

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-39455

(P2021-39455A)

(43) 公開日 令和3年3月11日(2021.3.11)

(51) Int.Cl.
G06T 15/08 (2011.01)F I
G06T 15/08テーマコード (参考)
5B080

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2019-159051 (P2019-159051)	(71) 出願人	899000068
(22) 出願日	令和1年8月30日 (2019.8.30)		学校法人早稲田大学
			東京都新宿区戸塚町1丁目104番地
		(74) 代理人	110002675
			特許業務法人ドライト国際特許事務所
		(72) 発明者	久家 隆宏
			東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学
			校法人早稲田大学内
		(72) 発明者	谷田川 達也
			東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学
			校法人早稲田大学内
		(72) 発明者	森島 繁生
			東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学
			校法人早稲田大学内
		Fターム(参考)	5B080 AA17 FA02

最終頁に続く

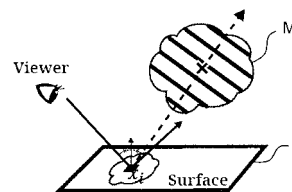
(54) 【発明の名称】 画像レンダリング方法、画像レンダリングシステム及びプログラム

(57) 【要約】

【課題】非均一な関与媒質が別の物体に映り込む現象を実時間で表現することができる画像レンダリング方法、画像レンダリングシステム及びプログラムを提供する。

【解決手段】非均一の関与媒質Mが別の物体の表面Fに反射して見える映り込みを計算装置による演算によって表現する画像レンダリング方法では、関与媒質Mを囲む立体的領域を、別の物体の表面F上の反射点 x_i を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、複数の面光源のそれぞれから減衰しながら反射点 x_i に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求める。一次元の積分では、複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、反射点 x_i における光の強さを求める。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

非均一の関与媒質が別の物体の表面に反射して見える映り込みを計算装置による演算によって表現する画像レンダリング方法であって、

前記関与媒質を囲む立体的領域を、前記別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、前記複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、前記複数の面光源のそれぞれから減衰しながら前記反射点に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求め、

前記一次元の積分では、前記複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、前記反射点における光の強さを求める、画像レンダリング方法。

10

【請求項 2】

前記立体的領域を、前記反射点と前記立体的領域の重心とを通る直線に垂直な方向にスライスして前記複数の切断面を取得する、請求項 1 に記載の画像レンダリング方法。

【請求項 3】

前記一次元の積分の被積分関数は、前記パラメータによって光の強さを表す第 1 関数と、前記パラメータによって光の減衰を表す第 2 関数との積で表される、請求項 1 又は 2 に記載の画像レンダリング方法。

【請求項 4】

前記第 2 関数は、前記複数の面光源の各々からの光の減衰を、特定方向に相対的に強く重み付けをすることによって表される、請求項 3 に記載の画像レンダリング方法。

20

【請求項 5】

前記一次元の積分では、前記隣接する面光源の間の領域ごとに、前記第 1 関数と前記第 2 関数とを別々に離散化する、請求項 3 又は 4 に記載の画像レンダリング方法。

【請求項 6】

非均一の関与媒質が別の物体の表面に反射して見える映り込みを表現する画像レンダリングシステムであって、

前記関与媒質を囲む立体的領域を、前記別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、前記複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、前記複数の面光源のそれぞれから減衰しながら前記反射点に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求め、

30

前記一次元の積分では、前記複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、前記反射点における光の強さを求める計算装置を備える、画像レンダリングシステム。

【請求項 7】

非均一の関与媒質が別の物体の表面に反射して見える映り込みを表現する画像レンダリング方法をコンピュータに実行させるプログラムであって、

前記関与媒質を囲む立体的領域を、前記別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、前記複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、前記複数の面光源のそれぞれから減衰しながら前記反射点に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求め、

40

前記一次元の積分では、前記複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、前記反射点における光の強さを求める処理を前記コンピュータに実行させる、プログラム。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、画像レンダリング方法、画像レンダリングシステム及びプログラムに関する

。

50

【背景技術】

【0002】

煙、炎、雲等の非均一な関与媒質 (participating medium) を含むシーンの画像レンダリングには、光の放射、吸収、散乱等の複雑な現象をシミュレーションする必要がある。近年、このような関与媒質を実時間で画像レンダリングする様々な方法が提案されている (例えば、非特許文献 1、非特許文献 2 及び非特許文献 3 参照)。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】Zhou, Kun, Ren, Zhong, Lin, Stephen, et al. "Real-time Smoke Rendering Using Compensated Ray Marching". ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 27. 3. ACM. 2008, 36. 10

【非特許文献 2】Matthias Raab, "Ray Tracing Inhomogeneous Volumes" Ray Tracing GEMS, Apress, 2019, Chapter 28, pp. 521-531.

【非特許文献 3】Heitz, Eric, Dupuy, Jonathan, Hill, Stephen, and Neubelt, David. "Real-time Polygonal-Light Shading with Linearly Transformed Cosines". ACM Transactions on Graphics (TOG) 35.4 (2016), 41.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

非均一な関与媒質の実時間での画像レンダリングに関する従来の研究のほとんどは、観察者 (カメラ) が直接見ることができる関与媒質自体の画像レンダリングに関するものであり (例えば、非特許文献 1 参照)、関与媒質が、床、水面等の別の物体に反射して見える映り込み (間接照明) を表現するのは、計算量の観点から困難であった。また、一般的な関与媒質を表現することができる方法は提案されてはいるが (例えば、非特許文献 2 参照)、高価なハードウェアを用いても、フレームレートが低いという問題がある。 20

【0005】

非特許文献 3 に開示された技術は、二次元的な面光源からの寄与を計算する手法であり、三次元的な関与媒質を扱うことはできない。三次元的な関与媒質の映り込みを正確に表現するためには、関与媒質の体積全体からの放射光が映り込み点にどれだけ入射するかを計算する必要がある。しかしながら、この計算は、関与媒質の体積内での光の複雑な振る舞いを扱う必要があるため、実時間で評価するのは困難である。 30

【0006】

本発明は、上記課題に鑑みてなされたものであり、非均一な関与媒質が別の物体に映り込む現象を実時間で表現することができる画像レンダリング方法、画像レンダリングシステム及びプログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の実施形態に係る画像レンダリング方法は、非均一の関与媒質が別の物体の表面に反射して見える映り込みを計算装置による演算によって表現する画像レンダリング方法であって、関与媒質を囲む立体的領域を、別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、複数の面光源のそれぞれから減衰しながら反射点に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求める。一次元の積分では、複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、反射点における光の強さを求める。 40

【0008】

本発明の実施形態に係る画像レンダリングシステムは、非均一の関与媒質が別の物体の表面に反射して見える映り込みを表現する画像レンダリングシステムであって、関与媒質を囲む立体的領域を、別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスし 50

て複数の切断面を取得し、複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、複数の面光源のそれぞれから減衰しながら反射点に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求め、一次元の積分では、複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、反射点における光の強さを求める計算装置を備える。

【 0 0 0 9 】

本発明の実施形態に係るプログラムは、非均一の関与媒質が別の物体の表面に反射して見える映り込みを表現する画像レンダリング方法をコンピュータに実行させるプログラムであって、関与媒質を囲む立体的領域を、別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、複数の面光源のそれぞれから減衰しながら反射点に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求め、一次元の積分では、複数の面光源において隣接する面光源の間の各領域から受ける光の強さを加算することで、反射点における光の強さを求める処理をコンピュータに実行させる。

10

【 発明の効果 】

【 0 0 1 0 】

本発明によれば、関与媒質を囲む立体的領域を別の物体の表面上の反射点を通る直線に交差する方向にスライスし、得られる複数の切断面のそれぞれを面光源とみなし、それぞれの面光源から反射点への光の影響を光線経路上のパラメータによる一次元の積分によって求めた。これにより、関与媒質から反射点への光の影響を高速に計算することができ、関与媒質の映り込みを実時間で表現することができる。

20

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 1 】

【 図 1 】 関与媒質の映り込みを表現する従来の画像レンダリング方法の一例を説明する模式図である。

【 図 2 】 本実施形態の画像レンダリング方法の概要を説明する模式図である。

【 図 3 】 本実施形態の画像レンダリングシステムのハードウェア構成を示すブロック図である。

【 図 4 】 関与媒質をスライスする方向を説明する模式図である。

【 図 5 】 本実施形態で用いる表記を示す模式図である。

30

【 図 6 A 】 平均消散係数を求める方法を説明するための模式図である。

【 図 6 B 】 消散係数の単純平均をとったモデルを説明するための模式図である。

【 図 6 C 】 消散係数に重み付けをしたモデルを説明するための模式図である。

【 図 7 】 従来の求積法と本実施形態の求積法とを比較する模式図である。

【 図 8 】 関与媒質を囲む軸平行境界ボックスで規定される立体的領域をスライスするときの問題点を説明する模式図である。

【 図 9 】 関与媒質を囲む立体的領域の変換を説明する模式図である。

【 図 1 0 】 本実施形態の画像レンダリング方法によって表現された関与媒質の映り込みの画像の一例である。

【 図 1 1 】 本実施形態の画像レンダリング方法を実行したときの計算時間の内訳の一例を示す表である。

40

【 図 1 2 】 スライスの数による計算時間の違いの一例を示す表である。

【 図 1 3 】 平均消散係数ごとに面光源からの光の寄与（被積分関数）の一例を示すグラフである。

【 図 1 4 】 図 1 3 に示した平均消散係数ごとに求積法の精度を比較した結果を示すグラフである。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 2 】

以下、図面を参照して本発明の実施形態について説明する。図面全体を通して、同一又は同様の要素には同一の符号を付している。

50

【 0 0 1 3 】

本実施形態において対象とする非均一の関与媒質には、自己発光するもの（炎など）と、太陽光等の光源からの光を受けて光るもの（雲など）があるが、後者の関与媒質も自己発光する媒質として扱う。また、以下では、対象とする非均一の関与媒質を単に「媒質」と呼ぶ。

【 0 0 1 4 】

発光している媒質 M が別の物体の表面 F に反射して見える映り込みを表現する方法の一つとして、図 1 に示すように、媒質 M を仮想点光源（virtual point lights: V P L s）の集まりとして近似し、各仮想点光源からの光の寄与を体積積分によって求めることが考えられる。しかしながら、媒質 M の体積全体にわたって個々の仮想点光源からの光の寄与を加算するのは、計算に膨大な時間を要するため、実時間での画像レンダリングには適していない。

10

【 0 0 1 5 】

そこで、本実施形態の画像レンダリング方法では、図 2 に示すように、自己発光する媒質 M を囲む立体的領域を、表面 F 上の反射点 x_i を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面を取得し、複数の切断面のそれぞれを、Layered Polygonal Area Lights (L P A L s) と呼ばれる仮想的な面光源とみなす。各面光源から減衰しながら反射点 x_i に到達する光の強さを評価するために、隣接する 2 つの面光源に挟まれた領域において減衰する光の強さを解析的に評価し、各領域からの光の強さを加算する。

20

【 0 0 1 6 】

< ハードウェア構成 >

次に、本実施形態の画像レンダリング方法を実現するシステムのハードウェア構成について説明する。

【 0 0 1 7 】

図 3 に、本実施形態の画像レンダリングシステム 1 0 0 の構成を示す。画像レンダリングシステム 1 0 0 は、制御装置 1 1 と、計算装置 1 2 と、ディスプレイ 1 3 と、記憶装置 1 4 と、メインメモリ 1 5 と、通信インターフェース 1 6 と、入力装置 1 7 とを備える。制御装置 1 1、記憶装置 1 4、メインメモリ 1 5、通信インターフェース 1 6 及び入力装置 1 7 は、マザーボード上のバスを介して相互に接続されている。計算装置 1 2 は、マザーボードの拡張スロットに接続され、ディスプレイ 1 3 は計算装置 1 2 に接続されている。

30

【 0 0 1 8 】

制御装置 1 1 は、Central Processing Unit (C P U) を有し、記憶装置 1 4 に格納されたプログラムに従って、各種の処理を実行する。本実施形態において制御装置 1 1 は、記憶装置 1 4 に格納された画像データ（媒質 M のシミュレーションデータ）を読み込んで計算装置 1 2 に転送し、本実施形態の画像レンダリング方法に対応する計算処理（後述）を計算装置 1 2 に実行させる。

【 0 0 1 9 】

計算装置 1 2 は、Graphics Processing Unit (G P U) を搭載したグラフィックカードによって構成される。計算装置 1 2 は、モニタ端子を有し、モニタ端子にディスプレイ 1 3 が接続可能である。計算装置 1 2 は、制御装置 1 1 の制御の下で、本実施形態の画像レンダリング方法に対応する計算処理（後述）を実行し、計算処理結果を表す信号をディスプレイ 1 3 に出力する。

40

【 0 0 2 0 】

ディスプレイ 1 3 は、液晶ディスプレイ (L C D)、プラズマディスプレイ、又は有機エレクトロ・ルミネッセンス (E L) ディスプレイ等のディスプレイである。ディスプレイ 1 3 として、卓上型ディスプレイ、タブレット端末、スマートフォン、及びヘッドマウントディスプレイ (H M D) 等の種々の型のディスプレイが採用可能である。ディスプレイ 1 3 は、計算装置 1 2 のモニタ端子に接続され、計算装置 1 2 から出力された信号に基づいて計算処理結果を表示する。

50

【 0 0 2 1 】

記憶装置 1 4 は、不揮発性メモリであり、制御装置 1 1 及び計算装置 1 2 によって実行される各種のプログラム及びこれらのプログラムの実行時に必要なデータを格納している。

【 0 0 2 2 】

メインメモリ 1 5 は、揮発性メモリであり、記憶装置 1 4 に格納されたプログラム及びデータは、メインメモリ 1 5 にロードされて実行される。

【 0 0 2 3 】

なお、制御装置 1 1 及び計算装置 1 2 によって実行されるプログラム及びこれらのプログラムの実行時に必要なデータは、画像レンダリングシステム 1 0 0 に着脱可能で、且つコンピュータが読み取り可能なメモリカード等の記録媒体に格納してもよいし、通信インターフェース 1 6 を介してネットワークから受信するようにしてもよい。

【 0 0 2 4 】

通信インターフェース 1 6 は、Local Area Network (L A N)、Wide Area Network (W A N)、インターネット等のネットワークを介して外部機器との間でデータの送受信を行うためのインターフェースである。

【 0 0 2 5 】

入力装置 1 7 は、キーボード、マウス、タッチパネル等の入力デバイスであり、ユーザによる操作入力を受け付ける。

【 0 0 2 6 】

なお、C P U、G P U等の汎用ハードウェアの代わりに、本実施形態の画像レンダリング方法の実現に特化した、Application Specific Integrated Circuit (A S I C) 又はField Programmable Gate Array (F P G A) 等の専用ハードウェアを採用してもよい。

【 0 0 2 7 】

< 画像レンダリング方法 >

次に、図 4 ~ 図 9 を参照して、本実施形態の画像レンダリング方法を詳細に説明する。

【 0 0 2 8 】

まず、図 4 を参照して、媒質 M をスライスする方向について説明する。

複数の切断面（複数の面光源）を取得するために、媒質 M をスライスする方向は原則として任意である。しかしながら、スライスする方向によっては、媒質 M が表面 F に映り込む現象を適切に表現することができないことがあるため、スライスする方向を適切に選択することが好ましい。

【 0 0 2 9 】

図 4 の R - R R 1 及び R - R R 2 には、媒質 M を後述の反射方向 r に垂直な方向にスライスした例を示し、図 4 の R - G C 1 及び R - G C 2 には、表面 F 上の反射点 x_i と媒質 M の重心 G C （後述の領域 V の重心）とを結ぶ直線方向 c に垂直な方向にスライスした例を示している。ここで、反射方向 r は、観察者（Viewer）から反射点 x_i への視線（光線）が表面 F 上で正反射する方向を示している。R - R R 1 及び R - G C 1 は、反射点 x_i からの反射光線が媒質 M の内部を通過する場合を示し、R - R R 2 及び R - G C 2 は、反射点 x_i からの反射光線が媒質 M から離れている場合を示している。

【 0 0 3 0 】

R - R R 1 に示すように、反射光線が媒質 M の内部を通過する場合、媒質 M の切断面（面光源）が表面 F 上の反射点 x_i の方向を向いていることから、各面光源から反射点 x_i への光の寄与は適切に計算され得る。一方、R - R R 2 に示すように、反射光線が媒質 M から離れている場合、媒質 M の切断面（面光源）が反射点 x_i の方向を向いていないため、各面光源から反射点 x_i への光の寄与は適切に計算されない。

【 0 0 3 1 】

これに対し、R - G C 1 及び R - G C 2 のように、媒質 M を、反射点 x_i と重心 G C とを結ぶ直線方向 c に垂直な方向にスライスすると、反射方向 r にかかわらず、媒質 M の切断面（面光源）が常に表面 F 上の反射点 x_i の方向を向いていることから、各面光源

10

20

30

40

50

からの光の寄与は適切に計算され得る。したがって、本実施形態では、媒質 M を方向 c に垂直な方向にスライスするものとする。

【 0 0 3 2 】

本実施形態で用いる表記を、既出のものも含めて以下に定義する。これらの表記の一部は図 5 に示されている：

V：媒質 M を囲む軸平行境界ボックス（Axis-Aligned Bounding Box：A A B B）で規定される立体的領域（domain）；

G C：領域 V の重心；

c ：表面 F 上の反射点 x_i と重心 G C とを結ぶ直線方向を表す単位ベクトル；

p ：領域 V 内の任意の点（ $p \in V$ ）；

s：方向 c における反射点 x_i と媒質 M の切断面との間の距離を表すパラメータ；

A (s)：反射点 x_i から方向 c に距離 s の位置にある切断面；

i ：反射点 x_i から点 p に向かう方向を表す単位ベクトル... $i = (p - x_i) / \|p - x_i\|$ ；

$l_i(s)$ ：反射点 x_i を通る方向 c の直線と切断面 A (s) との交点... $l_i(s) = x_i + s \cdot c$ ；

x_e ：観測者（Viewer）であるカメラの中心位置；

o ：反射点 x_i からカメラ中心 x_e に向かう方向を表す単位ベクトル... $o = (x_e - x_i) / \|x_e - x_i\|$ ；

$n(x_i)$ ：表面 F 上の反射点 x_i での単位法線ベクトル。

【 0 0 3 3 】

また、本明細書の数式中においてオーバーラインが付された文字（後述の T_r 、 t 、 L など）は、本明細書の本文中ではオーバーラインを付さずに表記する。さらに、図面では、表面 F が平坦であるものとして描画されているが、表面 F が凹凸を有するものであってもよい。

【 0 0 3 4 】

媒質 M から表面 F 上の反射点 x_i への光の寄与は、領域 V 内の任意の点 p からの寄与を積分することで得られるが、本実施形態では、切断面 A (s) を面光源とみなし、切断面 A (s) 上の任意の点 p からの寄与を足し上げることで、面光源としての切断面 A (s) からの光の強さとして放射輝度（radiance）を求める。なお、観測者（Viewer）と反射点 x_i との位置関係は任意に設定され得る。以下、切断面を単に「面」と呼ぶことがある。面 A (s) から反射点 x_i を経てカメラ中心 x_e に入る光線の放射輝度 $L(A(s) \rightarrow x_i \rightarrow x_e)$ は、式（1）のように定義される。

【 数 1 】

$$L(A(s) \rightarrow x_i \rightarrow x_e) \triangleq \int_{A(s)} L(v \rightarrow x_i \rightarrow x_e) dv. \quad (1)$$

【 0 0 3 5 】

式（1）の右辺の被積分関数 $L(p \rightarrow x_i \rightarrow x_e)$ は、式（2）のように定義される。

【 数 2 】

$$L(v \rightarrow x_i \rightarrow x_e) \triangleq \frac{I(v, -\omega_i)}{\|v - x_i\|^2} T_r(v \rightarrow x_i) f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)|, \quad (2)$$

ここで、 $I(v, -\omega_i)$ は、点 p から $-\omega_i$ 方向への放射強度（radiant intensity）を表し、 $T_r(p \rightarrow x_i)$ は、点 p から反射点 x_i への透過率（transmittance）を表し、 $f_r(x_i; \omega_i, \omega_o)$ は、反射点 x_i での双方向反射率分布関数（Bidirectional Reflectance Distribution Function：BRDF）を表している。式（2）では、点 p から放

10

20

30

40

50

射された光線が、散乱により進行方向を変えることなく反射点 x_i に届くと仮定している。

【 0 0 3 6 】

式 (1) において、面 $A (s)$ 上の点 x_i によって光線経路 (x_i) が異なるため、放射輝度の減衰は経路によって異なる。しかしながら、経路が異なっているとしても、減衰係数 (attenuation factor) がほぼ同等であれば、減衰係数を平均値で近似することができる。式 (1) は、平均減衰係数 $T_r (s)$ を用いて式 (3) のように近似することができる。

【 数 3 】

$$\begin{aligned} L(A(s) \rightarrow x_i \rightarrow x_e) \\ &= \int_{A(s)} \frac{I(v, -\omega_i)}{\|v - x_i\|^2} T_r(v \rightarrow x_i) f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| dv \\ &\approx \bar{T}_r(v_{//}(s) \rightarrow x_i) \int_{A(s)} \frac{I(v, -\omega_i)}{\|v - x_i\|^2} f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| dv \\ &\triangleq \bar{T}_r(s) L(s) \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) において、平均減衰係数 $T_r (s)$ は、面 $A (s)$ 上の異なる点からの放射輝度の平均減衰を表している。このように、面 $A (s)$ からの寄与は、放射輝度 $L (s)$ (第 1 関数) と平均減衰係数 $T_r (s)$ (第 2 関数) との積で表される。

【 0 0 3 7 】

したがって、反射点 x_i から ω_o 方向への全放射輝度 $L (x_i, \omega_o)$ は、放射輝度 $L (s)$ と平均減衰係数 $T_r (s)$ との積を被積分関数として、式 (4) のように近似することができる。

【 数 4 】

$$L(x_i, \omega_o) \approx \int_0^\infty \bar{T}_r(s) L(s) ds. \quad (4)$$

【 0 0 3 8 】

式 (4) の放射輝度 $L (s)$ は、面光源としての面 $A (s)$ からの全ての光の寄与を表している。放射輝度 $L (s)$ を計算する手法は様々あるが、例えば、非特許文献 3 に開示された手法を用いることができる。非特許文献 3 に開示された linearly transformed cosine (L T C) の手法を用いると、放射輝度 $L (s)$ は式 (5) のように表すことができる。

【 数 5 】

$$\begin{aligned} L(s) &= \int_{A(s)} L(\omega_i) f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| d\omega_i \approx I_D I_L, \quad (5) \\ I_D &= \int_{A(s)} f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| d\omega_i, \\ I_L &= \frac{\int_{A(s)} L(\omega_i) f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| d\omega_i}{\int_{A(s)} f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| d\omega_i}. \end{aligned}$$

ここで、面積分 I_D は、BRDF のローブ (lobe) の形状によって決まる clamped cosine space と呼ばれる半球空間で計算される。この半球空間への変換は、 3×3 行列の線形変換によって表される。 I_L は、単純な画像フィルタリングと同様の形をとっている。こ

10

20

30

40

50

で、BRDFのローブとは、入射方向(-)を固定したときに得られる $f_r(x_i; i, o)$ の確率密度分布を、 i を変数とする二次元の関数として表したものである。

【0039】

式(4)の平均減衰係数 $T_r(s)$ は、平均消散係数(average extinction coefficient) $\bar{\sigma}_t$ を用いて、式(6)のように近似することができる。

【数6】

$$\bar{T}_r(s) \approx e^{-\int_0^s \bar{\sigma}_t(u) du}. \quad (6)$$

10

【0040】

式(6)に示すように、平均減衰係数 $T_r(s)$ は、平均消散係数 $\bar{\sigma}_t$ を方向 c のパラメータ u で積分区間 $[0, s]$ にわたって積分したものを u を変数とした指数関数で表される。式(6)の平均消散係数 $\bar{\sigma}_t$ を求める最も簡単な方法は、面光源にわたって消散係数の平均をとることである。しかしながら、単純に平均値を求めるだけでは、密度や反射率等が均一ではない媒質からの光の減衰を適切に表現することができない。煙、炎、雲等の現実の媒質は、場所によって密度等が異なる。

【0041】

そこで、本実施形態では、表面F上のBRDFのローブの形状を利用して、面光源にわたる積分において特定方向に強く重み付けをする。具体的には、式(7)に示すように、面 $A(s_k)$ での積分において反射方向 r に相対的に強く重みをつけて平均消散係数 $\bar{\sigma}_t(s_k)$ を求める。

20

【数7】

$$\bar{\sigma}_t(s_k) \approx \int_{A(s_k)} \sigma_t(\omega_i) f_r(x_i; \omega_i, \omega_o) |\omega_i \cdot n(x_i)| d\omega_i. \quad (7)$$

【0042】

図6A～図6Cを参照し、内側全体が空洞CVである媒質M2を例に挙げて、平均消散係数の演算方法の違いによる影響について説明する。ここでは、簡単のため、図6Aに示すように、反射方向 r と方向 c (図5参照)とを同一とし、面 $A(s_k)$ が反射方向 r に直交するものとしている。図6Bに、面 $A(s_k)$ (面光源)にわたって消散係数 $\sigma_t(i)$ の単純平均をとったモデル1の模式図を示し、図6Cに、式(7)のように消散係数 $\sigma_t(i)$ に重み付けをしたモデル2の模式図を示す。

30

【0043】

BRDFのローブ120は、反射方向 r 及びその近傍領域に分布し、カメラ(Viewer)と反射点 x_i とを結ぶ方向(-)で入射した光が、表面粗さを含む表面Fで反射された際の反射方向の密度分布に対応する。図6B及び図6Cのそれぞれにおいて、ローブ120と直交する楕円領域130及び140が、消散係数 $\sigma_t(i)$ を積分する面 $A(s_k)$ に対応している。図6Bのモデル1では、楕円領域130全体にわたって消散係数 $\sigma_t(i)$ が均一に重み付けられる。一方、図6Cのモデル2では、楕円領域140のうち、ローブ120に近い領域141に大きな重みを与えられており、領域141の外側の領域142の重みは、領域141よりも小さく、領域142の外側の領域143の重みは、領域142よりも小さい。

40

【0044】

表面Fで反射した媒質M2をカメラから見るとき、反射方向 r にある光源110から反射点 x_i に向かう光は、空洞CVでは減衰されず、媒質M2のうち、ローブ120と重なる領域M21及びM22において微量な減衰を受け、比較的明るい色として認識されるのが正しい。

【0045】

しかしながら、図6Bに示すモデル1のように、面 $A(s_k)$ 上で消散係数 $\sigma_t(i)$

50

）が均一に重み付けられる場合、媒質 M 2 のうち、楕円領域 1 3 0 と重なる領域 M 2 3 及び M 2 4 の消散係数 $\mu_t(\mathbf{x}_i)$ を不適切に積分してしまうため、本来、光の減衰が起こらない空洞 C V においても光が減衰するという、誤った演算を実行してしまう。その結果、カメラで認識される映り込みの色が過度に暗く見積もられる。

【 0 0 4 6 】

一方、図 6 C に示すモデル 2 では、ローブ 1 2 0 に近い領域 1 4 1 に大きな重みが与えられ、媒質 M 2 のうち、楕円領域 1 4 0 と重なる領域 M 2 3 及び M 2 4 の消散係数 $\mu_t(\mathbf{x}_i)$ の影響が相対的に小さくなるため、空洞 C V を正しく反映した平均消散係数 $\mu_t(\mathbf{s}_k)$ を求めることができる。その結果、カメラにおいて、比較的明るい色が適切に見積もられる。

10

【 0 0 4 7 】

次に、式 (4) の全放射輝度 $L(\mathbf{x}_i, \theta_i)$ を計算する方法を説明する。

式 (4) の積分を計算するために、媒質 M を囲む領域 V を無限に細かくスライスして、無限個の面光源からの寄与を全て計算するのは不可能である。そこで、領域 V を方向 \mathbf{c} に垂直な方向にスライスして有限個の面光源からの寄与を計算することで、式 (4) の積分を離散的に扱う。

【 0 0 4 8 】

積分を離散的に計算する方法として、ニュートン・コーツの公式 (Newton-Cotes formulae) が知られている。ニュートン・コーツの公式では、積分区間を等間隔に分割し、各分割区間での関数を多項式で近似する。被積分関数を $g(y)$ 、積分区間を $[a, b]$ とすると、m 次のニュートン・コーツの公式は、式 (8) のように与えられる。

20

【数 8】

$$\int_a^b g(y) dy \approx \sum_{j=0}^m w_j g(y_j), \quad (8)$$

ここで、 y_j は、積分区間 $[a, b]$ での j 番目のサンプル点であり、 w_j は、j 番目のサンプル点での重みである。

【 0 0 4 9 】

1 次及び 2 次のニュートン・コーツの公式は、それぞれ、台形則 (trapezoid rule) 及びシンプソン則 (Simpson ' s rule) と呼ばれ、式 (9) のように表される。

30

【数 9】

$$\int_a^b g(y) dy \approx \begin{cases} \frac{b-a}{2} (g(a) + g(b)) & \cdots (\text{trapezoid rule}) \\ \frac{b-a}{6} \left(g(a) + 4g\left(\frac{a+b}{2}\right) + g(b) \right) & \cdots (\text{Simpson's rule}) \end{cases} \quad (9)$$

【 0 0 5 0 】

式 (4) の被積分関数は、平均減衰係数 $T_r(\mathbf{s})$ と放射輝度 $L(\mathbf{s})$ との積であるが、平均減衰係数 $T_r(\mathbf{s})$ 及び放射輝度 $L(\mathbf{s})$ 自体が、式 (5) ~ 式 (7) に示すように、複雑な計算を含んでいるため、計算に時間がかかるとともに、多大な計算コストがかかる。そこで、台形則を用いて式 (4) の積分を実行すると、積分区間内で線形近似しているため、計算速度は速いが、精度が低い。一方、シンプソン則を用いて式 (4) の積分を実行すると、計算の精度は高いものの、計算に時間がかかるため、フレームレートが減少してしまうという観点から、実時間レンダリングには不適切である。

40

【 0 0 5 1 】

これらの課題を解決するため、本実施形態では、以下に示すように、平均減衰係数 $T_r(\mathbf{s})$ と放射輝度 $L(\mathbf{s})$ との積を近似するのではなく、平均減衰係数 $T_r(\mathbf{s})$ 及び放射輝度 $L(\mathbf{s})$ を別々に簡単な式で近似する。

50

【 0 0 5 2 】

まず、式 (4) の積分から、式 (1 0) のように積分区間 $[s_k, s_{k+1}]$ の積分を抜き出して、隣接する面 $A (s_k)$ と面 $A (s_{k+1})$ との間 (k は 0 以上の整数) の補間を考える。

【 数 1 0 】

$$L([s_k, s_{k+1}]) = \int_{s_k}^{s_{k+1}} \bar{T}_r(s) L(s) ds. \quad (10)$$

【 0 0 5 3 】

式 (1 0) に式 (6) を代入すると、式 (1 0) は式 (1 1) のように書き直すことができる。 10

【 数 1 1 】

$$\begin{aligned} L([s_k, s_{k+1}]) &= \int_{s_k}^{s_{k+1}} L(s) e^{-\int_0^s \bar{\sigma}_t(u) du} ds \\ &= \bar{T}_r(s_k) \int_{s_k}^{s_{k+1}} L(s) e^{\int_{s_k}^s \bar{\sigma}_t(u) du} ds \\ &\triangleq \bar{T}_r^{(k)} \bar{L}^{(k)} \end{aligned} \quad (11)$$

20

【 0 0 5 4 】

ここで、積分区間 $[s_k, s_{k+1}]$ の両端での放射輝度 $L (s)$ 及び平均消散係数 $\bar{\sigma}_t (s)$ が解析的に求まることを利用して、両端でのこれらの値を補間する。具体的には、各積分区間 $[s_k, s_{k+1}]$ において、式 (1 2) のように放射輝度 $L (s)$ を線形近似し、式 (1 3) のように平均消散係数 $\bar{\sigma}_t (s)$ を定数で近似する。

【 数 1 2 】

$$L(s) \approx \frac{s_{k+1} - s}{s_{k+1} - s_k} L(s_k) + \frac{s - s_k}{s_{k+1} - s_k} L(s_{k+1}), \quad (12)$$

30

$$\bar{\sigma}_t(s) \approx \bar{\sigma}_{t,k} \triangleq \frac{1}{2} (\bar{\sigma}_t(s_k) + \bar{\sigma}_t(s_{k+1})), \quad (13)$$

【 0 0 5 5 】

なお、平均消散係数 $\bar{\sigma}_t (s)$ についても線形近似をすることができるが、複雑な計算を回避し、且つ計算速度を早くするため、本実施形態では、式 (1 3) に示すように、各積分区間で定数とする。

【 0 0 5 6 】

式 (1 1) に式 (1 2) 及び式 (1 3) を代入すると、式 (1 4) 及び式 (1 5) に示すように、式 (1 1) に対する解析的な形を得ることができる。 40

【数 1 3】

$$\begin{aligned} \bar{L}^{(k)} = & \frac{L(s_k)}{\bar{\sigma}_{t,k}^2 \delta_k^2} \left(\bar{\sigma}_{t,k} \delta_k + e^{-\bar{\sigma}_{t,k} \delta_k} - 1 \right) \\ & + \frac{L(s_{k+1})}{\bar{\sigma}_{t,k}^2 \delta_k^2} \left(-\bar{\sigma}_{t,k} \delta_k + e^{\bar{\sigma}_{t,k} \delta_k} - 1 \right) e^{-\bar{\sigma}_{t,k} \delta_k}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{T}_r^{(k)} = \prod_{l=1}^k e^{-\bar{\sigma}_{t,l} \delta_l} \quad (15)$$

10

ここで、 $\delta_k = |s_{k+1} - s_k|$ であり、各積分区間の長さを表す。全ての積分区間が同じ長さに設定されてもよい。式(14)及び式(15)の解析的な形により、計算の複雑さが軽減され、シンプソン則よりも高速に計算することが可能となる。

【0057】

式(15)の $\bar{T}_r^{(k)}$ と式(14)の $\bar{L}^{(k)}$ との積を、全ての積分区間について加算することで、式(16)に示すように、全放射輝度 $L(x_i, \omega_0)$ を求めることができる。

【数 1 4】

$$L(x_i, \omega_0) = \sum_{k=0}^{N-1} L([s_k, s_{k+1}]) \delta_k. \quad (16)$$

20

ここで、 N は積分区間の数であり、領域 V を方向 c に垂直な方向にスライスして得られる切断面の数(スライス数)は $N - 1$ に等しい。計算装置12は、表面 F 上の各反射点 x_i に対して求めた全放射輝度 $L(x_i, \omega_0)$ に基づいて、媒質 M が別の物体の表面 F に反射して見える映り込みを画像レンダリング結果としてディスプレイ13に表示させる。

【0058】

図7に、従来の求積法(台形則及びシンプソン則)と、本実施形態の求積法(Our method)との違いを模式的に示す。式(4)の被積分関数は、平均減衰係数 $\bar{T}_r(s)$ と放射輝度 $L(s)$ との積で表されるが、台形則及びシンプソン則では、この積を式(9)のように近似しており、平均減衰係数 $\bar{T}_r(s)$ と放射輝度 $L(s)$ とを別々に扱っていない。一方、本実施形態の求積法(Our method)では、各積分区間 $[s_k, s_{k+1}]$ において、放射輝度 $L(s)$ を式(12)のように線形近似し、平均消散係数 $\bar{\sigma}_t(s)$ を式(13)のように定数で近似することによって、平均減衰係数 $\bar{T}_r(s)$ と放射輝度 $L(s)$ とを別々に離散化している。この結果、本実施形態の求積法は、従来の求積法よりも、平均減衰係数 $\bar{T}_r(s)$ と放射輝度 $L(s)$ の変化を正しく反映した積分計算を実現することができる。

30

【0059】

なお、平均消散係数 $\bar{\sigma}_t(s)$ の値がゼロのとき、本実施形態の求積法は、台形則と同一となる。

40

【0060】

次に、図8及び図9を参照して、媒質 M を囲む直方体の領域 V について説明する。

上述のように、式(4)の積分を求めるため、媒質 M を囲む $ABBA$ の領域 V を、表面 F 上の反射点 x_i と領域 V の重心 GC とを結ぶ直線方向 c に垂直な方向にスライスしたが、この方法には2つの課題がある。

【0061】

第1に、図8の左側に示すように、領域 V をスライスして得られる複数の切断面は様々な多角形を含むため、 $ABBA$ と切断面との間の交差テストをして、各切断面の頂点の数を決めるプロセスを実行する必要がある。このプロセスは、画像レンダリングの性能を著

50

しく低下させてしまう。

【0062】

第2に、LTCに基づく画像レンダリングでは、図8の右図に示すように、clamped cosine spaceに変換された面光源のうち、表面の下に隠れた部分をクリッピングする必要がある。図8の左側に示すような様々な形状の面光源に対して、それぞれの形状に合わせたクリッピング処理を行う必要があるが、このプロセスの計算コストは決して低くはない。

【0063】

これらの課題を回避するために、図9に示すように、AABBで規定された元の領域Vを、一面が方向 c に垂直となるように回転させて、さらに拡大させることで、領域V1を得るようにする。この領域V1を方向 c に垂直な方向にスライスすると、得られる切断面は全て単一種類の矩形となるため、クリッピング処理を大幅に簡略化することができる。これにより、画像レンダリングの計算を格段に簡単にすることができる。

【0064】

以上のように、本実施形態の画像レンダリング方法では、媒質Mを囲む立体的領域Vを、別の物体の表面F上の反射点 x_i を通る直線に交差する方向にスライスして複数の切断面 $A(s)$ を取得し、複数の切断面のそれぞれを複数の面光源とみなし、式(4)に示すように、それぞれの面光源から減衰しながら反射点 x_i に到達する光の強さを、光線経路上のパラメータ s による一次元の積分によって求めた。式(4)の積分では、式(16)のように、隣接する2つの面光源 ($A(s_k)$ と $A(s_{k+1})$) の間の各領域からの光の強さ $L([s_k, s_{k+1}])$ を加算することで、反射点 x_i における光の強さである全放射輝度 $L(x_i, \omega_o)$ を求めた。

【0065】

このように、各面光源から受ける光の影響を、計算に有利な解析的表現である、光線経路上のパラメータ s による一次元の積分に落とし込むことで、大幅に計算コストが削減され、実時間での画像レンダリングが可能となる。

【実施例】

【0066】

次に、図10～図14を参照して、本実施形態の実施例として、実際に上述の画像レンダリング方法を実行した結果について説明する。

【0067】

図10に、本実施形態の画像レンダリング方法を実行することによって得られた、媒質Mとしての炎が床に映り込んだ画像の例を示す。図10の例は、媒質Mを囲む領域Vを方向 c に垂直な方向に128個スライスしたもので ($N = 128$)、全計算時間は、CPUからGPUへのデータ転送時間を除き、1280 × 720の解像度で12.74ミリ秒 ($= 78.5 \text{ fps}$) である。

【0068】

図11に、図10の画像に要する計算時間 (ms) の内訳を示す。図11において、Pre-filterは、ボリュームデータ (三次元テクスチャ) をMIPマップ化して、各レベルにガウシアンフィルタを施す処理に要する時間を示し、Directは、カメラから直接見える媒質Mを表現する時間を示し、Indirectは、媒質Mの表面Fへの映り込みを表現する時間を示す。図11から明らかなように、Directは全計算時間の4.72%を占めるのに対し、Indirectは全計算時間の89.13%を占めており、計算時間のほとんどが映り込みの表現に費やされていることがわかる。しかしながら、上述のように、各面光源から受ける光の影響の計算を解析的な表現に落とし込んでいるため、従来の点光源を用いた画像レンダリング方法よりも高速に計算することができ、且つ計算コストは格段に低く抑えられている。

【0069】

この計算時間は、スライス数 ($= N - 1$) によって変動する。図12に、Nが、16、32、64及び128のときの計算時間の一例を示す。図12に示すように、Nが小さくなると計算時間 (ms) が短く、フレームレート (fps) が高くなることがわかる。

【 0 0 7 0 】

また、Nを変化させて、与えられた参照画像との誤差を調べたところ、Nにかかわらず、得られる画像レンダリング結果（映り込み画像）がほぼ同等であることが確認された。よって、Nを少なくすることで、より高速な計算を実現することが期待される。

【 0 0 7 1 】

本実施形態の画像レンダリング方法は、任意の形状及び粗さ（roughness）を有する表面Fに対して適用可能であるが、粗さを変化させて、与えられた参照画像との誤差を調べたところ、特に、鏡面のように粗さが低い表面Fに対して良好な画像レンダリング結果が得られることが確認された。

【 0 0 7 2 】

次に、従来の求積法（台形則及びシンプソン則）と本実施形態の求積法とを比較した結果について説明する。

【 0 0 7 3 】

本実施形態では、式（11）～式（15）に示すように、隣接する2つの面光源の間の領域において、光の強度が指数関数的に減衰するものとした。この減衰の性質をより明らかにするため、放射輝度 $L(s)$ を $L(s) = - (s - 1)^2 + 1$ とし、平均消散係数 $t(s)$ を定数として、簡単な実験を行った。

【 0 0 7 4 】

図13に、平均消散係数 $t(s)$ の値が0.5、1.0、2.0、及び5.0であるときの、パラメータs（横軸）に対する式（10）の被積分関数の値（縦軸）をそれぞれ示す。図14に、図13の平均消散係数ごとに、積分の分割数（# divisions）（横軸）に対する台形則（Tra）、シンプソン則（Sim）及び本実施形態の求積法（Ours）のそれぞれについて、与えられた参照画像との誤差（Error）（縦軸）を示している。

【 0 0 7 5 】

図14に示すように、領域Vのスライス数を多くして、積分の分割数が大きくなると、いずれの求積法も、誤差が小さくなり、計算の精度が高くなる。また、平均消散係数 $t(s)$ の値が小さいほど、本実施形態の求積法は台形則とほぼ同じ精度を示し、シンプソン則が一番精度が高い。一方、平均消散係数 $t(s)$ の値が大きくなるにつれ、本実施形態の求積法の精度はだんだん高くなり、 $t(s) = 5.0$ では、シンプソン則に匹敵する精度を示していることがわかる。

【 0 0 7 6 】

また、媒質Mの密度を変化させて減衰の大きさを変化させたときの計算精度を上述の求積法ごとに調べたところ、媒質Mの密度が相対的に低いときは、媒質Mからカメラに直接入ってくる光の成分が支配的となるため、与えられた参照画像との誤差は、いずれの求積法もほぼ同等の結果を示した。一方、媒質Mの密度が高くなると、本実施形態の求積法は、台形則及びシンプソン則よりも、参照画像との誤差が少なく良好に描画することができた。

【 符号の説明 】

【 0 0 7 7 】

- 1 1 制御装置
- 1 2 計算装置
- 1 3 ディスプレイ
- 1 4 記憶装置
- 1 5 メインメモリ
- 1 6 通信インターフェース
- 1 7 入力装置
- 1 0 0 画像レンダリングシステム
- C V 空洞
- F 表面
- M、M 2 媒質

10

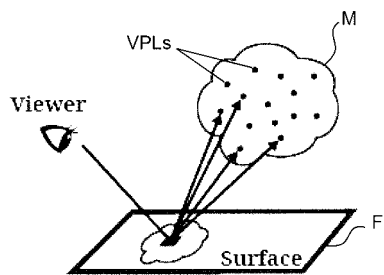
20

30

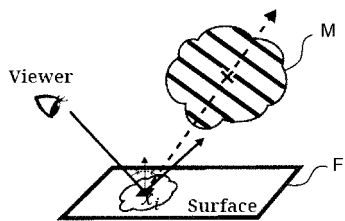
40

50

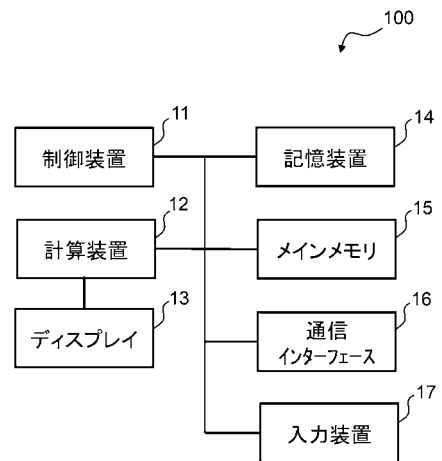
【図 1】



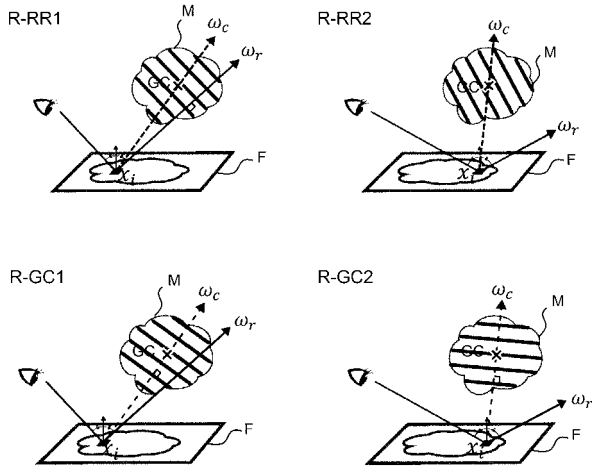
【図 2】



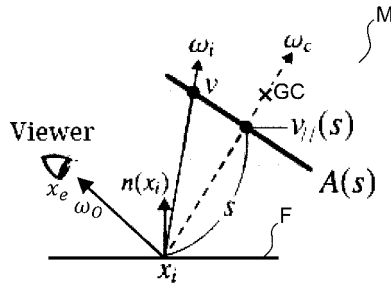
【図 3】



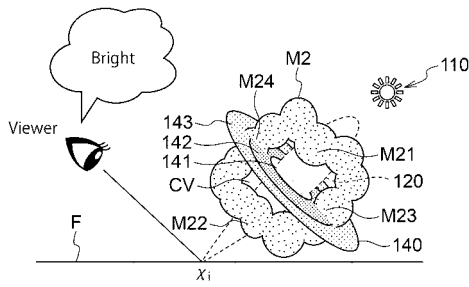
【 図 4 】



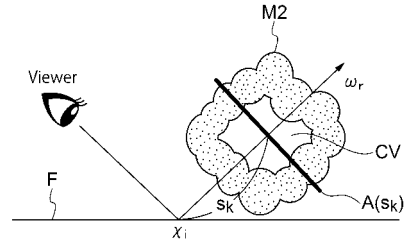
【 図 5 】



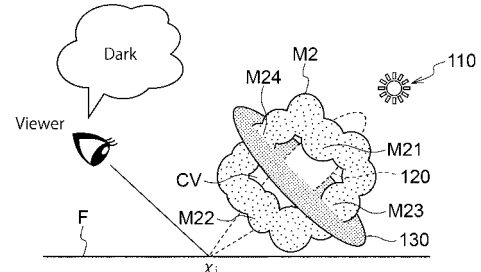
【 図 6 C 】



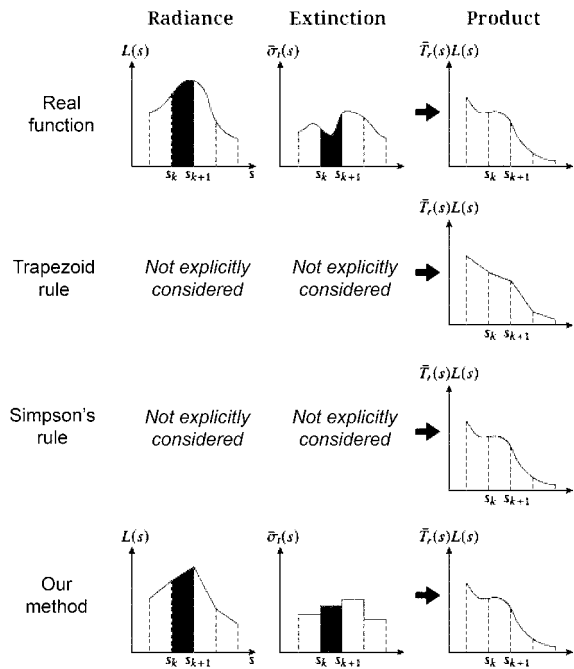
【 図 6 A 】



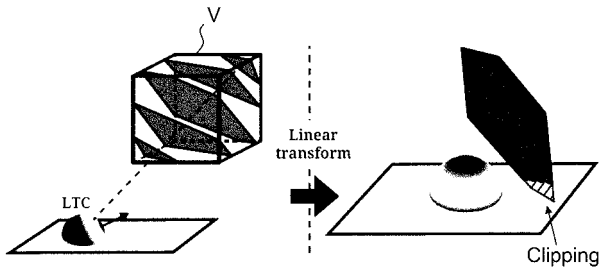
【 図 6 B 】



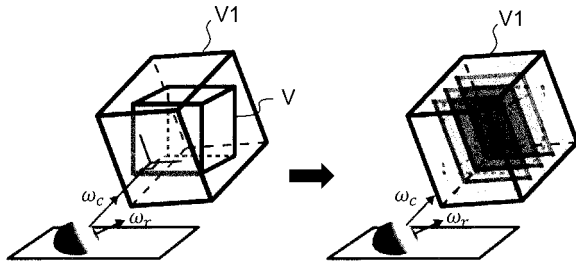
【 図 7 】



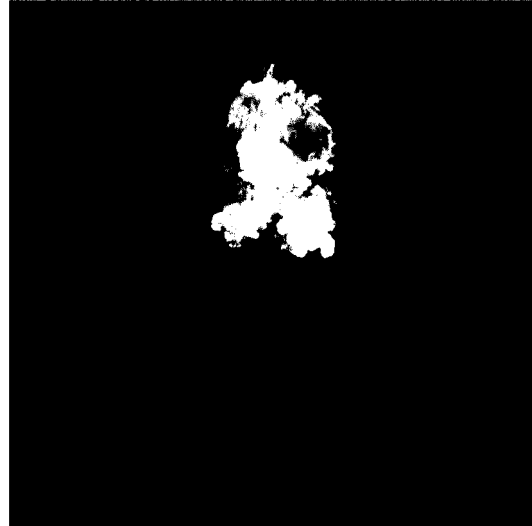
【図 8】



【図 9】



【図 10】



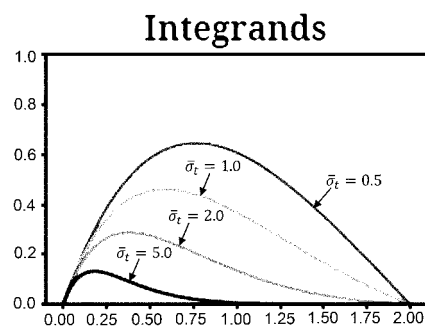
【図 11】

	Pre-filter	Direct	Indirect	Total
Time (ms)	0.784	0.601	11.355	12.74
Percentage	6.15%	4.72%	89.13%	100.0%

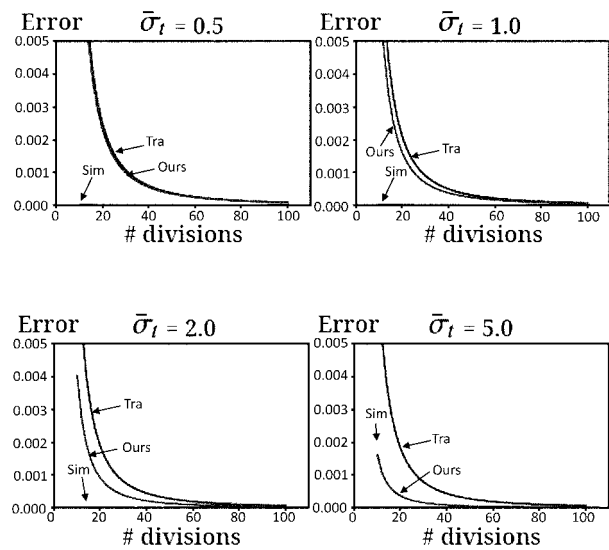
【図 12】

	$N = 16$	$N = 32$	$N = 64$	$N = 128$
Time (ms)	5.38	6.57	8.81	12.74
fps	186	152	114	78

【図 13】



【図 14】



Tra: Trapezoid rule
Sim: Simpson's rule
Ours: Our method

フロントページの続き

特許法第30条第2項適用申請有り 画像電子学会 VC(Visual Computing)ワークショップ 2018 PDF 集USB 平成30年12月9日 画像電子学会 VC(Visual Computing)ワークショップ 2018 水明館 (岐阜県下呂市幸田1268)平成30年12月9日(開催期間:平成30年12月9日~平成30年12月10日) <https://www.ieeej.org/journal/ieeej-vol-48-no-1/> 平成31年1月30日 2018(平成30)年度 早稲田大学 応用物理学科 物理学科 卒業研究発表会 早稲田大学 54号館-304(東京都新宿区大久保3-4-1 西早稲田キャンパス)平成31年2月9日 cgvi.jp/vc2019/program/poster/ 令和1年6月10日 Visual Computing 2019 早稲田大学 国際会議場 井深大ホール(東京都新宿区西早稲田1-20-14)令和1年6月27日(開催期間:令和1年6月27日~令和1年6月29日) <http://cedec.cesa.or.jp/2019/session/detail/s5ca0d43f434ae> 令和1年6月14日

(出願人による申告)平成30年度 国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業、研究題目「鑑賞・創作支援のための音楽動画分析合成技術に関する研究開発」、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願