

# 論文の要旨

題目 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)

氏名 三嶋 道弘

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、人は、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。CG 画像を、ディスプレイに表示するためにこの視覚特性が利用される。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、輝度ダイナミックレンジを変化させて光を感じる特性をモデル化し、利用することにより、通常のディスプレイに、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。

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。また、論文中の第 2 章以降で現れる用語・概念を、視覚システムと関連させて説明する。具体的には、まず、視覚システムのハードウェア的な側面として、眼の構造と視覚伝達路について説明する。ここでは、眼の光学システムを構成する器官のうち特に重要な部分の名称と、その器官が果たす役割を説明する。次に、視覚システムのソフトウェア的な側面として、視覚特性について説明する。ここでは、光から変換された電気信号が、脳によって知覚されるまでに、どのような処理が行われるのか、また、その処理を再現するために考案されたモデルを説明する。

第 2 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」と題して、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 (明所視) と、星空の下のような暗い環境 (暗所視) の中間である、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。

既存手法は、薄明視の状況下での色の見え方の変化を表現するために、明所視の状況下における色相と暗所視の状況下における色相を線形補間していた。しかし、線形補間は、人の知覚と異なり、自然な印象を与える色の表示を行うことができない問題があった。また、周囲の明るさに応じて変化する視細胞の応答をモデル化した手法では、視細胞の応答が、実際に知覚する色の見え方に、どの程度影響を及ぼすか解明されていないため、表示の際に不自然な色合いを生じる問題があった。そこで、提案手法では、色票を用いて実際の色の見え方の変化を測定した、心理物理学的な実験データに基づくことで、既存手法の問題点を解決し、自然な色の変化を表現することができる。さらに、提案手法は、色相を変化させる部分と、輝度ダイナミックレンジを変化させる部分がそれぞれ分かれて構成されている。このため、既存のトーンマッピング手法に容易に取り入れることができる。また、提案手法は計算量が少ないため、リアルタイムアプリケーションに応用することが可能である。

第3章では、「視覚特性に基づいた残像表示手法」と題して、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。通常のディスプレイの表示輝度は、車のヘッドライトのような大きな輝度に及ばない。このため、単に光源を表示するだけでは残像は発生せず、シミュレータなどによる疑似体験には不十分であった。そこで残像をモデル化し、画像中の高輝度光源の存在していた位置に残像を意図的に付加することで、残像が現れたことを表現する手法を開発した。残像は視覚システム内で発生する現象であるため、物理法則に基づく光学モデルだけでは表現できない。提案手法は、視覚特性モデルを利用し、生理的に発生する現象である残像を再現した。

既存の残像表示モデルは、残像の発生原因を、視細胞中に存在し光を電気信号に変換する役割を持つ、視物質の濃度変化に由来するとした。この濃度変化を基にして、残像の明るさの時間変化を表現した。しかし、色相の時間変化は考慮されていなかった。そのため、既存の残像表示モデルにより発生した残像は、時間が経過しても、初期の色のまま、変化せずに消えてゆく結果であった。これは、日常経験する残像と異なる問題があった。提案手法は、これを改善するため、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。これにより、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は、光源から尾を引くように残像が現れる。このような残像の表示方法についても提案している。提案したモデルにより表示される残像の色変化は、実際に光源を見た場合に発生する残像の色変化に近いという特徴がある。

第4章では、「ハイダイナミックレンジ分光画像の効率的表示」として、ハイダイナミックレンジ分光 (High Dynamic Range Spectral: HDRS) 画像の高圧縮・高速な表示方法を提案する。HDRS 画像は、物理法則に基づく光学モデルにより計算された高精度の画像を、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記録している。このとき、RGB 成分ではなく、可視光の波長成分をサンプリングすることで、精度よく保存することが可能である。しかし、波長成分をサンプリングすることで、ファイル容量は大きくなり、通常のディスプレイに表示するには多くの時間がかかる。

提案手法を用いることで、これらを解決する。すなわち、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可能である。これは、既存手法の特徴を生かして組み合わせることで達成する。具体的には、圧縮と伸長、それぞれ、リモートセンシング分野と CG 分野で開発された手法を利用する。

画像圧縮についてはリモートセンシング分野で発表されている成果を利用する。リモートセンシング分野では分光情報を用いて地質の調査などが行われる。その分光情報を保存するため、ウェーブレット係数を用いた高精度かつ高圧縮率な手法が開発された。これを CG で作成した画像に応用する。空間成分と波長成分の 2 段階に分けてウェーブレット変換を利用することで、高精度で高圧縮な記録が可能である。

画像伸長については、CG 分野で開発された、RGB 成分への高速な変換手法を利用して表示を行う。提案手法は、この高速な変換手法を、ディスプレイへ画像を表示することに着目して改良した。すなわち、輝度ダイナミックレンジの調整のために、トーンマッピングを行うことを考慮し、それに適した表色系である XYZ 表色系を用いる。また、画像表示までに行う変換にはウェーブレット変換を用いる。画像をウェーブレット係数で表現することで、トーンマッピングや、所望の画像サイズへの変換を高速に行うことができる。

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る。本研究では、視覚特性に着目し、ディスプレイに表示した際の色表現手法について開発を行った。第 2 章では周囲の環境の明るさが変化した場合の色の見え方の変化を表現する手法を開発した。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の表示手法を開発した。これら二つに共通することは、どちらのモデルも実験データに基づいていることである。これらのモデルを用いることで、実際の印象に近い画像を得ることができることを示し、表示の際の色合いの重要性を示した。第 4 章では、実世界の光は RGB 成分ではなく、分光成分を持つことに着目し、分光分布画像の記録方法についても提案した。さらに、通常のディスプレイは RGB 成分に対応しているため、それに応じた高速に表示する手法を開発した。

今後の課題として、次のことが挙げられる。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。提案手法を、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、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でも対応する必要がある。また、HDRS 画像のリアルタイム表示も必要である。さらに、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ている。