

視覚特性を考慮したハイダイナミックレンジ画像の
表示手法に関する研究
(A Study on Displaying High Dynamic Range
Images Considering Human Visual Perception)

広島大学大学院工学研究科 情報工学専攻
知的システムモデリング研究室
三嶋 道弘

概要

リアルな画像の生成と表示はコンピュータグラフィクス（CG）において、重要な課題であり、特に次の2点を入念に取り扱う必要がある。すなわち、物理現象に基づいた光学モデルと、心理学・生理学現象に基づいた視覚特性モデルである。前者の光学モデルは、物理法則に基づいて眼に入射するまでの光の伝達経路を追跡し、入射の際の光の強度を計算する。これは、約半世紀にわたりCGの主要課題として研究が行われてきた。一方、後者の視覚特性モデルは、眼に入射した光が、眼球内部を通過し、視細胞の光受容体で電気信号に変換され、視神経系に伝わり知覚されるまでの応答を模擬する。CG研究、特に前者の研究領域の成熟により、近年、後者の視覚特性モデルが大きな注目を集めるようになってきた。

視覚特性モデルを利用することで、実際にそのものを見たときと同じ印象を与えるようにCG画像をディスプレイに表示させることができる。例えば、人が光を感じる際、知覚する輝度ダイナミックレンジを変化させている特性が利用される。物理特性に基づく光学モデルを用いて計算されたCG画像の各画素の輝度は、現実世界と同様に、輝度ダイナミックレンジが大きくなる。そのため、表示には、従来よりもダイナミックレンジの広いディスプレイが必要になる。しかし、そのようなディスプレイは未だ高価であり、また、現実の輝度幅に比べ、十分な輝度帯域を持っているとは言い難い。この問題を解決するために、上述した特性をモデル化し、利用することで、ディスプレイに現実と同様な印象を与えるように表示できる。また、視覚特性モデルを利用することで、単なる光学シミュレーションだけでは表現できない現象をも考慮することができる。本論文は、視覚特性モデルを利用した表示手法に関して研究を行った成果をまとめたものである。

本論文は次の構成になっている。第1章では序論として、本研究の目的、研究背景、そして、提案手法の特徴・独創的な点を述べ、本研究の位置づけを明らかにする。第2章では、薄明視を考慮した表示手法を提案する。これは薄暗いシーンの色知覚を再現するための手法である。人は周囲の明るさによって、感じる色に変化が生じる。具体的には周囲が暗くなると長波長の光を感じ難くなる。提案手法は、周囲の明るさによる色の知覚特性を、心理物理学での実験データに基づいてモデル化した。特に、昼間の明るい環境と、星空の下のような暗い環境の間である、薄明視の状況下での色の見え方の変化を考慮した表示手法を提案している。第3章では、高輝度光源を見た場合に生じる、残像を表現する手法を提案する。残像はその発生原因は未だ完全には解明されていないが、夜間の車の運転などで知覚される身近な現象である。画像中の高輝度光源の存在していた位置に残像を付加し、物理法則に基づく光学モデルだけでは表現できない現象を再現する。提案手法は、残

像の色が時間経過に伴って変化していく様子を，心理物理学での実験データに基づいてモデル化した．静止する高輝度光源から発生する残像は，時間が経過するにつれて様々な色に変化する．さらに，光源が移動した場合に光源から尾を引くように発生する残像の表示方法についても提案している．第4章では，物理法則に基づく光学モデルにより計算された結果を，輝度ダイナミックレンジだけでなく，分光分布もあわせて，ハイダイナミックレンジ分光（High Dynamic Range Spectral: HDRS）画像として記録し，視覚特性を考慮して高速に表示する手法を提案する．HDRS 画像は，計算結果を詳細に記録できるが，ファイル容量は大きくなり，通常の RGB ディスプレイに表示するには多くの時間がかかる．提案手法は，画像圧縮によりファイル容量を削減し，かつ，視覚特性を考慮して高速に表示を行うことができる．最後に第5章で，本研究で得られた成果や今後の課題を述べ，まとめとする．

目次

第1章 序論	4
1.1 研究目的	4
1.2 眼の構造と視覚伝達路	7
1.2.1 水晶体	8
1.2.2 虹彩	8
1.2.3 網膜	8
1.2.4 視覚伝達路	12
1.3 視覚特性	14
1.3.1 Threshold Versus Intensity Function	14
1.3.2 Response Function	15
1.3.3 TVI Function と Response Function の関係	16
1.3.4 等価明度	18
1.3.5 残像	19
1.4 二段階モデルと表色系	21
1.4.1 LMS 表色系	21
1.4.2 反対色表色系	22
1.4.3 二段階モデル	22
1.5 ハイダイナミックレンジ画像	23
1.5.1 ハイダイナミックレンジ画像の作成	23
1.5.2 ハイダイナミックレンジ分光画像	25
1.5.3 ハイダイナミックレンジ画像の利用	27
1.6 トーンマッピング手法	28
1.6.1 グローバルトーンマッピング手法	29
1.6.2 ローカルトーンマッピング手法	29
第2章 薄明視における視覚特性を考慮したトーンリプロダクション	32
2.1 はじめに	32
2.2 関連研究	33
2.3 視覚特性	35

2.3.1	明るさによる色相の知覚の変化	35
2.3.2	CIE $L^*a^*b^*$ 表色系と等価明度	37
2.4	提案手法	39
2.4.1	提案手法の概要	39
2.4.2	等価明度曲線の近似関数	39
2.4.3	色相の調整	40
2.5	結果	40
2.5.1	有効性の検証	41
2.5.2	さまざまなシーンの表示に応用	44
2.5.3	計算時間	46
2.6	まとめ	46
第3章	視覚特性に基づいた残像表示	47
3.1	はじめに	47
3.2	関連研究	49
3.3	提案手法	50
3.3.1	提案手法の概要	51
3.3.2	入力画像	53
3.3.3	基準光の設定	53
3.3.4	色差の計算	53
3.3.5	輝度の変化	54
3.3.6	色相の変化	55
3.3.7	残像の生成	56
3.3.8	色域の補正	59
3.3.9	ぼけの表現	59
3.3.10	暗順応	59
3.4	移動光源に対する残像	60
3.5	結果と考察	62
3.5.1	有効性の検証	62
3.5.2	提案手法による残像の色変化	64
3.5.3	様々なシーンを適用	66
3.5.4	移動する光源を適用	69
3.6	まとめ	69

第 4 章	ハイダイナミックレンジ分光画像の効率的表示	71
4.1	はじめに	71
4.2	ハイダイナミックレンジ分光分布画像表示	72
4.2.1	画像ファイル容量	72
4.2.2	RGB 変換	72
4.2.3	輝度ダイナミックレンジの調整	72
4.2.4	ディスプレイの解像度	73
4.3	関連研究	73
4.3.1	分光情報の記録	73
4.3.2	分光情報の RGB 変換と表示	74
4.3.3	トーンマッピング手法	74
4.4	提案手法	75
4.4.1	提案手法の概要	75
4.4.2	HDRS 画像の圧縮	75
4.4.3	HDRS 画像の表示	76
4.4.4	トーンマッピングの実現	77
4.5	結果と考察	79
4.5.1	記録の精度と圧縮率の関係	79
4.5.2	表示時間	81
4.6	まとめ	86
第 5 章	結論	88
付 録 A	最小二乗法を用いたパラメータの決定	91
付 録 B	異なる条件下での残像	92
B.1	刺激光の照射時間を変化させた場合の残像の輝度変化	92
B.2	刺激光の視野角を変化させた場合の残像の色相変化	92
B.3	刺激光の照射時間を変化させた場合の残像の色相変化	95
付 録 C	ウェーブレット変換を用いた RGB 表色系への高速変換	98
	参考文献	106
	謝辞	107

第1章 序論

1.1 研究目的

リアルな画像の生成と表示はコンピュータグラフィクス (Computer Graphics: CG) において、重要な課題であり、特に次の2点を入念に取り扱う必要がある。すなわち、物理現象に基づいた光学モデルと、心理学・生理学現象に基づいた視覚特性モデルである。前者の光学モデルは、物理法則に基づいて眼に入射するまでの光の伝達経路を追跡し、入射の際の光の強度を計算する。これは、約半世紀にわたり CG の主要課題として研究が行われてきた。近年、物理現象に基づく光学モデルを用いることにより、高精度な画像を生成することが可能となってきた。一方、後者の視覚特性モデルは、眼に入射した光が、眼球内部を通過し、視細胞の光受容体で電気信号に変換され、視神経系に伝わり知覚されるまでの応答を模擬する。CG 研究、特に前者の研究領域の成熟により、近年、後者の視覚特性モデルが大きな注目を集めるようになってきた。

人は日々、輝度ダイナミックレンジの広い環境の中で生活している。図 1.1 に実世界の輝度ダイナミックレンジと、視覚系が対処できる輝度ダイナミックレンジ、通常のディスプレイが表示できる輝度ダイナミックレンジを示す。実世界の輝度ダイナミックレンジは約 10^{14} 程度である。星空の下では約 $10^{-3}[\text{cd}/\text{m}^2]$ であり、また、昼間屋外の輝度は約 $10^5[\text{cd}/\text{m}^2]$ である。一方、人が一度に感じられる輝度ダイナミックレンジは 10^5 程度であるといわれている。眼は周囲の明るさに順応することで、その対処できる輝度帯域を大きくしている。

これまでに、実世界の輝度を取得し、画像として記録する様々な手法が開発されてきた [1]。その中で代表的な手法は、露光時間の異なる複数枚の画像から、カメラレスポンスカーブを求め、それを用いて輝度を計算する手法である。そして、得られた輝度値はハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range: HDR) 画像として記録される。

物理特性に基づく光学モデルを用いて計算された、CG 画像の輝度ダイナミックレンジも、現実世界と同様に大きくなる。そのため、CG により計算された輝度や、実世界の輝度を記録した HDR 画像を直接表示するには、ダイナミックレンジの広いディスプレイが必要になる。しかし、そのようなディスプレイは高価であり、一般には普及していない。また、実世界の輝度ダイナミックレンジに比べて、まだ十分な輝度帯域を持っているとは言い難い。

HDR 画像を、 10^2 程度の輝度ダイナミックレンジしか持たない、通常のディスプレイに表示するには、輝度ダイナミックレンジを、ディスプレイに適合するダイナミックレンジに変換する必要がある。しかし、単に輝度ダイナミックレンジをスケール倍して変換するだけでは自然な印象を与える表示を得ることはできない。これは、トーンリプロダクション問題と呼ばれる [2]。

トーンリプロダクション問題の解決手段として、視覚特性モデルが利用される。視覚特性モデルは実世界の輝度に対する視覚特性を模擬する。例えば、人はシーンを見る際、すべての輝度を同等に感じるのではなく、周囲の明るさに順応することで、感じる輝度を変化させるという特性を持つ。この特性をディスプレイ表示に利用することで、HDR 画像を、そのシーンを見たときと同じ印象を与えるように表示させることができる。さらに、視覚特性モデルを利用することで、単なる光シミュレーションだけでは表現できない現象をも考慮することができる。本研究では、そのような現象にも着目する。

本研究の目的は、物理現象に基づいた光学モデルから得られた計算結果に、視覚特性モデルを適用し、リアルな画像表示に近づけることである。そして、本論文では、HDR 画像をディスプレイの輝度ダイナミックレンジを用いて表示した際、実際のシーンに近い印象を与える画像を生成する手法を提案する。これは、将来的に、ドライブシミュレーションなどのシミュレーション分野に活用できる。

シミュレーションで重要なことは、実際のシーンの見え方、そのシーンで起こりうる現象を正確に再現することである。現在開発されている視覚特性モデルは、HDR 画像の輝度ダイナミックレンジの調整を主な目的としている。一方で、色相の扱いについては研究されはじめたばかりである。特に、周囲の環境の明るさによって変化する色見え方をモデル化したものは、未だに色再現性が不十分である。また、実際のシーンで起こる現象の一つに残像がある。残像は暗いシーンで対向車のヘッドライトを見た場合などに発生する身近な現象である。それにもかかわらず、残像を表現するモデルは、残像の発生原因が未だに解明されていないため、CG 分野では研究がほとんど行われていない。さらに、視覚特性モデルを用いて画像表示を行うためには、正確な光学シミュレーション結果が必要である。この結果を詳細に記録するためには、従来の RGB 画像では、不十分である。これは、光学シミュレーションに用いられる光学モデルは、RGB 3 成分ではなく、さらに多くの分光成分を利用し、物理現象に基づいた、正確な光の強度を計算するからである。このような精度の高い記録のためには、大きなファイル容量が必要であり、また、表示のために時間も多くかかる。そのため、できるだけ小さなファイル容量で、かつ、表示に時間がかからない手法が望まれる。

本論文は、視覚特性モデルを利用し、上述した問題に対処した表示方法に関して、研究を行った成果をまとめたものである。第 1 章では序論として、本研究の目的、研究背景、

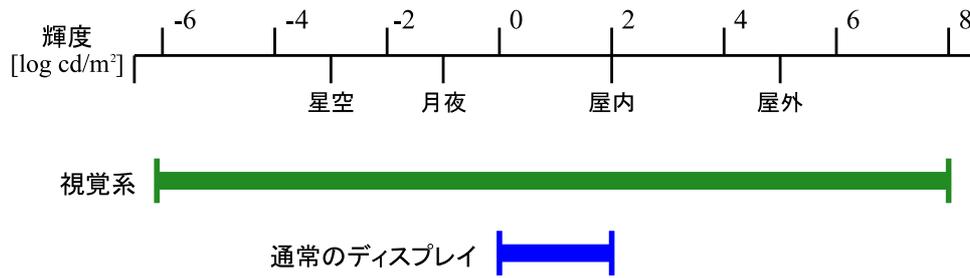


図 1.1: 実世界の輝度幅と視覚系・ディスプレイが対処できる範囲 (出展：文献 [3]).

そして、提案手法の特徴・独創的な点を述べ、本研究の位置づけを明らかにする。第2章では、薄明視の状態における、周囲の明るさによる色合いの変化を表現する手法を提案する。第3章では、強い光を見た後に発生する生理的な現象である残像を表現する手法を提案する。これらの現象は、いずれも人の視覚特性により発生する現象であるため、物理現象に基づく光学モデルだけでは表現できない。提案手法を、光学モデルによる画像生成手法によって得られた結果に適用することで、より自然な印象を与える表示結果を得ることができる。また、視覚特性モデルは実世界の輝度を入力とするため、入力となるデータの精度が重要となる。第4章では、画像に記録される輝度を従来のRGB表現から拡張し、より精度の高い分光表現として記録する、ハイダイナミックレンジ分光画像とその表示手法を提案する。第2章、第3章、第4章のいずれも、HDR画像をディスプレイ表示する手法について提案する。加えて、第4章では、保存手法についても提案している。第5章で本研究で得られた成果や今後の課題を述べ、まとめとする。

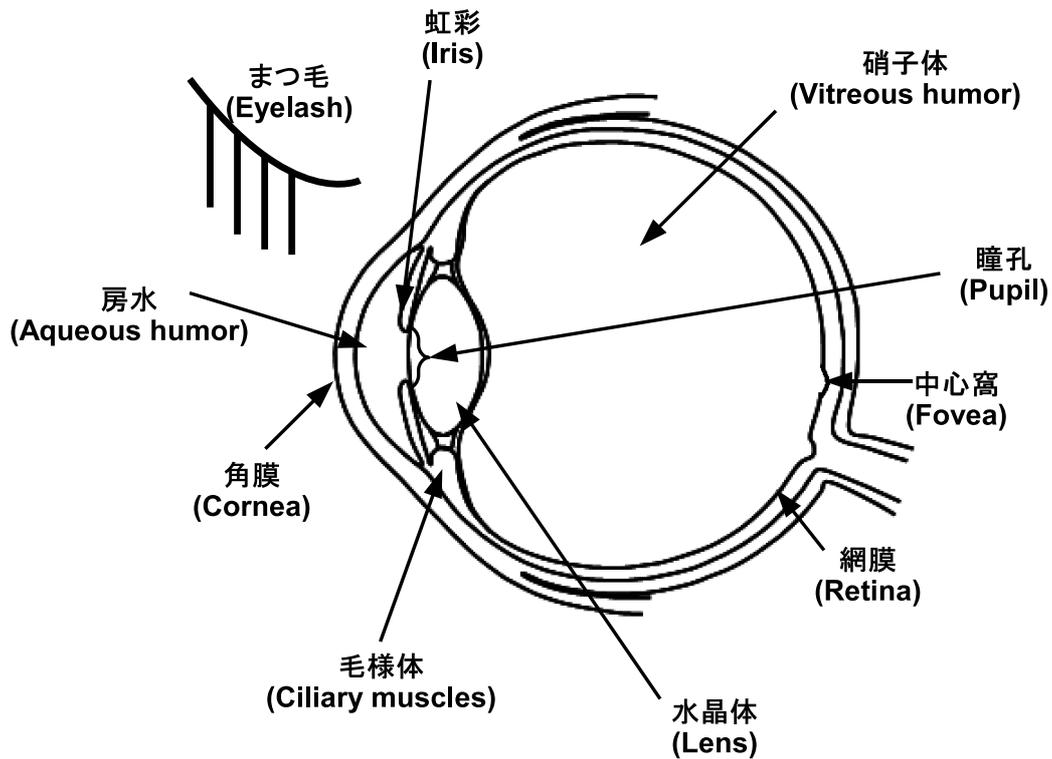


図 1.2: 眼の構造.

1.2 眼の構造と視覚伝達路

眼は、人の持つ器官の中でも、唯一、光を直接知覚することのできる感覚器官である。人の得る情報は 80 パーセント以上が眼からであると言われており、そのため、人は日常的に多くのことを視覚情報に頼って生きていくと言える。本節では、まず、眼の構造を明らかにし、どのような経路をたどり光が網膜に到達するのかを説明する。そして、網膜に達した光が電気信号に変換され、知覚されるまでに通過する視覚伝達路について説明する。これらの、より詳しい説明は文献 [1], [4] に載っている。

眼の断面図を図 1.2 に示す。光は眼球内を、次のような経路で通過する。すなわち、角膜、房水、水晶体、硝子体を通り、網膜に到達する。その際、虹彩は瞳孔の大きさを調節して網膜に到達する光の量を調節する。毛様体は水晶体の厚さを調節し、焦点を網膜上に合わせる働きを持つ。

網膜に到達した光は、視細胞にある光受容体で電気信号に変換される (図 1.3)。その電気信号は、網膜内の細胞に伝わった後、視神経を經由して、眼球外部に出る。

両眼から外部に伝わった信号は、視覚伝達路を通る (図 1.6)。その際、一度、視神経交叉で交わり、再び別れたのち、外側膝状体に送られる。外側膝状体から出た信号は視覚野

に到達する。光から変換された信号が、このような経路で脳に伝わることで人は物体を知覚する。

カメラの構造と人の眼の構造は似た部分がある。ここでは、人の眼とカメラの共通点に着目する。特に、カメラにおけるレンズ、絞り、光センサに対応する、眼の機構である水晶体、虹彩、網膜について説明する。

1.2.1 水晶体

水晶体はカメラにおいてレンズに対応する。水晶体は透過性のある細胞が中心から外へ並ぶような構造で集まってできている。水晶体の厚さは、毛様体によって、網膜上で結像されるように調節される。

1.2.2 虹彩

虹彩はカメラにおいて絞りに対応する。虹彩が伸縮することで、光多通過する孔(瞳孔)の大きさが調節され、瞳孔を通過する光の量が調節される。

1.2.3 網膜

網膜はカメラにおいて光センサに対応する。網膜には2種類の細胞(錐体と桿体)があり、それぞれ光受容体を持つ。光受容体が、受け取った光を電気信号に変換する。その信号は、双極細胞、水平細胞と伝えられ、神経節細胞から視神経に繋がり、眼球の外部に送られる。

錐体と桿体

錐体と桿体は網膜の一番外側に存在する。その形状から、英語名でそれぞれ、Cone, Rodと呼ばれる。錐体と桿体には、光を電気信号に変換する役割を持つ光受容体がある。これらの細胞は、それぞれ、異なる特徴を持つ。まず、その数と分布である。錐体は網膜上に7~800万個あり、中心窩に集中して分布する。一方、桿体は網膜上に1億~1.2億個あり、中心窩の周辺部に分布する。

また、錐体と桿体はそれぞれ、光の明るさに対する感度が異なる。錐体は桿体よりも、明るさに対する感度は劣る。一方、桿体は錐体よりも、明るさに対する感度が高い。このため、例えば、星空を眺めたとき、星を直接見るのではなく、少し視線から外して見る方

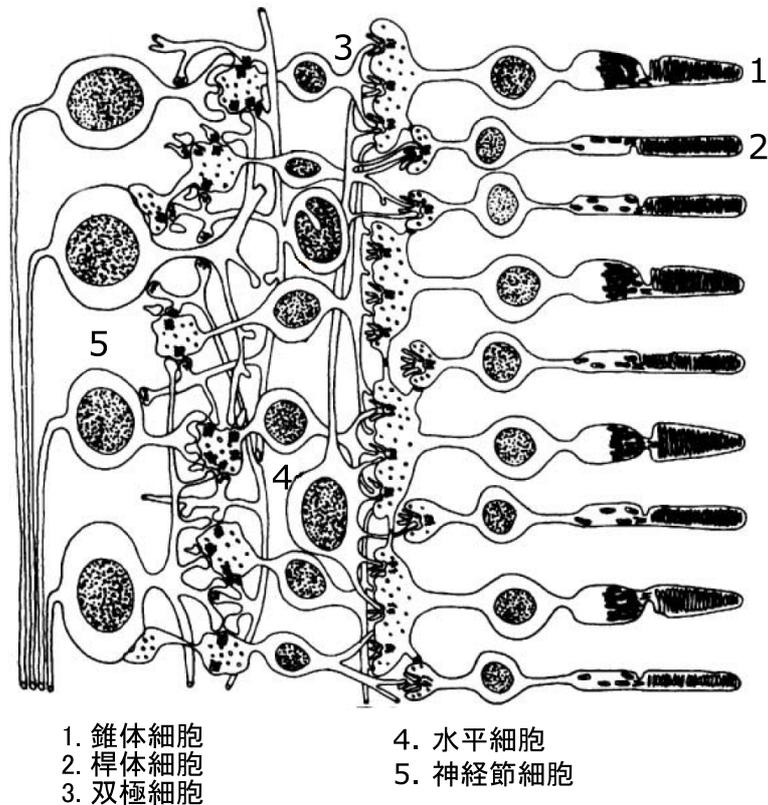


図 1.3: 網膜の断面図 (出展: 文献 [4]).

が星の明るさを捉えやすい。これは視線を外すことで桿体細胞に光が届きやすくなるからである。

さらに、錐体は、3種類存在し、それぞれ異なる波長に感度を持つ。これらは、L錐体、M錐体、S錐体と呼ばれる。L錐体は長波長、S錐体は短波長、M錐体はそれらの中間の波長に感度を持つ。この3種類による応答により、人は色を感じることができる。このL錐体、M錐体、S錐体それぞれ波長に対する感度が異なる性質を基に、1.4節で説明するLMS表色系が考案された。

一方、桿体は1種類だけである。図1.4に各錐体と桿体の波長感度を示す。横軸が波長、縦軸が感度である。赤、緑、青の曲線がそれぞれ、L錐体、M錐体、S錐体の感度である。そして、黒の破線が桿体の感度である。図1.4に示すように、それぞれの感度の最大値をとる波長は、L錐体、M錐体、S錐体でおよそ、565 [nm]、545 [nm]、440 [nm]である。一方、桿体の感度の最大値はおよそ510 [nm]である。

錐体と桿体の働きによって、人の視覚状態は3種類に分類される。これらは**明所視**、**薄明視**、**暗所視**と呼ばれる(図1.10)。周囲が明るい場合、視覚状態は明所視にある。このとき、錐体が働いている。これにより、色の識別を行うことができる。一方、周囲が暗い場

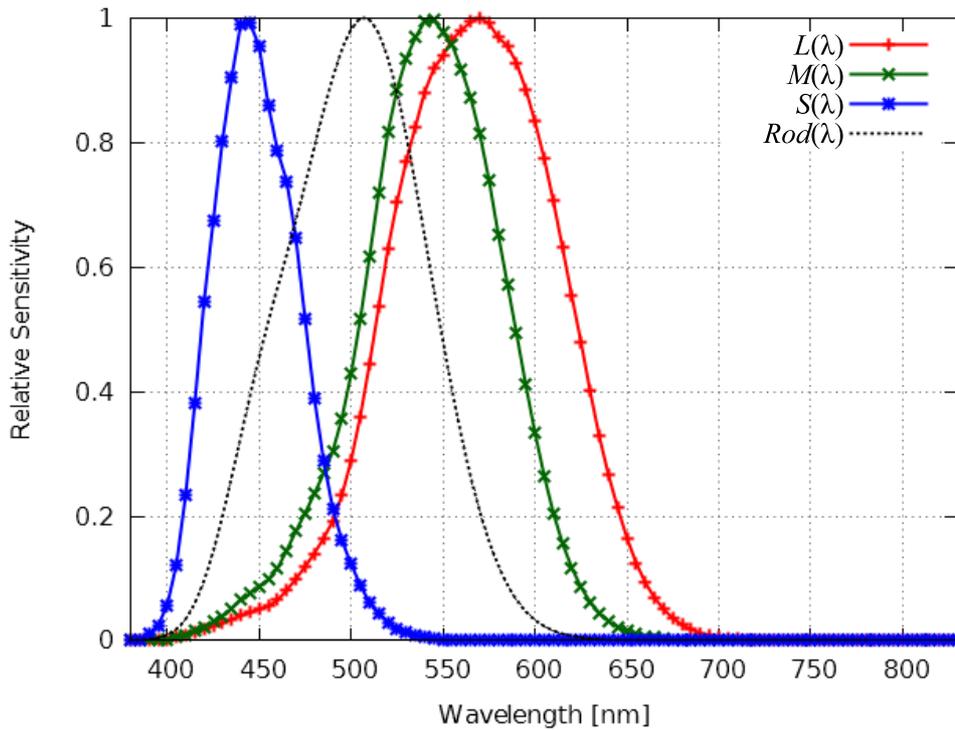


図 1.4: 錐体と桿体の相対感度 (出展: 文献 [5]).

合, 視覚状態は暗所視にある. このとき, 桿体が働いている. これにより, 色の識別は行うことはできないが, わずかな光も感じることができる. この中間の場合, 視覚状態は薄明視にある. このとき, 錐体と桿体の両方が働く. しかし, 錐体はその感度が弱まり始める. 一方, 桿体の感度が上がってくる. そのため, 明所視の場合と異なった色合いに見えるようになる.

薄明視では明所視の場合と異なった色合いに見えるようになる. 具体的には, シーン全体が青みがかって見えるようになる. これは, 図 1.4 に示すように, 桿体の感度の最大値が短波長側にあること, そして, 図 1.3 に示すように, 桿体と錐体は信号が伝わる細胞を共有していることにある [6][7]. すなわち, 短波長側の感度が大きい桿体から発せられた信号が, S 錐体から発せられた信号が伝わる経路を通して, 脳に知覚されるからである.

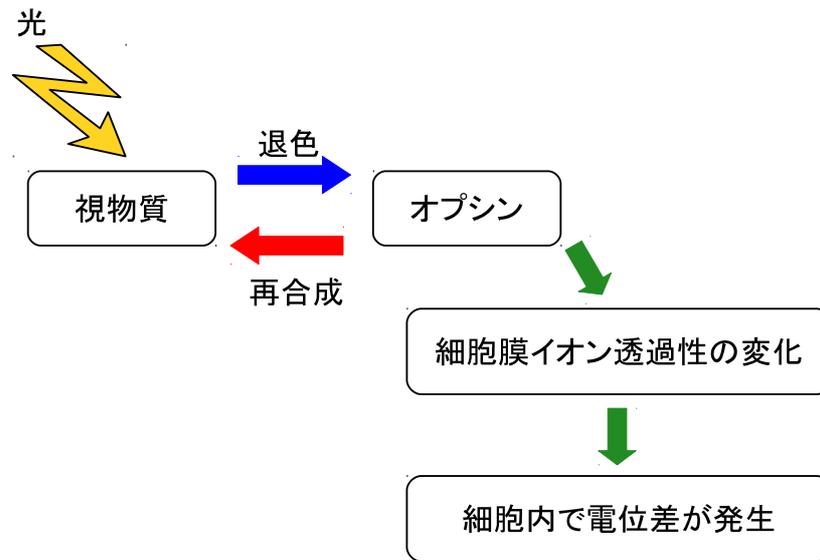


図 1.5: 光受容体での電位差発生の流れ.

視物質の反応

光受容体では光が電気信号に変換される。そして、この電気信号が刺激となり物を見ることが出来る。電気信号は、細胞膜内の電位差により生じる。この節では、そのメカニズムを説明する。

光受容体が光を受け取り、電気信号を発するのは細胞膜内の電位差によって生じる。電位差を生じさせる原因は視細胞中にある視物質である。視物質が化学反応を起こし、イオン濃度が変化することで電位差が生じる。

具体的には次のメカニズムで反応が起こる (図 1.5)。まず、視物質が光に反応し、オプシンに分解される。この分解を退色という。オプシンは、光が当たらなければ再び、視物質に変化する。この変化を再合成という。退色と再合成は、可逆反応であり、時間が経過すると、分解される前の視物質とオプシンは平衡状態になり、どちらも共存するようになる。一方、オプシンは更にイオンに分解される。すると、細胞膜のイオン透過率の違いにより、イオンの濃度に偏りが生じる [8]。その結果、電位差が生じ、電流、つまり電気信号が発せられる。

このイオンは網膜中の様々な器官を巡るため、再びオプシンが再合成されるには、ある程度時間がかかる。これらの反応時間は、順応の時間経過や後に述べる残像の時間経過にも影響すると考えられている [1]。

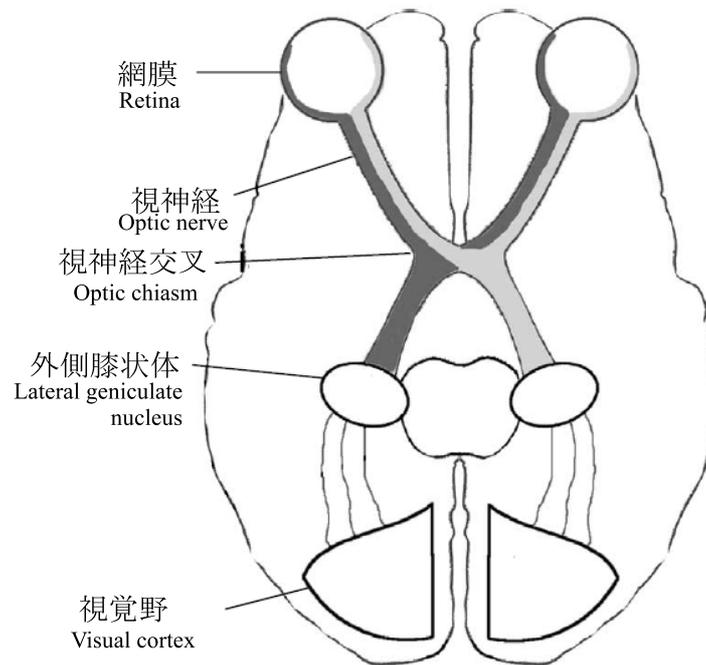


図 1.6: 視覚伝達路 (出展：文献 [4]).

双極細胞

双極細胞は錐体細胞と桿体細胞から送られてきた信号を神経節細胞に伝える役割を持つ。双極細胞は2種類存在する。すなわち、入力信号に対して、同じ応答を出力するもの(オン型)と、入力信号に対して、反対の応答を出力するもの(オフ型)である。入力信号に対して、オン型・オフ型の応答を示すことで物体境界を目立たせる役割を持つ。この特性は側抑制と呼ばれる。

この後、信号は神経節細胞、視神経の順で伝わり、眼球の外部に送られる。眼球の外部に伝わった信号は、視覚伝達路を通り、脳の視覚野に達する。

1.2.4 視覚伝達路

図 1.6 に視覚伝達路を示す。まず、眼球内の神経節細胞は視神経に繋がっている。信号は、視神経を通して眼球から外部に伝わる。眼球内で視神経が束になり集まって眼球外へと出る部分は錐体、桿体が存在せず、光を感じるができない。ここは盲点と呼ばれる。

両目の視神経は視神経交叉で一度交わるが、その後、再び別れ、左右の脳の外側膝状体に繋がる。外側膝状体は6層あり、そのうち2層が Magnocellular 層、4層が Parvocellular 層である。これら2種類の層はそれぞれ異なる処理を行っている。Magnocellular 層は、伝

わってきた信号に対して、高速であるが、解像度が低く、明るさに対する処理が行われる。一方、Parvocellular層では、伝わってきた信号に対して、低速で、解像度が高く、色に対する処理が行われる。

これらの層で処理された信号は、視覚野に送られる。視覚野を構成する細胞は、一定の機能を持つ細胞の集まりではなく、様々な機能を持った細胞が集まっている。例えば、ある細胞は物体の方向や向きに感度が高い。また、色に感度が高い細胞や、コントラスト、物体の動きに感度が高い細胞も存在する。視覚野では、このような様々な機能を持つ細胞により発せられた信号が、神経によって、順方向、逆方向に伝わり、混ざり合う。

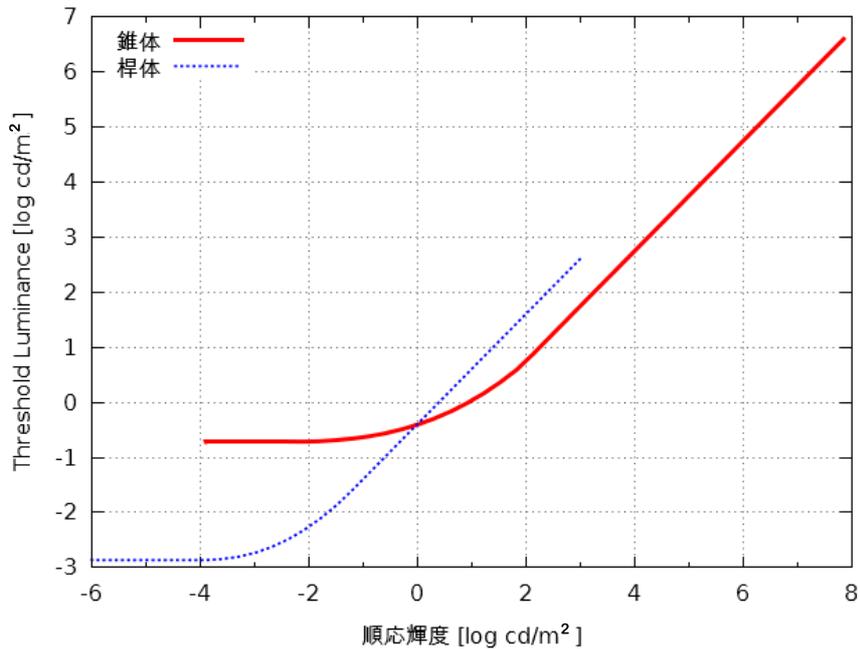


図 1.7: Threshold Versus Intensity Function の概形 (出展：文献 [9]).

1.3 視覚特性

本節では、視機能の見地から見た、主要な視覚特性について述べる。視覚特性について、より詳しい説明は文献 [1] に掲載されている。

1.3.1 Threshold Versus Intensity Function

Threshold Versus Intensity (TVI) Function[9] は、ある輝度に順応しているとき、その輝度をわずかに変化させて識別することができる最小の輝度 (Threshold Luminance) を関数として表したものである (図 1.7)。図 1.7 は横軸が順応輝度、縦軸が Threshold Luminance である。図 1.7 の 2 本のグラフは錐体と桿体による TVI Function を示す。

これらは、網膜上の視細胞の分布を考慮して、測定に用いる光の面積を変化させて測定されている [9]。すなわち、錐体の TVI Function を測定する場合は、刺激に用いる光の面積を小さく (視野角を小さく) することで網膜に光が到達する範囲を小さくし、錐体の密集している部分に光が当たるようにする。一方、桿体の TVI Function を測定する場合は、面積を大きく (視野角を大きく) することで、網膜に光が到達する範囲を大きくし、桿体の密集している部分に光が当たるようにする。

図 1.7 に示した TVI Function により、順応輝度が大きくなればなるほど、Threshold Luminance は大きくなるのがわかる。これは、例えば、昼間に空の星が見れないことを

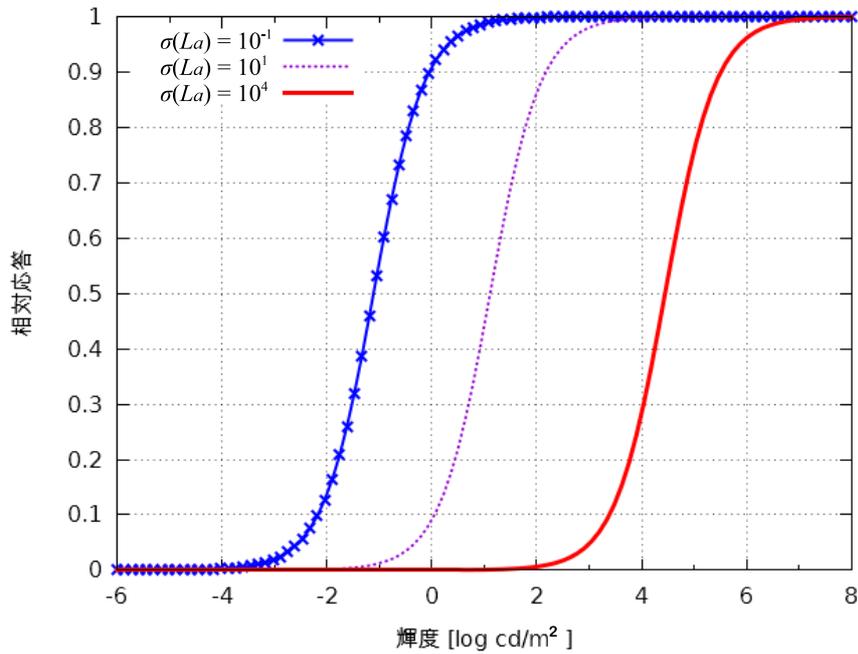


図 1.8: Response Function の概形 (出展：文献 [3]).

説明している。すなわち、日中は順応輝度が大きいので、星の影響による小さな輝度変化は識別できなくなる。

錐体は、周囲が明るいとき、すなわち、順応輝度が大きいときによく働く。一方、周囲が暗いときには感度が悪くなり、桿体に比べ、小さな輝度変化を感じにくくなる。桿体は周囲が暗いときに感度が良く、小さな輝度変化でも感じるができる。

図 1.7 から約 $0.01[\text{cd}/\text{m}^2]$ より大きい順応輝度に対して、識別できる輝度がほぼ比例関係にあることがわかる。これは、心理物理学ではウェーバーの法則 [10] と呼ばれる。

1.3.2 Response Function

光受容体の応答は次式 1.1 で示す Response Function で表される [3][11], [12].

$$R(L, \sigma(L_a)) = \frac{L^n}{L^n + \sigma(L_a)^n} R_{max} \quad (1.1)$$

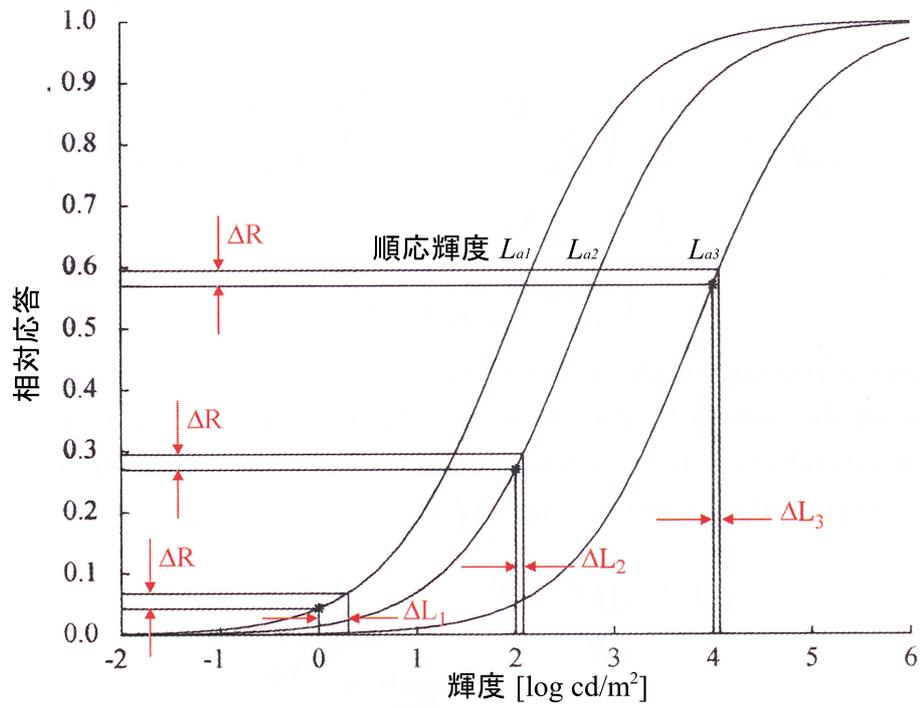
ここで、 L は輝度、 L_a は順応輝度、 $\sigma(L_a)$ は順応輝度により変化する値である。 R_{max} は最大応答を表す。 n は $0.7 \sim 1.0$ の範囲の定数であり、実験的に値が得られている。式 1.1 の両辺を R_{max} で割り、正規化したものを図 1.8 に示す。図 1.8 は横軸が輝度、縦軸が相対応答を示している。横軸の輝度に対して、対数グラフをとることで正規化された Response Function は S 字を示す。図 1.8 は $n = 0.90$ 、 $\sigma(L_a)$ をそれぞれ、 10^{-1} 、 10^1 、 $10^{4.0}$ に設定

した場合の Response function を示す. $\sigma(L_a)$ が大きい場合は右へ, 小さい場合は左へ移動する.

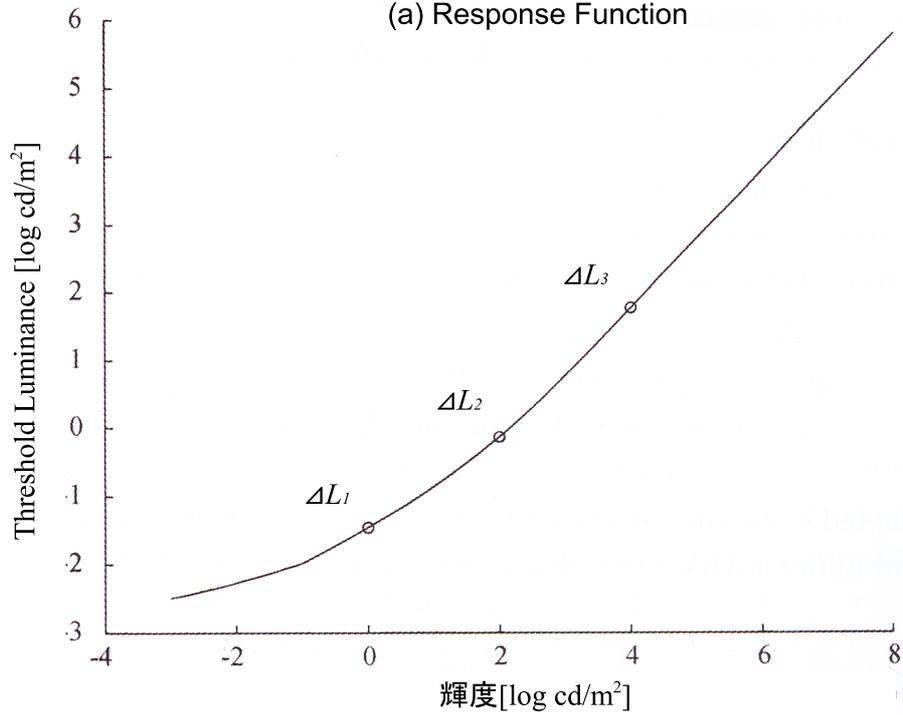
1.3.3 TVI Function と Response Function の関係

1.3.1 節で述べたように, TVI Function とは, ある順応輝度 L_a に対して, Threshold Luminance ΔL の関係を表すものであった (図 1.7). また, 1.3.2 節で述べたように, Response Function とは, ある輝度 L に対して, 眼の光受容体の応答を表したものであった (図 1.8). これらより, 順応輝度 L_a の状態で, ΔL の輝度に応答する量を ΔR と考えることで, TVI Function から Response Function を得ることができる.

具体的には次のようにして TVI Function から Response Function が得られる (図 1.9). ΔR は知覚される最小の応答であり, これを一定と仮定する. 図 1.9 で順応輝度が $1.0[\text{cd}/\text{m}^2]$ であったとする. このときの最小の応答に必要な輝度は Threshold Luminance であり ΔL_1 である. なぜならば, Threshold Luminance は識別できる最小の輝度, すなわち, 最小の応答に必要な輝度だからである. 同様に, 順応輝度が $100[\text{cd}/\text{m}^2]$ の場合, Threshold Luminance は ΔL_2 であり, 順応輝度が $10,000[\text{cd}/\text{m}^2]$ の場合, Threshold Luminance は ΔL_3 である. このようにして ΔL をプロットしたものが, 図 1.9(b) の TVI Function である.



(a) Response Function



(b) TVI Function

図 1.9: Response Function と TVI Function の関係 (出展: 文献 [3]).

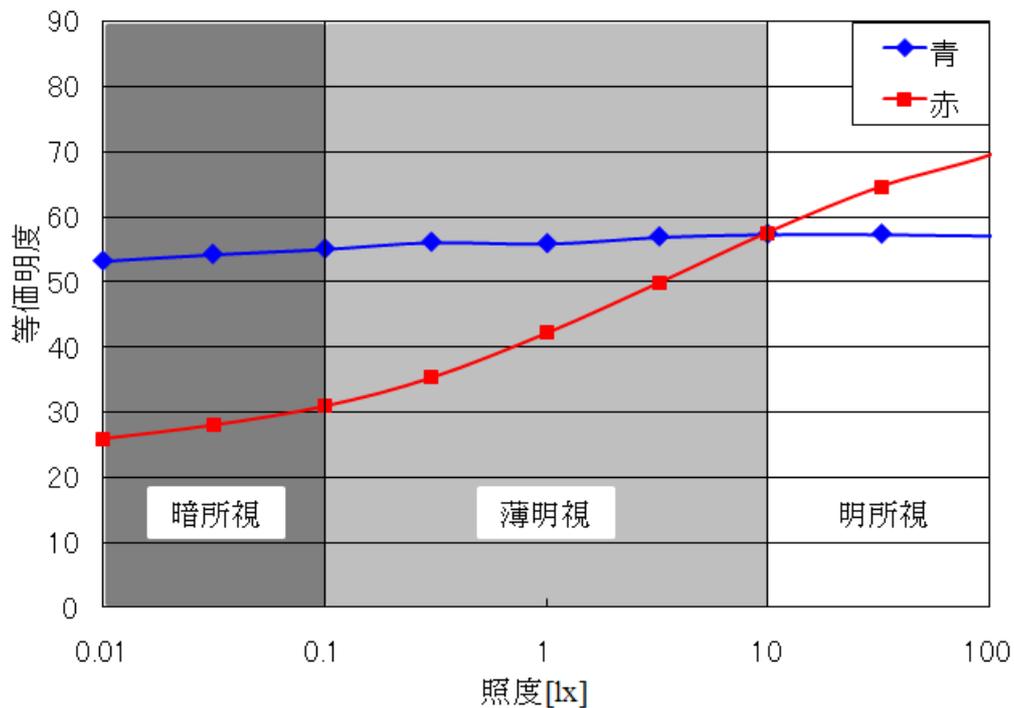


図 1.10: 等価明度と照度の関係 (出展：文献 [13]).

1.3.4 等価明度

等価明度とは、ある照度に対して、色がどれくらいの明度で表されるか示したものである。Ikedaら [13] は赤と青の色票を用いて、それぞれの等価明度を測定した。実験は暗室内で次の手順で行われた。まず、赤と青の色標を用意する。そして、暗室の明るさ（照度）を徐々に暗くしていく。それぞれの照度のときに、赤と青の色標と、等価明度を表すグレースケールの複数のサンプルを比較し、色標の明るさと等しい明度のサンプルを選択する。このときの明度が等価明度である。このようにして得られた等価明度を室内の照度の関数としてプロットしたものが図 1.10 である。横軸が室内の照度、縦軸が色標の等価明度を表している。

図 1.10 より青の色標では照度に変化してもほとんど等価明度は変化しない。一方、赤の色標では照度が小さくなるにつれ、等価明度も小さくなっている。すなわち、暗いときには赤成分が見えにくくなることで、相対的に青成分が目立って見えることがわかる。

これは、視覚状態が明所視から薄明視に移行したことを示している。すなわち、錐体の長波長側の感度が弱まってきたことを示している。

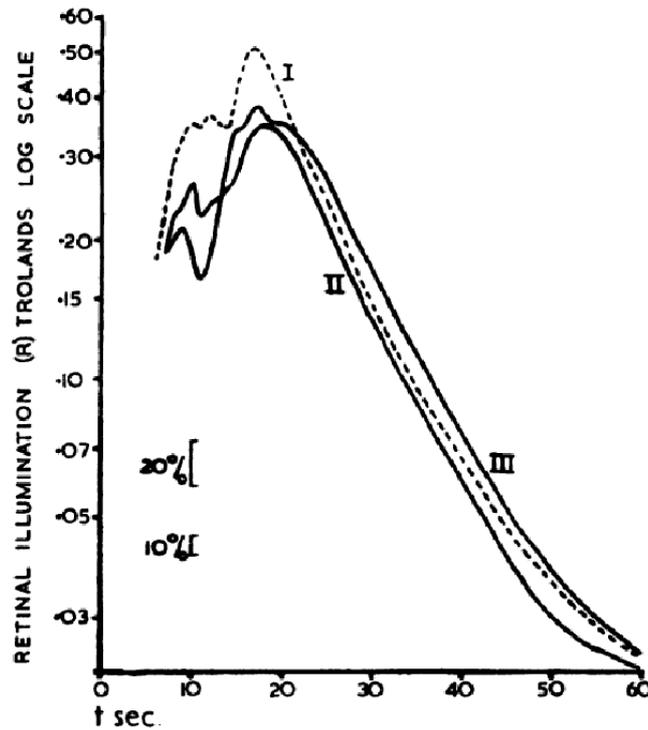


図 1.11: 残像の明るさの変化 (出典: 文献 [14]).

1.3.5 残像

まぶしい光を見た後など、残像が見える。Padgham は一時的な光の刺激に対する残像の明るさ変化を記録した [14]。その実験結果の一部を図 1.11 に示す。これは、 2×10^6 [Td]¹ の刺激光を 1.0 [sec.] 間見続けた場合の残像の明るさ変化である。10 [sec.] 近くまでグラフのプロットが始まっていない。Padghman によると、この間、残像の明るさが不規則に変化し、計測できなかったためである。図 1.11 から、残像の明るさは一度大きな値をとり、その後、徐々に小さくなっていくことがわかる。

さらに、Padgham は残像の色相の現れ方についても調査を行った [15]。その実験結果の一部を図 1.12 に示す。実験は刺激光を見続ける時間を考慮して、数種類行われた。図 1.12 の実験は 2×10^6 [Td] の刺激光を 1.0 [sec.] 間見続けた場合の色相の変化である。同じ条件で 3 回行われ、図 1.12(a) は 3 回の残像の色相変化を色度図上にプロットしたものである。図 1.12(b) は図 1.12(a) の 3 回の実験から平均を取り、それを、横軸に経過時間をとってプロットしたものである。図 1.12(a) の点 S(0.43, 0.40) は刺激光の色相を表わしている。図 1.12 では 20 秒経過するまでプロットが始まっていない。Padghman によると、この間

¹[Td] は網膜照度を表わす単位である [16]。網膜照度とは、瞳孔面積の要因を考慮に入れた測光量であり、輝度 L [cd/m²]、瞳孔面積を S [mm²] とすると、網膜照度 $E = S \times L$ で表わされる。

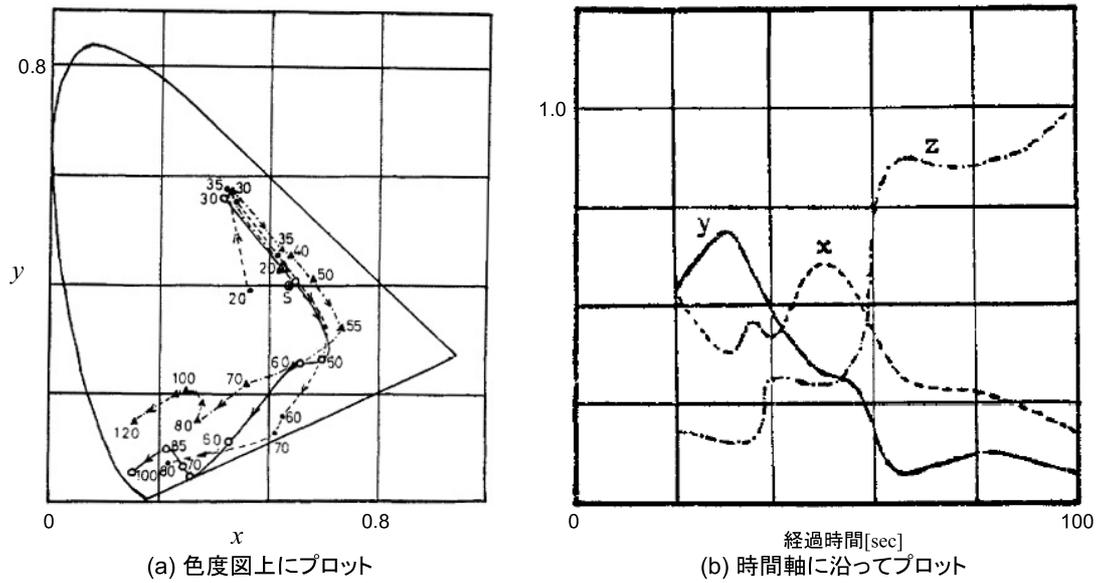


図 1.12: 残像の色相の変化 (出典：文献 [15]).

は、不安定な色相が続き、計測できなかったためである。

図 1.12(b) から色相は次の順に現れることがわかる。最初、青みがかった白色であり、次に緑に移行する。そして、刺激光の色へ近づく。次に赤紫、紫と変化し、最後には青に落ち着く。実験結果では、この間、時間が経つにつれ、彩度が高くなったと報告されている。また、刺激光を見る時間を長くしても、現れてくる色相の順は変化せず、残像の発生している時間が変化すると報告されている。

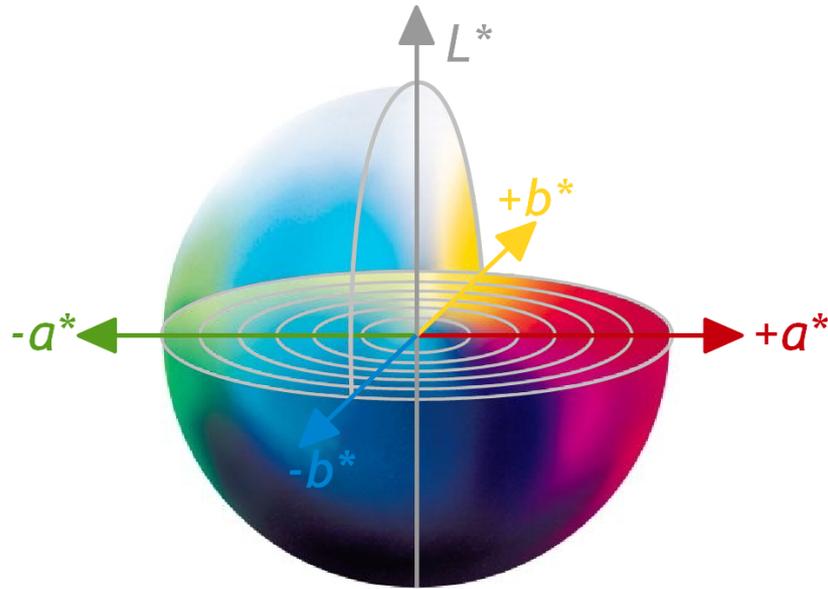


図 1.13: CIE $L^*a^*b^*$ 表色系

1.4 二段階モデルと表色系

ここでは、色処理の二段階モデルとそれを構成する表色系について説明する。二段階モデルの色処理は LMS 表色系と反対色表色系で構成される。LMS 表色系、反対色表色系はそれぞれ、形態学的特性、機能的特性に基づくモデルである。よって、二段階モデルはその両方の特徴を持つモデルであるといえる。ここで紹介するモデル以外のモデルや、より詳細なモデルの説明は文献 [17] に記載されている。

1.4.1 LMS 表色系

LMS 表色系は、L 錐体、M 錐体、S 錐体の応答を基に考案された表色系である [1]。すなわち、人は色を感じる時、この 3 種類の錐体を使用している。そこで、この 3 種類の応答を使用し、すべての色を表現するという考えである。

LMS 表色系は、錐体の応答を基にしているという点で、二段階モデルや、その他の色の見えモデルの初期変換に用いられることが多い。例えば、CIECAM02 モデルや iCAM モデルなどで用いられる [17]。

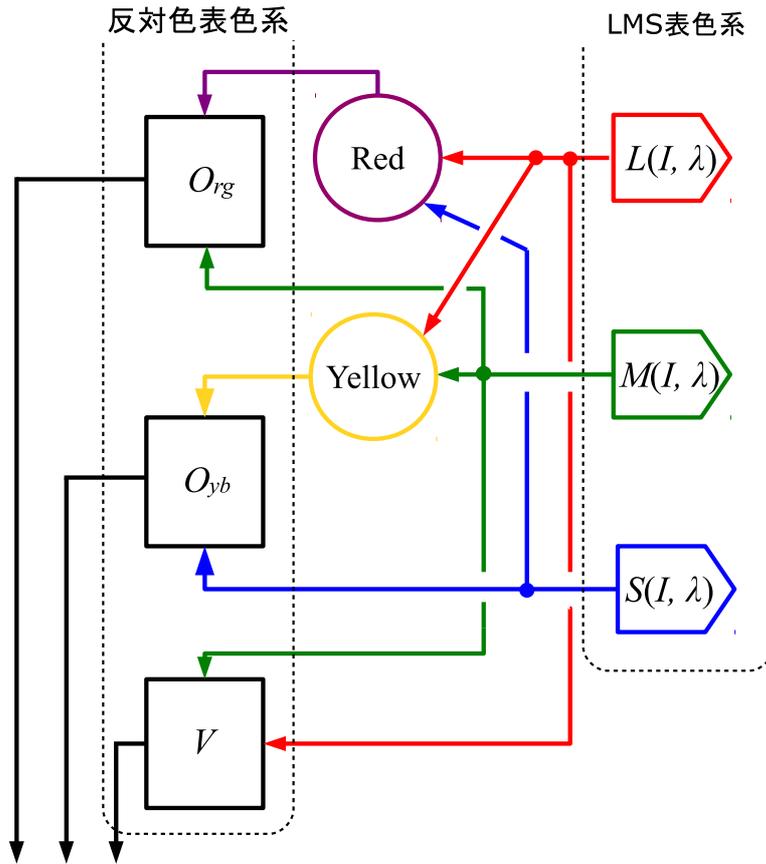


図 1.14: 二段階モデル (出展 : 文献 [20]).

1.4.2 反対色表色系

反対色表色系は Hering によって導入され [18], Hurvich ら [19] により実験的に検証された。この表色系では、反対色の関係にある色は同時に見えないという特性に基づいている。反対色表色系では反対色の関係にある色相により構成された直交する二軸により色相を表す。そして、それら二軸を含む平面に直交するように、明度を表す軸をとる。色相の二軸は赤と緑の反対色軸、青と黄色の反対色軸である。明度を表す軸は黒と白の反対色である。図 1.13 は反対色表色系である CIEL* a^* b^* 表色系を示したものである。 L^* が明度、 a^* が赤と緑の反対色、そして、 b^* が黄色と青の反対色を表す。

1.4.3 二段階モデル

二段階モデルが開発される前は細胞の形態学的知見に基づく LMS 表色系と、生理学的知見に基づく反対色表色系が別々に存在していた。この二つの特徴を取り入れ、開発されたのが、二段階モデルである [20]。二段階モデルの一段階目では、光は LMS 表色系で表

される．そこから出た信号の一部は，混合され，紫がかった赤と黄色の信号を作る．二段階目で，LMS 表色系から出た信号とそれら混ざり合った信号は反対色表色を構成する．

人の視覚が LMS 表色系と反対色表色系の両方の性質を併せ持つことは，網膜にある視細胞から視神経を通して信号が伝わることに関係しているといわれている．すなわち，網膜にある視細胞から視神経を通して信号が伝わる過程で，信号を伝える神経の数は減少する．このため，より少ない数の神経繊維に最適化するように情報処理が行われていると考えられる [21]．

1.5 ハイダイナミックレンジ画像

この節では，実写画像からのハイダイナミックレンジ (HDR: High Dynamic Range) 画像を作成する方法とトーンマッピング手法について述べる．HDR 画像は，実写画像から得られた輝度値を記録するためだけでなく，物理法則に基づく光学モデルにより計算したシーンの輝度値を記録するのにも利用される．これは幅広い輝度情報を損失することなく記録でき，リアルな映像表現を行うことができるという特長があるためである．HDR 画像についての詳しい説明は文献 [3] に掲載されている．

HDR 画像は幅広い輝度を記録しているため，一般的なディスプレイでは輝度幅が足りず，表示できないという問題がある．それを解決するのが視覚特性を利用した表示手法，すなわちトーンマッピング手法である．視覚特性を利用した表示手法については次節で述べる．

1.5.1 ハイダイナミックレンジ画像の作成

実世界の輝度値は露光時間の異なる複数の画像から取得することができる [22]，[23]．まず，露光時間の異なる複数の画像から，カメラレスポンスカーブを得る．カメラレスポンスカーブとはカメラ内部で，実世界の輝度値を画素値に変換する関数である．このカメラレスポンスカーブの逆関数と複数の画像各々の露光時間を用いて，画素値から実世界の輝度値を計算する．

特に，Debevec らは，シンプルで頑強な輝度値取得手法を開発した [22]．露光は露光時間と輝度値に比例するものと仮定する．そして，露光時間と画素値からカメラレスポンスカーブを得る (図 1.15)．得られたカメラレスポンスカーブと露光時間から輝度値を計算する．計算にはメキシカンハット型の重み付けを行い，画素値が 128 に近いものに最大の重み付けをする．この重み付けは，黒つぶれや白とびの発生している画像にかかる重みを小さくするためである．この操作を RGB それぞれのチャンネルに対して行うことで輝度値を得る．その輝度値を HDR 画像として記録する．

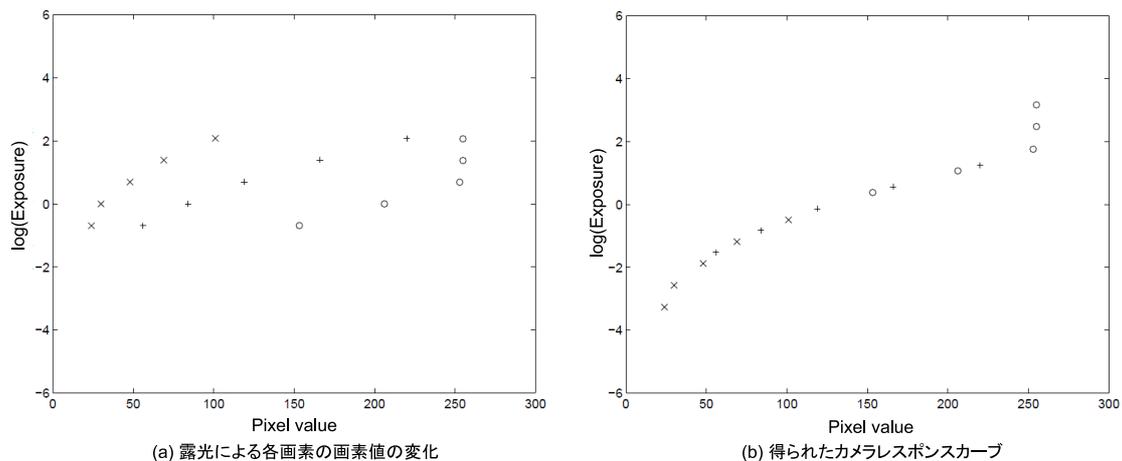


図 1.15: 多重露光撮影により得られるカメラレスポンスカーブ (出典: 文献 [22]). サンプルングされた各画素の露光時間による画素値の変化 (a) から, レスポンスカーブ (b) を得る.

さらに, 物理法則に基づく光学モデルを用いて計算した画像も HDR 画像として記録することで情報の損失を防ぐことができる. 輝度値の計算を精度よく行ったとき, 従来の画像記録に用いられた 255 段階に収まることはない. そのため, HDR 画像として記録することで, 輝度値の損失を防ぐ.

HDR 画像フォーマットには, Ward らが開発したラディアンズフォーマット [24] や, ILM 社が開発した OpenEXR フォーマット [25] などがある. ラディアンズフォーマットが RGB 値を 32bit 浮動小数点型で記録するのに対し, OpenEXR フォーマットは画素の RGB 値と透明度を 16bit で記録する. コンピュータサイエンスなどの分野においてはラディアンズフォーマット, 映画やエンタテインメントの分野などにおいては OpenEXR フォーマットが使用されることが多い.

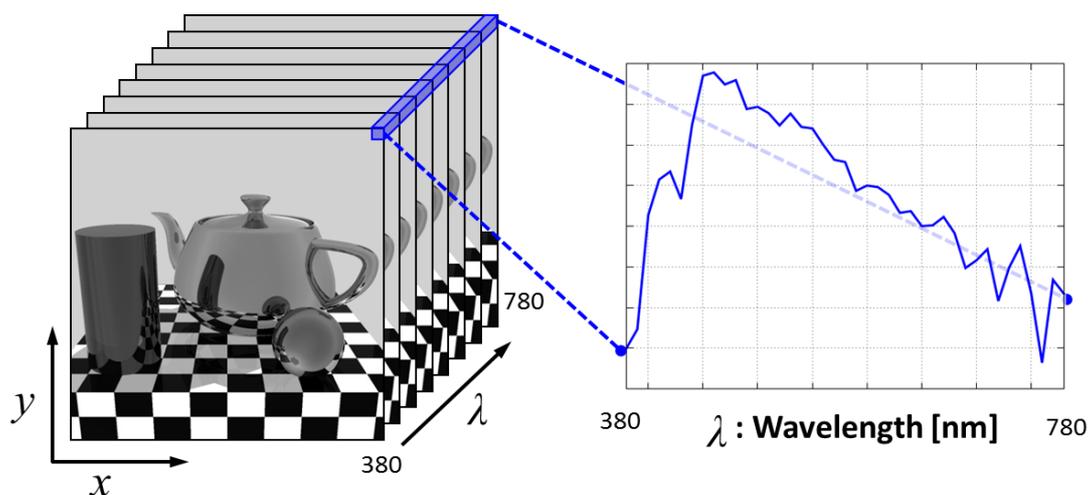


図 1.16: ハイダイナミックレンジ分光画像

1.5.2 ハイダイナミックレンジ分光画像

ハイダイナミックレンジ分光 (High Dynamic Range Spectral: HDRS) 画像は光学シミュレーションにより計算された光の強度を、RGB 成分ではなく、光の波長成分を用いて精度よく記録している画像である。HDRS 画像はボリュームデータとしてとらえることができる。すなわち、各ボクセルは三つの要素 (x, y, λ) から構成され、 x, y は空間的位置、 λ は光の波長を表す。また、波長成分のサンプリング数を大きくすると、それにしたがってファイル容量も大きくなる。例えば、可視光の波長域 380 [nm]–780 [nm] を 5 [nm] 間隔でサンプリングしたとする。この時、81 サンプル必要になる。これは RGB の 3 成分の 27 倍の記憶容量が必要になることを意味する。よって、HDRS 画像の精度を保ったまま容量を小さくして記録することが望まれる。

また、HDRS 画像を通常の、RGB モニタに表示するために分光情報を RGB に変換する必要がある。これには一般的に等色関数が用いられる。

等色関数

等色関数はある波長の光に対して、それと同じ色を知覚するための、赤、緑、青の光の強度である。図 1.17 に RGB 等色関数を示す。横軸は、光の波長を表し、縦軸の強度は、その波長の光と同じ刺激を知覚するために必要な赤、緑、青の光の強度である。

等色関数は等色実験によって得られる。これは、片方の眼に測定対象となる波長の光を照射し、もう片方の眼でその光と同じ光が知覚されるように、赤、緑、青の光の強度を調

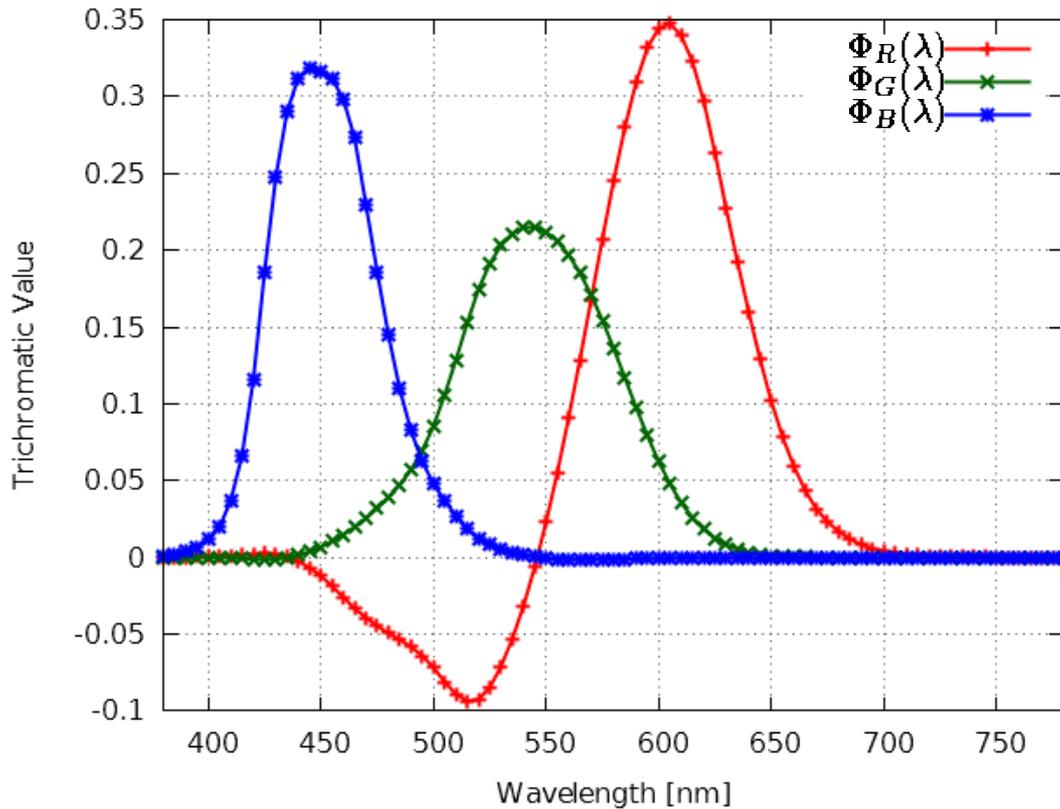


図 1.17: RGB 等色関数

節して行われる。そして同じ色が知覚された時の、赤、緑、青の光の強度を計測する。このように、等色実験をして得られた結果が図 1.17 である。

分光分布から RGB 値への変換

分光分布から RGB 値を計算するには、次式を用いる [26].

$$C_l = k \int_{\lambda \in \Lambda} I(\lambda) \Phi_l(\lambda) d\lambda \quad (l = R, G, B), \quad (1.2)$$

ここで、 C_R , C_G , そして、 C_B はそれぞれ変換された R, G, B 値である。 Λ は可視光域である。 k は放射輝度から輝度の変換を行う定数である。 $I(\lambda)$ は分光分布である。 $\Phi(\lambda)_R$, $\Phi(\lambda)_G$, $\Phi(\lambda)_B$ はそれぞれ、R, G, B の等色関数である。



図 1.18: HDR 画像を光源として利用した例 (出展 : [27]).

1.5.3 ハイダイナミックレンジ画像の利用

HDR 画像に記録された輝度値は、精度が高いため、リアルな映像表現に適している。例えば、魚眼レンズなどを用いて露光時間の異なる全方位画像を取得し、HDR 画像を作成する。これは、環境マップやライトプローブといった、CG で画像を作る際、光源として利用することができる [3]。図 1.18 に HDR 画像を光源として利用した例を示す。

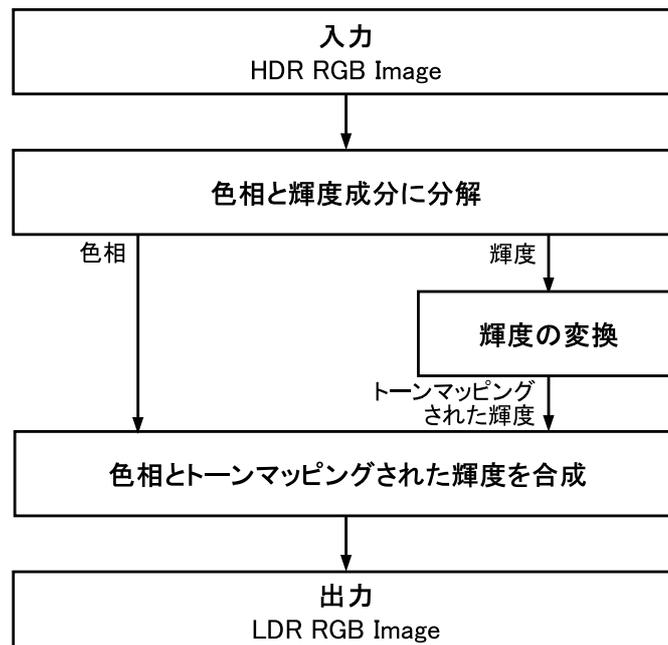


図 1.19: 一般的なトーンマッピング手法の流れ.

1.6 トーンマッピング手法

HDR 画像を通常のディスプレイに表示するためにはディスプレイのダイナミックレンジに合わせた輝度調整を行う必要がある。しかし、単なる線形変換では自然な印象を与える画像を表示することができない。このとき利用されるのが輝度に対する視覚特性をモデル化した変換手法であり、これはトーンマッピング手法と呼ばれる。

トーンマッピング手法の詳しい説明は文献 [3] に掲載されている。

図 1.19 に一般的なトーンマッピング手法の流れを示す。まず、入力は HDR 画像である。そして、HDR 画像を輝度と色相成分に分解する。色相は変化させず、輝度値にトーンマッピングを施す。最後に、トーンマッピングした輝度値と色相を再び合成し、出力画像を得る。

現在までに、様々なトーンマッピング手法が開発されてきた [3], [28]。グローバルトーンマッピング手法は、すべての画素に対し、同じ関数を用いて輝度値を変換する。一方、ローカルトーンマッピング手法は、画素ごとに異なる関数を用いて輝度値を変換する。

これらのトーンマッピング手法の多くは先に述べた輝度に対する視覚特性である TVI Function や Response Function を利用し、HDR 画像の輝度幅をディスプレイに表示できる輝度幅に変換する。次節に、グローバルトーンマッピング手法とローカルトーンマッピング手法の概要を説明する。

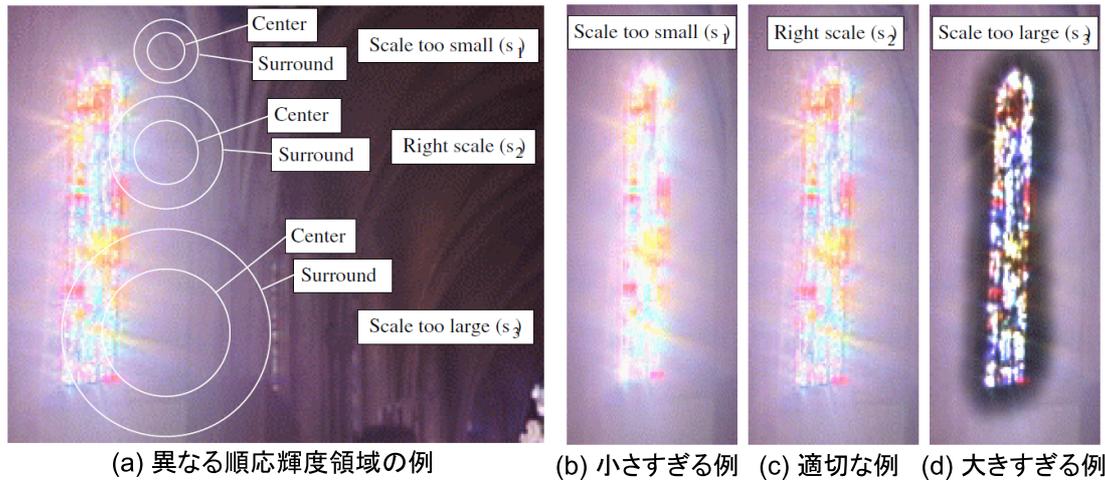


図 1.20: 順応輝度領域の設定例 (出展 : 文献 [2]).

1.6.1 グローバルトーンマッピング手法

グローバルトーンマッピング手法は、HDR 画像の輝度に対して、すべて同じ関数を用いて処理する。これは、画像中のシーン全体の輝度に、眼が順応していることを仮定している。全ての画素で同じ関数を使用するため、計算コストが小さく、処理が高速であるという長所がある。そのため、リアルタイム性が必要なアプリケーションに用いられる [29].

代表的な手法に次のような手法がある。Ward らは、TVI Function を用いてヒストグラムを調整することで、知覚できる輝度以上を表示させる手法 [30] を開発した。Reinhard らによるグローバルトーンマッピング手法は、式 1.1 を基に、基にしたものである [2]. 具体的には、ディスプレイに表示する輝度を定めるために次式が使用される。

$$L_d(x, y) = \frac{L_w(x, y)}{1 + L_w(x, y)} \quad (1.3)$$

ここで、 $L_d(x, y)$ はディスプレイに表示される輝度、 $L_w(x, y)$ は HDR 画像の輝度である。Pattanaik らはトーンマッピング関数のパラメータを、時間の関数とし、時間的に変化させることで順応を表現できる手法 [31] を開発した。

1.6.2 ローカルトーンマッピング手法

ローカルトーンマッピング手法は、HDR 画像の輝度に対して、その着目画素の輝度値と、周りの画素の輝度値を用いて処理する。これは、眼が画像中のシーンの局所領域にある輝度に順応していることを仮定している。ローカルトーンマッピング手法は、グローバルトーンマッピング手法よりも輝度の詳細を表現できるという長所がある。しかし、トーン

ンマッピング関数を画素ごとに変化させて適用するため、計算コストが高いという欠点がある。また、パラメータの設定方法によって輝度の反転といったアーティファクトを含む結果を生じる場合がある。

代表的な手法に次のような手法がある。Reinhard らは自らの手法 [2] をさらに改良し、フォトグラフィックトーンマッピング手法 [2] を開発した。具体的には、ディスプレイに表示する輝度を求めるために次式が使用される。

$$L_d(x, y) = \frac{L_w(x, y)}{1 + V(x, y, s_m(x, y))} \quad (1.4)$$

ここで、 $V(x, y, s_m(x, y))$ が着目画素周辺の順応輝度である。フォトグラフィックトーンマッピング手法はアナログ写真作成技術を基に開発された。すなわち、白とびが起こる部分では $V(x, y, s_m(x, y))$ を大きくすることで輝度値を抑え、黒くつぶれてしまう部分では $V(x, y, s_m(x, y))$ を小さくし輝度値を上げる。これは、アナログ写真作成過程の被い焼きと焼き込みに相当する。また、Pattanaik らによる視細胞の働きを考慮し、解像度の異なる画像を、そのレベルに合わせてゲインを変化させ、再び組み合わせることで、輝度ダイナミックレンジを減らす手法を開発した [31]。

これらローカルトーンマッピング手法で計算時間が最もかかる処理は、トーンマッピング関数を適用するために必要な、局所的な順応輝度を計算する部分である。これは視覚特性である側抑制をモデル化していることに由来する。側抑制とは、物体境界を認識するために働く視覚特性である。モデルには、ブラーサイズの異なるガウシアンフィルタを適用した複数枚の画像が利用される、そして、それらの差分をとることで局所的な順応領域輝度を計算する。

図 1.20 に Reinhard らのフォトグラフィックトーンマッピング手法における、局所的な順応輝度領域を設定した例を示す。図 1.20(a) に示している、Center, Surround がそれぞれガウシアンフィルタのブラーサイズに相当する。適切なスケールの場合 (図 1.20(c)) に式 1.4 を適用すれば、視覚的に満足に行く結果を得ることができる。しかし、スケールが適切でない場合では、細部が失われたり (図 1.20(b)), 輝度の反転がおこる (図 1.20(d))。

ローカルトーンマッピング手法は細部が表現でき、また、視覚的に好ましい印象を与えることができる手法である [32]。そのため、高速化の要求が高く、高速化を図った研究もある [33], [34]。

図 1.21(a) と (b) にそれぞれグローバルトーンマッピング手法とローカルトーンマッピング手法の適用例を示す。両者とも Reinhard らによるフォトグラフィックトーンマッピング手法 [2] であり、グローバルトーンマッピング手法には式 1.3 を、ローカルトーンマッピング手法には式 1.4 が用いられている。各適用例の下部に、一部領域の拡大表示を示す。グローバルトーンマッピング手法と比べ、ローカルトーンマッピング手法は、より詳細が



(a) グローバルトーンマッピング手法適用例

(b) ローカルトーンマッピング手法適用例

図 1.21: グローバル・ローカルトーンマッピング手法適用結果.

はっきりと表現できていることがわかる. 特に円形の窓の支柱やステンドグラスの模様などローカルトーンマッピング手法により, はっきりと表示できている.

第2章 薄明視における視覚特性を考慮した トーンリプロダクション

2.1 はじめに

ハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range: HDR) 画像 [22] は記録できる輝度ダイナミックレンジの大きさから、様々な用途に用いられる。例えば、コンピュータグラフィックスでは計算された輝度を HDR 画像で記録することで、保存の際に起こるデータ損失を減らし、リアルな映像を再現することができる。これは、従来のローダイナミックレンジ (Low Dynamic Range: Low Dynamic Range) 画像では保存できる輝度値が 8 ビットであるのに対し、HDR 画像はそれ以上のビット数で保存できることに起因する。また、保存された輝度はライトプローブや環境マップとして、実世界の輝度を表現するのにも用いられる。

しかし、HDR 画像が普及してくる一方で、一般的なディスプレイやプロジェクタで表示できる輝度ダイナミックレンジは狭いため、HDR 画像を直接表示できないということが大きな課題となっている。そこで HDR 画像に保存された大きな輝度ダイナミックレンジを圧縮してディスプレイに表示するトーンマッピング手法が開発されてきている。

これまでに開発されたトーンマッピング手法の多くは人が見たときの印象ができるだけ同じになるように輝度ダイナミックレンジを単に小さくする手法である。しかし、輝度のみを変えて表示するだけでは不十分である。なぜなら、人が様々な明るさの下で物を見るときの視覚特性は色相の変化にまで及ぶからである。よって、リアルな画像の表示には、単なるトーンマッピングのみだけでなく、そのときの色相の変化まで考慮した色の再構築、すなわち、トーンリプロダクションを行う必要がある。

これまでの色相の変化を考慮したトーンリプロダクション手法では暗いときに見える色相と明るいときに見える色相を線形補間することにより、その中間での薄明視での色相を取り扱っていた。しかし、そのような手法では人の知覚にマッチした色相の変化を表現することはできない。真にリアルな表示のためには、人の視覚特性を考慮することにより、ディスプレイから受ける印象を実世界から受ける印象に近づけることが重要となる。

本章では、薄明視における視覚特性を考慮したトーンリプロダクション手法を提案する。薄明視での色相は明るいときに見える色相と異なる。人の視覚特性は暗くなるにつれて赤

成分を感じにくくなる。提案手法では、薄明視における人の視覚特性として知られているプルキニエ現象に基づき、反対色表色系を用いてこれを実現する。提案手法の特徴として、次の2点がある。1点目は、提案手法は汎用性に富むことである。提案手法は、輝度と色相に分けて処理を行うために、従来のトーンマッピング手法に簡単に組込むことができるという特徴がある。2点目は計算コストが低いことである。リアルタイム性が求められるアプリケーション・動画などにも利用することができる。

本章では、第2.2節において既存手法について述べた後、第2.3節で薄明視における視覚特性について概説する。第2.4節で提案手法について述べ、2.5節で出力結果を示す。そして2.6節で本論文をまとめる。

2.2 関連研究

トーンマッピング手法は幅広い輝度の画像をディスプレイに表示できる輝度レンジ範囲に狭める方法である。今までに様々なトーンマッピング手法が提案されている [3][28]。その中でも代表的なものとして Reinhard ら [2] はアナログ写真作成の考えを用いた手法を開発している。

アナログ写真を作成する際、露光されたフィルムに記録されている輝度幅は、印画紙で表示できる輝度幅よりも大きい。したがって、フィルムに記録されている輝度幅の全てを印画紙で表示することはできないという問題がある。アメリカの著名な写真家であるアンセル・アダムスは、この問題に対処する方法を開発し、実践した [35]。すなわち、印画紙に画像を照射する際、フィルム上で輝度の高い部分から出てくる光を隠し、印画紙に届かなくする。また、フィルム上で輝度の低い部分から出てくる光は、長時間照射する。これらはそれぞれ、被い焼き、焼き込みと呼ばれる。このようにして領域ごとに感光量を変化させることで、アダムスは、フィルムに記録されている輝度幅を、印画紙で表示できる輝度幅に合わせた表示を行った。

Reinhard らはこの写真作成手順を基にして、フォトグラフィックトーンマッピング手法を開発した。彼らの手法は、特に、アナログ写真作成過程の被い焼き、焼き込みと呼ばれる操作をモデル化し、明るい部分の輝度は下げ、暗い部分の輝度は上げる。

Ferwerda ら [9] は視覚特性のひとつである順応に着目した。彼らの手法は、順応状態における識別できる最小の輝度 (Threshold Luminance) を基にトーンマッピングを行った。画像中のシーンの順応輝度、ディスプレイを見ている状態での順応輝度、それぞれの状態での Threshold Luminance を用いてディスプレイに表示する輝度を決定する。さらに、この手法は、明るさによって物体境界の識別が困難になる効果を取り入れている。これは、周囲の明るさと視力低下の関係を調査した文献 [36] の実験結果からモデル化された。

前述した二つのトーンマッピング手法は、周囲が暗くなった場合に見える色相については考慮していない。

Khan ら [37] は錐体と桿体の影響を考慮することにより周囲の明るさに応じた色相の見え方を表現する手法を開発した。色相変化は、錐体・桿体の応答データをモデル化したものを用いている。すなわち、桿体と S 錐体は信号が伝わる細胞を共有していること [6] を基にモデルを作成した。出力結果は青成分が強く現れる画像になり、月あかりの状況下のような暗所視に近い印象を与える画像となっている。

また、Barsky ら [38] は反対色表色系と暗所視での色相 [39] を用いることで、色相変化を与える方法を提案した。この手法ではどの程度色相を変化させるかの調節はユーザ設定のパラメータに依存する。これは、明所視での色相は入力画像の色相を用いる。暗所視での色相は Hunt らの実験結果による色相を用いる。この色相を、ユーザ設定のパラメータを用いて線形補間する。これにより薄明視での色相を表現した。

Krawczyk ら [33] 画像の輝度に基づいて色相を変化させるた。明所視、暗所視の色相は Barsky らと同様に、それぞれ、入力画像の色相、Hunt らの実験結果による色相を用いた。この色相を、画像輝度に依存する桿体の応答を用いて線形補間し、薄明視での色相を表現した。

Jensen ら [40] は、暗所視の色相には、夜の風景が描かれた絵画を計測した結果を用いた。薄明視での色相を決める方法は、Krawczyk らの手法と同様である。すなわち、明所視の色相と暗所視の色相を、輝度に依存する桿体の応答を用いて線形補間した。

Barsky ら、Krawczyk ら、Jensen らの手法は、薄明視の色相を暗所視での色相と明所視の色相からパラメータを用いて線形補間することで表現する。しかし、薄明視における視覚特性を考慮していないため、人の知覚にマッチした色相の変化を表現することはできないという問題点がある。

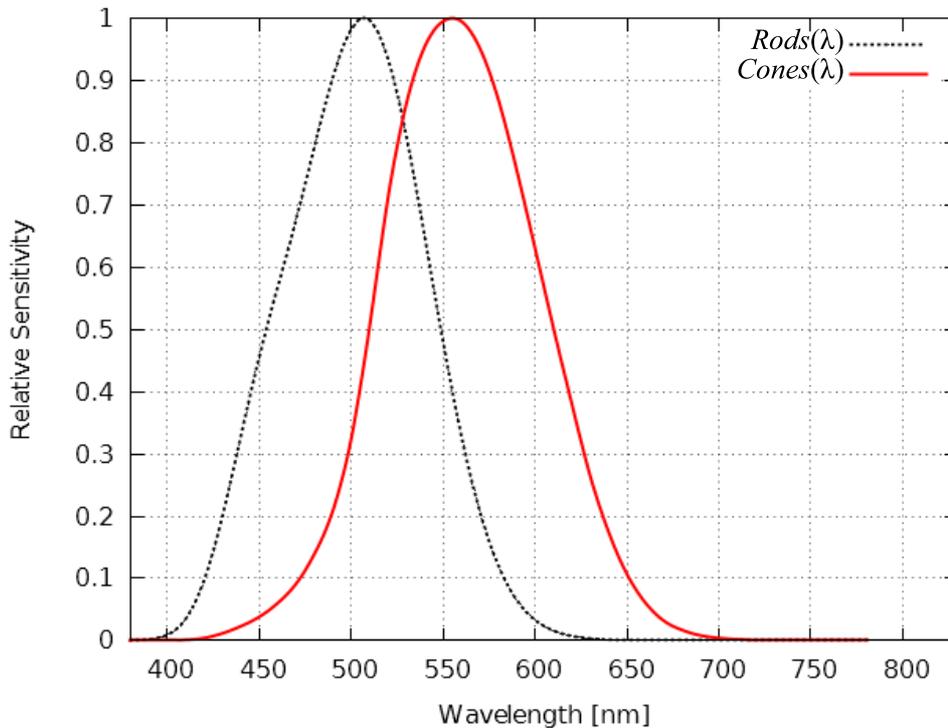


図 2.1: 錐体の比視感度と桿体の比視感度 (出展：文献 [5])

2.3 視覚特性

2.3.1 明るさによる色相の知覚の変化

人は明るさによって見える色相が異なる。この理由は明るさに応じて働く視細胞が異なるからである。視細胞には錐体と桿体があり、錐体は周囲が明るいときに働き、長波長（赤色）成分に応答しやすい。一方、桿体は周囲が暗いときに働き、短波長（青色）成分に反応しやすい。よって、暗くなるにつれて赤成分を感じなくなり、青成分を感じやすくなる。

これは、図 2.1 に示した錐体、桿体の比視感度の違いからもわかる。比視感度とは、視覚の明るさに対する相対感度を表す。図 2.1 の横軸が可視光の波長、縦軸が比視感度である。錐体、桿体の比視感度をそれぞれ、赤の曲線、黒の破線で示した。錐体の比視感度は L, M, S の錐体全体の明るさの相対感度を示したものである。したがって、錐体の比視感度は L, M, S の錐体の感度を、各錐体の応答を基にして重み付けし、平均を取ることによって得られる。これは、CIE XYZ 表色系の Y として定義されている [26]。

図 2.1 に示すように、錐体の比視感度の最大値はおおよそ 555 [nm]、桿体の比視感度の最大値はおおよそ 510 [nm] であり、錐体の比視感度が桿体の比視感度よりも長波長側にあることがわかる。これにより、錐体の機能が低下すると、光の長波長成分を感じにくくなる。

この錐体から桿体への感度の移行は、発見者の名前からプルキニエ現象と呼ばれる [26].
そして、視覚状態は周囲の明るさに応じて明所視, 薄明視, 暗所視に分類される [26].

明所視とは周りが明るいとき, 錐体が働いている状態を言う. 明所視では色相ははっきり見え, また, それらの区別も容易である. 日中がこの状態にある.

一方, 暗所視とは周りが暗いとき, 桿体が働いている状態を言う. 暗所視では色相はほとんど感じず, 辺りは青白く感じられる. 夜の暗闇や, 月夜などがこの状態にある.

薄明視とはこの中間の状態である. 日没後や, 蠟燭明かりの下など, 周りが薄暗いときに表れる. 薄明視では色を識別することはできるが, 明所視の状態と薄明視の状態で色の見え方に違いがある. 薄明視では明所視のようにはっきりと色相を区別することはできないが, 暗所視のように見える景色が全て青白くなるわけではない. これは, 錐体と桿体が両方働いている状態だからである.

暗所視, 薄明視, 明所視での照度の領域を図 2.3 に示す. 薄明視の領域は上限が $10[\text{lx}]$ であり [41], その範囲が $10^2[\text{lx}]$ 程度であることから, 提案手法では下限を $0.1[\text{lx}]$ に設定した. 図 2.3 は横軸が室内の照度, 縦軸がサンプルに用いた赤, 青の色標の等価明度を表している.

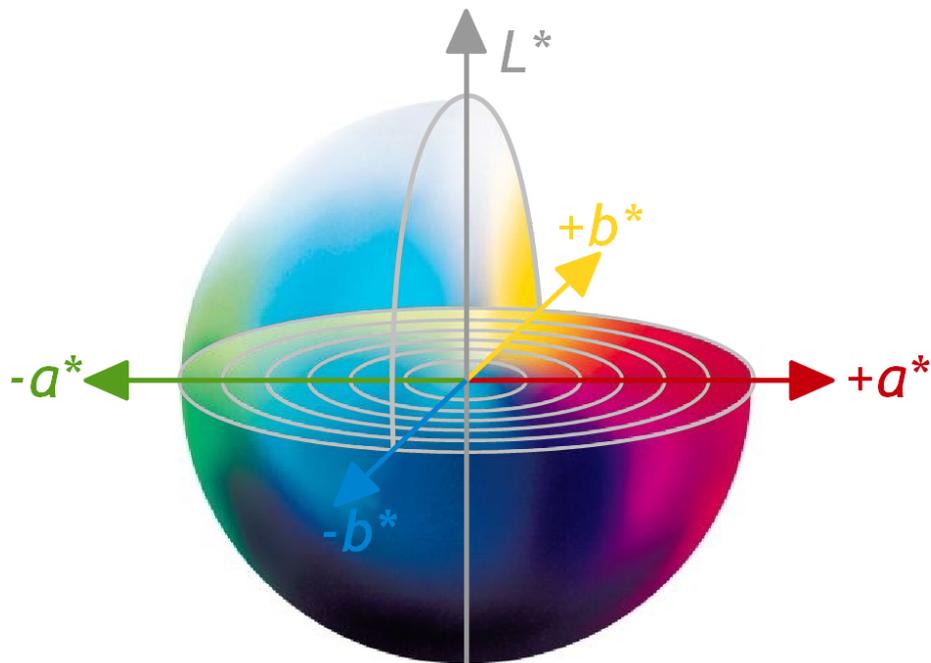


図 2.2: 等価明度と照度の関係 (出展：文献 [13])

2.3.2 CIE $L^*a^*b^*$ 表色系と等価明度

提案手法では、明るさによる色相の知覚の変化を表現するため、第 1.4.2 節で述べた反対色表色系である、CIE $L^*a^*b^*$ 表色系と、第 1.3.4 節で述べた等価明度を利用する。

CIE $L^*a^*b^*$ 表色系 [26] は反対色表色系に基づく表色系である。

反対色表色系は Hering によって導入され、Hurvich ら [19] により実験的に検証された表色系である。この表色系では、反対色の関係にある色は同時に見えないという人の知覚特性に基づいている。反対色表色系では反対色の関係にある色相により構成された直交する二軸により色相を表す。そして、それら二軸を含む平面に直交するように、明るさを表す軸をとる。色相の二軸は赤と緑の反対色軸、青と黄色の反対色軸である。明るさを表す軸は黒と白の反対色である。

CIE $L^*a^*b^*$ 表色系では、 a^* が赤と緑の反対色成分、 b^* が青と黄色の反対色成分、そして、 L^* が相対的な明るさを表している (図 2.2)。さらに、この表色系で表される色相は色相間の色距離が人の感覚に合致しているという特徴がある。この特徴は均等色空間と呼ばれる。この特徴を考慮し、提案手法では CIE $L^*a^*b^*$ 表色系を用いる。

等価明度とは、周囲の明るさ (照度) に対して、色がどれくらいの明度で表されるか示したものである。Ikeda らは次の実験によって等価明度を測定した [13]。実験は暗室内で行われた。まず、色標のサンプルを用意する。そして、部屋の明るさ (照度) を徐々に小さ

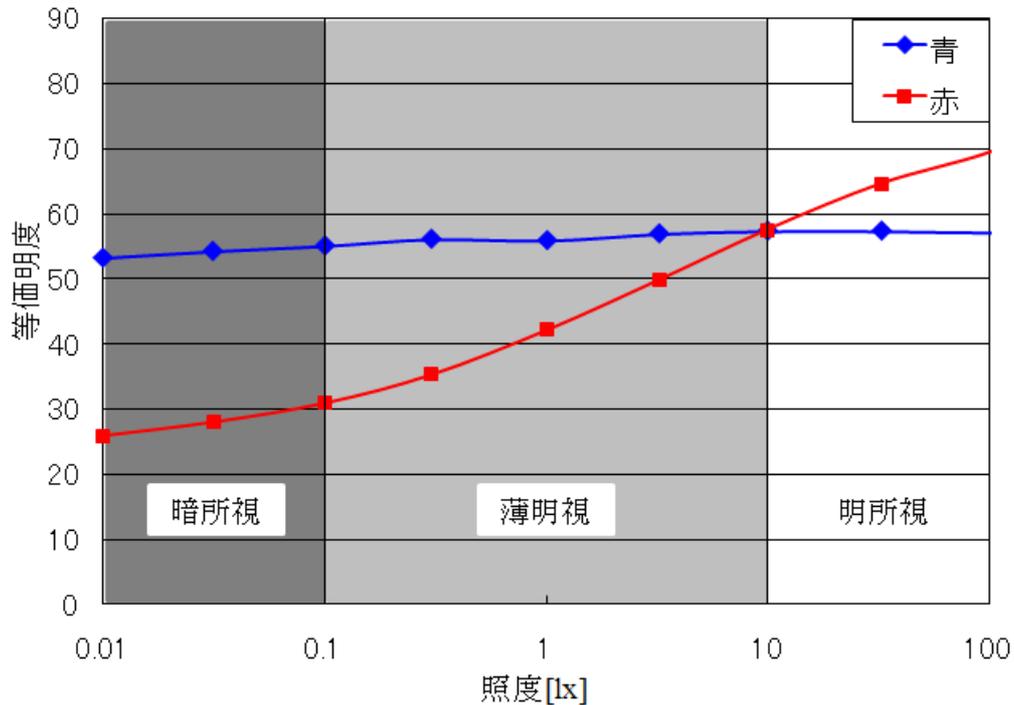


図 2.3: 等価明度と照度の関係 (出展：文献 [13])

くしていく。それぞれの照度のときに、サンプルの色標と、明度のわかっているグレースケールのサンプルを比較した。そして、サンプル色標の明るさと等しいグレースケールを選択する。このときのグレースケールの明度が等価明度である。Ikeda らは、赤と青のサンプルについてこの実験を行い、それぞれの等価明度の変化を測定した。

このようにして得られた等価明度をプロットしたものが図 2.3 である。前述のように、横軸が室内の照度、縦軸が色標の等価明度を表している。青の色標では照度が増えなくてもほとんど等価明度は変化しない。一方、赤の色標では照度が小さくなるにつれ、等価明度も小さくなっている。この実験から、相対的に、暗いときには赤成分よりも青成分が目立って見えることがわかる。

2.4 提案手法

2.4.1 提案手法の概要

提案手法では Ikeda らの実験結果 [13] を基に薄明視での色相を表現する。処理の流れを図 2.4 に示す。提案手法では輝度と色相を分離して処理する。これにより、既存の輝度ダイナミックレンジのみを小さくするトーンマッピング手法に容易に組込むことができる。

入力された RGB 表色系の HDR 画像を XYZ 表色系での輝度 Y と正規化された xy 成分に変換する。輝度成分は通常のトーンマッピングを行い、輝度ダイナミックレンジを狭める ($Y \rightarrow Y'$)。提案手法では、Reinhard らのフォトグラフィックトーンマッピング手法 [2] を利用した。これは幅広い輝度に対処することができるからである。そして、変換後の輝度 (Y') と xy 成分から $L^*a^*b^*$ 表色系に変換し、色相成分を分離する。

一方、色相成分の変換では画像の平均輝度 (Y_{avg}) を求め、色相変化係数 $k_r(Y_{avg})$ を算出する。平均輝度はトーンマッピング前の輝度 Y を用いて計算する。これは、トーンマッピング前の輝度 Y は実世界の輝度に対応するからである。提案手法ではトーンマッピング前の輝度の平均輝度を周囲環境の輝度とすることで、目が見ているシーンの輝度に順応しているという仮定のもとで処理を行う。また本章では、照度と輝度は比例関係にあるものとして処理を行う。すなわち、反射率を一定と仮定する。この仮定の妥当性は適用例によって確認することができる。さらに、画像のピクセル値は輝度に比例した値が格納されており、実在する物質すべてについての平均反射率が一定値を取ることが経験的に知られている [2]。このことから説明できる。

この平均輝度を用いた $k_r(Y_{avg})$ の計算方法については第 2.4.3 節で詳述する。この係数 $k_r(Y_{avg})$ を用いて図 1.10 の実験結果の視覚特性に基づき色相成分 a^* を変化させる ($a' = k_r(Y_{avg})a$)。そして、変換後の $a^{*'}$ と L^* , b^* 成分から RGB 表色系に変換し、出力画像を得る。

次節以降で、色相を変化させる係数の計算と色相の調整について詳述する。

2.4.2 等価明度曲線の近似関数

色相の変化量は Ikeda らの実験結果 [13] (図 1.10 参照) に基づいて決定する。すなわち、図 1.10 の赤成分のデータから近似曲線を求め、その曲線に基づいて赤成分を変化させる。具体的には色相が変化しない点と変化する点での等価明度の比を求める。そして、この比を赤成分に掛け合わせるにより赤成分の大きさを変化させる。青成分の等価明度はほぼ一定であるので変化させない。赤成分が相対的に小さくなることにより、青成分が目立って見える効果が生じる。

赤成分の等価明度曲線 $E(I)$ を照度 I を用いて次式 2.1 に示すシグモイド関数により近似する。これは、視細胞の反応はシグモイド関数で近似されることが多いからである [42]。

$$E(I) = \frac{A}{1 + \left(\frac{10}{I}\right)^B} + C \quad (2.1)$$

ここで A, B, C は定数であり、図 1.10 の赤成分の曲線から次のようにして決定した。 A は I が大きくなったときに漸近する値、 C は I が小さくなったときに漸近する値である。そして、 B は最小 2 乗法により決定した (付録 A 参照)。最終的に近似曲線は次式となる。

$$E(I) = \frac{70}{1 + \left(\frac{10}{I}\right)^{0.383}} + 22 \quad (2.2)$$

近似曲線については図 1.10 のグラフのプロット点の値を用いて色相を変化させた場合と、近似曲線による値を用いて色相を変化させた場合とで差分値を求めて検討した。その結果、式 2.2 の近似曲線の妥当性を確認した。詳細についてはまとめて述べる。

2.4.3 色相の調整

色相を調整する係数 $k_r(Y_{avg})$ は次のように決定する。画像全体の平均輝度 Y_{avg} を求め、式 2.2 により、そのときの等価明度 $E(Y_{avg})$ を求める。そして、その等価明度 $E(Y_{avg})$ と薄明視が始まる $10[\text{lx}]$ での等価明度 $E(10)$ との比を取ることで $k_r(Y_{avg})$ を得る。

$$k_r(Y_{avg}) = \frac{E(Y_{avg})}{E(10)} \quad (2.3)$$

そして、この係数 $k_r(Y_{avg})$ を赤成分 a^* に掛け合わせ、新たな色相 $a^{*'}$ を得る。

$$a^{*' } = k_r(Y_{avg})a^* \quad (2.4)$$

本研究では図 1.10 に示す赤の等価明度曲線の赤の等価明度と色相 a^* が線形の関係にあると仮定している。この妥当性は適用画像から視覚的に判断した。

2.5 結果

式 2.2 に示す近似曲線の精度を検討するために、図 1.10 のグラフのプロット点での値を用いて変換した画像と式 2.2 の近似曲線による値を用いて変換した画像 (図 1.10 の提案手法の画像) の差分を求めた。ピクセル値の範囲 $0 \sim 255$ レベルにおいて差分値は最大でも 1 レベルであり、1 ピクセル当たりの平均誤差が R, G, B 成分それぞれ 0.005, 0.049, 0.093

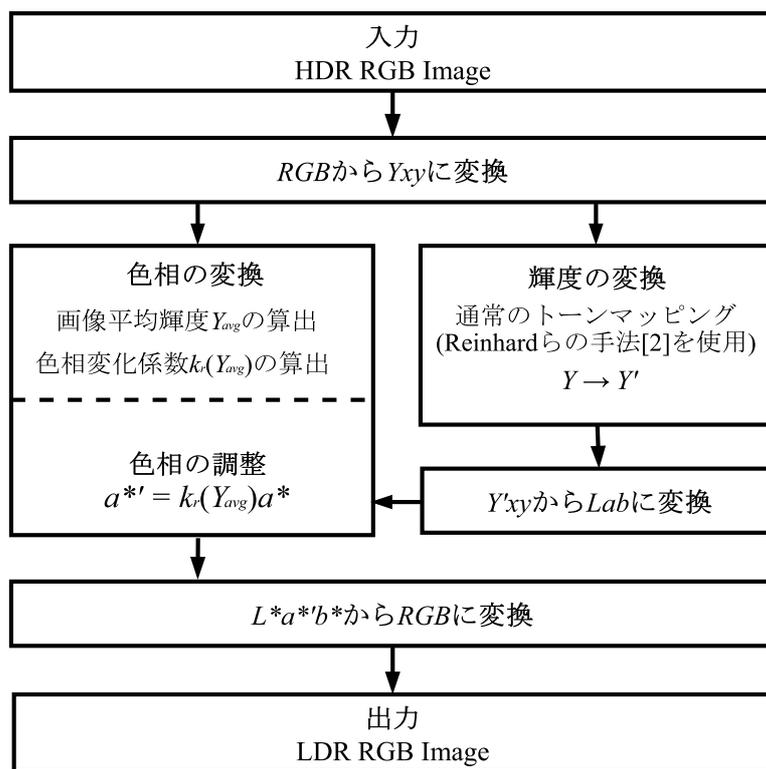


図 2.4: 提案手法の流れ.

であった. このことより式 2.2 の近似曲線は十分な精度で等価明度曲線を近似できていることがわかる.

2.5.1 有効性の検証

提案手法の有効性を示すため, 図 2.5 で薄明視における出力結果を, Jensen ら [40] による手法, Krawczyk ら [33] による手法と比較する.

色相についての比較は次のような条件で行った. まず, すべての手法は画像全体の平均輝度に基づいて色相を変化させる. また, 色相の変化に着目して評価を行うため, Krawczyk ら, Jensen らの手法での物体が見えにくくなる効果は実装していない. 比較した画像平均輝度は 10, 1.0, 0.1 の 3 種類である. それぞれ明所視との境界, 薄明視, 暗所視との境界の状態を選んだ. 第 2.4 節で述べたように, 照度と画素値が比例関係にあるという仮定に基づいて, 入力画像の画素値を係数倍して画像平均輝度を変化させた.

まず, 明所視との境界での状態 (右側の画像: 10 の列) では, それぞれの手法にわずかに出力結果の違いが見られるが, すべての手法ではっきりと色相が出ている.

次に, 薄明視の状態 (中央の画像: 1.0 の列) では, 画像中央のオレンジと黄色の花に

注目すると，Jensen らや Krawczyk らの手法に比べ，提案手法ではその色相の差が小さくなっている．すなわち，オレンジと黄色の色の違いがわかりにくくなっており，提案手法はプルキニエ現象による色相変化がリアルに表現できているといえる．

暗所視との境界の状態（左側の画像：0.1 の列）を比較すると Jensen らの手法は青成分が強く出ておりオレンジと黄色の花の領域は色が似通ってきている．Krawczyk らの手法は画像全体が薄暗くなった印象は受けるが，どの色相も同じように変化している．提案手法ではシーン全体が暗くなった印象を与え，かつ，オレンジと黄色の花は，ほとんど同じ色相になっている．また，画像下部の赤と紫の花に注目すると，紫の花は赤成分が小さくなり，青成分が目立つようになった．一方，赤い花の鮮やかさはなくなり，くすんでいる様子がよりよく表現できている．提案手法によるこれらの結果は，プルキニエ現象による色相変化を実験した Ikeda ら [13] の結果をよく反映している．

平均輝度 手法	0.1	1.0	10
Jensen et al.			
Krawczyk et al.			
提案手法			

図 2.5: 提案手法と従来手法との比較

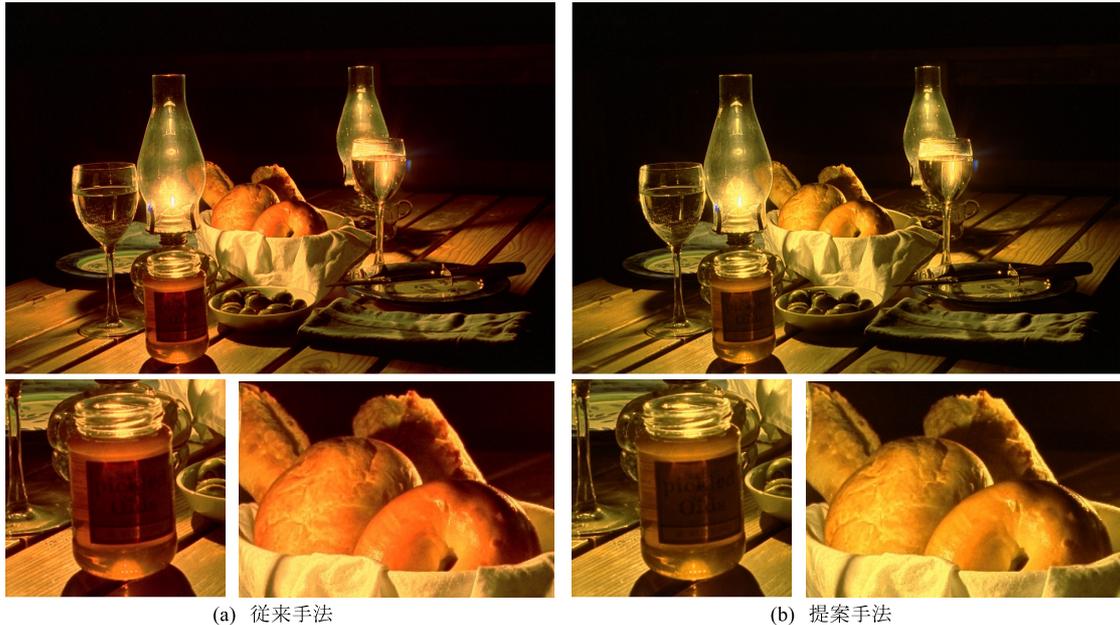


図 2.6: 屋内の風景への適用

2.5.2 さまざまなシーンの表示に応用

提案手法を用いて、さまざまなシーンの表示に応用した結果を図 2.6, 2.7, 2.8 に示す。それぞれ、左側の画像が色相の調整を行っていない出力結果（従来手法）、右側の画像が提案手法により色相の調整を行った出力結果（提案手法）である。また、色相の変化が顕著に見られる部分 2 箇所の拡大図をそれぞれの画像の下に示す。

図 2.6 は屋内の風景であり、静止物体が含まれている画像についての適用結果である。提案手法では手前側にあるビンや炎、照らされたパンの表面の色相に変化がみられ、薄明視の状態をよりリアルに表現できている。

図 2.7 は屋外の夜景についての適用結果である。提案手法では空の色が赤紫からより青みがかった色に変化している。また、ビルの明かりは赤から黄色に変化し、より現実の見えに近い印象を与える。

図 2.8 はコンピュータグラフィックスによって作成された薄膜による干渉現象をシミュレーションした画像である。提案手法ではティーポットの側面に色相の変化が顕著にみられる。また、円柱や球にも色相の変化がみられ、全体的に赤みが抜けた色相になっている。



図 2.7: 屋外の夜景への適用

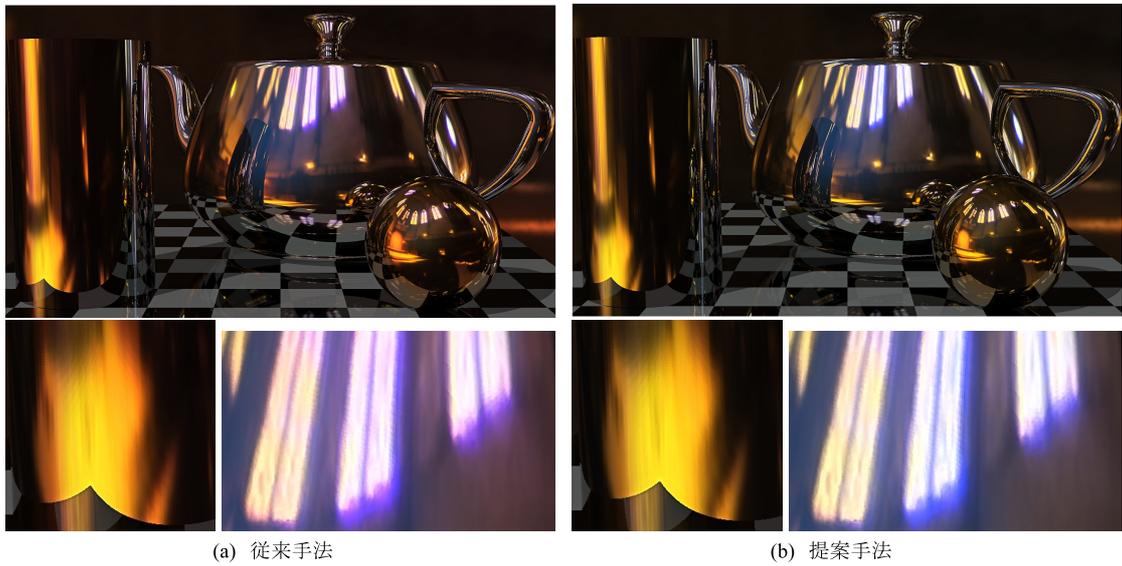


図 2.8: コンピュータグラフィックスにより作成された画像への適用

表 2.1: 提案手法を使用した場合と色相の調整を行わない場合の計算時間

適用画像	図 2.5	図 2.6	図 2.7	図 2.8
画像サイズ [pixel]	816×1232	1240×846	1204×768	720×411
提案手法 [ms]	4.81	5.02	3.96	2.59
色相調整なし [ms]	4.65	4.85	3.79	2.62

2.5.3 計算時間

図 2.5～2.8 の各画像に対する提案手法の計算時間と、色相を調整しないときの計算時間を表 2.1 に示す。計算には GPU を使用し、Slomp ら [34] によるリアルタイムに処理できるよう拡張されたローカルフォトグラフィックトーンマッピングを行っている。使用した GPU は NVIDIA GeForce 9800GT である。提案手法を加えた場合、すべての画像において数ミリ秒で処理を行うことができ、かつ、従来の色相調整のないトーンマッピング手法のみ場合とほぼ同じ時間で表示ができています。

2.6 まとめ

本章では、薄明視の印象を与える画像の表示を目的としたトーンリプロダクション手法を提案した。薄明視では明所視や暗所視と色相が異なる。これを実現するために薄明視における赤成分の等価明度と反対色表色系である CIE $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた。

また、表示結果を従来手法と比較し、薄明視において起こる視覚特性、すなわち、赤成分が見えにくくなり、色相の識別が難しくなる特性をよりよく表現することを示した。

さらに、提案手法は計算負荷が少なく、高速な表示を行えることを示した。

今後の課題として、提案手法は薄明視を中心として扱っているが、ドライビングシミュレーションなどに拡張することを考えた場合、明所視や暗所視の状態まで取り扱える範囲を拡大することなどがあげられる。その場合、薄明視の色変化だけではなく、色順応など、ここでは扱わなかった色に対する視覚特性も考慮する必要がある。

第3章 視覚特性に基づいた残像表示

3.1 はじめに

リアルな画像の表示はコンピュータグラフィックスの分野において、重要な課題の一つである。これは、映画やゲームなどのエンターテインメント分野や、さらに、ドライビングシミュレータや飛行シミュレータなどのシミュレーション分野にも必要となっている。

リアルな画像の表示ために、物理法則に基づく、正確な光学モデルだけに注目されがちである。しかし、写実的なレンダリングのために、さらに重要な要素として、視覚特性を考慮することが挙げられる。すなわち、光が眼に入射し、網膜に達した後、知覚されるまでをシミュレーションする視覚特性モデルが重要になる。

視覚特性モデルを設計するための課題は、厳密な計測結果を得ることが困難な点である。人の視神経がどのように繋がり、信号が神経間をどのように伝わり、脳に届くのか、未だ、すべては解明されていない。そのため、得られた実験データは、限られた環境下で行われた実験によるものである場合が多い。

多くの視覚効果がグラフィックエンジンや映像作成方法に取り入れられて、利用されてきた。例えば、映画、ゲーム、そして、シミュレータなどにおいてである。映像産業では、そのような視覚効果は発生原理に基づく正確な表現よりも、視覚的にリアルに見える表現方法として扱われてきた。

今までに、様々な視覚特性モデルが開発され、表示に利用されている。例えば、網膜や視神経系の処理をモデル化したトーンマッピング手法やトーンリプロダクション手法がある [43]。これらの手法の多くは、人が明るさに順応する視覚特性を基にしている。

そのほか、コンピュータグラフィックスで用いられる、視覚特性を表現した効果に、モーションブラーなどがある。さらに、まつ毛で起こる回折により発生するグレアもしばしば視覚特性として扱われている [44]。

本章では、人の視覚特性のなかでも特に日常的に体験する、残像について着目する。残像は、強い光を見た後に、その光が消えても明るさを知覚する現象である。例えば、夜間、車のヘッドライトを見た後に残像は知覚され、その後、ある程度の時間残像は現れ続ける。残像は、連続的な明るさ・色合いの変化をもたらしながら、消えて行く。今までに生態学的な見地から、残像は網膜内の光受容体で発生すると考えられている [45]。しかし、多くの研究者が残像発生の原因を調査しているが、未だ、その正確な発生原因は解明されてい

ない。

残像には陰性残像と陽性残像がある。陰性残像とは、見た物体・シーンの補色が見える現象である。例えば、ある一点を凝視し続けた後に、視線を移動することで知覚する残像がこの現象である。これは視覚システムが、長時間物を視続けることで、疲労するためであると考えられている。人の視覚特性の一部は反対色系を使って説明することができる。すなわち、この現象は次のように説明することができる。そして、一方の色を見続けると、疲労のためにその感度は失われる。そのため、相対的にもう一方の色の感度が大きくなる。これにより、実際の色の補色を感じるようになる。

一方、陽性残像とは、見た物体・シーンと同様な形状、色相が、その後、実際にそこに存在していなくても、そこに存在して見える現象である。例えば、ビデオやアニメーションでは、この現象を利用し、物体が滑らかに動いて見えるように、静止画像を連続して表示する。また、モーションブラーなどの表現は、フレームごとに重みを変えて重ね合わせることで、物体のスピード感を表現する。

さらに、次のような残像も陽性残像に分類される。すなわち、太陽や車のヘッドランプ、裸電球などの強い光を見た後、その光が消えた後も、その形状がしばらくの間、ぼんやりと明るく見える現象である。それは時間が経つにつれ、消えてゆくが、その間、緑色や赤紫色、青色など様々な色相に変化し続ける。この現象は、光源の背景が暗い場合などに顕著に知覚される現象である。

本章ではこのような強い光を見た後に発生する陽性残像の表現を目的とし、以下単に、**残像**と呼ぶ。陽性残像の発生原因はまだ解明しきれておらず、未だ研究者の中で興味を引きつける対象となっている [46][47]。

提案手法では、残像の輝度の変化と色相の変化を表現することを目的とする。後者は *flight-of-colors* と呼ばれる。提案手法は心理物理学的な実験データを基にして残像を表現することで、未だ発生原因が解明しきれていない残像に対して、視覚的に好ましい残像を生成することができる。さらに、提案手法はそのシンプルさにより、リアルタイムアプリケーションに適用可能である。残像をシミュレーションすることで、歩行者や通行者の安全を考えた道路標識・ライトの設計などに有益であると考えられる。

本章は次の構成になっている。第3.2節で今までに行われている、心理物理学的な実験による残像の研究について述べる。第3.3節で本論文の提案手法を述べる。第3.4節では、提案手法を移動する光源に適用する方法を述べる。第3.5節で結果と考察を述べ、第3.6で本章をまとめる。

3.2 関連研究

ここは心理物理学において、実際に発生した残像の色変化を観察することで行われた研究について述べる。しかし、残像が発生する原因は未だ完全には解明されていない。

本章では、ここに述べる関連研究を基に、心理物理学的な実験データから残像生成モデルを構築する。これにより、提案するモデルは視覚的に好ましい残像を表現する。提案手法は、計算速度の速さや、使いやすさに着目してモデル化したものである。

自然科学者として有名な Issac Newton は残像に大いに興味を持った [48]。Newton は太陽を一定時間見続けた後、暗い部屋の隅に視線を移し、残像の色変化を観察した。この実験によりニュートンは網膜を痛め(医学的には、solar scotoma と呼ばれる)、その影響は数か月にも及んだという。ニュートンはこの実験の後、「太陽を取り出すことに成功した」と語っている。また、ドイツの詩人であり、自然科学者として有名な Goethe は著書「Theory of Colours」において、より詳しく残像の色変化について述べている [49]。彼は紙に反射した太陽光を見た後に発生する残像の観察を行った。

それらに続いて、さらに、多くの研究者たちが残像の発生原因を解明するために実験を行った。Titchener らは残像の原因を、Hering の考えに基づき、反対色系で表される視神経の興奮作用と抑制作用によるものであるとした [50]。しかし、Titchener らの説では陰性残像の説明はできたが、陽性残像の説明はできなかった。Shuey は残像に対する様々な調査文献を纏めている [51]。Weve らは、カラーネーミング法によって、離散的ではあるが、その色変化を記録した [52]。カラーネーミング法とは、見えた色相を、あらかじめ準備した比較対象となる色票から選び、決定する方法である。カラーネーミング法は被験者間の意見の一致を得やすいという長所がある。しかし、残像のように連続的に変化する色相では、特定の色相だけしか得られず、色票にない色相については情報が得られないという短所がある。実験で用いられた白色光による残像は、青、黄色、緑、カーマインレッド、そして、青緑に変化した。また、彼らは実験結果で、刺激の光が変わっても、残像には、ある程度特定の色が、決まった順番で現れるということを述べている。

その後、より高精度な実験が Padgham によって行われた。Padgham は刺激光を見た時間に対する、残像の色相の変化、輝度の変化を測定した [14], [15]。Padgham は彼自身が被験者となり実験を行った。これは、被験者を自身に限定して実験を繰り返すことで、その実験の一貫性を保持するねらいがあった。実験は数か月間をかけて繰り返された。彼は、等色実験を用いて、残像の明るさ、色相を計測した。彼は刺激光を左目にあて、それによって発生した残像の明るさを、右目にセットした参照光と比べることで計測した。また、同様に色相を計測するには、右目に色度図表をセットすることでその色変化を追った。これにより、時間に対して連続的に変化する残像の輝度、色相の変化を詳細に記録することができた。

Reidenbach は照明工学分野から、LED により発生する残像について解析を行った [53]. 実験は、LED のワット数、照射時間、光源の波長を変化させて行われた。被験者は発生した残像の色変化を、モニタに表示されたカラープレートと参照した。彼らの実験結果の一部を図 3.8 に示す。彼らの目的は、眼に害を与えない LED を開発することであった。

これまでに述べた関連研究は心理物理学的な観測結果によるものである。残像について、その発生原因解明のための、生理学的な立場から研究も行われている。特に、第 1.2.3 節で述べた光受容体で起こる化学反応が残像が発生する原因の一部であると考えられている。

視細胞内の光受容体には視物質が存在する。視物質は光によって分解される。これは退色と呼ばれる。また、視物質は退色の後、時間が経過すると再び合成する性質を持つ。これは再合成と呼ばれる。この退色と再合成は化学平衡反応である。退色によって、光受容体内のイオンの濃度変化が起こり、その結果、刺激が発生し、物を見ることができる。強い光により視物質が過剰に退色すると、光受容体内は視物質の量が欠損した状態になる [1], [54], [55]. この間、再合成が間に合わず、刺激が発生できない状態になるため、物が見えない状態になり、残像が発生すると考えられている [45]. この退色による光受容体の感度の変化をシミュレーションする手法も開発されている [56].

興味深いことに、コンピュータグラフィックスの分野においては、二つの独立した研究が、同じ年、同じ会議で発表された [47], [57]. 一方は本論文筆者らによるもの [57], もう一方は、Ritschel と Eisemann によるもの [47] である。Ritschel と Eisemann は光受容体で起こる化学反応を基に、残像を表示させる方法を開発した。彼らは、光受容体で起こる化学反応である、退色と再合成を基に、残像の表示モデルを開発した。残像の明るさの変化は微分方程式を解くことで表現した。しかし、色相の変化については考慮していない。更に、残像の境界に視物質の濃度変化に由来するブラーをかけることで、残像の境界がはっきり見えないという特徴を表現した。光受容体で起こる化学反応を基にすることで、残像の明るさの変化を考慮した。しかし、彼らの手法では、残像の色変化を表現することができない。そのため、一時的に反対色を用いることで対応している。この結果、残像の色相は残像が消えるまで、変化しない。これは、過去の心理物理学的な観測結果と異なっている。また、彼らはディスプレイに表示する際、画像に残像を付加することで、表示した実際の明るさよりも、明るい印象を与えることを、実験により示した。これは、残像を付加することで、知覚されるダイナミックレンジが大きくなるということである。

3.3 提案手法

本章では、提案手法による残像生成の詳細を説明する。

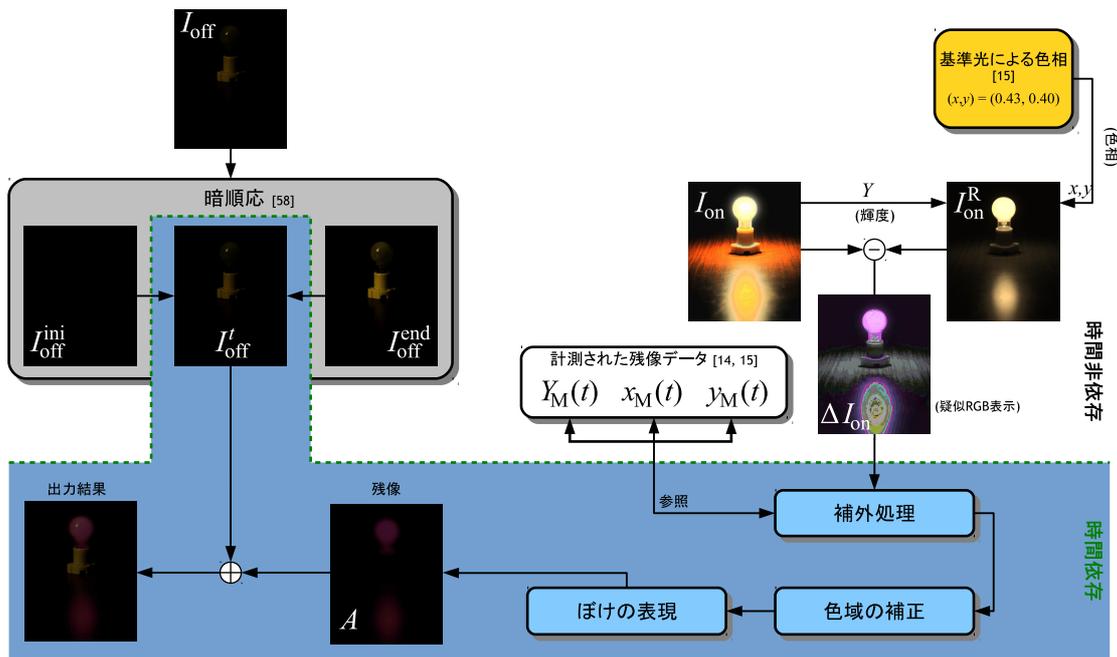


図 3.1: 提案手法による残像作成の流れ.

3.3.1 提案手法の概要

提案手法は、残像生成のために、残像について調査された文献を基にモデルを作成する。文献で述べられている実験データを用いることで、提案手法により生成される残像は残像の輝度の変化、色相の変化を表現できるという特徴を持つ。これに対し、既存の残像生成手法 [47] は輝度の変化を表現できるが、色相の変化は表現できていない。

また、提案手法による残像は、様々な光源の色に対応した残像を生成することができる。具体的には、文献に述べられている観測結果を基に、実験データを得るために用いた光源の色と、目的とする光源の色の差分を補外することで、光源の色に依存した残像を生成する。

さらに、高速で、視覚的に好ましい残像を生成することができる。これは、実験データをモデルに取り入れることで、時間毎の計算量を減らす効果による。

図 3.1 に提案手法による残像生成の流れを示す。図中に示された記号は、本文中の説明で用いられている記号と一致する。

残像の輝度の変化は Padgham[14] による実験データを近似することで決定する。近似には指数関数を用いる。これは、光受容体で起こる化学反応に由来する。さらに、指数関数のパラメータは文献 [52][53] のように実験データを利用して決定する。指数関数を用いて残像の輝度を測定することにより、Ritschel らの手法よりも少ない計算で残像を表示できる。

表 3.1: 残像の色相変化

経過時間 [s]	x_M	y_M	経過時間 [s]	x_M	y_M
0.0	0.41	0.42	44.0	0.26	0.06
4.0	0.37	0.48	48.0	0.24	0.06
8.0	0.32	0.54	52.0	0.23	0.07
12.0	0.31	0.55	56.0	0.23	0.08
16.0	0.36	0.47	60.0	0.23	0.10
20.0	0.34	0.38	64.0	0.21	0.10
24.0	0.39	0.33	68.0	0.20	0.09
28.0	0.47	0.27	72.0	0.18	0.08
32.0	0.48	0.25	76.0	0.16	0.07
36.0	0.44	0.24	80.0	0.15	0.06
40.0	0.35	0.15			

さらに提案手法は残像の特徴である色相の変化を表現するため、様々な観測実験の結果 [15][52][53] を取り入れる。これにより、提案手法は様々な色相の光に対して、残像を表現することができる。

初めに、色差 ΔI_{on} を計算する。この ΔI_{on} は、入力画像と、入力画像の輝度分布と Padgham らによる実験の色相 [15] を持つ画像 I_{on}^R の差から計算する。この色差は後に、残像の色相を計算するために用いる。

色差 ΔI_{on} を求めるのは、様々な色相を持つ光源の影響を残像に反映させるためである。Padgham は一種類の光源を用いて実験を行った。そのため、Padgham の実験で用いられた光源の色相だけでは、その他の色相を持つ光源による残像を表現できない。これを解決するため、我々は、Padgham の実験で用いられた光源の色相と、 I_{on} の色相を色差 ΔI_{on} を用いて補外することで、生成する残像の色相を決定する。これにより、様々な波長の光源を含む画像 I_{on} に対しても生成される残像の色相を決めることができる。

残像は強い光を放つ光源から、視線を離れたときに知覚される。そのとき、明るい場所を見た状態から暗い場所を見た状態への順応、すなわち、暗順応が起こる。これも考慮することで、より自然な印象を与える映像を生成する。提案手法では、Durand and Dorsey による方法 [58] を取り入れた。これにより、残像の色が変化していく間、暗順応が起こり、背景が見えない状態から次第に見えるようになるという状態を表現する。

次節から、提案手法の詳細を順を追って述べる。

3.3.2 入力画像

提案手法の入力画像には高輝度な物体を含む画像 I_{on} とそうでない画像 I_{off} を用いる. 図 3.1 中では簡単のため, I_{on} に電球が点灯している画像, I_{off} に電球が消灯している画像を用いて説明する. I_{on} はハイダイナミックレンジ画像が適しているが, 従来の 255 段階のローダイナミックレンジ画像形式にも提案手法は適用することができる.

さらに, 生成した残像を適用する背景画像を入力とする. これには視覚特性を考慮した表示を行う. 具体的には, Durand and Dorsey によって提案された順応を表現する手法を適用する. 画像 I_{off} は残像を適用する背景を作成するために使用する.

3.3.3 基準光の設定

前述したように, 文献 [15] の実験は一種類の光源を用いて行われており, その他の色相の光源による残像の色相変化は計測されていない. 一方, 提案するモデルは, 様々な色相の光源による残像を表現する. そのため, 光源と基準光の色差 ΔI_{on} を利用する.

色差の計算には, I_{on} の輝度分布を持ち, Padgham の実験に用いられた色相を持つ, 仮想的な光源 (ここでは基準光と呼ぶ) I_{on}^R を用いる. I_{on}^R は, I_{on} と同様の輝度分布を持ち, すべての画素値で色相 $(x, y) = (0.43, 0.40)$ を持つ画像である.

I_{on}^R を設定するには, CIE XYZ 表色系から導き出される Yxy 表色系を用いる. これは Yxy 表色系には, Yxy 表色系は輝度と色相を独立して扱えるという特徴があるためである.

3.3.4 色差の計算

現在, 筆者の知る限り, 全ての可視光による残像の色相の変化についての実験データは得られていない. さらに, 今後もそれは難しいことであると予想される. 提案手法では文献 [15] らの実験データに対し, 補外処理を行うことで, 様々な色相を持った光源による残像の色相変化を表現する.

まず, 画素ごとに CIE Lab 表色系における色差を次式で計算する. $L^*a^*b^*$ 表色系の * はここでは簡単のため省略する.

$$\Delta a(i, j) = a_{on}(i, j) - a_{on}^R(i, j) \quad (3.1)$$

$$\Delta b(i, j) = b_{on}(i, j) - b_{on}^R(i, j) \quad (3.2)$$

ここで, $a_{on}(i, j)$, $a_{on}^R(i, j)$ は, Lab 表色系で表した画像 I_{on} , I_{on}^R 中の位置 (i, j) における a 成分である. $b_{on}(i, j)$, $b_{on}^R(i, j)$ についても同様である. Lab 表色系を用いるのは, 残像

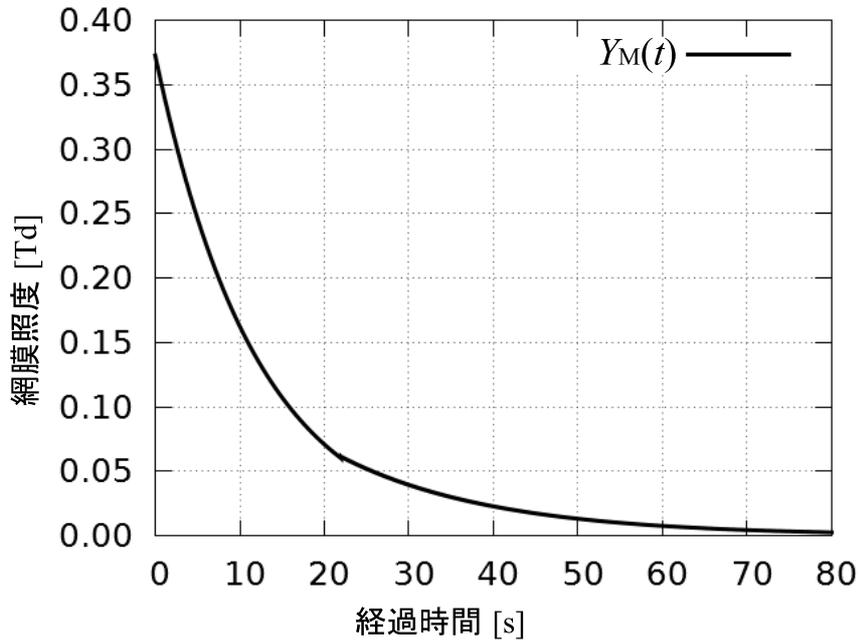


図 3.2: 残像の輝度変化.

は反対色系で表現されるという知見があること、また、均等色空間で表されており、知覚による差を数値で表すことができることからである。

この色差画像 ΔI_{on} は入力画像と基準光 I_{on}^R の対応を維持するために用いる。そして、この色差画像は、残像を生成するための補外処理に使用する。また、補外処理を用いたのは Weve による実験結果 [52] に由来する。すなわち、異なる色の刺激光による残像は、同じような色変化に収束して行くという実験結果である。

3.3.5 輝度の変化

提案手法によって生成される残像の輝度の変化は Padgham ら [14] の実験データに従う。この変化の様子を図 3.2 に示す。これは、次の近似式で表される。

$$Y_M(t) = \begin{cases} e^{-0.083t-0.978} & (t \leq 22) \\ e^{-0.055t-1.584} & (t > 22) \end{cases} \quad (3.3)$$

指数関数を用いたのは、光受容体で起こる化学反応を表す微分方程式を解く場合、指数関数が現れることに由来する。実験により発生する残像の強度は網膜照度 (単位 [Td]) で表される。指数関数により残像の強度が減少することで、残像が次第に消えてゆく様子を表現する。

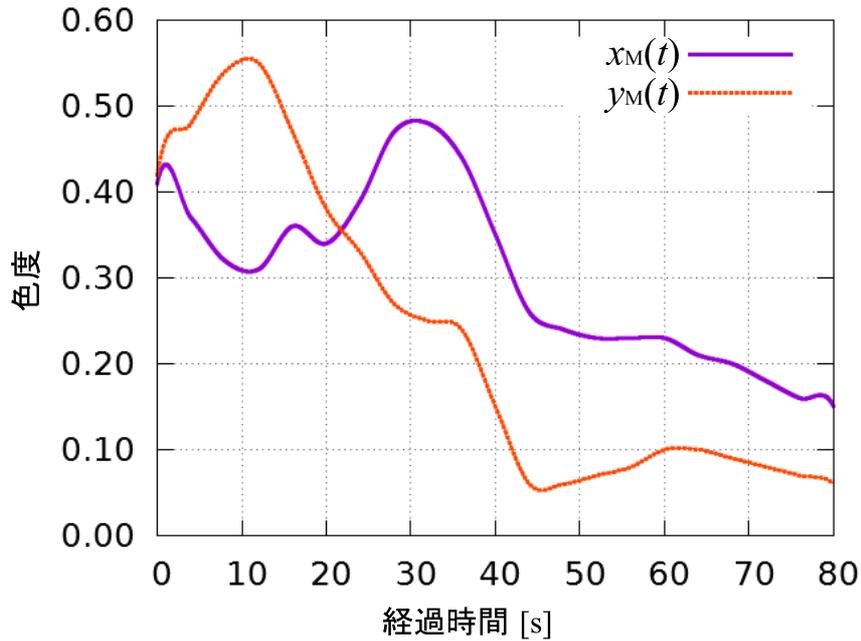


図 3.3: 残像の色相変化.

3.3.6 色相の変化

提案手法によって生成される残像の色相の変化は Padgham[15] の実験データに従う．残像の色相の変化を図 3.3 に示す．さらに，色度図上にプロットしたものが図 3.6(青い曲線)である．

残像の色相の変化は複雑なため，これを関数化すると複雑な式になる．そのため，提案手法は，4 秒ごとにサンプリングしたデータ (表 3.1) に対して，Catmull-Rom 補間を用いた．

色差 ΔI_{on} を用いて色相を補外する．これより， I_{on} と Padgham[15] の実験により使用された刺激光が同じである場合， $I_{on} = I_{on}^R$ となる．このとき，提案手法によって生成される残像の輝度・色相の変化は Padgham らの実験結果と同じになる．また，その他の色相の光源に対しては，色差 ΔI_{on} を用いて補外することにより，光源 I_{on} の色相を考慮した表示を行う．

提案手法では Padgham[15] の実験の 20 秒以降のデータを使用した．これは Padgham らの実験では刺激光が消えた後の 20 秒間は残像が安定せず，残像の色相を特定できなかったためである¹．

¹Padgham によると “The eyes were dark-adapted for 10 min prior to each exposure to the stimulus. (...) it is not possible to make measurements for about 20 sec after the presentation of the stimulus. This is the order of time necessary to allow the extreme sensation of glare to subside, and for the after-image color to be perceived.” (文献 [15] から一部を抜粋)．

これに対し提案手法は、Padgham の実験で行われたような完全な暗順応でない状況を仮定する。これにより、グレアによる強い刺激が発生しないものとする。さらに、Padgham の実験データ [15] で、経過時間 20[s] の点を図 3.3 中の経過時間 0[s] とする。輝度の変化については、色相の変化のデータと一貫性を保つため、Padgham の実験データ [14] の経過時間 20 [s] 以後のデータを用いる (図 3.2)。

3.3.7 残像の生成

この節では、基準光と異なる、様々な色相の光源による残像を生成するための補外処理について述べる。画像 I_{on} によってできる残像の色相は先に述べた色差 ΔI_{on} によって決定する。

時刻 t における残像 A は Lab 表色系で、次式で表される。

$$L_A(i, j)_t = L_M(t) \cdot Z(i, j) \quad (3.4)$$

$$a_A(i, j)_t = a_M(t) \cdot Z(i, j) + \tau_M(t) \cdot \Delta a(i, j) \cdot k \quad (3.5)$$

$$b_A(i, j)_t = b_M(t) \cdot Z(i, j) + \tau_M(t) \cdot \Delta b(i, j) \cdot k \quad (3.6)$$

ここで、

$$Z(i, j) = \left(\frac{L_{on}(i, j)}{L_{on}^{max}} \right)^\gamma$$

であり、 $a_M(t)$, $b_M(t)$, そして $L_M(t)$ は、図 3.2, 図 3.3 で示される Padgham らによる実験データ Y_M , x_M , y_M を Lab 表色系に変換したものである。

$Z(i, j)$ は画像 I_{on} 中の輝度が大きい部分ほど、残像が強く表れるようにする効果がある。これは、画像 I_{on} 中の輝度と、その最大輝度 I_{on}^{max} との比を使った。パラメータ γ は $Z(i, j)$ を非線形に変えることで、生成される残像の明るさを変える効果がある。図 3.4 に γ の違いによる残像の変化を示す。 γ が小さいほど、生成される残像は大きくなるが、彩度が小さくなる。 $\tau_M(t)$ は、色相の変化とともに、残像が消えてゆく効果を表現するために用い、 $\tau_M(t) \equiv L_M(t)/L_M(0)$ とした。 $t=0$ のとき、 $\tau_M(0) = 1$ をとる。このとき生成される残像は画像 I_{on} の影響を最も反映するものになる。色相に掛かる係数 k は色相の変化に影響する。 k が大きいほど、生成される残像の色相は、入力画像 I_{on} の色相に近づく (図 3.5)。

γ と k については、参考文献がなく、現在、は実験的に設定している。

上記の式により、生成される残像は次の特徴を満たす。すなわち、(i) 生成される残像初期の色相は、刺激光の色相に近い [53]。 (ii) どのような色の刺激光でも、生成される残像の色相変化は、Weve が述べているように同じ変化に収束して行く [52]。これらは、残像における観測結果を反映している。

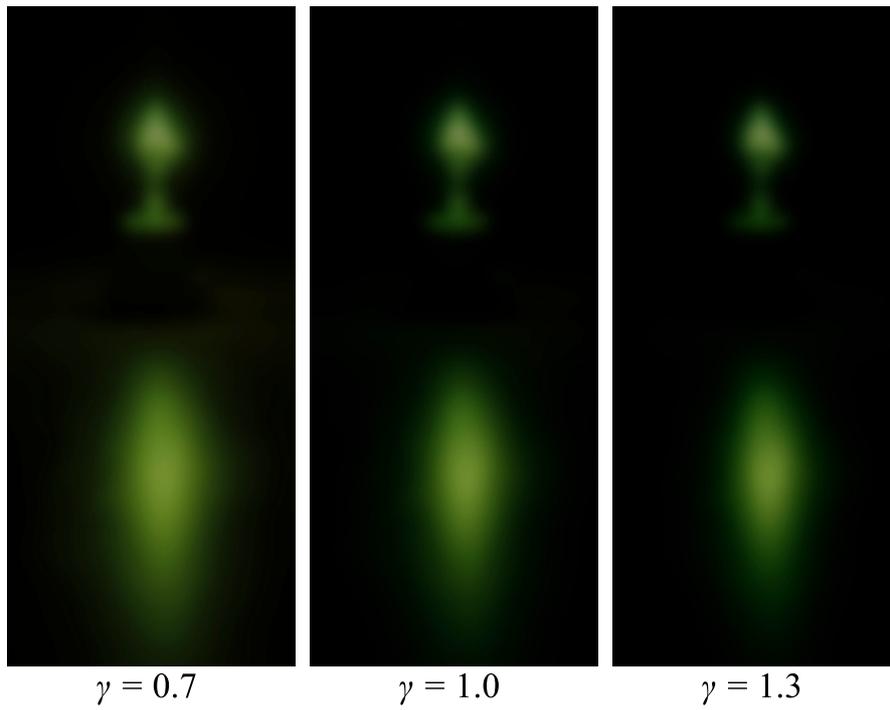


図 3.4: パラメータ γ の違いによる生成される残像の変化

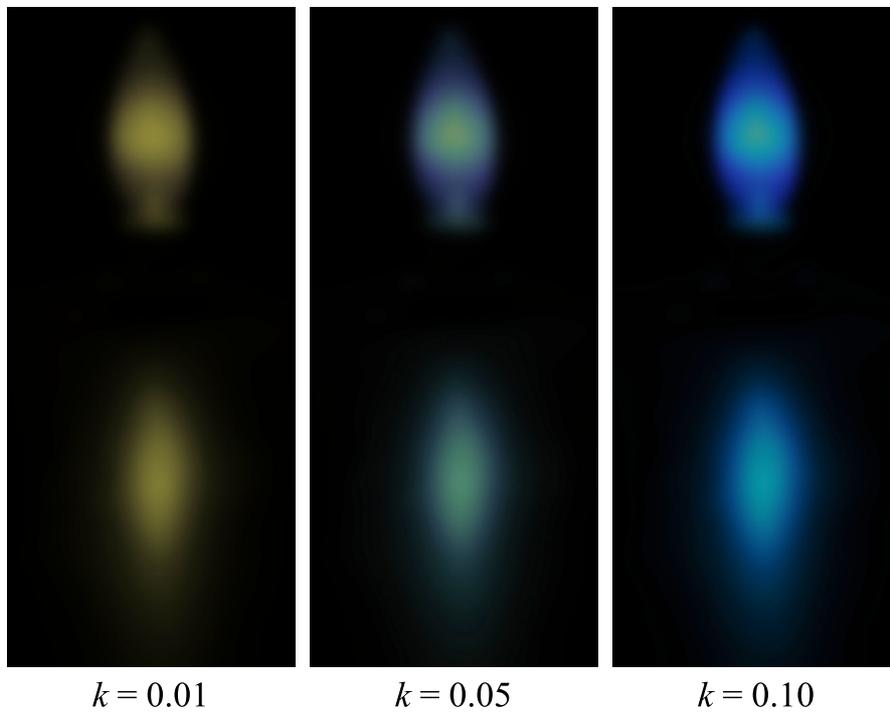


図 3.5: パラメータ k の違いによる生成される残像の変化

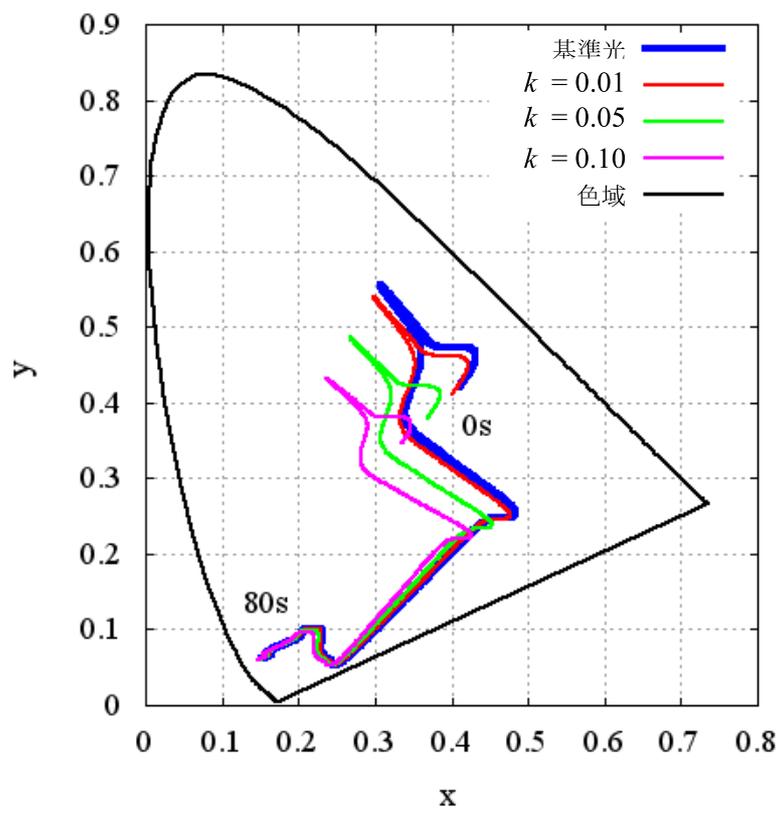


図 3.6: k による色相変化の様子.

3.3.8 色域の補正

残像の輝度は実験データを用いることでディスプレイ表示できる範囲に収まっている。しかし、残像の色相についてはそうとは限らない。式 3.4~3.6 で計算された値を RGB 値に変換すると、ディスプレイが表示できる色域を出る場合がある。これは Padgham らによる色相の変化の実験データに原因がある。すなわち、実験データは視覚特性を計測したものである。そのため、ディスプレイで表示できる範囲よりも広い範囲の値を取る。その結果、ディスプレイ表示できる範囲を出た値は RGB 値に変換した場合、負の値をとる。提案手法では次の 2 段階の処理によってこの問題を防ぐ。まず、負の RGB 値が現れた場合、負の値を 0 に固定する。このとき、0 にすると、輝度が変化する。そのため、次に、元の輝度に設定しなおす。この変化した輝度を元の輝度に設定する処理を Lab 表色系で行う。

提案手法ではデバイスに依存しない RGB 表色系 [59] を用いることで、手法の汎用性をはかった。

3.3.9 ぼけの表現

経験的に残像は形状がはっきりしておらず、境界部分がぼやけている。これを表現するために、輝度、色相を設定した後、残像にブラーをかける。ブラーにはガウシアンブラーを用いた。これは、網膜上の視覚特性 (例えば、側抑制) を表わすのに、ガウシアンブラーを用いられることがあるからである [60]。このときのブラーの量を決定するカーネルサイズは、出力結果から視覚的に判断した。この処理によって生成される残像 A を図 3.1 中に示した。

3.3.10 暗順応

最後に、生成した残像の生成結果 A を、暗順応する過程を表現した画像に加える。これは画像 I_{off} から計算される。暗順応する過程は文献 [58] で提案された手法を用いる。すなわち、画像 I_{off} から得られる、明るさの異なる画像 2 枚を指数関数を用いて補間する。その補間パラメータには時間 t が用いられ、これによって補間に用いる 2 枚の画像の重みが増える。この処理の流れを図 3.1 に示した。

Durand and Dorsey による手法 [58] は本来、錐体と桿体の順応モデルを用いて、明順応状態の画像・暗順応状態の画像間における輝度と色相を補間している。それに対して提案手法では、より単純化し、画像 I_{off}^{in} と画像 I_{off}^{end} を補間する。画像 I_{off}^{in} と画像 I_{off}^{end} は、それぞれ画像 I_{off} を定数倍して得られるが、画像 I_{off}^{in} の方が画像 I_{off}^{end} よりも暗い画像として設定する。また、画像 I_{off}^{in} と画像 I_{off}^{end} は、ともに同じ色相の画像であるため、これらの画像の輝度を補間する。

補間に用いる関数は Durand and Dorsey と同じものを用いる。これは次式で表される。

$$Y_{\text{off}}^t(i, j) = Y_{\text{off}}^{\text{end}}(i, j) + \left(Y_{\text{off}}^{\text{ini}}(i, j) - Y_{\text{off}}^{\text{end}}(i, j) \right) e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.7)$$

ここで、 Y_{off}^t , $Y_{\text{off}}^{\text{end}}$, そして、 $Y_{\text{off}}^{\text{ini}}$ はそれぞれ、画像 I_{off}^t , 画像 $I_{\text{off}}^{\text{end}}$, そして画像 $I_{\text{off}}^{\text{ini}}$ の輝度を表す。画像中の刺激光が消えた場合 ($t = 0$), 背景は完全に暗く見える。時間経過により、眼は暗さに慣れ始め、最終的には暗順応を完了する。これは、指数関数部分が小さくなっていくことで表現される。

このように得られる画像を背景とし、前節で得られた残像画像 A を加え合わせる。これにより背景に暗順応して行く過程で、高輝度光源から発生した残像が消えてゆく様子を表現する。

3.4 移動光源に対する残像

本節では移動する高輝度光源に適用する方法を述べる。ここまでの提案手法は、静止した光源を仮定した場合に発生する残像を生成するものであった。しかし、日常生活において静止した光源だけが存在するわけではない。例えば、車のヘッドライトは移動する光源である。さらに、光源は静止していても、光源を見ていた視線を外した場合も、相対的に光源が移動したと考えることができる。このような場合、残像は移動する光源に対して軌跡を描くように発生する。

移動する光源に対して発生する残像は、各光源位置に依存し、発生時刻が異なる。すなわち、ある時刻で発生した残像と、それよりも前の時刻に発生した残像では、発生時刻が異なるため、その色が異なる。前の時刻で発生した残像は、ある時刻で発生した残像よりも、より時間が経過した残像が発生している。したがって、残像は場所によって異なる色を持って発生している。

これは、光源移動が起こる画素では、移動直前・直後のフレームで、光源が点灯した状態から消灯した状態に遷移したとみることができる。そこで、画素位置 (i, j) にある光源が、そこから移動し存在しなくなった時刻を $t_0(i, j)$ とし、 t_0 から現在時刻 t_A までの経過時間を $t_p(i, j)$ とする。提案手法では前提条件として、光源は移動するが注視点は固定とする。

この考え方にに基づき、残像表現のための時空間画像 $I(i, j, t)$ (図 3.7 参照) を次式により生成する。

$$I(i, j, t_p(i, j))_{L^*} = L_M^*(t_p(i, j))Z(i, j) \quad (3.8)$$

$$I(i, j, t_p(i, j))_{a^*} = a_M^*(t_p(i, j))Z(i, j) + k \cdot \tau_M(t_p(i, j))\Delta a^*(x, y) \quad (3.9)$$

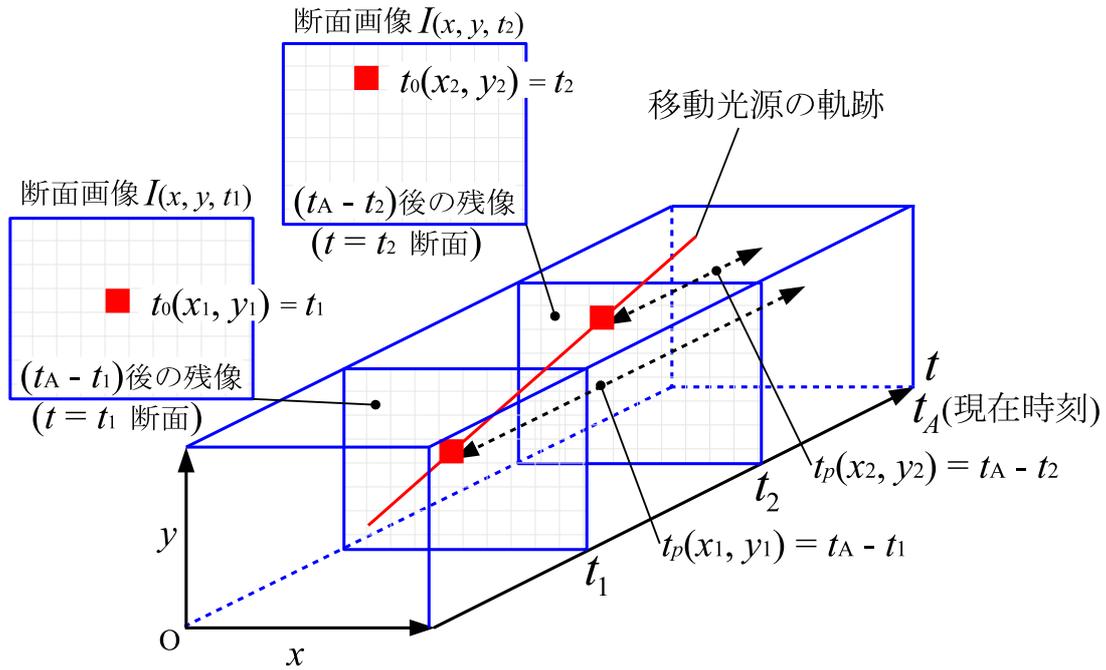


図 3.7: 残像表現のための時空間画像

$$I(i, j, t_p(i, j))_{b^*} = b_M^*(t_p(i, j))Z(i, j) + k \cdot \tau_M(t_p(i, j))\Delta b^*(x, y) \quad (3.10)$$

ここで, $t_p(i, j) = \max(t_A - t_0(i, j), 0)$ である.

図 3.7 に示すように, 高輝度光源が存在した画像位置 (i, j) (移動光源の軌跡と断面画像の交点である赤で示した画素) に, 時刻 $t_0(i, j)$ から残像が生成される. 生成された残像は現在の時刻において, $t_p[s]$ 経過している.

この時空間画像を時間軸に沿って加え合わせることで, 時刻 t_A に知覚される残像画像 $I_A(x, y)$ を得る.

$$I_A(i, j) = \sum_{k=1}^N I(i, j, t_k) \quad (3.11)$$

ここで, N は時空間画像の枚数 (Δt を時間サンプル間隔とすると $N = t_A/\Delta t$) である. また, 網膜が受ける刺激は残像発生直後が最大であると考え, $I_A(i, j)$ の明度は最大明度 ($L_M^*(0)$) を超えないとする.

3.5 結果と考察

ここでは、結果とその考察について述べる。まず、有効性の検証を行った。ここでは、提案手法によって生成された残像が、実際の残像とどの程度合致するかを示す。次に、提案手法による残像の色変化を示す。ここでは提案手法によって生成された残像の特徴を示し、既存手法とどのように異なるかを述べる。さらに、提案手法に様々なシーンを適用し、その結果について述べる。提案手法に移動する光源を適用したシーンでは、光源に対して尾を引くように発生する残像の様子について述べる。

3.5.1 有効性の検証

まず、提案手法によって生成される残像の色変化を Reidenbach[53]の実験による結果と比較した。図3.8(a)に Reidenbachによる、5人の被験者による実験結果を示した。Reidenbachによる実験では刺激光として波長 530nm の LED ライトが使用された。図3.8(b)に提案手法により生成される残像の色を示した。提案手法では Reidenbachによる実験で使用された LED ライトを入手できなかったため、提案手法を用いて比較するための緑色の刺激光として図3.10中の緑色電球領域の画素値を用いた。

Reidenbachによって得られた残像の色変化は、モニタに表示されたカラーパレットと比較して観測された。すなわち、被験者は、残像の色変化の様子をモニタ上のカラーパレットと照らし合わせ、対応する色を順に指示した。左から右に、記録された残像の色を示す。記録された残像の色が不連続なのは、カラーパレット上に表示された色が不連続であったためである。各被験者の結果は異なっている部分があるが、共通する部分も見る事ができる。例えば、すべての被験者で初期の残像の色は黄緑に近い色である。そして、青緑色、シアン、紫の順で現れる。刺激光を消してからの時間については文献[53]に説明がなく、また、Reidenbachによる実験と同じ環境を設定することはできていないが、提案手法では全体的に似た順番で似た色が現れている。特に、被験者3に対しては、その輝度も色相変化も似た結果が得られている。

被験者 1



被験者 2



被験者 3



被験者 4



被験者 5



(a) Reidenbachらの実験による色変化



(b) 提案手法による色変化

図 3.8: Reidenbach らによる実験結果と提案手法の比較

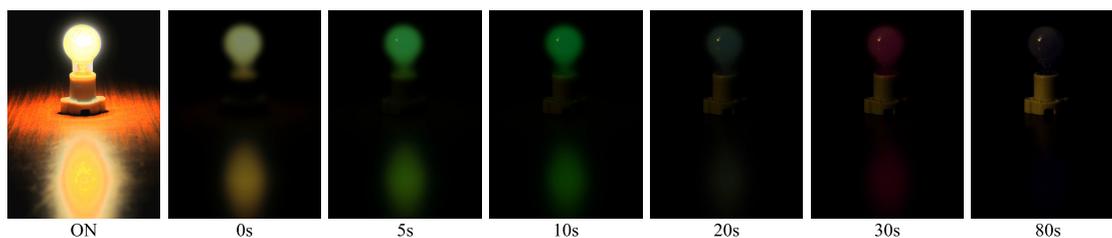


図 3.9: 基準光によってできる残像の色変化.

3.5.2 提案手法による残像の色変化

図 3.9 に提案手法を用いた残像の生成結果を経過時間ごとに示す. 使用した電球による光の色相 $(x, y) = (0.35, 0.36)$ は Padgham による実験 [15] に使用された電球の色相 $(x, y) = (0.43, 0.40)$ に近い. この結果では $\gamma = 1.0$, $k = 0.05$ に設定した. 残像の輝度については, 時間経過とともに小さくなっている. これは, 文献 [14] による実験データが反映されていることを示している. そして, 生成された残像の色相は, 緑, 青緑, 紫, そして赤となって次第に消えてゆく. この残像の色相変化は Ritschel と Eisemann[47] による手法では表現できなかった効果である. また, 暗順応の効果も表現できている. すなわち, 電球が消えた直後, 背景は暗く, 消えた電球は確認できない. しかし, 時間が経つにつれ, 消えた電球が見えるようになってくる.

図 3.10 に様々な色の電球に対して, 提案手法を適用した結果を示す. 電球のフィラメントはすべて同じだが, 電球のガラス表面をコーティングする塗料によって光の色が異なっている. 電球の実写画像を図 3.10 中の一番左の列に示す. 第 2 列に示している入力に使用した HDR 画像 (I_{on}) にはトーンマッピングを施して表示を行っている. この結果では $\gamma = 0.7$, $k = 0.05$ に設定した. 生成された残像の色相は, 初期では電球による光に近い. これは Reidenbach の実験結果と似た結果である [53]. この後, 生成された残像の色相は, それぞれ似たような変化に収束する. これは, Weve による実験結果 [52] に一致する. 現在, 提案手法では刺激光を見る時間は考慮していない.

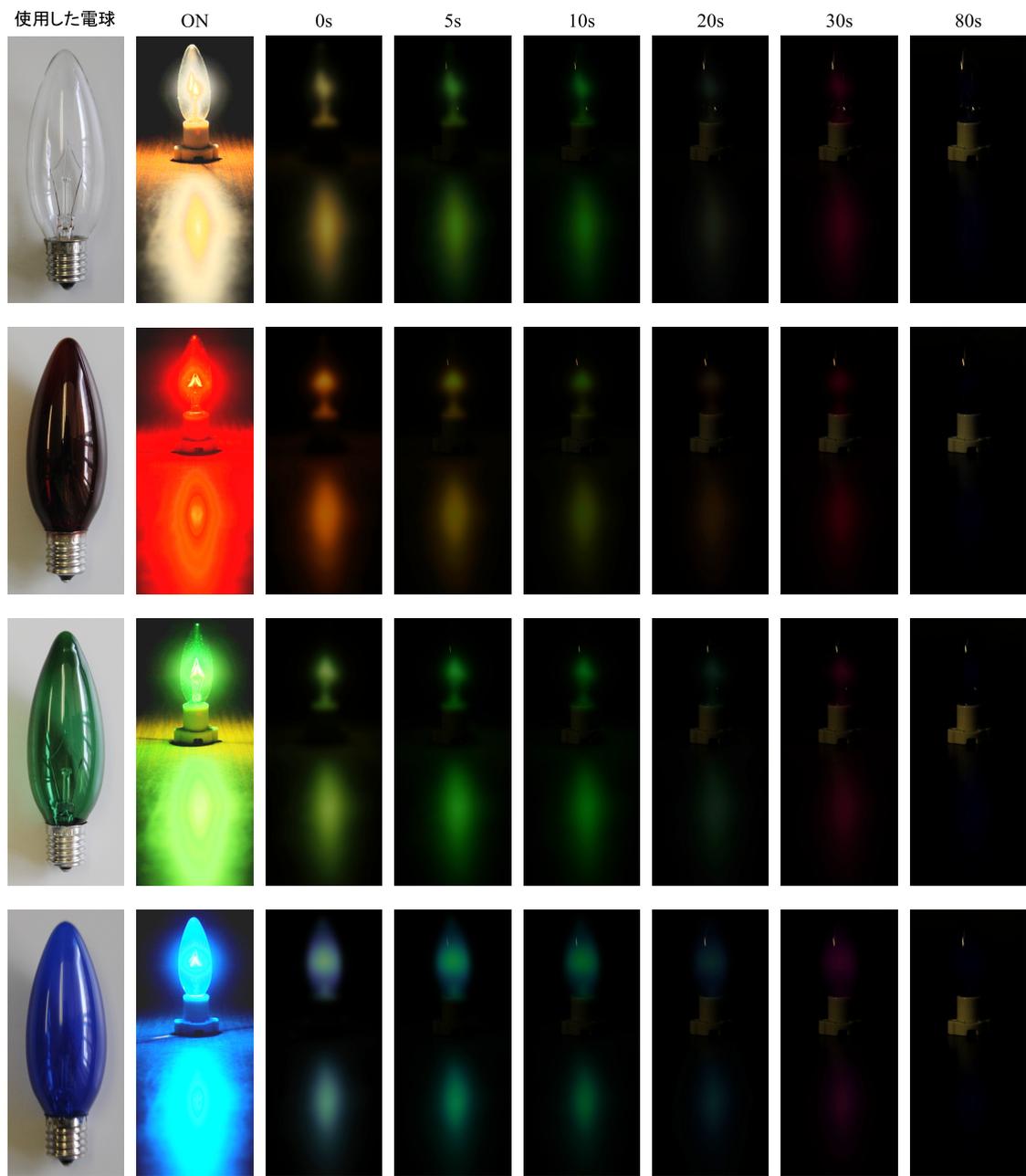


図 3.10: 様々な色の電球によってできる残像の色変化.

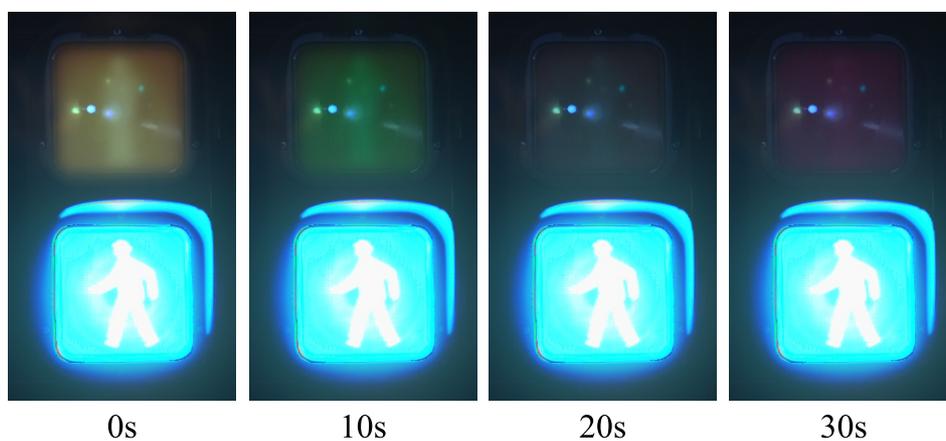
3.5.3 様々なシーンを適用

提案手法をより一般的なシーンに適用した結果を次に示す。提案手法は、交通標識などに使用される照明機器の設計や電飾の設計などへの応用も考えることができる。図 3.11 では、夜、信号があるシーンに対して提案手法を適用した。図 3.11(a) に入力画像である、青信号が点灯しているシーン、赤信号が点灯しているシーン、信号が消えているシーンを示した。信号は、赤信号による残像と青信号による残像の 2 種類がある。信号の点灯パターンは、点滅→赤信号点灯 (青信号消灯) →青信号 (赤信号消灯) の順で変化する。点滅は青信号の点灯と消灯が繰り返される。消灯時の青信号による残像を表現するため、入力画像 I_{on} として、青信号が点灯している画像を、背景画像 I_{off} として、青信号と赤信号ともに消灯している画像を用いる。赤信号点灯時の青信号による残像を表現するには入力画像 I_{on} として、青信号が点灯している画像を、背景画像 I_{off} として、赤信号が点灯している画像を用いる。青信号点灯時の赤信号による残像を表現するには入力画像 I_{on} として、赤信号が点灯している画像を、背景画像 I_{off} として、青信号が点灯している画像を用いる。これら入力画像を図 3.11(a) に、赤信号による残像、青信号による残像をそれぞれ、図 3.11(b), (c) に示す。図 3.11(b), (c) は右に向かって、時間経過したときの出力結果である。

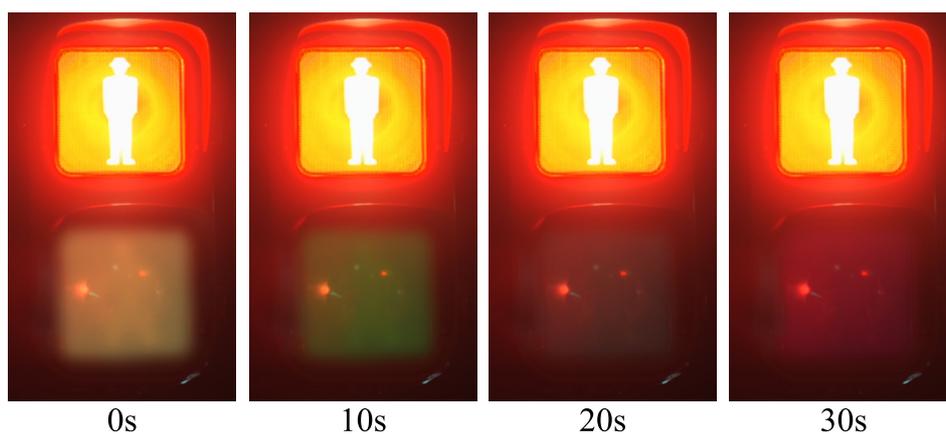
図 3.12 では、電飾されたツリーが置かれたシーンを提案手法に適用した。図 3.12(a) 電飾の点灯パターンを示す。次の 4 通りがある。(i) 全ての電飾が点灯している場合、(ii) 全ての電飾が消灯している場合、(iii) 青と緑の電飾が消灯している状態、そして、(iv) 赤と黄色の電飾が消灯している場合である。それらの状態から生成される残像は図 3.12(b), (c), (d) に示した。(b) がすべての電飾が消灯することによって生成される残像、(c) が青と緑の電飾が消灯することによって生成される残像、(d) が赤と黄色の電飾が消灯することによって生成される残像である。



(a) 入力画像



(b) 赤信号により生成される残像



(c) 青信号により生成される残像

図 3.11: 提案手法を信号があるシーンに対して適用した結果.



(a) 入力画像



0s

2s

4s

6s

(b) 全ての電飾により生成される残像



0s

2s

4s

6s

(c) 青と緑の電飾により生成される残像



0s

2s

4s

6s

(d) 赤と黄色の電飾により生成される残像

図 3.12: 電飾されたツリーが置かれたシーンに対して提案手法を適用した結果.

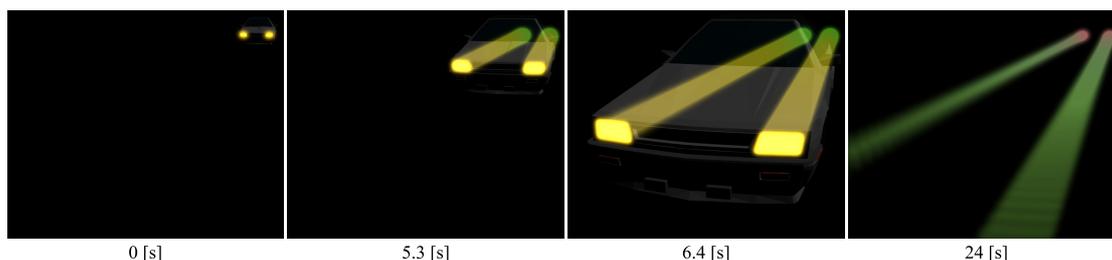


図 3.13: 移動光源による残像表示結果

3.5.4 移動する光源を適用

図 3.13 に移動する光源による残像表示結果を示す。最も左 (0[s]) が発車直後であり、この瞬間からヘッドライトが移動する。光源の軌跡に沿って残像が生じている様子が表現できている。残像の色相はヘッドライトが通過してから経過した時間に応じて変化していることがわかる。すなわち、ヘッドライト移動直後ほどヘッドライトの色相に近い黄色い残像が現れており、発車直後の残像は緑がかっている (6.4[s])。さらに時間が経過すると、残像は全体に緑がかかる (24[s])。これは図 3.10 に示した静止光源での残像の時間的色相変化が、移動光源の軌跡に沿った空間的色相変化として表れている。

3.6 まとめ

本章では、強い光を見た後に発生する残像の表現方法を提案した。コンピュータグラフィックスで残像を表現する方法は、未だ新しい研究テーマである。提案手法は残像の大きな特徴である、時間経過による輝度と色相の変化を、あらゆる波長の光に対して、ある程度違和感なく表現することができる。

提案手法による残像は、心理物理学的な実験データ・観測結果を取り入れたモデルによって生成される。これは、文献 [14], [15], [52], [53] を基にしている。残像の色変化を実験した結果 [53] と提案手法を比較し、その妥当性を確認した。

また、結果では暗順応の表現も同時に適用した。このように、提案手法はその他の視覚特性モデルと独立している。そのため、その他の特性に影響せずに適用することができる。

提案手法のさらなる有効性として、色変化のデータを取り換えることができることである。現在、提案手法では Padgham による実験データを用いている。しかし、より詳細な実験データが存在すれば、手法自体は変化させずに、データだけを新たに適用することができる。

さらに、提案手法を用いて、光源が移動した際に起こる残像も表現した。すなわち、光源移動を画素ごとの光源点灯・消灯とみなし、さらに、発生時間の時間差を考慮すること

により、従来の静止光源に対する残像の表現を拡張し、移動光源による残像を表現することができた。そして、例としてCGで作成した、車のヘッドライトに適用した。表示結果は日常経験する残像と同じような特徴が現れていることを確認した。すなわち、光源であるヘッドライトから、尾を引くように現れる残像を表現することができた。

提案手法の応用例として、道路に表示する看板や電飾の設計が挙げられる。これにより、対向車や通行者に対する安全性を考えた設計を行うことができる。また、提案手法は計算負荷が小さいため、リアルタイム性の必要となるゲームやドライビングシミュレーションに適用できる。その結果、ゲームでの臨場感や、シミュレーションの際、現実には起こり得る、強い光により発生する残像によって、視界が奪われる効果を表現することができると考えられる。

今後の課題として、刺激光を見た時間を考慮した表示モデルに改良することが挙げられる。すなわち、提案手法では1秒間だけ光源を見た場合の残像表示に限られている。これはPadghamの計測結果Padgham[14], [15]に基づいているための制限である。これに改良を加え、任意の長さの時間、光源を見た場合の残像を表現できるモデルに改良する。さらに、評価実験を行い、提案手法の妥当性の検証を行うことも課題である。また、現在、実験的に決定しているパラメータ γ と k を自動的に決定する方法を見付けることも有用であると考えられる。

第4章 ハイダイナミックレンジ分光画像の効率的表示

4.1 はじめに

本節では、分光情報を記録した画像であるハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range Spectral : HDRS) 画像を、高精度にかつ少ない容量で記録し、表示の際には、出力デバイスに応じた解像度の画像を高速に得る手法を提案する。

画像の記録と表示において重要なことは、次の三点である。一点目は、画像をできるだけコンパクトに記録する点である。二点目は、RGB 成分でなく分光情報を、精度よく扱える点である。三点目は、表示デバイスの解像度に応じて高速に表示を行う点である。

現在、一般的に用いられている JPEG や BMP などの画像ファイルフォーマットは、ローダイナミックレンジ (Low Dynamic Range: LDR) 画像を保存するのに用いられ、256 段階で輝度値を表現する。しかし、256 段階は現実世界の輝度値を表現するには不十分である。このため、LDR 画像では輝度飽和が起これ実際の輝度の情報が失われてしまう。この問題を解決するために、RADIANCE[61] や OpenEXR[62] など、従来よりも広い輝度幅が記録できる画像ファイルフォーマットを用いるハイダイナミックレンジ画像が開発されている。また、JPEG 画像フォーマットを拡張し、従来よりも広い輝度幅を記録することができるようにする研究 [63][64] も行われている。

可視光はおよそ 380 [nm] から 780 [nm] の波長を持つ電磁波である。また、光学現象には、光の回折、干渉など、波長依存性の高いものがある。これらの現象を考慮した CG を作成する際には、光の波長成分ごとに輝度計算を行う必要がある。光の波長成分を考慮したレンダリング手法として、多層薄膜系で起こる光学現象の可視化 [65] や、波動光学に基づいた虹のレンダリング [66] などがある。

近年、HDR 画像は CG による写実的な画像作成手法である Image Based Lighting 手法 [27] においても必要不可欠になっている。Image Based Lighting 手法を使用することで、周囲環境を含むリアルな画像を比較的短時間で作成することができる [67]。

これらのことを踏まえると、リアルな CG のレンダリング結果を記録し、さらにそれを環境マップやライトプローブとして利用するためには、分光情報を記録した HDR 画像、すなわち、HDRS 画像が必要であるといえる。

4.2 ハイダイナミックレンジ分光分布画像表示

この節では、HDRS 画像を記録し、再び表示する際に重要となる要素、すなわち、画像ファイル容量、RGB 変換、輝度ダイナミックレンジの調整、そして、画像表示解像度について述べる。

4.2.1 画像ファイル容量

HDRS 画像のファイル容量は HDR-RGB (High Dynamic Range RGB) 画像と比べ、大きくなる。HDRS 画像は (x, y, λ) の 3 要素からなるボリュームデータとして見ることができる。ここで、 x, y は画素の位置を表し、 λ は波長成分を表す。例えば、同じ空間解像度の画像であっても、波長成分のサンプリング数が大きくなるほど、画像ファイル容量は大きくなる。例えば、人間の可視光域は 380[nm]~780[nm] である。この間を 5[nm] でサンプリングした場合、81 サンプル必要になる。これは、従来の 3 成分を記録する RGB 画像に比べ、27 倍のデータ量となる。これを如何にコンパクトに記録するかが重要となる。

4.2.2 RGB 変換

HDRS 画像は分光情報を記録している。しかし、分光情報は通常のディスプレイに直接表示することができない。そのため、通常、次式を用いて、分光分布を RGB 値に変換する。

$$C_l = k \int_{\lambda \in \Lambda} I(\lambda) \Phi_l(\lambda) d\lambda \quad (l = R, G, B), \quad (4.1)$$

ここで、 C_R , C_G , そして、 C_B はそれぞれ、変換された R, G, B 値である。 Λ は可視光域である。 k は放射輝度から輝度の変換を行う定数である。 $I(\lambda)$ は分光分布である。 $\Phi(\lambda)_R$, $\Phi(\lambda)_G$, $\Phi(\lambda)_B$ はそれぞれ、R, G, B の等色関数である (図 1.17)。このように、RGB 値を得るには分光分布と等色関数を掛け合わせたものを可視光域で積分する必要がある。この計算コストをできるだけ小さくすることが重要となる。

4.2.3 輝度ダイナミックレンジの調整

CG により計算される光の輝度輝度ダイナミックレンジは実世界の光の輝度ダイナミックレンジと同様に大きくなる。一方で、通常のディスプレイで表示できる輝度ダイナミックレンジは、それに比べると小さい。広い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、広い輝度幅をディスプレイに表示できる輝度幅まで変換しなければならない。そのために、4.3.3 節で述べる、トーンマッピング手法を適用する必要がある

4.2.4 ディスプレイの解像度

ディスプレイに出力される画像は、ディスプレイに適した解像度に変換される。現在、大型ディスプレイなどの高解像度のディスプレイからスマートフォンなど低解像度のディスプレイまで、様々な出力デバイスが普及している。表示する際は、それらのデバイスに応じた適切な解像度の画像が必要になる。高解像度の画像を低解像度の表示デバイスに表示する場合、通常は、一度復元した元の解像度の画像を、平均画素法などにより縮小する。しかし、画像を復元する際には、必要とする解像度に合わせた画像を直接取り出すことが望まれる。また、異なった解像度の画像を複数出力する場合、それぞれの解像度の画像ごとに分光情報から RGB 値への変換を行うことは非効率である。一度の RGB 値への変換で複数解像度の画像を得ることが望まれる。

4.3 関連研究

4.3.1 分光情報の記録

分光情報を記録した衛星画像に対して、Penna らは様々な変換手法で圧縮率と精度の関係を評価した [68]。彼らは離散ウェーブレット変換と離散コサイン変換を使用し、空間領域と波長領域に対して様々な組み合わせを調査した。その結果、離散ウェーブレット変換を、空間領域と波長領域の別々に適用するのが最も効果のある手法であるという結果を得た。

Christophe らは SPIHT [69] と呼ばれるエンコーディング方法をボリウムデータに対して使用した [70]。また、この手法による復元後のデータ欠損に対しても調査を行った。

島田ら [71] は、二つの異なる正規直交基底変換を併用し、分光分布の近似および RGB への変換を行った。正規直交基底変換である離散コサイン変換と、離散ウェーブレット変換を併用し、基底関数の係数値の個数を削減しながら、分光分布を近似することでデータを圧縮した。しかし、この手法は空間成分に対して変換を行っておらず、十分な圧縮率を得られていない。

辰巳ら [72] は、分光分布を記録する際に、主成分分析によって特徴解析を行った。そして、そのときの基底関数と、基底関数の係数値を記録することでデータの圧縮を行う手法を提案した。しかし、この手法は基底関数に正規直行性がなく、表示の際に多くの計算量を要する。

上で述べた関連手法の目的は分光情報をコンパクトに記録することであり、表示方法の効率化は考慮されていない。

4.3.2 分光情報の RGB 変換と表示

Iwasaki らは分光情報をディスプレイに高速に表示する方法を開発した [73]. この手法は分光分布から RGB 値を求める際, 正規直行基底関数の性質を用いることで, 処理の効率化をはかり, 高速な変換を行うことができる (付録 C 参照). 提案手法は, Iwasaki らの手法を, 空間領域, 波長領域どちらに対しても圧縮処理を施した HDRS 画像に適用する.

提案手法は Penna ら [68], Iwasaki ら [73] の知見から, 正規直行基底関数としてウェーブレット関数を用いる. これにより, 圧縮率を上げても精度を保って記録することができる. さらに, 正規直行基底関数を使用しているため, その性質を用いて, 高速な RGB 変換を行うことができる.

4.3.3 トーンマッピング手法

CG により計算される光の輝度は実世界の光の輝度にと同様に, その輝度幅はとても大きい. これは HDR 画像を用いて記録することができる. HDR 画像は輝度値を精度よく記録することが可能である. しかし, 表示の際には輝度幅をディスプレイで表示できる輝度幅に変換する必要がある. この変換にはトーンマッピング手法が用いられる. トーンマッピング手法は HDR 画像の輝度幅を調節し, さらに, 表示結果を見たときの印象を, 実物を見た場合に近づけて表示することを目指している.

今までに様々なトーンマッピング手法が開発されてきた. それらはグローバルトーンマッピング手法とローカルトーンマッピング手法の 2 種類に分類される [43]. その違いは, 順応状態の違いに由来する. グローバルトーンマッピング手法では観察者は画像中のシーン全体の輝度に順応していると仮定する. 一方, ローカルトーンマッピング手法では, 観察者は, 画像領域ごとに異なる順応状態であると仮定する. これにより, グローバルトーンマッピング手法では, すべての画素値に対して同じパラメータが使用される. 一方, ローカルトーンマッピング手法では, 画像領域ごとに異なるパラメータが使用される [43].

グローバルトーンマッピング手法として, 次の手法がある. Ferwerda ら [9] は順応輝度に対して識別できる最小の輝度 (Threshold luminance) を用いたトーンマッピング手法を開発した.

Reihard ら [2] はアナログ写真技術を基にしたトーンマッピング手法を開発した. アナログ写真撮影では, 写真全体の明るさを決めるために, シーンの key 値を決定する. Reihard らは出力画像の明るさを変えるために, 入力画像全体から計算される key 値を変化させた.

ローカルトーンマッピング手法として, 次の手法がある. Pattanaik ら [74] は視覚のマルチスケールモデルに由来する順応状態を用いてトーンマッピングを行った. 彼らはまず, 周波数の異なるバンドパスフィルタを複数用いて, 画像を周波数ごとに分解した. バンド

パスフィルタにはスケールの異なるガウシアンブラーを適用した画像が用いられた。その後、分解された画像のゲインを視覚特性を基に制御し、合成することでトーンマッピングを行った。ブラーサイズが一番大きな画像を、局所的に順応した輝度として用いた。

Reihard ら [2] は、自らが提案したグローバルトーンマッピング手法に、アナログ写真技術の被い焼き、焼き込みをモデル化し、それらを取り入れ、さらにそのトーンマッピング手法を、ローカルトーンマッピング手法に拡張した。

ローカルトーンマッピング手法はグローバルトーンマッピング手法と比べ、より視覚的に好ましい印象を与えるという特徴がある。しかし、パラメータ設定が難しいという問題がある。パラメータ設定が適切に行えなかった場合、輝度の反転(ハロと呼ばれる)が発生する。また、ローカルトーンマッピング手法は多くの計算量を必要とする。

提案手法は、手法の高速性に着目し、HDRS 画像を通常のディスプレイに表示する際に、Reinhard らのグローバルトーンマッピング手法 [2] を用いる。

4.4 提案手法

4.4.1 提案手法の概要

提案手法は、前述した4点を考慮した HDRS 画像の圧縮、表示手法を提案する。すなわち、画像ファイル容量を小さくする高精度な圧縮手法と、RGB 変換、輝度幅の変換、ディスプレイの解像度を考慮した高速な表示手法である。

HDRS 画像の圧縮には、高精度、かつ高圧縮を実現するために文献 [68] による手法を用いる。RGB 変換の代わりに XYZ 変換を行い、輝度幅の変換をスムーズに行えるようにする。XYZ 変換を効率的に行うため文献 [73] による手法を用いる。また、ウェーブレット変換を用いることで、ディスプレイの解像度を考慮した表示を実現する。

以下、第 4.4.2 節で HDRS 画像の圧縮の手順について述べる。そして、第 4.4.3 節で、画像の復元と出力について述べる。

4.4.2 HDRS 画像の圧縮

分光情報は空間成分 (x, y) と波長成分 (λ) の 3 次元ボリュームデータである。提案手法は 3 次元ウェーブレット変換を直接に適用せず、2 次元の空間成分に適用した後、1 次元の波長成分に適用する。これは、二段階に分けて適用することで、より高い圧縮率を得ることができるからである [68]。さらに、二段階に分けて適用することは、記録した HDRS 画像表示の際に都合が良い。すなわち、HDRS 画像を、逆ウェーブレット変換を用いて XYZ 値に変換する際に、高速な変換を行うことができ、また、異なる解像度の画像を得やすいという利点がある。

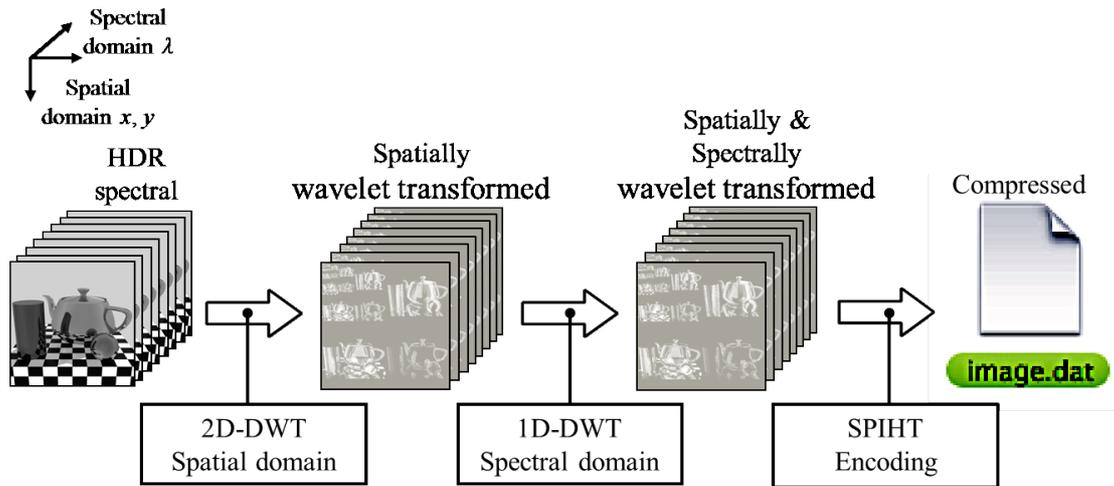


図 4.1: 提案手法による HDRS 画像表示までの流れ

提案手法による HDRS 画像圧縮の流れを図 4.1 に示す. HDRS 画像圧縮は, 空間成分の変換と分光成分の変換からなる, 二回の離散ウェーブレット変換と, SPIHT エンコードから構成される. まず, 2次元ウェーブレット変換を HDRS 画像の空間領域に適用する. 次に, 1次元ウェーブレット変換を HDRS 画像の波長領域に適用する. 最後に, SPIHT エンコーディング [69] を空間・波長の両方の領域に適用し, 圧縮された HDRS 画像を得る.

4.4.3 HDRS 画像の表示

図 4.2 に提案手法の流れを示す. まず, SPIHT デコーディングにより, 空間領域と波長領域でウェーブレット変換された分光画像を得る. 次にこの分光画像を, 高速な変換手法 (付録 C 参照) を用いることで, XYZ 表色系で表す. 提案手法はトーンマッピング手法を適用するために, CIE XYZ 等色関数 (2 度視野, $\Phi_X(\lambda)$, $\Phi_Y(\lambda)$, $\Phi_Z(\lambda)$) を用いる.

$$C_l = k \int_{\lambda \in \Lambda} I(\lambda) \Phi_l(\lambda) d\lambda \quad (l = X, Y, Z) \quad (4.2)$$

ここで, C_X , C_Y , そして, C_Z は XYZ 空間に属する. C_Y は輝度値である.

手法 [73] と異なる点は, 提案手法では RGB 等色関数ではなく, XYZ 等色関数を正規直行基底関数で表す. また, XYZ 表色系で表すことで, トーンマッピング手法を直接適用できるようにする.

提案手法は, Reinhard らによるグローバルトーンマッピング手法 [2] を採用した. ただし, 画像平均輝度は対数平均でなく, 算術平均を用いた. これはウェーブレット係数による多重解像度画像の画像ピラミッドの頂点には, 算術平均輝度が記録されているためである.

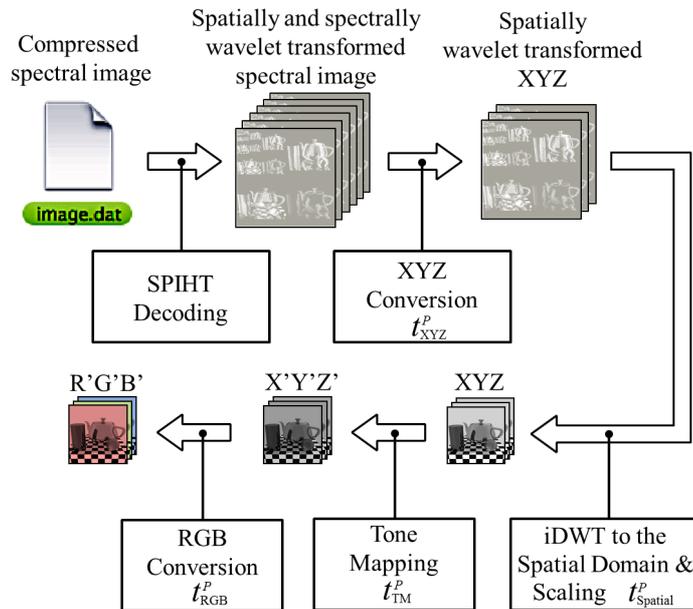


図 4.2: 提案手法による HDRS 画像表示までの流れ

る。これを利用することで、目的とする解像度の画像全体から平均輝度を求める処理を省き、トーンマッピング手法を高速に実行する。

提案手法は、トーンマッピング手法を復元手順の中に取り入れることで、通常のディスプレイに輝度の調整された画像を直接表示することを可能とする。

空間領域に適用したウェーブレット変換の係数は、多重解像度画像という特徴を持つ。これを利用することで、表示デバイスに合わせた解像度の画像を得ることができる。

小さな解像度の画像を得るためには、周波数を小さくすればよい。例えば、ウェーブレット基底関数の周波数の $1/4$ にすることで、その逆変換は $1/4$ の解像度となる。これは、本来の解像度を得た後に、所望の解像度に変更する場合よりも、直接、所望の解像度を得られるため、高速な処理が可能である。

この後、画像を XYZ 表色系から Y_{xy} 表色系に変換し、トーンマッピング手法を適用することで、輝度ダイナミックレンジを調整する。次節でトーンマッピングを実現する過程について説明する。

4.4.4 トーンマッピングの実現

CG で作成された画像は大きな輝度ダイナミックレンジを持つため、表示の際、輝度が高い部分では白とび、低い部分では黒潰れが発生する。そこでトーンマッピングを用いて輝度変換を行う。

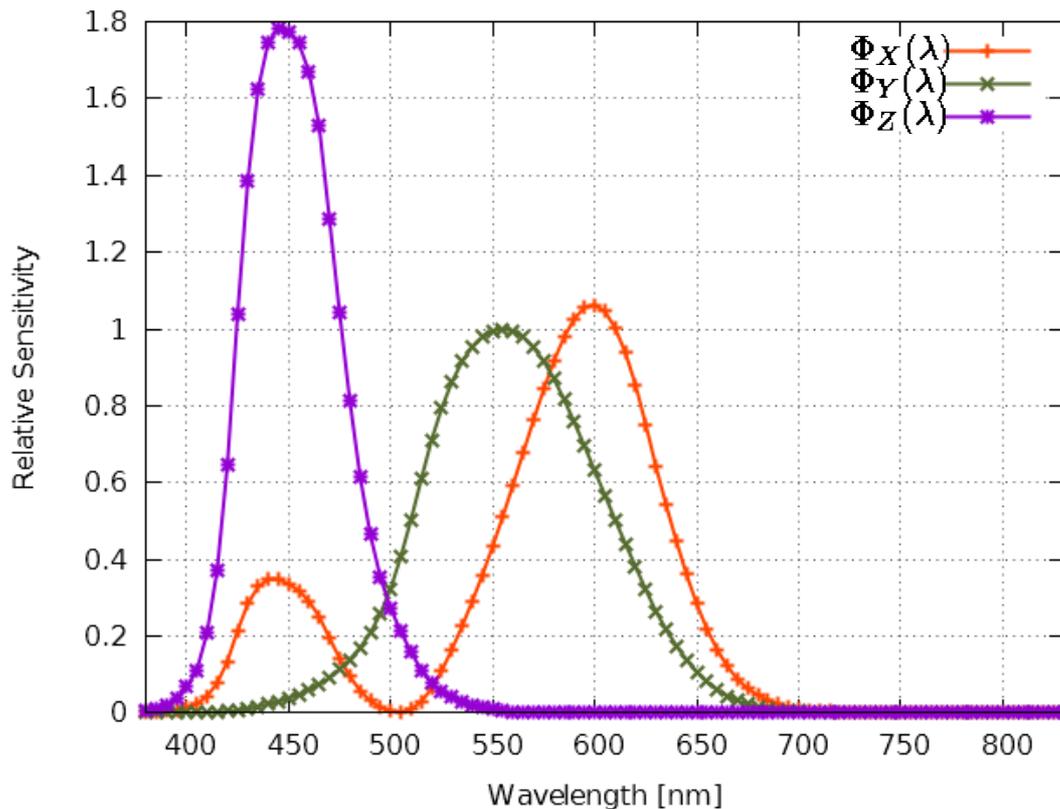


図 4.3: XYZ 等色関数

一般的な手法は、RGB 画像を得た後、その画像を XYZ 表色系に変換し、トーンマッピング手法を適用するアプローチである。それに対し、提案手法は、RGB 画像を介さず、直接、XYZ 画像に対して、トーンマッピングを行う。また、画像中の全画素を用いて平均を計算するのではなく、提案手法では、ウェーブレット係数による、多重解像度画像の画像ピラミッドを利用し、高速に平均輝度を取得する。

図 4.4 にトーンマッピングを実現するための流れを示す。提案手法は処理の高速化をはかるため、グローバルトーンマッピング手法 [2] を用いた。さらに、多重解像度画像における、画像ピラミッドの頂点に位置する処理のウェーブレット係数値を用いて、画像平均輝度を取得する。提案手法は次式を用いて出力画像全体の明るさを決定する。

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_{top}} L_w(x, y) \quad (4.3)$$

ここで、 $L_w(x, y)$ は画像の位置 (x, y) における画像の輝度値である。これは XYZ 表色系から Yxy 表色系に変換することで得られる輝度成分である。 \bar{L}_{top} は、ウェーブレット係数の画像ピラミッドの頂点であり、画像全体の平均輝度である。 a は Reinhard らの手法

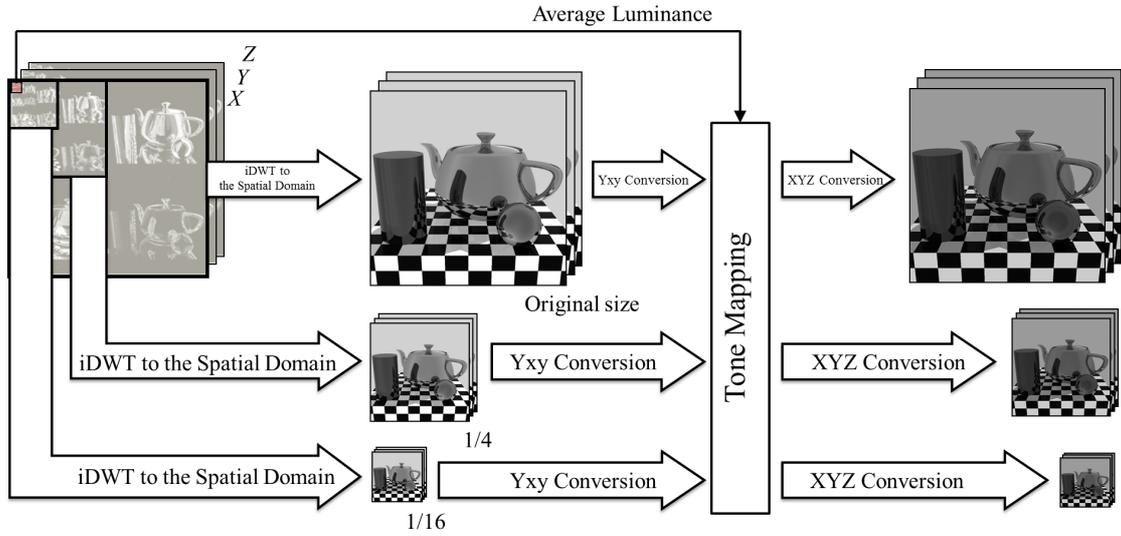


図 4.4: トーンマッピングを実現するための流れ

において key と呼ばれる，画像全体の明るさを変化させるパラメータである。

次式を用いて，出力画像の輝度を決定する．これには Reinhard らと同じ手法を用いる．

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \quad (4.4)$$

ここで， $L_d(x, y)$ はトーンマッピングを施した後の輝度成分である。

最後に，トーンマッピングを施した輝度成分と色相成分から RGB 画像を得る。

4.5 結果と考察

4.5.1 記録の精度と圧縮率の関係

提案手法を用いて記録した HDRS 画像の精度と圧縮率の関係を調査した．具体的には HDRS 画像の圧縮率を変更し，そのときの精度を求めることにより，両者の関係を調査した．精度の評価には，原画像と復元後の画像の SNR を用いた．SNR は次式 4.5 で表される．

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=0}^{n_p} \sum_{j=0}^{n_\lambda} I_{i,j}^2}{\sum_{i=0}^{n_p} \sum_{j=0}^{n_\lambda} (I'_{i,j} - I_{i,j})^2} \quad [dB] \quad (4.5)$$

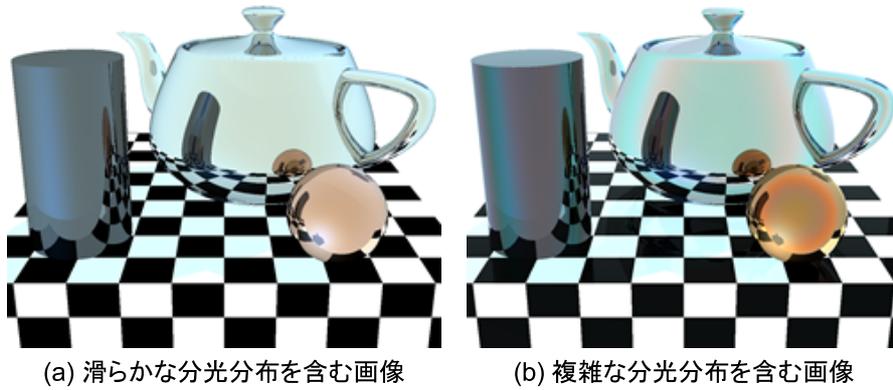


図 4.5: 異なる分光分布を含む HDRS 画像

ここで、 $I'_{i,j}$ は i 番目の画素における波長成分 j の復元後の分光強度を表し、 $I_{i,j}$ は元画像の分光強度を表す。 n_p は全画素数、 n_λ は分光分布のサンプル数である。

三種類の異なる分光分布を含む HDRS 画像について精度の評価を行った。 すなわち、滑らかな分光分布が含まれる画像 (図 4.5(a))、部分的に複雑な分光分布が含まれる画像 (図 4.5(b))、複雑な分光分布が多く含まれる画像 (図 4.5(c)) の三種類である。 これらの画像は干渉光を考慮したレイトレーシング法を用いてレンダリングされた画像である。 図 4.5(a) では滑らかな分光分布を持つ光源 (CIE 標準光 C) を用いられている。 図 4.5(b) では干渉現象を生じる物体を配置してレンダリングを行い、画像には部分的に複雑な分光分布が含まれている。 図 4.5(c) では輝線スペクトルを含む光源 (CIE 標準蛍光 N) を用いてレンダリングが行われた。 それぞれの画像の画像解像度は 512×512 で分光分布の波長サンプル数は 81 である。 そして、元画像のファイルサイズは約 128[MB] である。

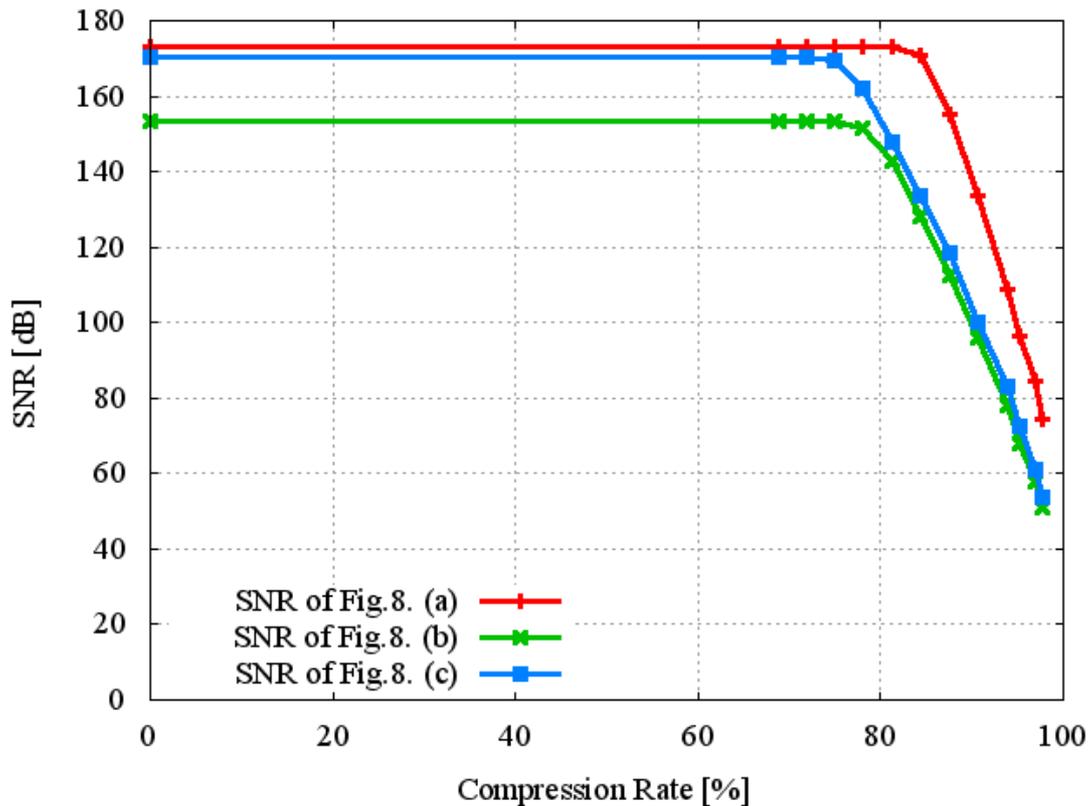


図 4.6: SNR 比の遷移

図 4.6 に圧縮率を変化させた場合の SNR 比を示す。横軸が圧縮率、縦軸が SNR 比である。SNR 比が高いほど、圧縮後に復元した画像の精度が高いことを示す。また、復元後の画像の精度が高く、元画像に近い場合、式 4.5 に示した SNR の式の分母が 0 に近づく。このとき、数値計算結果は、SNR 比 150~170 の間の値となった。図 4.6 より圧縮率が 80% 近くになっても、SNR 比が高く、精度を保っていることがわかる。

4.5.2 表示時間

提案手法の高速性を検証するために、圧縮した HDRS 画像表示時間を計測した。そして、圧縮する際と逆手順により復元を行う手法 (以下、一般的な手法と呼ぶ) を比較した。

図 4.7 に一般的な手法による画像表示の流れを示す。一般的な手法は、RGB 表色系に変換した後、XYZ 表色系に変換しトーンマッピングを行い、再び RGB 表色系に変換する。

図 4.2 に提案手法による画像表示の流れを示す。提案手法では、直接 XYZ 表色系の画像に変換し、トーンマッピングを施す。

各処理にかかる時間を、それぞれ、図中に示す。ただし、SPIHT デコーディングに必要な

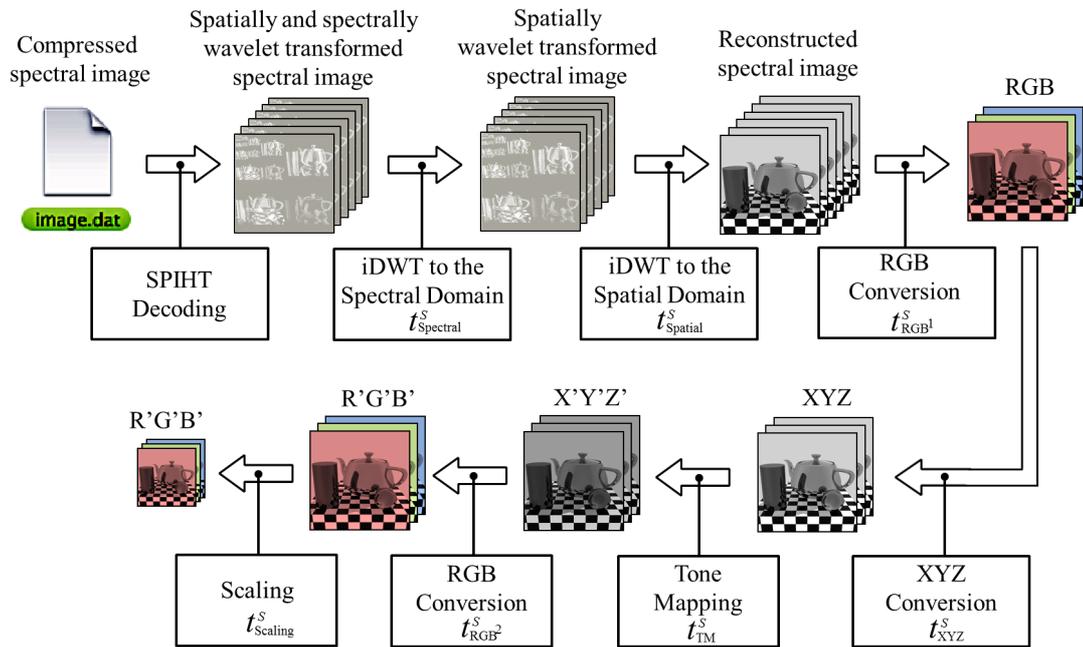


図 4.7: 一般的な手法の流れ

な時間は提案手法と一般的な手法の、どちらにも共通するため、結果には含めていない。以下に各処理時間とその説明を記す。計算時間の単位は秒 ([sec.]) である。

- t_{XYZ}^P, t_{XYZ}^S : それぞれ、提案手法、一般的な手法による、XYZ 表色系に変換するためにかかる時間
- $t_{Spatial}^P, t_{Spatial}^S$: それぞれ、提案手法、一般的な手法による、空間領域に対する逆ウェーブレット変換にかかる時間
- t_{RGB}^P : 提案手法による、XYZ 表色系から RGB 表色系に変換するための時間。
- t_{RGB1}^S : 一般的な手法による、分光分布から RGB 表色系に変換するための時間。
- t_{RGB2}^S : 一般的な手法による、XYZ 表色系から RGB 表色系に変換するための時間。
- t_{TM}^P, t_{TM}^S : それぞれ、提案手法、一般的な手法による、トーンマッピングを行うための時間。
- $t_{Spectral}^S$: 一般的な手法による、波長領域に対する逆ウェーブレット変換のための時間。
- $t_{scaling}^S$: 一般的な手法による、画像解像度を変更するための時間。

表 4.1: 6 種類の解像度を得るまでの計算時間

	Displaying image size				
	1/1	1/4	1/16	1/64	1/256
t_{XYZ}^P [sec.]	1.920	1.920	1.920	1.920	1.920
$t_{Spatial}^P$ [sec.]	0.518	0.118	0.029	0.007	0.0014
t_{TM}^P [sec.]	0.083	0.023	0.006	0.001	0.0004
t_{RGB}^P [sec.]	0.017	0.003	0.001	0.0002	0.00004
Proposed Method (total)[sec.]	2.534	2.064	1.956	1.929	1.922
$t_{Spectral}^S$ [sec.]	8.592	8.592	8.592	8.592	8.592
$t_{Spatial}^S$ [sec.]	10.359	10.359	10.359	10.359	10.359
t_{RGB1}^S [sec.]	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074
t_{XYX}^S [sec.]	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
t_{TM}^S [sec.]	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052
t_{RGB2}^S [sec.]	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
$t_{Scaling}^S$ [sec.]	—	0.029	0.019	0.016	0.009
Standard Method (total)[sec.]	20.102	20.130	20.121	20.118	20.111
Speed-up ratio (R)	7.933	9.753	10.479	10.429	10.464

実験には Intel® Core™ i7-2600 CPU (3.40GHz), を用いて, シングルコアを使用して処理を行った際の時間を計測した.

実験 1 : 出力画像解像度を変更した場合にかかる時間

まず, 出力画像解像度を変更した場合にかかる計算時間を, 提案手法と一般的な手法と比較した. 実験に用いた HDRS 画像は画像解像度と波長サンプル数が $(x, y, \lambda) = (1024, 1024, 38)$ である. 波長サンプル間隔は 10[nm] である. 実験に用いた HDRS 画像は, HDR-RGB 画像を手法 [75] を用いて変換したものである. 元の HDR-RGB 画像は文献 [76] のものを用いたそして, 本実験のために画像空間解像度を 1024×1024 になるようにトリミングした. 図 4.9 に本実験に用いた画像を示す.

実験では, 6 種類の解像度の画像を得るまでの時間を計測した. すなわち, $1024 \times 1024(1/1)$, $512 \times 512(1/4)$, $512 \times 512(1/4)$, $256 \times 256(1/16)$, $128 \times 128(1/64)$, $64 \times 64(1/256)$ である. 括弧の中は元画像の解像度との比率を表す.

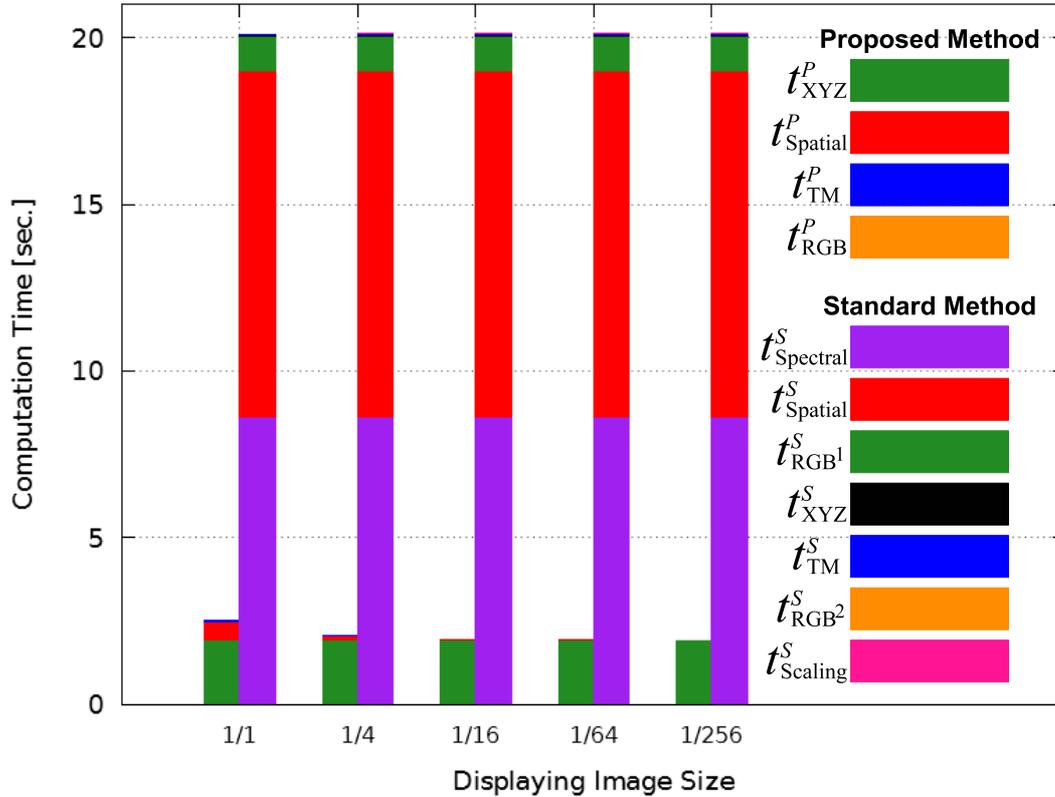


図 4.8: 6 種類の解像度を得るまでの計算時間

表 4.1 と図 4.8 にそれぞれの出力画像解像度を得るための計算時間と、そのグラフを示す。それぞれの解像度に対し、左側に提案手法、右側に一般的な手法を示している。

SPIHT デコーディングに必要な計算時間は 31.715[sec.] であった。ただし、提案手法と一般的な手法のどちらにも共通するため結果に含めていない。

表 4.1 に示す高速化率 (R) は次式により求めた。

$$R = \frac{t_{\text{Spectral}}^S + t_{\text{Spatial}}^S + t_{\text{RGB}^1}^S + t_{\text{XYZ}}^S + t_{\text{TM}}^S + t_{\text{RGB}^2}^S + t_{\text{Scaling}}^S}{t_{\text{XYZ}}^P + t_{\text{TM}}^P + t_{\text{Spatial}}^P + t_{\text{RGB}}^P} \quad (4.6)$$

提案手法は、一般的な手法と比べ、元画像と同じ解像度では約 7.9 倍、元画像よりも小さい画像解像度では約 10 倍の高速化を達成している。

実験 2 : 異なる分光分布を含む HDRS 画像を適用した場合

次に、異なる分光分布を含む画像に対し、出力画像を得るまでにかかる計算時間を、提案手法、一般的な手法で比較した。比較に用いた画像は、滑らかな分光分布を記録した画

表 4.2: 異なる分光分布を含む HDRS 画像に対し, 各処理の計算時間

	Complex(図 4.9)	Smooth(図 4.5(c))
t_{XYZ}^P [sec.]	5.388	1.920
$t_{Spatial}^P$ [sec.]	0.507	0.518
t_{TM}^P [sec.]	0.078	0.083
t_{RGB}^P [sec.]	0.012	0.017
Proposed Method (total)[sec.]	5.985	2.534
$t_{Spectral}^S$ [sec.]	16.322	8.592
$t_{Spatial}^S$ [sec.]	20.316	10.359
t_{RGB1}^S [sec.]	3.803	1.074
t_{XYX}^S [sec.]	0.012	0.012
t_{TM}^S [sec.]	0.051	0.052
t_{RGB2}^S [sec.]	0.012	0.013
Standard Method (total)[sec.]	40.515	20.102
Speed-up ratio (R)	6.769	7.933



図 4.9: 実験 2 で用いた滑らかな分光分布を記録した画像

像 (図 4.9) と、複雑な分光分布を記録した画像 (図 4.5(c)) を使用した。

表 4.2 と図 4.10 に各処理での計算時間と、そのグラフを示す。それぞれ、グラフの左側に提案手法、右側に一般的な手法を示す。SPIHT デコーディングに必要な計算時間はそれぞれ、54.295[sec] と 31.715[sec] であった。

提案手法では、複雑な分光分布を記録した画像で約 6.8 倍、滑らかな分光分布を記録した画像で 7.9 倍の高速化を達成している。

4.6 まとめ

本章では、HDRS 画像のためのコンパクトで精度の良い記録方法と、RGB ディスプレイモニタへの、トーンマッピングを考慮した高速な表示方法を提案した。提案手法では、圧縮率が 80% の場合でも、分光情報を精度よく記録できる。さらに、提案手法は、HDRS 画像をトーンマッピング手法を行って RGB ディスプレイモニタに直接表示することが可能である。提案手法では、XYZ 変換に必要な時間を、正規直行基底関数の性質を用いることで短縮した。ウェーブレット変換の多重解像度の性質を利用することで様々な解像度の画像を得ることができ、また、画像ピラミッド構造の頂点のウェーブレット係数を用い

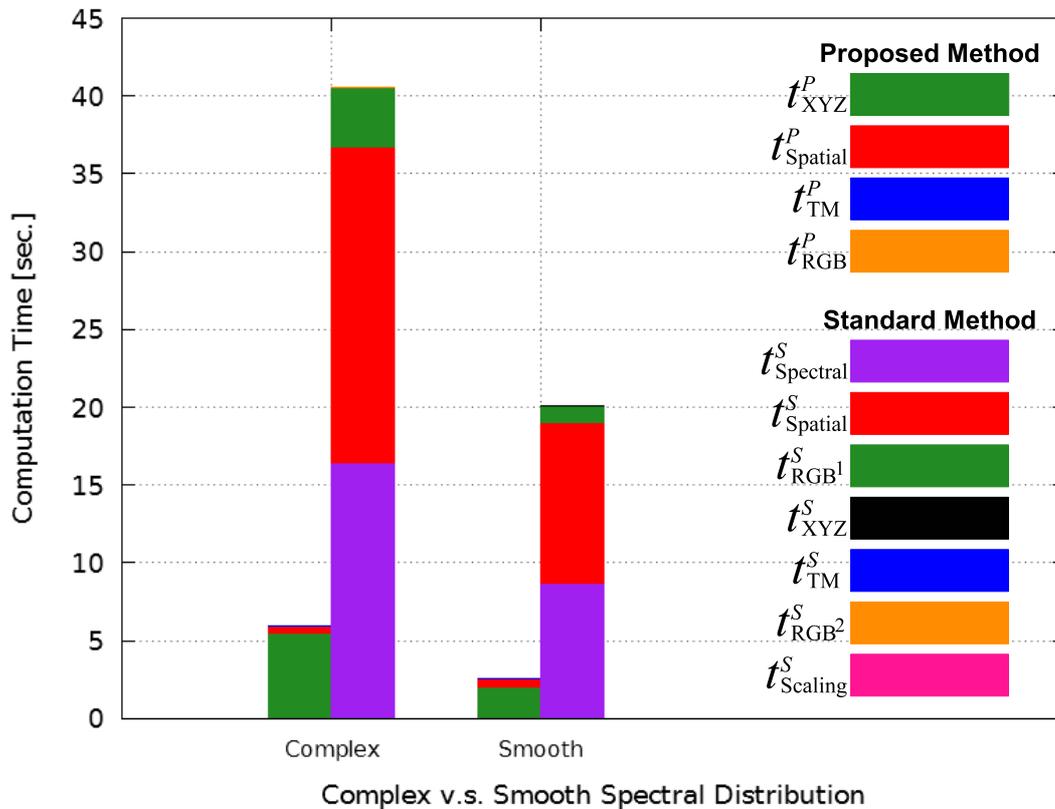


図 4.10: 異なる分光分布を含む HDRS 画像に対し, 各処理の計算時間

ることで, トーンマッピングの際の平均輝度を直接取得することができ, 処理時間の短縮をはかった.

様々な解像度の画像を得る場合, 提案手法による画像表示は, 一般的な手法のそれと比べて, 約 8~10 倍高速である. また, 複雑な分光分布の画像に対しても, 同程度の高速化をはかることができる.

今後の課題として, デコーディング手法の高速化が挙げられる. 本処理で用いている, SPIHT デコーディングは多くの計算時間を必要とする処理である. また, 出力画像の質を上げるために, ローカルトーンマッピングを実現することも課題の一つである.

第5章 結論

本論文では、視覚特性を考慮したハイダイナミックレンジ画像の表示手法を開発した。視覚特性モデルは、実際にシーンを見たときと同じ印象を与えるように、CG画像を表示する役割を持つ。本論文は、この役割に着目し、心理学・生理学的な実験データを用いた視覚特性モデルを利用することで、知覚に基づいた表示を行い、実際の印象に近い画像を得ることができることを示し、そして、表示の際の色合いの重要性を示した。すなわち、シーンに合った色合いを、視覚特性に基づいたモデルを利用し、表示することで、既存手法よりも自然な印象を与える画像に近づけることが可能であることを示した。

特に、本論文では、薄明視による色合いの変化、残像の時間経過による色変化を表現するための手法を開発した。さらに、視覚にとって重要な、光の分光情報を精度よく記録するためのハイダイナミックレンジ分光 (High Dynamic Range Spectral: HDRS) 画像の圧縮・表示手法を開発した。

第2章では、薄明視での色の見え方を考慮した表示手法を提案した。これは薄暗いシーンの色知覚を再現するための手法である。人は周囲の明るさによって、感じる色に変化が生じる。具体的には周囲が暗くなると長波長の光を感じ難くなる。そして、相対的に短波長側の色が目立って見えるようになる。提案手法は、周囲の明るさによる色の知覚特性を、心理物理学での実験データである等価明度曲線に基づいてモデル化した。特に、昼間の明るい環境と、星空の下のような暗い環境の中間である、薄明視状況下での色の見え方の変化を考慮した表示手法を提案した。提案手法により、従来手法と比べ、自然な色合いを表現することが可能になった。また、提案手法の計算負荷は小さく、高速な表示が可能であることを示した。今後は、暗所視、明所視の範囲まで拡大することが課題となる。

第3章では、強い光を見た後に発生する残像の表示手法を提案した。実際のシーンで残像が発生する場合、その原因となる光源の光の強度は大きい。しかし、ディスプレイではその強度を再現することは難しい。そのため、光源が存在する場所に、意図的に残像を加え、実際のシーンで体験する現象を再現する手法である。

CG分野で残像を表現することは、未だ新しい研究テーマである。提案手法は残像の大きな特徴である、時間経過による輝度と色相の変化を、あらゆる波長の光に対して、ある程度違和感なく表現することができる。

提案手法による残像は、心理物理学的な実験データ・観測結果を取り入れたモデルによっ

て生成される。残像の色変化を実験した結果と提案手法を比較し、その妥当性を確認した。

さらに、提案手法を用いて、光源が移動した際に起こる残像も表現した。そして日常経験する残像と同じような特徴が現れていることを確認した。

提案手法の応用例として、道路に表示する看板や電飾の設計が挙げられる。これにより、対向車や通行者に対する安全性を考えた設計を行うことができる。提案手法の特徴として、計算負荷が小さいため、リアルタイム性の必要となるゲームやドライビングシミュレーションに適用できる。

また、提案手法は実験データを容易に取り入れることができる。これにより、残像に関して更なる実験から得られたデータを取り込むことで、より知覚に基づいた残像を作成できる。その結果、ゲームでの臨場感や、シミュレーションの際、現実には起こり得る、強い光により発生する残像によって、視界が奪われる効果を表現することができると考えられる。

第4章では、HDRS 画像のためのコンパクトで精度の良い記録方法と、RGB ディスプレイモニタへの、トーンマッピングを考慮した高速な表示方法を提案した。

物理現象に基づいた光学モデルを用いた計算結果は、再び画像をレンダリングするために利用される。このため、精度の高い記録が必要であり、ハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range: HDR) 画像が用いられる。さらに、光の干渉や回折など、波長に依存する現象をレンダリングするためには、光の分光情報を利用する。このため、RGB の3成分だけでは不十分であり、従来の3成分よりも多くの成分が必要である。よって、記録の際には、コンパクトに、かつ、精度の高い記録方法が望まれる。また、表示の際には、ディスプレイが表示できる輝度幅、解像度を考慮した高速な表示が望まれる。

提案手法では、圧縮率が80%の場合でも、分光情報を精度よく記録できる。さらに、提案手法は、HDRS 画像にトーンマッピング手法を適用することでRGB ディスプレイモニタに直接表示することが可能である。提案手法は、画像をウェーブレット係数を用いて表現することで、高速化を行った。具体的には、正規直行基底関数であるウェーブレット関数の性質を用いることでRGB 値への変換時間を短縮した。さらに、ウェーブレット変換の多重解像度の性質を利用することで様々な解像度の画像を得ることができ、また、画像ピラミッド構造の頂点のウェーブレット係数を用いることで、トーンマッピングの際の平均輝度を直接取得することができ、処理時間の短縮をはかった。その結果、様々な解像度の画像を得る場合、提案手法による画像表示は、一般的な手法のそれと比べて、約8~10倍高速化することができる。また、複雑な分光分布の画像に対しても、同程度の高速化をはかることができる。しかし、現在、SPIHT によるデコーディングに多くの計算時間を必要としてため、この改良が課題である。

今後、シミュレーションのようにユーザーと相互的な動作を必要とする場面に応用する場合、以下が課題となる。まず、全輝度領域に統一的な視覚特性モデルの開発である。ドライブシミュレーションでは、明るいシーンから暗いシーンまで対応する必要がある。その為、論文中で扱っている、薄明視の領域だけでは不十分であり、明所視や暗所視の状況下も対応する必要がある。さらに、色順応といった、その他の視覚特性も考慮する必要がある。残像の発生条件は、周囲の明るさや光源を見た時間など、様々な要因が存在すると思われる。それらに対応することも必要である。また、HDRS 画像のリアルタイム表示も必要である。加えて、適宜、心理物理学の実験による評価を取り入れることで、自然な印象を与える表示に近づけるための指標として役立つと考えられる。この評価方法を確立することも今後の課題である。

この課題に対して、具体的に各章で述べた手法を用いて、以下のようにまとめられる。

第2章で述べた、薄明視における視覚特性を考慮したトーンリプロダクションでは、提案手法は薄明視を中心として扱っているが、明所視や暗所視の状態まで取り扱える範囲を拡大することがあげられる。

第3章で述べた、視覚特性を考慮した高輝度光源における残像表示では、刺激光を見た時間を考慮した表示モデルに改良することが挙げられる。すなわち、提案手法では1秒間だけ光源を見た場合の残像表示に限られている。これは現在、使用している実験データを得るために用いられた条件による制限である。これに改良を加え、任意の長さの時間、光源を見た場合の残像を表現できるモデルに改良する。さらに、現在、実験的に決定しているパラメータを、自動的に設定する方法を調査することも今後の課題である。

さらに、第2章、第3章で提案した手法に共通する課題として、心理物理学的な評価実験を行うことが挙げられる。現在、出力結果から主観的な評価を行っているが、より多くの被験者を用いて、客観的な評価も行うことも、提案手法の有効性を高める上で有益である。

第4章で述べた、HDRS 画像の効率的な表示手法では、より高速なデコーディング手法を適用することが挙げられる。現在使用している、SPIHT は、デコーディングの際、多くの計算時間を必要とする。また、出力画像の質を上げるために、ローカルトーンマッピングを実現することも考えられる。これによって、より視覚的に好ましい画像を表示することも今後の課題である。この際にも、できるだけ高速な処理を行うことが要求される。

付録 A 最小二乗法を用いたパラメータの決定

式 2.1 に A , C を代入し, 両辺の対数をとると次式となる. ただし, 最小 2 乗法を用いるために右辺に定数項 D を付加する.

$$\log_{10} \left(\frac{70}{E(I) - 22} - 1 \right) = B \log_{10} \left(\frac{10}{I} \right) + D \quad (\text{A.1})$$

図 1.10 より, グラフのプロット点での照度 I と等価明度 $E(I)$ を用いて最小 2 乗法により $B = 0.383$, $D = 0.030$ を得る. ここで 10^D は式 2.1 の分母の項 $\left(\frac{10}{I}\right)^b$ に掛かる係数となる. 最小 2 乗法により得られた $D = 0.030$ より $10^D \simeq 1.071 \simeq 1.0$ と近似すると, 近似曲線は式 2.2 で表される.

付 録 B 異なる条件下での残像

ここでは、提案手法では用いなかった、その他の条件により発生する残像についての実験データを示す。これらは文献 [14], [15] によって得られたものである。提案手法は、以下の輝度、色相データも代替することができる。代替する場合には、各データに対し、刺激光の網膜照度、視野角、照射時間の同じデータを使用する必要がある。

B.1 刺激光の照射時間を変化させた場合の残像の輝度変化

図 B.1 に刺激光の照射時間を変化させた場合の残像の輝度変化を示す。縦軸が残像の明るさ (網膜照度)、横軸が残像が発生している時間である。グラフの隣にある数値は、刺激光の照射時間を示す。各直線は、各照射時間でのグラフを近似したものである。図 B.1 から、照射時間が大きくなるほど、残像が発生する時間は長くなることがわかる。しかし、照射時間 0.6[sec.] は例外であり、照射時間 1[sec.], 2[sec.] の方が残像が発生する時間は短くなっている。

B.2 刺激光の視野角を変化させた場合の残像の色相変化

図 B.2 に刺激光の視野角を変化させた場合の残像の輝度変化を示す。実験に用いた刺激光は、網膜照度 2×10^6 [Td], 色度 3000[K]($x = 0.43, y = 0.40$), 照射時間 1.0[sec.], 視野角 5.0° である。実験は 3 回行われ、それぞれの結果をプロットしている。この結果は、視野角 2.5° の場合による実験結果 (図 1.12(a)) と大差ないことがわかる。

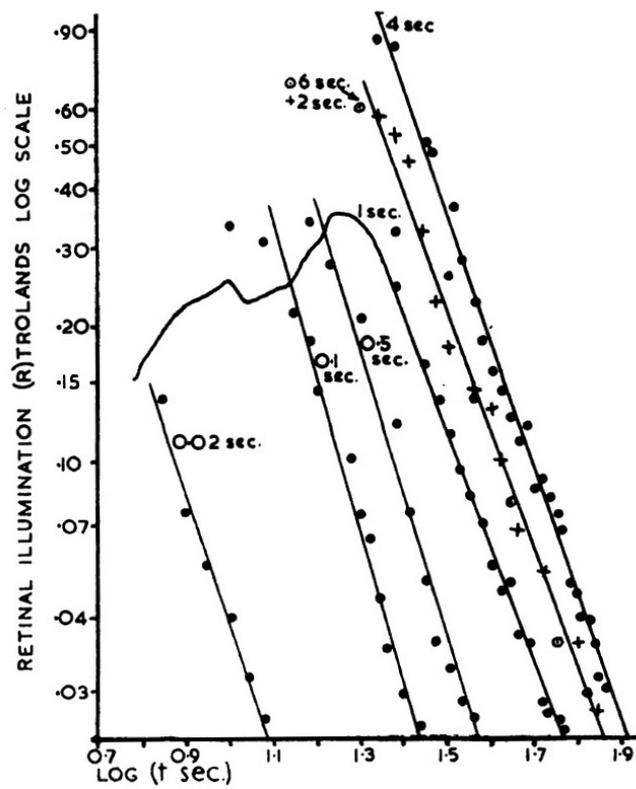


図 B.1: 2×10^6 [Td] の刺激光の照射時間を変化させた場合に発生する残像の輝度変化 (出典: 文献 [14]).

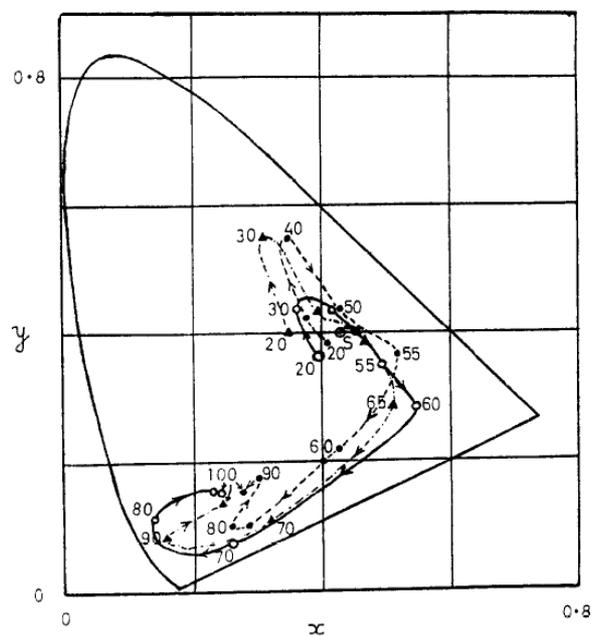


図 B.2: 2×10^6 [Td] の刺激光の視野角を変化させた場合に発生する残像の色相変化 (出典 : 文献 [15]).

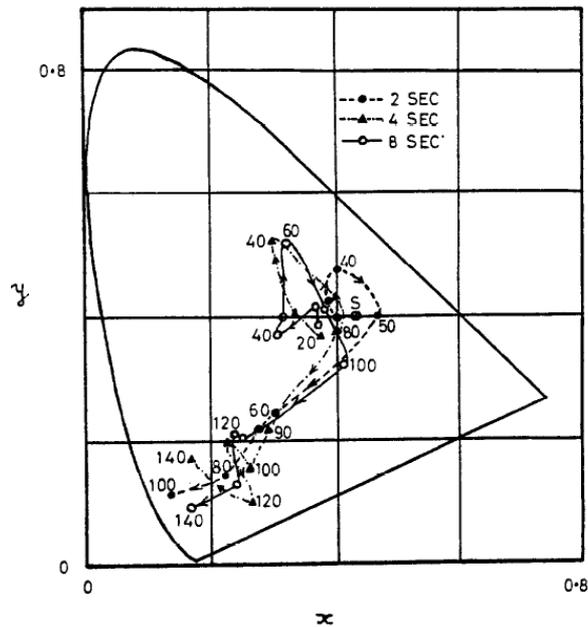


図 B.3: 2×10^6 [Td] の刺激光の照射時間を変化させた場合に発生する残像の色相変化 (出典: 文献 [15]).

B.3 刺激光の照射時間を変化させた場合の残像の色相変化

図 B.3 に刺激光の照射時間を変化させた場合に発生する残像の色相変化を示す。実験に用いた刺激光は、網膜照度 2×10^6 [Td]、色度 3000 [K] ($x = 0.43, y = 0.40$)、視野角 2.5° である。照射時間は 2 [sec.], 4 [sec.], 8 [sec.] である。

図 B.4, 図 B.5, 図 B.6 に、それぞれ、照射時間 2 [sec.], 4 [sec.], 8 [sec.] の結果を示す。縦軸が、色度 (x, y, z)、横軸が残像が発生している時間 [sec.] である。

図 B.4~B.6 より、色相の変化は決まった順番があることがわかる。さらに、照射時間が大きくなると、色相変化の時間も大きくなることがわかる。これは、 x, y, z のグラフの形状が、時間方向に対して拡大されるように変化することからわかる。

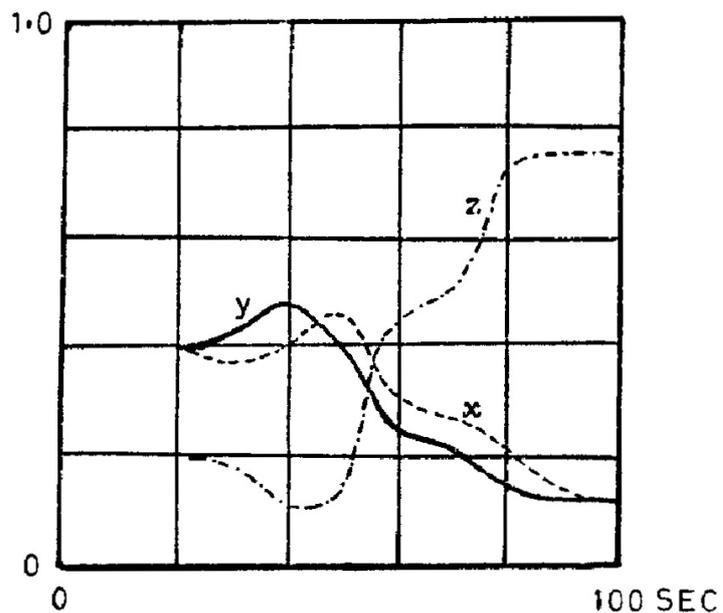


図 B.4: 2×10^6 [Td] の刺激光で照射時間が 2.0 [sec.] の場合に発生する残像の輝度変化 (出典: 文献 [15]).

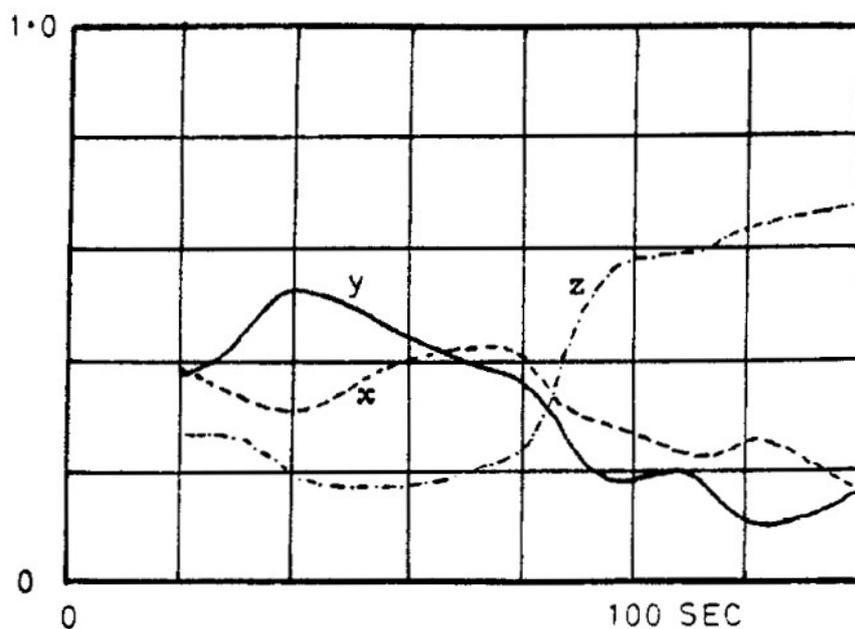


図 B.5: 2×10^6 [Td] の刺激光で照射時間が 4.0 [sec.] の場合に発生する残像の輝度変化 (出典: 文献 [15]).

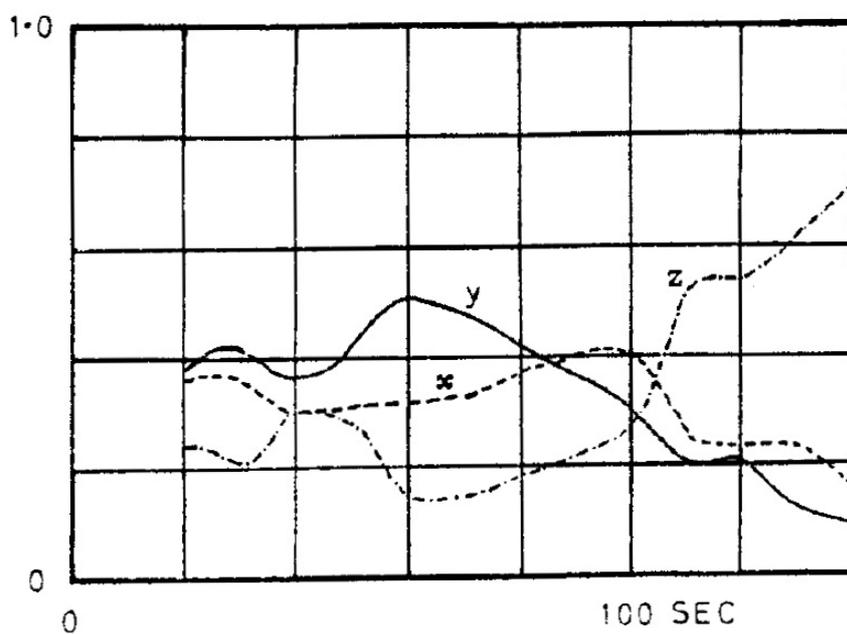


図 B.6: 2×10^6 [Td] の刺激光で照射時間が 8.0 [sec.] の場合に発生する残像の輝度変化 (出典: 文献 [15]).

付録C ウェーブレット変換を用いたRGB 表色系への高速変換

分光分布を高速にRGB値に変換するため、Iwasakiら[73]は正規直行基底関数の性質を利用した。すなわち、正規直行基底関数である離散ウェーブレット変換を用いて式4.1を変形することによってRGB値の変換の際の計算コストを削減した。

分光分布 $I(\lambda)$ は離散的に、次式C.1で表される。

$$I(\lambda) = \sum_{i=0}^{N_\lambda-1} \mu_i E_i(\lambda), \quad (\text{C.1})$$

ここで、 $E_i(\lambda)$ は i 次の正規直行基底関数であり、 μ_i はその係数である。

同様に、等色関数は次式C.2で表される。

$$\Phi_l(\lambda) = \sum_{i=0}^{N_\lambda-1} \eta_{l,i} E_i(\lambda) \quad (l = R, G, B) \quad (\text{C.2})$$

ここで、 $\eta_{l,i}$ はその係数である。

これら正規直行基底関数で表した分光分布と等色関数から式4.1を用いて、分光分布はRGB成分に変換される。

式4.1で表されるRGB変換は次式C.3で表される。

$$C_l = k \sum_{i=0}^{N_\lambda-1} I_i \Phi_{l,i} \Delta\lambda \quad (l = R, G, B) \quad (\text{C.3})$$

ここで、 C_R, C_G, C_B はそれぞれ、R成分、G成分、B成分である。 I_i は分光分布 $I(\lambda)$ の i 番目の分光強度、 $\Phi_{l,i}$ は等色関数 $\Phi_l(\lambda)$ の i 番目の値、 $\Delta\lambda$ はサンプル幅である。

また、正規直行基底関数では次式C.4で示されるように、次数の等しい同一基底関数の内積が1となり、次数の異なる同一基底関数の内積が0になるという性質がある。

$$\sum_{k=0}^{N_\lambda-1} E_{i,k} E_{j,k} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (\text{C.4})$$

ここで、 $E_{i,j}$ は次数 i 、波長成分 j の正規直行基底関数である。

式 C.4 を用いることで，式 C.3) は次式 C.5 で表される．

$$\begin{aligned}
 C_l &= k \sum_{j=0}^{N_\lambda-1} \left(\sum_{i=0}^{N_\lambda-1} \mu_i E_i \right) \left(\sum_{i=0}^{N_\lambda-1} \eta_{l,i} E_i \right) \Delta\lambda \\
 &= k \sum_{j=0}^{N_\lambda-1} (\mu_i \eta_{l,i}) \Delta\lambda \quad (l = R, G, B)
 \end{aligned} \tag{C.5}$$

これは，RGB 成分は μ_i と $\eta_{i,j}$ を掛け合わせることで得ることができ，分光分布を復元しなくてもよいことを意味する．

さらに，等色関数は高周波成分を含まないため，低次元の正規直行基底関数で表すことができる．よって，式 C.5 は次式で近似することができる．

$$C_l \approx k \sum_{j=0}^{n_\lambda-1} (\mu_i \eta_{l,i}) \Delta\lambda \quad (l = R, G, B), \tag{C.6}$$

ここで， n_λ は N_λ よりも小さい．これによって，RGB 変換をより高速化することが可能である．

参考文献

- [1] E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyüz and G. M. Johnson: “Color Imaging: Fundamentals and Applications”, A K Peters (2008).
- [2] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda: “Photographic tone reproduction for digital images”, *ACM Trans. Graph.*, **21**, 3, pp. 267–276 (2002).
- [3] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik and P. Debevec: “High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting”, Morgan Kaufmann Publishers (2005).
- [4] J. A. Ferwerda: “Elements of early vision for computer graphics”, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, **21**, 5, pp. 22–33 (2001).
- [5] “Color & Vision Research Laboratory”, <http://www.cvrl.org/> (October, 23, 2013 accessed).
- [6] E. Soucy, S. Nirenberg, J. Nathans and M. Meister: “A nobel signaling pathway from rod photoreceptors to ganglion cells in mammalian retina”, *Proceedings of Neuron*, **21**, pp. 481–493 (1998).
- [7] D. Cao, J. Pokorny, V. C. Smith and A. J. Zele: “Vision research”, *Rod Contributions to Color Perception: Linear with Rod Contrast*, **48**, 26, pp. 2586–2592 (2008).
- [8] 福島 : “視覚の生理とバイオニクス”, 電子通信学会 (1976).
- [9] J. A. Ferwerda, S. N. Pattanaik, P. Shirley and D. P. Greenberg: “A model of visual adaptation for realistic image synthesis”, *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, pp. 249–258 (1996).
- [10] G. A. Gesheider: “心理物理学 - 方法・理論・応用”, 北大路書房 (2002).
- [11] E. H. Adelson: “Saturation and adaptation in the rod system”, *Vision Research*, **22**, 10, pp. 1299 – 1312 (1982).

- [12] D. C. Hood and M. A. Finkelstein: “Comparison of changes in sensitivity and sensation: Implications for the response-intensity function of the human photopic system”, *Experimental Psychology: Human Perceptual Performance*, **5**, pp. 391–405 (1979).
- [13] M. Ikeda and S. Ashizawa: “Equivalent lightness of colored objects of equal munsell chroma and equal munsell value at various illuminances”, *Color Research and Application*, **16**, pp. 72–80 (1991).
- [14] C. A. Padgham: “Quantitative study of visual after-images”, *British Journal of Ophthalmology*, **37**, 3, pp. 165–170 (1953).
- [15] C. A. Padgham: “Measurements of the colour sequences in positive visual after-images”, *Vision Research*, **8**, 7, pp. 939 – 949 (1968).
- [16] 田崎, 大山, 樋渡 : “視覚情報処理 : 生理学・心理学・生体工学”, 朝倉書店 (1979).
- [17] M. D. Fairchild: “Color Appearance Models Third Edition”, Association with the Society for Imaging Science and Technology (2013).
- [18] E. Hering: “On the Theory of Sensibility to Light”, Harvard University Press (1878).
- [19] L. M. Hurvich and D. Jameson: “Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. ii. brightness saturation and hue in normal and dichromatic vision”, *Journal of the Optical Society of America*, **45**, pp. 602–616 (1955).
- [20] C. R. I. Jr. and B. H.-P. Tsou: “Orthogonal combination of the three visual channels”, *Vision Research*, **17**, pp. 1075–1082 (1978).
- [21] E. Reinhard, A. Efros, J. Kautz and H.-P. Seidel: “On visual realism of synthesized imagery”, *Proceedings of the IEEE*, **101**, 9, pp. 1998–2007 (2013).
- [22] P. E. Debevec and J. Malik: “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs”, *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, pp. 369–378 (1997).
- [23] T. Mitsunaga and S. K. Nayar: “Radiometric self calibration”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society Conference on, **1**, p. 1374 (1999).
- [24] G. Ward: “The radiance lighting simulation and rendering system”, *SIGGRAPH ’94: Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, ACM, pp. 459–472 (1994).

- [25] Industrial Light and Magic: “An OpenEXR technical introduction”, <http://www.openexr.com> (2008). Online accessed in Feb, 2008.
- [26] 日本色彩学会編：“新編 色彩科学ハンドブック [第2版]”，東京大学出版会 (1998).
- [27] P. Debevec: “Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography”, Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, pp. 189–198 (1998).
- [28] K. Devlin, A. Chalmers, A. Wilkie and W. Purgathofer: “Star: Tone reproduction and physically based spectral rendering”, State of the Art Reports, Eurographics 2002, The Eurographics Association, pp. 101–123 (2002).
- [29] S. Rahardja, F. Farbiz, C. Manders, H. Zhiyong, J. N. S. Ling, I. R. Khan, O. E. Ping and S. Peng: “Eye hdr: gaze-adaptive system for displaying high-dynamic-range images”, ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation, ACM, pp. 68–68 (2009).
- [30] G. Ward Larson, H. Rushmeier and C. Piatko: “A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes”, ACM SIGGRAPH 97 Visual Proceedings: The art and interdisciplinary programs of SIGGRAPH ’97, ACM, p. 155 (1997).
- [31] S. N. Pattanaik, J. Tumblin, H. Yee and D. P. Greenberg: “Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display”, Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, pp. 47–54 (2000).
- [32] P. Ledda, A. Chalmers, T. Troscianko and H. Seetzen: “Evaluation of tone mapping operators using a high dynamic range display”, ACM Trans. Graph., **24**, 3, pp. 640–648 (2005).
- [33] G. Krawczyk, K. Myszkowski and H.-P. Seidel: “Perceptual effects in real-time tone mapping”, Proceedings of the 21st spring conference on Computer graphics, SCCG ’05, ACM, pp. 195–202 (2005).
- [34] M. Slomp and M. M. Oliveira: “Real-time photographic local tone reproduction using summed-area tables”, Computer Graphics International 2008, pp. 82–91 (2008).
- [35] A. Adams: “The print”, Brown and Company (1983).

- [36] S. Shaler: “The relation between visual acuity and illumination”, *Journal of General Physiology*, **21**, pp. 165–188 (1937).
- [37] S. M. Khan and S. N. Pattanaik: “Modeling blue shift in moonlit scenes by rod cone interaction”, *Journal of Vision*, **4**, 8 (2004).
- [38] B. A. Barsky, T. J. Kosloff and S. D. Upstill: “An opponent process approach to modeling the blue shift of the human color vision system”, *Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization, APGV '04, ACM*, pp. 163–163 (2004).
- [39] R. W. G. Hunt: “Light and dark adaptation and the perception of color”, *Journal of the Optical Society of America*, **42**, pp. 190–199 (1952).
- [40] H. W. Jensen, F. Durand, J. Dorsey, M. M. Stark, P. Shirley and S. Premože: “A physically-based night sky model”, *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM*, pp. 399–408 (2001).
- [41] 池田, 永田, 矢口, 芦澤: “昼光照明下における薄明視の出現時刻と照度レベル”, *照明学会誌*, **67**, pp. 491–496 (1983).
- [42] D. C. Hood and M. A. Finkelstein: “Comparison of changes in sensitivity and sensation: Implications for the response-intensity function of the human photopic system”, *Experimental Psychology: Human Perceptual Performance*, **5**, pp. 391–405 (1979).
- [43] E. Reinhard, G. Ward, P. Debevec, S. Pattanaik, W. Heidrich and K. Myszkowski: “High Dynamic Range Imaging 2nd Edition”, Morgan Kaufmann Publishers (2010).
- [44] T. Ritschel, M. Ihrke, J. R. Frisvad, J. Coppens, K. Myszkowski and H.-P. Seidel: “Temporal glare: Real-time dynamic simulation of the scattering in the human eye”, *Comp. Graph. Forum (Proc. of Eurographics 2009)*, **28**, 2, pp. 183–192 (2009).
- [45] G. S. Brindley: “Two new properties of foveal after-images and a photochemical hypothesis to explain them”, *The Journal of Physiology*, **164**, pp. 168–179 (1962).
- [46] M. Feldman, L. Todman and M. B. Bender: “‘flight of colours’ in lesions of the visual system”, *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, **37**, 11, pp. 1265–1272 (1974).

- [47] T. Ritschel and E. Eisemann: “A computational model of afterimages”, *Comp. Graph. Forum (Proc. of Eurographics 2012)*, **31**, 2 (2012).
- [48] R. S. Westfall: “Never at Rest: A Biography of Isaac Newton”, Cambridge University Press (1980).
- [49] J. W. von Goethe: “Theory of Colours”, John Murray (1840).
- [50] E. B. Titchener: “Experimental Psychology: A Manual of Laboratory Practice”, The Macmillan Company (1901).
- [51] A. M. Shuey: “The flight of colors”, *The American Journal of Psychology*, **35**, 4, pp. 559–582 (1924).
- [52] H. Weve: “The colours of after-images, following strong light stimuli”, *British Journal of Ophthalmology*, **9**, pp. 627–638 (1925).
- [53] H. D. Reidenbach: “Determination of the time dependence of colored afterimages”, *Proceedings SPIE The International Society for Optical Engineering*, Vol. 6844, International Society for Optical Engineering (2008).
- [54] W. A. H. Rushton and G. H. Henry: “Bleaching and regeneration of cone pigments in man”, *Vision Research*, **8**, 6, pp. 617–631 (1968).
- [55] D. A. Baylor, A. L. Hodgkin and T. D. Lamb: “Reconstruction of the electrical responses of turtle cones to flashes and steps of light”, *The Journal of Physiology*, **242**, 3, pp. 759–791 (1974).
- [56] D. Gutierrez, O. Anson, A. Munoz and F. J. Seron: “Perception-based rendering: Eyes wide bleached”, *Comp. Graph. Forum (Proc. of Eurographics 2005)* (2005).
- [57] M. Mikamo, M. Slomp, B. Raytchev, T. Tamaki and K. Kaneda: “Perceptually based afterimage synthesis”, *Comp. Graph. Forum (Proc. of Eurographics 2012)*, pp. 17–20. (2012).
- [58] F. Durand and J. Dorsey: “Interactive tone mapping”, *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000*, London, UK, Springer-Verlag, pp. 219–230 (2000).
- [59] E. Reinhard, M. Ashikhmin, B. Gooch and P. Shirley: “Color transfer between images”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **21**, 5, pp. 34–41 (2001).

- [60] F. J. Blommaert and J.-B. Martens: “An object-oriented model for brightness perception”, *Spatial Vision*, **5**, 1, pp. 15–41 (1990).
- [61] G. W. Larson: “Real pixels”, *Graphics Gems II*, pp. 80–83 (1991).
- [62] R. Bogart, F. Kainz and D. Hess: “The openexr file format”, *Siggraph 2003 Technical Sketch* (2003).
- [63] G. Ward and M. Simmons: “Jpeg-hdr: a backwards-compatible, high dynamic range extension to jpeg”, *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, ACM (2005).
- [64] R. Xu, S. N. Pattanaik and C. E. Hughes: “High-dynamic-range still-image encoding in jpeg 2000”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **25**, pp. 57–64 (2005).
- [65] H. Hirayama, K. Kaneda, H. Yamashita, Y. Yamaji and Y. Monden: “Visualization of optical phenomena caused by multilayer films based on wave optics”, *The Visual Computer*, **17**, 2, pp. 106–120 (2001).
- [66] S. Kanamori, K. Fujiwara, T. Yoshinobu, B. Raytchev, T. Tamaki and K. Kaneda: “Physically based rendering of rainbows under various atmospheric conditions”, *Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, **0**, pp. 39–45 (2010).
- [67] J. Cohen, C. Tchou, T. Hawkins and P. E. Debevec: “Real-time high dynamic range texture mapping”, *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, Springer-Verlag, pp. 313–320 (2001).
- [68] B. Penna, T. Tillo, E. Magli and G. Olmo: “Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression”, *IEEE TRANS. GEOSCI. REMOTE SENS*, **45**, pp. 1408–1421 (2007).
- [69] A. Said and W. A. Pearlman: “A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **6**, 3, pp. 243–250 (1996).
- [70] E. Christophe, C. Mailhes and P. Duhamel: “Hyperspectral image compression: Adapting spiht and ezw to anisotropic 3-d wavelet coding”, *IEEE Transactions on Image Processing*, **17**, 12, pp. 2334–2346 (2008).
- [71] Y. Shimada, T. Tamaki and K. Kaneda: “A spectral-based high dynamic range image data format by combination of cosine and wavelet basis functions [in japanese]”,

The proceedings of 243th research conference of the institute of image electronics engineers of Japan, pp. 147–153 (2009).

- [72] M. Tatsumi, S. Tominaga, S. Nishi and N. Tanaka: “Analysis and compression of the spectral reflectance data of art paintings [in japanese]”, *Journal of the Color Science Association of Japan*, Vol. 31, pp. 58–59 (2007).
- [73] K. Iwasaki, K. Ueda, Y. Omoya, S. Takagi and F. Yoshimoto: “Real-time rendering of objects coated with multilayer thin films”, *Proceedings of ISICE 2007* (2007).
- [74] S. N. Pattanaik, J. A. Ferwerda, M. D. Fairchild and D. P. Greenberg: “A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display”, *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, pp. 287–298 (1998).
- [75] T. Yoshinobu, T. Manabe, K. Kaneda and H. Yamashita: “An rgb to spectral conversion method (in japanese)”, *Proceedings of the Associated Symposium of Graphics and CAD*, pp. 159–164 (2003).
- [76] Y. Li, L. Sharan and E. H. Adelson: “Compressing and companding high dynamic range images with subband architectures”, *ACM Trans. Graph.*, pp. 836–844 (2005).

謝辞

本論文をまとめ、研究を遂行するにあたり、日頃から丁寧・熱心に相談に応じ、暖かなご指導・ご助言を頂きました、広島大学大学院工学研究院情報部門の金田和文教授に深く感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、多くの建設的なご指摘・ご意見を頂いた、広島大学大学院工学研究院情報部門の原田耕一教授、平嶋宗教授に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、ゼミや研究で多くのご指摘・ご意見を頂いた、広島大学大学院工学研究院情報部門の玉木徹准教授、多くのご指摘・ご意見・英文校正を頂いた同 Bisser Raythev 助教に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、事務手続き、物品購入など日々の研究環境を整えて頂いた広島大学技術職員の開内幸治技官に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、英文校正などについて相談に乗って頂いた Marcos Slomp 氏 (現在、鹿児島大学大学院理工学研究科工学系情報生体システム工学専攻) に深くに感謝致します。

日々の生活で大変お世話になりました広島大学工学部知的システムモデリング研究室の皆様 に深く感謝致します。

最後に、学生生活を送るにあたり、物心両面から支援して下さった家族に深く感謝致します。

これらの支援がなければ本研究を完成させることはできませんでした。心から感謝致します。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費 (特別研究員 DC1 23・10707) によった。