

動的計画法を用いた半透明物体のリアルタイムレンダリング

小澤 禎裕¹ 岡本翠¹ 久保尋之² 森島 繁生³

概要: 人肌をはじめとした半透明物体は、物体内部で生じる表面下散乱現象のシミュレーションに膨大な計算が必要となるため、高速な描画は依然として困難であると言える。本研究では、歩数マップを用いて表面下散乱における光輸送の経路を近似的に計算することで、半透明物体を高速に描画する手法を提案する。まず、対象とするオブジェクト上に歩数マップを作成し、散乱光の入射点と出射点との測地線距離を取得する。次に、その距離に応じて入射光の光線強度を減衰させることで、半透明物体における光の伝播をモデル化する。本研究によって多重散乱の支配的な半透明物体を実現した。

1. はじめに

近年、ゲーム等のコンテンツにおいて、ハードウェアの性能や描画技術の向上により、様々な材質の物体を高速に描画することが可能となった。これによって、より写実的なシーンの描画が可能となってきている。しかし、半透明物体をリアルタイムに描画することは、依然として難しい課題である。主な原因として、半透明物体の描画を行う場合には、内部に透過する光を考慮する必要があることが挙げられる。一般に、半透明物体に光が入射した際、その一部は表面で反射されずに物体内部に浸透する。そして浸透した光は内部で散乱し、入射点とは異なる点から再び出射する。こうした現象を表面下散乱と呼ぶ。表面下散乱を考慮した描画を行うことによって、半透明らしい柔らかな光の広がり表現をすることができる。表面下散乱を物理的に正しく計算する手法として、Photon Mapping 法 [1] や Path Tracing [2] などが挙げられる。しかし、これらの手法は膨大な計算時間を必要とするため、リアルタイム性を求める場面で用いることはできず、そのため表面下散乱を何らかの手法によって近似的に扱うことで計算コストを低減することが必要不可欠である。

本研究では、半透明物体上のある点 P の輝度が光の照射点との光学的距離によって決定されるものと仮定することで、半透明物体の描画を高速に行う手法を提案する。半透明物体の唯一点を、レーザー光のような照射面積が無限小

となる光源を用いて照らす場合、物体上の輝度は照射点との光学的距離によって一意に定まる。一般光源下においても、光源を複数のレーザー光の集合とみなすことによって、同様の輝度計算が可能であるとした。そこで、本手法では最短経路を求める手法として歩数マップを用い、マップから取得する最短経路を用いて輝度計算を行う。

歩数マップはダイクストラ法 [3] の一種であり、最短経路を取得するアルゴリズムとして知られる。最短経路問題を解く手法としては、A*法 [4] 等を始めとして、歩数マップより高速な手法が存在するが、歩数マップを用いた場合は、一度のマップ作成により、全ての頂点の輝度計算を行うことが可能である。

2. 関連研究

2.1 半透明物体の描画手法

コンピュータグラフィックスの分野では、表面下散乱を、単一散乱と多重散乱の二つの現象として区別し、それぞれに適切なモデルを適用するという試みが多くなされている。単一散乱した光とは、半透明物体に浸透する光のうち、内部で一度だけ散乱した光を指し、多重散乱した光は、内部で複数回散乱した光を指す。多重散乱を高速に計算するモデルは数多く提案されている。

Jensen ら [5] はダイポールモデルによって多重散乱を近似的に扱い、半透明物体の描画を高速に行った。しかしながら、ダイポールモデルでは、描画対象が均一な材質からなることを仮定しているため、描画可能な材質は限られる。また、描画には数分程度の時間を要するため、リアルタイムな描画には不向きである。次に、Mertens ら [6] は BSSRDF にダイポールモデルを用いつつ、重点的サンプリングを採用することで、インタラクティブな速度での描画

¹ 早稲田大学

Waseda University

² 奈良先端科学技術大学院大学

NAIST

³ 早稲田大学理工学術院理工学総合研究所/JST CREST

Waseda Research Institute for Science and Engineering/JST CREST

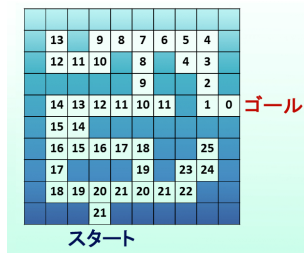


図 1: 歩数マップ

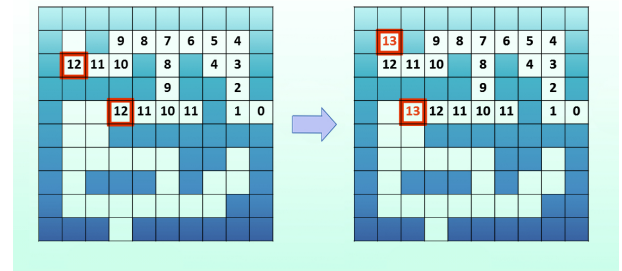


図 2: 歩数マップ作成の流れ

を可能とした。しかし問題点として、Jensen らの手法と同様に内部が均一な材質のみを扱うことが挙げられる。

また、不均一な材質からなる半透明物体を、高速に描画可能な手法も多く存在する。その一つとして、拡散方程式を用いる手法 [7], [8] が挙げられる。拡散方程式は、熱や気体などをはじめとする物理量の拡散を記述するために用いられるものであり、これを用いることで半透明物体内部での光の広がり表現する。まず、物体表面に入射する光量から境界条件を決定し、次に拡散方程式を解くことによって、表面下散乱による光の伝播を求める。これらの手法は、表面下散乱を、拡散方程式を解く問題に帰着しているため、高速な計算が可能であり、また、エネルギーの保存を考慮した物理的に正確な描画を行うことができる。しかし、拡散方程式は、物体内部での光の吸収を考慮できないなどの問題点が存在する。また、[8] では事前計算に数分程度の時間を要するため、任意の形状変化を取り扱うことができない。

次に、Screen-Space で表面下散乱を計算する手法 [9], [10] が挙げられる。これらは、異なるガウシアンカーネルを用いてブラーをかけた複数枚の画像を用いることで、表面下散乱による光の広がり表現している。しかし、Screen-Space での計算を行っているため、描画するシーンによってはアーティファクトが生じる場合がある。特に、光源がモデルを挟んでカメラと正対している場合における、光の透過現象やリムライトなどの描画には不向きであることが挙げられる。

以上のように半透明物体の描画では、不均一な材質が描画不可能であることや、任意の形状変形を取り扱えないなどの制限が存在する。本研究ではよりロバストな半透明物体の描画を目的としている。

2.2 ボクセルを用いた半透明物体の構造推定

コンピュータビジョンの分野においては、対象となる半透明物体を格子分割し、ボクセル単位での光線の経路を取り扱うことで、少ない計算量で内部構造を推定する手法 [11] が提案されている。まず、対象物体を、ボクセルを平面状に並べたレイヤーを積層させたものとして表現する。そして、レイヤーからレイヤーへの光の伝播を求めることによって透過光をモデル化する。この伝播を求める際

に、ボクセル単位で光の経路を生成するが、影響度の高い経路を優先的に生成することによって、より少ない計算量での構造推定を可能としている。本手法では対象物体をボクセルライズすることで、逆に、内部構造を表現する。

3. 歩数マップ

歩数マップは、1つのスタート地点と、1つ以上のゴール地点を含む迷路上に作成されるマップである。歩数マップの例を図 1 に示す。マップに書き込まれた数値を参照することで、迷路上の任意の点 P と、点 P から最も近いゴール地点 G との最短経路を取得することが可能である。本手法では歩数マップを用いることで、光の入射点と出射点との最短経路を取得し、取得した経路の距離を用いて透過光を減衰させることで、半透明物体における表面下散乱の計算を高速に行う。本章では歩数マップの具体的な作成手順について述べる。

3.1 歩数マップの作成例

図 2 の例に示されるように、マップ上の数値を逐次書き換える操作を繰り返し行うことによって作成される。歩数マップは、迷路上の移動可能なマス全てに数値が書き込まれており、この数値を参照することで、ゴールまでの距離を取得することができる。歩数マップは以下の手順で作成する。

[操作 1] ゴールとするマスに任意の数値 a を書き込む。ゴール地点は複数設定することも可能である。以降、この操作を歩数マップの初期化と呼ぶものとする。

[操作 2] 直前の操作で書き込みが行われたマス全てについて以下の操作を行う。直前で書き込まれた値が n の場合、隣接するマスに $n+d$ を書き込む。ただし、書き込みを行うマスに $n+d$ より小さい値が既に書き込まれていた場合は書き込みを行わないものとする。ここで、 d は隣のマスへ移動に要するコストに対応し、マップ上のマスごとに異なる値を設定することができるが、値は必ず正でなければならない。

[操作 3] 書き込みが行われなくなるまで、操作 2 を繰り返す行う。

図 1 に示した例は、初期化に用いる数値 a に 0、隣接マス

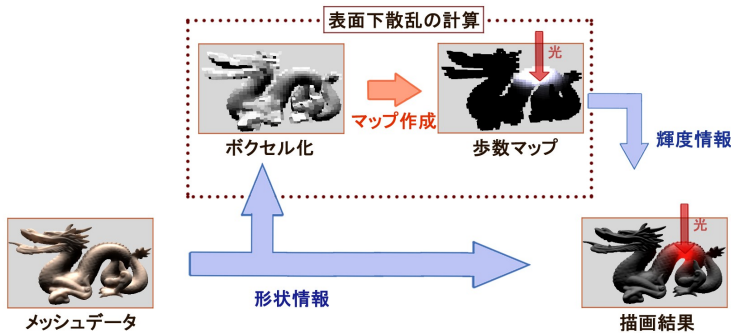


図 3: 本手法のフロー

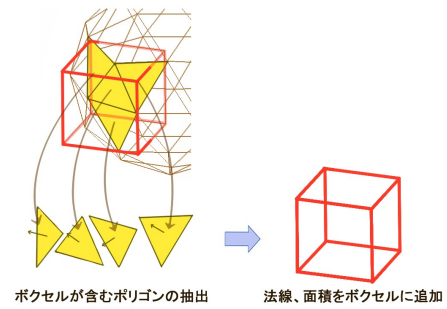


図 4: 法線情報の追加

への移動コスト d に 1 を用いた場合の歩数マップを表す。

3.2 歩数マップの三次元拡張

3-1 節では、二次元の歩数マップ作成例を示した。しかし、描画対象となるオブジェクトは三次元形状を持つため、作成する歩数マップは三次元である必要がある。マップの三次元拡張は、二次元でのマップ作成手法を元に、容易に行うことができる。ただし、光の拡散をより滑らかに表現するため、マップの作成における操作 2 の部分に変更を加える。二次元の歩数マップの場合、最も距離が近い 4 マスに対して操作 2 をそれぞれ行っていた。しかしこの方法を三次元に適用した場合、6 方向の光の伝播しか扱うことができない。そこで、より正確に、あらゆる方向へ伝播する光を表現するため、操作を行う範囲を以下の三種類の隣接マス、合計 26 マスに拡張する。

- (1) 隣接する 6 マス
- (2) 斜め方向に隣接する 12 マス
- (3) 対角線方向に隣接する 8 マス

これにより、斜め方向を含む三次元空間における光の伝播を扱うことができるため、より滑らかな光の伝播を表現することができる。

4. 提案手法

本手法のフローを図 3 に示す。本手法では、描画するオブジェクト上に歩数マップを作成し、マップ上の数値を参照することで、各頂点における明るさを決定する。まず始めに、マップを作成する土台を作成するため、オブジェクトを格子分割し、ボクセル化を行う。ボクセル 1 つが歩数マップの 1 マスに対応する。対象物体が変形を伴わない場合、このステップを事前計算に含めることが可能である。次に、入射光の方向をもとに表面ボクセルに入射する光量を計算し、ボクセルを初期化する。その後、歩数マップを作成し、物体内部における光の伝播距離を得る。この距離を用いて各ボクセルの色を決定する。最後に、ボクセルから頂点の色を決定し、描画を行う。

4.1 ボクセル化

ボクセル化とは、メッシュデータを空間格子状に分割することで、オブジェクトを立方体の集合として表現する手法である。一般的に、ボクセル化は、表面のみにボクセルを作成するサーフェスボクセル化と、内部にもボクセルを作成するソリッドボクセル化の二種類に大別される。本手法では、物体内部における光の伝播距離の計算を行うため、ソリッドボクセル化を適用する。また、入射光量を考慮した歩数マップの初期化を行うため、ボクセルを表面ボクセルと内部ボクセルに分類して管理をする。ボクセル v が表面ボクセルと内部ボクセルのどちらに含まれるかを判別する方法として、ボクセル v に隣接するボクセル数が 6 つであれば内部ボクセルとし、6 つ未満であれば表面ボクセルであるとした。また、入射する光量の計算には、法線の情報が必要であるが、立方体上に定義された法線を単純に用いる場合、正しい入射光量を計算することができない。そこで、表面ボクセルの抽出に加え、表面ボクセルに対して法線を与える。図 4 に示すように、1 つの表面ボクセル s に対し、ボクセル s と交差するポリゴン全てについて、その面積と法線をデータとしてボクセルに与える。以上の処理を事前計算として行うことにより、1 つのボクセルに入射する光量を精度よく計算し、歩数マップを初期化することが可能となる。

4.2 歩数マップを用いた光の伝播の近似

ボクセル化した物体内部における表面下散乱の近似を考える際、光源に応じた歩数マップの初期化、および半透明物体の材質に応じた移動コストの決定を行う必要がある。本節ではこの 2 点に関して詳述する。

4.2.1 歩数マップの初期化

半透明物体に対し、レーザー光のような面積が無限小のスポットライトが、一本照射されている半透明物体の描画について考える。この場合の物体表面における各頂点の輝度は、レーザー光の入射点との光学的な距離によって決定される。そこで、レーザー光の入射点を歩数マップでのゴールの地点とみなし、マップを作成する。作成された歩

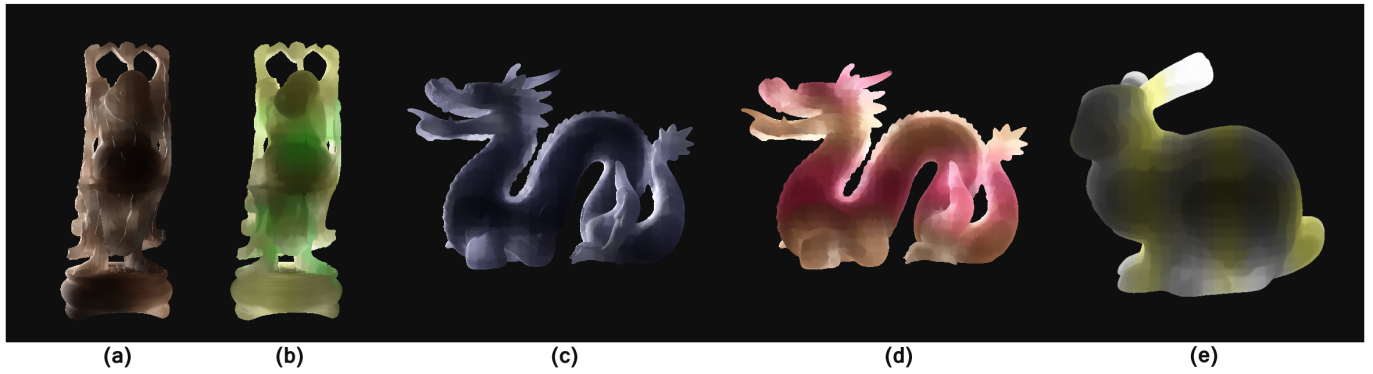


図 5: 描画結果

表 1: ボクセル数と描画時間

モデル	事前計算 (秒)	FPS	ボクセル数
(a)Buddha	15	57	$36 \times 36 \times 36$
(b)Buddha	12	75	$32 \times 32 \times 32$
(c)Dragon	20	44	$36 \times 36 \times 36$
(d)Dragon	26	28	$40 \times 40 \times 40$
(e)Bunny	7	23	$30 \times 30 \times 30$

数マップの数値から、光の入射点と出射点との光学的距離を取得し、輝度を決定する。

平行光源下では、レーザー光の場合と異なり、オブジェクトの複数の箇所に光が照射される。そこで平行光源下では、複数の強度の異なるレーザー光が照射されているものとみなし、歩数マップの初期化を行う。対象物体の表面は十分に粗く、透過光は完全に指向性を失って透過する場合、各ボクセルの初期化に用いる数値 a は式 (1), (2) によって決定される。

$$a(v_i) = -\ln(e \cdot t) \quad (1)$$

$$e = \frac{\sum_{t \in v_i} s(t) \times \max(0, -\vec{L} \cdot \vec{N}(t))}{\sum_{t \in v_i} s(t)} \quad (2)$$

$a(v_i)$ はボクセル v_i の初期化に用いる数値、 t はボクセルに含まれる三角形ポリゴン、 $s(t)$ はポリゴンの面積、 L は光線ベクトル、 $N(t)$ はポリゴンの法線ベクトルを表す。ここで用いられる値 e は、ボクセル内の三角形ポリゴンの輝度を三角形の面積で重み付けした平均を表し、これを平行光源下でのボクセルの輝度とする。また、 t は入射した光が内部に透過する割合を表す。以上の処理によって、各表面ボクセルの輝度の初期値を決定する。この初期値は表面下散乱の影響が存在しない場合の輝度値に対応する。決定された初期値を用いて、歩数マップを作成し、実際に表面下散乱光を計算する。

4.2.2 移動コストの決定

歩数マップにおける隣接マスへの移動コスト d は、光の透過しにくさに対応する。つまり、光が透過しにくい材質

であるほど移動コスト d は大きくなる。そこで、移動コスト d は吸収係数と散乱係数の和である消散係数に依存するとし、実際の移動コスト d は式 (3) によって決定する。

$$d = (\sigma_s(v_{i+1}) + \sigma_a(v_{i+1})) \times (R(v_i, v_{i+1})) \times p(d_{in}, d_{out}) \quad (3)$$

ここで v_i は移動前のボクセル、 v_{i+1} は移動後のボクセルを表す。また、 $\sigma_s(v_{i+1})$ はボクセル v_{i+1} が持つ散乱係数、 $\sigma_a(v_{i+1})$ はボクセル v_{i+1} が持つ吸収係数である。不均一な材質の場合、各ボクセルは異なる係数をもつ。次に、 $R(v_i, v_{i+1})$ はボクセル v_i とボクセル v_{i+1} との距離を表す。式の最後にある $p(d_{in}, d_{out})$ は位相関数であり、光の入射方向 d_{in} と散乱方向 d_{out} とのなす角を引数とする関数である。本手法では様々な散乱現象に対して用いられる、Henyey-Greenstein 位相関数 [12] を採用した。Henyey-Greenstein 位相関数は式 (4) によって表される。

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

ここで g は散乱の偏りを表すパラメータであり、材質に応じて、 $1 \geq g \geq -1$ の値をとる。ただし、本手法では多重散乱のみを対象としているため $g = 0$ とした。以上のように移動コスト d を決定し、歩数マップを作成することで、光が最も減衰せずに透過する影響力の大きい経路を取得し、その経路を用いて輝度を決定する。

4.3 輝度計算

まず、歩数マップの数値を用いて、ボクセル単位での輝度を計算する。半透明物体を透過する光は、透過距離に応じて指数関数的に減衰することから、歩数を w とすると、式 (5) でボクセルの輝度 $I(v_i)$ を求める。

$$I(v_i) = \exp(-w) \quad (5)$$

次に、歩数マップによって計算される輝度は、ボクセル単位であるため、離散的な値をとる。したがって、実際の描画を行う場合、滑らかに補間する必要がある。本手法では、各ボクセルをメタボールとして補間を行う。具体的に



(a) 提案手法 (16 × 16 × 16)



(b) 提案手法 (32 × 32 × 32)



(c) 提案手法 (64 × 64 × 64)



(d) 正解画像

図 6: 光源が後方に存在する場合の正解画像との比較



(a) 提案手法 (16 × 16 × 16)



(b) 提案手法 (32 × 32 × 32)



(c) 提案手法 (64 × 64 × 64)



(d) 正解画像

図 7: 光源が右方に存在する場合の正解画像との比較

は式 (6) によって、各頂点の輝度を決定する.

$$I(x) = \frac{\sum_{u \in A(v)} \exp\left(-\frac{2r(u,x)}{\sqrt{3}w}\right)}{\sum_{u \in A(v)} L(u) \exp\left(-\frac{2r(u,x)}{\sqrt{3}w}\right)} \quad (6)$$

ここで、 $I(x)$ は位置 x にある頂点 P の輝度、 v は頂点 P を含む表面ボクセル、 $A(v)$ はボクセル v に隣接する表面ボクセルと、ボクセル v の和集合、 $r(u,x)$ は、ボクセル u の中心と位置 x との距離、 $L(u)$ はボクセル u が持つ輝度値を表す.

5. 描画結果

5.1 半透明物体の描画

本手法を用いて様々な材質、光源位置での半透明物体を描画した結果を図 5 に示す. また、ボクセル数と描画時間の関係を表 1 に示す. なお実行環境はメモリ 8GB, Intel core i5-2450M 2.60GHz CPU である. また実装に際して DirectX 9.0c を用いた. また、描画結果は全て 800 × 600 pixel の大きさで描画されている. これらは全て平行光源下で描

画した結果であり、図 5-(b), (d) は後方から、図 5-(a), (c), (e) は斜め後方から光を照射している。また、図 5-(a), (c) は均一な材質からなる半透明物体、図 5-(b), (d), (e) は不均一な材質からなる半透明物体を描画した結果である。

5.2 計算時間

本手法では、モデルのボクセル化およびボクセルが保持する法線のデータセットの作成を事前計算として行う必要がある。事前計算に要する時間は、描画するメッシュの頂点数およびボクセルの分割数に依存するが、表 1 に示すように、これらは数秒程度で行うことが可能である。次に、描画時間であるが、材質やメッシュの頂点数ではなく、ボクセルの分割数に大きく依存する。よって、複雑なオブジェクトを用いる場合でも、計算時間を増やすことなく描画することが可能である。

5.3 正解画像との比較

本手法の妥当性を評価するため、異なるボクセル分割数で本手法を適用した半透明物体の描画結果と、正解値としてパストレーシング法を用いた描画結果の比較を図 6、図 7 に示す。それぞれ左からボクセル数 $16 \times 16 \times 16$ 、ボクセル数 $32 \times 32 \times 32$ 、ボクセル数 $64 \times 64 \times 64$ での提案手法を用いた描画、正解画像の順となっている。これらは均質な大理石からなる Buddha を描画したものである。図 6 では光源は Buddha の後方に置かれており、物体に入射した光は 50 % が透過し、50 % が内部に浸透するものとした。図 7 では光源は左方にあるものとしている。また、正解画像では、二次反射の影響を抑えるため、周囲をアルベドの非常に小さい材質からなる壁で覆った。図 6 と図 7 を比較すると、光源が後方に存在する場合、本手法は光学的に薄い部分ではより光が透過し輝度が高く、厚い部分では輝度が低くなっており、現実に近い半透明物体の光の減衰を表現可能であることが分かる。また、光源が横に存在している場合、提案手法の結果は、本来より輝度が高くなっている。本手法では、最短経路の光路のみを考慮することから、輝度を大きく見積もりやすいことが原因として挙げられる。

ボクセル数を増やし、詳細な歩数マップを作成した場合、より詳細な形状を考慮した描画を行うことができる一方で、正解画像よりも輝度が高くなる傾向が見られた。この原因として、右方から光を当てた場合と同様に、最短経路のみで輝度を決定していることが考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、物体内部に歩数マップを作成することで、影響力の大きい光路のみを選択し、半透明物体における表面下散乱の計算を高速に行う手法を提案した。

本手法の特長として、歩数マップの作成方法を工夫する

ことによって、様々なシーンの描画をロバストに行うことができる点が挙げられる。特に、半透明物体を構成する材質に対して適切に移動コストを決定することで、不均一な半透明物体の描画をリアルタイムに行うことを可能とした。

本手法では、毎フレームボクセライズを行うことによって、半透明物体の任意の形状変化を扱うことが可能である。現段階では、ボクセライズおよび法線データの作成に、数秒程度の時間を要しており、形状変形をリアルタイムに扱うことができない。よって、今後の課題として、GPUを用いたより高速なボクセライズを行うことによる、リアルタイムな半透明物体の変形の描画が挙げられる。

また、本手法による半透明物体の描画に要する時間の大部分は、歩数マップを作成する工程が占める。よって、更なる描画の高速化を行う場合は、歩数マップの作成をより効率的に行う必要がある。これを実現する方法として、GPU上での歩数マップ作成が考えられる。

本手法における問題点として、歩数マップでは影響度の最も大きい一つの経路しか取得することができないことが挙げられる。よって、複数の歩数マップを作成することで、複数の光路を考慮し、より精度の高い描画を行うことが考えられる。

参考文献

- [1] Jensen, H. W. and Christensen, P. H.: *Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps* (1998).
- [2] Kajiya, J. T.: *The rendering equation*, Vol. 20, No. 4 (1986).
- [3] Dijkstra, E. W.: *A note on two problems in connexion with graphs*, Vol. 1, No. 1, Springer (1959).
- [4] Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B.: *A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths*, Vol. 4, No. 2, IEEE (1968).
- [5] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M. and Hanrahan, P.: *A practical model for subsurface light transport* (2001).
- [6] Mertens, T., Kautz, J., Bekaert, P., Van Reeth, F. and Seidel, H.-P.: *Efficient rendering of local subsurface scattering*, Vol. 24, No. 1 (2005).
- [7] Stam, J.: *Multiple scattering as a diffusion process*, Springer (1995).
- [8] Wang, Y., Wang, J., Holzschuch, N., Subr, K., Yong, J.-H. and Guo, B.: *Real-time Rendering of Heterogeneous Translucent Objects with Arbitrary Shapes*, Vol. 29, No. 2 (2010).
- [9] Borshukov, G. and Lewis, J. P.: *Realistic human face rendering for the matrix reloaded* (2005).
- [10] Jimenez, J., Sundstedt, V. and Gutierrez, D.: *Screen-space perceptual rendering of human skin*, Vol. 6, No. 4, ACM (2009).
- [11] 櫛田貴弘, 玉木徹, 向川康博, 久保尋之 and 金田和文: *パスサンプリングを用いた散乱トモグラフィ*, Vol. 2015, No. 51, 一般社団法人情報処理学会 (2015).
- [12] Henyey, L. G. and Greenstein, J. L.: *Diffuse radiation in the galaxy*, Vol. 93 (1941).