

## 光の散乱を考慮した水中物体の拡散反射率の推定 Estimation of Diffuse Reflectance of Underwater Objects Using a Scattering Model

池田 聖<sup>†</sup> 眞鍋和寛<sup>†</sup> 井村 誠孝<sup>†</sup> 眞鍋 佳嗣<sup>†</sup> 千原 國宏<sup>†</sup>  
IKEDA Sei<sup>†</sup> MANABE Kazuhiro<sup>†</sup> IMURA Masataka<sup>†</sup> MANABE Yoshitsugu<sup>†</sup> CHIHARA Kunihiro<sup>†</sup>

### 1. はじめに

自然遺産や文化遺産をデジタルアーカイブする第一の目的は、計算機内に対象物を視覚的に再現し、離れた場所、異なる時間に多くの人々が対象を観察出来るようにすることである[5][4]。遺産の中でも、大規模であるため運搬が難しく、時間と共に変化(環境汚染等により劣化消滅)する水中遺産は、デジタルアーカイブの必要性が最も高い対象の1つである。水中遺産とは、サンゴ礁などの水中自然遺産や水没した遺跡などの水中文化遺産のことであり、これらをデジタルアーカイブにより視覚的に再現し、自由な視点や自由な光源環境下で観察出来るようにするためには、対象物本来の表面形状および表面反射特性を取得しなければならない。

本研究では、カメラおよびレーザレンジファインダにより、大規模な水中遺産表面の形状および反射率を推定する手法の開発が目的である。表面形状については、媒質の屈折率の違いを考慮する[8]ことにより、幾何学的には空中における形状計測問題と等価となり、従来の手法[4]を適用することができる。反射率特性については、従来の媒質の影響が考慮されていない手法をそのまま適用することは出来ない。水中で撮影された対象物は、水や浮遊物により光が吸収および散乱され、本来の表面色よりも青みがかる上、低いコントラストで観測されるためである。

本稿では、対象物と色・形状が既知のマーカをカメラおよびレーザレンジファインダで撮影し、得られたカラー画像と奥行き画像から、媒質による拡散・吸収率および対象表面の拡散反射率を推定する手法を提案する。提案手法では、媒質の拡散・吸収を考慮した観測モデルによりマーカの輝度値予測し、入力画像中のマーカの輝度値と予測値が一致するよう、媒質の拡散・吸収率を推定する。次に、推定された拡散・吸収率を用いて、拡散によるバイアスと吸収による輝度低下率の効果を除去し、対象の拡散反射率を算出する。実験では、空気中で撮影した画像と媒質の影響を除去した画像を比較し、提案手法を評価する。

### 2. 関連研究と本研究の位置づけ

水中遺産表面の正確な表面反射率を取得するためには、取得したカラー画像から媒質による吸収・散乱の影響を除去する必要がある。媒質の影響を除去する従来の手法は、筆者らの調べでは、(1)偏光フィルタを用いて直接カメラに入射する散乱光を低減させる手法、(2)自然環境光の一般的な特性から画像を補正する手法、(3)人工の光源を用いて媒質の特性を推定し、画像を補正する手法、の3種類に分けられる。

偏光フィルタを用いた手法では、水中撮影における散乱のみの影響であれば、偏光フィルタを用いて除去することができる[3][2][9]。これは、媒質による散乱光は偏光

が生じるのに対し、観測対象物の反射光は偏光していないことを利用して、偏光フィルタを用いれば散乱光をカットできるためである。ただし、これらの手法では、媒質の吸収による効果を除去することはできない。

自然環境光下で撮影された画像を補正する手法では、ある代表的な光源環境を想定し、画像全体のコントラストを高める。こういった手法では、画像中の対象物の奥行き情報を用いないため、対象の奥行きにより異なる(散乱と吸収による)減衰の効果を除去することができず、このため正確な反射率の推定は難しい。

吸収および散乱の両影響を除去する従来手法の多くは、人工の光源の光源を用い、自然環境光が入射しにくい夜や暗室で撮影された画像を用いる。カメラに対する光源の位置関係が分かっているならば、媒質による光の吸収および散乱のモデルを使用することができる。媒質を介して放射輝度が既知のスリット状のレーザの軌跡[6]や球状の光源[7]を観測することにより、媒質による吸収率および散乱率を推定できる。推定した吸収・散乱率を用いてモデルに入力画像の輝度値を当てはめ、反射率が逆算される。

これらの手法では、画像中の光源やレーザの軌跡の輝度値の変化を観測するため、カメラのダイナミックレンジの制限上、本来の観測対象の輝度に対応するレンジが狭くなるという問題がある。計測精度を重視した場合、最も理想的な方法は、観測対象と近い位置に、観測対象に近く既知の色の基準物体を配置し、輝度の減衰を計測することにより媒質特性を推定する方法である。本研究では、これらの手法と同様に人工の光源を用いるが、上記問題を解決するために、色と形状が既知の限られた数のマーカを用いて、媒質の吸収・散乱率と対象の反射率を推定する。

### 3. 計測環境についての前提条件

水中遺産を計測する環境のモデルを考える。本研究で想定する計測装置は、図1に示すように、主にカメラ、レンジファインダ、光源、マーカにより構成される。

カメラおよびレンジファインダは、防水ケースや保護ケースに覆われていることがあり、受光部分とケースの間に空気の層が存在することがある。本研究では、このような状況を想定して後述する実験環境を設定する。また、本稿では、カメラとレンジファインダにより、各画素が対応するカラー画像と距離画像が同時に取得できる装置を想定する。両装置の投影中心が一致していない場合でも、各画像を取得後、カラー画像と距離画像の位置合わせを行うことで、問題を同等に扱うことが出来る。

光源は、カメラとレンジファインダに対する位置が変わらないよう、アームで固定されており、白色の点光源であるとする。後述するがレーザなどの視準された光源についても大きく変わらない。

マーカは、Lambert面を持つ平面物体である。拡散反射係数は予め計測されており、既知であるとする。空気中と水中とで反射係数が変化しない素材を選択する。マーカは、カメラと計測対象の間や計測対象表面近くにも配置できるが、対象の規模が大きいため観測空間全ての位置に正確に配置することはできない。マーカの位置および姿勢は未知とする。

以上より、本稿で取り扱う問題において、入力であるカラー画像と距離画像以外に既知な情報は、カラー画像と距離画像の対応点、カメラに対する光源の位置、マーカの反射特性である。

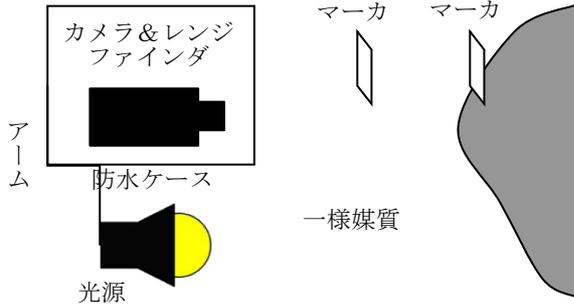


図 1: 水中遺産計測用カメラモデル

#### 4. カラー・奥行き画像からの拡散反射率推定

上述の計測環境により得られたカラー画像および奥行き画像から拡散反射率を推定する手順について述べる。

##### 4.1 画像輝度の予測

前節で述べた計測環境において、媒質の吸収率  $a$  および散乱率  $b$  (両効果による減衰率を  $c = a + b$ )、対象の拡散反射率  $d$  が与えられたとき、観測される画素  $(u, v)$  の放射輝度  $I(u, v)$  の算出手法について述べる。ただし、以下で述べる処理は全て、RGBの各チャンネル独立に行う。

媒質が光を散乱する場合、画素  $(u, v)$  に入射する光線上の各点  $\mathbf{r}(z) = (uz, vz, z)$  をある放射輝度  $R(z)$  の光源とみなすことができるので、画素  $(u, v)$  の放射輝度  $I$  はこれらの光源から来る光の総和として以下のように算出できる。

$$I(u, v) = \int_0^{z_{surface}} \frac{R(z)}{4\pi |\mathbf{r}|^2} e^{-c|\mathbf{r}|} dz$$

ただし、 $z$  は任意の奥行き、 $z_{surface}$  は計測対象表面までの奥行きであり、簡単化のためカメラの焦点距離が  $1 (\ll z)$  の単位系で表現した。各点  $\mathbf{r}(z)$  から放たれた光は、撮像面に到達するまでに距離により減衰 ( $1/4\pi |\mathbf{r}|^2$  の項) し、媒質により減衰 ( $e^{-c|\mathbf{r}|}$  の項) する。

光線上の各点  $\mathbf{r}(z)$  の放射輝度  $R(z)$  は、カメラに対して  $\mathbf{s}$  の位置に固定されている放射輝度  $L$  の点光源から放射された光が、吸収と散乱により減衰したものであるから、以下のように表現できる。

$$R(z) = \frac{Lc}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{s}|^2} e^{-c|\mathbf{r} - \mathbf{s}|}$$

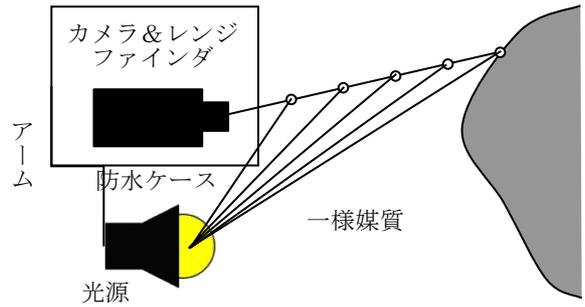


図 2: 媒質による光の一次散乱モデル

ただし、対象表面上の点  $\mathbf{r}(z_{surface})$  では、媒質ではなく反射角  $\theta$  の拡散反射による減衰が生じるため、以下の式で表される。

$$R(z_{surface}) = \frac{Ld \cos\theta}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{s}|^2} e^{-c|\mathbf{r} - \mathbf{s}|}$$

反射角  $\theta$  は、距離画像から計測対象の法線方向を算出し、カメラの方向ベクトルのなす角として算出できる。

##### 4.2 吸収・散乱率の推定

観測された  $n$  個のマーカの輝度  $M_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) から減衰率  $c$  を算出する手順について述べる。マーカ  $i$  の座標座標を  $(u_i, v_i)$  とすると、チャンネル  $\lambda (= R, G, B)$  予測される輝度  $I_i$  と観測値であるマーカの輝度  $M_i$  の差  $\varepsilon_i(\lambda) = |M_i - I_i|$  が予測誤差である。全てのマーカの予測誤差を最小にするために、以下の評価式を最小化する減衰率  $c$  を求める。

$$E(c) = \sum_{\lambda} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(\lambda)^2$$

ただし、上記評価式は減衰率  $c$  についての非線形の関数である。減衰率  $c$  の初期値を 0 とし、Levenberg-Marquardt アルゴリズム等で最適解を求める。

##### 4.3 拡散反射率の算出

推定された媒質による減衰率  $c$  と入力画像から、媒質による吸収・散乱の影響を除去した画像および対象物体の拡散反射率を算出する。散乱の影響を除去した画像については、各画素に対して  $d \cos\theta$  を求めることで得られる。拡散反射率  $d$  については、計測対象の法線方向を距離画像から算出し、上記結果を  $\cos\theta$  で割ることで得られる。

#### 5. 実験

提案手法の有効性を確認するために、2種類の未知対象物の画像を撮影し、媒質の減衰効果を除去および反射率を推定した。

##### 5.1 実験環境と実験条件

実験では、図 3 に示すように、水槽の中に計測対象物と光源を入れ、水槽の外から壁面に設置するようにカメラを配置し、画像の撮影を行った。全ての画像取得および幾何学[10]・光学キャリブレーションは水槽のガラスを介して行ったが、実際に水中遺産を計測する環境では、

第3章で述べた防水ケースに相当する。

また、水槽のガラス面での屈折の影響を簡単に扱うため、水中の対象の奥行きデータは水を入れていない状態で計測した。これにより屈折の影響を含まない奥行き画像を取得した。ただし、これによりカラー画像と奥行き画像は各画素間が対応しなくなる。これに対しては、不正確ではあるが、今回は対応する4点を用いて、一方をアフィン変換し画素間の対応をとった。

カメラとレーザレンジファインダとしての計測機器には、VIVID910 (KONICA MINOLTA 社製) を用い、光源には電球型蛍光灯ランプ、マーカには蛍光塗料を含まない複数色のスチロール板をタイル状に並べて使用した。媒質には、海水を模して水道水に緑色の絵の具を混ぜて使用した。

媒質による減衰率を推定するために、マーカを奥行き600mm, 650mm, 700mmの位置に正対させて撮影した画像と、奥行き650mmの位置に底辺を設置させ、上向き約45度に傾けて撮影した画像を用いた。以上により44点のマーカの輝度値を取得して使用した。

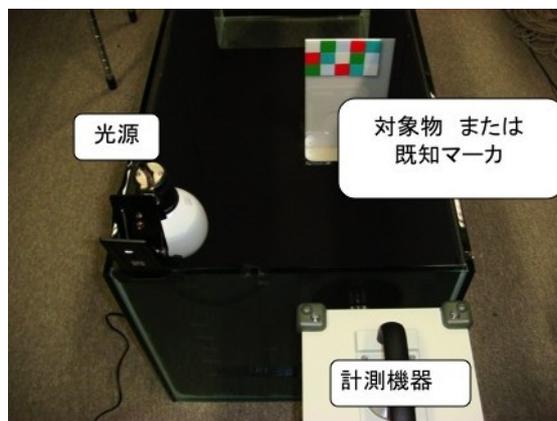


図3：実験環境

## 5.2 実験結果

図4に平面对象、図5に非平面对象の入力画像と結果を示す。全ての結果において、散乱の影響が除去されていることが確認できる。(ただし、結果画像および拡散反射率を表す画像中の下部分の黒い箇所は、レンジファインダにより奥行き取得が失敗した部分である。)

しかし、図4および図5の全結果画像のコントラストが入力画像と異なっている。具体的には、真水を用いた結果では、空气中で撮影した結果よりも高いコントラストが得られ、絵の具を入れた水を用いた結果では、空气中で撮影した結果よりも、コントラストが低くなっている。

これは、入力画像中の散乱・吸収の影響の割合が高くなることにより、対象反射率の分布を観測するのに割り当てられる輝度の幅が小さくなるためと考えられる。真水を用いた結果でコントラストが高くなっているのは、今回真水に対象を入れた状態で最も適切なゲインになるようにカメラを設定したため、空气中では対象に照射する光が強すぎる可能性がある。この問題に対しては、輝度に関して高分解能なカメラの使用や複数の画像を撮

影し、SN比を高めるという手法が考えられる。

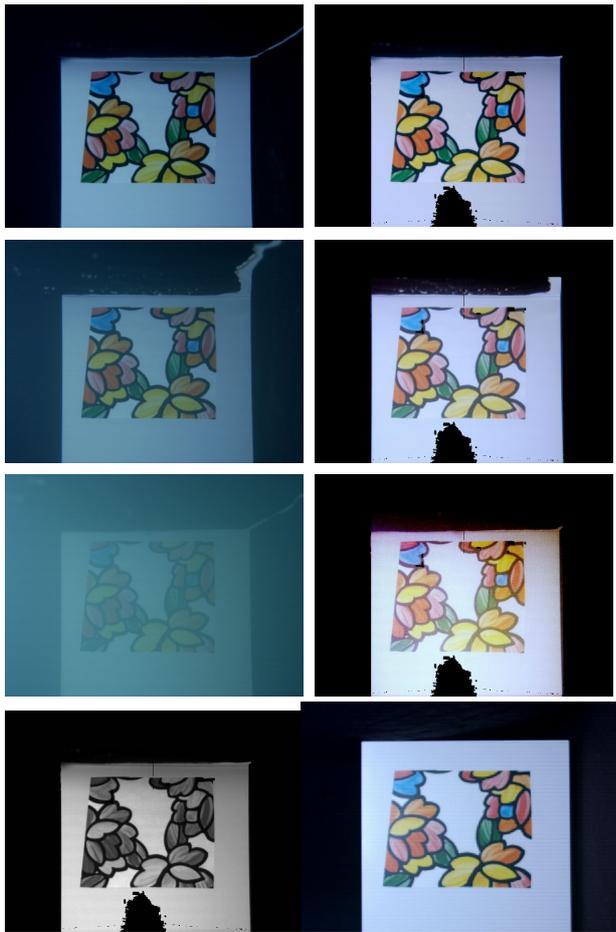
図5の非平面对象の拡散反射係数が算出されていないのは、今回使用した対象の表面に光沢があり、レンジファインダのレーザを反射して正確な表面の法線が得られなかったためであるが、実際の水中遺産ではこのような現象は少ないと考えられる。今後は、形状や材質が水中遺産に近い対象で実験したい。

## 6. まとめ

本稿では、水中遺産のデジタルアーカイブを想定し、対象物と色・形状が既知のマーカをカメラおよびレーザレンジファインダで撮影し、得られたカラー画像と奥行き画像から、媒質による散乱・吸収率および対象表面の拡散反射率を推定する手法を提案した。提案手法では、媒質の拡散・吸収を考慮した観測モデルを用い、入力画像との予測誤差を最小化することにより、拡散・吸収率を推定し、輝度の補正画像および拡散反射率を算出することができる。媒質の散乱・吸収率が小さい場合には、現在の手法でも、媒質の影響を除去できることが分かった。今後は、媒質の散乱・吸収率が高い場合に対応するために、ダイナミックレンジが広く、輝度分解能が高い画像を用いて提案手法の評価をしたい。

## 参考文献

- [1] Atsushi Yamashita, Akira Fujii and Toru Kaneko, "Three dimensional measurement of objects in liquid and estimation of refractive index of liquid by using images of water surface with a stereo vision system", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2008), pp. 974-979, 2008.
- [2] G. C. Giakos, "Active backscattered optical polarimetric imaging of scattered targets", Proc. IEEE Instr. & Measurement Tech. Conf., vol. 1, pp. 430-432, 2004.
- [3] G. D. Gilvert and J. C. Pernicka, "Improvement of underwater visibility by reduction of backscatter with a circular polarization technique", App. Opt., No. 6, pp. 741-746, 1967.
- [4] Katsushi Ikeuchi, Daisuke Miyazaki, "Digitally Archiving Cultural Objects", Springer, 2007.
- [5] Marc Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade and Duane Fulk, "The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues", SIGGRAPH '00: Proc. the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH2000), pp. 131-144, 2000.
- [6] Srinivasa G. Narasimhan, Shree K. Nayar, Bo Sun and Sanjeev J. Koppal, "Structured light in scattering", Proc. Int. Conf. on Computer Vision, vol. 1, pp. 420-427, 2005.
- [7] Srinivasa G. Narasimhan, Mohit Gupta, Craig Donner, Ravi Ramamoorthi, Shree K. Nayar, Henrik Wann Jensen, "Acquiring scattering properties of participating media by dilution", ACM Trans. on Graphics, vol. 25, no. 3, pp. 1003-1012, 2006.
- [8] Tali Treibitz, Yoav Y. Schechner, Hanumant Singh, "Flat refractive geometry", Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2008), pp. 1-8, 2008.
- [9] Tali Treibitz and Yoav Y. Schechner, "Instant 3Descatter", Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2006) vol. 2, pp. 1861-1868, 2006.
- [10] Zhengyou Zhang, "A flexible new technique for camera calibration". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 11, 1330-1334, 2000.
- [11] 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透: "レーザ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, 2006.



拡散反射率  
(G)

ground truth

図 4 : 平面对象の入力画像 (左) 輝度補正結果 (右) .  
真水 (1 段目) , 絵の具を少量まぜた水 (2 段目) , 絵の  
具を多量に混ぜた水 (3 段目) を用いて撮影した画像 .  
最下段左は , G チャンネルの拡散反射率 , 右は空气中で撮  
影した画像 (ground truth) .



ground truth

図 5 : 非平面对象物の入力画像 (左) 輝度補正結果  
(右) . 真水 (2 段目) , 絵の具を少量まぜた水 (3 段  
目) , 絵の具を多量に混ぜた水 (4 段目) を用いて撮  
影した画像 . 最下段右は空气中で撮影した画像 (ground  
truth) .