

符号化 IR カットフィルタによる高感度センシング方式

High Sensitivity Sensing Method by Using a Coded IR Cut Filter

塚田 正人† Kimberly McGuire‡ Wouter Blom‡ 戸田 真人†
Boris Lenseigne‡ Wouter Caarls‡ Pieter Jonker‡

1. まえがき

夜間屋外や暗所で映像を撮影する場合、光量不足に起因するセンサノイズが発生し、映像品質が低下する。その課題解決の一手法としてより多くの光をイメージセンサに受光させる観点から、可視光に加えて近赤外光をイメージセンサに照射することでセンサノイズを低減し、高感度撮影を実現する手法が提案されている[1]。なお、近赤外光の利用に関しては、高感度撮影(デノイズ)以外にも、デヘイズ機能の強化や、照明変動による顔認識における性能低下を抑制するなどのアプリケーションが提案されている[2][3]。

通常、カメラで使用されるイメージセンサがシリコンフォトダイオードの場合、その分光感度は可視光から近赤外光に対応する波長(400nm~1000nm)に感度を有する。しかし、カメラの色再現性の観点から近赤外光は IR カットフィルタで除去される。

イメージセンサが感度を有する近赤外光を、1つのイメージセンサで可視光と同時に撮影する方法が提案されている。その一例として、R、G、B のカラーフィルタに加え、近赤外光を透過する IR フィルタを追加した4色光学フィルタを組み込んだイメージセンサ[4]が提案されている。この手法では、IR カットフィルタを用いないため、R,G,B のカラーフィルタの対応画素には、近赤外光が混じる。一方、NIR フィルタに対応する画素は、純粋な近赤外成分を含む信号(NIR)である。この純粋な近赤外成分を有する画素を参照し、デモザイキング手法を用いることで、R,G,B の各画素に対する近赤外成分を算出する。そして、近赤外成分の混じった R、G、B の画素値から近赤外成分を減ずることで、純粋な R、G、B の画素値を得る。

また、IR カットフィルタを用いず、RGB ベイヤ型カラーフィルタアレイ(CFA)のGに対して分光透過特性の異なる2種類のフィルタを用いるなど、通常のRGB ベイヤ型CFAとは異なる特殊なCFAを用いて撮像した画像からRGBと近赤外信号であるNIRを分離して、4チャンネル画像を生成する手法も提案されている[5]。

上記の通り従来法では、特殊なイメージセンサを用いる必要があるため、現時点ではこれらのセンサを安価かつ容易に入手することが難しいといった課題がある。

本研究では、一般に広く使用されており、安価かつ容易に入手可能なRGB ベイヤ配列型イメージセンサと、一部に近赤外光を透過させる加工を施したIR カットフィルタ(以下、符号化IR カットフィルタと呼ぶ)を用いて、R、G、B、NIRの4チャンネル画像をワンショットで生成するセンシング方式について述べる。シミュレーション実験にて本手式の性能を示す。

2. 符号化 IR カットフィルタによるセンシング

通常、カメラには色再現性を保つためにイメージセンサの前に、近赤外光をカットするIR カットフィルタが組み込まれている。本提案方式では、このIR カットフィルタに、一部近赤外光を透過させる加工を施した符号化IR カットフィルタを使用する。イメージセンサは、一般に広く使用されている安価で容易に入手可能なRGB ベイヤ配列型イメージセンサを用いる。

本センシング方式は、図1に示したように、符号化IR カットフィルタとRGB ベイヤ型センサで構成される。符号化IR カットフィルタを用いることにより、近赤外光一部は遮断され、残りの近赤外光はイメージセンサに照射される。イメージセンサでは、可視光と近赤外光を含んだ画像信号が生成されるため、画像処理によって、RGB画像からNIR画像を分離する。

符号化IR カットフィルタに、画素サイズと同じサイズで近赤外光を透過させる穴(以下、近赤外透過部)を設定し、その穴を透過した近赤外光が、イメージセンサ上の対応する一画素に入射する場合には、デモザイキング手法により、R、G、B、NIRの4チャンネル画像を容易に生成可能である[6]。しかし、近赤外光は、符号化IR カットフィルタの近赤外透過部を透過すると、回折現象により拡散されて、イメージセンサに照射される。イメージセンサが出力するRGB画像からNIR画像を分離するためには、この回折現象を考慮する必要がある。

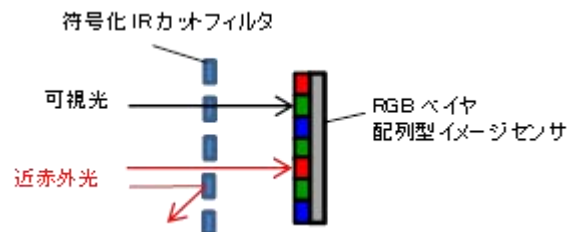


図1 符号化IR カットフィルタによるセンシング

3. NIR 画像の生成アルゴリズム

本方式では、符号化IR カットフィルタにおける近赤外透過部を、規則正しい周期性を保ったパターンで配列させることで、近赤外透過部を透過した近赤外光を、イメージセンサ面上においてある特定の空間周波数を有するパターンに形成させる。この近赤外成分のパターンは、可視光成分に転嫁された形で画像データに反映される。

図2(a)は、格子状に穴(4μm)を開けた金属板に近赤外レーザー光(850nm)を照射した際に生じる回折を、モノクロイメージセンサで捉えた画像である。図2(b)は、その2次元フーリエ空間のパワー強度を表したものである。図2(b)の2次元フーリエ空間のパワー強度には、周期的なパターンを有するピークが存在することが確認できる。本方式では、符号化IR カットフィルタを用いて撮影した

† 日本電気株式会社, NEC Corporation

‡ Delft University of Technology, TU Delft

画像データには、特定の空間周波数にピークを有する近赤外光成分が、R、G、B 色信号に転嫁されるという特性を用いて、画像データから NIR 信号を抽出する。

まず、2次元フーリエ空間において特定の周波数成分を通すノッチフィルタを用いて、近赤外光成分を抽出する。近赤外光成分のフーリエ空間においてピークが発生する特定の周波数は、赤外透過部のパターン、および、符号化 IR カットフィルタとイメージセンサ間の距離で決定される。そして、近赤外光によるピークが発生する特定の周波数におけるパワー強度を除去する。ここで、フーリエ空間における特定の周波数のパワー強度を除去することによって、その周辺の周波数におけるパワー強度との不連続が発生した状態で、逆フーリエ変換し画像データに変換すると、リングングなどの不自然なアーティファクトが発生する。この問題を防ぐために、Butterworth filter を用いて、フーリエ空間においてピークが発生する特定周波数とその周辺とのパワー強度の不連続性が発生しないように、ピークを除去する。Butterworth filter 関数 H を以下に示す。

$$H(\omega) = 1 - \frac{1}{1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^2} \quad (1)$$

ここで、 ω は全周波数を、 ω_c はピークを除去する周波数を表す。このフィルタ関数は、フーリエ空間においてピークが発生する特定周波数に適用することで、特定周波数とその周辺とのパワー強度の不連続性を抑制しつつ、ピークを除去する。

Butterworth filter によって、近赤外光によるピークが発生する特定周波数におけるパワー強度を除去し、逆フーリエ変換することによって、近赤外光成分を除去した可視光成分のみによる画像データを得る。

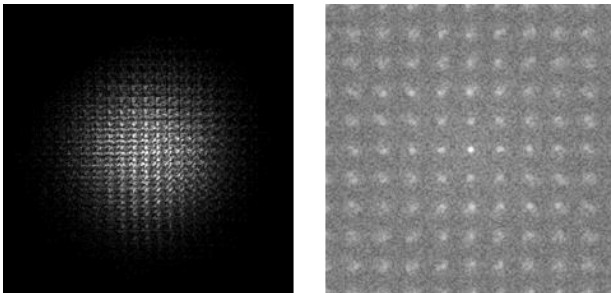


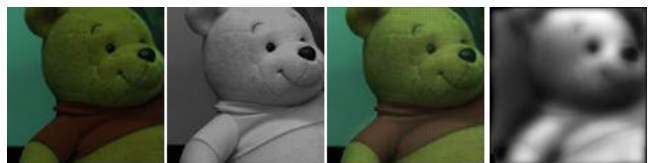
図 2 光回折の画像と 2次元フーリエ空間のパワー強度

4. 実験

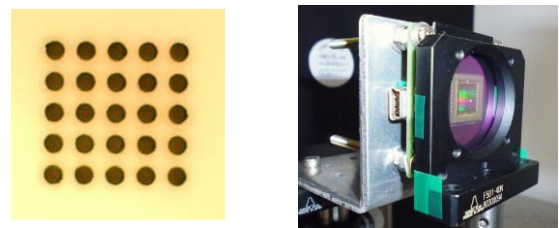
本方式の撮影システムは現在開発中であるため、実際の画像撮影ができない。本実験では、符号化 IR カットフィルタによる近赤外光の回折を光回折モデル[7]で再現した。具体的には、可視光および近赤外光の画像撮影が可能なデジタルカメラ (Pentax 645D) で、可視光の RGB 画像と近赤外光の NIR 画像を取得し、符号化 IR カットフィルタの近赤外透過部のみに画素値を有する NIR 画像に光回折モデルを適用した画像を近赤外光の光回折画像とした。ここで、近赤外透過部のサイズは $4\mu\text{m}$ 、イメージセンサと符号化 IR カットフィルタの距離を $8\mu\text{m}$ とした。この光回折画像を可視光の RGB 画像に転嫁したものを、イメージセンサの出力画像とした。

図 3(a), (b) はそれぞれ RGB と NIR の正解画像である。図 3(c), (d) は、光回折モデルによるイメージセンサの出力画像 (NIR を含んだ RGB 画像) から、第 3 章の NIR 画像生成アルゴリズムで得られた RGB 画像と NIR 画像である。正解画像と処理結果の PSNR は、RGB 画像が 49.4dB, NIR 画像が 27.5dB であった。RGB 画像は良好な結果であり、NIR 画像も情景が十分に確認できる画質で再現された。

現在、符号化 IR カットフィルタによる撮影システムを構築中である。図 4(a) は、符号化 IR カットフィルタの撮影画像である。穴の口径は約 $50\mu\text{m}$ である。図 4(b) は、RGB バイヤ型イメージセンサに符号化 IR カットフィルタをセットした状態を示している。今後、本システムによる撮影実験を進め、近赤外光の回折を考慮した NIR 画像生成アルゴリズムの高精度化を進める。



(a) RGB (b) NIR (c) RGB (d) NIR
図 3 正解画像とシミュレーション結果



(a) 符号化 IR カットフィルタ (b) 撮影システム

図 4 符号化 IR カットフィルタによる撮影システム

5. まとめ

本稿では、符号化 IR カットフィルタおよび通常の RGB イメージセンサによって高感度撮影を実現するセンシング方式について述べた。近赤外光が、符号化 IR カットフィルタの近赤外透過部を透過する際に生じる回折により、特定の周波数でピークを有する画像を形成する特性に着目し、NIR を含んだ RGB 画像から純粋な RGB 画像と NIR 画像を生成する。実験にて本方式の現時点の効果を示した。

参考文献

- 1) S. Zhuo et al.: "Enhancing low light images using near infrared flash images," Proc of IEEE ICIP, pp. 2537-2540, 2010.
- 2) L. Schaul et al.: "Color image dehazing using the near infrared," Proc of IEEE ICIP, pp. 1629-1632, 2009
- 3) S. Z. Li et al.: "Illumination invariant face recognition using near-infrared images," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 29, pp. 627-639, 2007.
- 4) 香山ら: "フォトリソグラフィ技術による昼夜兼用 MOS イメージセンサ," 光シンポジウム講演予稿集, Vol.33, pp.59-62, 2009.
- 5) Z. Sadeghipoor et al.: "A Novel Compressive Sensing Approach to Simultaneously Acquire Color and Near-Infrared Images on a Single Sensor," Proc. of IEEE ICASSP, pp.1646-1650, 2013.
- 6) 塚田ら: "符号化IRカットフィルタによる高感度センシング," 信学会総合大会論文集, D-11-25, 2014.
- 7) T. Shimobaba et al.: "Computational wave optics library for c++: Cwo++ library," Comp. Phys. Comm. 183(5), pp. 1124-1138, 2012.