

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23700207

研究課題名(和文) 物体表面の光沢性を利用した三次元形状計測技術の開発

研究課題名(英文) 3-D Surface Reconstruction of Glossy Objects

研究代表者

満上 育久 (Mitsugami, Ikuhisa)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：00467458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、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。この手法は、既存のStructure from MotionとMulti-view stereoを組み合わせる方法では復元できないテクスチャが少ない光沢物体に対して、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し、最後にこの局所曲面を統合して対象全体の表面形状を得る。また、この機能をモバイル端末から容易に利用できるためのシステムの開発も行った。

研究成果の概要(英文)：In this project, I proposed a novel surface reconstruction method that takes sparse 3-D points and specular measurements. The proposed method is particularly useful for reconstructing glossy surfaces where obtaining stable correspondences is difficult. To efficiently reconstruct a surface from such sparse measurements, our method represents a local surface shape by polynomial surfaces and determines the shape by finding the optimal polynomial coefficients that fit both the sparse 3-D points and specular observations. The local polynomial surfaces are finally integrated to obtain the whole surface. Moreover, I developed a system where we can use this function in our mobile device.

研究分野：コンピュータビジョン

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

1. 研究開始当初の背景

実物体の三次元形状獲得技術の開発は、計測や物体認識などに利用できる重要な研究課題である。さらに最近では、3D テレビの普及によりメディア・通信分野からの三次元形状情報に対する需要が増大してきており、同技術は今後ますます重要になると考えられる。

三次元形状獲得方法として、産業レベルではレーザレンジファインダやステレオカメラなどの専用デバイスがすでに利用されているが、これらによって計測可能な物体は非常に限定される。レーザレンジファインダは、物体に光・電波を照射しその反射波を用いて形状を推定する仕組みのため、光沢の強い物体では反射波がデバイスに返ってこず計測ができない。ステレオカメラの場合は、2 台以上のカメラから対象物体を撮影し、各撮影画像中から対応点を求めて三角測量の原理で三次元形状を推定するため、対応点の探索が困難となるテクスチャの少ない物体は正しく形状推定することができない。また、ロボットビジョン・ユーザインタフェース等の研究分野では、複数視点から撮影した画像によって三次元形状計測をする Structure from Motion (SFM) の手法が提案されているが、これもステレオカメラと同様に形状計測の性能は表面テクスチャに強く依存する。

一方で、我々の身の回りにはある物体では、その製造コスト・加工の容易さ・軽量化・強度・質感など実用上のさまざまな理由によりプラスチック・金属・ガラス等が使われることが非常に多い。これらの素材でできている物体は、その表面は一般に強い光沢を持つ(図 1)。また、これらの物体が表面全体に渡って密なテクスチャを持つことは少なく、表面の一部のみに絵柄がある、あるいは単純な幾何学的パターンが描かれていることが多い。そのためこれらの物体では対応点が密に得られない。その上、光沢性があるため環境光やフラッシュの鏡面反射によって対応点が観測できなかつたり、誤った対応点が割り当てられる可能性が増大する。Bhat らの手法や Li らの手法によってこの誤対応の軽減を図ることはできるが、これらは積極的な形状計測精度へは寄与するものではない。以上の議論より、身の回りの一般的な物体の多くは、既存の三次元計測手法を単純に適用しても正確・安定に形状計測することが難しい。

2. 研究の目的

我々が身の回りの物体を計測するという用途を考えた際には、カメラで物体の画像を撮影するだけで三次元形状計測を行うことが可能である Structure from Motion ベースの手法が適している。これらの手法において、物体の表面の光沢性は計測結果の劣化を引き起こす外乱として捉えられてきた。しかし、

光沢物体表面で観測される鏡面反射は、セッティングの仕方によっては物体表面各点での法線方向を与える有益な情報となる。そこで本研究では、既存の Structure from Motion の枠組みと鏡面反射に関する処理を組み合わせ、これまで外乱として排除されていた鏡面反射を積極的に活用した新たな Multi-view Stereo 手法の実現を目的とする。この手法では SFM によって得られる三次元点群を持つ、疎ではあるが三次元的な位置が正確であるという性質と、鏡面反射情報が示す法線(形状の微分値)の正確さを効果的に組み合わせることによって、大域的に正確かつ密で滑らかな形状計測結果が期待される。本研究では、まず基礎研究として、この手法の実現に向けた数学的定式化、その解法アルゴリズムの設計・実装・評価を行う。また、実利用を想定して、物体の全周形状計測手法や、カメラ内蔵型携帯端末での動作を可能とするための計算効率化などについても検討する。

3. 研究の方法

(1) 手法の設計

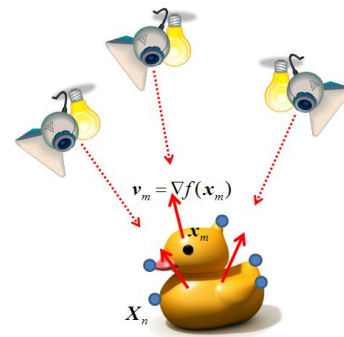


図 1 提案手法のコンセプト

提案手法では、図 1 に示すように光源がカメラの位置にあるセッティングで、さまざまな方向から対象物体を撮影した画像群を用いて物体表面の三次元形状 f の復元を行う。この際、SFM によって得られる物体表面上の三次元点群 X_n だけから表面形状を復元するのではなく、光源によって物体表面上に現れる鏡面反射によって得られる位置 x_m での法線情報 v_m も考慮して、以下の最小化問題を解くことで最適な f を決定する。

$$\left\{ f(\mathbf{x}) \mid \sum_n \{f(\mathbf{X}_n)\}^2 + \lambda \sum_m \{v_m \times \nabla f(x_m)\}^2 \rightarrow \min \right\}$$

実際の処理としては、物体表面形状 f を多項式で表現し上式を解くが、物体全体を 1 つの関数で表現しようとする次元が高くなりすぎ復元が不安定になるため、図 2 に示すように、物体を複数の局所空間に分割し、各局所空間内の物体表面形状をある一定の次元数の多項式表面として推定し、最後にそれ

らを統合して物体全体の復元を行うこととした。

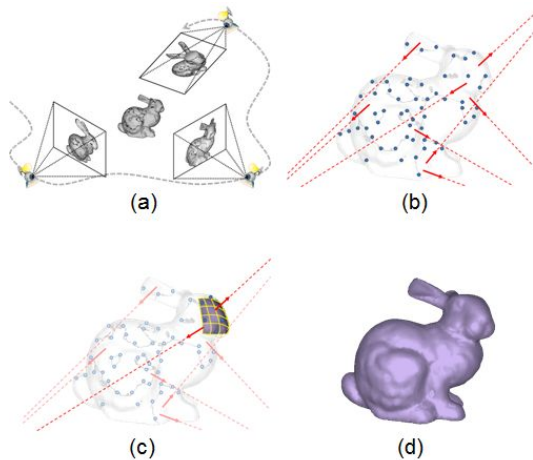


図 2 提案手法のアウトライン

一般に、提案手法のように鏡面反射情報を用いる光学的アプローチでは、環境光の影響を受けないようにするために、暗室等特殊な環境下での撮影が必要となる。しかし、提案手法の場合は、図 3 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を除去できないが、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。

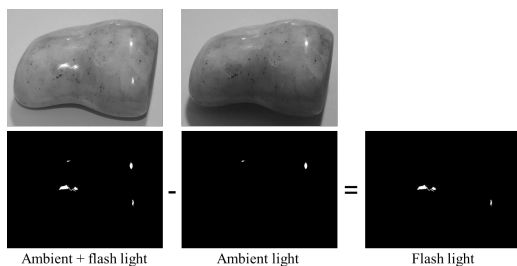


図 3 鏡面反射検出における環境光の除去

(2) 三次元形状復元精度評価

提案手法の評価にあたっては、三次元形状復元の精度について定量評価が可能なように、CG レンダリングソフトウェア POV-Ray を用いて撮影画像を生成し、提案手法の入力として用いた。結果を図 4 に示す。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

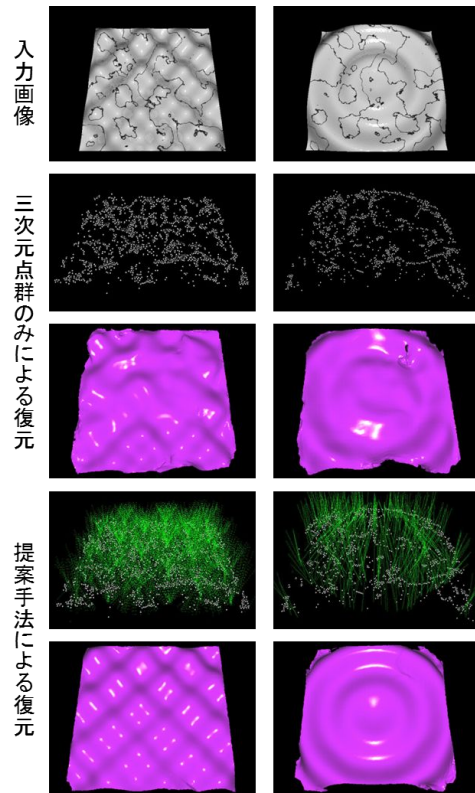


図 4 CG シーン復元結果

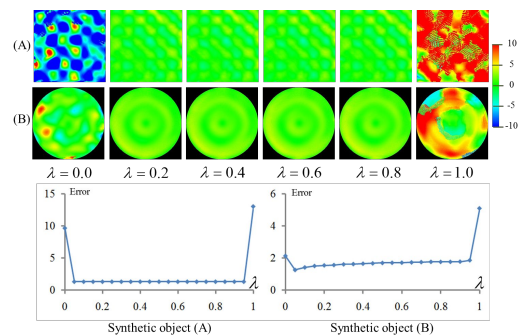


図 5 重み付けパラメータ λ の影響

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 5 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 $0 < \lambda < 1$ 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 $\epsilon = 0.5$ を用いた。

(3) モバイル端末からの利用

それらの技術をモバイルデバイス上で利用可能にすることが主な目標であった。実現方法としては、モバイルデバイス上でこの処理を実行する方法と、別途サーバを設けモバイルデバイスから撮影画像をサーバに転送し、サーバ側で処理が実行され、得られた三次元モデルをモバイルデバイスに転送する、という2つを検討した。その結果、近年モバイルデバイスでも通信帯域が増大し、またクラウド化が進むことで、撮影画像が即座にクラウドに転送されることが一般的となったこと、また提案手法は計算量が多く電力容量や処理能力に制限のあるモバイルデバイス上で実行することが不向きであることから、後者の方針でシステムを構築することとした。

開発したシステムでは、三次元形状復元のための提案手法はサーバ上で実行されることとし、モバイル端末で撮影された画像は、その端末が有する無線LAN機能を用いてサーバに自動転送され、サーバ上で復元が行われる。処理が終わればモバイル端末に通知され、モバイル端末から復元結果を確認することができる。

4. 研究成果

本研究の成果は、国内外の会議で賞を得ている。国内では、コンピュータビジョンにおけるトップ会議である画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011)において、採択率約17%のロングオーラルセッションに採択された上、優秀論文賞を受賞した(学会発表)。また、国際的にも、2つの国際会議で Best Poster Award を受賞した(、)。特に、The 15th SANKEN International Symposiumでの受賞については、ナノテクノロジーから人間行動解析まで広範囲の研究発表を含むこのシンポジウムにおいてコンピュータビジョンの研究で唯一の受賞であった。本研究成果が幅広い分野の研究者から高い評価を得たといえる。これらの外部発表が評価されたためか、2014年度には国内外で多数の招待講演の依頼を受けた。

また、本研究の過程で寄稿した図書は Web 上で多数閲覧されており、その補足用 Web ページとして公開しているホームページは、現在、Google で「Structure from Motion」で検索すると、1位に表示される。コンピュータビジョン分野における基本的かつ重要なこの手法について、多くの研究者・学生に平易で分かりやすい資料を提供したことも、本研究の貢献の1つといえる。また、上述のとおり多くの招待講演依頼があったのは、このホームページによるところも大きいと推

察される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 8件)

満上育久, 他, 「疎な特徴点と鏡面反射を用いた三次元形状推定」, 画像の認識・理解シンポジウム, 2011年. **(優秀論文賞)**

Ikuhisa Mitsugami, et al., "Surface Estimation of Glossy Object using Sparse Depths and Specular Cues," The 15th SANKEN International Symposium, Jan., 2012. **(Best Poster Award)**

Ikuhisa Mitsugami, et al., "Surface Reconstruction of Glossy Object using Sparse Depths and Specular Cues," The 7th International Workshop on Robust Computer Vision, Jan., 2013. **(Best Poster Award)**

Ikuhisa Mitsugami, "Multi-view Stereo for Glossy Objects," 1st Thai-Japan International Workshop on Computer Vision, Aug., 2013.

満上育久, 「多視点画像からの三次元形状復元」, 高解像度地形情報シンポジウム, 8月, 2014年. **(招待講演)**

満上育久, 「身の回りの光沢物体や人物の三次元計測」, 精密工学会大規模環境3次元計測モデリング専門委員会第14回定例研究会, 10月, 2014年. **(招待講演)**

Ikuhisa Mitsugami, "Surface Reconstruction of Glossy Objects," 17th International Conference on Computing and Information Technology (ICCI2014), 2014. **(招待講演)**

満上育久, 「身の回りの物体や人物の三次元形状計測と解析」, 機械学会 ロボメカ部門第一地区特別講演会, 3月, 2015年. **(招待講演)**

[図書](計 1件)

満上育久, 「Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections」, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.4, 2011年.

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 件)

[その他]

ホームページ等

研究代表者のホームページ

<http://www.am.sanken.osaka-u.ac.jp/~mitsugami/>

「Instruction of "Bundler"」

<http://www.ite.or.jp/ronbun/backnumber/tool1104/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

満上 育久 (MITSUGAMI, Ikuhisa)

大阪大学産業科学研究所・助教

研究者番号：00467458