

暗所調査のための複数照明制御を用いた 画像内の白とび・黒つぶれ領域の補正

林 鍾勳[†] 藤井 浩光[†] 山下 淳[†] 浅間 一[†]

[†] 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: [†] {im, fujii, yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 人が直接入れない危険な場所では調査のため、遠隔操作ロボットを利用する必要がある。しかし、照明を搭載したロボットを用いた暗い環境での調査では白とび・黒つぶれによって画像内の一部が不明瞭になる問題が発生する。本研究では複数照明の制御および画像合成を用いて画像内に現れた白とびおよび黒つぶれ領域を補正する手法を提案する。提案手法は画像内に白とび・黒つぶれが現れた場合、白とび・黒つぶれが異なる位置に現れるように複数照明を制御し、複数の画像を取得する。その次に、白とび・黒つぶれでない領域を各画像から抽出し、合成することで画像を明瞭化する。実験結果により、提案手法を適用することで明暗差が大きい環境において明瞭な画像が取得可能であることが明らかになった。

キーワード 画像合成, 白とび, 黒つぶれ, 照明

1. 序論

事故が起こった福島第一原子力発電所のように人が直接入れない場所では、内部を調査するため、遠隔操作ロボットが必要となる。さらに、撮影環境が広範囲で暗い場合は強い光を出す照明が必要である。しかし、この場合、白とび・黒つぶれによって画像内の一部が不明瞭になる問題が発生し、画像内の見たい部分が見えなくなり、原子力発電所の内部調査やロボットの操作が困難になる。そこで、白とびや黒つぶれが発生するような条件下でも明瞭な視野を提示する技術が必要となる。

明瞭な視野を提示する従来手法として **High Dynamic Range (HDR)** イメージング技術[1][2]がある。この技術はカメラのシャッタースピードを変え、露出度の異なる複数の画像を取得し、各画像で露出が適切な領域を抽出し、合成することで画像を明瞭化する技術である。しかし、**HDR** イメージングは明暗差が大きい環境では白とび・黒つぶれの補正が困難であり、暗所調査に適用することが難しい。

他の手法としてフラッシュ画像とノンフラッシュ画像のグラデーションを比較して画像内のハイライトおよび反射光を削除する手法[3]が提案されている。しかし、暗所では照明を使用しない状態では画像全体が暗くなるため、ノンフラッシュ画像では画像情報の取得ができない問題がある。そこで、暗所調査のための新たな白とび・黒つぶれ画像の補正手法が必要である。

本研究では明暗差が大きい環境での白とび・黒つぶれ画像を補正することが可能な手法を提案することを目的とする。本研究では複数照明を制御することで複数の画像を取得し、画像合成を行うことで画像を明瞭化する。

著者の従来研究[4]では取得した画像の中で基準

となる 1 枚の画像を選び、その画像の白とび・黒つぶれ領域を他の画像で補正した。しかし、この場合基準となる画像が変わると出力画像が変わってしまう問題があった。そこで、本研究では全ての入力画像に対して白とび・黒つぶれ領域を抽出し、白とび・黒つぶれでない全ての領域を同時に合成することでこの問題を解決する。

2. 手法

本研究では遠隔操作ロボットを用いた暗所での調査を想定している。また、車のヘッドライトのような強い光を出す複数の照明がロボットに搭載されており、各照明の ON/OFF 制御が可能な状況を想定している。コンセプトは画像内に白とび・黒つぶれが現れた場合、白とび・黒つぶれが異なる位置に現れるように複数照明を制御し、複数の画像を取得する。その次に、白とび・黒つぶれでない領域を各画像から抽出し、合成することで画像を明瞭化する。

提案手法は画像の取得、明るさ補正、白とび・黒つぶれ領域の抽出の 4 つのステップで構成されている。以下に各ステップについて具体的に説明する。

2.1. 画像の取得

画像の取得では画像内に白とび・黒つぶれが現れた場合、白とび・黒つぶれが異なる位置に現れるように複数照明の点滅を用い、複数の画像を取得する。 N 個の照明がある環境で、最初に取得した画像を入力画像 1 (I_0^1)、その次に取得した画像を入力画像 2 (I_0^2) と順に定義して最後に取得した画像を入力画像 N (I_0^N) とする。本節では手法の説明をわかりやすくするため、例の画像を用いて説明を行う。画像

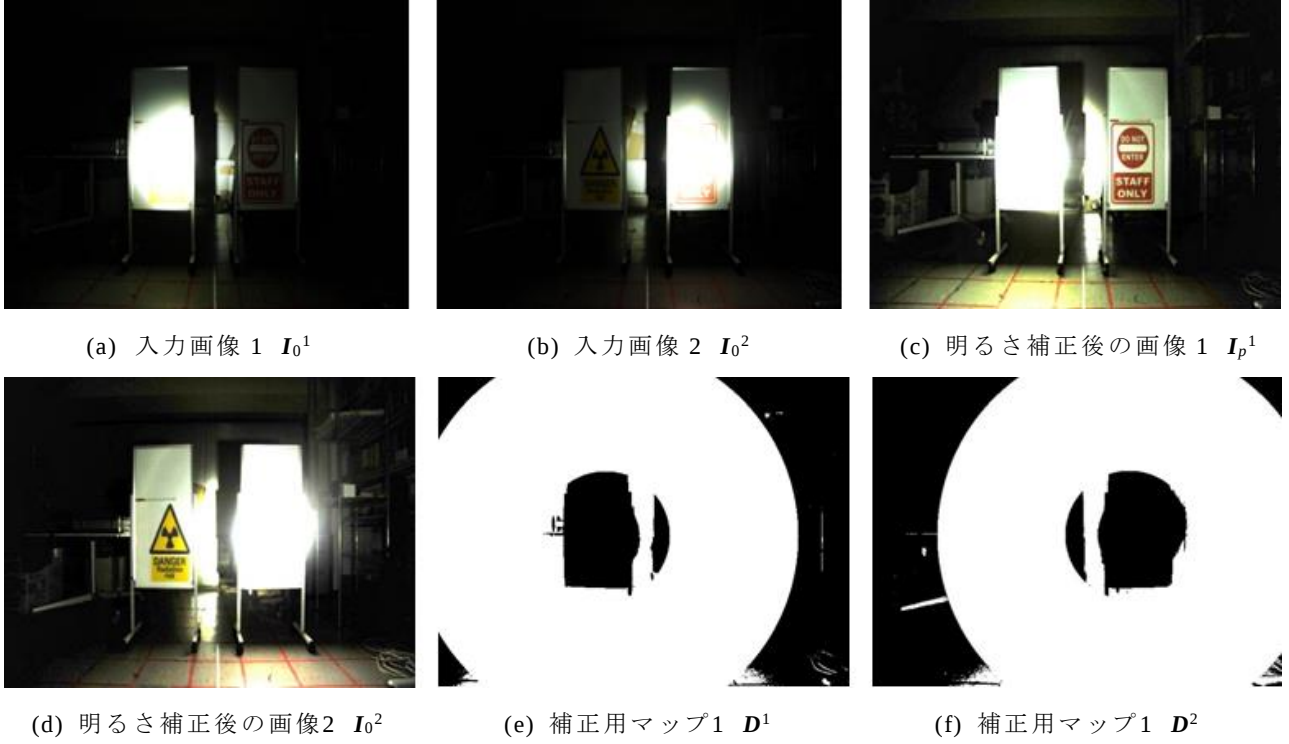


図1 各処理結果の画像

取得の結果を図 1(a), (b)に示す. 図 1(a)のように入力画像 1 では画像の左側に白とびが, 画像の右側に黒つぶれが現れている. 一方, 図 1(b)のように入力画像 2 では画像の右側に白とびが, 画像の左側に黒つぶれが現れている.

2.2. 明るさ補正

取得した画像で白とび・黒つぶれ領域を抽出し, その部分を白とび・黒つぶれでない他の画像で補正すると補正される各領域の間で輝度差が発生し, 鮮明な画像が取得できない. この問題を解決するため, 本研究では白とび・黒つぶれ領域の抽出の前に照明によって変わった照度分布を均一化するため, 明るさの補正を行う. 本研究の明るさの補正では一般的に使用されている明るさは距離の 2 乗に反比例するという光の減衰の法則を利用する. 照明と画像内の各ピクセル相当する位置までの距離を計算し, 距離の 2 乗を各ピクセルに掛けることで明るさの補正を行う. ただし, 本研究では, 照射される面は平面で, 照射面の反射率は一定, 光源は点光源である仮定をしている. 明るさ補正の式を式(1)に示す.

$$I_p^n(i, j) = \alpha \cdot I_0^n(i, j) \cdot l^2, \quad (1)$$

ここで, $I_0^n(i, j)$ は入力画像 n の座標 (i, j) におけるピクセルの明るさで, $I_p^n(i, j)$ はその出力画像の座標 (i, j)

におけるピクセルの明るさである. α は補正係数, l はカメラから対象物体までの距離である.

入力画像に対する明るさ補正の結果を図 1(c), (d)に示す. それぞれの画像は照射面の重心を基準として照射面の重心からの距離が大きくなるほど明るさも大きくなるように補正されている. しかし, 明るさ補正だけでは図 1(c), (d)のように白とび・黒つぶれ領域を完全に補正することはできない.

2.3. 白とび・黒つぶれ領域の抽出

画像の合成を行うためには, 合成に不必要な白とび・黒つぶれ領域を各画像から除去する必要がある. 白とび・黒つぶれ領域を抽出する手法として画像内の輝度情報を用いる手法[5]が提案されている. この手法は 2 つの閾値を決め, 画像内のピクセルの値がある値以上であれば, 白とびであると判断し, ある値以下であれば, 黒つぶれであると判断する手法である. しかし, 輝度情報のみを利用した場合は, 元々白色あるいは黒色であるものも白とびあるいは黒つぶれで誤分類される問題が発生する.

そこで, 提案手法では本研究で想定している環境では照射面の位置から白とび・黒つぶれ領域を推定することが可能であることを利用し, 白とび・黒つぶれ領域の抽出に輝度情報と空間情報を利用する. 提案手法の白とび・黒つぶれ領域の抽出式を式(2)

に示す.

$$D^n(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{if } I_p^n(i, j) > \tau_H \text{ AND } r < r_L \\ 0 & \text{if } I_p^n(i, j) < \tau_L \text{ AND } r > r_H \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $D^n(i, j)$ は白とび・黒つぶれ抽出結果得られた出力画像の座標 (i, j) におけるピクセルの値である。 D を補正用マップと定義する。 τ_H および τ_L はそれぞれ白とび、黒つぶれ抽出のための画像内の輝度値に関する閾値である。 r は画像内の照射面の重心位置から各ピクセルまでの距離を表し、 r_L および r_H はそれぞれ白とび、黒つぶれ抽出のための画像内の距離に関する閾値である。画像内のピクセルの輝度値が τ_H 以上でかつ、照射面の重心位置からの距離が r_L 以下であれば白とび領域として判断する。一方、画像内のピクセルの輝度値が τ_L 以下でかつ、照射面の重心位置からの距離が r_H 以上であれば黒つぶれ領域として判断する。白とびおよび黒つぶれ領域の抽出結果を図1(e), (f)に示す。図1(e), (f)では白とびおよび黒つぶれ領域は黒色に、それ以外の領域は白色で表示されている。

2.4. 画像の合成

画像の合成では補正用マップ D を利用し、画像の合成を行う。合成では各画像で白とびおよび黒つぶれ領域を除き、残りの適切な輝度値を持つ領域を抽出し、均等に混合する。画像合成のルールを式(3)に示す。

$$I_f(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N D^n(i, j) I_p^n(i, j)}{\sum_{n=1}^N D^n(i, j)} \quad (3)$$

ここで、 $I_f(i, j)$ は合成後の画像の座標 (i, j) におけるピクセルの明るさを示す。各画像で白とびあるいは黒つぶれ領域においては $D^n(i, j)$ の値が0となり、合成の候補から除去される。一方、白とびあるいは黒つぶれではない領域においては $D^n(i, j)$ の値が1となり、合成に用いられる。合成の結果を図2に示す。入力画像（図2）での白とび・黒つぶれ領域が他の



図2 合成後の画像

表1 撮影条件

カメラ	NIKON D700
解像度	640×480
ISO	400
F 値	f/8
シャッタースピード	1/40sec
焦点距離	24mm
照明	GENTOS MF-1010G
照明の明るさ	1,000lm

画像での白とび・黒つぶれでない領域で補正される。

3. 実験

3.1. 実験環境

実験では様々な環境において3つの照明を利用し、順番にON/OFFすることで、3枚の画像を取得し、画像合成を行った。照明とカメラの配置を図3に示す。図3のように3つの照明をカメラから0.3m離れた場所に設置した。また、そのときの撮影条件を表1に示す。各パラメータは試行錯誤的に決定した。今回の実験では $\alpha = 1.2 \times 10^6$, $\tau_C = 2.0 \times 10^2$, $\tau_H = 1.2 \times 10^2$, $\tau_L = 5.0$, $r_L = 1.5 \times 10^2$, $r_H = 2.3 \times 10^2$ に設定した。

3.2. 実験結果

実験結果を図4, 5に示す。図4の実験環境1は撮影対象が平面でない場合を表し、図5の実験環境2は撮影対象がほぼ平面である場合を現す。各撮影環境において3枚の入力画像を取得し、提案手法を用いて合成を行った結果、白とび・黒つぶれ画像が改善された。撮影環境2のように撮影対象がほぼ平面である場合は鮮明な画像が得られたが、撮影環境1のように撮影対象が平面でない場合は輝度の差が少し発生した。これは、提案手法の明るさの補正で撮影対象は平面という前提をした上で、補正を行ったためである。次に、画像の情報量を表すエントロピー[6]を用いて評価を行った。エントロピーが大きいことは明るさ分布が暗から明まで均等に分布していること示し、白とび・黒つぶれ画像はエントロピー

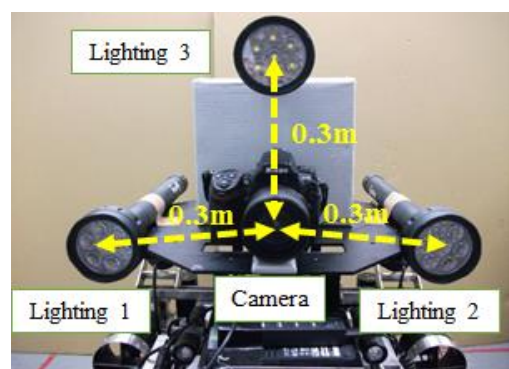


図3 照明とカメラの配置

が小さい特徴を持っている．エントロピーの式を式(4)に示す．

$$E = -\sum_{i=0}^L p_i \log(p_i), \quad (4)$$

ここで、 E はエントロピー、 L は諧調数、 i は明るさ、 p_i は各明るさにおける確率である．今回は $L=255$ とした．評価には、コントラスト補正画像、HDR イメージングの結果画像、提案手法による補正結果画像を用いて比較した．エントロピー比較の結果を図 6 に示す．グラフの横軸は画像を、縦軸はエントロピーを表す．エントロピー比較の結果、いずれの場合にも提案手法による補正結果画像のエントロピーが大きいことより、提案手法は暗所調査のための補正手法として一番効果的であることが明らかになった．

4. 結論

本研究では複数照明の ON/OFF を用い、明暗差が大きい環境での白とび・黒つぶれ画像を補正することが可能な手法を提案した．実験の結果、様々な暗所環境において提案手法は有効であり、従来のコントラスト補正および HDR イメージングより効果的に白とび・黒つぶれ画像の補正ができることを示した．

今後の展望としてはより明瞭な画像を取得するため、照明の ON/OFF だけでなく、照射方向の制御や照明強度の制御などが必要であると考えられる．

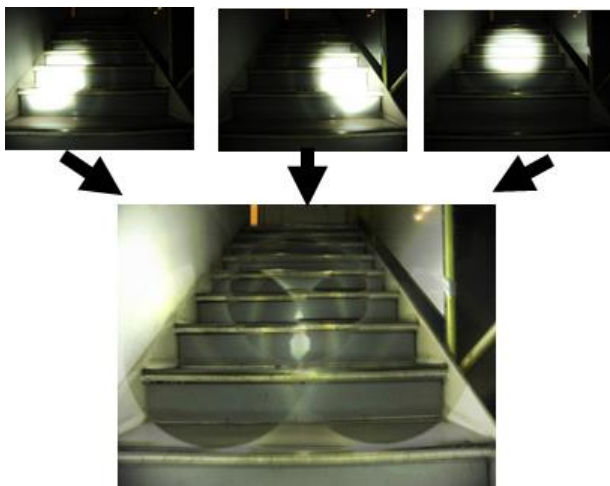


図4 実験結果(撮影環境1)

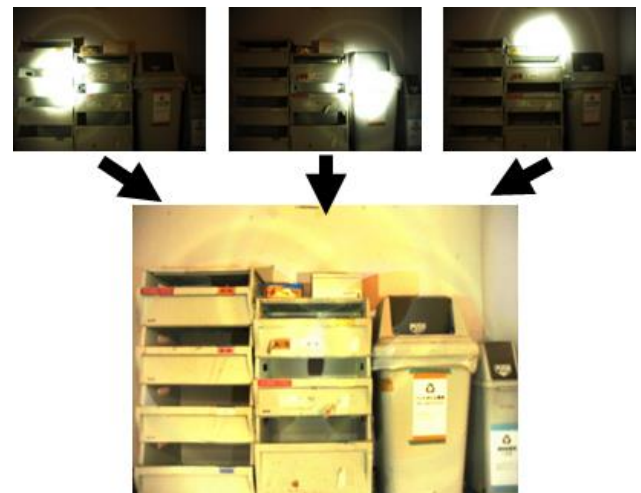


図5 実験結果(撮影環境2)

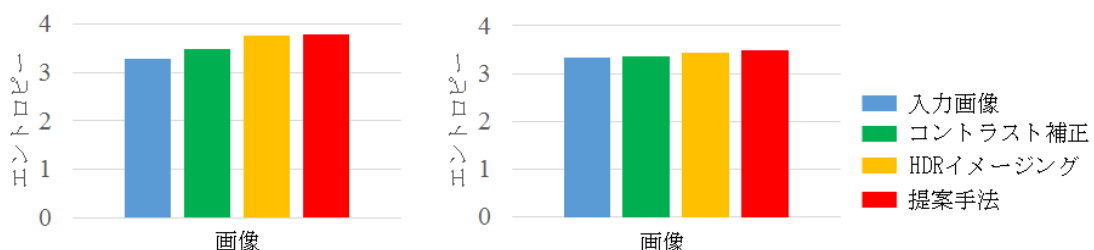


図6 エントロピー比較結果

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム (ImpACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の援助を受けた．

文 献

- [1] P. Debevec and J. Malik: "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1997*, pp. 369-378, 1997.
- [2] S. Mann and R. W. Picard: "On being 'Undigital' with Digital Cameras : Extending Dynamic Range by Combining Differently Exposed Pictures", *Proceedings of the 48th Annual Conference of the Imaging Science and Technology*, pp. 442-448, 1995.
- [3] A. Agrawal, R. Raskar, S. Nayar and Y. Li: "Removing Photography Artifacts Using Gradient Projection and Flash-Exposure Sampling", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 828-835, 2005.
- [4] 林鍾勳, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一: "暗所調査ロボットのための複数照明制御を用いた白とび・黒つぶれ画像の補正", 第 20 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 505-511, 2015.
- [5] W. Zhang and W. K. Cham: "Gradient-Directed Multi-Exposure Composition", *IEEE Transactions on Image Process*, Vol. 21, No. 4, pp. 2318-2323, 2012.
- [6] C. E. Shannon: "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423, 1948.