偏 角 分 光 イメージング法 における カメラ・照 明 方 向 の最 適 化

中口 俊哉*, 河西 将範*, 津村 徳道*, 三宅 洋一*

*千葉大学工学部情報画像工学科 〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33

Optimization of camera and illumination directions on Gonio spectral imaging methods

Toshiya NAKAGUCHI*, Masanori KAWANISHI*, Norimichi TSUMURA*, Yoichi MIYAKE*

*Department of Information-and Image Sciences, Chiba University 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522, Japan

要旨

偏角分光イメージング法は物体の形状や色,光沢情報を 正確に記録することができ,ディジタルアーカイブへの 応用が期待されている.一般に偏角分光イメージング法 ではカメラ・照明の配置を多数変化させるため,計測時 間が膨大となる.本提案手法では計測時に表面粗さパラ メータを仮定し評価関数を構築する.遺伝的アルゴリズ ムにより最適化した配置を用いた撮影を行い,計測値の 妥当性を検証する.こうして物体表面の粗さを両素単位 で計測する事により,復雑な表面粗さ分布を持つ物体に 対しても適応可能な,偏角反射特性計測のための効率的 なカメラ・照明配置の決定方法を提案する.本手法の有 物性を計算機シミュレーションにより評価し,また自動 制御撮影システムを構築して画像再現実験を行った.

Abstract

Gonio spectral imaging method is significant to record the shape, reflectance spectra, gloss and texture of 3-D object for digital archives. This method, however, takes much time to record the object. In this paper, a t h e n e w method based on genetic algorithm i s introduced to reduce the taking time by optimizing the configuration of camera and illumination. We confirmed the effectiveness of the method by the computer simulation. We also confirmed the significance of the algorithm by using the developed gonio spectral imaging system based on the result of computer simulation.

キーワード:

ディジタルアーカイブ, 偏角分光イメージング法, 遺伝的アルゴリズム, 偏角反射特性

Keyword:

Digital archiving, Gonio spectral imaging, Genetic algorithm, Gonio spectral reflectance

1. はじめに

近年、情報処理技術の発達に伴い、美術品の経年劣化や破損・紛失 を防ぐため、劣化のないディジタルデータとして記録するディジタル アーカイブに関する研究が進められている。ディジタルアーカイブに は美術品の色や形状、そして光沢感の忠実な記録が必須条件となって いる.美術品の色や光沢の忠実な記録は、一般的に照明方向の変化に 伴う物体色と光沢の変化を計測することにより行われる.これまで Haneishi¹⁻⁴⁾らは Fig.1 のように照明角度を変化させて撮影したマルチ バンド画像群から、物体固有の分光反射率と照明変化に伴う反射光の 強度変化を偏角反射パラメータとして推定し、任意の照明環境下での 画像を再現する偏角分光イメージング法を提案した. この手法では照 明方向を複数変化させて撮影した離散的な画像群を,反射モデルに基 づき補間して連続データとして扱う. 高精度な反射特性パラメータの 補間は密なサンプリング間隔により可能となるが、その反面、冗長な データが増加する.藤牧 5)らは光沢ピーク位置が物体の法線情報から 推定できることに着目し、ヒストグラムマッチングによる光源方向の 修正、画像処理に基づく光源方向の追加の二段階の処理を行うことに より,光沢の強度,表面粗さをより正確に計測する適応的偏角分光イ メージング法を提案した.また Seidel⁶⁾らは、少数の撮影画像群から反 射特性パラメータの推定精度を評価し,補間精度を最も向上させるカ メラ,照明方向を追加する事により、少数の撮影画像群から高効率に 偏角反射特性を計測する手法を提案した.しかし,藤牧らの手法は光 沢のピーク位置に関して、配置されている全ての照明方向の強度比を

Fig.1 挿入

比較する必要があり,効率が悪いという問題点があった.また Seidel らの手法は類似色画素同士をクラスタリングし,類似色領域内は等し い偏角反射特性を持つと仮定しているため,複雑な反射特性を有する 物体に対して高精度な計測は困難であった.以上のように,従来まで は画素単位の偏角反射特性を高効率,高精度に計測することはできな かった.

そこで本研究では、画素単位で偏角反射特性の計測を可能とし、よ り少ない撮影回数で高精度に計測を行うカメラ、照明配置の決定手法 を提案する.測定対象の表面粗さパラメータを仮定し評価関数を構築、 遺伝的アルゴリズムを用いてカメラ・照明配置を決定する.得られた 配置から実際に撮影を行い、算出した表面粗さパラメータの妥当性を 検証する.そして表面粗さが確定しない画素に対して表面粗さパラメ ータの仮定値を更新して上記の測定を繰り返す.本手法を実施するた めに完全自動制御による撮影システムを構築し、撮影した実物体をモ ニター上でリアルタイムにカメラ、照明方向を変化させて画像再現で きることを確認した.

2. 偏角分光イメージング法

物体の反射光はFig.2に示す二色性反射モデル⁷⁾を用いて近似できる. Fig.2 挿入 このモデルは物体色の影響を受けず入射光の色のみから成る表面反射 光成分と,物体表面色素粒子の光吸収波長に依存した内部反射光成分 とに分離して全反射光を近似する.反射光f(r,*ω*)は各成分の線形和とし て次式で与えられる.

 $\mathbf{f}(\mathbf{r},\omega) = k_s(\mathbf{r},\omega)\mathbf{e}_s + k_d(\mathbf{r},\omega)\mathbf{e}_d(\mathbf{r})$ (1) ここで**r**は物体表面の位置ベクトル, $\omega = [\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r]$ はそれぞれ入射 光源の天頂角 θ_i ,方位角 ϕ_i と視点方向の天頂角 θ_r ,方位角 ϕ_r を表してお り、 \mathbf{e}_s は表面反射光成分の色を表す単位ベクトル、 $\mathbf{e}_d(\mathbf{r})$ は内部反射光 成分の色を表す単位ベクトルである.表面反射光の色成分は光源色に 等しいとするので \mathbf{e}_s は標準白色板を撮影することで得られ、 $\mathbf{e}_d(\mathbf{r})$ は事 前に偏光板を用いた内部反射光成分撮影法⁸⁾を用いて取得することが 出来る. $k_s(\mathbf{r}, \omega), k_d(\mathbf{r}, \omega)$ はそれぞれ表面反射光成分,内部反射光成分の 強度を表す.理論的には $\mathbf{e}_s \ge \mathbf{e}_d(\mathbf{r})$ のベクトルが完全に同じでなければ 撮影した色情報から $k_s(\mathbf{r}, \omega), k_d(\mathbf{r}, \omega)$ それぞれの成分に分離することが可 能である.偏角分光イメージング法では、複数回計測して得られた各 成分を光の反射モデル⁹⁻¹²⁾に近似してモデル化を行うことにより、任 意照明方向における画像再現を行うことが可能となる.

本論文では光の反射モデルとして、比較的計算コストが少なく一般 的に広く利用されている Phong モデル⁹⁾を用いる. Phong モデルは、 光源の入射角と視点角度のにおける各反射光強度を次のように与える.

$$k_{s}(\omega) = A\cos^{G} \alpha$$

$$k_{d}(\omega) = B\cos\theta_{i}$$
(2)

ここで,αは光源入射の正反射方向と視点方向がなす角度である.パ ラメータA,Bは各成分の強さ,Gは表面反射光の収束度を表しており,Gの値が大きくなるほど表面は滑らかで尖鋭な光沢を表現する.

本研究では 5 種類のカラーフィルタを用いて撮影したマルチバンド 画像群から分光反射率を推定し分光画像を得る.カメラのセンサ応答 ベクトル v(r, ω)は以下のように表すことができる.

$$\mathbf{v}(\mathbf{r},\omega) = \mathbf{H}\mathbf{f}(\mathbf{r},\omega)$$
(3)
$$= k_s(\mathbf{r},\omega)\mathbf{H}\mathbf{e}_s + k_d(\mathbf{r},\omega)\mathbf{H}\mathbf{e}_d(\mathbf{r})$$
$$= A(\mathbf{r})\cos^{G(\mathbf{r})}\alpha\mathbf{H}\mathbf{e}_s + B(\mathbf{r})\cos\theta_i\mathbf{H}\mathbf{e}_d(\mathbf{r})$$

ここでHはカメラのシステムマトリクスを表す.重回帰分析を用いて 逆行列 H⁻¹を推定することで,センサ応答ベクトル v(r, ω)から f(r, ω)が 得られ, k_s (r, ω), k_d (r, ω)値を算出できる.複数回の計測データを最小自 乗近似を用いて反射モデルにフィッティングすることで反射モデルパ ラメータを得る.

3. 偏角分光イメージング法におけるカメラ・照明方向の最適化

高精度な偏角反射パラメータを計測するためには多数のカメラ・照 明方向における撮影が必要となる.そこで偏角分光イメージング法で は反射モデルに近似することで撮影回数を削減することができるが, 近似精度は撮影位置に大きく依存する.効率的かつ高精度に偏角反射 特性を計測するためには,適切なカメラ・照明方向を決定する必要が ある.一般に表面粗さが既知であれば,少数で最適なカメラ・照明の 配置を算出することができる.しかし,当然ながら表面粗さは未知で あるため,カメラ・照明配置の適切さを客観的に評価することも困難 である.そこで本研究では対象物体の表面粗さパラメータを所定のア ルゴリズムに従って仮定し,仮定した粗さ特性を有する物体を計測す るのに適切なカメラ・照明配置を算出する.この配置を用いて実際に 計測を行い,仮定した値の妥当性を検証することで対象の表面粗さを 決定するという手法を提案する.

従来,物体全体の表面粗さを均一とする仮定や表面の色情報を用い て領域をクラスタリング分割し,各領域内は均質であるという仮定で 粗さパラメータを計測する手法⁶⁾が提案されてきた.しかしこれらの 仮定は複雑な実物体に対しては成立しないため,本研究では物体表面 の画素単位で異なる粗さパラメータを有するという条件での測定を目 標とする.一般に撮影対象の形状変化は非連続的であり,オクルージョンも考慮すると,カメラ・照明方向の決定は組合せ最適化問題として定式化する必要がある.カメラと照明の配置場所は計測対象物体を中心にした同心円上とし,中心角をn_p個に分割して与える.n_pの増加と共に探索する解の組合せ総数は爆発的に増加する為,本論文では組合せ問題の強力なヒューリスティック解法である遺伝的アルゴリズム¹³⁾を用いて適切なカメラ・照明方向を決定した.

カメラ・照明の配置決定アルゴリズムの流れを Fig.3 に示す. 前処理 として 3D スキャナを用いて物体の三次元形状を取得する. 物体の三 次元形状から各カメラ・照明方向において観測できる面と法線方向を 算出する.この情報を予めデータベース化しておき,各画素に対して カメラ・照明方向が変化した際の遮蔽領域や影領域を高速に算出する. 対象物体の表面粗さが未知の場合、カメラ・照明配置の適切さを評価 する指標を決定することができない. そこで物体の表面反射光収束度 が G^Aであると仮定し評価関数を構築する.この評価関数に従って遺伝 的アルゴリズムを用いてカメラ・照明方向の最適化を行う. カメラと 照明方向を同時に最適化すると、解の組合せが莫大になり探索精度が 低下するため、カメラと照明の最適化処理を分離する.まず、照明配 置を固定した上で、3.1節で述べる最適化手法によりカメラ配置を決定 する. ここで得たカメラ配置に対して 3.2 節で述べる最適化手法を用 いて照明配置を決定する.以上,カメラと照明の最適化処理を交互に 繰り返し行うことにより,全体的な最適解を探索する.この繰り返し の終了条件としては上限回数を定めた.

上記の手法で得たカメラ・照明配置を用いて実撮影を行い,物体の 偏角反射特性を計測する.計測結果から算出した表面反射光収束度 Fig.3 挿入

G^R(i=1…n_s)と測定時に仮定したG^Aを用いて3.3節で述べる方法で計測 値の妥当性を検証する.検証結果から妥当性が得られた画素に対して は偏角反射特性を決定し,妥当性が得られない画素に対しては表面反 射光収束度の仮定値G^Aを更新し,カメラ・照明配置に関する評価関数 の構築から処理を繰り返す.繰り返し処理の終了条件は全画素の偏角 反射特性が決定するまでとした.

3.1. カメラ配置の最適化

カメラ配置を決定する必要条件として物体を構成する全ての画素が 最低限一度は観測できることとする.この条件を満たした上で,照明 配置を考慮した最適なカメラ配置を探索する.本論文では簡単化のた め、カメラの配置天頂角を 90 度(水平)に固定する.方位角を n_pに分 割してカメラの配置候補位置を与える.Fig.4 に示すカメラ配置の遺伝 子表現を次のように与える.

Fig.4 挿入

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1, c_2, \dots, c_{n_p} \end{bmatrix}$$
where $c_j = \begin{cases} 0 & \text{when } \text{ 配置場所 } j \text{ ic} \text{ } j \text{ } \beta \text{ } \delta \text{ } 0 \end{cases}$
(4)
$$1 & \text{when } \text{ Rtll } \text{ } j \text{ } \text{ } \beta \text{ } j \text{ } \delta \text{ } \delta$$

物体表面を構成する全画素数をn とすると,必要条件は次式で与える

$$\sum_{j=1}^{n_{p}} \mathbf{L}_{i,j} c_{j} \geq 1 \quad \forall i, i = \{1, \dots, n_{s}\}$$
where $\mathbf{L}_{i,j} = \begin{cases} 1 \text{ when } \bar{j} n \bar{j} n \bar{j} m \bar{j} n \bar{j} n$

Lは事前の3次元形状計測時に算出した行列である.

表面粗さを高精度に推定するためには,光沢のピーク付近を計測す るのが効率的である.そこで,カメラの適切な配置を評価する指標と して照明入射の正反射方向のカメラ配置を高評価とする評価関数を構築した. 画素*i*, カメラ位置*j*, 照明位置*k*における, 照明入射の正反射方向とカメラ方向がなす角を**D**_{*i*,*j*,*k*}として, カメラ配置の評価関数を 次のように与える

$$F_{c}' = \sum_{i} \sum_{j} \sum_{k} c_{j} s_{k} \mathbf{L}_{i,j} \mathbf{L}_{i,k} \cos(D_{i,j,k})$$
⁽⁶⁾

ここで*s*_kは照明配置に関する遺伝子表現であり詳細は次節で述べる. 次に,カメラの撮影配置数は可能な限り少ない方がよい.そこでカメ ラ配置数最小化の為の評価関数を次のように与える

$$F_{c}'' = \left(n_{p} - \sum_{j=1}^{n_{p}} c_{j}\right)^{2}$$
(7)

以上の(6),(7)式よりカメラ配置の総合評価関数 F_c を得た.

$$F_c = F_c' + F_c'' \tag{8}$$

この F_cを最大化するカメラ配置の組合せ Cの探索には遺伝的アルゴリ ズムを用いた.遺伝子の個体数は 500 個用意し,初期値は乱数で決定 した.算出した評価関数から上位 50%の遺伝子はエリートとして残し, 下位 50%の遺伝子は淘汰する.淘汰した個体を補充するためエリート 遺伝子の1点交叉により遺伝子を生成する.また突然変異としてラン ダムに選択した 10%の遺伝子に対して1ビット反転を行った.以上の アルゴリズムにより 100 世代まで繰り返し,最終的に最も評価値の高 いカメラ配列を選択した.

3.2. 照明方向の最適化

物体表面の偏角反射特性を計測するためには最低限2種類のジオメ

トリからの撮影が必要となる.前節で述べたように全ての表面領域は カメラによって最低限一度は撮影されることが保証されている.従っ て各表面領域に対して2度の撮影を行うためには全ての面が2種類の 照明方向から照射される必要がある.これが照明配置に関する必要条 件となる.照明方向の最適化においては,この必要条件を満たした上 で,カメラ配置を考慮した最適な配置を探索する.本論文では簡単化 のため,照明の配置天頂角も90度(水平)に固定する.方位角をn_pに 分割して照明の配置候補位置を与える.Fig.4に示す照明配置の遺伝子 表現を次のように与える.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1, s_2, \dots, s_{n_p} \end{bmatrix}$$
where $s_j = \begin{cases} 0 & \text{when 配置場所 } j \text{にカメラを配置しない} \\ 1 & \text{when 配置場所 } j \text{にカメラを配置する} \end{cases}$
(9)

全ての物体表面が2度照明される必要条件を次式に示す

$$\sum_{j=1}^{n_p} \mathbf{L}_{i,j} s_j \ge 2 \qquad \forall i, i = \{1, \cdots, n_s\}$$

$$(10)$$

照明配置の評価関数は反射モデルの補間精度を用いて定義する.まず, 照明配置Sを用いて計算機上で撮影シミュレーションを行い, Phoneの 反射モデルにフィッティング近似することで偏角反射特性曲線を推定 する.推定した偏角反射特性曲線と表面反射光収束度の仮定値G^Aを有 する偏角反射特性曲線との RMSE 誤差を算出し,誤差の逆数を照明配 置の評価値として与える. RMSE 誤差は各点に対して算出されるので, 総合的な照明配置最適化の評価値は次式で与えられる,

$$F_l' = \sum_i \left\{ e_i \left(\mathbf{C}, \mathbf{S}, G^A \right) \right\}^{-p}$$
(11)

ここで $e_i(\mathbf{C}, \mathbf{S}, \mathbf{G}^A)$ は画素iに対してカメラ配置 \mathbf{C} と照明配置 \mathbf{S} によって 推定される偏角反射特性曲線と表面反射光収束度の仮定値 \mathbf{G}^A から得 られる偏角反射特性曲線との RMSE 誤差を与える関数である.pは誤 差の影響度を決定する係数である.カメラの配置数と同じく照明回数 も可能な限り少ない方がよい.そこで照明回数最小化の為の評価関数 を次のように与える

$$F_{l}'' = \left(n_{p} - \sum_{j=1}^{n_{p}} s_{j}\right)^{2}$$
(12)

以上の(11),(12)式より照明配置の総合評価関数 F₁を得た.

 $F_{l} = F_{l}' + F_{l}'' \tag{13}$

この F_iを最大化する照明配置 Sの探索には遺伝的アルゴリズムを用いた.遺伝子の個体数は 500 個用意し,初期値は乱数で決定した.算出した評価関数から上位 50%の遺伝子はエリートとして残し,下位 50%の遺伝子は淘汰した.個体数を補充するためエリート遺伝子配列の 1 点交叉により遺伝子を生成する.また突然変異としてランダムに選択した 7%の遺伝子に対して 1 ビット反転を行った.以上のアルゴリズムにより 100 世代まで繰り返し,最終的に最も評価値の高い照明配列を選択した.

3.3. 計測値の有効性検証と仮定する表面反射光収束度の更新

まず計測値の有効性について検討する.表面反射光収束度の仮定値 *G^A*を 20 として,前節の手法を用いて適切なカメラ・照明配置を決定 する.面に対する照明回数を 3,4,5回と強制的に固定し,様々な表 面反射光収束度*G^R*を有する対象に撮影シミュレーションを行った.撮 影シミュレーションから算出した偏角反射特性曲線の RMSE 誤差を対

Fig.5 挿入

数プロットした結果を Fig.5 に示す. この結果を見ると G^Aよりも G^Rが 小さい時,つまり仮定より粗い面に関しては計測結果が有効であるこ とが分かる.一方, G^Aより G^Rが大きい場合,精度は急激に低下する. この特性を用いて測定対象となる全画素に対して計測結果の有効性を 検証し,未決定の画素に対して表面反射光収束度の仮定値を更新する アルゴリズムを次に述べる.

まず仮定する表面反射光収束度 G^A の初期値として 20 を与え, 3.1, 3.2 節で述べた手法を用いて計算機上で撮影条件を決定し,実撮影を行う. この実撮影から画素 *i*における表面反射光収束度 G_i^R を全ての画素 に対して算出する.上記の検討により計測した $G_i^R \leq G^A$ であれば G_i^R は有 効であることが分かっている.従って $G_i^R \leq G^A$ を満たす画素 *i*について は G_i^R を表面反射光収束度として決定し, $G_i^R \leq G^A$ を満たさない画素 *i*に ついては表面反射光収束度の仮定値 G^A を 2 倍の値に更新し,カメラ・ 照明配置の算出から再計算を行う.この処理を全ての画素に対して表 面反射光収束度が決定するまで繰り返す.

4. 提案手法の有効性評価

本手法の有効性を評価するため、まずは計算機シミュレーションを 用いて評価実験を行った.計測対象として Fig.6 に示す実物の瓶を用意 し、3D ディジタイザにより計測した形状データを本シミュレーション に用いた.表面粗さの計測単位を3次元ポリゴンの面数($n_s = 6253$)とし、 各ポリゴン面に仮想的に Phong モデルの光沢強度パラメータA = 100、 表面反射光収束度Gには $\{10,20,50,100\}$ の4種の値からランダムに割り当 てた.カメラ・照明方向の分割数 $n_p = 54$, G^A の初期値には 15を与え、 本論文で提案する計測アルゴリズムを用いて撮影シミュレーションを

Fig.6 挿入

行った.

提案手法による計測結果の比較対象として,照明配置を 54 方向全て の配置から撮影して得られる偏角反射特性を算出した.計測誤差 (RMSE)について本手法と全方向から撮影した結果との比較を Table.1 に示す.提案手法では従来手法に比べ,少ない撮影回数かつ高精度な データの推定が行われている.

Tbl.1 挿入

5. 提案手法の実画像への応用

本手法を実画像へ適用するため、Fig.7 に示す画像計測システムを構築し画像再現実験を行った.本システムは 3D ディジタイザ(コニカミノルタ Vivid910),回転式マルチバンドフィルタ,走行台付ロボットアーム(Mitsubishi MELFA A-2),照明光源から成る.これらのハードウェアは計算機上のプログラムから制御し,撮影処理は自動化されている.計測結果を元に画像を再現した結果を Fig.8 に示す.ポリゴンの回転,移動,そして照明方向の変化による光沢の変化をリアルタイムに再現するため、グラフィックスハードウェアを用いて並列演算を行った.この開発には ATI 社が提供しているソフト Render Monkeyを用いた.Render Monkeyを用いた.Compa を用いることにより Microsoft 社の Direct Graphics や OpenGL といった 3D 描画 API でサポートされているリアルタイムシェーディング言語(HLSL や GLSL)による開発,プレビュー表示などを GUI 操作で容易に行うことができる.

Fig.8 挿入

Fig.7 挿入

6. まとめ

本論文では効率的な撮影回数で画素単位の偏角反射特性を計測する 手法を提案した.まず,表面反射光収束度を仮定しカメラ方向・照明 方向に対する評価関数を構築,遺伝的アルゴリズムを用いて適切な撮 影条件を決定した.得られた撮影条件に従い実際に撮影を行い,測定 した表面反射光収束度と仮定した表面反射光収束度を比較して測定値 の妥当性を検証できるという特性が得られた.妥当な計測値が得られ た画素は計測を終了し,計測値が決定できない画素に対してのみ仮定 する表面反射光収束度を更新して再度測定を行う.このアルゴリズム により複雑な表面粗さ分布を持つ物体を効率的に計測することが出来 るようになった.

また本手法の実撮影への応用として、3D ディジタイザ・回転式マル チバンドユニット・走行台付ロボットアームを制御する自動計測シス テムを構築した.画像再現にはグラフィックスハードウェアを用いて 各ポリゴンの移動,回転に要する時間を高速に処理し,視線方向や照 明方向が変化した際の画像の見えの変化をリアルタイムに再現可能と なった.

カメラ・照明配置の最適化手法として遺伝的アルゴリズムを用いた が,最適化パラメータのチューニングが十分ではない.計測対象とし て現在は比較的簡易な形状データを用いているが,隠蔽領域の処理な ど改善の必要がある.

謝辞

5 章,画像再現実験の環境データは国立歴史民俗博物館の協力により,博物館内を実際に撮影して得たものである.このデータを用いて CUBE MAP 手法により仮想的な博物館の一室を再現した.

参考文献

1. H. Haneishi, T. Iwanami, N. Tsumura and Y. Miyake, Proc. 6th Color

Imaging Conference, 173(1998).

- K. Tonsho, Y. Akao, N. Tsumura and Y. Miyake, Proc. SPIE, 4663, 370(2001).
- H. Haneishi, T. Iwanami, T. Honma, N. Tsumura and Y. Miyake, JIST, 45(5), 45(2001).
- 本間友之,羽石秀昭,津村徳道,宮田公佳,三宅洋一,ディスプレイアンドイメージング,8,293(2000).
- 藤牧達彦,河西将範,中口俊哉,津村徳道,三宅洋一,2004年度日本写真学会年次大会,24(2004).
- H. P. A. Lensch, J. Kautz, M. Goesele, W. Heidrich, H. P. Seidel, ACM Trans. Graphics, 22(2), 234(2003).
- 7. S. A. Shafer, COLOR Res. & app., 10(4), 210(1985).
- 8. 三宅洋一,"ディジタルカラー画像の解析・評価",東京大学出版 会,東京,2000, pp.45-47.
- 9. B. Phong, Comm. of ACM, 18(6), 311(1975).
- K. E. Torrance and E. M. Sparrow., J. Opt. Soc. Am, 57(9), 1105(1967).
- R. L. Cook and K. E. Torrance, Computer Graphics, 15(3), 307(1982).
- M. Oren and S. K. Nayar, Intl. J. of Computer Vision, 14, 227(1995).
- 13. 伊庭斉志,"遺伝的アルゴリズム",医学出版,東京,2002.

Figure and Table captions

Table.1: Accuracy comparison between 54 times shooting and proposed method.

Fig.1: Gonio spectral imaging methods. (a)Multi-band imaging. (b) Multi-illumination imaging.

Fig.2: Dichromatic reflection model.

Fig.3: Schematic flow of optimization process.

Fig.4: Gene representation of camera and illumination configuration.

Fig.5: Simulation results of effective range of measured surface property.

Fig.6: The object used in the experiment.

Fig.7: Automatic imaging system.

Fig.8: Digital reproduction result of the object taken by the proposed method.

Table.1

	54 times shooting	Proposed method
Number of shooting	54	32
RMSE of specular intensity (A)	10.2	8.4
RMSE of surface roughness (<i>G</i>)	2.4	1.2





Fig.1















