

視覚系の積分効果と時空間コントラスト感度を考慮した フレームレート変換法の検討

Frame-rate Conversion Method Considering Human Vision Properties

松尾 康孝[†]
Yasutaka Matsuo

境田 慎一[†]
Shinichi Sakaida

1. はじめに

本稿では、シネマ映像をスーパーハイビジョン放送に用いることを目的として、24 から 120 フレーム/秒へのフレームレート変換法を提案する。提案法は、時空間コントラスト補正を用いた線形補間フレーム内挿を行うことを特徴とする。提案法を用いることで、簡便かつ高画質なフレームレート変換を行うことができる。

2. フレームレート変換法

フレームレート変換は、シネマとテレビジョンのような映像方式変換に用いられる[1]。ほかにもフリッカ低減や、液晶や有機 EL などのホールド型モニタの動きぼやけ改善のような表示系の画質改善に用いられる[2]。フレームレート変換では、フレーム内挿法を用いて内挿フレーム画像を生成する。表 1 にフレーム内挿法とその適用例を示す。以下、2.1 と 2.2 節ではフレーム内挿法の詳細と課題、2.3 節では時空間コントラスト感度変化について説明する。

2.1 フレーム内挿法の詳細

0 次補間内挿法では、内挿位置において、過去の標本位置の信号値（または任意の信号値）を保持する。同方法の映像方式変換への適用例としては、シネマ映像をハイビジョン放送する際の映像方式変換に用いられる 2-3 プルダウン法[1]があげられる。また表示系の画質改善への適用例としては、シネマ映像を映画館で上映する際のフリッカ改善に用いられる 0 次ホールド複数回表示法、ホールド型モニタの動きぼやけ改善に用いられる間欠表示法（黒フレーム挿入法）があげられる。

動き補正内挿法や線形補間内挿法では、内挿位置において、過去および未来の標本位置の信号値から動き補正や線形内挿により信号値を生成する。同方法の映像方式変換への適用例としては、NTSC や PAL などの異なるテレビジョン方式間の変換に用いられる動き補正内挿法と線形補間内挿法の組み合わせ法があげられる[3]。また表示系の画質改善への適用例としては、ホールド型モニタの動きぼやけ改善に用いられる倍速表示法があげられる。

2.2 フレーム内挿法の課題

2.2.1 0 次補間内挿法

0 次補間内挿法は、実装が容易であるが、ジャーキネスの発生が課題となる。ジャーキネスの発生は、映画のエンドロールにおいて、文字が垂直にスクロールする際に顕著である。この原因としては、約 0.1 秒間と言われる視覚系の積分効果が考えられる[4]。この積分効果により、CG (Computer Graphics) や時間方向シャッタが入った映像の

表 1 フレーム内挿法とその適用例

フレーム内挿法	適用例 (方式名)	
	映像方式変換	表示系の画質改善
0 次補間内挿法	・シネマとテレビジョンの変換 (2-3 プルダウン法)	・フリッカ低減 (0 次ホールド複数回表示法) ・動きぼやけ改善 (間欠表示法)
動き補正内挿法 線形補間内挿法	・異なるテレビジョン方式間の変換	・動きぼやけ改善 (倍速表示法)

ように動きぼやけが少ないオブジェクトが大きなフレーム間動き量を持つ場合は、多重像が検知されて大きな主観画質低下を招くことが考察される。この課題の解決法としては、間欠表示法（黒フレーム挿入法）があげられる。同方法は、フレームレート変換後の動画像が本来持つ動きの滑らかさを概ね得ることができる[5]。しかしフレームレートを 5 倍にする場合は輝度が 1/5 に低下するため、モニタのバックライトもしくは動画像信号の輝度値を 5 倍に補償する必要がある。ただしこの補償は、HDR (High Dynamic Range) モニタのような高輝度モニタにおける間欠表示法や暗い動画像における黒フレーム挿入法の適用においては有効であるが、一般の動画像信号には適用が困難である。

2.2.2 動き補正内挿法と線形補間内挿法

動き補正内挿法は、動き検出精度が高精度な場合は、高い映像方式変換画質が得られる。しかし、処理量が膨大なうえ、シネマ映像はフレームレートが低いため高精度な動き検出が困難である。そして、動き補正誤りに起因するブロック歪による大きな主観画質低下が課題となる。

線形補間内挿法は、0 次補間内挿法と動き検出精度が高精度な場合の動き補正内挿法の中間の画質であり、動き検出精度などに影響されず安定した画質が得られる。さらに、動き補正内挿法と比較して処理が非常に軽い、線形補間内挿に起因する動きぼやけが課題となる。ただし、シネマ映像が持つ動きぼやけを保持しながらフレームレート変換を行う必要があることなどを考慮すれば、線形補間内挿法でも比較的高い主観画質が得られる可能性が高い。

2.3 時空間コントラスト感度変化

従来のフレームレート変換法は、フレームレート変換によって生じる時空間コントラスト感度変化を考慮していないという課題がある。図 1 に、視覚系の時空間コントラスト感度特性[6]を示す。ここで同図の縦軸は、Michelson コントラストの逆数である。式(1)に Michelson コントラストの計算式を示す。

$$MC = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} MC : \text{Michelson コントラスト,} \\ L_{\max} : \text{最大輝度値, } L_{\min} : \text{最小輝度値} \end{array} \right\}$$

[†] 日本放送協会, NHK

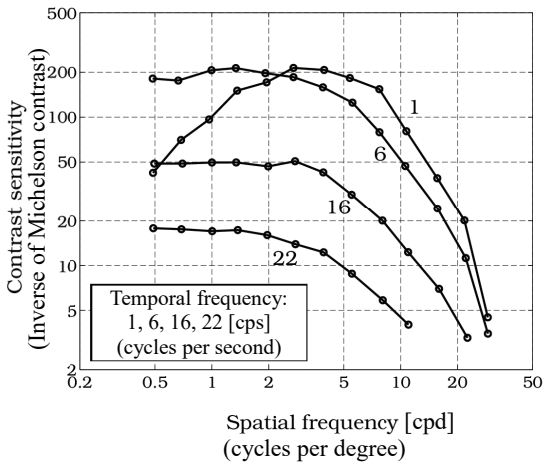


図1 視覚系の時空間コントラスト感度特性

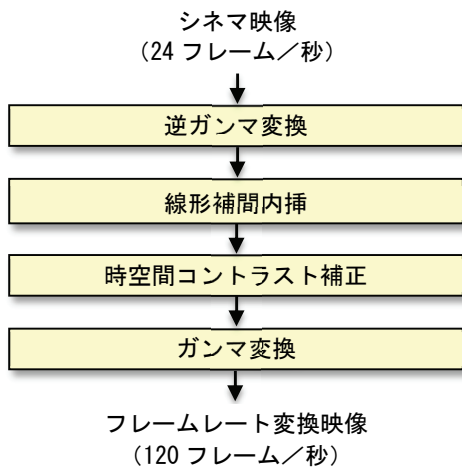


図2 提案法全体図

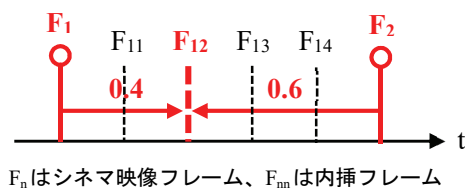


図3 線形補間内挿

同図より、フレームレートが向上すれば視覚系の時空間コントラスト感度が低下するため、動領域の動きぼやけによるコントラスト低下を含む線形補間内挿法でも、比較的高い主観画質が得られる可能性が高い。さらに、本来のシネマ映像には存在しない線形補間内挿によって発生した時間高周波帯域成分を、時空間コントラスト感度特性を考慮して補正することで、高い主観画質が得られる可能性が高いと考えられる。

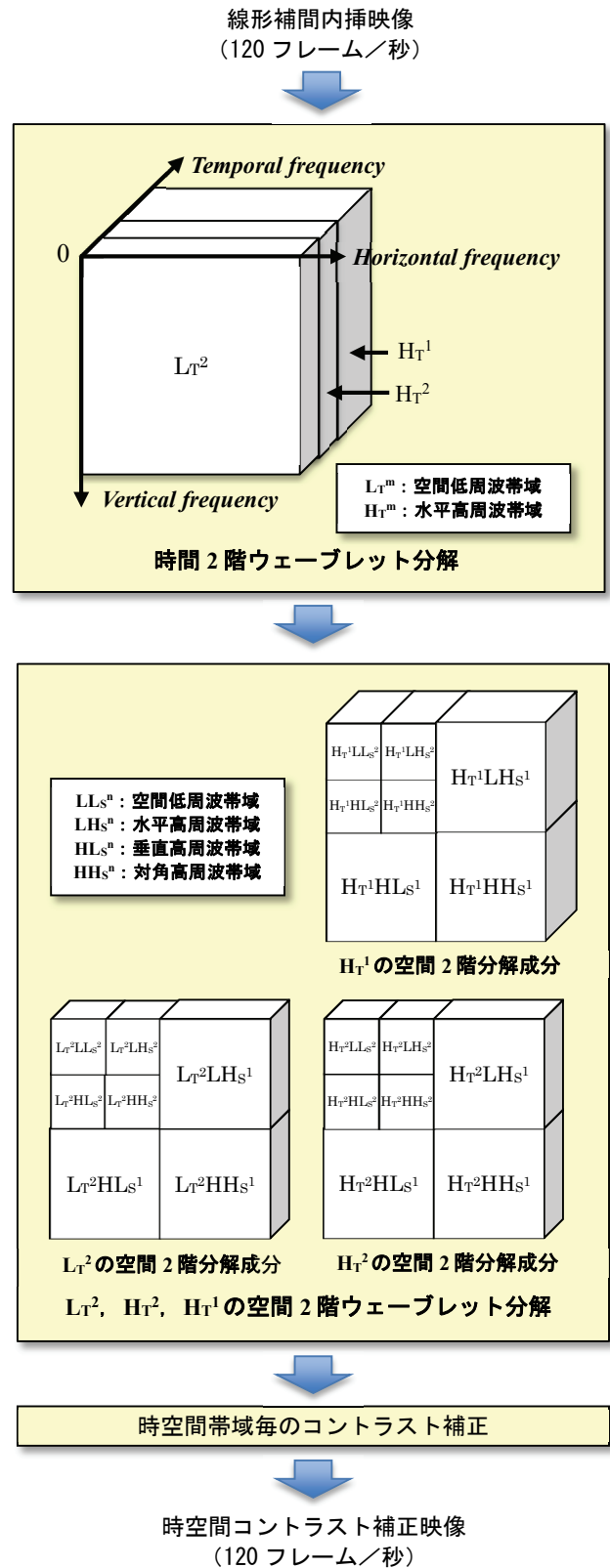


図4 時空間コントラスト補正

3. 提案法

2 章を基に、本稿では時空間コントラスト補正を用いた線形補間内挿によるフレームレート変換法を提案する。図 2 に提案法の全体図を示す。提案法では、シネマ映像の逆ガンマ変換を行ったあと、線形補間内挿法を用いて 24 から 120 フレーム/秒に線形補間内挿する。そして視覚系の時空間コントラスト感度特性を考慮した時空間コントラスト補正を行ったあと、ガンマ変換を行ってフレームレート変換映像を出力する。

以下では、線形補間内挿と時空間コントラスト補正の詳細について説明する。

3.1 線形補間内挿

線形補間内挿法では、内挿位置の前後フレーム画像に内挿比の逆数の重みをかけて足し合わせることで内挿フレーム画像を生成する。図 3 に 24 から 120 フレーム/秒へのフレームレート変換における線形補間内挿処理を示す。同図に示すように、内挿フレーム画像 F_{12} は、フレーム画像 F_1 と F_2 の間における 0.4:0.6 の内挿位置に生成する。内挿フレーム画像 F_{11} , F_{13} , F_{14} も同様に、所定の内挿位置に生成する。式(2)に内挿フレーム画像の算出式を示す。

$$\begin{aligned} F_{11} &= F_1 \times 0.8 + F_2 \times 0.2 & F_{12} &= F_1 \times 0.6 + F_2 \times 0.4 & (2) \\ F_{13} &= F_1 \times 0.4 + F_2 \times 0.6 & F_{14} &= F_1 \times 0.2 + F_2 \times 0.8 \end{aligned}$$

3.2 時空間コントラスト補正

時空間コントラスト補正では、線形補間内挿映像において、図 1 の時空間コントラスト感度特性を用いた時空間コントラスト補正を行う。ここで、線形補間内挿映像の動領域では、線形補間内挿処理より発生する動きぼやけや、シネマ映像撮影時の時間シャッタに起因する動きの不連続性などの画質劣化が生じている。基本的にこれらの画質劣化は、図 1 においてコントラスト感度が低い時間高周波帯域に発生するため検知されづらいと考えられる。しかし、動きぼやけ成分などは時空間コントラスト感度の高い空間低周波帯域に発生するため、必ずしも検知されないわけではない。以上より本補正処理では、120 フレーム/秒の線形補間内挿映像を時空間周波数帯域分解して、各周波数帯域の Michelson コントラストを視覚系の時空間コントラスト感度特性を用いて補正することで、主観画質の向上を目指す。時空間周波数帯域分解はウェーブレット分解により行い、ウェーブレットは線形位相特性を持つ Haar ウェーブレットを用いる。

図 4 に本補正処理の詳細を示す。同図内の時間周波数帯域分解ブロックでは、120 フレーム/秒の線形補間内挿映像を時間方向に 2 階ウェーブレット分解して、時間低周波帯域成分 L_T^2 と時間高周波帯域成分 $\{H_T^m | m=1,2\}$ を抽出する。ここで、 L_T^2 は 0~15 [cps] (cycles per second) の時間周波数成分を持つため、主に 24 フレーム/秒のシネマ映像が持つ時空間周波数成分が含まれる。一方、 $\{H_T^m | m=1,2\}$ は 15~60 [cps] の時間周波数成分を持つため、主に線



(a) Kimono



(b) Park scene

空間解像度	: 1,920×1,080 画素/フレーム
フレームレート	: 24 フレーム/秒 (fps)、 50%シャッタ開口率
階調数	: 8 ビット/画素、 モノクロ (輝度信号)
シーケンス長	: 5 秒
ガンマ	: ITU-R BT.709

図 5 評価映像

形補間内挿処理によって生じた時空間周波数成分が含まれる。そして、 L_T^2 , H_T^2 , H_T^1 の代表値を各々の帯域内の中央値である 7.5, 22.5, 45 [cps] とする。

空間周波数帯域分解ブロックでは、 L_T^2 と $\{H_T^m | m=1,2\}$ の各々を空間方向に 2 階ウェーブレット分解して空間低周波帯域 LL_s 、水平高周波帯域 LH_s 、垂直高周波帯域 HL_s 、対角高周波帯域 HH_s に分解した L_T^2 帯域成分 $\{L_T^2 LL_s^n, L_T^2 LH_s^n, L_T^2 HL_s^n, L_T^2 HH_s^n | n=1,2\}$ と $\{H_T^m | m=1,2\}$ 帯域成分 $\{H_T^m LL_s^n, H_T^m LH_s^n, H_T^m HL_s^n, H_T^m HH_s^n | m=1,2, n=1,2\}$ を抽出する。ここで、シネマ映像の空間解像度を 1,920×1,080 画素、標準観視距離 (視力 1.0 で画素構造が知覚されない観視距離、画面高の 3 倍) から視聴した際の視野角を水平 30 度とすると、 LL_s^2 は 0~8 [cpd] (cycles per degree)、 $\{LH_s^2, HL_s^2, HH_s^2\}$ は 8~16 [cpd]、 $\{LH_s^1, HL_s^1, HH_s^1\}$ は 16~32 [cpd] の空間周波数成分を持つ。シネマ映像の空間解像度を 3,840 (4,096) × 2,160 画素、標準観視距離 (画面高の 1.5 倍) から視聴した際の視野角を水平 60 度としても同様である。そして、 LL_s^1 の代表値を当該帯域内の中央値である 4 [cpd]、 $\{LH_s^1, HL_s^1, HH_s^1\}$ の代表値を各々の帯域内の中央値である 12 [cpd]、 $\{LH_s^1, HL_s^1, HH_s^1\}$ の代表値を各々の帯域内の中央値である 24 [cpd] とする。

コントラスト感度補正ブロックでは、図 1 の時空間コントラスト感度特性を用いて、 L_T^2 を基準に H_T^2 , H_T^1 の時空間コントラストを補正する。補正処理では、 L_T^2 , H_T^2 , H_T^1 の代表値である 7.5, 22.5, 45 [cps] の時空間コントラスト感度特性のデータを、他の時間周波数のデータから内外挿して生成する。そして、 LL_s^1 , $\{LH_s^1, HL_s^1, HH_s^1\}$, $\{LH_s^1, HL_s^1, HH_s^1\}$ の空間周波数帯域毎に、 L_T^2 の時空間コントラスト感度値を基準にして H_T^2 , H_T^1 を補正する。例えば空間周波数帯域 LL_s^1 では、 L_T^2 の代表値である 7.5 [cps] および LL_s^1 の代表値である 4 [cpd] における時空間コントラスト感度値 (約 140) を基準にする。そして、 H_T^2 の代表値である 22.5 [cps] および LL_s^1 の代表値である 4 [cpd] における時空間コントラスト感度値 (約 14)、 H_T^1 の代表値である 45 [cps] および LL_s^1 の代表値である 4 [cpd] における時空間コントラスト感度値 (約 2) が基準の 1/10, 1/70 のため、Michelson コントラスト比で $H_T^2 LL_s^1$ は $L_T^2 LL_s^1$ の 1/10、 $H_T^1 LL_s^1$ は $L_T^2 LL_s^1$ の 1/70 になるように時空間コントラスト感度を補正する。

以上の補正処理により、線形補間内挿映像を視覚系の時空間コントラスト感度特性に応じて補償することができる。

4. 評価

提案法によるフレームレート変換画像の主観画質について、主観評価実験により評価する。図 5 に評価映像、表 2 にフレームレート変換法、表 3 に実験条件を示す。表 4 に示す実験結果より、提案法の MOS (Mean Opinion Score) は、0 次ホールド 5 回表示法よりも Kimono で 1.7、Park scene で 1.01 高く、線形補間内挿法よりも Kimono で 0.27、Park scene で 0.2 高い。以上の結果より、提案法は表 2 の他のフレームレート変換法に比べて、高い主観画質が得られている。提案法は、動きのジャーキネス妨害による主観画質劣化が顕著な 0 次ホールド 5 回表示法と比較して非常に高い主観画質が得られており、動きぼやけなどによる主観画質劣化を持つ線形補間内挿法と比較しても高い主観画質が得られていることがわかる。

5. おわりに

本稿では、時空間コントラスト補正を用いた線形補間内挿法によるフレームレート変換法を提案した。提案法は、線形補間内挿法を用いて生成した 120 フレーム/秒の線形補間内挿映像において、24 フレーム/秒のシネマ映像が本来持たない線形補間内挿法によって発生した時間高周波帯域の時空間コントラスト感度をシネマ映像が持つ時間低周波帯域の時空間コントラスト感度を基準に補正することで、簡便かつ高画質にフレームレート変換が行えることを特徴とする。評価実験では、提案法は他の方法に対して、優位な画質が得られることを示した。提案法を用いることで、120 フレーム/秒のホールド型モニタにおけるシネマ映像の視聴者に向けて、高画質なフレームレート変換映像を提供することができる。さらにモニタにおいてシネマ映像に対する特別な処理を行う場合は、フレーム間差分画像による判定などを用いて 120 フレーム/秒のフレームレート変換映像における 24 フレーム/秒のシネマ映像フレーム画像を抽出し、処理を行うこともできる。

今後は、さらに空間解像度が高いシネマ画像や放送を想定したビットレートで映像符号化した場合について、実験により検証する。

表 2 フレームレート変換法

(a) 0 次ホールド 5 回表示法
(b) 線形補間内挿法
(c) 提案法 (線形補間内挿法 + コントラスト補正法)

表 3 実験条件

主観評価法	単一刺激法 (Single stimulus method)
評価者	専門家 4 名 × 2 回
評価基準	総合画質 (動きのジャーキネス妨害やぼやけを含めて評価)
評価尺度	5 (非常に良い)、4 (良い)、3 (普通)、2 (悪い)、1 (非常に悪い)
評価環境	ITU-R BT.500 に準拠
モニタ	株式会社計測技術研究所 MM-HD120-C

表 4 実験結果 (Mean opinion score)

		フレームレート変換法		
		(a)	(b)	(c)
評価映像	Kimono	2.13	3.58	3.83
	Park scene	2.31	3.12	3.32

参考文献

- [1] C. K. P. Clarke and N. E. Tanton, "Digital standards conversion: Interpolation theory and aperture synthesis", BBC R.D., 1984/20, p.1-47, Dec. (1984)
- [2] Y. Kuroki, T. Nishi, S. Kobayashi, H. Oyaizu, S. Yoshimura, "Improvement of Motion Image Quality by High Frame Rate", SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol.37, Issue 1, p.14-17, Jun. (2006)
- [3] 野尻 裕司, 平林 洋志, 曾根原 源, 岡野 文男, "HDTV 方式変換装置", テレビジョン学会論文誌, Vol.48, No.1, p.84-94, Jan. (1994)
- [4] C. W. Eriksen and J. F. Collins, "Some temporal characteristics of visual pattern", Journal of Experimental Psychology, Vol.74, Issue 4, p.476-484, Aug. (1967)
- [5] 栗田 泰市郎, "ディスプレイの時間応答と動画表示画質", VISION, Vol.24, No.4, p.154-163, Oct. (2012)
- [6] J. G. Robson, "Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system", Journal of the Optical Society of America, Vol.56, p.1141-1142, Aug. (1966)