

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500157

研究課題名（和文）順応効果を考慮したHDR画像の臨場感再現とその評価

研究課題名（英文）Realistic HDR Image Reproduction with Visual Adaptation Effect and Its Evaluation

研究代表者

堀内 隆彦 (TAKAHIKO HORIUCHI)

千葉大学大学院・融合科学研究科・准教授

研究者番号：30272181

研究成果の概要（和文）：本研究では、HDR から LDR への適切なトーンマッピング手法の開発によって、LDR デバイスでの映像表現の限界の解決を行った。このとき、視覚の明暗順応および色順応特性を考慮する方法を考案した。また、主観評価と測色値との関係を考察し、適切な評価規範を検討した。さらに、デジタルハーフトニングの技術をディスプレイデバイスへ展開することによって、低明度部分の階調が粗くなるという問題点の解決に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：In this study, the limit of the image reproduction using an LDR device has been solved by developing an effective tone mapping technique from HDR to LDR. At that time, luminance adaptation and chromatic adaptation in human visual system were considered. Then, an appropriate criterion for evaluating reproduced images by considering the relationship between subjective evaluations and colorimetric values. Furthermore, a low quantization problem at low intensity level has been tackled by applying digital half-toning techniques to a display device.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：HDR画像，トーンマッピング，視覚特性，色順応，画質改善，画質評価

1. 研究開始当初の背景

HDRからLDRへの適切なトーンマッピング手法

HDR 画像のダイナミックレンジ圧縮手法は、米国画像科学技術学会(IS&T)を中心に検討がなされている。従来提案されてきた方法は、空間不変型階調変換(Spatially-invariant Tone Mapping)と空間可変型階調変換(Spatially-variant Tone Mapping)の二種類

に大別される。空間不変型階調変換は、視覚システムのグローバル順応機能を TRC (Tone Reproduction Curve)に反映することによって階調を変換する手法である。TRC 法は、シンプルで演算効率が良い利点があるが、空間的な局所コントラストの操作は行われず、人間の視覚にとっての適合性は低い。一方、空間可変型階調変換では、画像の空間的明暗分布に適応的に作用する TRO (Tone

Reproduction Operator)を用いて、目標とする局所コントラストを維持するように階調変換を行う。近年の研究の多くは、TRO法に基づいている。TRO法は、人の視覚特性の一部をモデルしているが、人間の視覚にとっての適合性は十分とは言えない。

申請者は、視覚特性を積極的に取り入れたトーンマッピング法の提案を行ってきた。特に、最近の研究では、順応した状態での見えを再現することは、リアリティある画像再現を知覚するために必要であると考え、明暗順応した状態における実シーンの知覚と、ディスプレイ画像の知覚が同等になる手法を考案した。しかしながら、色順応モデルを取り入れたトーンマッピング問題は未解決である。加えて、再現画像と実シーンとの比較評価規範は十分に検討されていない。

FPDを対象としたデジタルハーフトーンマッピング手法

FPDを対象としたデジタルハーフトーンマッピングは、新しい研究分野であり、まだ十分な検討がなされていない。本来、デジタルハーフトーンマッピングは、インクのドット密度の違いによって多階調表現を行うことを目的とした技術であり、プリンタ出力を対象に長い間研究が進められてきた。代表的な手法は、誤差拡散法と組織的ディザ法の二つに大別される。FPDを対象としたデジタルハーフトーンマッピングも、これらの方法を適用する研究が主流であるが、解決しなければならない大きな二つの課題がある。一つめは、出力輝度が高いために、従来から指摘されている視覚的に不快な幾何学的なパターンが、容易に視認されてしまうことである。二つめは、動きがなだらかな映像に対して、フレーム間で同じパターンが再生されるため、視覚的に不自然で不快に感じることである。一つめの課題に対しては、誤差拡散法の改良手法として、エラーカーネルの重みを変化させる手法、エラーカーネルの形態を変える手法、エラーの伝播方向を変化させる手法などが印刷技術分野で工夫されてきた。しかしながら、ディスプレイ出力のようなリアルタイム処理には、膨大なメモリと参照テーブルが必要となり、現実的ではない。さらに、種々のパラメータ設定が容易ではない。一方、ディザ法の改良手法も提案されているが、空間表現力は改善されるものの、表現できる階調数が低い問題点が残っている。加えて、従来技術は、材料、工程、ディスプレイのセルサイズ、ディスプレイの駆動方法などのFPDの特性が十分考慮されていない。また、二つめの課題点に対しては、時間軸による変化に起因しているため、詳細な検討はなされていない。

申請者は、ディスプレイを対象としたデジタルハーフトーンマッピング手法として、誤差拡散法とディザ法を融合した手法を開発して

いる)。しかしながら、2値の静止画ハーフトーンマッピングに対する検討が中心であり、ディスプレイのようなマルチレベル映像への検討は十分に行っていない。さらに、具体的に高輝度ディスプレイを用いた検証を行っていない。

2. 研究の目的

研究期間内に、以下の5項目に対して学術的に明らかにすることを目指す。

- [1] 色順応を考慮したHDR画像のトーンマッピング法を開発する。
- [2] 高輝度ディスプレイのマルチレベルハーフトーンマッピング手法を開発する。
- [3] 種々の色度、輝度をもつHDRシーンデータベースを構築する。
- [4] 主観評価実験を通じて、実シーンと再現画像の色度変化を解析する。
- [5] HDRシーンの画像再現における客観的な評価規範を提案し、提案手法の検証を行う。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するための要素技術は、「HDR映像のトーンマッピング法」と「高輝度FPDのためのデジタルハーフトーンマッピング」の二つに大別される。本年度までに、前者に関しては、明暗順応を考慮したトーンマッピング法を開発しており、後者では2値レベルのディスプレイ用デジタルハーフトーンマッピング技術の開発を行ってきた。平成21年度から平成22年度にかけては、それぞれ実用技術への展開として、色順応を考慮した手法の開発に移行し、ハーフトーンマッピングはマルチレベル出力技術を確立する。また、評価用のデータベース構築を並行して行う。平成22年度以降は、検証実験を進めながら技術の改善を行い、色度変化に着目した順応機能を反映した新しい再現画像評価規範を提案する。

(1) 色順応を考慮したHDR画像のトーンマッピング技術の構築

これまでに、明暗順応の視覚特性を積極的に取り入れたHDRシーンのトーンマッピング手法を開発してきた。これらの研究を進めるにあたり、実シーンの測色値を正確にディスプレイで再現しても、人間の色に対する見えは異なるという評価結果が明らかになってきた。本研究では、色順応を考慮したHDR画像のトーンマッピング技術の開発を目指す。Fairchildらが提案しているiCAM06モデルでは周辺視などの色の見えモデルを取り入れているが、色順応メカニズムは研究途上であるため、色順応を積極的にトーンマッピングに取り入れた研究例は見受けられない。共同研究者の富永は、絵画のデジタルアーカイブを目的として、油彩絵画の色順応特性について研究を行ってきた。本研究では、この色

順応モデルに基づいて、トーンマッピング手法を構築していく予定である。

(2) マルチレベルハーフトーン技術の構築

これまでに、2値レベルのディスプレイ用ハーフトーン技術を開発し、多くの学会で高い評価を受けてきた。この方法は、従来の印刷技術のハーフトーンをディスプレイに適用したときの問題点を明確にした後に、それらを改善するために組織的ディザ法と誤差拡散法を融合したものである。しかしながら、ディスプレイデバイスはプリンタと異なって多値出力が可能であるため、マルチレベルのハーフトーン技術に展開する必要がある。マルチレベルハーフトーン技術の研究例もいくつか存在するが、いずれも3値レベルを対象としており、汎用性がない。申請者らが提案してきたアルゴリズムは、マルチレベルでも実時間処理が可能である見通りが得られており、初年度で開発が可能であると計画している。研究代表者が中心に取り組む。

(3) HDR シーンデータベースの収集

HDR シーンはいくつかの研究機関でデータベース化されているが、それらは輝度値が記録されているのみであり、撮影照明環境、カメラ特性、色度などの情報が欠落しているため、十分な検証を行うことができない。申請研究では、実シーンと再現画像の色再現を厳密に評価することを目指しているため、種々のHDRシーンのデータベースを構築する。特に、別途経費で購入を予定している任意の色度を照射できる光源を利用して、色順応特性を調べるために、同じオブジェクトを種々の光源で撮影する。なお、色度の再現性を調べるために、撮影に利用するカメラは、RGBではなくXYZの三刺激値として十分に獲得できる必要があるため、等色関数を十分に近似できるカメラ感度をもつカメラを設備費にて購入して、画像を獲得するものとする。

(4) 主観評価実験による解析と手法改善

HDRシーンの再現画像を評価する研究の歴史は浅い。申請者らの研究では、実シーンと再現画像を比較して評価する場合と、再現画像のみを評価する場合では、人間が目目して評価する項目も、評価結果も異なることがわかっている。しかしながら、具体的な評価規範は示されていない。特に、順応効果を考慮した見えと評価との関係は、大きな課題である。本研究では、実験室に構築した実シーンに対して、前年度構築したデータベースと同じ種々の光源を照射し、様々なトーンマッピングによって再現された画像と比較する主観評価実験を通じて、その優劣の評価を行う。トーンマッピング法は、申請者らが提案している方法を含めて、過去提案されている10種類を予定している。色順応過程において、

色度点が標準白色点に向かって移動することに着目し、実シーンと各トーンマッピングによる再現画像の色度点の移動方向、距離との関係を解析し、人間の見えとの関係を考察する。また、主観評価結果に応じて、提案手法の改善を行う。精度の高い評価を実現するために、広色域でフルハイビジョンサイズのモニタを設備経費で購入予定である。

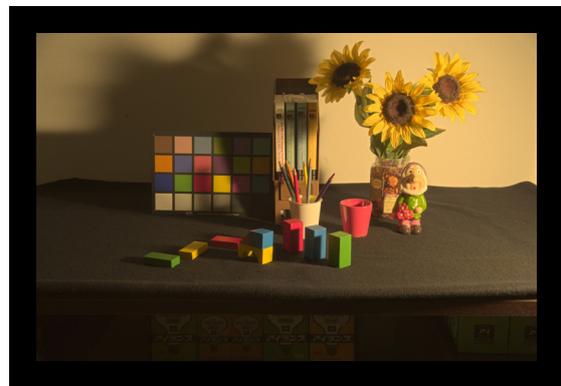
(5) 再現画像の評価規範の設計

(4)において解析した結果を利用して、実シーンの色度点が順応後移動する個所を推定し、これに基づいた再現画像の評価規範を設計する。そして、主観評価結果と合致することを示す。

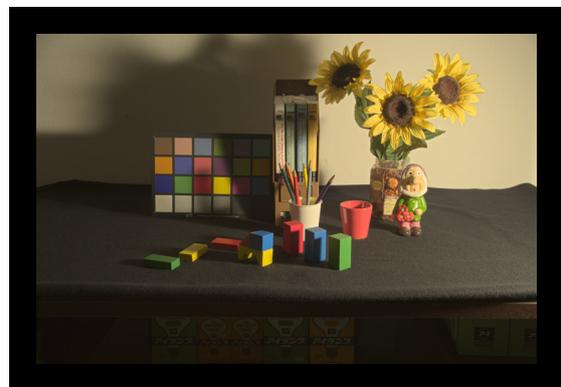
4. 研究成果

(1) 色順応を考慮したHDR画像のトーンマッピング技術の構築

色順応を考慮したHDR画像のトーンマッピング技術の開発を行った。先行研究で提案している昼光下におけるHDR画像のトーンマッピング法に対して、共同研究者の富永が提案している色順応モデルを利用して種々の照明光のシーンの色温度を推定し、不完全色順応に基づいた色予測を利用したトーンマッピング手法を構築した。実験室に構築したHDRの実シーンに対して、心理物理実験を通じて検証を行った。



A光源下で撮影されたシーン



色予測を用いたトーンマッピング

(2) マルチレベルハーフトーン技術の構築

組織的ディザ法と誤差拡散法を融合したマルチレベルのハーフトーン技術の構築を行った。理論構築はほぼ完了した。プロトタイプ実装を試みて動作確認を行ったが、視覚的に切り替え速度が視認できる問題点が残った。引き続きシステム構築を継続する必要がある。

(3) HDR シーンデータベースの収集

様々な色温度のHDRシーンについて、屋内外において撮影し、データの獲得を継続して行った。屋外シーンは、大学内の定点において全方位HDR画像を毎月計測し、データベース化を行った。



全方位HDRデータベースの画像例

(4) 主観評価実験による解析と手法改善

屋内のHDRシーンに対して、明度、彩度、色相を意図的に変化させた再現画像を作成し、一対比較法により心理物理実験を行った。好ましい色再現評価、メモリマッチング評価、実シーンと比較した評価の3種類を行い、彩度変化に対して有意に主観評価が関係する解析結果を得た。また、シーンのダイナミックレンジに依存して、網膜モデルの応答関数の傾きを変化させることが有用であることを発見し、アルゴリズムの改良を行った。



評価環境

(5) 再現画像の評価規範の設計

(4)の結果を受けて、主にメモリマッチングと実シーン比較の評価法において、適切な画像再現の評価規範の原案を作成した。さら

に評価実験を進めて、提案規範の適切性の検証を継続する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

① T.Horiuchi, Y.Fukuda, Y.Kohda, S.Tominaga, "Appropriate Observation Condition of Diagonal-Pixel-Offset Projection for Improving Visual Resolution", Proc. 18th International Display Workshop, 査読有, 2011, pp.357-360.

② T.Horiuchi and S.Tominaga, "HDR Image Quality Enhancement Based on Spatially-Variant Retinal Response", EURASIP Journal on Image and Video Processing, 査読有, Vol.2010, Article ID 438958, 2010, doi:10.1155/2010/438958.

③ T.Horiuchi, Y.Q.Fu, S.Tominaga, "Perceptual and Colorimetric Evaluations of HDR Rendering with/without Real-world Scenes", Proc. Congress of the International Colour Association, 査読有, 2009, CD-ROM.

[学会発表] (計5件)

① 中島詩織, 堀内隆彦, 富永昌治, 画像再現における照明環境と色順応効果との関係, 第42回日本色彩学会全国大会, 2011年5月14日, 千葉大学.

② 福田雄太, 堀内隆彦, 富永昌治, 局所的な明暗順応に基づいたHDR画像レンダリングとその評価, 電子情報通信学会電子ディスプレイ研究会, 2010年10月18日, 機械振興会館.

③ 大寺亮, 堀内隆彦, 富永昌治, 視線追跡を利用したカラー画像の画質改善システム, パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU), 2009年10月15日, 広島大学.

[その他]

ホームページ等

<http://dippix.tp.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 隆彦 (TAKAHIKO HORIUCHI)

千葉大学大学院・融合科学研究科・准教授
研究者番号: 30272181

(2) 研究分担者

富永 昌二 (SHOJI TOMINAGA)

千葉大学大学院・融合科学研究科・教授
研究者番号: 10103342