

平成20年度 修士論文

露出の異なる画像による高ダイナミックレンジ画像生成
手法に関する研究

Research on Composing High Dynamic Range
Image Using Differently Exposed Images

指導教授 渡辺 裕 教授

2009年3月

早稲田大学大学院 国際情報通信研究科
国際情報通信学専攻

4206A143-9

高 木 鉄 平

Teppeï TAKAGI

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	高ダイナミックレンジ画像の生成手法と関連要素	5
2.1	まえがき	5
2.2	画像のダイナミックレンジ	5
2.2.1	撮像の基本	5
2.2.2	光電変換	5
2.2.3	撮像信号処理	6
2.2.4	画像の明るさと露出	7
2.3	高ダイナミックレンジ画像 (HDRI: High Dynamic Range Image)	8
2.3.1	撮像系での高ダイナミックレンジ化	9
2.3.2	複数の画像を用いた HDRI の生成	10
2.4	HDR format	10
2.5	Tone mapping	11
2.6	HDRI の符号化	13
2.7	HDRI 生成手法	13
2.7.1	露出の異なる画像による応答関数の推定手法	14
2.7.2	応答関数の多項式近似手法	15
2.8	画像合成アルゴリズム	18
2.9	複数露出画像からの HDRI 生成における問題点	18
2.10	従来のゴースト除去手法	20
2.10.1	High dynamic range video	20
2.10.2	分散による移動物体検出	20
2.10.3	カーネル密度推定法による移動物体検出	21
2.11	むすび	21
第 3 章	位置ずれを持つ画像からの HDRI 生成手法	23
3.1	まえがき	23
3.2	位相相関法による HDRI 生成手法	23

3.2.1	位相相関法	23
3.2.2	提案アルゴリズム	24
3.2.3	基準画像選択方式	25
3.2.4	位置ずれ補正精度の検証実験	25
3.3	実画像による HDRI 生成実験	25
3.4	考察	25
3.5	むすび	28
第 4 章	移動物体によるゴースト除去手法	32
4.1	まえがき	32
4.2	カーネル密度推定法を応用したゴースト除去	32
4.2.1	カーネル密度推定法	32
4.2.2	背景検出	33
4.2.3	従来手法の問題点	34
4.2.4	提案アルゴリズム	35
4.2.5	実験と考察	35
4.3	位置ずれと移動物体によるゴースト除去	36
4.3.1	実験	36
4.3.2	考察	36
4.4	むすび	37
第 5 章	結論	49
5.1	総括	49
5.2	今後の課題	50
5.2.1	位相相関法による位置ずれ補正の高速化の検討	50
5.2.2	領域分割による最適フレーム割当て手法の検討	51
5.2.3	背景差分による移動物体除去手法の検討	51
	謝辞	53
	参考文献	54
	図一覧	56
	表一覧	58
	研究業績	59

第1章

序論

1.1 研究の背景

近年、急速なデジタル技術の発達と普及により、音楽や画像、動画などマルチメディアコンテンツが急増している。中でも、デジタルカメラ（以下、カメラ）や表示機器の高性能、高機能化は著しく、精細なデジタル画像（以下、画像）が広く普及した。

まず、画像を撮影するカメラは CCD や CMOS などセンサの微細化により飛躍的に解像度を高めている。たとえローエンドなコンパクトカメラでも画素数は 1000 万画素前後にまで達している。加えて、顔認識や手ぶれ補正、オートピント、露出などきれいな画像を撮影するための機能が組み込まれたことにより、誰もが手軽に高解像度かつ高品質な画像を撮影できるようになった。さらに、ハイエンドなカメラになれば、解像度や様々な機能はもちろんのこと、RAW データとして画像を高い色深度で撮影し、好きな明るさの画像に現像することもできるようになっている。また、1 度の撮影で 2 枚の異なる露出の画像を連続撮影し、それらを合成することにより明暗の広い写真が撮れる「ワイドダイナミックレンジ」機能を持つ三洋電機の Xacti⁽¹⁾ のようなカメラが発売された。

次に、その画像を表示する映像表示機器も液晶ディスプレイやプラズマディスプレイが普及し、高解像度、高品質な画像や映像を表示することが可能になっている。加えて、Sony から高コントラスト比を持つ有機 EL(Organic Electro-Luminescence) テレビが発売され、大画面化を目指し研究開発が続けられている⁽²⁾。さらに、コントラスト比 50,000 : 1 という広大なダイナミックレンジで映像を表示する HDR(High Dynamic Range) ディスプレイ^(3, 4)の研究開発が行われており、鮮明な画像や映像の需要が一層高まると考えられる。

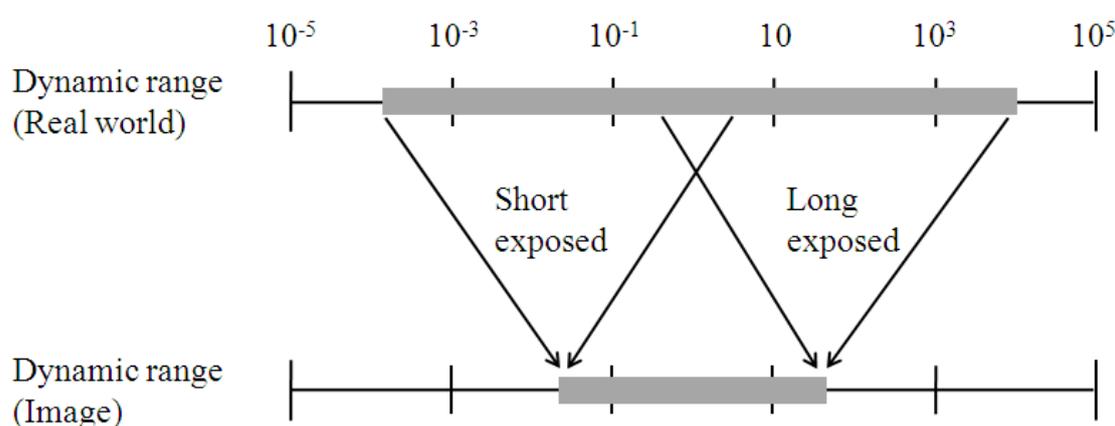
また、デバイスの進歩だけではなく画像処理による高精細画像の生成技術の開発もめざましく、低画質な画像からでも高画質な画像を生成することが可能になってきた。その様な技術として、高精細な画像を画像処理で生成技術として超解像技術⁽⁵⁾やモザイク技術⁽⁶⁾が研究されている。

この様に画像の高精細化は著しいが、その反面、カメラや表示機器のダイナミックレンジ*に対しては大きな進歩が見られず限られている。一方で、実世界がもつ明るさの幅は表 1-1 に示したように広大なダイナミックレンジを持つ。一般的な画像は RGB 各 8[bit] 程度

*ダイナミックレンジ: 信号の再現能力を表す数値で、最小値と最大値の比率を [dB] 単位で表したもの。デジタル画像ではビット数にあたり、これが大きい程表現階調が増える。

表 1-1: Luminance levels for some lighting environments(文献⁽⁷⁾ 参照)

Condition	Illuminance [cd/m^2]
Starlight	10^{-3}
Moonlight	10^{-1}
Indoorlight	10^2
Sunlight	10^5
Common CRT monitors	10^2

図 1-1: 実世界と撮像のダイナミックレンジ (文献⁽⁸⁾ 参照)

で画像を表現しているが、実世界を過不足なく表現するのは困難である。

そのため、図 1-1 に示すように、カメラは実世界のダイナミックレンジの一部を切り取り、撮像して表現しており、捉えきれない範囲は白飛び、黒潰れを起こしてしまう。実世界では別の色であっても、画像中ではその領域は白、もしくは黒として表されてしまう。さらに、多くのカメラは感受した光を画像処理により非線形に画像の輝度値へに変換している。よって、画像の色譜調はシーン本来の明るさとは異なったものとなっている。

そこで、高ダイナミックレンジ画像 (HDRI: High Dynamic Range Image) への関心が高まり、HDRI 生成技術が提案されている。HDRI は通常のデジタル画像では表現仕切れない、実世界の広大な明暗の幅をありのまま表現する画像である。このような研究背景において、本研究では HDRI の生成を容易にし普及させるべく、新しい HDRI 生成手法の検討を行う。

1.2 本研究の目的

HDRI を生成する技術として、明るさの異なる複数枚の画像を合成する手法がある⁽⁷⁾。明るさの異なる画像は、同一シーンをカメラの露出を変えながら複数回撮影することで得られ

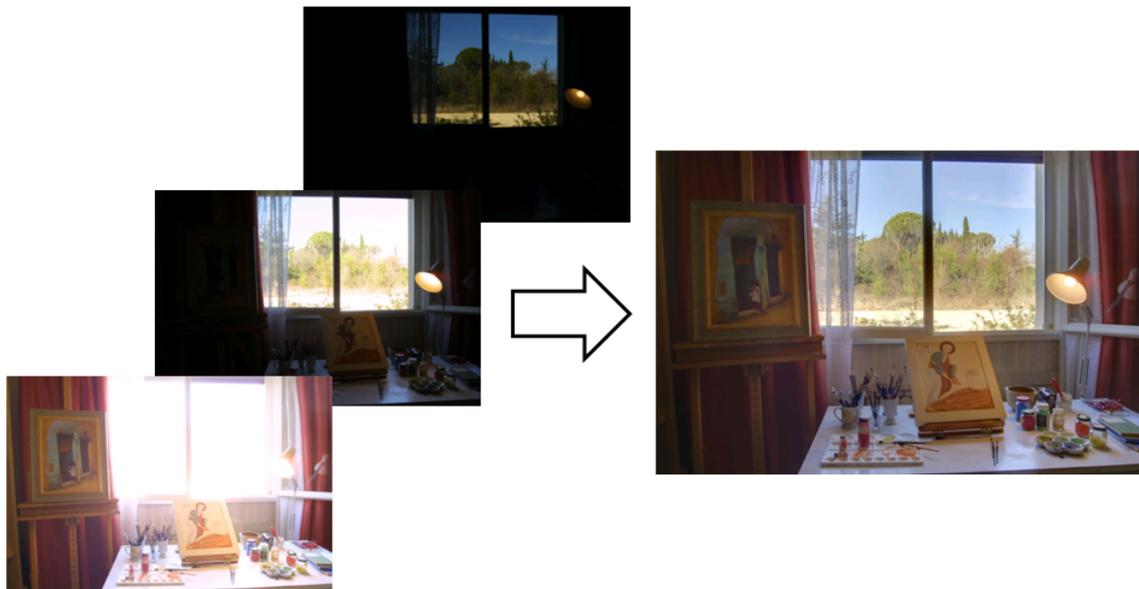


図 1-2: 露出の異なる画像による HDRI の生成 (文献⁽⁹⁾ 参照)

る。露出の異なる画像として、例えば、露出の大きい画像はセンサに光を多く感受させた画像であり、明るい画像になる。この画像は光を多く感受するため、実世界の暗い領域を表現することができる反面、明るい領域に対しては白飛びを起こしてしまう。逆に、露出の小さい画像は明るい領域を表現でき、暗い領域では黒潰れを起こしてしまう。故に、露出の異なる画像を用いることで、各画像間で白飛び、黒潰れした領域を補完することができ、それらを合成することで HDRI を生成することが可能となる。その様子を図 1-2 に示した。

しかし、この手法では複数枚の画像が同一のシーンでなければならず、画像の位置ずれや、移動物体の存在に対して脆弱である。そのため、HDRI の元となる露出の異なる画像を撮影する場合、カメラを固定しなければならず、また被写体が静止している瞬間を捉えなければならない。したがって、撮影には大きな制約がかかる上、どれだけ注意を払っても完全に静的な画像を得ることは困難である。よって、我々はそれらの問題を解決することで HDRI の生成を容易にするための手法を提案する。

1.3 本論文の構成

以下に本章以降の構成を示す。

第1章 本章であり，研究の背景およびその目的について述べている．

第2章 HDRI について述べる．まず，通常の画像のダイナミックレンジや色調に影響を与える撮像の特性や画像処理について述べ，画像の明度に影響を与える露出について述べる．さらに，画像のダイナミックレンジを広げるために行われている研究や技術開発について述べる．

次に，HDRI について記録形式や圧縮方法，HDRI を表示機器に表示するために用いられるトーンマッピングについて述べる．そして，露出の異なる画像を用いた HDRI 生成手法を述べる．そして，従来提案されてきた手法について基礎実験を行いその問題点を確認する．

第3章 カメラを手持ちで撮影した画像のように位置ずれがある画像を用いた場合でも，ゴーストのない HDRI を生成できるようにするため，位相相関法による位置ずれ補正を用いた HDRI 生成手法を提案する．そこで，位相相関法とそれを用いた提案手法のアルゴリズムを述べる．さらに，実験により位置ずれ補正の精度を確認し有効性を確認し，実際に撮影した画像に対して，提案手法により HDRI を生成し，ゴーストが低減されることを示す．

第4章 移動物体によって生じるゴーストを除去するため，カーネル密度推定法を応用したゴースト除去手法を提案する．まず，位置ずれのない画像に対する提案手法のゴースト除去手法アルゴリズムを述べる．そして，実験により提案手法の有効性を評価する．

次に，位置ずれと移動物体が存在する画像に対して，前章で提案した手法と組み合わせることで，本研究の目的である手持ちのカメラで撮影した画像を用いたゴーストのない HDRI の生成実験を行う．さらに，評価により提案手法の有効性を示す．

第5章 本研究の総括と今後の課題について述べる．

第2章

高ダイナミックレンジ画像の生成手法と関連要素

2.1 まえがき

本章では、HDRI について述べる。まず、通常の画像のダイナミックレンジや色調に影響を与える撮像の特性や画像処理について述べ、画像の明度に影響を与える露出について述べる。さらに、画像のダイナミックレンジを広げるために行われている研究や技術開発について述べる。

次に、HDRI について記録形式や圧縮方法、HDRI を表示機器に表示するために用いられるトーンマッピングについて述べる。そして、露出の異なる画像を用いた HDRI 生成手法を述べる。そして、従来提案されてきた手法について基礎実験を行いその問題点を確認する。

2.2 画像のダイナミックレンジ

カメラで撮影した画像のダイナミックレンジは光電変換特性や信号処理によって決まる。そこで、本節では画像のダイナミックレンジに影響を与える撮像の特性やデバイス内で行われる画像処理について述べる。

2.2.1 撮像の基本

カメラは図 2-1 のように光学系、CCD や CMOS のような撮像デバイス、電子回路で構成されている。照明された被写体の光学像は、レンズで撮像デバイス上に結像される。ここで、光電変換された信号電荷を順次取り出し、各種の機能を持った電子回路でデジタル信号処理を行い、目的の出力信号として取り出される。デジタル信号処理では、画質をよくするための処理機能とよい信号を撮影するための撮影機能とを兼ね備えている⁽¹⁰⁾。

2.2.2 光電変換

撮像デバイスは光学像を電気信号に変換する光電変換と書く画素に発生した信号電荷を読み出していく走査という2つの機能を持つ。光電変換は光学像の明るさの変化に対して、電気信号の大きさ、振幅の変化に変換する。光入力に対する出力信号の関係を光電変換特性と

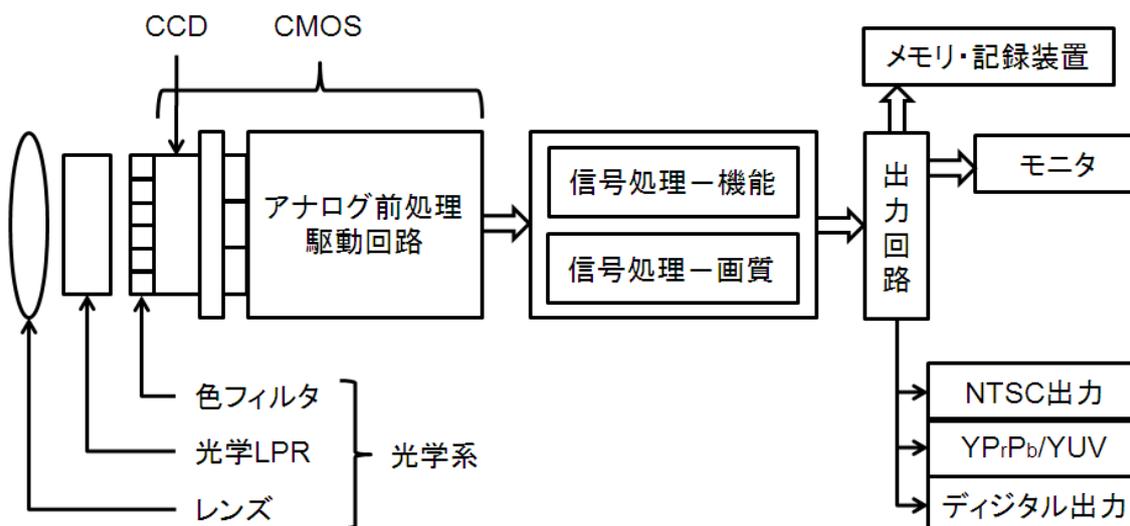


図 2-1: 撮像デバイスの構造 (文献⁽¹⁰⁾ 参照)

いい、図 2-2 に示すように一般的にはほぼ線形に変化する。光が強すぎると飽和して、それ以上は信号が蓄積できないレベルがある。また、光が弱すぎる場合にはノイズレベルに埋もれて検知できなくなる。この検出範囲がダイナミックレンジに相当する。一般的に用いられる CCD では、出力信号で 54[dB]、光入力で 40~60[dB] 程度である。

より詳しく光電変換の特性を見る。信号出力を i 、入射光量を E とするとこれらの関係は、 $i = kE^\gamma$ となる。 k は定数、 γ を係数とする。式から明らかなように、入出力を対数でとれば傾斜は γ に依存する。CCD や CMOS センサの光電変換特性は前記した図 2-2 に示した通り直線的になり、 γ は 1 である⁽¹⁰⁾。

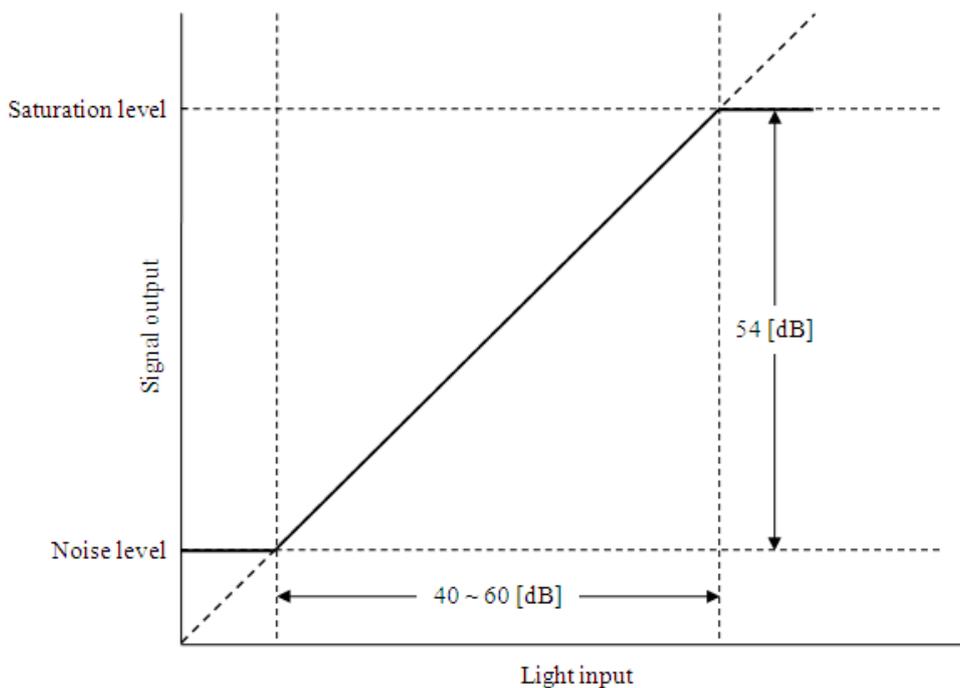
ここで示した光電変換特性は線形であるが、ダイナミックレンジ拡大のために非線型な特性を持たせることもある。例えば、低輝度部分では線形な特性であるが、輝度が大きくなるにつれて自動的に対数特性に変化する線形/対数型光電変換特性のセンサが研究されている⁽¹¹⁾。

2.2.3 撮像信号処理

カメラにはセンサで得られた信号を処理する回路が組込まれている。この中には、人間の視覚特性や表示装置の特性、ダイナミックレンジの調整のため信号を非線型に変換するものがある。そのため、画像の明るさは実世界の物理的な明るさと比較して非線型になる⁽¹⁰⁾。

γ 補正

表示の際、CTR(cathode ray tube) のガンマ特性が 2.2 であるため、あらかじめ撮像側で補正し、再生画面が正しい階調になるようにしている。最近の LCD(liquid crystal display)

図 2-2: 光電変換特性 (文献⁽¹⁰⁾ 参照)

などでは、ガンマ 1 で表示することもできるが、従来に合わせて 2.2 に変換して表示することが多い。

この補正を行うのがガンマ補正回路である。この回路では $1/2.2 = 0.45$ をガンマ特性とする。ガンマ特性を図 2-3 に示す⁽¹⁰⁾。

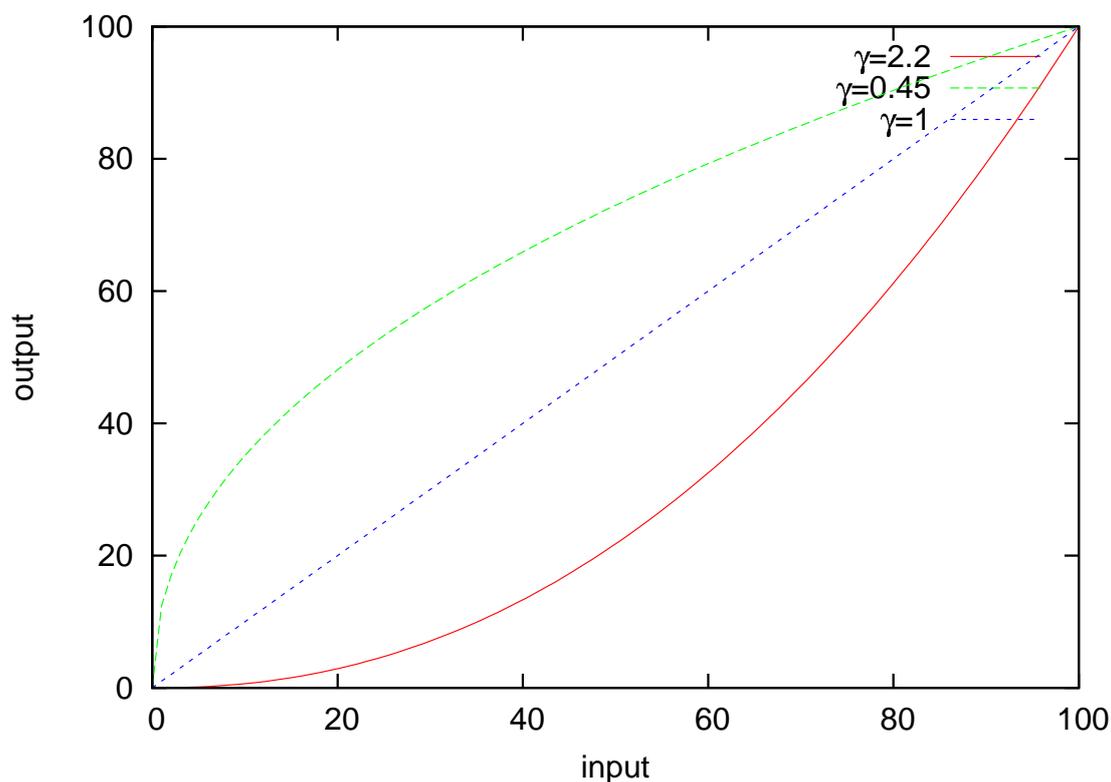
ニースロープ補正

実世界の光はダイナミックレンジが著しく大きく、撮像デバイスである程度制限されるが、全範囲にわたって信号を飽和することなく伝送することは不可能である。そこで、過度の大きな入力信号に対しては信号振幅を制限することが必要である。そうしなければ AD 変換で破綻を起こす恐れが出てくる。

ガンマ補正では、0.45 程度のなだらかな特性であったが、これより急峻にカットする。この特性をニースロープ特性という⁽¹⁰⁾。

2.2.4 画像の明るさと露出

画像を組合わせて HDRI 生成する上で必要となる露出について述べる。露出は撮像デバイスが感受する光量である。つまり、露出が大きくなれば画像は明るくなり、小さくなれば暗い画像となる。露出は絞りとシャッター速度により決まる。撮像デバイス上の光感面照度

図 2-3: γ 特性

E は、被写体照度が E_0 としたとき式 (2.1) で表現される。

$$E = \frac{RT}{4F^2(1+m)^2} E_0 \quad (2.1)$$

ここで、 R は被写体の反射率、 T は撮像レンズの透過率、 m は結像面の倍率である。一般的に、 $m \ll 1$ であるため m は省略可能である。さらに、 F はいわゆる F 値のことである。 F 値はレンズの明るさの尺度として用いられ式 (2.2) で表される。

$$F = \frac{f}{D} \quad (2.2)$$

ここで、 D はレンズの口径、 f は焦点距離である。よってレンズの口径が大きくなれば撮像センサへの入射照度は大きくなるのが分かる。加えて、シャッター速度により露光量は変化する。仮にシャッター速度が2倍になれば、光感面照度も2倍になるため、露光量は $E \times t$ で表される⁽¹²⁾。

2.3 高ダイナミックレンジ画像 (HDRI: High Dynamic Range Image)

HDRI とは、その名の通り一般的な表示装置で映し出される画像や、カメラで撮られた画像よりも大きなダイナミックレンジを持つ画像である。HDRI は、単に従来の画像よりも大

きなダイナミックレンジを持つ画像という意味から実世界の明るさをありのまま表現する極めて広大なダイナミックレンジを持つ画像まで幅広い認識がある。我々が、HDRI という時には後者の広大なダイナミックレンジを持つ実世界と同等のダイナミックレンジを持つ画像とする。

HDRI を生成するには、撮像の性能を向上させるか、もしくは画像処理により異なる露出で撮影された画像でダイナミックレンジを補完する必要がある。

2.3.1 撮像系での高ダイナミックレンジ化

撮像や信号処理における画像の高ダイナミックレンジ化について述べる。研究中の技術も含め現在認知されているものを表 2-1 に挙げた⁽¹⁰⁾。

表 2-1: 高ダイナミックレンジ化技術 (文献⁽¹⁰⁾ 参照)

項目	方式
基本特性	飽和レベルの拡大
	ノイズレベルの低減
撮像デバイス	対数特性
	横型オーバーフロー容量
	垂直 2 画素方式
	画素内 ADC
カメラ技術	掃出し駆動
	複数シャッター

様々な技術が研究されているが、純粋にダイナミックレンジを挙げるには撮像センサの基本特性を向上させるしかない。しかし、それにはさらに大きな技術革新が必要になる。

また、最近ではパナソニックからダイナミックレンジ拡大技術を搭載した撮像装置が発表された。これは MOS センサにダイナミックレンジを拡大する回路を内蔵する仕様になっており、撮像装置の特徴として次の 3 点が挙げられている。

- 撮像可能な入射光のダイナミックレンジを従来比 1 万倍の 140dB へと拡大
- 動くものの撮像、動きながらの撮像に強いグローバルシャッターを搭載
- ワンチップで広ダイナミックレンジを実現

さらに、ダイナミックレンジを拡大する回路には主に以下の技術が用いられている。

- 一つのシーンを暗い領域と明るい領域それぞれに合わせて露光時間を変えた画像を複数枚取り込み、これらを画素単位で合成して出力する合成回路
- 撮像から読み出しまでの間、合成した映像信号を保持するメモリ素子を画素内に搭載。

- 露光時間の異なる複数の映像信号を1個のメモリ素子で高速に記憶・合成を可能とするシンプルなメモリ回路であることである。

このMOSセンサでは、複数の明るさの異なる画像を記録し、それらを合成することにより画像のダイナミックレンジを高めている⁽¹³⁾。

2.3.2 複数の画像を用いた HDRI の生成

パナソニックの開発したMOSセンサはセンサ内に明るさの異なる複数の画像を記録し、それらを合成する画像処理回路を加えることで画像のダイナミックレンジを向上させた。

それと同様の技術として、一般的なデジタルカメラを用いて露出を変えて撮影したダイナミックレンジの低い画像(LDRI: Low Dynamic Range Image)を合成することによるHDRIを生成する技術も提案されている。本研究では、HDRIの生成手法としてこの技術に注目する。

2.4 HDR format

HDRIは高いダイナミックレンジを持つため、記録するフォーマットも専用のものが提案されている。現在では、様々な種類のフォーマットが考えられており、主に表2-2のフォーマットが挙げられる。

Radiance

Radiance RGBEは、Wardらによって開発されたHDRフォーマットである。1画素あたりRGB各float 32 [bit]のデータを、RGBE各unsigned char 8 [bit]で表す。EはExponentで、RGBに共通の指数である。Radiance RGBEはヘッダ部とデータ部で構成される。図2-4に、Radiance RGBEの構造を示す⁽¹⁴⁾。

OpenEXR

OpenEXRは、16[bit]浮動小数点、32[bit]浮動小数点、32[bit]整数に対応したHDR形式のフォーマットである。rle、zip、pizの3種類のロスレス圧縮に対応している。

表 2-2: HDR Format

Format	拡張子
Radiance RGBE	.hdr
OpenEXR	.exr
LogLuv TIFF	.tif
JPEG-HDR	.jpg(.jif)

```
#!RADIANCE
# comment
FORMAT = 32-bit_rle_rgbe
EXPOSURE=  exposure

-Y height +X width
data (R G B E R G B E ...)
```

図 2-4: Radiance RGBE のフォーマット構造例

また、OpenEXR は高い拡張性を備えている。以下の特徴が挙げられる。

- Zチャンネルなど RGBA 以外のチャンネルも保存可能
- 32[bit] 浮動小数点以外のピクセルフォーマットのサポート
- ヘッダに文字列情報などの埋め込みが可能
- PXR24 圧縮

PXR24 は、OpenEXR の新しい圧縮方式である。16[bit] 浮動小数点形式と整数形式の画像は可逆圧縮を行う。32[bit] 浮動小数点形式の画像は、一度 24[bit] 浮動小数点値に変換し、そのビット列を INT とみなしてわずかな非可逆圧縮を行う⁽¹⁵⁾。

2.5 Tone mapping

ディスプレイ上に HDRI の階調を再現する方法として数多くの Tone mapping 手法が提案されている。ここでは、本研究でも実際に Tone mapping として用い、また一般的にもよく利用される Reinhard らの手法について述べる。

Tone mapping のアルゴリズムは大きく広域的な処理と局所的な処理に別けられる。前者は、画像全体の明るさに応じた関数を用いて、それぞれの画素の明るさを圧縮する。これは単純で分かりやすいが、ダイナミックレンジが著しく大きい HDRI においては明暗部で画像の詳細が損なわれる。

一方で、局所的な処理はある画素の近傍の平均的な明るさに応じた処理である。この処理では近傍画素の範囲を正確に決定しなければならない。不正確である場合には ringing artifacts が起こりうる。

まず、輝度を RGB から式 (2.3) によって計算する。

$$L_w(x, y) = 0.27R(x, y) + 0.67G(x, y) + 0.06B(x, y) \quad (2.3)$$

ここで、 $L_w(x, y)$ は実シーンの輝度である。さらに、輝度の対数平均を式 (2.4) 計算する。

$$L_{av} = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{x,y} \log(\delta + L_w(x, y))\right) \quad (2.4)$$

ここで、対数計算が破綻しないように、定数 δ を設ける。この L_{av} とキーバリュ α を用いて、式 (2.5) によりそれぞれの画素をスケールする。

$$L(x, y) = \frac{\alpha}{L_{av}} L_w(x, y) \quad (2.5)$$

第二に、シーンの一部が明る過ぎることを想定し、白飛びを許容する範囲を決める。この時の最小値を”white point” とする。これにより、広域的なトーンマッピングオペレータが式 2.6 で与えられる。

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L(x, y)} \quad (2.6)$$

最初に、シーンの key value に基づいた出力画像の色合いの範囲を決める。シーンの key value の有効な近似として、照度の \log 平均をとる。これは、式 (2.7) で \bar{L}_w として与えられる。

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{x,y} \log(\delta + L_w)\right) \quad (2.7)$$

ここで、 $L_w(x, y)$ は画素 (x, y) が取る実世界の輝度、 N は画像の画素数、 δ は画像中に黒い画素が存在するときに生じる特異性を回避するための小さな値を表す。シーンが normal-key を持つならば、それを表示画像の中間値に、もしくは、 $[0, 1]$ の範囲の 0.18 に対応させる。これにより、以下の式 (2.8) が得られる。

$$L = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x, y) \quad (2.8)$$

ここで、 $L_w(x, y)$ は相対輝度、 $a = 0.18$ である。low-key, high-key の画像に対しては、 a の値を変えることで対応できる。

式 (2.8) には問題がある。多くのシーンは大部分が適当な範囲のダイナミックレンジを持つが、局所的に太陽光が当る高輝度な領域や、影で覆われる低輝度な領域を持つ。従来は、高低の両側を圧縮してきたが、現在では、主に高輝度側を圧縮する特性曲線が用いられる。この特性曲線を用いた簡単なトーンマッピングは式 (2.9) で与えられる。

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \quad (2.9)$$

この式 (2.9) は、高輝度は $\frac{1}{L}$ によってスケールされる一方で、低輝度は 1 でスケールされることを意味している。公式は表示可能な範囲内のすべての輝度を変換することを保証する。しかし、良い手法ではない。そこで、式 (2.9) を高輝度値を増幅する制御方式を導入し、式 (2.10) に拡張する。

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L(x, y)} \quad (2.10)$$

ここで、 L_{white} は白に射影される最小輝度である。例えば、 L_{white} にシーンの最大輝度を当てはめること、飽和する画素はなくなる⁽¹⁶⁾。

2.6 HDRIの符号化

HDRIをJPEG⁽¹⁷⁾やJPEG2000⁽¹⁸⁾に圧縮する技術が提案されている。ここでは、JPEG圧縮について述べる。まず、実世界の輝度で表されるHDRIとそれをTone mappingしたものを用意する。次に、エンコーダでは、Tone mappingしたHDRIと元のHDRIを再構成するために必要な情報を保有するサブバンド画像からなる合成画像を生成する。そして、TonemappingしたHDRIをJPEG画像に変換し、サブバンドをメタデータとして記録する。JPEG圧縮の流れを図2-5に示した。

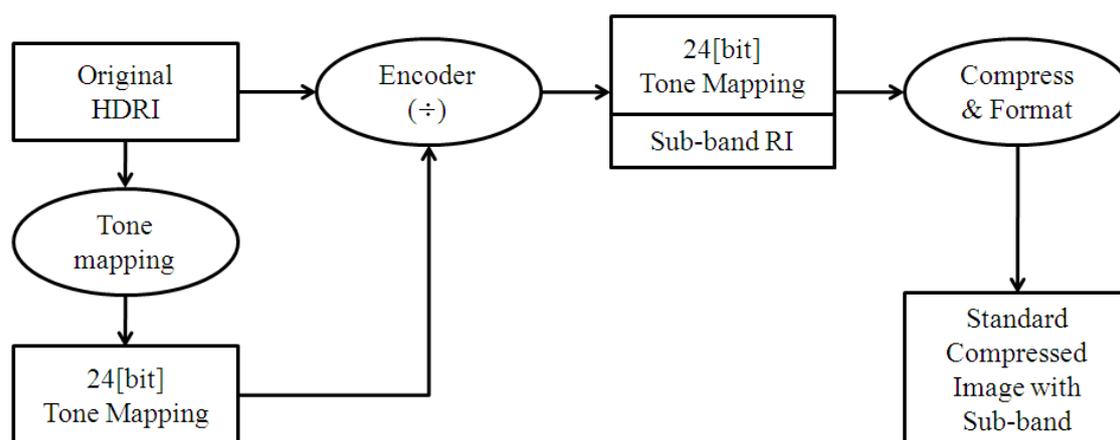


図 2-5: HDR subband encoding pipeline(文献⁽¹⁷⁾ 参照)

2.7 HDRI生成手法

HDRIの生成には、同一シーンを露出を変えて撮影した複数の画像を用いる手法がある。露出の異なる画像を用いるのは、図2-6の様に各画像間で白飛び、黒潰れした情報を補完するためである。

カメラで撮影された画像は、実際の輝度で保存されるわけではなく、変換されて保存される。これはJPEGなどの画素値が8[bit]しかないことと、人の視覚が感じる明るさが線形でないことが関係している。つまり、カメラで撮影された画像は、人の感覚に近いよう対数的に補正され、そして8[bit]程度に収められる。

このような画像からHDRIを生成するにはシーン本来の輝度を復元する必要がある。この復元のために撮像系で行われる光入力から画素へ変換する際の応答特性を利用する方法がある。

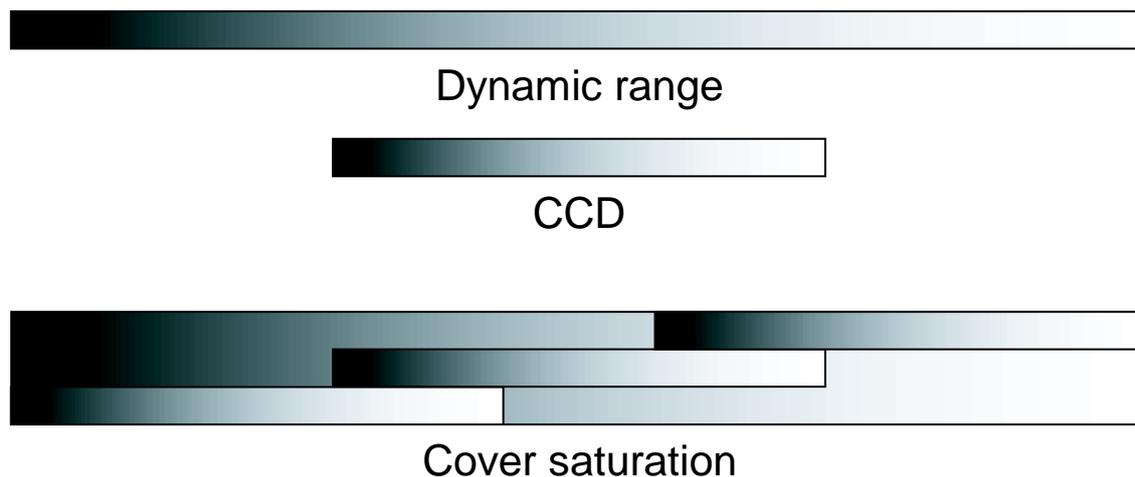


図 2-6: 複数画像によるダイナミックレンジの補完

2.7.1 露出の異なる画像による応答関数の推定手法

Debevec らは、撮影時の露出時間が既知の露出が異なる画像から撮像系の応答特性を推定する手法を提案した。彼らはカメラが感受した光量から画素値へ射影を関数として定義し、式 (2.11) と表した。

$$Z = f(E\Delta t) \quad (2.11)$$

このとき、 Z は画素値、 E は照度、 Δt は露出時間となる。また、露出はシャッター速度により調節するものとし絞りや感度は一定とする。ここで、この関数 f が撮像系の応答特性に相当する。彼らはこの関数を応答関数 (response function)、応答関数をグラフ化したものを応答曲線 (response curve) と名づけている。応答関数を単調増加の関数として逆関数をとると、式 (2.12) より照度が得られる。

$$E = f^{-1}(Z)/\Delta t \quad (2.12)$$

よって、応答関数の推定により画素値から相対的なシーンの放射輝度が求められる。応答関数を単調増加関数と仮定できるのは、照度が大きくなると対応する画素値も大きくなるとが容易に推測できるためである。

応答関数の推定には露出の異なる画像から複数箇所の画素を用いるため、式 (2.12) を一般化し式 (2.13) と書き直す。

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i t_j \quad (2.13)$$

ここで、 i は画素番号を、 j はフレーム番号を表す。照度 E は理想的な環境であるならば、フレームによらず一定になるはずである。さらに、両辺の対数をとると式 (2.14) が得られる。

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln t_j \quad (2.14)$$

式を簡単化するために、 $\ln f^{-1} = g$ とする。従って式 (2.14) は次式 (2.15) となる。

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln t_j \quad (2.15)$$

この方程式で画素値と露出時間は既知であり、未知数は関数 g と照度 E_i である。

そこで、式 (2.15) から得られる方程式群において最少二乗誤差を与える関数 g と照度 E_i を推定することになる。関数 g の推定は、画素値 Z が $[0, 255]$ の範囲にあることから、その範囲内の $g(z)$ を推定すれば良い。従って、 Z_{min} , Z_{max} をそれぞれ最少、最大の画素値とし、 N を用いる画素位置の数、 P を画像数とすれば、式 (2.16) として2次目的関数を最小化する N の E_i と、 $Z_{max} - Z_{min} + 1$ の $g(z)$ を見つける問題に定式化できる。

$$o = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [g(Z_{ij}) - \ln E_i + \ln t_j]^2 \quad (2.16)$$

しかし、単純に式 (2.16) により $g(Z)$ を求めても関数 g の単調性は保証されない。そこで、 g の滑らかさを高めることで単調性を実現する。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。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 (2.17) と表す。

$$g''(Z_{ij}) = g(Z-1) - 2g(Z) + g(Z+1) \quad (2.17)$$

従って、式 (2.16) に式 (2.17) の二乗和を加えて正則化する。最終的な目的関数は、式 (2.18) となる。

$$o = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [g(Z_{ij}) - \ln E_i + \ln t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z) \quad (2.18)$$

ここで、 λ は正則化項に対する加重係数である。 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。

式 (2.18) は $g(z)$ と E_i の二次式なので、 o の最小化は線形最小二乗問題となる。過決定の線型方程式系は特異値分解を用いることで解くことができる。応答関数推定の直観的な手順は図 2.7.1 のようになる⁽¹⁹⁾。

2.7.2 応答関数の多項式近似手法

光永らは応答関数は単調増加であり、撮像系によって形状に大きな違いはないとして、多項式に近似する手法を提案した。この手法では、正確な露出情報は必要でなく、応答関数の推定と同時に露出時間の推定も可能としている⁽²⁰⁾。

多項式推定

応答関数 f の多項式近似アルゴリズムを示す。彼らもカメラが感受する光量を照度と露出時間の積とし、画素値はそれを応答関数により射影したものとしている。そこで、式 (2.11)

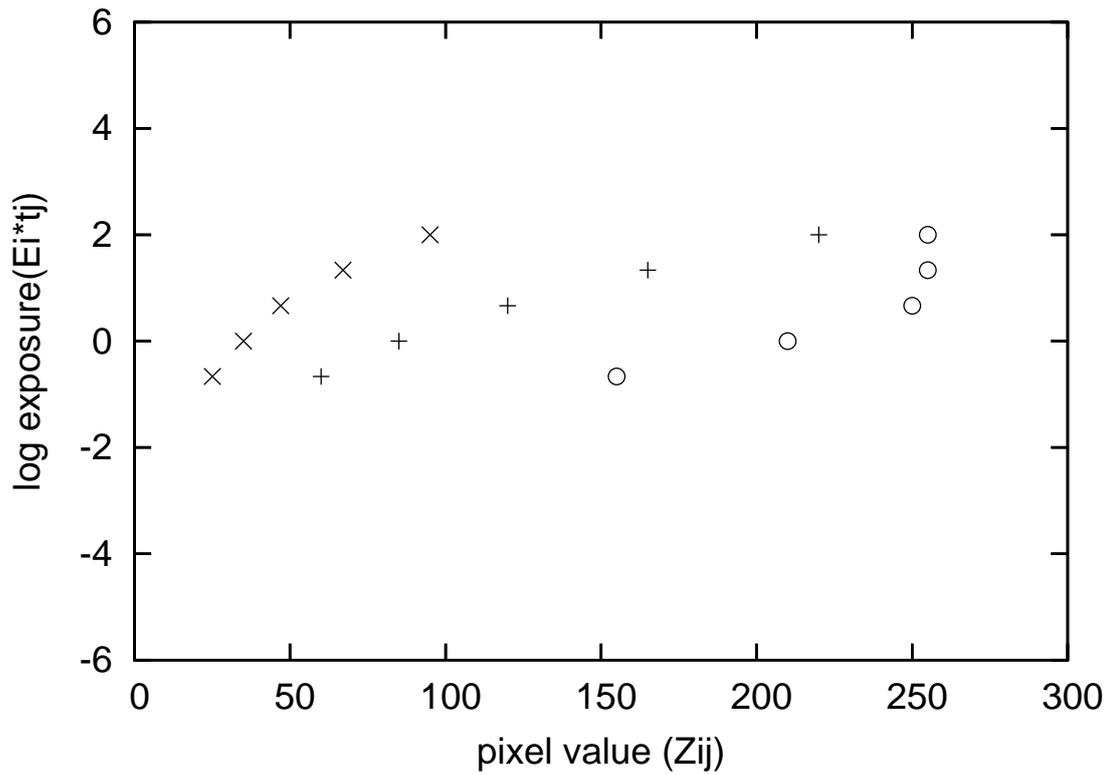


図 2-7: 露出が異なる画像の画素値 Z_{ij} から式 (2.16) により導出される $g(Z_{ij})$ (文献⁽¹⁹⁾ 参照)

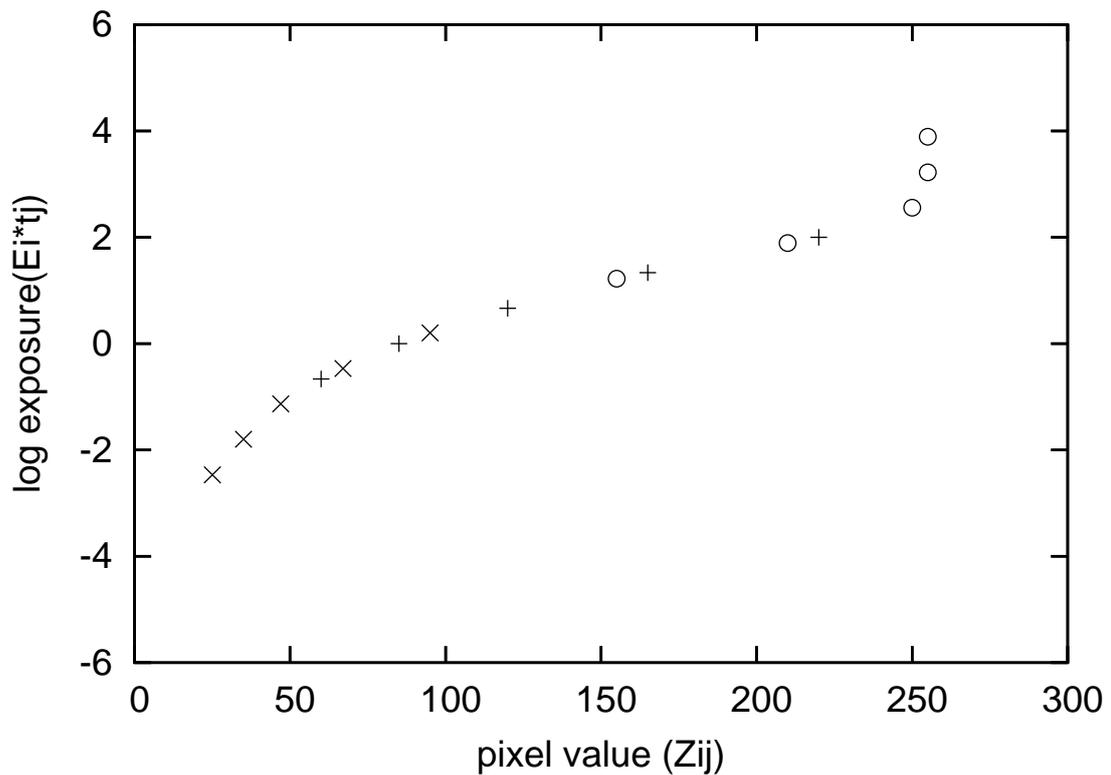


図 2-8: 正則化により滑らかな単調増加局線にフィッティングした $g(Z_{ij})$ (文献⁽¹⁹⁾ 参照)

の逆関数を取り, $f^{-1}(Z)$ を係数 a_n の N 次多項式とすると, 式 (2.19) が得られる.

$$E \cdot t = f^{-1}(Z) = \sum_{n=0}^N a_n Z^n \quad (2.19)$$

まず, 単純に2組の露出が異なる画像で考える. このとき, 露出時間を t_q, t_{q+1} とし, 露出比率 $R_{q,q+1} = t_q/t_{q+1}$ を定義すると, ある一定の画素数 p において露出比率は式 (2.20) で表わされる.

$$\frac{E_p \cdot t_q}{E_p \cdot t_{q+1}} = \frac{f^{-1}(Z_{p,q})}{f^{-1}(Z_{p,q+1})} = R_{q,q+1} \quad (2.20)$$

ここで, 画像の露出が $t_q < t_{q+1}$ と順次増加するならば, 露出比率は $0 < R_{q,q+1} < 1$ となる. 多項式により式 (2.21) を表記する.

$$\frac{\sum_{n=0}^N a_n Z_{p,q}^n}{\sum_{n=0}^N a_n Z_{p,q+1}^n} = R_{q,q+1} \quad (2.21)$$

従って, 露出比率 $R_{q,q+1}$ が既知であれば, Q 枚の露出が異なる画像から, それぞれ P 個の画素が与えられるとき, 式 (2.21) より, 残差二乗和 ε を与える誤差関数を式 (2.22) 定式化することで, 応答関数は推定できる.

$$\varepsilon = \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P \left[\sum_{n=0}^N a_n Z_{p,q}^n - R_{q,q+1} \sum_{n=0}^N a_n Z_{p,q+1}^n \right]^2 \quad (2.22)$$

さらに, 画素値を $0 \leq Z \leq 1$ に正規化し, $f(1) = Z_{max}$ とすることによって, 新たな条件式 2.23 を追加する.

$$a_N = f(1) - \sum_{n=0}^{N-1} c_n \quad (2.23)$$

応答関数の係数は, 式 (2.24) において各係数を偏微分して得られる線形方程式を解くことで決定される.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_n} = 0 \quad (2.24)$$

以上をまとめると式 (2.25) と書け, これは線形方程式であるから Gauss-Jordan 法により係数 a_n を算出できる.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P (d_{p,q,0} - d_{p,q,N})^2 & \cdots & \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P (d_{p,q,0} - d_{p,q,N})^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P (d_{p,q,N-1} - d_{p,q,N})^2 & \cdots & \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P (d_{p,q,N-1} - d_{p,q,N})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_{N-1} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P (d_{p,q,0} - d_{p,q,N}) d_{p,q,N} \\ \vdots \\ \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P (d_{p,q,N-1} - d_{p,q,N}) d_{p,q,N} \end{bmatrix} \quad (2.25) \end{aligned}$$

露出が既知である場合には, この式を解き最小の残差二乗和 ε を与える次数の多項式を応答関数とする⁽²⁰⁾.

露出推定

すべての画像に対して露出比率を正確に知ることは困難である．光永らの手法では露出が正確に分かっていない画像からでも露出の推定が可能である．uの曖昧性が役に立つ．再び2枚の画像で考える．仮に人為的に与えられた露出比率が理想的であるならば，実際の比率は与えた比率の周辺を探索することで容易に推定できる． ϵ を最小にする係数 a_n を与える R を求めれば良いだけである．

しかし，2枚以上の画像の場合には $R_{q,q+1}$ を推定するための次元は $Q-1$ となる．そこで，繰り返し処理により $R_{q,q+1}$ を推定する． $R_{q,q+1}^{(k-1)}$ を次の係数群 $a_n^{(k)}$ を求めるために利用する．さらに，これらの係数群はまた次の露出比率を求めるために使われる．これは式(2.26)として表される．

$$R_{q,q+1}^{(k)} = \sum_{p=1}^P \frac{\sum_{n=0}^N a_n^{(k)} Z_{p,q}^n}{\sum_{n=0}^N a_n^{(k)} Z_{p,q+1}^n} \quad (2.26)$$

ここで， $R_{q,q+1}^{(0)}$ は人為的に与えられる．以降，この手順を k 回繰り返し，式(2.27)を満たす $R^{(k)}$ を露出比率とする．

$$\forall M; |f^{(k)}(M) - f^{(k-1)}(M)| < \epsilon \quad (2.27)$$

ϵ には閾値として十分に小さな値を与える⁽²⁰⁾．

2.8 画像合成アルゴリズム

応答関数が推定されると各画像の画素値を照度値に変換する．それらを合成してHDRIを生成する．HDRI生成の一連の流れを図2-9に示した．ただし，合成時に，各照度値に輝度の中央値付近を強調する重みが掛け合わされる．これは，飽和した画素を破棄し，信頼性の低い画素の寄与度を下げるためである．このような加重係数が用いられる理由は，画素値は両端(0, 255付近)でノイズの影響を受け，誤差が大きい傾向があるためである．この加重を関数として表した一例を図2-10に示した^(19, 20)．

2.9 複数露出画像からのHDRI生成における問題点

従来手法では複数の画像を合成するため，露出の異なる画像に位置ずれや移動物体が存在してはならない．カメラを手で持ちブラケット撮影撮影した画像から生成したHDRIを図2-11に示した．これを見ると位置ずれによりゴーストが生じてしまっている．そのため，画像の撮影時はカメラを固定し画像のずれを防ぎ，歩行者や木の揺らぎに注意し止まったシーンを撮影しなければならない．しかし，これらを完全に防ぐのは困難である．

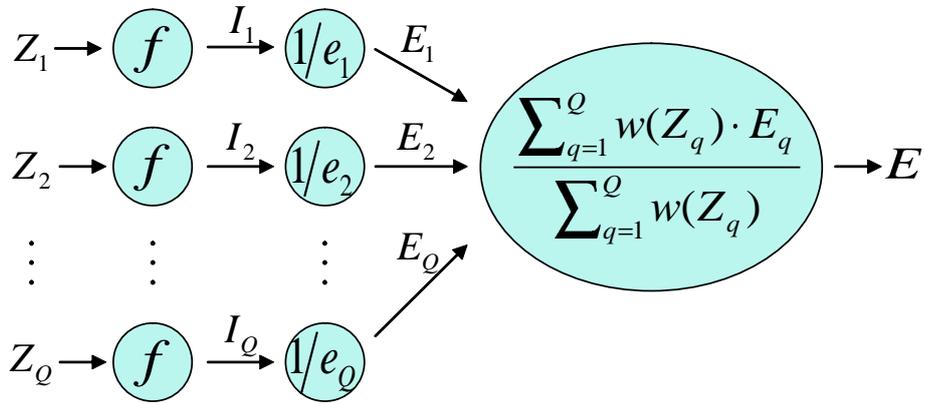


図 2-9: HDR 合成処理フロー . Q : フレーム数, Z : 画素値, f : 応答関数, I : 入射光量, e : 露出, E : 照度値, $w(Z)$: 重み関数 (文献⁽²⁰⁾ 参照)

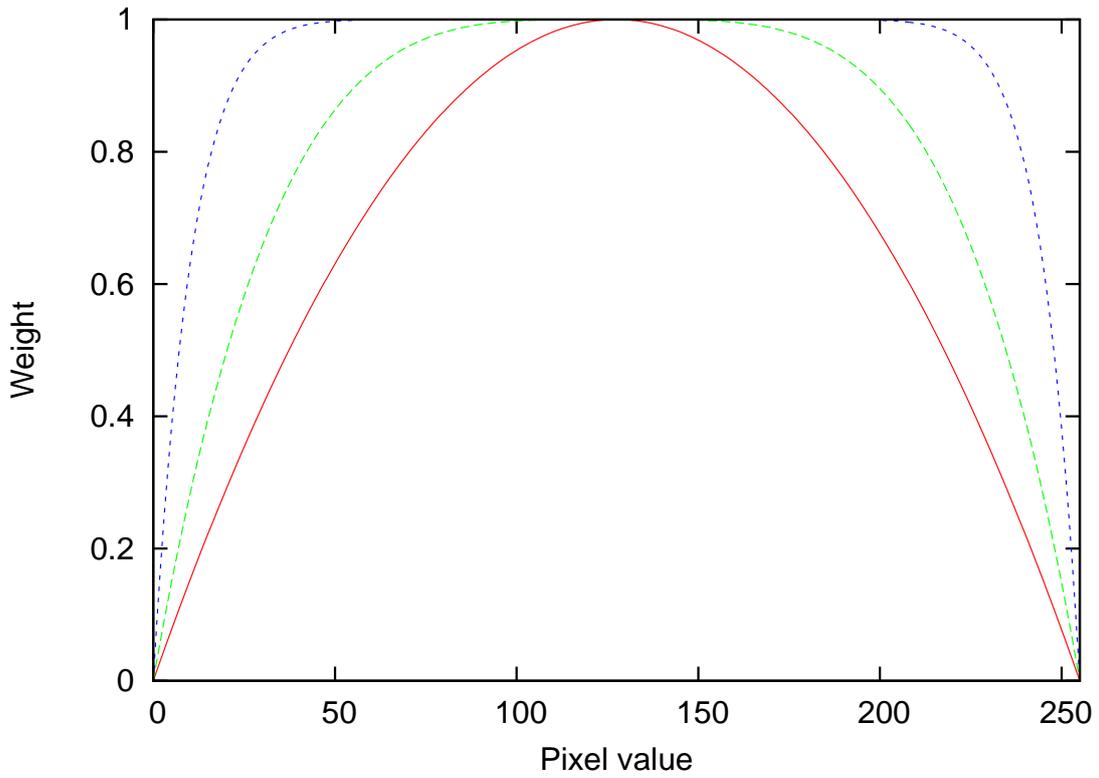


図 2-10: 加重関数の一例



図 2-11: ゴーストの発生した HDRI

2.10 従来のゴースト除去手法

2.10.1 High dynamic range video

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^(?)。この手法では、まず露出の異なる画像 ev_{-1}, ev_0, ev_1 があつたとすると、撮像の応答関数を用いて、 ev_{-1}, ev_1 の輝度を ev_0 の輝度へ正規化する。これらの画像を仮に ev'_{-1}, ev'_1 とすると、 ev'_{-1}, ev'_1 から ev_0 に対してオプティカルフローを算出する。それを元にワーピング画像 ev^w_{-1}, ev^w_1 を生成し、それらを合成して HDRI をしている。

しかし、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。

2.10.2 分散による移動物体検出

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。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 (2.28) で表わされる．

$$V(j) = \frac{\sum_{i=0}^N w(z(i, j))E(i, j)^2 / \sum_{i=0}^N w(z(i, j))}{\left(\sum_{i=0}^N w(z(i, j))E(i, j) \right)^2 / \left(\sum_{i=0}^N w(z(i, j)) \right)^2} - 1 \quad (2.28)$$

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⁽⁷⁾．

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のかも特定できない．

2.10.3 カーネル密度推定法による移動物体検出

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．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⁽²²⁾．

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．

2.11 むすび

本章では，HDR I の特徴や生成手法について述べた．まず，画像のダイナミックレンジや色調に影響を与える撮像の特性や画像処理について述べた．撮像では，光電変換特性が画像のダイナミックレンジに影響を与えている．さらに，信号処理によりダイナミックレンジや色調を人間の視覚に合うよう変換している．また，画像のダイナミックレンジを広げるために行われている研究や技術開発について述べた．その中で露出の異なる画像を合成しダイナミックレンジを拡大する技術について説明した．さらに，露出と画像の明度の関係について述べた．

次に，HDR I の特徴を述べ，その記録形式や圧縮方法を述べた．加えて，HDR I を表示機器に表示するために用いられるトーンマッピングについて述べた．さらに，露出の異なる画像を合成し HDR I を生成手法を述べた．この手法では，実世界の明度を画像の輝度へ変換する一連の処理を応答関数として推定し，それを用いて画像の輝度から実際の明度を得る．その後，露出の異なる画像を白飛びや黒潰れにより欠落した領域を補完するように合成することで，実世界の明るさを表現する HDR I を生成している．従来手法では画像の位置ずれ

や移動物体によりゴーストが発生するという問題がある．この問題に対してゴースト除去手法が提案されているがそれぞれ完全にゴーストを除去できないことを実験により確認した．

次章以降では，本章で示した HDRI の生成における問題点である位置ずれや移動物体によって生じるゴースト除去手法を提案する．

第3章

位置ずれを持つ画像からのHDRI生成手法

3.1 まえがき

本章では、カメラを手持ちで撮影した画像のように位置ずれがある画像を用いた場合でも、ゴーストのないHDRIを生成できるようにするため、位相相関法による位置ずれ補正を用いたHDRI生成手法を提案する。そこで、位相相関法とそれを用いた提案手法のアルゴリズムを述べる。さらに、実験により位置ずれ補正の精度を確認し有効性を確認し、実際に撮影した画像に対して、提案手法によりHDRIを生成し、ゴーストが低減されることを示す。

3.2 位相相関法によるHDRI生成手法

位置ずれがある画像からHDRIを生成するには、高精度な位置ずれ補正をしなければならない。加えて、HDRIの生成では露出の異なる画像を用いるため、位置ずれ補正には明度変化に対する頑健さが求められる。そこで、明度変化にロバストであり、かつ高精度な画像のマッチングが可能な位相相関法^(23, 24)により位置ずれの補正を行う⁽⁸⁾。

3.2.1 位相相関法

位相相関法とは画像をDFT(Discrete fourier transform)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DFTをそれぞれ $F(u, v), G(u, v)$ とすると式(3.1, 3.2)で表される。

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \sum_{y=0}^{N_2-1} \sum_{x=0}^{N_1-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} \\ &= |F(u, v)| e^{j\phi(u, v)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} G(u, v) &= \sum_{y=0}^{N_2-1} \sum_{x=0}^{N_1-1} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} \\ &= |G(u, v)| e^{j\psi(u, v)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

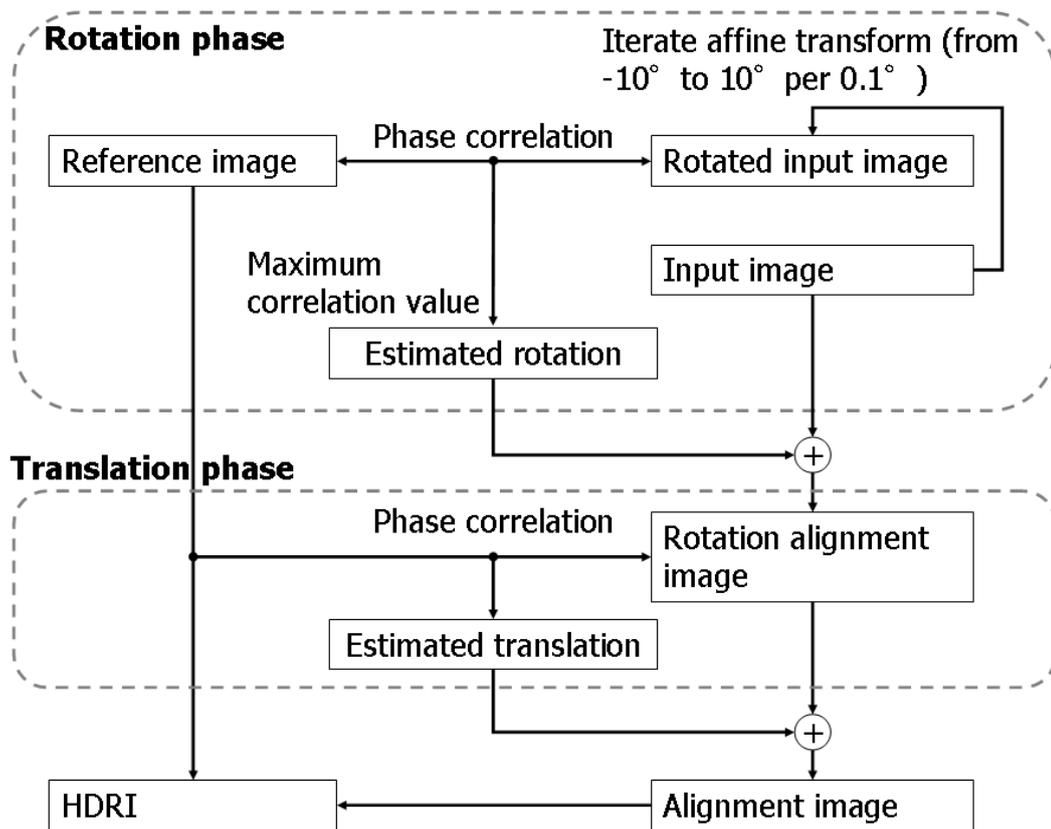


図 3-1: 位相相関法による移動, 回転量推定フロー (文献⁽⁸⁾ 参照)

$F(u, v), G(u, v)$ から位相限定相合成 $\hat{R}(u, v)$ は次式 (3.3) のように定義される.

$$\begin{aligned} \hat{R}(u, v) &= \frac{F(u, v)\overline{G(u, v)}}{|F(u, v)\overline{G(u, v)}|} \\ &= e^{j(\phi(u, v) - \psi(u, v))} \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで, $\overline{G(u, v)}$ は $G(u, v)$ の複素共役である. 位相相関関数 $\hat{r}(x, y)$ は $R(\hat{u}, v)$ を逆離散フーリエ変換することにより得られる^(23, 24).

3.2.2 提案アルゴリズム

画像の撮影時にはカメラが揺れるため, 画像に位置ずれが生じる. 本研究では, 大きな位置ずれの要因を回転と平行移動とし, 位相相関法により補正する. しかしながら, 位相相関法では平行移動量の検出しか行えない. そこで, 回転補正を行うため, 回転量を変えながら幾何変換を施した画像に対して, 位相相関法により相関値を求めていく. これを順次繰り返す, 最大の相関を持つ幾何変換画像の回転量とする. この処理フローは図 3-1 に示すようになる.

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。

さらに、この提案手法では位相相関法により得られた画像の相関値を基に画像のマッチングを行っている。そのため、相関が小さい場合、位置合わせを行っても画像に大きなずれが残っている等、異なる画像とみなすことができる。よって、相関値が小さい場合には、その画像を間引いて合成することにより、合成精度の向上が可能である⁽⁸⁾。

3.2.3 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⁽⁸⁾。

3.2.4 位置ずれ補正精度の検証実験

まず、カメラを固定して撮影した位置ずれのない露出の異なる画像に対して人為的に移動や回転を加え、その推定を行うことで精度を検証する。移動、回転を加えた画像を図3-2に示した。なお、この実験には HDRI の生成において頻繁に用いられる Debevec らが公開する画像を利用した⁽²⁵⁾。これらの画像を提案手法により補正したものを図3-3に示した。また、付加した移動・回転量と推定した結果を表3-1にまとめた。

3.3 実画像による HDRI 生成実験

実際に手でカメラ (Nikon D300) を持ち撮影した画像から提案手法により位置合わせを行い HDRI を生成する実験を行う。撮影した露出の異なる画像を図3-6に示した。提案手法により基準画像に対する各画像の回転量を推定する時の過程を図3-7に示した。この図のピークを取る回転角が推定値となる。これらを元に位置ずれ補正をした後合成した HDRI を図3-8に、位置ずれ補正なく単純に合成した HDRI を図3-9に示した。

3.4 考察

位置ずれ補正精度の検証実験により高精度な推定結果を得ることができた。回転の推定はわずかな誤差で求めることができています。また、図3-4,3-5に示した提案手法による回転補

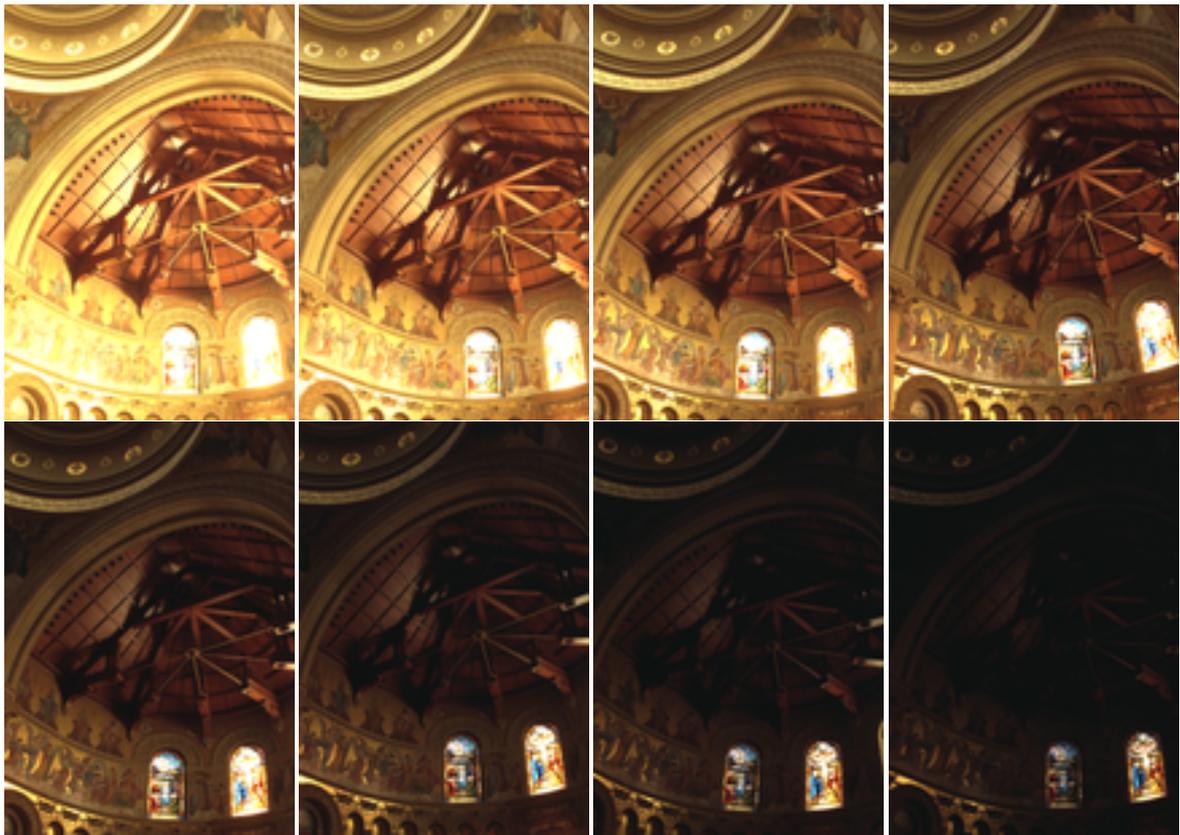


図 3-2: 精度検証実験用の露出が異なる画像シーケンス (文献^(8, 25) 参照)

正画像と位置ずれのない画像から生成した HDRI の PSNR は 40.96[dB] と位置ずれ補正後でもほぼ劣化がないと言える。

次に、実際にカメラを手で持ち撮影した画像から生成した HDRI を見ると、単純に合成した図 3-9 の HDRI では、木の茂みがぼけ、壁面の線が 2 重 3 重になっている。しかし、提案手法で位置ずれを補正した図 3-8 の HDRI は目立ったゴーストがなく、位置ずれによるゴーストは大きく低減することができたと言える。また、回転角の推定過程を示した図 3-7 を見ると、基準画像に対して露出が互いに 1 段異なる exposure -1, 1 では、1 の相関値が小さくなっている。露出変化により白飛び箇所が増えたことが原因とも考えられるが、2 段異なる exposure -2, 2 を見ると互いに近い値である上、exposure 1 よりとほぼ同等の相関値になっている。そこで、exposure 1 の画像は合成から省くほうがよいと言える。

しかし、一方で木の葉の動きや位置ずれ推定誤差、カメラの平行移動以外の動きによりゴーストがところどころ発生してしまっている。そのため、これらの影響を低減させる必要がある

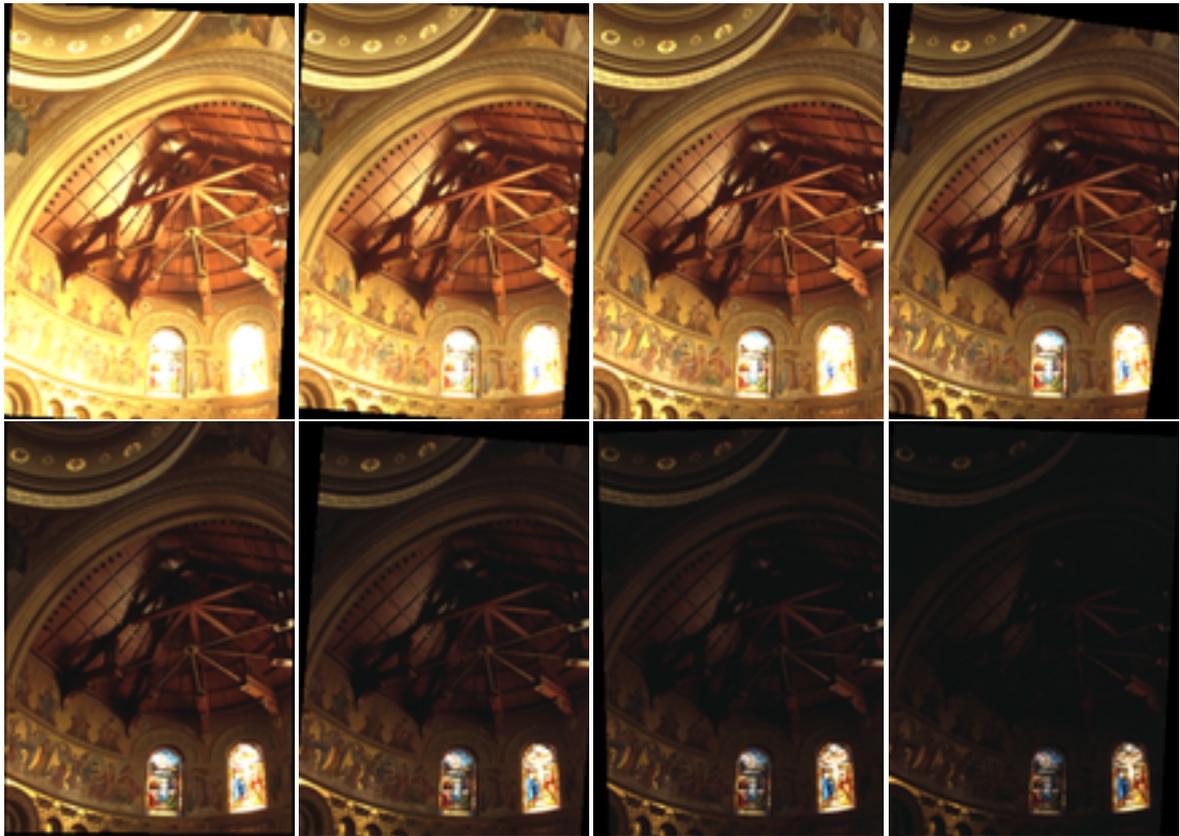


図 3-3: 位置ずれを補正した原画像シーケンス (文献^(8, 25) 参照)

表 3-1: 推定結果 (文献⁽⁸⁾ 参照)

exposure	added value			estimated value		
	rotation	x	y	rotation	x	y
3	1.1154	3	2	1.11	3	2
2	3.3345	7	0	3.34	7	0
1	1.10163	8	9	1.10	8	9
-1	1.5792	8	1	1.59	8	1
-2	4.63489	1	2	4.64	1	2
-3	3.4485	2	6	3.44	2	6
-4	2.62396	8	6	2.62	8	6

3.5 むすび

本章では、カメラを手持ちで撮影した画像のように位置ずれがある画像を用いた場合でも、ゴーストのない HDRI を生成できるようにするため、位相相関法による位置ずれ補正を用いた HDRI 生成手法を提案した。実験により位置ずれ補正の精度を確認し結果画像の評価を行い、提案手法の有効性を確認した。また、実際に撮影した画像に対して、提案手法により HDRI を生成し、ゴーストが低減されることを示した。

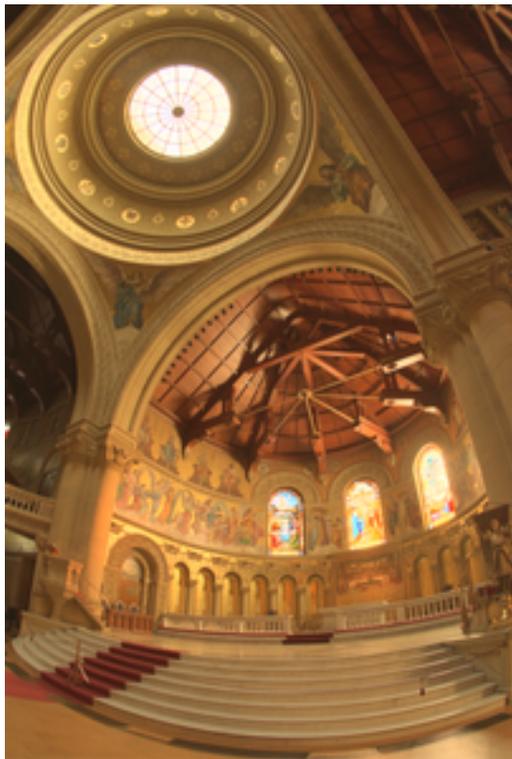


図 3-4: 提案手法を用いて位置ずれ画像から生成した HDRI(文献⁽⁸⁾ 参照)

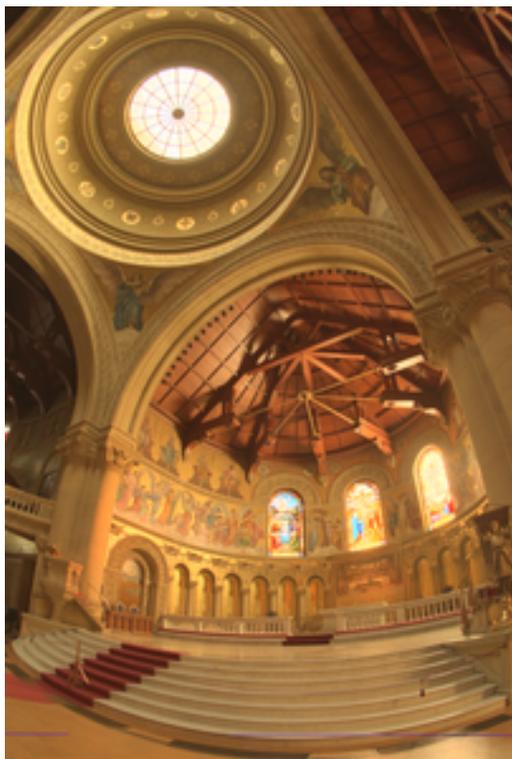


図 3-5: 固定カメラで撮影された通常の画像より生成した HDRI(文献⁽⁸⁾ 参照)



図 3-6: 手持ちのカメラで撮影した露出の異なる画像

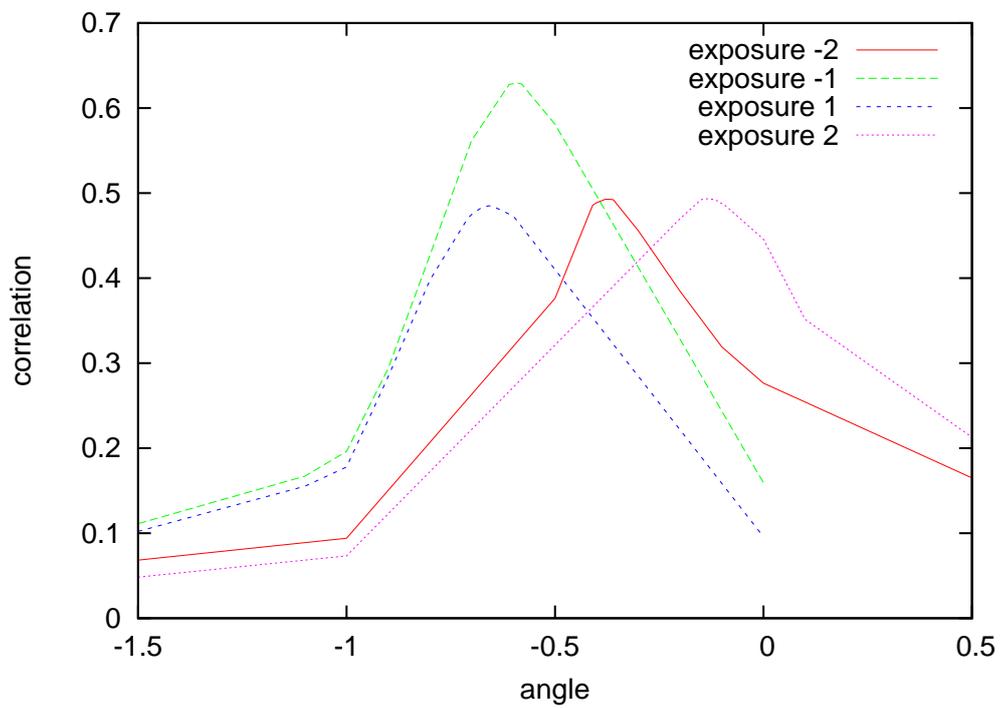


図 3-7: 回転角に対する相関値



図 3-8: 実画像を位置ずれ補正した画像より生成した HDRI



図 3-9: 撮影した実画像を単純に合成した HDRI

第4章

移動物体によるゴースト除去手法

4.1 まえがき

本章では、移動物体によって生じるゴーストを除去するため、カーネル密度推定法を応用したゴースト除去手法を提案する。まず、位置ずれのない画像に対する提案手法のゴースト除去手法アルゴリズムを述べる。そして、実験により提案手法の有効性を評価する。

次に、位置ずれと移動物体が存在する画像に対して、前章で提案した手法と組み合わせることで、本研究の目的である手持ちのカメラで撮影した画像を用いたゴーストのないHDRIの生成実験を行う。さらに、評価により提案手法の有効性を示す。

4.2 カーネル密度推定法を応用したゴースト除去

本提案では Khan らが提案したカーネル密度推定法を応用し、従来手法では効果が得られにくかった複雑背景や認識の困難な移動物体、例えば微小な動きをする木の枝葉のような常に微小に動く移動物体によるゴーストを除去する手法を提案する。カーネル密度推定法を応用するのは移動物体が存在するフレームの特定が容易であり、自動的な移動物体除去ができるからである。また、単純な歩行者のような移動物体には従来手法でも十分に有効である。

提案手法では、カーネル密度推定法の特徴を生かし、画像を背景、もしくは歩行者のような単純な移動物体のみが存在する領域と、常に動きがあるような領域に判別する。そして、後者の領域に対して1フレームを割り当て、前者の領域には従来手法を併用する。本手法で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ことで、極力ダイナミックレンジが低下する領域を抑えることができる⁽²⁶⁾。

4.2.1 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 $\hat{p}(x)$ を式 (4.1) を用いて推定できる。

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n K_h(x, x_i) \quad (4.1)$$

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 (4.2) となる。

$$K_h(x, y) = \frac{1}{h^{1/2}} K\left(\frac{(x-y)^2}{h^2}\right) \quad (4.2)$$

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 (4.3) で表わされる。

$$K(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{|x-y|^2}{h^2}\right) \quad (4.3)$$

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 の確率はガウシアンカーネルを用いて式 (4.4) から推定できる。

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{1}{|\mathbf{H}|^{1/2} (2\pi)^{d/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)^T \mathbf{H}^{-1/2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)\right) \quad (4.4)$$

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 (22, 27)。

4.2.2 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 4-1 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は高くなる。つまり、確率が高いならば、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 \mathbf{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 $N(\mathbf{x})$ とする。集合の要素となる画素は $y_{p,q,s} \in N(\mathbf{x}), (p, q, s) \neq (i, j, r), s = 1, \dots, R$ と表す。

HDRI の場合、画像群には白飛び、黒潰れした画素が多く存在するため、背景の要素からは除外する必要がある。そこで、HDRI の合成で用いるものと同様の加重関数を利用する。

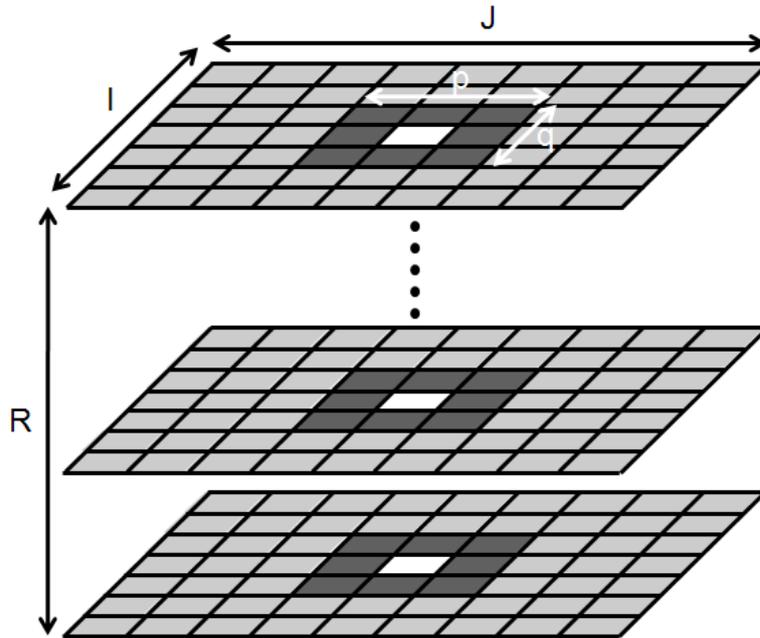


図 4-1: R 枚の露出が異なる画像配列と画素に対する周辺領域 (文献⁽²²⁾ 参照)

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 (4.5) となる.

$$\hat{p}(x|N(x)) = \frac{\sum_{p,q,s \in N(x)} w(y_{p,q,s}) K_H(x - y_{p,q,s})}{\sum_{p,q,s \in N(x)} w(y_{p,q,s})} \quad (4.5)$$

$N(x)$ の要素が背景であるならば, ガウシアンカーネルより確率 $\hat{p}(x|N(x))$ が大きくなる時 x は背景であり, 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⁽²²⁾.

4.2.3 従来手法の問題点

Khan らはある画素 x に対する周辺領域 $N(x)$ が背景であると仮定して, カーネル密度推定法を適用している. そのため, 背景の推定は基本的に全てが背景のフレームであり, その中に移動物体がたまたま写りこんでしまったような, 大多数のフレームが背景で, かつ背景と移動物体が明確に異なる場合には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. 例えば, 木の葉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, $y \in N(x)$ の要素はフレーム毎で異なる値になる. 当然ながら, カーネル関数の特性上その周辺領域と比較される画素が背景である確率 $\hat{p}(x|N(x))$ は小さくなる. しかし, この様な, 周辺領域が全体に渡り異なる場合には, 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 $p(x_r)$ も同様に小さくなる. よって, 相対的に見て同じような確

表 4-1: 周辺領域と確率, 総和の関係 (文献⁽²⁶⁾ 参照)

条件	確率	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

率をとり, 背景として認識されてしまうため, 合成した HDRI にはゴーストが発生してしまう。

4.2.4 提案アルゴリズム

従来手法の問題として周辺領域が背景でない場合にはゴーストが発生してしまう問題があげられた。そこで, 本方式では従来のカーネル密度推定法によりゴースト除去できる領域と, 常に動き変化する移動物体によりゴーストが生じる領域を識別することによってゴースト除去を行う。なお, 前者を正常領域, 後者をゴースト領域と呼ぶ。

ゴースト領域では, カーネル密度推定法により画素が背景である確率を算出したときに, 他のフレームの同位置にある画素の確率も小さくなってしまうため, 移動物体を特定できなかった。そこで, 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 4-1 の白い画素群) の確率の総和を考慮する。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画素, つまり同様な値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 4-1 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⁽²⁶⁾。

4.2.5 実験と考察

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。実験に用いたシーケンスを図 4-2, 4-3 に示した。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。

図4-2のシーケンスから従来手法と提案手法により生成したHDRIをそれぞれ図4-4, 4-5に示した。そして、ゴーストの影響が分かりやすいよう一部を拡大した画像を図4-6, 4-7に示した。さらに、図4-8は図4-6, 4-7の周波数特性を示したものである。また、図4-3のシーケンスからも同様に従来手法と提案手法によりHDRIを生成し、一部を拡大したHDRIとその周波数特性を合わせて図4-9から4-13に示した。

図4-6, 4-7, 4-11, 4-12に示したHDRIの局所拡大した画像を見ると従来手法により生成したHDRIでは木の葉がぼけているが、提案手法では先鋭な画像を生成することができた。

さらに、図4-8, 4-13に示した周波数特性を見ると、提案手法のほうが高周波成分が強く、画像として先鋭であると分かる。

4.3 位置ずれと移動物体によるゴースト除去

第3章と本章の提案手法を組み合わせ、位置ずれと移動物体両方が存在する場合のゴースト除去を行う。まず、位相相関法により画像の位置ずれを補正する。その後、画像の輝度を正規化し、カーネル密度推定法によりゴースト領域の除去を行う。提案手法の流れを図4-14に示した。

4.3.1 実験

元となる露出の異なる画像には、前章で用いた図3-6を利用する。位置ずれ補正のみで生成した図3-8のHDRIには、木の茂みにゴーストによるぼけが生じる問題があった。

そこで、ぼけが目立っていた木の茂みがある領域を中心に本提案により生成したHDRIを図4-15に示した。比較のため、Khanらの手法を組み込んで生成したHDRIを図4-16に示した。また、図4-15, 4-16のHDRIから木の茂みの領域を切り出し図4-17, 4-18に示した。さらに、ゴーストの影響が分かりやすいよう、さらに局所的に抜粋したものを図4-20, 4-21に示した。

4.3.2 考察

まず、図4-17, 4-18, そしてその領域の一部をさらに拡大した図4-20, 4-21から従来手法ではゴーストが生じぼけている木の茂みの領域が提案手法では、先鋭な画像を生成できたことが分かる。さらに、図4-17, 4-18の周波数特性を示した図4-19を見ると、提案手法によるHDRIのほうが高周波成分が強く、先鋭な画像であることが確認できた。

次に、図4-20, 4-21から、従来手法では旗が揺らぎ変化していたためゴーストになっていたところが、提案手法ではゴーストが除去でき、一枚の旗として写っている。

4.4 むすび

移動物体によって生じるゴーストを除去するため、カーネル密度推定法を応用したゴースト除去手法を提案した。まず、位置ずれのない画像に対するゴースト除去手法を述べた。実験により従来手法ではゴーストによりぼけていた領域が、提案手法では先鋭になることを確認し、有効性を評価した。

次に、位置ずれと移動物体が存在する画像に対して、前章で提案した手法と組み合わせることで、本研究の目的である手持ちのカメラで撮影した画像を用いたゴーストのないHDRIの生成実験を行った。さらに、提案手法の有効性を評価した。



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 4-2: 移動物体が存在する露出の異なる画像シーケンス 1(文献⁽²⁶⁾ 参照)



シャッター速度: 1/2000, 絞り: 3.5



シャッター速度: 1/1000, 絞り: 3.5



シャッター速度: 1/500, 絞り: 3.5



シャッター速度: 1/250, 絞り: 3.5

図 4-3: 移動物体が存在する露出の異なる画像シーケンス 2



図 4-4: シーケンス 1 から従来手法により生成した HDRI(文献⁽²⁶⁾ 参照)



図 4-5: シーケンス 1 から提案手法により生成した HDRI(文献⁽²⁶⁾ 参照)



図 4-6: 図 4-4 から局所的に抜粋した HDRI 図 4-7: 図 4-5 から局所的に抜粋した HDRI

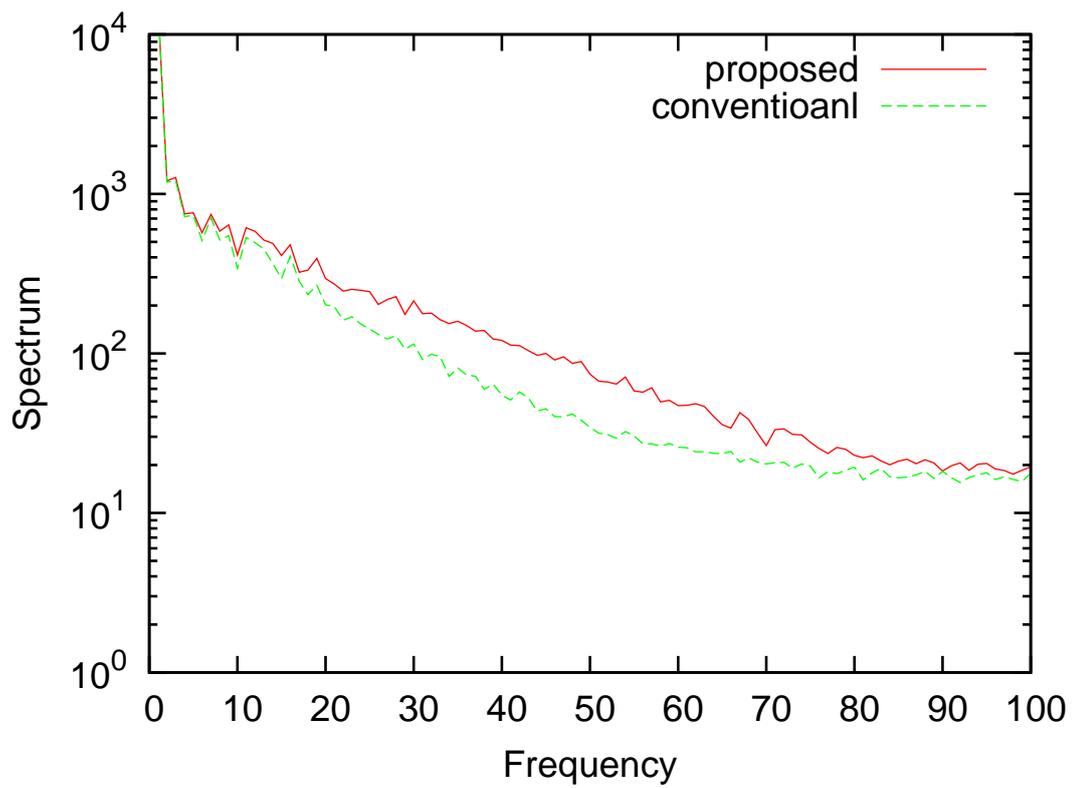


図 4-8: 図 4-7 と図 4-6 の周波数特性



図 4-9: シーケンス 2 から従来手法により生成した HDRI



図 4-10: シーケンス 2 から提案手法により生成した HDRI

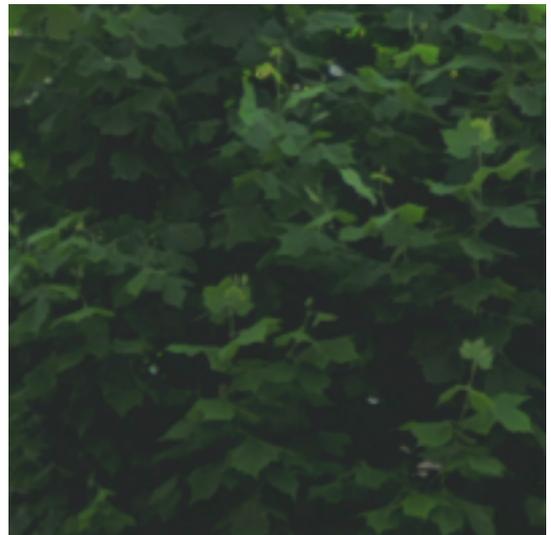
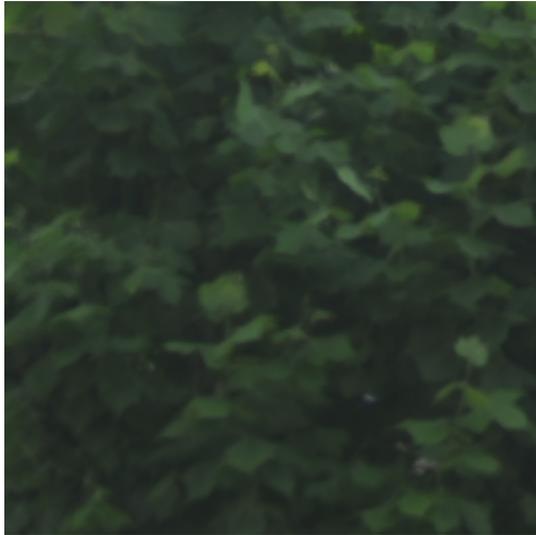


図 4-11: 図 4-9 から局所的に抜粋した HDRI

図 4-12: 図 4-10 から局所的に抜粋した HDRI

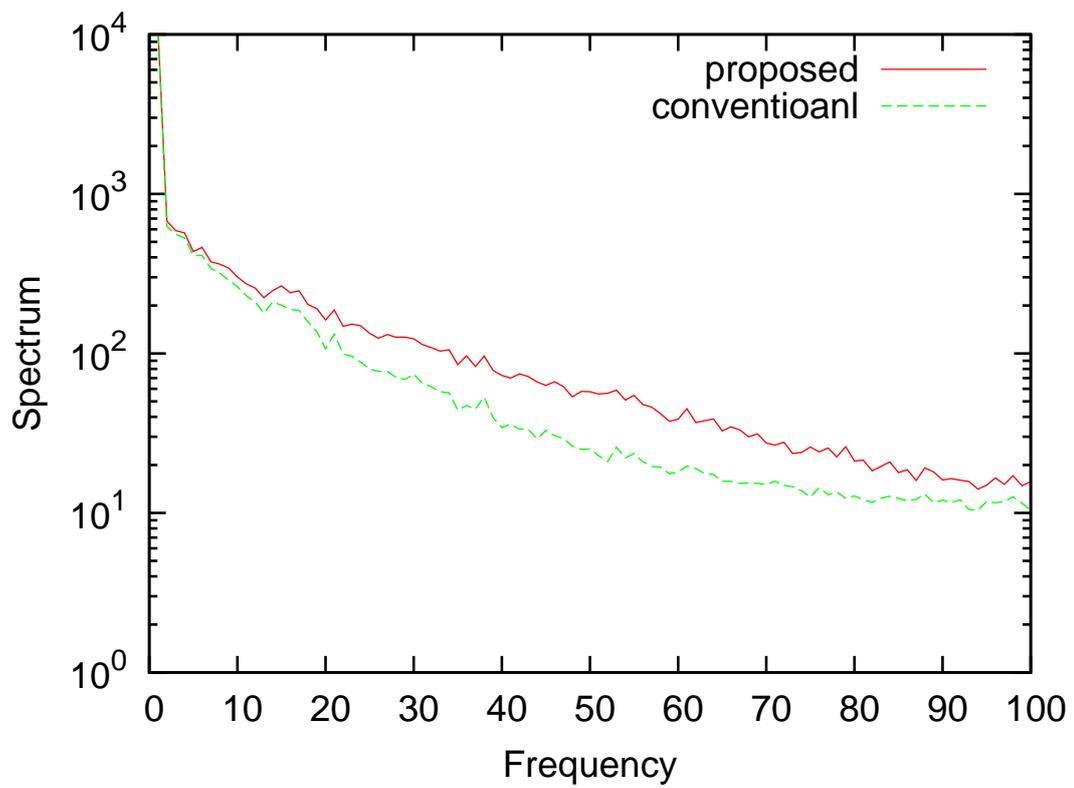


図 4-13: 図 4-12 と図 4-11 の周波数特性

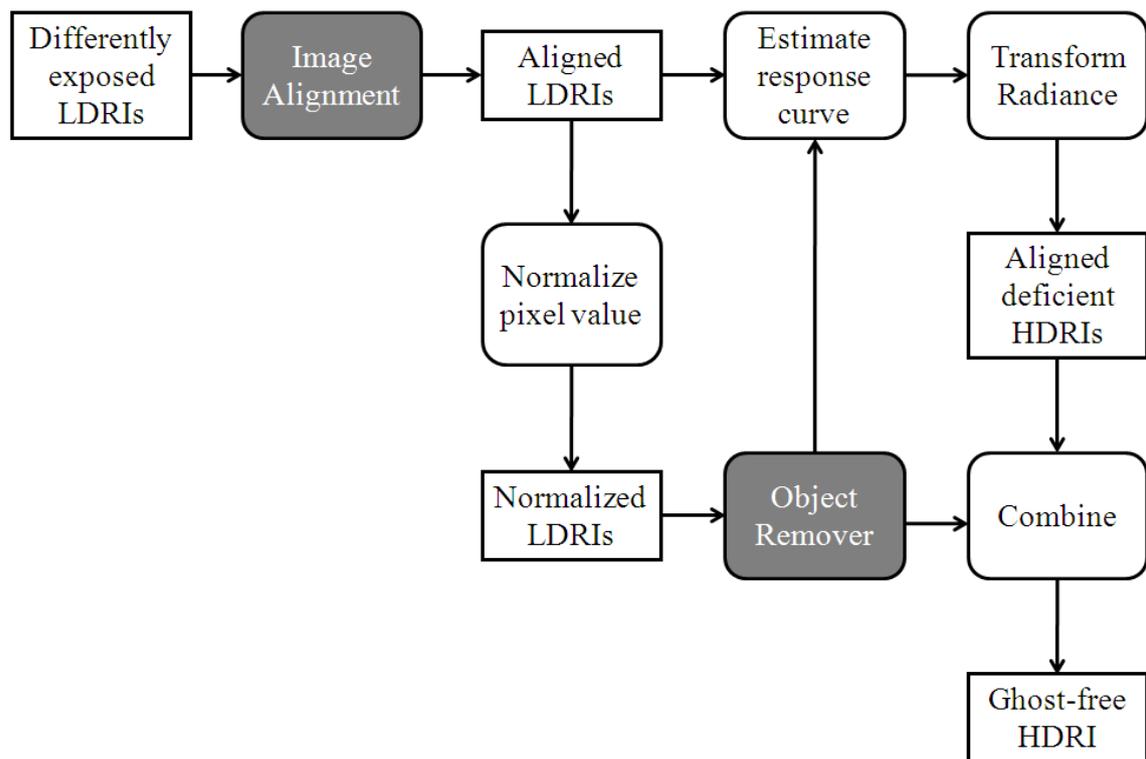


図 4-14: 位置ずれ, 移動物体によるゴースト除去手法



図 4-15: 図 3-6 から提案手法により生成した HDRI



図 4-16: 図 3-6 から従来手法により生成した HDRI



図 4-17: 図 4-15 より木の茂みの領域を抜粋した HDRI(文献⁽²⁶⁾) 参照



図 4-18: 図 4-16 より木の茂みの領域を抜粋した HDRI(文献⁽²⁶⁾) 参照

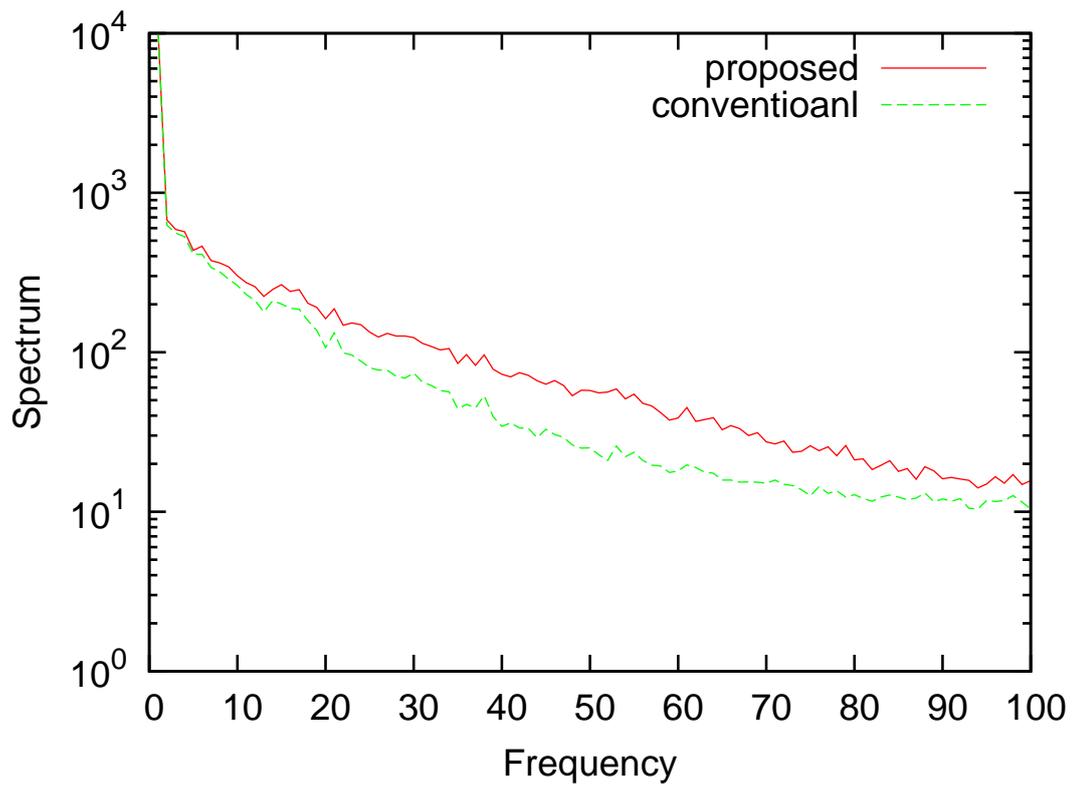


図 4-19: 図 4-17 と 4-18 の周波数特性



図 4-20: 図 4-15 より局所的に抜粋した提案の HDRI

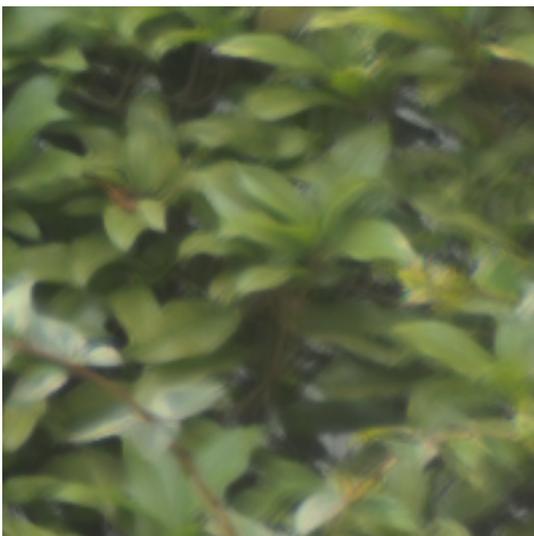


図 4-21: 図 4-16 より局所的に抜粋した提案の HDRI

第5章

結論

本章では本論文を総括し、今後の検討課題を述べる。

5.1 総括

本研究では、HDRIの生成を容易にするため、位置ずれや移動物体が存在する画像からのHDRI生成手法の検討を行った。露出の異なる画像からHDRIを生成する手法が従来提案されてきたが、この手法ではカメラが動くことによる画像の位置ずれや、被写体の移動や変化によりゴーストが生じる問題があった。そのため、HDRIを生成するためには、元の画像を得るときにカメラを固定し、静的な被写体を移さなければならず、限られた条件下でしかHDRIを生成できなかった。そこで、本研究では、位置ずれや移動物体がある画像からでも、HDRIを生成できるようにすることを目的とした。

本研究ではゴーストの大きな要因を位置ずれと移動物体とし、これらによるゴーストを除去するため、まず、位相相関法を用いた位置ずれ画像に対するHDRI生成手法を提案した。実験により位置ずれを回転、平行移動としたとき明度変化のある画像に対して位相相関法により高精度な補正ができ、生成したHDRIからゴーストを除去できることを示した。

次に、カーネル密度推定法を応用した移動物体除去手法を提案し、従来手法では微小な動きでぼけてしまうようなゴーストの除去を行った。実験により提案手法では、より先鋭なHDRIが生成できることを確認した。さらに、実際にカメラを手で持ち撮影した画像に対して両提案手法を組み合わせることで自然画像に対してゴーストのないHDRIを生成できることを示した。

第1章では本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第2章ではHDRIの特徴や生成手法について述べた。まず、画像のダイナミックレンジや色調に影響を与える撮像の特性や画像処理について述べた。撮像では、光電変換特性が画像のダイナミックレンジに影響を与えている。さらに、信号処理によりダイナミックレンジや色調を人間の視覚に合うよう変換している。また、画像のダイナミックレンジを広げるために行われている研究や技術開発について述べた。その中で露出の異なる画像を合成しダイナミックレンジを拡大する技術について説明した。さらに、露出と画像の明度の関係について述べた。

次に、HDRIの特徴を述べ、その記録形式や圧縮方法を述べた。加えて、HDRIを表示機器に表示するために用いられるトーンマッピングについて述べた。さらに、露出の異なる画像を合成しHDRIを生成手法を述べた。この手法では、実世界の明度を画像の輝度へ変換する一連の処理を応答関数として推定し、それを用いて画像の輝度から実際の明度を得る。その後、露出の異なる画像を白飛びや黒潰れにより欠落した領域を補完するように合成することで、実世界の明るさを表現するHDRIを生成している。従来手法では画像の位置ずれや移動物体によりゴーストが発生するという問題がある。この問題に対してゴースト除去手法が提案されているがそれぞれ完全にゴーストを除去できないことを実験により確認した。

さらに、従来手法では画像の位置ずれや移動物体によりゴーストが発生するという問題がある。この問題に対してゴースト除去手法が提案されているがそれぞれ完全にゴーストを除去できないことを実験により確認した。

第3章ではカメラを手持ちで撮影した画像のように位置ずれがある画像を用いた場合でも、ゴーストのないHDRIを生成できるようにするため、位相相関法による位置ずれ補正を用いたHDRI生成手法を提案した。実験により位置ずれ補正の精度を確認し結果画像の評価を行い、提案手法の有効性を確認した。また、実際に撮影した画像に対して、提案手法によりHDRIを生成し、ゴーストが低減されることを示した。

第4章では移動物体によって生じるゴーストを除去するため、カーネル密度推定法を応用したゴースト除去手法を提案した。まず、位置ずれのない画像に対するゴースト除去手法を述べた。実験により従来手法ではゴーストによりぼけていた領域が、提案手法では先鋭になることを確認し、有効性を評価した。

次に、位置ずれと移動物体が存在する画像に対して、前章で提案した手法と組み合わせることで、本研究の目的である手持ちのカメラで撮影した画像を用いたゴーストのないHDRIの生成実験を行った。さらに、提案手法の有効性を評価した。

第5章は結論であり、本論文の総括および今後の課題について述べている。

5.2 今後の課題

今後検討すべき課題を以下に示す。

5.2.1 位相相関法による位置ずれ補正の高速化の検討

本研究では位相相関法により画像の位置ずれ補正を行っているが、回転量の推定のため繰り返しDFTを行っている。そのため、膨大な演算を必要となっている。演算量を減らすために、位相相関法を用いた回転量の推定として、回転不変位相相関法を利用すると良いと考えられる⁽²⁸⁾。この手法では、2度のDFTで回転量と移動量を推定が可能であり、実際に用いることが出来れば演算量を大きく減らすことが可能である。

5.2.2 領域分割による最適フレーム割当て手法の検討

移動物体によるゴースト除去手法では、カーネル密度推定法により移動物体を除去できる領域と除去できない領域に分け、前者には従来手法と同様に、画素が背景である確率を算出し、それを加重することで移動物体を除去した。後者に対しては1フレームを割り当てることでゴースト除去を行った。

本研究では、ある1フレームをどの領域に対しても割り当てたが、これでは白飛びや黒津ぶれが含まれる領域もあり最適とは言えない。そこで原画像を領域分割し、領域ごとに最も白飛び、黒津ぶれが少ない領域を割り当てるようにすることでダイナミックレンジの低下を防ぐことができると考えられる。

5.2.3 背景差分による移動物体除去手法の検討

カーネル密度推定法による移動物体除去手法は、単純な移動物体除去には有効であるが、一部効果が薄い対象がある。仮に歩行者を除去する場合、背景と歩行者の輝度や色が似ていたり、背景が黒や白で合成加重が小さい場合、歩行者も背景と見なされてしまい、ゴーストになってしまう。図5-1に一例を示した。

そこで、このような単純であるがカーネル密度推定法では効果の薄い対象において、背景差分による除去が有効であると考えられる。単純な背景差分で移動物体を除去し生成したHDRIを図5-2に示した。このHDRIでは、歩行者のゴーストは大きく低減されている。しかし、逆に色調が崩れてしまうという問題や歩行者と背景のエッジ付近がゴーストとなるという問題が見られる。よって、これらの問題を解決することができれば、背景差分はゴースト除去として有効であると思われる。



図 5-1: カーネル密度推定法で除去できないゴースト



図 5-2: 背景差分により移動物体除去した HDRI

謝辞

本研究の機会及び素晴らしい実験環境を与えて下さり、貴重な時間を割いて研究の方向性を御指導頂きました渡辺 裕 教授に心から感謝致します。

また、学部時の指導教授であり、研究の方向性について数々の有意義な御意見、御助言を賜りました早稲田大学国際情報通信研究科 富永 英義教授に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、日頃から惜しみなく御指導して頂き、貴重な御意見、様々な御提案を頂きました石川 孝明氏、河村 圭氏、石井 大祐氏に心から感謝致します。

貴重な御意見、様々な御提案を頂いた渡辺研究室の皆様に御礼申し上げます。特に学部時代からの同級生とともに励ましあった谷 誠一氏に心感謝致します。

学部時より御世話になりました富永研究室の皆様に、御礼申し上げます。特に、3年間公私にわたり、共に頑張ってきた大谷 佳裕氏に感謝致します。

最後に、私をここまで育てて下さった家族に深く感謝します。

平成 20 年 2 月 5 日

参考文献

- (1) “DMX-HD1010 Xacti,” http://www.sanyo-dsc.com/products/lineup/dmx_hd1010/index.html
- (2) “XEL-1,” <http://www.sony.jp/products/Consumer/oel/>
- (3) H. Seetzen, W. Heidrich, W. Stuerzlinger, G. Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, A. Vorozcovs, “High Dynamic Range Display Systems,” ACM Transactions on Graphics(Siggraph 2004), Aug, 2004.
- (4) H. Seetzen, L. Whitehead, G. Ward, “A High Dynamic Range Display Using Low and High Resolution Modulators,” Society for Information Display(SID) Digest, 2003.
- (5) 田中 正行, 奥富 正敏, “組合せ画素混合を利用した超解像処理,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.8, pp.1948-1956, Aug. 2007.
- (6) 千葉 直樹, 蚊野 浩, 美濃 導彦, 安田 昌司, “画像特徴に基づくイメージモザイク,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1581-1589, 1999.
- (7) E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. E. Debevec, “High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting,” Morgan Kaufmann, Dec. 2005.
- (8) 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,” IPSJ-AVM, No.125, pp.101-104, Dec. 2007.
- (9) “Examples of tone mapped HDR images and Exposure Blending,” <http://www.hdrsoft.com/examples.html>.
- (10) 竹村 裕夫, “CCD・CMOS カメラ技術入門,” コロナ社, Apr. 2008.
- (11) 佐藤 一睦, 片桐 哲也, 掃部 幸一, 芹田 保明, “広ダイナミックレンジ画像の高コントラスト化画像処理,” KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT Vol.4, 2007.
- (12) 奥田 正浩 (2007), “カメラの F 値について,” http://vig.is.env.kitakyu-u.ac.jp/Japanese/tutorial/camera_F.html.
- (13) T. Yamada, S. Kasuga, T. Murata, Y. Kato, “A 140dB-Dynamic-Range MOS Image Sensor with In-Pixel Multiple-Exposure Synthesis,” ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.50-51,594, Feb. 2008.
- (14) “Radiance,” <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>
- (15) “OpenEXR,” <http://www.openexr.com>
- (16) E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, J. Ferwerda, “Photographic tone reproduction for digital images,” in ACM Transactions on Graphics, vol.21, pp.267-276, 2002.

- (17) G. Ward, M. Simmons, “JPEG-HDR: A backwards-compatible, high dynamic range extension to JPEG,” Proc. Thirteenth Color Imaging Conference, Nov. 2005.
- (18) R. Xu, S.N. Pattanaik, C.E. Hughes, “High-dynamic-range still-image encoding in JPEG 2000,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol.25, no.6, pp.5–64, 2005.
- (19) P.E. Debevec, J. Malik, “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,” Proc. Siggraph, vol.31, pp.369–378, Aug. 1997.
- (20) T. Mitsunaga, S. K. Nayar, “Radiometric Self Calibration,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), Vol.1, pp.374-380, Jun. 1999.
- (21) 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.
- (22) E. Khan, O. Akyuz, E. Reinhard, “Ghost Removal in High Dynamic Range Images,” Proc. IEEE Conf. Image Processing (ICIP), pp.2005-2008, Oct, 2006.
- (23) 青木 孝文, 伊藤 康一, 本間 尚文, “位相情報に基づく画像マッチング技術とその応用展開 —3D ビジョンからバイオメトリクスまで—,” 電子情報通信学会誌, Vol. 90, No. 8, pp. 680–685, Aug. 2007.
- (24) 青木 孝文, 伊藤 康一, 柴原 琢磨, 長嶋 聖, “位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン - ピクセル分解能の壁を越える画像センシング技術を目指して - ,” IEICE Fundamentals Review, Vol. 1, No. 1, pp. 30–40, Jul. 2007.
- (25) ”Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,” <http://www.debevec.org/HDR/>
- (26) 高木 鉄平, 渡辺 裕, “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,” IPSJ-AVM, No.128, pp.9-14, Sep. 2008.
- (27) A. Elgammal, R. Duraiswami, D. Harwood, L. S. Davis, “Background and Fore-ground Modeling Using Nonparametric Kernel Density Estimation for Visual Surveillance,” Proc. IEEE., Vol.90, No.7, Jul. 2002.
- (28) 佐々木 宏, 小林 孝次, 青木 孝文, 川又 政征, 樋口 龍雄, “回転不変位相限定相関による画像の回転角度計測について,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol.22, No.45, pp.55-60, 1998.

図一覧

1-1	実世界と撮像のダイナミックレンジ (文献 ⁽⁸⁾ 参照)	2
1-2	露出の異なる画像による HDRI の生成 (文献 ⁽⁹⁾ 参照)	3
2-1	撮像デバイスの構造 (文献 ⁽¹⁰⁾ 参照)	6
2-2	光電変換特性 (文献 ⁽¹⁰⁾ 参照)	7
2-3	γ 特性	8
2-4	Radiance RGBE のフォーマット構造例	11
2-5	HDR subband encoding pipeline(文献 ⁽¹⁷⁾ 参照)	13
2-6	複数画像によるダイナミックレンジの補完	14
2-7	露出が異なる画像の画素値 Z_{ij} から式 (2.16) により導出される $g(Z_{ij})$ (文献 ⁽¹⁹⁾ 参照)	16
2-8	正則化により滑らかな単調増加局線にフィッティングした $g(Z_{ij})$ (文献 ⁽¹⁹⁾ 参照)	16
2-9	HDRI 合成処理フロー . 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 (文献 ⁽²⁰⁾ 参照)	19
2-10	加重関数の一例	19
2-11	ゴーストの発生した HDRI	20
3-1	位相相関法による移動, 回転量推定フロー (文献 ⁽⁸⁾ 参照)	24
3-2	精度検証実験用の露出が異なる画像シーケンス (文献 ^(8, 25) 参照)	26
3-3	位置ずれを補正した原画像シーケンス (文献 ^(8, 25) 参照)	27
3-4	提案手法を用いて位置ずれ画像から生成した HDRI(文献 ⁽⁸⁾ 参照)	29
3-5	固定カメラで撮影された通常の画像より生成した HDRI(文献 ⁽⁸⁾ 参照)	29
3-6	手持ちのカメラで撮影した露出の異なる画像	30
3-7	回転角に対する相関値	30
3-8	実画像を位置ずれ補正した画像より生成した HDRI	31
3-9	撮影した実画像を単純に合成した HDRI	31
4-1	R 枚の露出が異なる画像配列と画素に対する周辺領域 (文献 ⁽²²⁾ 参照)	34
4-2	移動物体が存在する露出の異なる画像シーケンス 1(文献 ⁽²⁶⁾ 参照)	38
4-3	移動物体が存在する露出の異なる画像シーケンス 2	39
4-4	シーケンス 1 から従来手法により生成した HDRI(文献 ⁽²⁶⁾ 参照)	40
4-5	シーケンス 1 から提案手法により生成した HDRI(文献 ⁽²⁶⁾ 参照)	40
4-6	図 4-4 から局所的に抜粋した HDRI	41

4-7	図 4-5 から局所的に抜粋した HDRI	41
4-8	図 4-7 と図 4-6 の周波数特性	41
4-9	シーケンス 2 から従来手法により生成した HDRI	42
4-10	シーケンス 2 から提案手法により生成した HDRI	42
4-11	図 4-9 から局所的に抜粋した HDRI	43
4-12	図 4-10 から局所的に抜粋した HDRI	43
4-13	図 4-12 と図 4-11 の周波数特性	43
4-14	位置ずれ, 移動物体によるゴースト除去手法	44
4-15	図 3-6 から提案手法により生成した HDRI	45
4-16	図 3-6 から従来手法により生成した HDRI	45
4-17	図 4-15 より木の茂みの領域を抜粋した HDRI(文献 ⁽²⁶⁾ 参照)	46
4-18	図 4-16 より木の茂みの領域を抜粋した HDRI(文献 ⁽²⁶⁾ 参照)	46
4-19	図 4-17 と 4-18 の周波数特性	47
4-20	図 4-15 より局所的に抜粋した提案の HDRI	48
4-21	図 4-16 より局所的に抜粋した提案の HDRI	48
5-1	カーネル密度推定法で除去できないゴースト	52
5-2	背景差分により移動物体除去した HDRI	52

表一覧

1-1 Luminance levels for some lighting environments(文献 ⁽⁷⁾ 参照)	2
2-1 高ダイナミックレンジ化技術(文献 ⁽¹⁰⁾ 参照)	9
2-2 HDR Format	10
3-1 推定結果(文献 ⁽⁸⁾ 参照)	27
4-1 周辺領域と確率，総和の関係(文献 ⁽²⁶⁾ 参照)	35

研究業績

	題 名	発表年月	発表掲載誌	連名者
国内				
(1)	複数画像によるダイナミックレンジ向上に関する検討	2007年3月	IEICE General Conf., D-11-67	高木 鉄平 河村 圭 渡辺 裕 富永 英義
(2)	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	2007年12月	IPSJ-AVM, 59-17	高木 鉄平 渡辺 裕
(3)	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	2008年9月	IPSJ-AVM, 62-3	高木 鉄平 渡辺 裕
(3)	高ダイナミックレンジ画像生成におけるゴースト除去手法に関する検討	2009年3月	IEICE General Conf., D-11-51	高木 鉄平 渡辺 裕