

バンドル調整に基づく直角面越し複光路単眼ステレオによる水中物体の3次元形状計測

静岡大学 ○伊部 公紀, 小林 祐一, 金子 透, 東京大学 山下 淳

Three-dimensional Shape Measurement for Underwater Objects Based on Bundle Adjustment with Bi-path Stereoscopic Image via Rectangular Planes

Hirotoishi Ibe, Yuichi Kobayashi, Toru Kaneko, Shizuoka University, and Atsushi Yamashita, the University of Tokyo

It is important to measure shape of objects in a transparent vessel for 3D digital preservation of underwater creatures. We propose a measurement method using a bi-path stereoscopic image of the objects acquired with a monocular camera via rectangular vessel planes. The method estimates the posture of rectangular planes based on bundle adjustment considering light refraction, and measures the 3D shape of underwater objects using ray tracing. Experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed method.

1. 序論

近年、歴史的な建築物や文化財などの3次元形状や色情報を計測することにより、情報として電子媒体に保存する3次元デジタルアーカイブ化が積極的に進められている。アーカイブ化は主に空気中に置かれたものが対象になっているが、水で満たされた透明容器の中で飼育される熱帯魚や深海魚またはホルマリンにより保存される液浸標本などの水中物体をアーカイブ化することにより生物研究や教育分野への応用が期待される。

画像計測は、カメラを用いて容器越しに撮影した画像から水中物体を非接触で計測することができ、色情報も取得できることから従来から様々な手法が提案されている^{[1][2][3][4][5]}。カメラを複数台用いた複眼ステレオ計測法^{[1][2][4]}やカメラと光源（レーザまたはプロジェクタ）を組合せた能動的ステレオ法^[3]は、高精度な計測が可能であるが装置コストが掛かることや装置間の位置姿勢を正確に校正しておく必要がある。

本研究では、図1(a)に示す直方体形状容器の角の直角面越しに1台のカメラを用いて水中物体を撮影することで、図1(b)に示す複光路単眼ステレオ画像が得られることに着目する。直角面越しの複光路単眼ステレオ画像は、水中物体からの光が水中から容器、そして容器から空気中へと進む際に光が屈折し、直角面を構成する2つの平面からそれぞれ通過することでカメラ画像に映り込んだものである。鈴木ら^[6]は、水中ロボットセンシングを目的とし、複光路を生じさせるハウジング内にカメラを設置して、水中物体を計測する手法を提案している。

本研究では1台のカメラを用いて直角面越しに撮影した複光路単眼ステレオ画像から水中物体の3次元形状を計測する手法を提案する^[7]。

取得画像から水中物体の3次元位置を光の屈折を考慮して計測するためには、光が屈折する直角面の位置姿勢情報が必要となる。SedlazeckとKochは^[8]、2台のカメラにより容器の平面部越しに撮影したステレオ画像上の水中物体の複数の対応点からバンドル調整を用いることにより、容器の平面の位置姿勢を推定する手法を提案している。本研究では、複光路単眼ステレオ画像上の対応点から、バンドル調整を用いて直角面の姿勢を推定し、推定した姿勢情報と容器寸法の情報を既知として直角面の位置を推定する。推定された直角面の位置姿勢情報を用い、容器の厚みおよび光が伝播する媒質の各屈折率を既知として光線追跡を用いて水中物体の3次元形状を計測する。

2. 計測手法

提案手法の処理手順を図2に示す。カメラ内の幾何学パラメータを事前に校正したカメラを用いて容器の直角面越しに水中物体の画像を取得する。

取得した画像から直角面の角部分の直線（境界直線）を抽出する。境界直線から直角面の位置姿勢を限定することで、直角面の位置ベクトルの長さを表すスケールパラメータ、直角面の姿勢を決定する2つの姿勢パラメータが未知パラメータとなる。

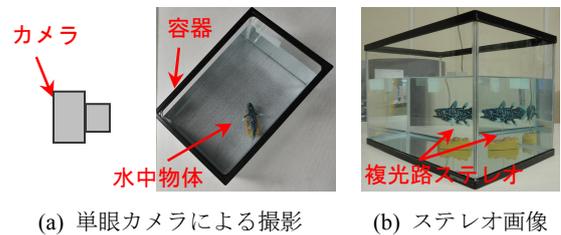


図1 直角面越し複光路単眼ステレオ

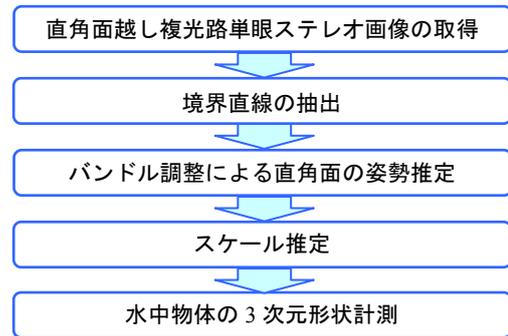


図2 計測処理手順

タとなる。

直角面の角部分は、容器の支柱または溶着部により構成されるものとし、画像上において角の左右に平行の直線として観察されるものと仮定する。境界直線の抽出過程を図3に示す。図3(a)に示す取得画像から、図3(b)に示すエッジをCannyのエッジ検出法を用いて抽出する。エッジからハフ変換により直線群を求め、得られた直線群から平行線を抽出し、平行線の中心線として境界直線を抽出する。図3(c)に抽出した境界直線（黄線）と平行線（緑）を示す。

直角面には、空気と容器が接する表面と容器と水とが接する裏面がある。パラメータ推定は表面について行い、裏面は表面と平行であるとし、容器の厚みを既知として表面の推定されたパラメータから裏面のパラメータを決定する。

ステレオ画像から水中物体上の同一点を結ぶ対応点の組を特徴点検出アルゴリズムのSIFTを用いて複数抽出し、バンドル調整を用いて2つの姿勢パラメータを推定する。

バンドル調整では、各対応点について図4に示すように光線追跡と再投影を行う。カメラのレンズに位置する光学中心から対応するそれぞれの点を通る光線を求め、任意の姿勢パラメータを与えて、スネルの法則を用いて水中まで光線追跡し、仮の計測位置を求める。仮の計測位置からフェルマーの原理により画像上の再投影点を求める。対応点と再投影点のずれを求め、対応点の組みすべてのずれの総和である再投影

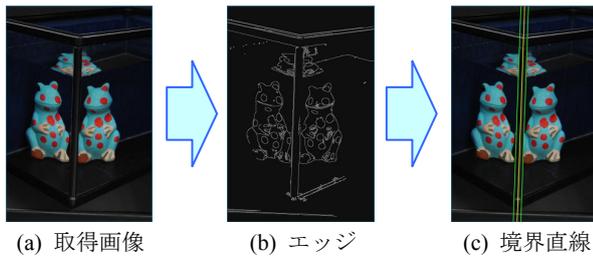


図3 境界直線の抽出

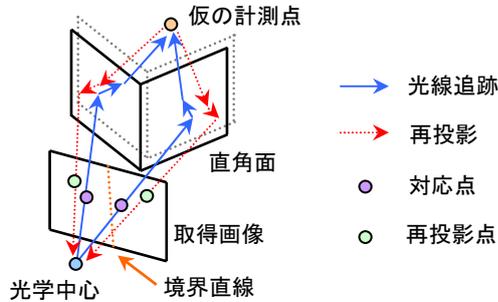


図4 バンドル調整 (光線追跡と再投影)

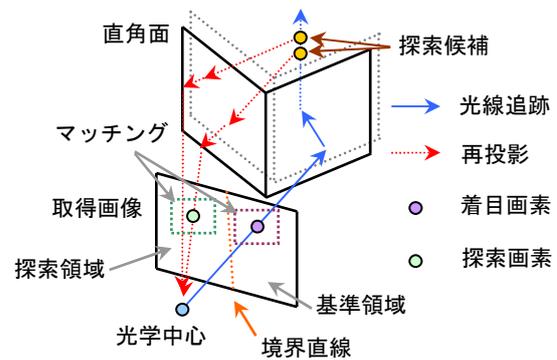


図5 ステレオマッチング



図6 複光路単眼ステレオ画像

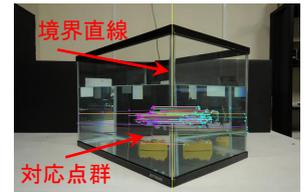


図7 境界直線と対応点群

誤差を最小化することで姿勢パラメータを推定する。得られた姿勢パラメータと直角面を構成する 2 つの容器平面の幅寸法からスケールパラメータを求める。

最後に、直角面を構成する 2 面のうちの片方の面に対応する画像領域を基準領域として、ステレオマッチングにより水中物体の 3 次元位置を計測する。基準領域内の着目画素から、図 5 に示す光線追跡により水中内での光線の位置と方向を求める。水中内における光の伝播距離を任意のステップで調節し、再投影により直角面のもう片方の面に対応する画像領域内での探索点を求める。着目画素と探索点の周囲に設定した矩形領域の輝度分布から輝度差の絶対値とである SAD を算出し、SAD の値が最小となる点を探索し、そのときの水中の位置を計測点として求める。

3. 実験

解像度 2128×1416 pixel のカメラを用い、ガラス製の直方体形状の容器内に設置したシーラカンスの模型を水中物体として計測実験を行った。取得した複光路単眼ステレオ画像を図 6 に示す。また、境界直線と対応点の抽出結果を図 7 に示す。対応点は 274 点得られ、推定された直角面のパラメータは、スケールパラメータは 439.1mm、2 つの姿勢パラメータはそれぞれ 42.0 deg および 0.3 deg となった。比較のために直角面の表面にキャリブレーションパターンを設置することで直角面のパラメータを取得した。その結果、スケールパラメータは 400.7mm、姿勢パラメータはそれぞれ 44.2 deg および 1.6 deg となった。

境界直線右側の領域を基準領域とし、水中内における探索のステップ幅を 1mm として、ステレオマッチングにより水中物体の形状を計測した。図 8 に水中物体の計測結果を示す。計測点の色は対応点の SSD 評価の値を示している。

4. 結論

容器の直角面越しに撮影した複光路単眼ステレオ画像から、容器内の水中物体の 3 次元形状を計測する手法とバンドル調整により直角面の姿勢を推定し、容器の幅寸からスケールを求める手法を提案した。実験により、水中物体の形状を計測し、3 次元形状を再構成した。今後の課題として、直角面の位置姿勢推定のロバスト化や動画を用いて移動する水中生物を計測することなどが考えられる。

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。

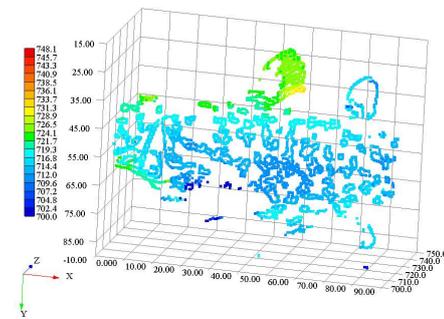


図8 水中物体の計測結果

参考文献

- [1] R. Li, C. Tao and W. Zou: "An Underwater Digital Photogrammetric System for Fishery Geomatics", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXI, Part B5, pp.319-323, 1996.
- [2] A. K. Chong and P. Stanford: "Underwater Digital Stereo-observation Technique for Red Hydrocoral Study", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 68, No. 7, pp.745-751, 2002.
- [3] R. Kawai, A. Yamashita and T. Kaneko: "Three-dimensional Measurement of Objects in Water by Using Space Encoding on Robotics and Automation (ICRA2009)", pp.2830-2835, 2009.
- [4] 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.
- [5] T. Yano, S. Nobuhara and T. Matsuyama: "3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-View Synthesis", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 5, No. 0, pp.65-69, 2013.
- [6] 鈴木陸実, 山下淳, 金子透: "光路差による見え方の違いを利用した単眼ステレオカメラによる水中画像センシング", 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 31, No. 14, pp.165-170, 2007.
- [7] 伊部公紀, 金子透, 小林祐一, 山下淳: "直角面容器越し複光路単眼ステレオによる水中物体の 3 次元形状計測", ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集 (VIEW2013), OS2-H2(IS1-F5), pp.1-8, 2013.
- [8] A. Sedlazeck and R. Koch: "Calibration of Housing Parameters for Underwater Stereo-Camera Rigs", Proceedings of the British Machine Vision Conference, pp. 118.1-118.11, 2011.