

長岡技術科学大学大学院
工学研究科修士論文

題 目

魚眼レンズによる水中撮影で
生じる屈折の補正

指導教員

准教授 杉田 泰則

著 者

工学専攻

電気電子情報工学分野
21318181 元矢 隆太

令和 7 年 2 月 7 日

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	基礎知識	3
2.1	防水ケースによる屈折	3
2.2	ドームポートの屈折光 [7]	4
2.3	厚いドームポートの屈折光 [7]	5
2.4	ドームポート内のカメラの位置推定 [7]	7
2.5	魚眼レンズのカメラモデル [14]	10
2.6	3 次元計測	12
2.7	移動量の推定 [11]	13
第 3 章	提案手法	15
3.1	屈折補正手順	15
3.2	ドームポート内のカメラの位置推定 (非中心モデル)	16
3.3	移動量の推定 (非中心モデル)	17
第 4 章	実験	19
4.1	実験条件	19
4.2	シミュレーション	21
4.2.1	ドームポート内のカメラの位置推定	22
4.2.2	移動量の推定	23
4.3	実機による撮影	24
4.3.1	ドームポート内のカメラの位置推定	26
4.4	移動量の推定	28

第 5 章	結論	31
5.1	まとめ	31
5.2	今後の展望	32
謝辞		33
参考文献		34

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

水中撮影は海底など水中の調査 [1] で使われている。また, 近年では水中での自動運転技術への応用に期待されている [2]。ここでカメラの撮影範囲を広げることでより効率的な撮影ができる。しかし, 一般的なカメラで撮影範囲を広げる場合複数のカメラが必要になりコストがかかる [3]。そこで視野角の広い魚眼レンズを 1 台だけ用いた水中撮影を行う。

水中撮影を行う場合, 一般的にはカメラを防水ケースの中に入れてカメラを保護する必要がある。そのため, 水中での撮影時にカメラで取得する光は水, 防水ケース, 空気の 3 つの媒質を通ることになり, 水→防水ケース, 防水ケース→空気で 2 回屈折が発生する。屈折により視野角の低下や画像の歪みが発生する。安価で一般的に普及している平らなガラスを使用したフラットポートは最大視野角が 96° に制限される [4]。近年では球状のガラスを使ったドームポートが注目されていて, 視野角の制限を軽減することができる。また, カメラの中心である焦点とドームポートの中心の位置が同じ場所にある時, 屈折面に対して光が垂直に入射するため屈折が発生しなくなる [5]。[6], [7] ではカメラの位置を推定し, 物理的にカメラの位置を調整することで屈折を抑制している。これ以外に, [8] では防水ケース内を空気よりも水に屈折率が近い液体で満たすことで屈折を抑制しているが画像の鮮明さが低下するなど課題がある。物理的な屈折抑制法は, カメラの理想モデルで焦点が一か所に定まるピンホールカメラに近い中心モデルである必要がある。しかし, 魚眼レンズは光が一か所ではなく一軸上に集まる非中心モデル [9] で, カメラ位置の調整では屈折が補正できないため上記の手法は使うことができない。よって, カメラの画像から得られる入射光から屈折光を計算して補正を行う必要がある。

屈折を正しく補正するためには対象点の 3 次元位置を取得する必要があり, カメラ

を 2 台用いた方法が一般的である [10]。また, 1 台のカメラを移動させながら二か所で撮影を行うモーションステレオ計測を用いることで 1 台のカメラでも 3 次元位置を取得することが可能になり低コストな装置を作成できるが, カメラの移動量が必要となり画像から推定を行う。[11] では防水ケースの形状, カメラのモデルに関わらずカメラの移動量を推定する汎用的な方法を提案している。しかし, 魚眼レンズの視野角が広く画像の分解能が大きいいため, 汎用的な手法では魚眼レンズに適用した時に画像座標の取得誤差などが影響して移動量の推定精度が低下し, 屈折の補正が上手くできない。

1.2 研究目的

本論文では, 1 台の魚眼レンズとドームポートを用いた水中撮影において, 近い距離を撮影する場合, カメラの非中心モデルや入射光を無視できないためこれらの影響を考慮した補正方法を提案し正確な屈折補正をすることを目的とする。

1.3 本論文の構成

第 1 章では研究の背景を及び目的を述べた。第 2 章では本論文で使用したドームポートの屈折モデルや, ドームポート内のカメラの位置推定法, 魚眼レンズのカメラモデル, モーションステレオ計測について述べる。第 3 章では魚眼レンズの非中心モデルを考慮したドームポート内のカメラの位置推定法, 及び移動量推定の提案手法を述べる。第 4 章ではシミュレーション, 実機の屈折補正精度の評価実験について述べる。最後に, 第 5 章では本論文のまとめ及び今後の展望について述べる。

第 2 章

基礎知識

2.1 防水ケースによる屈折

フラットポートとドームポートの屈折の様子を図 2.1 に示す。フラットポートは境界面が直線のため中心から 90° (視野角 180°) 以上の角度の光は水中に入射することができない。また, それ以下の角度の光も屈折により内側に曲がり水中での最大視野角は 96° となる。ドームポートは境界面が曲線のため半球のドームポートでカメラの中心がドームポートの中にある時, 中心から 90° の光も水中に入射することができる。また, 水中での屈折も内側に曲がるが境界面が曲線のため視野角の低下が抑制される。

フラットポートの屈折はカメラの角度に依存し, カメラの光軸と屈折面が垂直な時, 屈折による歪みは対称になる。この歪みをカメラのレンズの歪みとまとめて補正することである程度の精度で屈折を補正することができる [12]。しかし, ドームポートは屈折がカメラの位置に依存しており, 屈折による歪みは非対称になる。また, ドームポートの屈折は画像の外側ほど歪みが大きくなる [13]。

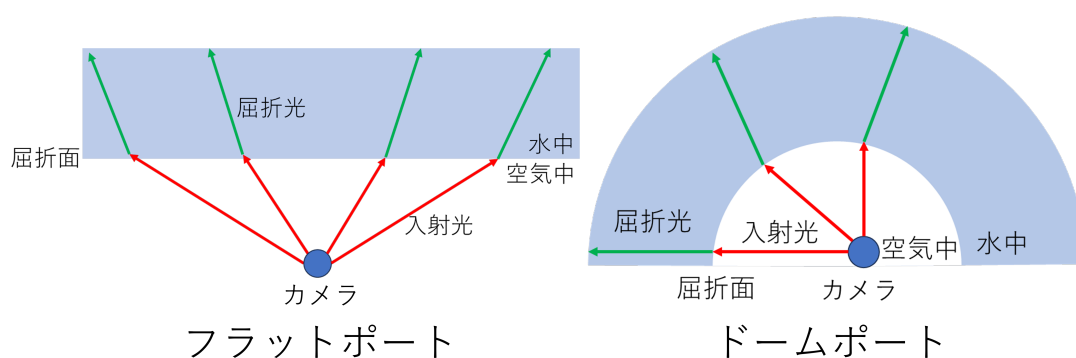


図 2.1 防水ケースによる屈折

2.2 ドームポートの屈折光 [7]

カメラはある物体から反射した光を受光して画像に投影する。逆にカメラからある物体まで進む光を考えた時に同じ経路を通るためこの論文ではカメラから出る光を入射光, 他の媒質に映って屈折した光を屈折光と呼ぶ。

表面が薄く, ドームポートの媒質による屈折を無視できるドームポート内のカメラから出る光のモデルを図 2.2 に示す。ドームポート内は空気で満たされており, ドームポートの中心 o を原点とする v の位置にあるカメラで水中の対象点 p を撮影した時, カメラから出る入射光の単位ベクトルを i_{in} とする。 i_{in} は大きさ k_{in} でドームポート内の空気中を進み, ドームポートの表面 m で屈折する。その後, 水中を進む屈折光の単位ベクトル i_{out} になり, 大きさ k_{out} で p まで進む。空気中で対象点を撮影した場合のカメラから出る光の単位ベクトルを i , 大きさを k とすると, i_{in}, i_{out} との関係は以下のようになる。

$$k\mathbf{i} = k_{in}\mathbf{i}_{in} + k_{out}\mathbf{i}_{out} \quad (2.1)$$

ここでドームポートの半径を R とすると, m は以下の式となる。

$$\mathbf{m} = \mathbf{v} + k_{in}\mathbf{i}_{in} (|\mathbf{m}| = R) \quad (2.2)$$

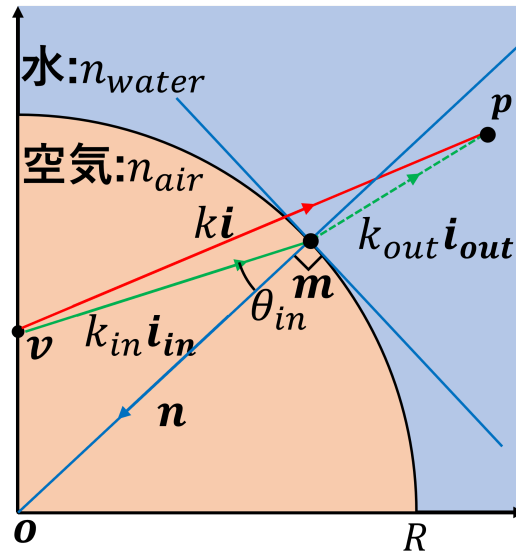


図 2.2 ドームポートの屈折モデル

式 (2.2) を満たす適切な k_{in} を求めることで \mathbf{m} も求めることができる。屈折面はドームポートの \mathbf{m} に対する接平面となり, \mathbf{m} から \mathbf{o} に向かう屈折面の法線ベクトルの単位ベクトル \mathbf{n} は以下の式となる。

$$\mathbf{n} = -\frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{m}|} \quad (2.3)$$

また, \mathbf{i}_{in} が \mathbf{m} で屈折する時の入射角 θ_{in} は以下の式となる。

$$\theta_{in} = \cos^{-1}(\mathbf{i}_{in} \cdot \mathbf{m}) \quad (2.4)$$

空気中の屈折率を n_{air} , 水中の屈折率を n_{water} とすると, 空気中から水中に移動するときの屈折率は以下の式となる。

$$r = \frac{n_{air}}{n_{water}} \quad (2.5)$$

これらから \mathbf{i}_{out} は以下の式で表される。

$$\mathbf{i}_{out} = r\mathbf{i}_{in} + \left(r \cos \theta_{in} - \sqrt{1 - r^2 \sin^2 \theta_{in}}\right) \mathbf{n} \quad (2.6)$$

2.3 厚いドームポートの屈折光 [7]

表面が厚く, ドームポートの媒質による屈折を無視できないドームポート内のカメラから出る光のモデルを図 2.3 に示す。薄いドームポートとの違いはドームポートの表面内のガラスで屈折がもう 1 回発生することである。

ドームポート内は空気で満たされており, ドームポートの中心 \mathbf{o} を原点とする \mathbf{v} の位置にあるカメラで水中の対象点 \mathbf{p} を撮影した時, カメラから出る入射光の単位ベクトルを \mathbf{i}_{in} とする。 \mathbf{i}_{in} は大きさ k_{in} でドームポート内の空気中を進み, ドームポートの表面と空気中の境界点 \mathbf{m}' で屈折する。ドームポート表面のガラスを進む屈折光の単位ベクトル \mathbf{i}'_{out} になり, 大きさ k'_{out} でドームポート表面と水中の境界点 \mathbf{m} まで進む。水中を進む屈折光の単位ベクトル \mathbf{i}_{out} になり, 大きさ k_{out} で \mathbf{p} まで進む。空気中で対象点を撮影した場合のカメラから出る光の単位ベクトルを \mathbf{i} , 大きさを k とすると, $\mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}'_{out}, \mathbf{i}_{out}$ との関係は以下のようになる。

$$k\mathbf{i} = k_{in}\mathbf{i}_{in} + k'_{out}\mathbf{i}'_{out} + k_{out}\mathbf{i}_{out} \quad (2.7)$$

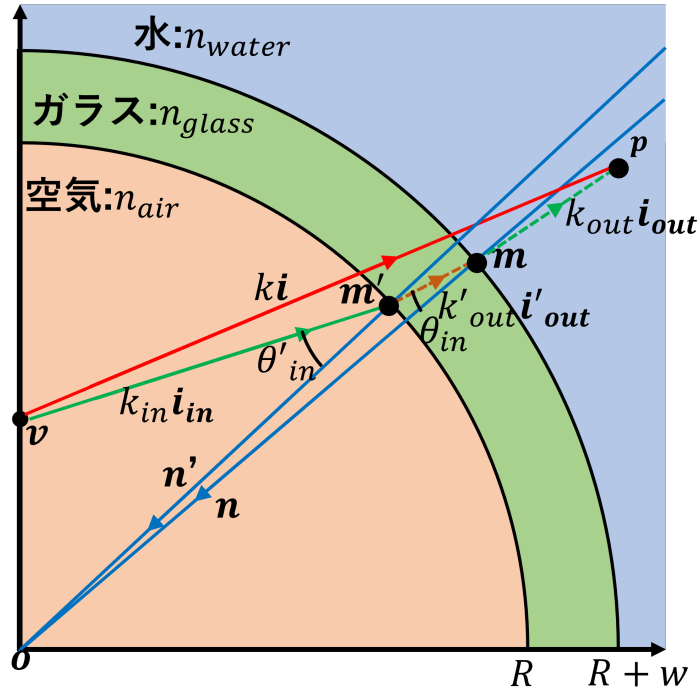


図 2.3 厚いドームポートの屈折モデル

ここでドームポートの半径を R , ガラスの厚みを w とすると, \mathbf{m} は以下の式となる。

$$\mathbf{m}' = \mathbf{v} + k_{in} \mathbf{i}_{in} (|\mathbf{m}'| = R) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{m}' + k'_{out} \mathbf{i}'_{out} (|\mathbf{m}| = R + w) \quad (2.9)$$

式 (3.2), 式 (3.3) を満たす適切な k_{in}, k'_{out} を求めることで \mathbf{m}', \mathbf{m} を求めることができる。屈折面はドームポートの \mathbf{m} に対する接平面となり, \mathbf{m}', \mathbf{m} から \mathbf{o} に向かう屈折面の法線ベクトルの単位ベクトル \mathbf{n}', \mathbf{n} は以下の式となる。

$$\mathbf{n}' = -\frac{\mathbf{m}'}{|\mathbf{m}'|} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{n} = -\frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{m}|} \quad (2.11)$$

また, $\mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}'_{out}$ が \mathbf{m}', \mathbf{m} にそれぞれ屈折する時の入射角 $\theta'_{in}, \theta_{in}$ は以下の式となる。

$$\theta'_{in} = \cos^{-1}(\mathbf{i}_{in} \cdot \mathbf{m}') \quad (2.12)$$

$$\theta_{in} = \cos^{-1}(\mathbf{i}_{in} \cdot \mathbf{m}) \quad (2.13)$$

空気中の屈折率を n_{air} , ガラスの屈折率を n_{glass} , 水中の屈折率を n_{water} とすると, 空気中からガラスに移動するときの屈折率 r' , ガラスから水中に移動するときの屈折率 r は以下の式となる。

$$r' = \frac{n_{air}}{n_{glass}} \quad (2.14)$$

$$r = \frac{n_{glass}}{n_{water}} \quad (2.15)$$

これらから i'_{out}, i_{out} は以下の式で表される。

$$i'_{out} = r' i_{in} + \left(r' \cos \theta'_{in} - \sqrt{1 - r'^2 \sin^2 \theta'_{in}} \right) n' \quad (2.16)$$

$$i_{out} = r i'_{out} + \left(r \cos \theta_{in} - \sqrt{1 - r^2 \sin^2 \theta_{in}} \right) n \quad (2.17)$$

水中で撮影した画像の屈折による歪みを補正したい場合, 画像座標から変換した i_{in} から i を求めて, i を画像座標に変換することで補正することができる。対象点が十分に遠く $k_{in}, k'_{out} \ll k_{out}$ になる場合, 屈折光が支配的になるため入射光を無視することができる。そのため $i = i_{out}$ となり i_{in} から i_{out} を求めるだけで補正することができる。しかし, 対象点が近い場合は i_{in} から $i'_{out}, i_{out}, k_{in}, k'_{out}, k_{out}$ を求める必要がある。ここで, 求められていない k_{out} は p に依存し 1 枚の画像情報からは取得できないため, カメラから p までの距離を測定する必要がある。

2.4 ドームポート内のカメラの位置推定 [7]

一般的なカメラの場合, 中心モデルに近似することができ, カメラの中心がドームポートの中心と一致する場合, 屈折を抑制することができる。よって位置合わせによって屈折の抑制が可能となる。しかし, カメラの中心もドームポートの中心も測定することが困難である。そこでチェッカーボードを撮影してチェッカーボードの各頂点座標から, ドームポートの中心を原点としたカメラの位置 v の推定を行う。[6] では空気中と水中の画像を組み合わせた推定を行っており, [7] では水中の画像のみを使用して推定を行っている。空気中と水中の画像を使用すると水槽内のチェッカーボードとカメラの位置を固定したまま水を入れたり抜いたりする必要があり手間がかかる。そのため, 本論文では水中画像のみを使用した推定を行う。

撮影によるチェッカーボードの変化を図 2.4 に示す。左の画像が元のチェッカーボードである。中央の画像はカメラからの相対位置 t と回転角 R を合わせた姿勢 $P = (t, R)$ の状態のチェッカーボードを屈折が発生しない空気中で撮影した画像であ

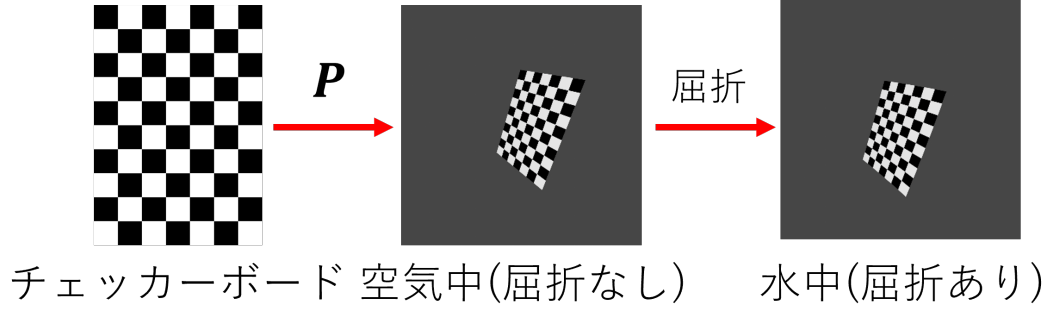


図 2.4 撮影画像

る。さらにドームポートを使用した水中撮影を行って屈折の影響がある時の画像が右の画像となる。

チェッカーボードの画像を図 2.5 に示す。画像の中心を原点とした時の N 個の各頂点の座標を $(p_{x_0}, p_{y_0}), (p_{x_1}, p_{y_1}), \dots, (p_{x_n}, p_{y_n}), \dots, (p_{x_N}, p_{y_N})$ とする。水中での撮影画像を図 2.6 に示す。チェッカーボードをカメラから $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ 離れた位置に設置して、回転行列 $R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_J$ で回転した状態の時にそれぞれを水中で撮影した J 枚の画像である。

t_j, R_j は以下の式となる。

$$t_j = \begin{bmatrix} t_1^{(j)} \\ t_2^{(j)} \\ t_3^{(j)} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$R_j = \begin{bmatrix} r_{11}^{(j)} & r_{12}^{(j)} & r_{13}^{(j)} \\ r_{21}^{(j)} & r_{22}^{(j)} & r_{23}^{(j)} \\ r_{31}^{(j)} & r_{32}^{(j)} & r_{33}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

t_j, R_j の状態のチェッカーボードを撮影した j 枚目の画像の内、 n 個目の頂点 (p_{x_n}, p_{y_n}) のカメラからの 3 次元座標 $p_{n,j} = (x_{p_{n,j}}, y_{p_{n,j}}, z_{p_{n,j}})$ は以下の式となる。

$$p_{n,j} = R_j \begin{bmatrix} p_{x_n} \\ p_{y_n} \\ 0 \end{bmatrix} + t_j \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} p_{x_n} \\ p_{y_n} \\ 0 \end{bmatrix} = R_j^{-1}(p_{n,j} - t_j) \quad (2.21)$$

水中で撮影した画像から得られたチェッカーボードの頂点の画像座標 $(x_{n,j}, y_{n,j})$ と v から式 (2.6) より屈折光を求めることができる。次に、 $p_{n,j}$ の z 成分である

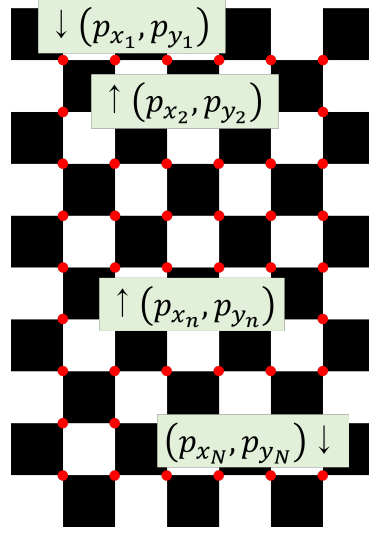


図 2.5 チェッカーボード

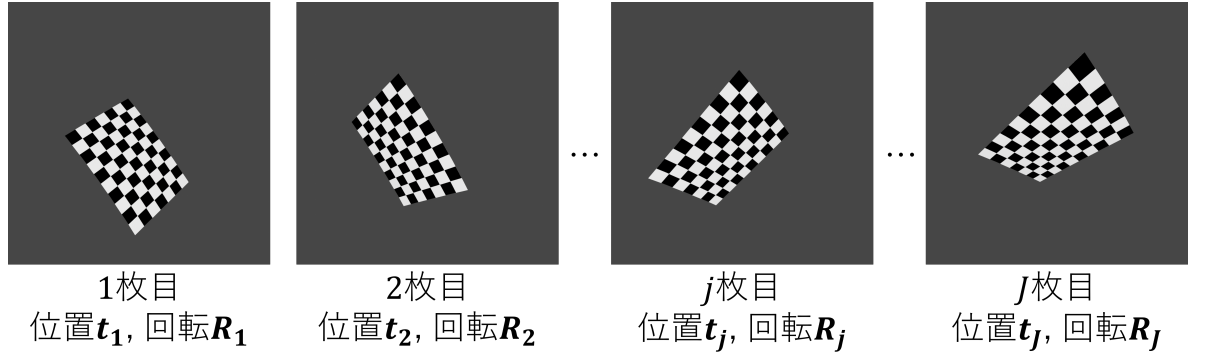


図 2.6 水中撮影画像

$z_{p_{n,j}}$ を使うことで \mathbf{v} から求めたチェッカーボードの n 個目の頂点の 3 次元座標 $\mathbf{p}'_{n,j}$ を求めることができる。その後、式 (2.21) を使用することで、任意の \mathbf{v}, \mathbf{P}_j から図 2.5 上での n 個目の頂点 (p'_{x_n}, p'_{y_n}) が求まる。 (p'_{x_n}, p'_{y_n}) を求める関数を $X_{j,n}((x_{n,j}, y_{n,j}), \mathbf{v}, \mathbf{P}_j) = (p'_{x_n}, p'_{y_n})$ とする。

この (p'_{x_n}, p'_{y_n}) と (p_{x_n}, p_{y_n}) の二乗誤差を計算する次式を最小化することで $\Theta = (\mathbf{v}, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_j, \dots, \mathbf{P}_J)$ を推定することができる。

$$E(\Theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \left\| \begin{bmatrix} p_{x_n} \\ p_{y_n} \\ 0 \end{bmatrix} - X_{j,n}((x_{n,j}, y_{n,j}), \mathbf{v}, \mathbf{P}_j) \right\|^2 \quad (2.22)$$

中心モデルに近似できない場合、カメラの位置合わせだけで屈折を抑制することはできないためチェッカーボード以外の撮影においても対象点の 3 次元点を取得する必要

がある。また, 上記の手法は中心モデルの手法で非中心モデルの魚眼レンズにそのまま適用することはできない。

2.5 魚眼レンズのカメラモデル [14]

理想的なカメラモデルはカメラから出る入射光は全てカメラの中心から出る中心モデルである。一般的なカメラは理想的なカメラモデルに近似することができ中心モデルとすることができる。しかし, 魚眼レンズは入射角の角度に応じて光の出る位置がカメラの中心から奥行方向にずれる。[14] で使用したカメラは中心から 90° の入射角 (視野角 180°) の時, カメラの中心から 10[mm] ずれていた。また, [15] で使用したカメラは 1° あたりの分解能が 35[px] のため 1.6[m] より近い物体の検出精度が著しく悪くなる。

魚眼レンズの非中心モデルを図 2.7 に示す。対象点 $\mathbf{p} = (x_p, y_p, z_p)$ を撮影した時, 撮影画像は図 2.8 に示すようにカメラの中心 \mathbf{o} を原点とする (x, y) の位置に投影される。この時の \mathbf{o} から (x, y) までの距離を ρ とするとカメラから \mathbf{p} に向かう光は以下の式となる。

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g(\rho) \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} x \\ y \\ f(\rho) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$f(\rho) = \sum_{k=0}^K f_{2k} \rho^{2k} \quad (2.24)$$

$$g(\rho) = \sum_{m=1}^M g_{2m} \rho^{2m} \quad (2.25)$$

$(0, 0, g(\rho))$ は光の開始地点, $(x, y, f(\rho))$ は光の単位ベクトル, d は光のベクトルの大きさである。 $\rho = 0 (x, y = 0)$ の時, 光の開始地点はカメラの中心で, 非中心モデルによるずれは発生しないため $g(0) = 0$ となり, ρ^0 の成分が存在しない。逆に光の単位ベクトルは光が奥行方向に進むため $f(0) = f_0$ となり ρ^0 の成分を持つ。

$f(\rho), g(\rho)$ は [16] のモデルにある線形成分などの奇数成分を含まず, 偶数成分だけで構成されている。また, [17] の手法と異なりカメラの入射角ではなく画像の座標に依存したモデルである。 $f(\rho), g(\rho)$ の各係数 f_{2k}, g_{2m} はカメラで撮影した画像から推定する必要がある。図 2.5 のチェッカーボードを撮影してチェッカーボードの各頂点座標から推定を行う。画像の中心を原点とした時の N 個の各頂点の座標を $(p_{x_0}, p_{y_0}), (p_{x_1}, p_{y_1}), \dots, (p_{x_n}, p_{y_n}), \dots, (p_{x_N}, p_{y_N})$ とする。撮影画像を図 2.9 に示す。チェッカーボードをカメラから $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ 離れた位置に設置して, 回転行列

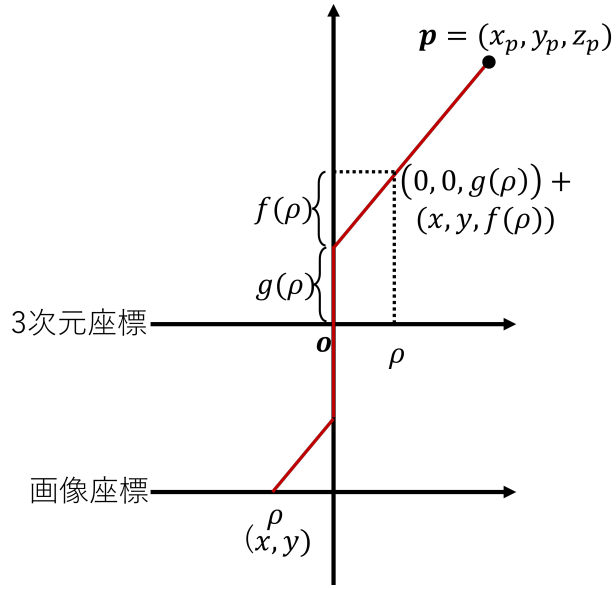


図 2.7 魚眼レンズの非中心モデル

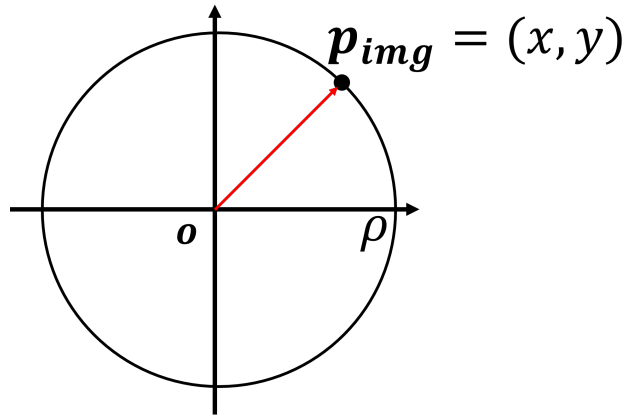


図 2.8 魚眼レンズの撮影画像

label 1

$R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_J$ で回転した状態の時にそれぞれ撮影した J 枚の画像である。

t_j, R_j は式 (2.18), 式 (2.19) となる。

t_j, R_j の状態のチェッカーボードを撮影した j 枚目の画像の内, n 個目の頂点 (p_{x_n}, p_{y_n}) に注目した時の式 (2.23) は以下の式となる。

$$R_j \begin{bmatrix} p_{x_n} \\ p_{y_n} \\ 0 \end{bmatrix} + t_j = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g(\rho_{n,j}) \end{bmatrix} + d_{n,j} \begin{bmatrix} x_{n,j} \\ y_{n,j} \\ f(\rho_{n,j}) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

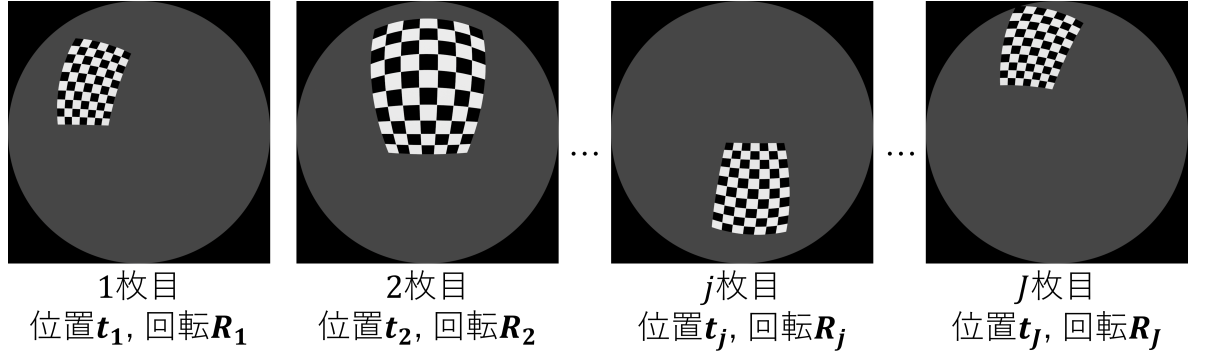


図 2.9 魚眼レンズの撮影画像

f_{2k}, g_{2k} を推定するために, $\mathbf{t}_j, \mathbf{R}_j, d_{n,j}$ も一緒に推定する必要がある。上式は以下の条件が成り立つ。

$$\left(\mathbf{R}_j \begin{bmatrix} p_{x_n} \\ p_{y_n} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{t}_j - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g(\rho_{n,j}) \end{bmatrix} \right) \times d_{n,j} \begin{bmatrix} x_{n,j} \\ y_{n,j} \\ f(\rho_{n,j}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.27)$$

この内, z 成分は以下の式となる。

$$\left(r_{11}^{(j)} p_{x_n} + r_{12}^{(j)} p_{y_n} + t_1^{(j)} \right) y_{n,j} - \left(r_{21}^{(j)} p_{x_n} + r_{22}^{(j)} p_{y_n} + t_2^{(j)} \right) x_{n,j} = 0 \quad (2.28)$$

上式を最適化することで $r_{11}^{(j)}, r_{12}^{(j)}, r_{21}^{(j)}, r_{22}^{(j)}, t_1^{(j)}, t_2^{(j)}$ を推定できる。しかし, このまま最適化すると $r_{11}^{(j)}, r_{12}^{(j)}, r_{21}^{(j)}, r_{22}^{(j)}, t_1^{(j)}, t_2^{(j)} = 0$ で最適化されてしまうため, $r_{11}^{(j)}, r_{12}^{(j)}, r_{21}^{(j)}, r_{22}^{(j)}$ を独立して最適化せずに, $|\mathbf{R}_j| = 1$ を満たすような最適化を行う。次に, 式 (2.26) の x, y 成分の式から $d_{n,j}$ を求める。この時, $d_{n,j} > 0$ を満たすように $r_{11}^{(j)}, r_{12}^{(j)}, r_{21}^{(j)}, r_{22}^{(j)}$ の符号を決定する。その後, 式 (2.26) の z 成分である次式を最適化することで $f_{2k}, g_{2k}, t_3^{(j)}$ を推定する。また, \mathbf{R}_j は $r_{11}^{(j)}, r_{12}^{(j)}, r_{21}^{(j)}, r_{22}^{(j)}$ から求める $f_0 > 0$ となるように $r_{13}^{(j)}, r_{23}^{(j)}, r_{31}^{(j)}, r_{32}^{(j)}, r_{33}^{(j)}$ の符号を決定する。

$$\sum_{m=1}^M g_{2m} \rho_{n,j}^{2m} + d_{n,j} \sum_{k=0}^K f_{2k} \rho_{n,j}^{2k} - t_3^{(j)} = r_{31}^{(j)} p_{x_n} + r_{32}^{(j)} p_{y_n} \quad (2.29)$$

2.6 3次元計測

正確な屈折補正を行うために対象点の3次元位置を取得する必要がある。[10]では, 図 2.10 に示す屈折光を用いたステレオカメラによる3次元計測法を提案している。各

カメラで対象点を撮影して、カメラ 1, 2 の屈折点 m_{w1}, m_{w2} から屈折光 i_{w1}, i_{w2} が出る
とき、各屈折光上の 3 次元位置 p_{w1}, p_{w2} の距離 L が最小になる p_{w1}, p_{w2} を求めてそ
の中点を対象点の 3 次元位置とする。2.3 節の k_{out} の大きさが求められるため i が得
られる。その後、 i に対応する画像座標を計算することで屈折を補正することができる。

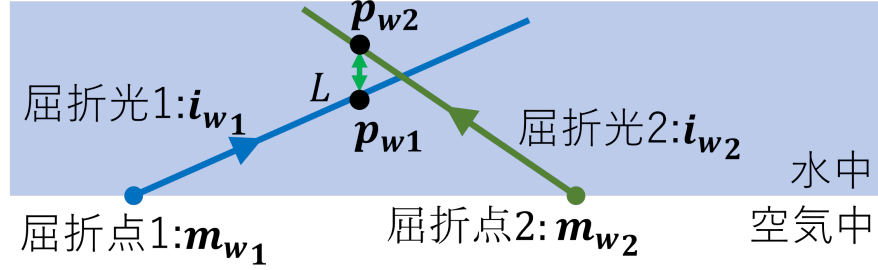


図 2.10 屈折光の 3 次元計測

2.7 移動量の推定 [11]

今回はカメラの台数を少なくすることで低コストで広範囲な水中撮影を行いたい。
そのため、ステレオカメラではなく 1 台のカメラだけを使用する。そこでカメラを動
かして 2 箇所での撮影を行うことで疑似的にステレオカメラの撮影を行うモーションス
テレオ計測を使用する [18]。カメラ間距離は撮影を行う間の移動量になり、撮影と同
時に取得する必要がある。

カメラの移動量は変位 t_c と回転行列 R_c で表され、最初の地点で撮影した画像を画
像 1、 t_c, R_c の地点で撮影した画像を画像 2 とする。画像 1 のドームポートの中心を原
点とした時の屈折点 m_{w1}, m_{w2} は、式 (2.2) より求めた各ドームポートを原点とした
屈折点 m_1, m_2 から以下の式で表される。

$$m_{w1} = m_1 \quad (2.30)$$

$$m_{w2} = R_c m_2 + t_c \quad (2.31)$$

また、屈折光 i_1, i_2 は式 (2.6) より求めた各ドームポートを原点とした屈折光
 i_{out1}, i_{out2} から以下の式で表される。

$$i_1 = i_{out1} \quad (2.32)$$

$$i_2 = R_c i_{out2} \quad (2.33)$$

1 枚の画像のから取得した n 番目の対象点に対して図 2.10 の L を最小化する $\boldsymbol{p}_{w1}, \boldsymbol{p}_{w2}$ が存在する $\boldsymbol{t}_c, \boldsymbol{R}_c$ を以下の式となる。この式を全ての対象点に対して二乗誤差の総和が小さくなるように最適化することで $\boldsymbol{t}_c, \boldsymbol{R}_c$ を推定する。屈折点と屈折光だけで推定でき、カメラモデルや屈折モデルに関わらず推定ができる汎用的な手法である。

$$\boldsymbol{i}_{1_n}^T (\boldsymbol{m}_{w2_m} \times \boldsymbol{i}_{2_m}) + (\boldsymbol{m}_{w1_m} \times \boldsymbol{i}_{1_m})^T \boldsymbol{i}_{2_m} = 0 \quad (2.34)$$

第 3 章

提案手法

3.1 屈折補正手順

図 3.1 に屈折補正手順を示す。屈折を補正する上で事前に必要な値として屈折率やドームポートのサイズなどがあり, この中で測定が困難な 2.5 節カメラモデルの推定を行う。次にドームポート内のカメラの位置推定を行う。その後カメラを 2 地点で撮影し, その時のカメラの移動量を推定する。推定移動量と 2 地点の撮影画像から対象点の 3 次元位置を取得し屈折光の大きさを計算することで対象点の屈折を補正する。

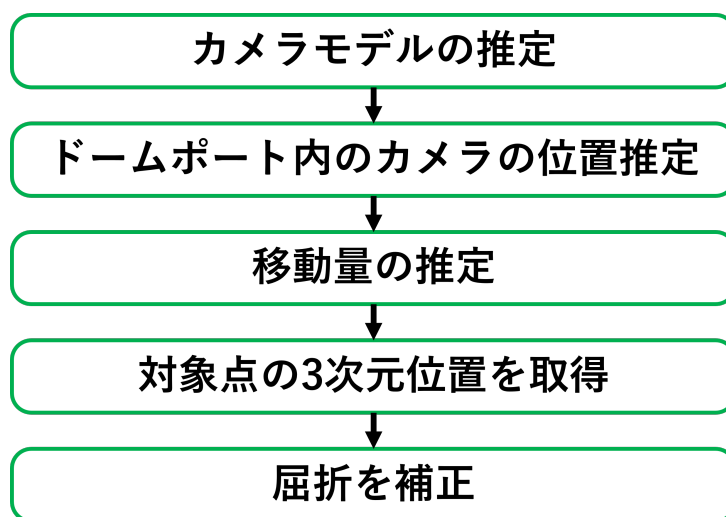


図 3.1 屈折補正手順

3.2 ドームポート内のカメラの位置推定 (非中心モデル)

2.3 節, 2.4 節は中心モデルに近似できるカメラに対する手法である。しかし, 魚眼レンズは非中心モデルであるため 2.5 節を組み合わせた魚眼レンズ用のドームポートの屈折モデルとドームポート内のカメラの位置推定法を提案する。

表面が厚く, ドームポートの媒質による屈折を無視できないドームポート内の非中心モデルの魚眼レンズから出る光のモデルを図 3.3 に示す。

ドームポート内は空気で満たされており, ドームポートの中心 \mathbf{o} を原点とする \mathbf{v} の位置にあるカメラで水中の対象点 \mathbf{p} を撮影した時, 画像座標の (x, y) に投影される。カメラの中心 \mathbf{o} から (x, y) までの距離を ρ とすると, 式 2.25 よりカメラから出る入射光の開始地点は $\mathbf{v} + (0, 0, g(\rho))$ となる。カメラから出る入射光の単位ベクトルを \mathbf{i}_{in} とする。 \mathbf{i}_{in} は大きさ k_{in} でドームポート内の空気中を進み, ドームポートの表面と空気中の境界点 \mathbf{m}' で屈折する。ドームポート表面のガラスを進む屈折光の単位ベクトル \mathbf{i}'_{out} になり, 大きさ k'_{out} でドームポート表面と水中の境界点 \mathbf{m} まで進む。水中を進む屈折光の単位ベクトル \mathbf{i}_{out} になり, 大きさ k_{out} で \mathbf{p} まで進む。空気中で対象点を撮影した時, 画像座標の (x', y') に投影される。カメラの中心 \mathbf{o} から (x', y') までの距離を ρ' とすると, 式 2.25 よりカメラから出る光の開始地点は $\mathbf{v} + (0, 0, g(\rho'))$ となる。カメラから出る光の単位ベクトルを \mathbf{i} , 大きさを k とすると, $\mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}'_{out}, \mathbf{i}_{out}$ との関係は以下ようになる。

$$\mathbf{v} + (0, 0, g(\rho')) + k\mathbf{i} = \mathbf{v} + (0, 0, g(\rho)) + k_{in}\mathbf{i}_{in} + k'_{out}\mathbf{i}'_{out} + k_{out}\mathbf{i}_{out} \quad (3.1)$$

ここでドームポートの半径を R , ガラスの厚みを w とすると, \mathbf{m} は以下の式となる。

$$\mathbf{m}' = \mathbf{v} + (0, 0, g(\rho)) + k_{in}\mathbf{i}_{in} (|\mathbf{m}'| = R) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{m}' + k'_{out}\mathbf{i}'_{out} (|\mathbf{m}| = R + w) \quad (3.3)$$

これ以降の \mathbf{i}_{out} までの計算は 2.3 節と同様である。

上記の方法で \mathbf{i}_{out} が求まるため 2.4 節を用いてドームポート内の魚眼レンズの位置推定が可能となる。

位置推定の最適化をするための初期値として以下の値を設定した。 $\mathbf{v} = [0, 0, 0]$, チェッカーボードの姿勢 \mathbf{P}_j は取得した対象点の座標から中心モデルの魚眼レンズの歪み係数を計算する際に取得できるチェッカーボードの姿勢を使用した。

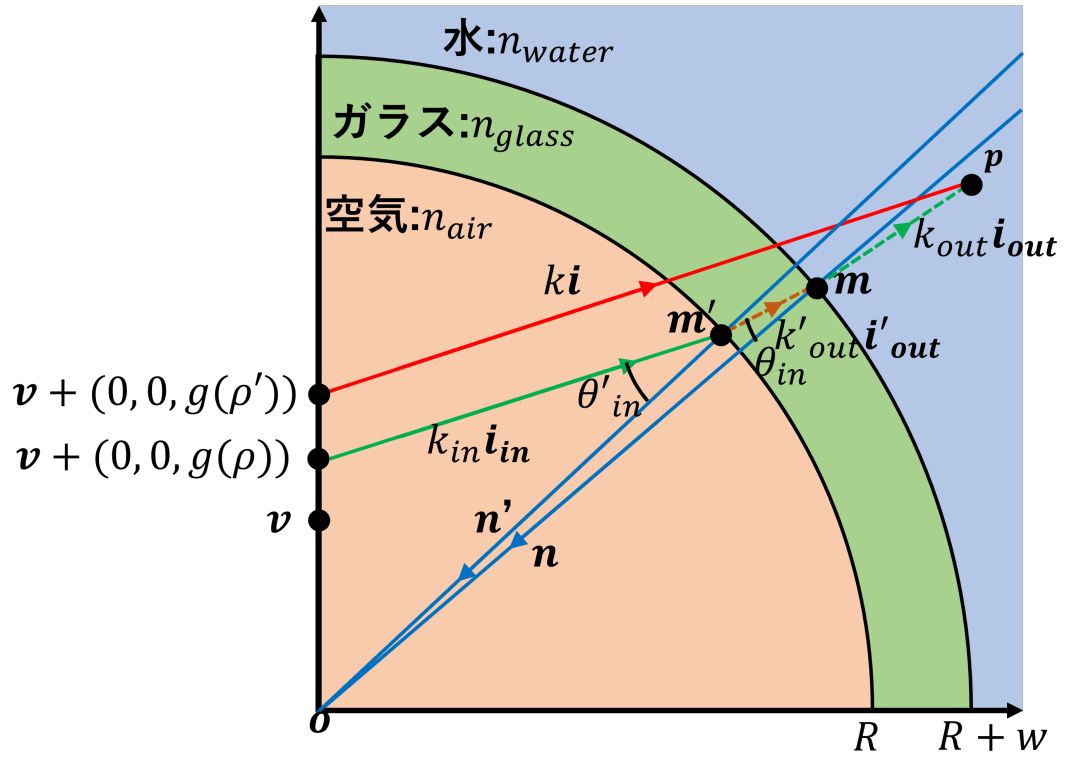


図 3.2 魚眼レンズのドームポートの屈折モデル

3.3 移動量の推定 (非中心モデル)

2.7 節の移動量の推定方法では評価関数が 3 次元での評価となってしまふ。特に魚眼レンズは視野角が広く対象点を取得する際の画像座標の誤差や推定した値の誤差による 3 次元座標上の誤差が大きくなり移動量の推定精度が低下する。そこでを用いた再投影法で移動量推定の評価関数を画像座標にすることでの画像座標の誤差や推定した値の誤差による移動量の推定精度の低下を抑制する方法を提案する。

カメラの移動量は変位 t_c と回転行列 R_c で表され、最初の地点で撮影した画像を画像 1, t_c, R_c の地点で撮影した画像を画像 2 とする。 t_c, R_c から 2.6 節を用いて 2 つの屈折光の距離 L を最小になる各屈折光上の 3 次元座標 p_{w1}, p_{w2} を求める。

次に画像 2 の画像上で p_{w1} を撮影した時の画像座標を求める。再投影の方法は再投影時の画像座標 (x'_1, y'_1) が 3.3 節で屈折光を求めたときに、屈折光の延長線上と p_{w1} の距離を最小化することで求めることができる。

撮影画像の対象点の移動はカメラの移動に対して逆方向になるため、初期値の推定にはカメラ 2 の各対象点の屈折点をカメラ 1 の各対象点の屈折点に変換する誤差が最小となる T と R を求めて使用した [19]。推定前で対象点の 3 次元座標は未知のため正

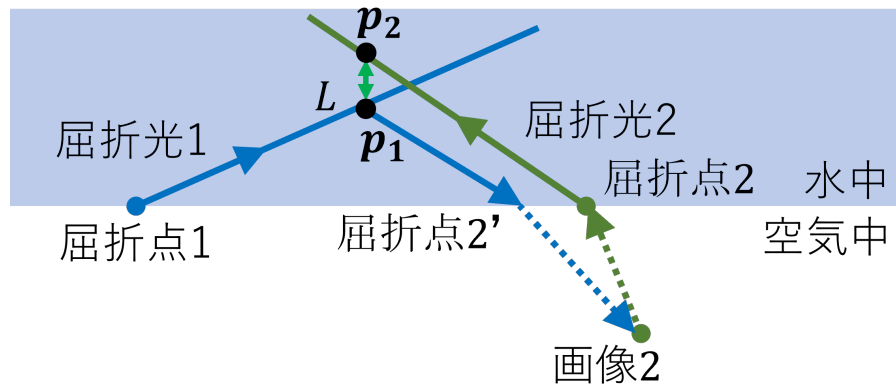


図 3.3 再投影による移動量の推定

しい移動量は推定することはできないがカメラの移動量に対する大体の方向は得ることが可能である。

この手法は 2.7 節と比較すると再投影と移動量の両方を反復的に解く必要があり、計算コストが高くなってしまう。そのため画像 1 と画像 2 で特徴点を抽出することで両方に存在する対象点を発見して移動量の推定に使用するが、信頼度が高い上位数個を使うことで計算量を減らす必要がある。また、リアルタイム処理には不向きのため画像を撮影して後で解析する場合に有効な手法となる。そのため、移動量を取得して水中でのカメラの自己位置推定をする方法への応用は難しいと考えられる。

第 4 章

実験

4.1 実験条件

今回はシミュレーションと実機でそれぞれ撮影を行い, 各パラメータを推定した。カメラは Kodak PIXPRO SP360 4K [20] を使用した。性能は以下に示す。

- 解像度: 1440×1440
- 視野角: 235°

2.5 を使用して推定した歪み係数 f_{2k} , 非中心モデル係数 g_{2m} を以下に示す。

- $f_{2k} = (0.185422644, -0.256368936, -9.122467033, 14.80434862)$
- $g_{2m} = (58.74726371, -1458.883047, 15643.5299, -43419.6252)$

各係数は魚眼レンズの中心からの距離を解像度で割った値を ρ とした時の係数である。また, 各係数から計算した魚眼レンズの特性を図 4.1, 図 4.2 に示す。図 4.1 は魚眼レンズの画像の中心からの距離と奥行方向の角度 θ の関係を表したものである。最大半径が約 720[px] の時に θ が視野角の半分である 120° 程度にあるため仕様通りであることが確認できる。図 4.2 は魚眼レンズの画像の中心からの距離と魚眼レンズの非中心モデル $g(\rho)$ の関係を表したものである。600[px] までは単調に増かしているがその後急激に減少している。これはチェッカーボードを用いた推定を行った際にカメラの端の部分で頂点が上手く検出できず係数の推定の際に考慮できなかったためである。

その他の条件は以下に記載する。屈折率は一般的な屈折率を使用した。

- 空気の屈折: 1.0000
- 水の屈折率: 1.3333
- ガラスの屈折率: 1.4000
- 防水ケース: Dual Camera Waterproof Housing for SP360 4K(半径: 22[mm], 厚さ

3[mm])

- チェッカーボード: 7 × 10 マス, 1 マスの 1 辺の長さ 9[mm]

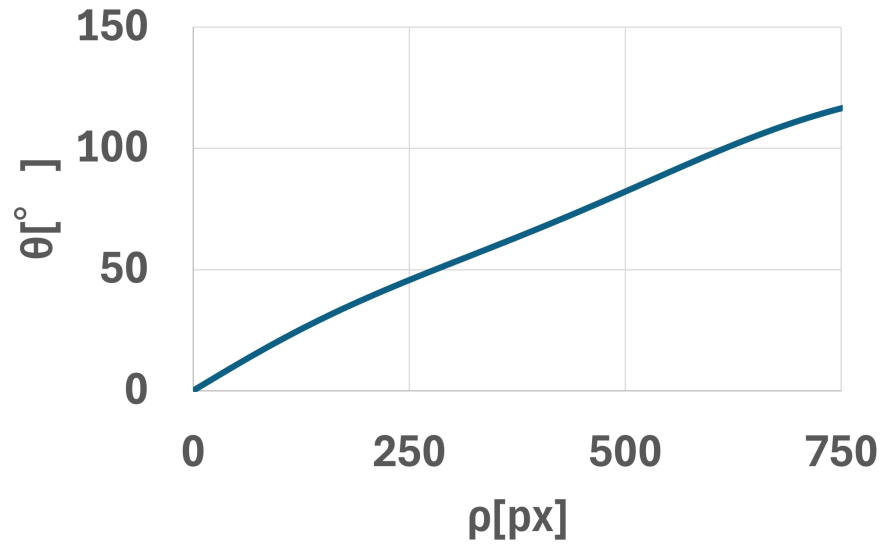


図 4.1 使用したカメラの歪み

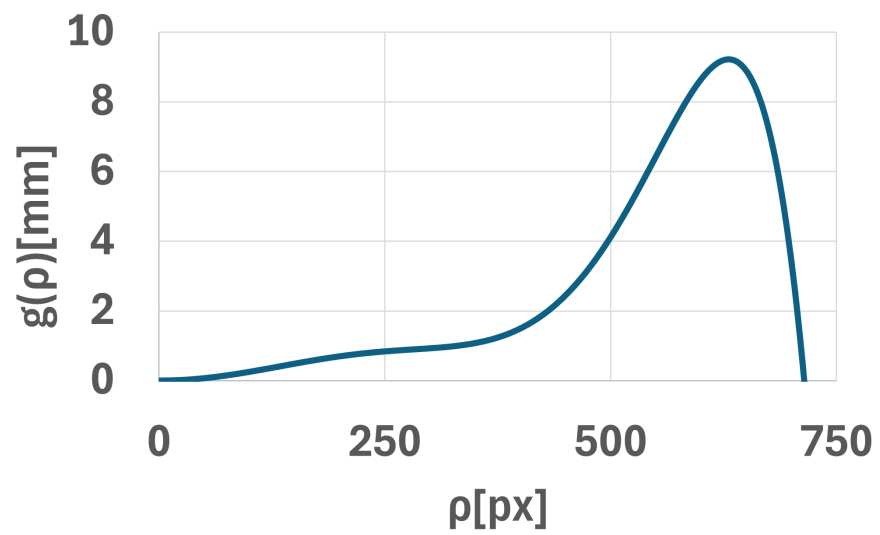


図 4.2 使用したカメラの非中心モデル

4.2 シミュレーション

カメラモデル, 屈折率, ドームポートは上記の値を使用した。ドームポート内のカメラは (0.0, 0.0, 10.0)[mm] に設置した。

今回使用したカメラとドームポートを用いた水中撮影によるカメラと対象点の距離による屈折の影響を調べた。撮影はシミュレーションを用いた。対象点の配置条件を以下に示す。

- 撮影枚数: 各 r で 101 枚ずつ
- 対象点: カメラから半径 r の球の表面上, 奥行方向の角度 $0^\circ \sim 60^\circ$
- r : 25~170[mm] の範囲で 5[mm] 間隔

結果を図 4.3 に示す。入射光は水中で撮影を行った時と空気中で撮影を行った時の画像上対象点の平均座標誤差である。屈折光は水中で撮影した画像の座標から屈折光を計算して, 屈折光の単位ベクトルを画像座標に変換した時の空気中の撮影画像との平均座標誤差である。対象点の距離が遠くなるほど屈折光を用いた補正が有効になることがわかる。

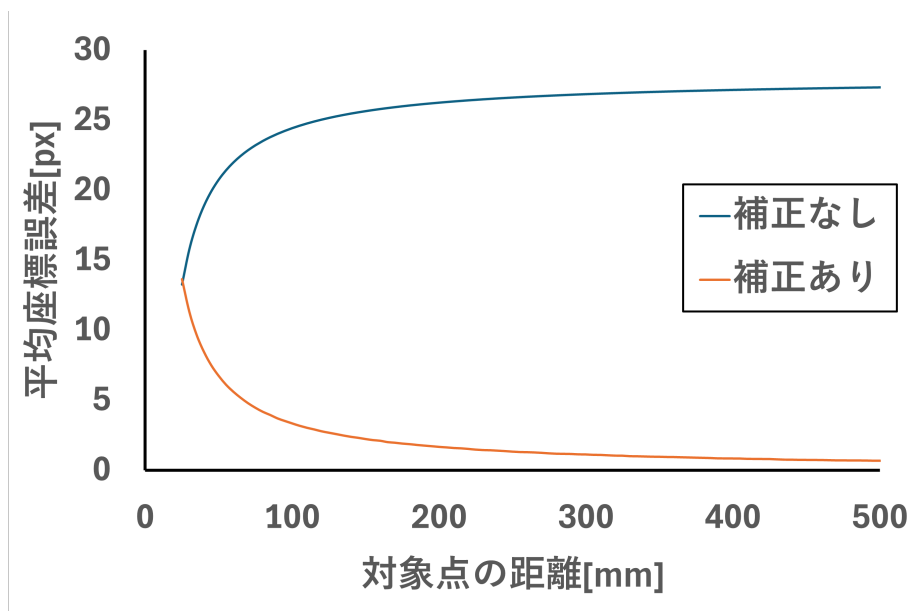


図 4.3 距離による屈折の影響

4.2.1 ドームポート内のカメラの位置推定

シミュレーションを用いて撮影を行いドームポート内のカメラの位置を推定した。対象点の配置条件を以下に示す。

- 撮影枚数:15 枚
- 対象点: チェッカーボードの頂点
- チェッカーボードの位置:(-100.0~100.0, -100.0~100.0, 10.0~90.0)[mm](ランダムに決定)
- チェッカーボードの角度チェッカーボードの面の法線ベクトルがカメラの方向になるように回転

取得した対象点の座標からドームポート内のカメラの位置推定を行った結果を表 4.1 に示す。位置推定を提案手法の非中心モデルの位置推定と既存手法の中心モデルの位置推定の 2 つの手法で推定を行った。精度として推定位置と、推定した位置を使って屈折を補正した時の平均座標誤差を調べた。チェッカーボードの位置を推定することで、チェッカーボードの各頂点の 3 次元座標が得られる。対象点までの距離がわかれば屈折は補正することができるため、補正した時の平均座標誤差を示す。非中心モデルは正しくドームポート内のカメラの位置を推定することができ、座標誤差も 0.00[px] と限りなく小さくなった。しかし、使用したカメラに対応できない中心モデルでは、真値は z 方向だけの変位だが推定結果は x 軸方向が主な変位と誤った推定を行っている。そのため、座標誤差も補正しない時より大きくなり、位置推定が上手くいっていないことがわかる。中心モデルで位置推定を行うと位置推定誤差が大きく、移動量の推定にも大きい誤差が乗るためこの手法では今回使用したカメラには適用できないことがわかる。

表 4.1 位置推定 (シミュレーション)

位置推定方法	推定位置			屈折補正方法	平均座標誤差[px]
	x	y	z		
				補正なし	31.00
真値	0.00	0.00	10.00	3次元位置	0.00
中心モデル	-18.22	-17.72	1.95	3次元位置	53.81
非中心モデル	-0.25	-0.20	11.68	3次元位置	0.00

4.2.2 移動量の推定

シミュレーションを用いてドームポートを $(0.0, 0.0, 0.0)[\text{mm}]$, $(10.0, 0.0, 0.0)[\text{mm}]$ の2地点で撮影を行い, 移動量を推定, 屈折を補正して座標誤差を調べた。対象点の配置条件を以下に示す。

- 撮影枚数: 各 r で1枚ずつ
- 対象点: カメラから半径 r の球の表面上, 奥行方向の角度 $0, 36^\circ, 72^\circ$ で計11箇所に配置
- $r: 60[\text{mm}]$

取得した画像座標は真値のため, ガウスノイズを与えて移動量推定への影響を調べた。既存手法の移動量推定, 提案手法の移動量推定, 水中撮影の画像上の座標から計算した屈折光, それぞれで補正した時の結果を図4.4に示す。横軸が与えたガウスノイズの標準偏差で右に行くほどノイズが大きくなっている。縦軸は画像座標から移動量を推定し, 対象点の3次元位置を計算することで屈折を補正した時の, 平均座標誤差である。ノイズがない時, 既存手法も提案手法も移動量の推定が精度よく, 座標誤差がほぼ0なことがわかる。既存手法はノイズが増加すると座標誤差が急激に大きくなりノイズの標準偏差が0.5の時に屈折光よりも座標誤差が大きくなっている。提案手法はノイズが増加すると座標誤差も大きくなるが屈折光の座標誤差よりは小さく安定した補正ができることがわかる。

図4.5に移動量の推定結果を示す。横軸はノイズの標準偏差, 縦軸は移動量の位置と角度の推定結果と真値の誤差である。ノイズの標準偏差が0.5を超えた所から提案手法の位置推定の誤差が増大している。既存手法も位置推定の誤差は増大しているが提案手法よりは小さい。しかし, 角度の誤差は既存手法が増大したのに対して提案手法はあまり変化がない。位置は多少ずれても画像座標がほとんど変化しないのに対して角度は少し変わるだけで全体の画像座標が大きく変化するため角度の推定精度が図4.4の平均座標誤差の精度に影響を与えたと思われる。

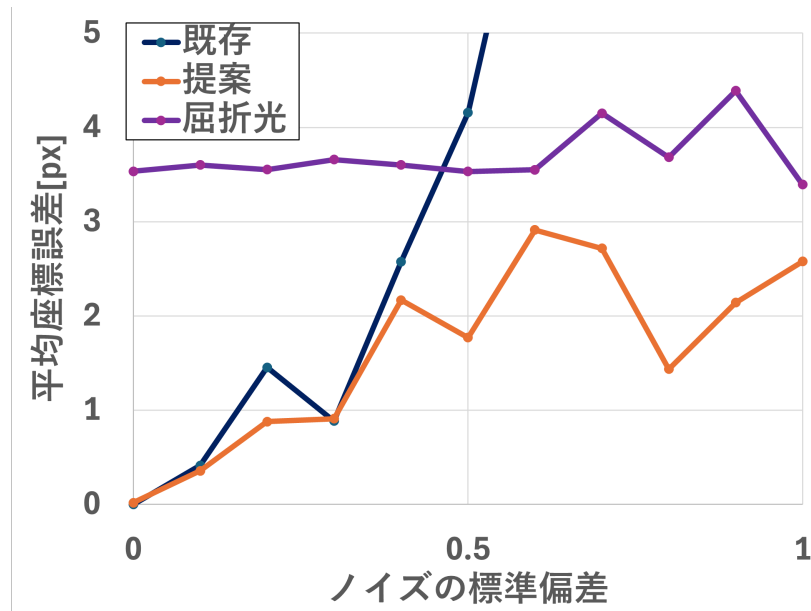


図 4.4 移動量の推定による座標誤差 (シミュレーション)

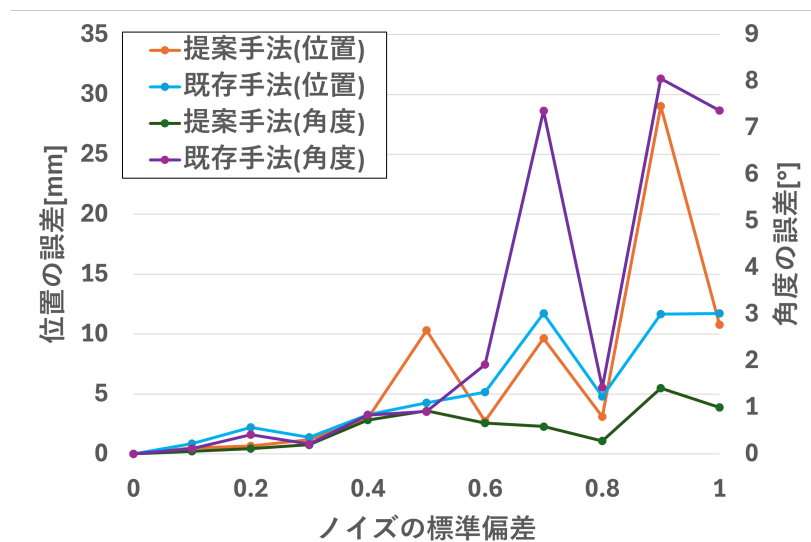


図 4.5 移動量の推定誤差 (シミュレーション)

4.3 実機による撮影

撮影風景を図 4.6 に示す。今回の実験は近距離を想定しているため、撮影場所は家庭用のシンクで行った。防水ケース内の空気や水を入れる際の水流で動かないようにカメラとチェッカーボードそれぞれにおもりを付けた。深さがあまりないため高さを変

えた時の画像は今回撮影できなかった。

チェッカーボードの半分の高さまで水で満たした時の撮影画像を図 4.7 に示す。画像上半分が空気中での撮影, 下半分が水中での撮影である。水中の撮影画像の方が膨らんでみることが確認できる。これはカメラから出る光の始点がドームポートの中心よりチェッカーボードに近づく方向に移動している。魚眼レンズの非中心モデルとドームポート内のカメラの設置位置の影響で今回の実験環境では屈折が発生するため補正をする必要がある。



図 4.6 実験風景

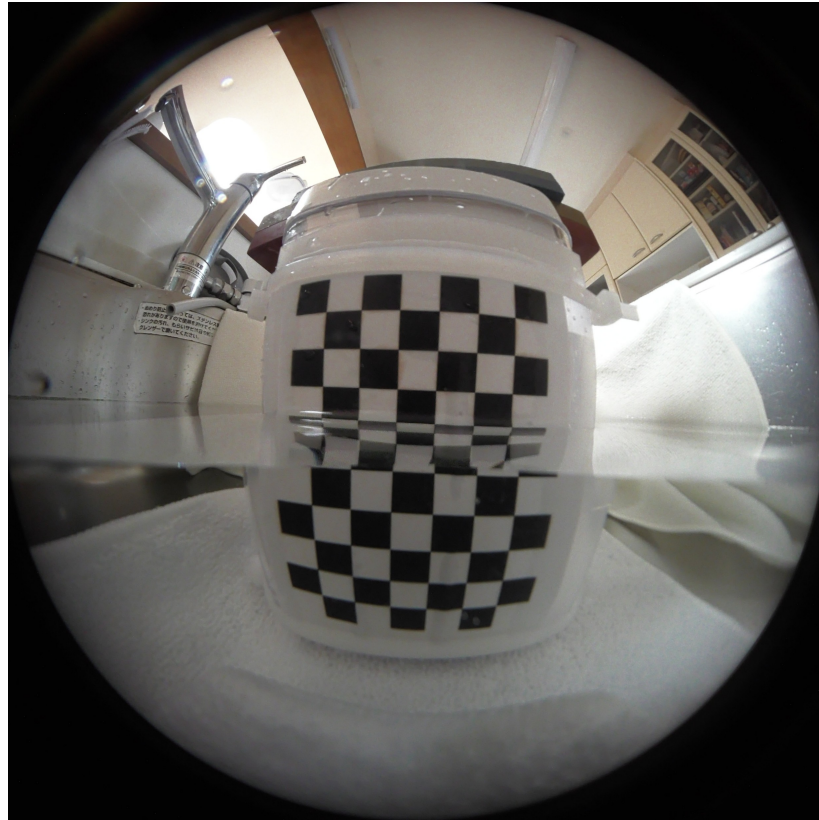


図 4.7 水中と空気中の撮影画像

4.3.1 ドームポート内のカメラの位置推定

実機によるチェッカーボードを対象とした水中撮影からドームポート内のカメラの位置推定を行った結果を表 4.2 に示す。位置推定を提案手法の非中心モデルの位置推定と既存手法の中心モデルの位置推定の 2 つの手法で推定を行った。ドームポートの内の位置は測定が困難であるため、精度として推定した位置を使って屈折を補正した時の平均座標誤差を調べ、屈折モデルが正しく作成できているか確認した。また、補正しない時と非中心モデルで推定した位置と水中撮影撮影画像から計算した屈折光で補正した場合の平均座標誤差も示す。

非中心モデルの推定位置は z 方向にずれた場所にあり、図 4.7 から予想される位置と似ている。また、座標誤差も小さく正しい精度よく位置推定ができています。既存手法の推定位置は x, y 方向にずれた場所にあり平均座標誤差も補正しない時より誤差が大きく、位置推定が上手くできなかった。

表 4.2 位置推定 (実機)

位置推定方法	推定位置			屈折補正方法	平均座標誤差[px]
	x	y	z		
				補正なし	19.72
中心モデル	-18.22	-17.72	1.95	3次元位置で補正	132.83
非中心モデル	-0.25	-0.20	11.68	屈折光で補正	4.91
				3次元位置で補正	3.64

撮影したチェッカーボードの各頂点を補正した画像を図 4.8 に示す。撮影画像は空气中で撮影した画像で, 左の画像は屈折光で屈折を補正した時, 右の画像は非中心モデルで位置推定した後, チェッカーボードの姿勢を推定して各頂点の 3 次元位置を計算, 屈折を補正した時である。屈折がない時の光は入射光 + 屈折光であるため, 空气中で撮影した時の各頂点は入射光である補正なしと補正ありの間にあり, 屈折光で補正した時は真値よりも内側に補正されていることがわかる。非中心モデルによる補正は各頂点の 3 次元座標を取得してより正確な補正をしている。しかし, 正確に補正はできず屈折光とは逆に全体的に真値よりも外側の座標に補正されている。これはカメラモデルや位置推定, チェッカーボードの姿勢推定の誤差が原因だと考えられる。

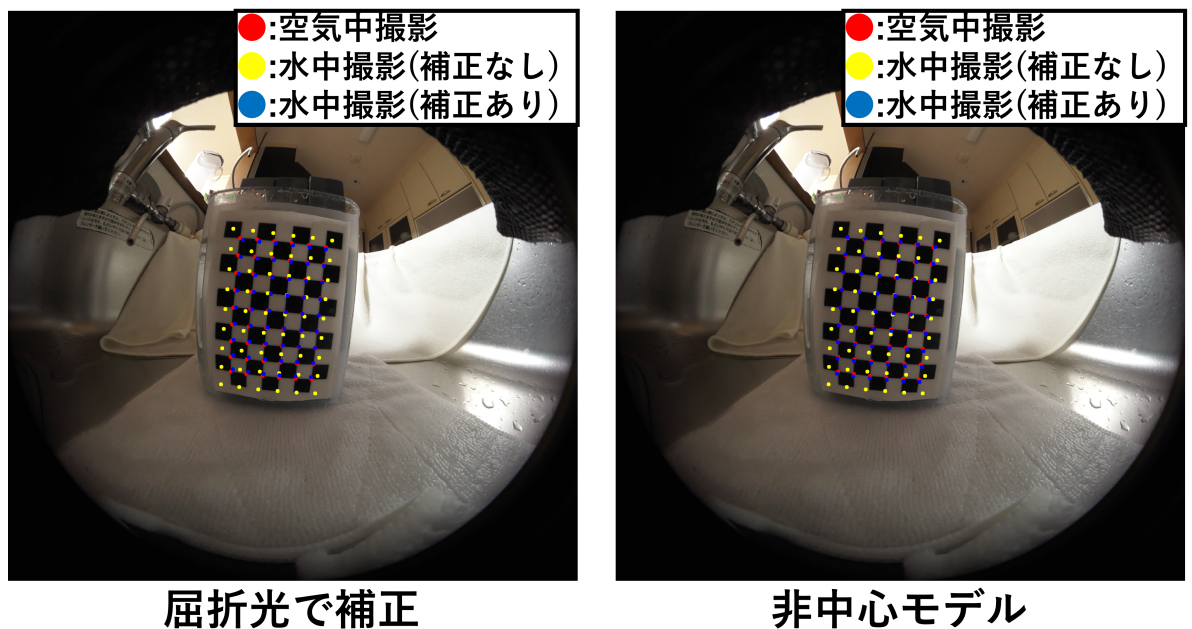


図 4.8 位置推定による補正画像

4.4 移動量の推定

実機による2地点のチェッカーボードを対象とした水中撮影から移動量を推定を行った結果を表4.3に示す。移動量推定を提案手法と既存手法の2つの方法で推定した。推定移動量と、推定した移動量と2地点の撮影画像から対象点の3次元位置を求め屈折を補正した時の平均座標誤差を調べた。移動量は各軸を移動した変位と各軸の回転角で表し、回転角はz軸→y軸→x軸の順番で回転させた。また、補正しない時と水中撮影撮影画像から計算した屈折光で補正した場合の平均座標誤差も示す。ドームポート内のカメラの位置は提案手法の値を使用して、2地点目の撮影は適当な場所で撮影を行った。

提案手法は屈折光で補正した時より座標誤差が小さく、正しい屈折補正ができていることがわかる。既存手法は推定移動量が提案手法と全く違い、座標誤差も補正なしより大きくなっているため、移動量を推定できていないことがわかる。

撮影したチェッカーボードの各頂点を補正した画像を図4.9に示す。撮影画像は空気中で撮影した画像で、左の画像は屈折光で補正した時、右の画像は提案手法で移動量推定した後、対象点の3次元位置を求めて補正した時である。屈折光で補正した時は真値よりも内側の座標に補正されることがわかる。提案手法は対象点の3次元位置を求めているが、正確に補正はできず屈折光とは逆に全体的に真値よりも外側の座標に補正されている。

また、表4.2と表4.3は同じ写真を補正した結果である。これらを比較するとチェッカーボードの姿勢を推定するより移動量推定と3次元位置を計算した方が座標誤差が0.8[px]程度小さくなるためチェッカーボードの姿勢推定の精度が3次元位置の計算より精度が低いことがわかる。これは移動量の推定よりカメラモデルと位置推定精度の誤差が大きいと考えられる。

表 4.3 移動量の推定による座標誤差 (実機)

移動量推定方法	推定変位[mm]			推定角度[°]			屈折補正方法	平均座標誤差[px]
	x	y	z	θ_x	θ_y	θ_z		
							補正なし	19.72
							屈折光	4.91
既存手法	7.27	-0.51	3.09	-3.03	-44.12	0.33	3次元位置	594.75
提案手法	-84.54	4.17	-6.23	-1.03	0.55	-1.99	3次元位置	2.85

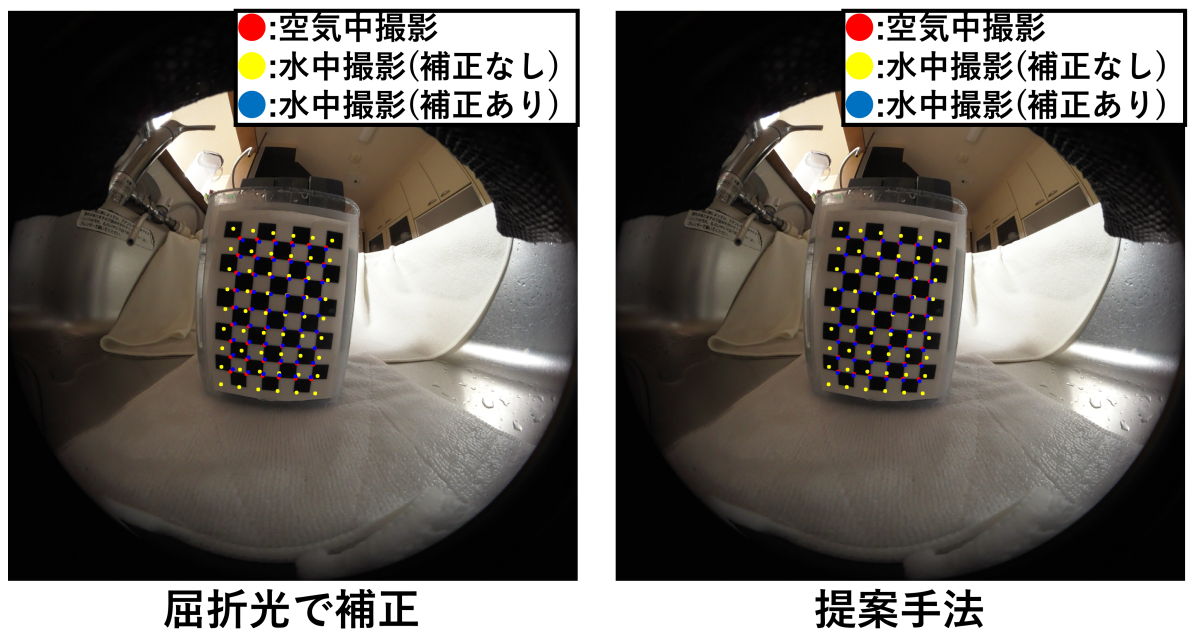


図 4.9 移動量推定による補正画像

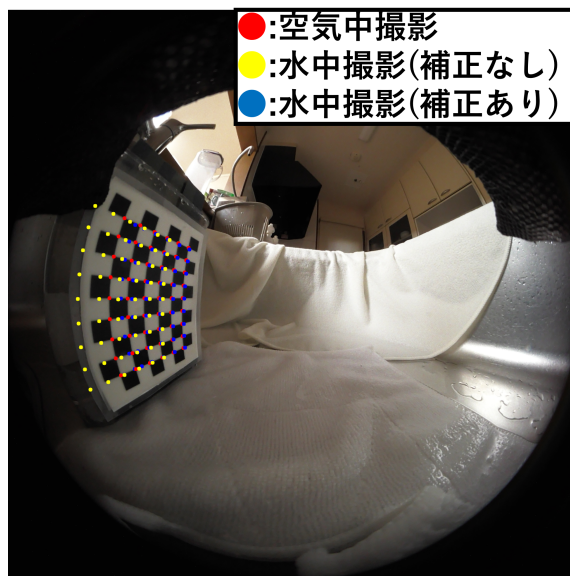
チェッカーボードを横に置いて撮影した時の結果を表 4.4 に示す。提案手法は屈折光で補正した時より座標誤差が小さく正しい屈折補正ができていることがわかる。既存手法は座標誤差が補正なしより大きくなっているため、移動量を推定できていないことがわかる。しかし、提案手法は移動量の推定が撮影範囲を超えた値になっていて正しい移動量ではない。

今回は対象点の間隔が 9[mm] のチェッカボードをカメラから 100[mm] 程度離れた位置に置いた。チェッカボードを横に置いた時の提案手法で推定した移動量を用いて対象点の 3 次元位置を計算するとカメラからの距離が平均で 69491[mm], 対象点の間隔が平均で 5865[mm] と実際のより大きいチェッカボードが実際に置いた位置より遠い場所にあると推定していた。よって、提案手法の移動量推定は実際の移動量を推定しているわけではなく、屈折を補正した時の座標誤差が小さくなるような移動量を推定していると思われる。

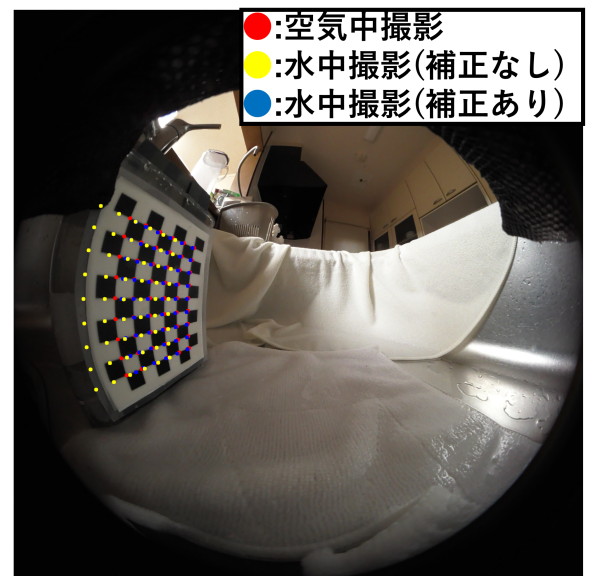
撮影したチェッカーボードの補正した画像を図 4.10 に示す。屈折光で補正した場合も提案手法で補正した場合も画像の端に近い方が座標誤差が大きいことがわかる。

表 4.4 移動量の推定による座標誤差 横 (実機)

移動量推定方法	推定変位[mm]			推定角度[°]			屈折補正方法	平均座標誤差[px]
	x	y	z	θ_x	θ_y	θ_z		
							補正なし	65.03
							屈折光	10.60
既存手法	17.30	0.59	15.79	-3.55	-93.06	-7.13	3次元位置	1081.24
提案手法	-21692	1452	-12694	-12.79	-77.01	8.53	3次元位置	6.83



屈折光で補正



提案手法

図 4.10 移動量推定による補正画像 横

第 5 章

結論

5.1 まとめ

本研究では 1 台の魚眼レンズとドームポートを組み合わせた広範囲の撮影で生じる屈折を補正することを目的とし,これを達成するために既存の理想的なカメラである中心モデルの屈折補正方法と魚眼レンズの非中心モデルを組み合わせたドームポート内のカメラの位置推定方法と,位置推定誤差や座標取得誤差に強いカメラの移動量の推定方法を提案した。

シミュレーションでは,非中心モデルと中心モデルを用いたドームポート内のカメラの位置推定と推定した位置から屈折を補正した時の座標誤差を調べた。結果として,魚眼レンズには非中心モデルの位置推定を使用しないとドームポート内の位置推定が正しくできないことを確認した。また,対象点の画像座標にノイズを付与した時の提案手法と既存手法のカメラの移動量推定と,推定した移動量から 3 次元位置を取得して屈折を補正した時の座標誤差を調べた。結果として,提案手法の方がノイズによる座標誤差の変化が少なく画像座標のノイズに強いことを確認した。

実機では非中心モデルと中心モデルを用いたドームポート内のカメラの位置推定と推定した位置から屈折を補正した時の座標誤差を調べた。結果として,非中心モデルの座標誤差が小さくなり高精度なドームポート内の位置推定ができていることを確認した。また,提案手法と既存手法のカメラの移動量推定と,推定した移動量から 3 次元位置を取得して屈折を補正した時の座標誤差を調べた。結果として,正面にチェッカーボードを置いた時は提案手法が高精度な移動量を推定でき,座標誤差の小さい屈折補正ができたことを確認した。横にチェッカーボードを置いたときは移動量の推定は上手くいかなかったが座標誤差は小さくなった。このため,移動量の精度より屈折を補正した時の補正誤差が小さい移動量を推定していると思われる。

5.2 今後の展望

より精度を上げる方法として, 前提条件として使用した屈折率やドームポートの形状に含まれる誤差が各推定精度に与える影響を確認する必要がある。実機で生じる推定誤差を減らすことで, 現実でもより高精度な屈折補正を行うことが今後の課題となる。また, チェッカーボードではない撮影画像から特徴点の屈折を補正し, その後の画像全体を補正した時の補正精度を確認する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導とご助言を賜りました杉田泰則准教授に深く感謝申し上げます。先生の的確なご指導と温かい励ましのおかげで、困難に直面した際にも研究を続けることができました。また、本論文の審査をお引き受けいただき、貴重なご意見を賜りました副査の圓道知博教授、南部功夫准教授にも、心より御礼申し上げます。ご助言は、研究の質を向上させるうえで非常に有益なものでした。さらに、これまで惜しみない支援と励ましを与えてくれた両親に、心から感謝いたします。学びの機会を与え、見守り続けてくれたことが、今日の私を支えてくれました。最後に、本研究に関わってくださったすべての方々に、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T.Kwasnitschka, K.Köser, J.Sticklus, M.Rothenbeck, T.Weiß, E.Wenzlaff, T.Schoening, L.Triebe, A.Steinführer, C.Devey, J.Greinert: "DeepSurveyCam—a deep ocean optical mapping system.", *Sensors*, 16(2), 164.(2016)
- [2] DT.Kutzke, A.Wariar, J.Sattar:"Autonomous robotic re-alignment for face-to-face underwater human-robot interaction.", *arXiv preprint arXiv:2401.04320* (2024).
- [3] J.Bosch, P.Ridao, D.Ribas, N.Gracias:"Creating 360 underwater virtual tours using an omnidirectional camera integrated in an AUV.", *OCEANS 2015 - Genova, Genova, Italy*, pp. 1-7, (2015)
- [4] . F.Menna, E.Nocerino, F.Fassi, F.Remondino:"Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry." *Sensors*, 16(1), 48.(2016)
- [5] .C.Kunz,H.Singh"Hemispherical refraction and camera calibration in underwater vision." In *OCEANS 2008* (pp. 1-7). IEEE.(2008)
- [6] M.She, Y.Song, J.Mohrmann, K.Köser:"Adjustment and calibration of dome port camera systems for underwater vision." *Pattern Recognition: 41st DAGM German Conference, DAGM GCPR 2019, Dortmund, Germany, September 10 – 13, 2019, Proceedings 41*. Springer International Publishing, p. 79-92. (2019)
- [7] M.She, D.Nakath, Y.Song, K.Köser:"Refractive geometry for underwater domes.", *SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 183: 525-540.(2022)
- [8] BE.Motsenbocker., TJ.Noyes, AT.Runyan., R.Shomberg., BT.Phillips. "PresTo: A liquid-filled camera for low-cost imaging in the deep sea." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 206, 104263.(2024)
- [9] D.Gennery. "Generalized camera calibration including fish-eye lenses." *International Journal of Computer Vision*,68:239 – 266, (2006)
- [10] 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*, 79(4), 344-348.(2013)
- [11] X.Qiao, A.Yamashita, H.Asama:"Underwater structure from motion for cameras un-

- der refractive surfaces.” *Journal of Robotics and Mechatronics*, 31.4: 603-611.(2019)
- [12] M.Shortis,”Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems.” *Sensors*, 15(12), 30810-30826.(2015)
- [13] E.Nocerino., F.Menna, A.Gruen, M.Troye., A.Capri., C.Castagnetti, P.Rossi, A.J.Brooks, R.J.Schmitt, S.J.Holbrook.” Coral reef monitoring by scuba divers using underwater photogrammetry and geodetic surveying.” *Remote Sensing*, 12(18), 3036.(2020)
- [14] R.Tezaur, A.Kumar, O.Nestares: ”A new non-central model for fisheye calibration.” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 5222-5231).(2022)
- [15] P.A.Pozo, M.Toksvig, T.F.Schrager,J.Hsu, U.Mathur, A.Sorkine-Hornung, R.Szeliski, B.Cabral,”An integrated 6DoF video camera and system design.” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 38(6), 1-16.(2019)
- [16] D.Scaramuzza,A.Martinelli,R.Siegwart,”A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion.” In *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS’06)* (pp. 45-45). IEEE.(2006)
- [17] A.Kumar,N.Ahuja,”On the equivalence of moving entrance pupil and radial distortion for camera calibration.”, In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 2345-2353).(2015)
- [18] 後藤真一, 川西亮輔, 山下淳, 金子透.”全方位ステレオ画像による二眼ステレオとモーションステレオを併用した3次元計測 (若葉研究者の集い 5, サマーセミナー (若葉研究者の集い)).” *映像情報メディア学会技術報告 34.34. 一般社団法人映像情報メディア学会*, p. 81-84.(2010)
- [19] 西田 健, 黒木 秀一:”対応関係が不明な三次元点集合間の回転行列の推定”*日本ロボット学会誌*, 31(6), 624-627.(2013)
- [20] マスプロ電工 MASPRO PIXPRO SP360 4K,<https://www.maspro.co.jp/products/pixpro/sp360-4k/>