

全方位カメラを用いたスケール復元が可能な水中 Structure from Motion

東京大学 ○久米 大将, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一

Scale Reconstructable Structure from Motion with Omni-Directional Camera in Underwater Environments

The University of Tokyo Hiromasa KUME, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

Structure from Motion (SfM) needs only one camera for 3D measurement. In underwater sensing, the conventional SfM method cannot be used because of refraction at the boundary surfaces of the water, a housing, and the air. In this paper, we propose a new method of SfM for underwater sensing with taking into account the effect of refraction. This method can also reconstruct scales of objects which the conventional SfM cannot.

1. 序論

水中設備の点検作業など、水中物体を画像情報に基づいて3次元計測する社会的要請が存在する。特に危険が伴う環境では水中ロボットによる計測が望まれる。しかし水中計測においては、カメラを防水容器で覆うことで光が屈折し画像が歪むため、この影響を考慮する必要がある。

ステレオカメラによる方法¹⁾及び能動ステレオ法²⁾は複数台のカメラないしは投光器を必要とするため、搭載スペースに制限がある場合、水中ロボットへの実装が困難である。河村らはカメラ1台のみを使い、水面上の平行移動により計測しているが、計測範囲は限定され、かつその移動量は既知としている³⁾。

一方、Structure from Motion (SfM) は、カメラの位置姿勢変化を画像情報のみから対象物体の形状と同時に復元する手法であるが、屈折を考慮した研究事例の報告は十分になされていない。また一般にSfMは対象のスケールを復元できないという欠点を持つ。そこで本研究では、広視野を持つ全方位カメラを使って水中物体の形状を実寸で復元するSfMの新手法を提案する。提案手法は水中に限らず気中においても、透明容器でカメラを覆い意図的に空気-容器の界面で屈折を起こすことで対象のスケールを復元することが可能である。

2. 提案手法の計測原理

2.1 全方位カメラ

全方位カメラは通常のカメラの上に双曲面ミラーが取り付けられたものである。双曲面の一方の焦点に入射した光線は反射後に他方の焦点に向かうので、焦点の1つをレンズ中心と一致させて用いる。本研究では円筒状の防水容器でこれを覆う (Fig. 1)。

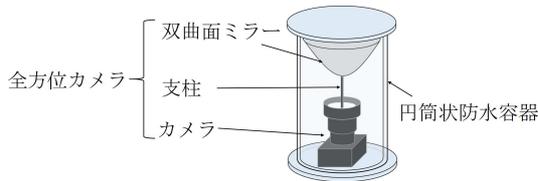


Fig. 1 水中全方位カメラの構成

2.2 光線ベクトル

光線は容器外-防水容器-容器内の各界面で屈折する。はじめに対応点の画像座標 (u, v) を双曲面のミラー側の焦点 C_0 から容器内側の屈折点 C_1 に向かうベクトルに変換する (Fig. 2)。これ

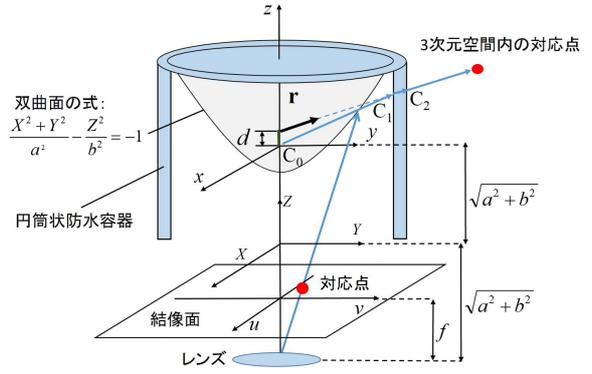


Fig. 2 光線ベクトルの算出

はレンズ中心と画像座標を通る直線と双曲面の連立方程式を解いて得られる。次にこのベクトルを、容器外側の屈折点 C_2 から被写体に向かう方向ベクトルに変換する。これを光線ベクトルとよぶこととし、その仮定の始点をミラー軸上にとる (Fig. 2)。本研究では防水容器の大きさ及び各媒質の屈折率は既知とするので、光線追跡により光線ベクトル \mathbf{r} とその始点の位置ベクトル $\mathbf{d} = (0, 0, d)^T$ が得られる。

2.3 屈折を考慮した SfM の定式化

はじめに、移動前と後の2つのカメラ座標系 (原点はミラーの焦点) で3次元空間内の対応点を観測し、前節の方法で光線ベクトル $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$, $\mathbf{r}' = (x', y', z')^T$ とそれらの始点の位置ベクトル \mathbf{d} , \mathbf{d}' を算出する。カメラの運動は回転行列 \mathbf{R} と並進ベクトル \mathbf{t} で表し、 $r_{11} \sim r_{33}$, $t_1 \sim t_3$ をそれぞれ \mathbf{R} , \mathbf{t} の成分とする。

屈折が存在しない従来のSfMでは、 \mathbf{r} , \mathbf{r}' , \mathbf{t} が同一平面上に存在するという幾何関係 (Fig. 3) を

$$\begin{pmatrix} xx' \\ yy' \\ zz' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1 - r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1 - r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1 - r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

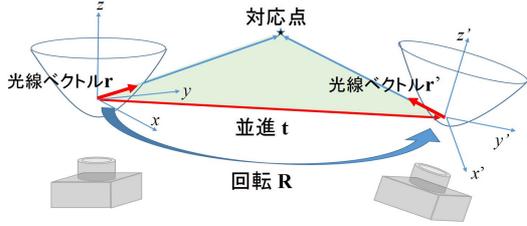


Fig. 3 従来の SfM で利用する幾何学的関係

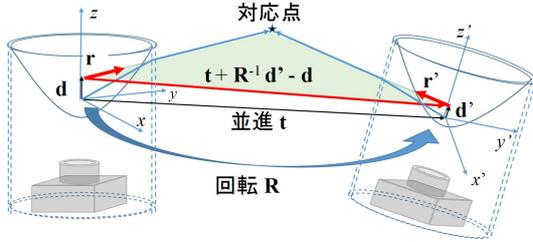


Fig. 4 提案手法で利用する幾何学的関係

と定式化し解くことで \mathbf{R} と「 \mathbf{t} の向き」を得る。しかし \mathbf{t} には定数倍の不定性があるため対象物体のスケールは復元できない。

提案手法では、「2つの光線ベクトルと、その始点同士を結ぶベクトルが同一平面上に存在する」という幾何学的関係を利用する (Fig. 4)。これは「 \mathbf{r} と $(\mathbf{t} + \mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}' - \mathbf{d}) \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}'$ の内積が 0 である」と同値である。整理して \mathbf{R} の直交性を用い簡単化すると

$$\begin{pmatrix} xx' \\ yx' \\ zx' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \\ dyx' + d'xy' \\ -dxx' + d'yy' \\ d'zy' \\ dyy' - d'xx' \\ -dxy' - d'yx' \\ -d'zx' \\ dyz' \\ -dxx' \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1 - r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1 - r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1 - r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{u}^T \mathbf{g} = 0 \quad (3)$$

と表せる。この式を 16 個以上の対応点について連立すれば、最小 2 乗法により \mathbf{g} が得られる。従来の SfM の式 (1) と異なり \mathbf{g} には \mathbf{R} の成分のみから成る成分があるため、 \mathbf{R} の直交性より \mathbf{g} の第 10~12 成分の 2 乗和が 1 となるようにノルムを決めることができる。これにより \mathbf{R} も \mathbf{t} も一意に決まり、各対応点の 3 次元位置が復元できるので対象の形状をスケールも含めて復元可能となる。

Table 1 シミュレーション結果

n	計測誤差の平均 [mm]	
	水中計測	気中計測
16	3.7×10^{-6}	3.9×10^{-4}
100	7.0×10^{-10}	4.3×10^{-8}

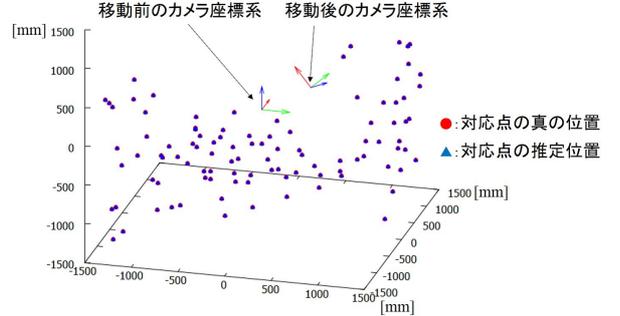


Fig. 5 シミュレーション結果 (水中, $n = 100$)

3. シミュレーション実験

提案手法により対応点の 3 次元座標の復元が可能であることを確認するため、水中計測および気中計測のシミュレーション実験を行った。カメラの周囲にランダムに生成した対応点を n 個 ($n = 16, 100$) 与え、それぞれが結線する画像座標を算出したのち、本手法を用いて対応点の 3 次元位置を推定し真の位置との誤差を算出した。

厚さ 3mm のアクリル防水容器 (屈折率 1.49) の外側が水、内側が空気と想定した場合の結果と、容器内外を共に屈折率 1.0 の空気と想定した場合の結果を結果を Table 1 に示す。Fig. 5 は水中計測 ($n = 100$) の結果である。赤い丸が対応点の真の位置、青い三角が復元位置であるが、誤差が小さいため図中では重なって表示されている。これより 3 次元位置が正しく復元されていることが確認できる。また屈折の効果の大きい水中環境は、提案手法のより効果的な適用環境であるといえる。

4. 結論と今後の展望

屈折を考慮したスケール復元が可能な SfM を提案し、シミュレーション実験によりその理論的妥当性を示した。実際の計測では、容器の軸のずれや厚みの不均一などの要因により、対応点の画像座標に誤差が生じることが想定される。誤差に対するロバスト性が今後の課題となる。

謝 辞

本研究の一部は、科研費若手研究 (A)22680017, および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 成瀬 達哉, 山下 淳, 金子 透, 小林 祐一: “魚眼ステレオカメラを用いた水中物体の 3 次元計測”, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 4, pp. 344–348, 2013.
- 2) R. Kawai et al.: “Three-Dimensional Measurement of Objects in Water by Using Space Encoding Method”, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2830–2835, 2009.
- 3) 河村 拓史, 斎藤 英雄, 中島 真人: “時空間画像解析による水中物体の 3 次元形状計測”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, No. 4, pp. 607–609, 1996.