7245$ 回であり、約 1/10 の演算量削減が可能であると考ええる。

5.3 回路実装結果

本技術をシステム LSI へ実装した。結果を表 8 にまとめる。60 Hz のフル HD 動画をを入力し、LSI 内部で 120 Hz へ変換、シミュレーション画像と出力画像の一致確認と、120 Hz 対応モニターへ出力し、リアルタイム動作と動画画質向上を確認した。

6. おわりに

動き補償型フレーム変換処理において、高精度な動きベクトル検出手法と、映像破綻抑圧手法を開発し、低処理量ながら高品位動画表示システムを実現した。実験結果から補間フレームの画質向上に加え、動画視認性の向上が実現できることを確認した。

動き補償型フレームレート変換の品質は、動画画質の指標も重要である。本提案はその可能性の 1 つと考える。今後、4K2K、スーパーハイビジョン等への MC-FRC 適用へ向け、さらなる研究が望まれる。

参考文献

- [1] 田中, 大村, 岡田, 大塚, 栗田, 合志, 二宮, 西澤: 動き補正型フレーム数変換法を用いた HDTV-PAL 方式変換装置の構成と画質評価, テレビ誌, Vol.J70-D, No.8, pp.1535-1545 (1987).
- [2] 坂, 高村, 八島: 高フレームレート映像の符号化特性に関する考察, PCSJ, P-1.02 (Nov. 2004).
- [3] 青木, 半谷, 杉山: フレームレート変換による LCD 受像画質の総合改善, 映メ技報, Vol.29, No.16, pp.1-4 (2005).
- [4] Choi, B.T., Lee, S.-H. and Ko, S.-J.: New frame rate up-conversion using bidirectional motion estimation, *IEEE Trans. Consum. Electron*, Vol.46, No.3, pp.603-609 (2000).
- [5] Jeon, B.-W., Lee, G.-I., Lee, S.-H. and Park, R.-H.: Coarse-to-fine frame interpolation for frame rate up-conversion using pyramid structure, *IEEE Trans. Consum. Electron*, Vol.49, No.3, pp.499-508 (2003).
- [6] Ha, T., Lee, S. and Kim, J.: Motion compensated frame interpolation by new block-based motion estimation algorithm, *IEEE Trans. Consum. Electron*, Vol.50, No.2, pp.752-759 (2004).
- [7] Yang, S.-H. and Yang, C.-C.: Fast frame rate up-conversion based on multiple frames, *ICME*, pp.1-4, IEEE (2011).
- [8] Kang, S.-J., Yoo, D.-G., Lee, S.-K. and Kim, Y.H.:

- Design and Implementation of Median Filter based Adaptive Motion Vector Smoothing for Motion Compensated Frame Rate Up-Conversion, *Proc. 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics, ISCE'2009*, pp.745-748 (May 2009).
- [9] Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R. and Simoncelli, E.P.: Image quality assessment: From error visibility to structural similarity, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.13, No.4, pp.600-612 (2004).
- [10] Choi, B.D., Han, J.W., Kim, C.S. and Ko, S.J.: Motion-compensated frame interpolation using bilateral motion estimation and adaptive overlapped block motion compensation, *IEEE Trans. Circuit and System for Video Technology*, Vol.17, pp.407-416 (April 2007).
- [11] 東, 渡辺: グローバル動き補償を用いた背景フレーム補間手法に関する検討, 情報処理学会第 70 回全国大会 (2008).
- [12] 標準テレビジョン方式・システム評価用標準動画像, 一般社団法人映像情報メディア学会.



萩野 昌宏 (正会員)

1996 年金沢大学工学部電気情報工学科卒業。1998 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株) 日立製作所に入社。画像処理技術に関する研究開発に従事。



高野橋 健太

2005 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年 (株) 日立製作所入社。画像処理技術に関する研究開発に従事。日本医用画像工学会会員。



福田 伸宏

2006 年 (株) 日立製作所中途入社。画像処理技術に関する研究開発に従事。



中嶋 満雄

1981 年 (株) 日立製作所入社。画像処理技術に関する研究開発に従事。



浜田 宏一

1996年東京大学大学院修士課程修了。
2003年より、(株)日立製作所中央研
究所にて、画像処理技術に関する研究
開発に従事。博士(情報理工学)。電
子情報メディア学会、映像情報メデ
ィア学会各会員。