# 屈折と吸収に基づく多波長画像からの 水面・水中物体の形状復元

# 中嶋 倫太郎1 岡部 孝弘1

概要: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に必要不可欠な技術である.こ れまでに水面または水中物体のどちらか一方の形状復元は研究されてきたが,両方の形状復元については ほとんど研究されていなかった.そこで本稿では,多波長画像から得られる情報を統合することで,水面 と水中物体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 幾何学的な手掛りと近赤外光の吸収に基づく光学的な手掛りを統合することで,両方の形状を復元する.3 波長の実画像を用いた実験を行い,提案手法の有効性を示す.

キーワード:ハイパースペクトル、マルチスペクトル、多波長画像、3次元形状復元、水

# 1. はじめに

2次元の画像から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(水底を含む)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,直接測定できないものを非接触測定す る時に必要不可欠な技術である.

一般に物体の3次元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が,水中物体の見えは, 光の屈折により,水面形状や光源・カメラの向きに依存し て変化するため,従来手法では正確に形状復元ができない. そのため,水中物体の形状復元には水面形状の復元も不可 欠である.

屈折現象を利用した水面形状の復元は以前から研究され ている [6]. この手法は,屈折と水面の揺らぎを利用するこ とで水底のテクスチャを復元し,水面の表面形状を復元す る.しかしこの手法では,水底は平面であり,静止した水 面から水底までの深さが既知であるという前提のもと形状 復元しているため,深さが未知の場合は正確な形状を推定 できない.

また,水中における光の吸収を手がかりに,水中物体の 表面形状を復元する手法 [1] も存在する.水中では,可視 光はほぼ透過する.一方近赤外光は,透過率が低く,画像 全体がシーンの深さに応じて暗くなる.これは水が光を吸

九州工業大学 Kyushu Institute of Technology 収し,光の減衰が生じているためである.水中での光の吸 収を用いた手法では,2枚の近赤外波長画像から水中物体 の表面形状を復元することができるが,波の発生している 状況下では,屈折により行路長が変化してしまい,正確な 形状を推定することができない.

そこで本研究では、多波長画像から得られる情報を統合 することで、水面と水中物体の両方の形状を復元する手法 を提案する.具体的には、可視光域では、反射率の変動が 大きく、水が透明であるのに対して、近赤外光域では、反 射率の変動が小さく [4]、水が半透明であること [1] に着目 して、可視光の屈折に基づく幾何学的な手掛りと近赤外光 の吸収に基づく光学的な手掛りを統合することで、両方の 形状を復元する.具体的には、Asanoらの手法 [1] を用い て得られる水中の行路長から、水面上の点を複数点計算す る.計算した点から水面形状を二次関数で多項式曲面近似 し、近似した水面形状を用いて水中物体の3次元座標を復 元する.

可視光と近赤外光域の3波長の実画像を用いた実験を行い,屈折に基づく情報と吸収に基づく情報を用いた提案手法と,水面が平面であると仮定して,吸収に基づく情報のみを用いた単純な手法と実験結果を比較し,提案手法の有効性を示す.

# 2. 関連研究

水面や水中物体の形状復元に関する研究は,これまでに 多く行われている.水は透明であるという性質上,見えが

#### 情報処理学会研究報告

IPSJ SIG Technical Report

水底や水中物体に依存して変化する.そのため,物体表面 で光が反射することを前提とした,ランバート反射物体が 対象である形状復元手法では水面の3次元形状を復元する ことはできない.

そこで、水面の形状を復元する手法として、光の屈折を 利用した研究が多数行われている. Muraseの手法では、屈 折と水面の揺らぎを利用することで水底のテクスチャを復 元し、水面の表面形状を復元する [6]. 具体的には、揺らぐ 水面によって歪む水底のテクスチャの動画像を撮影し、動 画像のオプティカルフローを求めることで、歪みのないテ クスチャを求める. 歪んだテクスチャと歪みのないテクス チャの対応関係から、スネルの法則を用いて水面形状を求 めることが出来る.

Shan らは、屈折に基づいた定式化により、単一画像か ら画像中の各画素ごとに奥行き計算を行うことで透明物体 の高さ推定を行い、形状を復元した [12]. Tian らは、波動 方程式を基にいくつかの基底を組み合わせることで、揺ら いだ水面の見えや形状を復元する手法を提案した [13]. ま た, Bokode や Light Field Probe のような特殊な照明を用 いて水面形状を復元する手法もある [14], [16].

これらの手法は水底が平面であるシーンに対しては有効 であるが,水中物体がある場合は想定しておらず,正確な 形状を復元できない.一方,本研究は水面に形状があり, 水中物体のあるシーンを想定し,水面と水中物体の両方の 形状を復元する.

一方で,水中物体の形状復元に関しては,多くの手法が 水面が平らで静的であることを仮定して復元を行う.照度 差ステレオ [7] や Structure-from-Motion[3], [10] のような 従来のステレオモデルで水中物体や散乱媒体内の形状を復 元するには,平らな水面の3次元座標を計測し,光の屈折 や散乱を考慮することが必要となる.Yanoらは,形状が 未知の水槽内の物体に対し,屈折を考慮した視体積交差法 により水中物体の3次元復元を行った [15].

Asanoらは、水中における光の吸収を手がかりに、水中 物体の表面形状を復元した [1]. この手法では、2枚の近赤 外波長画像から水中物体の表面形状を復元することができ るが、波の発生している状況下では、屈折により行路長が 変化してしまい、正確な形状を推定することができない.

これらの手法は水面が平面であるシーンに対しては有効 であるが、水面に形状がある場合には、正確な形状を復元 できず、一般的なシーンへの適用は難しい.一方本研究は、 水面・水中物体両方の形状を復元することが目的であるた め、一般的なシーンへの応用が期待できる.

上記の手法の問題点として,水面・水中物体のどちらか 一方の復元にしか着目していないという点が挙げられる. そこで,Zhangらは,屈折によって行路長が変わることで 発生する焦点のずれを手がかりに,水面形状を復元する手 法を提案した[17].しかし,この手法では水面が平坦な場 (b)



図 1: (a) 可視光下での水の見え, (b) 近赤外光下での水の 見え.

(a)

合に焦点を合わせた全焦点画像が必要であり,カメラの投 影面を水面に対して平行に設置しなければならない.その ため,セットアップを忠実に再現することが難しく,実用 シーンが限られる.

また,Qianらは,屈折に基づく水面・水中物体の同時形 状復元手法を提案した[9].具体的には,複数台のカメラ を用いて,スネルの法則に基づく屈折の幾何学的情報と, 水面の緩やかな変化に基づく水面の局所表面構造から,水 面・水中物体の形状を復元した.複数台のカメラ(実験で は9台)を用いて幾何学的な情報から水面・水中物体を復 元するQianらの手法[9]に対して,本手法は単一のHSカ メラのみを用いて,屈折から得られる幾何学的情報と吸収 から得られる光学的情報を組み合わせて形状を復元する.

# 3. 提案手法

水面を通して水底や水中物体を観測する時,実物と比べ て像は歪んで見える.これは空気と水の境界で屈折が発生 するからである.屈折とは,光がある媒質から別の媒質に 進むときに境界で進行方向を変える現象を指す.屈折率 $n_1$ の媒質中の光線の入射角 $\theta$ と屈折率 $n_2$ の媒質中の光線の 屈折角 $\varphi$ の関係は,スネルの法則より,

$$\sin\theta = \frac{n_2}{n_1}\sin\varphi \tag{1}$$

と表される.真空の屈折率をn = 1としたとき,水の屈折率は, $n \approx 1.334$ であることが知られている.屈折率は波長に依存して変化するが、本稿では屈折率の変化は無視し、定数として扱う.

光が水中を通過する時,水が光を吸収することによって, 光量の減衰が発生する.図1に,可視光と近赤外光におけ る水の見えの比較を示す.図から,水は可視光をほとんど 吸収せず,近赤外光をより吸収しやすいことが分かる.図 1において,可視光下で確認できた物体のテクスチャが, 近赤外光下では一様になっていることが確認できる.これ は,可視光では反射率の変動が大きく,近赤外光では反射 率の変動が小さいことに起因する[4].

ある波長 λ における水中での光の吸収は, ランベルト・ ベールの法則 [8] で表すことができる. 減衰した光の強度 *I* は,入射光強度 *I*<sub>0</sub> を用いて,

$$I(\lambda) = r(\omega)s(\lambda)I_0e^{-2\alpha(\lambda)l}$$
(2)

と表せる.ここで  $r(\omega)$  は光源方向  $\omega$  に依存するパラメタ,  $s(\lambda)$  は分光反射率,  $\alpha(\lambda)$  は水の吸収係数, l は片道の行路 長である. Asano らは, 式 (2) を基に, 近赤外波長  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ における分光反射率  $s(\lambda)$  が  $s(\lambda_1) \approx s(\lambda_2)$  を満たすとき, 水の吸収係数  $\alpha(\lambda)$  を用いて行路長 l が

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

のように求められることを示した.水面と水中物体の形状 を復元するにあたって,いくつかの仮定を行う.

## [仮定]

- カメラと光源が同じ位置
- カメラは透視投影
- 水底に大きさが既知の平面パターンを投影・配置可能
- 屈折の有/無で水底パターンの対応獲得可能

提案手法は、一度に全画素の撮影が可能なスナップショット方式の HS カメラや、可視光と近赤外光にそれぞれ感度 を持つカメラを複数台用いることで動的シーンに適用できる.後述の実験では、デバイスの制約上静的シーンを仮定し、水面・水中物体を復元する.ここで水が満たされた水 槽を想定し、水面が揺らぎ、水槽内部に水中物体が配置されている状況における、水面形状と水中物体の復元につい て考える.水面と水底・水中物体に関する光線を考えると、 図2のように図示できる.

カメラで点 A を観察するとき, $\overrightarrow{OA}$  は屈折がないときに 点 A を捉える光線, $\overrightarrow{OP}$ , $\overrightarrow{PA}$  は屈折があるときに点 A を 捉える光線である.水槽の奥に大きさが既知の平面状のパ ターンを配置し,特徴点を検出することで,平面に対する 回転・並進の外部パラメタを得られ,水槽の背面の3次元 座標を計算できるので,点 A の3次元座標は事前に取得で きる.画像中の屈折がある点と屈折がない点の対応を取る ことで,光線のなす角  $\theta$  を得られる.また,式(3)より, 点 A と水面上の点 P 間の行路長 l を計算すると,点 A を 中心とする半径 l の球と光線  $\overrightarrow{OP}$  の交点を求めることで, 点 P の座標を計算することが出来る.

$$|\overrightarrow{OP}| = |\overrightarrow{OA}|\cos\theta \pm \sqrt{|\overrightarrow{OA}|^2\cos\theta^2 - |\overrightarrow{OA}|^2 + l^2} \quad (4)$$

屈折がある場合とない場合に対応が取れる特徴点を手動で 複数個選択し,式4の計算を行う.得られた点群から曲面 近似によって水面の形状を求める.

次に,水中物体の形状復元について考える.水中物体上の点 B に着目すると,前もって復元した水面形状から水面の法線を計算できるので,空気中の光線  $\overrightarrow{OP'}$  に対して,式(1)のスネルの法則,および,水面形状(法線)から,

$$\overrightarrow{P'B} = \frac{n_1}{n_2}\overrightarrow{OP'} + \left(\frac{n_1}{n_2}\cos\theta - \cos\varphi\right)\vec{N}$$
(5)



図 2: 水面・水中物体に関する光線関係



図 3: 撮影環境.

より,  $\overrightarrow{P'B}$ の向きを計算できる.また式 (3) より  $\overrightarrow{P'B}$ の行 路長 l' も求まるため,水面上の点 P'の3次元座標と  $\overrightarrow{P'B}$ から水中物体上の点 Bを導出できる.各画素についてこ の計算を行うことで,水中物体の形状も導出することがで きる.

## 4. 実験

#### 4.1 実験環境

提案手法の有効性を示すために、ハイパースペクトル (HS)カメラを用いて実画像実験を行った.実験では、揺 らぐ水面の代わりに、前面が丸く湾曲しているアクリル製 の壁掛け水槽の形状を復元する.壁掛け水槽に水を満た し、うさぎの置物を中に沈めたシーンをエバ・ジャパン製 のHSカメラを用いて図3のような配置で撮影した.光源 には、近赤外線を放出する白熱電球を用いた.実際の撮影 では、物体表面に生じる鏡面反射や照り返しを軽減するた めに、光源・カメラ前方に偏光板を設置している.また、 この実験においては、アクリル水槽の境界で発生する屈折 は無視している.

撮影で用いた HS カメラの記録方式はラインスキャン式 であり,動的シーンの撮影が困難であるため,静的シーンの 撮影を行った. HS 画像の解像度は,768×1024×125(band)



図 4: 実験で使用した画像. 上段:水中物体なし,下段:水中物体あり. 左から順に,600nm,905nm,950nmの単一波長 画像,行路長計算結果.

である.また、今回の実験では波長による屈折率の違い は無視しており、空気の屈折率を $n_1 = 1$ ,水の屈折率を  $n_2 = 1.334$ として計算を行った.実験では、可視光域から 選択した 600nm,式(3)が成り立つ条件 $s(\lambda_1) \approx s(\lambda_2)$ を 満たす近赤外線波長 905nm、950nmの3バンドを用いた. 近赤外波長の選択に関しては、Asanoらの論文[1]を参考 にした.定性的評価のために、光の屈折と吸収に基づき表 面形状と水中物体形状を復元したものと、光の屈折を無視 し、吸収のみに基づいて、水面形状が平面であると仮定し て水中物体を復元したものから比較を行う.

実験で使用する HS 画像を図3のような設定で, HS カメ ラを用いて撮影した.このとき、うさぎの置物があるシー ンと無いシーンの2パターンを撮影した.実験で用いたの は 600nm, 905nm, 950nm の波長であり, HS 画像から再 構成した単一波長画像が図4である.なお図4は,視認性 の確保のため補正を加えているが、実験では生データを用 いている.図4から,可視光波長である 600nm の画像で はチェッカーパターンが見えているが、近赤外波長である 905nm,950nm の画像ではチェッカーパターンが確認でき ない. これは, 可視光では反射率の変動が大きいが, 近赤 外光では反射率の変動が小さいためである.近赤外波長の 画像は吸収に基づいた水中の行路長の導出に使用する. 一 方,近赤外波長ではテクスチャが一様になってしまうため, 近赤外線画像からチェッカーパターンの特徴点の抽出はで きない. そこで, HS 画像を用いることで, テクスチャが鮮 明に現れる可視光画像を特徴点の抽出に用い、テクスチャ が一様になる近赤外画像から正しい水中の行路長を求める ことが可能になる.

形状復元実験のために、チェッカーパターン上の特徴点 を基にカメラキャリブレーションを行った.実験では、求 めた内部パラメタから投影面の各画素における光線方向を 導出し、外部パラメタから、水槽背面に配置したチェッカー パターンの3次元座標を測定した.カメラキャリブレー



図 5: 屈折がある時とない時の画素の対応関係.

ションは Camera Calibration toolbox for MATLAB[2] を 用いて実装した.キャリブレーションには,カメラに対す る距離や角度を変化させながら撮影した 15 種類のチェッ カーボード画像を使用した.

また,実験で用いる吸収係数を3枚のHS画像を用いて 較正した.較正に用いた水深はそれぞれ,3cm,5cm,7cm である.図中の水部分の複数画素の平均を取り,式(3)を 基に導出した  $\alpha_{950nm} - \alpha_{905nm}$ の値は0.0068となった.

較正した吸収係数を基に,水中を通過する光線の長さ*l*を計算した.図4右端に行路長*l*の計算結果を示す.この結果には,ノイズ軽減のために平滑化を施している.

水面形状の復元では、チェッカーパターンの屈折のある 場合とない場合から、図5の要領で手動で対応を取れる点 から水面の点を計算し、点群を基に形状を多項式曲面近似 を行う. 実際には、3次元座標 (*x*,*y*,*z*)に対して、*z*を*x*,*y* の2つからなる二次関数で表す.

 $z(x,y) = w_0 + w_1 x + w_2 y + w_3 x^2 + w_4 x y + w_5 y^2 \quad (6)$ 

ここで、 $w_0, w_1, ..., w_5$  は、表面形状を操作する重みパラメ タである。事前のカメラキャリブレーションから、カメラ の各画素に入る光線方向が求まっているので、カメラ座標 系における光線方向を  $(x_r, y_r, z_r)$  とすると、水面上の点 (x, y, z) は任意の値 k を用いて、 $(kx_r, ky_r, kz_r)$  と表せる.



図 6: 水面形状の復元結果.上段:水中物体なし、下段:水中物体あり. 左から順に、復元シーン、復元した点群、点群を 基に近似した形状.



図 7: 水中物体の復元結果.上段:提案手法,下段:比較手法(水面が平面で屈折が無いと仮定). 左から順に,復元に使用 した水面形状,水中物体なしの復元結果,水中物体ありの復元結果,水面と水中物体の位置関係,チェッカーパターンの座 標と水中物体の位置関係.

 $z_r = 1$ のとき,式(6)より,kに関する2次方程式

$$(w_3 x_r^2 + w_4 x_r y_r + w_5 y_r^2) k^2 + (w_1 x_r + w_2 y_r - 1) k + w_0 = 0$$
 (7)

を解くことで,カメラの各画素が捉える水面上の点 (*x*, *y*, *z*) を計算できる.

#### 4.2 実験結果

チェッカーパターンの歪みから推定した点の対応から, 水面形状を復元した.図4より,水面の点群を復元した結 果,また点群を基に,式(6)を用いて水面形状を多項式曲 面近似したものを図6に示す.

図7に水中物体の復元結果を示す.上段が,図6の水面 形状を用いた提案手法での復元結果である.提案手法との 比較として,水面が平面かつ屈折が発生しないと仮定した 場合の水中物体の復元結果を,図7下段に示す.また,カ メラキャリブレーションで求めたチェッカーパターンの交 点の3次元座標を真値として,真値と提案手法と比較手法 のチェッカーパターンの交点の復元結果から,平均ユーク リッド距離を計算した.提案手法が10.36±2.51[mm],比 較手法が18.29±3.38[mm]となり,相対的に提案手法の方 が良好な結果となった.

### 4.3 考察

図6より,手動で選択した複数の対応点から,水槽の形 状の湾曲が表現されている.水面形状の湾曲を再現できて おり,水中物体についても,屈折を無視した手法に比べ,屈 折と吸収の両方を考慮した提案手法の方が歪みが少なく, 定性的に良い結果となった.しかし,水面形状の端の湾曲 部分がうまく復元できていない.これは,形状の近似が対 応点に依存しており,対応点を増やす,もしくは近似関数 を見直すことで改善が期待できる.

一方水中物体について,屈折を無視し,吸収のみを考慮 した比較手法が実際のスケールよりも大きく復元されてし まっていることに比べ,屈折と吸収の両方を考慮した提案 手法の結果のスケールが定性的に正しく復元されているこ とが分かる.また,比較手法では奥行き方向の歪みが顕著 であることに対し,提案手法では歪みが少ないことが確認 できる.

また,吸収を無視し,屈折のみを用いた手法は理論上適 用できない.Muraseの研究[6]では,水中の深さが既知で あると仮定して水面形状を復元するが,水中の深さが未知 の場合,吸収を用いなければ深さを計算する術がないため である.このことから,屈折から得られる幾何学的情報と, 吸収から得られる光学的な情報を組み合わせることに有効 性があると言える.

今回は静的シーンを対象として実験を行ったため,一般 的な水面・水中物体のシーンから離れた条件設定となって しまったが,これはラインスキャン型ハイパースペクトル カメラというデバイスの時間分解能の制約のためである. 動的な水面や水中物体の復元には,時間分解能に優れるス ナップショット型のハイパースペクトルカメラを用いるこ とや,分光反射率の変化の著しい任意の可視光1バンド, 近赤外光2バンドに感度を持つモノクロカメラ3台を用い ることで対応可能である.また,動的シーンの撮影を行う ことによって,オプティカルフローのようなシーン追跡手 法と組み合わせることで,今回は手動で行っていた特徴点 の選択の自動化が可能となる.自動化によってより多くの 特徴点を捉えることができれば,水面形状の復元精度の向 上が期待できる.

### 5. おわりに

本稿では、光の屈折と吸収に基づいて、多波長画像を用 いて水面・水中物体両方の形状を復元する手法を提案した. また、実画像を用いた実験を行い、光の屈折と吸収の両方 から得られる情報を組み合わせることが定性的・定量的に 有効であることを確認した.

水面・水中物体のそれぞれを復元する手法 [1], [6] に比 ベ,水面・水中物体の両方を復元できる点や,Qian らや Zhang らの提案した水面・水中物体の両方を復元する手 法 [9], [17] に比べ,単一のカメラで実験が可能である点, また今までの手法では無かった,屈折という幾何学的な情 報と吸収という光学的な情報を組み合わせたという点にお いて,本研究には新規性・有効性がある.

今回の実験では,静的シーンにおける水面・水中物体の 形状復元を行ったため,今後は,動的シーンにおける水面 と水中物体の形状を復元する手法に取り組みたい. 謝辞:本研究の一部は,JSPS 科研費 JP18H05011 の助成 を受けた.

## 参考文献

- Y. Asano, Y. Zheng, K. Nishino, and I. Sato, "Shape from Water: Bispectral Light Absorption for Depth Recovery," The 14th European Conference on Computer Vision, Vol. 9908, pp.635-649, 2016.
- [2] J. Y. Bouguet, Camera calibration toolbox for MATLAB, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\_doc/.
- [3] Y. J. Chang, T. Chen, "Multi-view 3d reconstruction for scenes under the refractive plane with known vertical direction," International Conference on Computer Vision, pp.351-358, 2011.
- [4] G. Choe, S. G. Narasimhan, and I. S. Kweon, "Simultaneous estimation of near IR BRDF and fine-scale surface geometry," In Proc. CVPR2016, pp.2452-2460, 2016.
- [5] B. Greve, "Reflections and Refractions in Ray Tracing," 2006.
- [6] H. Murase, "Surface shape reconstruction of an undulating transparent object," International Conference on Computer Vision, pp.313-317, 1990.
- [7] Z. Murez, T. Treibitz, R. Ramamoorthi, D. J. Kriegman, "Photometric stereo in a scattering medium," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 39(9), pp.1880-1891, 2017.
- [8] E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyuz, and G. Johnson, "Color imaging: fundamentals and applications," CRC Press, Boca Raton, 2008.
- [9] Y. Qian, Y. Zheng, M. Gong, and Y. Yang, "Simultaneous 3D Reconstruction for Water Surface and Underwater Scene," European Conference on Computer Vision, pp.776-792, 2018.
- [10] H. Saito, H. Kawamura, M. Nakajima, "3d shape measurement of underwater objects using motion stereo," IEEE IECON 21st International Conference on. vol. 2, pp. 1231-1235, 1995
- [11] D. J. Segelstein, "The complex refractive index of water," MS Thesis Department of Physics, University of Missouri-Kansas City, 1981.
- [12] Q. Shan, S. Agarwal, and B. Curless, "Refractive Height Fields from Single and Multiple Images," The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.286-293, 2012.
- [13] Y. Tian, and S. G. Narasimhan, "Seeing through water: Image restoration using model-based tracking," IEEE 12th International Conference on Computer Vision, pp.2303-2310, 2009.
- [14] G. Wetzstein, R. Raskar, and W. Heidrich, "Hand-held schlieren photography with light field probes," International Conference on Computational Photography, pp.1-8, 2011.
- [15] 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.
- [16] J. Ye, Y. Ji, F. Li, and J. Yu, "Angular domain reconstruction of dynamic 3d fluid surfaces," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.310-317, 2012.
- [17] M. Zhang, X. Lin, M. Gupta, J. Suo, and Q. Dai, "Recovering scene geometry under wavy fluid via distortion and defocus analysis," IEEE 13th European Conference on Computer Vision, pp.234-250, 2014.