

# 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

林 鍾勳<sup>\*1</sup>, 藤井 浩光<sup>\*1</sup>, 山下 淳<sup>\*1</sup>, 浅間 一<sup>\*1</sup>

## Compensation of Over and Under Exposure Images Using Multiple Lighting System for Exploration Robot in Dark Environments

Jonghoon IM<sup>\*1</sup>, Hiromitsu FUJII<sup>\*1</sup>, Atsushi YAMASHITA<sup>\*1</sup>  
and Hajime ASAMA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Precising Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Over and under exposure causes a big problem when people investigate dangerous places like Fukushima nuclear power plant through the camera attached a remote control robot. In this paper, we propose a method to compensate the over and under exposure regions in an image. For the compensation of over and under exposure, multiple images which are acquired in different lighting conditions are necessary. The image processing consists of four steps. Firstly, multiple images are acquired by alternately turning on and off each illumination which are set in different positions. Then the image obtained first is defined as input image 1, the image obtained second is defined as input image 2 and the image obtained  $N$ -th is defined as input image  $N$ . Secondly, over and under exposure regions in the image are extracted from the input image 1. Thirdly, luminance of the images is corrected. Finally, the over and under exposure regions in the input image 1 are compensated by other images. The results show that the over and under exposure regions in the input image are recovered by our proposed method.

**Key Words** : Image processing, Multi-exposure images fusion, Image correction, Over and under exposure, Multiple lighting system

### 1. 序 論

人が直接入れない危険な場所では遠隔操作ロボットによる調査が必要である。特に外部照明がない暗い環境では、周囲環境の情報を取得するため、ロボットに取り付けられた照明を使う必要がある。しかし、このような明暗差が大きい場所では、画像中に現れる白とびや黒つぶれなどによって画像の一部が不明瞭になり、オペレータがロボットを操作することが難しくなる問題が挙げられる。白とび、黒つぶれはカメラ画像内の輝度差がカメラのダイナミックレンジを越えてしまうと発生する。

このような問題を解決するため、様々な手法が提案されてきた。画像内に現れる白とびや黒つぶれ問題を解決する技術として Multi-Exposure Fusion (MEF)<sup>(1)-(2)</sup>や High Dynamic Range (HDR) イメージング技術

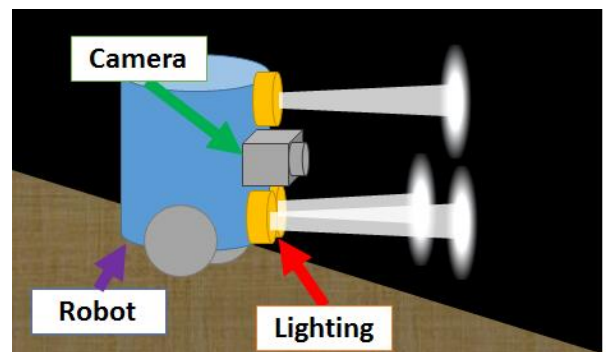


Fig. 1 Investigation using remote controlled robot with attached lightings.

<sup>(3)-(4)</sup>などがある。これらの技術は露出度の異なる複数の画像を合成して1つの高階調画像を取得する技術である。露出度を上げて全体的に明るくした画像では相対的に暗い部分を、露出度を下げて全体的に暗くした画像では相対的に明るい部分を抽出し、合成す

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) {im,fujii,yamashita,asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

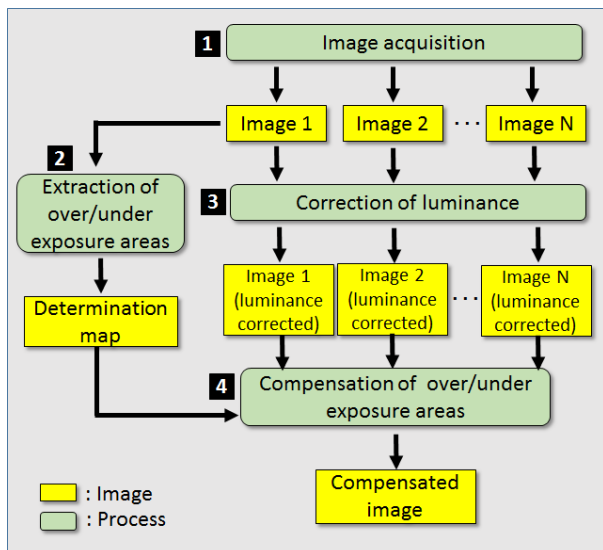


Fig. 2 The schematic view of our proposed method for compensation of over/under exposure.

することで画像を明瞭化する。これらの技術は使用する画像の数が多いほど、より効果的に白とびおよび黒つぶれを除去することができる。しかし、HDR イメージングの場合は複数の Low Dynamic Range (LDR) 画像から 1 つの HDR 画像を生成後、通常のディスプレイに表示させるため階調度を圧縮するトーンマッピング<sup>9)</sup>が必要となる。また、HDR イメージングではカメラ応答関数 (CRF: Camera Response Function) が非線形の場合、CRF を校正する必要がある。一方、MEF ではこれらの作業が不必要となり、処理時間が短いメリットがある。そこで、本研究では画像生成プロセスがシンプルである MEF 手法をベースにする。

MEF ベースの画像合成手法としてはフラッシュ画像とノンフラッシュ画像のグラディエントを比較して画像内のハイライトや反射光などを除去する手法<sup>6)</sup>、露出度の異なる複数の画像をそれぞれに対して領域分割し、各領域のエントロピーを計算して明瞭な部分のみを抽出する方法<sup>7)</sup>などが提案されている。これらの手法では主にカメラのシャッタースピードなどを調整することで露出度の異なる複数の画像を取得するが、カメラ機材の制約でシャッタースピードを十分速くあるいは遅くすることができない場合は画像の取得が難しい問題がある。また、撮影対象領域があまりに暗く広範囲である場合は自動車のヘッドライトのような極端な

特性の光源が必要であるが、従来手法ではこの条件を考慮していないため、暗所調査用ロボットのための補正手法としては適切ではない。

本研究ではロボットに装着されている照明を制御することにより、暗所調査用ロボットに適合な白とび・黒つぶれ画像の補正手法を提案することを目的とする。図 1 のように遠隔操作ロボットを用いた暗い環境での調査を想定し、車のヘッドライトのような複数の照明がロボットの前面に搭載されており、複数の照明を互いに点滅させる制御が可能な状況を想定する。以前の 2 つの照明を用いた補正<sup>8)</sup>では得られた画像で白とびおよび黒つぶれ領域が重なる部分に関しては処理が困難であった。それに対して本研究では使用照明の数を 3 つ以上に増やし、白とびおよび黒つぶれ領域が可能な限り重ならないようにする。

本研究で想定している環境では従来の露出度の異なる複数の画像を取得する手法であるビームスプリッタ<sup>9)-(10)</sup>やシャッタースピード<sup>(11)-(13)</sup>の調整だけではなく、ロボットに装着されている照明を制御することでも露出度の異なる複数の画像を取得することができる。これは本研究で想定している環境では、従来手法に比べて提案手法はより多様な露出度の制御が可能であり、画像内に現れる白とびおよび黒つぶれもより効果的に除去することができることを示す。

## 2. 提案手法

本研究では複数の照明を点滅させることで、画像内に現れる白とびおよび黒つぶれの除去が可能な手法を提案する。本研究で提案する白とびおよび黒つぶれ除去の流れを図 2 に示す。

まず、1 つの照明の点灯によって得られた白とびおよび黒つぶれ画像に対して、異なる照明を点灯させ、白とびおよび黒つぶれの現れる位置が異なる複数の画像を取得する。次に、最初に取得した画像を入力画像 1 とし、画像内で白とびおよび黒つぶれが現れる領域を抽出する。その次に、各画像の明るさを補正する。最後に提案する合成のルールに基づいて白とびおよび黒つぶれ領域を照明条件を変えて取得した画像で補正する。以下に各ステップについて具体的に説明する。

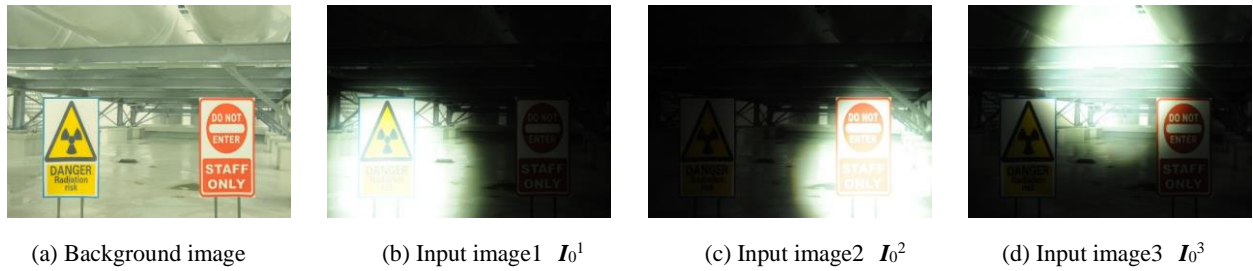


Fig. 3 Background image and input images.

**2・1 画像の取得** 複数の照明の点滅により、画像内の白とびおよび黒つぶれの現れる位置が異なる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。例えば、図3(a)のような背景に対して照明条件を変えて3枚の画像を取得したとする。得られた3枚の画像の中で最初に取得した画像を入力画像1、その次に取得した画像を入力画像2、最後に取得した画像をと入力画像3とする。今回例としてあげた入力画像1 (図3(b))では左下の部分に白とびが、右上の部分に黒つぶれが現れている。一方、図3(c)のように入力画像2では右下の部分に白とびが、左上の部分に黒つぶれが現れている。最後に図3(d)のように入力画像3では中央上の部分に白とびが、左下および右下の部分に黒つぶれが現れている。

**2・2 白とびと黒つぶれ領域の抽出** 次に、画像合成に不必要な白とびおよび黒つぶれ領域を削除するため、取得した画像における白とびおよび黒つぶれ領域を抽出する。白とびおよび黒つぶれの抽出には2つの閾値を用い、その判定条件を式(1)に示す。

$$D^n(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \tau_L < I_0^n(i, j) < \tau_H, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $n$ は取得した画像番号であり、 $n=1, 2, \dots, N$ である。照明条件を変えて取得した入力画像 $I_0^n$ の輝度値  $I_0^n(i, j)$ が設定した閾値  $\tau_H$  以上であれば白とび、 $\tau_L$  以下であれば黒つぶれ領域であると判断し、その値を0に変換する。それ以外の領域においては値を1に変換する。得られた画像を補正用マップ  $D^n(i, j)$ とし、2.1節で例として挙げた入力画像 $I_0^1$  (図3(b))の補正用マップ  $D^1(i, j)$ を図4(a)に示す。図4(a)では  $D^1(i, j)=1$ の部分は白に、 $D^1(i, j)=0$ の部分は黒に表示されている。この補正用マップは最後の画像の合成で用いられる。

**2・3 明るさ補正** 入力画像  $I_0^1, I_0^2$  および  $I_0^3$  は照明によって明るさ分布が変わってしまい、今回例として挙げた画像の背景である図 3(a)と比べると照度差が発生している。そこで、原画像に近い画像を取得するためには照明によって変わった明るさ分布を再調整する必要がある。本ステップでは、まず照射面の重心位置を画像から探し、次に重心位置からの距離を考慮して各画素の明るさの補正を行う。

照射面の重心の探索では、まず閾値を用いて照明

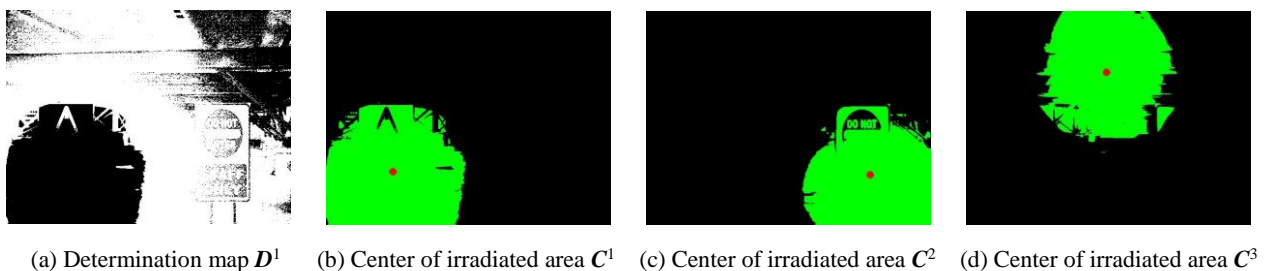


Fig. 4 Determination image and center of irradiated area images.

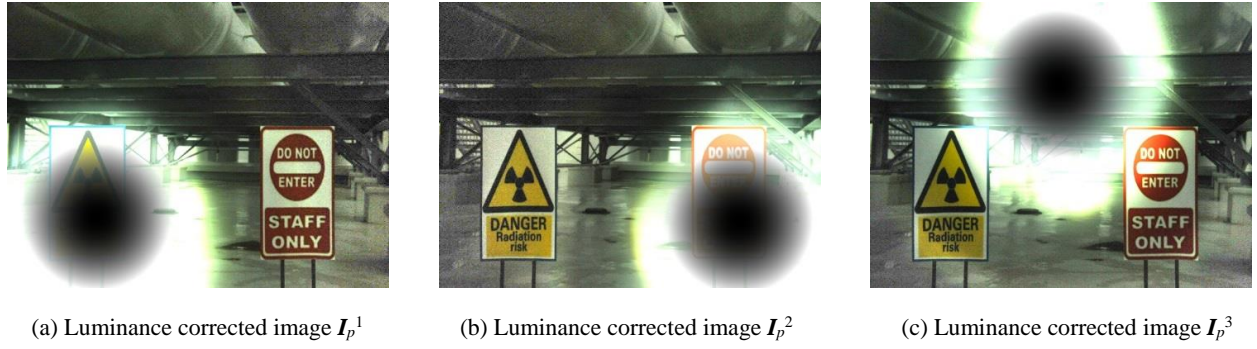


Fig. 5 Luminance corrected images.

によって発生した白とび領域を抽出する. その抽出式を式(2)に示す.

$$C^n(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } I_0^n(i, j) > \tau_c, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

ここで,  $I_0^n$ は入力画像 $n$ ,  $C^n$ は入力画像 $n$ に対する照射面の重心位置マップである. 入力画像 $I_0^n$ の輝度値 $I_0^n(i, j)$ が設定した閾値 $\tau_c$ 以上であれば白とび領域であると判断し, その値を1に変換する. それ以外の領域においては輝度値を0に変換する. 例として, 入力画像1, 2, 3に対して得られた照射面の重心位置マップを $C^1(i, j)$ ,  $C^2(i, j)$ ,  $C^3(i, j)$ とし, 図4(b), (c), (d)に示す. 図4(b), (c), (d)では $C^n(i, j)=1$ の部分は緑色に,  $C^n(i, j)=0$ の部分は黒に表示されている. その次に, 白とび領域の重心位置の探索を行う. 得られた重心位置を $X_c, Y_c$ とし, 例の場合は図4(b), (c), (d)の赤い丸に表示している部分が重心位置である.

次に, 照射面の重心位置からの距離による明るさの補正を行う. 照明により, 画像内での照射面の重心位置の周辺が一番明るい部分となり, 重心位置から離れるほど次第に暗くなる. この輝度差を補正するため, 導入した補正式を式(3), (4)に示す.

$$L'(i, j) = \alpha \cdot L(i, j) \cdot r^2, \quad (3)$$

$$r = \sqrt{(i - X_c)^2 + (j - Y_c)^2}, \quad (4)$$

ここで $\alpha$ は補正用係数,  $L(i, j)$ は座標 $(i, j)$ における輝度値,  $r$ は照射面の重心位置から各ピクセルまでの距離,  $L'(i, j)$ は補正後の座標 $(i, j)$ における輝度値である. また,  $X_c, Y_c$

は照射面の重心位置の $i$ 座標,  $j$ 座標を示す. 入力画像 $n$ に対する明るさ補正の結果得られた画像を $I_p^n$ とし, 図5(a), (b), (c)に示す.

**2.4 画像の合成** 画像内の白とびおよび黒つぶれ領域を抽出した補正用マップ $D^n(i, j)$ を用いて画像の合成を行う. 合成のルールを式(5)に示す.

$$I_f^n(i, j) = \begin{cases} I_f^{n-1}(i, j) & D^{n-1}(i, j) = 1 \\ I_p^n(i, j) & D^{n-1}(i, j) = 0 \end{cases}, \quad (n \geq 2)$$

$$\text{ただし, } I_f^1(i, j) = I_p^1(i, j) \quad (5)$$

$I_p^n$ の合成においては補正用マップの $D^{n-1}(i, j)=1$ の部分に関しては画像 $I_f^{n-1}$ を用い, 補正用マップの $D^{n-1}(i, j)=0$ の部分に関しては画像 $I_p^n$ を用いる. この処理の結果得られた画像を出力画像 $I_f^n$ とする.

例としてあげた画像を用いて $n=3$ の場合の合成を説明すると, 補正用マップ $D^1$ (図4(a))において $D^1(i, j)=1$ の部分に関しては画像 $I_p^1$ (図5(a))を $D^1(i, j)=0$ の部分に関しては $I_p^2$ (図5(b))を出力する. 合成の結果得られた出力画像 $I_f^2$ を図6(a)に示す. 次に, 式(1)を用いて画像 $I_f^2$ の補正用マップ $D^2$ (図6(b))を求める. その次に,  $D(i, j)=1$ の部分は画像 $I_f^2$ を出力し,  $D(i, j)=0$ の部分は画像 $I_p^3$ (図5(c))を出力する. この処理の結果得られた出力画像 $I_f^3$ を図6(c)に示す. このとき,  $I_p^1, I_p^2, I_p^3$ から出力される部分はそれぞれ図6(d), (e), (f)ようになる.  $N$ 個の照明が存在する場合はこの処理を $N$ 回繰り返し, 最後の出力画像 $I_f^N$ を求める.

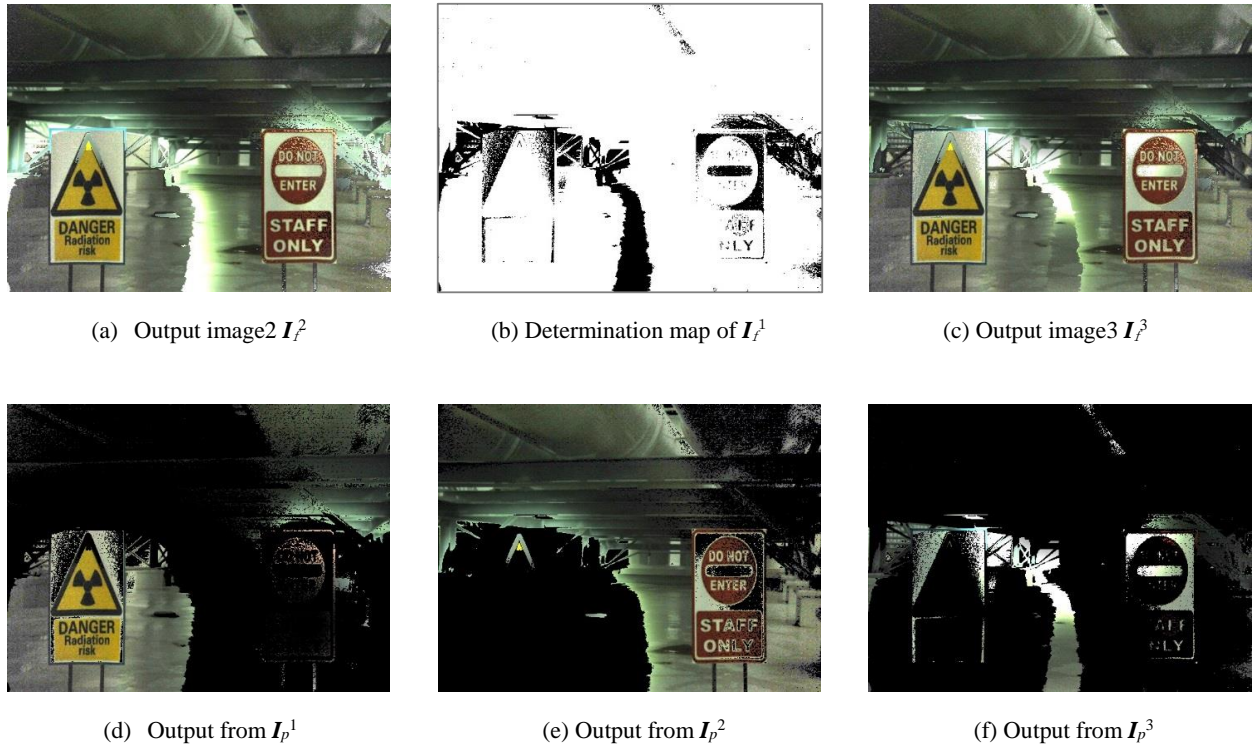


Fig. 6 Output images when  $N=3$ .

### 3. 実験

**3-1 実験環境** 照明条件を変えたときの画像を取得するため、カメラの左右に同じ照明を設置した。次に、あらかじめ用意した2つの看板(図7(a))をカメラの視野に入るようにカメラと看板の間の距離を調整した。カメラ、照明、看板の位置関係を図7(b), (c)に示す。カメラの高さは床から850mmであり、図7(c)のように照明1はカメラの左方向に300mm、下方向に200mm離れた場所に、照明2はカメラの右方向に300mm、下方向に200mm離れた場所に、照明3はカメラの上方向に200mm離れた場所にそ

Table 1 Photographing conditions.

Camera	NIKON D200
Definition	640 × 480
ISO	2,500
F-number	$f/8$
Shutter speed	1/40sec
Focal length	24mm
Luminance of lighting	1,000lm

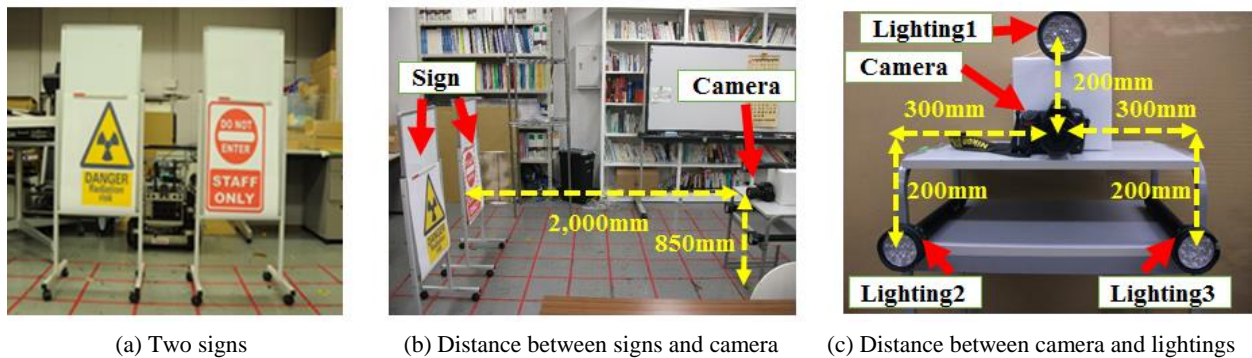


Fig. 7 Experiment environment.

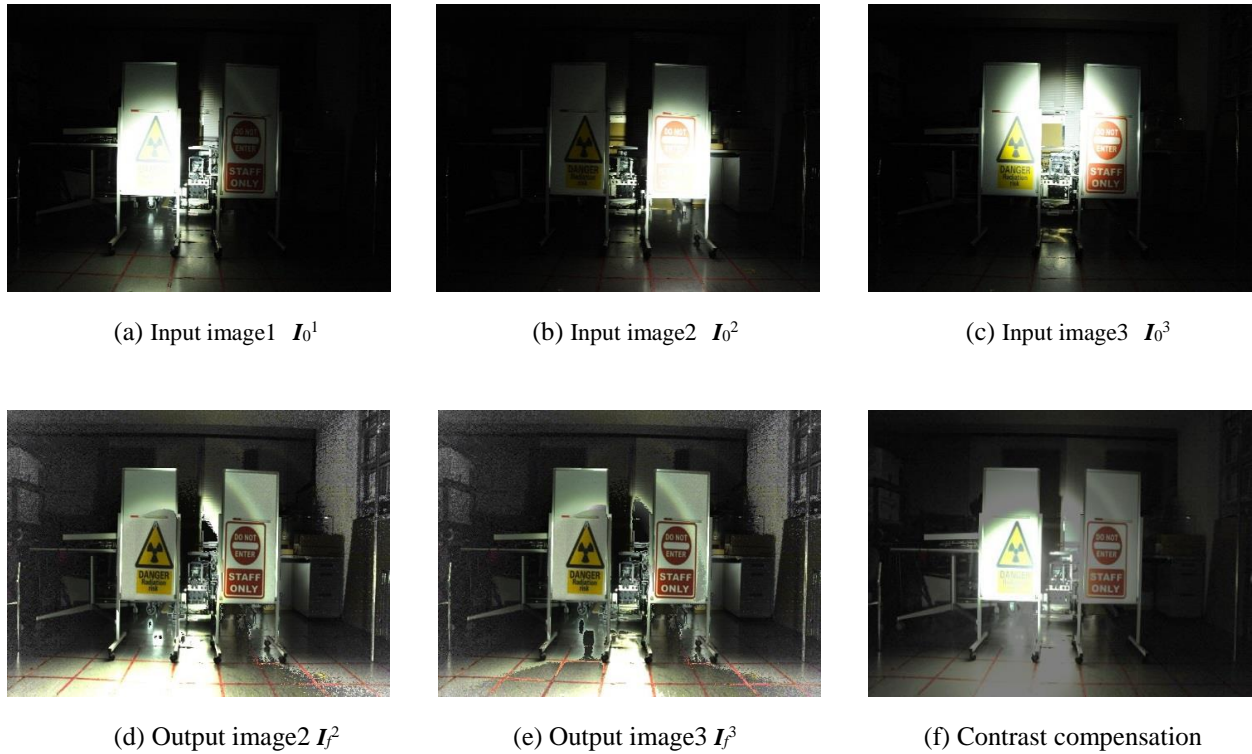


Fig. 8 Experiment results.

れぞれ設置した. 看板は図 7(b)のようにカメラから 2,000mm 離れた場所に設置した. カメラと照明の位置関係以外の撮影条件(表 1)は固定した状態で, 照明 1, 照明 2, 照明 3 を順番に ON/OFF し, 1 回ずつ撮影を行った. 実験で使用した照明は GENTOS MegaFire LED ライト MF-1010G である.

**3・2 実験結果** 実験には CPU: 2.5 GHz (iCore5), RAM: 8 GB の PC を使用し, 画像処理を行った. 今回入力画像 1 として使用した画像  $I_0^1$  を図 8(a)に, 入力画像 2 として使用した画像  $I_0^2$  を図 8(b)に, 入力画像 3 として使用した画像  $I_0^3$  を図 8(c)に示す. また, 入力画像 1 と 2 の合成結果得られた画像を図 8(d)に, 入力画像 1, 2, 3 の合成結果得られた画像を図 8(e)に示す. 入力画像 1 では左側の看板に白とびが, 右側に黒つぶれが発生し, 入力画像 2 では右側の看板に白とびが発生し, 左側に黒つぶれが発生した. 白とびによって, 入力画像 1 では左看板に書いてあった文字が, 入力画像 2 では右看板に書いてあった文字が識別できない. また, 黒つぶれによって角の部分の背景が判読できない状態である. また, 入力画像 3 では画像の中央部分に白とびが, 画像の画枠付近の部分に黒つぶれが発生した. 本研究で提案した補正アルゴ

リズムを適用した結果, 入力画像 1 で白とびによって判読できなかった左側の看板に書かれた 'DANGER Radiation risk' という文字が判読できるようになった. また, 右側に発生した黒つぶれ領域も補正前より改善され, 背景が判読できるようになった.

一方, 入力画像 1, 2 を用いて合成を行った場合, 図 8(d)の床面のように両画像とも, 白とびあるいは黒つぶれ領域の場合は補正ができなかったが, 入力画像の数を増やして合成をした結果, 図 8(e)のように画像の左下の床面の部分が補正され, 2 枚を用いた場合より, 改善されたことがわかった.

次に, 提案手法と単純なコントラスト補正の結果を比較する. 図 8(f)は入力画像 1 に対して単純なコントラスト補正を行った結果得られた画像である. コントラスト補正によって画像の明るい部分は暗くなり, 暗い部分は明るくなった. しかし, 単純なコントラスト補正では左側の看板に書いてあった 'DANGER Radiation risk' という文字が判読できないのに対して, 提案手法では判読できるようになった.

## 4. 結 論

本研究では照明の制御により、画像内に現れる白とびおよび黒つぶれを除去することが可能な手法を提案した。今回は人が遠隔操作ロボットを用いて暗いところを調査している状況を想定し、車のヘッドライトのような複数の照明がロボットの前面についており、複数の照明を互いに点滅させる制御が可能な状況を想定した。想定した環境に合わせて実験環境を構築し、照明の制御を行い、画像内の白とびおよび黒つぶれの現れる位置が異なる複数の画像を取得した。その次に、提案したアルゴリズムを適用することで白とびおよび黒つぶれ画像を補正することができた。また、入力画像数を従来の2枚から3枚以上に増やすことで従来手法より精度を向上させることができた。

しかし、提案手法では、光源の位置を変えながら複数の画像を取得した場合、同じ画素でも、その明るさがそれぞれの画像において異なる問題があった。今後、より適切な画素を選択する手法に改良することで復元した画像全体の質も向上させる必要があると考えられる。

また、画像処理の精度を高くするためには照明のON/OFFだけではなく照明の照射角あるいは明るさなどを制御し、より多くの画像を入力画像として取得する必要があると考えられる。

## 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。

## 参 考 文 献

- (1) R. Shen, I. Cheng and A. Basu, "QoE-Based Multi-Exposure Fusion in Hierarchical Multivariate Gaussian CRF," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 22, No. 6, pp. 2469-2478, 2013.
- (2) T. Mertens, J. Kautz and F. Van Reeth, "Exposure Fusion: A Simple and Practical Alternative to High Dynamic Range Photography," *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, No. 1, pp. 161-171, 2009.
- (3) P. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1997*, pp. 369-378, 1997.
- (4) 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.
- (5) E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda, "Photographic Tone Reproduction for Digital Images," *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002*, pp. 267-276, 2002.
- (6) A. Agrawal, R. Raskar, S. Nayar and Y. Li, "Removing Photography Artifacts Using Gradient Projection and Flash-Exposure Sampling," *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005*, Vol. 24, No. 3, pp. 828-835, 2005.
- (7) J. Kong, R. Wang, Y. Lu, X. Feng and J. Zhang, "A Novel Fusion Approach of Multi-exposure Image," *Proceedings of International Conference on "Computer as a Tool" 2007 EUROCON*, pp. 163-169, 2007.
- (8) 林 鍾勳, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一 "複数照明制御を用いた白とび・黒つぶれ画像の補正," 計測自動制御学会第 93 回パターン計測部会研究会資料, pp. 5-10, 2014.
- (9) M. D. Tocci, C. Kiser, N. Tocci and P. Sen, "A Versatile HDR Video Production System," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4, pp. 41-50, 2011.
- (10) M. Aggarwal and N. Ahuja "Split Aperture Imaging for High Dynamic Range," *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 10-17, 2001.
- (11) D. C. H. Schleicher and B. G. Zagar, "High Dynamic Range Imaging by Varying Exposure Time, Gain and Aperture of a Video Camera," *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2010*, pp. 486-491, 2010.
- (12) Y. Piao and W. Xu, "Method of Auto Multi-Exposure for High Dynamic Range Imaging," *Proceedings of International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 2010*, Vol. 6, pp. 93-97, 2010.
- (13) N. Barakat and T. E. Darcie, "Minimal Capture Sets for Multi-Exposure Enhanced-Dynamic-Range Image," *Proceedings of IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology 2006*, pp. 524-529, 2006.