

暗所調査のための複数照明の ON/OFF 制御を用いた 白とび・黒つぶれ画像の補正

○林鍾勳 藤井浩光 山下淳 浅間一（東京大学）

Compensation of Over and Under Exposure Images Using ON/OFF Control of Multiple Lightings for Exploration in Dark Environments

* J. Im, H. Fujii, A. Yamashita, H. Asama (The University of Tokyo)

Abstract— In this paper, we propose a method to correct the over and under exposure regions in the images. For the correction of over and under exposure regions, multiple lightings are used to obtain multiple images whose over and under exposure regions are in different positions. The image processing consists of four steps. Firstly, multiple images are captured by alternately turning on and off illuminations which set in different positions. Secondly, luminance of the acquired images in step 1 is corrected. Thirdly, the over and under exposure regions are extracted from the luminance corrected images. Finally, the images are merged except for the over and under exposure regions. The experiment results show that the over and under exposure regions in the input images are recovered by our proposed method.

Key Words: Image processing, Over and under exposure, Image correction, Multiple lighting system

1 序論

最近では、人が入れない危険な場所での調査のため、様々な遠隔操作ロボットが利用されている。事故が起こった福島第一原子力発電所がその一例である。そのような環境では、Fig. 1のように撮影環境が広範囲で暗所であるため、見たい場所を見るためには強い光を出す照明の使用が必要である。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 Imaging (HDRI) 技術^{1)~2)}がある。この技術は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。露出度の異なる複数の画像を取得する方法としてはカメラのシャッタースピードを変える方法^{3)~5)}、ビームスプリッターを利用する方法^{6)~9)}などが提案されている。しかし、HDRI は Fig. 1 のように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を利用する方法⁹⁾がある。この手法はフラッシュを ON にしたとき取得したフラッシュ画像とフラッシュを OFF にしたとき取得した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および反射光を削除する手法である。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

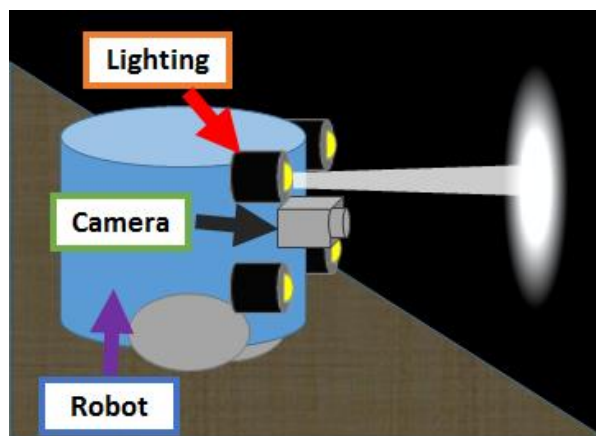


Fig. 1: Investigation using remote controlled robot with attached lightings.

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¹⁰⁾では複数照明の制御および画像の取得を手動で行ったため、画像の取得から画像合成まで長時間がかかり、効率的ではなかった。そこで、本研究では複数照明の制御、画像の取得および画像の合成までを自動で行うことが可能な手法を提案することを目的とする。

2 提案手法

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、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。本研究のコンセプトはまず画像内に白とび・黒つぶれが現れた場合、白とび・黒

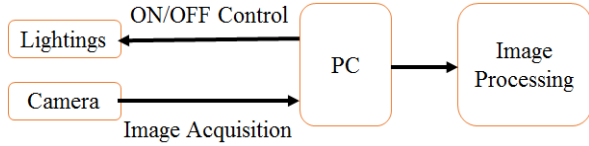


Fig. 2: Multiple lighting system.

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。

システムの構成を Fig. 2 に示す。提案手法のシステムは照明取得側と映像取得側で構成されている。照明制御側では PC から命令を送り、複数照明の ON/OFF 制御を行う。同時に映像取得側ではカメラから取得した映像を PC に転送する。

画像補正手法を Fig. 3 に示す。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。画像取得の結果を Fig. 4(a), (b), (c) に示す。Fig. 4(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、Fig. 4(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。最後に Fig. 4(c) のように入力画像 N では画像の中央部分に白とびが、画像の角の部分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、

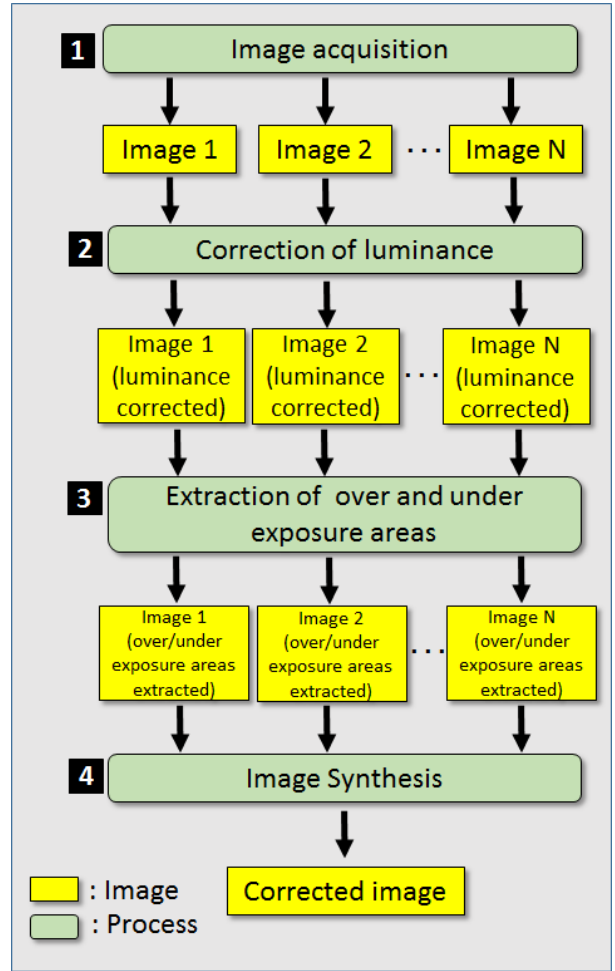


Fig. 3: Our image processing method for compensation of over and under exposure using multiple images obtained by multiple lighting system.

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 は補正用係数、 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 Fig. 5(a), (b), (c) 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 Fig. 5(a), (b), (c) 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

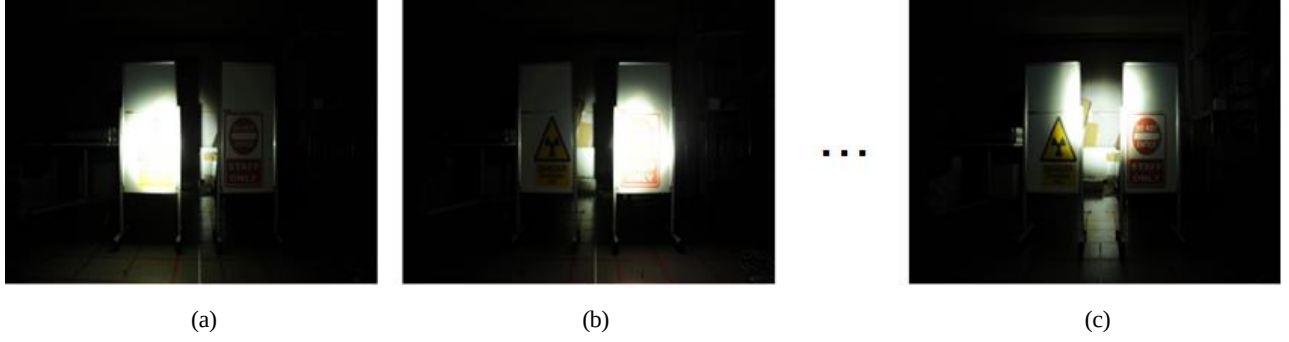


Figure 4: Images obtained in image acquisition step : (a) Input image 1 I_0^1 , (b) Input image 2 I_0^2 , (c) Input image $N I_0^N$.

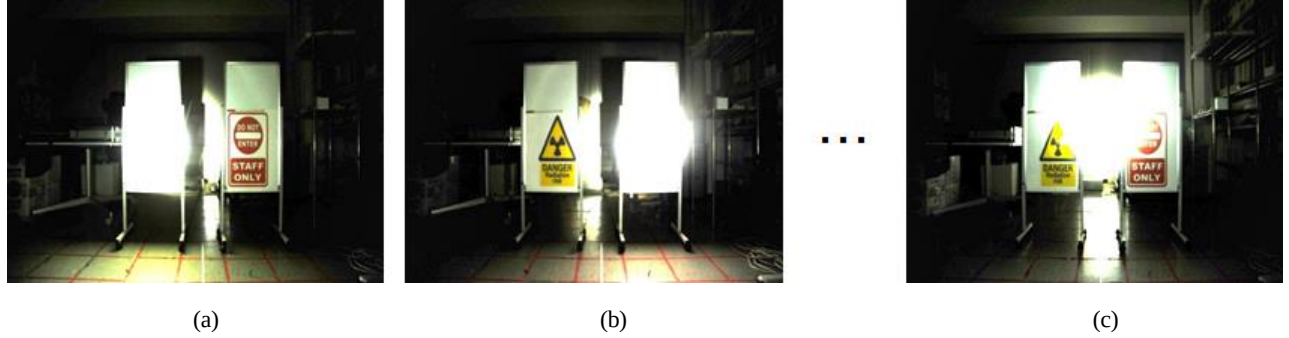


Figure 5: Images obtained in luminance correction step : (a) Luminance corrected image 1 I_p^1 , (b) Luminance corrected image 2 I_p^2 , (c) Luminance corrected image $N I_p^N$.

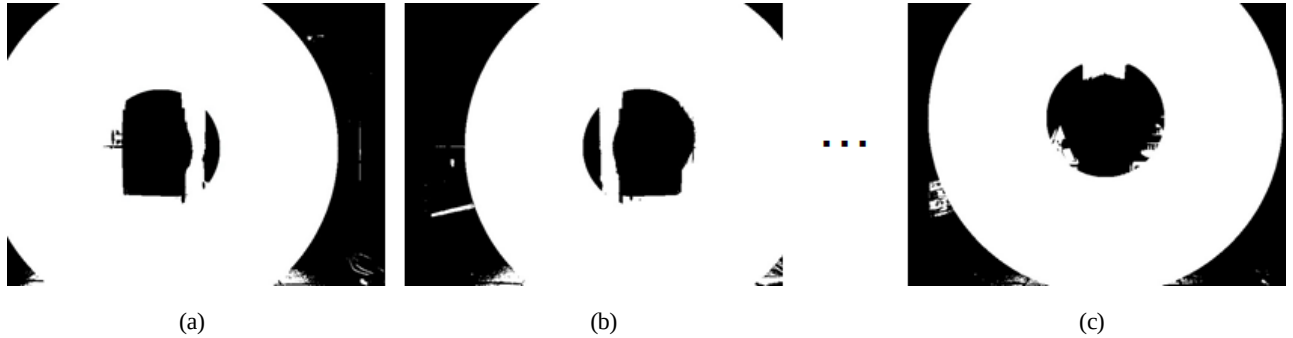


Figure 6: Image obtained in extraction of over and under exposure areas step : (a) Determination image 1 D^1 , (b) Determination image 2 D^2 , (c) Determination image $N D^N$.

輝度情報を用いる手法^{11)~13)}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 Fig. 6(a), (b), (c)に示す。Fig. 6(a), (b), (c)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 Fig. 7 に示す。入力画像 (Fig. 4) での白とび・黒つぶれ領域が他の画像での白とび・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2つの照明を利用し、順番にON/OFFすることで、2枚の画像を取得し、画像合成を行った。システムの様子をFig. 8に示す。Fig. 8のようにロボットの上にPC、カメラおよび照明を設置した。PCはPanasonic Let's note CF-SX3 (Intel(R) Core(TM) i5-4200U CPU 2.30GHz, 8GB RAM)、カメラはSony α6000、照明は3W Power LED6個、ロボットはPioneer3-DXを利用した。また、照明とカメラの配置をFig. 9に示す。Fig. 9のように2つの照明をカメラから縦方向に0.1m、横方向に0.2m離れた場所に設置した。また、2つの照明によってできた照射面がかぶるとその部分に関しては補正が難しいため、今回は照明を水平線から20° ずつ回転し、2つの画像で照射面がかぶらないようにした。今回の実験の撮影条件をTable 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。プログラムはC++



Figure 7: Image obtained as a result of image synthesis step.

TABLE 1. Photographing conditions.

Camera	Sony α6000
Definition	640×480
ISO	400
F-number	f/8
Shutter speed	1/40sec
Focal length	24mm
Lighting	3W Power LED×6
Luminance of lighting	1,000lm

環境で実装され、処理時間は1回の補正で約0.2秒がかかった。

3.2 実験結果

実験結果を Fig. 10, 11, 12 に示す。Fig. 10, 11, 12. の画像(a)はカメラを基準として左側にある照明を ON にしたとき取得した画像で、画像(b)はカメラを基準として右側にある照明を ON にしたとき取得した画像で、画像(c)は(a)と(b)を合成した結果得られた画像である。各撮影環境において2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、入力画像での白とびおよび黒つぶれ領域が補正され、見えるようになった。次に、画像の情報量を表すエントロピー¹⁵⁾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 は階調数、 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¹⁴⁾画像、HDRI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。コントラスト補正はトーンカーブを用い、暗い部分は明るくし、明るい部分は暗くする手法である。エントロピー比較の結果を Fig. 13 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。また、青は入力画像、緑はコントラスト補正による結果画像、オレ

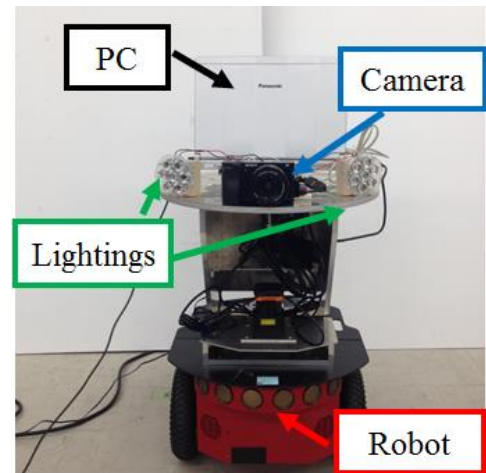


Figure 8: Our system for compensation of over and under exposure images.

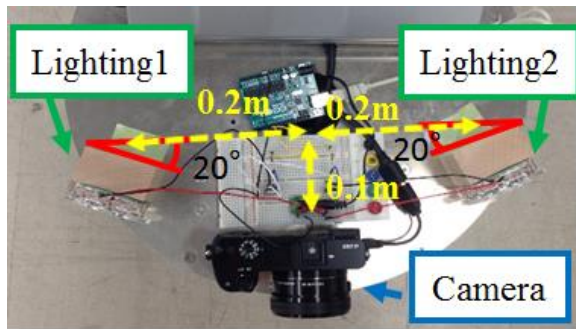


Figure 9: Placement of camera and lightings.

レンジは HDRI による結果画像，赤は提案手法による結果画像の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およ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．また，複数照明システムの構築により，カメラ映像の取得および照明の制御が同時に可能になり，以前より，効率的になった．

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．

謝辞

本研究の一部は，資源エネルギー庁からの委託事業として IRID が受託しその組合員である三菱重工が実施した「平成 25 年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金事業」，および，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」により行われた．

参考文献

- 1) 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.
- 2) P. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1997*, pp. 369-378, 1997.

- 3) D. C. H. Schleicher and B. G. Zagar, "High Dynamic Range Imaging by Varying Exposure Time, Gain and Aperture of a Video Camera," *2010 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 486-491, 2010.
- 4) Y. Piao and W. Xu, "Method of Auto Multi-Exposure for High Dynamic Range Imaging," *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, Vol. 6, pp. 93-97, 2010.
- 5) N. Barakat and T. E. Darcie, "Minimal Capture Sets for Multi-Exposure Enhanced-Dynamic-Range Image," *2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, pp. 524-529, 2006.
- 6) 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, 2011.
- 7) M. Aggarwal and N. Ahuja, "Split Aperture Imaging for High Dynamic Range," In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision 2001*, pp. 10 – 17, 2001.
- 8) M. Aggarwal and N. Ahuja, "Split Aperture Imaging for High Dynamic Range," *International Journal of Computer Vision* 58, pp. 7–17, 2004.
- 9) 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.
- 10) J. Im, H. Fujii, A. Yamashita and H. Asama, "Compensation of Over and Under Exposure Image Using Multiple Light Switching," *Proceedings of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2014)*, pp.147-152, 2014.
- 11) W. Zhang and W. K. Cham, "Gradient-Directed Multi-Exposure Composition," *IEEE Transactions on Image Process*, Vol. 21, No. 4, pp. 2318–2323, 2012.
- 12) T. Jinno and M. Okuda, "Multiple Exposure Fusion for High Dynamic Range Image Acquisition," *IEEE Transactions on Image Process*, Vol. 21, No. 1, pp. 358–365, 2012.
- 13) O. Gallo, N. Gelfand, W. Chen, M. Tico, and Kari Pulli, "Artifact-Free High Dynamic Range Imaging," *Proceedings of IEEE International Conference on Computational Photography*, pp. 1–7, 2009.
- 14) E. Reinhard and K. Devlin, "Dynamic Range Reduction Inspired by Photo receptor Physiology," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11, No. 1, pp. 13-24, 2005.
- 15) C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423, 1948.



Fig. 10: Experiment result at location 1 : (a) Input image 1, (b) Input image 2 and (c) Input image 3.

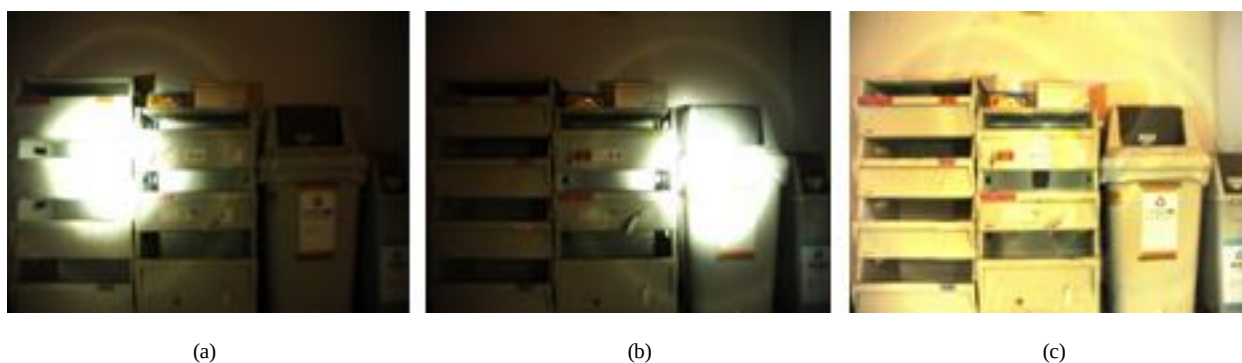


Fig. 11. Experiment result at location 2 : (a) Input image 1, (b) Input image 2 and (c) Input image 3.

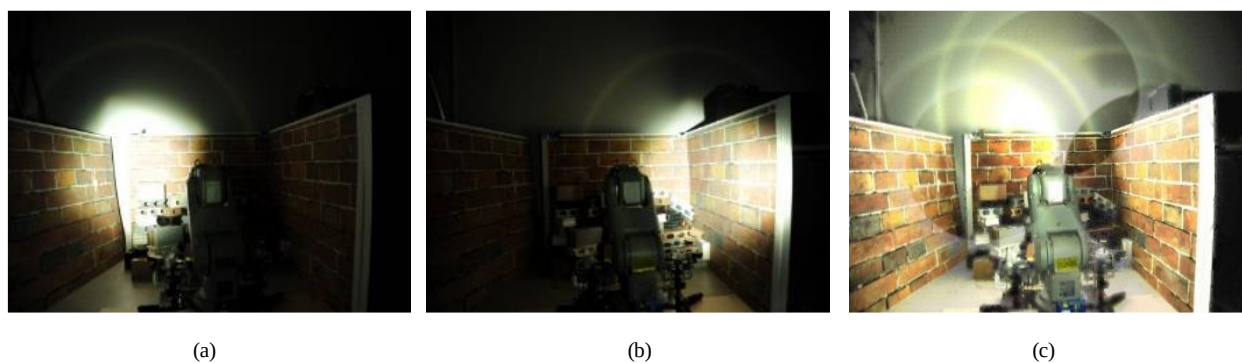


Fig. 12. Experiment result at location 3 : (a) Input image 1, (b) Input image 2 and (c) Input image 3.

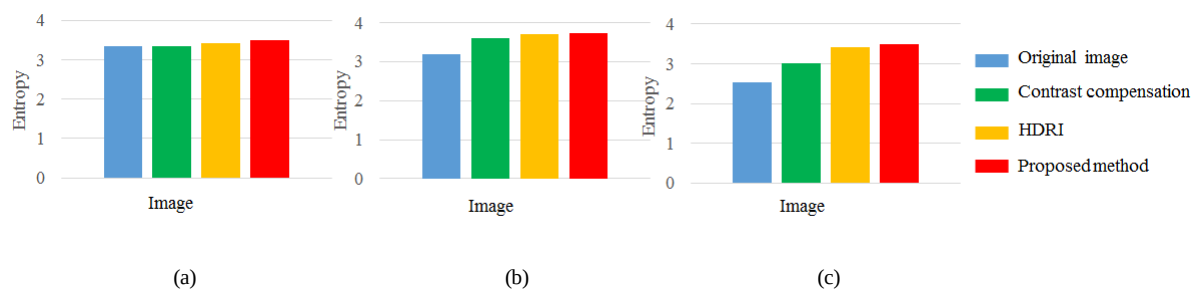


Fig. 13. Entropy of original image, the result of contrast compensation, the result of HDRI and the result of our proposed method : (a) Location 1, (b) Location 2 and (c) Location 3.