

近赤外画像を用いた低照度シーンにおける画質改善

松井 壮介[†] 岡部 孝弘[†] 佐藤 洋一[†]

[†] 東京大学 生産技術研究所
〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
E-mail : {matsui, takahiro, ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし

本研究では、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を効果的に除去する手法を提案する。低照度画像の画質改善について、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。

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

Sosuke Matsui[†] Takahiro Okabe[†] Yoichi Sato[†]

[†]Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku,
Tokyo 153-8505, JAPAN
E-mail : {matsui, takahiro, ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract

In this paper, we propose a noise reduction technique for images taken under dark illumination using a near-infrared image. To reduce noise in dark images, existing methods use a flash image taken by a color camera. However, these methods force us to take pictures twice with flash and no-flash image and cannot be used for dynamic scenes. Our method takes a flash image and a no-flash simultaneously by using a near-infrared camera and a color camera, and as a result is applicable to dynamic scene.

1 はじめに

デジタルカメラで低照度シーンを撮影する際、撮影者はフラッシュを用いるか用いないかで頭を悩ます。フラッシュを用いない場合、撮影される画像と実際の撮影シーンとの間で陰影は変化しない。しかし、光量が十分でないためセンサのゲインを上げる必要があり、ノイズが目立つという欠点がある。シャッター速度を遅くすることによって十分な光量を得る方法もあるが、撮影中に被写体やカメラが動くことによってぶれが発生しやすくなる。これに対して、フラッシュを用いる場合は十分な光量が得られる。

そのため、センサのゲインを低くすることが可能となり、ノイズが目立ちにくい。また、シャッター速度を速くできるため、ぶれの発生も抑えられる。一方で、フラッシュを用いると撮影シーンの陰影を変えてしまい、明るいシーンで撮ったような画像になってしまう。このように、低照度シーンの撮影ではフラッシュを用いる場合と用いない場合でそれぞれ一長一短がある。

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、低照度画像のノ

イズを除去することである。これまでも、低照度画像とフラッシュ画像を用いて低照度画像の画質改善を図る手法が提案されてきた [2-7]。Eisemann と 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 [3,5]。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い、既存のフィルタリングと比較して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。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 [4]。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。

山崎らは監視カメラで撮影した夜間の画像と昼間の画像を組み合わせ、夜間の画像のコントラストを改善する手法を提案した [7]。この手法では、まず、固定カメラで同一の場所を終日観測した。次に、撮影された大量の昼間・夜間画像を使用して、現在撮影されている夜間の画像を昼間に撮影された画像のようにコントラストの改善を行った。しかし、この手法はノイズについて考慮していないため、低照度画像のノイズを強調してしまうという欠点がある。また、初めて撮影するシーンには適用できないという限界がある。

複数のカラー画像を組み合わせ、低照度画像の画質改善を図るこれらの手法に対して、近赤外画像と低照度カラー画像を組み合わせ、低照度カラー画像の画質を改善する手法も存在する。Zhang らは低照度カラー画像に近赤外画像を併用して低照度画像のコントラスト改善を実現した [6]。彼らの目的がコントラスト改善なのに対して、われわれは撮影シーンの陰影を変えず、見た目通りの画像の撮影を実現するために、低照度シーンの撮影の際に現れるノイズ除去を目指す。Bennett らは低照度画像のノイズ除去を

図っているが [2]、彼らの手法では色信号の高周波成分が改善されないため、色ずれが発生する可能性がある。

われわれの手法では、近赤外フラッシュを照射して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。これにより、カラーカメラで低照度画像が、近赤外カメラでフラッシュ画像が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。

提案手法における処理の概要は次の通りである。まず、低照度画像の低周波成分を取り出す。低周波成分とは空間方向の変化が滑らかな成分であり、撮影シーンに存在する物体や陰影が含まれる。低周波成分を得るために、撮影された近赤外画像の画素値に基づいて決定した重みを利用して、低照度画像のエッジを保存するようなフィルタリングを行う [2]。さらに、元画像をフィルタリングによる出力で割って高周波成分を得る。高周波成分とは空間方向の変化が急な成分であり、ノイズやエッジ、ディテールが含まれる。ここで、低照度画像中に発生するノイズは平均値がゼロのガウシアンノイズを仮定する。高周波成分に対して、Baudes らによる Non-local Mean Algorithm [1] を発展させたフィルタリングを適用し、ノイズを低減する。Non-local Mean Algorithm とは、画素 p の値を改善するために、画像の中から p 周りの領域と似たテクスチャの領域を探し出し、それらの領域の中心画素の値との加重平均を取ることによって、平滑化を実現する手法である。この手法は他の平滑化手法と比較して、エッジやディテールが保存されやすいことが報告されている [1]。最後に、平滑化した高周波成分を低周波成分と合わせることによって、ノイズを低減した低照度画像を得る。

以下、本稿では第2節で提案手法の概要を述べる。次いで第3節で実験結果を説明し、第4節で結論を述べる。

2 提案手法

本稿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

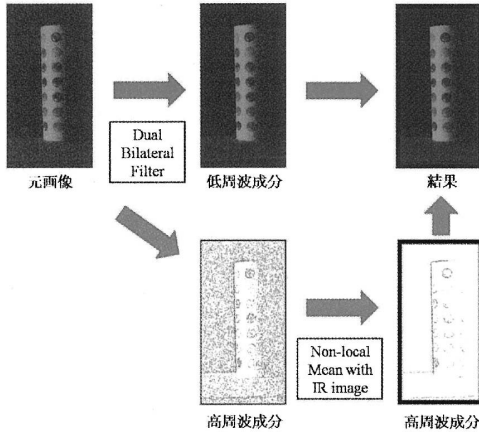


図 1: 本手法のフロー

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 1 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。

2.1 事前準備

提案手法では、図 2(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 2(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、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 2(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。

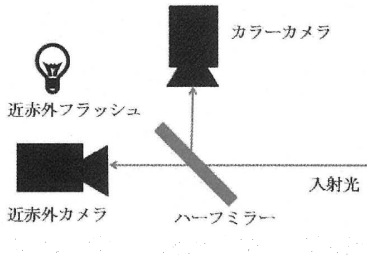
2.2 Dual Bilateral Filter

本稿で提案するノイズ低減手法では、まず、Dual Bilateral Filter [2] 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。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。

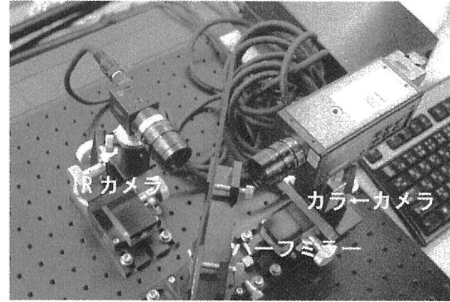
具体的には、入力画像 A の色空間を YUV 空間に変換し、画素 p における Y 値に対し以下の処理を行う。

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

$g_d(\cdot)$, $g_{\text{IR}}(\cdot)$, $g_y(\cdot)$ 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。通常のパララレ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、パララレ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 [2]。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 [2] 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



(a) 撮影装置の模式図



(b) 撮影装置

図 2: 撮影装置の模式図と実際に使用した装置

である。今回、領域の大きさは 7×7 とした [2]。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。

$$A^{\text{High}}(p) = \frac{A(p) + \epsilon}{A^{\text{Low}}(p) + \epsilon} \quad (2)$$

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 [5]。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。

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 [1] 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取ることでノイズ低減を実現する手法である (図 3)。他の平滑化手

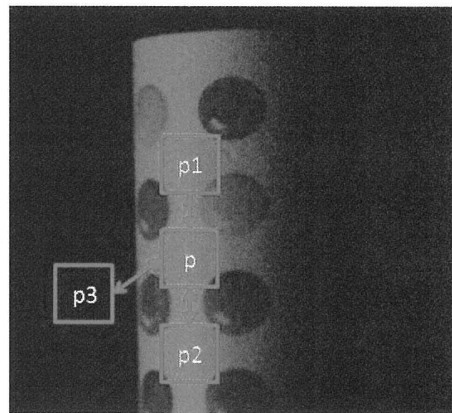


図 3: Non-local Mean Algorithm の仕組み。テクスチャの類似度を計算し、加重平均を取る。p と p1, p2 の類似度は高いので重みは大きくなり、p と p3 の類似度は低いので重みは小さくなる。

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。

$$A^{\text{Low}}(p) = \frac{1}{Z_N(p)} \sum_{p' \in \Omega} \{g(\|v(A(p)) - v(A(p'))\|) A(p')\} \quad (3)$$

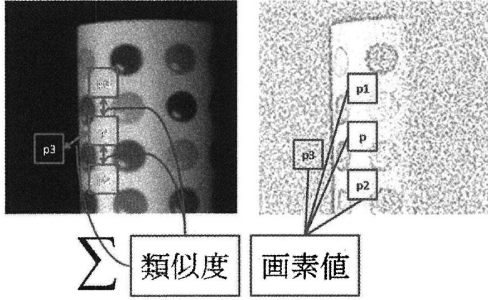


図 4: 近赤外画像を併用した Non-local Mean Algorithm の仕組み。左図は近赤外画像、右図は元画像の高周波成分である。近赤外画像でテクスチャの類似度を計算し、低照度画像の高周波成分の画素値との加重平均を取る。

$Z_N(p)$ 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) 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 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。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。

画素 p における近赤外画像の画素値を $I_{IR}(p)$ とする。低照度画像の高周波成分 $A^{High}(p)$ 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。

$$A^{Detail}(p) = \frac{1}{Z_{IR}(p)} \sum_{p' \in \Omega} \{g(\|v(I_{IR}(p)) - v(I_{IR}(p'))\|) A^{High}(p')\} \quad (4)$$

$Z_{IR}(p)$ 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、 $v(I_{IR}(p'))$ の範囲を p' を中心とした 3×3 の領域に含まれる画素とした。式 (2.3) の処理を高周波成分の R, G, B 値に適用し、得られた $A^{Detail}(p)$ を Dual Bilateral Filter の出力と掛け合わせることで、最終的な出力 $A^{Final}(p)$ を得る。

$$A^{Final}(p) = A^{Low}(p) \times A^{Detail}(p) \quad (5)$$

3 実験結果

図 5 は提案手法の結果である。図 5(a), (b) のカラー画像と近赤外画像を使用して、図 5(a) の赤、緑、青色の領域に対する結果を図 5 の 2 段目から 4 段目に示す。図 5(c), (f), (i) のノイズは図 5(d), (g), (j) のように低減された。また、図 5(e), (h), (k) 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 5(i), (j), (k) 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 5(d), (g) 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。

図 6 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 6(a) の矩形領域図 6(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 6(b), 使った場合が図 6(c) である。図 6(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 6(b) と (c) にそれぞれ低周波

表 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

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

成分を加えた図 6(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 6(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 5 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 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って, 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.

図 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 7(b) の近赤外画像中の写真立てに図 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 7(e) のようにぼやけた画像が得られた. 図 7(d) には存在する屋根と屋根の間の模様を図 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.

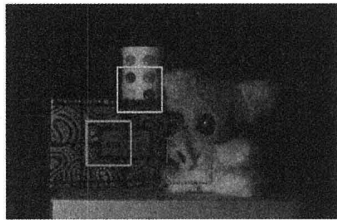
4 おわりに

本稿では, 近赤外画像を併用した低照度カラー画像のノイズ低減手法を提案した. 近赤外画像を併用しない場合と比較してノイズ低減の効果が大きいことを示した. また, フラッシュによるハイライトが発生するような領域では提案手法を適用できないということも示した.

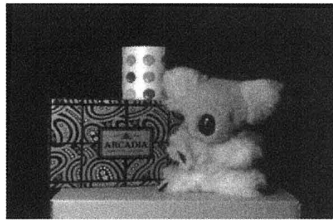
今後は, このような領域を自動的に検出し, 近赤外画像を使用しないノイズ低減手法と組み合わせることで低照度シーンの画質改善を目指す. さらに, 低照度シーンでシャッタースピードを遅くして撮影を行うことによって発生するぶれを, 近赤外フラッシュ画像の併用によって除去することも検討する予定である.

参考文献

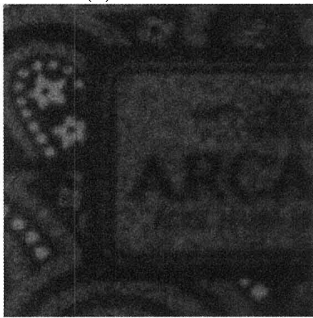
- [1] A. Baudes, B. Coll, and J.B Morel. “A Non-local Algorithm for Image Denoising”. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, pp. 60–65, 2005.
- [2] E.P Bennett. “*Computational Video Enhancement*”. PhD thesis, University of North Carolina, the Department of Computer Science, 2007.
- [3] E. Eisemann and F. Durand. “Flash Photography Enhancement via Intrinsic Relighting”. In *Proc. ACM SIGGRAPH 2004*, pp. 673–678, 2004.
- [4] H. Hoppe and K. Toyama. “Continuous Flash”. Technical report, Microsoft Research, 2003.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.



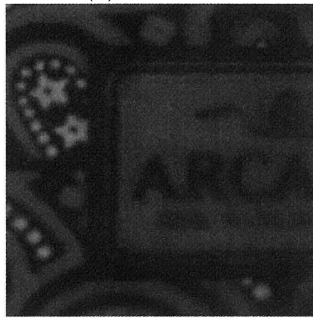
(a) カラー画像



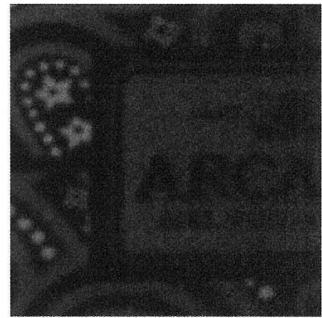
(b) 近赤外画像



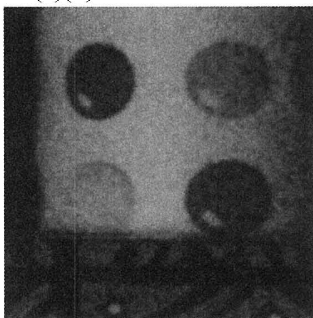
(c)(a) の赤色矩形の領域



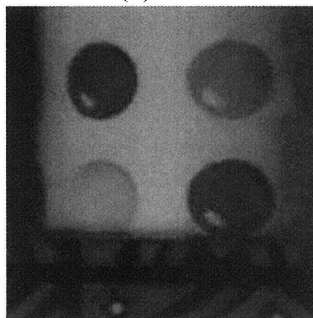
(d) 結果



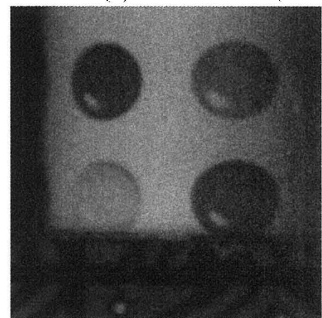
(e) 平均画像



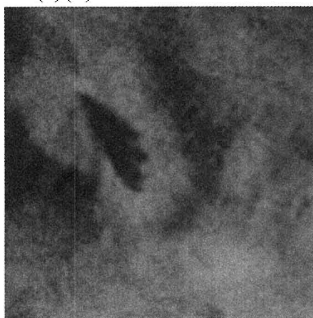
(f)(a) の緑色矩形の領域



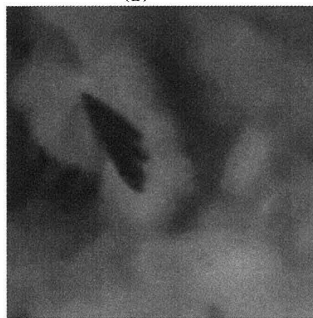
(g) 結果



(h) 平均画像



(i)(a) の青色矩形の領域



(j) 結果



(k) 平均画像

図 5: 本手法の適用結果. (a) カラーカメラで撮影された画像. (b) 近赤外画像. (c)(a) で赤色の矩形で囲まれた領域. (d)(c) へ提案手法を適用した結果. (e)(c) の平均画像. (f)(a) で緑色の矩形で囲まれた領域. (g)(f) へ提案手法を適用した結果. (h)(f) の平均画像. (i)(a) で青色の矩形で囲まれた領域. (j)(i) へ提案手法を適用した結果. (k)(i) の平均画像

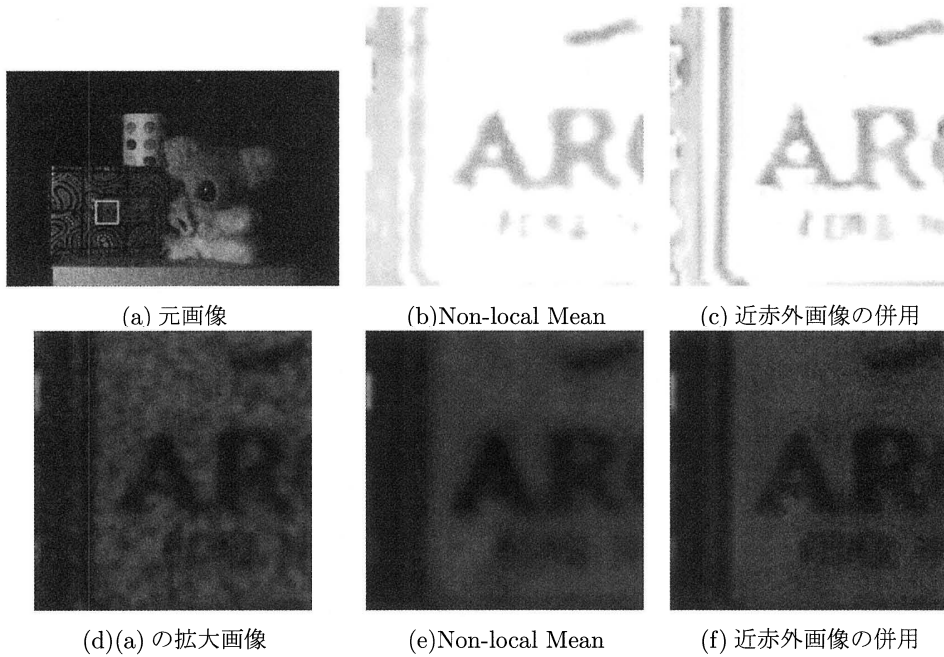


図 6: 近赤外画像を併用する場合としない場合との比較. (a) は元画像. (b) は (a) の赤色矩形領域における拡大画像. (c) は高周波成分に対して Non-local Mean を適用した結果. (d) は高周波成分に対して近赤外画像を併用した Non-local Mean の結果. (e) と (f) はそれぞれ (c) と (d) に低周波成分を合わせた結果.

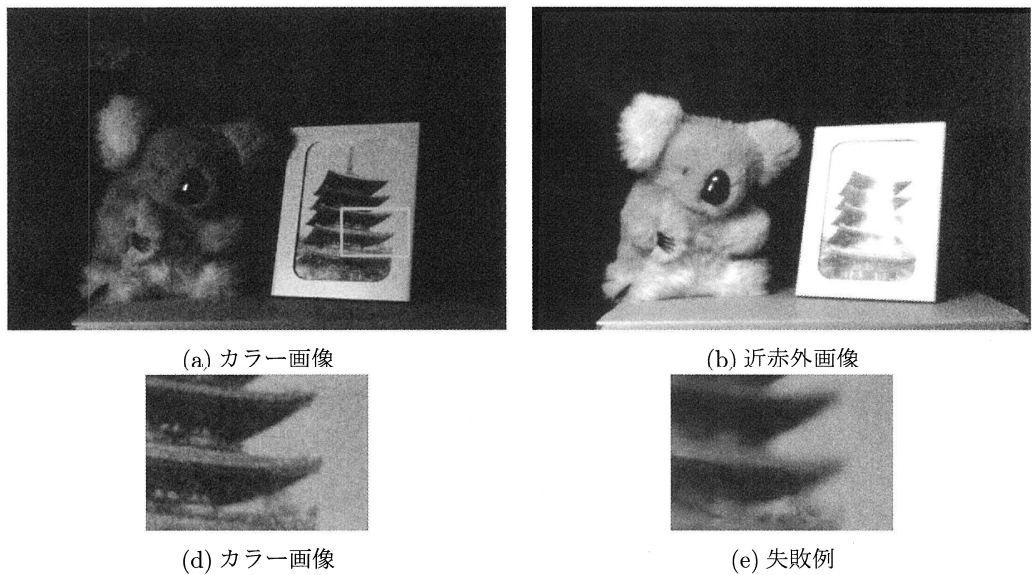


図 7: 提案手法の失敗例. (a) カラー画像. (b) 近赤外画像. (c)(a) の矩形領域の拡大画像. (d) 近赤外画像を併用したことによる失敗例