

修 士 論 文

近赤外画像を用いた 低照度シーンにおける画質改善

Image Enhancement with Near-Infrared Images
for Low-Lit Scene



東京大学大学院
情報理工学系研究科
電子情報学専攻

076435

松 井 壮 介

指導教員

佐藤 洋一 准教授

平成21年 2月

概要

本論文では、低照度シーンを撮影した画像の画質改善を目的とし、近赤外フラッシュを照射して同時に撮影されたカラー画像と近赤外画像を用いることにより、カラー画像中に含まれるノイズとブラーを効果的に除去する手法を提案する。低照度画像のノイズ除去について、従来ではフラッシュ撮影によって得られたカラー画像を併用して低照度画像のノイズ低減を実現していたが、複数回の撮影が必要となるため静止シーンにしか適用できないという課題が存在した。これに対し、提案手法ではカラー画像と近赤外画像を同時に撮影でき、動きのあるシーンに対しても適用することが可能となった。また、低照度シーンを撮影する際に、しばしば発生する被写体のぶれや手ぶれについても、ノイズ除去で用いた同様の装置を用いることによって、除去することが可能となった。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	画質改善に関する研究の分類	5
2.2	低照度シーンの画質改善に関する研究	5
2.2.1	複数枚のカラー画像を用いた低照度シーンのノイズ除去	6
2.2.2	近赤外画像を用いた低照度シーンのノイズ除去	7
2.2.3	近赤外画像を用いた低照度シーンのコントラスト改善	9
2.2.4	固定カメラからの観測画像群に基づく夜間画像改善	10
2.2.5	動画に対するコントラスト改善	13
2.3	ノイズ除去に関する研究	16
2.3.1	類似テクスチャの加重平均によるノイズ除去	16
2.4	ブラー除去に関する研究	19
2.4.1	2台のカメラを使用する手法	19
2.4.2	ブラー画像とノイズ画像を用いる手法	23
2.4.3	1枚の画像からブラーカーネルの推定とブラーを除去を同時 に行う手法	25
2.4.4	本研究の位置づけ	25
第3章	提案手法	27
3.1	撮影装置	27
3.2	低照度シーンのノイズ除去	28
3.2.1	ノイズ除去手法の概要	28
3.2.2	Dual Bilateral Filter	28

3.2.3	近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm	31
3.3	低照度シーンのブラー除去	34
3.3.1	ブラーカーネルの除去の概要	34
3.3.2	ブラーカーネルの推定	34
3.3.3	デコンボリューション	35
第4章	実験結果	37
4.1	低照度シーンのノイズ除去実験	37
4.1.1	動きのある物体を撮影した画像に対するノイズ除去	37
4.1.2	静止物体を撮影した画像に対するノイズ除去	37
4.1.3	近赤外画像の効果	38
4.1.4	他の手法との比較	44
4.1.5	提案手法の失敗例	45
4.2	低照度シーンのブラー除去	47
4.2.1	推定されたブラーカーネルの定量的評価	47
4.2.2	ブラー除去結果	49
第5章	結論	51
5.1	本論文のまとめ	51
5.2	今後の課題	52
5.2.1	撮影装置の改良	52
5.2.2	ハイライトを含む場合の処理	52
5.2.3	近赤外画像とカラー画像の関係	52
5.2.4	ブラー除去	53
謝辞		54
発表文献		59

目次

1.1	ブラー画像とノイズ画像．Sony DSLR-A300 で撮影	2
2.1	Petschnigg らによる手法のフロー	6
2.2	Petschnigg らによる結果	7
2.3	Bennett らによる撮影装置	8
2.4	Bennett らによる結果	8
2.5	Zhang らによる手法の流れ	9
2.6	近赤外画像を用いたコントラスト改善手法の結果	10
2.7	山崎らによる手法の流れ	11
2.8	夜間画像から昼間画像への変換	12
2.9	Bennett らによるコントラスト改善手法のフロー	14
2.10	コントラスト改善結果	15
2.11	類時テクスチャの加重平均によるノイズ除去手法の説明	17
2.12	元画像と各フィルタリング手法の出力との差分	17
2.13	各フィルタリング手法の比較	18
2.14	Tai らによる撮影装置	21
2.15	ブラー画像とカーネル	21
2.16	画像全体で一様なブラーカーネルの場合	22
2.17	画像全体で一様でないブラーカーネルの場合	22
2.18	Residual deconvolution	24
2.19	Yuan らによるブラー除去結果	24
2.20	Shan らによるブラー除去結果	26
3.1	撮影装置の模式図と実際に使用した装置	28
3.2	提案手法のフロー	29

3.3	Non-local Mean Algorithm の仕組み . テクスチャの類似度を計算し , 加重平均を取る . p と p_1, p_2 の類似度は高いので重みは大きくなり , p と p_3 の類似度は低いので重みは小さくなる	31
3.4	近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm の仕組み . 左図は近赤外画像 , 右図は元画像の高周波成分である . 近赤外画像で テクスチャの類似度を計算し , 低照度画像の高周波成分の画素値と の加重平均を取る	33
3.5	ブローカーネル推定の手順	35
4.1	動きのあるシーンの例	38
4.2	動きのあるシーンに対する結果	40
4.3	(a) カラーカメラで撮影された画像 . (b) 近赤外画像	41
4.4	(a) 図 4.3(a) で赤色の矩形で囲まれた領域 . (b)(a) へ提案手法を適 用した結果 . (c)(a) の平均画像 . (d) 図 4.3(a) で緑色の矩形で囲まれ た領域 . (e)(d) へ提案手法を適用した結果 . (f)(d) の平均画像 . (g) 図 4.3(a) で青色の矩形で囲まれた領域 . (h)(g) へ提案手法を適用し た結果 . (i)(g) の平均画像	42
4.5	近赤外画像を併用する場合としない場合との比較 . (a) は元画像 . (b) は (a) の赤色矩形領域における拡大画像 . (c) は高周波成分に対して Non-local Mean を適用した結果 . (d) は高周波成分に対して近赤外 画像を併用した Non-local Mean の結果 . (e) と (f) はそれぞれ (c) と (d) に低周波成分を合わせた結果	43
4.6	Bennett らの手法との比較結果 . わかりやすさのため , 拡大画像は 明るさを変えて表示	45
4.7	提案手法の失敗例 . (a) カラー画像 . (b) 近赤外画像 . (c)(a) の矩形 領域の拡大画像 . (d) 近赤外画像を併用したことによる失敗例	46
4.8	ブローカーネルの評価に用いた画像	47
4.9	近赤外画像群	49
4.10	ブロー画像	50
4.11	推定されたブローカーネルとブロー除去の結果	50

表 目 次

1.1	低照度シーンの撮影条件による分類	2
4.1	平均画像と元画像, 近赤外画像なしの Non-local Mean Algorithm を 用いた場合, 近赤外画像ありの Non-local Mean Algorithm を用い た場合との平均二乗誤差	39
4.2	Bennett らによる手法と提案手法の定量的な比較結果	44
4.3	推定されたブローカーネルの誤差	48

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年，デジタルカメラ技術の進歩により，多くのカメラに手ぶれ防止機能やノイズ除去機能が組み込まれている．しかし，図 1.1 の様に依然として低照度シーンを撮影した画像にはノイズやぶれ（ブラー）が発生するという問題があり，ノイズ除去やブラー除去について，現在でも様々な手法が提案されている．

カメラはセンサに十分な量の光を取り込むことによって，写真を撮影する．センサに取り込まれる光の量は，カメラのシャッタースピードやレンズの絞りによって決まる．しかし，低照度シーンを撮影したい場合，明るいシーンと同様の撮影方法では十分な量の光を取り込むことができない．そこで，低照度シーンの撮影の際には様々な工夫が必要となる．

低照度シーンにおいて十分な光量を得るためには，一般的にフラッシュが用いられる．撮影シーンをフラッシュで照らすことにより，環境光だけでは得られない多くの反射光をセンサに取り込むことが可能となる．しかし，この方法では撮影シーンの実際の陰影や明るさと異なる画像が撮影されてしまう．フラッシュを使用しない場合，センサのゲインを上げることによって暗いシーンでも写真を撮影することが可能である．この方法は撮影シーンの陰影や明るさを変えないが，ゲインを上げることによってセンサで発生するノイズも増幅され，撮影された画像中にノイズが目立つという欠点がある．

フラッシュを用いずゲインを抑えたい場合，シャッタースピードを遅くすることによって多くの光を取り込む方法もある．この場合，撮影される画像と実際の撮影シーンとの間で陰影や明るさは変化しない．また，ゲインを上げる必要がないためノイズの発生も抑えられる．しかし，撮影時におけるカメラのぶれや撮影対象の移動により，撮影された画像にブラーが発生しやすくなる．

以上を整理すると，低照度シーンの撮影における問題は表 1.1 のように分類することができる．



図 1.1: ブラー画像とノイズ画像 . Sony DSLR-A300 で撮影 .

表 1.1: 低照度シーンの撮影条件による分類

	ブラー	ノイズ	陰影・明るさ
フラッシュ使用			×
フラッシュ未使用 ゲイン小・シャッタースピード遅	×		
フラッシュ未使用 ゲイン大・シャッタースピード速		×	

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、低照度シーンをフラッシュを使わずに撮影した「低照度画像」とフラッシュを使って撮影した「フラッシュ画像」を効果的に組み合わせることによって、低照度画像の画質を改善することである。表 1.1 からわかるように、フラッシュ画像にはブラーもノイズも発生しないという利点がある。この利点を用いて、以下の二つの問題を解決する。

- ゲインを大きく、シャッタースピードを速くして撮影した低照度画像からノイズ除去
- ゲインを小さく、シャッタースピードを遅くして撮影した低照度画像からブラー除去

低照度シーンのノイズ除去について、Eisemann や Petschnigg らはカラーカメラで同一シーンを撮影して得られた低照度画像とフラッシュ画像を用いて、低照度画像のノイズを除去する手法を提案した [11, 22]。しかし、これらの手法では低照度画像とフラッシュ画像を得るために撮影を二回以上行う必要があり、静止シーンにしか適用できないという問題点がある。

本論文で提案する手法では、近赤外カメラとカラーカメラで同一シーンを同時に撮影する。撮影時に近赤外フラッシュを照射することによって、近赤外カメラではフラッシュ画像を、カラーカメラでは低照度画像を同時に撮影することができる。したがって、動きのあるシーンに対しても適用可能となる。

ブラー除去については、Ben-Ezra や Tai らが高解像度・低フレームレートのカメラで撮影されるブラーの発生した高解像度画像と、低解像度・高フレームレートのカメラで同時に撮影される複数枚の画像を併用することによって、高解像度画像からブラーを除去する手法を提案した [6, 28]。本論文では、カラーカメラと近赤外カメラで撮影することによって得られた画像に対し、Ben-Ezra や Tai らの提案した手法と同様のアプローチでブラーを除去する手法について検討する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．第2章で低照度シーンの画質改善手法，ノイズ除去手法，およびブラー除去手法を紹介する．次いで第3章で低照度シーンのノイズ除去とブラー除去を実現する提案手法について述べ，第4章で実験結果を説明し，第5章で結論を述べる．

第2章 関連研究

2.1 画質改善に関する研究の分類

本論文では低照度カラー画像と近赤外フラッシュ画像を組み合わせた低照度シーンの画質改善手法について提案する。低照度画像の画質改善について、近年様々な手法が提案されてきた [2, 3, 7–9, 11, 14, 15, 17, 22–24, 30–32]。これらの手法のうち、多くのものが撮影方法を工夫した複数枚の画像を使用した画質改善手法となっている。また、低照度シーンに限らない画像のノイズ除去やブラー除去に関する研究も数多くある [4–6, 10, 28, 29]。そこで、本章では関連研究を以下の3つのグループに整理して紹介する。

- 複数枚の画像を使用した低照度シーンの画質改善に関する研究
- ノイズ除去に関する研究
- ブラー除去に関する研究

低照度シーンの画質改善にはノイズ除去やブラー除去を行っているものも含まれるが、ここでは低照度シーンに限ったものをはじめに紹介し、シーンを限定しないノイズ除去手法とブラー除去手法についてそれぞれ別に紹介する。

2.2 低照度シーンの画質改善に関する研究

低照度シーンの画質改善に関する研究は数多くあるが、主にノイズの除去に着目したもの [7, 11, 14, 22] とコントラスト改善に着目したもの [8, 9, 15, 17, 24, 31, 32] に分けることができる。本節では、まずノイズ除去に関する研究 [8, 11, 22] について紹介し、続いてコントラスト改善を行った研究 [8, 31, 32] について紹介する。

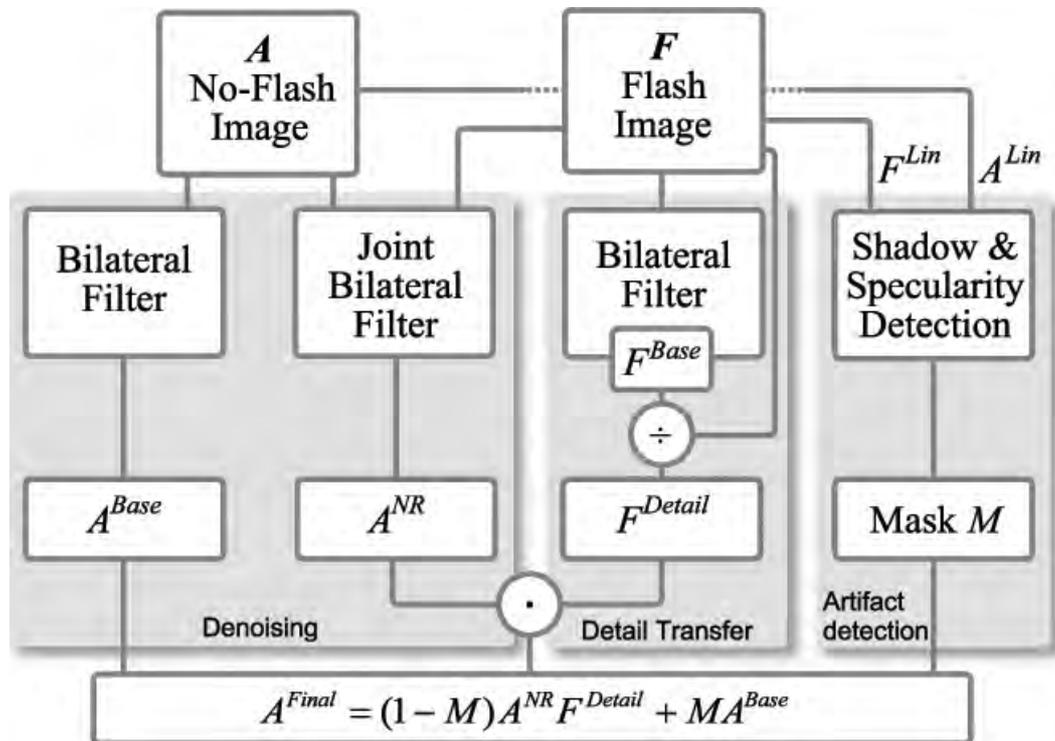


図 2.1: Petschnigg らによる手法のフロー

2.2.1 複数枚のカラー画像を用いた低照度シーンのノイズ除去

Eismann や Petschnigg らはカラーカメラで同一シーンのフラッシュ画像と低照度画像を撮影し，ノイズの少ないフラッシュ画像を用いて，低照度画像からノイズを除去する手法を提案した．図 2.1 に Petschnigg らによる画質改善手法のフローを示す．

具体的には，Joint Bilateral Filter と呼ばれる，フラッシュ画像の画素値に基づいて重みを決定したフィルタリングを低照度画像に対して行った．Joint Bilateral Filter は，フラッシュ画像の画素 p の値を $F(p)$ ，低照度画像の画素値を $A(p)$ ，出力値を $I(p)$ とした時，次の式であらわされる．

$$I(p) = \frac{1}{Z(p)} \sum_{p' \in \Omega} \{g(|p' - p|, \sigma_d) g(F(p) - A(p), \sigma_I)\} A(p) \quad (2.1)$$

$Z(p)$ は正規化項， $g(\cdot, \sigma)$ は分散 σ のガウス関数をあらわす．Tomasi らによる Bilateral Filter [29] などの既存のフィルタリングと比較して，ノイズのっていない画



図 2.2: Petschnigg らによる結果

像の画素値を重みの計算に用いているため，エッジやディテールの保存された平滑化を実現した．さらに，この出力に対してフラッシュ画像の高周波成分（エッジやディテール）をのせることで，平滑化によって失われてしまったディテールの復元に成功した（図 2.2）．Hoppe らは低照度画像とフラッシュ画像を組み合わせ，連続的なフラッシュの調整を実現した [14]．しかし，これらの方法では低照度画像とフラッシュ画像を得るために撮影を二回以上行う必要があり，静止シーンにしか適用できないという問題点がある．

2.2.2 近赤外画像を用いた低照度シーンのノイズ除去

これらの手法に対し，Bennett らはカラーカメラと近赤外カメラで同一シーンを同時に撮影し，静止シーン以外でも低照度画像の画質改善を行う手法を提案した [7]．彼らは我々の手法と同様に，図 2.2.2 の様な装置を組み，カラーカメラと近赤外カメラで同一シーンを同時に撮影した．得られた低照度カラー画像を YUV 色空間 [12] に変換して Y 信号を取り出し，Dual Bilateral Filter と呼ばれる，ノイズの少ない近赤外画像の画素値とメディアンフィルタを適用した低照度カラー画像の画素値に基づいて重みを計算したフィルタリングを適用した．続いて，Liu らによる画像変換手法 [18] を用いて，近赤外画像を可視光で撮影された画像に変換を行った．最後に，近赤外画像の高周波成分を先ほどのフィルタリング結果にのせることによって，フィルタリングによって失われたエッジやディテールを補完し，

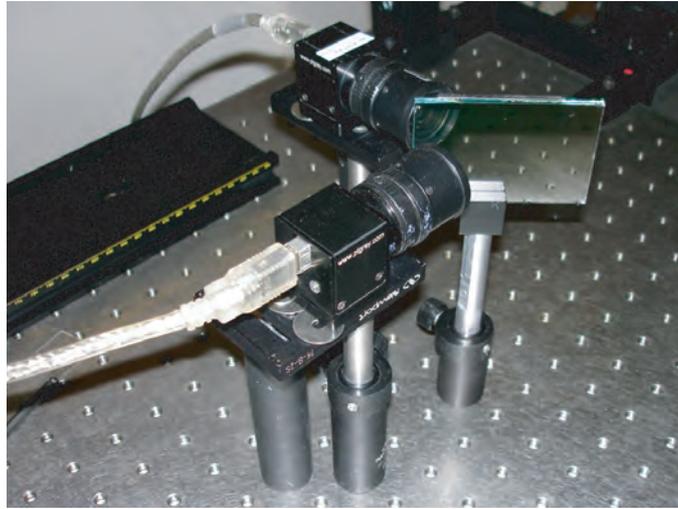


図 2.3: Bennett らによる撮影装置



図 2.4: Bennett らによる結果

UV 信号を合わせて色をのせた．図 2.4 に彼らの手法の適用結果を示す．カラー画像と近赤外画像を同時に撮影できるため，撮影シーンに動きがある場合や動画に対しても適用可能となったが，可視光と近赤外光という，異なる帯域で撮影された画像を合成してしまっている．

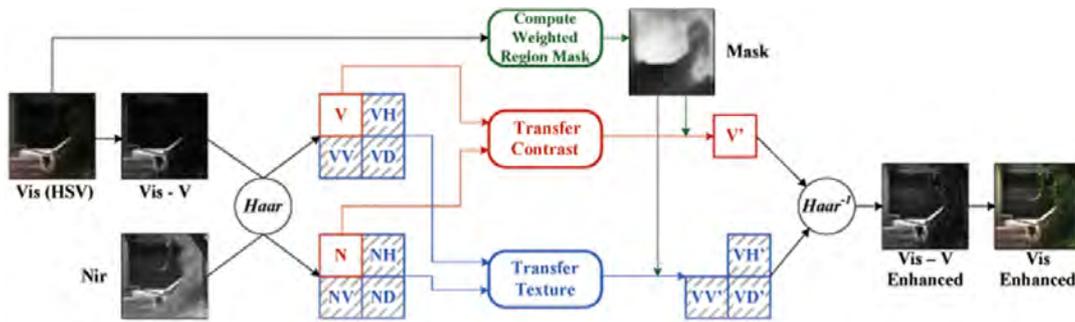


図 2.5: Zhang らによる手法の流れ

2.2.3 近赤外画像を用いた低照度シーンのコントラスト改善

Zhang らはカラーカメラで低照度シーンを撮影した画像を，近赤外カメラで同一シーンを撮影した画像を用いてコントラストの改善を行った [31]．カラーカメラで撮影するとコントラストが悪いシーンでも，近赤外カメラで撮影するとコントラストが良い画像が撮影できるという前提である．図 2.5 に，彼らの手法の流れを示す．彼らはまずカラー画像の彩度と明るさの信号から，コントラストの悪い領域を求める．彩度の値を s ，明るさの値を v とするとき，コントラストの悪さの重みを W を次の式から計算する．

$$\begin{aligned}
 W_s &= 1 - e^{-p_s |s-1|}, \quad p_s \in [0, 1], \quad s \in [0, 1] \\
 W_v &= 1 - e^{-p_v |v-0.5|}, \quad p_v \in [0, 1], \quad v \in [0, 1] \\
 W &= W_s \cdot W_v
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで， W_s ， W_v はそれぞれ彩度と明るさから計算される重みである．続いて，カラー画像から輝度信号を取り出す．さらに，輝度信号にウェーブレット変換を適用して低周波成分と高周波成分に分離する．低周波成分には空間方向の変化がなだらかな情報（コントラストやテクスチャ）が，高周波成分には空間方向の変化が急な情報（エッジやテクスチャ）が含まれる．コントラストを改善するために，コントラスト情報が含まれる低周波成分について，空間方向の勾配の大きさのヒ



図 2.6: 近赤外画像を用いたコントラスト改善手法の結果

ストグラムを近赤外画像の勾配の大きさのヒストグラムにそろえる [13] . ここで , 勾配のヒストグラムを合わせることによって得られた低周波成分と元の低周波成分の値を , 先ほど求めた W の割合で足し合わせることによって , 新しい輝度値を得る . また , 高周波成分については , 近赤外画像の高周波成分とカラー画像の輝度信号の低周波成分を W の割合で足し合わせる . 得られた結果を図 2.6 に示す . 既存のコントラスト改善手法では , 様々な露出で撮影された複数枚の画像を組み合わせることによって , コントラストの良い画像を得ていたが , 複数回撮影する必要があるため , 静止シーンにしか適用できないという問題があった . 提案手法では近赤外画像とカラー画像を同時に撮影しているため , 動きのあるシーンにも適用可能となった .

2.2.4 固定カメラからの観測画像群に基づく夜間画像改善

山崎らは監視カメラで夜間に撮影した画像を昼間に撮影した画像のように変換する手法を提案した . 彼らの手法では , 事前に改善したいシーンの昼間画像と夜間画像を大量に準備し , それらの画像を用いてオンラインで監視カメラ化の入力夜間画像を昼間画像に変換を行う . 彼らの提案手法の流れは図 2.7 のようになっている .

具体的には , 準備した昼間画像群と夜間画像群について , それぞれ画素ごとに中央値をとることによって , 昼間画像と夜間画像を作った . 次に , 昼間画像へ変換したい夜間画像の入力があると , 画像を輝度信号と色信号に分離した . 得られた輝度信号に対して , Retinex 理論 [16] に基づいて Bilateral Filter [29] を適用することによって , 輝度信号を照度と反射率に分離した . 照度 L_N に対して , 事前に準

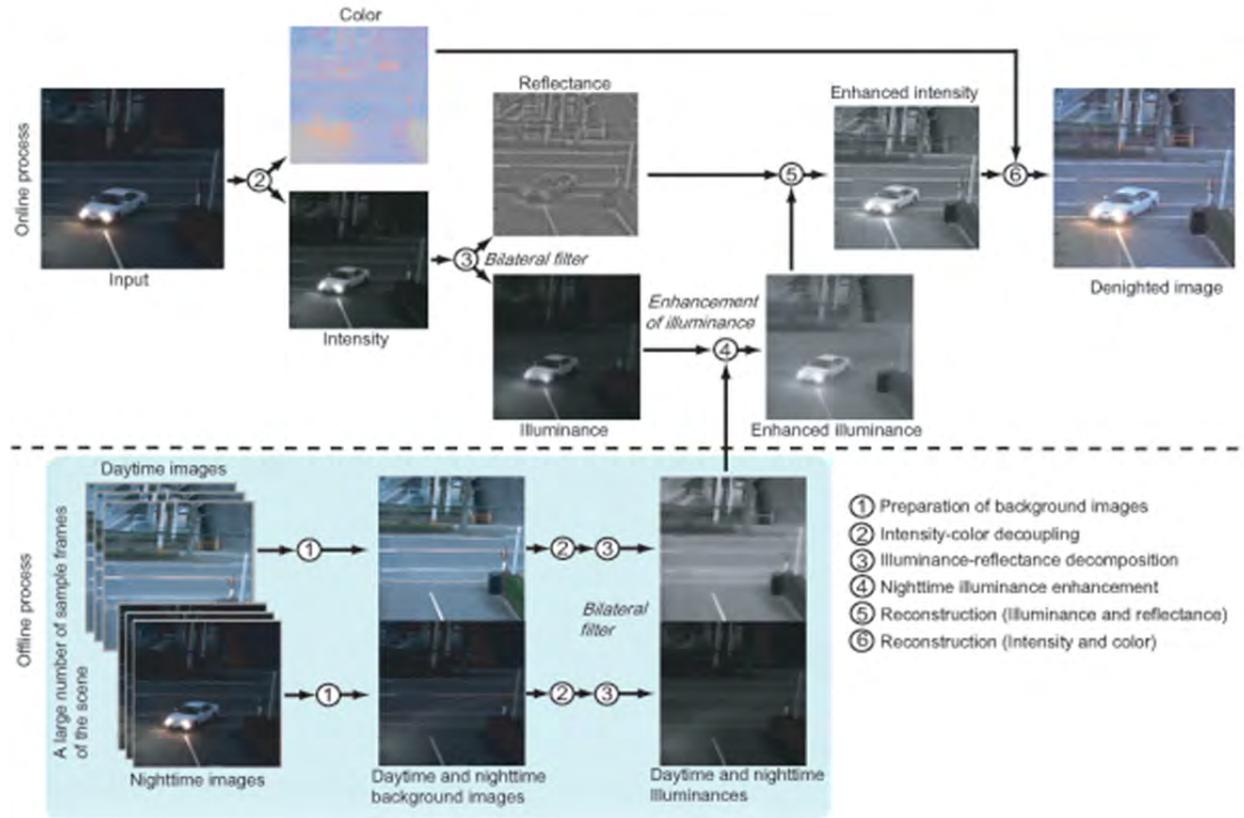


図 2.7: 山崎らによる手法の流れ

備した昼間画像 L_{DB} と夜間画像 L_{NB} を用いて，改善後の照度 $L_{Denight}$ を次の式から計算する．

$$L_{Denight} = \frac{L_{DB}}{L_{NB}} L_N \quad (2.3)$$

改善された照度を元の反射率と合わせ，最後に元の色信号を乗せることによって，昼間画像を得る．図 2.8 が得られた結果である．彼らの手法を用いることによって，夜間画像を昼間に撮影された画像のように変換することができるが，得られた結果を見てみると，色ずれが発生する場合がある．



夜間画像



結果

図 2.8: 夜間画像から昼間画像への変換

2.2.5 動画に対するコントラスト改善

Bennett らは低照度シーンを撮影した動画に対して、コントラストの改善を行った [8] . 図 2.9 に彼らの提案手法の流れを示す . 彼らはまず、入力に対してトーンマッピングを行いコントラストを改善した . しかし、トーンマッピングはコントラストを改善するがノイズも強調してしまうという欠点がある . そこで、トーンマッピングの出力に対して、静止している領域には時間方向のフィルタリングを適用し、動いている領域には空間方向のフィルタリングを適用した . 一般に、bilateral filter は以下の式であらわすことができる .

$$B(s, \sigma_h, \sigma_i) = \frac{\sum_{p \in N_s} g(|p - s|, \sigma_h) g(D(p, s), \sigma_i) I_p}{\sum_{p \in N_s} g(|p - s|, \sigma_h) g(D(p, s), \sigma_i)} \quad (2.4)$$

$$g(x, \sigma) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} / (\sigma\sqrt{2\pi})$$

$$N_s = Kernel = \begin{bmatrix} p_x = [s_x - k, s_x + k] \\ p_y = [s_y - k, s_y + k] \end{bmatrix}$$

$$\text{where } D(p, s) \equiv I_p - I_s \quad (2.5)$$

p, s は座標 , σ_h, σ_i は分散 , I_p は p における画素値 , k はカーネルのサイズを表す . Bennett らは bilateral filter を時間方向に拡張するために、上記の $D(p, s)$ を、

$$D(p_{xyt}, s_{xyt}) = \frac{\sum_{x=sx-n}^{sx+n} \sum_{y=sy-n}^{sy+n} g(|x - p_x, y - p_y|, \sigma_e) |I_{x,y,pt} - I_{x,y,st}|}{\sum_{x=sx-n}^{sx+n} \sum_{y=sy-n}^{sy+n} g(|x - p_x, y - p_y|, \sigma_e)} \quad (2.6)$$

としたフィルタを適用する . 式 (2.7) は、画素値の時間方向の変化は、空間方向の変化が少ない場合にノイズであり、空間方向の変化が大きい場合は物体の移動による変化であるという考えに基づいている . すなわち、空間方向の変化が少ない場合に大きく、大きな場合は小さい値を返す . 静止している領域では時間方向に拡張した bilateral filter を用い、移動領域では空間方向の bilateral filter を用いることによって、トーンマッピングによって強調されたノイズの除去を実現し、コントラスト改善に成功した . 図 2.10 が Bennett らによる提案手法の適用結果である .

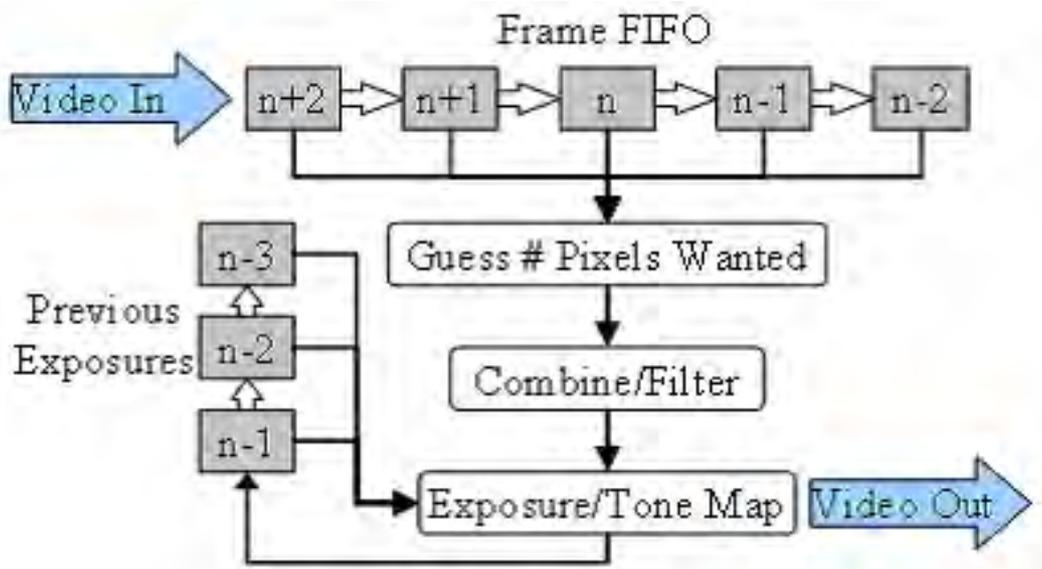


図 2.9: Bennett らによるコントラスト改善手法のフロー

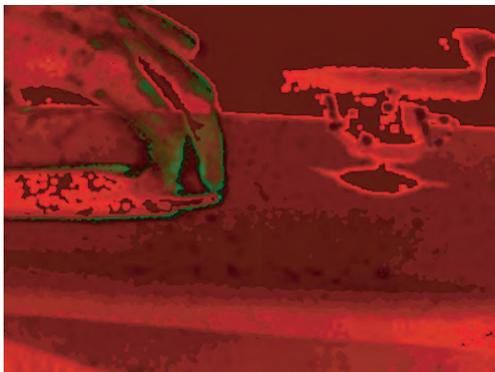
以上，第 2.2.3 節で紹介した研究はどれも低照度シーンのコントラスト改善に着目したものとなっている．コントラストの改善も非常に重要な研究課題であるが，本論文ではノイズ除去およびブラー除去について検討を行う．



低照度画像



トーンマッピング後の画像



赤い領域：時間方向のフィルタリング，
緑色の領域：空間方向のフィルタリング



結果

図 2.10: コントラスト改善結果

2.3 ノイズ除去に関する研究

画像のノイズ除去は、画像処理という研究分野が確立されて以来多くの手法が提案されており、長い歴史を持つ。最近では Tomasi らによる bilateral filter [29] や、bilateral filter を発展させたものが多くの研究で用いられている。また、MRF を用いたノイズ除去に関する手法も存在する [10]。本論文では、特に Baodes らによる non-local mean algorithm [4,5] を紹介する。

2.3.1 類似テクスチャの加重平均によるノイズ除去

Baodes らは、画像中で似ている領域を探しだし、それらの領域で加重平均を計算することによってノイズを除去する non-local mean algorithm と呼ばれる手法を提案した [4,5]。

彼らの手法ではまず、図 2.11 のように、画素 p の値を改善するためにその周りのある大きさの領域を考えた。続いて、 p を中心とした領域と、画像中の他のあらゆる領域との間でテクスチャの類似度を計算した。例えば、 p を中心とした領域と $q1$, $q2$ を中心とした領域はテクスチャが似ているため、類似度は大きくなる。逆に、 p と $q3$ は似ていないため、類似度は小さくなる。この類似度を重みに用いて、中心画素の加重平均を計算することによって、ノイズの除去が行われた。図 2.12 が元画像とフィルタリング結果との差分画像となっている。既存のフィルタリング手法と比較して、ノイズ成分だけを取り出せることがわかる。また、図 2.13 がこの手法の適用結果となる。



図 2.11: 類時テクスチャの加重平均によるノイズ除去手法の説明

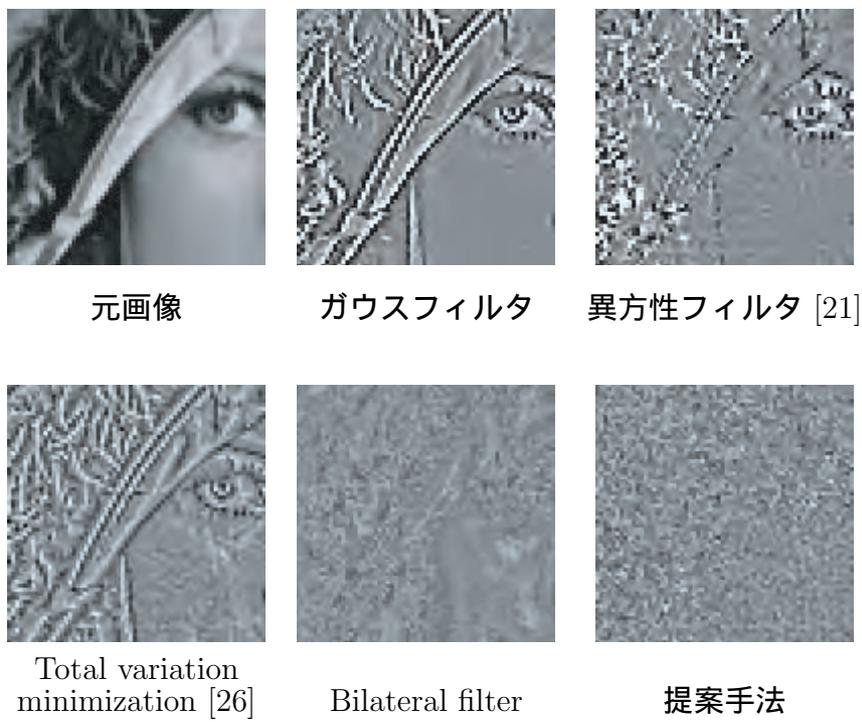


図 2.12: 元画像と各フィルタリング手法の出力との差分

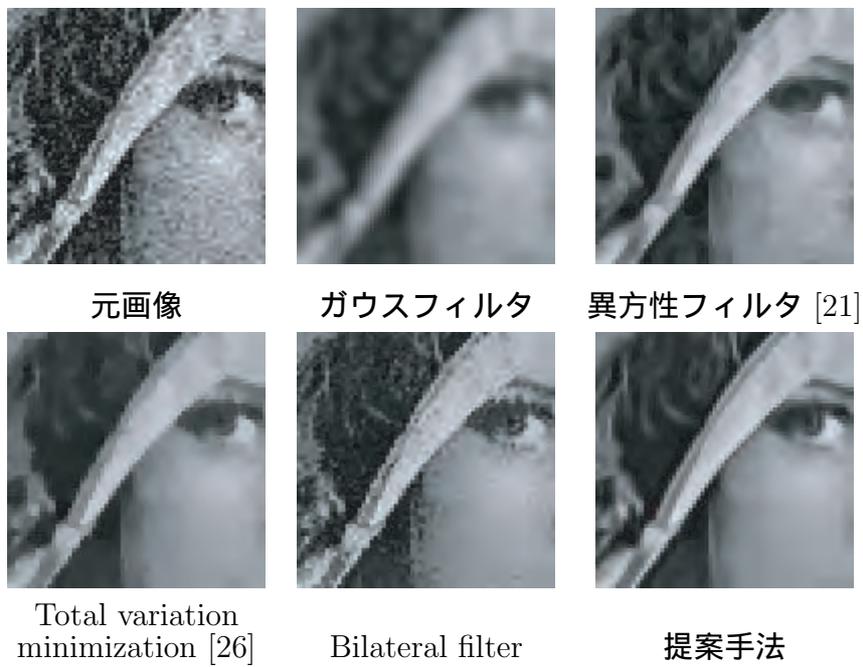


図 2.13: 各フィルタリング手法の比較

2.4 ブラー除去に関する研究

ブラーの発生した画像を B , もともとの画像を I , ノイズを n とすると , ブラーは次の式でモデル化される .

$$B = K \otimes I + n \quad (2.7)$$

K はブラーカーネルと呼ばれる . よって , ブラーを除去するためには ,

- ブラーカーネルの推定
- 式 (2.7) のデコンボリューション

の処理が必要となる . また , カメラの移動によって発生するブラーは画像全体で一様なブラーカーネルを考えることができるが , 撮影対象の移動によって発生するブラーは画像の領域ごとに異なるブラーカーネルを考える必要がある . 過去に行われてきたブラー除去に関する研究では , 前者にしか適用できないものと , 両者に対して適用できるものが存在する .

ブラー除去に関する研究もノイズ除去と同様に , 長い歴史を持つ . 本節では2台のカメラを使用する手法 [6, 28] , ブラー画像とノイズ画像を用いる手法 [30] , 1枚のブラー画像からブラーカーネルの推定とデコンボリューションを反復的に行うもの [27] を紹介する .

2.4.1 2台のカメラを使用する手法

Ben-Ezra らは , 高解像度で低フレームレートのカメラと低解像度で高フレームレートのカメラを用意し , 高フレームレートのカメラで撮影した複数枚の画像からブラーカーネルを推定を行った [6] . 推定されたブラーカーネルと既存のデコンボリューション手法 [20, 25] を用いて , 高解像度・低フレームレートで撮影したブラー画像からブラーの除去に成功した . この手法では , ブラーは画像全体で一様であることを仮定している . 高フレームレートカメラで撮影された複数枚の画像からオプティカルフローを計算し , そこからブラーカーネルの推定を行った . ブラーカーネルの推定精度が高いため , ブラーの除去もうまくできているが , Richardson-Lucy のデコンボリューションを用いているため , その問題点であるエッジ付近でのリングングの発生が見られる .

これに対して, Tai らは Ben-Ezra らと同様な撮影装置を用い, ブラーカーネルを画像上のある領域ごとに定義することによって, 画像全体で一様でないブラーを除去する手法を提案した [28]. 図 2.14 がその撮影装置である. この手法では, Ben-Ezra らの手法と同様にオプティカルフローから初期ブラーカーネルを計算する. 図 2.15(a) が入力ブラー画像, 図 2.15(b) がオプティカルフローから計算された初期ブラーカーネルである. 続いて, 次の式の最適化を行うことによって, ブラーカーネルとブラー除去画像を同時に推定する.

$$\begin{aligned}
 & \arg \max_{I, K} P(I, K | I_b, K_o, I_l) \\
 &= \arg \max_{I, K} P(I_b | I, K) P(K_o | I, K) P(I_l | I) P(I) P(K) \\
 &= \arg \min_{I, K} L(I_b | I, K) + L(K_o | I, K) + L(I_l | I) + L(I) + L(K) \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

I, K は推定したい画像とブラーカーネル, I_b, K_o, I_l はそれぞれブラー画像, オプティカルフローから計算した初期ブラーカーネル, 低解像度カメラで撮影された画像となっている. また, $L(\cdot) = -\log(P(\cdot))$ である. Tai らは $P(I)$ と $P(K)$ については無視して, 前から 3 つの項について考えた. $P(I_b | I, K)$ については式 (2.7) のモデルを適用した. $P(I_l | I)$ については, 復元される高解像度画像をダウンサンプリングすると, 高解像度・低フレームレートのカメラで撮影される画像と一致すると考え, モデル化した. Ben-Ezra らの手法と違い, 空間的に非一様なブラーにも適用できるが, この手法でもリングングの発生という問題が存在する. 図 2.16 が画像全体で一様なブラーがかかった場合の結果, 図 2.17 が画像全体で一様でないブラーがかかっている場合の結果である.

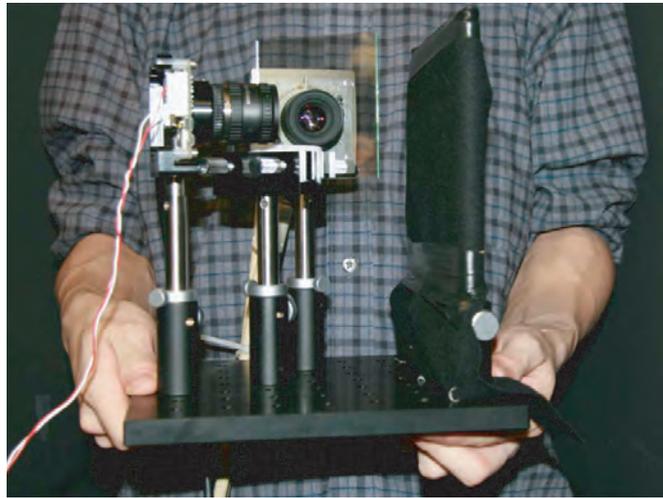
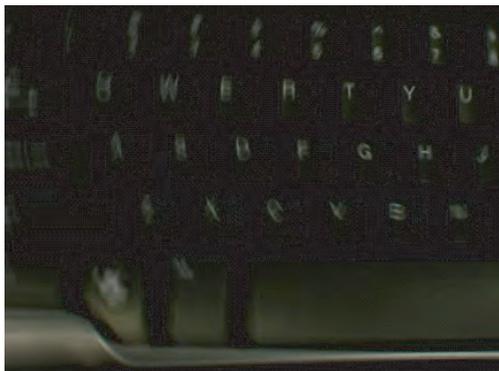
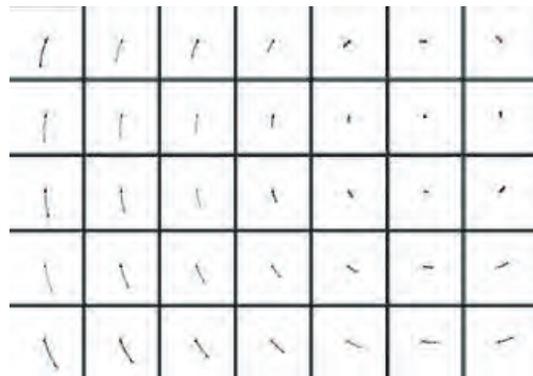


図 2.14: Taiらによる撮影装置



ブラー画像



計算されたカーネル

図 2.15: ブラー画像とカーネル



図 2.16: 画像全体で一様なブローカーネルの場合



図 2.17: 画像全体で一様でないブローカーネルの場合

2.4.2 ブラー画像とノイズ画像を用いる手法

Yuan らは、シャッタースピードを速くして撮影したためにノイズが目立つ画像と、シャッタースピードを遅くして撮影したためにノイズは目立たないがブラーの発生した画像を組み合わせ、ブラーもノイズもない画像を得る手法を提案した [30] .

本来、式 (2.7) からブラーカーネルを推定するためにはブラー画像とブラーの発生していない画像が必要になる。しかし、Yuan らはブラーの発生していない画像の代わりにノイズ画像にフィルタリングを適用した画像を用いることで、ブラーカーネルの推定を行った。さらに、ここで得られたブラーカーネルでデコンボリューションを行う際、ノイズ画像とそのフィルタリング結果との差分に対してデコンボリューションを行うことで、リングングの影響を小さくする residual deconvolution を提案した。図 2.18 は residual deconvolution の様子である。各グラフは横軸が空間方向の変化で縦軸は画素値を表す。ブラー画像 B (図 2.18(a)) をもとに、先ほど推定されたブラーカーネルを用いてデコンボリューションを実行すると、図 2.18(c) のように、復元された画像にはリングングが発生する。そこで、 $\Delta B = B - N_D \otimes K$, $I = N_D + \Delta I$ と定義すると、 $B = I \times K$ は $\Delta B = \Delta I \otimes K$ と変形できる。そこで、 ΔB (図 2.18(d)) に対してデコンボリューションを実行して ΔI (図 2.18(e)) を得る。リングングはエッジを中心として発生するが、その大きさはエッジ部分の変化の大きさに比例する。つまり、エッジ部分での変化が小さい ΔB にデコンボリューションを実行すればリングングの影響の少ない ΔI を得ることができる。最後に、 N_D (図 2.18(b)) を加え、リングングの影響が少ない復元画像 I (図 2.18(f)) が得られる。図 2.19 に、推定されたカーネルとブラー除去結果を示す。左から順に、ブラー画像、ノイズ画像、ノイズ除去画像、既存のデコンボリューション手法による結果、residual deconvolution の結果となっている。ブラー画像やノイズ画像では確認できない文字が、ブラー除去によって確認できるようになっている。また、既存の手法で発生しているリングングが、提案手法では発生していない様子が見える。この手法により画質は良く改善されるが、二枚の画像を撮影する際に、カメラや撮影対象が大きく移動してしまうと適用できないという欠点がある。

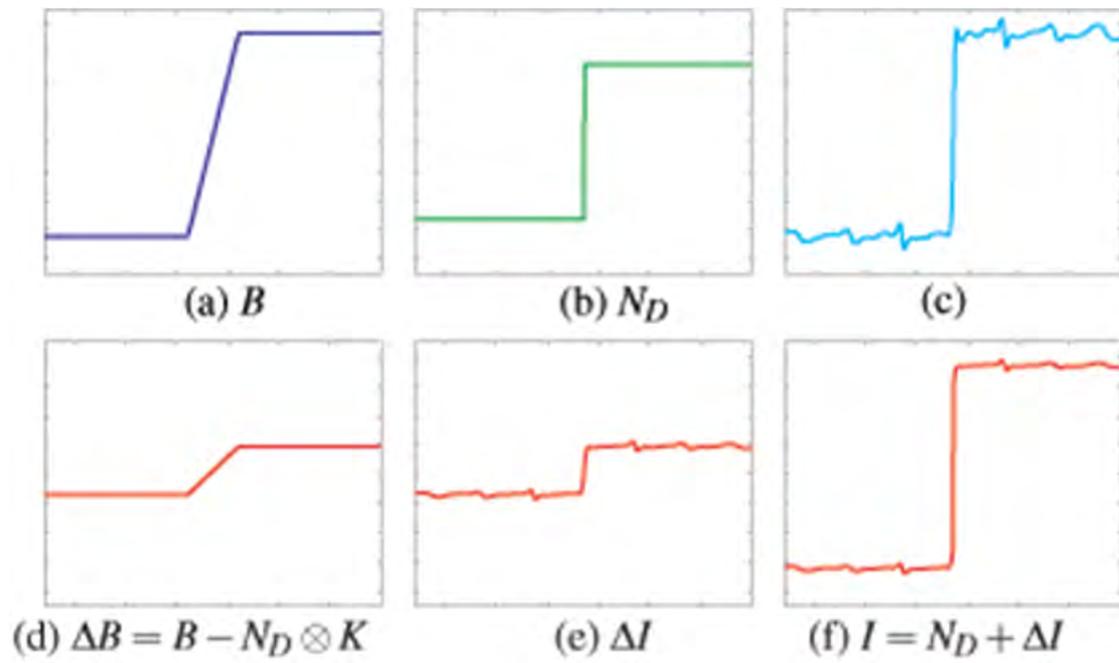


図 2.18: Residual deconvolution

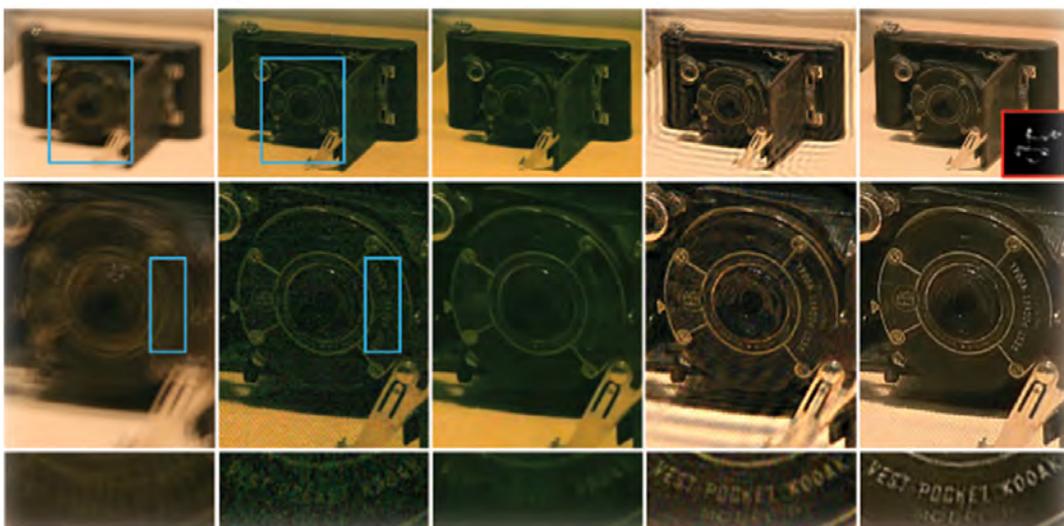


図 2.19: Yuan らによるブラー除去結果

2.4.3 1枚の画像からブラーカーネルの推定とブラーを除去を同時に行う手法

Shanらは1枚のブラー画像をもとに、ブラーカーネルの推定とブラー除去を同時に行う手法を提案した [27]。既存のブラー除去手法では、式(2.7)のノイズがガウス分布すると仮定して、ベイズ推定の枠組みで解くものが多かった。Shanらの手法では、ノイズは空間方向の高次の微分までガウス分布すると仮定している。この仮定により、空間方向に完全に独立に発生するノイズが定義できるため、既存の手法よりもノイズ除去の性能が高い。さらにこの手法では、同じシーンを撮影したブラー画像とブラーのない理想的な画像とを比較すると、テクスチャのない領域では見た目が変わらないという性質を利用した。空間方向の高次の微分までガウス分布するというノイズモデルを尤度とし、テクスチャのない部分でブラーの発生による変化が少ないという制約を設け、ベイズ推定を行った。このとき、ブラーカーネルとブラー除去結果を同時に推定する必要があるため、一方を固定して反復的に最適化を行った。図2.20がブラーカーネルの推定結果とブラー除去の結果である。ブラー画像1枚だけでブラーカーネルの推定とブラー除去が同時に行えるため、手軽な手法となっている。また、他の手法と比較してもそんな色のない性能である。しかし、最適化の際に初期ブラーカーネルを手で与える手間が必要である。

2.4.4 本研究の位置づけ

以上、画質改善に関する最近の研究動向を、低照度シーンの画質改善、ノイズ除去、ブラー除去の3つに分けて説明した。本論文で提案する手法は低照度シーンを撮影する際に発生するノイズとブラー除去を目的としている。特に、ノイズ除去に関してはEisemannやPetschniggらの2枚のカラー画像を用いる手法を発展させ、近赤外画像とカラー画像を用いることで、静止シーン以外にも適用可能とする。また、低照度シーンを撮影する際に、しばしばブラーが発生するという問題がある。そこで、ノイズ除去に用いたのと同じ撮影装置を用いて、カラー画像中に発生したブラーを除去することも検討する。



ブラー画像

ブラー除去結果

図 2.20: Shan らによるブラー除去結果

第3章 提案手法

本論文では，近赤外画像を用いた低照度シーンのノイズ除去手法を提案する．また，ブラー除去についても検討する．本章ではまず撮影装置の説明，続いてノイズ除去手法について，最後にブラー除去手法について説明する．

3.1 撮影装置

本論文で提案するノイズ除去手法およびブラー除去手法は，ともに同一シーンを撮影したカラー画像と近赤外画像を必要とする．そのため，図 3.1 のような装置を組んだ．図 3.1(a) のように 3CCD のカラーカメラと近赤外領域に感度のあるモノクロカメラを，光軸が直角に交わるように配置する．2 台のカメラの前にハーフミラーを設置することによって，同一シーンの撮影を可能とする．撮影時に近赤外光のフラッシュを照射することによって，カラーカメラではノイズの乗った低照度カラー画像が，モノクロカメラではフラッシュ画像が撮影される．

図 3.1(a) のように装置を組んだ上でキャリブレーションを行い，カメラの内部パラメータを計算し，レンズひずみの修正を行う．さらに，キャリブレーションによって得られた外部パラメータから，世界座標系における 2 台のカメラの相対位置が得られる．2 台のカメラの位置を合わせた上で，カラーカメラとモノクロカメラで撮影された画像に対してホモグラフィを計算することによって，2 枚の画像に関してサブピクセル単位の対応を取る．

今回の実験では 3CCD のカラーカメラとモノクロカメラにそれぞれ Sony 製の XC-003，XC-EI50 を使用し，図 3.1(b) のように装置を組んだ．また，近赤外光を透過するフィルタと白色の照明を用意して，近赤外光の照明を作った．キャリブレーション Matlab の Camera Calibration Toolbox [1] を使用した

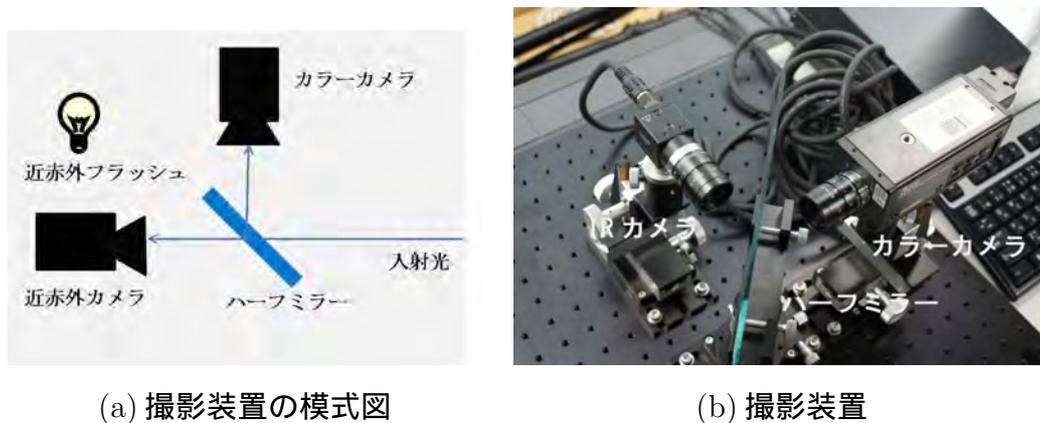


図 3.1: 撮影装置の模式図と実際に使用した装置

3.2 低照度シーンのノイズ除去

3.2.1 ノイズ除去手法の概要

本論文で提案する手法では、まず、カラー画像と近赤外画像で同一シーンが撮影されるような装置を組む。次に、ノイズの乗った低照度カラー画像について、ノイズの少ない近赤外画像を用いて画質改善を図る。

図 3.2 に提案手法の流れを示す。まず、Dual Bilateral Filter によって、低照度カラー画像から低照度シーンの陰影を含んだ低周波成分を取り出す。フィルタリングによりノイズは低減されるため、低周波成分にはノイズはほとんど含まれないと考え、手を加えずにおく。元画像とその低周波成分との割り算から得られた高周波成分には、エッジやディテールとともにノイズが含まれるため、近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm によってノイズを低減する。最後に、低周波成分とノイズを低減した高周波成分を掛け合わせることで、ノイズの少ない低照度画像を得る。

3.2.2 Dual Bilateral Filter

本論文で提案するノイズ低減手法では、まず、Dual Bilateral Filter [7] によってカラー画像を低周波成分と高周波成分にわけると。Dual Bilateral Filter とは、低照度カラー画像と近赤外画像を併用して、低照度画像のノイズを低減するフィルタリングである。

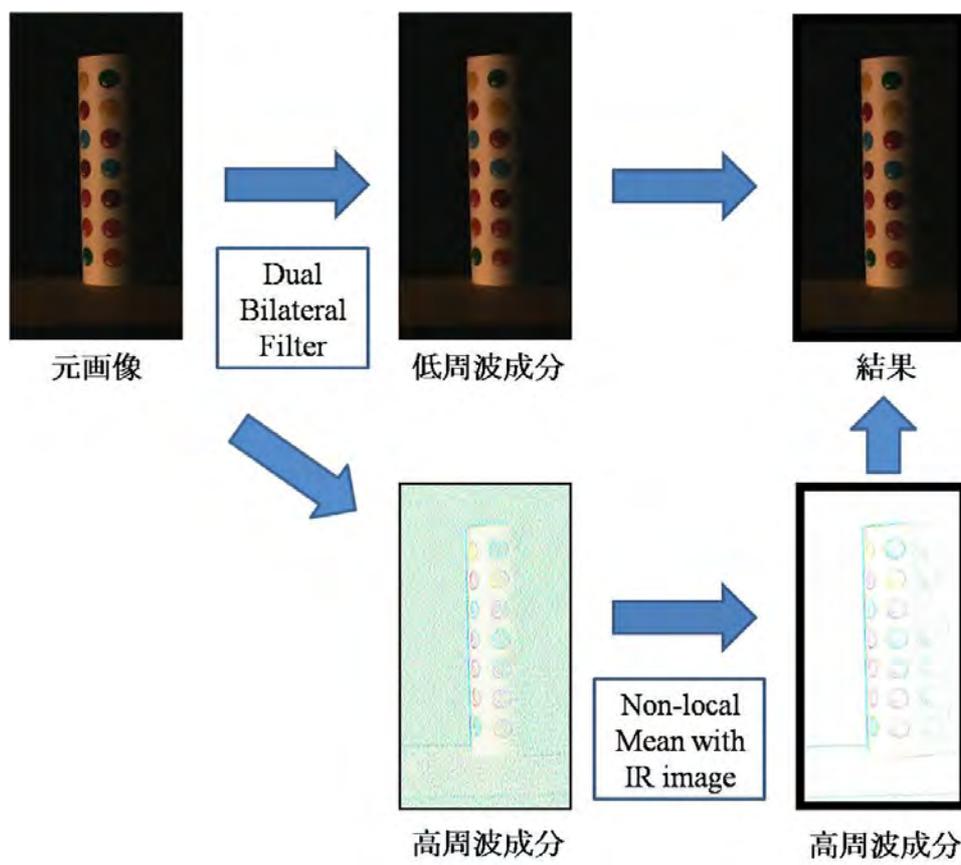


図 3.2: 提案手法のフロー

具体的には，入力画像 A の色空間を YUV 空間に変換し，画素 p における Y 値に対し以下の処理を行う．

$$Y^{\text{Low}}(p) = \frac{1}{Z_D(p)} \sum_{p' \in \Omega} \{g_d(\|p' - p\|)g_{\text{IR}}(I_{\text{IR}}(p) - I_{\text{IR}}(p'))g_y(Y(p) - Y(p'))Y(p')\} \quad (3.1)$$

$g_d(\cdot)$ ， $g_{\text{IR}}(\cdot)$ ， $g_y(\cdot)$ はそれぞれ平均ゼロ，分散 σ_d^2 ， σ_{IR}^2 ， σ_y^2 のガウス関数， $\|\cdot\|$ はユークリッド距離を表す．通常のバイラテラルフィルタと異なり，画素値の差から決まる重みに，Y 値と近赤外画像の画素値を使用している．可視光と近赤外光では帯域が異なるため，可視光で見えないものが近赤外画像中に現れる可能性がある．そこで，ノイズを含んだ Y 値とノイズの少ない近赤外画像の画素値を用いることによって，バイラテラルフィルタよりも高性能な平滑化を行えることが報告されている [7]．今回は $\sigma_d^2 = 100$ ， $\sigma_{\text{IR}}^2 = 87.6$ ， $\sigma_y^2 = 22.5$ とした．なるべく多くのノイズが低周波成分から除かれ，高周波成分に含まれるように，各分散値を Bennett らが用いた値 [7] の 10 倍程度に設定した． Ω は p を中心としたある大きさの領域に含まれる画素の集合である．今回，領域の大きさは 7×7 とした [7]．また， $Z_D(p)$ は正規化項である．

U，V 信号に対してバイラテラルフィルタをかけた $U^{\text{Low}}(p)$ ， $V^{\text{Low}}(p)$ を $Y^{\text{Low}}(p)$ と合わせてノイズが除去された画素値 $A^{\text{Low}}(p)$ を得る．ここで得られた画像 A^{Low} は元画像の低周波成分である．

次に，元画像と低周波成分から高周波成分を得る．

$$A^{\text{High}}(p) = \frac{A(p) + \epsilon}{A^{\text{Low}}(p) + \epsilon} \quad (3.2)$$

分母と分子に $\epsilon = 0.02$ を加えることで，ゼロで割ることを防ぐ [22]．ここで得られた $A^{\text{High}}(p)$ は空間方向の変化が急な成分であり，元画像のノイズやエッジ，ディテールが含まれる．

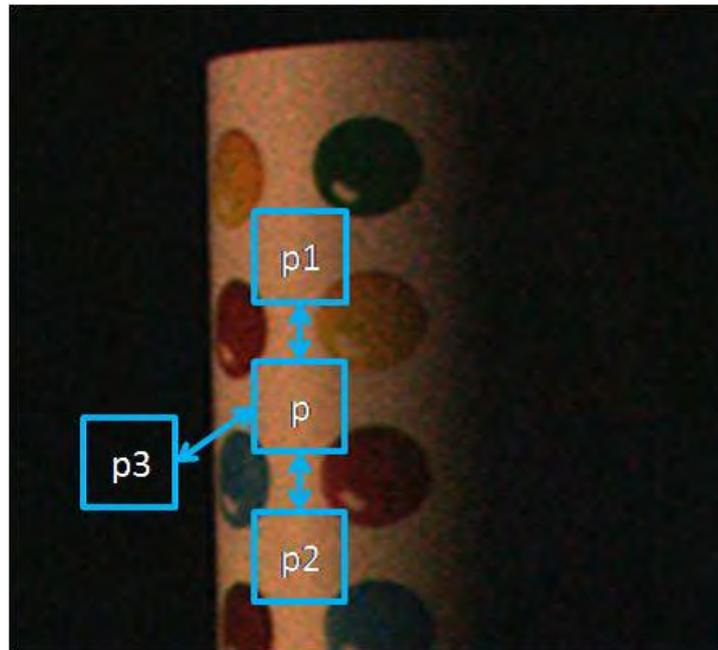


図 3.3: Non-local Mean Algorithm の仕組み．テクスチャの類似度を計算し，加重平均を取る． p と $p1$ ， $p2$ の類似度は高いので重みは大きくなり， p と $p3$ の類似度は低いので重みは小さくなる．

3.2.3 近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm

以下， A^{High} のエッジやディテールを保存するようにノイズを低減する方法について説明する．まず Baudes らによる Non-local Mean Algorithm [4] について説明し，彼らの手法を発展させた近赤外画像の併用による Non-local Mean Algorithm の説明を行う．

Non-local Mean Algorithm

Non-local Mean Algorithm は画像中にはテクスチャの似ている領域が多数存在するという考えに基づき，テクスチャの類似度を計算し，類似度に応じた重みで加重平均をとることによってノイズ低減を実現する手法である（図 3.3）．他の平滑化手法と比較して，エッジやディテールを保存したノイズの低減に成功している．特に，似たようなパターンが多く現れる画像で高い性能を発揮する．

画素値 A_p の画素 p のまわりの $k \times k$ 領域中に含まれる画素を考える．それらの画素の値を並べたベクトルを $v(A_p)$ とする．画素 p に対して，以下の処理を行う．

$$A^{\text{Low}}(p) = \frac{1}{Z_N(p)} \sum_{p' \in \Omega} \{g(\|v(A(p)) - v(A(p'))\|)A(p')\} \quad (3.3)$$

$Z_N(p)$ は正規化項である． $g(\cdot)$ は平均ゼロ，分散 σ^2 のガウス関数を表す． Ω は画素 p の周りの領域に存在する画素の集合である． Ω の領域中で似ているテクスチャを探し， σ^2 の値が大きいほど，多くの領域が似たテクスチャであると判断される． Ω の領域を画像全体とするのが理想的であるが，画素数 N の画像に対して式 (3.4) は $O(N^2)$ の計算量となるため，Baudes らは Ω を p' を中心とした 21×21 の大きさの領域に含まれる画素の集合としている．

近赤外画像を併用した場合

近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm は低照度カラー画像と近赤外画像を用いて，低照度画像の平滑化を行う方法である（図 3.4）．ノイズが少ない近赤外画像中でテクスチャの類似度を計算し，類似度に応じた重みを用いて低照度画像の画素値の加重平均を取る手法である．第 3.2.2 節でも説明したように，可視光では見えないものが近赤外画像中に現れてしまう可能性がある．しかし，ノイズを含んだ画像を用いて類似度を計算する Non-local Mean Algorithm と比較して，ノイズの少ない近赤外画像を用いる方が，より正確に類似度を計算でき，ノイズ低減の性能が向上すると考えられる．しかし，可視光と近赤外光で見えが異なるようなシーンでは，うまくいかない可能性がある．

画素 p における近赤外画像の画素値を $I_{\text{IR}}(p)$ とする．低照度画像の高周波成分 $A^{\text{High}}(p)$ に対して，近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm を適用することによってノイズを低減したエッジやディテールを得る．

$$A^{\text{Detail}}(p) = \frac{1}{Z_{\text{IR}}(p)} \sum_{p' \in \Omega} \{g(\|v(I_{\text{IR}}(p)) - v(I_{\text{IR}}(p'))\|)A^{\text{High}}(p')\} \quad (3.4)$$

$Z_{\text{IR}}(p)$ は近赤外画像から計算される正規化項である．分散は $\sigma = 1.5$ ， Ω は p を中心とする 21×21 の領域中の画素とした．また， $v(I_{\text{IR}}(p'))$ の範囲を p' を中心とし

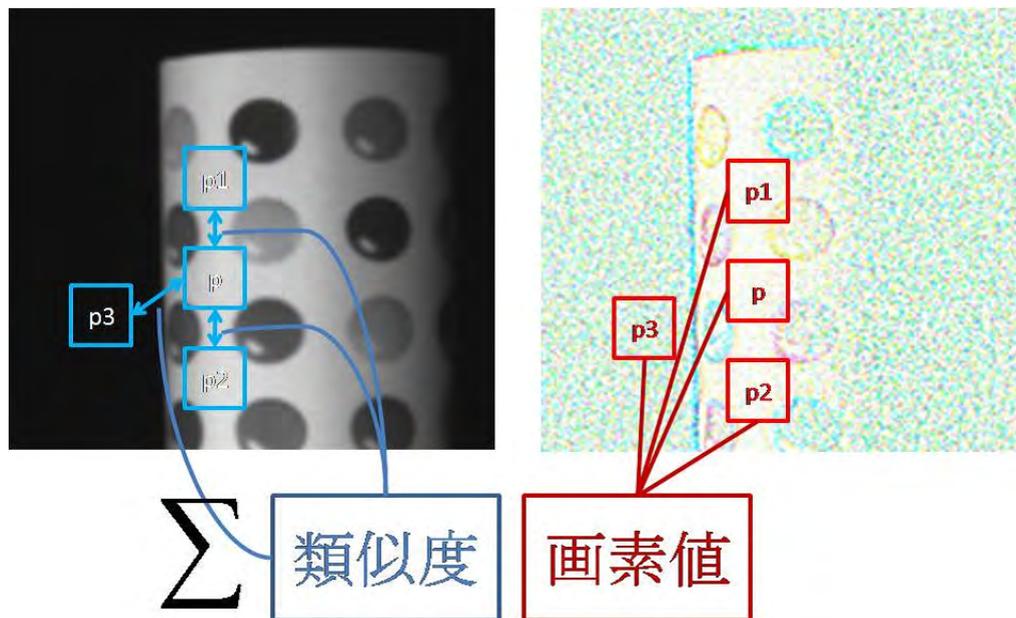


図 3.4: 近赤外画像を併用した Non-local Meanm Algorithm の仕組み．左図は近赤外画像，右図は元画像の高周波成分である．近赤外画像でテクスチャの類似度を計算し，低照度画像の高周波成分の画素値との加重平均を取る．

た 3×3 の領域に含まれる画素とした．式 (3.5) の処理を高周波成分の R, G, B 値に適用し，得られた $A^{\text{Detail}}(p)$ を Dual Bilateral Filter の出力と掛け合わせることで，最終的な出力 $A^{\text{Final}}(p)$ を得る．

$$A^{\text{Final}}(p) = A^{\text{Low}}(p) \times A^{\text{Detail}}(p) \quad (3.5)$$

3.3 低照度シーンのブラー除去

3.3.1 ブラーカーネルの除去の概要

続いて、低照度シーンのブラー除去についても検討した。今回は、Ben-Ezraらの手法 [6] と同様のアプローチでブラーカーネルの推定を行い、Richardson-Lucyの手法 [20,25] を用いてデコンボリューションを実行した。この手法では、カメラの移動により発生するブラーに対してのみ適用可能である。

まず、ブラーカーネルの推定には高フレームレートで撮影された複数枚の画像から、オプティカルフローを計算する。続いて、計算されたオプティカルフローから、カメラの移動した軌跡が推定できるので、移動量に応じたブラーカーネルの要素の値を決定する。最後に、得られたブラーカーネルを用いて、Richardson-Lucyの手法を用いてデコンボリューションを行う。以下では、まずブラーカーネルの推定手順を、続いてデコンボリューションの方法について説明する。

3.3.2 ブラーカーネルの推定

ブラーカーネルの推定のために、まず高フレームレートの画像群の隣接画像間でオプティカルフローを計算した。オプティカルフローの計算にはLucas-Kanadeの手法 [19] を用いた。このオプティカルフロー計算方法は、前フレームで特徴点の座標が与えられた場合、現フレームにおける特徴点の座標を計算する。続いて、得られたオプティカルフローを空間方向に平均化し、図 3.5(a) のように、特徴点の軌跡をプロットした。さらに、これらの点を図 3.5(b) のように三次のスプライン曲線で結び、曲線を隣接する2点間で二等分した。ここで、高フレームレートのカメラで複数枚の撮影する際、各フレームで撮影時間は等しい。よって、各フレーム間でカメラのセンサに取り込まれる光量は等しいと考えられる。そこで、図 3.5(c) のように面積の等しい長方形を並べることで、各フレーム間で取り込まれる光量を表現する。図 3.5(d) のように長方形の上辺の midpoint をなめらかな曲線で結ぶ。ブラーカーネルはエネルギー分布関数と考えることができるので、エネルギー保存の法則を満たすために、ブラーカーネルを水平方向、垂直方向に積分した値は1となる必要がある。よって、曲線の始点から終点まで積分した値が1になるように正規化し、高さを各画素に格納することでブラーカーネルを計算した。

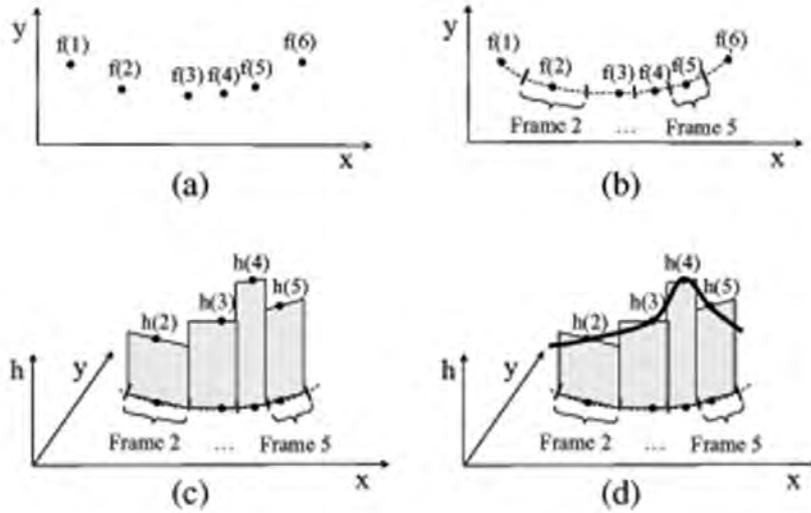


図 3.5: ブラーカーネル推定の手順

3.3.3 デコンボリューション

次に, Richardson-Lucy の手法を用いてデコンボリューションを行った. Richardson-Lucy のデコンボリューションではベイズ推定の枠組みで, 反復的にブラー除去を行う. 古くからあるアルゴリズムであり, リンギングを発生させるという欠点があるが, 様々な研究で用いられているアルゴリズムである. まず, ブラーを除去した画像 I を適当に初期化する. 画像 I の座標 k における画素値 I_k を確率変数として考えると, 式 (2.7) は

$$P(B_i) = \sum_k P(B_i|I_k)P(I_k) \tag{3.6}$$

と書ける. ただし, B_i は座標 i における B の画素値である. また, ベイズの定理から,

$$P(I_i|B_k) = P(B_k|I_i)P(I_i)/P(B_k) \tag{3.7}$$

を得る．式 (3.8) , 式 (3.7) と $P(B_k) = \sum_j P(B_k|I_j)P(I_j)$ から , 反復的に画像 I_i を計算する以下の式を得る .

$$P_{t+1}(I_i) = P_t(I_i) \sum_k \frac{P(B_i|I_k)P(B_i)}{\sum_j P(B_k|I_j)P(I_j)} \quad (3.8)$$

$$t = \{0, 1, \dots\}$$

ここで , $P(B_k|I_j)$ は画像が入力されるとブラー画像が出力されるもの , すなわちブラーカーネルそのものであるので , $P(B_k|I_j) = P(K_{j,k})$ である . $I = \sum_i I_i$, $K = \sum_j K_j$ とすると , $P(I_i) = I_i/I$, $P(K_{j,k}) = K_{j,k}/K$ と書ける . 以上から , 式 (3.9) は

$$I_{i,r+1}/I = I_{i,r}/I \sum_k \frac{(K_{i,k}/K) \cdot (B_k/I)}{\sum_j (S_{j,k}/S) \cdot (I_{j,r}/I)} \quad (3.9)$$

すなわち ,

$$I_{i,r+1} = I_{i,r} \sum_k \frac{K_{i,k} B_k}{\sum_j K_{j,k} I_{j,r}} \quad (3.10)$$

が得られる . Richardson-Lucy のデコンボリューションでは , 式 (3.11) を用いて反復的にブラー除去が行われる .

第4章 実験結果

本章ではまず，第3章で提案した低照度シーンのノイズ除去手法の評価を行う．続いて，ブラー除去の実験結果を示す．

4.1 低照度シーンのノイズ除去実験

4.1.1 動きのある物体を撮影した画像に対するノイズ除去

まず，動きのあるシーンについて実験を行った． 748×482 のサイズの画像に対して処理時間が862秒かった．図4.1がそれぞれ低照度カラー画像と近赤外カラー画像である．図4.2が提案手法の適用結果である．わかりやすさのため，コントラストを変えて表示する．EisemannやPetschniggらの2枚のカラー画像を用いる手法では2回の撮影が必要となるため，撮影対象に動きがある場合には適用することができなかった．提案手法では，近赤外カメラと近赤外フラッシュを用いることで図4.1のように低照度画像とフラッシュ画像を同時に撮影できるため，動きのあるシーンに対しても適用可能となる．図4.2のように，手のしわ，シャツの模様，髪の毛などを必要以上に平滑化せずにノイズを除去できている様子がわかる．

4.1.2 静止物体を撮影した画像に対するノイズ除去

次に，静止物体に対しても提案手法を適用した．図4.3が実験に用いた画像である．その結果を拡大したものが，図4.4となっている．わかりやすさのため，明るさを変えて表示する．図4.3(a)，(b)のカラー画像と近赤外画像を使用して，図4.3(a)の赤，緑，青色の領域に対する結果を図4.4の1段目から3段目に示す．図4.4(a)，(d)，(g)のノイズは図4.4(b)，(e)，(h)のように低減された．また，図4.4(c)，(f)，(i)はそれぞれの領域に関して30フレーム撮影し，平均をとった画像である．低照度シーンの撮影の際に現れるノイズが平均値ゼロのガウシアンノイズであると仮



図 4.1: 動きのあるシーンの例

定すると，平均画像はノイズのない理想的な画像であると考えられる．図 4.3(g)，(h)，(i) のぬいぐるみの毛のような領域では，わずかにディテールが失われてしまっているように見えるが，図 4.3(b)，(e) のような領域では平均画像とほぼ似たような結果が得られていることがわかる．

4.1.3 近赤外画像の効果

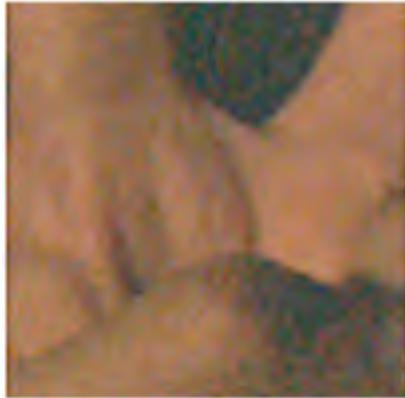
図 4.5 は，高周波成分に対して近赤外画像を併用しない Non-local Mean Algorithm を用いた場合と提案手法との比較である．図 4.5(a) の矩形領域図 4.5(d) の高周波成分に対して近赤外画像を使わなかった場合が図 4.5(b)，使った場合が図 4.5(c) である．図 4.5(b) と (c) を比較して分かるように，近赤外画像を使った方がエッジがよく保存されている．図 4.5(b) と (c) にそれぞれ低周波成分を加えた図 4.5(e) と (f) を比較しても，近赤外画像を併用した方が画質改善の効果が大きいことが確認できる．図 4.5(e) は (d) のノイズを低減しているが，(f) の方が文字がはっきりしている．

図 4.3 の赤，緑，青の矩形領域について，近赤外を併用した場合としない場合の Non-local Mean Algorithm の結果と平均画像との平均二乗誤差を計算した結果が表 4.1 である．元画像と平均画像との最小二乗誤差と比較すると，いずれの場合もノイズをよく低減していることがわかる．また，近赤外画像を併用することによ

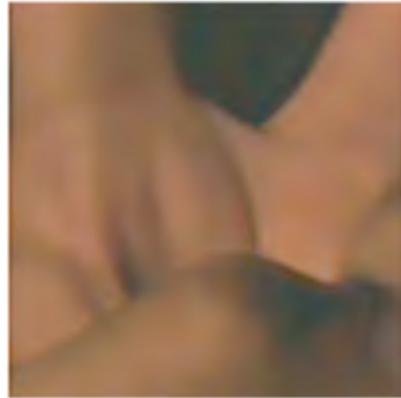
表 4.1: 平均画像と元画像，近赤外画像なしの Non-local Mean Algorithm を用いた場合，近赤外画像ありの Non-local Mean Algorithm を用いた場合との平均二乗誤差

矩形領域	元画像	近赤外画像なし	近赤外画像あり
赤色	22.8	18.3	9.05
緑色	49.0	14.0	12.6
青色	45.0	15.6	13.7

て，平均二乗誤差の改善したことも確かめられた．特に，赤色領域では二乗誤差が半減した．



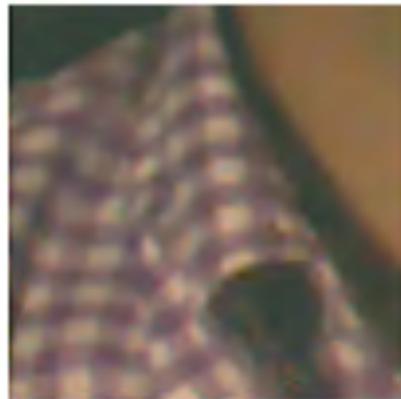
(a) 図 4.1(a) の赤色領域拡大画像



(b) ノイズ除去結果



(c) 図 4.1(a) の緑色領域拡大画像



(d) ノイズ除去結果

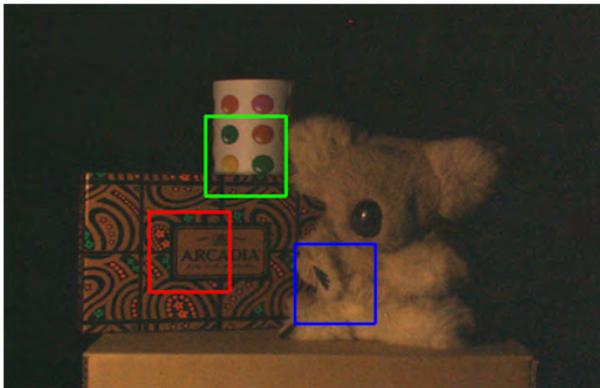


(e) 図 4.1(a) の青色領域拡大画像



(f) ノイズ除去結果

図 4.2: 動きのあるシーンに対する結果



(a) カラー画像



(b) 近赤外画像

図 4.3: (a) カラーカメラで撮影された画像 . (b) 近赤外画像 .



(a) 図 4.3(a) の赤色矩形の領域



(b) 結果



(c) 平均画像



(d) 図 4.3(a) の緑色矩形の領域



(e) 結果



(f) 平均画像



(g) 図 4.3(a) の青色矩形の領域



(h) 結果



(i) 平均画像

図 4.4: (a) 図 4.3(a) で赤色の矩形で囲まれた領域 . (b)(a) へ提案手法を適用した結果 . (c)(a) の平均画像 . (d) 図 4.3(a) で緑色の矩形で囲まれた領域 . (e)(d) へ提案手法を適用した結果 . (f)(d) の平均画像 . (g) 図 4.3(a) で青色の矩形で囲まれた領域 . (h)(g) へ提案手法を適用した結果 . (i)(g) の平均画像

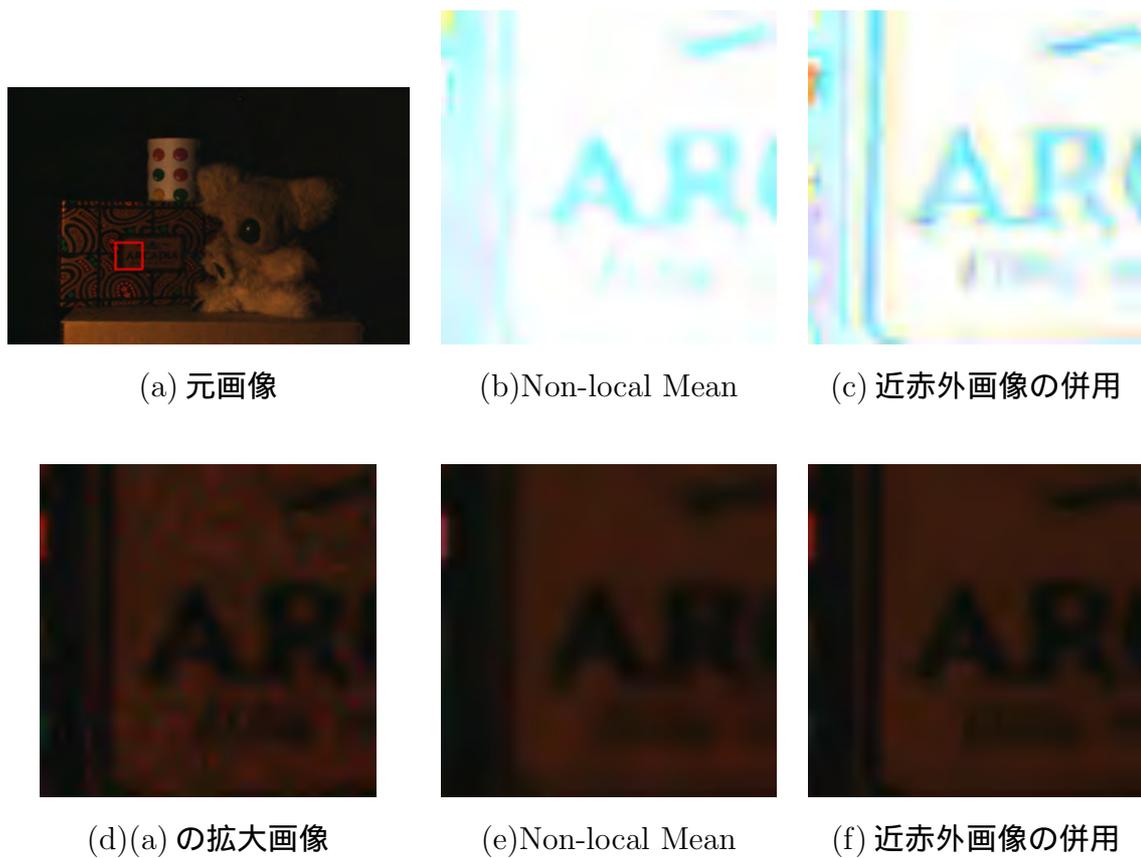


図 4.5: 近赤外画像を併用する場合としない場合との比較。(a) は元画像。(b) は (a) の赤色矩形領域における拡大画像。(c) は高周波成分に対して Non-local Mean を適用した結果。(d) は高周波成分に対して近赤外画像を併用した Non-local Mean の結果。(e) と (f) はそれぞれ (c) と (d) に低周波成分を合わせた結果。

表 4.2: Bennett らによる手法と提案手法の定量的な比較結果

矩形領域	元画像	Bennett らの手法	提案手法
赤色	22.8	43.7	9.05
緑色	49.0	29.5	12.6
青色	45.0	17.7	13.7

4.1.4 他の手法との比較

第 2.2.2 節で紹介した, Bennett らによる近赤外画像を用いた低照度シーンのノイズ除去手法との比較を行った. 図 4.6 が彼らの手法と提案手法との比較結果, 表 4.2 が定量的な比較である. 図 4.6 の箱の領域を見てわかるように, Bennett らの提案手法の処理結果は時間軸平均画像より明るくなってしまった. これは, 彼らの手法では近赤外フラッシュ画像の高周波成分を用いているためであると考えられる. 理想的には, 画像の陰影の情報は低周波成分に, エッジやディテールの情報は高周波成分に含まれるべきである. しかし, 実際には高周波成分にも陰影の情報が多少含まれるため, 低照度カラー画像と陰影の異なる近赤外フラッシュ画像の高周波成分をのせることによって, 明るさが変わってしまったと考えられる. 提案手法では, 近赤外フラッシュ画像はテクスチャの類似度を計算にだけ使い, 画素値は低照度から画像のものを利用している. 陰影の異なる二つの画像を直接合成していないため, 陰影が変化していない様子がわかる. 表 4.2 の定量的な比較結果は, 図 4.5 の三つの領域に対して比較したものとなっている. Bennett らによる手法よりも, 提案手法のほうが優れていることがわかる.



(a) 元画像

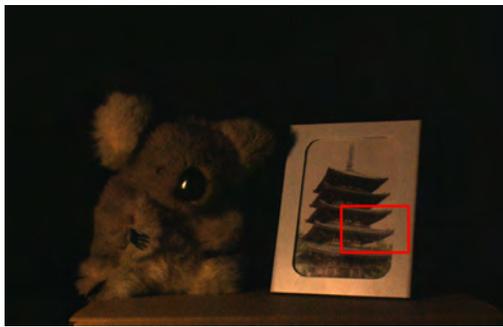


(b) Bennett ら手法の拡大画像 (c) 提案手法の拡大画像 (d) 時間軸平均画像の拡大画像

図 4.6: Bennett らの手法との比較結果．わかりやすさのため，拡大画像は明るさを変えて表示

4.1.5 提案手法の失敗例

図 4.7 は，提案手法が失敗している例である．近赤外フラッシュにより，図 4.7(b) の近赤外画像中の写真立てに図 4.7(a) のカラー画像中には存在しないハイライトが発生した．このような場合，ハイライトが発生している領域では類似度が等しくなってしまうため，図 4.7(e) のようにぼやけた画像が得られた．図 4.7(d) には存在する屋根と屋根の間の模様が図 4.7(e) では確認できなくなってしまった．このような場合，ハイライトを検出してハイライト領域では近赤外画像を使わずにノイズ低減を行う必要がある．



(a) カラー画像



(b) 近赤外画像



(d) カラー画像



(e) 失敗例

図 4.7: 提案手法の失敗例 . (a) カラー画像 . (b) 近赤外画像 . (c)(a) の矩形領域の拡大画像 . (d) 近赤外画像を併用したことによる失敗例

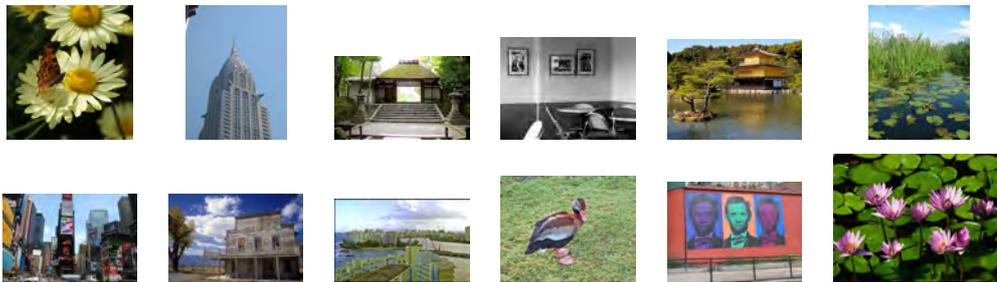


図 4.8: ブラカーネルの評価に用いた画像

4.2 低照度シーンのブラー除去

続いて、低照度シーンを撮影した際のブラー除去についても実験を行った。撮影に用いた Sony 製の XC-003, XC-EI50 の初期設定ではインタレースモードで撮影される。その場合、ブラーが発生した画像を撮影すると、偶数フィールドと奇数フィールドでずれるため、ぎざぎざの画像が得られる。そこで、ノンインタレースモードの設定を行い撮影した。そのため、画像サイズがノイズ除去の際に用いたものの半分の大きさとなった。まず、推定されたブラカーネルについて定量的な実験を行い、推定されたブラカーネルを用いてブラー除去を実行した。

4.2.1 推定されたブラカーネルの定量的評価

まず、この手法で推定されたブラカーネルに対して定量的な評価を行った。具体的には、ある画像をあらかじめ決められた経路に沿って並進させた複数枚の画像を作った。続いて、これらの画像をもとに、第 3.3.2 節で説明した手法でブラカーネルの推定を行った。並進させて作った複数の画像をすべて使用する場合（サンプリング間隔 1）、一枚おきに使用する場合（サンプリング間隔 2）、二枚ごとに称する場合（サンプリング間隔 3）で比較を行った。最後に、推定されたカーネルと、あらかじめ決められた経路との誤差の平均と分散を計算した。図 4.8 が評価に用いた画像、表 4.3 が誤差の平均と分散の計算結果である。表 4.3 の 2 つの経路について評価を行った。いずれの場合も、サブピクセルの精度でブラカーネルの推定が可能となっている。また、分散の値が小さいことから、どのような種類の画像に対しても同様な結果を返すことが言える。

表 4.3: 推定されたブラーカーネルの誤差

軌跡	$y = \sin x$		$y = \sqrt{r^2 - x^2}$	
	平均	分散	平均	分散
1	0.0000	0.0000	0.0079	0.0001
2	0.0774	0.0006	0.1409	0.0000
3	0.9028	0.0059	0.5417	0.0032



図 4.9: 近赤外画像群

4.2.2 ブラー除去結果

続いて、実際に撮影した画像を用いてブラーカーネルの推定とブラー除去を実行した。図 4.9 が撮影された近赤外画像群、図 4.10 がブラー画像である。図 4.9 の画像を用いてブラーカーネルの推定を行った結果、図 4.11(a) が得られた。図 4.10 を見るとぶれの軌跡が推測できるが、図 4.11(a) の推定されたブラーカーネルの軌跡と似ていることがわかる。さらに、このブラーカーネルを用いて、ブラー画像図 4.10 に対してデコンボリューションを実行した結果が図 4.11(b) である。入力されたブラー画像と比較すると、ブラーが除去されている様子わかる。ただし、完全に除去されたわけではなく、依然としてブラーが残っている領域も存在している。



図 4.10: ブラー画像

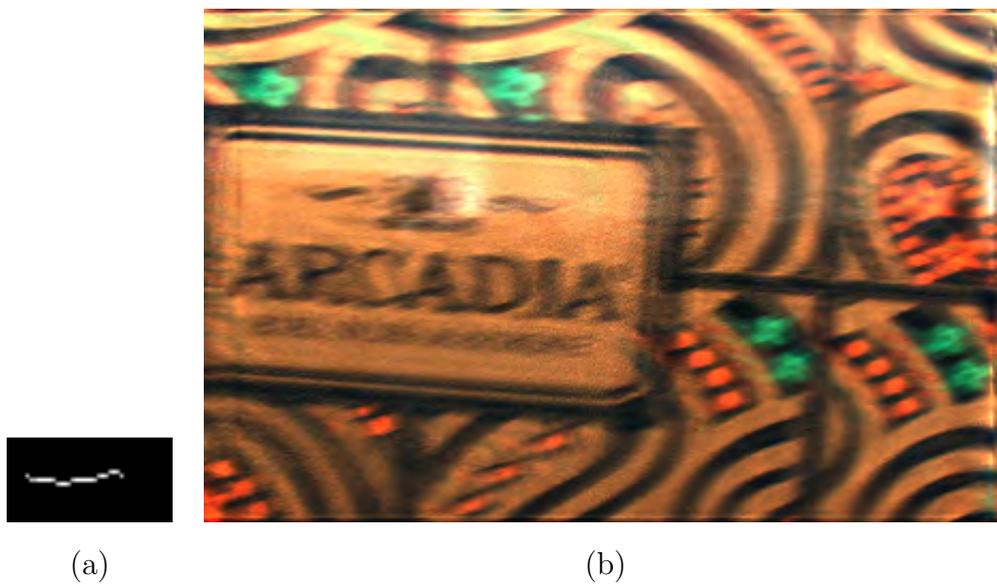


図 4.11: 推定されたブラーカーネルとブラー除去の結果

第5章 結論

5.1 本論文のまとめ

本論文では、カラーカメラに近赤外カメラと近赤外フラッシュを併用することで、低照度シーンにおいて撮影された画像の画質を改善する手法を提案した。特に、ノイズの除去とブラーの除去に着目し、実装と評価を行った。ノイズ除去に関しては、既存の手法では、カラーカメラでフラッシュ画像と低照度画像を別々に撮影する必要があり、静止シーンにしか適用できないという問題が存在した。しかし、提案手法を適用することによって動きのあるシーンに対しても適用可能となった。また、低照度シーンを撮影する際には、ブラーの発生が問題となる場合がある。ブラーにも対処するために、同じ撮影装置を用いたブラー除去についても検討を行った。

ノイズ除去の手順は、まず撮影されたカラー画像に対して近赤外画像を併用したフィルタリングを適用し、低周波成分と高周波成分に分解した。さらに、高周波成分に対して近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm を適用し、ノイズの低減を行った。最後に低周波成分と高周波成分を合わせることで、ノイズを除去した低照度画像の獲得に成功した。実際にカラーカメラと近赤外カメラで同一シーンを同時に撮影する装置を組み、動きを含むシーンについて、撮影された画像を用いてノイズが除去されることを示した。さらに、静止シーンに対しては提案手法の処理結果と時間軸平均画像を比較することによって、提案手法の定量的な評価を行った。また、近赤外画像を用いることがノイズ除去に有効であること、Bennett らの近赤外画像を用いたノイズ除去手法と違って提案手法では陰影を変えずにノイズ除去が行えることがわかった。

ブラー除去では、まず複数枚撮影した近赤外画像を用いてオプティカルフローを算出し、ぶれの軌道を計算することによってブラーカーネルの推定を行った。続いて推定されたブラーカーネルと Richardson-Lucy のデコンボリューション手法を用いて、ブラーの除去を行った。シミュレーション実験を行うことで、推定さ

れたブローカーネルの定量的な評価を行った．さらに，実際に撮影された画像を用いてブローの除去が可能であることを示した．

5.2 今後の課題

5.2.1 撮影装置の改良

今回撮影に用いた近赤外のフラッシュは，白熱電球に近赤外光のみ透過するフィルタを併用することによって代用した．白熱電球とフィルタを用いることで提案手法の有効性は示せたが，より説得力を増すために，今後は実際に近赤外フラッシュを用いて実験を行う予定である．

5.2.2 ハイライトを含む場合の処理

第4.1.5節で説明したように，近赤外フラッシュを照射することにより，撮影シーンでハイライトが生ずる場合がある．このとき，低照度カラー画像にはハイライトが生じていないため，近赤外画像を用いて提案手法を適用するとぼやけた画像が得られ，ノイズの低減に失敗した．よって，ハイライトを含むシーンに対しては，まずハイライトが生じている領域を検出し，その領域については近赤外画像を用いない手法を適用する必要がある．今後はハイライトを含む場合の対処についても考えていく．

5.2.3 近赤外画像とカラー画像の関係

提案手法では，高周波成分を得るために近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm を使用した．このアルゴリズムは，テクスチャの類似度を計算するために近赤外画像を用いている．しかし，可視光に感度があるカメラで撮影された画像と近赤外光に感度があるカメラで撮影された画像は，撮影対象の反射特性のため，エッジなどが異なる領域が存在する．したがって，厳密には近赤外画像だけを用いてテクスチャの類似度を計算した場合の処理結果は，実際に人が目で見たシーンと異なる可能性がある．今後は，異なる波長帯で撮影された画像を合成するための，より理論的な手法について検討する必要がある．具体的には，同一シーンを撮影した可視光画像と近赤外画像の関係について調査する予定である．

5.2.4 ブラー除去

本論文で実装したブラー除去手法は，撮影に用いた装置は異なるが，Ben-Ezraらが以前に発表した手法と同じものであった．今後は，オリジナリティのあるブラー除去手法を考える予定である．また，本論文ではゲインを上げてシャッタースピードを速くした場合にはノイズが発生するためノイズ除去を行い，ゲインを下げてシャッタースピードを遅くした場合にはブラーが発生するためブラー除去を行った．しかし，実際には低照度シーンを撮影すると一枚の画像中にブラーとノイズが同時に発生する場合がある．今後は，近赤外カメラと近赤外フラッシュを併用してノイズとブラーを同時に除去する手法について検討を行う．

謝辞

本研究を行うにあたり，常日頃から多大な時間を割いて熱心にご指導くださいました佐藤洋一准教授に心より御礼申し上げます．研究だけにとどまらず，公私にわたる様々な相談に乗ってくださいました岡部孝弘助教，佐藤いまりさんに深く御礼申し上げます．順調な研究生生活を送るにあたり，研究以外の様々な部分でサポートをしてくださった秘書の鈴木咲恵さん，新木真理子さん，今川洋子さんに心より感謝いたします．また，私の研究の滞りない遂行に協力していただきました佐藤研究室の皆さんに心より感謝いたします．最後に何不自由ない学生生活を支援してくださった両親と，精神的な支えとなってくださった友人全員に深く感謝いたします．皆様，本当にありがとうございました．

2009年2月4日

松井壮介

参考文献

- [1] Camera Calibration Toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- [2] A. Agrawal and R. Raskar. “Resolving Objects at Higher Resolution from a Single Motion-blurred Image”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’07)*, pp. 1–8, 2007.
- [3] A. Agrawal, R. Raskar, S.K. Nayar, and Y. Li. “Removing Photography Artifacts using Gradient Projection and Flash-Expoure Sampling”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2005*, pp. 828–835, 2005.
- [4] A. Baudes, B. Coll, and J.B Morel. “A Non-local Algorithm for Image Denoising”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, pp. 60–65, 2005.
- [5] A. Baudes, B. Coll, and J.B Morel. “Nonlocal Image and Movie Denoising”. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 76, No. 2, pp. 123–139, 2008.
- [6] M. Ben-Ezra and S.K. Nayar. “Motion Deblurring Using Hybrid Imaging”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’03)*, pp. 1–8, 2003.
- [7] E.P Bennett. “*Computational Video Enhancement*”. PhD thesis, University of North Carolina, the Department of Computer Science, 2007.
- [8] E.P. Bennett and L. McMillan. “Video Enhancement Using Per-Pixel Virtual Exposures”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2005*, pp. 845–852, 2005.
- [9] Y. Cai, K. Huang, T. Tan, and Y. Wang. “Context Enhancement of Nighttime Surveillance by Image Fusion”. In *Proc. the 18th International Conference on Patern Recognition (ICPR’07)*, pp. 980–983, 2006.

- [10] J. Chen and C.K. Tang. “Spatio-Temporal Markov Random Field for Video Denoising”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’07)*, pp. 1–8, 2007.
- [11] E. Eisemann and F. Durand. “Flash Photography Enhancement via Intrinsic Relighting”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2004*, pp. 673–678, 2004.
- [12] J. Foley, A. van Dam, S. Feiner, and J. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [13] R.C. Gonzalez and R.E. Woods. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2002.
- [14] H. Hoppe and K. Toyama. “Continuous Flash”. Technical report, Microsoft Research, 2003.
- [15] A. Ilie, R. Raskar, and J. Yu. “Gradient Domain Context Enhancement for Fixed Cameras”. In *Proc. Asian Conference in Computer Vision (ACCV’04)*, 2004.
- [16] E. Land and J. McCann. “Lightness and Retinex Theory”. *Journal of Optical Society of America*, pp. 1–11, 1971.
- [17] J. Li, S. Li, Q. Pan, and T. Yang. “Illumination and Motion-based Video Enhancement for Night Surveillance”. In *Proc. 2nd Joint IEEE International Workshop on Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracking and Surveillance 2005*, pp. 169–175, 2005.
- [18] Z. Liu, Y. Shan, and Z. Zhang. “Expressive Expression Mapping with Ratio Images”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 271–276, 2001.
- [19] B.D. Lucas and T. Kande. “An Iterative Image Registration Technique with Anapplication to Stereo Vision”. In *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, pp. 121–130, 1981.
- [20] L.B. Lucy. “An Iterative Technique for the Rectification of Observed Distributions”. *Astronomical Journal*, p. 745, 1974.

- [21] P. Perona and J. Malik. “Scale Space and Edge Detection using Anisotropic Diffusion”. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 629–939, 1990.
- [22] G. Petschnigg, M. Agrawala, and H. Hoppe. “Digital Photography with Flash and No-Flash Image Pairs”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2004*, pp. 664–672, 2004.
- [23] R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin. “Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluttered Shutter”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2006*, pp. 795–804, 2006.
- [24] R. Raskar, A. Ilie, and J. Yu. “Image Fusion for Context Enhancement and Video Surrealism”. In *Proc. International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR’04)*, pp. 85–94, 2004.
- [25] H.W. Richardson. “Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration”. *Journal of Optical Society of America*, pp. 55–59, 1972.
- [26] L. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi. “Nonlinear Total Variation based Noise Removal Algorithm”. *Physica D*, pp. 259–268, 1992.
- [27] Q. Shan, J. Jia, and A. Agarwala. “High-quality Motion Deblurring from a Single Image”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2008*, pp. 1–8, 2008.
- [28] Y.W. Tai, H. Du, M.S. Brown, and S. Lin. “Image/Video Deblurring using a Hybrid Camera”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’08)*, pp. 1–8, 2008.
- [29] C. Tomasi and R. Manduchi. “Bilateral Filtering for Gray and Color Images”. In *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV’98)*, pp. 839–846, 1998.
- [30] L. Yuan, J. Sun, L. Quan, and H.Y. Shum. “Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2007*, pp. 1–8, 2007.

- [31] X. Zhang, T. Sim, and X. Miao. “Enhancing Photographs with Near Infrared Images”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’08)*, pp. 1–8, 2008.
- [32] 山崎彬人, 高氏秀則, 金子俊一, 金出武雄, 大城英裕. “Denighting: 固定カメラからの観測画像群に基づく夜間画像改善”. *画像の認識・理解シンポジウム*, pp. 275–282, 2008.

発表文献

1. 松井壮介, 岡部隆弘, 佐藤洋一: 近赤外画像を用いた低照度シーンにおける画質改善, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2008-CVIM-165-31, pp. 213–220 (2008).