

ラジオシティ法のための輝度不連続線およびメッシュの生成に関する効率的な一手法

伊藤 貴之[†] 嶋田 憲司[†] 土井 章男^{††}

本論文では、輝度不連続線 (discontinuity edge) が形成するループに囲まれる閉領域を算出して利用することにより、ラジオシティ法におけるメッシュ生成、輝度値算出、レンダリングの各処理を効率化する手法を提案する。本手法では、本影空間および半影空間との交差判定を行い、生成された不連続線を順次探索して、輝度不連続線ループを生成する。各ループの光源に対する内外判定により、光源と受光面との照射関係 (照射/半影/本影) を求め、これをメッシュ生成、輝度値算出、レンダリングの各処理において利用することで、各処理を高速に実行する。また、本手法によって生成される画像と処理時間を示し、本手法の有用性について考察する。

An Efficient Method of Discontinuity Mesh Generation for Radiosity Calculation

TAKAYUKI ITOH,[†] KENJI SHIMADA[†] and AKIO DOI^{††}

This paper proposes an effective method for generating a mesh and displaying a radiosity image, using loops enclosed by discontinuous shadow edges. Each loop is generated by a sequential search for all discontinuous shadow edges that are generated by intersections between the displayed surface and the umbra/penumbra volume. Simultaneously, the relations between lights and loops are calculated by using an inside/outside test for each light. We also give an example of an image generated by our method, together with the processing time, and evaluate the method in various ways.

1. はじめに

コンピュータ・グラフィックスで写実的な画像を生成するアルゴリズムの一つに、ラジオシティ法¹⁾がある。ラジオシティ法では、物体をパッチとよばれる面素に分割し、それぞれのパッチのもつ光エネルギーの平衡状態を求め、それぞれの部位の輝度を算出する。漸進型ラジオシティ法 (progressive refinement radiosity)²⁾では、パッチをさらに細かい面素 (エレメント) に分割し、未放射エネルギーを持つパッチから他のエレメントへ光エネルギーを順次分配し、収束解を求めている。また、輝度変化の大きい部位のエレメントだけを動的に分割する、適応型メッシュ生成 (adaptive meshing)^{3),4)}も報告されている。

ここで、ラジオシティ法では、パッチやエレメント

への分割を的確に行うことが、計算量・記憶容量・写実性の観点から、非常に重要である。パッチ数・エレメント数の増大は計算量やデータ量の増大を招く。逆に、計算量やデータ量を減らすためにパッチやエレメントを大きくすると、写実性が低下する。そのため、陰影の境界線など、不連続な輝度値を持つ部位をリアルに表現するためには、適応型メッシュ生成の再分割条件の設定が非常に難しくなる。

上記の問題を解決するために、輝度不連続を表す境界線 (discontinuity edge) を受光面 (receiver) 上について求め、これと交差しないようにパッチやエレメントを生成することにより、不連続な輝度分布を鮮明に表現する手法が報告された⁵⁾。ここで、輝度不連続線は、光源 (source) と遮蔽面 (occluder) がつくる輝度不連続面 (critical surface) と、受光面の交線の集合で与えられる。輝度不連続面は、光源の頂点と遮蔽面の辺、または光源の辺と遮蔽面の頂点で形成される、半無限な多角形である。例えば、図 1 (a) において、輝度不連続面は、光源の各頂点 s_1, s_2, \dots と遮蔽面の各辺 o_1o_2, o_2o_3, \dots を含む平面、または光源の各

[†] 日本アイ・ビー・エム (株) 東京基礎研究所
Tokyo Research Laboratory, IBM Japan, Ltd.

^{††} 岩手大学工学部情報工学科
Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University

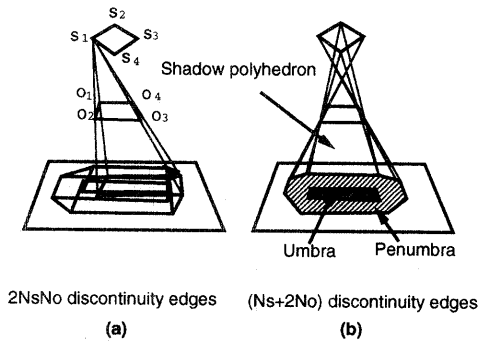


図1 輝度不連続線の生成
Fig. 1 Generation of discontinuity edges.

辺 s_1s_2, s_2s_3, \dots と遮蔽面の各頂点 o_1, o_2, \dots を含む平面である。

輝度不連続線の両側における輝度の連続性には、輝度値そのものが不連続である D_0 級と、輝度値の n 階微分値 ($n = 1, 2, \dots$) が不連続である D_n 級がある。一般的には、接触する遮蔽面または点光源によって形成される D_0 級、遮蔽面1枚と面光源によって形成される D_1 級の輝度不連続線が対象となる。遮蔽面2枚と面光源によって形成される D_2 級の輝度不連続線が対象に含むこともある。

物体数や光源数の多い環境では、輝度不連続線同士の交点計算により線分を分割すると、輝度不連続線の数は加速的に増加する。文献5)では、光源の数だけ同一幾何データを保持し、光源ごとに独立に求めた輝度不連続線を用いて、独立にメッシュを生成し、光源からの直接光放射を求める、というアルゴリズムを推奨している。しかし、この方法では、光源の数に比例してメッシュの数が増大するので、非常に大きな記憶領域を要する。そのため、記憶領域の小さい、ワークステーションやパソコンなどを用いて輝度不連続線を生成する場合には、複数の光源から形成される輝度不連続線を一つの幾何データ上で処理することが望ましく、このために必要な計算量を低減させることは、重要な研究課題の一つである。

一方、光線が遮蔽される空間には、光が完全に遮断される空間を表す本影空間 (umbra) と、光線の一部が照射される空間を表す半影空間 (penumbra) がある。光源および物体を多角形に限定した場合、光線が遮蔽される空間は多面体となる。これを、影多面体 (shadow polyhedron) という。影多面体を構成する面との交線のみを輝度不連続線として用いるという手法⁶⁾も提案されている。図1(a)(b)はそれぞれ、文献5)および文献6)に報告される手法で輝度不連続線を生成した例である。光源および遮蔽面を凸多角形に限

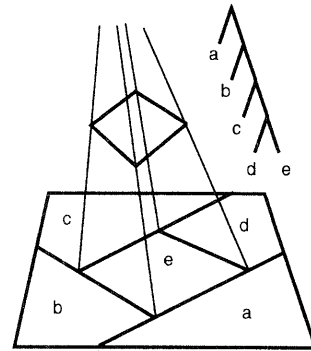


図2 BSP法を用いた輝度不連続線の管理
Fig. 2 Management of discontinuity edges using a BSP-tree method.

定し、それぞれの辺の数を N_s, N_o とすると、生成される輝度不連続線の数は、(a)では $2N_sN_o$ 、(b)では $N_s + 2N_o$ である。光源数および物体数が多い幾何データにおいては、特に(a)の手法は非常に多くの輝度不連続線が生成されるので、そのデータ量および処理時間も増大する。

また、文献5), 6)においては、BSP法を用いて輝度不連続線が保持されている(図2参照)。BSP法は交線が1本生じるたびに受光面を2分してしまうので、最終的には非常に多くの面素が生成され、データ量が増大しやすい。

(b)で得られる本影/半影領域の光源との照射関係は、輝度不連続線生成後のメッシュ生成、輝度値算出、レンダリングの各処理において有用である。一般に、半影領域は輝度変化が大きいことが多いので、半影領域のみを細かくメッシュ生成することにより、データ量を効率化することができる。また、本影領域においては、光源からの照射がないため、輝度算出を省略することができる。しかし、既存の手法において、これらの有用な情報を保持したデータ構造は提案されていない。

本論文では、BSP法を用いずに、輝度不連続線が囲むループを単位として受光面の領域を表現する手法を提案する。本手法では、影多面体を用いて輝度不連続線を生成する際に、それらが形成するループに囲まれる各領域が、半影または本影の領域に属するか否かを判定し、それを保持している。この照射関係データを活用することにより、メッシュ生成、輝度値算出、レンダリングの各処理が効率化される。

2. 本手法のアルゴリズム

本手法における、輝度不連続線およびメッシュ生成部のアルゴリズムを、図3に示す。

本手法では、光源と遮蔽面から影多面体を生成し、影多面体と受光面との交線として輝度不連続線を生成する。生成された輝度不連続線は、BSP法を用いずに、輝度不連続線が形成するループを単位として保持される。さらに、ループに囲まれる領域と影多面体との内外判定によって、光源と受光面との照射関係を判定し、そのデータを各領域ごとに保持する。輝度不連続線の生成後に、ループを単位として受光面を分割し、分割された面ごとにメッシュを生成する。輝度変化が大きいと推測される半影領域のみに小さいメッシュを生成することにより、パッチやエレメントの増加を抑えることができる。

なお、各々のルーチンの簡略化のため、本論文では、光源、遮蔽面、受光面を凸多角形 (convex polygon) に限定している。そのため、光源および面はそれぞれ前処理で凸多角形に分割されているものとする。また、輝度不連続線生成部の高速化のため、輝度不連続

```
void Meshing-for-Radiosity() {
    for( each receiver ) {
        Divide concave or holed faces into convex faces;
    }
    for( each light ) {
        for( each occluder ) {
            Generate a shadow polyhedron;
            for( each receiver ) {
                Generate discontinuity edges;
                Construct discontinuity loops;
                Check the relationship between the loops and the lights;
            }
        }
    }
    for( each receiver ) {
        Divide the receiver into faces enclosed by discontinuity loops;
        Specify the size of a patch and that of an element;
        Generate patches and elements;
    }
}
```

図3 輝度不連続線およびメッシュ生成部のアルゴリズム
Fig. 3 Algorithm for generating discontinuity mesh generation.

線ループによる受光面の分割は、すべての輝度不連続線が生成された後に一括して実行されている。

2.1 影多面体の生成

影多面体を生成する代表的な手法として、文献7)に報告された手法があげられる。影多面体生成時の遮蔽物体には、多面体等の立体を対象とする場合と、多角形等の面を対象とする場合が考えられる。本論文では、遮蔽物体を凸多面体に限定し、文献7)に類似した下記の手法で、影多面体を生成している。

本影空間を生成するために、まず遮蔽面の辺を一つ選択し、これと光源の各頂点を含まないように形成される平面を生成する。例えば、図4では、遮蔽面の辺 o_1o_2 を選択し、これと光源の各頂点 s_1, s_2, \dots を含む各平面を生成している。この時、これらの平面のうち、遮蔽面とのなす角が最小である平面が、本影空間を形成する。遮蔽面の各辺 o_1o_2, o_2o_3, \dots について、同様に平面を生成し、遮蔽面とのなす角が最小である平面を選択し、これを集めることで、本影空間を形成する多角形の集合を求めることができる。これらの多角形を、多角形同士の交線で切りとることにより、本影空間を表す多面体が生成される。

半影空間を生成するために、まず光源の頂点 s_1, s_2, \dots と遮蔽面の辺 o_1o_2, o_2o_3, \dots を含んで形成される平面、および、光源の辺 s_1s_2, s_2s_3, \dots と遮蔽面の頂点 o_1, o_2, \dots を含んで形成される平面のうち、遮蔽面とのなす角が最大である平面を一つ選択する。例えば、図5では、光源の頂点 s_1 と遮蔽面の辺 o_2o_3 を含む面が選択されている。続いて、これらの平面のうち、選択した平面と隣接し、さらにその中で選択した平面とのなす角が最大であるものを選択する。図5の例では、選択された面の1辺 s_1o_3 を共有する面の中で、なす角が最大である面として、光源の辺 s_1s_2 と遮蔽面の頂点 o_3 を含む平面が選択されている。以後、なす角が最大である隣接平面を順次選択することにより、平面群の凸包 (convex hull) を形成することができる。この凸包は、半影空間を表す多面体に相当

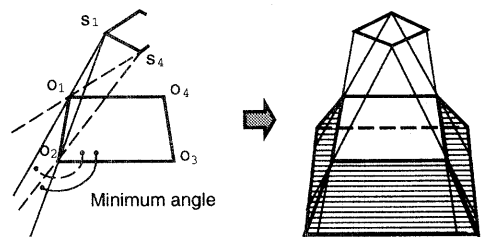


図4 本影空間の生成
Fig. 4 Generation of umbra space.

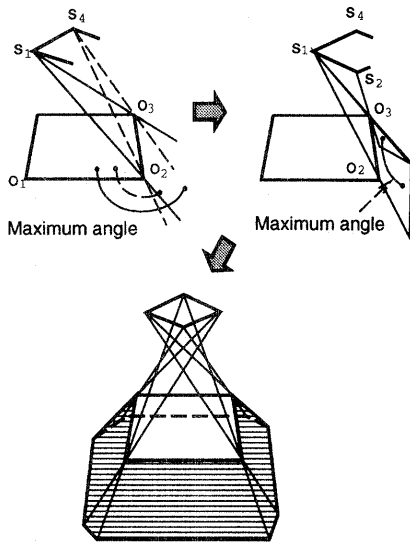


図 5 半影空間の生成
Fig. 5 Generation of penumbra space.

する。

本手法では、遮蔽面と輝度不連続面とのなす角を求めるために、遮蔽面の法線ベクトルが必要となる。しかし、後で説明するループ処理も、面の法線ベクトルが必要であるので、これを前処理にて算出しておく。この法線ベクトルを有効に利用することで、影多面体の生成を効率化する。

2.2 輝度不連続線の生成

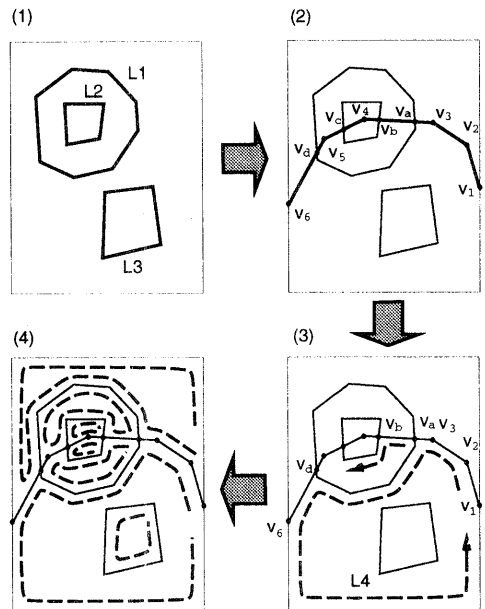
受光面上における輝度不連続線 (discontinuity edge) は、影多面体の面と受光面との交線を求めることで得られる。本手法では、

- (1) 影多面体の各辺と受光面との交点を算出する
 - (2) 交点を結んで、線を生成する
 - (3) 既存の輝度不連続線との交点を求める
- の手順によって、輝度不連続線を求めている。

2.3 ループ処理による受光面の領域分割

本手法では、輝度不連続線、および面の境界線がつくるループを、線分のリストとして保持している。新しく生成された輝度不連続線が既存の輝度不連続線や境界線と交点を持たない場合には、新しい輝度不連続線によるループが幾何データに付加される。交点を持つ場合には、既存のループのうち交点を持つ線分を含むものを消去し、新しい輝度不連続線を含むループが生成され、幾何データに付加される。

まず、一つの影多面体 (本影領域または半影領域) によって新しく生成された輝度不連続線の一覧表を作成する。それぞれの線分は、表中で「前向き」「後向き」の二つのフラグを持っている。



| | v_1v_2 | v_2v_3 | v_3v_a | $v_a v_b$ | $v_b v_4$ | $v_4 v_c$ | $v_c v_5$ | $v_5 v_d$ | $v_d v_6$ |
|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Forward | ○ | ○ | ○ | | | | | | ○ |
| Backward | | | | | | | | | |

図 6 輝度不連続線ループの生成
Fig. 6 Generation of loops enclosed by discontinuity edges.

新しいループを生成する工程として最初に、輝度不連続線の線分のうち、上記の表のフラグが立てられていない一つを選択する。その線分を出発点として、頂点を共有する不連続線を順次探索する。探索した輝度不連続線に対して、表のフラグの「前向き」「後向き」の一方を立てる。頂点を多くの不連続線が共有する場合には、直前に探索した輝度不連続線に対して、探索の進行方向から左向きに見て、なす角が最小である輝度不連続線を選択し、探索を続行する。最初に選択した線分に再び到達したら、探索を止め、探索した輝度不連続線群を一つのループとして登録する。

この探索を、すべてのフラグが立つまで繰り返すことにより、輝度不連続線ループが更新される。

この一連の処理を、図 6 を例にして説明する。まず、(1) に示すように、既存の輝度不連続線ループ L_1 , L_2 , L_3 が存在する受光面を仮定する。続いて (2) に示すように、この受光面に、 $v_1 \sim v_6$ の六つの頂点から成る新しい輝度不連続線が生成され、 $v_a \sim v_d$ の四つの交点を得られたとする。この時、各々の線分 v_1v_2 , v_2v_3 , v_3v_a , などに対し、「前向き」「後向き」の二つのフラグを持つ表を作成する。新しいループを作成する

ために、表中のフラグの立てられていない欄を一つ選択し、その線分を出発して隣接線分を順次選択する。例えば、線分 v_1v_2 を「前向き」の方向で選択し、隣接する線分を順次探索して得られたループが、(3)に示すループ L_4 である。頂点 v_1 を出発点として、 v_2, v_3, v_a と探索し、 v_a において、 v_3v_a から時計回り方向への角度が最小である既存の不連続線を選択する。同様に v_d においても、時計回り方向への角度が最小である不連続線を選択した後、最終的に v_1 に戻っている。この時、探索された線分 $v_1v_2, v_2v_3, v_3v_a, \dots, v_dv_6, \dots$ の、それぞれに「前向き」のフラグが立てられている。続いて、フラグの立てられていない線分の中から、 $v_a v_b$ を選択し、新しいループを作成している。この探索を繰り返すことにより、(4)の点線に示すように、受光面上には七つのループが生成される。上記の手法によって生成されたループは、分割されて生成される受光面の、外枠 (Outside Loop) または穴 (Inside Hole) を形成している。本手法では、ループ生成時に、新規に生成されたループの回転方向を求め、そのループが外枠になるべきものか穴になるべきものか判別している。

2.4 光源との照射関係の管理

光源と受光面との照射関係 (照射/半影/本影) は、その光源がつくる影多面体と、輝度不連続線ループが囲む領域との、内外判定結果によって求められる。本手法では、各々の輝度不連続線ループに、各光源との照射関係を表す変数を保持している。この内外判定は、影多面体をつくる光源を対象として、新規に生成されたループのうち、外枠になると判定されたものに対して実行される。

光源とループの照射関係は、本影=3, 半影=2, 照射=1, 未処理=0 の4種類で表され、2bit 単位で保持されている。例えば、光源が16個以下である場合には、ループ一つに対して4byte の記憶領域を用いて、表1のように照射関係を保持することができる。

2.5 メッシュ生成

本手法では、生成された輝度不連続線の周辺の輝度分布や、輝度不連続線に囲まれる領域の照射関係を考慮したメッシュ生成を実現している。

接触する遮蔽面や点光源によって生じる、 D_0 級の輝度不連続線の両側では、輝度値が不連続である。この

場合には、輝度不連続線上の両側のエレメントによって頂点を共有することはできない。逆に、密接していない遮蔽面と面光源によって生じる、 D_1 級の輝度不連続線上は、隣接するエレメントは頂点を共有する必要がない。さもないと、輝度値が D_0 級の連続性を保たなくなる可能性があるからである。本手法では、 D_0 級の輝度不連続線上においては、受光面の分割時に、両側のループに個別の辺と頂点を与えている。このため、メッシュ生成時には、輝度不連続線の両側に隣接するメッシュに、個別の頂点が与えられるので、輝度の洩れ (Shadow Leak および Light Leak) は生じない。 D_1 級の輝度不連続線上においては、両側のループの辺と頂点を共有させているので、メッシュ生成時にも隣接メッシュの頂点が共有される (図7参照)。

一般に、半影領域においては、輝度変化が大きいことが多い。そこで、本手法では、光源との照射関係を参照し、半影領域では他の領域よりも小さいメッシュを生成する。この処理により、エレメント数の増加を抑え、かつ写実性の高い画像を得ることができる。

上記の機能性を満たすために要求される、メッシュ生成部の特徴には

- 輝度不連続線とメッシュ境界の整合性
- メッシュの大きさ制御の容易さ

などがあげられる。

また、フォームファクタ算出時のサンプリング誤差を少なくするために、

- 歪みのないメッシュ形状

も要求される。

本論文では、文献8)に報告されるメッシュ生成手法を用いている。この手法では、物理現象の支配方程式をモデルとしてノードを配置しており、輝度不連続線上のノードの配置や、メッシュの大きさなどを、容易に制御することができる。また、配置されたノードは、Delauney 網を用いて接続されるので、歪みの少ないメッシュが生成される。

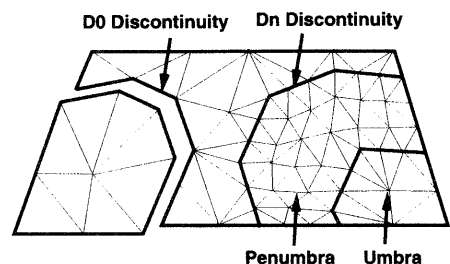


図7 メッシュ生成
Fig. 7 Mesh generation.

表1 光源との照射関係

Table 1 Light sources and their relationships.

| | 1 byte | | | 2 bytes | | | | ... | |
|------|--------|---|---|---------|---|---|---|-----|-----|
| 光源番号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | ... |
| 照射関係 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 0 | 0 | ... |

2.6 ラジオシティ法による輝度計算

漸進型ラジオシティ法では、未放射エネルギーの大きい物体からの放射が他のエレメントに順次分配される。そのため、光源からの直射光による放射エネルギーが最初に算出される。

本手法では、

- (1) それぞれのエレメント頂点において、光源からの直射光によるエネルギーの収集 (gathering) 量を求める。
- (2) 未放射エネルギーの大きいパッチを選択し、そのパッチからの間接光の、他のパッチに属するエレメントへの放射 (shooting) 量を求める。
- (3) エレメントに与えられたエネルギー量から、それぞれのエレメント頂点におけるエネルギーを補間により求める。

という手順で輝度を求めている。

ここで、2.4 節で求めた光源との照射関係を利用することにより、光源からの直接光によるエネルギー分配の算出を効率化することができる。照射領域 (本影領域にも半影領域にも属さない領域) においては、それぞれのエレメント頂点から見て上空に光源が占める面積の割合を、面積分により算出し、光源からのエネルギー分配量を算出する。半影領域においては、レイトレーシング法などのポイントサンプリングにより、光源の可視部分の割合を求め、面積分によって求められるエネルギー分配量に乗じている (図 8 参照)。本手法では、半影領域のみにポイントサンプリングを用いているので、すべての幾何データを半立方体 (hemisphere)⁹⁾などに投影する従来の手法に比べ、ポイントサンプリングに要する計算量を低減することができる。

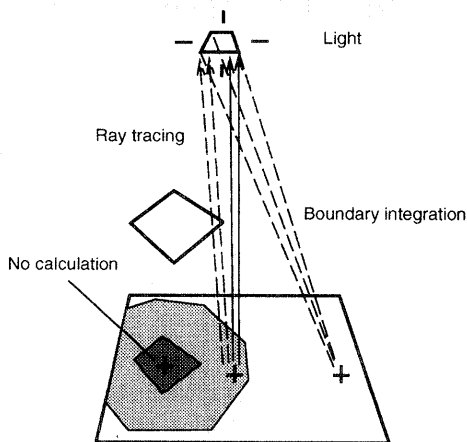


図 8 直接光収集量算出の効率化

Fig. 8 Efficient method for calculating direct light energy.

できる。

間接光によるエネルギー算出には、漸進型ラジオシティ法で提案されているアルゴリズムを用いている。パッチからの放射エネルギー量を求めるこの手法は、エレメントの収集エネルギー量を求めるアルゴリズムに比べて、近似解が高速に得られる利点がある。

フォームファクタ算出を高速化する手法として、筆者らは文献 10) に提案される手法を用いている。この手法では、エレメントを半球の底面 (hemisphere base) に投影し、Zバッファ法によるポイントサンプリングによって、フォームファクタを算出している。

2.7 レンダリング

前節の手法によって輝度を求められたエレメントは、Zバッファ、レイトレーシング法などの手法によってレンダリングされる。

ラジオシティ法の間接光の反復計算中の表示に関しては、Zバッファなどの高速なレンダリング手法を用いることが望ましい。

ラジオシティ法の反復終了後のレンダリングには、レイトレーシング法を用いることが望ましい。ここで、通常のレイトレーシング法では、直射光の鏡面反射光の輝度計算のために、光源方向にレイを追跡し、直射光を放射する光源との照射関係を求める必要がある。本手法では、各ループごとに求めた照射関係を各エレメントから参照することにより、半影領域以外の領域における光源方向へのレイ追跡を省略することができる。

3. メッシュ生成結果と処理時間の評価

本手法をインプリメントしてメッシュを生成し、ラジオシティ法を実行して画像を生成した結果を以下に示す。使用した計算機は IBM RS/6000 (Model 340) である。

図 9 は、本手法を適用して輝度不連続線を生成し、ループ単位で受光面を分割した例である。図 10 は、この一つの面についてメッシュを生成した例である。メッシュの大きさは、半影領域でのみ小さく自動設定されている。

図 11 は、このメッシュを用いてラジオシティ法を実行し、レンダリングして生成された画像である。半影のなだらかな輝度変化が表現されている。

図 12 は、多角形近似された球を、非常に小さな面光源で照射した環境についてラジオシティ法を実行したものである。影の境界線が鮮明に表現されている。

図 13 は、多面体で表現された椅子について、上側が輝度不連続線を用いてメッシュを生成した結果であ

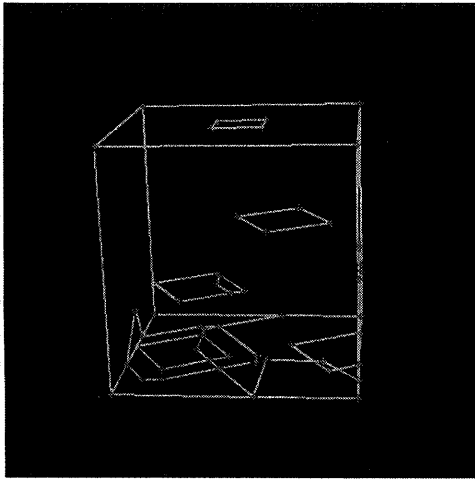


図9 輝度不連続線生成結果

Fig. 9 A result of generating discontinuity edges.

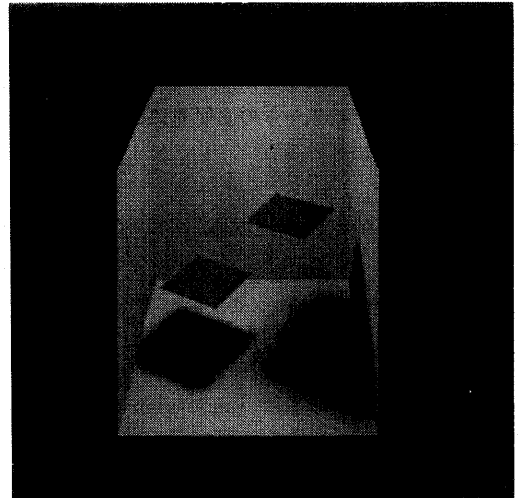


図11 レンダリング結果 (1)

Fig. 11 A rendering result (1).

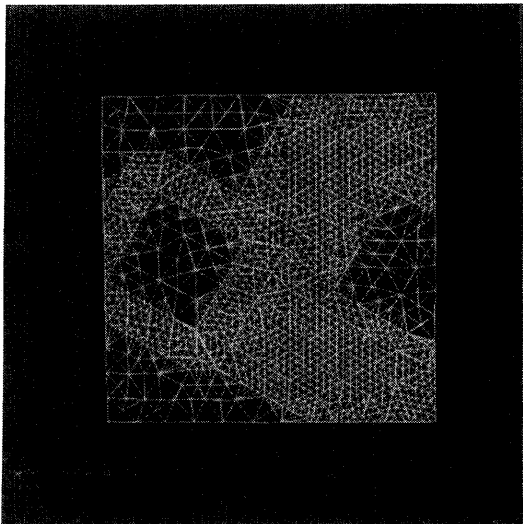


図10 メッシュ生成結果

Fig. 10 A result of mesh generation.

り、下側が適応型メッシュ分割によってメッシュを生成した結果である。図14は、これらのメッシュを用いてラジオシティ法を実行したものである、上側の画像の方が椅子の骨格がつくる陰影を正確に表現しており、本手法の優位性が見られる。

続いて、本手法を適用したラジオシティ法の計算時間等について考察するために、メッシュ生成結果および計算時間の測定結果を、表2に示す。ここで、データ1およびデータ2は、それぞれ図11、図12の生成に用いたデータである。

BSP法において、受光面の分割数は、少なくとも

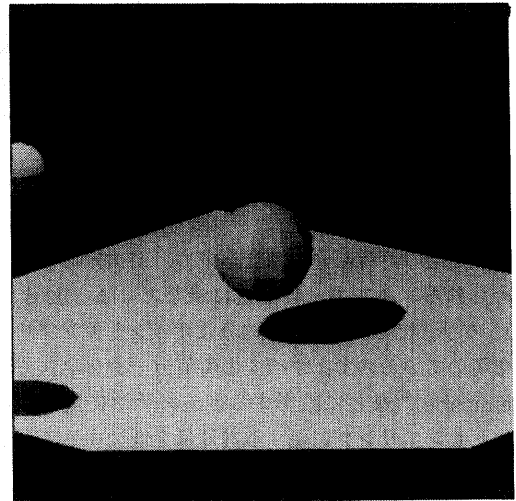


図12 レンダリング結果 (2)

Fig. 12 A rendering result (2).

$N_{f1} + N_d$ 以上である。表2において、 N_d が N_{f2} よりもはるかに大きくなっていることから、本手法はBSP法に比べ、受光面の分割数が少なくなることがわかる。また、表2において、半影領域のみを細かく生成したエレメント数 N_{e1} は、半影領域以外の領域も同じ大きさに生成した時のエレメント数 N_{e2} に比べ、非常に小さくなっている。本手法では、半影領域以外の領域のメッシュの増加を抑えることができるので、全体としてエレメントの増加を抑えることができる。エレメントの増加を抑えることで、記憶容量の節約と、ラジオシティ法実行時におけるフォームファクタの算出、レンダリング実行時における座標変換や交

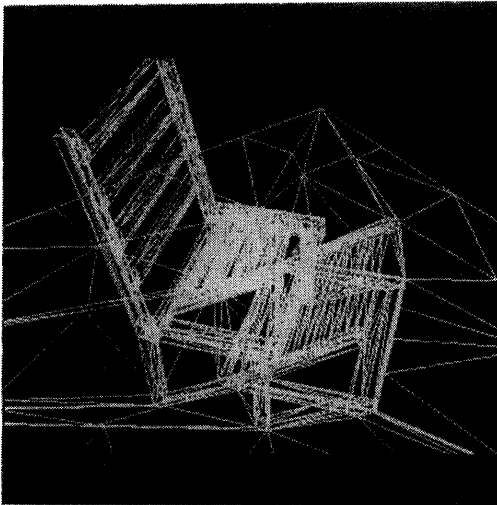


図 13 レンダリング結果 (3)

Fig. 13 A rendering result (3).

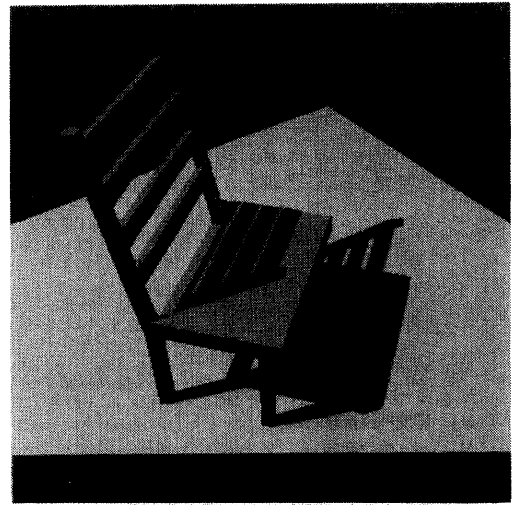
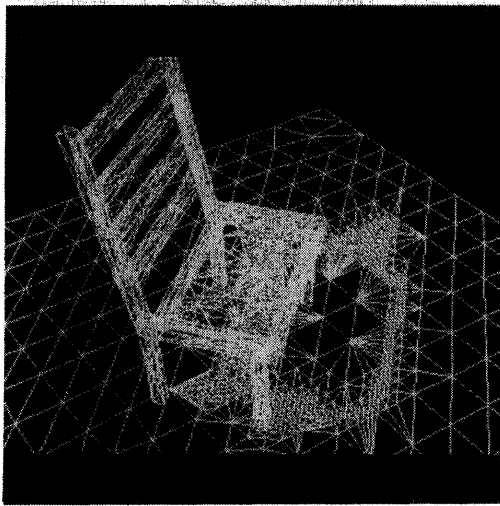
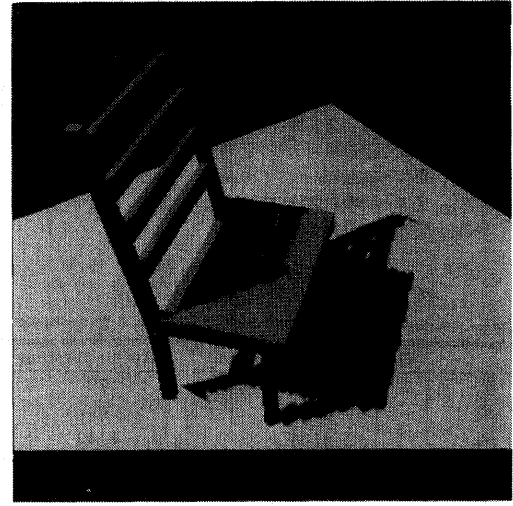


図 14 レンダリング結果 (4)

Fig. 14 A rendering result (4).



点計算の高速化を図ることができる。

表 3 は、図 13 に示した幾何データに対して、輝度不連続線を用いた場合および適応型メッシュ分割を行った場合の処理時間である。物体数や光源数が少なく曲面を含まない、図 13 に示したようなシーンにおいては、適応型メッシュ分割による方法に比べて、本手法は計算時間および記憶領域使用量においても有利であることがわかる。

続いて、本手法の輝度不連続線生成部の計算時間の内訳について考察する。輝度不連続線を生成し、ループ単位で受光面を分割するまでの、各処理に要する計算時間は、表 4 に示すとおりである。

ここで、遮蔽面および受光面の対象となる面の数を n とすると、 T_{isr} および T_{lit} は、影多面体と受光面の相互関係を処理する部分であるため、その処理量は

最大で $O(n^2)$ である。本論文の適用例では、図 12 中の球は多面体で近似されており、その面の数は非常に多い。表 4 の結果から見てわかるとおり、本手法は幾何データの増大とともに、

- (1) 影多面体と受光面の交点計算部 T_{isr}
 - (2) 輝度不連続線同士の交点計算部 T_{idd}
- の両者が著しく増大している。

現時点でのインプリメンテーションでは、交点計算に高速化手法を用いていないが、いくつかの手法を用いることが考えられる。例えば、上記の (1) については、

- 空間分割 (voxel) 法を用いて受光面を分類する
- 輝度不連続線ループを木構造 (tree) などの階層を用いて保持する

また、上記の (2) については、

表2 本手法の計算時間
Table 2 Computation time of our algorithm.

| | データ1 | データ2 |
|-----------------|--------|--------|
| N_{f1} | 8 | 721 |
| N_{f2} | 20 | 2495 |
| N_d | 40 | 3116 |
| N_p | 486 | 6030 |
| N_{e1} | 3485 | 11230 |
| N_{e2} | 6090 | 17150 |
| T_d (sec.) | 0.12 | 166.58 |
| T_m (sec.) | 1.77 | 15.28 |
| T_{rs} (sec.) | 156.63 | 289.02 |

N_{f1} ループ分割前の受光面の数
 N_{f2} ループ分割後の受光面の数
 N_d 輝度不連続線の数
 N_p バッチの総数
 N_{e1} エレメントの総数 (半影領域のみ細かく生成)
 N_{e2} エレメントの総数 (均一に細かく生成)
 T_d 輝度不連続線生成に要した処理時間
 T_m メッシュ生成に要した処理時間
 T_{rs} ラジオシティ法実行に要した処理時間
 T_{sdw} 影多面体生成部
 T_{isr} 影多面体と受光面の交点計算部
 T_{idd} 輝度不連続線同士の交点計算部
 T_{lop} 輝度不連続線ループの更新部
 T_{iit} 光源との照射関係の記録部
 T_{div} 受光面の分割部

表3 メッシュ生成時間および輝度計算
Table 3 Computation time needed for mesh generation.

| | Discontinuity meshing | Adaptive meshing |
|-----------------|-----------------------|------------------|
| N_f | 79 | 79 |
| N_p | 3166 | 358 |
| N_e | 3166 | 8142 |
| T_d (sec.) | 0.83 | 0.0 |
| T_m (sec.) | 3.56 | 14.54 |
| T_{rs} (sec.) | 7.85 | 46.61 |

表4 輝度不連続線生成部の計算時間
Table 4 Computation time needed for generation of discontinuity edges.

| | データ1 | データ2 |
|------------------|------|--------|
| T_{sdw} (sec.) | 0.03 | 0.21 |
| T_{isr} (sec.) | 0.04 | 154.48 |
| T_{idd} (sec.) | 0.02 | 3.76 |
| T_{lop} (sec.) | 0.01 | 2.13 |
| T_{iit} (sec.) | 0.01 | 5.50 |
| T_{div} (sec.) | 0.01 | 0.50 |

- 輝度不連続線の多く生成された受光面上では、線分の存在領域判定 (MiniMax 判定) を用いる
 - 輝度不連続線ループの隣接関係を用いて、交差判定の対象となる線分を限定する
- などの高速化手法を適用することができる。

BSP 法を用いた手法では、光源との照射関係を求めた手法は報告されていないが、仮にこれを適用した

とすると、その処理量は影多面体の数と受光面の分割数に依存する。表2の結果のように、一般には BSP 法は本手法よりも受光面の分割数が多くなるので、その処理量は本手法よりも多くなるはずである。

本手法では、ループを生成する処理が必要になるが、表4で見ると、この部分の計算量は全体と比較して少ないことがわかる。一方、BSP 法は、必要以上に長い輝度不連続線を生成するため、物体が多くなった時に、輝度不連続線どうしの交点計算が飛躍的に多くなる。そのため、BSP 法においては、 T_{lop} が不要であるかわりに、 T_{idd} の計算量が大きく増加することが予想される。

4. むすび

本論文では、BSP 法を用いずに、ループを単位として輝度不連続線を保持することにより、メッシュ生成、ラジオシティ法、レンダリングを効率化する手法を提案した。今後は BSP 法をインプリメントして処理速度を測定し、本手法の有用性を考察したい。また、影多面体との交点計算、輝度不連続線同士の交線計算等の高速化が、今後の課題としてあげられる。

謝辞 貴重な御助言を賜りました、日本アイ・ビー・エム (株) 東京基礎研究所の清水和哉氏、杉本和敏氏、およびグラフィックスグループの諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Goral, C.M., Torrance, K.E. and Greenberg, D.P.: Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surfaces, *Computer Graphics*, Vol.18, No.3, pp.213-222 (1984).
- 2) Cohen, M.F., Chen, S.E., Wallace, J.R. and Greenberg, D.P.: A Progressive Refinement Approach for Realistic Image Synthesis, *Computer Graphics*, Vol.22, No.4, pp.75-84 (1988).
- 3) Campbell, A.T. and Fussell, D.: Adaptive Mesh Generation for Global Diffuse Illumination, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.155-164 (1990).
- 4) Baum, D.R., Mann, S., Kevin, P.S. and Winget, J.M.: Making Radiosity Usable: Automatic Preprocessing and Meshing Techniques for the Generation of Accurate Radiosity Solutions, *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp.51-60 (1991).
- 5) Lischinski, D., Tampieri, F. and Greenberg, D.P.: Combining Hierarchical Radiosity and Discontinuity Meshing, *Computer Graphics*, Vol.27, No.3 (1993).

- 6) Chin, N. and Feiner, S.: Near Real-Time Shadow Generation Using BSP Trees, *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp.99-106 (1989).
- 7) Nishita, T. and Nakamae, E.: Continuous Tone Representation of Three-dimensional Objects Taking Account of Shadows and Inter-reflection, *Computer Graphics*, Vol.19, No.3, pp.23-30 (1985).
- 8) 嶋田, 伊藤, 土井: ラジオシティ法の写実性と処理速度向上のための三角メッシュ分割法, 第10回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.44-55 (1994).
- 9) Cohen, M.F. and Greenberg, D.P.: The Hemicycle: A Radiosity Solution for Complex Environments, *Computer Graphics*, Vol.19, No.3, pp.31-40 (1985).
- 10) Doi, A.: Bidirectional Radiosity Approach for Complex Environments, *Denshi Tokyo*, No.32, pp.93-99, IEEE Tokyo Section (1993).

(平成6年11月15日受付)

(平成7年9月6日採録)



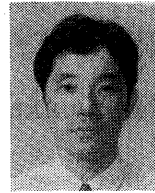
伊藤 貴之 (正会員)

1990年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1992年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、日本アイ・ピー・エム(株)入社。現在、日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所にて、レンダリングおよびボリュームビジュアライゼーションに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



嶋田 憲司 (正会員)

1983年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1985年同大学院工学系研究科修士課程修了。同年より日本アイ・ピー・エム(株)ジャパン・サイエンス・インスティテュート(現東京基礎研究所)勤務。1993年米国マサチューセッツ工科大学大学院博士課程修了。Ph.D. 現在、日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所にて、計算機による形状処理、計算力学、コンピュータ・グラフィックスなどの研究開発に従事。1994年情報処理学会山下記念研究賞受賞。日本機械学会、日本応用数理学会、日本計算工学会、ACM、ASMEの会員。



土井 章男 (正会員)

昭和55年神戸大学工学部土木工学科卒業。昭和57年同大学院修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム(株)入社。平成7年岩手大学工学部情報工学科専任講師。現在に至る。コンピュータ・グラフィックスによる可視化技術、等高面表示、ラジオシティ法やレイトレーシング法による画像生成手法の研究に従事。工学博士。IEEE、画像電子学会、各会員。