

2 台の RGB-D センサを用いた水面下環境の 3 次元復元

下村 涼太^{1,a)} 金澤 靖^{1,b)}

概要: 浅海域の地形調査では一般的にカメラやセンサを搭載した無人探査機が用いられる。センサとしてソナーを用いた場合、一般に解像度が低だけでなく物体の色を認識できないという問題がある。一方、カメラを用いた場合でも、伝送の関係上、あまり解像度を高くすることが出来ない。また有線カメラを使用する場合も防水筐体など特殊な装備を必要とする。そこで、本研究では特別な装置を必要としない、浅瀬などにおける水面下の環境を復元する手法を提案する。ここでは水面上にマーカーを浮かべ、それを RGB-D センサで計測することにより水面情報を求めることで、画像から水面下の 3 次元形状を復元することが可能となる。シミュレーションデータと実画像を用いた実験により、提案法の有効性を示す。

3-D Reconstruction of Underwater Environment using two RGB-D Sensors

RYOUTA SHIMOMURA^{1,a)} YASUSHI KANAZAWA^{1,b)}

Abstract: A remotely operated vehicle (ROV) with a sensor is generally used for measuring the floor of a shallow sea. The measurement in the underwater of the sea is generally low resolution. For the sensor, in addition, the special equipment such as a waterproof housing is necessary. In this paper, we propose a method for reconstructing the 3-D shape of the undersea environment using RGB-D sensors. The proposed method can measure shapes in the underwater from the above of the surface of the water by using floating markers. We show the effectiveness of the proposed method by simulation and real image data.

1. はじめに

浅海域、特に水深 20[m] 以下の特に浅い海域に存在する干潟や藻場、サンゴ礁などは生態系や水質浄化などに極めて重要な役割を持っている。これらは地球温暖化や生態系の変化により減少傾向にあることから、その状態や経年変化を調査するための研究が盛んに行われている [1], [2], [3], [4], [5], [6]。しかし、深海の調査であれば潜水艇や探査船による調査を行うことができるが、このような水深数メートル程度の海域では大型の機器を用いた調査が困難であるため、従来はスノーケリングによる調査が行われていた。このスノーケリングは人が直接潜水して調査を行うため、危険が伴うことや、広範囲な調査が困

難であるといった問題があるため、現在では無人探査機 (remotely operated vehicle, ROV) による調査が一般的となっている [5]。

水面下で形状計測を行う場合、ソナーやレーザー光、カメラなどが用いられることが多いが、カメラなどのセンサを水中に沈めるために、防水筐体などの特殊な装備が必要となるだけでなく、船自体にも特殊な装置や機材が必要となる。もし、より安価な機材で手軽に計測を行うことができれば、浅海域に対してより多くの調査が可能となり、地球温暖化等の要因の解析への貢献が期待できる。例えば、大掛かりな装置は小型ボートなどに乗せることが出来ないが、カメラとパソコン程度であれば小型ボートに載せることも可能であり、そして船上からカメラのみで水面下の計測を行うことが出来れば、防水筐体などの特殊な機材も必要ない。これにより、水深数メートル程度の干潟や藻場の地形を調査する際、小型のボートの上から水中を撮影するだけで 3 次元計測が可能となる。

¹ 豊橋技術科学大学 情報・知能工学系。Department of Computer Science and Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan

a) r-shimomura@img.cs.tut.ac.jp

b) kanazawa@cs.tut.ac.jp

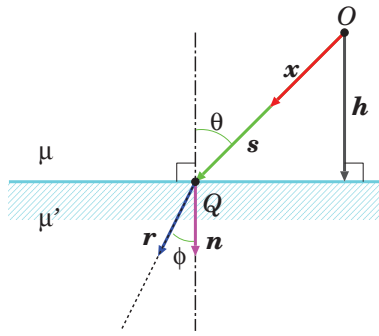


図 1 水面での光の屈折.

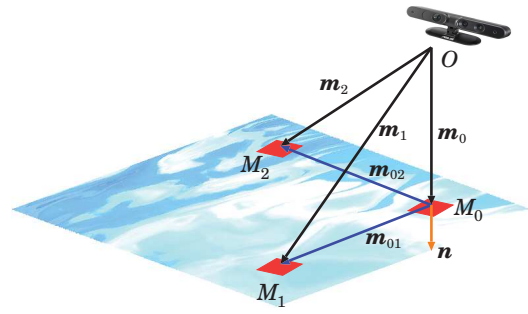


図 2 カメラによるマーカークの計測.

本研究では、容易に入手可能な 2 台の RGB-D センサを用い、船上から水面を撮影することで、水面下の形状を計測する手法を提案する。提案法の有効性をシミュレーションおよび実画像による実験により示す。

2. 関連研究

水中における形状計測の関連研究として、Kamgar-Parsi ら [7] は超音波を用いた手法を提案している。この超音波を用いた計測は解像度が低く、高精度な計測が難しいという問題があるが、音響レンズを移動する台に設置し、複数のシーンで計測を行うことにより高い解像度での計測を実現した。また山下ら [8], [9], [10] は、カメラと光を併用した計測手法としてレーザーレンジファインダを用いた手法 [8], [9] や光切断法を用いた手法 [10] を提案した。さらに河井ら [11] は空間コード化法を用いた手法を提案した。このレーザーレンジファインダを用いた手法 [8], [9] では、対象物体にレーザー光を照射して、その光と対象物体との交点をカメラで観測することにより屈折を考慮した 3 次元計測を実現した。また光切断法による手法 [10] では、対象物体にライン上のレーザースポット光を照射し、それをカメラで観測することで 3 次元計測を行った。また空間コード化法による手法 [11] では、対象物体に一定のパターン光を照射し、そのパターン光をカメラで観測することにより 3 次元位置を計測する。これらの手法においても屈折を考慮した高精度な 3 次元計測を実現しているが、レーザー光を走査したり、パターン光を投影する必要があるため、撮影時間が長く、計測に時間がかかってしまうという問題がある。一方、成瀬ら [12] は、ステレオカメラを用いた水中計測手法を提案している。これはまず魚眼カメラの歪みを補正し、屈折を考慮することで水中環境での広範囲かつ高精度な計測が可能であることを示した。これらは、いずれも水中下での計測を想定しているため、防水筐体などの特殊な装置が必要になる。また、Yano ら [13] は自由視点映像生成のための水中計測手法を提案した。ここでは屈折を考慮した視体積交差法を用い、形状が未知である水中物体の 3 次元復元を実現しているが、この手法では水槽内の物体を想定しているため、海底調査を行う際のように船上から

の計測には不向きであると考えられる。

3. 提案手法

カメラで水面を通して水中を撮影する場合、水面での光の屈折の影響を受ける。一般に水面では波が発生しているため、その屈折の状況は時々刻々と変化するため、これを考慮する必要がある。この光の屈折については、もし屈折率が既知、すなわち媒質となる空気と水との屈折率の比が既知であれば、スネルの法則に従って、コンピュータグラフィックスのように光線を追跡することで光の屈折方向を計算することができる (図 1)。

図 1 において、原点 O から出た光は、ベクトル s の先の水面上の点 Q で屈折し、ベクトル r 方向に進む。通常のカメラ画像では、点 Q までのベクトル s を直接測定することは不可能であり、これは Kinect などの RGB-D センサを使ったとしても水面による近赤外線吸収が大きく、誤差は大きいと考えられる。そこで本研究では、一般のカメラ画像では、ベクトル s と同じ方向に向うベクトル x は測定できることから、水面に浮かべたマーカークを RGB-D センサで測定することで、水面上の点 Q の位置を推定することを考える。

もし、原点 O から水面までの鉛直ベクトル s が既知であれば、水面に波がない場合、水面の単位法線ベクトルを n とすると、次式が成り立つ。

$$(n, (s - h)) = 0 \quad (1)$$

ただし、 (a, b) はベクトル a と b の内積を表す。一般にベクトル s は未知であるが、画像上の観測点から同じ方向の単位ベクトル x は観測可能であり、 $s = \alpha x$ を用いて、式 (1) を満足するようなスカラー α を求めることで、水面上の位置 Q を推定することが可能となる。

ここでは、図 2 に示すように、RGB-D センサに原点 O をとり、水面上に 3 つのマーカーク M_0, M_1, M_2 を浮かべる。このとき、それぞれのマーカークまでの位置ベクトルを m_0, m_1, m_2 とする。そして、

$$m_{01} = N[m_1 - m_0], \quad m_{02} = N[m_2 - m_0] \quad (2)$$

を求めれば、水面の法線ベクトル n は次式により求めら

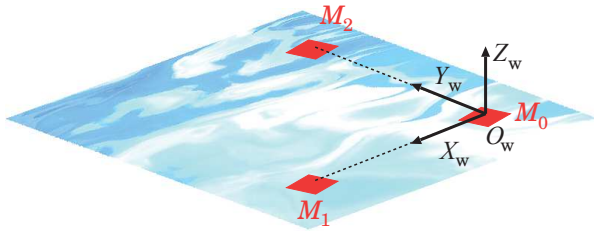


図3 マーカー座標系

れる.

$$\mathbf{n} = \mathbf{m}_{01} \times \mathbf{m}_{02} \quad (3)$$

ただし, $N[\mathbf{a}]$ はベクトル \mathbf{a} の正規化 (単位ベクトル化) を表す.

3.1 波のモデル化

波のある場合に, 前述の方法で水面上の点を求めるには, 波をモデル化する必要がある. そこで本研究では, 波の大きさ及び波長が一定である2次元波を仮定する.

まず, 図3に示すように, 水面上のマーカーを用いた座標系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ を設定する. ここでは, マーカー M_0 が原点 O_w であり, ベクトル \mathbf{m}_{01} 方向に X_w 軸, ベクトル \mathbf{m}_{02} 方向に Y_w 軸にとる. そして, 大きさや波長が一定の2次元波のモデルとして, 次式を用いる.

$$z = A \sin(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (4)$$

ここで, A は振幅 [mm], k_x, k_y はそれぞれ X_w 軸方向, Y_w 軸方向の波数, ω は角周波数 [rad/sec], t は時刻 [sec], そして z は時刻 t における座標 (x, y) での高さ [mm] とする.

また, 角周波数 ω 及び波数 k_x, k_y , 周期 T [msec], それぞれの軸における波長 λ_x, λ_y の関係は次式の通りとなる.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad k_x = \frac{2\pi}{\lambda_x}, \quad k_y = \frac{2\pi}{\lambda_y}$$

$$\lambda_x = T v_x, \quad \lambda_y = T v_y \quad (5)$$

ここで v_x, v_y は, それぞれ X_w 軸方向, Y_w 軸方向での位相速度 [mm/sec] を表す.

波の単位法線ベクトルはその位置によって異なるため, 各位置での単位法線ベクトルを求める必要がある. そこでまず式(4)で表される波をその陰関数表現

$$S(x, y, z) = A \sin(k_x x + k_y y - \omega t) - z = 0 \quad (6)$$

で表す. 位置 (x, y) における波 S の単位法線ベクトルを $\tilde{\mathbf{n}}_S^{(x,y)}$ とすると, これは次式で求めることができる.

$$\tilde{\mathbf{n}}_S^{(x,y)} = N[\nabla S(x, y, z)] \quad (7)$$

ここで ∇ は, 次に示すハミルトンの演算子である.

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (8)$$

これらにより, 水面上の点 (x, y) における, カメラ座標系における $S(x, y, z)$ の位置ベクトル $\mathbf{z}^{(x,y)}$ は次式で計算できる.

$$\mathbf{z}^{(x,y)} = \mathbf{m}_0 + \tilde{\mathbf{m}}_{01}x + \tilde{\mathbf{m}}_{02}y + A \sin(k_x x + k_y y - \omega t) \tilde{\mathbf{n}}_c \quad (9)$$

ただし, $\tilde{\mathbf{n}}_c$ はカメラ座標系における水面の法線ベクトルとする.

また, マーカー座標系における水面の法線ベクトルを $\tilde{\mathbf{n}}_m = (0, 0, -1)^T$ とおくと, 水面上の点 (x, y) における法線ベクトル $\tilde{\mathbf{n}}^{(x,y)}$ は次式で計算できる.

$$\tilde{\mathbf{n}}^{(x,y)} = \tilde{\mathbf{n}}_S^{(x,y)} + (\tilde{\mathbf{n}}_c - \tilde{\mathbf{n}}_m) \quad (10)$$

3.2 水面での屈折を考慮した3次元復元

以上により, 画像面上の一点に対する水面上の3次元座標が与えられることになり, それぞれ水中での屈折方向も計算できる. 本研究では, この屈折方向に対して, もう一台のRGB-Dセンサの撮影した画像を用いて, ステレオ復元することで, 3次元復元を行う.

まず, 2台のRGB-Dセンサの相対位置関係 (回転 \mathbf{R} と並進 \mathbf{t}) は予めキャリブレーションを行っておくとする. 提案手法による3次元復元までの手順の概要は以下の通りとなる (図4).

- (1) マーカーの距離画像観測による対象水面の観測と基準座標系の設定.
- (2) 両センサの観測画像間の対応付け.
- (3) 対応する特徴点位置に対する水面上への位置ベクトルの計算.
- (4) 対応する特徴点の光線に対する屈折後の方向の計算.
- (5) 屈折後の方向ベクトルを用いた3角測量.

以下, それぞれの処理について説明する.

3.2.1 キャリブレーション

本研究では, 2台のRGB-Dセンサの通常画像を用い, OpenCV などを使って, 通常ステレオカメラのキャリブレーションを行うことで, 2台のセンサ間の相対的な位置関係 $\{\mathbf{R}, \mathbf{t}\}$ および通常カメラの内部パラメータを求める.

それぞれの通常カメラの内部パラメータとしては, 焦点距離 f_u, f_v , 画像中心 (u_0, v_0) を用いる. 画像中心はそのまま, 焦点距離に関しては平均 $f = (f_u + f_v)/2$ を用いる. また, 外部パラメータとして, キャリブレーションパターンから得られたカメラの回転 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ と位置 $\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2$ より, 2台のセンサ間の相対的な位置関係を表す回転行列 \mathbf{R} と並進 \mathbf{t} は次式で計算できる.

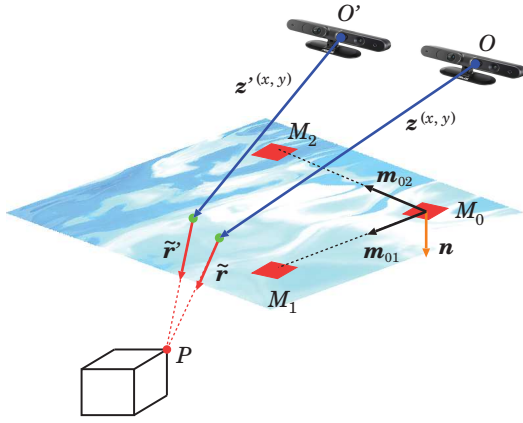


図4 3次元復元の概要

$$R = R_1^T R_2, \quad R = R_1(t_2 - t_1) \quad (11)$$

3.2.2 水面情報の計算

静水状態の水面は平面とみなすことができることから、基準となる RGB-D センサから各マーカーの位置を計測し、そのベクトル m_0, m_1, m_2 を用いて、式 (2) および式 (3) より、水面の法線ベクトル \tilde{n}_c が計算できる。

3.2.3 水面方向ベクトル x_i, x'_i の計算

両画像での対応点をそれぞれ $(u_i, v_i), (u'_i, v'_i)$ としたとき、次式により、画像中心を原点とする座標系での同次ベクトル x_i, x'_i に変換する。

$$\begin{aligned} x_i &= \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & v_0 \\ 1 & 0 & -u_0 \\ 0 & 0 & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix}, \\ x'_i &= \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ f' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & v'_0 \\ 1 & 0 & -u'_0 \\ 0 & 0 & f' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u'_i \\ v'_i \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

そして、これらを正規化したベクトルを $\tilde{x}_i, \tilde{x}'_i$ とする。

$$\tilde{x}_i = N[x_i], \quad \tilde{x}'_i = N[x'_i] \quad (13)$$

3.2.4 水面へのベクトル s_i, s'_i の推定

水面へのベクトルは、水面と上記の水面方向ベクトル x_i, x'_i との交点で求められるが、波によっては複数の交点を持つ場合もあるため、ここでは、マーカー座標系でモデルにより予め格子状に求めておいた水面ベクトル $\tilde{z}_j^{(x,y)}, \tilde{z}'_j^{(x,y)}$ を用い、最も近いベクトルを選ぶことで推定する。

$$\begin{aligned} s_i &= \arg \max_{\tilde{z}_j^{(x,y)}} (\tilde{x}_i, \tilde{z}_j^{(x,y)}), \\ s'_i &= \arg \max_{\tilde{z}'_j^{(x,y)}} (\tilde{x}'_i, \tilde{z}'_j^{(x,y)}) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、ベクトルに対するチルダ ($\tilde{\cdot}$) の有無は、正規化の有無を表す。

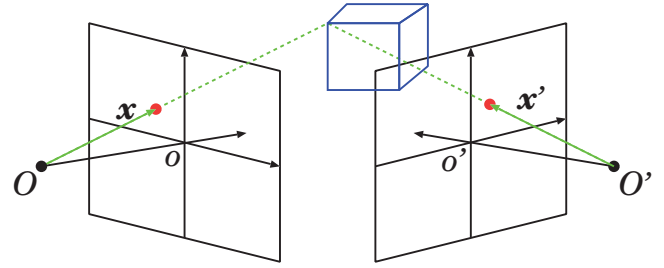


図5 カメラ座標系

3.2.5 屈折後の方向ベクトル $\tilde{r}_i, \tilde{r}'_i$ の計算

まず、それぞれの入射角 θ_i, θ'_i 及び屈折角 ϕ_i, ϕ'_i を求めることを考える。入射角 θ_i, θ'_i は $\tilde{x}_i, \tilde{x}'_i$ と法線ベクトル $\tilde{n}_i^{(x,y)}, \tilde{n}'_i^{(x,y)}$ から、次式により計算できる。

$$\begin{aligned} \theta_i &= \cos^{-1}((\tilde{n}_i^{(x,y)}, \tilde{x}_i)), \\ \theta'_i &= \cos^{-1}((\tilde{n}'_i^{(x,y)}, \tilde{x}'_i)) \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、屈折角 ϕ_i, ϕ'_i については、スネルの法則を用いて次式で計算する。

$$\begin{aligned} \phi_i &= \sin^{-1}\left(\frac{\mu}{\mu'} \sin \theta_i\right), \\ \phi'_i &= \sin^{-1}\left(\frac{\mu}{\mu'} \sin \theta'_i\right) \end{aligned} \quad (16)$$

屈折後の方向ベクトル $\tilde{r}_i, \tilde{r}'_i$ は、それぞれ $\tilde{x}_i, \tilde{x}'_i$ と $\tilde{n}_i^{(x,y)}, \tilde{n}'_i^{(x,y)}$ の同一平面上に存在するため、以下のような式で計算できる。

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i &= \frac{\mu}{\mu'} \tilde{x}_i + \left(\cos \phi_i - \frac{\mu}{\mu'} \cos \theta_i\right) \tilde{n}_i^{(x,y)}, \\ \tilde{r}'_i &= \frac{\mu}{\mu'} \tilde{x}'_i + \left(\cos \phi'_i - \frac{\mu}{\mu'} \cos \theta'_i\right) \tilde{n}'_i^{(x,y)} \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、 μ, μ' はそれぞれ空気および水の屈折率とする。

3.2.6 3次元位置の計算

以降は通常のステレオによる復元と同様であり、得られた屈折後の方向ベクトル $\tilde{r}_i, \tilde{r}'_i$ を延長し、それらが交わった位置が3次元位置となるが、ノイズや計算誤差などの影響により実際には交わらない。そこで、ベクトル $\tilde{r}_i, \tilde{r}'_i$ 間の距離が最短となる位置の midpoint \hat{P}_i を3次元位置 p_i とする。

$$p_i = \frac{1}{2} \left((d'_i R \tilde{r}'_i + s'_i) + (d_i \tilde{r}_i + s_i) \right) \quad (18)$$

ただし、 d_i, d'_i はそれぞれ以下の式から計算できる。

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{((s'_i - s_i), (\tilde{r}_i - (\tilde{r}_i, R \tilde{r}'_i) R \tilde{r}'_i))}{1 - (\tilde{r}_i, R \tilde{r}'_i)^2}, \\ d'_i &= \frac{((s_i - s'_i), ((R \tilde{r}'_i, \tilde{r}_i) \tilde{r}_i - R \tilde{r}'_i))}{1 - (\tilde{r}_i, R \tilde{r}'_i)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

4. 実験

4.1 シミュレーション実験

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーションに

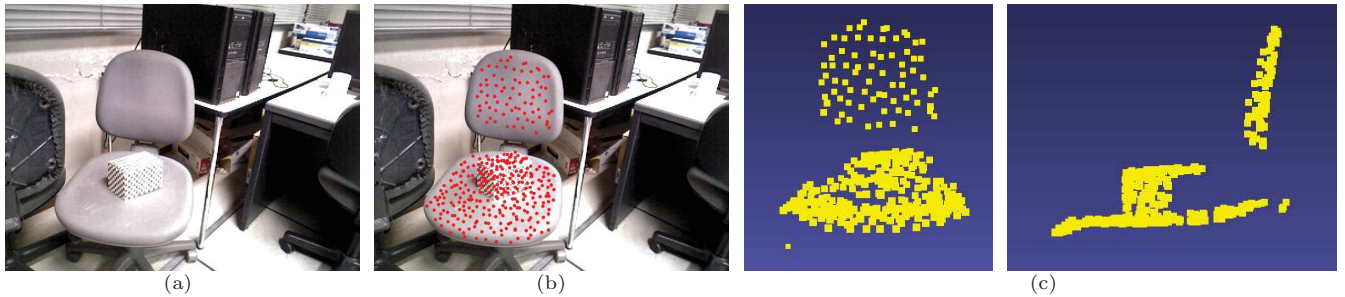


図 6 実験に用いたシーンと形状データ. (a) シーンの画像. (b) 用いたデータ点. (c) RGB-D センサによる計測データ (真値).

より精度評価を行った.

ここでは, RGB-D センサにより実測した 3D データに対して, 水面を仮定して擬似的に屈折させたデータを作成し, そこから 3 次元復元を行って, 元の計測データとの誤差を比較した. RGB-D センサによる実測に用いた画像を図 6(a) に, 実際にデータとして用いた 3 次元点群を図 6(b) に示す. また, 3 次元的に表示したデータを図 6(c) に示す. 実験ではこの計測値を真値とみなす.

シミュレーションでは, 図 7 に示すように, RGB-D センサと物体の間に仮想的な水面を想定し, この仮想水面で光線を屈折させて, それを画像として観測したデータを用いる. 実験条件を表 1 に示す. ここでは, 水面の高さを 100, 300, 500, 700[mm] に変化させて実験を行った. 復元精度については, 計測データの位置ベクトル \bar{p} (=真値に相当) と復元結果の位置ベクトル p との距離を計算し, その距離から相対誤差及び絶対誤差を計算して比較した. それぞれ, 相対誤差 e_r は

$$e_r = \frac{\|p - \bar{p}\|}{\|\bar{p}\|} \quad (20)$$

で, また絶対誤差 e_a は

$$e_a = \|p - \bar{p}\| \quad (21)$$

により求めている.

入力画像例を図 9 に, また仮定した波の例を図 8 に示す. 各距離に対する復元結果を図 10 に示す. 図中, 黄色い点は真値, 緑の点は復元結果を表している. 復元結果の相対誤差及び絶対誤差をそれぞれ表 2, 表 3 に示す. また, 相対誤差のグラフを図 11 に示す.

見てわかる通り, 水面までの距離が遠いほど誤差が大きくなっていることがわかる. これは, 遠いほど画像面上での分解能が下がり, 水面までのベクトルを求める際の誤差が大きくなるためや, 水面上で格子上の点を求める際の細かさが影響していると考えられる.

4.2 実画像実験

次に, 波がないと仮定して, 実際の環境での 3 次元復元を行った. ここでは, シミュレーションと同様, 水のない

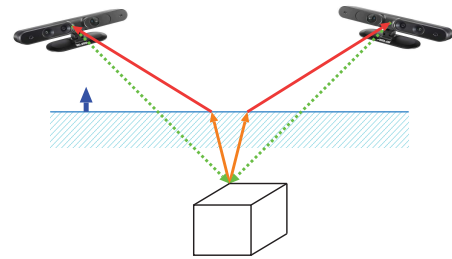


図 7 屈折シミュレーション

表 1 実験条件

項目	値 or 仕様
RGB-D センサ	Xtion Pro Live
点の数	347
空気の屈折率	1.00
水の屈折率	1.33
波の振幅 [mm]	30
波の周期 [mm/sec]	100
位相速度 [mm/sec]	1
焦点距離 [mm]	500
X, Y, Z 軸の回転角 [deg]	(10, -5, 5)
並進 [mm]	(100, 20, 50)
カメラから水面までの距離 [mm]	100, 300, 500, 700

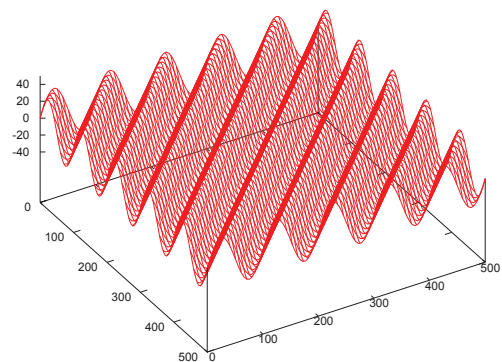


図 8 波の例

状態で測定した値を真値とし, 水を張った状態で復元した値と比較した. 実験条件を表 4 に示す.

キャリブレーションにより得られた内部パラメータと回

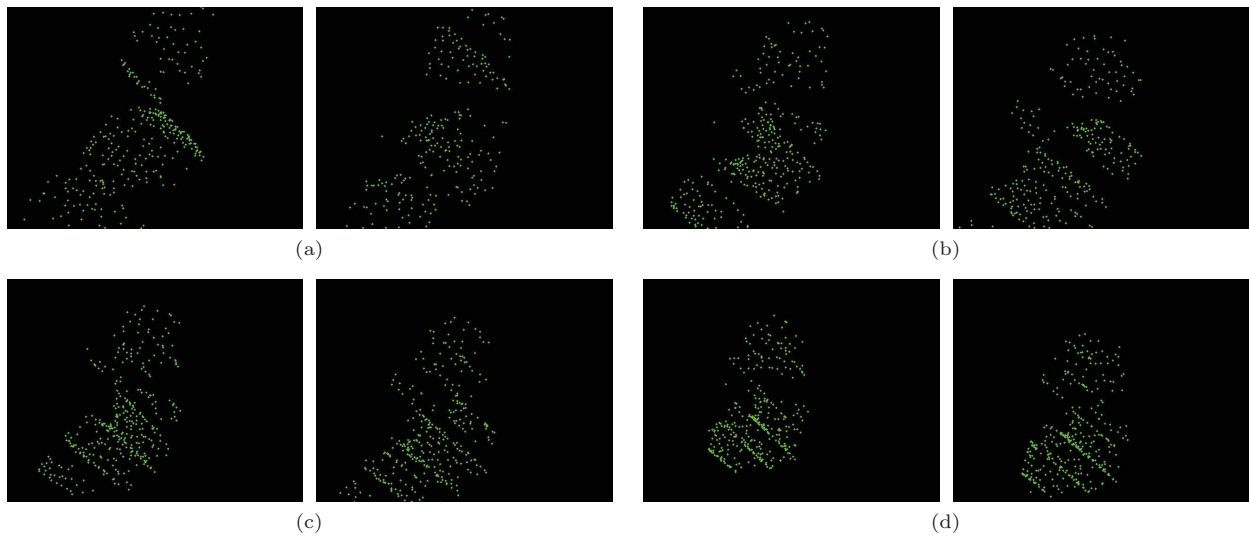


図 9 左右の画像面に投影された特徴点. (a) 水面までの距離が 100[mm] の場合. (b) 300[mm] の場合. (c) 500[mm] の場合. (d) 700[mm] の場合の場合.

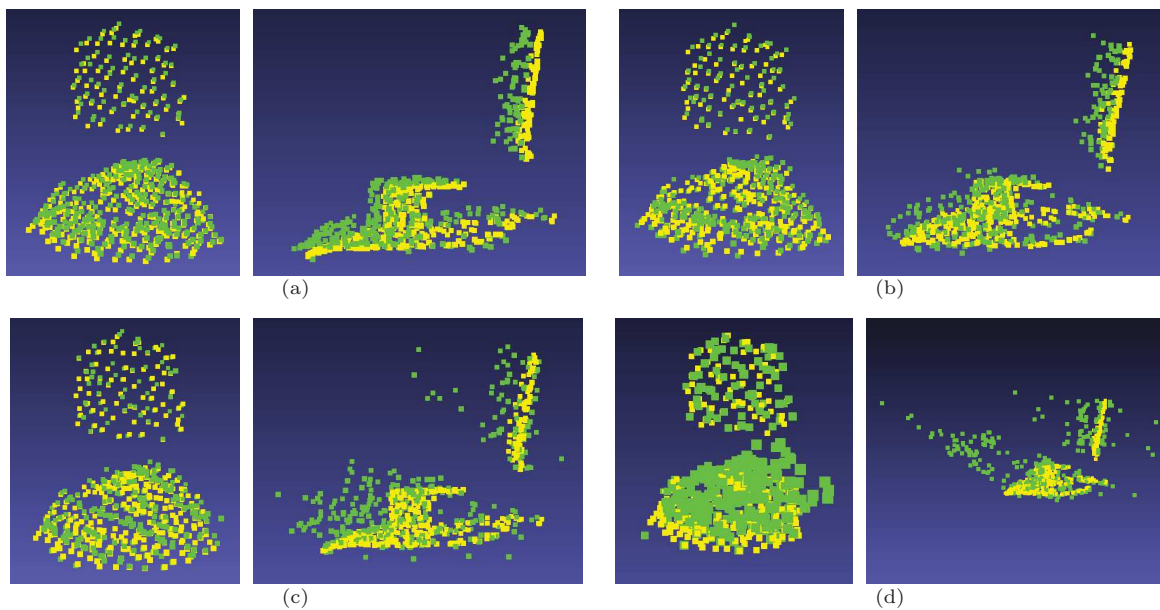


図 10 復元結果. 黄色い点は真値, 緑の点は復元結果. (a) 距離 100[mm] の場合. (b) 距離 300[mm] の場合. (c) 距離 500[mm] の場合. (d) 距離 700[mm] の場合.

表 2 相対誤差 [%]

距離 [mm]	平均	標準偏差
100	2.773	1.266
300	2.338	1.436
500	4.501	4.808
700	10.341	21.687

表 3 絶対誤差 [mm]

距離 [mm]	平均	標準偏差
100	29.276	13.724
300	24.505	15.035
500	47.631	51.600
700	104.573	214.040

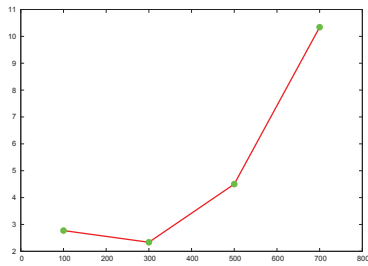


図 11 相対誤差.

表 4 実験条件

項目	値 or 仕様
RGB-D センサ	Xtion Pro Live
マーカー計測	距離画像から計測
対応点	目視
波	無と仮定
空気の屈折率	1.00
水の屈折率	1.33
カメラから水面までの距離	約 60[cm]
水深	約 25[cm]
解像度	640×480
復元点の数	280 点

表 5 内部パラメータと運動パラメータ

項目	値
センサ 1 の焦点距離 (f_u, f_v)	530.494, 530.375
センサ 2 の焦点距離 (f_u, f_v)	524.959, 524.217
センサ 1 の画像中心 (u_0, v_0)	(319.5, 239.5)
センサ 2 の画像中心 (u_0, v_0)	(319.5, 239.5)
センサ間の回転	$\begin{pmatrix} 0.871 & 0.317 & -0.377 \\ -0.346 & 0.938 & -0.009 \\ 0.351 & 0.138 & 0.926 \end{pmatrix}$
センサ間の並進	$(293.032, 33.111, -44.773)^T$

表 6 平均と標準偏差

	相対誤差 [%]	絶対誤差 [mm]
平均	0.839	7.537
標準偏差	0.486	4.324

転行列 R , 並進ベクトル t を表 5 に示す. 使用した画像を図 12(a) に, また用いた特徴点を図 12(b) に示す. また対応は目視で手動で求めた. 復元結果を図 13 に示す. ここで, 黄色い点が真値, 緑の点が水が入っている場合の復元結果を表している. また, 相対誤差及び絶対誤差を表 6 に示す. 見てわかる通り, 本実験では, 相対誤差で 1[%] 未満, 絶対誤差で 1[cm] 未満という結果が得られており, キャリブレーションや対応点取得などによる誤差を考えれば妥当な結果であると考えられる. しかし, シミュレーションのように, 波がある場合には誤差がより大きくなると考えられる. また水面ベクトルを求める際の計算においても格子点の細かさが精度に影響することから, より多くの実験を行って評価する必要があると考える.

5. おわりに

本研究では, 水上から撮影した 2 枚の画像から水面下環境の 3 次元復元を行う手法を提案した. 水面下の 3 次元復元を行う際には画像が水面での屈折などの影響を受けるため, 提案法では, 水面にマーカーを浮かべて RGB-D センサで水面情報を計測し, それを用いることで水面での屈折を考慮した 3 次元復元が行えることを示した. シミュレーション実験や実画像による実験で提案法が有効に機能することを示し, 実環境下での実験では, 相対誤差が 1[%] 未満, 絶対誤差が 1[cm] 未満という結果が得られた. しかし, 本稿で示した実験は, 限られた条件下での実験であることなどから, 更なる実験による検証が必要と考える.

今後の課題としては, まず, 実環境下での波がある場合の波の状態の計測方法を確立し, 波のある条件下での復元実験を行う必要がある. また, 波のモデルとして振幅や周期が一定の波を想定しているが, より複雑な波についてもモデル化も含めて対応することが必須となる. さらに, 提案手法の精度は対応付けや波の計測の精度にも依存するため, これらの高精度化についても検討する.

謝辞: 本研究の一部は, 日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 (C) (No. 24500202) および平成 26 年度物質・デバイス領域共同研究拠点における共同研究 (課題番号 2014385) の助成によった.

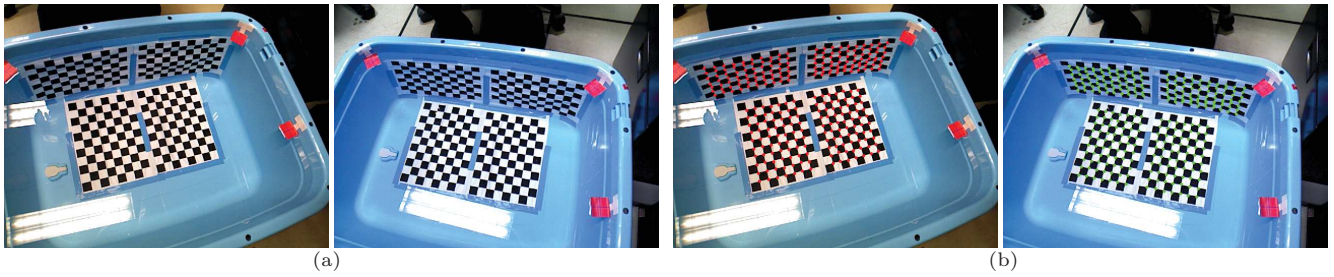


図 12 入力画像. (a) 原画像. (b) 特徴点.

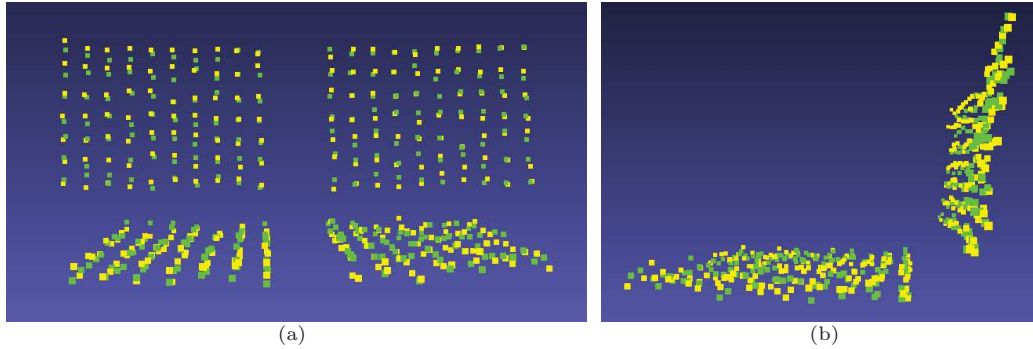


図 13 3次元復元結果. 黄色い点は水が入っていない場合(真値), 緑の点は水が入っている場合.

参考文献

- [1] 環境庁, “日本の干潟、藻場、サンゴ礁の現状 第1巻 干潟,” 1997.
- [2] 環境庁, “日本の干潟、藻場、サンゴ礁の現状 第2巻 藻場,” 1997.
- [3] 環境庁, “日本の干潟、藻場、サンゴ礁の現状 第3巻 サンゴ礁,” 1997.
- [4] 海と渚環境美化推進機構, “藻場・干潟環境保全調査報告書,” 2002.
- [5] 国立環境研究所, “ボート搭載型の中水カメラを用いた浅海底観測システムの開発,” <http://www.nies.go.jp/whatsnew/2014/20140206/20140206.html>.
- [6] 文部科学省, “海洋分野における研究開発,” http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/kaiyou/, January 2014.
- [7] B. Kamgar-Parsi, L.J. Rosenblum, and E.O. Belcher, “Underwater imaging with a moving acoustic lens,” IEEE Signal Processing Society, Vol.7, No.1, pp.91–99, June 1998.
- [8] 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透, 川田 善正, “円筒状透明容器における水中物体のレーザー光による3次元形状計測,” 第9回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.63–68, June 2003.
- [9] 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透, “レーザーレンジファインダを用いた水中物体の3次元形状計測,” 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.717, pp.1506–1513, May 2006.
- [10] 山下 淳, 樋口 裕和, 金子 透, “光切断法による水中物体の3次元計測,” 精密工学会誌, Vol.73, No.2, pp.265–269, Feb. 2007.
- [11] 河井 良平, 山下 淳, 金子 透, “空間コード化法を用いた水槽中物体の形状計測,” 第14回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.IN3-18-1-IN3-18-6, June 2008.
- [12] 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, Apr. 2013.
- [13] T. Yano, S. Nobuhara, and T. Matsuyama, “3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-View Synthe-

sis,” Information and Media Technologies, Vol.8, No.4, pp.1056–1060, Dec. 2013.