

多波長動画像を用いた水中物体と動的水面の形状復元

陰山 賢太¹ 松岡 諒² 岡部 孝弘²

概要: 画像から物体の3次元形状を復元することはコンピュータビジョンにおいて重要な課題の一つである。とくに、画像による水面や水中物体の形状復元は、水中設備の外観検査や水中生物の調査など、非接触計測を行う上で必要不可欠な技術である。そこで本研究では、多波長動画像から水中物体と動的水面の両方の形状を復元する手法を提案する。具体的には、可視光域/近赤外光域では、反射率の変動が大きい/小さいこと、ならびに、水が透明/半透明であることに着目して、可視光の屈折に基づく幾何学的な手掛かりと近赤外光の吸収に基づく光学的な手掛かりを統合することで両方の形状を復元する。

キーワード: 多波長動画像, 形状復元, 屈折, 吸収, 可視光, 近赤外光

1. はじめに

2次元画像から物体の3次元形状を復元することは、コンピュータビジョンにおいて重要な課題の一つである。中でも水中物体の形状復元は、水中設備の外観検査や水中生物の調査など、非接触計測を行う上で必要不可欠な技術である。一般に物体の形状復元には、多視点ステレオや照度差ステレオなどの手法が用いられる。しかし、水面や水中物体の見えは、光の屈折のために水面形状や光源・カメラの位置・向きに依存することから、従来手法では水面や水中物体の形状を復元することは困難である。

これまでに、動画像から得られるオプティカルフローを手掛かりに水面の形状を復元する手法 [2] や、水中における近赤外光の吸収を手掛かりに水中物体の形状を復元する手法 [5] が提案されている。しかし、これらの手法は水中または水面の形状が既知であることを前提としており、どちらも未知の場合には復元が困難となる。

そこで本稿では、多波長動画像から水中物体と動的水面の両方の形状を復元する手法を提案する。具体的には、可視光域/近赤外光域では、反射率の変動が大きいこと/小さいこと、ならびに、水が透明/半透明であることに着目して、可視光の屈折に基づく幾何学的な手掛かりと近赤外光の吸収に基づく光学的な手掛かりを統合することで、両方の形状を復元する。

本研究の主な貢献は以下のとおりである。本稿では、多波長動画像から得られる幾何学的な手掛かりと光学的な手掛かりを統合した新たな手法を提案する。これにより水中

物体と動的水面の両方の形状復元を実現する。この形状復元手法は非接触による水中設備の外観検査や水中環境の調査など、様々な応用への展開が期待される。

2. 関連研究

水面形状を復元する研究として、Murase [2] は屈折による水底テクスチャの揺らぎを手掛かりに水面の形状を復元する手法を提案している。また、Shan ら [3] は屈折による歪みから透明物体表面の法線を推定することで、単一画像による透明物体の形状復元手法を提案している。しかし、これらの手法は水深や水中物体形状が既知であることを前提としているため、水深が未知(水中物体形状が未知)の場合には適用することができない。

一方で、水中物体形状を復元する研究として、Yano ら [4] は形状が未知である水槽内の物体に対し、屈折を考慮した視体積交差法による形状復元手法を提案している。また、Asano ら [5] は水中における近赤外光の吸収を手掛かりとした水中物体形状の復元手法を提案している。しかし、これらの手法は水面が平面であることを仮定しているため、波のあるような動的水面の場合には適用が難しい。

水面と水中物体の両方の形状を復元する手法として Qian ら [6] は、視差と屈折を手掛かりとした形状復元手法を提案している。この手法では、複数台のカメラを格子状に配置し、視差と屈折が各カメラで整合性を保つように最適化を行うことで水面と水中物体の形状を同時に復元する。しかし、カメラを複数台使う関係上キャリブレーションに手間がかかるといった問題がある。一方、提案手法では、カメラ一台で撮影される多波長動画像を用いることで動的な

¹ 九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

² 九州工業大学大学院情報工学府知能情報工学研究系

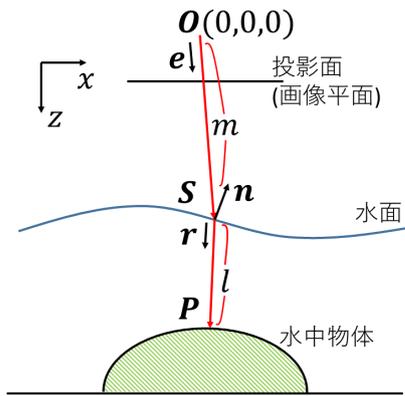


図 1: 屈折による光線関係

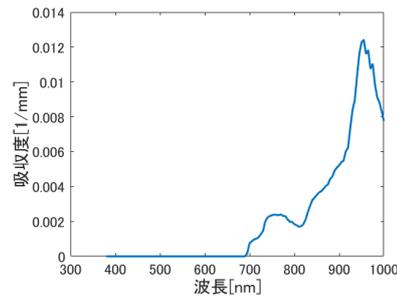


図 2: 吸収度

面と水中物体の形状復元を行うため、複雑なカメラキャリブレーションをすることなく形状を復元できる。

3. 基本原理

3.1 屈折

図 1 はカメラで水中物体を撮影したときの光の経路を模式的に表したものである。水面での光の屈折はそれぞれの媒質の屈折率 η_1 , η_2 と水面の法線ベクトル \mathbf{n} を用いて

$$\eta_1(\mathbf{e} \times \mathbf{n}) = \eta_2(\mathbf{r} \times \mathbf{n}) \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで、カメラがキャリブレーション済みであれば、入射ベクトル \mathbf{e} は既知である。したがって、水面の法線ベクトル \mathbf{n} が決まれば、屈折ベクトル \mathbf{r} を一意に求めることができる。

3.2 吸収

近赤外光は水に吸収されるため、水中物体による反射光は水深に応じて減衰する。吸収による光線のエネルギーの減衰は、Lambert-Beer の法則に従う [1]。光路長を l 、ある波長 λ における入射光強度を $I_0(\lambda)$ 、水の吸収度を $\alpha(\lambda)$ とし、水中物体表面の分光反射率を $s(\lambda)$ 、反射光の幾何学的係数を $r(\omega)$ とすると、水を通して観測される光の強度 $I(\lambda)$ は

$$I(\lambda) = r(\omega)s(\lambda)I_0(\lambda)e^{-2\alpha(\lambda)l} \quad (2)$$

と表される。水深が既知である水槽の底面をハイパースペクトルカメラで撮影することにより求めた α を図 2 に示す。ここで、分光反射率が $s(\lambda_1) \simeq s(\lambda_2)$ を満たすような近赤外波長 λ_1 , λ_2 を用いることで、光路長 l は

$$l \simeq \frac{1}{2(\alpha(\lambda_2) - \alpha(\lambda_1))} \log \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} \quad (3)$$

のように求められる [5]。提案手法では、多波長画像から得られる近赤外波長 2 バンドを利用することで水深推定の手掛かりとする。

4. 提案手法

本手法では、可視光域 1 バンドと近赤外光域 2 バンドからなる動画像を利用して水中物体と動的水面の形状復元を行う。提案手法では、水の吸収度 α と入射ベクトル \mathbf{e} を既知として、入力が多波長動画像 $I(\lambda, t)$ から、各フレームの画素毎に水中物体の 3 次元形状 \mathbf{P} と水面の 3 次元形状 \mathbf{S} を求める。

まず、水中物体の形状を求める。本手法では、入力として与えられる動画像において水面は動的であるが恒常性(水面の傾きの時間平均はゼロ)を持ち、かつ、水中物体は静的であることを仮定する。この仮定において、Murase[2] の手法から、波による揺らぎのある動画像から静水時(水面が平面の時)の水底テクスチャの見えを復元できる。注目画素について、可視動画像から求まるオプティカルフローを利用し、注目画素をその軌跡中心へ再投影して得られる画像は静水時の画像となる。本手法では入力動画像に近赤外光域 2 バンドを含むことから、静水時の近赤外画像も得ることができる。このとき、求めた画像は静水時画像であるため、水面の法線ベクトル \mathbf{n} が既知となることにより式 (1) から屈折ベクトル \mathbf{r} が求まり、かつ、近赤外画像 2 枚を用いれば式 (3) よりその方向の水深 l が求まるため、画素毎に水中物体表面の 3 次元座標 \mathbf{P} を求めることができる。これを全画素について行うことで水中物体形状を復元できる。

次に、得られた水中物体の形状とオプティカルフローを用いてフレーム毎に水面の形状を求める。具体的には、式 (3) より、近赤外光域 2 バンドから各フレームの画素毎に水深 l が求まる。ここで、可視動画像から求めたオプティカルフローによる画素の対応付けにより、注目画素の水中物体表面の 3 次元座標 \mathbf{P} がわかる。また、入射ベクトル \mathbf{e} が既知であることから、注目画素について、図 1 の屈折による光線関係をたどることで水面の 3 次元座標 \mathbf{S} を一意に定めることができる。これを全画素について行うことで注目フレームの水面形状を復元することができる。

5. 実験

提案手法の有効性を確かめるため CG と実画像で実験を

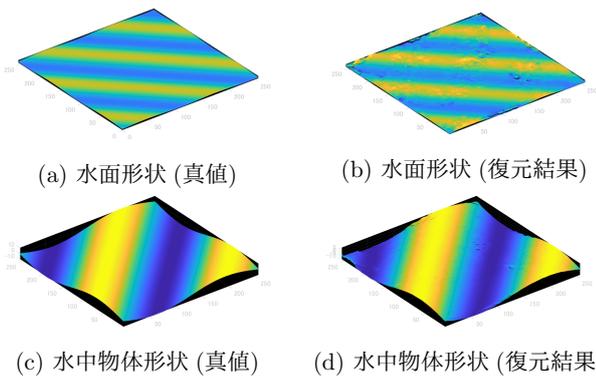


図 3: CG 実験 1

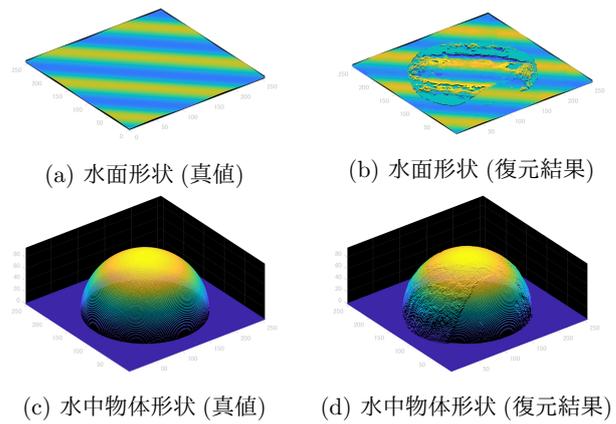


図 4: CG 実験 2

行った。CG 実験では、水底に複雑なテクスチャを持つ水中物体があることを想定して多波長動画像を作成した。図 3, 4 に復元した水面と水中物体の形状を示す。図 3 では水中に正弦波形状の物体があり、水面ではそれと直交するような波が発生していることを想定している。水面と水中物体のそれぞれの真値と比較して良好な結果が得られていることがわかる。また、図 4 では水中に半球形状の物体があることを想定して CG を作成し、形状復元を行った結果である。水中物体の遮蔽により物体の境界付近で水面形状に復元誤差が生じているものの、大まかな水面と水中物体形状を復元できていることが確認できた。一方で、オプティカルフローの誤差による復元誤差が発生していることも確認できる。

次に、実画像実験を行った結果を図 5 に示す。実験では水槽に 18[cm] 程度の水をため、水底に被写体 (陶器製の茶碗) を設置して撮影を行った。撮影カメラは IMEC 社の IMEC-HS-25NIR-USB を用いた。実験結果から水中物体の大まかな形状を復元できていることがわかる。しかし、水面形状は復元できていない。水中物体にテクスチャのある領域では水面の位置が平面とは異なっているが、それ以外の領域では形状が復元されていない (平面のままである) ことがわかる。これは、テクスチャのない領域では、オプティカルフローが正しく求まらないことが原因であると考えられる。

6. むすび

本稿では、静的水中物体と動的水面の両方の形状を復元する手法を提案した。屈折によるテクスチャの揺らぎを可視域でとらえることで水面形状を復元するための手掛かりとし、吸収による減衰を近赤外域でとらえることで水中物体の形状を復元するための手掛かりとすることで両方の形状を復元した。また、提案手法の有効性を CG 実験および実画像実験により確認した。実画像実験における復元精度の向上は今後の課題である。

今回の手法では水中物体は静的であることを仮定したが、実際のシーンでは水中物体が静的であるとは限らない。動

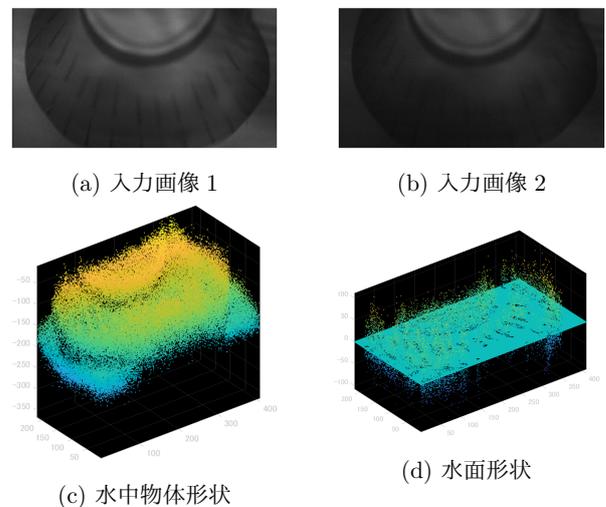


図 5: 実画像実験

的な水中物体への拡張は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18H05011 および JP17H00744 の助成を受けた。

参考文献

- [1] E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyuz, and G. Johnson, "Color Imaging: Fundamental and Applications", CRC Press, Boca Raton, 2008.
- [2] H. Murase, "Surface shape reconstruction of an undulating transparent object", In Proc. IEEE ICCV1990, pp.313-317, 1990.
- [3] Q. Shan, S. Agarwal, and B. Curless, "Refractive Height Fields from Single and Multiple Images", In Proc. IEEE CVPR2012, pp.286-293, 2012.
- [4] T. Yano, S. Nobuhara, and T. Matsuyama, "3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-view Synthesis", IPSJ Trans. Comput. Vis Appl. 5, pp.65-69, 2013.
- [5] Y. Asano, Y. Zheng, K. Nishino, and I. Sato, "Shape from Water: Bispectral Light Absorption for Depth Recovery", In Proc. ECCV2016, pp.635-649, 2016.
- [6] Y. Qian, Y. Zheng, M. Gong, and Y. Yang, "Simultaneous 3D Reconstruction for Water Surface and Underwater Scene", In Proc. ECCV2018, pp.776-811, 2018.