

多視点画像を用いた半透明水中物体の 3次元形状・透過率分布推定

矢野 智彦^{1,a)} 延原 章平¹ 松山 隆司¹

概要: 本研究は、水槽の外部から撮影した多視点画像を用いて、半透明水中物体の3次元形状およびその内部の透過率分布を推定することを目的とする。特に半透明物体による光線の減衰や散乱現象に着目し、これらが撮影空間を離散化したボクセル単位で記述できると仮定した上で、各ボクセルが減衰現象を近似した透明度および散乱現象を近似した点光源輝度を持つと定義したモデルを提案する。提案モデルの透明度および点光源輝度を同時に推定するアルゴリズムを示すとともに、実験により本モデルの有効性を示した。

1. はじめに

これまでのコンピュータビジョンにおける多視点画像を用いた3次元形状復元の多くは、人物などを不透明な物体であると仮定して、その形状表面による反射をモデル化することで実現されてきた [1]。このような方式には非接触・非拘束に対象物体の形状を得ることができるという長所がある一方で、前提とした不透明性が成り立たない場合には適用ができなかった。

そこで本研究では、これを受精卵や細胞をはじめとする半透明物体へと適用可能なものへと発展させることを目的として、水中半透明物体の多視点画像による3次元形状復元に取り組む。特に、半透明物体では物体表面での屈折や、物体内部での透過、散乱が生じるが、本研究では水に十分近い屈折率を持つ水中物体を被写体として仮定することで屈折の影響を無視し、透過と散乱のモデル化に取り組む。

具体的には図1のように半透明水中物体を入れた水槽を、周囲から撮影する環境を想定し、物体の3次元形状および物体内部の散乱現象を考慮した透過率分布を推定する。ここで本研究では、対象を含む空間をボクセル集合として離散化し、それぞれに透過成分および散乱成分を表すパラメータを定義する。そして多視点からの撮影画像を再構成することができるような、矛盾のないパラメータ分布を推定することによって、対象の形状推定とする。

以下ではまず関連研究に対する本研究の位置づけを議論する。次いで計測モデルを定義したのちに形状推定アルゴリズムについて述べる。最後に実画像を用いた評価実験によって提案手法の評価を行う。

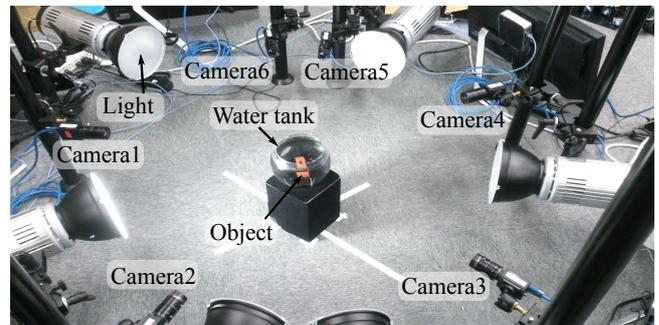


図1 研究環境

2. 関連研究

従来のコンピュータビジョン分野における半透明物体を対象とした3次元形状計測は、モデル化する光学現象に応じて分類することができる。

屈折 まず透過光の屈折を手がかりとした研究には、炎や煙のような気体を扱ったもの [2][3] や液体を扱ったもの [4], [5] を挙げることができる。本研究では水に十分近い屈折率を持つ水中物体を被写体として仮定することにより屈折の影響を無視している。

散乱 また散乱現象については、散乱媒体中の不透明物体の形状復元 [6] や、散乱現象を計測することによって物体の形状を復元する研究 [7] などが行われているが、いずれも表面形状の推定にとどまっており、内部の透明度分布までは復元されていない。また解析が容易な単一散乱を仮定し、内部の分布を求めた研究 [8][9] も行われているが、単一散乱の仮定は厚みに変化のある一般的な物体には適さない。さらに高周波照明法 [10] を拡張した多重高周波照明を用いて散乱成分を考慮し

¹ 京都大学 大学院情報学研究所

^{a)} yano@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

た半透明物体内部の分布を求めた研究 [11] も行われている。この研究では多重散乱を仮定しているが、表面形状は画像平面と平行である必要があり、本研究で用いるような未知形状の物体に適用することは困難である。

発光 発光現象についての研究としては自発光する流体の3次元形状復元が行われている [12]。こちらは物体の内部分布を点光源の分布として求めており、物体自身による散乱、減衰は考慮していない。

吸収 物体内部の吸収を扱う例として、ランベルト・ベールの法則による吸収の定式化がある。これを利用したものがコンピュータ断層撮影 (以下、CT) である。医学などで主に使用される CT は撮影対象に X 線を照射し、X 線の吸収率から内部画像を構成する技術である。X 線は不透明物体でも透過し、一般に物体表面の屈折も十分に無視できるため、画像の再構成にラドン変換を用いることができる。しかしこれを可視光に応用するには、物体内部の散乱および水槽表面の屈折が生じるためラドン変換を直接用いることはできない。また X 線 CT は散乱を考慮した研究も行われているが、光源環境及び物体形状が既知としてシミュレーションにより予め散乱を算出した値を使用したり [13]、散乱を除去するグリッドの使用 [14]、復元する物体形状に制約を設ける [15] など、光源環境および復元対象の形状が未知の場合への適用は困難である。

また生体などの半透明物体を対象とし、近赤外光を用いた光 CT についての研究も多く行われている [16]。特に吸収や散乱を含めた拡散を考慮した Diffuse Optical Tomography (DOT) が本研究と大きく関連する [17]。DOT は適当な散乱係数と吸収係数を仮定し光拡散方程式を解き、実際の測定結果との誤差を目的関数とする最適化問題によって計算するが、このとき近赤外線出射部分と物体、物体と受光素子部を密着させることにより物体表面での屈折を無視している。また DOT は物体の表面形状は既知であるものと仮定することで境界条件を定めて光拡散方程式を解いており、未知形状には適用が困難である。

これに対して本研究の特徴は以下の通りである。(1) 水中に物体を沈めることで物体表面の屈折は無視しているが、カメラと水槽の間での屈折は明示的にモデル化する。(2) DOT が物体表面形状を既知の形状とするのに対して未知の形状も扱う。

3. 計測モデル

先に述べたように、本研究では対象が存在する空間をボクセルを単位として離散化し、そのボクセルごとに透過・散乱といった光学現象をモデル化する。そのため以下第 3.1 節でボクセルとそのパラメータを定義し、ボクセルに

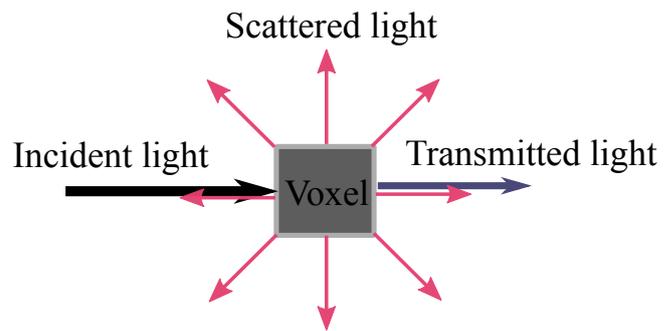


図 2 ボクセルに光線が入射した時の振る舞い

流入、流出するエネルギーを数式化する。続いて第 3.2 節で計測画素値の生成モデルを定義する。

3.1 ボクセル空間のパラメータ定義

本研究では対象空間をボクセル集合として離散化する。ただし

- (1) ボクセル空間は物体の全部分が含まれる、
 - (2) ボクセル境界における屈折および反射は無視する、
 - (3) ボクセルでの光の散乱は等方的である、
 - (4) 光源環境の波長の変化によるボクセルの透過率の変化は無視できる、
- と仮定する。

この仮定のもとで、ボクセルに光線が入射すると、図 2 のようにボクセルによる吸収と透過および等方散乱が生じる。ここである一定の光源環境下においてボクセルに入射する光線の放射束の和を $\int_{\Omega} \Phi(\Omega) d\Omega$ とし、そのような入射光線のうち、 x だけ透過、 y が散乱、残りの $1 - x - y$ が吸収されたと定義する。

本研究ではこのうち透過率 x を透明度、散乱光の放射強度 $s = \frac{y}{4\pi} \int_{\Omega} \Phi(\Omega) d\Omega$ を、現在の光源環境下における注目ボクセルによる等方性散乱を近似する点光源の強度と定義し、これらを推定する。なお x は光源環境に非依存であるのに対して、 s は光源環境により入射放射束の和が変化するため、光源環境に依存する。

3.2 画素値の生成モデル

本研究では図 3 のように計測対象のみを照射する光源を、対面するカメラと側面のカメラで撮影する環境を想定する。以下前者を正面カメラ、後者を側面カメラと呼び、正面カメラでは透過光と散乱光が、側面カメラでは散乱光のみが計測されると仮定して画素値の生成モデルを定義する。このとき水槽による屈折を含めたキャリブレーションには文献 [18] の方法を用いる。また事前に画素への入射放射束と計測画素値の関係が線形になるようにカメラが較正済みであるとする [19]。

3.2.1 透過光による画素値の生成モデル

図 4 のように、散乱光を無視して放射束 Φ の光線が複数

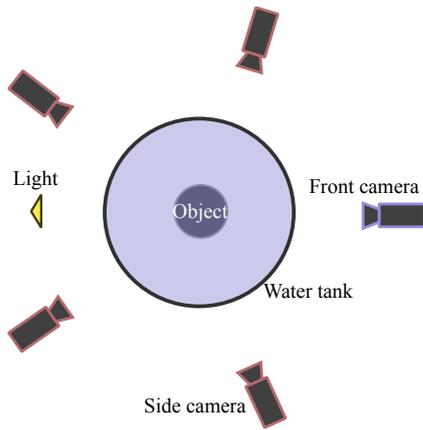


図 3 計測モデル

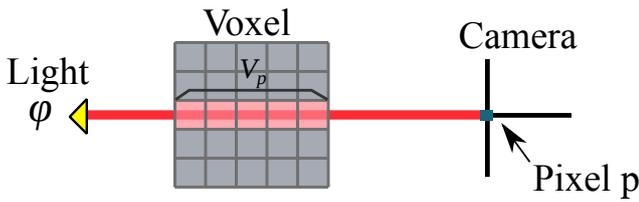


図 4 透過光による画素値の生成モデル

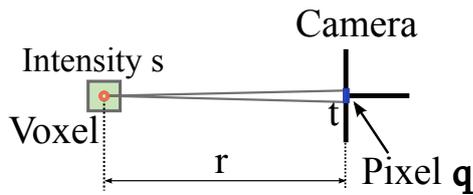


図 5 単体ボクセルの散乱光による画素値の生成モデル

のボクセルを透過して画素 P_t に到達するモデルを考える。このとき画素 p に流入する放射束 ϕ_p は

$$\phi_t = \Phi \prod_{i \in V_p} x_i \quad (1)$$

で与えられるとする。ただし V_p は画素 p に投影されるボクセルの集合、 x_i はボクセル i の透明度である。

ここで入射放射束と計測画素値の関係が線形となるように較正済みであるとしたため、画素 p における画素値 I_p は

$$I_p = K \Phi \prod_{i \in V_p} x_i \quad (2)$$

となる。

3.2.2 散乱光による画素値の生成モデル

図 5 のように単一のボクセルから散乱光として放射された放射束が、距離 r だけ離れた面積 t の画素 q に到達するモデルを考える。このとき画素 q に入射する放射束 ϕ_q は

$$\phi_q = \frac{t}{r^2} s \quad (3)$$

である。これを透過光の画素値の生成と同様に画素値 I_q へと変換すると

$$I_q = K \frac{t}{r^2} s \quad (4)$$

を得る。本研究では各カメラの画素サイズが同一であると仮定し、実効点光源強度 $s' = t s$ を推定する。

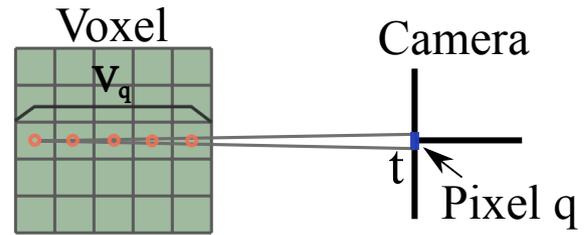


図 6 複数のボクセルの散乱光による画素値の生成モデル

続いて図 6 のように画素に対応する光線上の複数のボクセルからの散乱光が画素 q に到達するモデルを考えると、画素値 I_q は

$$I_q = K \sum_{i \in V_q} \left[\frac{1}{r_i^2} \left(\prod_{x_j \in V_{i,q}} x_j \right) s'_i \right] \quad (5)$$

となる。ただし s'_i はボクセル i の実効点光源強度、 r_i はボクセル i からカメラまでの距離、 V_q は画素 q に投影されるボクセルの集合、 $V_{i,q}$ は画素 q に投影されるボクセル集合のうちボクセル i とカメラの間にあるボクセルの部分集合である。

3.2.3 計測画素値の生成モデル

前述の計測モデルに基づく、正面カメラの各画素は透過光と散乱光の両方が入射するのに対して、側面カメラは散乱光のみが入射する。すなわち正面カメラの画素値 $I_p^{(f)}$ は

$$I_p^{(f)} = \Phi K \prod_{i \in V_p} x_i + K \sum_{i \in V_p} \left[\frac{1}{r_i^2} \left(\prod_{x_j \in V_{i,q}} x_j \right) s'_i \right] \quad (6)$$

で与えられ、側面カメラの画素値 $I_p^{(s)}$ は

$$I_p^{(s)} = K \sum_{i \in V_p} \left[\frac{1}{r_i^2} \left(\prod_{x_j \in V_{i,p}} x_j \right) s'_i \right] \quad (7)$$

となる。以下では式 (6) および式 (7) を用いて各パラメータの推定を行う。

4. 透明度および実効点光源強度の推定

本節では対象が存在する空間が与えられ、その空間を離散化した各ボクセルが各カメラではどの画素へと投影されるかは既知であるとしたときに、前節のモデルを用いて透明度と実効点光源強度を推定する。

式 (6) および式 (7) は、どちらも透明度 x および実効点光源強度 s' をパラメータとして持つが、式 (6) の透過光の項である式 (2) は透明度のみをパラメータとして持つことに着目し、まず初期値として正面カメラでは透過光成分が支配的であると仮定して、式 (2) を用いて透明度の初期値

を線形に求める．続いて式 (7) において透明度を既知として，実効点光源強度の初期値を線形に算出する．最後にこれらの初期値を用いて式 (7) と式 (6) による透明度と実効点光源強度の交互推定を行う．

以降第 4.1 節で散乱光を無視した透明度の推定，第 4.2 節で透明度を補正するための実効点光源強度の推定，第 4.3 節で透明度と点光源強度の交互推定について述べる．

4.1 散乱光を無視した透明度の推定

外部光源のある点から放射束 Φ が複数のボクセルを通過し，正面カメラの画素 $P^{(f)}$ で観測される透過光は式 (2) のようになる．この式の両辺で対数をとると

$$\log I_P^{(f)} = \log \Phi + \log K + \sum_{i \in V_P^{(f)}} \log x_i \quad (8)$$

を得る．一方で，同一の光源環境において撮影対象が存在しない場合に得られる画素値を $J_P^{(f)}$ とする．このとき

$$\log J_P^{(f)} = \log K + \log \Phi \quad (9)$$

を得る．式 (8) と式 (9) の差から

$$\log I_P^{(f)} - \log J_P^{(f)} = \sum_{i \in V_P^{(f)}} \log x_i \quad (10)$$

を得ることができる．ここでボクセルは 1 から N 番まで存在し， i 番目のボクセルが j 番目の画素に投影されるなら 1，そうでなければ 0 となるような，幾何学的キャリブレーションを反映した変数 a_{ij} を導入すると，一般に j 番目の画素について

$$\log I_j - \log J_j = \sum_{i=1}^N a_{ij}^{(f)} \log x_i \quad (11)$$

と記述できる．

これを k 番目のカメラにおけるすべての画素について記述することで，対数透過率 $\mathbf{x}' = (\log x_1, \dots, \log x_N)^\top$ を変数とする次の連立方程式を得る．

$$(\mathbf{I}'_k - \mathbf{J}'_k) = A_k^{(f)} \mathbf{x}' \quad (12)$$

ただし $\mathbf{I}'_k = (\log I_1, \dots, \log I_M)^\top$ ， $\mathbf{J}'_k = (\log J_1, \dots, \log J_M)^\top$ ，であり， $A_k^{(f)}$ は $a_{ij}^{(f)}$ を j 行 i 列の要素とする観測行列である． M はボクセルが投影されたカメラ画素数である．

さらに各カメラが正面カメラとなるように，照明環境を切り替えながら撮影を行ったとすると，対数透過率 \mathbf{x}' を共通の変数として，左辺が計測画素値，右辺が各カメラの計測行列と \mathbf{x}' からなる連立方程式

$$\mathbf{b}^{(f)} = A^{(f)} \mathbf{x}' \quad (13)$$

を得ることができる．ただし

$$\mathbf{b}^{(f)} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}'_1 - \mathbf{J}'_1 \\ \vdots \\ \mathbf{I}'_H - \mathbf{J}'_H \end{pmatrix} \quad A^{(f)} = \begin{pmatrix} A_1^{(f)} \\ \vdots \\ A_H^{(f)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

であり H は使用するカメラの台数である．

この連立方程式の拘束式の数は，対象を撮影した多視点カメラ群の全有効画素数に等しく，一方で未知数は各ボクセルの透明度である．このような定式化は参照物体を用いて光源環境を点光源集合としてモデル化する際にも現れるように，空間的に近接する光線に対応する拘束式同士の類似性が高く，見かけ上の拘束式数が十分であっても，実質的にはランク落ちをすることが多い [1]．

そこで本研究では，この式から一般解をまず求めて，その中から透明度に関するモデルをもっともよく満たす解を選択するアプローチを採る．すなわち行列 $A^{(f)}$ の特異値 0 に対応する i 番目の右特異ベクトルを \mathbf{e}_i としたとき，一般解としての透明度分布

$$\mathbf{x}'_w(\mathbf{w}) = \mathbf{x}'_0 + \sum w_i \mathbf{e}_i \quad (15)$$

を得る．ただし w_i は任意の重み変数であり， \mathbf{x}'_0 は $\mathbf{x}_0 = (A^\top A)^{-1} A^\top \mathbf{b}'$ によって得られた特殊解である．

続いて透明度分布について空間的連続性をモデルとして仮定し，下記のように隣り合うボクセルの透明度の絶対値誤差を最小化するような透明度分布を選択する．

$$\arg \min_{\mathbf{w}} \sum_{(j,k) \in N} |x'_j - x'_k| \quad (16)$$

s.t. $\mathbf{x}' \leq 0$

ただし N は隣接するすべてのボクセル対の集合である．この目的関数は明らかに凸関数であるため，凸最適化問題 [20] として解くことによって拡散成分を無視した場合の透明度分布 $\tilde{\mathbf{x}}$ を得ることができる．

4.2 実効点光源強度分布の推定

第 3.2 節で述べたように，拡散成分のみを撮影する側面カメラの画素値 $I_p^{(s)}$ は式 (7) によって記述できた．前節に倣って式 (7) を式 (11) と同様に表現すると，

$$I_j^{(s)} - J_j^{(s)} = \sum_{i=1}^N a_{ij}^{(s)} s'_i \quad (17)$$

と書ける．ここで $a_{ij}^{(s)}$ は i 番目のボクセルから散乱する光線が j 番目の画素に入射していれば $\frac{K}{r_{ij}^2} (\prod_{x_k \in V_{i,j}} x_k)$ ，してなければ 0 となる変数であり， $J_j^{(s)}$ は物体が存在しないときに当該カメラで撮影された背景画像である．

前述のように，透明度を前節で求めた初期値によって固定し， q_i が定数であるとみなすと，前節と同様にこの式 (17) から s' を変数とする連立方程式を作成することができる．

$$\mathbf{b}'^{(s)} = A^{(s)} \mathbf{s}' \quad (18)$$

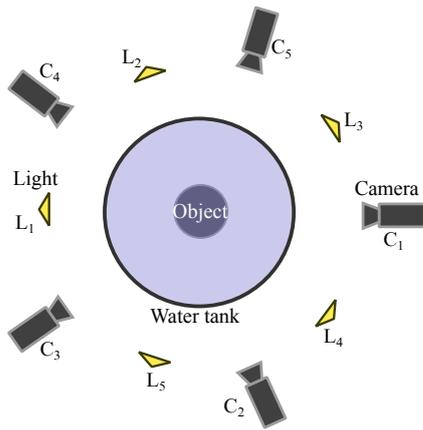


図 7 光源とカメラの配置

ただし B は A に対応する観測行列, $\mathbf{b}^{(s)}$ は $\mathbf{b}^{(f)}$ に対応する計測画素値である. この式をもとにして, 前節と同様に空間的連続性をもっとも高くなるような分布を推定することにより, 実効点光源強度分布の初期値 \mathbf{s}' を得ることができる.

4.3 透明度と実効点光源強度の交互推定

第 4.1 節および第 4.2 節で透明度および実効点光源強度の初期値を得ることができた. 本節ではこれらと式 (6) および式 (7) を用いて, 透明度と実効点光源強度の交互推定を行う. すなわち式 (6) において点光源強度を既知とした透明度の推定を行い, 式 (7) において透明度を既知とした点光源強度の推定を行う. ただし式 (6) において, 散乱光の画素値の生成モデルに含まれている透明度は前ステップの値を用い, 透過光の画素値の生成モデルに含まれている透明度のみを未知数とする.*1

4.4 アルゴリズム

図 7 のように 1 つの光源に対して正対するカメラが 1 台ずつ, 合計 H 組の光源-カメラペアを備えた撮影環境を想定する. なおカメラを (C_1, \dots, C_H) , 光源を (L_1, \dots, L_H) とし, i 番目のカメラ C_i の正面に, 撮影対象を挟んで光源 L_i が配置されているものとする.

まず $C_i (i = 1, \dots, H)$ のカメラの対面にある光源 L_i を発光させて H 台のカメラで撮影する. これにより C_i が正面カメラ, $C_1, \dots, C_{i-1}, C_{i+1}, \dots, C_H$ が側面カメラとなって, 光源 L_i 環境下における正面カメラ画像 $I^{(f,i,i)}$ と $H-1$ 枚の側面カメラ画像 $I^{(s,i,j)} (j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, H)$ を得る. これを順に $i = 1, \dots, H$ まで行い, 正面カメラ C_1, \dots, C_H の画像が各一枚と各光源下 L_1, \dots, L_H における側面カメラの画像を各カメラで $H-1$ 枚ずつ得ることができる.

*1 CVIM 原稿では透明度と点光源強度の非線形最適化による同時推定を行うと記述したが本研究では本文中に述べたような交互推定を用いて実装している.

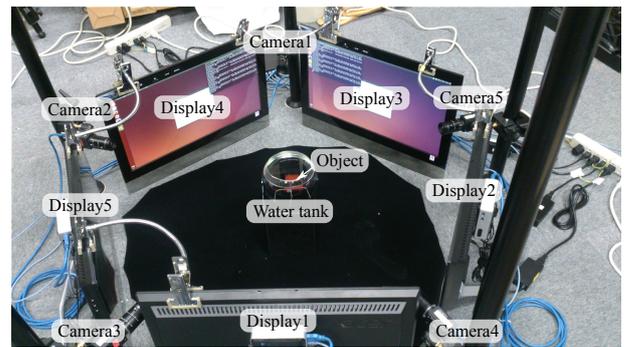


図 8 実験環境



図 9 穴の空いた吸水性ポリマー

上記の撮影を対象が存在する場合と存在しない場合について行い, まず各カメラで背景差分によって多視点シルエットを得る. このシルエット群から視体積交差法により visual hull を計算し, その内部をサンプリングすることで対象が存在するボクセル空間を獲得する.

続いて第 4.1 節, 第 4.2 節の手法によって初期透明度 \bar{x} および各光源環境下における初期実効点光源強度 $\bar{\mathbf{s}}'$ を計算し, 最後に第 4.3 節の手法から透明度 x および各光源環境下における実効点光源強度 $(s'^{(j)} (j = 1 \dots H))$ の交互推定を行うことで最終的な推定値を得る.

5. 評価実験

5.1 実験環境

図 8 のように 5 台のカメラ (PointGray Grasshopper3) を用いて, 中央の球形状の水槽内に置かれた物体形状およびその内部の透明度を算出した. 光源はディスプレイ (Aser T272HL) を使用し, 復元する物体は図 9 のような穴の空いた吸水性ポリマーを用いた.

5.2 評価方法

評価用カメラを 1 台定め, すべてのカメラで透明度を推定した後, 評価用カメラに再投影する. 評価用カメラで実際に撮影されたグレースケール画像と比較することにより評価を行う.

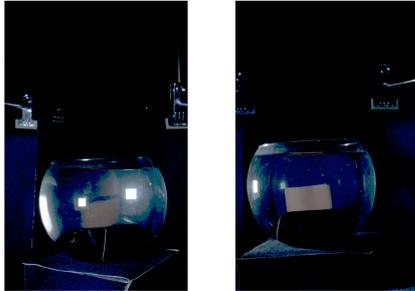
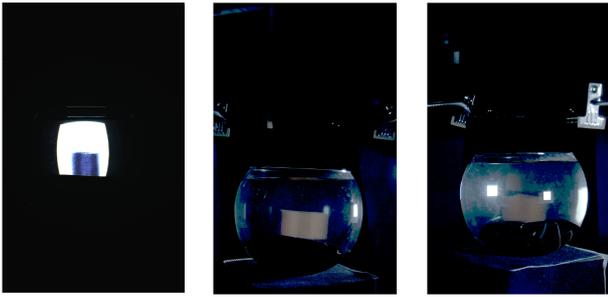


図 10 ある光源環境において撮影された画像

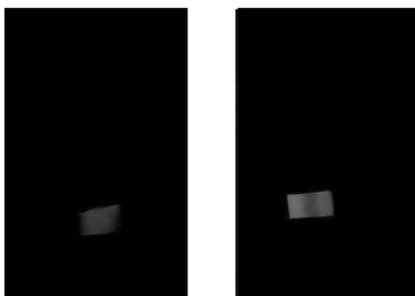
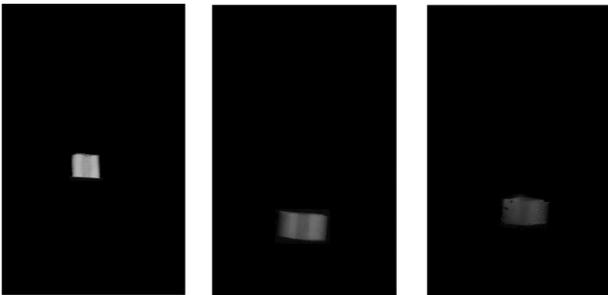


図 11 背景差分を行った画像

5.3 実験結果

ある光源環境下において撮影された画像を図 10 に、背景差分を行った画像を図 11 に示す。図 10, 11 において左上が正面カメラで撮影された画像、その他が側面カメラから撮影された画像である。なお側面カメラについては可視化のために画像を加工している。図 10, 11 ともに穴の空いている部分が画素値の変化として表れていることが確認できる。

視体積交差法による Visual Hull の結果を図 12 に示す。視体積交差法の特長上、穴の空いている部分は形状復元することができていない。

図 13 に推定された透明度を、図 14 に推定された実効点光源強度を示す。図 13 について左が視体積交差法により

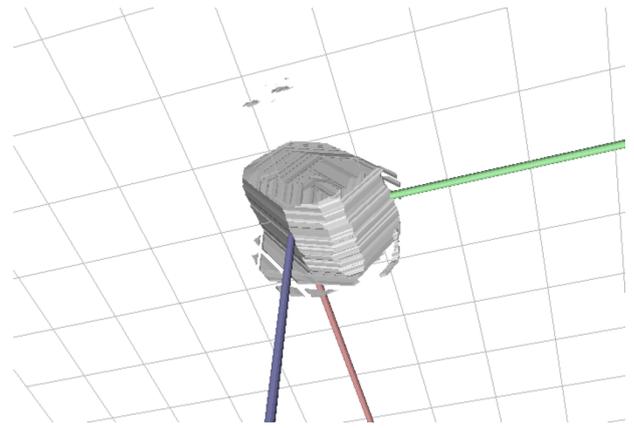


図 12 Visual Hull

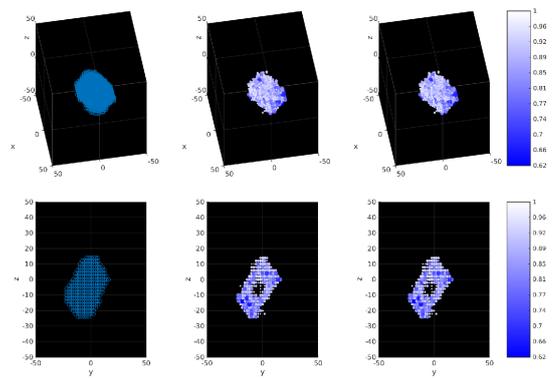


図 13 推定された透明度

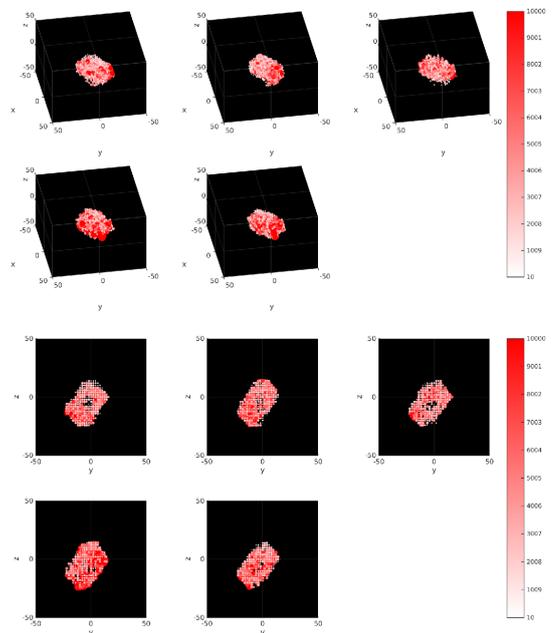


図 14 推定された 5 つの光源環境下における実効点光源強度

獲得したボクセル、中央および右はそれぞれ散乱を考慮しない場合とした場合の透明度の分布である。図 14 について左上から各光源環境における実効点光源強度分布を示している。またどちらも 2 つの視点から表示している。図 13

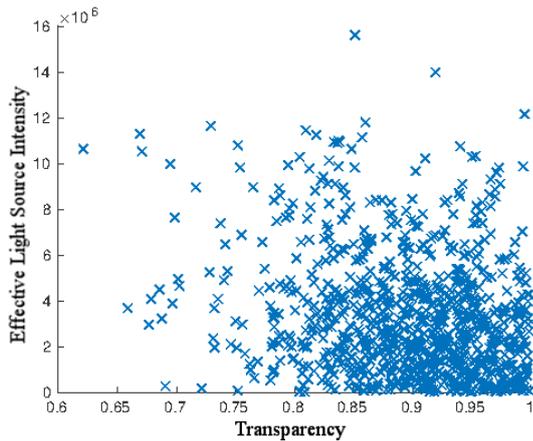


図 15 透明度と実効点光源強度の関係

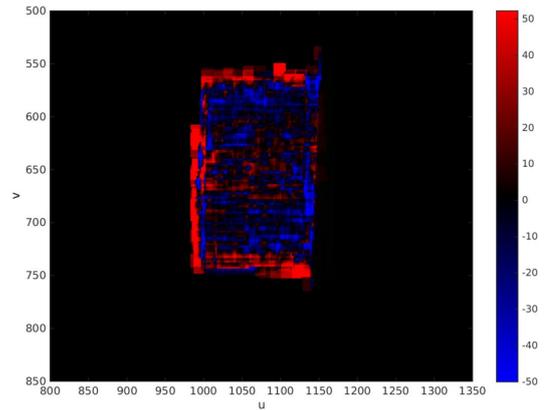


図 17 再投影誤差を表した画像



図 16 撮影された評価画像および再投影により作成された画像

から Visual Hull には観察されなかった穴の空いている部分も復元できていることが分かる。また視体積交差法により得られた形状よりも、推定された透明度から推定できる表面形状は物体の存在する範囲が限定されている。実験で用いた物体の形状は長方形に近い形であることから、この結果は妥当であると考えられる。図 14 は透明度分布に比べると、穴の空きが顕著ではなかった。これは実効点光源強度分布を、透明度分布の推定の時よりも一台少ないカメラ 4 台で推定したことによる精度の低下が原因であると考えられる。

図 15 に透明度と実効点光源強度の関係を示す。図 15 によると透明度が低いほど実効点光源強度が高くなっていることが分かる。実際に相関係数の値は -0.26 となり弱い相関が見られた。これは 3.1 節で示したエネルギーの定義により透過の割合が低いと、散乱や吸収の割合が大きくなるというエネルギーの式から妥当であると考えられる。

図 16 に撮影された評価画像と再投影により作成された画像を示し、図 17 に評価用のカメラに再投影した際の誤差を示す。図 17 によると物体のエッジの部分に誤差が大きく出ている。これはボクセルが物体の境界をまたいで存在するために、再投影すると物体からはみ出した部分が誤

差として表れているものであると考えられる。このことを考慮して物体のエッジ部分を除いた誤差の平均値は散乱を考慮しない場合は 11.42、考慮した場合は 11.36 となり散乱を考慮することにより透明度の精度が上昇した。

6. 今後の課題

本研究では散乱現象を考慮した半透明物体の 3 次元形状復元を行った。提案手法の特徴は、特に光源環境を明示的にキャリブレーションする必要がなく、また特別な機材を用いずに多視点撮影画像から透明度分布推定を行った点にあったが、一方で下記のような課題が残されている。

- (1) 今回得ることができた実効点光源強度は撮影環境の光源に依存する値であり、物体固有の拡散係数を得ることができなかった。このことは光源環境を明示的にキャリブレーションする必要がないという本手法の限界であり、今後は光源環境キャリブレーションも視野に入れて光源環境に非依存な散乱成分のモデル化を考える必要がある。
- (2) 透明度、拡散係数の分布が連続であると仮定したが、これは必ずしも正しいとは限らない。撮影画像から得られるエッジ情報などを用いて、より適応的な連続性制約を導入する必要がある。
- (3) 透明度、拡散係数の波長依存性について全く考慮していないため、異なる波長をもつ光源環境下での見えを再現できる保証がない。

今後はこれらの点についてさらに検討を進める予定である。

謝辞

本研究は科研費（課題番号 26240023）の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Matsuyama, T., Nobuhara, S., Takai, T. and Tung, T.: *3d Video and Its Applications*, Springer (2012).

- [2] Atcheson, B., Ihrke, I., Heidrich, W., Tevs, A., Bradley, D., Magnor, M. and Seidel, H.-P.: Time-Resolved 3d Capture of Non-stationary Gas Flows, *Acm Trans. Graph.*, Vol. 27, No. 5, pp. 132:1–132:9 (2008).
- [3] Ihrke, I. and Magnor, M.: Image-based Tomographic Reconstruction of Flames, *Acm Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 365–373 (2004).
- [4] Morris, N. and Kutulakos, K. N.: Dynamic Refraction Stereo, *ICCV*, pp. 1573–1580 (2005).
- [5] Ihrke, I., Goldluecke, B. and Magnor, M.: Reconstructing the Geometry of Flowing Water, *ICCV*, pp. 1055–1060 (2005).
- [6] Kim, J., Lanman, D., Mukaigawa, Y. and Raskar, R.: Descattering Transmission via Angular Filtering., *ECCV*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6311, pp. 86–99 (2010).
- [7] Inoshita, C., Mukaigawa, Y., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Shape from Single Scattering for Translucent Objects., *ECCV*, lecture notes in computer science, Vol. 7573, pp. 371–384 (2012).
- [8] Gu, J., Nayar, S. K., Grinspun, E., Belhumeur, P. N. and Ramamoorthi, R.: Compressive Structured Light for Recovering Inhomogeneous Participating Media, *ECCV* (2008).
- [9] Narasimhan, S., Nayar, S., Sun, B. and Koppal, S.: Structured Light in Scattering Media, *ICCV*, pp. 420–427 (2005).
- [10] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D. and Raskar, R.: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene Using High Frequency Illumination, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (2006).
- [11] 田中賢一郎, 向川康博, 久保尋之, 松下康之, 八木康史: 多重高周波照明による半透明物体内部のスライス可視化, *CVIM 研究会*, Vol.2015-CVIM-195 No.24 (2015).
- [12] Gregson, J., Krimmerman, M., Hullin, M. B. and Heidrich, W.: Stochastic Tomography and Its Applications in 3D Imaging of Mixing Fluids, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 4, pp. 52:1–52:10 (2012).
- [13] Jarry, G., Graham, S., Jaffray, D. and Moseley, D.: Scatter Correction for Kilovoltage Cone-beam Computed Tomography (CBCT) Images using Monte Carlo Simulations” (2006).
- [14] Ruola Ning, Xiangyang Tang, D. C.: X-ray Scatter Correction Algorithm for Cone Beam CT Imaging, *Medical Phys.*, Vol. 31, pp. 1195–1202 (2004).
- [15] 馬場理香, 植田健, 高橋満理子, 中納治久, 榎宏太郎: コーンビーム CT における散乱 X 線の補正, *Medical Imaging Technology*, Vol. 27, pp. 177–184 (2009).
- [16] Arridge, S. R.: Optical Tomography in Medical Imaging, *Inverse Problems*, Vol. 15, No. 2, p. R41 (1999).
- [17] Jiang, H.: *Diffuse Optical Tomography: Principles and Applications*, CRC Press (2010).
- [18] Tomohiko, Y., Shohei, N. and Takashi, M.: 3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-view Synthesis, *IPSS Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 5, pp. 65–69 (2013).
- [19] Javed, O., Shafique, K. and Shah, M.: Appearance Modeling for Tracking in Multiple Non-overlapping Cameras., *CVPR*, pp. 26–33 (2005).
- [20] Boyd, S. and Vandenberghe, L.: *Convex Optimization*, Cambridge University Press (2004).