

コンピュータ工学特別研究報告書

題目 人間の視覚特性を考慮した
ハイダイナミックレンジ画像のトーンマッピング

学生証番号 044679

氏名 立石 理菜

提出日 平成26年 1月 29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、画素あたりの階調数が8ビット/256階調よりも十分に大きい画像である。写真画像の場合、その画素値がシーンの輝度値を表す画像になる。ハイダイナミックレンジ画像をダイナミックが狭い通常のディスプレイに表示するためには、トーンマッピングとよばれるダイナミックレンジの圧縮が必要である。本論文は、このトーンマッピングについて研究した。

まずハイダイナミックレンジ画像の性質について調査した。その結果、多くのハイダイナミックレンジ画像は画素値が小さな画素が支配的であり、画素値が大きな画素の割合が非常に小さいことがわかった。そのため、ハイダイナミックレンジを通常のダイナミックレンジが狭いディスプレイに表示する場合、対応する輝度範囲を線形に変換するだけでは、多くの場合は、画像が極端に暗くなり、好ましい画像の再現ができない。また、指数対数型階調変換で低輝度域を強調すると、明るい画像に変換することは可能であるが、くすんでめりはりのない画像になり、好ましい結果を得ることができなかった。

次いで、トーンマッピングと人間の視覚特性の関係を調査した。人間の視覚特性に関する最も基本的な性質であるウェーバー・フェヒナーの法則によると、人間の視覚は輝度に対して対数関数的に反応する。この性質を用いて、人間の視覚特性を考慮したトーンマッピングを導いた。このトーンマッピングを用いることで、ある程度ダイナミックレンジが広い画像であっても好ましい画像の再現が可能になった。しかし、非常にダイナミックレンジが広い画像の場合には、画像を十分に明るくすることができないため、このトーンマッピングを用いても好ましい画像再現ができなかった。

ダイナミックレンジが非常に広い画像を表示するためにDragoのトーンマッピングについて調査した。Dragoのトーンマッピングは、人間の視覚特性を考慮した上記のトーンマッピングに、画素の輝度に応じて適応的に対数の基数とパラメータ値を調整可能としたものである。これらがダイナミックレンジの広さを考慮した調整項になっている。最終的にDragoのトーンマッピングによって、多くのハイダイナミックレンジ画像を良好に表示できるようになった。

目次

第1章 序論	．．． 4
第2章 ハイダイナミックレンジ画像	．．． 6
2.1 シーンの明るさとダイナミックレンジ	．．． 6
2.2 カメラのダイナミックレンジ	．．． 6
2.3 ディスプレイのダイナミックレンジ	．．． 7
2.4 ハイダイナミックレンジ画像の性質	．．． 8
2.5 ハイダイナミックレンジ画像の生成	．．． 9
2.6 トーンマッピングモデル	．．． 11
第3章 視覚特性を考慮しないトーンマッピング	．．． 13
3.1 研究で用いたハイダイナミックレンジ画像	．．． 13
3.2 輝度リニアなトーンマッピング	．．． 14
3.3 指数対数型トーンマッピング	．．． 14
3.4 ダイナミックレンジが狭い画像の表示	．．． 15
3.5 ハイダイナミックレンジ画像の表示	．．． 16
3.6 考察	．．． 19
第4章 視覚特性を考慮したトーンマッピング	．．． 20
4.1 視覚に関するウェーバー・フェヒナーの法則	．．． 20
4.2 ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング	．．． 21
4.3 Drago のトーンマッピング	．．． 25
4.4 視覚特性を考慮したトーンマッピングによる表示	．．． 28
4.5 考察	．．． 32
第5章 結論	．．． 33
参考文献	．．． 34
謝辞	．．． 34
付録	．．． 34

第1章 序論

星の明るさは等級で表す。等級を考えだしたのは古代ギリシアの天文学者ヒッパルコスである。肉眼で見える最も明るい星を1等星、最も暗い星を6等星とよぶ。等級が1等級変わると明るさは100の5乗根、すなわち約2.512倍変化する。よって等級差が5等級の場合に明るさの差は正確に100倍に等しい。これは、人間の目の光に対する感度が対数的であるため、この性質が等級の定義に結果的に反映しているといえる。

夜空の6等星は人間の目で見える最も暗いものの一つである。一方、直視可能な最も明るいものを太陽であるとすると、人間の目が観察可能な明るさの範囲は6等星の明るさから太陽の明るさの範囲であると言える。太陽の見かけの実視等級は-26.7等級であるから、6等星から太陽までの明るさの範囲は32.7等級である。天体の明るさにおける32.7等級の差はおおよそ 10^{13} 倍の差になる。我々が目にする世界は、このように明るさの範囲が広い世界である。

6等星と太陽の比較は極端な例であるが、教会のような暗い場所において窓から差し込む明るい光を観察する場合や、屋外の情景が逆光になっているような場合には、そのシーン中の明暗の差が大きくなる。このような状態は、トンネルを走行しているときに対向車のヘッドライトが目に入る場合や、夕焼け空を背景に写真撮影をする場合にも見られる。このように明暗の差が大きいシーンをダイナミックレンジが広いシーンとよぶ。

ダイナミックレンジが広いシーンをカメラで撮影すると、明るすぎて白飛びを起こしたり、暗すぎて黒潰れが発生する。この現象が生じる根本原因は、通常のカメラで記録できる明るさの範囲が、撮影するシーンの明るさの範囲よりも狭いことである。通常デジタルカメラで記録できる明るさの範囲は、明暗の比率が1000倍程度である。このようなカメラで広いダイナミックレンジを持つシーンを撮影すると、白飛びや黒潰れが発生する。

通常のカメラでダイナミックレンジが広いシーンを記録するために、シャッター速度が異なる複数の写真画像を撮影し、それらを合成することが行われる。合成した一枚の画像は、広い範囲の明るさを記録しているので、ハイダイナミックレンジ画像とよばれる。また、通常カラー画像が、画素あたりRGB各色8ビットで表現されることが多いのに対して、ハイダイナミックレンジ画像はより多いビット数で画素値を表現する。ハイダイナミックレンジ画像に対して、通常デジタルカメラで撮影した一枚の写真画像のように、明暗範囲の狭い画像をローダイナミックレンジ画像とよぶ。

ハイダイナミックレンジ画像は、ダイナミックレンジが広い画像であるが明暗が均一にあるというわけではない。むしろ暗い画素値が支配的であり、明るい画素値はほんのわずかしかない。教会のような暗い場所において窓から差し込む明るい光を観察する場合は、窓から差し込む光しか明るい画素値がない。他にも、夜間、車のヘッドライトの明るい画素値はヘッドライトしかない。このように多くのハイダイナミックレンジ画像は、一部に存在する光源が非常に明るく、大部分は暗い画素値で構成される。

写真画像をディスプレイに表示して観察する場合、元のシーンの明るさをディスプレイの明るさに変換していることになる。ディスプレイには、製品ごとに表示可能な明るさの範囲がある。これは、シーンの明るさの範囲とは一致しない。しかしながら、適切な露光状態で撮影された写真画像を、通常のディスプレイに表示すると良好に観察することができる。これは、デジタルカメラによる写真画像の記録系と、それを表示するディスプレイ系のマッチングが適切に設定されているからである。ディスプレイはガンマ特性とよばれる階調特性を有するので、デジタルカメラの出力画像にあらかじめ逆ガンマ補正が施されている。これによって、シーンの明るさの範囲とディスプレイの明るさの範囲を線形に対応させている。シーンの性質によっては、これに若干の階調補正を加えることもあるが、通常は、それほど強い補正を加えることなく、良好に画像を再現することができる。

ハイダイナミックレンジ画像をディスプレイに表示する場合、両者のダイナミックレンジの違いが問題になる。ハイダイナミックレンジ画像のダイナミックレンジは1000倍以上になる。一方、通常のディスプレイのダイナミックレンジは、せいぜい100倍程度であると思われる。これほどにダイナミックレンジに違いがある場合には、人間の視覚特性を考慮に入れた、より高度な変換が必要になると考えられる。この変換のことをトーンマッピングとよぶ。

本論文では、このような性質を持つハイダイナミックレンジ画像について調査し、それを通常のディスプレイで表示するために、人間の視覚特性を考慮したトーンマッピングについて研究した。

以下、第2章では、ハイダイナミックレンジ画像に関する定義や生成等の一般的なことを述べる。第3章では、人間の視覚特性を考慮しないトーンマッピングの場合、どのようにしてディスプレイに映るのか実験し考察する。第4章では、人間の視覚特性を考慮したトーンマッピングについて検討し、それを適用した画像が、実シーンと同じように見えているのかについて実験し考察する。第5章では結論を述べる。

第2章 ハイダイナミックレンジ画像

2.1 シーンの明るさとダイナミックレンジ

シーンの明るさは輝度によって表す。図 2.1 にさまざまなシーンの輝度を示す。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率である。例えば、昼間の屋外のシーンで 10^4cd/m^2 の日向と 10^2cd/m^2 の日陰が混在している場合には、シーンのダイナミックレンジは 100 倍あるいは 100:1 という。また、この数値の $20\log(\text{数値})$ で計算される dB (デシベル) 単位の数を用いることも多い。100 倍は 40dB である。

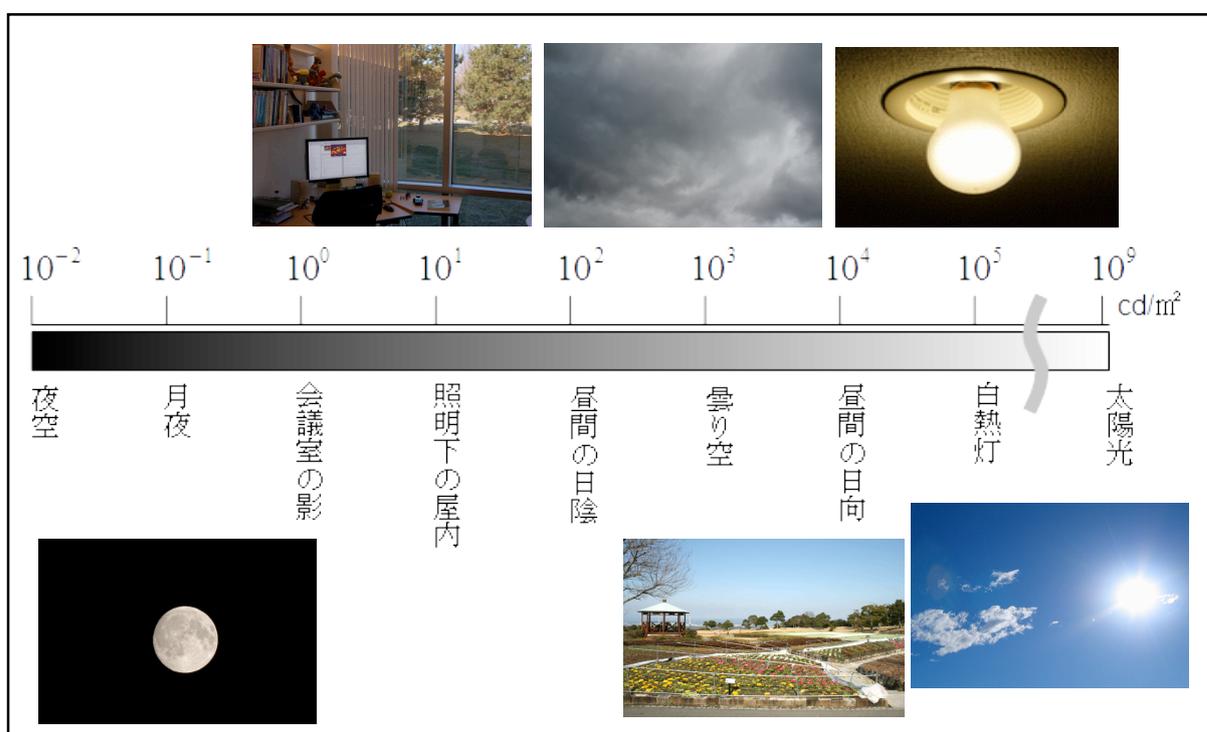


図 2.1 シーンの輝度

2.2 カメラのダイナミックレンジ

カメラはシャッター速度と絞りを調整して露光量を制御できるので、さまざまな明るさのシーンを撮影することができる。しかし、特定の露光状態(シャッター速度・絞り)と ISO 感度の組み合わせによって撮影できる輝度の範囲は、撮像素子のダイナミックレンジによって制限される。

撮像素子の画素サイズが大きいほどダイナミックレンジは広がる。したがって図 2.2 に示すように、ダイナミックレンジに関しては、スマートフォンのカメラ < コンパクトデジタルカメラ < レンズ交換式カメラとなる。

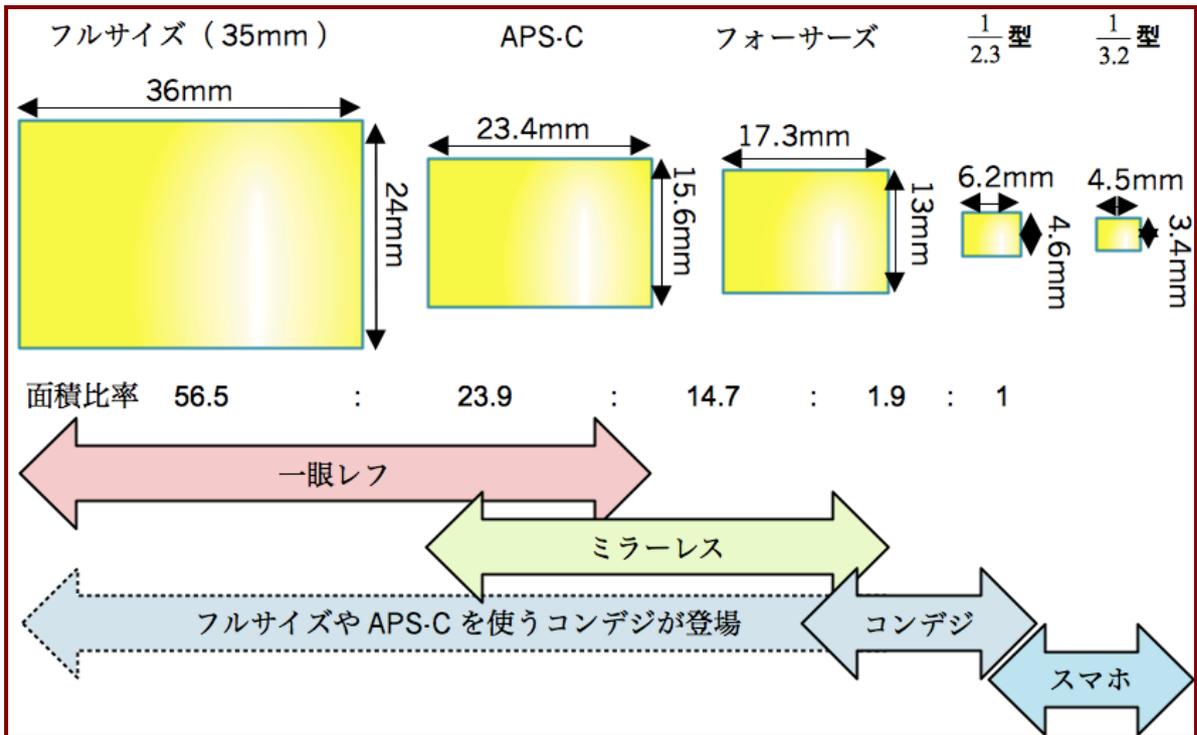


図 2.2 撮像素子の大きさの比較

iPhone5 のカメラに使われている画像センサは $\frac{1}{3.2}$ 型、800 万画素であるから、画素あたり

の面積は $1.91 \mu\text{m}^2$ である。プロ用一眼レフカメラ EOS-1DX に使われている画像センサはフルサイズ、1810 万画素であるから、画素あたりの面積は $47.73 \mu\text{m}^2$ である。この 2 つの画像センサの画素の面積比は 1:25 である。単純に考えると、プロ用一眼レフカメラ EOS-1DX の画像センサは iPhone5 の画像センサに比べて、25 倍の光を捉えることができる。したがってダイナミックレンジは 25 倍広いと言える。画素の全ての面積が光を捉えることができるわけではないので、実際にはこの差はもっと大きい。

人間の目のダイナミックレンジは、100dB~120dB[1]程度と言われている。市販されているデジタルカメラのダイナミックレンジを明確に示した文献を見つけることはできなかったが、写真撮影用のカメラのダイナミックレンジは 60dB (1000 倍) 程度、それに利用されている撮像素子のダイナミックレンジは 80dB (10000 倍) 程度と思われる。デジタルカメラの世界は、人間の見える世界より、色の濃淡を識別できる範囲が狭いということである。例えば、デジタルカメラで太陽と向かい合う逆光状態で撮影すると、太陽以外は黒潰れが起こってしまう。

2.3 ディスプレイのダイナミックレンジ

市販されている一般的なディスプレイは輝度が $250\text{cd}/\text{m}^2$ 程度、コントラスト比が 1000:1

程度であった。これはディスプレイを最も明るく表示した時の輝度が $250\text{cd}/\text{m}^2$ であり、最大輝度（画素値を最大にしたときの明るさ）と最小輝度（画素値を最小にしたときの明るさ）の比率が 1000:1 を意味すると考えられる。実際の利用状態では環境光がディスプレイに差し込むため最小輝度が高くなり、コントラスト比は 1000 倍よりも小さくなると予測される。また、ディスプレイの明るさを制御する画素値は、通常、RGB 各色 8 ビットで与える。

2.4 ハイダイナミックレンジ画像の性質

一般のデジタルカメラで撮影した画像は、1 画素あたり RGB それぞれ 8 ビット/256 階調で表現される。階調とは、色の濃淡変化のことである。0 は最も暗い画素値であり、255 は最も明るい画素値である。このようなデジタルカメラのダイナミックレンジは、画素値 0 と画素値 255 が表す輝度の比率となる。通常のデジタルカメラによる一回の撮影で取得する画像と同程度のダイナミックレンジを持つ画像のことをローダイナミックレンジ画像とよぶ。

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表現範囲が十分に広い画像のことである。通常、10 ビット以上の階調数を持つ画像である。人間の目に近い、あるいは同等のダイナミックレンジと色域をもつものが、ハイダイナミックレンジ画像ということもできる。ローダイナミックレンジ画像とハイダイナミックレンジ画像のダイナミックレンジの差の一例を図 2.3 に表す。

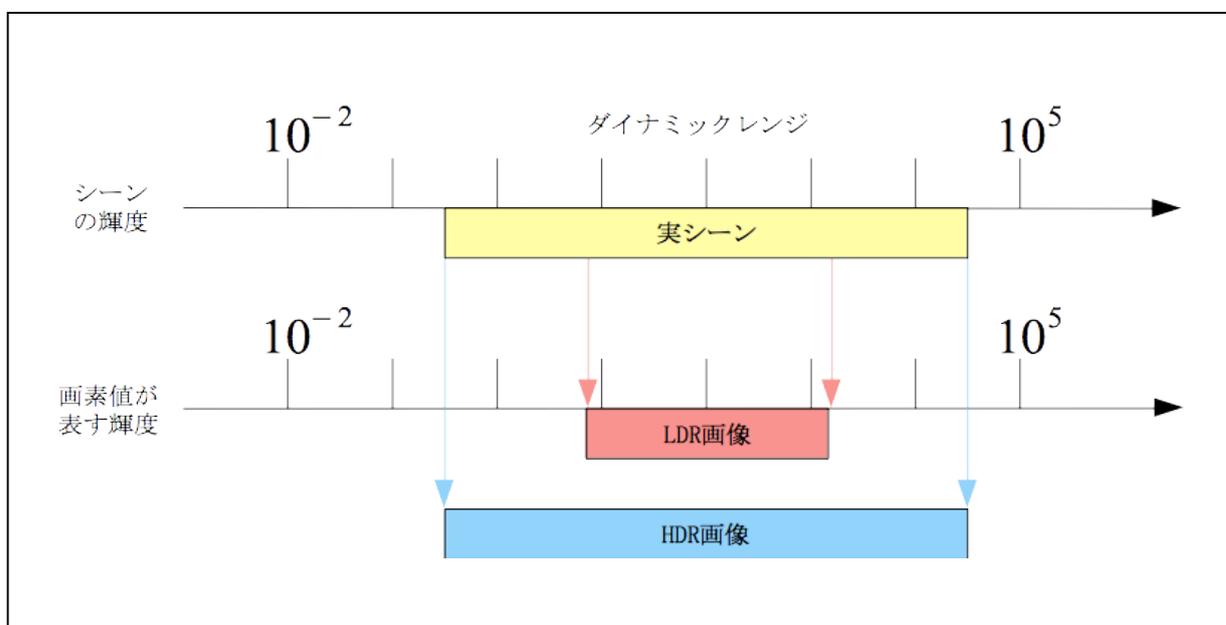


図 2.3 実シーンのダイナミックレンジと
ハイダイナミックレンジ画像、ローダイナミックレンジ画像の関係

画像の表示に用いるディスプレイのダイナミックレンジは、表示できる最も明るい輝度と最も暗い輝度の比率である。ディスプレイのダイナミックレンジが、撮影された画像のダイナミックレンジよりも広ければ、忠実な再現が可能である。撮影された画像のダイナミックレンジよりも狭ければ、忠実な再現は不可能である。一般的なディスプレイのダイナミックレンジは8ビットで表現される。したがって、ハイダイナミックレンジ画像を表示するためには、階調の変換とともにビット数の変換も必要である。

2.5 ハイダイナミックレンジ画像の生成

通常のデジタルカメラでハイダイナミックレンジ画像を生成するには、シャッター速度が異なる複数枚の画像が必要である。シャッター速度を変えることによって露光量が変わり、その結果、撮影される画像の明暗が変化する。そのように撮影した複数枚の画像を合成することによって、輝度差が大きいシーンを、一枚のハイダイナミックレンジ画像として記録する。

複数のローダイナミックレンジ画像を合成するためには、実世界の輝度と画像の濃淡値を関係づける応答関数が必要である。Debevecら[2]は、シャッター速度が異なる複数の画像から、空間位置別に画素が受ける光量と画素の関係を導き、両者の値が一致する応答関数を最適化手法で求めた。図2.4を用いてDebevecらの方法を説明する。

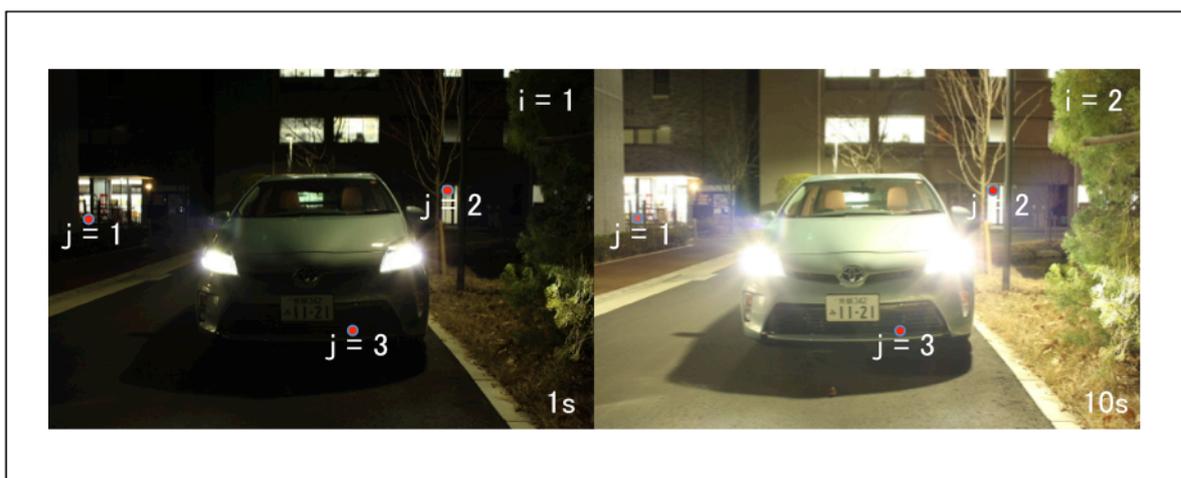


図 2.4 シャッター速度が異なる複数枚の画像と対応する点

撮影画像の画素値(v)は、画素が受けた露光量(l)の関数である。この未知関数をカメラの応答関数とよび f とする。

$$v = f(l) \cdots (2-1)$$

画素の露光量(l)は、シーンの輝度(y)と露光時間(t)の積である。

$$l = y \cdot t \cdot \dots \cdot (2-2)$$

式(2-1)と式(2-2)から

$$f^1(v) = y \cdot t \cdot \dots \cdot (2-3)$$

式(2-3)の両辺の対数をとって、整理すると式(2-4)を得る。

$$\log(f^1(v)) - \log(y) - \log(t) = 0 \cdot \dots \cdot (2-4)$$

同じシーンを、露光時間を変えて N 枚の写真撮影する。その写真画像の各画素に対する式(2-4)において、画素値 (v) 、露光時間 (t) が既知である。ここで、画像の階調数を 256 とし、0~255 の画素値に対する $\log(f^1(v))$ の値を未知数 $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{255}$ とおく。 $i = 1 \sim N$ なる N 枚の画像から、 $j = 1 \sim P$ なる P 個の点の輝度を未知数 y_j とし、 $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{255}$ を、次式を最小化するという条件で求める。

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [w(v_{ij})(g_{v_{ij}}) - \log(y_j) - \log(t_i)]^2 + \lambda \sum_{v=1}^{254} [x(v)g_v''] \cdot \dots \cdot (2-5)$$

式(2-5)の第1項は選択した画素が式(2-4)を近似するという条件、第2項は $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{255}$ が滑らかに変化するという条件である。

式(2-5)において、 v_{ij} は i 枚目の画像の j 番目の画素の画素値とし、 w は重み付き最小二乗法の重み関数で、hat 関数とする。hat 関数は定義域の中央で最大、定義域の両端で0になる山型の形をした関数である。 t_i は i 枚目の画像の露光時間とし、 λ は第2項の重みとする。 λ が大きいほど $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{255}$ が滑らかになる。 g_v'' は g_v の2回微分であるため $g_v'' = g_{v+1} - 2g_v + g_{v-1}$ である。式(2-5)を最小二乗法で解くことでカメラの応答関数を推定できる。

求めた $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{255}$ と $g_v = \log(f^1(v))$ から、カメラの応答関数 f を推定する。

カメラの応答関数が分かれば、画素値を露光量に変換でき、露光量をシャッター速度で割ることで輝度に変換できる。シャッター速度を変化させて撮影した複数の画像に関して、同じ位置の画素の中で、画素値が適正なものを用いて、それらの値を輝度に変換する。適正な画素値が複数あれば、重み付き平均などによって1つの値にする。このようにしてハイダイナミックレンジ画像を生成することができる。ハイダイナミックレンジ画像の生成プロセスからわかるように、ハイダイナミックレンジ画像は輝度を画素値とする画像である。

2.6 トーンマッピングモデル

ハイダイナミックレンジ画像を通常のディスプレイに表示するためには、異なるダイナミックレンジを対応させるための変換が必要である。この時に、画素値のビット数の変換も行われる。このように、ダイナミックレンジの変換を伴う階調の変換をトーンマッピングとよぶ。最も単純なトーンマッピングは、ハイダイナミックレンジ画像の輝度範囲とディスプレイの輝度範囲を直線的に対応させる方法である。これを輝度リニアなトーンマッピングとよぶ。普通のデジタルカメラで撮影したローダイナミックレンジ画像をディスプレイに表示する場合には、この輝度リニアなトーンマッピングが行われている。

一方、ハイダイナミックレンジ画像を通常のディスプレイに表示する場合には、ダイナミックレンジの違いが非常に大きいため、輝度リニアなトーンマッピングでは、好ましい画像を再現することができない。この場合、トーンマッピング関数はより複雑なものになる。例えば、指数対数型トーンマッピングを採用し、その定数を試行錯誤的に求めることが一つの方法である。また、別の方法として、ハイダイナミックレンジ画像とディスプレイに関する人間の明るさ感覚を求め、それを利用してトーンマッピングする方法が考えられる。

図 2.5 に、人間の視覚特性を考慮したトーンマッピングの概念モデルの一例を示す。図において、ハイダイナミックレンジ画像はシーンの輝度値分布を表す画像である。ディスプレイに表示される画像は、それに対応した画像ではあるが、通常、表示される輝度の分布と元のシーンの輝度分布は大幅に異なる。このような条件では、ディスプレイを観察する人間の視覚的な感覚を、できる限り、元のシーンに対する視覚的な感覚に近づけることが課題になる。これは、最終的には、元シーンの輝度をディスプレイの輝度に対応づける関数を設計することに帰着される。図 2.5 のトーンマッピングモデルは、この関数を設計する問題を、3つの部分問題に分解している。第一の問題は、シーンの輝度をシーンの明るさの感覚量に変換する問題である。第二の問題は、シーンの明るさの感覚量をディスプレイに関する明るさの感覚量に変換する問題である。第三の問題は、ディスプレイに関する明るさの感覚量をディスプレイの輝度に変換する問題である。以下、第3章で視覚特性を考慮しないトーンマッピングとして輝度リニアなトーンマッピングと、指数対数型のトーンマッピングを示す。第4章で視覚特性を考慮したトーンマッピングを示す。そして、ハイダイナミックレンジ画像を通常のディスプレイに表示する場合、視覚特性を考慮することで、より好ましい表示が可能になることを示す。

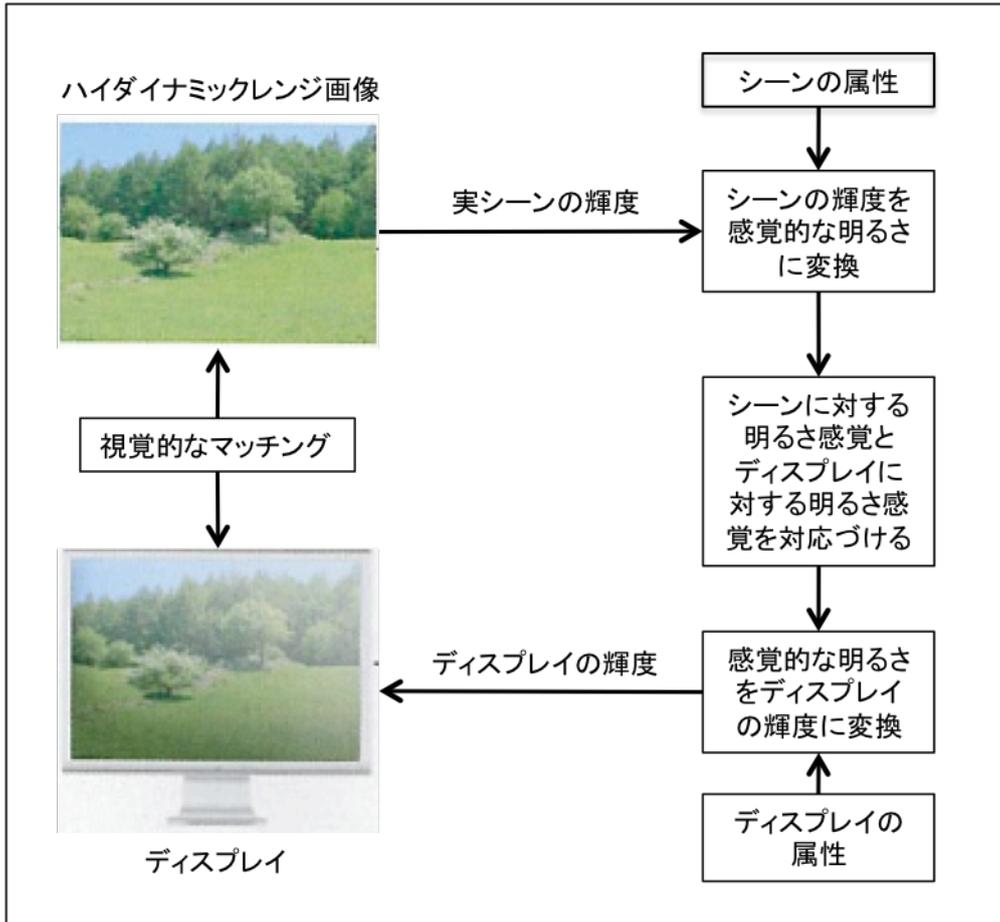


図 2.5 視覚特性を考慮したトーンマッピングモデル

第3章 視覚特性を考慮しないトーンマッピング

3.1 研究で用いたハイダイナミックレンジ画像

本研究では、図3.1の4種類のハイダイナミックレンジ画像を用いた。desk-HDRはmatlabのデモ画像として使われているものである。headlight-HDRとtree-HDRは、この研究のために作成したもので、2.5節で述べたDebevecの方法で生成した。memorial-HDRはHDR画像の研究に良く利用される画像で、<http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/>からコピーした。それぞれの画像の輝度範囲を表3.1に示す。desk-HDRは、比較的ダイナミックレンジが狭い画像である。tree-HDRとheadlight-HDRは、ダイナミックレンジが広い画像であり、memorial-HDRは、ダイナミックレンジが非常に広い画像である。



図3.1 ハイダイナミックレンジ画像にトーンマッピングを適用したローダイナミックレンジ画像

表 3.1 ハイダイナミックレンジ画像のダイナミックレンジ

	最小輝度	最大輝度	ダイナミックレンジ
desk-HDR	7.00×10^0	9.05×10^3	1.29×10^3
tree-HDR	1.87×10^{-1}	1.98×10^3	1.05×10^4
headlight-HDR	1.50×10^{-1}	6.80×10^3	4.52×10^4
memorial-HDR	1.67×10^{-4}	2.75×10^2	1.63×10^6

3.2 輝度リニアなトーンマッピング

ハイダイナミックレンジ画像の最低輝度を L_{Hmin} 、最大輝度を L_{Hmax} とし、ディスプレイの最小輝度を L_{dmin} 、最大輝度を L_{dmax} とする。ディスプレイの発光特性を $\gamma = 2.2$ のガンマ特性とする。最も単純なトーンマッピングは、 L_{Hmin} が L_{dmin} に、 L_{Hmax} が L_{dmax} に対応し、その間を輝度に関して線形に変換するものである。このトーンマッピングは図 3.2 のようになる。ここで、ディスプレイの輝度範囲を 0~1 に正規化している。なお、実際の画素値の変換では、ディスプレイのガンマ特性を考慮する必要がある。このトーンマッピング手法を輝度リニアなトーンマッピングとよぶ。

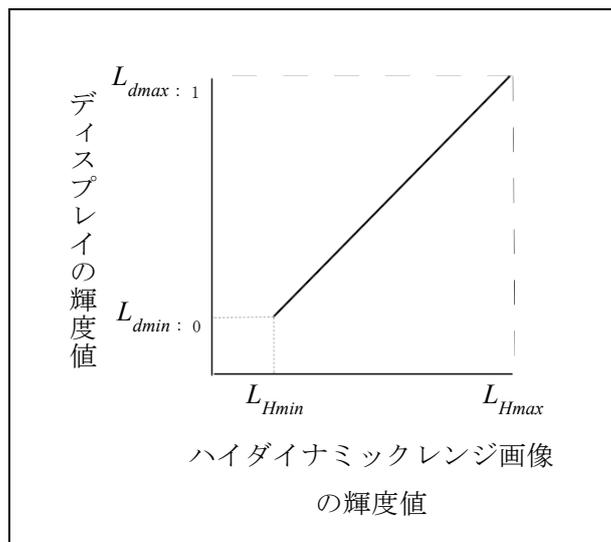


図 3.2 輝度リニアなトーンマッピング

3.3 指数対数型トーンマッピング

画像の各画素は、その濃淡を表す値(画素値)をもっている。そこで、画像の濃淡を変化させるためには、入力画像のそれぞれの画素値に対し、出力画像の画素値をどのように対応付けるかを指定すればよい。そのような対応関係を与える関数のことを階調変換関数、また、それをグラフに表したものをトーンカーブとよぶ。折れ線型のトーンカーブでは、トーンカーブの折れ曲がっている点の前後で変換の性質が急激に変わることになる。また、トーンカーブが水平な部分では、出力画像の画素値がすべて一定になるため、入力画像の

その範囲の濃淡変化は完全に失われる。これらの欠点を補うために、曲線で表される指数対数型トーンカーブを用いることがある。

入力画像の画素値の範囲を 0~255、出力画像の画素値の範囲を 0~255 とした場合の、指数対数型トーンカーブを図 3.3 に示す。これらのトーンカーブを与える変換式を式 (3-1) に示す。ここで、 γ の値によりトーンカーブの形状が変化し、 $1/\gamma > 1$ のときは上に凸、 $1/\gamma < 1$ のときは下に凸のトーンカーブとなる。このような変換はガンマ変換またはガンマ補正ともよばれている。

$$y = 255\left(\frac{x}{255}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad \dots (3-1)$$

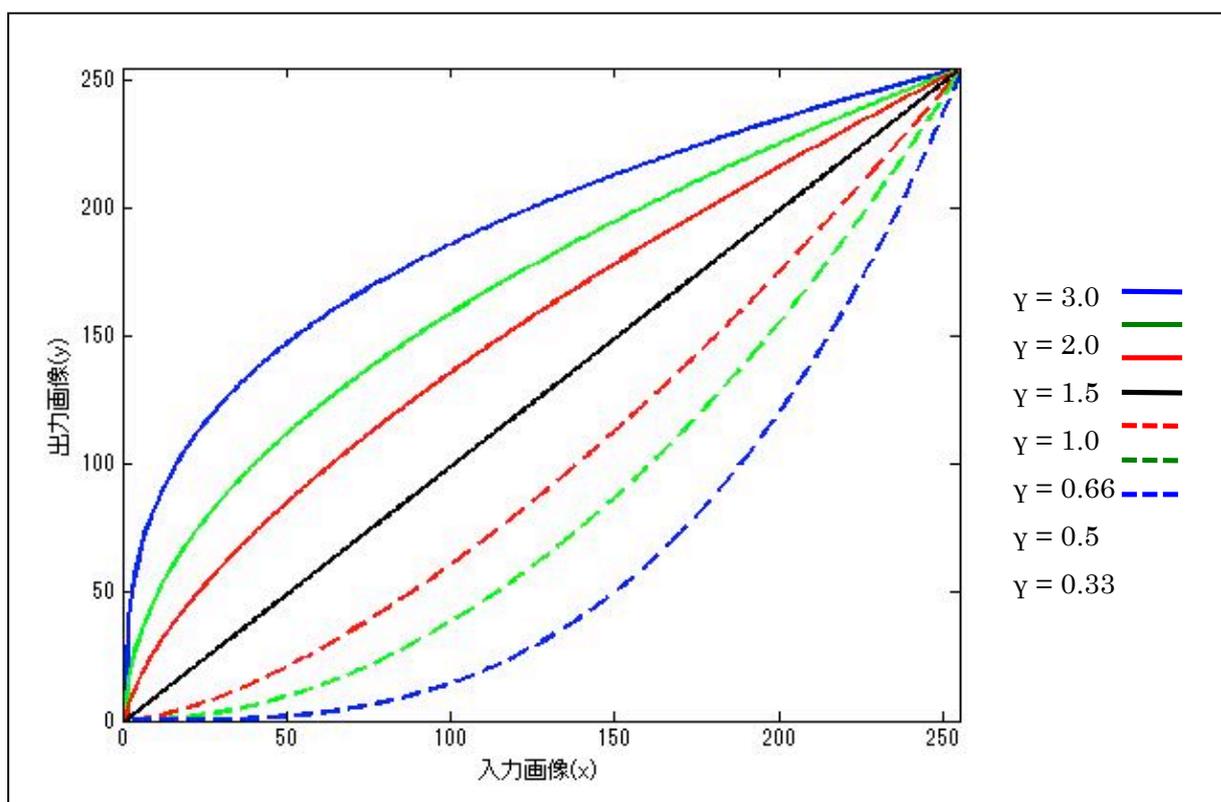


図 3.3 様々なガンマの値に対する指数対数型トーンカーブ

指数対数型階調変換の考え方をハイダイナミックレンジ画像のトーンマッピングに応用することは容易である。これを指数対数型トーンマッピングとよぶ。

3.4 ダイナミックレンジが狭い画像の表示

図 3.4 にダイナミックレンジが比較的狭い画像を、輝度リニアなトーンマッピングで表示した例を示す。ダイナミックレンジが狭い画像であれば、輝度リニアなトーンマッピン

グによって良好な画像の表示が可能であった。

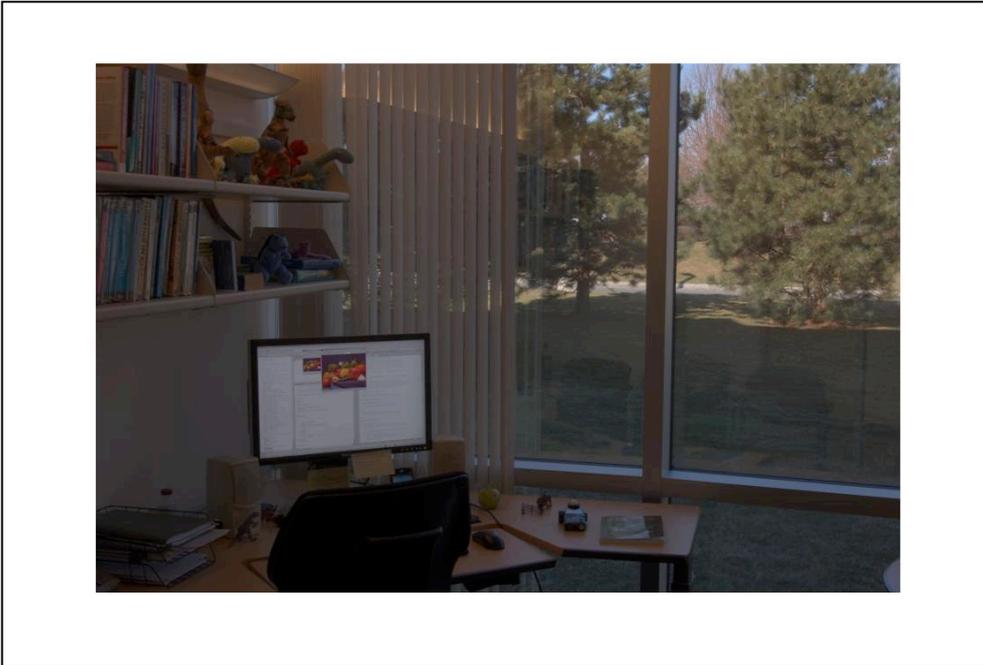


図 3.4 ダイナミックレンジが狭い画像に輝度リニアなトーンマッピングを適用した画像

3.5 ハイダイナミックレンジ画像の表示

図 3.5 に、3 種類のハイダイナミックレンジ画像を輝度リニアなトーンマッピングで表示した例を示す。ダイナミックレンジが広い画像を輝度リニアなトーンマッピングで表示すると非常に暗くなる。ハイダイナミックレンジ画像の画素値は小さい値が支配的であるため、通常のディスプレイで表示するとこのようになる。

図 3.6～図 3.8 に、3 種類のハイダイナミックレンジ画像を指数対数型トーンマッピングで表示した例を示す。それぞれ $1/\gamma=1/3$, $1/2$, $1/3$ で比較的良好な明るさになった。その他の γ 値に対する画像を付録 2 に示す。設定した γ の数値は画像によって異なり、それを決定するにはある程度の試行錯誤が必要である。いずれのトーンマッピングも、ハイダイナミックレンジ画像の低輝度域を強く持ち上げ、高輝度域を圧縮している。

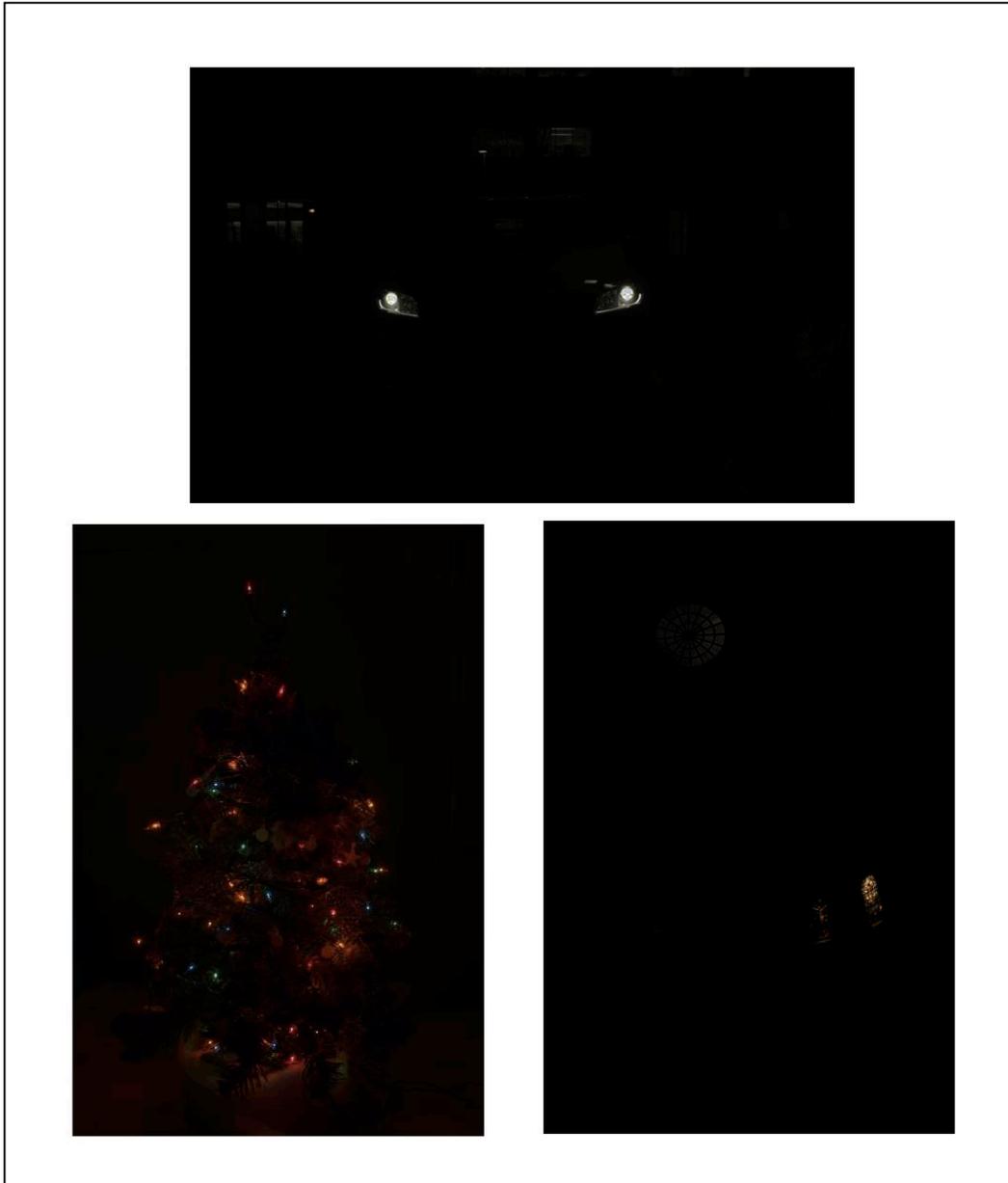


図 3.5 ハイダイナミックレンジ画像に輝度リニアなトーンマッピングを適用した画像

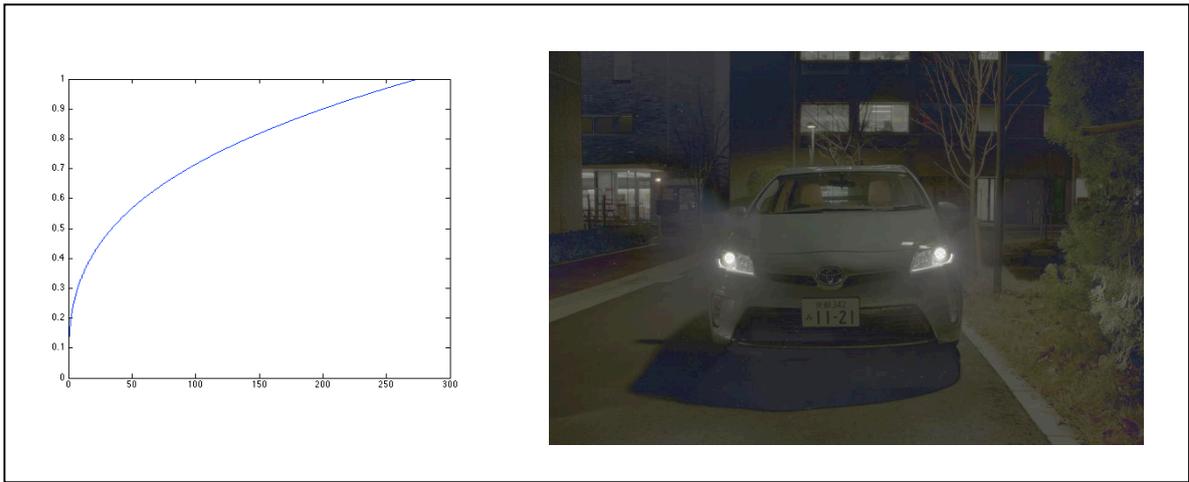


図 3.6 ハイダイナミックレンジ画像に
指数対数型トーンマッピングを適用した画像 ($1/\gamma = 1/3$)

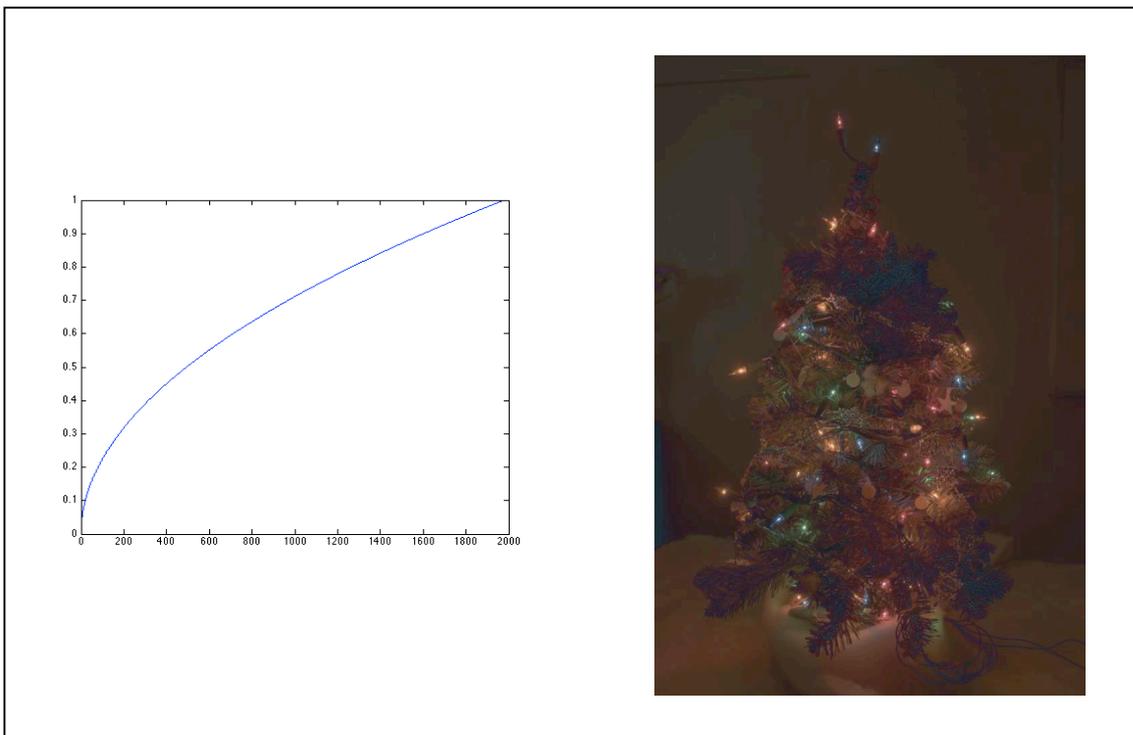


図 3.7 ハイダイナミックレンジ画像に
指数対数型トーンマッピングを適用した画像 ($1/\gamma = 1/2$)

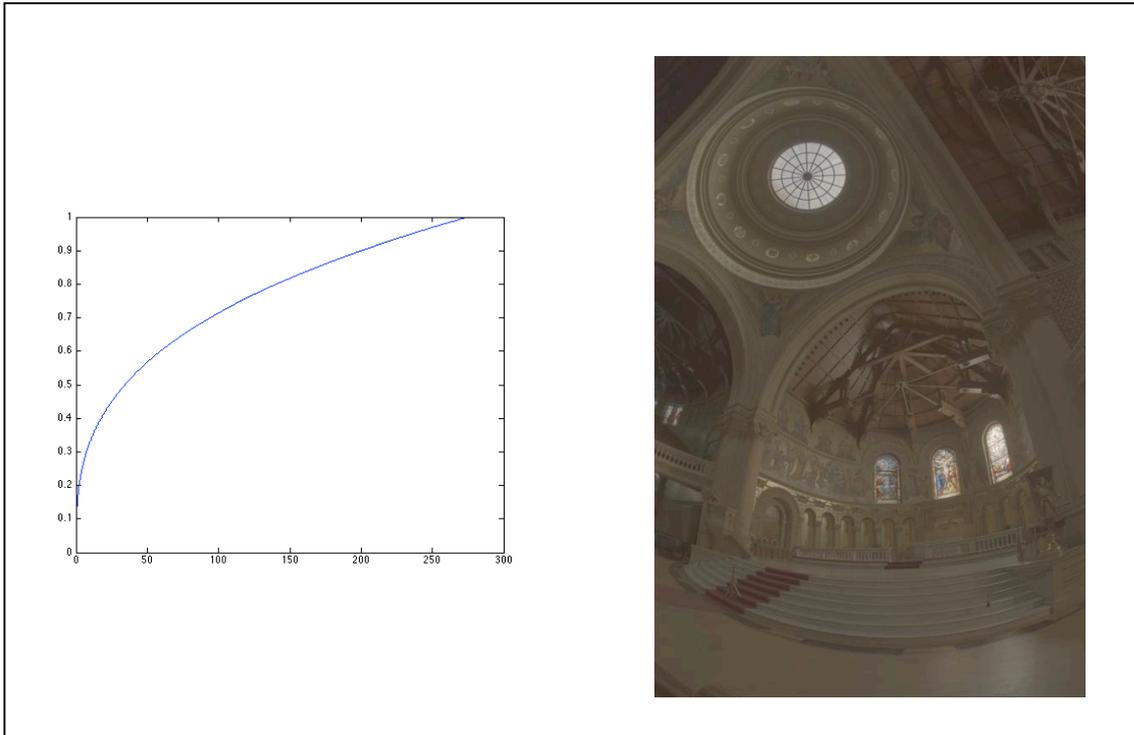


図 3.8 ハイダイナミックレンジ画像に
指数対数型トーンマッピングを適用した画像 ($\gamma = 1/3$)

3.6 考察

ダイナミックレンジが狭い画像の場合、輝度リニアなトーンマッピングで見やすい画像が得られる。ダイナミックレンジが広い画像の場合は、輝度リニアなトーンマッピングだけでは、好ましい結果が得られなかった。

指数対数型トーンマッピングは、 γ 値が大きくなると画像は明るくなるが、大きすぎると鮮明さがなくなりくすんでメリハリのない画像になってしまった。

多くのハイダイナミックレンジ画像は暗い画素値が支配的である。したがって、画素値が小さい低輝度域の画素を適切に変換することが重要である。その代表的な方法として指数対数型トーンマッピングで $\gamma > 1$ の場合を適用した。 γ 値を調整することで、画像の内容を十分に確認できるようになった。最適な γ 値を決定するには試行錯誤が必要である。しかし、最適な γ 値と判断した画像であっても、くすんでメリハリがない印象を受けた。これは、指数対数型のトーンマッピングで低輝度域を持ち上げた場合は、その効果が過度に働くからであると推察される。

第4章 視覚特性を考慮したトーンマッピング

4.1 視覚に関するウェーバー・フェヒナーの法則

ハイダイナミックレンジ画像は輝度値の画像である。そのダイナミックレンジは、通常8ビットよりも大きくなる。したがって、ダイナミックレンジを8ビットに圧縮して表示する必要がある。また、ディスプレイが表示できる輝度の範囲には限界がある。ここでもダイナミックレンジを圧縮する必要がある。人間の視覚に違和感なく画像のダイナミックレンジを圧縮するためには、視覚の特性を考慮する必要がある。

人間の感覚的な量（感覚量）とそれをもたらす物理量や刺激強度に関する法則として、ウェーバーの法則、フェヒナーの法則やスティーヴンスのべき法則が知られている。これらは感覚量全般に通用する法則であり、視覚刺激に関しても成立する。ウェーバーの法則は、輝度範囲1~1000[cd/m²]の範囲で有効とされる。ある視覚刺激の領域を2つに分け、一方の輝度を他方とわずかに変える。そのとき、境界線が識別できるか否かを判定する。一方の輝度値を I 、他方の輝度値との差を ΔI とすると、境界を識別できる限界において、この2値の比がほぼ一定になるという法則を得る。

$$\frac{\Delta I}{I} = C_w \quad \dots (4-1)$$

式(4-1)の C_w はウェーバー比とよばれる定数で、0.01~0.02 となる。

フェヒナーの法則はウェーバーの法則から導かれる法則で、明るさの感覚量(B)が光の輝度(I)の対数に比例するという法則である。すなわち、 $B = k \cdot \log I + a$ が成り立つ。 k と a は定数である。ウェーバーの法則とフェヒナーの法則は、一般的にまとめてウェーバー・フェヒナーの法則とよばれている。

スティーヴンスのべき法則は感覚量と刺激強度の関係を指数関数で表現する。明るさ感覚(S)に対しては、式(4-2)となる。ここで I は光刺激の輝度、 I_0 は明るさ感覚を生じさせる閾値である。

$$S = k(I - I_0)^{\frac{1}{3}} \quad \dots (4-2)$$

ウェーバー・フェヒナーの法則とスティーヴンスのべき法則を、光刺激の範囲を0~100、それに対する感覚量を0~1に正規化してグラフ化すると図4.1のようになる。したがって、2つの法則は、ほぼ同じことを意味していることがわかる。

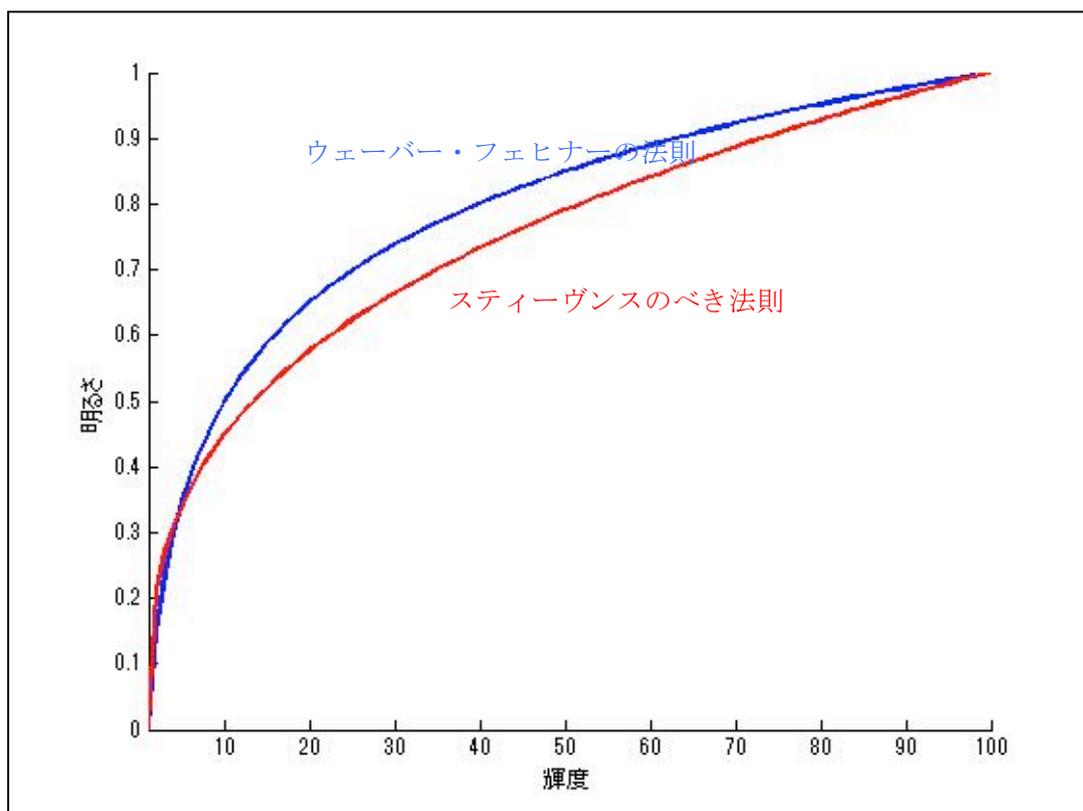


図 4.1 ウェーバー・フェヒナーの法則とスティーヴンスのべき法則の比較

4.2 ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング

ウェーバー・フェヒナーの法則は、明るさの感覚量 (B) が輝度 (I) の対数に比例するという法則であり、 $B = k \cdot \log I + a$ となる。ここで k と a 定数である。

ハイダイナミックレンジ画像の輝度 L_H の範囲を $L_{Hmin} \sim L_{Hmax}$ とする。 L_{Hmin} で感じる明るさの感覚量を $B_H = 0$ 、 L_{Hmax} で感じる明るさの感覚量を $B_H = 1$ とする。そして、輝度 L_H と明るさの感覚量 B_H の間にウェーバー・フェヒナーの法則を用いると、 $B_H = k \cdot \log L_H + a$ となる。 k と a を、 $0 = k \cdot \log L_{Hmin} + a$ かつ $1 = k \cdot \log L_{Hmax} + a$ から求め、それらを k_H 、 a_H とすると式(4-3)を得る。この式が表すトーンマッピングの関係を図 4.2 に示す。

$$B_H = k_H \cdot \log L_H + a_H \dots (4-3)$$

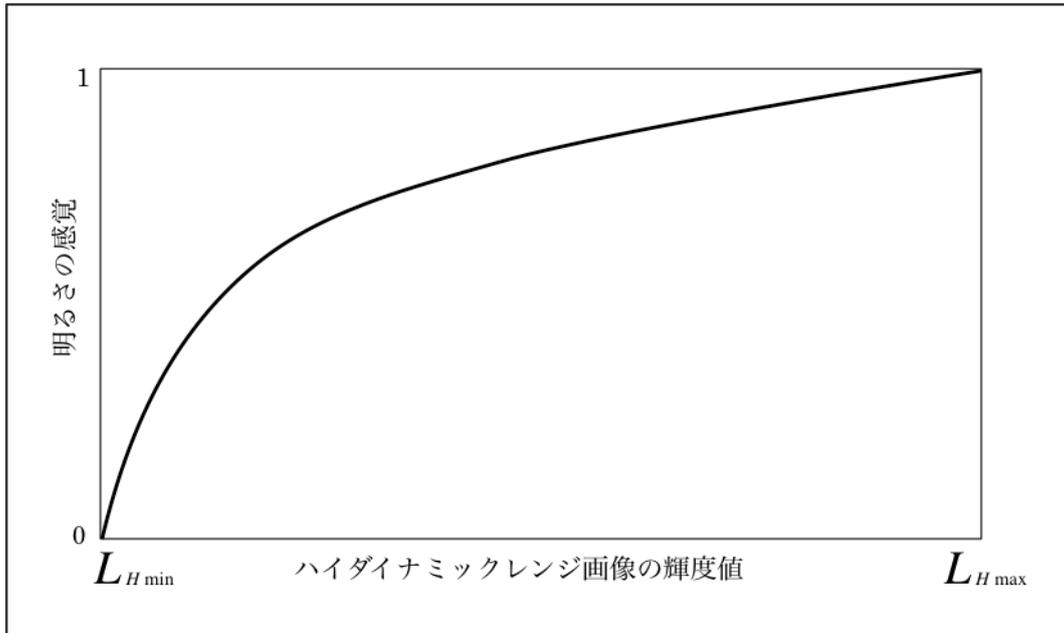


図 4.2 ウェーバー・フェヒナーの法則によるハイダイナミックレンジ画像の輝度値と明るさの感覚量の関係

同様に、ディスプレイの輝度 L_d の範囲を $L_{dmin} \sim L_{dmax}$ とする。 L_{dmin} で感じる明るさの感覚量を $B_d = 0$ 、 L_{dmax} で感じる明るさの感覚量を $B_d = 1$ とする。そして、輝度 L_d と明るさの感覚量 B_d の間にウェーバー・フェヒナーの法則を用いると、 $B_d = k \cdot \log L_d + a$ となる。 k と a を、 $0 = k \cdot \log L_{dmin} + a$ かつ $1 = k \cdot \log L_{dmax} + a$ から求め、それらを k_d 、 a_d とすると式(4-4)を得る。この式が表すトーンマッピングの関係を図 4.3 に示す。

$$B_d = k_d \cdot \log L_d + a_d \dots (4-4)$$

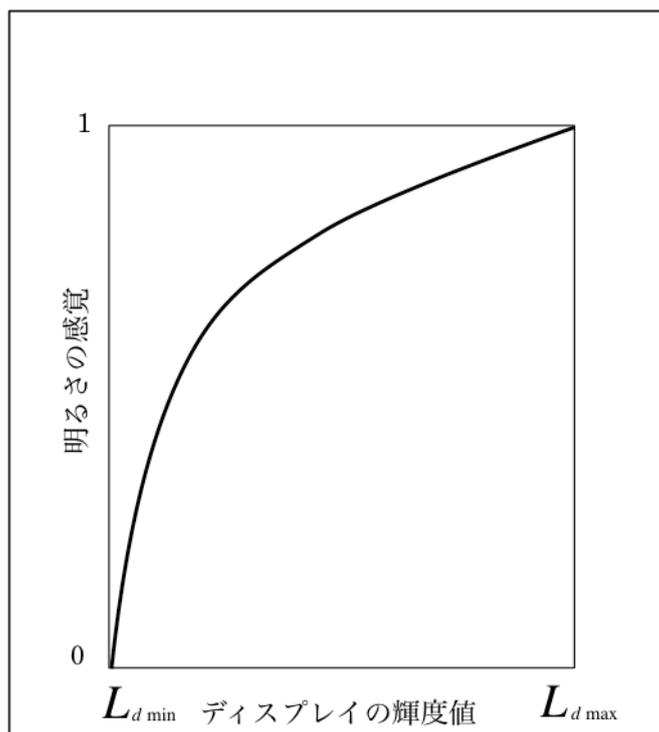


図 4.3 ウェーバー・フェヒナーの法則によるディスプレイの輝度値と明るさの感覚量の関係

ハイダイナミックレンジ画像に感じる明るさ(式(4-3))と、ディスプレイに感じる明るさ(式(4-4))を等しいと仮定すると、式(4-5)となる。図 4.4 にこの関係を表す。

$$B_H = B_d \dots (4-5)$$

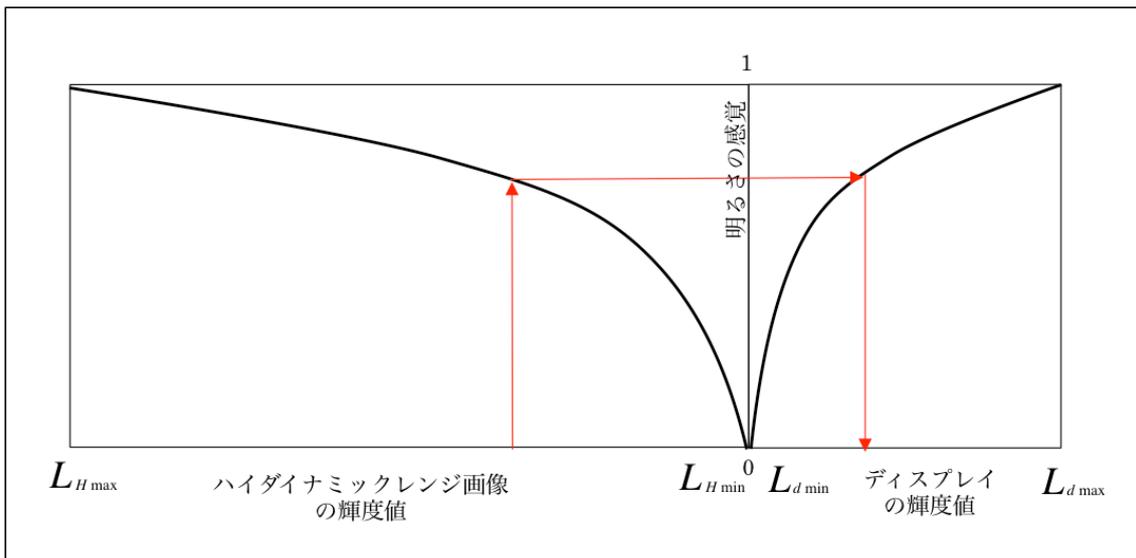


図 4.4 ハイダイナミックレンジ画像の輝度値とディスプレイの輝度値の関係

式(4-5)から式(4-6)を得る。

$$k_H \cdot \log L_H + a_H = k_d \cdot \log L_d + a_d \quad \dots (4-6)$$

log をはずすと式(4-7)が得られる。これがウェーバー・フェヒナーの法則から導かれるトーンマッピング式である。

$$L_d = e^{\frac{k_H \log L_H + a_H - a_d}{k_d}} \quad \dots (4-7)$$

一つのハイダイナミックレンジ画像を式(4-7)でトーンマッピングする時のパラメータは L_{dmax} と L_{dmin} である。図 4.5 にこれを変化させたときの表示画像の例を示す。ディスプレイのダイナミックレンジを小さく設定することで、低輝度域を持ち上げる効果が大きくなるのがわかる。



図 4.5 ウェーバー・フェフィナーの法則から導いたトーンマッピングによる画像の例

4.3 Drago のトーンマッピング

ハイダイナミックレンジ画像のトーンマッピング手法として Drago の方法が知られている[3]。Drago のトーンマッピングの基本的な性質は、画素の輝度に応じて適応的に対数の基数となるパラメータ値を調節することである。

Drago のトーンマッピング式を式(4-8)に示す。

$$L_d = \frac{L_{dmax} / 0.01}{\log_{10}(L_{max} + 1)} \cdot \frac{\log(L + 1)}{\log(2 + ((\frac{L}{L_{max}})^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}) \cdot 8)} \dots (4-8)$$

L_{dmax} はディスプレイの最大輝度、 L_{max} はシーンの最大輝度、 L はシーン中の輝度である。 $L_{dmax} / 0.01$ はディスプレイの輝度に合わせるための項であるから、以下の検討では無視する。その場合、 L_d は 0~1 の値になる。 b は高輝度域のレンジ圧縮性と低輝度域でのコントラストをコントロールするパラメータである。式(4-8)の右辺第2項の分母は複雑な式になっているが、後で説明するように、 b を適切に設定することで、 $\log 2 \sim \log 10$ 範囲の値となり、効果としては輝度を対数変換する時の基数を調整する。Drago のトーンマッピングは、全体として、コントラストと暗部の詳細な絵柄を維持することができる。

式(4-8)は、Stockham[4]の式を基にしている。式(4-9)が Stockham の式である。ここで、

Stockham の式とウェーバー・フェヒナーの式の間係を説明する。

$$L_d = \frac{\log(L+1)}{\log(L_{\max}+1)} \quad \dots (4-9)$$

式(4-9)でLに1を足しているのは、L=0でL_d=0とするためである。対数の性質よりlog1=0であり、1を足さなければ、L < 1に対してlog(L)が負の値になる。log(L_{max}+1)で割っているのは、L = L_{max}でL_d = 1とするためである。Stockhamの式はシーンの輝度を対数変換し、その結果を0~1の範囲に正規化する式である。したがって、Stockhamの式もウェーバー・フェヒナーの法則に基づく式であると言える。

式(4-10)は式(4-8)の一部、式(4-11)は式(4-10)の一部である。これらについて説明する。

$$\log\left(2 + \left(\frac{L}{L_{\max}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \cdot 8\right) \quad \dots (4-10)$$

$$\frac{\log(b)}{\log(0.5)} \quad \dots (4-11)$$

式(4-11)はb = 1.0のとき0、b = 0.5のとき1となる。したがって、式(4-10)は0.5 ≤ b ≤ 1.0の範囲に対してL = L_{max}でlog2~log10となる。式(4-10)が式(4-8)の右辺第2項の分母になっている。第2項の形から、対数の基数変換の働きをしていることがわかる。

図4.5に、輝度の範囲を0~1000に設定し、bをパラメータとしたDragoのトーンマッピングの式をグラフ化する。b = 1.0で式(4-8)は式(4-12)となり、Stockhamの式と同じになる。

$$L_d = \frac{\log_{10}(L+1)}{\log_{10}(L_{\max}+1)} \quad \dots (4-12)$$

bを1.0よりも小さくすると、低輝度域をより持ち上げ、高輝度域をさらに圧縮する。b = 0.7を超えるとディスプレイの輝度が1.0を超える部分が発生する。Dragoのトーンマッピングのパラメータbは概ね0.7 ≤ b ≤ 1.0で使用する。

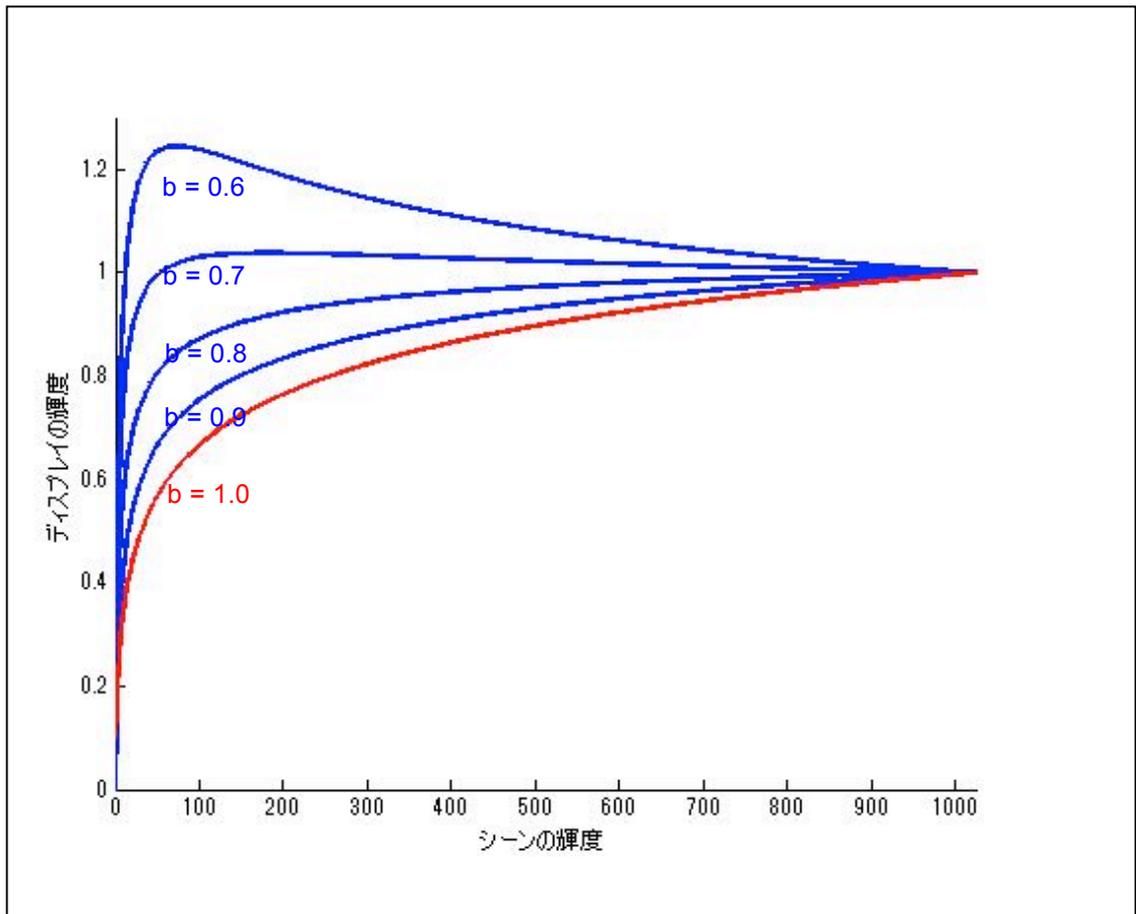


図 4.6 Drago の式においてパラメータ b を変更したトーンマッピング

Drago のトーンマッピングの効果を図 4.7 の画像を用いて説明する。(a)は $b = 1.5$ 、(b)は $b = 1.2$ 、(c)は $b = 1.0$ 、(d)は $b = 0.8$ でトーンマッピングした画像である。 b の値が小さくなるにつれ、全体的に明るくなっている。これは、低輝度域が強調され、高輝度域が圧縮された効果を示す。



図 4.7 Drago のトーンマッピングの効果を示す画像

4.4 視覚特性を考慮したトーンマッピングによる表示

図 4.8 は、画像にウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングを適用した画像である。図 3.5 に示した、輝度リニアなトーンマッピングと比較すると、大幅に見やすくなっている。一例として、tree-hdr の画像を比較する。比較した画像を図 4.9 に示す。tree-hdr は照明を消した室内で、クリスマスツリーの電飾だけを点灯させて撮影した。輝度リニアなトーンマッピングでは、電飾がわずかに見える程度である。実際には、電飾は十分に明るく、その照明によって付近が照らされており、室内の状態が確認できた。ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングでは、クリスマスツリーの全体像が見え、室内の状態も十分に観察ができる。

次いで、ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングと Drago のトーンマッピングを比較した。比較した画像を図 4.10 に示す。図 4.10 では、Drago のトーンマッピングのパラメータは、一番見やすいと感じる値に設定した。比較すると、ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングの場合、headlight-HDR と tree-HDR は、実シーンと同じように見える画像を取得できた。memorial-HDR は、鮮明さがなく、くすんだ画像となった。Drago のトーンマッピングの場合、headlight-HDR と tree-HDR は、明るい画像だが全体的に白く、くすんだ画像となった。memorial-HDR は、実シーンと同じように見える画像を生成できた。



$$L_{dmax} = 250, L_{dmin} = 100$$



$$L_{dmax} = 250, L_{dmin} = 100$$



$$L_{dmax} = 250, L_{dmin} = 10$$

図 4.8 ハイダイナミックレンジ画像にウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングを適応した画像



図 4.9 比較画像 (左図)輝度リニアなトーンマッピング
(右図) ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング



図 4.10 比較画像 (左) ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング
 (右)Drago のトーンマッピング

4.5 考察

人間の視覚特性を考慮したトーンマッピングを、ウェーバー・フェヒナーの法則から導いた。次いで、Drago のトーンマッピングに用いられている式を解析した。その結果、その元になっている Stockham の式がウェーバー・フェヒナーの法則から導いた式と同じ意味であることがわかった。Drago の式は、Stockham の式に、調整項を加えた形になっている。この調整項を適切に設定することで、さまざまなダイナミックレンジの画像に対応することが可能である。したがって、Drago の式は、ウェーバー・フェヒナーの法則から導いた式を拡張した方式である。

ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングは、ダイナミックレンジが広い画像で好ましい結果が得られた。だが、非常に広いダイナミックレンジでは、鮮明さがなく、くすんだ画像となり、好ましい結果が得られなかった。

Drago のトーンマッピングは、画素の輝度に応じて適応的に対数の基数とパラメータ値を調節することで、好ましい画像を得られる。しかし、ダイナミックレンジが広い画像では、全体的に白く、くすんだ画像となった。非常にダイナミックレンジ広い画像では、実シーンと同じような画像が得られ、好ましい結果となった。

第5章 結論

ハイダイナミックレンジ画像のトーンマッピングについて研究した。トーンマッピングの手法として、輝度リニアなトーンマッピング、指数対数型トーンマッピング、人間の視覚に関するウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング、Dragoのトーンマッピングを比較した。

画像のダイナミックレンジがそれほど広くない場合には、人間の視覚特性を考慮しない、輝度リニアなトーンマッピングで好ましい画像が表示できた。だが、ダイナミックレンジが広い場合は、画像の大部分が暗くなってしまい見やすい画像が得られなかった。ハイダイナミックレンジ画像の輝度とディスプレイの輝度を直接対応させても好ましい結果が得られないことがわかった。

画像のダイナミックレンジが広い場合、トーンマッピングを適用するには、人間の視覚特性を考慮しなければならないことがわかった。人間の視覚特性を考慮したトーンマッピングとして、ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングとDragoのトーンマッピングがある。

ダイナミックレンジが広い画像の場合、ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングが最も好ましい画像を生成した。ダイナミックレンジが非常に広い場合、Dragoのトーンマッピングが最も好ましい画像を生成した。

課題として、ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングは、人間の視覚特性を考慮しているので、全ての画像に対して好ましい画像が得られると予想したが、非常にダイナミックレンジが広い画像の場合には、好ましい画像が得られなかった。Dragoのトーンマッピングは、既存のトーンマッピングであるから、こちらも全ての画像に対して好ましい画像が得られると予想したが、必ずしも好ましい画像が得られなかった。

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, Vol66, No. 1, pp.61-64, 2012.
- [2]P. E. Debevec and J. Malik, “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,” Proceedings of SIGGRAPH’ 97, pp.369-378, 1997.
- [3]F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen and N. Chiba, 「Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes」, EUROGRAPHICS 2003, Volume22(2003), Number 3.
- [4]T. G. Stockham. Image Processing in the Context of a Visual Model, Proceedings of the IEEE, 60:828-842.

謝辞

本研究を遂行し、学位論文をまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました、蚊野 浩教授に感謝いたします。

付録 1

プログラムの開発には、Matlab を使用した。表 付.1

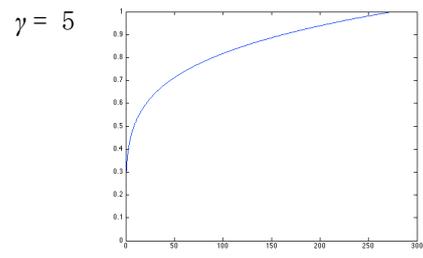
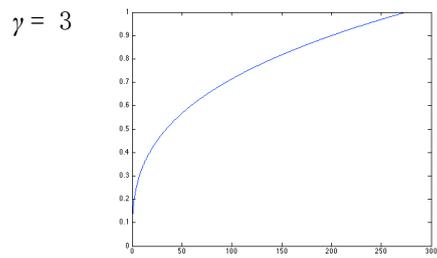
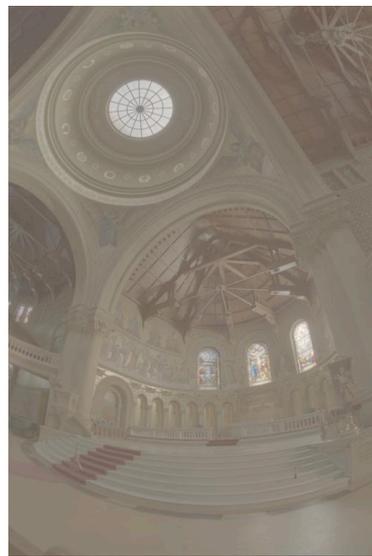
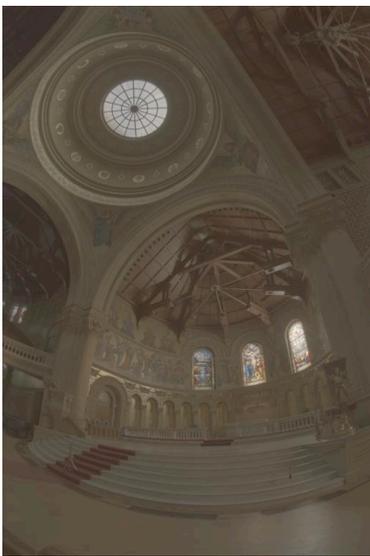
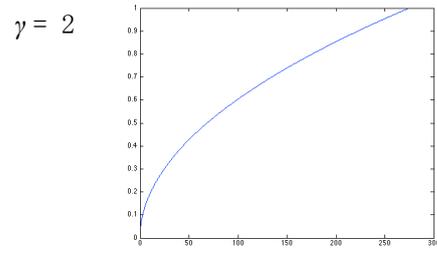
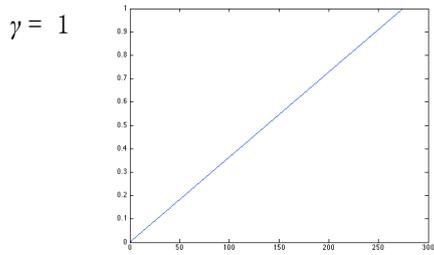
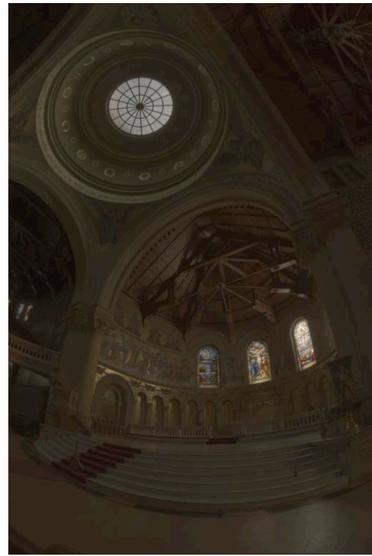
表 付.1 作成したプログラムの一覧と機能

プログラム名	機能
Tonemapping.m	ハイダイナミックレンジ画像を入力し、トーンマッピングを実行する。
Line_func.m	輝度リニアなトーンマッピングを適用する関数。
Expo_func	逆指数関数変換を適用する関数。
S_func.m	ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピングを適用する関数。
Drago_func.m	Drago のトーンマッピングを適用する関数。

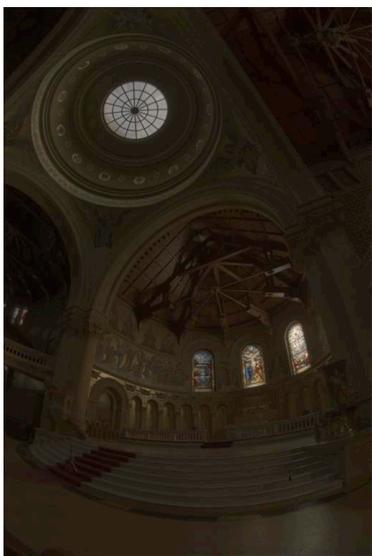
付録 2

3 種類の画像に対して、指数対数型トーンマッピング、ウェーバー・フェヒナーに基づくトーンマッピング、Drago のトーンマッピングを、さまざまなパラメータ適用した例を示す。

指数対数型トーンマッピング

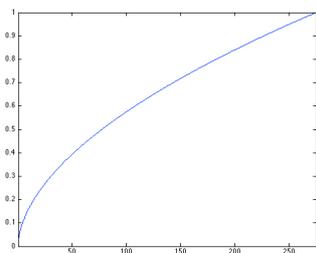


ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング



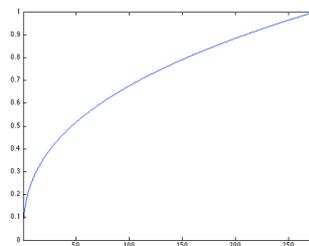
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 0.1$$



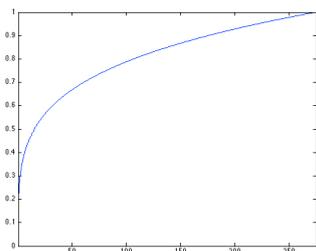
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 1$$



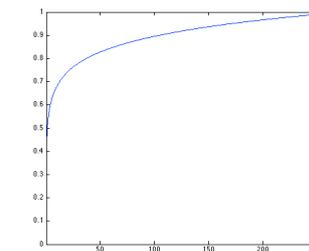
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 10$$



$$L_{dmax} = 250$$

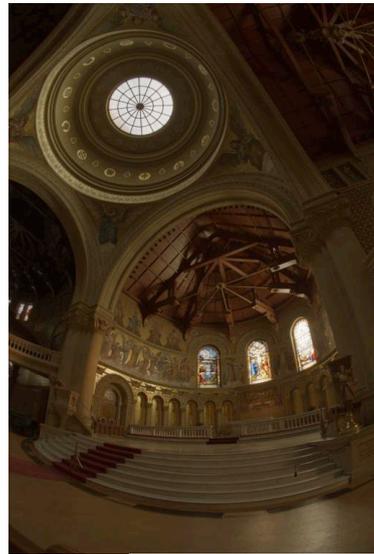
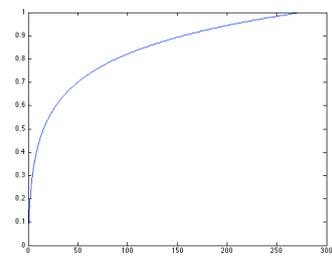
$$L_{dmin} = 100$$



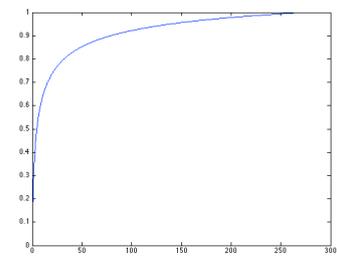
Drago のトーンマッピング



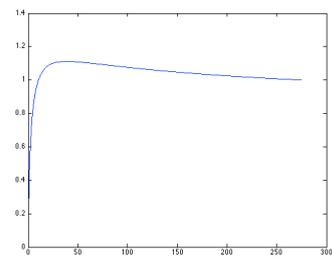
$b = 1.0$



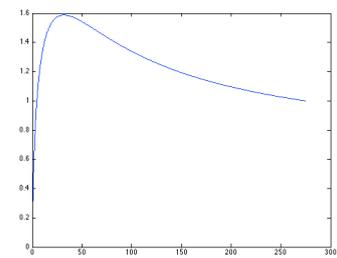
$b = 0.8$



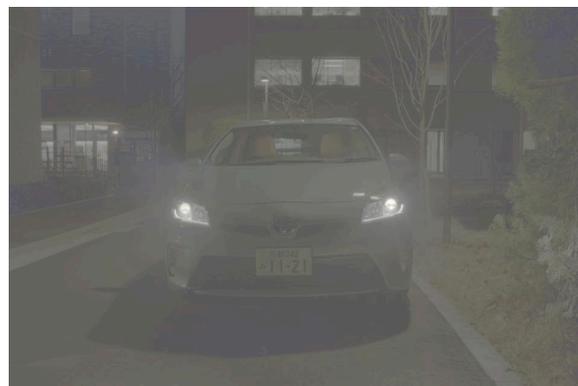
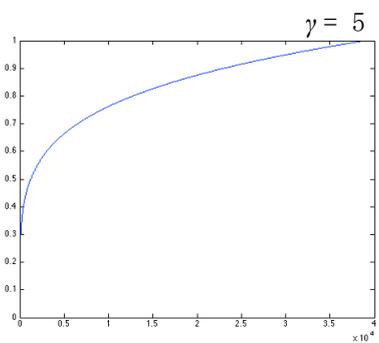
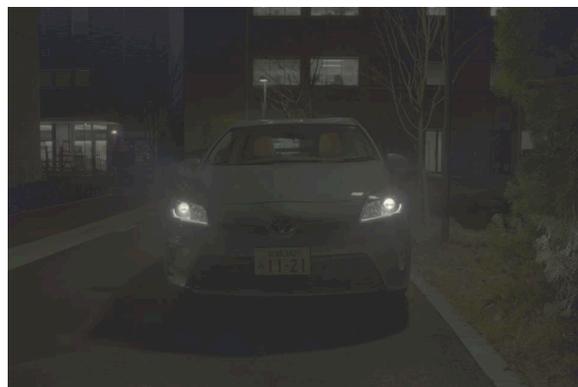
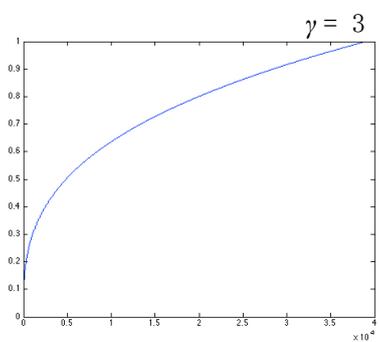
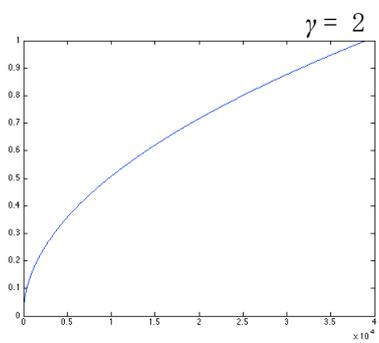
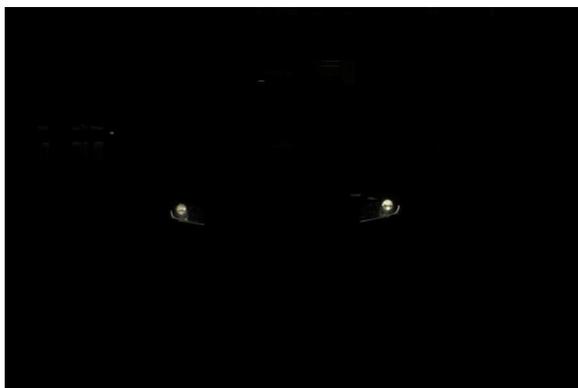
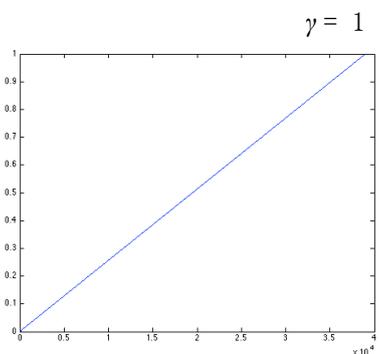
$b = 0.6$



$b = 0.4$



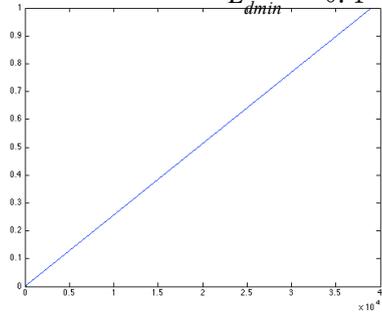
指数対数型トーンマッピング



ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング

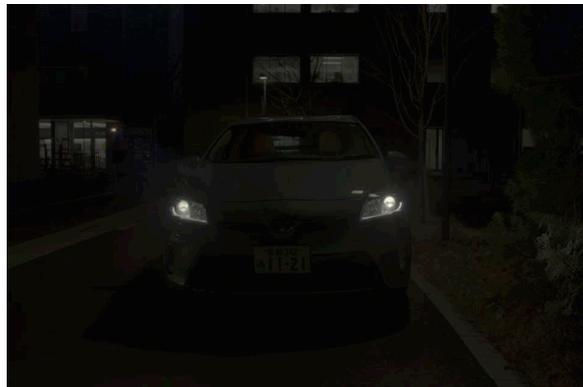
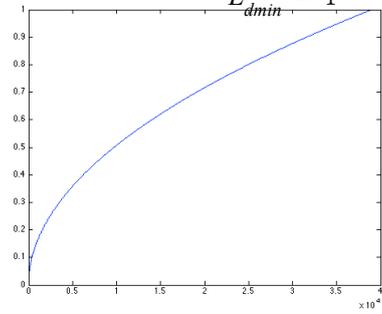
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 0.1$$



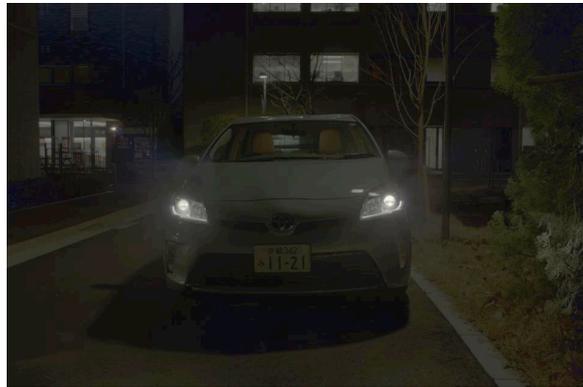
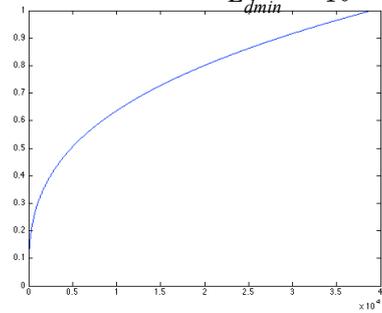
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 1$$



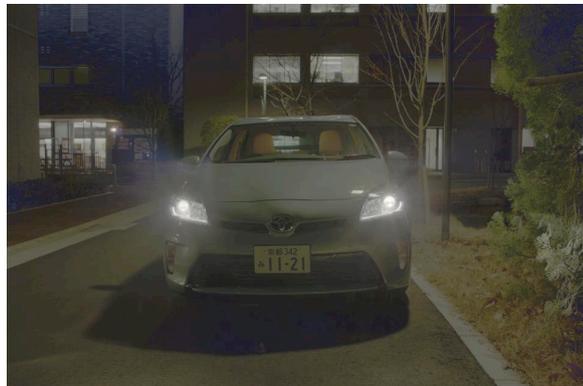
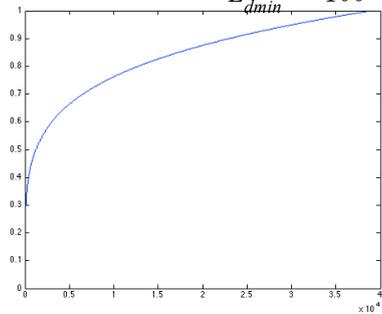
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 10$$



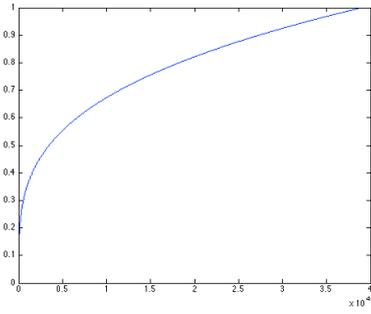
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 100$$

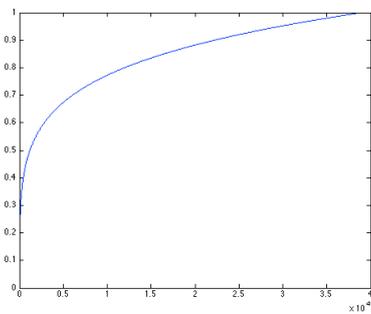


Drago のトーンマッピング

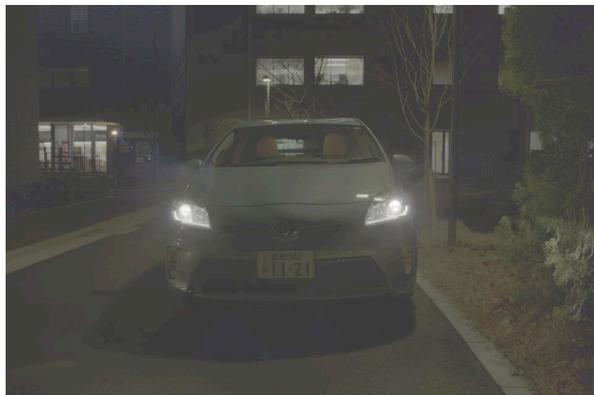
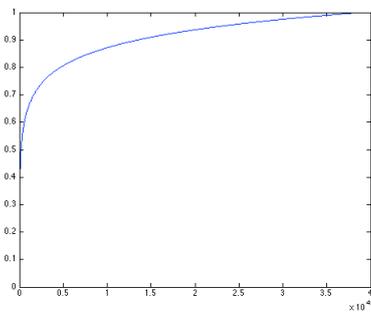
$b = 1.5$



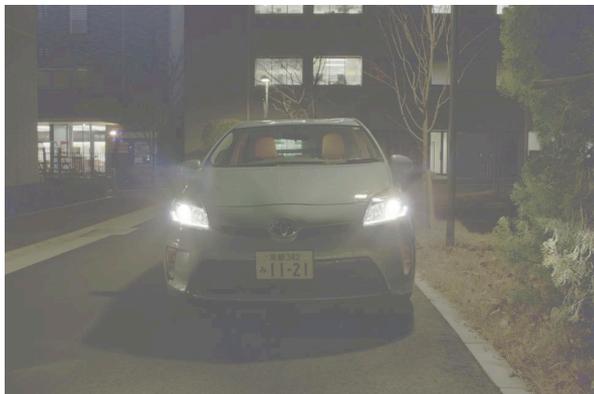
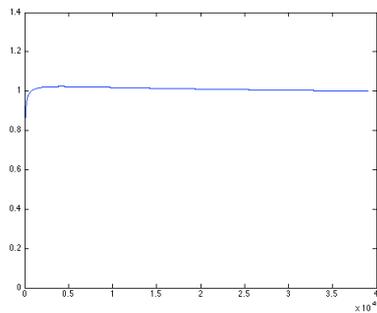
$b = 1.2$



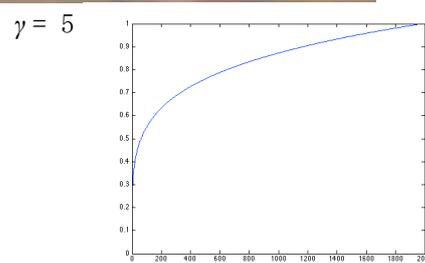
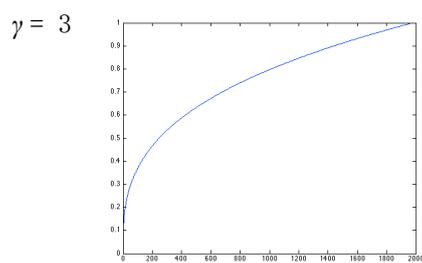
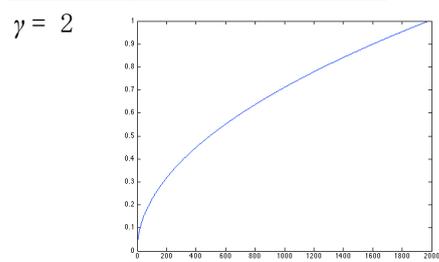
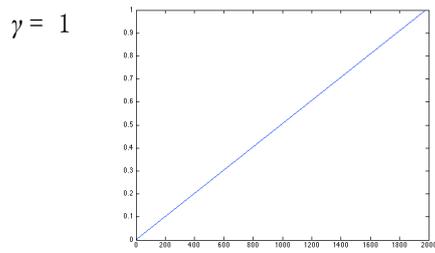
$b = 1.0$



$b = 0.8$



指数対数型トーンマッピング

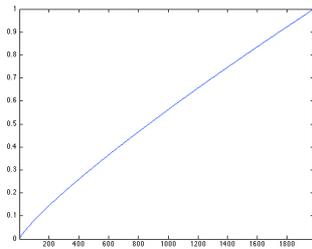


ウェーバー・フェヒナーの法則に基づくトーンマッピング



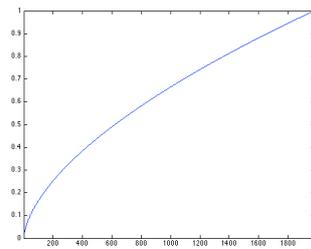
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 0.1$$



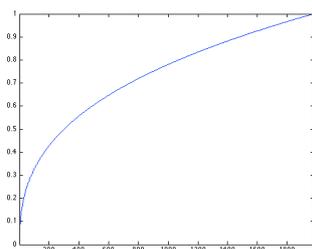
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 1$$



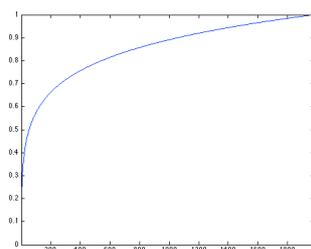
$$L_{dmax} = 250$$

$$L_{dmin} = 10$$



$$L_{dmax} = 250$$

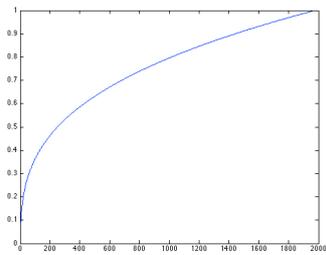
$$L_{dmin} = 100$$



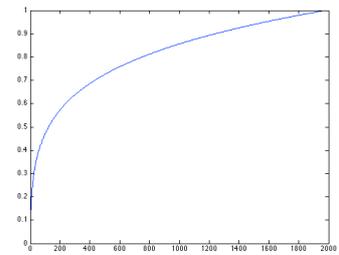
Drago のトーンマッピング



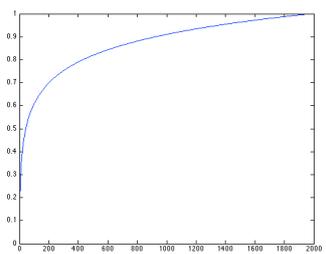
$b = 1.5$



$b = 1.2$



$b = 1.0$



$b = 0.8$

