

位置ずれを持つ画像に対する高ダイナミックレンジ画像の生成手法に関する検討

高木 鉄平[†] 渡辺 裕[†]

[†] 早稲田大学大学院国際情報通信研究科
〒 367-0035 埼玉県本庄市西富田大久保山 1011
E-mail: †teppei@tom.comm.waseda.ac.jp

あらまし 高ダイナミックレンジ画像は実世界と同等のダイナミックレンジを保持した画像である。この高ダイナミックレンジ画像は露出を変えて撮影された複数枚の画像を合成することで生成することが出来る。しかし、複数枚の画像から高ダイナミックレンジ画像を生成するには、各画像の各画素が一意に対応していなければならない。したがって、基の画像はカメラを固定して位置ずれが起こらない条件で撮影する必要がある。そこで、本稿ではカメラの手ぶれなどによる制御されない位置ずれを持つ露出が異なる複数の画像からの高ダイナミックレンジ画像の生成手法を検討する。

キーワード 高ダイナミックレンジ画像, 位相限定相関法

A Study on High Dynamic Range Image Generation Method for Unconstrained Images

Teppei TAKAGI[†] and Hiroshi WATANABE[†]

[†] Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University
1011, Okuboyama, Nishi-Tomida, Honjo-shi, Saitama, 367-0035 Japan
E-mail: †teppei@tom.comm.waseda.ac.jp

Abstract High dynamic range image(HDRI) has the equal dynamic range that real world has. HDRI is generated by composing several images which were photographed with changing exposure. However, each pixel of each image must correspond uniformly to generate HDRI from several images of different exposure. Therefore, we have the problem that the images must be photographed with a fixed camera and in static scene. In this paper, to ease this condition, we propose the HDRI generating technique that was based on aligning of the images of different exposure.

Key words high dynamic range image(HDRI), phase only correlation

1. はじめに

現在、デジタルカメラの高性能・高機能化が進んでいる。しかし一方で、カメラのダイナミックレンジは限られており、実世界をその範囲で捉えることは困難である(図1)。そのため、カメラで撮影した画像はダイナミックレンジが不足した場合に黒潰れ、白飛びが生じた画像となる。そこで、その黒潰れ、白飛びした部分の情報を再現し、実世界と同等のダイナミックレンジを保持する高ダイナミックレンジ画像(High Dynamic Range Image: HDRI)への関心が高まっている。

黒潰れ、白飛びした情報を復元するためには、露出を変えて撮影した複数枚の画像を用いる。画像の明るさを変えることで、明るい画像で白飛びしている部分が暗い画像では情報が写って

いる。その逆に、暗い画像では黒潰れしている部分が明るい画像では写っていることを利用する。これらの複数枚の画像を合成することで HDRI は生成される。

この時、HDRI を生成するには露出が異なる画像の各画素が

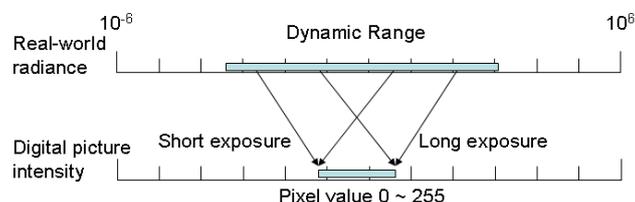


図1 Dynamic range

対応していなければならない。つまり、合成に利用するすべての画像が同じシーンを捕らえていなければならない。そのため撮影する画像はカメラを固定し、シーンが静的でなければならないという問題がある。そこで、カメラ固定、静止シーンという条件を緩和するため、明るさが異なる画像間の位置合わせを踏まえた柔軟な HDRI の生成手法を提案する。

2. HDRI 生成手法 [1]

本稿で用いる HDRI の生成手法と、そのために必要な応答関数の推定手法を示す。

2.1 HDRI 生成プロセス

HDRI は複数枚の露出が異なる画像を用いて生成される。露出を変えて撮影することにより各画像間で明るさが変わるため、白飛び、黒潰れした情報を補間することができる。HDRI の各画素はシーンの照度値を記録し、この照度値は撮影画像の画素値から撮像系の応答関数を用いて決定する。応答関数を f としたとき、画像値は次のように表される。

$$(\text{画素値 } Z) = f(\text{照度値 } E \times \text{露出 } e) \quad (1)$$

よって、照度値は応答関数の逆関数を用いて表すことができる。

$$E = f^{-1}(Z)/e \quad (2)$$

このように、HDRI は撮像系の応答関数を用いて画像値に対応する照度値を推定し、それらを合成することで生成される。HDRI の生成プロセスを図 2 に示した。次に、撮像系の応答関数を推定する手法を述べる。

2.2 応答関数推定

前記した式 (2) を一般化し、両辺の対数をとると式 (3) が得られる。

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln t_j \quad (3)$$

式 (3) を簡単化するために、 $\ln f^{-1} = g$ と定義する。

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln t_j \quad (4)$$

ここで、 i は画素番号を、 j はフレーム番号を表す。このとき、未知数は関数 $g(Z)$ と照度 $\ln E_i$ であるので、最小二乗法により推定する。

$$o = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [g(Z_{ij}) - \ln E_i + \ln t_j]^2 \quad (5)$$

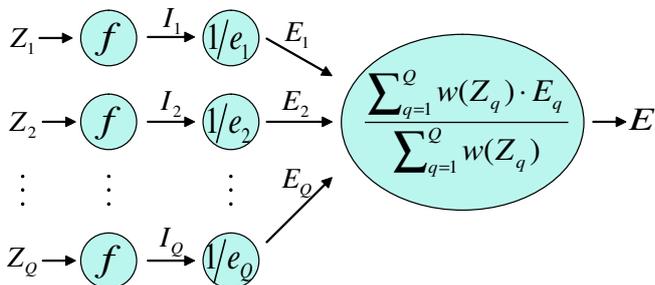


図 2 HDR 生成の流れ。Q: フレーム数, Z: 画素値, f: 応答関数, I: 入射光量, e: 露出, E: 照度値, w(Z): 重み関数

ここで、 P は画素数を、 Q はフレーム数を表す。しかし、単純に最小二乗法を解いた場合応答関数の単調性が補償されない。よって、滑らかさを高めることで単調性を補償する。関数 g が滑らかであることは g の二次微分が小さくなることを意味する。これは二次微分が小さくなると曲率が小さくなるためである。 g の二次微分は数値微分で式 (6) と表す。

$$g''(Z_{ij}) = g(Z-1) - 2g(Z) + g(Z+1) \quad (6)$$

従って、式 (5) に式 (6) の二乗和を加えて正則化する。最終的な誤差関数は、式 (7) となる。

$$o = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [g(Z_{ij}) - \ln E_i + \ln t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z) \quad (7)$$

ここで、 Z_{min}, Z_{max} は各々、最小画素値、最大画素値であり、 λ は正則化項に対する重み係数である。 λ を大きくすることで関数 g の滑らかさを強調することができる。

2.3 問題点

この手法では応答関数の推定、HDRI 合成時に各画像の各画素が一意的に対応していなければならない。したがって、カメラが動く、もしくは、シーンに移動体が存在する条件下で撮影された画像から HDRI を生成することが困難という問題がある。

この問題を解決する手法として、動画から HDRI を生成する手法が提案されている [2]。しかし、その手法では画像の位置合わせにオプティカルフローを用いており、露出が異なる画像の明るさを一致させる必要がある。そのため、応答関数を推定しなければならず、応答関数が既知であるカメラに対しては有効であるが、未知のカメラへの適用には向かない。

したがって、我々は明るさの異なる画像間のマッチングを行うことで、カメラが動く、すなわち位置ずれがある画像に対する HDRI 生成手法を提案する。

3. 位相限定相関法に基づく HDRI 生成手法

位相限定相関法により、露出が異なる画像間のマッチングが可能となる。よって、この位相限定相関法を用いた位置ずれ画像に対する HDRI 生成の手法を述べる。

3.1 位相限定相関法 [3]

位相限定相関法とは画像を離散フーリエ変換して得られる振幅スペクトルと位相スペクトルにおいて、振幅スペクトルを正規化し位相スペクトルに対してのみ相関をとる手法である。位相限定相関法により画像の平行移動が推定できる。

2 枚の画像を $f(x, y), g(x, y)$ とし、これらの信号の離散フーリエ変換をそれぞれ $F(u, v), G(u, v)$ とすると次式で表される。

$$F(u, v) = \sum_{y=0}^{N_2-1} \sum_{x=0}^{N_1-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} \\ = |F(u, v)| e^{j\phi(u, v)} \quad (8)$$

$$G(u, v) = \sum_{y=0}^{N_2-1} \sum_{x=0}^{N_1-1} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)}$$

$$= |G(u, v)| e^{j\psi(u, v)} \quad (9)$$

$F(u, v), G(u, v)$ から位相限定相合成 $\hat{R}(u, v)$ は次のように定義される。

$$\begin{aligned} \hat{R}(u, v) &= \frac{F(u, v)\overline{G(u, v)}}{|F(u, v)\overline{G(u, v)}|} \\ &= e^{j(\phi(u, v) - \psi(u, v))} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\overline{G(u, v)}$ は $G(u, v)$ の複素共役である。位相限定相関関数 $\hat{r}(x, y)$ は $\hat{R}(u, v)$ を逆離散フーリエ変換することにより得られる。

図 3 に位相限定相関法による画像の照合の様子を示した。参照画像と入力画像が同画像であればピークが現れるのに対し、異なる場合にはピークは現れない。また、参照画像と入力画像に位置ずれがなければ原点にピークが現れるが、位置ずれがある場合にはピークもその分だけ原点からずれて現れる。これを画像の位置合わせに応用する。

3.2 提案方式

本提案では画像の回転補正までを想定しているため、位相限定相関法と幾何変換を組み合わせることで回転角までを推定する。図 4 に提案方式の概要を示した。

本方式では、まず参照画像に対して入力画像を回転させなが

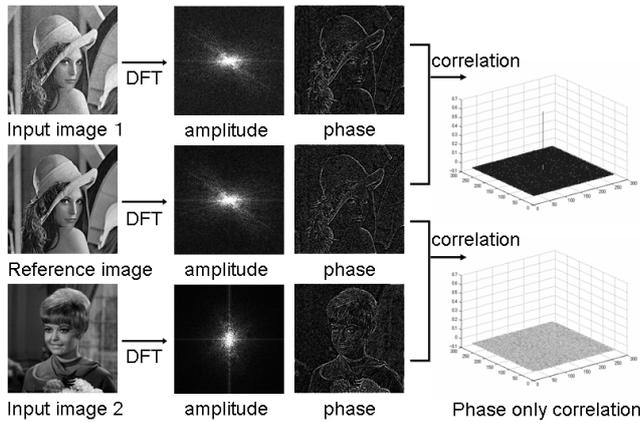


図 3 Phase only correlation

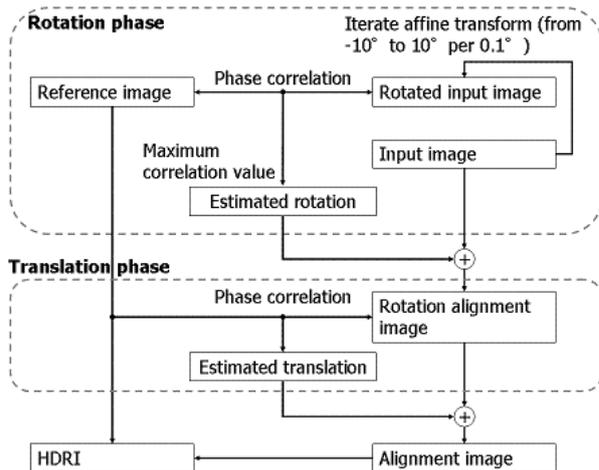


図 4 提案方式概要図

ら位相相関値を算出する。入力画像を回転させる範囲は $\pm 10^\circ$ で、その間隔は 0.1° とした。画像を回転させつつ相関を取り、最大の相関値が得られる回転角を測定値とする。さらに、推定した回転角を用いて入力画像の回転を補正した画像と、参照画像と位相相関を取る。これにより平行移動量が得られ、画像の位置合わせが可能となる。

以上のように画像間の位置合わせを行うのだが、位置合わせは基準フレームに対して順次行っていく。基準フレームより露出が高い画像を例にとると、まず、基準フレームと基準フレームより一段露出が高い画像を位置合わせする。次に、一段露出が画像とその画像よりさらに一段露出が高い画像を位置合わせし、これを最大露出画像まで繰り返す。露出が低い画像に対しても同様の操作を行う。

3.3 基準画像選択方式

位置合わせを行うときに基準となるフレームの決定方法を述べる。本手法では、回転・平行移動により位置合わせを行うため、画像の端で絵が切れてしまう。そのため、画像が切れる領域でのダイナミックレンジの不足ができる限り生じないように基準フレームを選択する必要がある。つまり、画像が切れる端部に有効画素値を持つ画素が最大の画像を基準フレームとする。ここでの有効画素値とは、応答関数において照度値と画素値が線形の関係にある部分の画素値を指す。本手法では各画像の中に一回り小さ長方形を考え、長方形の外側と画像の内側に囲まれる画素について有効画素値が最大のフレームを基準フレームとした。

3.4 実験条件

以上の提案方式に従い、HDRI 生成の実験を行った。実験に使用した位置ずれ画像は、あらかじめカメラを固定して撮影した位置ずれのない画像に対して、ランダムに回転・平行移動を加えたものである。この画像群を図 5 に示した。また、加えた回転・平行移動を表 1 に示した。

3.5 実験結果

提案方式により位置ずれを補正した画像群を図 6 に示し、画像の補正に用いた回転・平行移動量の推定結果を表 1 に示した。補正画像を用いて推定した応答関数を RGB についてそれぞれ図 7 に示した。提案手法により生成した HDRI を図 8 に示した。提案手法の有効性を示すため、固定カメラで撮影された画像から推定した応答関数を図 7 に、HDRI を図 9 に示した。

3.6 考察

位置ずれ画像より生成した応答関数、HDRI を位置ずれのない画像から生成したそれと比較すると、応答関数については画素値の両端でずれが生じているが、合成時の重みづけを考慮すれば問題にはならない。また、図 8 と図 9 を見比べると、主観的に大きな違いはなく、提案手法による画像の位置合わせは有効と考えられる。

4. まとめ

本稿では位相限定相関法に基づく画像間の位置合わせ手法を用いることで、位置ずれ画像に対しても有効な HDRI 生成手法を提案した。実験により、位相限定相関法により露出が異なる



図 5 原画像シーケンス



図 6 位置合わせ結果シーケンス

表 1 数値結果

	exposure	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
added value	rotation	1.1154	3.3345	1.10163	0	1.5792	4.63489	3.4485	2.62396	1.93804
	x transform	3	7	8	0	8	1	2	8	3
	y transform	2	0	9	0	1	2	6	6	2
estimated value	rotation	1.11	3.34	1.1	0	1.59	4.64	3.4	2.62	
	x transform	3	7	8	0	8	1	2	8	3
	y transform	2	0	9	0	1	2	6	6	2

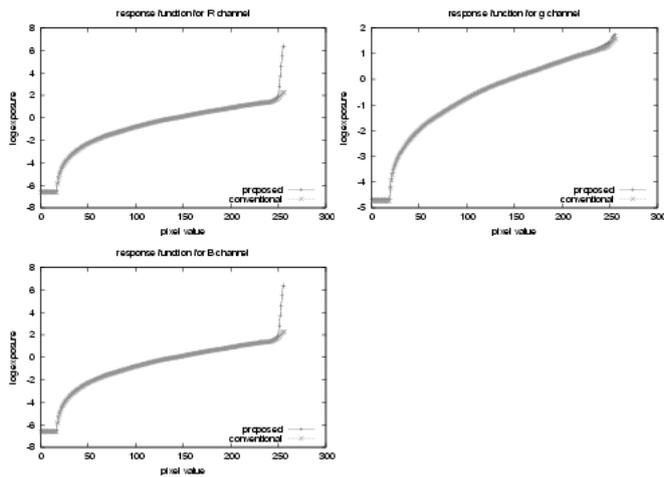


図 7 応答関数



図 8 提案手法を用いて位置ずれ画像から生成した HDR

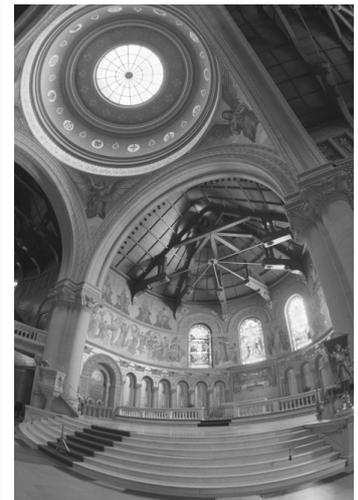


図 9 固定カメラで撮影された通常の画像より生成した HDR

回転・平行移動を含む画像の位置合わせが可能であることを確認した。提案手法により位置ずれ画像から生成した HDR は、固定画像から生成した HDR に主観的に見劣りしない結果が得られ、応答関数も同様の形状を取ることから提案手法の有効性を確認できたと言える。

今後の課題は提案手法の厳密な評価を行うため、定量評価手法について検討する。また、本稿では位置ずれ画像に対して HDR を生成する手法を提案したが、画像内部に動物体が存在する場合についての HDR 生成手法について検討していく。

文 献

- [1] P. E. Debevec, J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," Proc. SIGGRAPH, 1997.
- [2] S.B. Kang, M. Uyttendaele, S.Winder, R. Szeliski, "High Dynamic Range Video", Proc. SIGGRAPH, 2003.
- [3] K. Takita, T. Aoki, Y. Sakagi, T. Higuchi, K. Kobayashi, "High-Accuracy Subpixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E86-A, no. 8, pp. 1925-1934, Aug. 2003.