

疎な特徴点と鏡面反射を用いた三次元形状推定

満上 育久[†] 松下 康之^{††} 八木 康史[†]

[†] 大阪大学産業科学研究所 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

^{††} Microsoft Research Asia Dan Ling Street, Haidian District, Beijing, 100080, P.R.China

E-mail: [†]{mitsugami,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ^{††}yasumat@microsoft.com

あらまし 本稿では、対象物体をカメラで撮影した際に得られる疎な特徴点と鏡面反射から密な三次元形状復元を行う手法を提案する。三次元形状復元手法として、近年、Structure from Motion と Multi-view stereo を組み合わせて用いる方法がよく利用されるが、この方法ではテクスチャが少ない光沢物体をうまく復元できない。提案手法は、このような物体に対して特に有効な手法として設計されている。提案手法ではまず、対象物体の表面を局所的に多項式曲面でモデル化し、疎な三次元点群と鏡面反射から得られる法線情報を用いて、その係数を決定する。そして、この局所曲面を統合して対象全体の表面形状を得る。CG 画像および実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

キーワード Structure from Motion, 三次元形状復元, 鏡面反射, 多項式曲面

1. はじめに

三次元形状復元は、コンピュータビジョンにおける重要な課題の一つである。近年、Structure-from-Motion (SfM) や Multi-view Stereo (MVS) などの手法については、比較的安定に動作するオープンソースソフトウェアとしても提供されるようになり、これらの技術を誰もが容易に利用できるようになってきている。しかし、これらの手法が適用できるシーンはまだまだ非常に限定的であり、我々の日常生活の中でよく見かけるテクスチャの少ない物体や光沢物体、透明物体などには適用できない。例えば、図 1 に示す陶器は、中央部の白色の領域はテクスチャが無く画像間で対応点が得られないため、これらの手法では形状復元が困難である。このような領域に対しては、周囲の特徴点が密な領域の三次元情報を用いて補間処理を行うことしかできない。また、図 1 上段左の (A) のように、その光沢性のために鏡面反射ハイライトが物体表面のテクスチャの一部を覆い隠すことがあると、特徴点抽出や対応点探索の妨げとなる。

一方で、鏡面反射は物体表面の法線情報を与える有益な情報と捉えることもできる。光源からの物体表面上の点への入射角と反射角は等しいという性質があるため、カメラと光源の相対的な位置関係が与えられれば、鏡面反射ハイライトが観測される点での物体表面の法線方向を算出することが可能である。例えば、図 1 上段左の (A),(B) の鏡面反射ハイライトはその点における物体表面の法線を与える。特に (B) については、上述のとおり既存の SfM や MVS ではその位置の関する形状情報が取得できないのに対して、このハイライトにより正確な法線方向を与えられる。

本稿では、対象物体を複数の視点から撮影した画像を

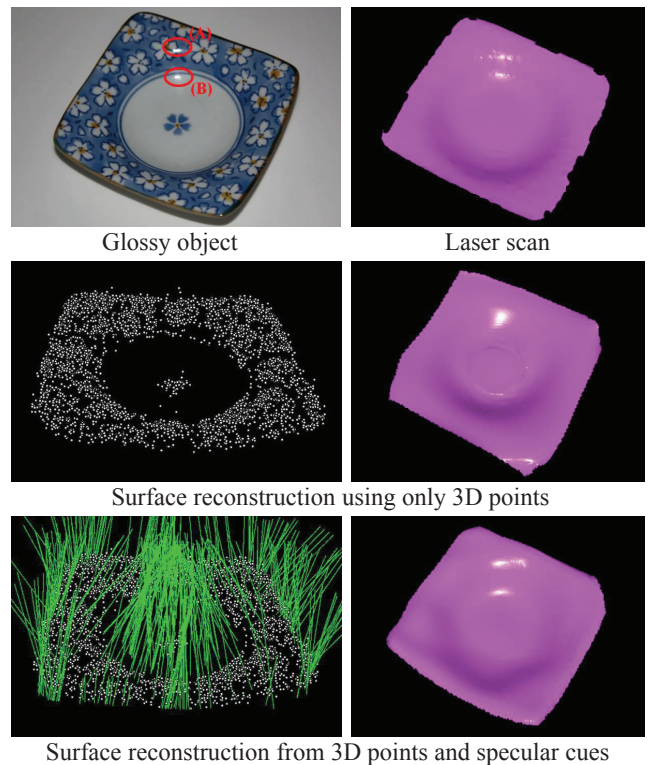


図 1 提案手法の概要 (上段左: 対象物体, 上段右: 対象物体のレンジデータ, 中段左: SfM による三次元点群, 中段右: 三次元点群を用いた密な形状復元, 下段左: SfM による三次元点群と鏡面反射情報, 下段右: 三次元点群と鏡面反射を用いた密な形状復元 (提案手法))

用いて、そこから疎な三次元点群と鏡面反射ハイライトを獲得し、密な三次元形状復元を行う手法を提案する。この手法では、対象物体の表面形状の局所領域を多項式曲面で表現し、その局所曲面を、特徴点ベースの SfM によって得られる三次元点群と鏡面反射ハイライトから得

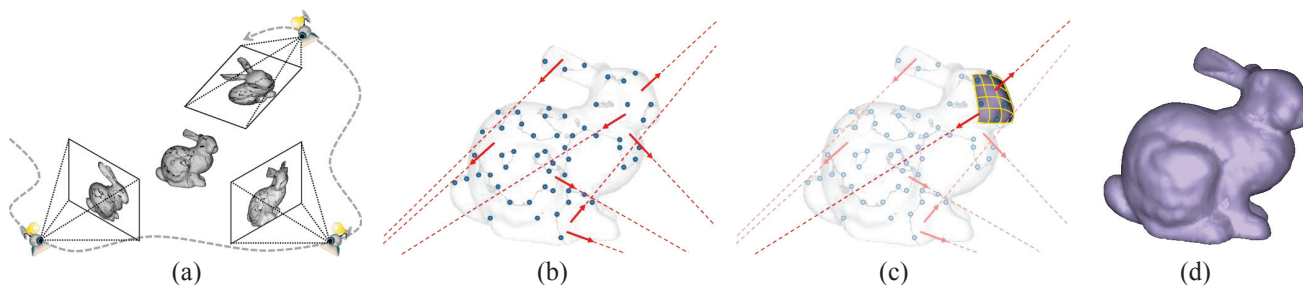


図2 提案手法のアウトライン：(a) 点光源付きカメラデバイスを用いて複数視点から画像を撮影する。(b) 特徴点の三次元点群および鏡面反射ハイライトをマッピングする。(c) 各局所領域について、その近傍の三次元点群と鏡面反射から多項式曲面を推定する。(d) 局所曲面を統合して対象物体の形状を獲得する。

られる法線情報を同時に満たす多項式曲面として算出する。そして、得られた局所曲面を統合して、形状復元結果とする。この手法によって、光沢物体の形状復元において、その表面のテクスチャから得られる三次元点群のみを用いるよりも正確な復元が可能となる。

なお、この手法では、点光源がカメラの視点位置に存在するという条件を設ける。この条件によって、鏡面反射が観測される点の法線はカメラの視点を向いていることが保証され、提案手法が実現されている。この条件は、一見特殊に見えるが、一般的なフラッシュ内蔵型のデジタルカメラで対象物体を撮影する際には、近似的にこの条件を満たすものと捉えられるので、その適用範囲は広い。また、この提案手法は、カメラの視点に存在する点光源による鏡面反射ハイライトのみを獲得するために暗室内で撮影を行うことを前提としているが、実際には各視点において光源を点灯・消灯した2枚の画像を用いることで容易に環境光を除去できるため、任意の光源環境下で利用可能な汎用的な手法である。

2. 関連研究

一般的に、ステレオ視に代表される三角測量ベースの形状復元手法において、鏡面反射は対応点探索の妨げとなり、形状復元性能を低下させる。Bhat らは3視点の画像を用いることで鏡面反射を除去する手法を提案し[1]、これは後に Li らによりマルチベースラインステレオに拡張されている[2]。Jin らも類似した手法をマルチフレームステレオの中で用いている[3]。これらの既存研究では、鏡面反射は対応点探索を悪化させる要因として位置づけられている。

一方、鏡面反射から得られる法線情報を形状復元に用いるアプローチも存在する。古くは、Ikeuchi がフォトメトリックステレオ[4]を拡張した光沢物体の形状復元法を提案している[5]。その後、Blake や Zisserman は鏡面反射の基本的な性質について議論し、局所的な凹凸が異なる視点からの鏡面反射観測のみから推定できることを示した[6]～[8]。Fleming らは、人間知覚の観点でこの性質を論じている[9]。Oren と Nayar は鏡面物体

の表面における映り込みパターンとその表面に実際に存在するパターンを分離するアルゴリズムを提案し、前者の軌跡によって三次元形状復元を行う方法についても論じている[10]。Savarse らは、計測対象の鏡面物体に平面のチェスボードパターンを写りませたものを撮影することにより、その対象3次までの曲面であれば形状復元することが可能であることを示している[11]。

スペキュラーフローは Roth らによって提案された三次元形状復元手法である[12]。これは、チェスボード等のキャリブレーションターゲットを必要とせず、カメラや対象物体を動かした際の物体表面の映り込みのフローから形状復元を行うことができる手法である。Adato らは、このアイデアを利用して、カメラの光軸を中心としてカメラと対象物体を同時に回転させることによって相対的に周囲の環境を回転させ、その環境下での形状推定法を提案している[13]。この手法は Canas らによって線形な定式化がなされている[14]。これらの研究はいずれも、鏡面物体の形状を決定するためにいくつかの初期条件を必要としており、一般的な用途への応用が難しい。また、これらの手法では、三次元形状が鏡面反射から得られる法線情報の積分によって算出されるため、累積誤差によって形状に歪みが生じやすいという問題がある。

鏡面反射については、さらに他の利用法も存在する。Laggarr らは、鏡面反射の観測位置が物体の表面の姿勢変化に応じて敏感に変化することを利用して、三次元の姿勢推定に鏡面反射を用いる手法を提案している[15]。Chang らも、対象の幾何学的な三次元情報を用いずに、鏡面反射の情報から姿勢推定を行う手法を示している[16]。また、DelPozo らは、鏡面反射ハイライトの存在から鏡面反射面を検出する手法を提案している[17]。

本稿の提案手法も、以上の既存研究と同様に、鏡面反射による対象物体表面の法線方向を利用する。しかし、その利用方法は既存研究とは異なり、提案手法は、点在了鏡面反射ハイライトと疎な三次元点群を組み合わせることで正確な形状復元を行う手法として設計されている。

3. 提案手法

疎な三次元点群と鏡面反射の観測によって対象物体の三次元形状復元を行う提案手法の流れを図2に示す。この手法では、複数の視点から対象物体を撮影した画像群を入力とする。この撮影には視点と同じ位置に点光源を有するカメラデバイスを用いており、撮影された各画像において対象物体表面上にその鏡面反射のハイライトが映る。このデバイス構成は特殊なものではなく、一般的なフラッシュ付きデジタルカメラも近似的にこの構成を満たすとみなすことができる。

対象物体の撮影は暗室で行われるものとする。この制約により、画像中で観測される鏡面反射ハイライトはすべて上述のデバイスの点光源によるものであることが保障される。実際には、4.3節で述べるように、他の環境光が存在する一般的な環境下にも対処可能であるが、ここではまず、このような暗室環境下での撮影画像を入力とした三次元形状復元手法として説明する。

まず、一般的なSfM手法[18]を用いて、画像群からカメラの内部パラメータ（焦点距離 f 、画像中心 $\bar{u}$ 、レンズ歪み係数）、外部パラメータ（位置 $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^\top$ と姿勢 $\mathbf{R}$ ）、さらにはシーン中で疎に得られる特徴点の三次元位置情報 $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^\top$ が得られる。特徴点は対象物体の表面に存在することから、その三次元位置情報は形状復元を行う上で重要な制約となる。本稿ではこの制約を**点制約**と呼ぶ。一方、各画像に対して、鏡面反射ハイライトを、輝度値の飽和した画素領域として抽出する。これらの領域は対象物体表面の法線情報を持っており、やはり形状復元を行う上で重要な制約となる。本稿では、この制約を**法線制約**と呼ぶ。この法線制約は三次元空間中の直線 $(\mathbf{q}, \mathbf{v})$ （**鏡面反射直線**と呼ぶ）として表現される。ここで、 $\mathbf{q}$ はその鏡面反射直線上の一点、 $\mathbf{v}$ はその方向ベクトルである。

上述のようにカメラの視点と点光源の位置が一致するデバイスを用いているため、鏡面反射直線はカメラの視点を通る。すなわち、各鏡面反射直線 $(\mathbf{q}, \mathbf{v})$ について、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{q}_m = \mathbf{R}_c^\top \mathbf{t}_c \quad (1)$$

ただし、添字の m と c はそれぞれ鏡面反射直線と視点のインデックスである。一方、方向ベクトル $\mathbf{v}_m$ は、各画像中の鏡面反射ハイライトの位置 $\mathbf{s}$ を用いて以下の式で表現される。

$$\mathbf{v}_m = \mathbf{R}_c^\top \frac{((\mathbf{s}_m - \bar{\mathbf{u}}_c)^\top, -f_c)^\top}{\|((\mathbf{s}_m - \bar{\mathbf{u}}_c)^\top, -f_c)^\top\|} \quad (2)$$

この式から明らかなように、方向ベクトル $\mathbf{v}_m$ は単位ベクトルとしている。本稿を通して、方向ベクトルはすべて単位ベクトルとする。

提案手法では、対象物体の形状をその表面を局所多項

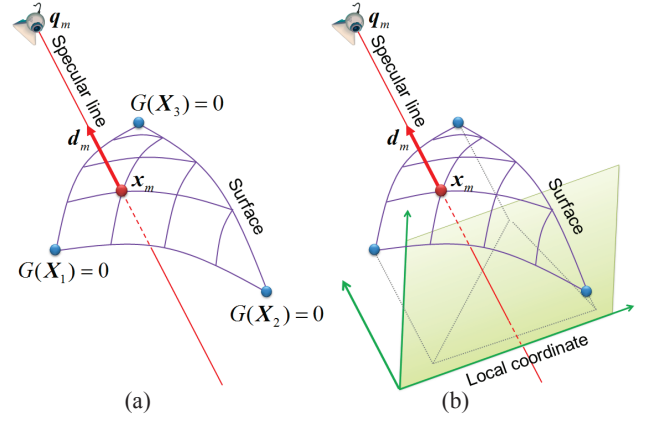


図3 局所多項式曲面推定と鏡面反射直線

式曲面の集合として表現する。点制約 $\mathbf{X}_n$ と法線制約 $(\mathbf{q}_m, \mathbf{v}_m)$ から、各局所多項式曲面について最適な係数を求めることが必要となる。

一般的に、多項式曲面 G は以下のように定義される。

$$G(\mathbf{x}) = \sum_{0 \leq i, j, k \leq r} a_{ijk} x^i y^j z^k = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$ はその曲面上の任意の点、 a_{ijk} は多項式の係数である。多項式曲面 G を求めることは、すなわちこの係数 a_{ijk} を求めることを意味する。

点制約すなわち対象物体上の点群 $\mathbf{X}_n = (X_n, Y_n, Z_n)$ のみが与えられる場合、以下の最小化問題として多項式の係数が決定できる。

$$\{G \mid \sum_n G(\mathbf{X}_n)^2 \rightarrow \min\} \quad (4)$$

本稿では、この点制約に加えて、法線制約を用いる。上述のように、法線制約の直線が対象物体表面上でハイライトが観測された点 $\mathbf{x}_m = (x_m, y_m, z_m)^\top$ における法線が鏡面反射直線と一致することから、多項式曲面の係数の決定は次の最小化問題に帰着できる。

$$\{G \mid (1 - \lambda) \sum_n G(\mathbf{X}_n)^2 + \lambda \sum_m \left\| \mathbf{v}_m - \frac{\nabla G(\mathbf{x}_m)}{\|\nabla G(\mathbf{x}_m)\|} \right\|^2 \rightarrow \min\} \quad (5)$$

ここで、 $\lambda \in [0, 1]$ は点制約と法線制約の重み係数である。右辺の第二項は鏡面反射直線方向ベクトル $\mathbf{v}_m$ と多項式曲面 G の法線方向ベクトル $\nabla G(\mathbf{x}_m)$ の差を表す。

この局所多項式曲面を対象物体表面全体について推定し、それらを統合することで対象物体全体の形状を復元する。以後では、この局所多項式曲面の推定法およびその統合法について順に述べる。

3.1 局所領域での多項式曲面推定

局所多項式曲面を推定するためには式(5)を解けばよいが、鏡面反射直線と多項式曲面の交点である $\mathbf{x}_m$ はその多項式曲面が決定しないと定まらないため、単純に解

くことはできない．すなわち，図 3 (a) に示すように， x_m は鏡面反射直線 ($\mathbf{q}_m, \mathbf{v}_m$) に沿った一次元の不定性を有する．

各局所多項式曲面は，適当な局所座標系で表現する．ここでは，計算を容易にするために，その z 軸がカメラの視線方向に平行になるような局所座標系を仮定するとともに，式 (3) は次式のような陽関数で表現する．

$$z = g(x, y) = \sum_{0 \leq i, j \leq r} a_{ij} x^i y^j \quad (6)$$

ただし，この陽関数表現をとることで，式 (3) から z^k ($k \geq 1$) の項が除かれるため，その表現能力は式 (3) と比較して若干低下する．具体的には，式 (6) では $x-y$ 平面に対して垂直な曲面は表現できない．

この陽関数表現を用いると式 (5) は次のような多項式 $g(x, y)$ に関する最小化問題に書き換えられる．

$$\begin{aligned} & \{g \mid (1 - \lambda) \sum_n (Z_n - g(X_n, Y_n))^2 \\ & + \lambda \sum_m \left(\left(\frac{v_x}{v_z} - \frac{\partial g(x_m, y_m)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{v_y}{v_z} - \frac{\partial g(x_m, y_m)}{\partial y} \right)^2 \right) \\ & \rightarrow \min \} \end{aligned} \quad (7)$$

この式中には x_m と y_m は出現するが， z_m は出現しない．図 3 (b) に示すように， z 軸が鏡面反射直線 ($\mathbf{q}_m, \mathbf{v}_m$) と平行になるように局所座標系を定めれば， x_m の不定性は z_m のみに現れ x_m と y_m は一定値となる．

この場合，ある局所領域における点制約 $\mathbf{X}_n$ と法線制約 ($\mathbf{q}_m, \mathbf{v}_m$) から，その局所多項式曲面の係数 $\{a_{ij}\}$ が以下の線形演算により算出可能である．まず，点制約については次式が成り立つ．

$$\mathbf{U}_n^\top \mathbf{A} = Z_n \quad (8)$$

なお，この式中の各ベクトルは次のように定義される．

$$\begin{cases} \mathbf{U}_n = (1 & X_n & Y_n & X_n^2 & X_n Y_n & Y_n^2 & \cdots)^\top \\ \mathbf{A} = (a_{00} & a_{10} & a_{01} & a_{20} & a_{11} & a_{02} & \cdots)^\top \end{cases} \quad (9)$$

これに加えて，法線制約 ($\mathbf{q}_m, \mathbf{v}_m$) についても線形な制約式を以下で導く．まず， x, y に関する g の偏微分は次式で表現される．

$$\frac{\partial g}{\partial x} = i a_{ij} x^{i-1} y^j, \quad \frac{\partial g}{\partial y} = j a_{ij} x^i y^{j-1} \quad (10)$$

式 (7) の第二項は，次式が満たされる際に最小値 0 になる．

$$i v_z a_{ij} x^{i-1} y^j = v_x, \quad j v_z a_{ij} x^i y^{j-1} = v_y \quad (11)$$

従って， (x_m, y_m, z_m) と (v_{mx}, v_{my}, v_{mz}) を通る鏡面反射直線は次の 2 つの式で表現される．

$$\begin{pmatrix} \mathbf{W}_{mx}^\top \\ \mathbf{W}_{my}^\top \end{pmatrix} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} v_{mx} \\ v_{my} \end{pmatrix} \quad (12)$$

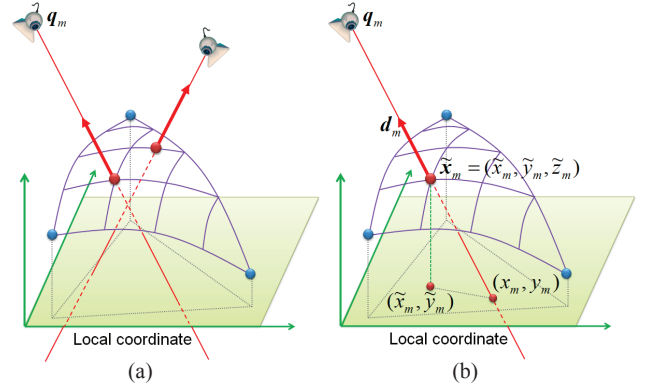


図 4 複数の鏡面反射直線と局所座標系の設定

ただし，この式中の各ベクトルは次式で定義される．

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{mx} = (0 & v_{mz} & 0 & 2x_m v_{mz} & y_m v_{mz} & 0 & \cdots)^\top \\ \mathbf{W}_{my} = (0 & 0 & v_{mz} & 0 & x_m v_{mz} & 2y_m v_{mz} & \cdots)^\top \end{cases} \quad (13)$$

以上より，点制約と法線制約について線形な制約式が導かれたので，それらを結合して次のような線形式を得る．

$$\begin{aligned} & (\cdots \mathbf{U}_n \mid \cdots \mathbf{W}_{xm} \mid \cdots \mathbf{W}_{ym})^\top \mathbf{A} \\ & = (\cdots (1 - \lambda) Z_n \mid \cdots \lambda v_{mx} \mid \cdots \lambda v_{my}) \end{aligned} \quad (14)$$

この式を解くことによって，最適な多項式曲面が決定される．

3.1.1 繰り返し計算による最適多項式推定

式 (14) では，鏡面反射直線が局所座標系の z 軸と平行であることを仮定した．これは，正射影モデルを仮定しすべてのカメラの向きが等しい場合にのみ成り立つ．しかし，透視投影モデル・複数のカメラ姿勢をという一般的な状況においては，図 4 (a) に示すように複数の視点で観測された鏡面反射直線はそれぞれ異なる向きを持ち，それらすべてと平行に局所座標系の z 軸を定めることは明らかに不可能である．そしてその場合，図 4 (b) に示すように，適当に定めた局所座標系において $x-y$ 平面と鏡面反射直線の交点として与えられる (x_m, y_m) は，本当の対象物体表面上の点 x, y 座標 $(\tilde{x}_m, \tilde{y}_m)$ とは異なった値を取る．この (x_m, y_m) と $(\tilde{x}_m, \tilde{y}_m)$ の間のずれのために，式 (14) は一般に適切な解を導かない．

この問題を解決するために，提案手法では図 5 に示すように (x_m, y_m) と g が次第に正解に収束していくような繰り返し計算を設計した．この処理は，以下のステップで行われる．

(a) 各鏡面反射直線 ($\mathbf{q}_m, \mathbf{v}_m$) について，局所座標系の $x-y$ 平面との交点として (x_m, y_m) を得る．

(b) 得られた (x_m, y_m) を式 (14) に適用して，局所多項式曲面を推定する．得られた曲面は，法線ベクトル $\mathbf{v}_m$ の始点が鏡面反射直線上ではなく直線 $(x, y) = (x_m, y_m)$ 上に存在するという制約のものとなるため，実際に法線ベクトルが $\mathbf{v}_m$ となる点は一般に鏡面反

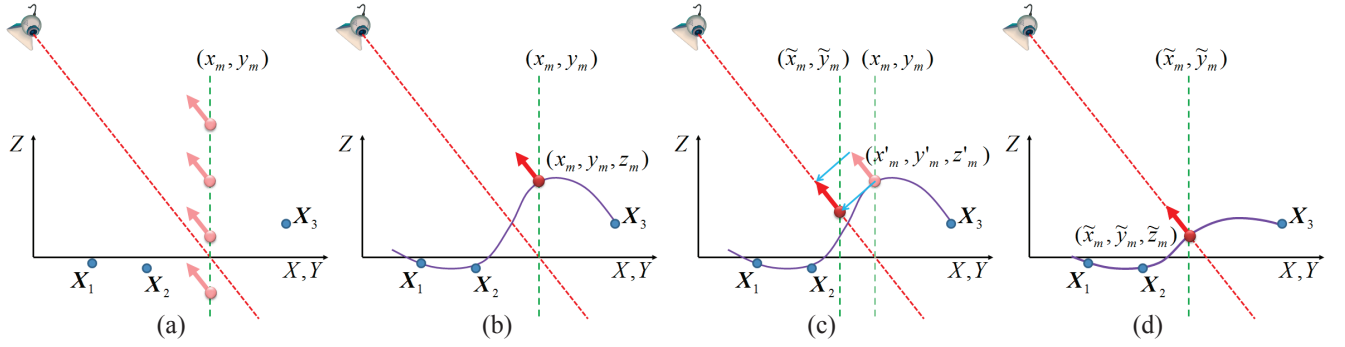


図5 繰り返し計算による最適多項式曲面の算出

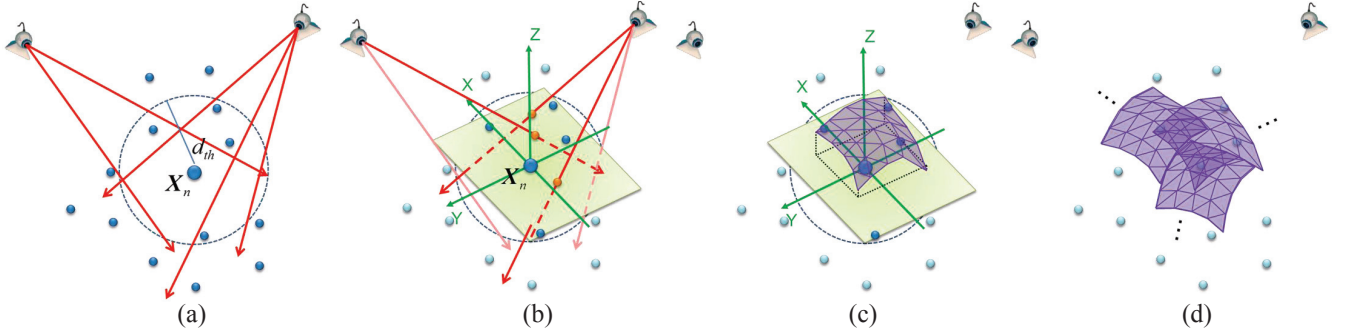


図6 局所領域の設定と局所多項式曲面の統合

射直線と異なる位置に推定される。

(c) (b) で観測されたずれを解消するように法線ベクトルの始点を鏡面反射直線上の点 $(\hat{x}_m, \hat{y}_m)$ に並行移動させる。

(d) $(\hat{x}_m, \hat{y}_m)$ を (x_m, y_m) に代入し、(b) の処理を行う。これを、 (x_m, y_m) および g が収束するまで繰り返し、収束解を最適な局所多項式曲面とする。

3.1.2 多項式曲面の次元数

式 (9) と式 (13) より、一つの点制約からは制約式が一つ、一つの法線制約からは制約式が二つ得られることが分かる。一方、 r 次元の陽関数多項式曲面における係数の個数は $(r+2)(r+1)/2$ 個である。これらから、多項式曲面を一意に決定するための条件式が次のように求められる。

$$\frac{(r_{\max} + 2)(r_{\max} + 1)}{2} = c_p + 2c_s \quad (15)$$

ここで、 c_p は点制約の個数、 c_s は法線制約の個数、 $r_{\max}$ は多項式の理論上の最大次数である。

実際の形状復元においては、三次元点の推定誤差や鏡面反射の検出誤差を含む状況下でも安定に解を得るために、 $r_{\max}$ より小さい次元の多項式を設定する。本稿の実験では、多項式の次元数として $r = \frac{2}{3}r_{\max}$ を用いた。

3.2 全体形状の獲得

3.1 節で述べた局所多項式曲面推定処理を用いて、図6に示すステップで対象物体の形状復元を行う。

(a) 各三次元点 $\mathbf{X}_n$ に対して、そこから距離 d 以内にある点群を抽出する。

(b) 抽出した点群に対して主成分分析を行い、定数ベクトルを局所座標系の原点、第一・第二基底ベクトルをそれぞれ局所座標系の x, y 軸とする。局所座標系の z 軸は、対象物体の表面から外側への向きが正となるように、その基本ベクトルが多くのカメラの方向ベクトルとの余弦が負になる向きを選択する。なお、局所座標系は右手系で統一するため、必要に応じて x 軸の向きを反転させる。次に、各鏡面反射直線と $x-y$ 平面との交点を求め、その交点が原点から d 以内となる鏡面反射直線のみを抽出する。

(c) 抽出された三次元点と鏡面反射直線を用いて、3.1 節で述べた処理によって局所多項式曲面を推定する。そして、得られた多項式曲面からメッシュを生成する。

(d) 局所多項式曲面は各三次元点に対して推定されるが、一方でその曲面は周辺の複数個の三次元点を含む程度に大きい。従って、(c) で生成されるメッシュは一般にお互いに重なり合う。この重なり合うメッシュを Pietroni らのメッシュ統合法 [19] を用いて統合し、一つの連結メッシュとして対象物体の形状を得る。

4. 実験

CG シーンおよび実世界の物体を対象として形状復元実験を行い、提案手法を評価した。実験を通して、特徴点の抽出には Lowe の SIFT 特徴 [20] を、SfM の処理には Snabely の実装 [18], [21] を用いた。鏡面反射直線は、各画像中で輝度値の飽和した点を抽出し、それとカメラの内部・外部パラメータから算出した。局所曲面のメッシュを統合する際には、MeshLab [22] に実装されている

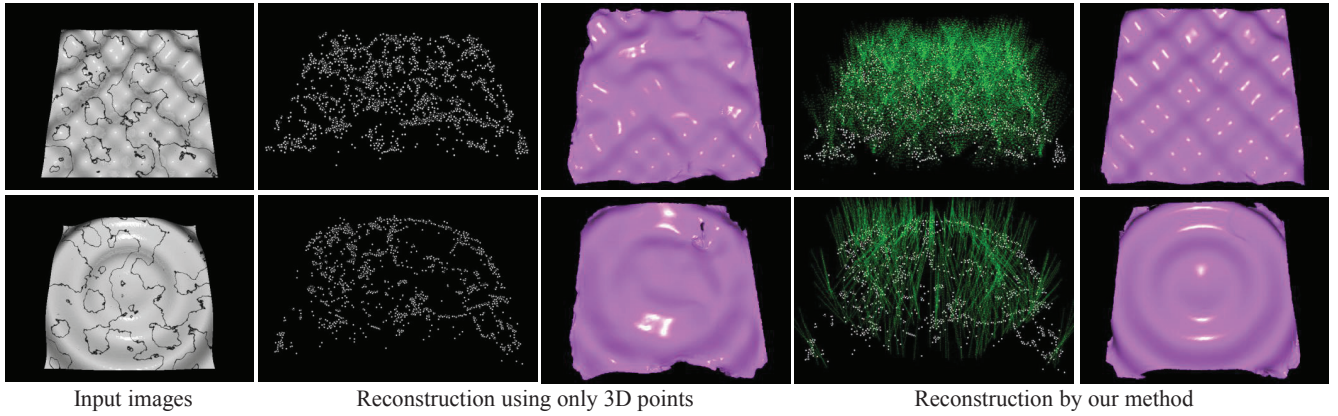


図7 CGシーンに対する形状復元（各段について左端から順に、原画像、SfMによる三次元点群、三次元点群のみから推定した密な形状復元、SfMによる三次元点群と鏡面反射直線、三次元点群と鏡面反射直線による密な形状復元（提案手法））

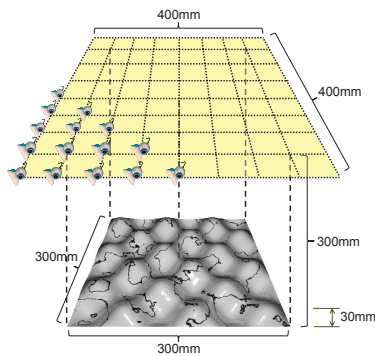


図8 CG実験における視点の設定

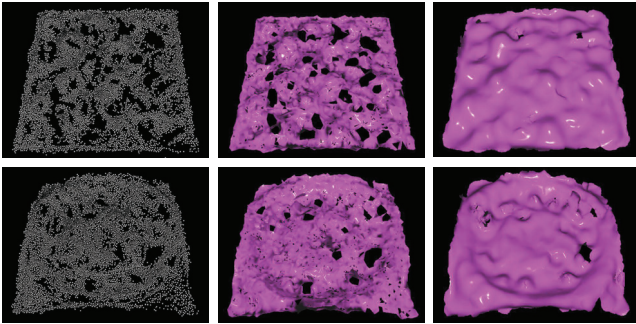


図9 MVSを用いた復元結果（各段、左端から順に、MVSで得られた密な点群、その点群にメッシュを張って得られた形状、同点群に本稿の多項式曲面フィッティングを適用した結果（法線制約は不使用））

Pietroni らの手法 [19] を利用した。局所多項式領域の大きさは実験的に定めたが、その次元数 r については式 (15) で述べた基準に従って定めた。

4.1 CG 画像に対する実験

形状復元結果の定量評価を行うために、図7に示す二種類のCGシーンを作成して実験を行った。各シーンは図8のような81個の視点から撮影されたとし、各撮影画像の解像度は 640×480 とした。

これらのシーンはテクスチャが疎なために、特徴点が

疎にしか得られず、そのため点制約も疎となり、点制約のみによる形状復元結果は不正確なものとなる。一方、この点制約に鏡面反射ハイライトによる法線制約も加えて提案手法で形状復元することで、形状復元結果が大幅に改善されているのが確認できる。

また、比較すべき既存手法として Furukawa らの Multi-View Stereo (MVS) [23], [24] を取り上げ、同じCGシーンに適用した結果を図9に示す。SfMの結果と比較して密な三次元点群が得られているが、シーンのテクスチャが疎で光沢が強いため、その位置が不正確であったり一部に欠損が生じていることが確認できる。さらに、この密な点群に対して本稿で提案している局所多項式曲面推定とその統合処理を適用した結果も示している。この処理によってMVSのみの結果よりも欠損の少ないスムーズな形状が推定されているが、本質的な形状推定精度は高くないことが分かる。この結果より、本稿で着目している鏡面反射から得られる法線制約が、形状復元精度の向上に大きく寄与していることが確認できる。

4.1.1 重み付けパラメータ λ の影響

形状復元結果の定量評価として、正解形状と復元結果の誤差を計算した。提案手法において、可変なパラメータとして、点制約と法線制約の重み付けパラメータ λ が存在するため、その値を変化させた際の誤差の変化についても調査した。その結果を図10に示す。上段の図は各シーンに対する形状復元において λ を変化させた際のシーン各点での誤差をマップ化したものであり、下段のグラフはそれらの復元結果の平均誤差をグラフ化したものである。

$\lambda = 0$ は点制約のみによる形状復元、 $\lambda = 1$ は法線制約のみによる形状復元の結果に対応する。この結果から、いずれかの制約のみを用いた場合に誤差が大きくなるのに対して、点制約・法線制約の両方を利用している $0 < \lambda < 1$ では復元精度が高いことが確認できる。また、 λ がこの範囲であれば、形状復元精度は λ の大小にほと

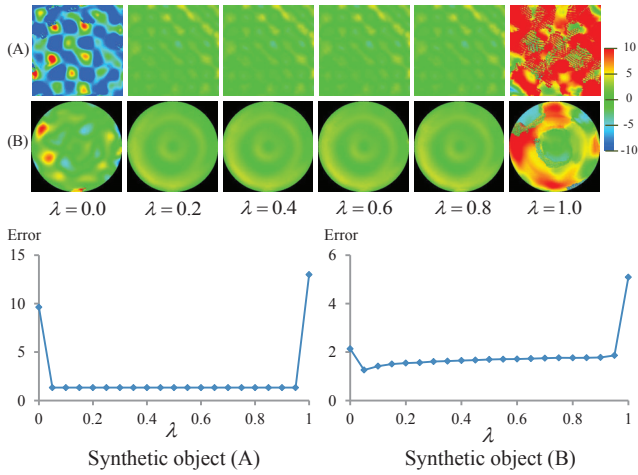


図 10 形状復元精度の定量評価と重み付けパラメータ λ の影響

んど影響を受けないことも確認できる。この結果を踏まえて、以後の実験では $\lambda = 0.5$ を用いた。

4.1.2 視点数による影響

形状復元に利用する視点数による、復元精度の変化についても調べた。図 11 にその結果を示す。

視点数が減少した場合、各画像中の特徴点の個数は変わらないが、SfM によって三次元位置が得られる点の個数が減少し、またその精度も低下する。そのため、その三次元点群を利用して行われる形状復元も精度が低下する。

鏡面反射による法線制約を用いる提案手法の場合でも、やはり三次元点の個数の減少と精度の低下によって復元精度は低下するが、法線制約の効果により、同じ視点数でもその低下の度合いが大きく減少していることが確認できる。

4.2 実画像に対する実験

提案手法を、CG シーンだけでなく、実世界の物体にも適用した。対象物体として、図 12 に示す大理石とガラスの花瓶を用いた。各物体に対して約 80 視点から撮影を行い、撮影画像の解像度は 900×600 とした。

大理石は、その表面のテクスチャが疎であるため、得られる三次元点群の個数が少なく、点制約のみによる形状復元結果が不正確だが、提案手法によって法線制約も活用することによって、復元結果が改善されている。復元形状のレンダリング結果が二次元の静止画像のため少し分かりにくいだが、その鏡面反射ハイライトの位置が原画像と一致していることから、その改善の様子が確認できる。図 1 に示した例も、提案手法の効果をよく表している。提案手法ではテクスチャによる点制約と鏡面反射ハイライトから得られる法線制約が相補的に活用されるため、通常の SfM や MVS では復元が困難なテクスチャの無い領域でも、そこで観測される鏡面反射ハイライトが与える法線情報と周囲の三次元位置情報から正しい形

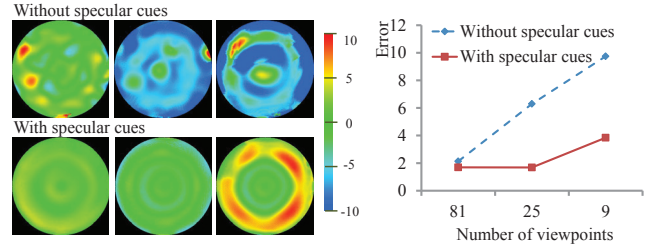


図 11 視点数と形状復元精度の関係

状が復元されている。

ガラスの花瓶については、その表面にテクスチャが存在するが、その透明性や光沢性によって特徴点の対応付けに失敗することが多いため、SfM による三次元点群が不正確になる。このような場合でも、提案手法では法線制約が効果的に作用して、復元精度を大幅に改善している。このような透明な物体は、既存のフォトメトリックステレオやレンジセンサ等でも計測不可能な対象であり、提案手法が非常に有効であることを示す例だと考えられる。

4.3 環境光が存在するシーン

本稿では、視点に設置した点光源による鏡面反射ハイライトのみを抽出するために、対象物体の撮影は他の環境光の存在しない暗室内で行うこととした。しかし、図 13 に示すように、各視点で点光源を付けた場合と消した場合の 2 枚の画像を撮影して二値化し、それらの差分をとることで、容易に環境光の除去ができる。従って、提案手法は一般環境下でも容易に利用できる。

フォトメトリックステレオのように画像中の各画素の輝度値を直接利用するような処理の場合は、このような単純な差分計算によって環境光が除去できないが、提案手法では鏡面反射ハイライトのみに着目することで、容易・安定に環境光の影響が除去される。この点も、提案手法の利点である。

5. おわりに

本稿では、光沢物体を対象として、その疎なテクスチャと鏡面反射ハイライトを利用して三次元形状復元を行う手法を提案した。これは、特徴点の対応付けによる幾何学的な情報と、鏡面反射という光学的な情報を統合的な枠組みで自然に統合した手法である。この手法ではまず、対象物体表面の各局所領域を多項式曲面として復元し、それらを統合することで形状復元を行う。一般的な MVS では三次元点の点制約のみをベースに形状復元を行うのに対し、提案手法では鏡面反射ハイライトから得られる法線情報も用いて復元をするため、より正確な形状復元を実現することができる。

提案手法の問題点として、鏡面反射の多重反射による外乱が挙げられる。この手法では、画像中で観測される鏡面反射ハイライトはすべて 1 回反射であるとみなして

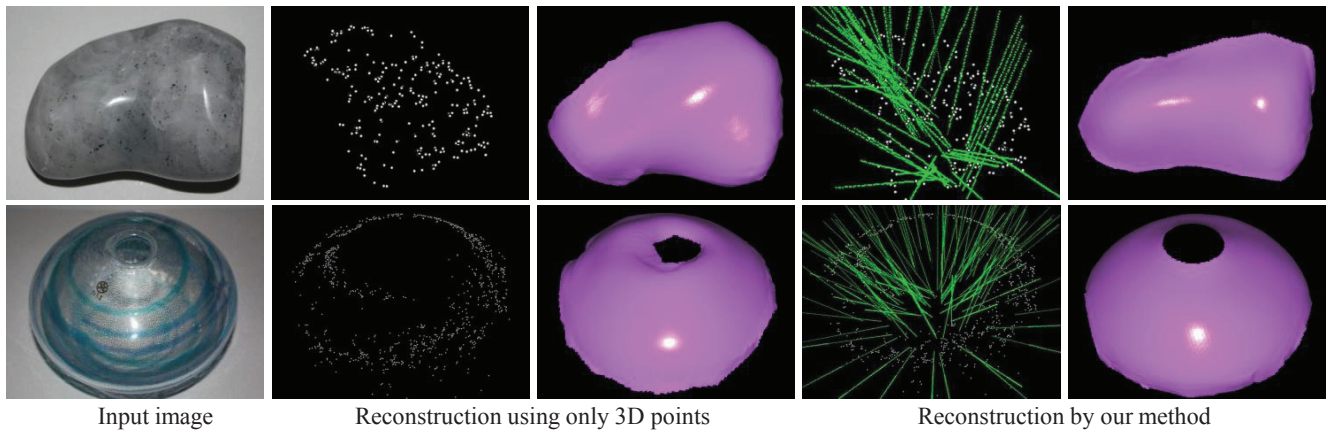


図 12 実物体に対する形状復元結果（各段における図の順序は図 7 と同様）

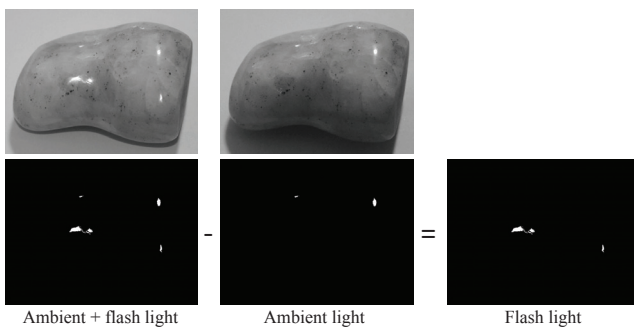


図 13 鏡面反射ハイライト検出における環境光の除去

計算を行うため、凹曲面などで多重反射のハイライトが観測された場合、それが形状復元誤差の要因となる。

文 献

- [1] D. N. Bhat and S. K. Nayar: "Stereo and specular reflection," *International Journal of Computer Vision*, **26**, 2, pp. 91–106 (1998).
- [2] Y. Li, S. Lin, H. Lu, S.-B. Kang and H.-Y. Shum: "Multibaseline stereo in the presence of specular reflections," *Proc. of International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 573–576 (2002).
- [3] H. Jin, A. Yezzi and S. Soatto: "Variational multi-frame stereo in the presence of specular reflections," *Proc. of Int'l Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pp. 626–630 (2002).
- [4] R. Woodham: "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, **19**, 1, pp. 139–144 (1980).
- [5] K. Ikeuchi: "Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **3**, pp. 661–669 (1981).
- [6] A. Blake: "Specular stereo," *Proc. of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, **2**, pp. 973–976 (1985).
- [7] A. Blake and G. Brelstaff: "Geometry from specularities," *Proc. of International Conference on Computer Vision*, pp. 394–403 (1988).
- [8] A. Zisserman, P. Giblin and A. Blake: "The information available to a moving observer from specularities," *Image and Vision Computing*, **7**, 1, pp. 38–42 (1989).
- [9] R. W. Fleming, A. Torralba and E. H. Adelson: "Specular reflections and the perception of shape," *Journal of Vision*, **4**, 9 (2004).
- [10] M. Oren and S. K. Nayar: "A theory of specular surface geometry," *International Journal of Computer Vision*, **24**, 2, pp. 105–124 (1997).
- [11] S. Savarese, M. Chen and P. Perona: "Local shape from mirror reflections," *International Journal of Computer Vision*, **64**, 1, pp. 31–67 (2005).
- [12] S. Roth and M. Black: "Specular flow and the recovery of surface structure," *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1869–1876 (2006).
- [13] Y. Adato, Y. Vasilyev, O. Ben-Shahar, and T. Zickler: "Toward a theory of shape from specular flow," *Proc. of International Conference on Computer Vision*, 2007.
- [14] G. D. Canas, Y. Vasilyev, Y. Adato, T. Zickler, S. Gortler and O. Ben-Shahar: "A linear formulation of shape from specular flow," *Proc. of International Conference on Computer Vision* (2009).
- [15] P. Lager, M. Salzmann, V. Lepetit and P. Fua: "3d pose refinement from reflections," *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition* (2008).
- [16] J. Chang, R. Raskar and A. Agrawal: "3d pose estimation and segmentation using specular cues," *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition* (2009).
- [17] A. DelPozo and S. Savarese: "Detecting specular surfaces on natural images," *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition* (2007).
- [18] N. Snavely, S. M. Seitz and R. Szeliski: "Phototourism: Exploring image collections in 3d," *Proc. of ACM SIGGRAPH* (2006).
- [19] N. Pietroni, M. Tarini and P. Cignoni: "Almost isometric mesh parameterization through abstract domains," *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, **16**, 4, pp. 621–635 (2010).
- [20] D. G. Lowe: "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, **60**, pp. 91–110 (2004).
- [21] N. Snavely: "Bundler: Structure from motion for unordered image collections," <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>.
- [22] "Meshlab," <http://meshlab.sourceforge.net/>.
- [23] Y. Furukawa and J. Ponce: "Accurate, dense, and robust multiview stereopsis," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **32**, 8, pp. 1362–1376 (2010).
- [24] Y. Furukawa: "Patch-based multi-view stereo software," <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvts/>.