

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6634387号
(P6634387)

(45) 発行日 令和2年1月22日 (2020.1.22)

(24) 登録日 令和1年12月20日 (2019.12.20)

(51) Int. Cl.	F I
GO 6 T 15/50 (2011.01)	GO 6 T 15/50
GO 1 N 21/47 (2006.01)	GO 1 N 21/47 Z

請求項の数 20 (全 39 頁)

(21) 出願番号	特願2016-567016 (P2016-567016)	(73) 特許権者	314015767
(86) (22) 出願日	平成27年6月25日 (2015. 6. 25)		マイクロソフト テクノロジー ライセンシング, エルエルシー
(65) 公表番号	特表2017-527863 (P2017-527863A)		アメリカ合衆国 ワシントン州 98052 レッドモンド ワン マイクロソフト ウェイ
(43) 公表日	平成29年9月21日 (2017. 9. 21)		
(86) 国際出願番号	PCT/US2015/037566	(74) 代理人	100079108
(87) 国際公開番号	W02016/003747		弁理士 稲葉 良幸
(87) 国際公開日	平成28年1月7日 (2016. 1. 7)	(74) 代理人	100109346
審査請求日	平成30年5月17日 (2018. 5. 17)		弁理士 大貫 敏史
(31) 優先権主張番号	14/320, 636	(74) 代理人	100117189
(32) 優先日	平成26年6月30日 (2014. 6. 30)		弁理士 江口 昭彦
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)	(74) 代理人	100134120
			弁理士 内藤 和彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 等方性双方向反射率分布関数のためのノンパラメトリックマイクロファセット因子モデル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも1つのプロセッサと、

前記少なくとも1つのプロセッサによって実行可能である実行可能コードを記憶するコンピュータ可読記憶媒体と、を備え、前記少なくとも1つのプロセッサによって、

等方性材料の表面の反射率に関連する測定3次元(3D)サンプルデータを取得することと、

二乗和加重を使用して計算されるフィッティングメトリックおよびマイクロファセットモデルの因子である1次元(1D)関数を用いて、前記3Dサンプルデータを前記マイクロファセットモデルにフィッティングさせて、前記反射率のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生させることと、

前記ノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を使用する1つまたは複数の画像をレンダリングすることと
を実行するシステム。

【請求項 2】

前記3Dサンプルデータポイントが、前記等方性材料の前記表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す、請求項1に記載のシステム。

【請求項 3】

前記輝度の様子は、前記複数の測定サンプルデータポイントが、異なる視野および前記等方性材料の前記表面に対する光位置の下で知覚される輝度に少なくとも基づく、請求項

10

20

2 に記載のシステム。

【請求項 4】

前記少なくとも 1 つのプロセッサは、

二乗和加重を使用して計算されるフィッティングメトリックを使用して前記 3 D サンプルデータを前記マイクロファセットモデルにフィッティングさせ、前記二乗和加重が、前記 3 D サンプルデータの測定値の大きさの非定値関数を適用することを含む、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 5】

前記少なくとも 1 つのプロセッサは、

前記フィッティングメトリックを、交代加重最小二乗 (AWLS) 数値技法を使用して最小化する、請求項 4 に記載のシステム。

10

【請求項 6】

前記マイクロファセットモデルの因子である前記 1 D 関数は、前記 3 D サンプルデータの 3 次元に対応する 3 つの 1 次元関数を含む、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 7】

前記因子は、

前記反射率の拡がり角 θ_d に対する依存性を表すフレネル因子 (F) と、

マイクロファセット法線が表面マクロスケール法線に対して θ_h の角度を作る確率を表す確率分布関数である法線分布関数 (D) と、

マイクロ幾何形状が、どのようにそれ自体への光を影にし、およびそれ自体への光を相互反射するかを、光方向または視方向の傾斜の関数として表す幾何学的因子 (G) と、を含む、請求項 6 に記載のシステム。

20

【請求項 8】

前記少なくとも 1 つのプロセッサは、

測定スペクトルの色チャンネルごとに前記マイクロファセットモデルを独立に適用することによって前記ノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生させる、請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 9】

前記少なくとも 1 つのプロセッサは、

R G B (赤 / 緑 / 青) 測定スペクトルに対して、3 つのチャンネル測定値、すなわち、赤色チャンネル、緑色チャンネル、および青色チャンネルの各々として、前記マイクロファセットモデルを独立に適用することによって前記ノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生させる、請求項 1 に記載のシステム。

30

【請求項 10】

等方性材料の表面の反射率に関連する測定 3 次元 (3 D) サンプルデータを取得する工程と、

前記 3 D サンプルデータにモデルフィッティングメトリックを適用することにより前記測定 3 D サンプルデータポイントを、モデルの 1 D 表示を生成する 1 次元 (1 D) 関数を含む前記モデルにフィットさせる工程であり、前記モデルフィッティングメトリックが、圧縮関数と非漸近的増加関数の比の非負で非ゼロの累乗を使用し、二乗和加重を使用して計算され、前記圧縮関数および前記非漸近的増加関数が、前記測定 3 D サンプルデータの規格化値にわたって定義される、フィットさせる工程と、

40

少なくとも前記モデルの前記 1 D 表示に基づいて 1 つまたは複数の画像をレンダリングする工程とを含むコンピュータ実装方法。

【請求項 11】

前記モデルフィッティングメトリックは、前記 3 D サンプルデータの 3 次元に対応する 3 つの角度パラメータ表示に少なくとも基づく体積形式加重を含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

50

前記モデルフィッティングメトリックは、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数 (BRDF) に少なくとも基づく B R D F 重要度加重を含む、請求項 1 0 に記載の方法。

【請求項 1 3】

前記モデルフィッティングメトリックが、交代加重最小二乗 (AWLS) 数値技法を使用して最小化される、請求項 1 0 に記載の方法。

【請求項 1 4】

前記測定 3 D サンプルデータポイントが、所定の閾値よりも大きい値を有する高ダイナミックレンジ (HDR) データポイントを含む、請求項 1 0 に記載の方法。

【請求項 1 5】

少なくとも 1 つのデータ処理装置と、

前記少なくとも 1 つのデータ処理装置によって実行可能である実行可能コードを記憶するコンピュータ可読記憶媒体と、を備え、前記少なくとも 1 つのデータ処理装置によって、

等方性材料の表面の反射率に関連する測定 3 次元 (3 D) サンプルデータを取得することと、

前記測定 3 D サンプルデータにフィッティングメトリックを適用することにより前記測定 3 D サンプルデータを、モデルの 1 次元 (1 D) 表示を生成する 1 D 関数を含む前記モデルにフィットさせることを実行し、

前記フィッティングメトリックが、二乗和加重を使用して計算され、前記二乗和加重が、前記測定 3 D サンプルデータの測定値の大きさの非定値関数を含む、システム。

【請求項 1 6】

前記二乗和加重は、前記モデルの予測と実際の測定値との間の二乗差を含む、請求項 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 7】

前記測定 3 D サンプルデータは、前記等方性材料の前記表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す、請求項 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 8】

前記少なくとも 1 つのデータ処理装置は、

前記 3 D サンプルデータの 3 次元に対応する 3 つの角度パラメータ表示に少なくとも基づく体積形式加重を含む複数のサブ重みを使用して、前記フィッティングメトリックを計算する、請求項 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 9】

前記少なくとも 1 つのデータ処理装置は、

複数のサブ重みを使用して前記フィッティングメトリックを計算し、前記サブ重みが、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数 (BRDF) に少なくとも基づく B R D F 重要度加重を含む、請求項 1 5 に記載のシステム。

【請求項 2 0】

前記実行可能コードが、前記少なくとも 1 つのデータ処理装置に、

前記 1 D 表示は、前記モデルの前記 1 D 関数のノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示である、請求項 1 5 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

[0001] 材料の B R D F (双方向反射率分布関数) は材料の反射率を表す、すなわち、材料が、表面の単一ポイントに入射した光をどのように影にし、散乱させるかを表す。一般に、B R D F は、表面法線ベクトルに対する光および視野の方向に依存する 4 次元 (4D) 関数である。多くの材料は、平坦な均一サンプルがその法線ベクトルのまわりに方位角的に回転される場合、反射率が変化しないので等方性である。等方性材料は、4 D セットの

10

20

30

40

50

測定ではなく3次元(3D)によってパラメータ化することができる。しかしながら、これらは、より詳細には反射率が空間的に変化する場合、実質的に扱いにくい表示となる傾向がある。

【発明の概要】

【0002】

[0002] 1つの一般的な態様によれば、システムは、実行可能コードを記憶するコンピュータ可読記憶媒体を含む装置を含むことができ、実行可能コードは、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントを得るデータ取得モジュールを含む反射率表示マネージャを含む。表示発生器は、得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生する。

10

【0003】

[0003] 別の態様によれば、材料の表面の反射率に関連する測定サンプルデータポイントを得ることができる。得られたサンプルデータポイントにモデルフィッティングメトリックを適用することによって、測定サンプルデータポイントをモデルにフィットさせることができ、モデルフィッティングメトリックは、第1の関数と第2の関数の比の非負で非ゼロの累乗を使用して計算され、第1の関数および第2の関数は、複数の測定サンプルデータポイントの規格化値にわたって定義され、第1の関数は圧縮関数として定義され、第2の関数は非漸近的増加関数として定義される。

【0004】

20

[0004] 別の態様によれば、材料の表面の反射率に関連する測定サンプルデータポイントを得ることができる。得られたサンプルデータポイントにフィッティングメトリックを適用することによって、測定サンプルデータポイントをモデルにフィットさせることができ、フィッティングメトリックは、二乗和加重を使用して計算され、二乗和加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイントの測定値の大きさの非定値関数を含む。

【0005】

[0005] この発明の概要は、簡単化した概念の選択を導入するために提供され、概念は、発明を実施するための形態において以下でさらに説明される。この発明の概要は、特許請求する主題のキー特徴または本質的な特徴を識別するようには意図されておらず、または特許請求する主題の範囲を限定するために使用されるようにも意図されていない。1つまたは複数の実施態様の詳細が、添付図面および以下の説明に記載される。他の特徴は、説明および図面と、特許請求の範囲とから明らかになるであろう。

30

【図面の簡単な説明】

【0006】

【図1】[0006]等方性BRDFの例示のパラメータ表示を示す図である。

【図2A】[0007]例示のBRDFフィットを使用する例示の測定結果を示す図である。

【図2B】例示のBRDFフィットを使用する例示のレンダリングを示す図である。

【図3】[0008]反射率表示および画像レンダリングのための例示の汎用システムを示すブロック図である。

【図4】[0009]例示の圧縮関数のグラフ図である。

40

【図5A】[0010]図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【図5B】図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【図5C】図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【図6A】[0011]図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【図6B】図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【図7A】[0012]図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【図7B】図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【0007】

[0013] 本明細書で論じる例示の技法によれば、等方性材料の反射率の一般的表示は、コンピュータグラフィックスにおける標準マイクロファセットモデルからの因子関数の1次元(1D)ノンパラメトリック集計表に基づくことができる。このモデルは、3次元(3D)データセットを3つの表形式1D因子のセットに換算することによって反射率の正確でコンパクトな特性評価を与えることができる。

【0008】

[0014] この文脈では、「等方性の」材料は、一般に、軸に沿って全方向で測定されたとき同じ値(または実質的に同じ値)をもつ特性(例えば、光透過の速度としての)を示すこと、または全方向で特性の同一の値(または実質的に同一の値)を有することを指すことができる。

10

【0009】

[0015] この文脈では、「作表する」は、一般に、特定のドメインセットにわたる関数のサンプリング値を決定することに基づいて1組のサンプルを得ることを指すことができる。例えば、 $[0, 1]$ の x にわたって定義される関数 $y = f(x)$ に関して、集計表を記憶することは、 x のサンプルを取り、 x のそれらの値での f の値を記憶すること(すなわち、それらの値 $f(x)$ を記憶すること)を含むことになる。

【0010】

[0016] 本明細書で論じる例示の技法によれば、そのようなモデルは、交代加重最小二乗(AWLS)数値技法を介して等方性材料の実在の測定値にフィットされ得る。例えば、各因子は、因子の残りを一定に保ちながら反復シーケンスで最適に更新することができる。例えば、各測定BRDF(双方向反射率分布関数)サンプルが最適化オブジェクティブの総合誤差にどのように寄与するかを決定する重みは、(1)サンプルのパラメトリック体積形式、(2)レンダリング積分における重要度、および(3)予想される測定誤差の積によって決定することができる。合成レンダリングに有用な望ましいBRDFフィットを得るために、パラメータ空間の小さい、しかし多くの場合非常に明るいハイライト領域のBRDFサンプルは、第3の加重因子において加重低下させることができる。

20

【0011】

[0017] 本明細書で論じる例示の技法によれば、ノンパラメトリックマイクロファセット因子表示は、等方性材料の反射率の表示のために利用することができる。

【0012】

30

[0018] 本明細書で論じる例示の技法によれば、既知の関数依存性の因子と圧縮性加重との積に対する交代加重最小二乗(AWLS)フィッティング方法が、反射率表示にも利用され得る。本明細書で論じるように、AWLSフィッティング方法は、反射率表示以外の多くの分野に適用をもつHDR(高ダイナミックレンジ)測定データのコンパクトな表示のための例示の技法である。

【0013】

[0019] 等方性BRDFは、図1に示すように、3つの角度に関してパラメータ化することができる。

$(\theta_h, \phi_d, \phi_h)$, $\theta_h \in [0, \pi/2]$, $\phi_d \in [0, \pi/2]$, $\phi_h \in [0, 2\pi]$ (1)

40

【0014】

[0020] 例えば、図1の等方性BRDFのパラメータ表示100に示されるように、表面マクロ幾何形状104に対する法線102は、 n で示すことができる。中間ベクトル $h = (i + o) / ||i + o||$ は、視方向(またはカメラ方向) o (108)と光方向 i (110)との間の中程のベクトル106である。 θ_h は、中間ベクトル106と法線ベクトル102との間になす角度112を示し、 ϕ_d は、光ベクトル110と中間ベクトル106との間になす角度114(それは、さらに、視方向108と中間ベクトル106との間の角度と等しくなり得る。その理由は、中間ベクトル106は2つの方向間の中程にあるからである)を示す。角度 ϕ_h (図示せず)は、光ベクトル i (110)および視像ベクトル o (108)の中間ベクトル106のまわりの回転を表す。

50

【 0 0 1 5 】

[0021] (マクロスケール)表面法線に対して「イン」(光)(118)および「アウト」(視野)(120)によってなされる角度 θ_i [0, $\pi/2$] および θ_o [0, $\pi/2$] は、これらの基本パラメータから、以下の式の

$$\begin{aligned} \cos \theta_i &= \cos \theta_h \cos \theta_d + \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d \quad (2) \\ \cos \theta_o &= \cos \theta_h \cos \theta_d - \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d \end{aligned}$$

を介して決定される。

【 0 0 1 6 】

[0022] 例示のノンパラメトリックマイクロファセットモデルは、

【 0 0 1 7 】

【数1】

$$\rho(\theta_h, \theta_d, \phi_d) = \rho_d + \rho_s \frac{D(\theta_h) F(\theta_d) G(\theta_i) G(\theta_o)}{\cos \theta_i \cos \theta_o} \quad (3)$$

として表示することができ、それは、1982年にCookおよびTorranceによって導入されたコンピュータグラフィックスにおける従来のモデルである(例えば、Cook and Torrance, "A reflectance model for computer graphics," SIGGRAPH 1982を参照)。法線分布関数またはNDFと呼ばれることがある因子Dは、マイクロファセット法線が表面マクロスケール法線に対して θ_h の角度を作る確率を表す確率分布関数である。フレネル因子と呼ばれることがある因子Fは、反射率が「拡がり」角 θ_d にどのように依存するかを表す。幾何学的因子と呼ばれることがある因子Gは、マイクロ幾何形状が、どのようにそれ自体への光を影にし、およびそれ自体への光を相互反射するかを、光方向または視方向(すなわち、 θ_i または θ_o) の傾斜の関数として表す。物理的相反原理は、光方向および視方向が取り替えられる(例えば、したがって、モデルが θ_i および θ_o において対称であり得る)場合、反射率は同一である(または実質的に同一である)ことを意味する。

【 0 0 1 8 】

[0023] 本明細書で論じる例示の技法によれば、上述のモデル(数式(3))は、測定スペクトルの色チャンネル(例えば、RGB(赤/緑/青)の3チャンネル測定値)ごとに独立に適用することができる。

【 0 0 1 9 】

[0024] 多くの以前の技法は、これらの因子の各々に対して簡単で限定的な分析モデルを仮定していた。しかしながら、本明細書で論じる例示の技法によれば、ユーザは、有利には、これらの因子に対していかなる特定のパラメトリックモデルまたは分析形態も仮定することなく上述の因子について解くことができる。本明細書で論じる例示の表示は、入力引数の1組の(多くの)離散的サンプルで各因子関数をサンプリングし、それを1Dベクトルとして処置し、それにより、個々の因子の形態を制限することなく上述のマイクロファセットモデルの関数形態を仮定する。

【 0 0 2 0 】

[0025] 本明細書で論じる例示の技法によれば、上述のモデルにフィットさせるために使用される目的関数F(例えば、フィッティングメトリック)は、

【 0 0 2 1 】

【数2】

$$F = \sum_j w_j (\rho(\theta_h, \theta_d, \phi_d)_j - \tilde{\rho}_j)^2 \quad (4)$$

として表示された、jとインデックス付けされたすべての測定BRDFサンプルにわたって合計することを含むことができ、ここで、

【 0 0 2 2 】

【数 3】

 $\tilde{\rho}_j$

は、パラメトリック座標 $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)_j$ に対応する j 番目の B R D F サンプルの値である。

【 0 0 2 3 】

[0026] 本明細書で論じる例示の技法によれば、B R D F サンプル j の加重 w_j は、数式 (5) で示されるように表示することができる。 10

【 0 0 2 4 】

【数 4】

$$w_j = w_V(\theta_h, \theta_d, \phi_d)_j w_I(\theta_h, \theta_d, \phi_d)_j w_E(\tilde{\rho}_j) \quad (5)$$

【 0 0 2 5 】

[0027] 例示の体積形式は、

【 0 0 2 6 】

【数 5】

$$w_V = \sin \theta_d \sqrt{(\cos^2 \theta_d + \sin^2 \theta_d \cos^2 \phi_d)} d\theta_h d\theta_d d\phi_d \quad (6) \quad 20$$

として表示することができる。

【 0 0 2 7 】

[0028] この式のための例示の導出は以下でさらに論じられる。

【 0 0 2 8 】

[0029] 例示の重要度重み w_I は、

$$w_I = \cos(\theta_i) \cos(\theta_o) \quad (7)$$

として表示することができる。 30

【 0 0 2 9 】

[0030] 因子 $\cos(\theta_i)$ が現われるが、その理由は、方向 θ_o から見た任意の表面ポイントでの影になった影響が、照明方向 θ_i にわたる半球積分によって与えられるからであり、影になった影響は、

$$s(\theta_o) = \int (\cos(\theta_i, \theta_o)) L(\theta_i) \cos \theta_i d\theta_i \quad (8)$$

として表示され、ここで、 $L(\theta_i)$ は、方向 θ_i の入射放射輝度（照明）を表す。因子 $\cos \theta_o$ は、法線が視方向と一直線をなすときに表面ポイントが現われる可能性が高いことに起因して生じる。

【 0 0 3 0 】

[0031] 予想される測定誤差 w_E は、 40

【 0 0 3 1 】

【数 6】

$$w_E = \left(\frac{f(\tilde{\rho}_j/\bar{\rho})}{\tilde{\rho}_j} \right)^p \quad (9)$$

として表示することができ、ここで、 f は、

【 0 0 3 2 】

【数 7】

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha x}) \quad (10)$$

の形態の例示の「圧縮関数」であり、

【0033】

【数 8】

$$\bar{p}$$

10

は $w_v w_i$ によって与えられる重みをもつ B R D F の加重中央値である。加重累乗 p は、
 [1 , 2] において選ばれ得るパラメータである。 p の値が大きいほど、高い重みが、B
 R D F の明るいハイライトに比べて B R D F のより暗い部分に割り当てられる。この例示
 の圧縮関数の形態は、 x がすべての負でない実数にわたるとき、圧縮関数が有限区間 [0
 , 1 / α] に写像するという有利に望ましい特性を有する。圧縮関数のパラメータは、出
 力範囲の中心に (1 / 2) に B R D F 加重中央値を写像するために、例えば $\alpha = \ln 2$
 として選択され得る。 p の値が大きいほど、変換は圧縮的となる、すなわち、より高い値
 は、 1 / α の関数の漸近値の近くに押し込まれる（したがって、「圧縮的な」に言及）。
 $x = 0$ での f の導関数は 1 であり、その結果、それを累乗 p に上げる前の重み w_e の最大
 の比は、

20

【0034】

【数 9】

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 1 \quad (11)$$

によって表示される。

30

【0035】

[0032] この最大値から、加重比は、B R D F 値が α まで増加するにつれて 0 まで単調に
 減少する。特に、この例示の定式化は、測定値が 0 の値に近づくときに重みが勝手に大き
 くなる困難を有利には実質的に除去することができる。これは、分子が圧縮関数ではなく
 1 になるように選ばれるより簡単な加重方式にはあてはまらない。

【0036】

[0033] 例示の A W L S 反復によれば、因子について解くために、ユーザは、その因子以
 外のすべてを一定に保持することができ、次に、最適加重最小二乗更新について解くこと
 ができる。因子の集計表の各成分は、以下の観察に基づいて独立に解くことができる。

【0037】

40

[0034] 目的関数の

$$F(x) = \sum_j w_j (z_j - x y_j)^2 \quad (12)$$

が与えられると、 F を最小にする x の解は、

【0038】

【数 10】

$$x = \frac{\sum_j w_j y_j z_j}{\sum_j w_j y_j^2} \quad (13)$$

50

として表示することができる。

【 0 0 3 9 】

[0035] したがって、因子の所与の表形式「ピン」に写像するサンプルはすべて蓄積され、ピンごとに上述の式（数式（ 1 3 ））を適用することができる。

【 0 0 4 0 】

[0036] s および d について解くために、オブジェクティブの

$$F(a, b) = \sum_j w_j (a x_j + b - y_j)^2 \quad (14)$$

への最適解は

【 0 0 4 1 】

【数 1 1 】

10

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum_j w_j y_j & \sum_j w_j x_j \\ \sum_j w_j x_j y_j & \sum_j w_j x_j^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_j w_j & \sum_j w_j x_j \\ \sum_j w_j x_j & \sum_j w_j x_j^2 \end{vmatrix}} \quad (15)$$

および

【 0 0 4 2 】

【数 1 2 】

20

$$b = \frac{\begin{vmatrix} \sum_j w_j & \sum_j w_j y_j \\ \sum_j w_j x_j & \sum_j w_j x_j y_j \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_j w_j & \sum_j w_j x_j \\ \sum_j w_j x_j & \sum_j w_j x_j^2 \end{vmatrix}} \quad (16)$$

であることに留意されたい。

30

【 0 0 4 3 】

[0037] 例示の最適化は、数式（ 1 3 ）を使用して各因子（例えば、 D および F ）を順に更新し、次に、 s および d を更新することによって進行し、 s および d は数式（ 1 5 ）および数式（ 1 6 ）の a および b になる。この手順のいくつかの反復が、収束が達成される前に含まれ得る。

【 0 0 4 4 】

[0038] 一例として、ユーザは、因子 D を表すベクトルを更新したいことがある。他の因子、ならびに d および s は一定に保持される。このベクトル D_k の成分は、その引数（ h ） k の値に対応する k によってインデックス付けされる。例えば、パラメトリックの座標 h が（ h ） k に最も近く写像する、フィットするすべての $B R D F$ サンプルのパラメトリックの場所は、（ d, d, i, o ） k_j によってインデックス付けされる。 D_k を更新するために、加重連立方程式

40

【 0 0 4 5 】

【数 1 3 】

$$\tilde{\rho}_{kj} = \rho_d + \rho_s \frac{D_k [F(\theta_d)]_{kj} [G(\theta_i)]_{kj} [G(\theta_o)]_{kj}}{[\cos \theta_i \cos \theta_o]_{kj}} \quad (17)$$

に対する最小二乗最善解を決定することができ、ここで、上述の式 j に対応する重みは w

50

j である。最適解は、

【 0 0 4 6 】

【 数 1 4 】

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}_k$$

$$z_j = \tilde{\rho}_{kj} - \rho_d \quad (18)$$

$$y_j = \rho_s \frac{[F(\theta_d)]_{kj} [G(\theta_i)]_{kj} [G(\theta_o)]_{kj}}{[\cos \theta_i \cos \theta_o]_{kj}}$$

10

を用いて数式 (1 3) によって与えられる。

【 0 0 4 7 】

[0039] 幾何学的因子 G は、独立した表形式因子として扱うことができ、またはマイクロファセット理論からのシャドーイング式を使用して、 D から導き出すことができる。 G が D から決定される場合、非線形依存が緩和に導入され、結果として生じる因子が最適であるかどうかの不確かになる。本明細書で論じる例示の技法によれば、この問題は、 $AWLS$ ステップを使用して D を計算し、この D から G を導き出し、次に、目的関数が減少したかどうかを決定するためにチェックすることによって解決することができる。そうでない場合、ベクトル D の以前の状態からのラインに沿ってオブジェクティブを $AWLS$ ステップから計算された新しいものまで減少させることができる簡単な $1D$ 最小化 (例えば、黄金分割探索) を導入することができる。

20

【 0 0 4 8 】

[0040] 以下でさらに論じるように、実験結果は、正確であることを有利に示している。そのような有利なフィッティングは、因子の各々に対するより一般的なモデルと、 $3D$ 測定全体への有利に加重されたフィッティングとの使用の結果であり得る。

【 0 0 4 9 】

[0041] 図 2 A ~ 図 2 B は、本明細書で論じるような例示のノンパラメトリック $BRDF$ フィットを使用する例示の測定結果 2 0 0 A および例示のレンダリング 2 0 0 B を示す。図 2 A に示すように、仏陀の幾何形状 2 0 2 は金のメタリックエナメル材料 (色は金として示されていない) を使用し、うさぎ 2 0 4 はクロム鋼であり、床および壁は $MERL$ データベースからの白ペンキである。偽色誤り可視化 2 0 6 が、図 2 B の挿入図に示されている。

30

【 0 0 5 0 】

[0042] データ処理の当業者は、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなく多くの他のタイプの技法が等方性材料の反射率の表示に使用され得ることを正しく理解するであろう。

【 0 0 5 1 】

II. 例示のオペレーティング環境

40

[0043] 本明細書で論じる特徴は、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなくデータ処理の当業者が理解できる多くの異なる方法で実現され得る例示の実施形態として提供される。そのような特徴は、例示の実施形態の特徴としてのみ解釈することができるが、それらの詳細な説明のみに限定するとして解釈されるようには意図されない。

【 0 0 5 2 】

[0044] 本明細書でさらに論じるように、図 3 は、反射率を示すための汎用システム 3 0 0 のブロック図である。図示のような汎用のシステム 3 0 0 は、単に、本明細書で論じるような例示の技法に含まれ得る様々な例示の機能および / または論理を示すように意図されており、様々なハードウェアおよび / またはソフトウェア構成の実装に関して限定するように意図されていない。

50

【0053】

[0045] 例えば、システム300は、少なくとも1つのプロセッサによる実行のために命令を記憶するコンピュータ可読記憶媒体を含むことができる。図3に示すように、システム300は、少なくとも1つのプロセッサ304を含むデバイス302を含むことができる。デバイス302は、反射率表示マネージャ306を含むことができ、反射率表示マネージャ306は、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイント310を得ることができるデータ取得モジュール308を含むことができる。

【0054】

[0046] 例示の実施形態によれば、反射率表示マネージャ306、またはその1つまたは複数の部分は、以下で論じるように、有形コンピュータ可読記憶媒体に記憶され得る実行可能命令を含むことができる。例示の実施形態によれば、コンピュータ可読記憶媒体は、分散型デバイスを含む任意の数の記憶デバイスおよび任意の数の記憶媒体タイプを含むことができる。

10

【0055】

[0047] この文脈において、「プロセッサ」は、処理システムに関連する命令を処理するよう構成された単一のプロセッサまたは多数のプロセッサを含むことができる。したがって、プロセッサは、処理命令を並列におよび/または分散方法で処理する1つまたは複数のプロセッサを含むことができる。デバイスプロセッサ304は、図3の反射率表示マネージャ306の外部にあるように示されているが、デバイスプロセッサ304は、単一の構成要素として、および/または反射率表示マネージャ306および/またはその要素のいずれかに内部的にまたは外部的に配置され得る分散型ユニットとして実現することができることをデータ処理の当業者は正しく理解するであろう。

20

【0056】

[0048] 例えば、システム300は、1つまたは複数のプロセッサ304を含むことができる。例えば、本明細書で論じるように、システム300は、1つまたは複数のプロセッサ304により実行可能命令を記憶する少なくとも1つの有形コンピュータ可読記憶媒体を含むことができ、実行可能命令は、少なくとも1つのコンピューティング装置（例えば、データ処理装置）に、システム300に含まれる様々な例示の構成要素に関連する動作を実行するように構成される。例えば、1つまたは複数のプロセッサ304は、少なくとも1つのコンピューティング装置に含まれ得る。例えば、実行可能命令は、1つまたは複数のプロセッサによる実行のために構成される論理（例えば、プログラム論理、論理回路など）として実装され得る。データ処理の当業者は、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなくそのような議論に従って構成され得るプロセッサおよびコンピューティング装置の多くの構成があることを理解するであろう。以下でさらに論じるように、本明細書における「コンピュータ可読記憶媒体」は信号を本質的に参照せず、具体的には除外する。

30

【0057】

[0049] この文脈において、「構成要素」は、ハードウェア支援を用いていくつかのオペレーションを実行するように構成され得る実行可能命令またはハードウェアを参照することができる。そのような命令は命令の構成要素群内に含まれてもよく、または1つを超える群にわたって分散されてもよい。例えば、第1の構成要素のオペレーションに関連するいくつかの命令は、第2の構成要素（またはより多くの構成要素）のオペレーションに関連する命令の群に含まれてもよい。例えば、本明細書における「構成要素」は、機能により構成された計算エンティティのタイプを参照することができ、機能は、実行可能命令によって実装されてもよく、実行可能命令は、単一のエンティティに配置されてもよく、または多数のエンティティにわたって拡散されるかもしくは分散されてもよく、および他の構成要素に関連する命令および/またはハードウェアと重複してもよい。この文脈において、「実行可能」命令は、具体的には1つまたは複数のハードウェアデバイスによる実行のために構成される命令を参照し、ソフトウェアを本質的に参照しない。

40

【0058】

[0050] 例示の実施形態によれば、反射率表示マネージャ306は、1つまたは複数のユ

50

ーザデバイスに関連して実装され得る。例えば、反射率表示マネージャ 306 は、以下でさらに論じるように、1つまたは複数のサーバと通信することができる。

【0059】

[0051] 例えば、エンティティリポジトリ 316 は、1つまたは複数のデータベースを含むことができ、データベースインターフェース構成要素 318 を介してアクセスされ得る。データ処理の当業者は、様々なタイプのデータベース構成（例えば、リレーショナルデータベース、階層型データベース、分散型データベース）および非データベース構成などの本明細書で論じるリポジトリ情報を記憶するための多くの技法があることを正しく理解するであろう。

【0060】

[0052] 例示の実施形態によれば、反射率表示マネージャ 306 は、例えば反射率表示マネージャ 306 のために中間データを記憶することができるメモリ 320 を含むことができる。この文脈において、「メモリ」は、データおよび/または命令を記憶するように構成された単一のメモリデバイスまたは多数のメモリデバイスを含むことができる。さらに、メモリ 320 は、多数の分散型記憶デバイスに及ぶことができる。

【0061】

[0053] 例示の実施形態によれば、ユーザインターフェース構成要素 322 は、ユーザ 324 と反射率表示マネージャ 306 との間の通信を管理することができる。ユーザ 324 は、ディスプレイ 328 および他の入力/出力デバイスに関連することができる受信デバイス 326 に関連することができる。例えば、ディスプレイ 328 は、内部デバイスバス通信を介してまたは少なくとも1つのネットワーク接続を介して受信デバイス 326 と通信するように構成され得る。

【0062】

[0054] 例示の実施形態によれば、ディスプレイ 328 は、フラットスクリーンディスプレイ、印刷形態のディスプレイ、2次元ディスプレイ、3次元ディスプレイ、静的ディスプレイ、ムービングディスプレイ、触覚出力などの知覚ディスプレイ、音声出力部、およびユーザ（例えば、ユーザ 324）との通信のための任意の他の出力部として実装され得る。

【0063】

[0055] 例示の実施形態によれば、反射率表示マネージャ 306 は、反射率表示マネージャ 306 と、少なくとも1つのネットワーク 332 を介して反射率表示マネージャ 306 と通信することができる他のエンティティとの間のネットワーク通信を管理することができるネットワーク通信構成要素 330 を含むことができる。例えば、ネットワーク 332 は、インターネット、少なくとも1つのワイヤレスネットワーク、または少なくとも1つの有線のネットワークのうちの少なくとも1つを含むことができる。例えば、ネットワーク 332 は、セルラーネットワーク、無線ネットワーク、または反射率表示マネージャ 306 のデータの伝送をサポートできる任意のタイプのネットワークを含むことができる。例えば、ネットワーク通信構成要素 330 は、反射率表示マネージャ 306 と受信デバイス 326 との間のネットワーク通信を管理することができる。例えば、ネットワーク通信構成要素 330 は、ユーザインターフェース構成要素 322 と受信デバイス 326 との間のネットワーク通信を管理することができる。

【0064】

[0056] 表示発生器 340 は、得られたサンプルデータポイント 310 を使用して、マイクロファセットモデル 344 の複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式 1次元表示 342 を発生することができる。例えば、表示発生器 340 は、メモリ 320 および/または表示データベース 346 に表示 342 を記憶することができる。表示データベース 346 は、システム 300 に含まれてもよく、またはシステム 300 の外側にあってもよい。

【0065】

[0057] この文脈において、「マイクロファセット」は、レンダリングされる物体の表面の非常に小さい（すなわち、ごく小さい）ファセット（例えば、近似の反射で使用される

10

20

30

40

50

）を参照することができる。例えば、ファセットは、平坦な面（または実質的に平坦な面）を含むことができる。

【 0 0 6 6 】

[0058] この文脈において、「稠密表形式の」は、フィットする測定値のオリジナルセットのパラメトリック座標におけるサンプリング密度に比例する実質的に多くのサンプルにわたって作表することを参照することができる。例えば、ノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示は、 θ_h および θ_d の 90 サンプルと、 θ_d の 180 サンプルとによる角度測定値にフィットするとき、D、F、および G 因子の 90 サンプルに基づいて発生され得る。

【 0 0 6 7 】

[0059] 例えば、レンダリングエンジン 348 は、ノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示 342 を使用して 1 つまたは複数の画像 350 をレンダリングすることができる。例えば、レンダリングエンジン 348 は、システム 300 に含まれてもよくまたはシステム 300 の外側にあってもよいメモリ 320 および / または画像データベース 352 にレンダリング画像 350 を記憶することができる。

【 0 0 6 8 】

[0060] 例えば、複数の測定サンプルデータポイント 310 を得ることは、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含むことができる。

【 0 0 6 9 】

[0061] 例えば、複数の測定サンプルデータポイント 310 を得ることは、複数の異なる視野および光位置の下で知覚される輝度に基づいて、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含むことができる。

【 0 0 7 0 】

[0062] 例えば、表示発生器 340 は、二乗和加重を使用して計算されるフィッティングメトリックを使用してノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示 342 を発生することができる。加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイントの測定値の大きさの非定値関数を含む。

【 0 0 7 1 】

[0063] 例えば、フィッティングメトリックは、交代加重最小二乗 (AWLS) 数値技法を使用して最小化することができる。

【 0 0 7 2 】

[0064] 例えば、表示発生器 340 は、得られたサンプルデータ 310 を使用して、マイクロファセットモデル 344 の因子である 3 つの 1 次元関数を使用しているノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示 342 を発生することができる。

【 0 0 7 3 】

[0065] 例えば、因子は、角度 θ_d への反射率の依存性を表すフレネル因子 (F) と、マイクロファセット法線が表面マクロスケール法線と θ_h の角度をなす確率を表す確率分布関数である法線分布関数 (D) と、光方向の傾斜または視方向の傾斜のうちの 1 つまたは複数の関数として、マイクロ幾何形状自体へのマイクロ幾何形状シャドーイングおよび相互反射光を表す幾何学的因子 (G) とを含む。

【 0 0 7 4 】

[0066] 例えば、表示発生器 340 は、測定スペクトルの色チャンネルごとにマイクロファセットモデル 344 を独立に適用することによってノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示 342 を発生することができる。

【 0 0 7 5 】

[0067] 例えば、表示発生器 340 は、RGB (赤 / 緑 / 青) 測定スペクトルに対して、3 つのチャンネル測定値、すなわち、赤色チャンネル、緑色チャンネル、および青色チャンネルの各々として、マイクロファセットモデル 344 を独立に適用することによってノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示 342 を発生することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 6 】

[0068] 別の態様では、データ取得モジュール 3 0 8 は、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイント 3 1 0 を得ることができる。フィッティングメトリックエンジン 3 5 8 は、得られたサンプルデータポイント 3 1 0 にモデルフィッティングメトリックを適用することによって、得られたサンプルデータポイント 3 1 0 をモデルにフィットさせることができ、モデルフィッティングメトリックは、第 1 の関数と第 2 の関数の比の非負で非ゼロの累乗を使用して計算され、第 1 の関数および第 2 の関数は、複数の測定サンプルデータポイント 3 1 0 の規格化値にわたって定義され、第 1 の関数は圧縮関数として定義され、第 2 の関数は、非漸近的増加関数として定義される（すなわち、漸近的でないように増加している関数）。例えば、第 1 の関数および第 2 の関数は数式（29）および数式（30）に関して以下で論じるように定義することができる。式（29）および式（30）の例に示すように、圧縮性分子は横這い状態になるが、分母は限界なしに増加し続けることがある。

10

【 0 0 7 7 】

[0069] 例えば、「漸近の」は、変数を含む表現式が極限（例えば、無限大）に向かうとき所与の値に近づくことを指すことができる。

【 0 0 7 8 】

[0070] 例えば、得られた測定サンプルデータポイント 3 1 0 は、材料の表面の反射率を表す複数の測定サンプルデータポイント 3 1 0 を含む。

【 0 0 7 9 】

20

[0071] 例えば、モデルフィッティングメトリックは、3つの角度パラメータ表示に基づく体積形式加重を含むことができる。

【 0 0 8 0 】

[0072] 例えば、モデルフィッティングメトリックは、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数（BRDF）に基づくBRDF重要度加重を含むことができる。

【 0 0 8 1 】

[0073] 例えば、モデルフィッティングメトリックは、交代加重最小二乗（AWLS）数値技法を使用して最小化され得る。

【 0 0 8 2 】

30

[0074] 例えば、測定サンプルデータポイントは、所定の閾値よりも大きい値を有する1組のデータポイントを含む高ダイナミックレンジ（HDR）データポイントの測定サンプルを含むことができる。

【 0 0 8 3 】

[0075] 別の態様では、データ取得モジュール 3 0 8 は、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントを得ることができる。

【 0 0 8 4 】

[0076] フィッティングメトリックエンジン 3 5 8 は、得られたサンプルデータポイント 3 1 0 にフィッティングメトリックを適用することによって、複数の測定サンプルデータポイント 3 1 0 をモデルにフィットさせることができ、フィッティングメトリックは、二乗和加重を使用して計算され、二乗和加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイント 3 1 0 の測定値の大きさの非定値関数を含む。

40

【 0 0 8 5 】

[0077] 例えば、二乗和加重は、モデルの予測と実際の測定値との間の二乗差を含むことができる。

【 0 0 8 6 】

[0078] 例えば、複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含むことができる。

【 0 0 8 7 】

50

[0079] 例えば、フィッティングメトリックは複数のサブ重みを使用して計算することができ、サブ重みは、3つの角度パラメータ表示に基づく体積形式加重を含む。

【0088】

[0080] 例えば、フィッティングメトリックは複数のサブ重みを使用して計算することができ、サブ重みは、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数(BRDF)に基づくBRDF重要度加重を含む。

【0089】

[0081] 例えば、表示発生器340は、得られたサンプルデータポイント310を使用して、マイクロファセットモデル344の複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示342を発生することができる。

【0090】

[0082] 本明細書で論じる例示の技法は、実際の材料から測定された等方性BRDFのためのマイクロファセットモデルのフィッティング能力を利用することができる。本明細書で論じる例示のノンパラメトリック因子モデルは、モデルの関数構造を利用し、一方、有利にはその因子のための限られたパラメータ表示を省略することができる。例示の目的関数は、高ダイナミックレンジBRDFにおけるフィッティング誤りを測定するための圧縮性加重に基づくことができる。本明細書で論じるような例示のメトリックは、有利には、レンダリング誤差の制御を改善することができる。

【0091】

[0083] さらに、例示の数値手順(または技法)は、目的関数を最小化し、因子間に生じる依存性を処理するために使用することができる。

【0092】

[0084] 実験結果は、一般的な1D因子をもつマイクロファセットモデルが、従来のパラメトリックの手法と対照して、有利な表示力を備え、コンパクトであるにもかかわらず忠実に包括的セットの材料を捕捉することを示した。

【0093】

[0085] フォトリアリスティック画像合成は、レンダリングまたは放射輸送式の数値解ならびに表面または体積粒子での光相互作用の局所モデリングによるシーンにおける光輸送のグローバルシミュレーションを含む。局所相互作用は、反射、透過、散乱、またはサブ表面事象としてさらに分類される。グローバル光輸送シミュレーションの精度にかかわらず、合成画像は、局所モデルが現実世界材料の振舞いを忠実に捕捉しない場合、非現実的に見えることがある。

【0094】

[0086] 本明細書で論じる例示の技法によれば、表面法線のまわりの光ベクトルおよび視野ベクトルの同時回転に不変である等方性局所表面反射の制限領域を利用することができる。ここで、特定の表面ポイントの反射率を支配する4D双方向反射率分布関数(BRDF)は、3D関数に縮小する。これは、掻き傷(艶消し金属上の)または細糸(髪または布地の)のような一方向に整列した表面マイクロ幾何形状をもつ例を無視するが、依然として、広くかつ興味のある種類の一般材料を含む。

【0095】

[0087] 等方性の場合でさえ、BRDF表示は難易度が高いことがある。例えば、いくつかの従来の表示は、レンダリングシステムにおいて編集することが困難であり、記憶およびアクセスするのに高価であることがある大きい表形式データセットに依拠するか、または多くの実際の材料を正確に捕捉することができないことがあるコンパクトなパラメトリックモデルに依拠することがある。

【0096】

[0088] マイクロファセット理論は、以下でさらに論じるように、有利には、マイクロスケール幾何形状の統計的分布から導き出されるいくつかの因子の積として粗いスケールの表面の反射をモデル化しているので、この表示問題を支援することができる。少数のパラメータに関する様々な因子のための簡単な分析のモデルを定義するいくつかの実現化が提

10

20

30

40

50

案されている。しかしながら、これらの因子モデルは、広範囲の現実的な反射率を捕捉しないことがある。しかしながら、その因子で使用される特定の非常に抑制されたモデルから理論の関数構造を分離することによって、一般化表示は、有利には、現実世界反射率を捕捉するのに十分有力であるにもかかわらず依然としてコンパクトである。そのような例示の表示は、本明細書では、「ノンパラメトリック因子マイクロファセットモデル」と呼ぶことがある。

【0097】

[0089] 本明細書で論じる例示の技法は、測定BRDFからの高ダイナミックレンジ(HDR)データへのこのノンパラメトリック因子モデルのフィッティングを標準最小化問題として表すことができる。しかしながら、従来の業務で使用された最適化オブジェクティブは、結果フィットがレンダリングのために使用される場合、高い誤差をもたらすことがある。それゆえに、本明細書で論じる例示の技法は、BRDFパラメトリック体積形式(例えば、式26)および局所レンダリング積分(例えば、式28)の重要度に基づく重みと圧縮性加重(例えば、数式29)を組み合わせる例示のオブジェクティブを利用する。例えば、ロバスト統計の技法と同様に、本明細書で論じる例示の技法は、有利には、より暗いより広い区域によりよく一致させるために明るいBRDFピークにおける誤差の重要度を減少させることができる。さらに、例示の交代加重最小二乗(AWLS)ソルバは最小化を実行することができる。例えば、AWLSソルバは、テンソル近似の手法にやや類似していることがあるが、マイクロファセットモデルで生じる因子と因子変数との間の非線形依存性を取り扱う。そのような例示の技法は、速い収束を実施することが簡単であること、ランダム初期設定に対して頑強であること、および材料当たりのパラメータ微調整を必要としない状態で完全に自動的であることが可能である。そのような例示の技法は、一貫して正確であるフィットを定量的におよび視覚的に実現することができる。

【0098】

[0090] 本明細書で論じる例示のモデルは、3つの表形式IDベクトル、すなわち、シャドーイング-マスキングG、マイクロファセット分布D、およびフレネルF因子に対して各々1つ、ならびにスカラー拡散およびスベキュラ係数 σ_d および σ_s (例えば、数式21)を含むことができる。本明細書でさらに論じるように、この例示のモデルは、データの各色(RGB)チャンネルに独立にフィットされ得る。例えば、G因子の少なくとも2つの代替定式化、すなわち、例示のシャドーイングモデルを使用してDからG因子を決定するものと、データ駆動される別のものとが本明細書で論じられる。第2の方法は、より拡散する材料のうちの多くに対するフィットを改善することができるが、フィッティングコストを増加させることがある。両方の方法は、マイクロファセットの非直交であるが物理的に動機づけられた因子分解によって支配されるコンパクトなデータ駆動型モデルの能力を備えることができる。

【0099】

[0091] BRDF反射率データは、ゴニオリフレクトメータで直接捕捉することができる。サンプリング雑音および限定的な解像度は、データが画像合成で使用されることになっている場合、修正後処理を含むことができる。例えば、MERLデータセット(例えば、Matusik et al, "A data-driven reflectance model," In ACM SIGGRAPH 2003 Papers, ACM, pages 759-769を参照)は、高い角度分解能で捕捉された大きいセット(例えば、100)の等方性BRDF(例えば、150万サンプル)を含む。

【0100】

[0092] 分析BRDFモデル(例えば、パラメトリックモデル)は、データ駆動表示の代替として役立つことができるが、しかしながら、そのようなパラメトリックモデルは精度の減少をもたらすことがある。例えば、パラメトリックモデルは、MERLデータセットへの最小二乗フィットを使用して現実世界BRDFに照らして検証することができる。

【0101】

[0093] 大まかには、粗い表面からの反射のマイクロファセット理論は、大規模な反射の振舞いはマイクロ幾何学的スケールでの反射(および相互反射)の結果であることを述べ

ている。このマイクロ構造の幾何形状および材料組成は、究極的に、材料の反射率を制御し得る。マイクロファセットモデルは、マイクロ表面の特性に数学的形態を強いる。例えば、コンピュータグラフィックスでは、マイクロ幾何学的ファセット方位の統計的分布が、分析的シャドーイング・マスキング因子を導き出すのに活用され得る。

【 0 1 0 2 】

[0094] 分析的基底表示は、BRDFのコンパクトな表示を含む、リアルでインタラクティブなレンダリングで使うことができる。例えば、球面調和関数(SH)表示は、コンパクトであり、効率的な再構築およびサンプリングを行うことができるが、拡散しマイルドな光沢感のあるBRDFからの「低周波」反射率に限定され得る。例えば、ウェーブレットは、同様の効率利益をもつが、より大きいストレージコストをもつより広い範囲の反射率挙動を表す。例えば、球面放射基底関数(SRBF)が、精度、再構築、およびサンプリング効率をよりよく平衡させるためにインタラクティブレンダリングで使われる。例えば、有理関数表示が、現実世界反射率にフィットさせるために使われる。しかしながら、そのような表示は、フィットさせるのに不安定で高価となることがある。

10

【 0 1 0 3 】

[0095] 表形式「基底」表示は、BRDF表示でも使うことができる。大まかに言えば、物体のBRDFが4次元表形式データセットとして解釈される場合、テンソル近似技法は、データをよりコンパクトに因子分解し表すために利用することができる。例えば、数値代数からの技法を適用して、BRDFデータセットを因子分解することができ、異なるタイプの因子分解および集計表パラメータ表示を利用することができる。これらの手法は、現実世界反射率データへの低誤差フィットを得るために多くの因子を含むことができる。

20

【 0 1 0 4 】

[0096] 本明細書で論じる例示の技法は、マイクロファセットモデルに内在する3つのID項因子分解を利用することができ、有利には、正確でコンパクトなフィットを得ることができる。

【 0 1 0 5 】

[0097] 別の例として、インバースシェードツリーは、より簡単な1Dおよび2D因子を推測するために全体的関数構造を強化することができる。そのようなモデルは、マイクロファセット理論に基づいていない。マイクロファセット因子はすべてが独立変数の一次関数とは限らず、したがって、本明細書で論じる例示の技法は、「非直交」テンソル因子分解として解釈することができる。詳細には、因子間の非線形依存性は、シャドーイング・マスキング(G)因子の \mathbf{g}_i (または \mathbf{g})依存(例えば、数式19および数式20)から生じる。この因子は、さらに、異なる導出角の関数として毎回2度現われる。さらに、本明細書で論じる例示のモデルの1つの形態は、マイクロファセット分布因子Dの二重積分を使用して、シャドーイング・マスキング因子をはっきりと導き出すことができる。

30

【 0 1 0 6 】

[0098] 例示の加重線形回帰が以下で論じられる。

【 0 1 0 7 】

[0099] 回帰分析のためのロバスト技法は、統計および実験分析で広く普及しているが、コンピュータグラフィックス(CG)反射率モデリングは不等分散性を含むことがあり(例えば、White, H., "A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity," *Econometrica* 48, 4, (1980), pages 817-838を参照)、BRDFサンプルなどの統計変数は、それらの分散および予測測定誤差に関して異なることがある。例示の解は、加重線形回帰を含むことができ、重みは、サンプル分散に反比例する。例えば、重みは、従属変数または測定応答の一次関数(例えば、逆数または逆数の二乗)になり得る(例えば、最小二乗百分率回帰)。例えば、そのような技法は、BRDF測定値が0に近づくとき、加重が勝手に高くないことを保証する圧縮性分子によって拡大された以下で論じるような圧縮性加重で使うことができる。

40

【 0 1 0 8 】

50

[0100] 例示のマイクロファセットモデルが以下で論じられる。

【 0 1 0 9 】

[0101] 正準局所座標フレームにおいて、表面法線は、 $n = (0, 0, 1)$ で示すことができる。例えば、光方向は i で示すことができ、視方向は o で表すことができ、中間ベクトルは、それらの間の中間部であり、 $h = (i + o) / ||i + o||$ で表すことができる。これらの例ベクトルは、3D単位ベクトルである。

【 0 1 1 0 】

[0102] 等方性BRDFは、法線のまわりの中間ベクトルの回転に対して不変であり、 n 、 i 、および o から導き出される3つの角度 ($\theta_h, \theta_d, \phi_d$) によってパラメータ化され得る。中間ベクトルと法線との間の角度は、

10

【 0 1 1 1 】

【数 1 5】

$$\theta_h \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

で示すことができ、

ここで、 $\cos \theta_h = n \cdot h$ である。

20

角度

【 0 1 1 2 】

【数 1 6】

$$\theta_d \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

は、視方向または光方向と中間ベクトルとの間に形成され、 $\cos \theta_d = i \cdot h = o \cdot h$ である。さらに、角度 $\phi_d \in [0, \pi]$ は、 h のまわりの光方向の回転を示し、

30

【 0 1 1 3 】

【数 1 7】

$$\cos \phi_d = i_h^\perp \cdot n_h^\perp$$

で定義することができ、ここで、

【 0 1 1 4 】

【数 1 8】

$$u_v^\perp = \frac{u - (u \cdot v)v}{||u - (u \cdot v)v||}$$

40

は、 n 上への u の垂直投影を示す。

【 0 1 1 5 】

[0103] 光方向と法線との間の角度 θ_i と、視方向と法線との間の角度 θ_o とは、3パラメトリック角度から

$$\cos \theta_i = \cos \theta_h \cos \theta_d + \cos \theta_h \cos \theta_d \cos \phi_d \quad (19)$$

$$\cos \theta_o = \cos \theta_h \cos \theta_d - \cos \theta_h \cos \theta_d \cos \phi_d \quad (20)$$

50

を介して決定することができる。

【 0 1 1 6 】

[0104] B R D F サンプルは、 n の正の半球にあることになる、言い換えれば、 $\theta_i, \phi_i \in [0, \pi/2]$ である。例えば、上述の式は、以下で論じるパラメータ表示を使用して導き出すことができる（例えば、以下で示す等方性 B R D F パラメータ表示の例示の導出の議論において）。

【 0 1 1 7 】

[0105] このパラメータ表示が与えられると、マイクロファセットモデルは、B R D F を 3 つの I D 因子関数に関して、

【 0 1 1 8 】

【 数 1 9 】

$$\rho(\theta_h, \theta_d, \phi_d) = \rho_d + \rho_s \left(\frac{D(\theta_h)F(\theta_d)G(\theta_i)G(\theta_o)}{\cos \theta_i \cos \theta_o} \right) \quad (21)$$

を介して表す。

【 0 1 1 9 】

[0106] D 因子は、法線分布関数 (NDF) と呼ぶことができ、マイクロファセット法線がマクروسケール法線 n と θ_h の角度をなす確率を表す。F 因子は、フレネル因子と呼ぶことができ、 ρ_d パラメータにおける反射率変化をモデル化する。幾何学的因子 G は、視方向野 θ_o または光方向 θ_i の傾斜に関してシャドーイング、マスキング、および相互反射効果をモデル化する。相反性は、 i および o が交換された場合、 G が不変であることを断言し、したがって、同じ G 因子は i および o 。引数の両方に対して共有されることになることを意味する。簡明のために、表記は、拡散係数 ρ_d およびスペキュラ係数 ρ_s の定義に通常存在する ρ による割り算を省く。

【 0 1 2 0 】

[0107] マイクロファセットモデルの妥当性を試験するために、例示のナイーブモデルは、

$$\rho(\theta_h, \theta_d, \phi_d) = \rho_d + \rho_s D(\theta_h) F(\theta_d) H(\theta_d) \quad (22)$$

として定義することができ、それは、パラメータ表示変数に関して直接因子分解する。

【 0 1 2 1 】

[0108] 例えば、ユーザは、100個の異なる等方性材料の測定値を記憶している M E R L データベースにフィットさせることができる。各材料測定値は、R G B 色チャネルごとに、角度サンプリング $90 \times 90 \times 180$ をもつ $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ パラメータ空間の均一にサンプリングされた 3 D ブロックに記憶される。 θ_h 次元は、さらに、

【 0 1 2 2 】

【 数 2 0 】

$$\theta'_h = \sqrt{\theta_h}. \quad (23)$$

を介して変換され、それは、スペキュラハイライトの領域において 0 に近いより高密度のサンプリングを与える。 θ'_h は、

【 0 1 2 3 】

【 数 2 1 】

$$\left[0, \sqrt{\pi/2} \right]$$

10

20

30

40

50

において均一にサンプリングされる。

【 0 1 2 4 】

[0109] 数式 (2 1) の例示のモデルは、各色チャネル測定値を別々にフィットさせるように適用することができる。色チャネルごとに、ユーザは、各々が 9 0 個の成分 (サンプルリングされた因子関数 D、F、および G を表す) と、2 つのスカラー (α_d および α_s) とを含む 3 つのベクトルについて解くことができる。

【 0 1 2 5 】

[0110] ノンパラメトリックマイクロファセット因子をフィットさせるための例示の技法が、以下で論じられる。

【 0 1 2 6 】

[0111] 例示のフィッティングオブジェクティブ (例えば、「フィッティングメトリック」の議論における) の議論において、以下の合計が、j でインデックス付けされたすべての測定 B R D F サンプルにわたって最小化することができる、

$$F = \sum_j w_j \left(\left(\alpha_h, \alpha_d, \alpha_s \right)_j - \mathbf{j}^* \right)^2 \quad (24)$$

ここで、 \mathbf{j}^* は測定 B R D F サンプルであり、 $(\alpha_h, \alpha_d, \alpha_s)_j$ はパラメトリック座標を表し、 α は数式 (2 1) から評価される。重み w_j は、

$$w_j = w_v \left(\alpha_h, \alpha_d, \alpha_s \right)_j w_I \left(\alpha_h, \alpha_d, \alpha_s \right)_j w_c \left(\mathbf{j}^* \right) \quad (25)$$

を介して 3 つのサブ重みの積によって与えることができる。

【 0 1 2 7 】

[0112] 3 つの例示のサブ重みは、以下でさらに論じられる。これらの定義におけるグローバル定数は、最小化に影響を与えないことがあり、無視されることがあることに留意されたい。

【 0 1 2 8 】

[0113] 体積形式加重が以下で論じられる。

【 0 1 2 9 】

[0114] 第 1 のサブ重みは、等方性 B R D F の 3 つの角度パラメータ表示から生じ、

【 0 1 3 0 】

【数 2 2 】

$$w_V = \sqrt{8 \sin^2 \theta_d (\cos^2 \theta_d + \sin^2 \theta_d \cos^2 \phi_d)} d\theta_h d\theta_d d\phi_d. \quad (26)$$

として示すことができる。

【 0 1 3 1 】

[0115] 本明細書で論じるような例示の加重は、 $(\alpha_h, \alpha_d, \alpha_s)$ パラメータ空間と、単位方向の対の (i, o) 出力空間との間の写像化の体積形式によって決定することができる。この式の例示の導出は、等方性 B R D F のパラメトリック加重の例示の導出において以下で論じられる。B R D F パラメータ表示は α_h ではなく α_h' に関するので、数式 (2 3) は、

【 0 1 3 2 】

【数 2 3 】

$$d\theta_h = 2 \theta_h' d\theta_h' = 2 \sqrt{\theta_h} d\theta_h'. \quad (27)$$

を意味する。

【 0 1 3 3 】

[0116] B R D F 重要度加重が以下で論じられる。

【 0 1 3 4 】

[0117] 第2のサブ重みは、

$$w_i = \cos \theta_i \cos \theta_o \quad (28)$$

として示すことができる。

【0135】

[0118] $\cos \theta_i$ 因子が生じるが、その理由は、それが局所シェーディング積分において入射照明方向にわたってBRDFを掛け算するからである。 $\cos \theta_o$ 因子は相反対称性のために含まれており、その理由は、表面ポイントの法線が視方向と合致したとき表面ポイントが現われる可能性が高いからである。

【0136】

[0119] 例示の圧縮性加重技法が以下で論じられる。

【0137】

[0120] より大きい規模のBRDFサンプルではより多くの測定誤差が予測され得るので、最終サブ重みが生じ得る。例えば、ユーザは、低い値 ρ_j^* ほどには高い値 ρ_j^* をフィットさせようとしないと決めてもよい。このサブ重みは、

【0138】

【数24】

$$w_C = \left(\frac{f(\rho_j^*/\bar{\rho})}{\rho_j^*/\bar{\rho}} \right)^p \quad (29)$$

10

20

として示すことができ、ここで、 f は、

【0139】

【数25】

$$f(x; \alpha) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha x}) \quad (30)$$

の形態の圧縮関数であり、

【0140】

【数26】

$\bar{\rho}$

30

は、積 $w_v w_i$ によって与えられる重みをもつBRDFの加重中央値である。加重累乗 p は、例えば、範囲 $[1, 2]$ において選択され得るパラメータである。 p の値が大きいほど、BRDFの明るい部分に比べてBRDFのより暗い部分に割り当てられ得る重み値は高くなる。例えば、値 $p = 1.4$ がフィットのために固定され得る。

【0141】

[0121] 図4は、本明細書で論じる例示の技法による、例示の圧縮関数のグラフ図400である。数式(30)の圧縮関数は、すべての非負の実数 x を有限区間 $[0, 1/\alpha]$ に写像化する。 α の値が大きいほど、変換は圧縮性になる、すなわち、より高い値は、 $1/\alpha$ の関数漸近線の近くに押し込まれる。例えば、図4に示すように、曲線402は $\alpha = 1$ での $f(x; \alpha)$ を示し、曲線404は $\alpha = 2$ での $f(x; \alpha)$ を示し、曲線406は $\alpha = 3$ での $f(x; \alpha)$ を示す。本明細書で論じる例示の技法によれば、 $\alpha = 1 \log 2$ の値が、BRDF加重中央値を出力範囲の中心に（すなわち、 $1/2$ に）写像化するために、固定され得る。

【0142】

40

50

[0122] $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)/x = 1$ であることに留意されたい。
 それゆえに、 w_c の最大値は 1 である。

それは、

【 0 1 4 3 】

【数 2 7】

$$x = \rho_j^* / \bar{\rho} = 0$$

におけるこの最大値から、BRDF 値 ρ_j^* につれて 0 まで単調に減少する。測定値
 逆数による加重の例示のより単純な代替 $w_c = (\rho_j^*)^{-p}$ と同様に、 $\rho_j^* \rightarrow 0$ にな
 るにつれて重みが勝手に大きくなることの困難さが無い。0 から離れると、この圧縮性加
 重方式は、より単純な方式と実質的に同様となる。

【 0 1 4 4 】

[0123] 例示のフィッティング技法が以下で論じられる。

【 0 1 4 5 】

[0124] A W L S は、過程が収束するまで繰り返して各因子を順々に更新する反復手順で
 ある。単一の因子を更新するために、他のものすべてを一定に保持することができ、次に
 、手順は、単一の因子の最適加重最小二乗値について解くことができ、その結果、反復は
 、オブジェクティブの「ダウンヒル」に向かう。各因子は、1 D サンプリングされた関数
 を表す多数の成分を含む。各因子成分をどのように計算できるかの説明として、例示の簡
 単化したオブジェクティブは、

$$F(x) = \sum_j w_j (z_j - x y_j)^2 \quad (31)$$

として示すことができ、ここで、 x は、解かれるべき個々の因子成分を表す。最小解は、

【 0 1 4 6 】

【数 2 8】

$$x = \frac{\sum_j w_j y_j z_j}{\sum_j w_j y_j^2}. \quad (32)$$

として示すことができる。

【 0 1 4 7 】

[0125] 各因子成分「ピン」において、上述の分子と分母とを表す加重和は、そこに写像
 するすべての BRDF サンプルにわたって蓄積され得る。次に、成分の最適値は、数式 (32)
) において割り算によって与えることができる。

【 0 1 4 8 】

[0126] a および b について解くために、簡単化したオブジェクティブ、すなわち、

$$F(a, b) = \sum_j w_j (a x_j + b - y_j)^2 \quad (33)$$

に対する最適解は、クラメル規則、すなわち、

【 0 1 4 9 】

【数 2 9】

$$a = \frac{\left\| \begin{matrix} \sum_j w_j y_j & \sum_j w_j x_j \\ \sum_j w_j x_j y_j & \sum_j w_j x_j^2 \end{matrix} \right\|}{\left\| \begin{matrix} \sum_j w_j & \sum_j w_j x_j \\ \sum_j w_j x_j & \sum_j w_j x_j^2 \end{matrix} \right\|} \quad (34)$$

【 0 1 5 0 】

【数 3 0】

$$b = \frac{\left\| \begin{matrix} \sum_j w_j & \sum_j w_j y_j \\ \sum_j w_j x_j & \sum_j w_j x_j y_j \end{matrix} \right\|}{\left\| \begin{matrix} \sum_j w_j & \sum_j w_j x_j \\ \sum_j w_j x_j & \sum_j w_j x_j^2 \end{matrix} \right\|} \quad (35)$$

によって計算できることに留意されたい。

【 0 1 5 1】

[0127] 最適の $b < 0$ である場合、それは 0 に固定することができ、以下の（より簡単な）式を適用して、

10

【 0 1 5 2】

【数 3 1】

$$\alpha = \frac{\sum_j w_j x_j y_j}{\sum_j w_j x_j^2}. \quad (36)$$

を介して最適 を決定することができる。

【 0 1 5 3】

[0128] 最適化は、数式（3 2）を使用して各因子成分（例えば、D または F）を更新することによって進むことができ、次に、数式（3 4）および数式（3 5）の a および b になる s および d を更新することができる。

20

【 0 1 5 4】

[0129] より詳細には、ユーザは、因子 D を更新したいことがある。他の因子ならびに d および s は、一定に保持することができる。例えば、D の成分は、その引数（ h ） k の特定の値に対応する k によってインデックス付けされると仮定し、 h 座標が（ h ） k に写像するすべての B R D F サンプルのパラメトリック場所は、（ d , d , i , o ） k_j によってインデックス付けされると仮定すると、次に、 D_k を更新するために、 j によってインデックス付けされた加重連立方程式の最小二乗最善解は、

【 0 1 5 5】

30

【数 3 2】

$$\rho_{kj}^* = \rho_d + \rho_s \frac{D_k [F(\theta_d)]_{kj} [G(\theta_i)]_{kj} [G(\theta_o)]_{kj}}{[\cos \theta_i \cos \theta_o]_{kj}}, \quad (37)$$

として決定することができ、ここで、すでに述べたように、数式 j は、 w_j によって加重される。例示の最適解は、

【 0 1 5 6】

【数 3 3】

40

$$\begin{aligned} x &= D_k, \\ z_j &= \rho_{kj}^* - \rho_d, \\ y_j &= \rho_s \frac{[F(\theta_d)]_{kj} [G(\theta_i)]_{kj} [G(\theta_o)]_{kj}}{[\cos \theta_i \cos \theta_o]_{kj}}. \end{aligned} \quad (38)$$

を用いて式（1 3）によって与えられる。

50

【 0 1 5 7 】

[0130] F 因子は同様に更新することができ、ならびにナイーブモデルの H 因子は同様に更新することができる。

【 0 1 5 8 】

[0131] G は、独立した表形式因子として扱われてもよく、またはシャドーイングモデルを使用して D から導き出してもよい。G または数式 (2 1) の余弦因子を評価するとき、直線補間を μ_i または μ_o 空間において適用することができる。これは、D および F では避けられることがあり、その理由は、すべての B R D F サンプル μ_j^* が、 μ_h' および μ_d において均一にパラメータ化され、対応するベクトル成分上に写像するからである。

【 0 1 5 9 】

[0132] D からの G の決定は、緩和において非線形依存を導入し、その結果、解かれた D はもはや最適ではない。この問題は、例示の A W L S ステップを使用して D を計算し、それから G を導き出し、次に、目的関数が減少したかどうかをはっきりとチェックすることによって対処することができる。そうでない場合、簡単な 1 D 最小化は、D の以前の状態から D の新しい状態までラインに沿ってオブジェクティブを減少させる黄金分割探索 (G S) に基づいて適用され得る。

【 0 1 6 0 】

[0133] G は、二重積分を介して D から計算することができる。

$$G(\mu) = (1 + (\cot \mu))^{-1} \quad (39)$$

【 0 1 6 1 】

【 数 3 4 】

$$\Lambda(\mu) = \frac{1}{\mu} \int_{\tan^{-1} \mu}^{\pi} (\tan \omega - \mu)(1 - \tan^2 \omega) p_2(\tan \omega) d\omega \quad (40)$$

【 0 1 6 2 】

【 数 3 5 】

$$p_2(r) = 2 \int_0^{\pi} p_{22}(r^2 + \tan^2 \psi)(\tan^2 \psi + 1) d\psi \quad (41)$$

【 0 1 6 3 】

【 数 3 6 】

$$p_{22}(u) = D(\tan^{-1} \sqrt{u}) \cos^4(\tan^{-1} \sqrt{u}) \quad (42)$$

【 0 1 6 4 】

[0134] これらの式は、変数 $\mu = \tan^{-1} q$ 、 $\mu = \tan^{-1} r$ 、および $u = \tan^2 \mu_h$ を使用して導き出すことができる。上述の積分を数値的に評価するために、精度は、15 ポイントを用いるガウス求積法を使用して得ることができる。表形式 D 関数は、直線補間を使用して評価することができる。

【 0 1 6 5 】

[0135] G をはっきりと解くことは、不自明な依存性も導入する。他の 2 つの因子と異なり、それは、マイクロファセットモデルにおいて 2 度現われる。本明細書で論じる例示の技法によれば、簡単な発見的方法が、それについて解くために適用され得る。例えば、2 つの因子が $G_i = G(\mu_i)$ および $G_o = G(\mu_o)$ で示される場合、例示の A W L S 更新ステップが、他のものを (ならびに D 因子および F 因子と、 μ_s および μ_d スカラーとを) 一定に保持して、別々に各々について解くために使用され得る。次に、これらの 2 つの結果を平均化することができ、簡単なガウス平滑フィルタを適用することができる。この手順は、それが収束するまで反復することができる。次に、オブジェクティブが増加するかどうかを決定することができ、そうならば、D から G の場合のように G S S 更新を適

10

20

30

40

50

用することができる。

【 0 1 6 6 】

【0136】 例示の独立したGの解のために、式(3)の余弦因子は一般的なG因子に吸収され得るという意味で余剰であることに留意されたい。本明細書で論じる例示の技法によれば、それらは、G因子が2つの方法間で比較できるように保持され得る。

【 0 1 6 7 】

【0137】 物理的に妥当性のあるダイナミックレンジを保証するために、各因子成分は、区間[, 1]に固定することができ、ここで、 $= 1 \times 10^{-6}$ である。例えば、そのようなDR固定化は、独立したGのフィッティングで使用することができ、独立したGのフィッティングは、独立に解かれた4つの因子(s 、D、F、G)の積を含む。DR固定化なしでは、ユーザは、 s の実質的に大きい値と、ほぼゼロの因子成分における小さい変化の重要度の膨張を経験することがある。

10

【 0 1 6 8 】

【0138】 多くの異なる技法が、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなく体積形式加重で使用され得ることを当業者は理解されよう。

【 0 1 6 9 】

III. 流れ図の説明

【0139】 本明細書で論じる特徴は、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなく、データ処理の当技術分野なら理解することができる多くの異なる方法で実装できる例示の実施形態として提供される。そのような特徴は、例示の実施形態の特徴としてのみ解釈されるべきであり、それらの詳細な説明のみに限定すると解釈されるようには意図されない。

20

【 0 1 7 0 】

【0140】 図5A～図5Cは、例示の実施形態による、図3のシステムの例示の動作を示す流れ図である。図5Aの例では、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントを得ることができる(502)。

【 0 1 7 1 】

【0141】 得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生することができる(504)。

【 0 1 7 2 】

【0142】 例えば、ノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を使用して1つまたは複数の画像をレンダリングすることができる(506)。

30

【 0 1 7 3 】

【0143】 例えば、複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含むことができる(508)。

【 0 1 7 4 】

【0144】 例えば、図5Bの例では、複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、複数の異なる視野および光位置の下で知覚される輝度に基づいて、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含むことができる(510)。

40

【 0 1 7 5 】

【0145】 例えば、二乗和加重を使用して計算されるフィッティングメトリックを使用してノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生することができ、ここで、加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイントの測定値の大きさの非定値関数を含む(512)。

【 0 1 7 6 】

【0146】 例えば、フィッティングメトリックは、交代加重最小二乗(AWLS)数値技法を使用して最小化される(514)。

【 0 1 7 7 】

【0147】 例えば、表示発生器は、得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロ

50

ファセットモデルの因子である 3 つの 1 次元関数を使用しているノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生することができる (5 1 6)。

【 0 1 7 8 】

[0148] 図 5 C の例では、例えば、因子は、拡がり角 θ_d への反射率の依存を表すフレネル因子 (F) と、マイクロファセット法線が表面マクロスケール法線と θ_h の角度をなす確率を表す確率分布関数である法線分布関数 (D) と、光方向の傾斜または視方向の傾斜のうちの 1 つまたは複数の関数として、マイクロ幾何形状自体へのマイクロ幾何形状シャドーイングおよび相互反射光を表す幾何学的因子 (G) とを含む (5 1 8)。

【 0 1 7 9 】

[0149] 例えば、測定スペクトルの色チャンネルごとにマイクロファセットモデルを独立に適用することによってノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生することができる (5 2 0)。

【 0 1 8 0 】

[0150] 例えば、R G B (赤 / 緑 / 青) 測定スペクトルに対して、3 つのチャンネル測定値、すなわち、赤色チャンネル、緑色チャンネル、および青色チャンネルの各々として、マイクロファセットモデルを独立に適用することによってノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生することができる (5 2 2)。

【 0 1 8 1 】

[0151] 図 6 A ~ 図 6 B は、例示の実施形態による、図 3 のシステムの例示の動作を示す流れ図である。図 6 A の例では、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントを得ることができる (6 0 2)。

【 0 1 8 2 】

[0152] 得られたサンプルデータポイントにモデルフィッティングメトリックを適用することによって測定サンプルデータポイントをモデルにフィットさせることができ、モデルフィッティングメトリックは第 1 の関数と第 2 の関数の比の非負で非ゼロの累乗を使用して計算され、第 1 の関数および第 2 の関数は複数の測定サンプルデータポイントの規格化値にわたって定義され、第 1 の関数は圧縮関数として定義され、第 2 の関数は非漸近的増加関数として定義される (6 0 4)。

【 0 1 8 3 】

[0153] 例えば、得られた測定サンプルデータポイントは、材料の表面の反射率を表す複数の測定サンプルデータポイントを含むことができる (6 0 6)。

【 0 1 8 4 】

[0154] 例えば、モデルフィッティングメトリックは、3 つの角度パラメータ表示に基づく体積形式加重を含むことができる (6 0 8)。

【 0 1 8 5 】

[0155] 図 6 B の例では、例えば、モデルフィッティングメトリックは、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数 (BRDF) に基づく B R D F 重要度加重を含むことができる (6 1 0)。

【 0 1 8 6 】

[0156] 例えば、モデルフィッティングメトリックは、交代加重最小二乗 (AWLS) 数値技法を使用して最小化され得る (6 1 2)。

【 0 1 8 7 】

[0157] 例えば、測定サンプルデータポイントは、所定の閾値よりも大きい値を有する 1 組のデータポイントを含む高ダイナミックレンジ (HDR) データポイントの測定サンプルを含むことができる (6 1 4)。

【 0 1 8 8 】

[0158] 図 7 A ~ 図 7 B は、例示の実施形態による、図 3 のシステムの例示の動作を示す流れ図である。図 7 A の例では、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントを得ることができる (7 0 2)。

【 0 1 8 9 】

10

20

30

40

50

[0159] 得られたサンプルデータポイントにフィッティングメトリックを適用することによって測定サンプルデータポイントをモデルにフィットさせ、フィッティングメトリックは二乗和加重を使用して計算され、二乗和加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイントの測定値の大きさの非定値関数を含む(704)。

【0190】

[0160] 例えば、二乗和加重は、モデルの予測と実際の測定値との間の二乗差を含むことができる(706)。

【0191】

[0161] 例えば、複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含むことができる(708)。

10

【0192】

[0162] 図7Bの例では、例えば、フィッティングメトリックは複数のサブ重みを使用して計算することができ、サブ重みは3つの角度パラメータ表示に基づく体積形式加重を含む(710)。

【0193】

[0163] 例えば、フィッティングメトリックは複数のサブ重みを使用して計算することができ、サブ重みは入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数(BRDF)に基づくBRDF重要度加重を含む(712)。

【0194】

20

[0164] 例えば、得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生することができる(714)。

【0195】

IV. 等方性BRDFパラメータ表示の導出

[0165] 一般に、球面座標系は3次元空間の座標系であり、ポイントの位置は3つの値、すなわち、固定原点からのそのポイントの半径方向距離と、固定頂点方向から測ったその極角と、原点を通過し、頂点と直交する基準面へのその正射影の、その面の固定基準方向から測った方位角とによって指定される。

【0196】

30

[0166] したがって、方位角は、球面座標系における角度測定値とすることができる。観察者(基点)から注目するポイントまでのベクトルは、基準面上に垂直に投影することができ、基準面上の投影ベクトルと基準ベクトルとの間の角度は、方位角と呼ぶことができる。

【0197】

[0167] この導出において、正準座標系は、法線面法線 $n = z = (0, 0, 1)$ と、 $z \times$ 面、すなわち、 $y = (0, 1, 0)$ に垂直な面における中間ベクトル h が仮定されている。言い換えれば、中間ベクトルの方位角は $\theta_h = 0$ である。

【0198】

[0168] 次に、中間方向は、 $\theta_h \in [0, \pi/2]$

40

$$h = z \cos \theta_h + x \sin \theta_h \quad (43)$$

によってパラメータ化することができ、垂直方向(さらに、 $z \times$ 面における)は、

$$h^* = z \sin \theta_h - x \cos \theta_h \quad (44)$$

によってパラメータ化することができる。

【0199】

[0169] この正規直交座標フレームを完成するには、

$$h^* = h \times h = -y \quad (45)$$

である。

【0200】

[0170] 次に、光方向は、

50

$i = h \cos \theta_d + (h \cos \theta_d + h^* \sin \theta_d) \sin \theta_d$ (46)
 であり、視方向は、

$o = h \cos \theta_d - (h \cos \theta_d + h^* \sin \theta_d) \sin \theta_d$ (47)
 であり、 $\theta_d \in [0, \pi/2]$ および $\theta_d \in [0, \pi]$ によってパラメータ化される（それは冗長な逆数対を除去する）。「入力」および「出力」としての2つの方向の標識付けは、相反性のために入れ替えることができることに留意されたい。成分を完全に書くと、

$$\begin{aligned} i_x &= \sin \theta_h \cos \theta_d - \cos \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d & (48) \\ i_y &= -\sin \theta_d \sin \theta_d \\ i_z &= \cos \theta_h \cos \theta_d + \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d \\ o_x &= \sin \theta_h \cos \theta_d + \cos \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d \\ o_y &= \sin \theta_d \sin \theta_d \\ o_z &= \cos \theta_h \cos \theta_d - \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d \end{aligned}$$

10

となる。

【0201】

[0171] したがって、イン/アウト方向の仰角の余弦は、

$$\cos \theta_i = i_z = \cos \theta_h \cos \theta_d + \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d \quad (49)$$

$$\cos \theta_o = o_z = \cos \theta_h \cos \theta_d - \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \theta_d$$

であり、方位角の正接は、

【0202】

20

【数37】

$$\tan \phi_i = \frac{i_y}{i_x} = \frac{-\sin \phi_d \sin \theta_d}{\sin \theta_h \cos \theta_d - \cos \theta_h \cos \phi_d \sin \theta_d} \quad (50)$$

$$\tan \phi_o = \frac{o_y}{o_x} = \frac{\sin \phi_d \sin \theta_d}{\sin \theta_h \cos \theta_d + \cos \theta_h \cos \phi_d \sin \theta_d}$$

30

である。

【0203】

[0172] 逆写像を実行するために、最初に、中間ベクトルを、 $z \times$ 面にある（ o_y 成分を有する）

$$h = (i + o) / ||i + o|| \quad (51)$$

として計算することができる。次に、

$$h = (-h_z, 0, h_x) \quad (52)$$

である。

【0204】

[0173] したがって、オリジナルパラメトリック角度は、

40

【0205】

【数 3 8】

$$\cos \theta_h = h_z$$

$$\cos \theta_d = \mathbf{i} \cdot \mathbf{h} = \mathbf{o} \cdot \mathbf{h}$$

$$\sin \theta_d = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_d} \quad (53)$$

$$\cos \phi_d = \frac{\mathbf{i} \cdot \mathbf{h}^\perp}{\sin \theta_d}$$

$$\sin \phi_d = \frac{\mathbf{i} \cdot \mathbf{h}^*}{\sin \theta_d} = \frac{-i_y}{\sin \theta_d}$$

10

を介して推測することができる。

【0 2 0 6】

[0174] 一般の場合には、中間ベクトルの方位角は 0 ではない、すなわち、 $\theta_h \neq 0$ である。パラメトリック座標からイン / アウト方向への変換には、3 D 回転の

20

【0 2 0 7】

【数 3 9】

$$R(\phi_h) = \begin{bmatrix} \cos \phi_h & -\sin \phi_h & 0 \\ \sin \phi_h & \cos \phi_h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (54)$$

を介して z のまわりの i および o の両方の追加回転が含まれる。

【0 2 0 8】

30

[0175] 一般的イン / アウト方向からパラメトリック座標に変換するために、

【0 2 0 9】

【数 4 0】

$$\phi_h = \tan^{-1} \left(\frac{h_y}{h_x} \right)$$

を最初に決定することができ、次に、上述の行列の逆行列によってイン / アウト方向を回転させる、 $R^T(\phi_h)$ 。これは、中間ベクトルが z x 面にあること、および数式 (53) の以前の式があてはまることを保証することができる。

40

【0 2 1 0】

V. 等方性 B R D F のためのパラメトリック加重の導出

[0176] 上述で導き出したように、等方性 B R D F は、3 つの角度、 θ_h 、 θ_d 、および ϕ_d によってパラメター化することができ、3 つの角度は、

$$i_x = \sin \theta_h \cos \theta_d - \cos \theta_h \cos \theta_d \sin \phi_d \quad (56)$$

$$i_y = -\sin \theta_d \sin \phi_d$$

$$i_z = \cos \theta_h \cos \theta_d + \sin \theta_h \cos \theta_d \sin \phi_d$$

$$o_x = \sin \theta_h \cos \theta_d + \cos \theta_h \cos \theta_d \sin \phi_d$$

50

$$o_y = \sin \theta_d \sin \theta_h$$

$$o_z = \cos \theta_h \cos \theta_d - \sin \theta_h \sin \theta_d \cos \phi_d$$

を介してイン（光）方向およびアウト（視）方向を決定する。

【 0 2 1 1 】

[0177] $T(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ が、 $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ パラメータ空間（3D入力空間）から (i, o) 出力空間（6D入力空間）に行く上述の変換を示すことにする。次に、上述のパラメータ表示によって誘導される体積形式 d は、

【 0 2 1 2 】

【数 4 1】

$$d\Omega = \sqrt{\det(\partial T^T \partial T)} d\theta_h d\theta_d d\phi_d \quad (57)$$

10

として示すことができ、ここで、 T は変換 T の (6×3) ヤコビアンである。積 $g = T^T T$ は変換の (3×3) メトリックテンソルであり、その行列式の平方根は座標変換後の体積形式を拡大縮小する。

【 0 2 1 3 】

[0178] 導関数を取り、評価すると、

【 0 2 1 4 】

【数 4 2】

20

$$g = \begin{bmatrix} 2(\cos^2 \theta_d + \sin^2 \theta_d \cos^2 \phi_d) & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \sin^2 \theta_d \end{bmatrix} \quad (58)$$

であり、そこで、

【 0 2 1 5 】

【数 4 3】

30

$$d\Omega = \sqrt{\det g} d\theta_h d\theta_d d\phi_d = \sqrt{8 \sin^2 \theta_d (\cos^2 \theta_d + \sin^2 \theta_d \cos^2 \phi_d)} d\theta_h d\theta_d d\phi_d \quad (59)$$

である。

【 0 2 1 6 】

[0179] これは θ_h に依存しないことに留意されたい。

【 0 2 1 7 】

[0180] パラメータ表示が θ_h 自体ではなく

【 0 2 1 8 】

【数 4 4】

40

$$\theta_h' = \sqrt{\theta_h}$$

の観点からである場合、

50

$d_h = 2 \quad h' \quad d_h' \quad (60)$
である。

【0219】

[0181] 微分容積は、各パラメータ表示ピンの中心で評価することができ、またはより正確には、数値積分を介してピン全体にわたって平均化することができる。

【0220】

[0182] さらに、BRDF サンプルの重要度は、

$$w = \max(0, \cos \theta_i) \max(0, \cos \theta_o) = \max(0, i_z) \max(0, \cos \theta_o) \quad (61)$$

をさらに掛けることができ、その理由は、表面の単位面積当たり観察者に反射された光の
10 パワーは、これらの因子に依存するからである。

【0221】

VI. いくつかの実施形態の態様

[0183] 本明細書で論じる特徴は、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなく、データ処理の当技術分野なら理解することができる多くの異なる方法で実装できる例示の実施形態として提供される。そのような特徴は例示の実施形態の特徴としてのみ解釈されるべきであり、それらの詳細な説明のみに限定すると解釈されるようには意図されない。

【0222】

[0184] 例えば、システムは、実行可能コードを記憶するコンピュータ可読記憶媒体を含む装置を含み、実行可能コードは、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントを得るデータ取得モジュールを含む反射率表示マネージャを含む。表示発生器は、得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生する。
20

【0223】

[0185] 表示発生器は、得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生する。

【0224】

[0186] 複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含む。

【0225】

[0187] 複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、複数の異なる視野および光位置の下で知覚される輝度に基づいて、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含む。
30

【0226】

[0188] 表示発生器は、二乗和加重を使用して計算されるフィッティングメトリックを使用してノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生し、ここで、加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイントの測定値の大きさの非定値関数を含む。

【0227】

[0189] フィッティングメトリックは、交代加重最小二乗(AWLS)数値技法を使用して最小化される。
40

【0228】

[0190] 表示発生器は、得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの因子である3つの1次元関数を使用しているノンパラメトリック稠密表形式1次元表示を発生する。

【0229】

[0191] 因子は、拡がり角 θ_d への反射率の依存を表すフレネル因子(F)と、マイクロファセット法線が表面マクロスケール法線と θ_h の角度をなす確率を表す確率分布関数である法線分布関数(D)と、光方向の傾斜または視方向の傾斜のうちの1つまたは複数の関数として、マイクロ幾何形状自体へのマイクロ幾何形状シャドーイングおよび相互反射光を表す幾何学的因子(G)とを含む。
50

【 0 2 3 0 】

[0192] 表示発生器は、測定スペクトルの色チャンネルごとにマイクロファセットモデルを独立に適用することによってノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生する。

【 0 2 3 1 】

[0193] R G B (赤 / 緑 / 青) 測定スペクトルに対して、3つのチャンネル測定値、すなわち、赤色チャンネル、緑色チャンネル、および青色チャンネルの各々として、マイクロファセットモデルを独立に適用することによってノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示を発生する。

【 0 2 3 2 】

[0194] 例えば、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントが得られる。測定サンプルデータポイントは、得られたサンプルデータポイントにモデルフィッティングメトリックを適用することによってモデルにフィットされ、モデルフィッティングメトリックは、第 1 の関数と第 2 の関数の比の非負で非ゼロの累乗を使用して計算され、第 1 の関数および第 2 の関数は、複数の測定サンプルデータポイントの規格化値にわたって定義され、第 1 の関数は圧縮関数として定義され、第 2 の関数は非漸近的増加関数として定義される。

10

【 0 2 3 3 】

[0195] 得られた複数の測定サンプルデータポイントは、材料の表面の反射率を表す複数の測定サンプルデータポイントを含む。

【 0 2 3 4 】

[0196] モデルフィッティングメトリックは、3つの角度パラメータ表示に基づく体積形式加重を含む。

20

【 0 2 3 5 】

[0197] モデルフィッティングメトリックは、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数 (BRDF) に基づく B R D F 重要度加重を含む。

【 0 2 3 6 】

[0198] モデルフィッティングメトリックは、交代加重最小二乗 (AWLS) 数値技法を使用して最小化される。

【 0 2 3 7 】

[0199] 測定サンプルデータポイントは、所定の閾値よりも大きい値を有する 1 組のデータポイントを含む高ダイナミックレンジ (HDR) データポイントの測定サンプルを含む。

30

【 0 2 3 8 】

[0200] 例えば、材料の表面の反射率に関連する複数の測定サンプルデータポイントが得られる。測定サンプルデータポイントは、得られたサンプルデータポイントにフィッティングメトリックを適用することによってモデルにフィットされ、フィッティングメトリックは、二乗和加重を使用して計算され、二乗和加重は、得られた複数の測定サンプルデータポイントの測定値の大きさの非定値関数を含む。

【 0 2 3 9 】

[0201] 二乗和加重は、モデルの予測と実際の測定値との間の二乗差を含む。

【 0 2 4 0 】

[0202] 複数の測定サンプルデータポイントを得ることは、表面のポイントの輝度の様子の測定値を表す複数の測定サンプルデータポイントを得ることを含む。

40

【 0 2 4 1 】

[0203] フィッティングメトリックは複数のサブ重みを使用して計算され、サブ重みは、3つの角度パラメータ表示に基づく体積形式加重を含む。

【 0 2 4 2 】

[0204] フィッティングメトリックは複数のサブ重みを使用して計算され、サブ重みは、入射照明方向にわたる局所シェーディング積分における双方向反射率分布関数 (BRDF) に基づく B R D F 重要度加重を含む。

【 0 2 4 3 】

50

[0205] 得られたサンプルデータポイントを使用して、マイクロファセットモデルの複数の因子のノンパラメトリック稠密表形式 1 次元表示が発生される。

【 0 2 4 4 】

[0206] データ処理の当業者は、本明細書の議論の趣旨から逸脱することなく反射率表示を決定する多くの方法があり得ることを理解されよう。

【 0 2 4 5 】

[0207] 顧客プライバシーおよび機密性は、長年、データ処理環境において継続している考慮事項である。したがって、反射率表示を決定するための例示の技法は、ユーザ入力、および / または関連する適用業務またはそのような技法に関連するサービスとの 1 つまた複数の申込み契約（例えば、「サービス利用規約」（TOS）契約）を介して提供許可を有するユーザによって提供されたデータを使用することができる。例えば、ユーザは、ユーザの入力 / データをデバイスに送信し記憶させることに同意することができるけれども、送信および / または記憶がどのように行われるかを各当事者が制御できること、およびもしあれば、記憶のどのレベルまたは期間が維持され得るかをはっきりと表示することができる（例えば、ユーザ同意を介して）。さらに、ユーザによって使用されるデバイスを識別するために使用され得る識別名は、例えば、実際のユーザ情報をハッシュすることによって分かりにくくすることができる。いかなるユーザ入力 / データも任意の関連する管轄権のプライバシーおよび規則に従って得られ得ることを理解されたい。

【 0 2 4 6 】

[0208] 本明細書で説明する様々な技法の実施態様は、デジタル電子回路で、またはコンピュータハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアで、またはそれらの組合せ（例えば、様々な機能を実行するために命令を実行するように構成された装置）で実装することができる。

【 0 2 4 7 】

[0209] 実施態様は、信号（例えば、純粋な伝搬信号などの純粋な信号）で具現されたコンピュータプログラムとして実装することができる。そのような実施態様は、本明細書では、以下で論じるように「コンピュータ可読記憶媒体」または「コンピュータ可読記憶デバイス」と本明細書では見なさない「コンピュータ可読送信媒体」を介して実装されたと呼ぶ。

【 0 2 4 8 】

[0210] 代替として、実施態様は、コンピューティング装置（例えば、データ処理装置）、例えば、プログラマブルプロセッサ、専用プロセッサもしくはデバイス、コンピュータ、または多数のコンピュータによって実行するための、またはその動作を制御するための実行可能命令（例えば、コンピュータプログラム）を記憶する機械使用可能または機械可読記憶デバイス（例えば、ユニバーサルシリアルバス（USB）記憶デバイス、テープ、ハードディスクドライブ、コンパクトディスク（CD）、デジタルビデオディスク（DVD）などのような磁気またはデジタル媒体）を介して実装することができる。そのような実施態様は、本明細書では、「コンピュータ可読記憶媒体」または「コンピュータ可読記憶デバイス」を介して実装されたと呼ぶことがあり、したがって、純粋に、純粋な伝搬信号などの信号である実施態様と異なる（したがって、本明細書では、上述で論じたように「コンピュータ可読送信媒体」と見なさない）。したがって、本明細書で使用する時、「コンピュータ可読記憶媒体」または「コンピュータ可読記憶デバイス」への言及は、具体的には、信号（例えば、伝搬信号）を本質的に除外する。

【 0 2 4 9 】

[0211] 上述のコンピュータプログラムなどのコンピュータプログラムは、コンパイラ型言語、インタープリタ型言語、または機械言語を含む任意の形態のプログラミング言語で書くことができ、スタンドアロンプログラムとして、またはモジュール、構成要素、サブルーチン、またはコンピューティング環境での使用に好適な他のユニットとして含む任意の形態で配備され得る。コンピュータプログラムは、機械使用可能または機械可読記憶デバイス（例えば、コンピュータ可読媒体）に実行可能コード（例えば、実行可能命令）と

して有形に具現することができる。上述で論じた技法を実装するコンピュータプログラムは、1つのコンピュータで実行されるように配備するか、または1つのサイトにおける多数のコンピュータで、もしくは多数のサイトにわたって分散され通信ネットワークによって相互接続された多数のコンピュータで実行されるように配備することができる。

【0250】

[0212] 方法ステップは、入力データで動作し出力を発生することによって機能を実行するためにコンピュータプログラムを実行する1つまたは複数のプログラマブルプロセッサによって実行され得る。1つまたは複数のプログラマブルプロセッサは、命令を並列に実行することができ、および/または分散処理のための分散構成で配列され得る。本明細書で論じた例示の機能は、さらに、1つまたは複数のハードウェア論理構成要素で実行することができ、装置は、少なくとも部分的に、1つまたは複数のハードウェア論理構成要素として実装することができる。例えば、限定なしに、使用することができる例示的なタイプのハードウェア論理構成要素は、フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）、特定プログラム向け集積回路（ASIC）、特定プログラム向け標準製品（ASSP）、システムオンチップシステム（SOC）、コンプレックスプログラマブルロジックデバイス（CPLD）などを含むことができる。

【0251】

[0213] コンピュータプログラムの実行に好適なプロセッサは、例として、汎用および専用マイクロプロセッサ、および任意の種類のデジタルコンピュータの任意の1つまたは複数のプロセッサの両方を含む。一般に、プロセッサは、読取り専用メモリまたはランダムアクセスメモリまたは両方から命令およびデータを受け取る。コンピュータの要素は、命令を実行するための少なくとも1つのプロセッサと、命令およびデータを記憶するための1つまたは複数のメモリデバイスとを含むことができる。一般に、コンピュータは、さらに、データを記憶するための1つもしくは複数の大容量記憶デバイス、例えば、磁気、磁気光学ディスク、または光学ディスクを含むか、あるいは1つもしくは複数の大容量記憶デバイスからデータを受信するかまたはそこにデータを転送するか、またはその両方のために動作可能に結合され得る。コンピュータプログラム命令およびデータを具現するのに好適な情報担体は、例として、半導体記憶デバイス、例えばEPROM、EEPROM、フラッシュメモリデバイス、磁気ディスク、例えば内蔵ハードディスク、リムーバブルディスク、光磁気ディスク、ならびにCD-ROMおよびDVD-ROMディスクを含む不揮発性メモリのすべての形態を含む。プロセッサおよびメモリは、専用論理回路によって補足されるか、または専用論理回路に組み込まれ得る。

【0252】

[0214] ユーザとの対話を行うために、実施態様は、ユーザに情報を表示するためのディスプレイデバイス、例えば、陰極線管（CRT）、液晶ディスプレイ（LCD）、またはプラズマモニタと、ユーザがコンピュータに入力を与えることができるキーボードおよびポインティングデバイス、例えば、マウス、トラックボールとを有するコンピュータに実装され得る。ユーザとの対話を同様に可能にするために他の種類のデバイスを使用することができ、例えば、ユーザに与えられるフィードバックは、任意の形態の知覚フィードバック、例えば、視覚フィードバック、聴覚フィードバック、触覚フィードバックとすることができる。例えば、出力は、任意の形態の知覚出力を介して、（限定はしないが）視覚出力（例えば、視覚ジェスチャ、ビデオ出力）、音声出力（例えば、音声、デバイス音響）、触覚出力（例えば、接触、デバイス移動）、温度、香りなどを含む任意の形態の知覚出力を介して供給することができる。

【0253】

[0215] さらに、ユーザからの入力、音響、発話、または触覚入力を含む任意の形態で受け取られ得る。例えば、入力は、（限定はしないが）視覚入力（例えば、ジェスチャ、ビデオ入力）、音声入力（例えば、音声、デバイス音響）、触覚入力（例えば、接触、デバイス移動）、温度、香りなどを含む任意の形態の知覚入力を介してユーザから受け取られ得る。

【 0 2 5 4 】

[0216] さらに、ナチュラルユーザインターフェース（NUI）を使用して、ユーザとインターフェースすることができる。この文脈では、「NUI」は、ユーザが、マウス、キーボード、リモートコントロールなどのような入力デバイスによって課される人工的制約がなく、「自然な」方法でデバイスと対話できるようにする任意のインターフェース技術を参照することができる。

【 0 2 5 5 】

[0217] NUI技法の例は、音声認識、接触およびスタイラス認識、両方の画面上および画面付近のジェスチャ認識、エアジェスチャ、ヘッドアイトラッキング、音声および発話、視覚、接触、ジェスチャ、および人工知能に依拠するものを含むことができる。例示のNUI技術は、限定はしないが、接触感応ディスプレイ、音声および言語認識、意図および目標理解、深度カメラを使用した運動ジェスチャ検出（例えば、ステレオカメラシステム、赤外線カメラシステム、RGB（赤／緑／青）カメラシステム、およびこれらの組合せ）、加速度計／ジャイロスコープを使用した運動ジェスチャ検出、顔認識、3Dディスプレイ、頭、眼および凝視追跡、没入型拡張現実および仮想現実システムを含むことができ、これらのすべては、より自然なインターフェースと、電界感知電極を使用して脳活動を感知するための技術（例えば、脳波記録法（EEG）および関連技法）とを提供することができる。

【 0 2 5 6 】

[0218] 実施態様は、例えばデータサーバとしてバックエンド構成要素を含む、あるいはミドルウェア構成要素、例えば、アプリケーションサーバを含む、あるいはフロントエンド構成要素、例えば、グラフィカルユーザインターフェース、またはユーザが実施態様、もしくはそのようなバックエンド、ミドルウェア、もしくはフロントエンド構成要素の任意の組合せと対話できるウェブブラウザを有するクライアントコンピュータを含むコンピューティングシステムに実装することができる。構成要素は、任意の形態または媒体のデジタルデータ通信、例えば、通信ネットワークによって相互接続され得る。通信ネットワークの例は、ローカルエリアネットワーク（LAN）と広域ネットワーク（WAN）、例えばインターネットとを含む。

【 0 2 5 7 】

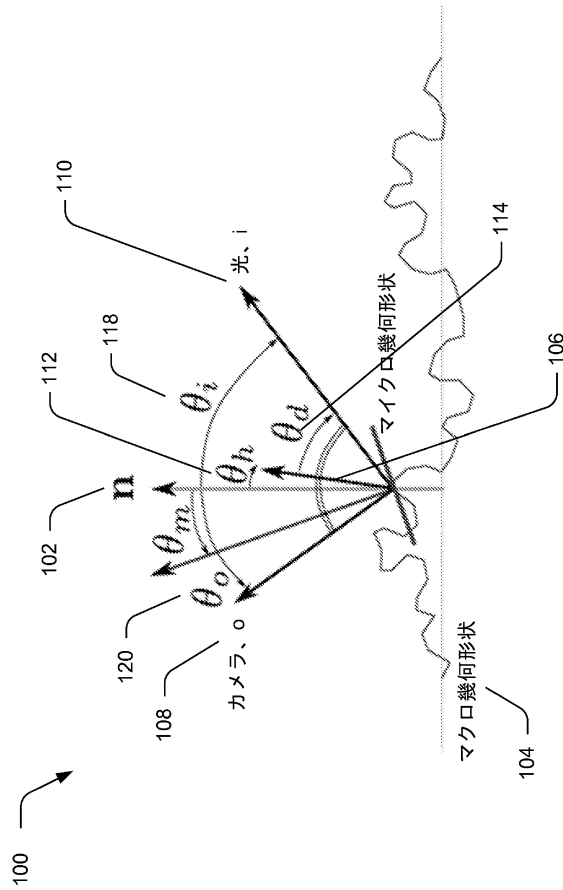
[0219] 構造的特徴および／または方法的行為に特有の言語で主題が説明されたが、添付の特許請求の範囲に記載される主題は、上述の特定の特徴または行為に必ずしも限定されないことを理解されたい。むしろ、上述の特定の特徴および行為は、特許請求の範囲を実施する例示の形態として開示されている。記載された実施態様のいくつかの特徴が本明細書に記載されたように示されたが、多くの変更、置換、改変、および均等物を、当業者なら直ちに思いつくであろう。それゆえに、添付の特許請求の範囲は、そのような変更および改変のすべてを実施形態の範囲内にあるとして包含することが意図されていることを理解されたい。

10

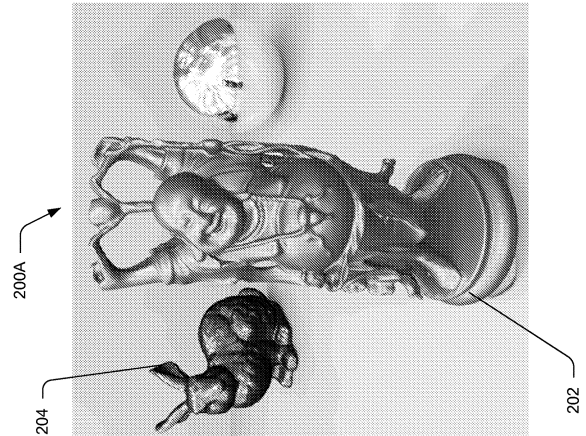
20

30

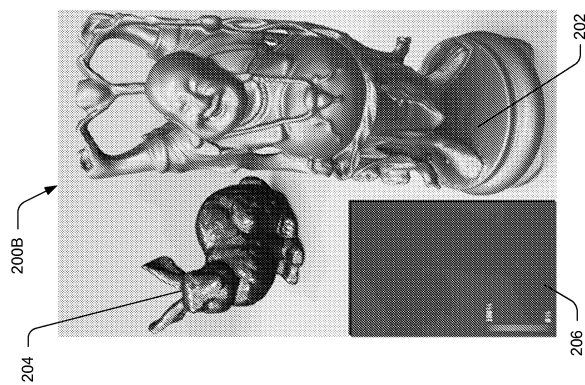
【図 1】



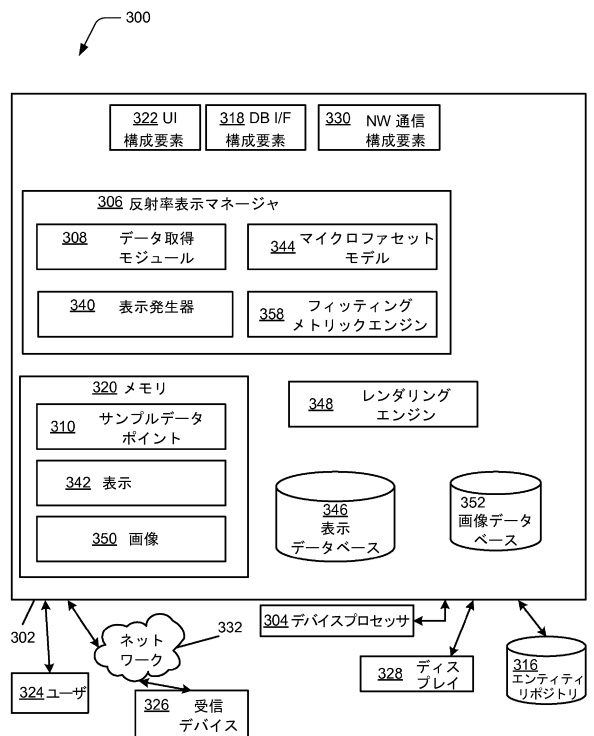
【図 2 A】



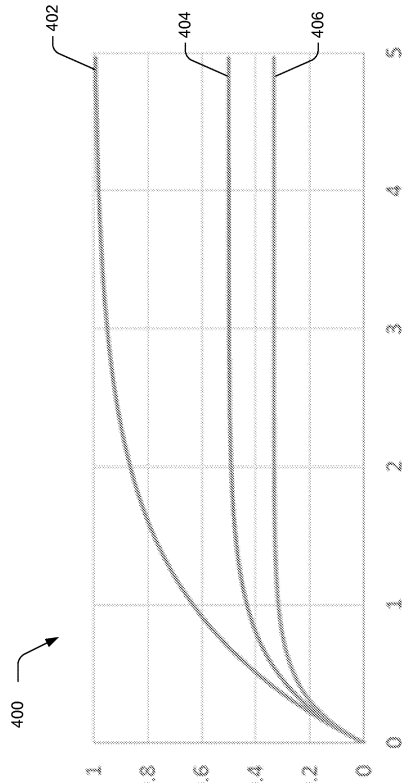
【図 2 B】



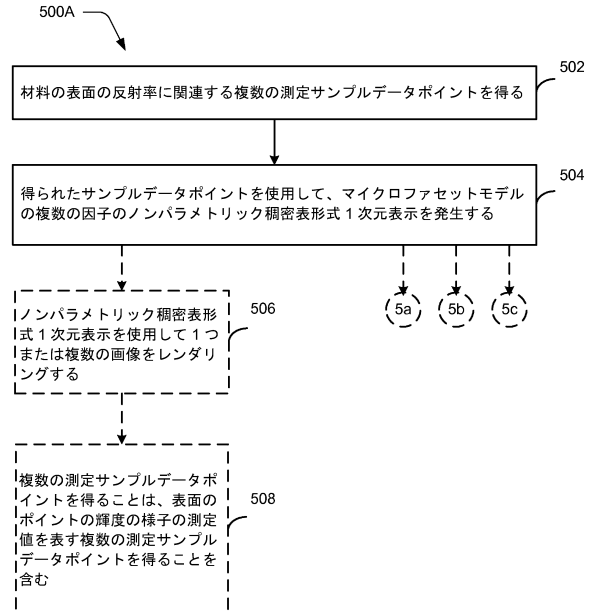
【図 3】



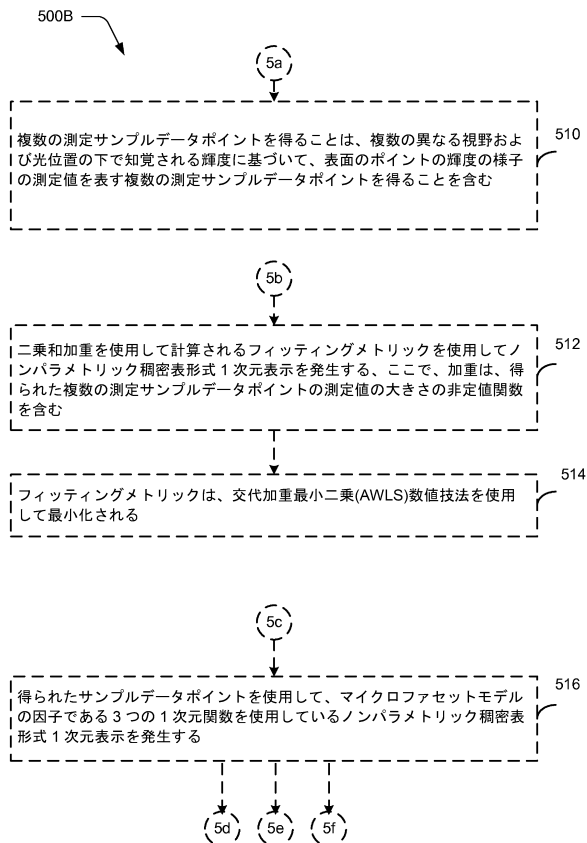
【図 4】



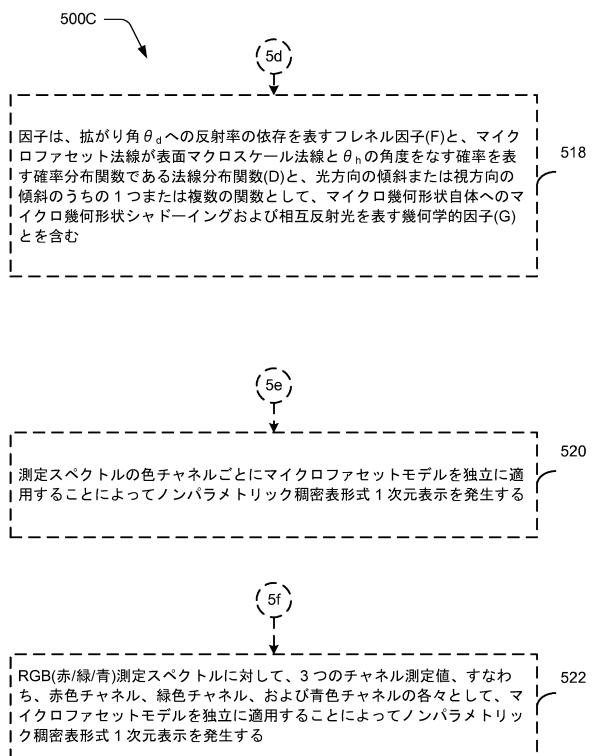
【図 5 A】



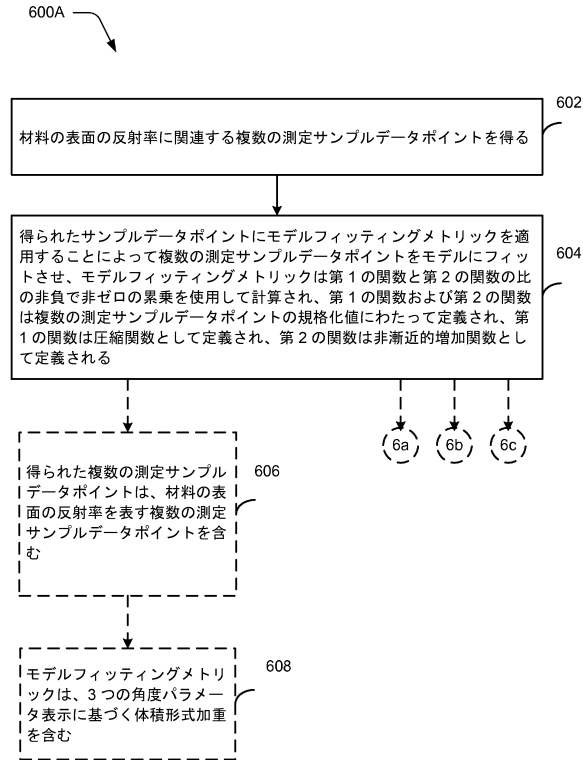
【図 5 B】



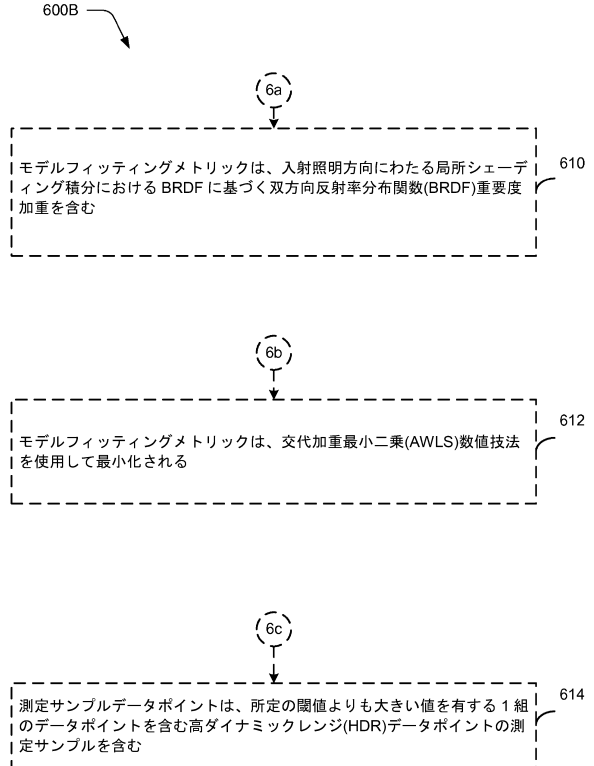
【図 5 C】



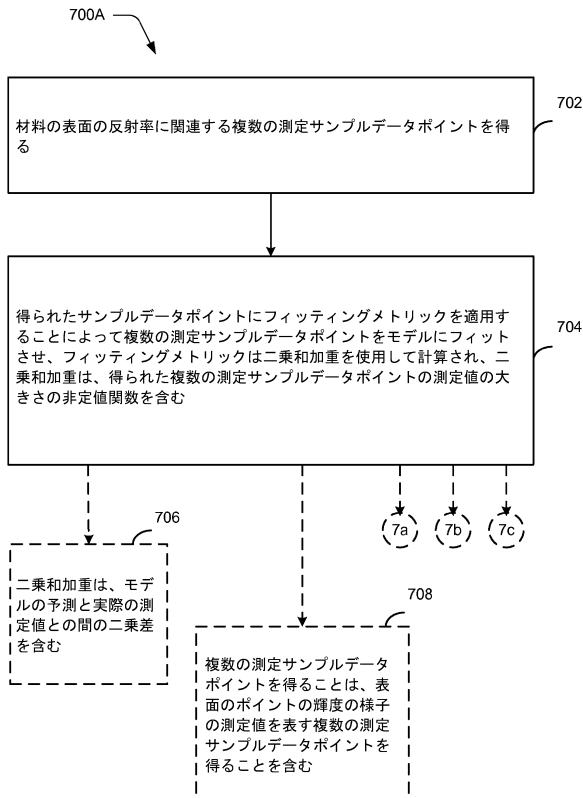
【図 6 A】



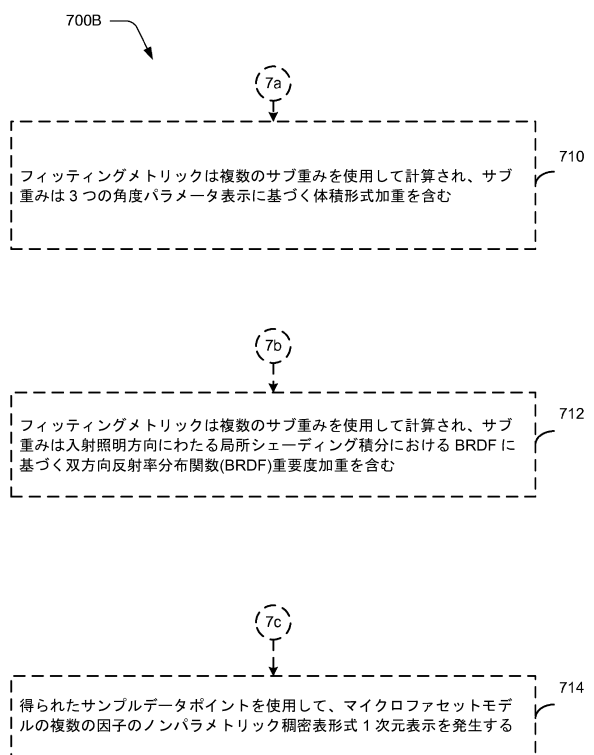
【図 6 B】



【図 7 A】



【図 7 B】



フロントページの続き

(74)代理人 100108213

弁理士 阿部 豊隆

(74)代理人 100207332

弁理士 岡澤 晋

(72)発明者 ムハンマドバーゲル, マハディ

アメリカ合衆国, ワシントン州 98052-6399, レッドモンド, ワン マイクロソフト
ウェイ, マイクロソフト テクノロジー ライセンシング, エルエルシー内, エルシーエー -
インターナショナル パテンツ (8/1172)

(72)発明者 ノウロウゼザーライ, デレク

アメリカ合衆国, ワシントン州 98052-6399, レッドモンド, ワン マイクロソフト
ウェイ, マイクロソフト テクノロジー ライセンシング, エルエルシー内, エルシーエー -
インターナショナル パテンツ (8/1172)

(72)発明者 スナイダー, ジョン マイケル

アメリカ合衆国, ワシントン州 98052-6399, レッドモンド, ワン マイクロソフト
ウェイ, マイクロソフト テクノロジー ライセンシング, エルエルシー内, エルシーエー -
インターナショナル パテンツ (8/1172)

審査官 岡本 俊威

(56)参考文献 特開2010-152533(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G06T 15/00 - 15/87

G01N 21/17 - 21/47