

動き補償と時空間フィルタによる低照度映像の画質改善

水田 辰也[†] 松田 一朗[†] 深井 寛修[†] 伊東 晋[†]

近年、屋外の監視カメラやドライブレコーダなどの普及に伴い、照明が適切ではない環境下でビデオ映像の撮影が必要となる機会が増えている。一般的なカメラを使用した場合、照度不足によって暗くなってしまった映像をゲインコントロールなどで補正しようとしても、信号成分と同時に雑音成分まで強調されてしまうため、十分な画質を得ることが困難である。そこで、動き補償と時空間フィルタを用いて近傍画素値を積分し、仮想的に開口面積または露出時間を長くすることで、低照度映像の画質を改善する手法を提案する。また、画質改善後の画像を次フレームの処理に再帰的に利用し、処理遅延および演算量を低減する効果についても調査する。

Quality Improvement of Dark Video Using Motion Compensation and Spatio-Temporal Filtering

SHINYA MIZUTA[†] ICHIRO MATSUDA[†] HIRONOBU FUKAI[†] SUSUMU ITOH[†]

Recently, there are increasing chances to capture outdoor scenes under insufficient illumination for video applications such as surveillance cameras and driving video recorders. When the video is acquired by a general purpose camera, it is difficult to obtain high quality images by applying signal level manipulation to dark video because not only signal but also noise components are amplified. This paper proposes a method for improving the image quality based on a virtual exposure technique which integrates neighboring pixels by means of motion compensation and spatio-temporal filtering. In addition, we investigate an effect of recursive filtering where the improved video frame will be used for the processing of the next frame to reduce computation and frame delay.

1. はじめに

近年、屋外の監視カメラやドライブレコーダ、車載カメラなどの普及に伴い、必ずしも照明が適切ではない環境下でビデオ撮影が必要となる機会が増えている。通常、照度が不足している環境では、カメラの露出時間を長くしたり、A/D変換器の前段に設置したアンプのゲインをコントロールすることでカメラの感度のある程度調整することが可能である。しかし露出時間を過度に長くすることは、運動する被写体に動きボケを生じさせるだけでなく、ビデオのフレームレートにも制約を与えてしまう。また、ゲインコントロールによる高感度化は、暗部の雑音成分まで増幅してしまうため、十分な画質を得ることが困難である。A/D変換後のデジタル信号に対してガンマ補正やトーンマッピングの処理を施すこともしばしば行われるが、雑音成分が増幅するという同様な現象に加えて、階調数の低下によって偽輪郭が発生することも問題となる。

夜間の撮影に限定した場合は、赤外線カメラ[1]などの特殊な撮像デバイスを用いることも一つの方法であるが、装置に要するコストの増大は避けられない。また昼間に撮影した画像[2]、あるいはフラッシュ撮影した画像[3]を組み合わせることにより、通常のカメラで取得した低照度映像を高画質化する手法も検討されているが、固定カメラを前提としているなど、適用条件が厳しく制限されている。一方

文献[4]では、空間方向、または時間方向の近傍画素値を積分し、仮想的に画像センサの開口面積、あるいは露出時間を変更する手法が提案されている。この手法では、空間方向と時間方向にそれぞれバイラテラルフィルタ[5]と呼ばれる非線形フィルタを適用し、動きの大きな領域では空間方向のフィルタ出力、静止領域では時間方向のフィルタ出力を優先するように制御を行っている。しかしこの手法では、時間方向と空間方向のフィルタ処理を独立に実行しており、両者のフィルタ出力の優先度を制御するための閾値を適切に設定することが難しい。さらにフレーム間の動きに対しては、特徴点の対応付けに基づいた大域的な補正しか行っていないため、局所的な動きを有する領域では、時間方向のフィルタリングに起因したボケが生じる場合があった。

これらの問題を解消するため、本稿ではブロックマッチング法とパラボラフィッティングに基づいたサブピクセル精度の動き検出手法[6]を導入し、局所的な動きを補償したフレームを対象としてフィルタ処理を適用する。また、空間方向と時間方向のフィルタ処理を統合することにより、仮想的な開口面積と露出時間の制御を同一の枠組で行うことを可能にしている。さらに、画質改善後のフレームを次フレームの処理に再帰的に利用することで動き検出の精度を高め、処理対象となるフレーム数が少ない場合でも、より高い画質改善効果を得る手法についても調査する。

[†] 東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科
Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology,
Tokyo University of Science

2. 時空間フィルタ

2.1 バイラテラルフィルタによる画質改善法

画像信号のエッジ成分を保存しつつ、雑音を除去する非線形フィルタとして、バイラテラルフィルタ[5]が知られている。一般的なバイラテラルフィルタは、図1のように近傍画素値に対してガウス関数に基づいた重み付けを行う。この際、画素間の距離だけでなく、輝度方向の差に対しても、ガウス関数による重み付けを行うことにより、注目画素に類似した輝度値を有する近傍画素のみを選択的に用いることが可能となる。これは、空間方向に類似した輝度値を有する画素を統合し、仮想的に注目画素の開口面積を拡大することで雑音の低減を図っているものとみなすことができる。また、時間方向にバイラテラルフィルタを適用した場合は、輝度値の変化が少ない静止領域において、露出時間を長くするのと同様な効果が期待できる。

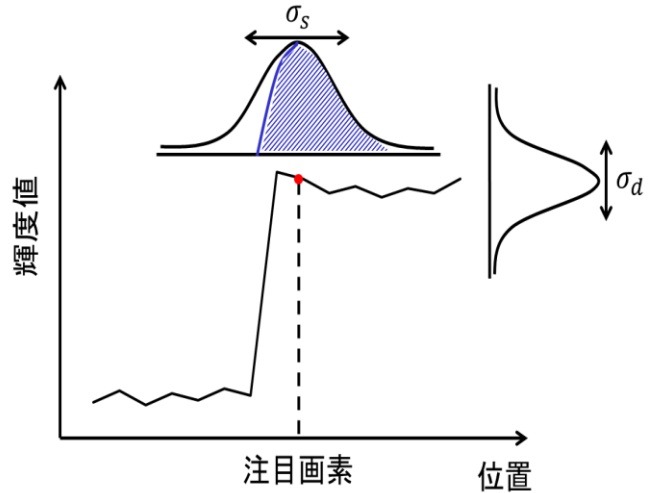


図1 バイラテラルフィルタ

Fig.1 Bilateral filter.

2.2 時空間フィルタへの拡張

本稿では、動画画像信号を時空間方向にサンプリングされた3次元座標の信号 $I(x, y, t)$ で表す。空間方向、時間方向のフィルタサイズをそれぞれ $2n_s + 1$, $2n_t + 1$ とおくと、時空間方向に拡張されたバイラテラルフィルタの出力は次式で与えられる[7]。

$$\tilde{I}(x, y, t) = \sum_{i,j=-n_s}^{n_s} \sum_{k=-n_t}^{n_t} W(i, j, k, d) \cdot I(x+i, y+j, t+k), \quad (1)$$

$$W(i, j, k, d) \propto g(i, \sigma_s)g(j, \sigma_s)g(k, \sigma_t)g(d, \sigma_d), \quad (2)$$

$$d = I(x+i, y+j, t+k) - I(x, y, t) \quad (3)$$

但し、 $g(\cdot, \sigma)$ は標準偏差 σ のガウス関数であり、空間方向、時間方向、輝度方向に対してはそれぞれ異なる標準偏差の値 σ_s , σ_t , σ_d が与えられている。

(2)式においてフィルタ係数 $W(i, j, k, d)$ の和が $T > 1$ となるように正規化を行うことにより、撮像系における画素の開口面積、または露出時間を T 倍にするのと同様の効果を得ることができる。図2に時空間フィルタに用いる画素の配置を示す。

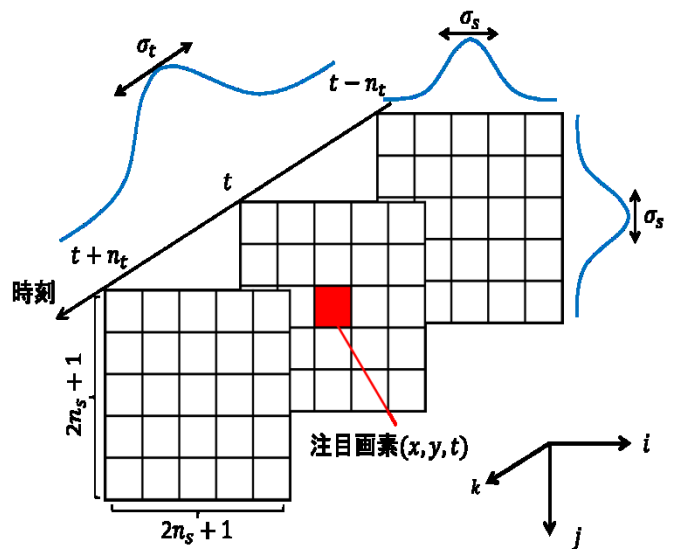


図2 時空間フィルタ

Fig.2 Spatio-temporal filter.

3. 動き補償のための動ベクトル検出

2章で述べた時空間フィルタは、フレーム間の被写体の動きを考慮していないため、静止領域以外では時間方向の重み付けによる画質改善効果を十分に得ることができない。そこで、本手法では当該フレームと異なる時刻のフレームにおいて、 16×16 画素のブロック単位で動ベクトルを検出し、当該フレームに対する局所的な動きを補償する。具体的には、まず動ベクトルの探索範囲を ± 15 画素に設定し、ブロックマッチング法を適用することで整数画素精度の動

ベクトル (v_x, v_y) を検出する。但し、ブロックマッチングのコスト関数にはSSD (Sum of Squared Differences)を採用し、動ベクトルの探索時に得られるコスト関数の値 $D(v_x, v_y)$ を一時的に記憶しておく。

次に、パラボラフィッティングと呼ばれる手法[6]を用いて動ベクトルの高精度化を図る。パラボラフィッティングは、コスト関数が最小となる座標の近傍で2次関数(放物線)による当てはめを行い、その最小値の座標より動ベクトルのサブピクセル位置を推定するものである。図3に水平方向のパラボラフィッティングの様子を示す。水平、垂直方向の動ベクトルのサブピクセル精度の成分を (d_x, d_y) とおくと、それぞれの値は次式により求められる。

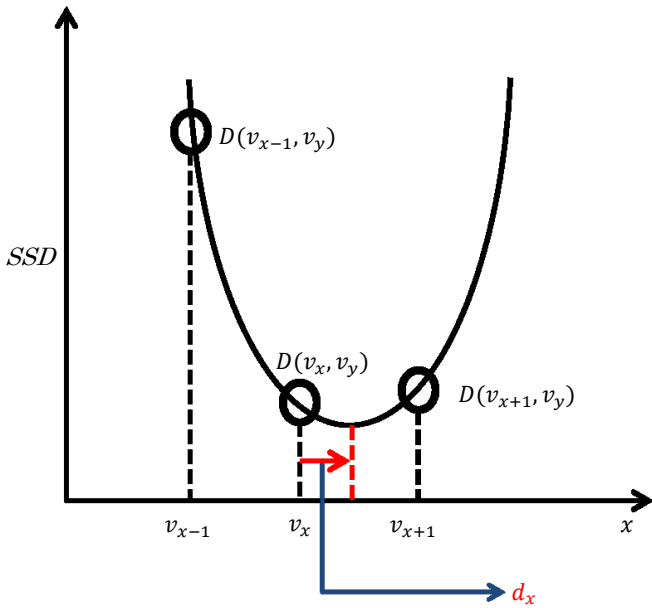


図3 パラボラフィッティング
Fig.3 Parabola fitting.

$$d_x = \frac{D(v_{x-1}, v_y) - D(v_{x+1}, v_y)}{2D(v_{x-1}, v_y) - 4D(v_x, v_y) + 2D(v_{x+1}, v_y)} \quad (4)$$

$$d_y = \frac{D(v_x, v_{y-1}) - D(v_x, v_{y+1})}{2D(v_x, v_{y-1}) - 4D(v_x, v_y) + 2D(v_x, v_{y+1})} \quad (5)$$

4. 再帰的なフィルタ処理の導入

文献[7]では、時間方向のフィルタ範囲を $n_t = 1$ と設定し、前後フレームに対して整数画素精度の動ベクトル (v_x, v_y) による動き補償を適用していた。しかし、次フレームを用いてフィルタ処理を行うと1フレーム分の遅延が避けられず、また過去のみのフレーム数を増やすと演算量の増大を招いてしまうため、リアルタイムでの処理が要求される用途では問題が生じる。そこで、本稿では図4のように画質改善後のフレームを次フレームに対して再帰的に利用することで、2フレームのみを用いた場合でも、十分な画質改善効果が得られる手法を提案する。具体的には4章の動き検出において、前フレームのフィルタ出力の明るさを補正した $\tilde{I}(x, y, t)/T$ を使用すると共に、現フレームのフィルタ出力を次式によって算出する。

$$\tilde{I}(x, y, t) = \sum_{i,j=-n_s}^{n_s} W(i, j, 0, d) \cdot I(x + i, y + j, t) + \sum_{i,j=-n_s}^{n_s} \frac{W(i - d_x, j - d_y, -1, d)}{T} \cdot \tilde{I}(x + v_x + i, y + v_y + j, t - 1) \quad (6)$$

5. 実験

本手法の画質改善効果を定量的に評価するため、10種類のモノクローム動画像（352×288画素、30fps、10フレー

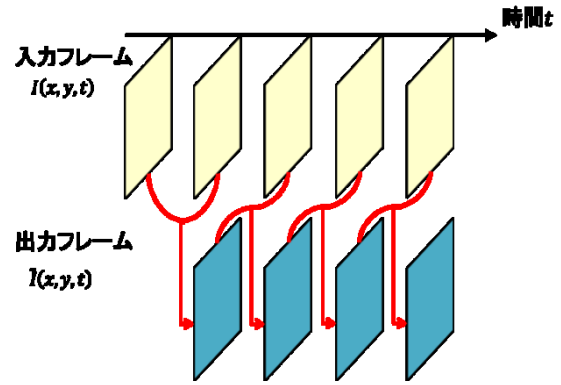


図4 再帰的フィルタ処理
Fig.4 Recursive filtering process.

ム)を対象として実験を行った。まず、テスト動画像の各フレームの輝度値を1/2倍にし、標準偏差 $\sigma = 6$ のガウス雑音を加えたものを低照度環境下で撮影された動画像と仮定する。これらの動画像に対し、フィルタ係数の和を $T = 2$ と設定して原画像の復元を試みた。得られた画質を、10フレーム分のPSNRの平均値で評価した結果を表1に示す。なお、空間方向のフィルタの適用範囲は $n_s = 2$ と設定し、バイラテラルフィルタに用いるガウス関数の標準偏差は、予備実験においてPSNRが平均的に良くなる値を調査した結果より、それぞれ $\sigma_s = 1$ 、 $\sigma_t = 20$ 、 $\sigma_d = 10$ を採用した。表1より、2フレームのみを使用するという条件の下で、再帰的なフィルタ処理を導入した結果、PSNRが0.02~0.86 dB向上している様子を確認できる。

さらに、車載カメラによって撮影された実際の夜間走行映像の画質改善を試みた結果を図5に示す。ただし、入力画像はカラー映像であるため、R、G、B信号に対して独立に本手法を適用することとした。これより、路面や人物、建造物の視認性が向上していることがわかる。また、図5(c)の一部を拡大した領域を、単純に入力画像をT倍して表示した結果と共に図6に示す。これより、粒子状の雑音が大幅に低減し、主観的な画質も改善されている様子を確認できる。

表1 テスト動画像におけるSN比の比較(dB)
Table.1 Comparison of PSNRs for test sequences (dB).

画像名	非再帰フィルタ	再帰フィルタ
container	31.63	32.21
carphone	33.28	34.02
coastguard	30.45	30.45
foreman	32.79	33.40
hall	32.32	32.99
mobile	29.56	29.58
mother_daughter	33.78	34.63
news	32.52	33.23
silent	32.18	32.80
tempete	30.22	30.39



(a) 入力画像 (時刻 $t-1$)



(b) 入力フレーム (時刻 t)



(c) フィルタ出力 (時刻 t)

図5 夜間走行映像における実験結果
Fig.5 Results for an actual night scene.



(a) 入力画像を T 倍した結果



(b) 本手法

図6 処理結果の拡大図
Fig.6 Enlarged area of the processed images.

6. むすび

本稿では、局所的な動き補償と時空間フィルタによる低照度映像の画質改善手法について述べた。また、処理対象フレームを2枚に限定した場合について、フィルタ出力を再帰的に利用することで画質改善が可能であることを示した。これにより、フレーム遅延および演算量が低減し、夜間走行時の運転支援など、リアルタイム処理が要求される分野への応用が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 青木正喜, “歩行者検出における遠赤外線応用動向”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.86, pp.25-28, (2006).
- 2) Y. Rao, Z. Chen, M.T. Sun, Y.F. Hsu and Z. Zhang, “An Effective Night Video Enhancement Algorithm”, Proc. of Visual Communications and Image Processing, (VCIP 2011), pp.1-4, (2011).
- 3) G. Petschnigg, M. Agrawala, H. Hoppe, R. Szeliski, M. Cohen and K. Toyama, “Digital Photography with Flash and No-Flash Image Pairs”, ACM Trans. on Graphics (Proc. of SIGGRAPH 2004), Vol.23, No.3, pp.664-672, (2004).
- 4) E. P. Bennett and L. McMillan, “Video Enhancement Using Per-Pixel Virtual Exposures”, ACM Trans. on Graphics (Proc. of SIGGRAPH 2005), Vol.24, No.3, pp.845-852, (2005).
- 5) C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral Filtering for Gray and Color Images”, Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV-98), pp.839-846, (1998).
- 6) 清水雅夫, 奥富正敏, “画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-II, No. 12, pp.1791-1800, (2002).
- 7) 水田辰也, 松田一朗, 青森 久, 伊東 晋, “動き補償と時空間フィルタによる低照度映像の高画質化”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, No.D-11-22, p.22, (2012).