

ラジオシティ法におけるゼロ3角形を用いたメッシュ分割

鈴木 剛 夫*¹⁾ 佐藤 真 知 子*²⁾

Mesh Generation Using Zero-Triangle for Radiosity

Masuo SUZUKI Machiko SATO

This paper proposes an effective method for generating a mesh for the radiosity calculation. The proposed method introduces “the zero triangle”—an imaginary triangle with an area of zero—to circumvent the creation of the T-vertices. The method also restricts the element shape to the triangle. These greatly simplify the meshing process, which results in reducing the processing time. The quality of images rendered by the proposed method is comparable to the one by the adaptive meshing algorithm.

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ひとつにラジオシティ法がある^{[1][2]}。ラジオシティ法は、環境内の間接光を正確に評価しようとする方法で、光エネルギーが閉じた環境内で保存されるという仮定のもとに、環境内に存在する面相互の影響を考慮し平衡状態を求めて、面が放出する光エネルギーを決定する。このため、計算負荷が大きく、広く用いられるには至っていない。

ラジオシティとは、面から放出される単位面積当りの光エネルギーを指す。実際ラジオシティを求めるには、環境内に存在する面をパッチと呼ばれる面素に分割し、パッチ毎のエネルギー収支を表わす方程式を連立させて解くことになる。漸進的ラジオシティ法では、連立方程式を解いて、全

てのパッチのラジオシティを同時に求める代わりに、近似解から出発し、これを徐々に改良する方法を採用した。この時、大きな放射エネルギーを持つパッチから順にエネルギーの分配を行うことによって、計算時間の短縮に成功している^[3]。一方、パッチ分割の良否も、計算時間、記憶容量、レンダリング結果に大きく影響する。一般的に、パッチを小さくすると、より写実的な画像が得られるが、パッチ数が増加することによって計算コストが増える。逆にパッチを大きくして、パッチ数を減らすと計算コストは減少するが、画質面で満足のいく結果が得にくい。適応型メッシュ生成法では、輝度変化が大きな部分のみ、パッチを細かい面素(エレメント)に分割することにより、処理の効率化を図っている^[4]。

適応型メッシュ生成法は、必要な部分のみでパッチ分割を行うため、全体のメッシュ数を極端に増加させることなく、高品質な画像を得ることができる方法である。しかし、単純な分割に比べてメッシュ構造が複雑になり、これを生成、管理するための計算負荷が無視できない。メッシュ構造

*¹⁾東京工芸大学大学院工学研究科画像工学専攻
(現 セガ・エンタープライゼス)

*²⁾東京工芸大学工学部画像工学科助教授
1999年9月22日 受理

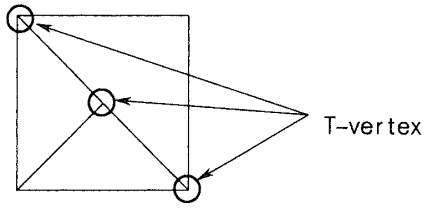


図1 Tvertex

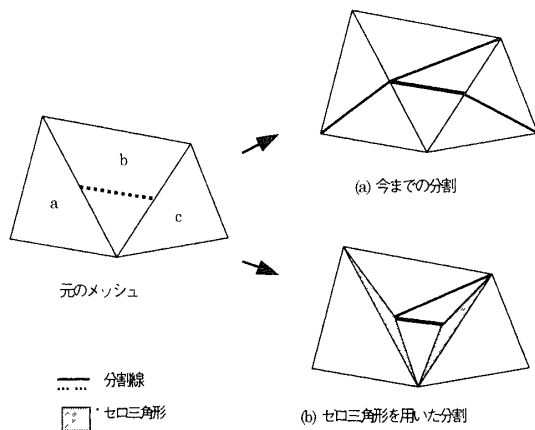


図2 ゼロ三角形を用いた分割

を複雑にしている要因の1つは T-vertex の処理である。T-vertex とは、図1に示す様に3つ以上の頂点が1直線上に並んでしまう状態をさすが、この状態が起こるとレンダリング画像において、その頂点を持つ面と隣接する面の間に割れ目が発生したり、頂点間の色補間がうまくいかないなどの不都合を生じる可能性がある。従って、分割は T-vertex を生じないように行う必要があるが、パッチを一部分だけ分割すると必ずどこかに T-vertex が発生するので、これを消去する処理が必要になる。Baum らの方法^[4]では、T-vertex が発生すると隣接エレメントを仮分割し、仮分割状態であることをアンカーという状態で示す；分割が進み、アンカー状態のエレメントに T-vertex が新たに加わると、新しい T-vertex の位置を考慮して、仮分割し直す；新しい T-vertex が加わったことで、仮分割状態とするよりも、通常分割をする方が良い場合はアンカー状態をはずし、通常分割する；ことによって T-vertex を消去している。しかし、この方法では、分割のたび毎に隣接エレメントの状態を確認して更新しなければならず、これに要する計算コストは、メッシュ生成

処理において大きな割合を占めている。本論文では、メッシュ生成時の T-vertex 問題をゼロ3角形と呼ばれる特殊な3角形を用いて解決する方法を提案する。この方法では、分割が周辺エレメントに及ばないため、従来方法に比べてメッシュ生成処理が単純化され、処理の効率化が期待できる。

2. ゼロ3角形

ゼロ3角形とは、3角形を構成する3つの頂点が同一直線上にある面積がゼロの3角形で、元来、ソリッドモデルの一手法である Brep の境界面を3角形のみで表現する時、形状演算などで分割が周辺の3角形に伝播し、不必要な3角形分割が発生するのを防ぐ目的で考案された^[5]。例えば、図2で3角形 b が分割されると、従来方法では隣接する3角形 a, c にも分割が及ぶが、a と b, b と c の間にゼロ3角形を置くと、分割は a, c には及ばない。これを、ラジオシティ計算におけるエレメント分割に適用するには、エレメント分割途中発生した T-vertex に、図2と同様にゼロ3角形を置けばよい。これによって、周辺エレメントの分割が不要になるので、分割対象となるエレメントのみを処理すればよく、アンカーによる管理は不要になる。

3. 手法概要

提案手法によるメッシュ生成の手順を以下に示す。

正方形に近い4角形に分割

```

while 全エレメント {
  while あるエレメントの頂点に対して {
    ラジオシティを計算
  }
  if 隣の頂点とのエネルギー差が規定値以上 {
    頂点を追加する
    if 隣接部分にゼロ3角形がある {
      頂点を接合し、ゼロ3角形を消去
    }
  }
  else ゼロ3角形を置く
}

```

```

    }
else 分割しない
}

while 全エレメント {
    if 隣接するゼロ3角形が存在 {
        頂点を結合し、ゼロ3角形を消去
    }
}

```

計算は、シーン内に存在する面を比較的大きなパッチに分割した初期メッシュを使用して開始する。この時、パッチ形状はできるだけ縦横比が1に近い形にしておくことが望ましい。初期パッチの縦横比が大きいと、分割によって、エレメントが扁平な3角形となるが、扁平な3角形は、フォームファクタや面積を計算する際に桁落ちによる誤差が大きくなるため、ラジオシティ計算の不正確さを招く危険性がある。このため、扁平な3角形を生じる可能性のある細長い長方形などは、前もって、できるだけ正方形に近い4角形に分割しておく必要がある。

ラジオシティ計算では、通常、エレメント形状は、3角形と4角形が混在するが、本手法では3角形のみを使用する。エレメント形状を3角形に統一することにより、データ構造、処理アルゴリズムの単純化が図れる。4角形を3角形に分割することで、エレメント数は増えるが頂点の数は変化しないので、放射側をパッチ単位、受光側を頂点単位で計算するラジオシティ計算では計算量の増加がほとんどないと考えられる。

アルゴリズムは、適応型メッシュ生成法を基本とし、エレメント頂点における光エネルギーを計算した後、隣接する頂点間のエネルギー差が大きい場合は頂点を追加し、エレメントを分割する。3角形エレメントは、図3に示すように各辺の中央に頂点を追加し、これらを結ぶ線を用いて分割するが、追加した頂点到隣接してゼロ3角形が存在しなければ、その頂点はT-vertexとなるので、ゼロ3角形を配置する。また、図4のように追加した頂点の隣接エレメントにすでにゼロ3角形が

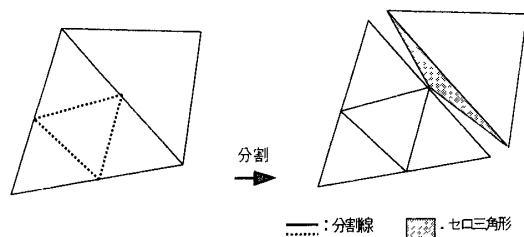


図3 ゼロ3角形を用いたメッシュ分割

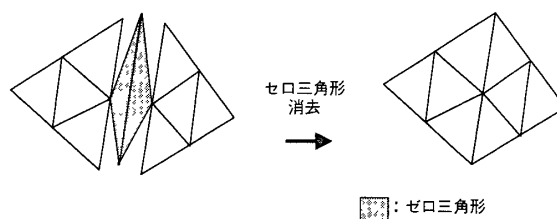


図4 細分化途中のゼロ3角形消去

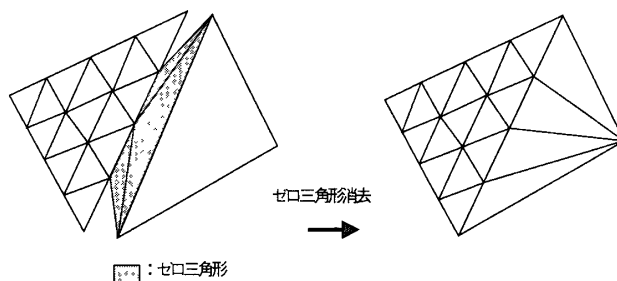


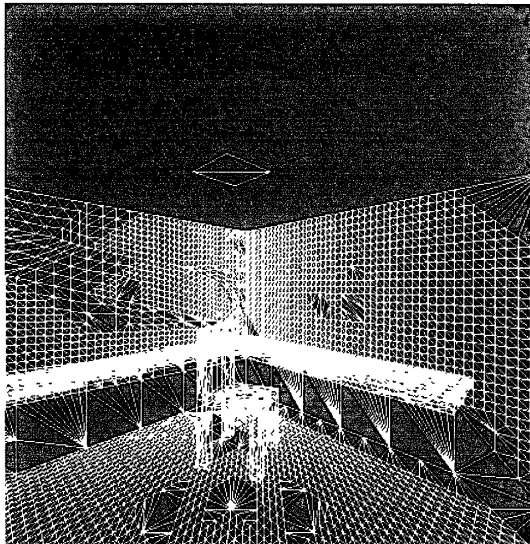
図5 ゼロ3角形の消去

存在する場合は、新しい分割によってT-vertex状態が解消されるので、頂点どうしを接合し、ゼロ3角形を消去する。

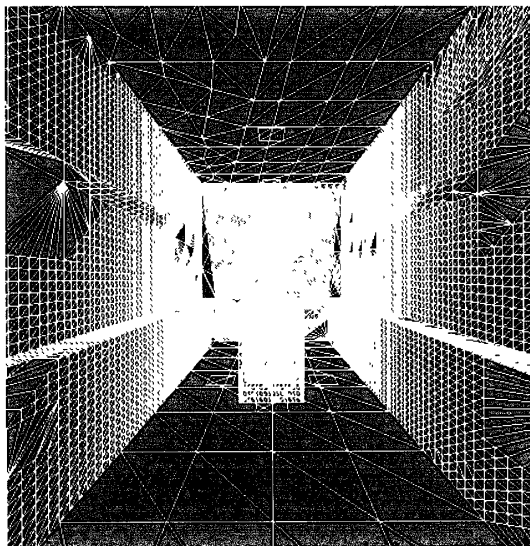
分割が終了した時点で、メッシュには、通常の3角形エレメントとゼロ3角形が混在している。ゼロ3角形はエレメント分割が周辺のエレメントに伝播するのを妨げ無駄な分割を防ぐため、メッシュ生成の効率化を図るために有用であるが、本来、T-vertexの存在を示すものなので、これをそのまま残してレンダリングすると、T-vertexと同様の問題を引き起こす可能性がある。したがって、最終的なメッシュでは、これを消去しておく必要がある。ゼロ3角形の消去は、ゼロ3角形に接するエレメント同士を接合し、T-vertexとなる位置で分割を行うことにより実現される(図5)。

4. 結果

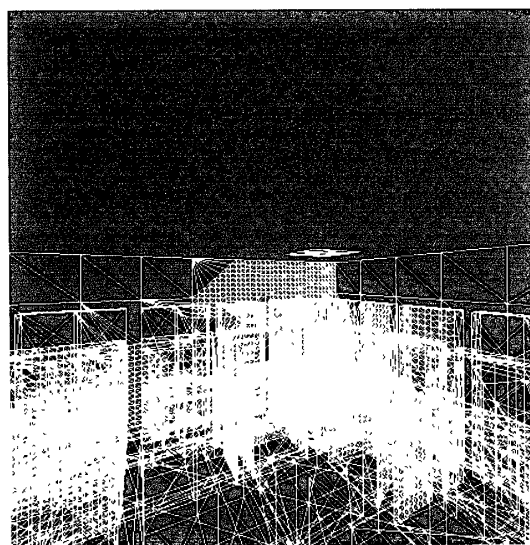
提案手法により、メッシュを生成し、ラジオシ



(a)



(b)



(c)

(a) シーン1 (b) シーン2 (c) シーン3

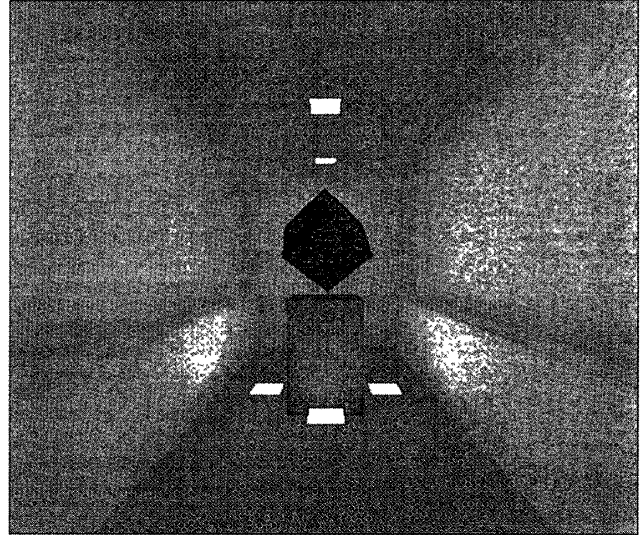
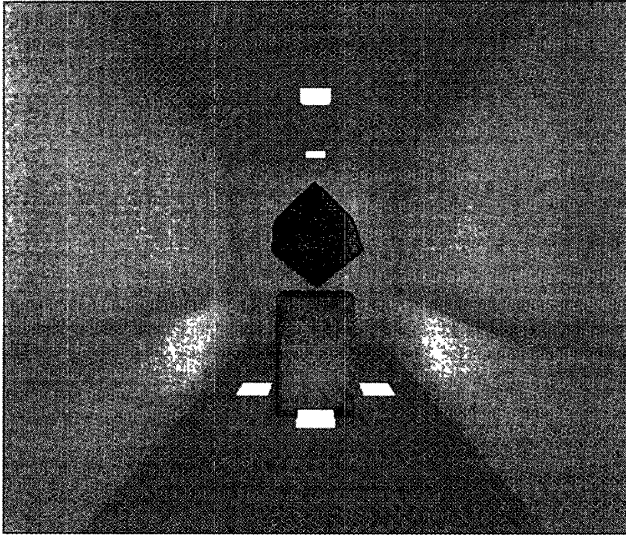
図6 生成されたメッシュ

表1 計算時間の比較

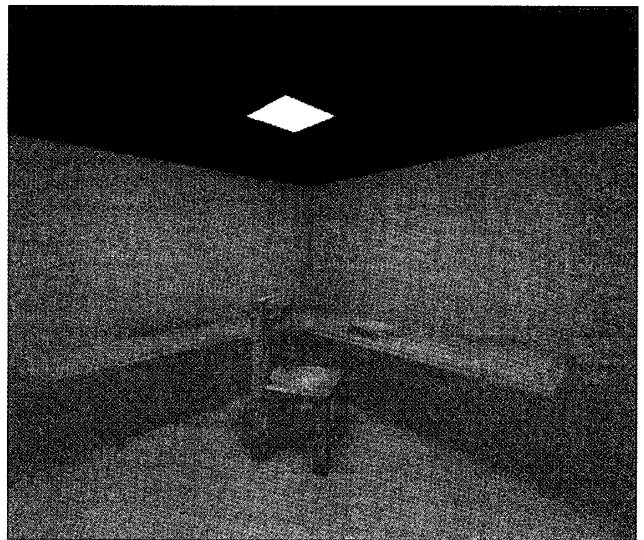
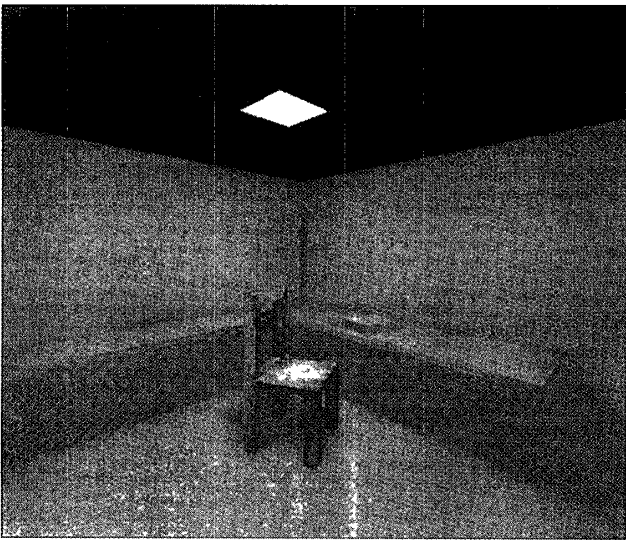
シーン 番号	初期ポリ ゴン数	提案処方		従来手法	
		計算時間 (秒)	エレメン ト数	計算時間 (秒)	エレメン ト数
1	36	40.1	23043	60.8	19355
2	84	73.6	16205	98.6	13747
3	241	271.3	4130	298.4	2244

ティ計算を行って、画像を生成した。なお、計算には、AT 互換機(CPU: Pentium, 400 MHz, メモリ: 128 MB)を使用し、レンダリングは OpenGL により行った。

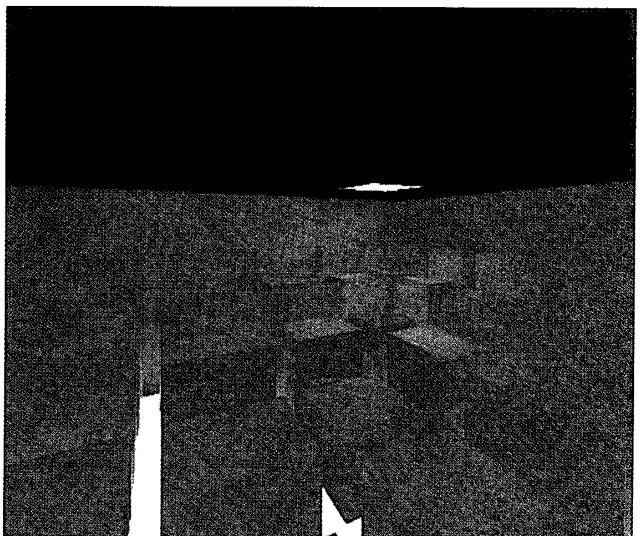
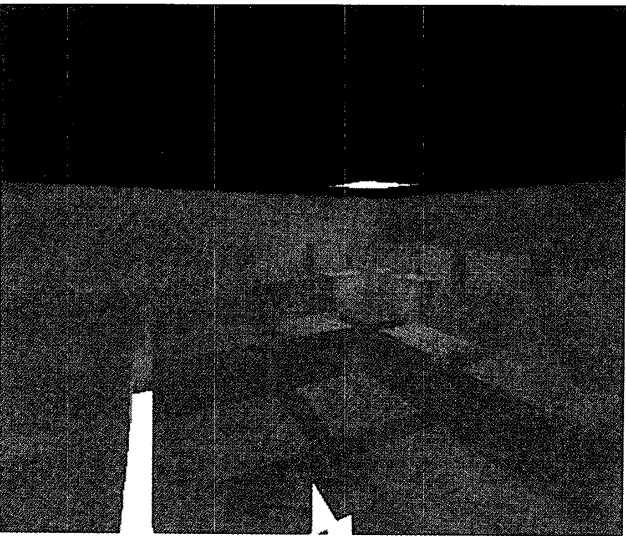
図6に生成されたメッシュを、図7には、それを用いてレンダリングした結果を示す。比較のために、図7には、Baumら¹⁴⁾の方法により生成したメッシュを用いてレンダリングした結果も併せて示してある。また、表1にはこれらの画像を作成するのに要した時間と生成されたエレメントの数を示した。図7から分かるように提案手法を用いて作成した画像と従来手法を用いて作成した画像には画質的な差は見られない。しかし、表1は提案手法を用いた場合、従来方法に比べて、ラジオシティ法により画像を生成するのに要する時間が短縮されたことを示している。なお、生成されるエレメント数は、提案手法の方が多くなっているが、これは、提案手法では、エレメント形状を3角形に限定しているためである。4角形エレメントとの混在を許す従来手法よりエレメント数が増加しているにもかかわらず、計算時間は減少しており、メッシュ生成において本手法が有効であったことが理解できる。また、表1から、1ポリゴン当りの分割回数(エレメント数/初期ポリゴン数)が多いほうが計算時間の差が大きく、分割回数が多いと提案手法の効果が顕著に現われることが分かる。この様子を詳しく調べるために、図8にはメッシュ生成に要する時間とシェーディング処理に要する時間がエレメント数によってどのように変化するかを示した。計算には、シーン2のモデルデータを用い、分割の条件を変えることによって生成されるエレメント数を制御している。また、シェーディング処理とは、フォームファクタ計算やラジオシティの受け渡しなどエレメントの分割



(a)



(b)



(c)

図7 レタリング画像の比較
提案手法による結果 (左), Baum らの方法による結果 (右)
(a) シーン1 (b) シーン2 (c) シーン3

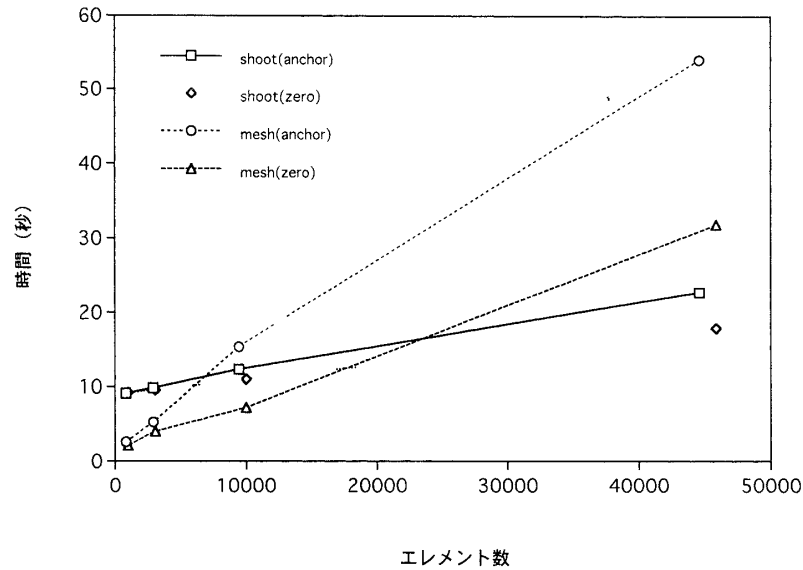


図8 エレメント数による処理時間の変化

以外に必要な処理を指す。図よりエレメント数が少ないうちは、シューティング処理に要する時間がメッシュ生成時間よりも長いことが分かる。このため、本手法を用いても、全体としての処理時間に大きな差は見られない。しかし、エレメント数が多くなると、メッシュ生成に要する時間が大きな割合を占めるようになり、従来手法では、シューティング処理に要する時間の2倍以上となっている。ゼロ3角形を用いる提案手法では、メッシュ生成に要する時間が従来手法の60パーセント以下に短縮されており、全体の処理効率の改善に貢献している。

5. まとめ

本稿では、ゼロ3角形を用いて、ラジオシティ法におけるメッシュ生成を効率化する手法を提案した。提案手法は、エレメント数が多い場合に特に有効で、複雑なシーンのラジオシティ計算を行う際に効果を発揮するものと考えられる。本方法では、エレメント形状を3角形に統一したため、初期メッシュを輝度不連続線を考慮して生成することが可能で、これにより、メッシュ分割を更に効率化できる可能性がある^{[7][8]}。今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Foley, J D., vanDam, A., Feiner, S K., Hughes, J F. and Phillips, R. L./Computer Graphics: Principles and Practice, Second Edition in C/Addison-Wesley, 1995.
- [2] Cohen, M. F. and Greenberg, D P./The Hemicube. A Radiosity Approach for Complex Environments/Computer Graphics, vol. 19, No. 3, pp 31-40, 1985.
- [3] Cohen, M. F., Chen, S E., Wallace, J. R. and Greenberg, D. P.: A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation/Computer Graphics, Vol. 22, No.4, pp.75-84, 1988.
- [4] Baum, D. R., Mann, S., Kevin, P. S. and Winget, J M.: Making Radiosity Usable: Automatic Pre-processing and Meshing Techniques for Generation of Accurate Radiosity Solutions/Computer Graphics, Vol.25, No.4, pp.51-60, 1991.
- [5] 荒川佳樹・面積ゼロ3角形を用いた3角形 Brep/情報処理学会論文誌, Vol.36, No.2, pp 362-373, 1995.
- [6] 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.
- [7] 伊藤, 嶋田, 土井: ラジオシティ法のための輝度不連続線およびメッシュ生成に関する効率的な一手法/情報処理学会論文誌, Vol 36, No 11, pp.2632-2641, 1995.
- [8] 鈴木, 荒川, 佐藤: ラジオシティ法におけるゼロ3角形を用いたメッシュ分割/情報処理学会第58回全国大会講演論文集(4), pp.169-170, 1999.
- [9] 鈴木剛夫: ラジオシティ法におけるゼロ3角形を用いたメッシュ分割, 東京工芸大学工学系研究科修士論文, 1999.