

コンピュータ工学特別研究報告書

題目 ハイダイナミックレンジ画像の生成に関する

基礎的な検討

学生証番号 9 4 7 5 1 4

氏名 山崎 恭幸

提出日 平成25年 2月 5日

指導教員 蚊野 浩

京都産業大学
コンピュータ工学部

要約

ハイダイナミックレンジ画像は、通常の写真技法で取得する画像に比べて格段に広いダイナミックレンジを表現した画像である。本論文では露光量を変えて撮影した、ダイナミックレンジが小さい一組の画像から、ハイダイナミックレンジ画像を生成する基本的な手法について研究した。まず、既知の反射率を持つ濃淡パターンを撮影し、それらの輝度とデジタルカメラの出力値の関係を調べた。その結果、ガンマ補正 ($\gamma=2.2$) の関係にあることを確認した。次に、複数のローダイナミックレンジ画像を用いて、2枚ごとに露光量を補正する階調変換を求めた。それを全画像に順次適用し合成することでハイダイナミックレンジ画像を生成する順次階調変換法を提案した。最後に順次階調変換法で生成されるハイダイナミックレンジ画像を、Matlab に実装されているハイダイナミックレンジ画像を生成する関数 `makehdr` の出力と比較することで、ノイズの量が軽減されるということが明らかになった。それは、階調変換後の画像にノイズが発生していても、複数枚の画像を平均化するので、合成画像にはノイズが発生しにくいと考えた。

目次

1. 序論
2. 写真画像の取得とダイナミックレンジ
 2. 1 デジタルカメラによるシーンの撮影
 2. 2 カメラの撮影パラメータ
 2. 3 シーンのダイナミックレンジ
 2. 4 ハイダイナミックレンジ画像の定義
3. デジタルカメラの基本的な入出力特性
 3. 1 ガンマ補正
 3. 2 ガンマ補正の確認
4. 従来のハイダイナミックレンジ画像の生成手法
 4. 1 Debevec の自動校正法
 4. 2 Matlab の makehdr 関数を使ったハイダイナミックレンジ画像の生成
5. 順次階調変換法によるハイダイナミックレンジ画像の生成
 5. 1 異なる露光量で撮影した画像間の画素値の関係
 5. 2 異なる露光量で撮影した画像間の濃淡変換
 5. 3 露光量の異なる複数枚の画像の合成
6. makehdr 関数と順次階調変換法の比較
 6. 1 ハイダイナミックレンジ生成画像の比較
7. 結論

参考文献

謝辞

付録

1. 序論

カラー画像は、コンピュータで画像を扱う最小の単位である画素（ピクセル (pixel)）に色情報を与えることで表現する。例えば、写真画像を 1280×960 画素でサンプリングすると、合計約 123 万画素になる。各画素の色情報は、RGB3 原色で表すことが一般である。RGB 各色が 1 ビットで 2 つの濃淡レベルを表すとき、8 ($=2 \times 2 \times 2$) 色まで表現できる。一般のデジタルカメラで撮影した出力画像は、RGB 各色が 8 ビット、256 の濃淡レベルで表し、約 1678 万色を表現することができる。

ハイダイナミックレンジ画像は、画素値が表現する明暗の範囲が、一般のデジタルカメラで撮影した画像よりも格段に広い画像である。デジタルカメラは人間の目よりも明暗を表現できる範囲が狭い。そのため、撮影した画像に白飛びや黒潰れを起こしてしまうことがある。ハイダイナミックレンジ画像を用いることで、それを軽減することができる。

ハイダイナミックレンジ画像は、車載カメラ（ドライブレコーダー）、医療用画像など、様々なシーンで活用されている。

ドライブレコーダーは、交通事故の状況を記録するために自動車に設置される装置である。衝突事故の前後における自動車の挙動を判断するために利用される。ドライブレコーダーは、晴天時や夜間などあらゆる環境に対応する必要がある。例えば、トンネル走行中の撮影において、ダイナミックレンジが低いセンサを用いると、露光を合わせる場所によって、トンネルの外部が白飛びし、内部が黒潰れをおこしやすい。ハイダイナミックレンジ画像を活用することで、このような現象が軽減される。

医療分野では、ダイナミックレンジが広い X 線写真が活用されている。医療用画像は DICOM フォーマットを使っている。これは、JPEG フォーマットの 8 ビットを上回る、14~16 ビットで 1 画素を表現する。これによって病巣の微妙な濃淡変化を観察することが可能になり、疾病の診断を容易にしている。このように、ハイダイナミックレンジ画像は幅広く活用されており、私たちの生活の中では欠かせない技術である [1]。

2. 写真画像の取得とダイナミックレンジ

ハイダイナミックレンジ画像の研究を行うにあたって、カメラの性質やハイダイナミックレンジ画像の定義などを述べる。

2. 1 デジタルカメラによるシーンの撮影

図 2.1 で示すように、デジタルカメラはレンズから入射した光を撮像素子で受光する。撮像素子表面に形成される光像が縦横にサンプリングされ、光電変換、A/D 変換を受けることで、生画像が生成される。生のデジタル画像が内部処理によって最終的な画像データとなり、メモリーカードに記録される。同時に液晶モニターに表示して画像を見ることができる。

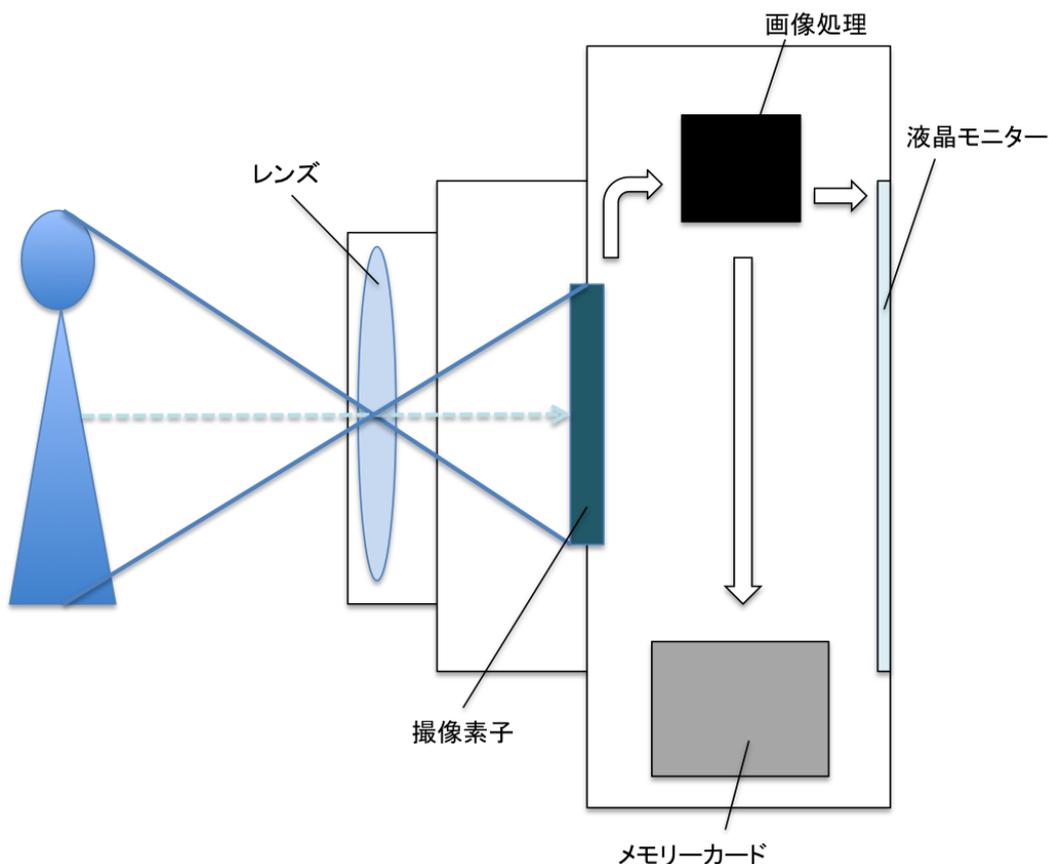


図 2.1 デジタルカメラによる被写体の撮影と画像データの生成

被写体の表面から発した光は、レンズによって集光されて像を形成する。図 2.2 を用いて、レンズの特徴を述べる。

- ① レンズ光軸に平行な光線がレンズを通過すると、焦点で光軸と交わる。
- ② 焦点で光軸と交わる光線がレンズを通過すると、光軸と平行になる。
- ③ 光学中心（レンズの主点）を通過した光線は、直進する。

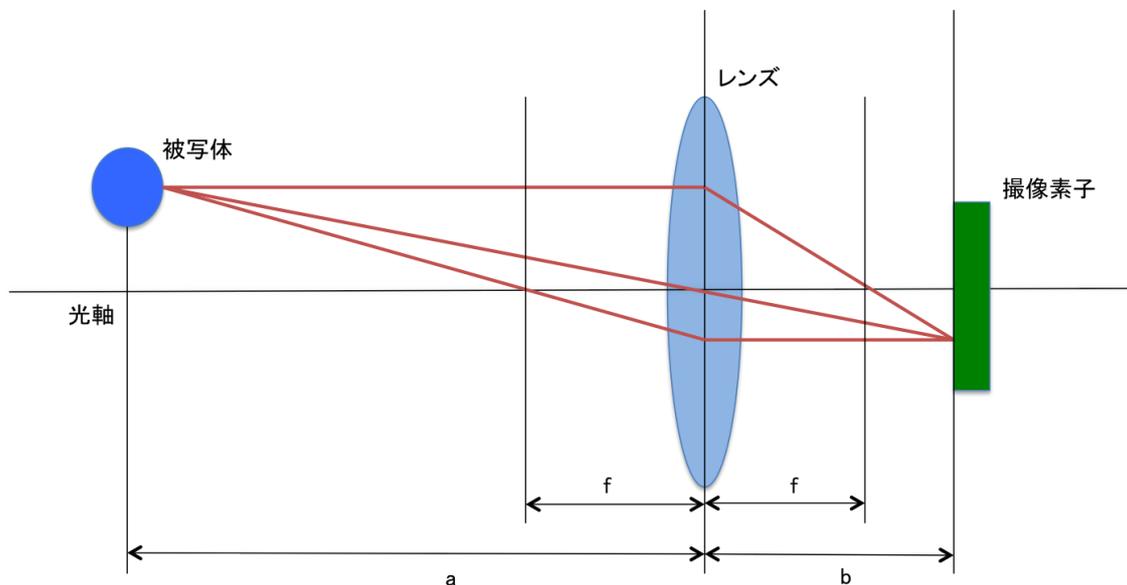


図 2.2 レンズによる結像

被写体がある有限の距離に存在する場合、レンズ後方の焦点から少し離れた位置に結像する。レンズ前方 a の距離にある被写体がレンズ後方 b の距離で結像するとき、次のような関係が成り立つ（ガウスのレンズ公式）。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

このようなレンズの性質によって、被写体からの光が集光され、撮像素子上に像を作る。

撮像素子（イメージセンサー）は、レンズから入射した光を電気信号に変換する半導体素子である。光を電気に変換する現象を光電変換という。撮像素子は、フィルムカメラに例えるとフィルムに相当する部分で、画質を左右する重要なデバイスである。撮像素子によって空間的にサンプリングされ、電気信号に変換されたアナログ画像は、A/D 変換によってデジタル画像に変換される。このデジタル画像を生画像（Raw Image）などと呼ぶ。

撮像素子が出力する生画像に対して、画像処理チップで、色補正などを施し、

所定の形式に変換する。その後、画像をメモリーカードに保存し、また液晶モニターに表示する。

2. 2 カメラの撮影パラメータ

カメラでシーンを撮影するためには、ズーム倍率、フォーカス位置、光源の種類、絞り値、シャッタースピード、ISO 感度などの撮影パラメータを設定する必要がある。その中で、写真画像の明暗に関する「絞り値」「シャッタースピード」「ISO 感度」を説明する。

カメラの絞りは撮像素子に入射する光量を調節する機構部品で、レンズの有効径を大きくしたり小さくしたりする。人間の目の虹彩（アイリス）に相当する部分である。絞り値は F 値と呼ばれ、レンズ焦点距離を入射瞳径（レンズに入射可能な光束径）で割った値である。F 値を変えることで画像の明るさを調節することができる。

$$F \text{ 値} = \frac{\text{レンズ焦点距離[mm]}}{\text{入射瞳径[mm]}}$$

F 値が小さいほど、撮像素子に到達する光量が多いことを示し、F 値が大きいほど、光量が少ない。

シャッタースピードはシャッターが開いている時間のことである。シャッタースピードを速くすると光が撮像素子にあたる時間は短くなり、遅くすると長くなる。

この絞り値とシャッタースピードの組み合わせで露光量を変えることができる。ここで露光量とは、カメラの撮像素子に当たる光の量である。これは、絞り値とシャッタースピードで調節する。絞り値を大きくしても、その分シャッタースピードを遅くすれば適正露光にすることができる。逆に、絞り値を小さくしてシャッタースピードを速くしても、同じ明るさの写真を撮影することができる。

ISO 感度はデジタルカメラが光をとらえる能力を表す値である。デジタルカメラは、撮像素子に当たった光を電気信号に変えて処理する。ISO 感度を上げることは電気信号を増幅することであり、ISO 感度を 2 倍にすると電気信号も 2 倍に

なる。ISO 感度を 2 倍にすると撮像素子に当たる光の量が半分でも、出力される画素値は同じになる。つまり、ISO 感度を ISO100 から ISO200 に上げると、同じ絞り値であれば 2 倍速いシャッタースピードで撮影ができる。

2. 3 シーンのダイナミックレンジ

シーンのダイナミックレンジは、シーン中の最も明るい位置の輝度と最も暗い位置の輝度の比である。通常、その比率の常用対数の 20 倍の数値を dB (デシベル) を単位として表示する。例えば、シーンの最も暗い位置の輝度が $1.0 \text{ (cd/m}^2\text{)}$ で、最も明るい位置の輝度が $1000.0 \text{ (cd/m}^2\text{)}$ であれば、その比率は 1000 になる。したがって、その明暗差は 60dB である。

人間の視覚のダイナミックレンジは 100dB~120dB 程度と言われているが、一般のデジタルカメラの撮像素子は、60dB~80dB 程度である。デジタルカメラは、人間の目よりも、色の濃淡を識別できる範囲が狭いということである。例を挙げると、人間の目は、逆光の中でも人の顔を識別することができる。しかし、一般のデジタルカメラで同じシーンを撮影しても、人の顔が真っ黒になってしまい、人の顔が識別できない。

2. 4 ハイダイナミックレンジ画像の定義

一般のデジタルカメラは各色 8 ビットで画像を表現する。このとき、最も暗い画素値は 0、最も明るい画素値は 255 である。シーンのダイナミックレンジの定義に従えば、画素値 0 に対応した輝度と、画素値 255 に対応した輝度の比率が、デジタルカメラのダイナミックレンジということになる。この数値が 60dB~80dB ということである。この程度の表現範囲の画像をローダイナミックレンジ画像と呼ぶ。

ハイダイナミックレンジ画像は、ローダイナミックレンジ画像よりもダイナミックレンジが広い画像である。デジタルカメラで撮影した画像に関しては、輝度の明暗範囲で 80dB 以上の画像をハイダイナミックレンジ画像と呼ぶことができる。

8 ビットで表現できる段階は 256 階調である。この数値を単純に dB 変換する

と、 $20 \times \log(256) = 48.1\text{dB}$ となる。したがって、各色 8 ビットの信号で表現できるダイナミックレンジの上限は 48.1dB である。各色 8 ビットの数では、ハイダイナミックレンジ画像はおろか、ローダイナミックレンジ画像も十分に表現できないことになる。10 ビットで 60.2dB、12 ビットで 72.2dB、14 ビットで 84.3dB、16 ビットで 96.3dB に相当するので、ハイダイナミックレンジ画像を十分に表現するには、画素あたり 14~16 ビット必要であることがわかる。

3. デジタルカメラの基本的な入出力特性

3. 1 ガンマ補正

画像をディスプレイに表示するとき、ディスプレイを駆動する信号値と、その値によって実際に表示される輝度は比例関係にはない。これは、画像を入力するカメラの特性についても同じことが言える。この画像の濃淡を補正するにはガンマ変換が利用され、この変換を利用した補正法をガンマ補正という。

CRT ディスプレイ（ブラウン管を利用した表示装置）には非直線性があり、ガンマ特性と呼ばれている。図 3.1 に示すように、CRT への入力電圧と発光輝度の関係が比例せず、 $(\text{発光輝度}) = (\text{入力輝度})^\gamma$ の関係になる特性である。多くの CRT ディスプレイは、 $\gamma = 2.2$ 前後の特性になっている。

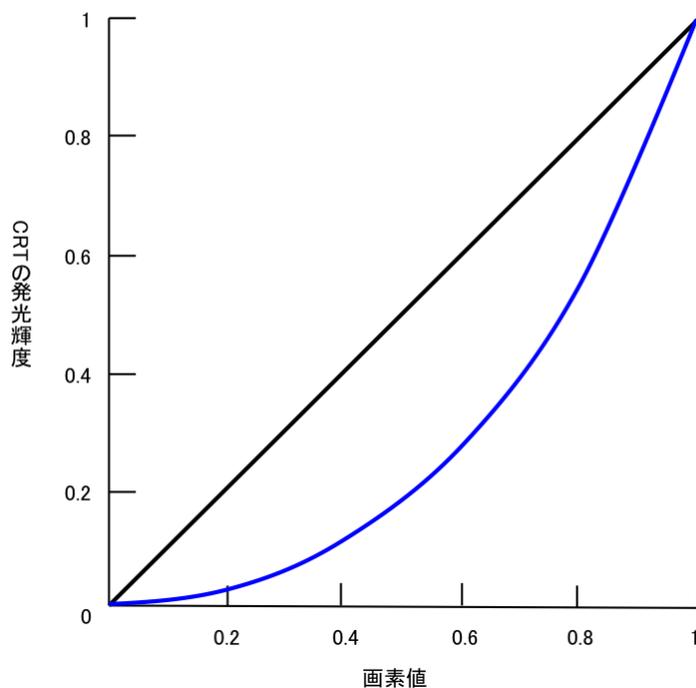


図 3.1 CRT のガンマ特性

CRT ディスプレイに画像を表示するとき、あらかじめガンマ特性を補正するように画像を撮影することで（図 3.2）、総合特性がほぼ一直線になるようにしている（図 3.3）。

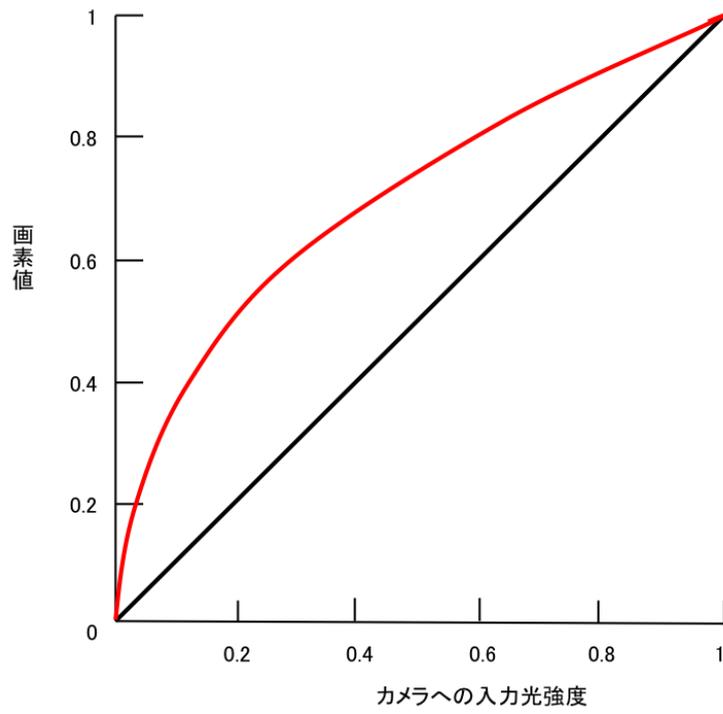


図 3.2 カメラ入出力特性

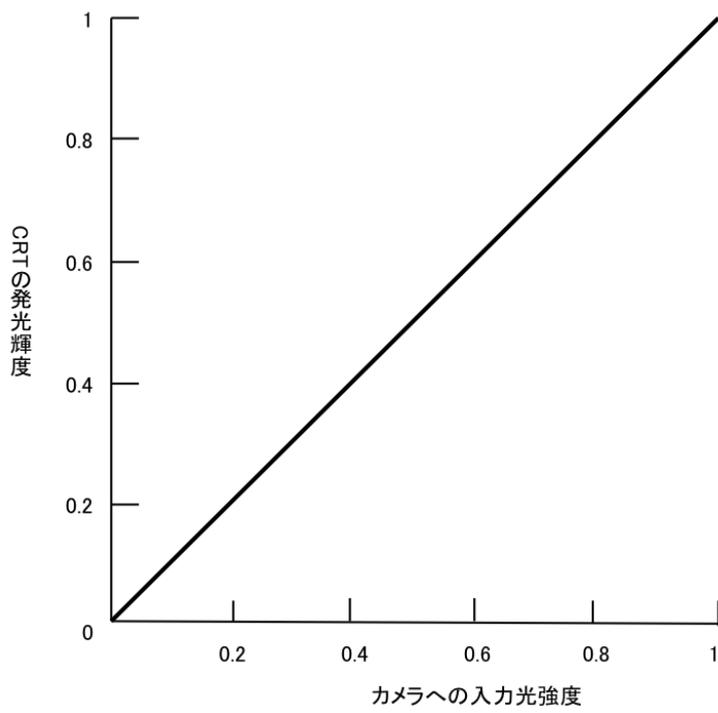


図 3.3 総合特性

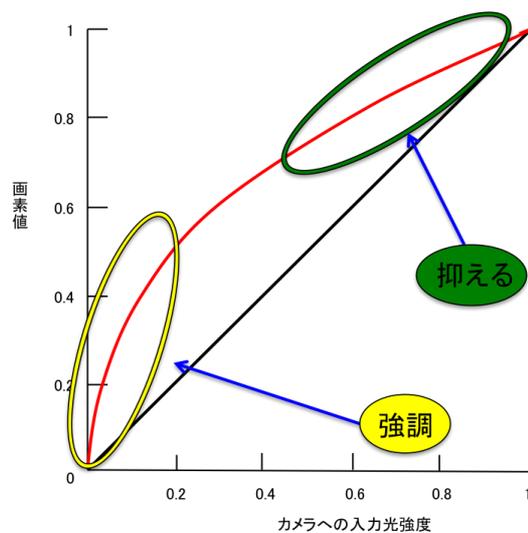


図 3.4 ガンマ補正の特徴

図 3.4 にガンマ補正の特徴を示す。黄色で囲んでいる部分はシーン中の暗い部分である。この部分は画素値が、比例関係よりも大きくなる。一方、緑色で囲んである部分は、シーン中の明るい部分である。この部分は画素値が小さめになる。

3. 2 ガンマ補正の確認

デジタルカメラの入出力特性が、ガンマ補正されていることを確認する実験を行った。この実験を行うために、図 3.5 のカラーチェッカーCLASSIC(X-rite社)を使用した。カラーチェッカーは24色のパッチから成っている。緑の部分は葉の分光反射特性を近似しており、肌色は人間の肌の分光反射特性を近似した色を再現している。カラーチェッカーを撮影して、その画素値を確認することで、デジタル写真の画像や出力、モニターの色を検証することができる。



図 3.5 カラーチェッカーCLASSIC (X-rite 社)

今回の実験では、24色あるパッチのうち、下段6色の白色から黒色のパッチ (図 3.6) を使用する。各パッチが反射する光の輝度は、サカティンクスエンジニアリング株式会社の Web サイトに掲載されているカラーチェッカー・クラシックの設計値 (C光源2度視野) [2]を用いる。



図 3.6 カラーチェッカー下段6色 (名称: white, n8, n6.5, n5, n3.5, n2)

設計値の表からそれぞれの輝度は、(white:90.0)、(n8:59.1)、(n6.5:36.2)、(n5:19.8)、(n3.5:9.0)、(n2:3.1)である。6色のパッチを、図 3.7のように、異なる露光量で撮影して、輝度と画素値の関係を調べた。異なる露光量の撮影

は、絞り値と ISO 感度を固定して、シャッタースピードを変化させることで行った。

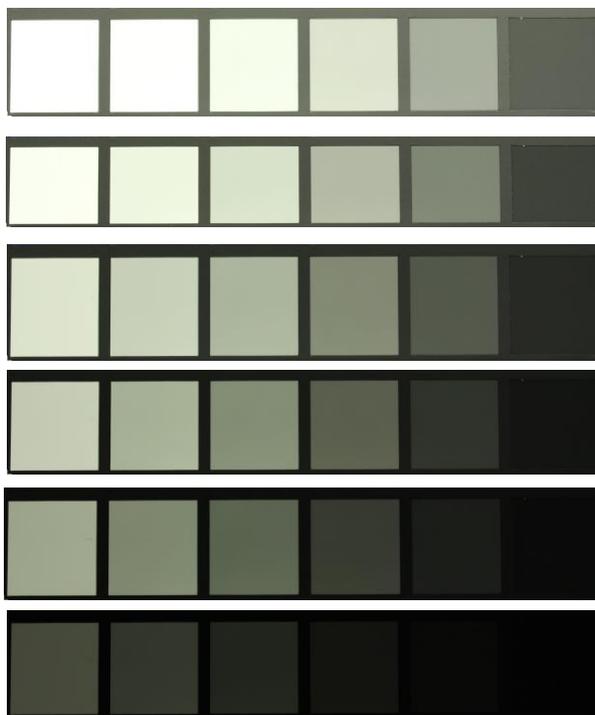


図 3.7 異なる露光量による画像

(上からシャッタースピード 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125)

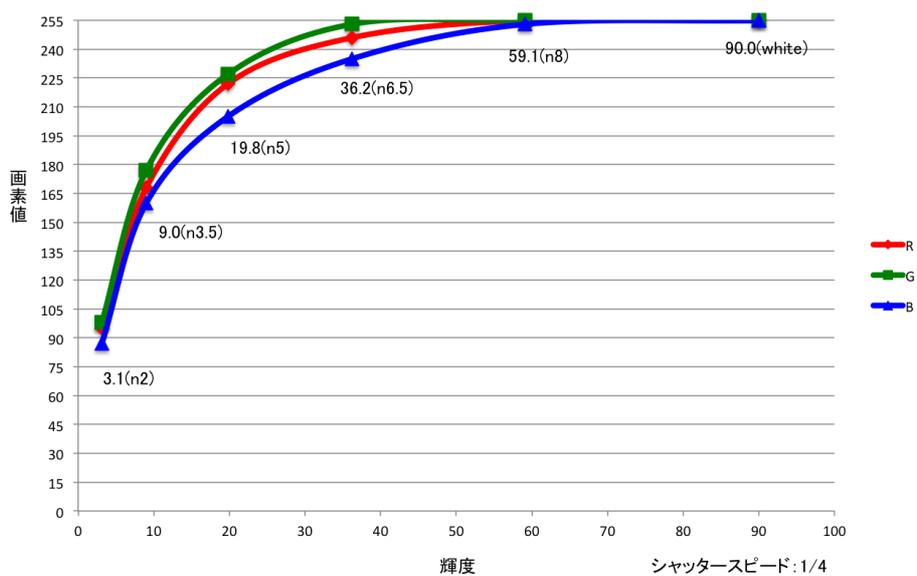


図 3.8 シャッタースピード 1/4 の入出力特性

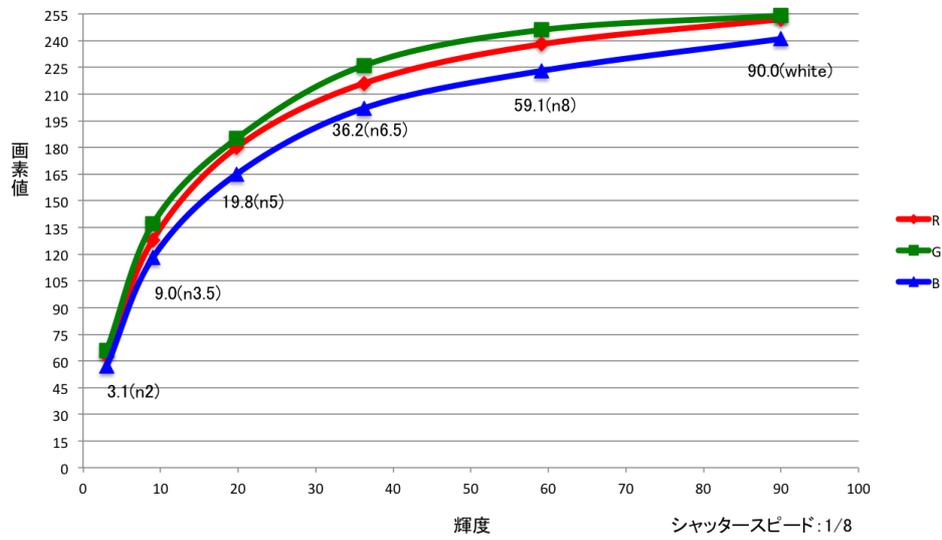


図 3.9 シャッタースピード 1/8 の入出力特性

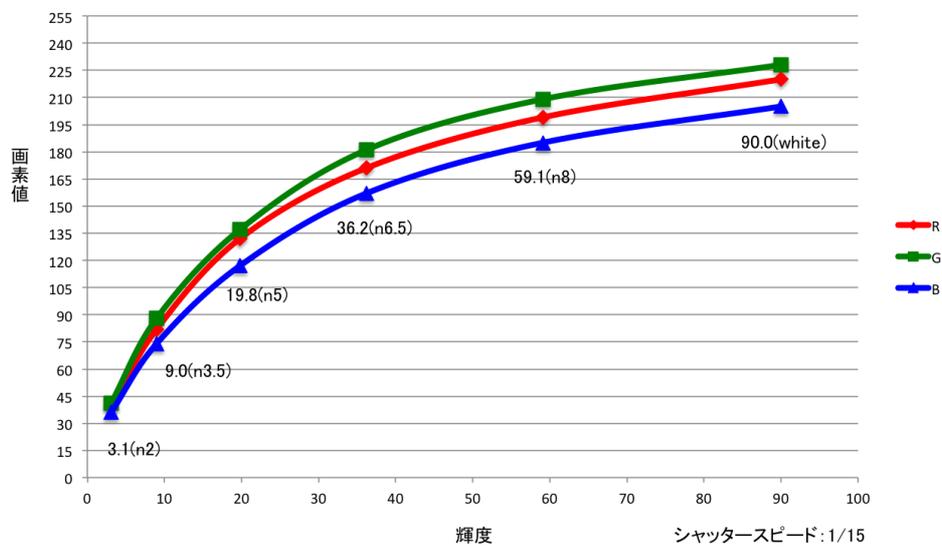


図 3.10 シャッタースピード 1/15 の入出力特性

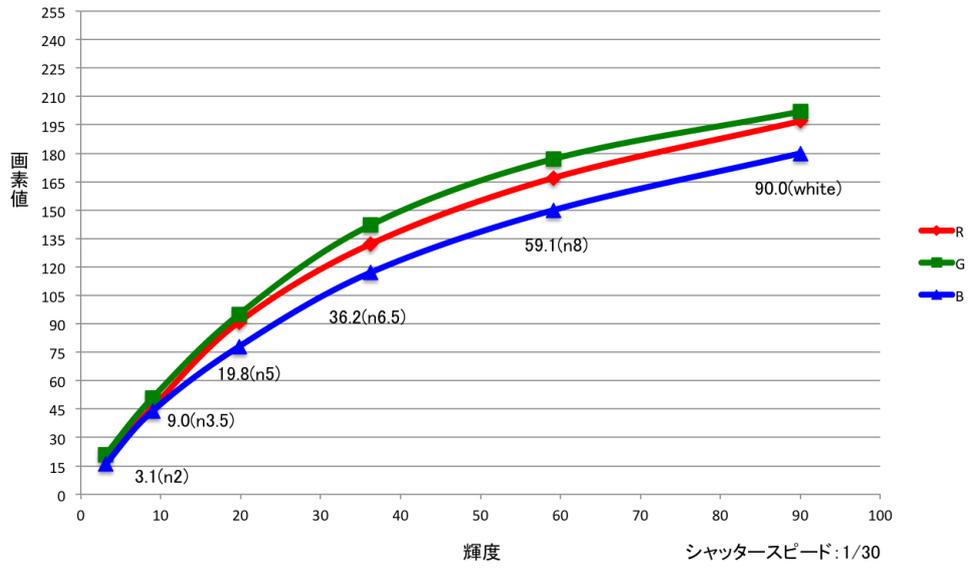


図 3.11 シャッタースピード 1/30 の入出力特性

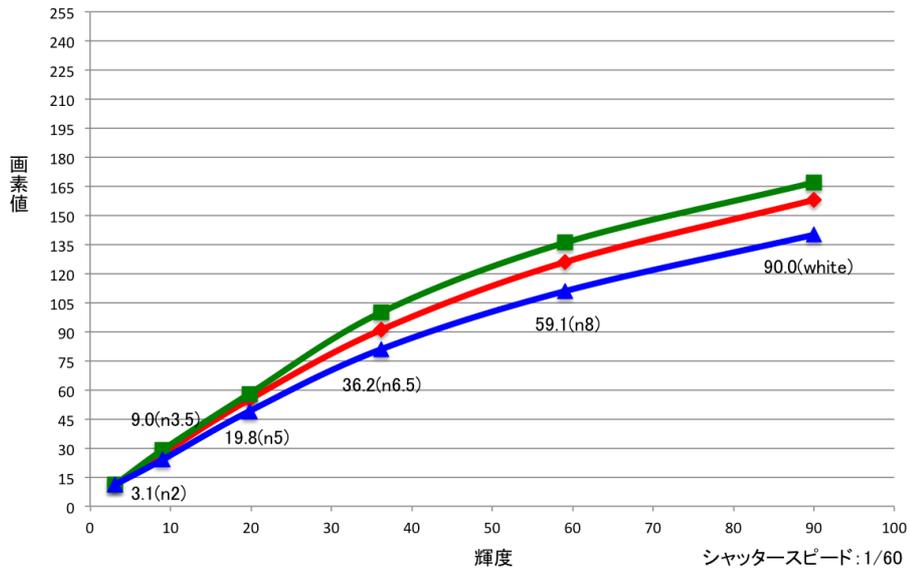


図 3.12 シャッタースピード 1/60 の入出力特性

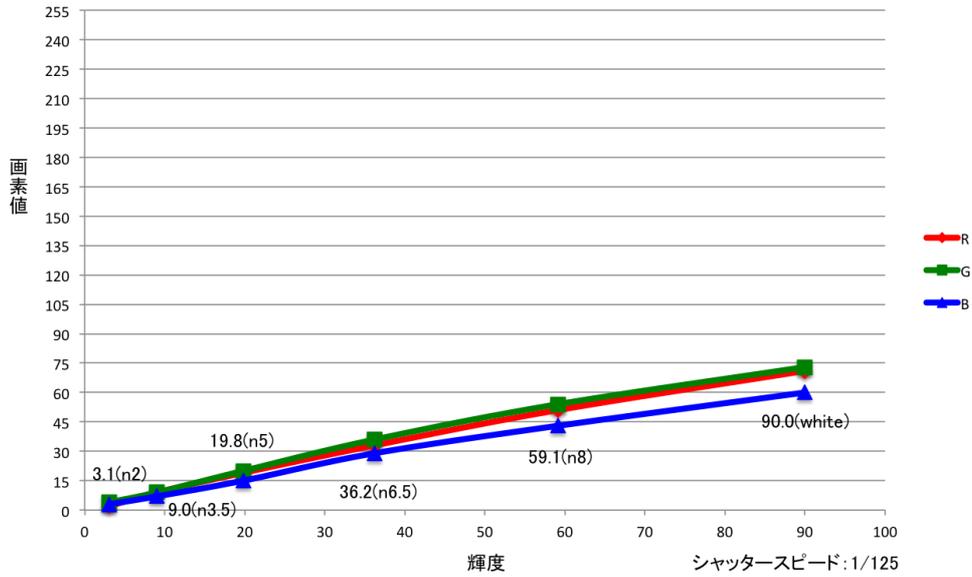


図 3.13 シャッタースピード 1/125 の入出力特性

ガンマ補正に似た曲線が観察される図 3.9～図 3.11 を使う。それぞれのガンマがいくつになるのかを見積もり、ガンマ補正 ($\gamma=2.2$) の入出力特性を見つける。それを行うために、横軸と縦軸を 0～1 の範囲に正規化をする。横軸は輝度 3.1～90.0、縦軸は横軸の輝度に対応する画素値を正規化した。曲線から、出力=入力 $^\gamma$ の関係の中で、最も良く合う値を見つける。それを図 3.14～図 3.16 に示す。

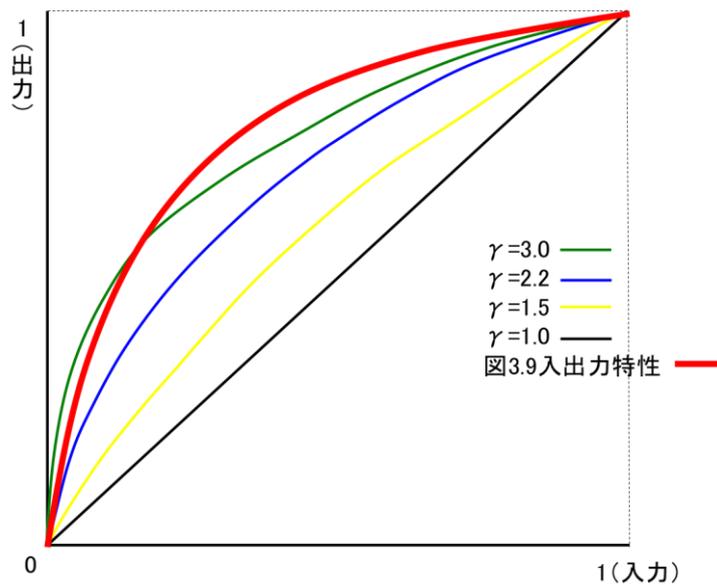


図 3.14 図 3.9 を正規化

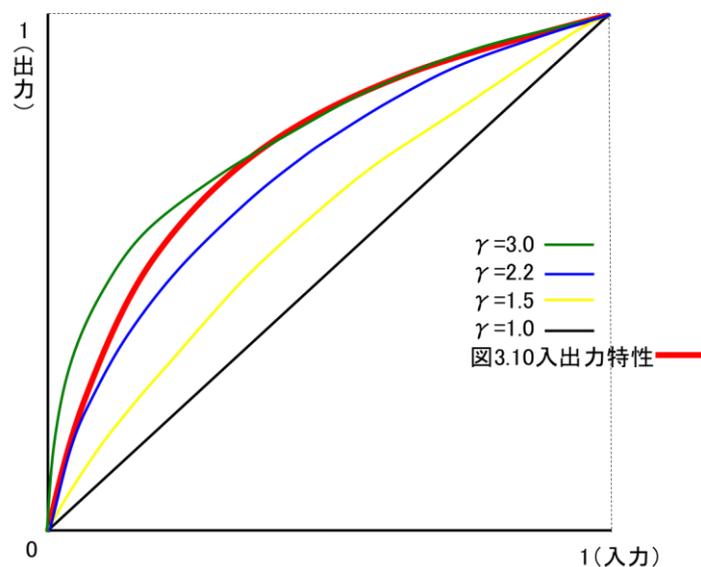


図 3.15 図 3.10 を正規化

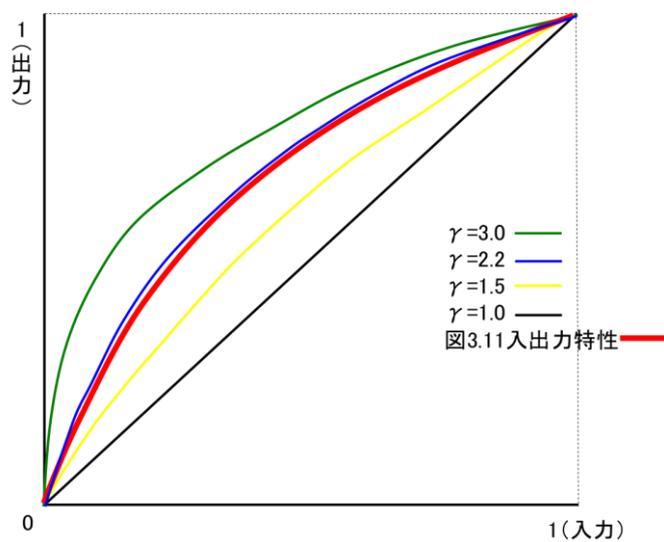


図 3.16 図 3.11 を正規化

図 3.14 と図 3.15 は $\gamma=3.0$ に近い値の入出力特性である。図 3.16 は、 $\gamma=2.2$ と同じ入出力特性であり、シャッタースピード $1/30$ のときは、 $\gamma=2.2$ でガンマ補正されていることがわかる。

図 3.8 の白飛びと図 3.13 の黒潰れをしている曲線も正規化をして、どのような特徴があるのかを見る。図 3.17、図 3.18 に示す。

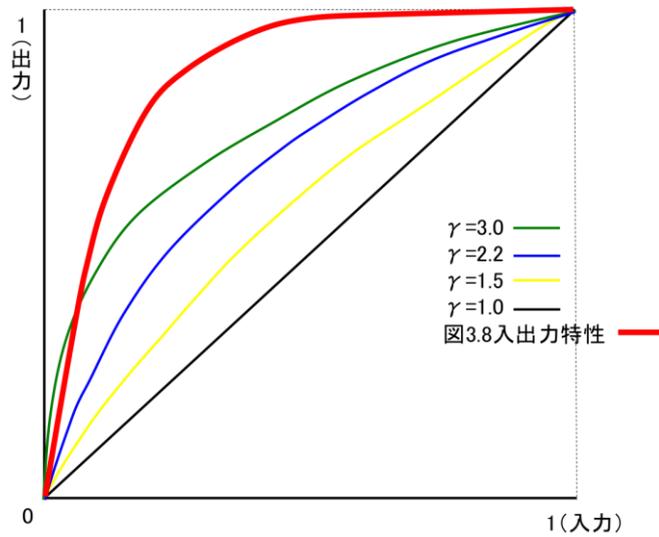


図 3.17 図 3.8 を正規化

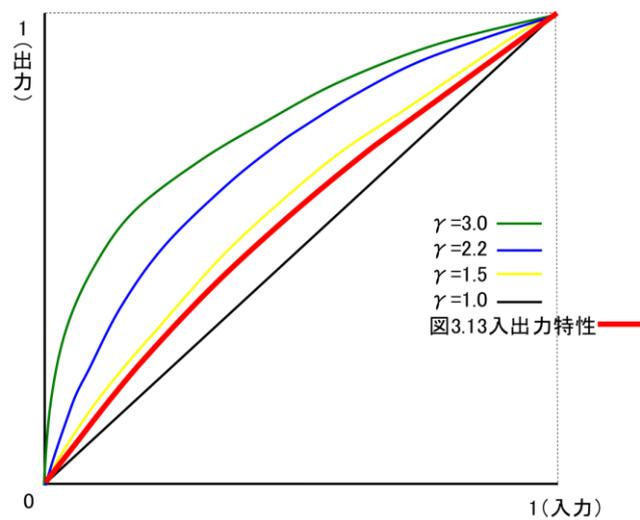


図 3.18 図 3.13 を正規化

図 3.17 は白飛び、図 3.18 は黒潰れを起こしていた画像の入出力特性を正規化した図である。あらかじめガンマ特性を補正するように画像を撮影することで、総合特性がほぼ一直線になるようにしている。しかし、このような 2 枚の画像だと総合特性は一直線にはならず、ディスプレイに表示をしようとしても、正確な画像を見ることができない。デジタルカメラの信号処理では、明るい部分の飽和を抑え、暗い部分を持ち上げるような処理がなされていることがわかった。

4. 従来のハイダイナミックレンジ画像の生成手法

一般のデジタルカメラを使ってハイダイナミックレンジ画像を生成するには、露光量が異なる複数枚の画像を合成する。複数枚の画像を合成するためには、実際に撮影するシーンの輝度と撮影した画像の応答関数が必要である。しかし、カメラの撮像素子の感度や絞りの制御方法はカメラメーカーから公開されていないため、輝度と画素値の応答関数を知ることができない。複数枚の画像を合成し、必要な応答関数を推定するために、Debevec は自動校正法を開発した[3]。その手法を説明する。

4. 1 Debevec の自動校正法

Debevec は、画像の画素ごとに応答関数を求めることができれば、実世界の輝度も求めることができると考えた。そのために、露光量が異なる複数枚の画像から、空間位置別に素子が受ける光量と画素の出力の関係を使い、両者の値が一致する応答関数を、最適化手法で求めた。

i:空間位置別



j:露出時間別

図 4.1 シャッタースピードが異なる画像

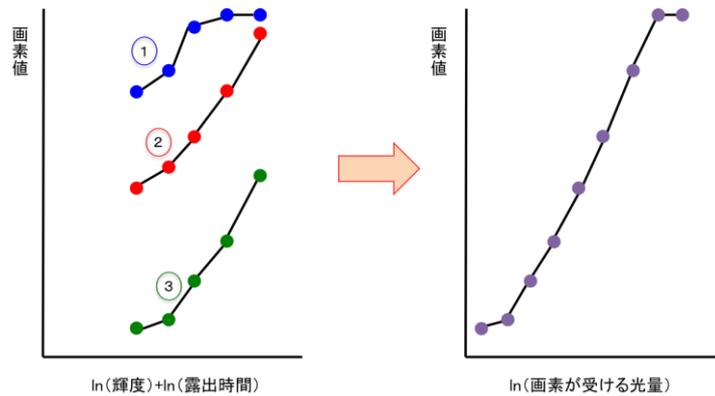


図 4.2 素子の応答関数を測定する方法

図 4.1 は異なるシャッタースピードで撮影した画像である。これらの画像上に、画素値を測定する位置を設定する。画素位置を区別するインデックスを i 、シャッタースピードを区別するインデックスを j とする。画素位置 i 、シャッタースピード j における画素値を v_{ij} とする。 v_{ij} は、その画素に対応するシーンの露光量（この場合、輝度と露光時間の積）によって決まるので、式 (1) を得る。

$$v_{ij} = f(\text{輝度} \cdot \text{露光時間}) \cdot \cdot \cdot (1)$$

ここで f は露光量と画素値を対応づけるカメラの応答関数である。この式から

$$f^{-1}(v_{ij}) = \text{輝度} \cdot \text{露光時間} \cdot \cdot \cdot (2)$$

を得る。両辺の対数を取り、右辺を左辺に移行することで

$$\ln(f^{-1}(v_{ij})) - \ln(\text{輝度}) - \ln(\text{露光時間}) = 0 \cdot \cdot \cdot (3)$$

となる。全ての測定点に関する式 (3) の自乗和を最小にするように f を決める。このように、応答関数は最小二乗法で求めることができる。図 4.2 はこのプロセスを概念的に示したもので、応答関数を円滑に求めることができる。

4. 2 Matlab の makehdr 関数を使ったハイダイナミックレンジ画像の生成

Matlab にハイダイナミックレンジ画像を生成する関数 `makehdr` 及び、生成されたハイダイナミックレンジ画像をトーンマッピングする関数 `tonemap` がある。`makehdr` は、Debevec の手法に類似した方法でハイダイナミックレンジ画像を生成するものと推察される。ここでは、これらを用いてハイダイナミックレンジ画像を生成し、トーンマッピングした例を示す。ここで、トーンマッピングは広いダイナミックレンジを圧縮して、ディスプレイに表示可能な範囲に収める手法である。

カメラを三脚で固定して、露光量を変えながら複数の画像を撮影する。カメラを三脚で固定することで、手ぶれを抑えることができ、手持ちで撮影したときの画像間のずれを抑えることができる。表 4.1 のように、シャッタースピードを変えて撮影をした。図 4.3 は、画像全体が明るく、窓の部分が白飛びをしている。図 4.5 は、窓の部分の景色を見ることができるが、画像全体が暗く、黒潰れが発生する画像になった。

表 4.1 撮影パラメータ

	図 4.3 (HDRpic_1.JPG)	図 4.4 (HDRpic_2.JPG)	図 4.5 (HDRpic_3.JPG)
シャッタースピード	1/60	1/1250	1/5000



図 4.3 窓が白飛びをしている画像 (HDRpic_1. JPG)



図 4.4 白飛びと黒潰れをバランスさせた画像 (HDRpic_2. JPG)



図 4.5 画像全体が黒潰れをしている画像 (HDRpic_3. JPG)

Matlab の `makehdr` 関数は次のように使用する。

```
hdr = makehdr(files , expTimes);
```

ここで、“files”に、撮影したローダイナミックレンジ画像のファイル名を渡す（表 4.1 のファイル名）。“expTimes”に画像の露光量の相対値を渡す。HDRpic_3.JPG を基準の写真画像とすると、相対露光量は、シャッタースピードに比例するので、表 4.2 になる。

表 4.2 相対露光量

	HDRpic_3	HDRpic_2	HDRpic_1
シャッタースピード	1/5000	1/1250	1/60
露光量の相対値	1	4	83.333

生成されたハイダイナミックレンジ画像は、通常のディスプレイに表示することができないので、tonemap 関数を使用する。tonemap 関数は、ハイダイナミックレンジ画像の階調を圧縮し、256 階調の画像に変換する。これでハイダイナミックレンジ画像を表示することができる。図 4.6 にトーンマッピングされた画像を示す。

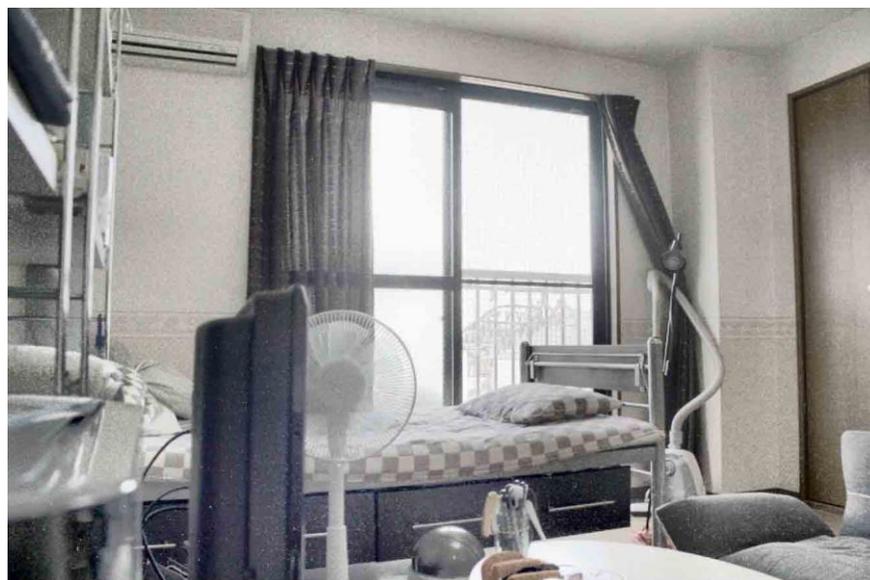


図 4.6 実験で得たハイダイナミックレンジ画像をトーンマッピングした画像

図 4.6 を見ると、窓の外景色が見えるようになっており、図 4.3 の白飛びがなくなっている。また、図 4.5 のような室内の黒潰れがなくなり、部屋全体に何があるか確認できるようになった。

5. 順次階調変換法によるハイダイナミックレンジ画像の生成

4章では従来技術としてDebevecの手法を紹介した。それは、露光量が異なる複数の画像から、最適化手法でカメラの応答関数を計算するものであった。ここではより基本的な手法を用いる。この手法は、取得した複数の画像から、2枚ごとに露光量を補正する階調変換を求め、それを全画像に順次適用することで一枚に合成する方法である。この手法を「順次階調変換法」と呼ぶことにする。

5. 1 異なる露光量で撮影した画像間の画素値の関係

カメラの露光量は、「絞り値」「シャッタースピード」「ISO感度」を変えることで設定する。今回は「絞り値」と「ISO感度」を固定し、「シャッタースピード」を変えることで露光量を設定した。

まず、露光量が2倍異なる2枚の画像を撮影する。シャッタースピードを1/30と1/60に設定する。カメラの露光量は2倍異なるので、対応する画素値は2倍異なると考えられる。図5.1と図5.2に撮影した2枚の画像を示す。

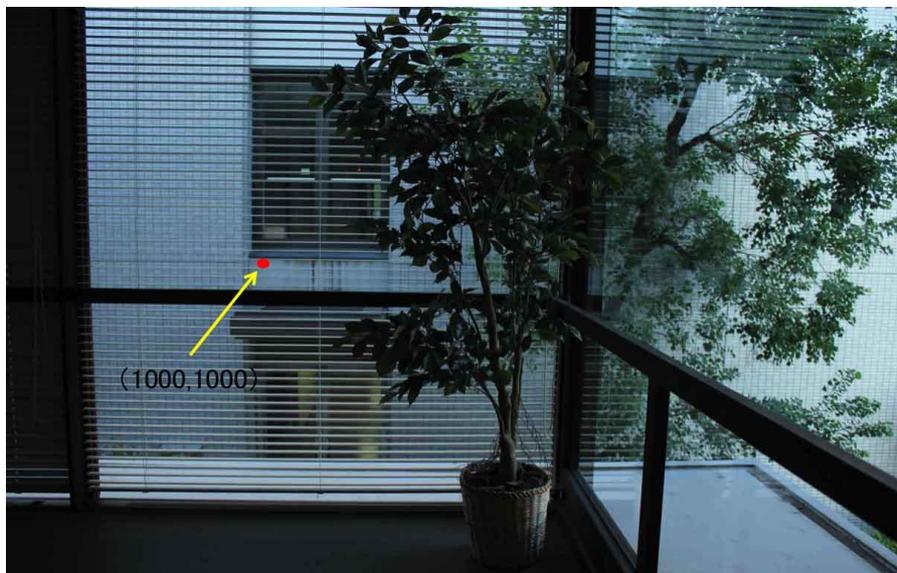


図 5.1 シャッタースピード 1/30 の画像



図 5.2 シャッタースピード 1/60 の画像

表 5.1 図 5.1・図 5.2 の図示した位置における画素値の比較

	1/30 の画像	1/60 の画像	比
R	0.2431	0.1569	1.5494
G	0.3804	0.2196	1.7322
B	0.5294	0.3098	1.7089

表 5.1 は 2 枚の画像の位置 (1000, 1000) の画素値を RGB それぞれ数値化した表である。カメラの露光量は 2 倍異なるが、対応する画素値は 1.7 倍前後しか異なっていない。これは、3 章で述べたように、カメラの基本特性として入出力信号の間にガンマ補正が施されているからである。

この実験を進めて、2 枚の画像の対応する場所の画素値をプロットした。その結果を図 5.3 に示す。図 5.3 は、プロットした点が広がっており、明確な傾向を読み取ることが難しい。

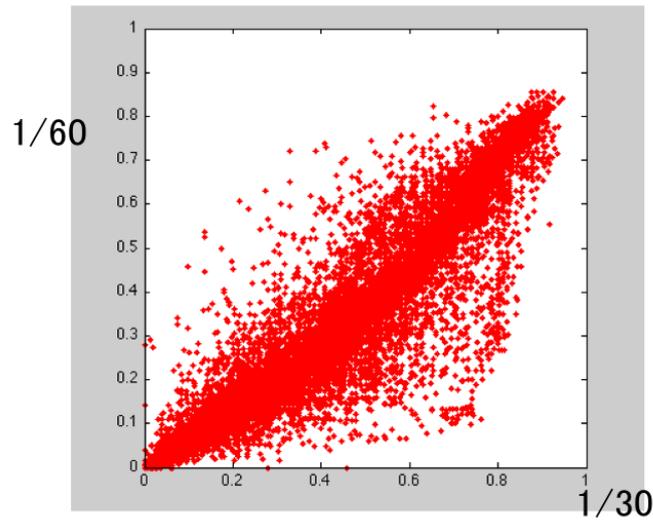


図 5.3 1/30 と 1/60 の画像の対応する場所の画素値をプロット

異なる露光量における画素値の関係を明確にするために、 3×3 の小領域で、画素値の変化が小さい場所のみをプロットした。その結果を図 5.4 に示す。

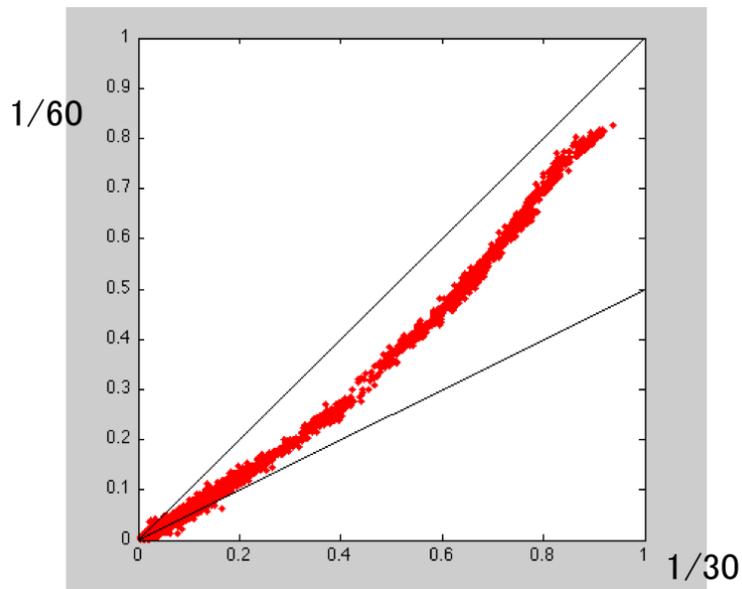


図 5.4 異なる露光量における画素値の対応を明確にしたプロット

図 5.3 と比べると、明らかな傾向を見ることできる。しかし、露光量と画素値には比例関係がない。シャッタースピード 1/30 と 1/60 の露光量が 2 倍異なる画像なので、本来あるべき関係は縦軸 Y、横軸 X とすると、 $Y=1/2X$ になるべきである。

5. 2 異なる露光量で撮影した画像間の濃淡変換

この節では、シャッタースピード 1/60 の画像に濃淡変換を施すことで、変換後の画素値がシャッタースピード 1/30 の画素値の 1/2 になるようにする。そのために第一段階として、図 5.4 の散布図として与えられた関係を関数近似する。今回は、原点を通る 2 次関数を最小自乗法でフィッティングした。その結果を図 5.5 の青線で示す。

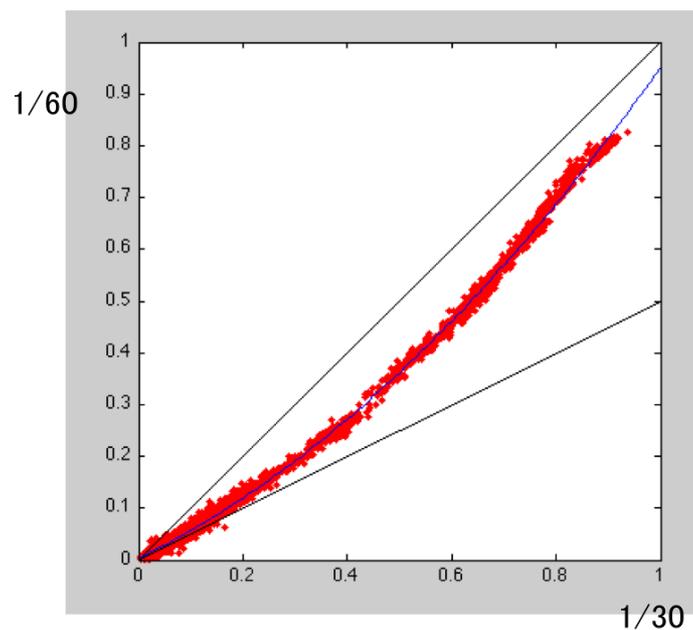


図 5.5 最小二乗法で求めた近似関係

このようにして求めた関数 ($f()$ とする) を用いて、シャッタースピード 1/60 の画像の画素値を階調変換する方法を説明する。まず、シャッタースピード 1/30 の画像の画素値を P_{30} 、1/60 の画像の画素値を P_{60} とする。これらの関係は $P_{60} = f(P_{30})$ である。画素値を変換する式を $P'_{60} = g(P_{60})$ とする。そして、1/30 の画素値と 1/60 の画素値の本来あるべき関係を $P'_{60} = 1/2P_{30}$ とし、 $g()$ を求める。これまでの関係を整理すると、次の 3 つの式、および図 5.6 のようになる。

- $P_{60} = f(P_{30})$: 1/30 の画素値と 1/60 の画素値の関係
- $P'_{60} = g(P_{60})$: 1/60 の画素値の階調変換
- $P'_{60} = 1/2P_{30}$: 1/30 の画素値と 1/60 の画素値の本来あるべき関係

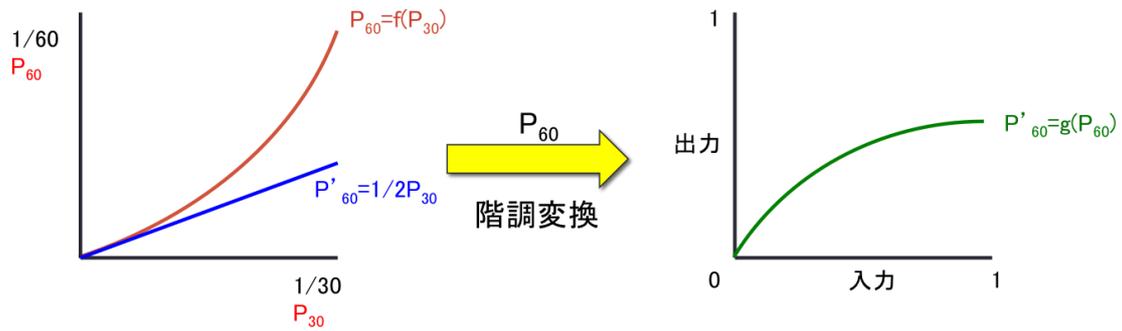


図 5.6 関係式のグラフ

これらの関係式から、 $P'_{60} = f^{-1}(P_{60})/2$ を得る。また、その関係を図 5.7 に示す。

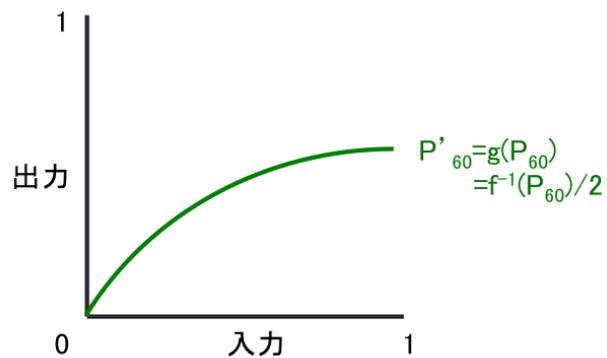


図 5.7 補正関数（階調変換関数）のグラフ

よって、最小二乗法で求めた近似関数の逆関数の $1/2$ が補正関数（階調変換関数）であることがわかる。

図 5.8 は階調変換関数のグラフ（トーンカーブ）と階調変換後の本来あるべき関係になったグラフである。図 5.8 の右側のグラフで、元々の赤色のプロットが、補正関数を与えたことで、 $Y=1/2X$ （黒のプロット）に変換された。

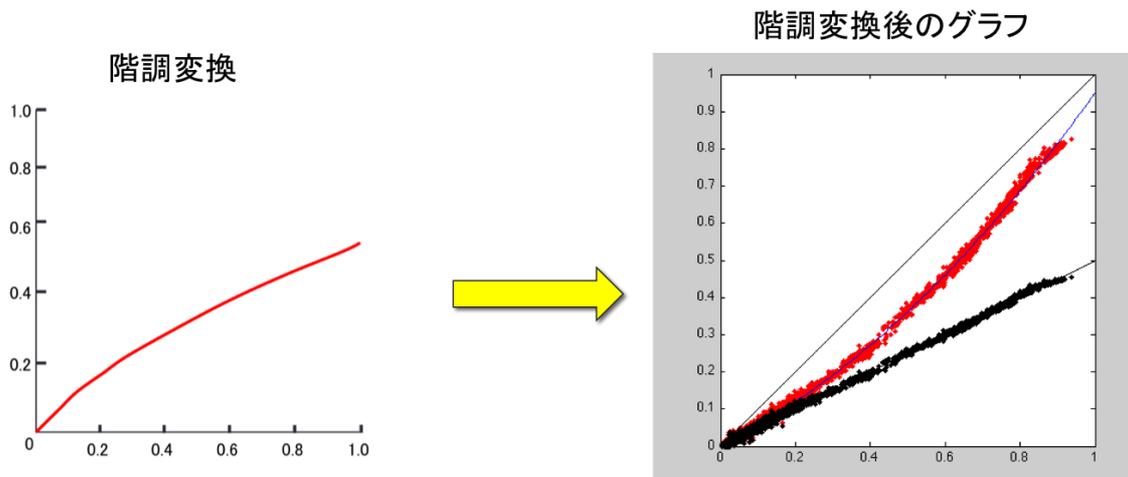


図 5.8 トーンカーブ（左）と本来の関係になった階調変換後のグラフ（右）

図 5.9 がシャッタースピード 1/60 の元画像と、階調変換後である。



図 5.9 シャッタースピード 1/60 の画像の階調変換前（左）と階調変換後（右）

階調変換を行うことで濃淡が変化し、全体が明るい画像が生成された。表 5.2 で、その階調変換後の画素値を数値化した。表 5.2 はそれぞれの画像の (1000, 1000) の RGB の画素値を数値化したものである。1/60 の画像の階調変換後の画素値が、1/30 の画像の画素値に大きく近づいている。

表 5.2 階調変換後の画素値を数値化

	1/30 の画像	元 1/60 の画像	修 1/60 の画像	比 (元)	比 (修)
R	0.2431	0.1569	0.2813	1.5494	0.8642
G	0.3804	0.2196	0.3663	1.7322	1.0385
B	0.5294	0.3098	0.4745	1.7089	1.1157

5.3 露光量の異なる複数枚の画像の合成

5.2 節で行った実験をシャッタースピード 1/60 以外の画像に対して行い、適正露光であるシャッタースピード 1/30 の露光量に合わせる。そして、階調変換後の複数枚の画像を一枚に合成した。図 5.10 は、左が元画像、右が階調変換後の画像である。図 5.10 で確認できるように、階調変換後の画像は、シャッタースピード 1/30 の画像とほとんど同じ明るさになった。



シャッタースピード 1/4



シャッタースピード 1/8



シャッタースピード 1/15



シャッタースピード 1/60



シャッタースピード 1/125

図 5.10 5 枚の元画像と 1/30 画像の露光量に合わせた階調変換画像

露光量をシャッタースピード 1/30 に合わせた 5 枚の階調変換画像と、シャッタースピード 1/30 の元画像の 6 枚を合成する。合成の方法は、画像を足し合わ

せ、その平均を取った。図 5.11 に合成結果の画像を示す。



図 5.11 シャッタースピード 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125 の合成画像

シャッタースピード 1/4 で撮影して、白飛びしていた部分を拡大した画像が図 5.12 である。元画像では白飛びしていた部分の、拡大した合成画像が図 5.13 である。



図 5.12 シャッタースピード 1/4 の白飛びしている部分



図 5.13 対応する合成画像

シャッタースピード 1/125 で撮影して、黒潰れしていた部分を拡大した画像が図 5.14 である。また図 5.15 は、その対応する合成画像の拡大図である。



図 5.14 シャッタースピード 1/125 黒潰れしている部分

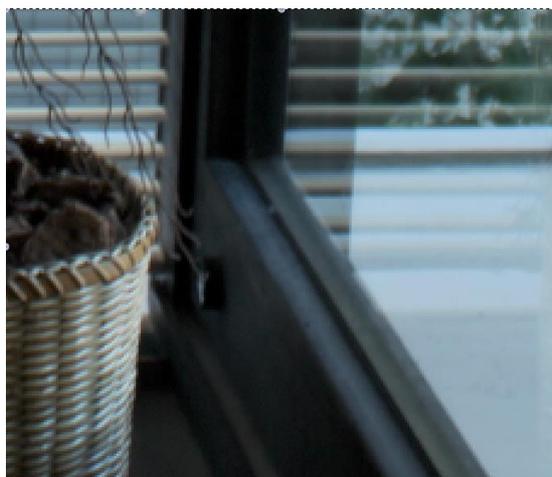


図 5.15 対応する合成画像

白飛びしている元画像と合成画像を比べると、合成画像は壁の模様が見えるようになった。また、黒潰れをしている部分も、軽減されていることがわかる。

6. makehdr 関数と順次階調変換法の比較

4章で、Matlab に実装されている関数 `makehdr` を紹介した。また、5章では、提案手法である「順次階調変換法」でハイダイナミックレンジ画像を生成した。その2つの生成手法を比較し、異なっているところを列挙、考察をする。

6. 1 ハイダイナミックレンジ生成画像の比較

複数枚の画像から、2つの生成手法でそれぞれ合成画像を生成し、その2枚の画像を比較する。図 6.1 は、合成に使用する5枚の画像である。

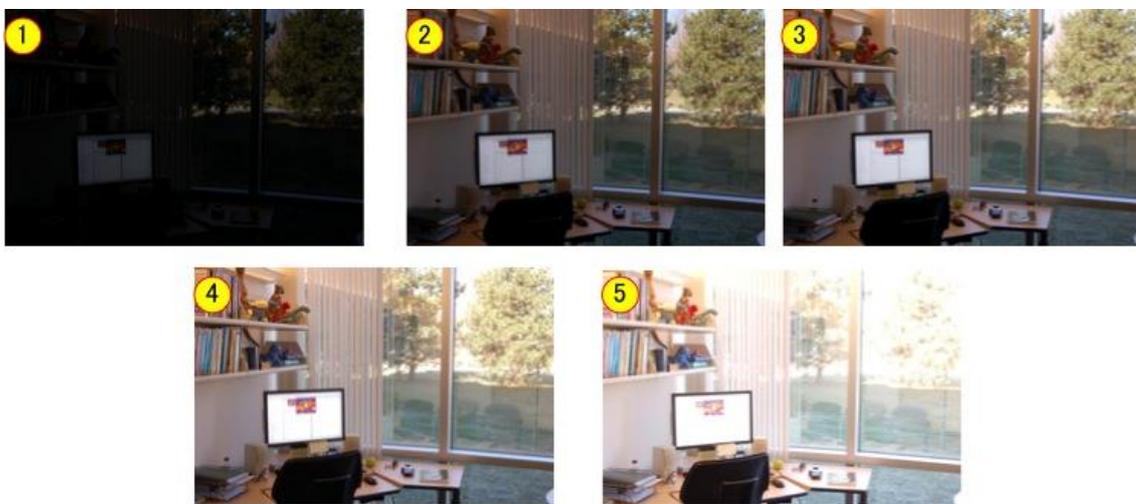


図 6.1 露光量が異なる6枚の画像

図 6.1 の画像から `makehdr` 関数でハイダイナミックレンジ画像を生成し、`tonemap` 関数で変換した画像が図 6.2 である。

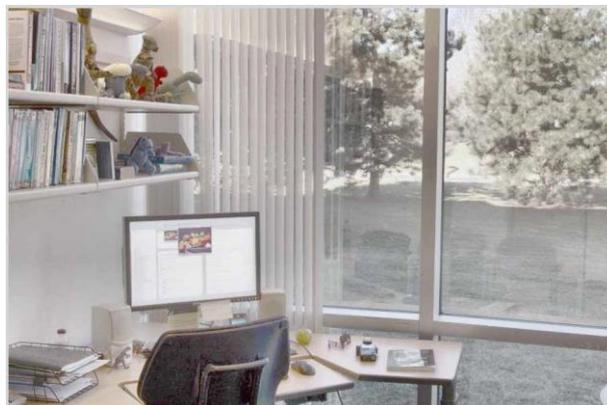


図 6.2 `makehdr` 関数と `tonemap` 関数で生成した画像

次に、順次階調変換法で、全画像を適正露光画像（③）に階調変換した画像を図 6.3 に示す。また、その階調変換後の画像を合成した画像を図 6.4 に示す。

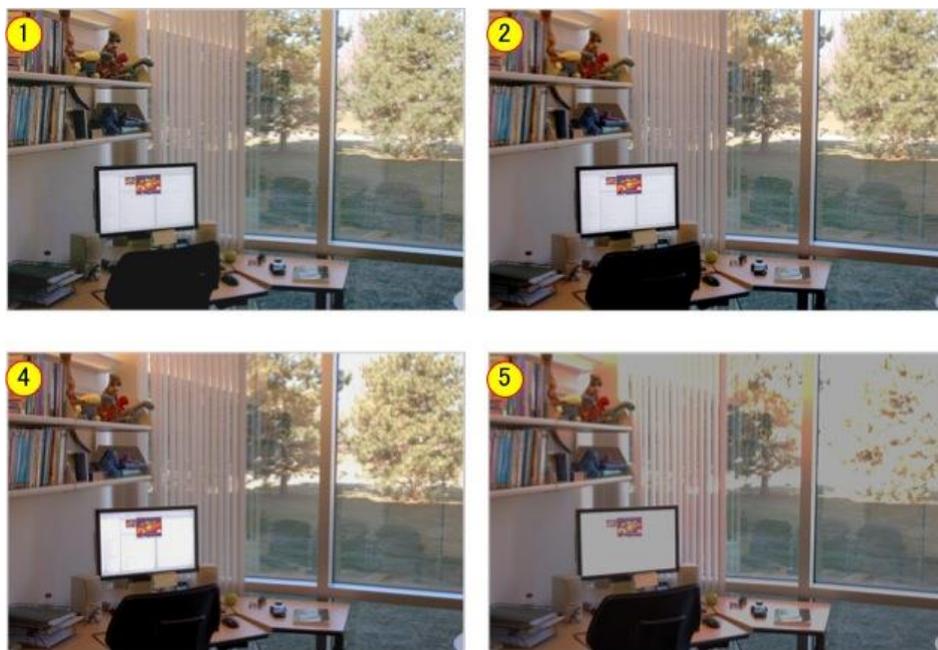


図 6.3 適正露光画像に階調変換をした画像



図 6.4 順次階調変換法で生成した画像を平均化した合成画像

makehdr 関数と tonemap 関数で生成した合成画像（図 6.2）と順次階調変換法の合成画像（図 6.4）を比較した。両方の画像共に、黒潰れや白飛びは軽減されているが、色の鮮やかさが異なる。順次階調変換法の方が、色が鮮やかでノイ

ズが少ない。

順次階調変換法による合成方法は、階調変換後の 5 枚の画像を平均して合成画像としている。黒潰れや白飛びが発生している元画像を、階調変換するとノイズが発生している。図 6.3 の①のノイズが発生している部分を図 6.5 に示す。



図 6.5 階調変換後のノイズが発生している部分

階調変換後の画像にノイズが発生しても、階調変換後の全画像を平均化するので、合成画像にノイズは発生しにくい (図 6.6)。



図 6.6 順次階調変換法 (左) と makehdr 関数 (右)

7. 結論

本論文では露光量を変えて撮影した、ダイナミックレンジが小さい一組の画像から、ハイダイナミックレンジ画像を生成する基本的な手法について研究した。まず、既知の反射率を持つ濃淡パターンを撮影し、それらの輝度とデジタルカメラの出力値の関係を調べた。その結果、適正な露光量で撮影したときは、ガンマ補正 ($\gamma=2.2$) の特性を持つことを確認した。次に、複数のローダイナミックレンジ画像から、2枚ごとに露光量を補正する階調変換を求めた。それを全画像に順次適用する手順で合成し、ハイダイナミックレンジ画像を生成する順次階調変換法という手法を提案した。最後に順次階調変換法で生成されるハイダイナミックレンジ画像を、Matlab に実装されているハイダイナミックレンジ画像を生成する関数 `makehdr` の出力と比較することで、ノイズの量が軽減されるということが明らかになった。それは、階調変換後の画像にノイズが発生していても、複数枚の画像を平均化するので、合成画像にはノイズが発生しにくいと考えた。

今回の研究では、ハイダイナミックレンジ画像の基本的な生成はできた。しかし、その生成画像をディスプレイに表示するための、トーンマッピングをするための関数を作成することができなかった。それを作成することで、細部のコントラストが非常に高い画像を生成でき、様々な画像を生成することができた。これが本研究の課題である。

参考文献

- [1] 奥田正浩, 「私の研究開発ツール (第55回) MATLAB を用いた高ダイナミックレンジ画像処理」, 映像情報メディア学会誌, Vol.66, No.1, pp.61-64, 2012年.
- [2] <http://www.inx-eng.co.jp/product/mn/cc.html>, サカティンクスエンジニアリング株式会社
- [3] P. E. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," Proceedings of SIGGRAPH'97, pp.369-378, 1997.

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた指導教官の蚊野浩教授に感謝致します。また、日常の研究を通じて多くの知識や示唆を頂いた 14223 教員研究室の皆様感謝します。

付録