

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500123

研究課題名(和文)分光分布を考慮した大域照明モデルに基づく表示手法の開発

研究課題名(英文)Development of a Spectral Rendering Method Based on a Global Illumination Model

研究代表者

金田 和文(Kaneda, Kazufumi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30185946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：照明設計や工業デザインにおいて、間接照明を含む環境下において照明光の分光分布を考慮して波長依存性の高い物質を写実的に表示する手法が必要とされている。これを実現するために、コンピュータグラフィクスにおける代表的な大域照明モデルであるフォトンマッピング法を拡張することにより分光分布を考慮した表示手法を開発した。さらに、レンダリングされた分光分布をもつハイダイナミックレンジ画像を、視覚特性に基づいてトーンマッピングを施してリアルに表示する手法の改良を行った。

研究成果の概要(英文)：It is important to render the objects realistically whose optical properties depend on the wavelength of light, under indirect lighting environment. To achieve the research goal, we have developed a spectral rendering method based on a photon mapping method, that is a typical algorithm of a global illumination model in computer graphics. Furthermore, we have improved a method for displaying high dynamic range spectral images realistically by using a tone mapping technique taking into account human visual properties.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，メディア情報学・データベース

キーワード：コンピュータグラフィクス 大域照明モデル スペクトル フォトンマッピング ハイダイナミックレンジ画像 トーンマッピング

1. 研究開始当初の背景

これまでコンピュータグラフィックスでは主として光の三原色である RGB の強度を計算し画像生成を行ってきた。しかし、光の干渉や回折を伴う現象では RGB 三成分の輝度計算だけではリアルな画像を作成することはできない。これを解決する方法として、可視光の波長を密にサンプルし、波長成分ごとの分光強度を計算し、人の光刺激に対する分光感度(等色関数)を用いて RGB 成分に変換して表示を行う方法がとられてきた。

一方、コンピュータグラフィックスにおける照明計算においては、被照面に到達する直射光を物理的モデルに基づいて計算する局所照明モデルが開発された。しかし、照明設計や写実的な画像生成のためには、直射光だけでなく間接光も含めて物理的なモデルに基づく大域照明モデルが必要となる。このモデルに基づく代表的な表示手法には、被照面の拡散反射光成分を有限要素法を用いて解くラジオシティ法と、光を粒子の流れ(光子)としてとらえ、光子の流れをレイトレーシング法を用いて解くフォトンマッピング法がある。

コンピュータグラフィックスにおける光の取り扱いには上述の大きな二つの柱があり、現在までに大域照明モデルでは RGB 成分の強度計算による画像生成手法、局所照明モデルでは分光強度計算による画像生成手法が開発されている。しかし、大域照明モデルに基づいた分光強度計算による画像生成手法の開発はこれまでまだ着手されていない。

この理由としては、間接光を含めて輝度計算を行う大域照明モデルでは RGB 三波長成分の計算だけでも計算量が多く画像生成に時間がかかるためである。可視光の波長をサンプルして分光強度計算を行えばサンプル数が増えれば増えるだけさらに計算時間がかかることになる。

今日では蛍光灯や LED 照明など可視光波長領域にわたって滑らかな分光分布をもたない光源が多用されるようになってきている。そのため、RGB 三波長成分の輝度計算だけでは高精度の照明設計を行うことはできない。分光分布を考慮した大域照明計算手法の開発により、この問題が解決される。さらに光の干渉を生じるコーティングが施された物質や、微細加工による回折現象を起こす物質など、工業デザイン分野においても表示物体の種類を大幅に広げることができる。さらに映画等における実写画像との合成においては、照明環境に応じた明るさや色あいの整合をとった極めて写実的な画像生成や画像表示が要求されている。これらの用途においても本課題の成果は大きく役立つ。

2. 研究の目的

分光分布を考慮した大域照明モデルに基づく表示手法の開発を行う。照明設計や工業デザインにおいて、間接照明を含む環境下

において照明光の分光分布を考慮して波長依存性の高い物質を写実的に表示する手法が必要とされている。これを実現するために、大域照明モデルのフォトンマッピング法を拡張することにより分光分布を考慮した表示手法を開発する。さらに、レンダリングされた分光分布をもつハイダイナミックレンジ画像をリアルに表示するために、視覚特性に基づいてトーンマッピング表示手法の改良を行う。

この研究目的を実現するために次項の研究開発を行う。

(1) 大域照明モデルのフォトンマッピング法を拡張することにより分光分布を考慮した表示手法を開発する。すなわち、フォトン(光子)が特定の波長成分をもつと仮定し、フォトンマップに波長情報を併せて登録するように拡張する。そして、物質の分光反射・透過特性に応じて確率的にフォトン反射・透過させてトレースを行う。これにより、大域照明環境下で間接光も考慮した分光強度を求めることが可能となる。

(2) 処理の効率化をはかるために、モンテカルロ法の高速度化で用いられている重点的サンプリングや層化サンプリングなどの手法を採用する。さらに、この手法ではフォトンマップ作成の際にはフォトンごとに独立に処理を行うことができるため、高速化や効率化も比較的容易に行える。

(3) レンダリングされた画像を視覚特性を考慮したトーンマッピングを用いてリアルに表示する手法を開発する。生成される画像は輝度ダイナミックレンジの広い分光画像となる。結果画像を呈示するためには、汎用の RGB ディスプレイにリアルに表示する必要がある。汎用のディスプレイの輝度ダイナミックレンジは狭いため、トーンマッピングを用いて輝度圧縮を行って表示を行う。この際、高い輝度ダイナミックレンジ分光画像のリアリティを損ねることなく表示できるように、人の視覚特性を考慮することによりトーンマッピングを行う。

本研究の独創的な点は、これまで未着手であった分光分布を考慮した大域照明モデルに基づく表示手法を開発することである。そして、単に光の波長成分のサンプル数を増やして各波長を単独に計算するのではなく、確率的なサンプリングを導入することにより、効率的な画像生成手法を開発することである。また、開発する手法は分光反射・透過特性や波長変化を確率的に取り扱うため、代表的な大域照明モデルであるフォトンマッピング法と非常に相性がよく、フォトンマッピング法の拡張により実現可能である。

3. 研究の方法

本研究は次の 4 項目から構成される。

- (1) フォトンマッピング法の拡張
- (2) 計算効率化と精度検証
- (3) HDR 分光画像の表示法の改良

(4) 各種分野への応用の検討

(1) フォトンマッピング法の拡張

従来手法では、フォトンが物体表面に衝突する度にフォトンマップに位置情報とフォトンのエネルギーを記録していた。これを位置情報とフォトンのエネルギーに加えてフォトンのもつ波長もフォトンマップに記録するように拡張する。そして、フォトンマップを参照して画像生成する際に、輝度計算点近傍において記録されたフォトンのエネルギーと波長成分から分光強度を求める。最終的に、輝度ダイナミックレンジの広い分光強度分布を格納したハイダイナミックレンジ(HDR)分光画像として出力される。これらの処理手順をコンピュータ上にインプリメントする。これにより、波長依存性の高い干渉や回折現象をとまなう物質を含むシーンに対して間接光を考慮した画像生成が可能となる。

(2) 計算効率化と精度検証

計算効率化手法として、モンテカルロ法の高速度に用いられる重点的サンプリングや層化サンプリングを導入する。すなわち、フォトン生成時やフォントレースにおいて上記のサンプリング手法を活用して計算効率化をはかる。

フォトン生成の際には、波長を各フォトンに割り当てる。このとき、各フォトンに確率的に波長をサンプルして割り当てる方法を採用し、効率的な割り当て方法を開発する。

さらに、従来手法では、フォトンが物体表面に衝突したとき、物体表面の反射特性だけを考慮してトレースを継続するかどうかを決定していた。しかし、この方法では、エネルギーの小さなフォトンが大量に生成されてしまい、計算効率を落とす原因になっている。本研究では、フォントレースの際に、物体表面の反射特性に加えてフォトンの相対エネルギーを考慮するよう、フォントレース法の改良を行う。これにより、比較的エネルギーの大きなフォトンのトレースが継続されるようになり、画像生成の効率が高まる。

上述の計算効率化に対して、表示精度の検証を行う。フォトンパス数を徐々に増加させていながら計算結果の収束状況を調査することにより検討を行う。フォトンパス数を十分大きくすれば計算結果は真値に近づくが、計算時間は長くなる。そのため、フォトンパス数と計算時間そして精度の関係を明らかにする。これにより、各種の応用に対して必要とされる精度に基づいてフォトンパス数を決定する際のガイドラインが得られる。

(3) HDR 分光画像の表示法の改良

レンダリングされた画像は分光情報を持つハイダイナミックレンジ(HDR)画像となる。これを汎用 RGB ディスプレイに表示するためには、等色関数を用いて分光強度分布から

RGB 表色系に変換する。さらにトーンマッピングを用いて広帯域の輝度を汎用ディスプレイの輝度レンジに変換して表示を行う。

HDR 分光画像はデータ量が大きくなるため、画像をコンパクトに記録し、表示の際には高速に画像を伸長し、さらに RGB 表色系へ変換する必要がある。このとき、HDR 分光画像のもつリアリティを損ねることなく、かつ高速に表示することが重要である。

これらの要求を実現するために、画像の伸長と RGB 変換を同時に行うことにより高速に表示が行え、かつ、人の視覚特性を考慮することによりリアルな表示を行うことができる手法の開発を行う。

(4) 各種分野への応用の検討

蛍光灯や LED 照明など可視光波長領域にわたって滑らかな分光分布をもたない光源を用いた照明設計への応用について調査、検討を行う。

また、工業デザインにおいて光の干渉を生じるコーティングが施された物体、微細加工による回折現象を起こす物体などの表示への応用を検討する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果について、それぞれの項目に分けてまとめる。

(1) フォトンマッピング法の拡張

フォトンマッピング法の拡張を行い、分光分布を考慮した大域照明計算を行うソフトウェアの作成を行った。フォトンのもつ波長もフォトンマップに記録するようにフォトンマップを拡張し、レンダリングの際にはフォトンマップを参照して輝度計算点近傍のフォトンのエネルギーと波長成分から分光強度を求めるよう拡張を行った。

(2) 計算効率化と精度検証

単一波長のみをもつ単波長フォトンと、可視光の波長をすべてをもつ全波長フォトンの 2 種類のフォトンを導入し、重点的サンプリングの考え方に基づいてフォントレースの効率化をはかる手法を開発した(学会発表 8, 10 参照)。

さらに、フォトン生成の際に、層化サンプリングを用いて波長を各フォトンに割り当てる方法を開発した。すなわち、可視光の波長を一定間隔に区分けし、各区間でランダムに波長をサンプルする方法である。これにより、少ない波長サンプル数でも比較的精度よいスペクトルを表現することができるようになり、生成画像の精度向上に寄与した(学会発表 2 参照)。

フォントレースの際に、フォトンが物質境界面に衝突したとき、フォトンのもつ相対分光エネルギーと物質の分光反射・透過特性の両者を考慮して確率的に反射・透過するように拡張を行った。すなわち、物体に衝突したフォトンには、入射時のフォトンの各波長に対する相対エネルギーと反射・透過率から、反射・透過を起こしてフォントレースを継

続するか否かを確率的に求める。フォントレースを継続する場合には、この処理を再帰的に繰り返す(学会発表4,5参照)。

これらの手法により効率的に分光分布を考慮した大域照明計算を行うことが可能となった。

(3) HDR 分光画像の表示法の改良

HDR 分光画像をコンパクトに記録し視覚特性に基づいて表示する手法の開発を行った。すなわち、HDR 分光画像を圧縮してコンパクトに記憶し、伸長時に RGB 変換を同時に施して汎用 RGB ディスプレイに高速に表示する手法を開発した。開発した手法は、伸長時に視覚特性に基づくトーンマッピングを施してリアルに HDR 分光画像を表示することができる(学会発表3,6,11参照)。

さらに、人の視覚特性を考慮して高輝度光源を見たときの残像効果を表現する手法の開発を行った。これらの手法は、高い輝度ダイナミックレンジをもつ画像表示の際に、重要となる要素技術である(雑誌論文1,2参照)。

(4) 各種分野への応用の検討

照明設計への応用を検討するために、白熱灯、蛍光灯、LED ランプなど各種光源を用いた場合、RGB レンダリングと分光分布を考慮したスペクトルレンダリングで、レンダリング画像にどのような違いが生じるかを調査した。その結果、可視光波長領域にわたって滑らかな分光分布をもつ白熱灯の場合でもレンダリング結果に誤差が生じ、精度良い照明設計のためにはスペクトルレンダリングの重要性が確認された。さらに、蛍光灯やLED ランプの光源を用いた場合には、その誤差が大きくなり、画像を表示した場合でも一見してその違いがわかることが確認された(学会発表1参照)。

工業デザイン分野への応用を目指し、大域照明環境下での波長依存性の高い光学現象をシミュレートできるように、薄膜による光の干渉現象を考慮した大域照明環境下でのレンダリング手法の開発を行った(学会発表2参照)。

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3件)

1. Michihiro Mikamo, Marcos Slomp, Bisser Raytchev, Toru Tamaki, Kazufumi Kaneda: Perceptually Inspired Afterimage Synthesis, *Computers & Graphics*, 査読有, Vol. 37, 2013, pp. 429-437, DOI: 10.1016/j.cag.2013.02.008.

2. 三嶋道弘, Marcos Slomp, Bisser Raytchev, 玉木徹, 金田和文: 視覚特性を考慮した高輝度光源の移動に伴う残像表現手法, *映像情報メディア学会誌*, 査読有, Vol. 67, 2013, pp. J407-J409, DOI: 10.3169/

itej.67.J407.

3. 金森祥太, 藤原和也, Bisser Raytchev, 玉木徹, 金田和文: 物理現象に基づく様々な大気条件下での虹のレンダリング手法, *画像電子学会誌*, 査読有, Vol. 40, No. 2, 2011, pp. 532-540, <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/iieej/>.

〔学会発表〕(計11件)

1. Navamani Isaivathi, Sho Ikeda, Bisser Raytchev, Toru Tamaki, Kazufumi Kaneda: Research on Light Spectrum and Color Representation in Computer Graphics Rendering, *画像電子学会 第269回研究会*, 2014年2月27~28日, 広島市.

2. Sho Ikeda, Shin Watanabe, Bisser Raytchev, Toru Tamaki, Kazufumi Kaneda: Physically Based Spectral Rendering of Optical Phenomena Caused by Multilayer Films under Global Illumination Environment, 2014 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT 2014), January 6-8, 2014, Bangkok, Thailand.

3. Michihiro Mikamo, Tsuyoshi Harada, Bisser Raytchev, Toru Tamaki, Kazufumi Kaneda: An Efficient Method for Displaying HDR Spectral Images on RGB Monitors Taking into Account the Color Matching Functions, *Computational Visual Media Conference 2013*, September 19-20, 2013, Hangzhou, China.

4. 池田翔, 渡部心, Bisser Raytchev, 玉木徹, 金田和文: グローバルイルミネーション環境下における波動光学を考慮した多層薄膜による光学現象の表示, *Visual Computing/グラフィクスとCAD合同シンポジウム 2013*, 2013年6月22~23日, 青森市.

5. Shin Watanabe, Shota Kanamori, Sho Ikeda, Bisser Raytchev, Toru Tamaki, Kazufumi Kaneda: Performance Improvement of Physically Based Spectral Rendering Using Stochastic Sampling, *IAPR The Fourth Computational Color Imaging Workop (CCIW 2013)*, 2013年3月3~5日, Chiba University, Japan.

6. Michihiro Mikamo, Yusuke Tsuda, Bisser Raytchev, Toru Tamaki, Kazufumi Kaneda: An Efficient Method for Displaying Compressed HDR Spectral Images to RGB Display Monitors, *The Third International Conference on Networking and Computing (ICNC 2012)*, December 5-7, 2012, Okinawa, Japan.

7. 渡部心, Bisser Raytchev, 玉木徹, 金田和文: レギュラーサンプリング表現を用いたスペクトラルレンダリング, *画像電子学会ビジュアルコンピューティングワークショップ 2012*, 2012年11月4~5日, 仙台市.

8. 渡部心, 金森祥太, Bisser Raytchev, 玉木徹, 金田和文: スペクトルを考慮したフォトンマッピングの効率化, Visual Computing/グラフィクスとCAD 合同シンポジウム 2012, 2012年6月23~24日, 東京都.

9. Kazufumi Kaneda: Realistic Image Synthesis Considering Spectral Distribution of Light, China-Japan Symposium on Visual Computing (招待講演), September 17-19, 2011, Hunan University (Changsha, China).

10. 渡部心, 金森祥太, Bisser Raytchev, 玉木徹, 金田和文: スペクトルを考慮したフォトンマッピングの効率化に関する研究, 画像電子学会 第260回研究会, 2012年3月2日, 佐賀大学(佐賀市).

11. 津田悠佑, 金田和文, 玉木徹, Bisser Raytchev: スペクトルを考慮したハイダイナミックレンジ画像の保存と表示, 画像電子学会 第260回研究会, 2012年3月2日, 佐賀大学(佐賀市).

[その他]

ホームページ等

<http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/publications.php>

6. 研究組織

(1)研究代表者

金田 和文 (KAZUFUMI KANEDA)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30185946

(2)研究分担者

ライチェフ ビセル (BISSER RAYTCHEV)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：00531922