

事例ベース推論と自己適応型差分進化による 反射特性パラメータの推定手法

松ヶ野 祐紀¹ 小野 智司¹ 川崎 洋¹ 福田 悠人² 古川 亮³

概要：写実的なコンピュータ・グラフィックスの生成には物体表面の反射特性を正確に再現する必要がある．そのため多くの手法が提案されているが，いずれも一般的なモデルを用いて初期値を推定し，局所探索法で最適パラメータを得る手法のため，複雑な反射特性では初期値が不安定となり最適パラメータ推定が困難であった．また，対象が3次元物体の場合，全表面の法線を高精度で得ることは難しくパラメータ推定が不安定となる．本研究では，事例ベース推論と自己適応型差分進化を組み合わせた，Case-Injected Differential Evolution (CIDER) により，初期値を推定せず複雑な反射パラメータの推定を実現する手法を提案する．CIDER では類似した最適化問題が大量にある時，過去の探索結果を利用して解を効率良く発見する．さらに，法線パラメータを同時に推定することで反射パラメータの推定精度を改善する．

1. はじめに

近年，映画やゲームなどの表現手法において，CG 技術は欠くことのできないものであり，より質の高い写実的 CG の生成が求められている．写実的な CG 生成には，物体の幾何形状および反射特性を正確に表現する必要がある．

CG の分野において，物体表面の反射特性は，任意の光源方向からの入射光と任意の反射方向への反射光の比率として，双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF) [15] により記述される．入射方向，反射方向の4自由度について BRDF を記録するためには膨大なデータ量が必要とされるため，反射モデルによって BRDF を近似することが行われている．実物体の反射特性を反射モデルで表現するためには，物体に合った反射モデルパラメータ (以下，反射パラメータ) の設定が必要である．より正確な実物体表面の反射特性を再現するために，光源環境が既知であるシーンにおいて観測した画像から得られる反射率を反射モデルに当てはめて反射パラメータを推定することが行われている．

複雑な反射特性をもつ物体は単純な反射特性を持つ物体に比べて反射パラメータの推定が難しい場合がある．複雑な反射特性を持つ物体の例として，シャボン玉や油膜で見

られる薄膜干渉，微細構造を持つコンパクトディスク，複雑な凹凸を持つ織布，保護シートの貼られた物体などが挙げられる．本研究では複雑な反射特性を持つ物体である，釉薬の塗られた陶器およびプラスチック材料で作成された置物を対象とする．釉薬の塗られた陶器は，複雑な反射特性を持つ物体の1つであり，広がりを持つローブ形状の鏡面反射とハイライトのような鋭い鏡面反射の2つの鏡面反射成分が観測される．また，プラスチック材料で作成された置物は強い光沢や物体内部での表面下散乱が生じる．このような複雑な反射特性を正確に表現するために Ward モデルや Lafortune モデルのような複雑な反射特性を表現可能な反射モデルが用いられる．しかし，Ward モデルや Lafortune モデルは設定する反射パラメータが多く，局所探索法での推定が難しい．

これまでに，我々は，釉薬の塗られた陶器を対象として，反射モデルへの当てはめにおいて，Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) を用いる手法を提案してきた [23]．しかし，LM 法などの非線形最適化手法による当てはめでは十分な初期値を与えない場合，局所解に陥ってしまい，正しい解が得られない問題があった．また，立体物を対象としており，3次元物体の全表面点について反射モデルのパラメータの推定を行うため，推定回数が非常に多く，全ての点において安定して推定を行うことが難しかった．さらに，立体物を対象としていることから，形状誤差や法線ずれの影響を受けやすくなるという問題が生じており，反射パラメータ推定および物体の見えに影響を与えていた．

本研究では，これらの問題を解決するために，jDE と事

¹ 鹿児島大学大学院 理工学研究科
鹿児島県鹿児島市都元 1-21-40

² 埼玉大学大学院 理工学研究科
JSPS Research Fellow 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

³ 広島市立大学大学院 情報科学研究科
広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

例ベース推論を組み合わせた, Case-Injected Differential Evolution (CIDER) および法線の修正と反射パラメータを同時に推定する手法を提案する. これにより釉薬の塗られた陶器やプラスチックの置物と言った複雑な反射特性を持つ物体を対象として, 安定して推定を行えることを示す. CIDER は問題と解の組を事例として記憶し, 新たな問題に対して最適化を行う際に初期集団の一部として利用する. 良い評価値を持つ個体から探索を開始することで, 効率的に探索できる. CIDER を反射モデル推定に用いることで, LM 法等の局所探索法に比べ, 安定して高品質な反射パラメータを発見できる. また, 観測した反射率と推定したパラメータを事例として記憶し, 再利用することで, 物体表面全点における効率的で安定した推定を実現する. さらに, 法線の修正と反射パラメータの推定を同時に行うことで, 3 次元形状物体の計測の際に生じる誤差による影響を軽減し, 推定精度を改善する.

2. 関連研究

2.1 反射モデル

双方向反射率分布関数は, 物体表面における光の反射を記述する手段である. CG の分野では, 反射特性を簡潔に記述するために Lambert モデル [4], Phong モデル [16] や Torrance-Sparrow モデル [5] などの反射モデルが広く利用されている.

多くの材質の反射に対応可能な反射モデルとして Lafortune モデルが提案されている [2]. この BRDF モデルは, 軸の向きと長さの異なる複数のコサインローブを組み合わせることによって, 反射特性を表現する. ある物体表面点での Lafortune モデルは式 (1) によって表される.

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \sum_i [C_{x,i}\omega_{ix}\omega_{rx} + C_{y,i}\omega_{iy}\omega_{ry} + C_{z,i}\omega_{iz}\omega_{rz}]^{n_i} \quad (1)$$

ここで, $\vec{\omega}_i$ は入射方向, $\vec{\omega}_r$ は反射方向, i は Lafortune モデルのローブ数を示す. ローブ数を 2 と仮定した場合の推定するパラメータは, $C_{x,1}, C_{y,1}, C_{z,1}, n_1, C_{x,2}, C_{y,2}, C_{z,2}, n_2$ の 8 つとなる.

2.2 反射パラメータの推定手法

実物体の反射特性を反射モデルで表現するためには, 物体に合わせた反射パラメータの設定が必要である. 複雑な反射モデルをユーザが手動で設定するのは困難であり, 意図する表現が実現できないなどの問題がある. そこで, 反射パラメータを自動で推定するために, 材質の反射率を計測し, 観測された反射率を反射モデルへ当てはめて反射パラメータを推定する手法が研究されてきた [2], [11], [18], [20]. Nayar ら [12] は観測輝度値を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離して, 拡散反射パラメータと鏡面反射パラメータを

別々に推定する手法を提案している.

反射特性推定では物体表面の微細な形状が反射パラメータ推定に影響を与えることから, そのような影響を軽減し高精度に推定を行うために, 物体の法線と反射特性を同時に推定する手法が Kreigman ら [13] により提案されている. Lensch ら [3] は入力データのクラスタリングを行い, クラスタ毎に反射モデルを推定し, それらの線形和により反射特性を表現する手法を提案している. また, 得られた BRDF から非線形最適化により法線の修正を行うことで, 物体の見えを改善している. 本手法では, 物体表面点毎に, 固有の反射パラメータを推定するため, Lensch らの手法に比べて表現できる幅が広いことが期待される. 逆に, 安定した推定は困難になるが, CIDER によりそれを軽減する.

2.3 最適化アルゴリズム

2.3.1 Levenberg-Marquardt 法

Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) は 1978 年に More によって提案された, 非線形最小二乗問題を解く有力なアルゴリズムである [8]. LM 法は解から離れたところでは勾配法で粗い探索を行い, 解にある程度近づいたら Gauss-Newton 法に切り替える組織的な推定を行う手法である. 収束までの時間は短いものの, 初期解によっては局所解に陥る.

2.3.2 差分進化

差分進化 (Differential Evolution: DE) [19] は実数値最適化問題を対象とする進化計算手法の一つである. DE は最適解への収束が早く頑健であることが示されている [22]. DE では, 現世代の個体群に含まれるすべての個体が次の世代の個体の生成に関与する. 世代 g の個体群における i 番目の個体をターゲットベクトル (親個体) $x_{i,g}$ とする. $x_{i,g}$ に対して, ベースベクトル $x_{b,g}$ と差分に用いる個体対 $x_{r1,g}, x_{r2,g}$ を個体群の中から個体が重複しないようにランダムに選択し, 式 (2) を用いて変異ベクトル $v_{i,g}$ を生成する.

$$v_{i,g} = x_{b,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2)$$

ここで用いる制御パラメータ F をスケールファクタと呼ぶ.

次に制御パラメータである交叉率 CR を用いて交叉を行い, $x_{i,g}$ と $v_{i,g}$ からトライアルベクトル (子個体) $u_{i,g}$ を生成する. 二項交叉では $CR \in [0, 1]$ とランダムに選択した次元 $j_{rand} \in [1, D]$ (D は次元数) に基づき, 個体中の要素 j を式 (3) のように決定する.

$$u_{i,j,g} = \begin{cases} v_{i,j,g} & \text{if } rand_{i,j} \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{i,j,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$rand_{i,j}$ は範囲 $[0, 1]$ の一様乱数である. 生成された $u_{i,g}$ と $x_{i,g}$ を比較し, 式 (4) により目的関数の値が優れる個体を次世代に残す.

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

これをすべての個体に対して行うことで、個体群が更新され、DE の探索が行われる。

2.3.3 自己適応型差分進化

本研究で用いる自己適応型差分進化 (jDE) [1] は、DE のパラメータであるスケール係数 F と交叉率 CR を個体毎に設定し、確率的にそれぞれの値をランダムに変化させるという手法である。jDE では、各世代で各個体ごとに、 F および CR をそれぞれ式 (5)、(6) に従って更新する。

$$F_{i,g+1} = \begin{cases} F_l + rand_1 * F_u & \text{if } rand_2 < \tau_1 \\ F_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$CR_{i,g+1} = \begin{cases} rand_3 & \text{if } rand_4 < \tau_2 \\ CR_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$rand_j (j \in 1, 2, 3, 4)$ は $[0, 1]$ の一様乱数を示し、 τ_1 と τ_2 は F と CR が更新される確率を示す。また、 F_l と F_u 、 CR_l と CR_u によって F 、 CR をランダムに変化させる範囲を設定する。

F と CR の組み合わせにより個体ごとに異なる役割を持たせて探索を行うことが可能となり、DE に比べて探索性能が向上している。実際には変更確率など設定可能なパラメータが増えている。しかし、 F と CR のランダムで与えられる範囲を一般的に DE で用いられる値である $F \in [0.1, 1]$ 、 $CR \in [0, 1]$ 、変更確率を 0.1 とすることで、良好な探索を行うことが可能である [1]。これによりユーザによる F と CR の調整の負担を減らすことが可能となる。

2.4 事例ベース推論

事例ベース推論 (Case-based reasoning: CBR) は、与えられた問題に類似する過去の事例を利用して解を導く方式である。知識の獲得が容易であることや、探索の中間過程を節約できるといった特徴を持つ [17]。また、CBR はその問題解決過程自身が新しい事例の獲得につながる。

CBR を用いて進化計算の探索の効率化を図る研究が行われている。Louis らは巡回セールスマン問題やコンピュータゲームを対象として、CBR により良好な解を集団注入 (Inject) することで探索効率を改善する CIGARs (Case-Injected Genetic Algorithms) を提案している [6]。上記のように進化計算に、CBR を組み入れることにより探索の効率化の促進が期待できる。

3. 反射特性計測手法

本研究では 3 次元形状物体の幾何形状と、視点位置、光源位置を用いて、撮影した画像群から、3 次元形状物体の反射パラメータ推定を行う。本節では、まずはじめに正確にデータを獲得するための視点位置の外部キャリブレーションについて述べ、反射特性の計測方法について述べる。

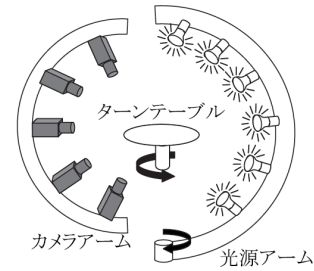


図 1 反射特性計測装置

3.1 既存の反射特性の計測方法

実物体の反射特性を計測するためにこれまでに様々な手法が提案されている [7], [9], [10], [14], [18], [20]。向川ら [25] は楕円鏡とプロジェクタを用いた計測装置を開発し、駆動装置を排除することによって高速計測を実現している。また、McAllister は不均一な平面状の材質に対して Lafortune モデルへのフィッティングを行う手法を提案している [11]。しかし、これらの手法では物体を構成する材質が全て均質であると仮定して、反射特性の計測を行っている。我々は、不均質な表面それぞれの反射パラメータの推定を目指す。

3.2 反射率計測装置

本稿で用いた計測装置の構成を図 1 に示す。計測装置には 2 個の円弧状の部品がついており、それぞれ CCD カメラ (6 台) とハロゲンランプ (11 個) が取り付けられている。以後、ランプが取り付けられている円弧を光源アームと呼ぶ。円弧の中心付近には、計測対象物体を載せるための回転テーブルが取り付けられている。カメラ、ランプ、光源アーム、回転テーブルはコントローラを介して PC に接続されている。回転テーブルと光源アームは、同一の垂直な軸を中心に回転するに設計されており、これらの回転は PC によって制御される。PC から、回転テーブルを任意の角度だけ回転させ、撮影するカメラ 1 機を選択することで、視点の方位角と仰角を変更しながら撮影可能であり、光源アームを任意の角度だけ回転させ、点灯させるランプ 1 灯を選択することで、光源の方位角と仰角を変更しながらの撮影が可能となっている。これらのパラメータを変えながら画像を標準化することで、4 自由度パラメータに関する BRDF のサンプリングが可能なシステムを利用し、3 次元形状物体の反射特性を計測した。実際の反射特性計測シーンを図 4 に示す。

3.3 反射率計測の手順

反射率計測の流れを図 2 に示す。反射率の測定には専用の測定機器を用いるのではなく、前節で述べた装置を用いているため、同一の座標系上での物体の表面点の位置、視点位置、光源位置、その点で観測された輝度値を用いて、ある点での反射率として計測する。そのため、ここでは結果

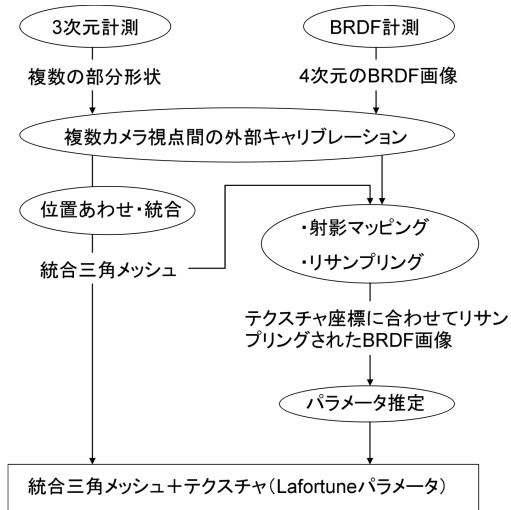


図 2 計測の流れ

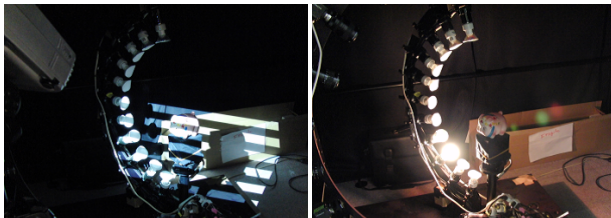


図 3 3次元形状計測

図 4 反射特性計測

として物体を各方向から計測したものを統合した統合メッシュデータと、任意の光源を使用した場合に、任意の視点（カメラ）で観測される物体のテクスチャが獲得される。

同一座標系での視点位置，光源位置を決定するために，座標系の基準として校正儀を使用する．校正儀は精密に作成された立方体であり，各面にチェッカーパターンが印刷されている．これをターンテーブルに置き，回転させながら，各カメラで撮影する．（本稿の実験では90度ずつ回転させながら撮影した．）これらの校正儀を撮影した画像を用いてカメラ（視点），校正儀間の位置合わせを行う．カメラの内部パラメータは事前に求めておき [21]，校正儀の真値データを内部パラメータをもとに2次元画像上へ投影する．撮影したチェッカーパターンと投影した真値データのパターンをテンプレートマッチングすることによって対応点を求めることで，各カメラの外部パラメータを求める．

物体の3次元形状の計測には，密な3次元形状が計測可能な，カメラとプロジェクタ各一台ずつで構成された3次元計測システムを用いる [24]．これは，対象物体にプロジェクタとカメラを向けプロジェクタから光パターンを投影し，これをカメラで撮影し解析することで3次元形状復元する手法である．この3次元計測システムを用いた計測シーンを図3に示す．また，この3次元計測システムにより得られるデータの例を図5に示す．

3次元形状物体の全周形状を獲得するため，複数方向から3次元点群を計測を行い，校正儀を中心とした座標系に

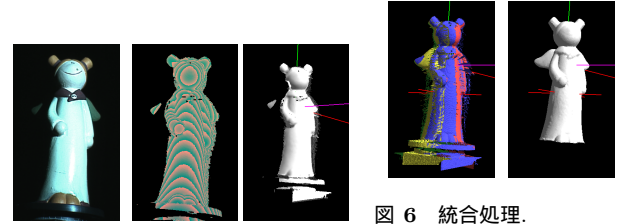


図 5 1回の計測によって得られるカラー画像と距離画像の例. (左) カラー画像. (中) 距離画像. (右) 復元3次元点.

図 6 統合処理.

(左) 位置あわせ後計測3次元データ
(右) 統合メッシュデータ

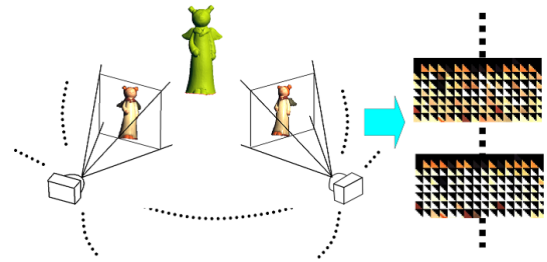


図 7 リサンプリングの様子

各3次元点群を剛体変換し位置あわせを行い，形状データを統合する．位置あわせ後の3次元データと全周のメッシュデータを図6に示す．

本手法では，光源位置，視点位置を変化させながら計測対象物を撮影することで物体の反射特性を計測する．このため各カメラ特性による差が生じないように，ホワイトバランスに関してはマクベスカラーチャートによるカラーキャリブレーションを行った．また，レスポンス特性に関しては，ひとつのシーンで露光時間を変えて複数枚撮影した画像により推定し，これを用いてリニアなHDR（High Dynamic Range）画像を作成する．これにより完全鏡面のような物体であってもパラメータ推定が可能となる．

撮影した画像は3次元形状物体の三角メッシュデータにテクセル（その三角メッシュのテクスチャ用画像上の各ピクセル）としてリサンプリングされる．リサンプリングの様子を，図7に示す．各カメラと3次元形状物体の三角メッシュデータの位置データが外部キャリブレーションにより既知のため，各カメラで計測された画像を三角メッシュに対して，射影テクスチャマッピングを行う．そのパッチ毎にマッピングされた輝度値を，三角メッシュのテクセルとしてリサンプリングする．これを撮影した全ての視点，光源下の画像に関して行う．視点，光源のパラメータライズは物体表面上の点の接空間に対して行うことで，ある点での反射率の分布を得る．

4. CIDERの反射特性解析への適用

自己適応型差分進化と事例ベース推論を組み合わせたCIDERおよび法線の修正と反射パラメータの同時推定を提案する．これにより，初期値を必要とせず，形状誤差に

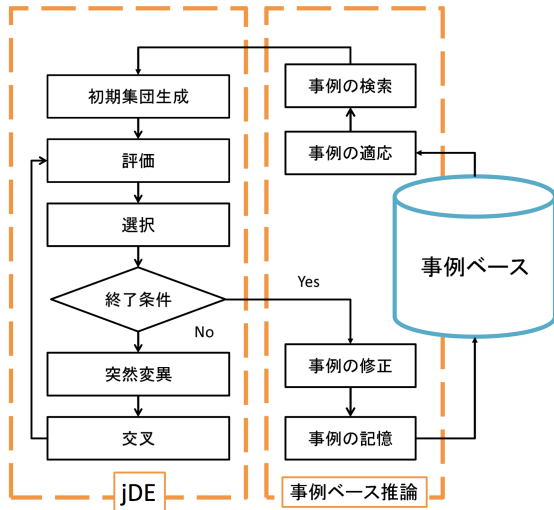


図 8 CIDER の処理手順

も頑健なパラメータ推定が可能となる。

4.1 Case-Injected Differential Evolution

CIDER は自己適応型差分進化と事例ベース推論を組み合わせることで、類似する大量の最適化問題において効率的に探索を行う方式である。提案する CIDER の基本方針を以下に示す。

1) jDE による最適化

jDE はユーザによる制御パラメータの調整などの負担が少なく、優れた探索能力を持つという特徴があり、実問題において有効性が示されている。CIDER では jDE を用いることで、反射特性に依存せず、安定した推定が可能である。

2) 事例を用いた初期集団生成

LM 法等の局所探索法に比べて、多点探索を行う進化計算は探索に時間を要する。CIDER では事例ベース推論により jDE の初期集団に良好な解を注入することで、探索の中間過程を節約し、探索効率を改善する。

提案する CIDER の処理手順を図 8 に示す。新たな問題が与えられた際、過去の事例との設計変数間の類似度を算出し、類似度の高い事例を上位から複数選出し、その事例の解を jDE の初期集団の一部として利用する。jDE による最適化を行い、世代数の上限に達した場合、または、一定世代の間、評価値が改善されていない場合は探索を終了する。探索終了後、問題と解を事例として記憶する。この時、記憶する事例の上限数に達している場合、事例に記憶されている最も類似度の高い事例を事例ベースから削除し、新しい事例を記憶する。

4.2 CIDER の反射パラメータ推定への適用

CIDER を 3 次元物体の全表面点の反射パラメータ推定に適用させたときの処理手順について具体的に述べる。前

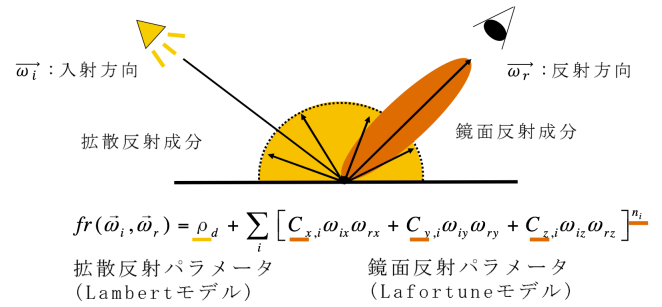


図 9 反射モデル

節で述べた方法により獲得したある物体表面上での反射率の分布から、反射パラメータ推定を行う。本研究では、2 色性の反射モデルを仮定し、拡散反射モデルに Lambert モデル、鏡面反射モデルに Lafortune モデルを用いる (図 9)。Lafortune モデルのローブ数を 2 に固定し、推定する反射パラメータは各ピクセルの RGB 成分毎の拡散反射パラメータ $\rho_{dR}, \rho_{dG}, \rho_{dB}$ および、RGB 成分共通の鏡面反射パラメータ $C_{x,1}, C_{y,1}, C_{z,1}, n_1, C_{x,2}, C_{y,2}, C_{z,2}, n_2$ の 11 個とする。推定に用いる目的関数を式 (7) で定義する。

$$E = \sum_j (I_{R(j)} - f_{rR}(\vec{\omega}_{i,j}, \vec{\omega}_{r,j}))^2 + \sum_j (I_{G(j)} - f_{rG}(\vec{\omega}_{i,j}, \vec{\omega}_{r,j}))^2 + \sum_j (I_{B(j)} - f_{rB}(\vec{\omega}_{i,j}, \vec{\omega}_{r,j}))^2 \quad (7)$$

各サンプル点 j における光源方向 $\vec{\omega}_{i,j}$ 、視線方向 $\vec{\omega}_{r,j}$ を代入し、求まる輝度値 f_{rR}, f_{rG}, f_{rB} と計測した輝度値 I_R, I_G, I_B との二乗誤差を最小化する。

反射パラメータ推定に CIDER を適用する場合、新たな点の推定を開始する際に、過去に推定した点との類似度を算出する。類似度には RGB 空間におけるユークリッド距離を用いる。反射パラメータの推定を開始する際、類似度の高い点を事例ベースから複数選出し、その反射パラメータを jDE の初期集団の一部として利用する。

本研究では幾何形状として、3.3 節で示す 3 次元形状計測手法を用いて取得したポリゴンメッシュを基にメッシュの平面に法線マップを適用したものをを用いる。本研究ではこの法線マップも同時に推定することで、計測できなかった細かい凹凸を表現し、物体の見えの改善を行う。法線情報は θ, ϕ の 2 つのパラメータを用いて表現する。従って、CIDER で推定するパラメータは、各点毎に計 13 となる。

5. 評価実験

提案する CIDER を用いて物体表面反射特性の推定を行った。また、法線の修正と反射パラメータの同時推定を行った。5.1 節では、実験設定について述べる。

5.1 実験設定

釉薬の塗られた陶器の置物とプラスチックの置物を対象として実験を行った。提案する CIDER に加え、比較対象として、LM 法と jDE による推定を行った。また、釉薬の塗られた陶器の置物について、CIDER を用いて法線の修正と反射パラメータの同時推定を行った場合と、CIDER、jDE、LM 法を用いて反射パラメータのみを推定した場合で結果を比較した。陶器の置物について、CIDER と jDE では Lafortune モデルのローブ数を 2 に固定した。プラスチックの置物については Lafortune モデルのローブ数を 1 に固定した。また、LM 法による推定では、Lafortune モデルのローブ数を 2 に固定する場合、十分な初期値を与える必要があり、推定が不安定となるため、どちらの物体についても Lafortune モデルのローブ数を 1 に固定した。CIDER と jDE に共通するパラメータ設定として、釉薬の塗られた陶器の置物については個体数を 120、世代数の上限を 2000 世代とし、プラスチックの置物については個体数を 70、世代数の上限を 1000 世代とした。CIDER において、記録する事例数の上限を 40 とし、事例から jDE の初期集団への注入数を 20 とした。CIDER と jDE は 200 世代の間、評価値が改善されない場合、探索を終了する。提案する方式である CIDER では事例を用いた初期集団生成を行い、jDE では初期個体をランダムに生成した。LM 法は最大繰り返し回数を 2000 回とした。

5.2 実験結果

釉薬が塗られた陶器の置物を対象として行った実験の結果を図 10、図 11、図 12 に示す。図 10 と図 11 は光源の位置が異なるシーンについての結果である。プラスチックの置物を対象として行った実験の結果を図 13 に示す。推定した反射パラメータを用いて図 10(a)、図 11(a)、図 12(a)、図 13(a) と同シーンでのレンダリングを行った。提案する CIDER により生成された例を図 10(c)、図 11(c)、図 12(c)、図 13(b)、jDE により生成された例を図 10(d)、図 11(d)、図 12(d)、図 13(c)、LM 法により生成された例を図 10(e)、図 11(e)、図 12(e)、図 13(d) に示す。また、CIDER を用いた法線の修正と反射パラメータの同時推定により得られた例を図 10(b)、図 11(b)、図 12(b) に示す。釉薬が塗られた陶器の置物を対象として行った実験の結果を見ると、CIDER による結果 (図 10(c)) と jDE による結果 (図 10(d)) は光沢が正しく再現され、表面色も正しく再現されているが、一部三角メッシュの平面や角の形状があらわれている箇所がある。LM 法による結果 (図 10(e)) は CIDER と jDE による結果 (図 10(c)、図 10(d)) による結果に比べて、表面色にムラがある。法線の修正と反射パラメータの同時推定により得られた結果 (図 10(b)) は反射パラメータのみ推定した結果 (図 10(c)、図 10(d)、図 10(e)) に比べて、三角メッシュの平面や角の形状があらわれている箇所が少な

い。プラスチックの置物を対象として行った実験の結果を見ると、CIDER による結果 (図 13(b)) と jDE による結果 (図 13(c)) は光沢が正しく再現され、表面色も正しく再現されている。LM 法による結果 (図 13(d)) は CIDER と jDE による結果 (図 13(b)、図 13(c)) による結果に比べて、光沢を正しく再現できていない。推定結果について、撮影画像との Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) を用いて、定量的な評価を行った。釉薬の塗られた陶器の置物のレンダリング結果を比較すると、図 10(a) との PSNR は CIDER による結果 (図 10(c)) は 23.31[dB]、jDE による結果 (図 10(d)) は 23.17[dB]、LM 法による結果 (図 10(e)) は 22.94[dB]、法線の修正と反射パラメータの同時推定により得られた結果 (図 10(b)) は 23.56[dB] となった。得られた解の PSNR に着目すると、CIDER と jDE は LM 法に比べて品質の良い解を発見している。また、法線の修正と反射パラメータの同時推定により得られた結果は反射パラメータのみ推定した結果に比べて良い PSNR の値を得られている。プラスチックの置物のレンダリング結果を比較すると、図 13(a) との PSNR は CIDER による結果 (図 13(b)) は 18.94[dB]、jDE による結果 (図 13(c)) は 18.65[dB]、LM 法による結果 (図 13(d)) は 18.22[dB] となった。得られた解の PSNR に着目すると、CIDER と jDE は LM 法に比べて品質の良い解を発見している。

図 11 は図 10 の結果と同様に CIDER と jDE による結果は LM 法による結果に比べて物体の見た目および PSNR 値が改善されている。また、法線の修正と反射パラメータの同時推定を行った結果 (図 11(b)) についても反射パラメータのみを推定した結果 (図 11(c)、11(d)、11(e)) に比べて PSNR 値が改善されている。図 12 はサンプリングデータとして用いていない視点からレンダリングした結果である。CIDER や jDE は LM 法による結果に比べて物体の見た目および PSNR 値が改善されている。しかし、法線の修正と反射パラメータの同時推定を行った結果 (図 12(b)) は CIDER と jDE により反射パラメータのみ推定した結果 (図 12(c)、12(d)) に比べて PSNR 値が悪くなっている。法線の修正を最適化に加えたことで、サンプリングした反射率に対してオーバーフィッティングが起こったためではないかと考えられる。

物体表面全点の推定に要した時間は、陶器の置物では CIDER が約 24 時間 42 分、jDE が約 30 時間 37 分、LM 法が約 1 時間 30 分となった。プラスチックの置物では CIDER が約 16 時間 6 分、jDE が約 18 時間 43 分、LM 法が約 2 時間 30 分となった。CIDER は jDE と比較して短い時間で探索を終えている。

6. おわりに

本研究では CIDER を用いた反射パラメータ推定を行った。CIDER により効率の良い、精度の高い反射パラメー

タ推定が可能であることを実証した。また、法線の修正と反射パラメータの同時推定によって、反射パラメータのみ推定した場合に比べて PSNR が改善したことから、真値に近いパラメータが推定できたと考えられる。3次元物体の反射特性計測手法については、位置ずれの解消や、オクルージョン処理など多くの改善の余地があり、これらは今後の課題である。

参考文献

- [1] Brest J., Greinero S., B. B. M. M. Z. V.: Self-Adapting Control Parameters in Differential Evolution: A Comparative Study on Numerical Benchmark Problems, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 10, pp. 646–657 (2006).
- [2] Eric P. F. Lafortune, Sing-Choong Foo, K. E. T. D. P. G.: Non-linear approximation of reflectance functions, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 117–126 (1997).
- [3] Hendrik P. A. Lensch, Jan Kautz, M. G. W. H. H.-P. S.: Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail, *In ACM Transactions on Graphics*, pp. 234–257 (2003).
- [4] J.H.Lambert: Photometria sive de mensura de gratibus luminis colorum umbrae, *Eberhard Klett* (1760).
- [5] K.E.Torrance and Sparrow, E. M.: Theory for off specular reection from rough-ened surfaces, *JOSA*, Vol. 57.9, pp. 1105–1112 (1967).
- [6] Louis, S. J. and Li, G.: Case Injected Genetic Algorithms for Traveling Salesman Problems., *Inf. Sci.*, Vol. 122, No. 2-4, pp. 201–225 (online), available from (<http://dblp.uni-trier.de/db/journals/isci/isci122.html>) (2000).
- [7] Lu, R., Koenderink, J. J. and Kappers, A. M. L.: Optical Properties (Bidirectional Reflection Distribution Functions) of Velvet, *Appl. Opt.*, Vol. 37, No. 25, pp. 5974–5984 (online), available from (<http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-37-25-5974>) (1998).
- [8] Marquardt, D. W.: An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431–441 (1963).
- [9] Marschner, S. R., Westin, S. H., Lafortune, E. P. F., Torrance, K. E. and Greenberg, D. P.: Image-based BRDF Measurement Including Human Skin (1999).
- [10] Marschner, S. R.: Inverse rendering for computer graphics, PhD Thesis, Ithaca, NY, USA (1998).
- [11] Mcallister, D. K.: A generalized surface appearance representation for computer graphics, PhD Thesis (2002).
- [12] Nayar Shree K., Fang Xi-Sheng, B. T.: Separation of Reflection Components Using Color and Polarization, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 21, pp. 163–186 (1997).
- [13] Neil Alldrin, Todd Zickler, D. K.: Photometric Stereo with Non-parametric and Spatially-varying Reflectance, *In Comp. Vision and Pattern Recognition* (2008).
- [14] Ngan, A., Durand, F. and Matusik, W.: Experimental Analysis of BRDF Models, *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, Eurographics Association, pp. 117–226 (2005).
- [15] Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W. and Limperis, T.: Geometric considerations and nomenclature for reflectance, *National Bureau of Standards* (1977).
- [16] Phong, B.-T.: Illumination for Computer Generated Pictures, *j-CACM*, Vol. 18, pp. 311–317 (1975).
- [17] Riesbeck, C. K. and Schank, R. C.: *Inside Case-Based Reasoning*, L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA (1989).
- [18] Sato, Y., Wheeler, M. D. and Ikeuchi, K.: Object shape and reflectance modeling from observation, pp. 379–387 (1997).
- [19] Storn, R. and Price, K.: Differential Evolution & Ndash; A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *J. of Global Optimization*, Vol. 11, No. 4, pp. 341–359 (online), DOI: 10.1023/A:1008202821328 (1997).
- [20] Ward, G. J.: Measuring and modeling anisotropic reflection, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 26, No. 2, pp. 265–272 (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/142920.134078> (1992).
- [21] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *Technical Report MSR-TR-98-71* (1998).
- [22] 田中 雅博伊藤 稔: 関数値最適化のための Particle Swarm Optimization, Differential Evolution, 実数値遺伝的アルゴリズムの探索性能に関する検討, 甲南大学紀要. 理工学編, Vol. 52, No. 1, pp. 125–135 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110004627553/>) (2005).
- [23] 福田悠人, 川崎洋, 久野義徳, 古川亮: 実3次元物体の表面反射特性パラメータの効率的推定手法, コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 172.8, pp. 1–8 (2010).
- [24] 川崎 洋, 大沢 裕, 古川 亮, 中村泰明: 空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な3次元形状復元, 情報処理学会論文誌 CVIM, Vol. 47, No. 10, pp. 59–71 (2006).
- [25] 角野皓平, 向川康博, 八木康史: 楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-D, No. 8, pp. 1921–1937 (2007).



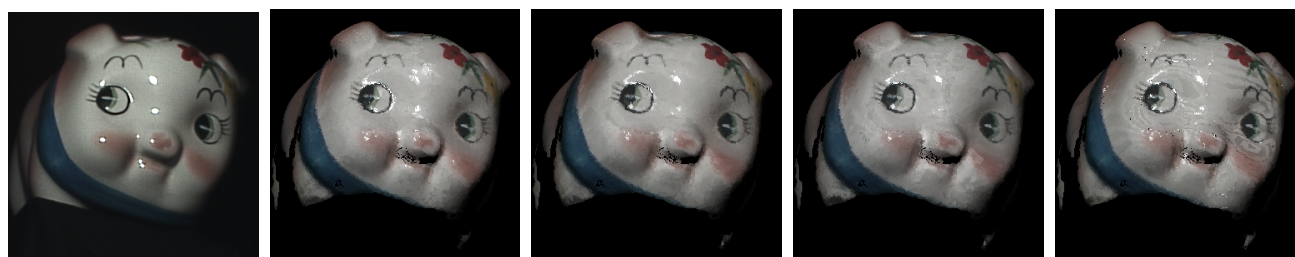
(a) 計測対象 (b) CIDER(法線修正) (PSNR:23.56) (c) CIDER (PSNR:23.31) (d) jDE (PSNR:23.17) (e) LM 法 (PSNR:22.94)

図 10 実験結果



(a) 計測対象 (b) CIDER(法線修正) (PSNR:24.58) (c) CIDER (PSNR:24.40) (d) jDE (PSNR:24.34) (e) LM 法 (PSNR:23.14)

図 11 実験結果



(a) 計測対象 (b) CIDER(法線修正) (PSNR:21.56) (c) CIDER (PSNR:22.07) (d) jDE (PSNR:22.01) (e) LM 法 (PSNR:21.03)

図 12 実験結果 (サンプリングデータとして用いていない視点でのレンダリング)



(a) 計測対象 (b) CIDER (PSNR:18.94) (c) jDE (PSNR:18.65) (d) LM 法 (PSNR:18.22)

図 13 実験結果 (プラスチックの置物)