

Structure from Motion により復元された物体形状と  
影に基づく光源環境の推定  
Estimation of Illumination Distribution based on Shadow and Object Shape  
by Structure from Motion

大津留 亮†      梅澤 猛†      大澤 範高†  
Ryo Ohtsuru      Takeshi Umezawa      Noritaka Osawa

## 1. まえがき

近年、コンピュータグラフィックス (CG) などの仮想物体を現実環境に重畳して表示する複合現実感 (MR: Mixed Reality) に関する研究が盛んに行われている。この技術により、CG で描いた仮想物体があたかも現実世界に出現したかのように見せることが可能である。また、照明環境による物体の影の方向の変化に矛盾が生じないようにしなければならないという光学的整合性をとることで、より違和感の少ない MR を実現することができる。この整合性の問題を解決するためには、実空間の光源環境を推定、もしくは観測し、その情報を元に仮想物体に対して陰影処理や影の重畳を行う必要がある。

実空間の光源環境を取得する手法はいくつか提案されており、佐藤らは物体と光源の遮蔽関係から生じる影を利用して光源環境を推定する手法を提案している[1]。しかし、その手法では光源環境の推定のためには物体が影に対してどの方向からの光を遮断しているかを導出する必要があり、そのためには物体と影の 3 次元位置座標が必要である。

そこで本研究では、3 次元形状復元の技術である Structure from Motion (SfM) [2] を用いることで、光源環境の推定手法に必要な物体と影の 3 次元位置座標を推定する手法を提案する。また、提案手法と関連研究との違いについても述べる。

## 2. 関連研究

本節では上記の佐藤らの研究での物体と影の 3 次元位置座標の推定法およびそれに関連した研究について述べる。また、それぞれの手法で出てくる制限についても述べ、提案手法がそれぞれの制限を軽減していることを説明する。

### 2.1 形状が既知の物体とキャリブレーションボードによる遮蔽関係の導出

佐藤らは、物体の形状、および 3 次元位置座標は既知として遮蔽関係を導出している。そのため、物体の形状の事前計測を行う必要があり、大きな制限になっている。また、影の 3 次元位置座標を 81 個の格子点 (縦 9×横 9) が書かれたキャリブレーションボードを物体が置かれる平面に設置し、それを撮影することで得られるカメラパラメータおよび 3 次元平面を用いて取得している。そのため、キャリブレーションボードの用意や撮影などの制限もある。

### 2.2 深度カメラを用いた遮蔽関係の導出

池田らは、深度カメラを用いて物体や影の 3 次元位置座標を取得し、光源環境推定に必要な遮蔽関係を導出する手法を提案している[3]。これにより、物体形状の事前計測やキャリブレーションボード撮影などの制限を軽減することができている。しかし、深度カメラという特殊な機器が必要であるという新たな制限が出てきている。また、深度カメラでは物体背後の形状までは取得できないため、正確な遮蔽関係が推定できないという問題もあるが、この手法では物体形状が未知な身近な物体でも光源環境の推定に用いることができるため、複数の物体を合わせて用いることで誤推定を軽減することを提案している。

### 2.3 従来研究との差異

佐藤らの研究では物体の 3 次元位置座標が既知である必要があり、物体の形状を事前に計測するという制限があり、またキャリブレーションボードの用意といった制限もある。一方、池田らの研究ではそれらの制限が軽減されているが、深度カメラという特殊な機器が必要となっている。

本研究では、単眼カメラで撮影された複数枚の画像を入力とした SfM によって物体の 3 次元位置座標を推定している。そのため、物体の事前計測の制限を軽減することができ、なおかつ、入力に必要な画像は元々 MR に必要な単眼カメラを用いているため、新たな機器が必要となることはない。しかし、SfM では影の 3 次元位置座標までは十分に復元することができない。そこで影の 3 次元位置座標の取得には、佐藤らの手法を適用する。しかし、この手法に必要なカメラパラメータおよび 3 次元平面は SfM を行うことで得られるため、キャリブレーションボードの用意の制限も軽減できる。

## 3. 提案手法

本節では SfM を用いて物体の 3 次元位置座標およびカメラパラメータを推定する手法を説明する。最初に、入力された画像群から物体の大まかな 3 次元位置座標とカメラパラメータの推定を行う。次に、推定できた 3 次元座標からより高精度な形状復元を行う。この際に、物体の置かれている 3 次元平面の推定も行う。最後に、得られたカメラパラメータおよび 3 次元平面から影の 3 次元位置座標を推定する。以上により物体と影の 3 次元位置座標が推定することができ、遮蔽関係を導出することができる。

† 千葉大学大学院融合科学研究科 Chiba University,  
Graduate School of Advanced Integration Science

### 3.1 物体の 3 次元位置座標およびカメラパラメータの推定

入力として、物体を複数方向から撮影した画像群を用意し、それぞれの画像から特徴点を抽出する。本研究では、抽出する特徴点には SIFT 特徴量を採用する。SIFT 特徴量はスケールスペースを使った、照明変化や回転、拡大縮小に不変な頑強な特徴量であり、画像間のマッチングや物体認識によく用いられている。次に、抽出した特徴点の画像間での対応関係を取得する。取得できた対応関係を記述した行列を用いて Tomasi-Kanade の因子分解法[4]によりカメラ運動とシーンの 3 次元形状を計算する。以上により、各特徴点の 3 次元位置座標・および対応画像での 2 次元座標が取得でき、物体の 3 次元形状を復元することができる。またカメラパラメータとして内部パラメータ（焦点距離・歪みパラメータ）、外部パラメータ（回転行列・並進ベクトル）を取得できる。

### 3.2 Multi-view Stereo を用いた物体の形状の密な復元と物体が置かれている平面の推定

3.1 項の計算により推定できた各特徴点の 3 次元位置座標は図 1(a)のように非常に疎な点群なので、遮蔽関係や 3 次元平面の推定をするのには不十分である。そのため、この点群から物体のより密な 3 次元位置座標の復元を行う。推定されたカメラパラメータおよび入力画像群から Multi-view stereo[5]の技術を用いることで、各特徴点間の 3 次元位置座標を補完でき、より高精度な物体の形状を復元できる（図 1(b)参照）。

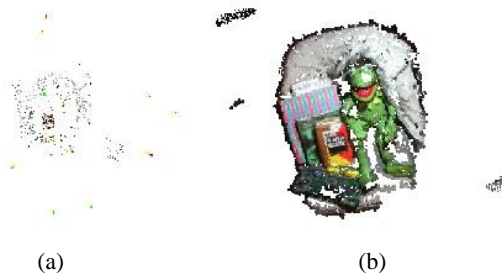


図 1. 復元された 3 次元位置座標の例

次に、物体が置かれている平面の推定を行う。復元できた 3 次元位置座標の内、物体が置かれている平面と思われる座標を抽出し、その点群から最小二乗法を用いて 3 次元平面を推定する。

### 3.3 影の 3 次元位置座標の推定

物体と影の遮蔽関係を推定するためには、物体の形状だけでなく、物体と影の位置関係も知る必要がある。そのため、物体の 3 次元位置座標だけでなく、影の 3 次元位置座標も導出しなければならない。影の 3 次元位置座標を推定するためには 2 次元画像面上の点と 3 次元空間内の点との間の投影変換を求める必要がある。3 次元空間から 2 次元画像面への投影変換、およびその逆変換は、3.1 項により推定されたカメラパラメータを用いることで求めることができる。求められた投影変換の逆変換を用いることで、影の画像上の座標

から 3 次元空間座標へ変換することができる。しかし、2 次元画像面上の点から 3 次元空間へ変換させると、点は、投影中心とその点を通る 3 次元空間内の直線に変換される。影は物体の置かれている平面上に存在すると仮定することで、物体の置かれている平面と直線との交点を影が落ちている平面の 3 次元位置座標と推定することができる。これにより、物体と影の 3 次元位置座標を復元でき、遮蔽関係を推定することができる。

## 4. まとめ

本研究では、SfM により復元された物体形状およびカメラパラメータを用いて、光源環境の推定に必要な物体と影との遮蔽関係を求める手法を提案した。提案手法により、単眼カメラで撮影された複数枚の画像群から物体と影の 3 次元位置座標を推定することで、物体と影の遮蔽関係を導出することができ、そのため、物体形状の事前計測やキャリブレーションボードの用意などの制限を軽減することができる。また、池田らの研究で用いられていた深度カメラなどの特殊な機器が必要になることもない。

提案手法の課題点として、現在では離散的な画像群から 3 次元形状を推定しているため、入力する画像の枚数や物体の映り方によって精度が大きく変わってしまう問題がある。これを解決するためには、入力を動画像にし、より多くの対応点を求めることで精度の高い 3 次元復元を行うことなどが考えられる。

今後は、影を落としている物体の画像でも実験を行い、物体と影の落ちている平面の 3 次元位置座標を求めることができるか検証を行う。また、求めることができた物体と影の 3 次元位置座標から遮蔽関係を求め、周囲の光源環境の推定を行い、従来研究との比較評価を行う。

## 参考文献

- [1] 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, “実物体のソフトシャドウにもとづく実照明環境の推定”, 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア] 98(26), 17-24, (1998)
- [2] N. Snavely, S. M. Seitz, R. Szeliski, “Modeling the World from Internet Photo Collections”, Int. Journal of Computer Vision, vol. 80, pp. 189-210, (2008)
- [3] 池田拓也, 小山田雄仁, 杉本麻樹, 斎藤英雄, “RGB-D カメラから得られる部分物体形状と影に基づく光源推定”, 映像情報メディア学会誌 vol.67 No.4, 124-133, (2013)
- [4] C.Tomasi, T.Kanade, “Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method,” International Journal of Computer Vision, Vol.9, No.2, pp.137-154, (1992)
- [5] Y. Furukawa, J. Ponce, “Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, No. 8, Pages 1362-1376, (2010)