

赤外フラッシュと1台のカメラを利用した低照度シーンのカラー画像生成

ゴウキム シン[†] 田中 正行^{††} 奥富 正敏^{††}

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

^{††} 東京工業大学工学部制御システム工学科 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: [†]gohkimshing@yahoo.com, ^{††}{mtanaka,mxo}@ctrl.titech.ac.jp

あらまし 本研究では、低照度シーンを高いゲインで撮影した低照度カラー画像と赤外フラッシュを用いて撮影した赤外フラッシュ画像を画像ペアとして用いることにより、低照度シーンにおいても鮮明なカラー画像を生成できる手法を提案する。従来の赤外フラッシュ画像を利用した画質改善の手法では、赤外フラッシュ画像を参照画像として利用し、低照度カラー画像のノイズ低減やブラー除去による低照度シーンの画質改善を実現していた。これに対し、提案手法は低照度カラー画像から得られる色情報を赤外フラッシュ画像に付加することによってモノクロの赤外フラッシュ画像をカラー化することを特徴とする。また、提案手法では、1台のカメラを用いて連続で高速に撮影した赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像を利用するが、2枚の画像間に多少の位置ずれがあっても、その影響を受けにくく、両方の画像の利点を持ち合わせた出力画像を生成することができる。

キーワード 1台カメラ、赤外フラッシュ、低照度シーン、画質改善、Colorization、カラー画像生成

1. はじめに

低ノイズに画像を撮影するために、カメラはセンサに十分な光を取り込む必要がある。近年、カメラ技術の進歩により、センサ性能が向上し、低照度シーンの撮影も可能になった。しかし、センサの性能にも限界があり、極端に低照度なシーンを撮影する際に、取り込む光量が十分ではないため、センサから十分な信号が得られず、撮影シーンを鮮明に撮影できない。このような低照度シーンを撮影するために、いくつかの方法が知られている。

取り込む光量が足りなくても、センサのゲインを上げることによって、センサから十分な信号を得ることができる。しかし、ゲインを上げた結果、センサで発生するノイズも同時に増幅され、撮影された画像の中にノイズが目立つという欠点がある。また、十分な光量を得るために、シャッタースピードを遅くする場合、シャッターが開いている間にカメラまたは被写体が動いてしまうと、撮影された画像にブラーが発生する。そのほか、低照度シーンにフラッシュという新たな光源を加え、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もできる。この場合、ノイズが目立たなく、ブラーの発生も抑えられるが、撮影した画像は実際のシーンの色合いと異なる画像が撮影されてしまうことになる。また、フラッシュに伴う強烈な光が周囲の人々に不快感を与えてしまうという欠点もある。さらに、フラッシュを使わず、赤外フラッシュを使用する撮影者もいる。この方法で撮影した画像には実際のシーンの色合いが現われない。このように、いずれの方法も、それぞれに長所と短所がある。

本研究の目的は、フラッシュを使わずにゲインを上げ

て撮影した「低照度カラー画像」と赤外フラッシュを使って撮影した「赤外フラッシュ画像」を効果的に組み合わせることによって、2枚の画像の長所を持ち合わせた高画質なカラー画像を生成し、低照度シーンの画質改善を図ることである。赤外フラッシュ画像はモノクロ画像であるものの、ノイズもブラーも目立たないという利点がある。一方、低照度画像にはノイズが目立っているが、低照度のシーンの色合いを捉えることができる。この2枚の画像を利用して、ノイズもブラーも発生しない1枚のカラー画像が生成できると考えられる。従来手法では、赤外フラッシュ画像を参考画像に利用して、低照度画像のノイズ低減を実現していた。これに対し、提案手法はColorization手法により、低照度カラー画像から得られる色情報を赤外フラッシュ画像に付加することを考える。つまり、従来手法では赤外フラッシュ画像を補助的な情報として扱い、主となる低照度カラー画像をデノイズすることを考えていたが、提案手法は赤外フラッシュ画像を主的な情報として使い、低照度カラー画像の色情報を補助情報として赤外フラッシュ画像に付加する。

また、従来手法に用いる入力画像ペアを得るには、1台のカメラを用いて2回の撮影を行う方法と、2台のカメラを用いて1回の撮影を行う方法がある。前者は、異なる時刻で撮影するため、静止シーンにしか対応できないという問題点がある。後者は同じ時刻で撮影できるため、動きのあるシーンにも対応できるが、高価で精密な撮影装置が必要となる。これに対し、提案手法は1台のカメラを用いて連続で高速に赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像の撮影を行う。本論文では、高速で撮影された2枚の画像間の被写体の動きは相対的に小さいと仮定し、入力画像ペアに小さい位置ずれがあっても適用

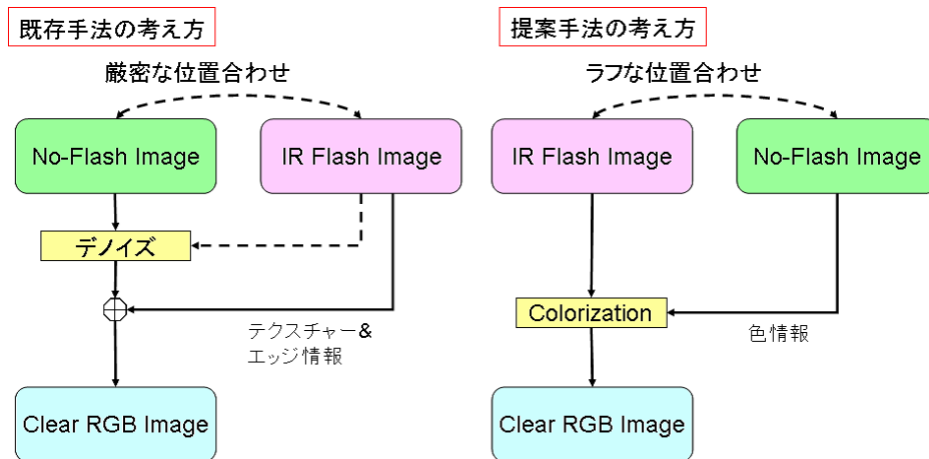


図 1 従来手法と提案手法の考え方

可能な画質改善方法を提案する。

以下、本稿は第 2. 節で低照度シーンの画質改善の既存手法について説明を行う。次に第 3. 節で提案手法について説明し、第 4. 節で実験結果について述べる。最後に、第 5. 節で本研究のまとめを行う。

2. 関連研究

これまでに、低照度シーンを撮影した画像の画質を改善する手法が数多く提案されてきた。それらの手法は大きく 1 枚の画像のみを用いるものと複数枚の画像を用いるものに分けることができる。複数枚の画像を用いる手法について、ここでは性質の異なる複数枚の画像を使用する手法について述べる。

1 枚の画像のみを使用した低照度シーンのノイズ除去について、Tomasi らは画像中のエッジを保ちつつ、ノイズを除去する Bilateral Filter (BF) を提案した [1]。BF は注目画素からの距離による重みに加えて、注目画素との画素値の差に応じて、重みをつけたフィルタである。BF は、強いエッジを保つことができるが、テクスチャーなどの弱いエッジを保てない。一方、Baudes らは画像中にはテクスチャーの似ている領域が画像中に数多く存在するという考えに基づき、テクスチャーの類似度を計算し、それに応じた重みで加重平均を計算することによってノイズの低減を実現する Non-local Mean Algorithm (NLMA) を提案した [2], [3]。Dabov らは Block-matching と 3D filtering を用いたノイズ除去手法を提案した [4], [5]。彼らの手法は BM3D と呼ばれる。Dabov らは「グループ」と呼ばれる 3 次元データ配列に類似の 2D 画像のパッチを集め、協調フィルタリングと呼ばれる手法でグループをデノイズする。最後にデノイズ結果に基づき 2D 画像を生成する。

性質の異なる複数枚の画像を使用した研究は主にフラッシュ画像を用いる手法 [6] と近赤外画像を用いる手法の 2 種類が挙げられる [7], [8]。

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

シュ画像を利用した Joint Bilateral Filter (JBF) 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 [6]。JBF は普通の BF と異なり、重みを決定する部分にはノイズの少ないフラッシュ画像の画素値を用いるため、エッジやテクスチャーを保ちながら、画像の平滑化を実現することができた。しかし、この手法は静止シーンしか適用できないという課題が残されている。

一方、Bennett らは 2 台のカメラ (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]。得られた低照度カラー画像を YUV 色空間に変換し、Y 信号に対して Dual Bilateral Filter (DBF) を適用し、低周波成分を取り出す。DBF とは、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応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である。続いて、Bennett らは画像変換手法を用いて、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 (エッジやテクスチャー) を DBF 出力結果の低周波成分に付加することによって、フィルタリングによって失われたエッジやテクスチャーの復元に成功した。このようにして得られた Y 信号と、BF によりデノイズされた UV 信号によりカラー画像を出力する手法である。同様に、松井らは DBF によって、低照度画像からノイズが低減された低周波成分を取り出す [8]。その後元画像と低周波成分との割り算から高周波成分を計算する。この高周波成分にはエッジやテクスチャーとともにノイズも含まれる。高周波成分に含まれるノイズを除去するために、近赤外画像を併用した NLMA を導入した。類似度計算によりノイズの少ない近赤外フラッシュ画像を用いることで正確に類似度が推定でき、結果としてノイズの低減性能を向上させている最後に低周波成分とノイズを低減した高周波成分をかけ合わせることによって、ノイズの少ない低照度画像を得ている。しかし、この手法では Bennett らの手法と同じく 2 台のカメラからなる高価で精密な装置を用いるため、一般の撮影者には向かない。

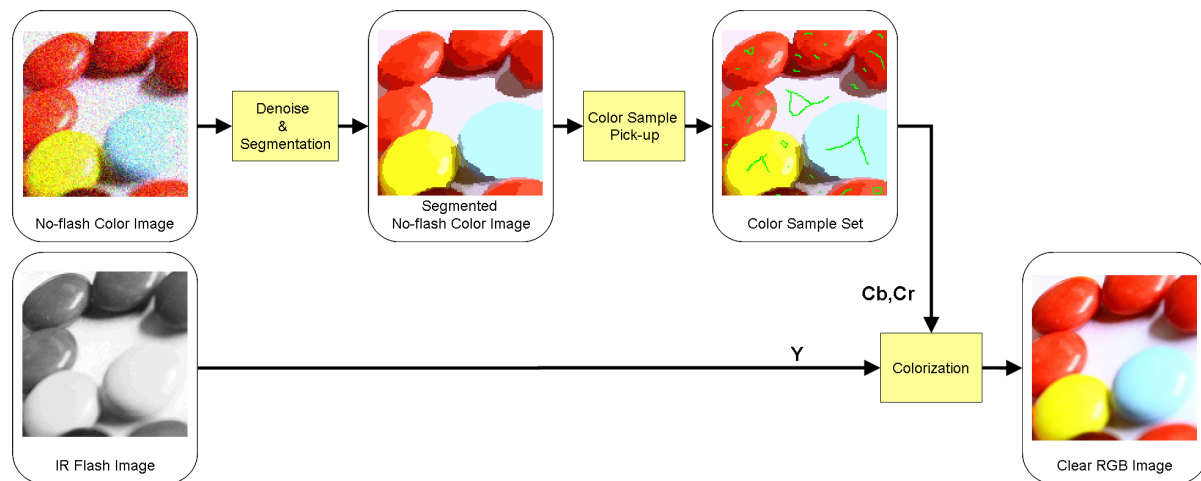


図 2 提案手法の流れ

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

本論文では1台のカメラを用いて撮影した低照度シーンの赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像からノイズもブラーもない高画質カラー画像を生成できる手法を提案する．従来手法と提案手法の考え方の違いを図1に示す．従来手法では，ノイズを含む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デノイズをすることによって画質改善を行っている．これに対し，提案手法では，ノイズの少ない赤外フラッシュ画像に対し，低照度カラー画像から得られる色情報を付加することによって，高画質のカラー画像を生成し，低照度シーンの画質改善を図る．

また，本論文では1台のカメラを用いて，赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像を連続的に撮影することを想定している．このような場合，2枚の画像間には小さなずれが生じていることが予想される．そこで，提案手法では，エッジから離れた位置における色情報をサンプリングすることにより，小さな位置ずれの生じている画像ペアに対しても適用可能な工夫がなされている．このように，提案手法では，1台のカメラを利用した撮影が可能であるため，低照度シーンを安価で手軽に，かつ高画質に撮影できることが期待される．

図2に提案手法の処理の流れを示す．まず，低照度カラー画像をデノイズし，領域分割する．その結果について，分割された領域の中心から色情報を抽出する．エッジから離れた領域の中心の色情報を抽出することにより，小さなずれにロバストな手法となっている．最後にColorizationと呼ばれる手法によって，赤外フラッシュ画像の輝度情報（Y信号）に基づいて，低照度カラー画像から抽出した色情報（Cb, Cr信号）を赤外フラッシュ画像の全領域に伝播させることによって，ノイズの少ないカラー画像を生成する．

3.2 Colorization

Colorizationとは，モノクロ画像と疎にサンプルされている色情報に基づき，カラー画像を生成する手法である．このようなColorizationはこれまでにいくつか提案されている[9], [10], [11], [12]．本論文では，Yatzivらの手法を利用する[10]．Yatzivらの手法は，注目画素と色サンプル画素との輝度画像を利用した測地線距離を計算し，測地線距離に基づく重み付き平均により注目画素の色情報を決定する手法である．この手法は，他のColorization手法と比較して，高速であることが知られている．

測地線距離とは2点間を結ぶ最短距離と定義されている．2次元平面的に考えると2画素間の最短距離は，単純なユークリッド距離で求められる．しかしながら，ここでは輝度値を「高さ」と考え，画像を3次元空間中の2次元多様体（曲面）にとらえ，この曲面に沿った経路を考える．2画素間の曲面に沿った経路は複数考えられるが，その中でも最も距離の短いものを測地線距離と定義する．このように考えた測地線距離は，2画素間のテクスチャが豊富で画素値変化が大きければより遠いと計算される．また，逆に単純なユークリッド距離が遠くても，フラットな領域であれば相対的に，近い測地線距離が計算されることになる．

図3(a)に注目画素と色サンプルとの測地線距離の概念図を示す．このような測地線距離はダイクストラ法[13]により求められることが知られている．

輝度値変化の少ない経路を有する2画素間の測地線距離は短くなる．逆に，2画素間の測地線距離が短ければ，輝度値変化の少ない経路が存在することになる．つまり，2画素間の測地線距離が短ければ，注目している画素の色は似ていると考えられる．そのため，Yatzivらは色サンプル画素との測地線距離に基づく重み付き平均により，注目画素の色情報を決定している．その概念図を図3(b)に示す．

注目画素 x の色差は式(1)のように推定される．

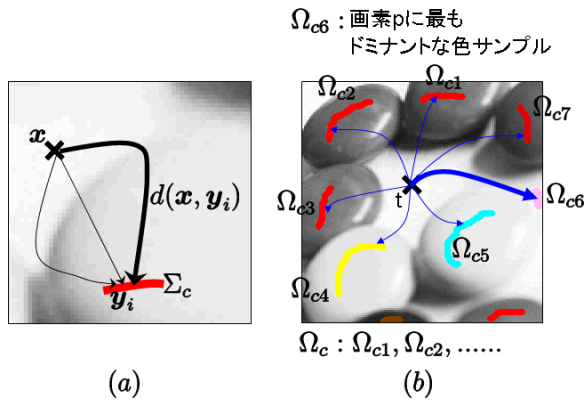


図3 Colorization の概念図

$$\hat{c}(x) = \frac{\sum_{y_i \in \Omega_c} W(d(x, y_i)) \cdot c(y_i)}{\sum_{y_i \in \Omega_c} W(d(x, y_i))} \quad (1)$$

ここで、 Ω_c は色サンプルの画素位置集合を、 $c(y_i)$ は画素位置 y_i における色差を、 $d(x, y_i)$ は画素位置 x から y_i までの測地線距離を、 $W(d)$ は重み関数を、それぞれ表す。なお、本論文では重み関数として式 (2) を用いる。

$$W(d) = d^{-6} \quad (2)$$

ところで、この重み関数は測地線距離が遠くなるに従い、急速に減少する。従って、注目画素と全ての色サンプルとの測地線距離を計算する必要はなく、測地線距離の近い数点の色サンプルを利用するだけで十分なことが多い。そこで、本論文では、測地線距離が近い方から3点の色サンプルの重み付き平均により、注目画素の色差を推定することにする。

3.3 低照度カラー画像からの色サンプル抽出アルゴリズム

提案手法では、Colorization に必要となる色情報 Σ_c を低照度カラー画像から抽出する。以降、低照度カラー画像から抽出した色情報のことを色サンプルと呼ぶ。低照度カラー画像にはノイズが非常に目立っているため、ノイズを避けて色サンプルを抽出するために、まず簡単なフィルタリングによって、低照度カラー画像のノイズを低減させる必要がある。次に、ノイズを低減させた画像において、色が似ている領域を一つの色にまとめ、一つの色サンプルとして抽出する。ところで、本研究において、動きのあるシーンを赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像交互に連続で撮影するために、2枚の画像間に常にずれが存在すると考えられる。エッジが存在する部分では、色が変化する可能性が大きい。そのため、エッジから離れた部分から色サンプルを抽出することによって、2枚の画像間にずれがあっても、ロバストに Colorization が行われることが期待される。また、カメラのデモザイキング処理により、エッジの部分に偽色が発生しやすい。以上の理由より、エッジから離れた部分から色サンプルを抽出することが望ましい。なお、本研究は動きのある

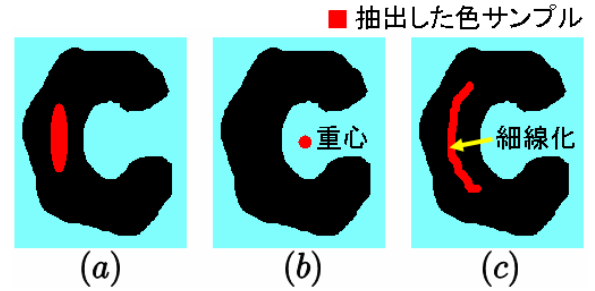


図4 色サンプルの抽出。(a) 理想的な色サンプル (b) 重心を色サンプルとした場合 (c) 領域の細線化結果

シーンを高速に撮影できるとし、2枚の画像間のずれは大きくないと仮定している。例えば、色サンプルをある領域から抽出するために、その領域の重心を求める方法が考えられる。しかし、重心を求める方法では、図4(b)に示すように、重心が求めたい領域からはみ出してしまう可能性があり、抽出した色サンプルが領域の色と異なる可能性がある。このため、図4(a)に示すように色サンプルを抽出することが望ましい。そこで、提案手法では、領域を細線化する方法が利用する。図4(c)に領域を細線化した結果の例を示す。

実際の処理では、まず低照度カラー画像をデノイズし、その後、セグメンテーションを行う。本論文では、デノイズに BM3D [4], [5] を、セグメンテーションに EDISON Code [14] を、それぞれ利用する。色情報の抽出には、エッジがぼやけていても問題ないため、強いデノイズ効果が得られるようにパラメータを調節している。また、オーバーセグメンテーションを行うことにより、低照度カラー画像からより多くの色情報を抽出している。セグメンテーションの結果を細線化し、セグメントごとに色サンプルを抽出する。抽出された色サンプルは、ピクセルの位置情報と色差情報 (Cb, Cr 信号) を持っている。抽出した色サンプルを用いて、前節に紹介した Colorization により赤外フラッシュ画像に色情報を付加する。

3.4 撮影装置

図5に示すように、Bennett らと松井らの従来手法は2台のカメラを用いてマルチカメラシステムを構築し、1回の撮影を行う方法を用いた。この方法はカラー画像と赤外画像を同じ時刻で撮影するため、動きのあるシーンにも適応できるが、2台のカメラを用いるため、高価でカメラ間の調整が容易ではない。これに対し、提案手法は1台のカメラを赤外フラッシュと同期させ、連続で高速に赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像の撮影方法を用いる。高速で撮影した2枚の画像間の被写体の動きが小さいという仮定のもとで、簡単な画像の位置合わせでも提案アルゴリズムを適用でき、入力画像ペアの利点を持ち合わせた出力画像を生成できる。このため、小さな動きのあるシーンにも対応できる。

提案手法は、赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像

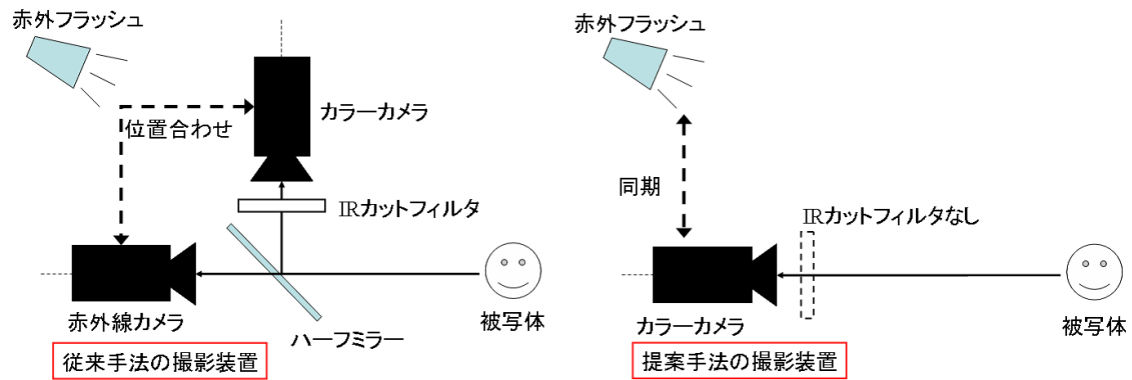


図 5 撮影装置の比較



(a) 赤外フラッシュ画像

(b) 低照度カラー画像

(c) 出力結果

図 6 静止シーンの実験結果

を撮影できる1台のカメラを利用する。一般のカラーカメラは赤外線カットフィルタが取り付けられているため、可視光の画像しか撮影ができない。本論文では、カラーカメラの赤外線カットフィルタをはずして、使用する。赤外フラッシュとして赤外LEDバー照明を利用する。

4. 実験結果

4.1 静止シーンの実験結果

提案手法による静止シーンの実験結果を図6に示す。第3.4節に述べた撮影装置から得られた入力画像ペアとそれによる出力結果を図6に示す。

図6から分かるように、提案手法の結果では元の低照度カラー画像に比べてノイズが少なく、赤外フラッシュ画像にはない色情報が付加されているのが確認できる。提案手法は赤外フラッシュ画像と低照度カラー画像から、シャープ感を持った高画質なカラー画像を生成できることが分かる。別のシーンに対する実験結果を図7に示す。図7から分かるように、複雑なシーンでも、ノイズの少ない赤外フラッシュ画像に色を復元させることができる。

図8に既存手法との比較結果を示す。比較のために、緑と赤く囲った枠の部分拡大した図を図8の第2行と第3行に示す。図8からわかるように、入力低照度カラー画像に比べて4つの手法は、いずれもノイズを取り除くことができている。BM3D [4], [5] による結果では強

いエッジを保ちつつデノイズを行えるが、図8(b)の下段の画像に示すように、テクスチャの弱いエッジについては、どうしてもエッジがなまってしまふ欠点がある。松井らによる結果(図8(c))は、2枚の入力画像の情報をを用い、赤外フラッシュ画像に基づいて、低照度カラー画像をデノイズするため、BM3Dの結果に比べて少しエッジが強調されたことが分かる。しかし、松井らのアルゴリズムは低照度カラー画像の方に重点をおいているため、ノイズな低照度カラー画像のように画像全体がぼやけていることもその結果画像から分かる。これに対し、Bennettら[7]は赤外フラッシュ画像からエッジ情報を抽出し、デノイズされた低照度カラー画像に戻す処理を行うため、以上の2つの手法よりもシャープな結果画像が得られる。しかし、図8(d)のチェーンの部分から分かるように、エッジを強調しすぎて、エッジの部分に擬似エッジが現われてしまふ欠点がある。一方、提案手法による結果では、赤外フラッシュ画像のY信号をもとにして色情報のCb, Cr信号を付加する処理をするため、赤外フラッシュ画像のエッジやテクスチャー情報を保ったまま、色を付加することができた。提案手法の結果は3つの従来手法に比較して、より自然で鮮明な結果となった。

4.2 動きのあるシーンの実験

次に、提案手法を動きのあるシーンに適用した実験を



(a) 赤外フラッシュ画像

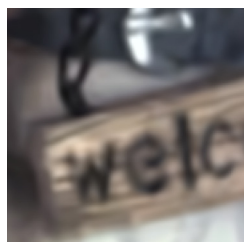
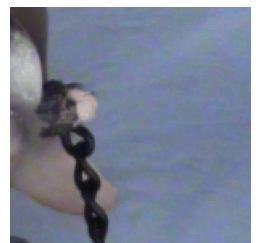
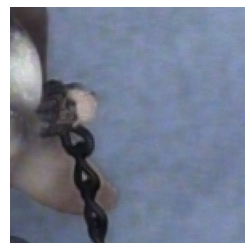
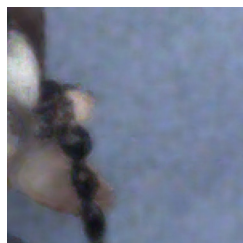
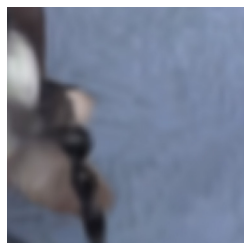
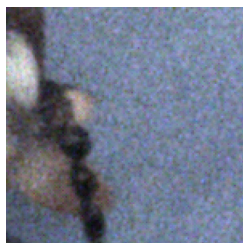
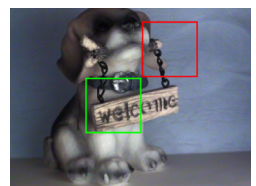
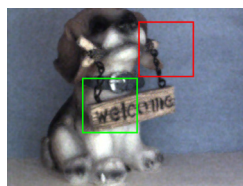
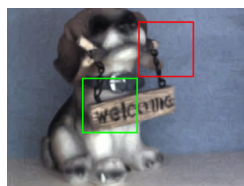
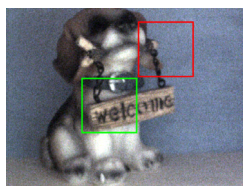


(b) 低照度カラー画像



(c) 出力結果

図 7 ほかの静止シーンの実験結果



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

図 8 静止シーンにおける提案手法と既存手法との比較．(a) 列が低照度カラー画像，(b) 列が BM3D, $\sigma=50$ による結果，(c) 列が松井らの手法による結果 [8]，(d) 列が Bennett らの手法による結果 [7]，(e) 列が提案手法による結果．

行った．実験に用いる入力画像ペアを図 9 に示す．実験には 2 種類のシーンの入力画像ペアを用いた．図 9 から分かるように，画像ペアの間にはずれが存在する．

図 9 の (a) と (b) による提案手法の出力結果を図 10 の (e) に示す．提案手法を松井らによる手法 [8] と BM3D ([4], [5]) による結果との比較を図 10 に示す．図 10 の上段に各手法の結果画像，下段に上段の結果画像の赤い枠で囲まれた部分の拡大図を示す．なお，提案手法と他の手法の出力結果にずれが生じているのは主として画像が異なるためである．

松井ら [8] による結果 (図 10(c)) では，エッジに近い部分のデノイズができていないことが分かる．一方，Bennett らによる結果 (図 10(d)) では不自然な擬似エッジが存在していることが分かる．これは，この 2 つの手法とも，2 枚の入力画像にずれがないという前提で提案された手法であるためだと考えられる．実際，2 枚の入力画像にずれが存在する場合，位置合わせを行わないまま処理を行うと，結果画像に擬似エッジやデノイズできないといった問題点がある．これに対し，提案手法の結果 (図 10(e)) では，2 枚の入力画像にずれが存在する



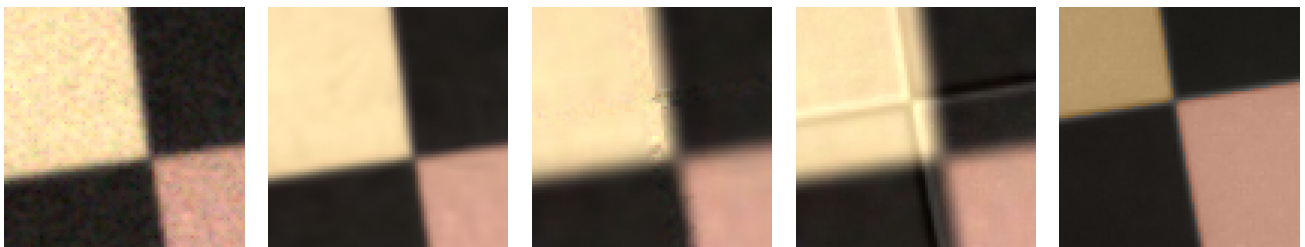
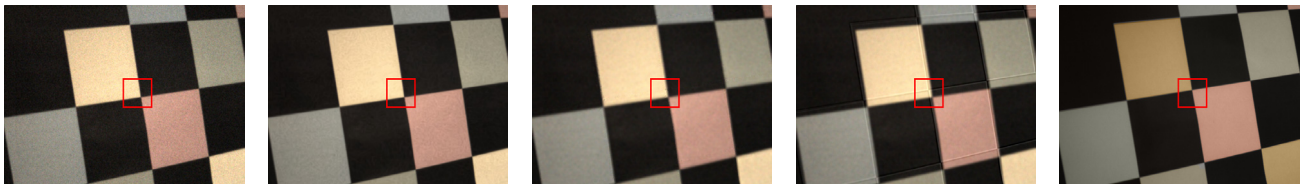
(a) 低照度カラー画像 1

(b) 赤外フラッシュ画像 1

(c) 低照度カラー画像 2

(d) 赤外フラッシュ画像 2

図 9 動きのあるシーンの入力画像ペア



(a)

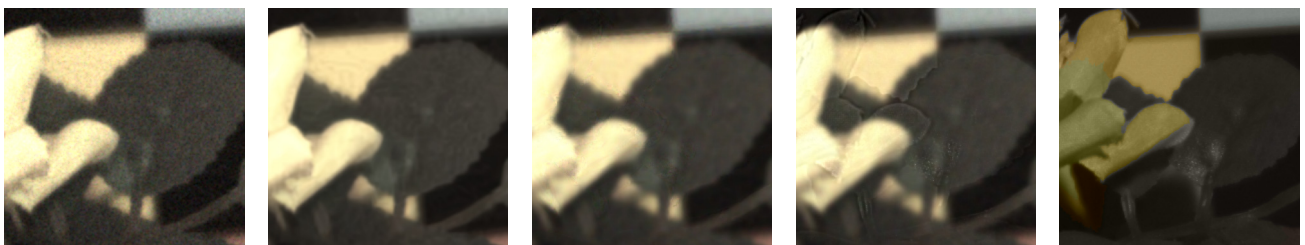
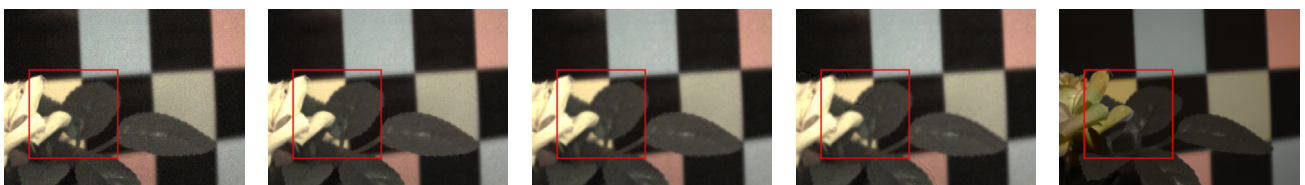
(b)

(c)

(d)

(e)

図 10 動きのあるシーンにおける提案手法と既存手法との比較。(a) 列が入力低照度カラー画像, (b) 列が BM3D, $\sigma=15$ による結果, (c) 列が松井らの手法による結果 [8], (d) 列が Bennett らの手法による結果 [7], (e) 列が提案手法による結果.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

図 11 動きのあるシーンにおける提案手法と既存手法との比較。(a) 列が入力低照度カラー画像, (b) 列が BM3D, $\sigma=15$ による結果, (c) 列が松井らの手法による結果 [8], (d) 列が Bennett らの手法による結果 [7], (e) 列が提案手法による結果.

場合でも、対応できることが分かる。さらに、提案手法による結果と BM3D の $\sigma=15$ のデノイズ結果 (図 10(b)) と比較した場合も、提案手法の方がシャープであることが分かる。BM3D は 1 枚の画像に基づくデノイズ手法であり、低照度カラー画像からしか情報を得ていない。これに対し、提案手法は 2 枚の入力画像から情報を得るため、その結果、提案手法の方が赤外フラッシュ画像のシャープさを保った出力画像を得ることができた。しかし、提案手法の結果は他の従来手法の結果と比べて、色が濃くなっていることが分かった。これは対象物の可視光に対する反射係数と赤外光に対する反射係数が異なるためと考えられる。

図 9 の (c) と (d) による提案手法の出力結果を図 11 の (e) に示す。提案手法を松井らによる手法 [8] と BM3D ([4], [5]) による結果との比較を図 10 に示す。図 10 の上段に各手法の結果画像、下段に上段の結果画像の赤い枠で囲まれた部分の拡大図を示す。各手法の問題点は図 10 に述べたと同様である。提案手法について、図 11 から分かるように、ずれが大きい部分の画素に、別の領域の色が付加されてしまうことになる。これは提案手法の限界とも考える。しかし、今後のカメラ技術の進歩によって、よりはやく 2 枚の画像が撮影できると考え、2 枚の画像ペアのずれも小さく収まることを予想し、提案手法を適応できると考える。

5. ま と め

本論文では、1 台のカメラで赤外フラッシュ画像とカラー画像を連続撮影し、その 2 枚の画像から 1 枚の高画質カラー画像を生成する手法を提案した。提案手法は先行研究と比較して、安価な装置を用いながら、動きのあるシーンに対してもある程度適応可能であり、また、低照度シーンに対して良好なカラー画像が生成できることを示した今後の課題として、出力画像の輝度値を赤外フラッシュ画像のみに頼らず、両方の入力画像を考慮したアルゴリズムを考えることが挙げられる。

文 献

- [1] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on IEEE, pp.839–846 2002.
- [2] A. Buades, B. Coll, and J.M. Morel, "A non-local algorithm for image denoising," Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on, vol.2 IEEE, pp.60–65 2005.
- [3] A. Buades, B. Coll, and J.M. Morel, "Nonlocal image and movie denoising," International Journal of Computer Vision, vol.76, no.2, pp.123–139, 2008.
- [4] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, "Image denoising with block-matching and 3 D filtering," Proceedings of SPIE, vol.6064 CiteSeer, pp.354–365 2006.
- [5] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, "Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering," Image Processing, IEEE Transactions on, vol.16, no.8, pp.2080–2095, 2007.
- [6] G. Petschnigg, R. Szeliski, M. Agrawala, M. Cohen, H. Hoppe, and K. Toyama, "Digital photography with flash and no-flash image pairs," ACM Transactions on Graphics (TOG), vol.23, no.3, pp.664–672, 2004.
- [7] E.P. Bennett, J.L. Mason, and L. McMillan, "Multispectral bilateral video fusion," Image Processing, IEEE Transactions on, vol.16, no.5, pp.1185–1194, 2007.
- [8] 松井壮介, 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," 修士論文, 東京大学大学院, 2009.
- [9] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss, "Colorization using optimization," ACM SIGGRAPH 2004 Papers-ACM, pp.689–694 2004.
- [10] L. Yatziv and G. Sapiro, "Fast image and video colorization using chrominance blending," Image Processing, IEEE Transactions on, vol.15, no.5, pp.1120–1129, 2006.
- [11] D. Šýkora, J. Buriánek, and J. Žára, "Unsupervised colorization of black-and-white cartoons," Proceedings of the 3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering ACM, pp.121–127 2004.
- [12] T. Welsh, M. Ashikhmin, and K. Mueller, "Transferring color to greyscale images," Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques ACM, pp.277–280 2002.
- [13] E. Dijkstra, "A note on two problems in connection with graphs," Numer.Math, vol.1, pp.269–271, 1959.
- [14] D. Comaniciu and P. Meer, "Mean shift: A robust approach toward feature space analysis," Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol.24, no.5, pp.603–619, 2002.