

移動物体が存在する複数画像からの高ダイナミックレンジ画像生成に関する検討

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, ^{††}hiroshi.watanabe@waseda.jp

高ダイナミックレンジ画像 (以下, HDRI) は実世界の広大な明暗の幅を余すことなく表現する画像である。HDRI を生成する手法として, 露出を変えて撮影した複数の画像を合成する手法がある。しかし, この手法では画像に位置ずれや移動物体が存在する場合, それらの影響により合成した HDRI にはゴーストアーチファクト (以下, ゴースト) が生じる。この問題に対して, カーネル密度推定法を用いたゴースト除去手法が提案されているが, 木の枝葉のような複雑な移動物体がある場合には低減効果は大きく劣化してしまう。本稿ではカーネル密度推定法を応用し, 複雑な移動物体にもゴーストを除去する HDRI 生成手法を提案する。

A Study on Composing High Dynamic Range Image for Differently Exposed Images with Moving Objects

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, ^{††}hiroshi.watanabe@waseda.jp

HDRI(High dynamic range image) has equal dynamic range that real world has. HDRI is composed from differently exposed images of real scene. However, if there are movemet and moving objects in those images, ghosting artifacts may apper in result HDRI caused by moving objects. Althoght the technique using kernel density estimation was proposed to remove ghost, removal effect was reduced if there are complex moving objects. Therefore, we discribe an effective ghost removal technique by appling kernel density estimation.

1. はじめに

現在, デジタルカメラ (以下, カメラ) の高性能化が進んでいる。一方で, カメラのダイナミックレンジは限られており, 広大な明暗の幅を持つ実世界を捉えきくことは困難である。そのため, カメラで撮影した画像は黒潰れ・白飛びが生じた画像となる。そこで, 実世界の明暗をありのまま表現する HDRI への関心が高まっている。

HDRI を生成する手法として普通のカメラで撮影した複数枚の画像を合成するものがある [1], [2]。この手法では露出が異なる画像を用いることで白飛び・黒潰れにより欠落した部分を補間する。これらの画像を合成することで, 一般的なカメラを用いて HDRI を生成できるが, 同時に様々な問題も持っている。特に, 画像に移動物体や位置ずれが存在する場合には, 画像を合成するためゴーストが発生する問題がある。ゴーストとは物体が消えるで

も写るでもなく, 薄く表れた状態を指している。図 1 はカメラを手で持ち撮影した露出の異なる画像から生成した HDRI であり, 画像に位置ずれや移動物体が存在するため線が 2 重になっていたり, ぶれが生じている画像になっている。そのため, 撮影中はカメラを三脚等で固定し画像のずれを防ぎ, 画像中の異なる位置に移動物体が存在してはいけない。よって, この手法ではカメラを手で持って撮影した画像や, 人や動物, 木の揺れなどがある画像からは HDRI を生成することができないという大きな制約を受けてしまう。

我々はゴーストが発生する要因を大きく位置ずれと移動物体に分けた。そこで, 我々が目指すゴーストを除去した HDRI 生成方式を図 2 は示す。この方式では画像全体の位置ずれを補正した後, 移動物体によって生じるゴーストを除去する処理を行い HDRI を生成する。我々は以前



図 1 ゴーストがみられる HDRI

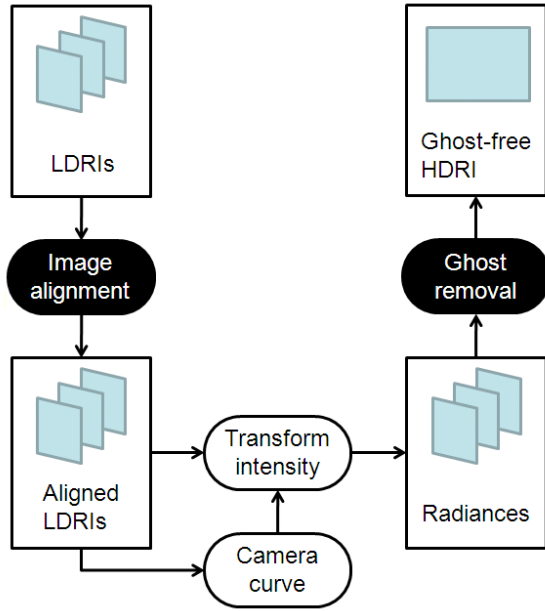


図 2 提案方式

に位相相関法を用いた位置ずれ画像からの HDRI 生成手法を提案した [3]．そこで、本稿では我々が目指す HDRI 生成方式における移動物体によるゴースト除去手法を提案する．

2. 従来手法

移動物体によるゴーストを解決するために、いくつかの手法が提案されている．Kang らは勾配法によるオプティカルフローを用いて画像間の動きベクトルを推定し、局所領域毎に位置合わせを行う手法を提案した [4]．この手法は動きベクトルが高精度に推定されるならば確かに有効であるが、形状変化が起こる物体やオクルージョンに対しては推定が困難である．よって、そのような移動物体が存在する場合には効果が薄い．

また、Ward らは移動物体が存在する領域を特定した後、最適な露出の画像を 1 つ選択し用いる手法を提案し

た [5]．移動物体の推定には画像間の同位置にある画素群に対して画素値の加重分散を算出し、分散が大きい場合には移動物体を含むとしている．このとき、画素値は撮影時の露出値を元に正規化されたものを用いる．この分散は式 (1) で表わされる．

$$V(j) = \frac{\sum_{i=0}^N w(z(i,j)) E(i,j)^2 / \sum_{i=0}^N w(z(i,j))}{\left(\sum_{i=0}^N w(z(i,j)) E(i,j) \right)^2 / \left(\sum_{i=0}^N w(z(i,j)) \right)^2}^{-1} \quad (1)$$

ここで、 i はフレーム番号、 j は画素番号、 z は画素値、 E は照度値、 $w(z)$ は加重関数を表す．この関数は画素値が中央値付近では大きい値をとり、逆に両端では小さくなる特徴を持つ．

しかし、この手法では移動物体が背景に類似している場合は移動物体の検出は困難である．加えて、局所的に高いダイナミックレンジを持つ領域では、1 枚の画像を利用することからダイナミックレンジが制限されてしまうという問題があげられる．また、どのフレームに移動物体が存在するのかも特定できない．

最後に、Khan らは各画素が背景である確率密度を算出することによって移動物体を除去する手法を提案した [6]．確率密度の推定にはノンパラメトリックな密度推定法であるカーネル密度推定を用いている．カーネル密度推定法では、ある画素が背景と推定される場合には確率密度は大きくなり、逆の場合は小さくなる．そのため、算出された確率密度を合成時の加重としても利用することで、移動物体の影響を低減している．しかし、我々の実験により単純な移動物体に対しては有効であるが、木の葉の揺れのような物体に対しては効果が小さくなる結果が得られた．

Khan らの手法は移動物体が存在するフレームの特定が容易で、自動的に移動物体除去ができる．そこで、我々は Khan らの手法を応用し、問題となる背景下でのゴースト除去手法を提案する．そのためにまず、カーネル密度推定法とそれによる背景検出の手法を述べ、さらに問題点を明らかにする．

2.1 カーネル密度推定法

集合 $\{x_i\}_{i=1,\dots,N}$ が与えられた時、任意の点 x がその集合に属する確率密度 $\hat{p}(x)$ を式 (2) を用いて推定できる．

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n K_h(x, x_i) \quad (2)$$

ここで、 K_h はカーネル関数、 h は平滑化変数でバンド幅と呼ばれる． $K_h(x)$ は式 (3) となる．

$$K_h(x, y) = \frac{1}{h^{1/2}} K\left(\frac{(x-y)^2}{h^2}\right) \quad (3)$$

カーネル関数は以下の条件を満たす．

- $\int K(x)dx = 1$
- $\int K(x)dx = 0$

この条件を満たすカーネル関数として様々なものが定義されているが、最も一般的なものとしてガウシアンカーネルがあり、式 (4) で表わされる．

$$K(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{|x - y|^2}{h^2}\right) \quad (4)$$

ガウシアンカーネルは点 x が他の集合 $\{x_i\}_{i=1, \dots, N}$ から孤立している場合、相対的な距離が大きくなりカーネル関数の値は小さくなる．

また、カーネル密度推定法は多変量を扱うことができる． d 変数で表わされるサンプル $\{x_i\}_{i=1, \dots, N}$ に対して、 x の確率密度はガウシアンカーネルを用いて式 (5) から推定できる．

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{1}{|\mathbf{H}|^{1/2} (2\pi)^{d/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - x_i)^T \mathbf{H}^{-1/2}(x - x_i)\right) \quad (5)$$

ここで、バンド幅 $\mathbf{H}$ は平滑化変数を要素に持つ正定値行列である．

2.2 背景検出

カーネル密度推定法では任意の画素が背景である確率密度を推定し、その値で背景判定を行う．Khan らはある画素が背景である条件として、その画素を中心とした局所領域は背景であり、その画素が周辺領域に属するならばその画素も背景であるとしている．ここでの周辺領域は他の露出画像の同一領域も含まれており、図 3 の濃灰色の画素により構成される領域である．カーネル関数の特性より、ある画素がその周辺領域に属するならば確率密度は高くなる．つまり、確率密度が高いならば、その画素はその周辺領域に属するため、最初の仮定よりその画素は背景となる．

これを数式であらわすと、露出 r の画像中のある任意の点 (i, j) の画素に対して $L * a * b *$ に変換した画素値を要素に持つベクトル x を与え、その周辺領域と他の露出画像の同じ領域にある画素の集合を $N(x)$ とする．集合の要素となる画素は $y_{p,q,s} \in N(x), (p, q, s) \neq (i, j, r), s = 1, \dots, R$ と表す．

ここで注意しなければならないこととして、白飛び・黒潰れした要素は背景ではないためカーネル密度推定から除外する必要がある．この影響を緩和するために、式 (1) で用いた加重関数を利用する．

この加重関数を用いて、 x が背景である密度を推定するカーネル密度推定は式 (6) となる．

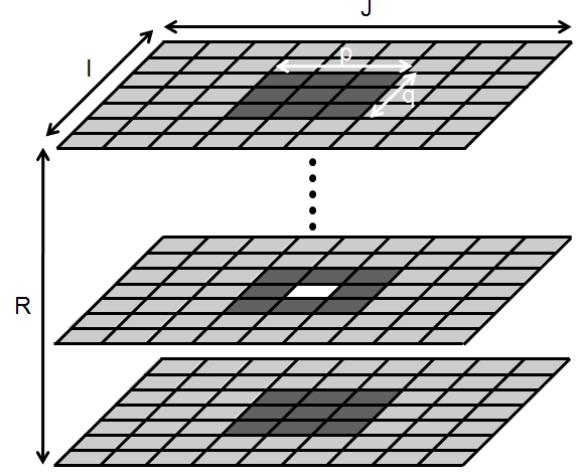


図 3 露出が異なる同一シーンの画像群

$$\hat{p}(x|N(x)) = \frac{\sum_{p,q,s \in N(x)} w(y_{p,q,s}) K_H(x - y_{p,q,s})}{\sum_{p,q,s \in N(x)} w(y_{p,q,s})} \quad (6)$$

$N(x)$ が背景であるならば、ガウシアンカーネルより確率密度 $\hat{p}(x|N(x))$ が大きくなるとき x は背景で、逆に小さくなれば移動物体ということになる．この演算をすべての画素に対して行うことで、各画素が背景である確率密度が分かる．それを HDRI 合成時に重みとして加重することで、移動物体を写している画素の寄与度を下げ、結果としてゴースト除去を行うことができる．

2.3 問題点

Khan らはある画素 x に対して周辺領域 $N(x)$ が背景であるならば、確率密度 $\hat{p}(x|N(x))$ は高くなると仮定してカーネル密度推定法を適用している．そのため、背景の推定は移動物体と背景が明確に異なるならば有効であるといえるが、 $N(x)$ が常に背景を捉えるとは限らない．木の揺れや人の行き交いなどがあれば、常に異なる物体を捉えることになる．この場合、 $y \in N(x)$ は同フレームの画素は類似値を示しても、フレーム毎では異なる値になる．よって、カーネル関数の特性上 $\hat{p}(x|N(x))$ は小さくなる．しかし、 $N(x)$ が背景でない場合、異なるフレーム $r \in R$ 中の同位置にある画素に対する確率密度 $p(x_r)$ も同様に小さくなるため、確率密度を単純に加重して HDRI を合成した場合にはゴーストが発生してしまう．

例として、図 5, 6 に示した画像を基に Khan らが提案したカーネル密度推定法によるゴースト除去を行った HDRI を図 7, 8 に示した．原画像では木の枝葉が揺らめいており、揺れる木の枝葉が移動物体となるが、一方で背景も枝葉である．そのため特徴が酷似し、背景と移動物体を区別することができない、もしくは常に枝葉が動くため背景が存在しないことから生成された HDRI は枝葉の周辺でゴーストが生じ、ぶれた様な画像となる

ている．

3. 提案手法

我々は Khan らが提案したカーネル密度推定法を応用し，複雑背景や識別が困難な移動物体にも対応したゴースト除去手法を提案する．この手法では背景もしくは移動物体として識別ができない領域には単一のフレームを当てることによりゴーストを除去する．単一フレームを当てることによりダイナミックレンジが失われることになるが，本手法は移動物体の識別ができない最小限の領域に対してのみ適用する．また，他の特定可能な領域については Khan らと同様に確率密度を合成の加重に用いることで，極力ダイナミックレンジが低下する領域を抑えている．背景や移動物体を特定できる領域と特定できない領域の判定にはカーネル密度推定法の特徴を利用する．

単一画素についてだけでなく同位置にある画素群 $\mathbf{x}_{r \in R}$ (図 3 の白い画素と同位置にあるすべての画素) の確率密度の総和を考慮する．カーネル関数の性質から $p(\mathbf{x}_{r \in R})$ の総和は周辺領域に背景が多く含まれるほど大きくなる．逆に，背景がない場合には $p(\mathbf{x}_{r \in R})$ それぞれが小さくなり，結果として総和も小さくなる．この関係を表 1 に示した．これにより，以下の条件により周辺領域が背景でない場合を判定することができる．

$$\sum_{r=1}^R p(x_r) \geq Th \Rightarrow \text{kernel density weight}$$

$$\sum_{r=1}^R p(x_r) < Th \Rightarrow \text{one frame}$$

この条件により，移動物体を含むフレームが存在しても，その他のフレームが背景であれば総和は大きくなるため，この場合には確率密度を重みとして移動物体のみを除去することができる．また，背景が特定できない場合には総和が小さくなり 1 つのフレームを割り当てることによりゴーストを除去できる．

4. 実験と評価

画像は Nikon D300 で撮影したものをを用いた．撮影はカメラを固定し，露出は手動設定でシャッター速度のみで 1 段階ずつ変化させながらのブラケット撮影を行った．この条件で撮影した画像を用いて提案手法により HDRI を生成し，複雑な動きをする移動物体に対して提案手法

表 1 周辺領域と確率密度，総和の関係

	確率密度	総和
N(x) 背景である場合	大	大
N(x) の一部フレームに移動物体がある場合 (大半が背景)	小，または大	中
N(x) が背景でない場合	小	小

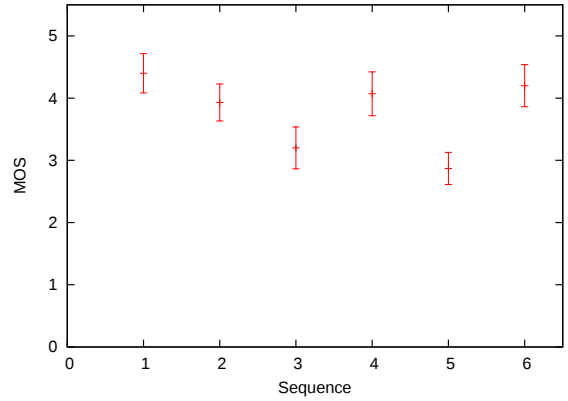


図 4 主観評価結果

がゴースト除去に有効であることを示す．さらに，同じ画像に対して提案手法と従来手法により HDRI を生成し，主観評価により提案手法の有意性を確認する．

4.1 実験

複雑な移動物体として木の枝葉が揺らいでいるような画像に対して HDRI の生成を行った．HDRI の生成に用いたシーケンスを図 5, 6 に示す．なお，それぞれの撮影時の露出設定を画像下に記載した．提示した画像は合成に用いた一部であり，実際にはより多くの画像を用いている．

提案手法と従来手法により生成した HDRI をそれぞれ図 7, 9 に示した．左側が従来手法，右側が提案手法により生成した HDRI である．また，ゴーストが分かりやすいよう一部を拡大した画像を図 8, 10 に示した．

4.2 評価

本実験では従来手法と提案手法により生成した HDRI を Reinhard らのトーンマッピング手法を用いてディスプレイに表示できる形式にし，MOS で主観評価を行った [7]．画像は DSCQS 法に基づき従来と提案の HDRI をランダムに提示し，どちらが優れているかを 5 段階で評価した．評定者は基準を満たす 15 人である．評価結果を図 4 に示した．

4.3 考察

従来手法により生成した HDRI では，木の葉がゴーストによりぶれた画像のようになっているが，提案手法で生成した HDRI では図 8, 10 に示したようにゴーストは低減されていると言える．また，背景とも移動物体とも認識できない領域には一枚のフレームを当てはめているが，それによるダイナミックレンジの低下も目立たないと言える．さらに，主観評価から提案手法が従来手法よりも優位である結果が得られた．

5. まとめ

本稿ではカーネル密度推定法を応用し，移動物体が存



シャッター速度: 1/4000
絞り: 3.5

シャッター速度: 1/1000
絞り: 3.5

シャッター速度: 1/250
絞り: 3.5

図 5 Sequence1



シャッター速度: 1/4000
絞り: 3.5

シャッター速度: 1/1000
絞り: 3.5

シャッター速度: 1/250
絞り: 3.5

シャッター速度: 1/60
絞り: 3.5

図 6 Sequence2

在する画像からでも主観的に優れた HDRI を生成する手法を提案した．提案手法ではカーネル密度推定法により各画素が背景である確率密度を推定する．その推定結果を基に各画素の周辺領域が背景であるか否かを判定する．そして，背景であればその確率密度を合成時の重みに用い，逆に背景でなければ 1 つのフレームを割り当てることにより，ゴーストを除去した HDRI を生成する．さらに，実験により従来手法と提案手法により HDRI を生成し，これらを主観評価した．

今後は領域毎に最適な露出の画像を割り当てることによりダイナミックレンジの低減を縮小するため，画像の領域分割を踏まえた手法へと改善していく．加えて，以前に提案した位置ずれ画像から HDRI を生成する手法と統合することで，手持ちのカメラで撮影され，移動物体が存在する画像に対して HDRI を生成する手法へと改善していく．

文 献

- [1] P.E. Debevec, J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," Proc. Siggraph, vol.31, pp.369-378, Aug, 1997.
- [2] T. Mitsunaga, S.K. Nayar, "Radiometric Self Calibration," Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), Vol.1, pp.374-380, Jun,

- 1999.
- [3] 高木鉄平, 渡辺裕, "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," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.379, CS2007-46, IE2007-129, pp.101-104, Dec.2007
- [4] S.B. Kang, M. Uyttendaele, S. Winder, R. Szeliski, "High dynamic range video," Proc. ACM Transactions on Graphics, vol.22, no.3, pp.319-325, 2003.
- [5] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. E. Debevec, "High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting," Morgan Kaufmann, 2005.
- [6] E. Khan, O. Akyuz, E. Reinhard, "Ghost Removal in High Dynamic Range Images," Proc. IEEE Conf. Image Processing (ICIP), pp.2005-2008, Oct, 2006.
- [7] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," Proc. ACM Transactions on Graphics, vol.21, pp.267-276, 2002.



図 7 HDRI(従来手法)



図 9 HDRI(提案手法)

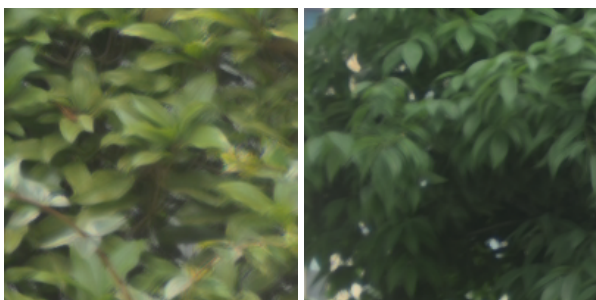


図 8 局所的に抜粋した HDRI(従来手法)

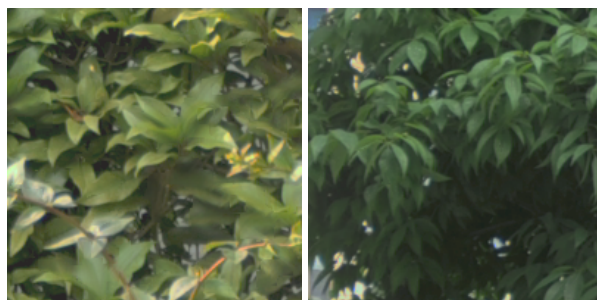


図 10 局所的に抜粋した HDRI(提案手法)