Vol.2012-CVIM-180 No.36
2012/1/20

光伝播の解析による散乱媒体中の遮蔽物分布推定

森口翔生[†1]　向川康博[†1]
松下康之[†2]　八木康史[†1]

本稿では，遮蔽物が内部に混在する散乱媒体において，複数位置から光を照射して取得した光強度を基に光伝播を解析し，その分布を推定する手法を提案する．この問題は，散乱媒体の内部情報を基に光強度を推定する順問題に対して，逆問題として位置づけられており，その解法の多くは光の透過性を仮定していることから，強い散乱を伴う媒体を対象とすることが困難であった．本手法では，対象内部においてランダムに選択した散乱点から光伝播の光路を複数決定し，遮蔽物の存在尤度を各光路上へと投票することでこれを解く．本手法の有効性を示すため，遮蔽物の位置を変化させたシミュレーション実験において，順問題で取得した光強度を基に逆問題を解き，その位置が大まかに推定できることを確認した．

Estimation of Shielding Object Distribution in Scattering Media by Analyzing Light Transport

Shosei Moriguchi,[†1] Yasuhiro Mukaigawa,[†1]
Yasuyuki Matsushita[†2] and Yasushi Yagi[†1]

In this paper, we propose a new method to estimate the distribution of shielding objects in scattering media by analyzing light transport which is measured by a pair of illumination and camera. This estimation problem is regarded as an inverse problem compared to the regular problem. Many solutions for this problem usually have a limitation which can not be applied for strong scattering media because it is difficult to deal with light propagation in this environment. In our method, many light paths are generated by random sampling of scattering points. We estimate the distribution of shielding objects by voting the likelihoods of existing the occluding object on each light path. We have evaluated the proposed method using simulated scene data and confirmed that the location can be roughly estimated.

1. はじめに

シーンが鮮明に見えない悪条件下において，物体の３次元位置や形状を推定することは，カメラを用いて実シーンを解析する上で重要な基礎技術である．見え方が不鮮明になる主な原因として，隠れや散乱などが挙げられる．隠れの例として，鳥かごの中の鳥を観察する場合や，フェンス越しに道路を見る場合などが相当する．一方，散乱の例として，磨りガラス越しに物体を見る場合や，対象物体が濁った液体中に存在する場合などが挙げられる．隠れの場合は物体表面の一部が見えているのに対し，散乱の場合には物体表面が直接観測できないことから，解析は一段と難しくなる．

散乱の影響が比較的小さい場合には，散乱光を除去することができる．例えば，偏光板を用いて散乱光を抑える技術は，濁った海中での画像の鮮明化などに古くから利用されてきた[1)]．Nayar ら[2)] は，プロジェクタから高周波パターンを投影することで，物体表面での反射光と，散乱光などの大域照明成分を分離した．Narasimhan ら[3)] は単一散乱をモデル化することで，散乱光の影響を受けずに濁った液体中の物体形状を計測した．Kim ら[4)] は，散乱光と透過光ではセンサに到達する際の角度が異なることを利用して散乱光を除去し，トモグラフィーによって形状を推定した．

しかし，強い散乱が生じる場合には，そもそもカメラに届く光の大部分が散乱光となるため，「散乱光の除去」という方法は使えない．例えば，ロウの中に金属が埋め込まれている場合には，散乱光の変化から何らかの異物が含まれていることまではわかっても，その形状となると人間の眼で見てもよくわからない．このように，散乱光は物体の輪郭を不鮮明にする効果をもたらす．

そこで，本研究では，遮蔽物の存在によって散乱光の分布が変化するという事実に着目し，散乱光の光伝播を解析することで，散乱媒体中の遮蔽物の空間的分布を推定する手法を提案する．本手法では，CG 分野で散乱物体を描画する際に用いられるモンテカルロシミュレーションと同様に乱数で光路を決め，その光路上に遮蔽物の存在尤度を投票する．これを繰り返すことで，投票結果が遮蔽物の分布に近づいてゆく．

CV 分野における提案手法の貢献は，散乱の近似モデルを当てはめるのではなく，散乱光

†1 大阪大学 産業科学研究所
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
†2 マイクロソフトリサーチ アジア
Microsoft Research Asia

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-CVIM-180 No.36
2012/1/20

シミュレーションの唯一の正解とされる乱数によるレイトレーシングの逆問題として問題を定式化し，散乱媒体中の物体形状推定という今まで扱われてこなかった問題に対する近似解を得る方法を明らかにしたことである．

2. 関 連 研 究

2.1 半透明物体の形状計測

乳白色のアクリルのような半透明物体に入射した光は表面下で散乱するため，参照光を用いたレンジファインダでも，精度良く計測することが難しい．Chen ら[5] は，比較的散乱光の影響を受けにくいとされる位相シフト法に，散乱光を低減する偏光板を組み合わせることで形状を推定した．井下ら[6] は，プロジェクタを光源として用いて単一散乱成分のみを取り出し，単一散乱から形状復元を試みている．これらの方法は，散乱を考慮した形状推定法であるが，本研究では散乱媒体中にある不透明な遮蔽物の形状を推定することを目指しており，問題設定が異なる．

2.2 ３次元ボリュームの推定

カメラで撮影された画像の奥行きを推定するのではなく，物体形状を３次元ボリュームとして推定するためには，多方向からの撮影が有効である． Visual Hull[7] はシルエットに基づく推定法であるが，凹部分は原理的に形状が正しく求まらない．Lanman ら[8] は，点光源アレイと光線空間カメラで挟まれた空間の３次元ボリュームの復元をしているが，同様に凹部分の形状は求まらない．凹部分の形状を推定するためには，テクスチャなどの付加的な情報が必要となる[9]．それに対して，本研究では散乱媒体で満たされた空間での物体の３次元ボリューム推定を目的としている．散乱光は凹部分も通過するため，間接的に凹部分の形状に関する手がかりを利用できる利点がある．

2.3 生 体 計 測

生体計測分野では，人体内部の可視化について古くから研究されている．X 線を利用したレントゲン撮影や CT は鮮明な画像が得られるが，放射線による被曝の危険性が残存する．一方，近赤外光を用いた拡散光トモグラフィは安全であるが，近赤外光が体内で散乱してしまい不鮮明になってしまう．そのために，拡散光トモグラフィは不良設定問題になりやすく，仮に数値計算としては良設定問題にできたとしても解が不安定になりやすい[10]．ピコパルスレーザ等を用いて時間分解能を向上させることで入力の情報量を増やせるが，散乱媒体における再帰的な光路の追跡には膨大な時間を要する[11]．それに対して，本研究では，観測された散乱光から内部の遮蔽物の分布を解析的に解くのではなく，投票に基づいて遮蔽物の分布を近似的に推定する．厳密な解が得られるわけではないが，少ない計算量で大まかな分布を推定する手法である．

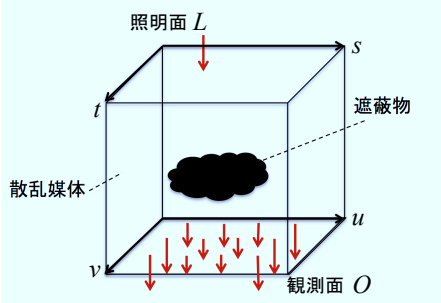


図 1 シーン中の光伝播．
Fig. 1 Light transport in the scene.

3. 散乱媒体中の光伝播のモデル化

3.1 入射光と透過光の関係

本研究では，均一な散乱媒体中に不透明な遮蔽物が存在するシーンを対象とする．ここで，**図 1** に示すように，シーンのある面に沿って２次元の照明面 L を，シーンを挟んで反対の面に２次元の観測面 O を考える．L に照明位置 (s,t)，O に観測位置 (u,v) をとり，入射位置 (s,t) から照明を行なうと，シーンを伝播した光強度が観測位置 (u,v) にて 2 次元の分布として観測される．ここで，照明位置 (s,t) も 2 次元的に変化させつつ照明と観測を繰り返すと，４次元 (s,t,u,v) で表現される光伝播の割合 $T(s,t,u,v)$ が定義される．$T(s,t,u,v)$ は L へと照明した場合に O からどれだけの光強度が観測されるかを記述しており，散乱媒体の内部情報を包含する．

3.2 散乱のモデル

次に，散乱光による光強度の減衰をモデル化する．**図 2** のように，点 p_1 からの光が，距離 d_1 だけ離れた散乱点 p_2 にて角度 θ の方向に散乱し，距離 d_2 だけ離れた点 p_3 まで到達する光路において，光伝播の割合 E_{p_1,p_2,p_3} は次式にて表される[12]．

$$E_{p_1,p_2,p_3} = \sigma_s p(\theta, g) \exp(-\sigma_t(d_1 + d_2)) \quad (1)$$

ここで，σ_s と σ_t は，それぞれ散乱係数，消滅係数と呼ばれる媒体固有のパラメータである．d_1，d_2 はそれぞれ p_1 から p_2 までの距離，p_2 から p_3 までの距離で，その長さに応じ

© 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-CVIM-180 No.36
2012/1/20

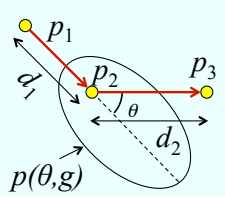
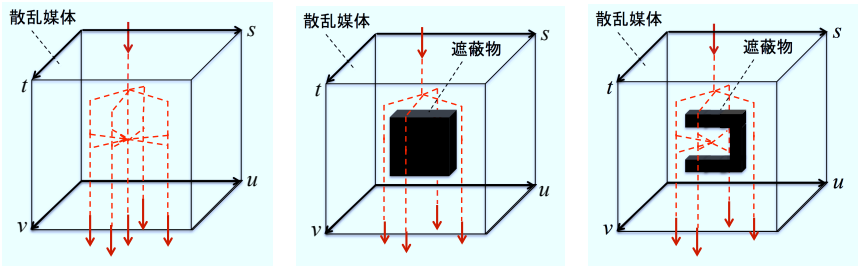


図 2 光強度の減衰.
Fig. 2 Attenuation of the intensity.



(a) 遮蔽物なし. (b) 遮蔽物あり（凸形状）. (c) 遮蔽物あり（凹形状）.

図 3 異なる遮蔽物の分布を有する散乱媒体における光路の例.
Fig. 3 Light paths in different distribution inside the scattering media.

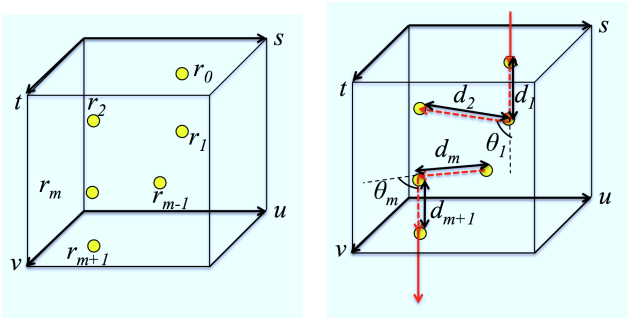
て光強度は指数関数的に減衰する．また，フェーズ関数 $p(\theta, g)$ は，散乱の偏りを近似的に表現する関数で，次式にて近似される[12]．

$$p(\theta, g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{\frac{3}{2}}} \tag{2}$$

ここで，パラメータ g は, 入射方向と散乱方向のなす角の余弦とフェーズ関数の積を全球面上で積分した値であり，散乱の等方性を決定する．g の値は，前方散乱では正に，後方散乱では負に，等方散乱の場合はゼロとなる．

3.3 ランダムサンプリングによる光伝播の近似

照明されたシーンにおいて観測された光は，シーンを伝播することからその内部情報を包含している．本研究では，特に複数回の散乱によって発生する光路に注目する．ここで，**図 3** は，異なる遮蔽物が存在する散乱媒体において，通りうる様々な光路を示したもので



(a) 散乱点の決定. (b) 光路の決定.

図 4 光伝播のモデル.
Fig. 4 Model of the light propagation.

ある．例えば，**図 3(a)** に示す遮蔽物を含まない散乱媒体に対して，**図 3(b)** に示す凸形状の遮蔽物を含む散乱媒体では，遮蔽物を通る光路を伝播する光が遮断されるため，遮蔽物の存在位置の垂直方向における観測位置に到達する光が少なくなる．また，図 3(b) に示す遮蔽物を含む散乱媒体に対して，**図 3(c)** に示す凹形状の遮蔽物を含む散乱媒体では，凹部分を通る光路が存在するため，凹面側の垂直方向における観測位置に到達する光が多くなる．このように，光伝播は内包する遮蔽物の分布に強く影響を受けることがわかる．

散乱媒体における光伝播のモデルを**図 4** に示す．まず，**図 4(a)** に示すように，ある試行 j における散乱点の数 m とその位置 $\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, ..., \boldsymbol{r}_{m-1}, \boldsymbol{r}_m$ を選択する．ここで，散乱点の数 m は，全ての散乱回数に対する発生確率により決定される．これはある一定区間の中で偶然に起こる事象の数の確率分布により表現され，次式のように，一単位区間あたり平均 λ 件起きる事象が m 件発生する場合のポアソン分布に従うものとする．

$$Poisson(\lambda, m) = \frac{\lambda^m \exp(-\lambda)}{m!} \tag{3}$$

散乱点の位置 $\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, ..., \boldsymbol{r}_{m-1}, \boldsymbol{r}_m$ を選択すると，照明点 $\boldsymbol{r}_0$，観測点 $\boldsymbol{r}_{m+1}$ を含む，光路 $\boldsymbol{R}_j(\boldsymbol{r}_0 \to \boldsymbol{r}_1, ..., \boldsymbol{r}_m \to \boldsymbol{r}_{m+1})$ が決定する．ここで，**図 4(b)** に示すように，点 $\boldsymbol{r}_k$ からの光が，散乱点 $\boldsymbol{r}_{k+1}$ にて角度 $\theta_{k-1,k,k+1}$ の方向に散乱し，距離 $d_{k,k+1}$ だけ離れた点 $\boldsymbol{r}_{k+1}$ まで到達する光路において，光伝播の割合 $E_{\boldsymbol{r}_{k-1},\boldsymbol{r}_k,\boldsymbol{r}_{k+1}}$ を照明点 $\boldsymbol{r}_0$ から観測点 $\boldsymbol{r}_{m+1}$ ま

© 2012 Information Processing Society of Japan

で積算すると，光路において遮蔽物が存在しない場合の光伝播の割合 $E^{\boldsymbol{R}_j}$ は次式にて定義される．

$$E^{\boldsymbol{R}_j} = \prod_{k=1}^{m} (\exp(-\sigma_t d_{k-1,k})\sigma_s p(\theta_{k-1,k,k+1}, g)) \exp(-\sigma_t d_{m,m+1}) \tag{4}$$

なお，距離 $d_{k,k+1}$ と角度 $\theta_{k-1,k,k+1}$ は次式で定義される．

$$d_{k,k+1} = |\boldsymbol{r}_k - \boldsymbol{r}_{k+1}| \tag{5}$$

$$\theta_{k-1,k,k+1} = \arccos\left(\frac{(\boldsymbol{r}_{k+1} - \boldsymbol{r}_k) \cdot (\boldsymbol{r}_k - \boldsymbol{r}_{k-1})}{|\boldsymbol{r}_{k+1} - \boldsymbol{r}_k||\boldsymbol{r}_k - \boldsymbol{r}_{k-1}|}\right) \tag{6}$$

また，光路 $\boldsymbol{R}_j$ における遮蔽物の存在有無 $V(\boldsymbol{R}_j)$ を次式にて定義する．

$$V(\boldsymbol{R}_j) = \begin{cases} 0 & : if\ shielding\ objects\ exist\ on\ \boldsymbol{R}_j \\ 1 & : otherwise \end{cases} \tag{7}$$

光伝播の割合 $T^{\boldsymbol{R}_j}$ は，光路 $\boldsymbol{R}_j$ 上に遮蔽物が存在しない場合の光観測の割合 $E^{\boldsymbol{R}_j}$ と遮蔽物の存在有無 $V(\boldsymbol{R}_j)$ により，次式にて表現される．

$$T^{\boldsymbol{R}_j} = V(\boldsymbol{R}_j) E^{\boldsymbol{R}_j} \tag{8}$$

これは，光路 $\boldsymbol{R}_j$ 上に遮蔽物が存在する場合に光伝播の割合 $T^{\boldsymbol{R}_j}$ がゼロとなることを意味し，遮蔽物が存在しない場合の光観測の割合 $E^{\boldsymbol{R}_j}$ とは独立に決定される．ここまで，ある j 回目の試行において仮定された光路 $\boldsymbol{R}_j$ に注目してきたが，試行回数 N だけ散乱点と光路の決定を繰り返すことで，シーン全体の光伝播の割合 $T(s,t,u,v)$ は，各試行 j での光伝播の割合 $T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v)$ により，次式にて近似される．

$$T(s,t,u,v) \simeq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v) \tag{9}$$

4. 遮蔽物の分布推定

4.1 問題設定

本節では，計測された光伝播の割合 $T(s,t,u,v)$ から，遮蔽物の分布を推定する手法に関して記述する．前節では，遮蔽物の存在有無 $V(\boldsymbol{R}_j)$ が既知である場合に光伝播の割合 $T(s,t,u,v)$ を導出する流れを記述したが，これを順問題とすると，**図 5** に示すように，我々の提案手法は，計測された光伝播の割合 $T(s,t,u,v)$ から遮蔽物の存在尤度を推定する逆問題への解法として位置づけられる．

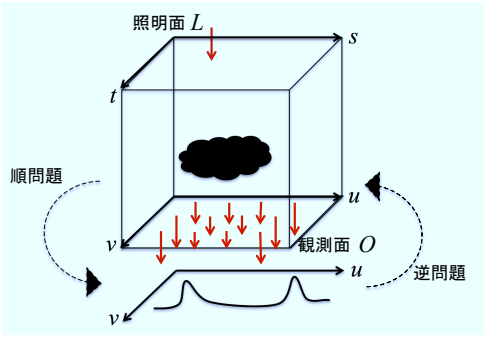
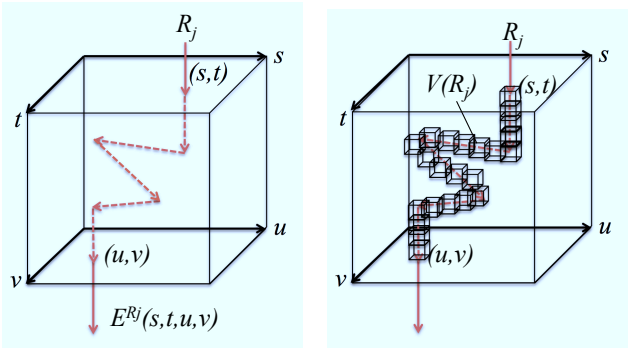


図 5 順問題と逆問題の概念図.
Fig. 5 Illustration of the forward and inverse problems.



(a) 散乱点の決定.　　(b) 分割領域への投票.

図 6 逆問題の解法.
Fig. 6 Solution of inverse problem.

4.2 投票に基づく遮蔽物の存在尤度推定

遮蔽物の存在尤度を推定する逆問題の解法に関して，**図 6(a)** に示すように，順問題の場

© 2012 Information Processing Society of Japan

合と同様，ある試行 j において散乱点を乱数により選択し，光路 $\boldsymbol{R}_j$ を決定する．光路 $\boldsymbol{R}_j$ 上に遮蔽物が存在しない場合の光伝播の割合 $E^{\boldsymbol{R}_j}$ は，散乱点の位置関係と散乱特性から計算される．ここで，光路 $\boldsymbol{R}_j$ を通る光伝播の割合 $T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v)$ が既知であれば，光路 $\boldsymbol{R}_j$ 上の遮蔽物の存在尤度 $V(\boldsymbol{R}_j)$ は，次式にて推定される．

$$V(\boldsymbol{R}_j) = \frac{T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v)}{E^{\boldsymbol{R}_j}} \tag{10}$$

しかし，光路 $\boldsymbol{R}_j$ ごとに個別に光伝播の割合 $T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v)$ を計測することはできない．そこで，本手法では，$T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v)$ の平均値がシーン全体の光伝播の割合 $T(s,t,u,v)$ であることを利用し，試行 j における光伝播の割合 $T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v)$ を次式のように近似する．

$$T^{\boldsymbol{R}_j}(s,t,u,v) \simeq T(s,t,u,v) \tag{11}$$

これより，光路 $\boldsymbol{R}_j$ 上の遮蔽物の存在尤度 $V(\boldsymbol{R}_j)$ は次式にて推定される．

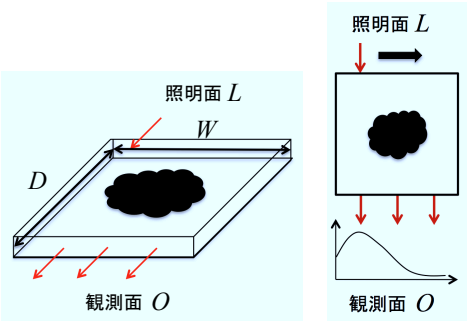
$$V(\boldsymbol{R}_j) \simeq \frac{T(s,t,u,v)}{E^{\boldsymbol{R}_j}} \tag{12}$$

ここまで，試行 j 回において仮定された光路 $\boldsymbol{R}_j$ に注目してきたが，対象シーン全体における遮蔽物の存在尤度を推定するため，試行回数 N だけ乱数による散乱点の選択と光路の決定を繰り返し，光路 $\boldsymbol{R}_j$ 上の遮蔽物の存在尤度 $V(\boldsymbol{R}_j)$ を投票によって累計する．そのために，**図 6(b)** に示すように，シーンを３次元の有限領域に分割する．各試行 j における光路 $\boldsymbol{R}_j$ と交差する分割領域に $V(\boldsymbol{R}_j)$ を加算しつつ，これを繰り返すことで，各分割領域に遮蔽物の存在尤度を投票する．なお，各分割領域における投票数は投票空間の位置に応じて偏りが生じる．そこで，遮蔽物の存在しない散乱媒体を仮定して算出した投票値との差分を計算し，それを最終的な遮蔽物の存在尤度とする．

5. シミュレーション実験

5.1 2 次元の対象シーン

提案手法の有効性を確認するために，シミュレーション実験を行なった．ただし，３次元シーンでは，密な投票結果を得るためには試行回数が膨大になること，および２次元シーンに限定しても本質的には変わらないことから，本実験では２次元シーンを対象とした．実験のセットアップを**図 7** に示す．ここでは**図 7(a)** のように，高さを無視できる幅 $W = 9$，奥行き $D = 9$ の２次元の散乱媒体を対象のシーンとする．また，散乱媒体の特性に関して，散乱係数 $\sigma_s = 0.1$，消滅係数 $\sigma_t = 0.15$，等方性パラメータ $g = 0.1$ とした．また，散乱媒体の内部に，幅 $W = 1$，奥行き $D = 1$ の遮蔽物が，単一で存在することを想定し，その位置がどれだけ正確に推定できるかを確認した．



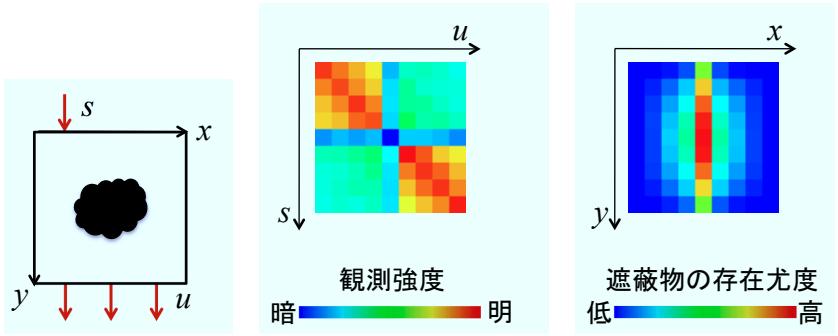
(a) 2 次元の散乱媒体.　(b) 照明と観測.

図 7 実験のセットアップ.
Fig. 7 Scene of the simulation.

図 7(b) に示すように，シーンの複数位置において照明と観測を行なう．照明面に対してシーンを挟んで反対側を観測面とする．照明として，レーザー光のように強度分布の広がりが小さい光を用いてシーンの側面から一点照明を行い，照明位置を変化させながら，２次元の光伝播を繰り返し計測する．なお，照明位置，観測位置の分割数と，散乱点を決定する範囲，すなわちシーンの空間分割数は独立に決定されるが，ここでは簡単のため，W と D を，それぞれ水平方向と垂直方向の空間分割数とする．

図 8 に実験結果の可視化方法を示す．まず，**図 8(a)** で示されるシーンに対して，**図 8(b)** に示すように，２次元の光伝播 $T(s,u)$ を光伝播行列として擬似カラーにて可視化する．ここで，水平軸と垂直軸はそれぞれ観測位置 u と照明位置 s に対応する．また，その値に関して，赤色は観測強度が明るく，青色は観測強度が暗いことを意味する．同様に，**図 8(c)** に示すように，遮蔽物の存在尤度を擬似カラーにて可視化する．ここで，水平軸と垂直軸はそれぞれシーンの分布推定面を俯瞰したときの水平位置 x と垂直位置 y に対応する．また，その値に関して，赤色は遮蔽物の存在尤度が大きく，青色は遮蔽物の存在尤度が小さいことを意味する．光伝播行列と投票空間の可視化画像に関して，それぞれで座標系と値の意味が異なること注意にされたい．

© 2012 Information Processing Society of Japan



(a) 座標系. (b) 光伝播行列. (c) 投票空間.

図 8 実験結果の可視化.
Fig. 8 Visualization of the experimental results.

5.2 遮蔽物の水平位置推定

まず，散乱媒体中に小さな遮蔽物が存在する場合に，光伝播からその水平位置がどの程度正確に推定できるかを確認する実験を行った．遮蔽物の垂直位置を $y = 5$ と中央に固定し，水平位置を $x = 1$ から $x = 9$ の範囲で変化させた．各水平位置における光伝播行列と投票空間を**図 9** に示す．光伝播行列からは，照明位置 s が遮蔽物の水平位置に近い場合，光が遮蔽物に吸収され，照明位置 s 付近の観測位置 u の光強度が大きく欠落していることがわかる．この光線の遮蔽の影響が本手法での遮蔽物の存在尤度の投票に情報をもたらす．また，投票空間を見ると，遮蔽物の存在位置周辺に投票値が集まっていることがわかる．ここで，投票空間の可視化画像を適当な閾値で二値化すると，実際に遮蔽物が存在する位置が投票空間のうちで投票値のピークとなることが明確になる．これより，単一の遮蔽物の水平位置が変化した場合には，十分な推定感度を有することが確認できる．

5.3 遮蔽物の垂直位置推定

次に，散乱媒体中の小さな遮蔽物の位置が垂直方向に変化する場合に，光伝播からその垂直位置がどの程度正確に推定できるかを確認する実験を行った．仮に透明な媒体中であれば遮蔽物の垂直位置が変化しても光伝播は変わらないため不良設定問題となるが，散乱媒体中では遮蔽物より奥での散乱の傾向が変化することから，光伝播に垂直位置に関する手がかりが含まれると期待される．つまり，垂直位置推定は，前節の水平位置推定よりも難しい問

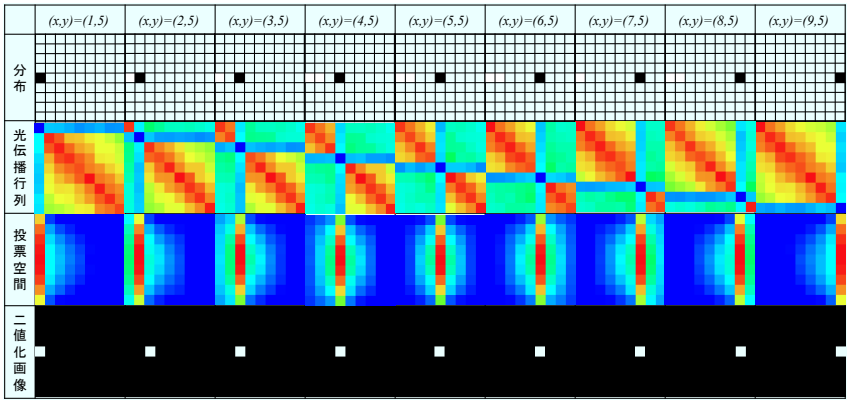


図 9 遮蔽物の水平位置を変化させた場合の推定結果.
Fig. 9 Estimated distribution by changing the horizontal locations of shielding object.

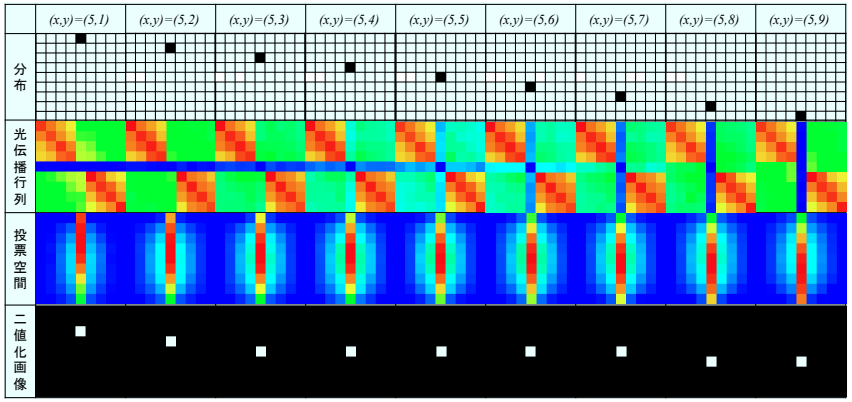


図 10 遮蔽物の垂直位置を変化させた場合の推定結果.
Fig. 10 Estimated distribution by changing the vertical locations of shielding object.

© 2012 Information Processing Society of Japan

題である．

遮蔽物の水平位置を $x = 5$ と中央に固定し，垂直位置を $y = 1$ から $y = 9$ の範囲で変化させた．各垂直位置における光伝播行列と投票空間を**図 10** に示す．光伝播行列からは，遮蔽物が照明面付近にある場合，光が散乱する前に遮蔽物に光が吸収され，観測位置 u によらずまんべんなく光強度が弱くなることがわかる．逆に遮蔽物が観測面付近にある場合，観測位置 u 付近の光強度のみが大きく欠落することがわかる．このように，透過光だけでは区別のつかない内部状態も，散乱光を用いることで区別がつく可能性がある．実際，遮蔽物の存在尤度を表す投票空間では，遮蔽物の存在位置周辺に投票値が集まっている．ここで，投票空間の可視化画像を適当な閾値で二値化すると，遮蔽物が在在する位置の周辺にピークが存在することがわかる．ただし，水平位置推定の場合とは異なり，若干のずれが見られる．これは，前述のように，光伝播のわずかな違いを手がかりとして推定しているため，厳密な位置が特定できなかったことによるものであると考えられる．しかし，観測面から浅い位置にある，あるいは深い位置にあるといった大まかな深さは推定できており，ある程度の精度は確認できた．

6. おわりに

本稿では，計測された光伝播を手がかりに散乱媒体内部の遮蔽物の分布を推定する手法を提案した．具体的には，対象となる散乱媒体に対して，照明と観測を繰り返すことで光伝播を計測し，光路をランダムに選択して遮蔽物の存在尤度の推定する手法について述べた．シミュレーション実験では，小さな遮蔽物の位置が水平および垂直方向に変化した場合の検証にとどまったが，位置に関しては概ね良好に推定できることがわかった．現在は，遮蔽物のサイズや形状の推定に取り組んでおり，予備実験では様々な大きさや形状の遮蔽物の分布が大まかに推定できることも確認している．この結果については，研究会での発表時に紹介したい．

今後の課題として，遮蔽物の位置や形状を様々に変化させた場合に，どの程度の正確さで分布を推定できるのかを，シミュレーション実験で網羅的に調べる必要がある．また，実環境にて散乱媒体に存在する遮蔽物の分布を推定することも必要である．具体的には，散乱媒体と遮蔽物として，それぞれアクリルプレートと黒い金属板を用いることを想定している．そのために，散乱媒体の境界面での反射や屈折のモデルを導入し，実環境での現象をどこまで厳密にモデル化すべきかを吟味する必要がある．また，本稿では，２次元のシーンに限定して実験を行なったが，３次元的に光伝播を追跡することで，次元の拡張が可能となる．しかしながら，対象を３次元空間とすると光伝播行列は４次元関数で記述されるため，記憶容量，可視化等の観点からその解析が困難となることが予想される．これは，試行回数や空間分解能と推定精度とのトレードオフ問題として議論されよう．更に，実環境においては波長ごとに散乱特性が変化することから，照明位置の変化だけでなく分光情報をも利用することで，より大きな情報量の光伝播情報を用いた分布推定を検討している．

なお，本研究は，総合科学技術会議により制度設計された最先端・次世代研究開発支援プログラムにより，日本学術振興会を通して助成されたものである．

参 考 文 献

1) T. Treibitz and Y. Y. Schechner, “Active Polarization Descattering”, IEEE Trans. PAMI, Vol.31, No.3, pp.385–399, 2009.
2) S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, “Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.935-944, 2006.
3) S. G. Narasimhan, S. K. Nayar, B. Sun, S. J. Koppal, “Structured light in scattering media”, Proc. ICCV2005, 2005.
4) J. Kim, D. Lanman, Y. Mukaigawa, R. Raskar, “Descattering transmission via angular filtering”, Proc, ECCV2010, 2010.
5) T. Chen, H. P. A. Lensch, C. Fuchs, H. P. Seidel, “Polarization and Phase-Shifting for 3D Scanning of Translucent Objects”, Proc. CVPR2007, 2007.
6) 井下智加, 向川康博, 松下康之, 八木康史, “単一散乱からの半透明物体の形状推定”，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), OS4-4, 2011.
7) A. Laurentini, “The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding”, IEEE Trans. PAMI, Vol.16, No.2, pp.150–162, 1994.
8) D. Lanman, R. Raskar, A. Agrawal, G. Taubin, “Shield Fields: Modeling and Capturing 3D Occluders”, Proc. SIGGRAPH Asia 2008.
9) Kiriakos N. Kutulakos and Steven M. Seitz, “A Theory of Shape by Space Carving”, IJCV Vol.38, No.3, pp.199-218, 2000.
10) D. A. Boas, D. H. Brooks, E. L. Miller, C. A. DiMarzio, M. Kilmer, R. J. Gaudette, and Q. Zhang, “Imaging the body with diffuse optical tomography”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol.18, Issue 6, pp.57-75, 2001.
11) J.Chen, V. Venugopal, X. Intes, “Diffuse ptical tomography with Time-gated Perturbation Monte Carlo Method”, Proc. SPIE Vol.7171, 2009.
12) N. Kurachi, “The Magic of Computer Graphics”, CRC Press (ISBN 978-1-56881-577-0), 2011.

© 2012 Information Processing Society of Japan