

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500094

研究課題名（和文） 超写実性光学表現のための表面下散乱モデルの構築

研究課題名（英文） Development of a rendering model of sub-surface scattering to visualize optical effects super-realistically

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

研究成果の概要（和文）：

従来の低いダイナミックレンジ画像(LDRI)での写実性を越えた、超写実性光学表現を可能とする表面下散乱モデルの構築とその表示手法を開発した。単散乱だけでなく2重散乱も考慮して表面下散乱現象をシミュレーションする手法を開発し、入射角や物質パラメータが変化したときの表面下放射照度分布を求めた。そして、その分布に基づいて表面下放射照度分布を精度よく補間し、ハイダイナミックレンジ画像(HDRI)として表示することにより写実性の高い表現を行う。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a rendering model for sub-surface scattering and a display method for super-realistic images beyond traditional low dynamic images (LDRI). A simulation method for sub-surface scattering considering not only single but also second order scattering is constructed, and sub-surface scattering irradiance distributions are calculated altering an incident angle and scattering parameters of materials. Based on the investigation, the irradiance distributions are accurately interpolated and are displayed realistically using a high dynamic range image (HDRI).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：情報工学

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：グラフィックス、フォトリアリスティックレンダリング、散乱現象

1. 研究開始当初の背景

コンピュータグラフィックス(CG)研究の大きな流れとしてフォトリアリスティックな表示手法の開発が挙げられる。写実性の高い画像を生成するアルゴリズムや手法の開発により、今日CGが映画やゲームな

どのエンタテインメント分野で必須の技術となっている。

写実性の高い画像を作成するためには、物質の質感をいかにして表現するかが重要となる。そのため、物質に光が当たったときの反射を表現する各種の反射モデルが開発

されてきている。2001年には Jensen らが表面下散乱モデルを開発し、人間の肌や大理石など光が物質内部に浸透する物質を極めてリアルに表示することに成功した。これにより、多くの研究者がさまざまな物質の写実的な表現を可能とする表面下散乱モデルの開発に着手した。

しかし、これまで開発されている表面下散乱モデルでは主観的な視覚的判断により経験に基づいてモデルを作成しているため、状況によっては現実とは異なる表示となってしまう。例えば、Jensen らは表面下での多重散乱による光を双極子光源を用いて近似するモデルを開発しているが、面への光の入射角度が大きくなると出射光の輝度最大点が入射点からずれ、さらに表面上の輝度分布も同心円状の分布から歪んでくることを表現することができない。

さらに表面下散乱モデルを構築する際には、設計パラメータが多く、それらが複雑に絡み合っている。すなわち、光の入射点、入射方向、出射点、出射方向に加え、物質の散乱・吸収係数や散乱位相関数なども設計パラメータとなり、物質係数が変化すると出射光の表面上での輝度分布も大きく変化する。

CGにおける従来の表示モデルは、RGB各8ビットの階調をもつディスプレイモニタに表示されることを前提としたものであった。しかし、人間が実物を直接見たときと比べると、ディスプレイモニタの階調やダイナミックレンジではリアリティに限界が生じる。表面下散乱現象は入射点から離れるにつれて輝度の微妙な変化をともなうため、従来の低いダイナミックレンジ画像ではその表現に限界が生じる。

本研究課題では、上記の問題点を解決し、従来の低いダイナミックレンジ画像での写実性を超えた、超写実性光学表現を可能とする表面下散乱モデルを構築することを目指す。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの経験に基づくモデル構築から脱却し、超写実性光学表現を可能とするために、表面下散乱数値シミュレーションにより表面下散乱現象の基礎データを取得する。その基礎データを解析することにより、設計パラメータの相互関係を明らかにし、表面下散乱モデルの設計指針を定める。そして、高ダイナミックレンジ画像を出力する表面下散乱モデル構築を行う。

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) 表面下散乱数値シミュレーション手法の開発：物質係数（散乱・吸収係数、位相関

数など）や光の入射角を変更したときの物質表面上での放射照度分布を算出し基礎データとするため、表面下散乱現象を精度よく高速にシミュレーションする手法を開発する。単散乱だけでなく多重散乱も取り扱うことができるように、物質を微小球ボリュームで離散化した計算モデルを新たに開発し、散乱シミュレーションに組み込む。

- (2) 表面下散乱モデルの設計指針の確立：表面下散乱モデルの設計指針を得るために、散乱現象に影響を与える物質係数と光の入射角を変えながら表面下散乱数値シミュレーションを行い、物質係数と表面上での放射照度との関係を調査する。また、実写により計測されたデータとの比較検討を併せて行い、得られた関係を用いて表面下散乱モデルを構築する際の指針を定める。次の点に着目して調査を行う。①単散乱光と多重散乱光の影響度、②放射照度分布形状、③放射照度のピーク位置

- (3) 表面下散乱モデルの構築・実装：前項で得られた設計指針に基づいてハイダイナミックレンジ画像を出力する表面下散乱モデルを構築しソフトウェア実装を行う。表面下散乱物質の表示を行い、精度や計算時間などに関して評価を行う。

本研究の独創的な点は、超写実性光学表現を実現するために、従来からの経験に基づく表示モデル構築から脱却し、数値シミュレーションから得られたデータに基づいて表面下散乱モデルを構築し、ハイダイナミックレンジ画像を出力するように実装を行うことである。

これにより、出力画像を単に表示するだけでなく、反射・屈折を生じる物体を環境マッピングにより表示する際の環境マップ画像や、イメージベーストラッキングのライトプローブ画像として利用することも可能となる。また、エンタテインメント分野での利用だけでなく、高い精度を必要とする工学・材料学等の幅広い分野での応用も期待できる。

3. 研究の方法

本研究は次の3つのフェーズで研究を進める。

- (フェーズ1) 表面下散乱数値シミュレーション手法の開発
- (フェーズ2) 表面下散乱モデル設計指針の確立
- (フェーズ3) 表面下散乱モデル構築と実装

フェーズ1の表面下散乱数値シミュレーション手法の開発では、散乱現象を精度よくシミュレーションできる手法を開発し、その実装を行う。散乱現象のシミュレーションには媒質空間をどのように離散化する

かが重要となる。そのため、媒質を微小球ボリュームで離散化した計算モデルを新たに開発し、単散乱シミュレーションが行えるようにソフトウェア実装する。さらに、多重散乱が取り扱えるように拡張を行う。多重散乱シミュレーションでは単散乱に比べてさらに計算パワーが必要となるため、高速化についても検討を行う。

フェーズ2では、物質係数（散乱・吸収係数や位相関数など）と光の入射方向を変化させ、表面上の放射照度分布を算出し、表面下散乱モデル設計指針を確立するための基礎データを収集する。それとあわせて、大理石などの表面下散乱を顕著に起す物質の写真撮影を行う。ダイナミックレンジの広い計測を実現するために、撮影の際にはシャッタースピードを変えて撮影を行い、得られた複数枚の画像からHDR画像を作成する。この実写HDR画像は、数値シミュレーションによって得られた基礎データとの比較や、表面下散乱モデル設計指針の検討、さらにフェーズ3で得られたCG画像の評価に用いる。

このようにして得られた基礎データと実写HDR画像から、①単散乱光と多重散乱光の影響度、②放射照度分布形状、③放射照度のピーク位置に着目して、設計パラメータである媒質係数と光の入射・出射の相互関係を明らかにする。そして各設計パラメータが射出光強度に与える影響を考慮して、表面下散乱モデルの基本的な設計指針を定める。次に表面下散乱モデルを具体的にどのように実装するかを踏み込んで、表面下散乱モデルの詳細設計を行う。

フェーズ3では、フェーズ2で得られた設計指針に基づいて表面下散乱モデルを、ソフトウェア実装する。画像出力の際には、高ダイナミックレンジ画像を出力できるように実装を行う。

構築した表面下散乱モデルを用いて、物質にさまざまな条件で光を照射したときの画像を作成し、構築したモデルの評価を行う。評価の際には、精度と計算時間に関して総合的に評価を行う。

作成したハイダイナミックレンジ画像を通常の輝度幅の狭いディスプレイにリアルに表示することも重要になってくる。本研究ではさらに、表面下散乱現象などで生じる光の滲みなど薄暗い環境下における現実感ある表示手法の開発を行う。

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纏める。

- (1) 表面下散乱数値シミュレーション手法の開発：表面下散乱現象を高精度にシミュレーションする手法を開発した。新たに開

発した手法では、物質を微小球ボリュームで離散化し、単散乱だけでなく2重散乱も考慮して散乱現象をシミュレーションすることができる（図1参照）。

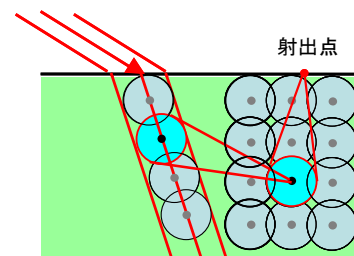
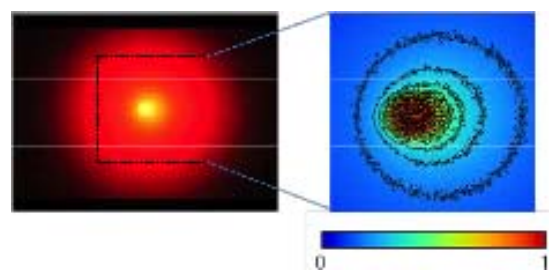


図1: 微小球ボリュームによる空間の離散化による表面下散乱シミュレーション

- (2) HDR画像の記録方式の開発：高精度散乱シミュレーション結果の記録のために、HDR分光分布情報をコンパクトに記録する方法の開発を行った。本記録方式では、異なる基底関数を併用した正規直交基底変換を用いて寄与の小さい係数を削減することでコンパクトにデータを保存する。表示の際はトーンマッピング手法を用いることにより幅広い輝度を再現して表示することができる（学会発表3参照）。
- (3) 表面下散乱現象の実写画像取得実験：半透明アクリル板や大理石などの表面下散乱が顕著な物質の撮影を行った。ダイナミックレンジの広い計測を実現するために、撮影の際にシャッタースピードを変えて撮影を行い、得られた複数枚の画像からHDR画像を作成した（図2参照）。これにより、シミュレーション結果との比較を行い、表面下散乱による輝度分布の定性的な整合性を確認できた。



(a) 実写画像 (b) 疑似カラー表示
図2: 入射角45°における半透明アクリル板表面の輝度分布

- (4) 表面下散乱数値シミュレーションと表面下散乱現象の実写画像との比較検討：表面下散乱現象の実写画像取得をさらに高精度化をはかり、光線の入射角度を変えたときの表面下散乱による輝度ピーク位置の移動量や輝度分布形状の変化などを計測した。そして、本研究課題で開発した表面下散乱数値シミュレーションの結果との定性的ならびに定量的な比較・検討を行った（図3、図4参照）。

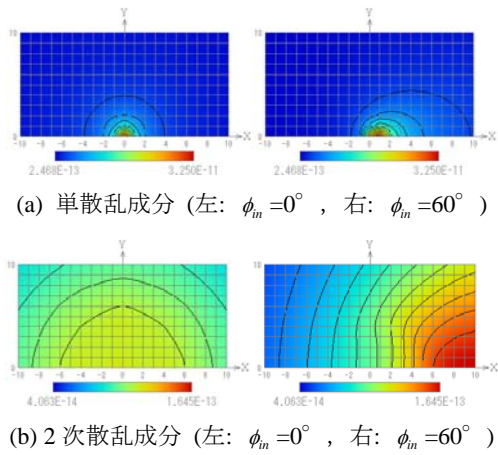


図 3: 入射角変化時の放射照度分布

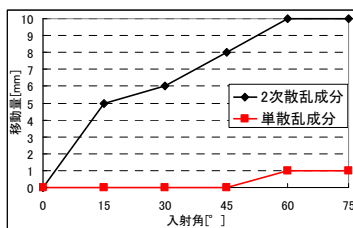


図 4: 入射角変化時の輝度ピーク点の移動量

(5) 表面下散乱表示モデルの開発：表面下散乱数値シミュレーションより得られた光線の入射角や物質パラメータの異なる 2 つの表面下放射照度分布から、それらの中間のパラメータ値における表面下放射照度分布を補間によって求める手法を新たに開発した。物質表面上の位置に基づいて放射照度値を補間するのではなく、光線入射点の上部に設置した仮想光源位置に基づくパラメータ空間に再パラメータ化して補間することにより、HDR 画像表現に利用可能となる高精度な放射照度値を算出することができる (図 5 参照)。この手法を用いることにより高速表示に適した表面下散乱表示モデルを構築することが可能である (学会発表 2 参照)。

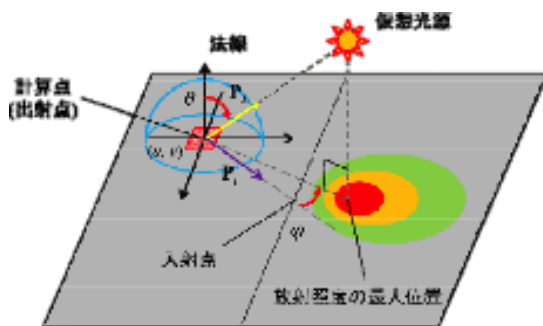
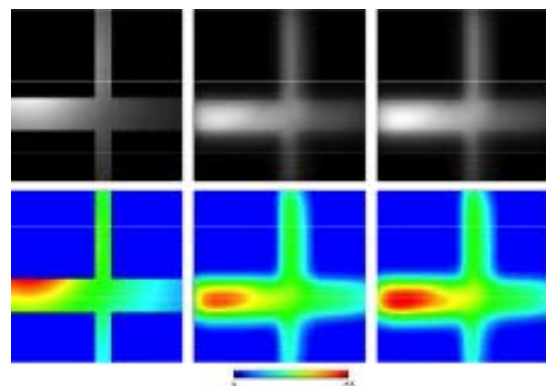
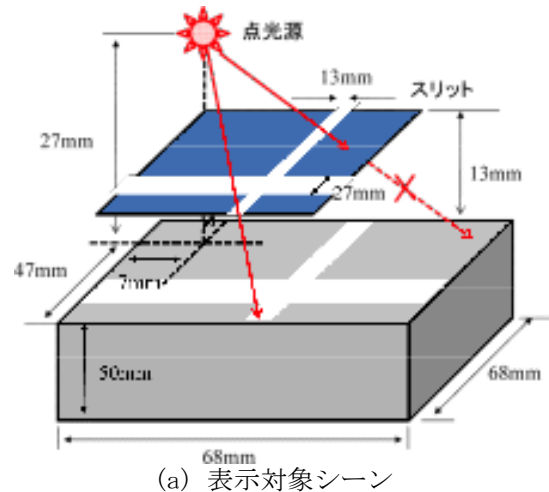


図 5: 表面下散乱表示モデルの概念図

(6) 表面下散乱表示モデルの開発と実装：光線の入射角や物質パラメータを変化させてシミュレーションを行った表面下放射照度分布から、それらの中間のパラメータ値における表面下放射照度分布を補間によって求める手法を開発し半透明物質をレンダリングするソフトウェアとして実装した。そして遮蔽物体を通して差し込んだ光が半透明物質に入射したときのシーンを作成し、手法の有用性を検証した (図 6 参照)。さらに、細かいビーム状の光線だけでなくビームを束ねた光線によって照射された半透明物質の表示が行えるように改良を行い、高速表示に適した表面下散乱表示モデルの構築を行った (学会発表 1 参照)。



(b) 表示結果 (表面反射, 単散乱, 2重散乱)
図 6: 表面下散乱表示モデルによる画像例

(7) 現実感ある表示手法の開発：表面下散乱現象は物質表面での光のしみ出しを生じ、直接光が当たらない領域でも薄暗くほのかな明るさが知覚される。生成画像を表示する際にもこのような効果を人間の知覚を考慮して表示する必要がある。そのため、薄暗い環境下での人間の視覚特性を考慮した現実感を再現する表示手法 (トーンリプロダクション手法) について併せて研究開発を行った (雑誌論文 1 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1件)

1. 三嶋道弘, Marcos Slomp, 玉木徹, 金田和文: “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” 映像情報メディア学会誌, 査読有, Vol.64, No.9, 2010, pp.1372-1378.

[学会発表] (計3件)

1. 古月綾香, 高村幸平, 眞鍋知久, 玉木徹, 金田和文: “表面下放射照度分布に基づいた半透明物質の表示モデル” Visual Computing/グラフィクスとCAD 合同シンポジウム, 2011.06.25-26, 松江市, No.26, pp.1-8.
2. 高村幸平, 眞鍋知久, 玉木徹, 金田和文: “表面下散乱シミュレーションと放射照度分布特性を考慮した表示モデル” 電子情報通信学会技術報告パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2009-77), 2009.10.22, 東広島市, Vol.109, No.249, pp.37-42.
3. 島田洋輔, 金田和文, 玉木徹: “異なる基底関数の併用によるハイダイナミックレンジ分光分布画像の記録” 画像電子学会 第243回研究会, 2009.03.06, 鹿児島市, 講演予稿 08-05-26, pp.147-153.

[図書]

[産業財産権]

[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

玉木 徹 (TORU TAMAKI)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 10333494

(3) 連携研究者