

Title	分散メモリ型並列計算機を用いたラジオシティ法の高 速化
Author(s)	佐藤, 敦
Citation	
Issue Date	1998-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1107
Rights	
Description	Supervisor:堀口 進, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

分散メモリ型並列計算機を用いた ラジオシティ法的高速化

指導教官 堀口進 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

佐藤敦

1998 年 2 月 13 日

要 旨

3次元CGのレンダリング手法の一つであるラジオシティ法では光の相互反射を考慮したリアルな画像を生成できるため様々な分野で用いられている。しかしながらフォームファクタを求めるには非常に大きな計算量を必要とするため高速計算手法が必要とされている。本報告では階層化したヘミキューブ（仮想の半立方体）を用いたフォームファクタの並列計算を提案する。この並列計算手法は、ヘミキューブを細かい領域に分け、各プロセッサに割り当てて負荷分散を行う。本並列計算手法を分散メモリ型並列計算機 T3E 上で実行し、様々なオブジェクト画像を対象としてその性能評価を行った。その結果、従来のヘミキューブを等分割してフォームファクタ計算を行う手法より高速に計算が行えることが分かった。また、提案した等面積マッピング法による負荷分散は等分割ヘミキューブ法に対しても有効であることを明らかにする。

目 次

1	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
2	ラジオシティ法	5
2.1	はじめに	5
2.2	ラジオシティ方程式	5
2.3	フォームファクタ計算	8
2.4	漸進法	13
2.5	まとめ	17
3	ラジオシティ法の並列化	18
3.1	はじめに	18
3.2	従来の並列化手法	18
3.2.1	ソフトウェア的手法	18
3.2.2	ハードウェア的手法	19
3.3	等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法	20
3.3.1	フォームファクタ計算の並列化	20
3.3.2	並列漸進法のアルゴリズム	21
3.4	階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法	23
3.4.1	ヘミキューブの階層分割	23
3.4.2	フォームファクタ計算におけるプロセッサへの処理割り当て	25
3.4.3	並列漸進法のアルゴリズム	27

3.5	まとめ	28
4	分散メモリ型並列計算機 T3E 上での並列処理性能	29
4.1	はじめに	29
4.2	オブジェクト画像のファイル形式	29
4.3	並列処理性能の比較	34
4.3.1	階層型ヘミキューブ法の処理時間	34
4.3.2	各プロセッサの処理時間差	35
4.3.3	等分割ヘミキューブ法と階層型ヘミキューブ法の比較	36
4.4	考察	37
4.5	まとめ	40
5	結論	41
5.1	まとめ	41
5.2	今後の課題	42
	謝辞	43
	参考文献	44
	研究業績	45

目 次

2.1	パッチ i のラジオシティ	7
2.2	パッチ間の関係	9
2.3	パッチの半球面への投影	10
2.4	ヘミキューブ法における ΔF の計算	11
2.5	パッチの半立方体への投影	12
2.6	ラジオシティの収集と放射	14
3.1	従来のヘミキューブの割り当て	21
3.2	等分割ヘミキューブ法を用いた並列ラジオシティ法のアルゴリズム	22
3.3	ヘミキューブへの投影	23
3.4	ヘミキューブの階層分割	24
3.5	等面積マッピングによるヘミキューブの割り当て	26
3.6	階層分割ヘミキューブ法を用いた並列ラジオシティ法のアルゴリズム	27
4.1	環境定義ファイルの形式	30
4.2	オブジェクト定義ファイルの形式	31
4.3	オブジェクト画像の例	32
4.4	漸進法による変化	33
4.5	階層型ヘミキューブ法の処理時間の割合 (room2)	34
4.6	階層型ヘミキューブ法の処理時間の割合 (room3)	35
4.7	階層型ヘミキューブ法の処理時間差	36
4.8	各手法の処理時間 (room1)	38
4.9	各手法の処理時間 (room2)	38
4.10	各手法の処理時間 (room3)	39

4.11 各手法の処理時間 (room4)	39
-----------------------	----

表 目 次

4.1	オブジェクト画像データ	32
4.2	比較に用いる 3 手法	36

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と目的

コンピュータグラフィックス (CG) は過去 25 年の間に急速に進歩・普及し、我々にとって身近なものとなった。コンピュータの普及とともに、科学的事象の視覚化 (サイエントフィック・ビジュアライゼーション) や商業・工業デザインの分野など多くの分野で CG が用いられている。現在では、TV のコマーシャルやゲーム、または映画などで一般の人々の間にも CG が浸透している。今日では、CG は情報処理の一つの重要なツールとして定着しているといえる。

3 次元グラフィックスの多くの応用において、ある 3 次元空間に定義された物体にさまざまな処理を施してその結果をディスプレイに表示して観察することが行われる。この場合定義された 3 次元物体に光源から光を照射して、それらを特定の視点から眺めた場合の現実感のある画像を生成する必要がある。現実感のある画像を得るためには、形状モデルだけでなく物体が本来有している表面の工学的な性質や光源を記述するシェーディングモデルが必要となる。このシェーディングモデルを使用して、視点から可視となる物体面を決定する隠れ面処理、影を付ける影処理、可視点の色や明るさを算出する輝度計算、画像の質を改善するためのアンチエイリアシングなどの処理を行うことにより、現実感のある陰影画像が得られる。これらの一連の処理は、レンダリング処理と言われる。

輝度計算は、光源から出た光が物体表面で反射、透過を行い、その中で可視物体の表面から出て視点に達する光の量を計算する処理である。可視物体面の輝度は光源から直接照射される直接光と、他の物体や大気中の微粒子などによる散乱を伴う反射、透過を経て 2

次的に達する間接光の和であると考えられる。

間接光を一定値（環境光）として取り扱う輝度計算モデルでは、室内の照明シミュレーションなどの応用において、壁、床、天井などからの散乱光による影響が考慮されないため不自然な画像となる。したがってきわめて現実感の高い画像を必要とする分野では、物体間の反射を繰り返す相互反射光を考慮する必要がある。相互反射を考慮することにより間接光がかもしだす柔らかい雰囲気を表現できるため、より現実感の高い画像が得られる。物体間の相互反射を考慮したモデルとして、ラジオシティ法がある。

ラジオシティ法はエネルギー移転の原理に基づくレンダリング技法である。この手法では、光源から直接照射される光線だけでなく、各拡散反射面が放射する光のエネルギーに着目する。拡散反射面の輝度は、閉じた系の中における平衡時の光のエネルギーバランスを求めることにより決定される。したがって、線光源や面光源の作る不均一な影や間接照明の多い室内など、視点に依存しない現象の表現や緩やかな輝度分布の表現に適しており、非常に現実感の高い画像を生成できるのが特徴である。

ラジオシティ法ではフォームファクタ（単位面積単位時間あたりに放射するエネルギー）と呼ばれるパッチ（エネルギー放射の単位面積）間での光が到達する割合の計算が重要となる。これは二重積分を解くことによって求められるが、パッチ間に障害物がある場合などに積分計算を解くことによって求めるのは、非現実的である。そのため、近似値を求める方法として近似解法であるヘミキューブ法が提案された [1]。また、レイトレーシング法に基づいた方法も提案された。

ラジオシティ法が考案された初期の頃は光の平衡状態から得られる連立方程式を直接解いていた。1988 年、Cohen ら [2] により徐々に解に近づけていく手法である漸進法が発表された。漸進法は計算途中でも CG 画像が得られ、大幅にメモリを節約できるため一般に用いられている。

ラジオシティ法では、フォームファクタの計算時間が全計算時間の大部分を占め、膨大な計算時間を必要とする。画像を高速に生成することが要求される現在では、フォームファクタの計算時間が大きな問題点となっている。したがって、フォームファクタの並列計算による高速化が重要である。

ラジオシティ法の並列化手法として、ソフトウェア的手法とハードウェア的手法がある。ソフトウェア的手法としては、ポリゴンやパッチ単位で分割する手法や、レイトレーシング法を基にした手法で、パッチから放射される光線を分割する手法も提案されている

[4][5][12]。また、フォームファクタ計算を行う際に用いられるヘミキューブを分割する手法も提案されている [12][14]。その他にパッチを階層的に分割していく並列化手法や半球法を用いてフォームファクタ計算を行う並列化手法も提案されている [9][15]。ハードウェア的手法として、画像生成専用のハードウェアを用いて並列計算する手法などが提案されている [4][8][13]。

本研究の目的は、分散メモリ型並列計算機を用いてラジオシティ法による高品質な画像を高速に生成することである。具体的には、フォームファクタ計算の際に、ヘミキューブ表面のメッシュを分割して各プロセッサに処理を割り当てる。そして、各プロセッサが担当する部分の描画を並列に行い、その結果を通信して全プロセッサがフォームファクタを得る。フォームファクタ計算では、各プロセッサにヘミキューブのメッシュの担当する部分だけ分散させることができ、プロセッサ N 台の場合、1 台の場合の $1/N$ のメモリ領域でよい。この方法では、ヘミキューブに必要なメモリ領域を各プロセッサに分散できる。オブジェクトデータは、フォームファクタ計算の際に必要なポリゴンデータをすべてのプロセッサが持ち、ラジオシティ放射に必要なパッチデータ、エレメントデータは各プロセッサが担当する部分を持つことにより、プロセッサ間のデータ転送を不要にしているという特徴がある。

また、ヘミキューブ法を用いたフォームファクタ計算は離散化された点でサンプリングするためエリアシングおよび精度の点で問題が生じる。精度を上げるためには、ヘミキューブのメッシュを細かく分割する必要があるが、それに伴いフォームファクタの計算時間が大きく増加してしまうという問題点がある。そこで、本研究ではヘミキューブの階層的分割による並列化手法を提案する。ヘミキューブの階層分割は、値の大きなフォームファクタを持つエレメントに対して行う。この方法では、同等な精度の等分割に比べ、計算量が少なく、画像品質を保つことができるという利点がある。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。

第2章では、ラジオシティ法の特徴、ラジオシティ方程式、フォームファクタ計算、画像生成法について述べる。

第3章では、従来手法について述べる。ヘミキューブの等分割によるラジオシティ法の並列化手法について述べる。また、ヘミキューブを階層的に分割する並列化手法を提案

する。

第 4 章では、超並列計算機 T3E 上での等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法と階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法との比較評価を行い、有効性を検討する。

第 5 章では本研究の結論について述べる。

第 2 章

ラジオシティ法

2.1 はじめに

ラジオシティ法はエネルギー移転の原理に基づくレンダリング技法である。この手法では、拡散反射面の輝度の決定において、光源から直接照射される光線だけでなく、各拡散反射面が放射する光のエネルギーに着目し、閉じた系の中における平衡時の光のエネルギーバランスを求めることにより決定する。

物体間の相互反射を考慮することにより以下のような間接光がかもしだす柔らかい雰囲気表現できる。

- 影が半影（ぼやけた影）を伴う。
- 直接届かない部分も、相互反射による間接光により照射される。
- 反射面の色が隣接する面に影響する（カラーブリーディング）。

したがって、線光源や面光源の作る不均一な影や間接照明の多い室内など、視点に依存しない現象の表現や緩やかな輝度分布の表現に適しており、非常に現実感の高い画像を生成できるのが特徴である。

2.2 ラジオシティ方程式

ラジオシティ法では、光のエネルギーの放射と反射について、次の仮定をする。

すべての放射と反射の過程は、理想的な拡散である
(入射光がすべての方向に同じ強度で反射する)

このとき、ある一つの面から発する光(ラジオシティ)は、

自己放射(面自身が発光している)

及び

他の面から入射して拡散反射する光

で構成されている。一つの面から発する光の量を決定するためには、

すべての面相互間の幾何学的な関係

及び

各面から発する光の量

を記述することが必要となる。そこでまず、環境内に与えられた一つのパッチ i と他のパッチ j のラジオシティに関する関係式を式 (2.1) で表す。

$$B_i A_i = E_i A_i + \rho_i B_j F_{ji} A_j \quad (2.1)$$

ここで、

B_i : パッチ i から発するエネルギー(ラジオシティ)の総量

[エネルギー/単位時間/単位面積]

E_i : パッチ i から自己放射されるエネルギーの量

[エネルギー/単位時間/単位面積]

A_i : パッチ i の面積

A_j : パッチ j の面積

ρ_i : パッチ i の反射率

F_{ji} : パッチ j から発したエネルギーがパッチ i に到達する割合

(フォームファクタ)

である。ここでフォームファクタとは、あるパッチから他のパッチへ光のエネルギーが到達する率である。フォームファクタの対称性

$$F_{ji} A_j = F_{ij} A_i \quad (2.2)$$

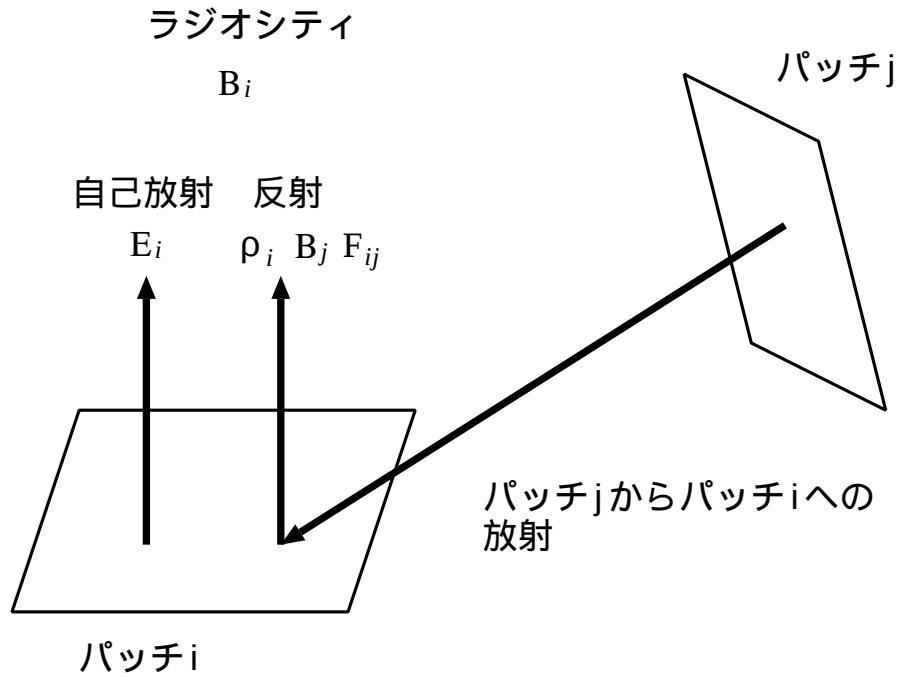


図 2.1: パッチ i のラジオシティ

により、式 (2.1) は次のような式で表すことができる。

$$B_i = E_i + \rho_i B_j F_{ij} \quad (2.3)$$

式 (2.3) は、図 2.1 で示すように、

パッチ i が発する光のエネルギーの総量 (ラジオシティ) は
自己放射光と反射光の和に等しい

ことを示している。

ラジオシティの解析を行うために、各面を平面パッチ $i (i = 1, \dots, N)$ に分割する。以下では簡単にするために、各パッチは単位面積に分割されたものとする。このとき、式 (2.3) はパッチごとの総和によって、次式のラジオシティ方程式によって表される。

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j F_{ij} \quad (2.4)$$

ここで、 N は総パッチ数である。したがって、系全体としては、

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= E_1 + \rho_1 \sum_{j=1}^N B_j F_{1j} \\ B_2 &= E_2 + \rho_2 \sum_{j=1}^N B_j F_{2j} \\ &\vdots \\ B_N &= E_N + \rho_N \sum_{j=1}^N B_j F_{Nj} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

の形の連立方程式になる。式 (2.5) を行列の形にすると次式になる。

$$\begin{pmatrix} 1 - \rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \cdots & -\rho_1 F_{1N} \\ \rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & \cdots & -\rho_2 F_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_N F_{N1} & -\rho_N F_{N2} & \cdots & 1 - \rho_N F_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

式 (2.3) に示したフォームファクタ F_{ij} は、パッチ j の放射するエネルギーがパッチ i に到達する割合を示しており、パッチ相互の幾何学的関係によって決定される。全てのパッチのラジオシティを得るためには E_i および ρ_i を設定し、 F_{ij} を求め、式 (2.6) を解けばよい。次に、フォームファクタの計算について説明する。

2.3 フォームファクタ計算

パッチ i, j の面積がそれぞれ A_i, A_j であるとする。このとき、パッチ i に含まれる微小領域 dA_i からパッチ j に含まれる微小領域 dA_j へのフォームファクタ $F_{dA_i dA_j}$ は図 2.2 で示す記号を用いると、次式で与えられる。

$$F_{dA_i dA_j} = \frac{\cos(\phi_i) \cdot \cos(\phi_j)}{\pi r^2} \quad (2.7)$$

式 (2.7) を領域 A_j について積分することにより、パッチ j から微小領域 dA_i へのフォームファクタ $F_{dA_i j}$ は次式で表される。

$$F_{dA_i j} = \int_{A_j} \frac{\cos(\phi_i) \cdot \cos(\phi_j)}{\pi r^2} dA_j \quad (2.8)$$

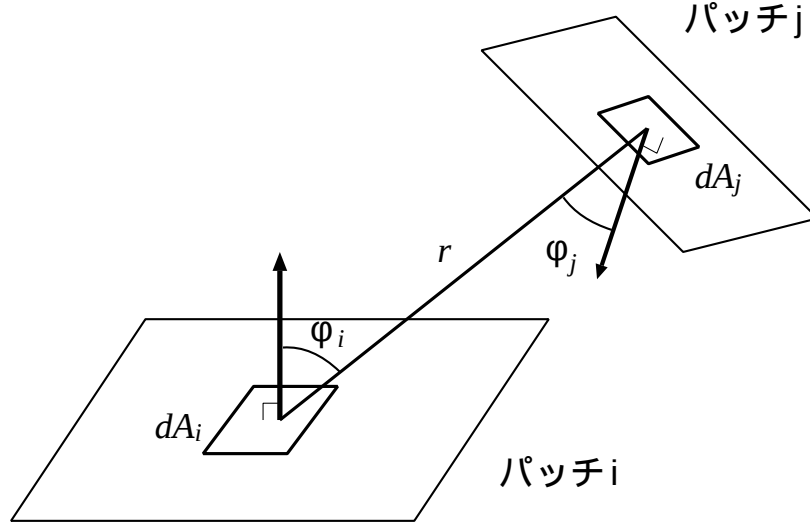


図 2.2: パッチ間の関係

さらに式 (2.8) を領域 A_i について積分することにより、パッチ j からパッチ i へのフォームファクタ F_{ij} は領域 A_i における平均として次式で表される。

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\phi_i) \cdot \cos(\phi_j)}{\pi r^2} H(dA_j, dA_i) dA_j dA_i \quad (2.9)$$

ただし、 $H(dA_j, dA_i)$ は、

$$H(dA_j, dA_i) = \begin{cases} 1 & (dA_i \text{ と } dA_j \text{ の間に遮蔽物体が存在しない場合}) \\ 0 & (dA_i \text{ と } dA_j \text{ の間に遮蔽物体が存在する場合}) \end{cases} \quad (2.10)$$

で定義される。

フォームファクタは式 (2.9) を用いて解析的に求める必要がある。しかし、積分を含むため非常に多くの計算時間を要し、実用的には計算しにくい。そこで、近似的にフォームファクタを計算する手法が提案された。

フォームファクタの性質として次のことがいえる。図 2.3 に示すように、パッチ i 上の微小領域 dA_i の周囲に仮想的な半球を設定し、パッチ j を dA_i に向かって投影させる。半球上にパッチ j が投影された領域を j' とすると、

$$F_{dA_i j} = F_{dA_i j'} \quad (2.11)$$

となることが知られている。すなわち、

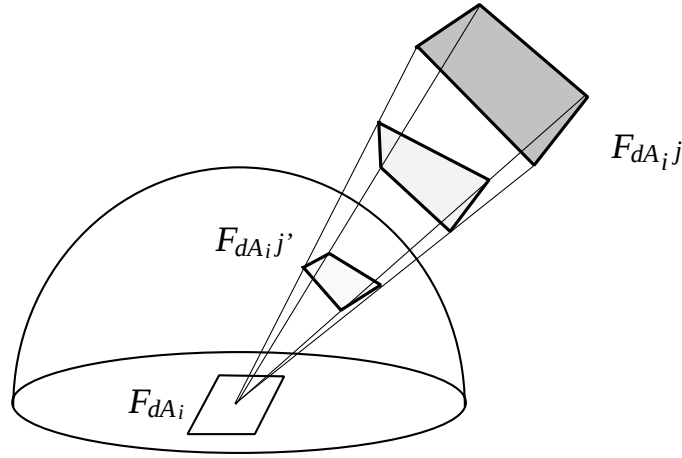


図 2.3: パッチの半球面への投影

半球上の同じ領域に投影されるパッチは同じフォームファクタ

である。

この性質を利用すれば、半球上の領域とのフォームファクタを求めればよい。しかし、半球面上に投影する方法や、半球上の領域の計算が複雑である。

1985 年に Cohen ら [1] は、既存のレンダリング手法を利用して効率よくフォームファクタを計算する手法を提案した。この方法では、半球のかわりにパッチ i の周辺に仮想的な半立方体 (ヘミキューブ) を設定し、表面を適当な大きさのメッシュ (セル) に分割する。そして、それぞれのセルについてデルタフォームファクタ ΔF を計算する。

図 2.4 は ΔF を計算するための説明図である。ここで、ヘミキューブ上にパッチ j が投影された部分を含むセルの面積を ΔA_j とする。ヘミキューブの上面のセルについては、

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + 1}, \\ \cos(\phi_i) &= \cos(\phi_j), \\ \cos(\phi_j) &= \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + 1}}, \end{aligned}$$

であるから、

$$\begin{aligned} \Delta F &= \frac{\cos(\phi_i) \cos(\phi_j)}{\pi r^2} \Delta A_j \\ &= \frac{1}{\pi(x^2 + y^2 + 1)^2} \Delta A_j \end{aligned} \tag{2.12}$$

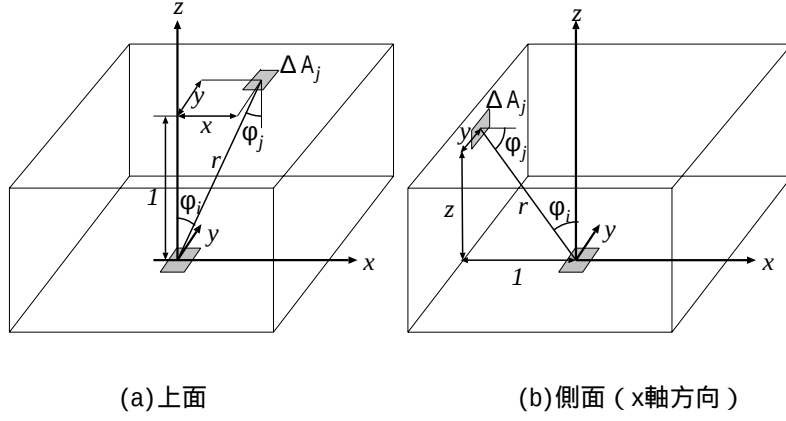


図 2.4: ヘミキューブ法における ΔF の計算

となる。 x 軸方向の側面のセルについては、

$$r = \sqrt{y^2 + z^2 + 1} \quad \cos(\phi_i) = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2 + 1}},$$

$$\cos(\phi_j) = \frac{1}{\sqrt{y^2 + z^2 + 1}},$$

であるから、

$$\Delta F = \frac{z}{\pi(y^2 + z^2 + 1)^2} \Delta A_j \quad (2.13)$$

となる。 y 軸方向の側面のセルについても同様にして、

$$\Delta F = \frac{z}{\pi(x^2 + z^2 + 1)^2} \Delta A_j \quad (2.14)$$

となる。

計算されたデルタフォームファクタを後の計算のため、ルックアップバッファに入れておく。次に Z バッファ法を用いて、パッチをヘミキューブに投影し、隠面消去によって距離が最も短い物体のみを残す。ルックアップバッファを用いて、パッチ j が投影されたセルの和

$$F_{ij} = \sum_{q \in j} \Delta F_q \quad (2.15)$$

を計算すると、パッチ i からパッチ j へのフォームファクタ F_{ij} が得られる。

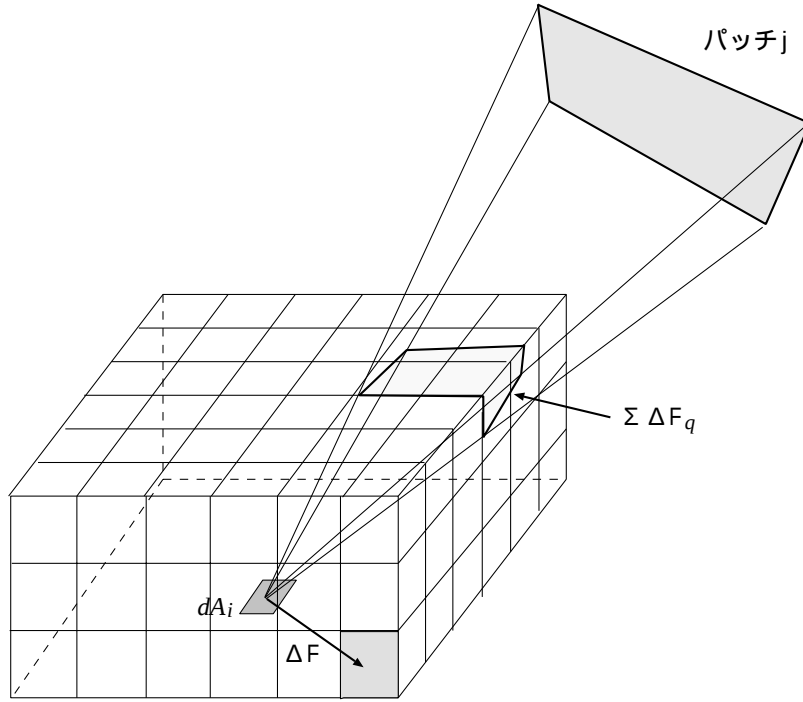


図 2.5: パッチの半立方体への投影

このヘミキューブ法は、Z バッファ法という既存のレンダリング手法を利用し、半立方体というフォームファクタを計算しやすい形状を利用しているため、式 (2.9) を直接計算するより効率が良い。

F_{ij} を求めたので、式 (2.6) を解くことを考える。式 (2.6) は、

$$F_{ii} = 0, \quad \rho_i < 1, \quad \sum_{i=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2.16)$$

より、対角優位行列であるので、ガウスザイデルの反復法と呼ばれる連立 1 次方程式の解法によって高速に解を計算することができる。

以上のようにして求めた各パッチのラジオシティにより、各パッチの輝度が決定される。それをもとにして適当な隠面消去および Z バッファ法によるレンダリングを行い、画像を生成する。これがラジオシティ法の原理である。

ラジオシティ法のほとんどの計算はフォームファクタ計算に費される。そこで、計算量を軽減するため、いったん式 (2.6) の フォームファクタを計算したらその値を記憶しておき、ガウスザイデル法による行列計算を行う際にはこのフォームファクタを繰り返し用い

る。原則的にはパッチ数 N の 2 乗に等しい数のフォームファクタを記憶しておかなければならない。また、フォームファクタ計算において $O(N^2)$ の計算量が必要となる。さらに、ラジオシティ方程式でガウスザイデル法を適用するので、すべてのラジオシティは最初の反復サイクルが完全に終了するまで得ることはできない。

2.4 漸進法

2.3 節で示したラジオシティ法では、パッチの 2 乗に比例したメモリと計算量を必要とする。これは質感の高い画像を生成するためにはパッチ数が非常に多くなることを考えると深刻な問題である。この問題に対して、フォームファクタ計算を連立方程式を解く過程で必要になった時点で行う方法が、Cohen ら [2] により提案された。提案されたラジオシティ法アルゴリズムでは、パッチ数に比例する程度のメモリ量で、漸近的に画像を生成できる。

式 (2.1) により、ラジオシティは、

$$\begin{aligned} & \text{パッチ } i \text{ の自己放射エネルギー} \\ & \text{及び} \\ & \text{他のパッチ } j \text{ が放射してパッチ } i \text{ に到達するエネルギー} \end{aligned}$$

の総和、すなわち、

$$\text{環境から与えられて吸収するエネルギーの総和}$$

である。従来の手法では、図 2.6(a) で示すようにガウスザイデル法などによりパッチ i が収集するラジオシティをパッチ 1 枚ずつ順次求めていた。Cohen らの手法ではこの考え方を逆転してアルゴリズムを構築している。すなわち、

パッチは交互に、各々がもつすべての放射エネルギーを瞬時に放射する

と仮定した。そして、パッチ i が放射する時に他のパッチ $j (j = 1, 2, \dots, N)$ は次の式で表されるエネルギーを収集するとした。

$$B_j = E_j + \rho_j \sum_{i=1}^N B_i F_{ji} \quad (2.17)$$

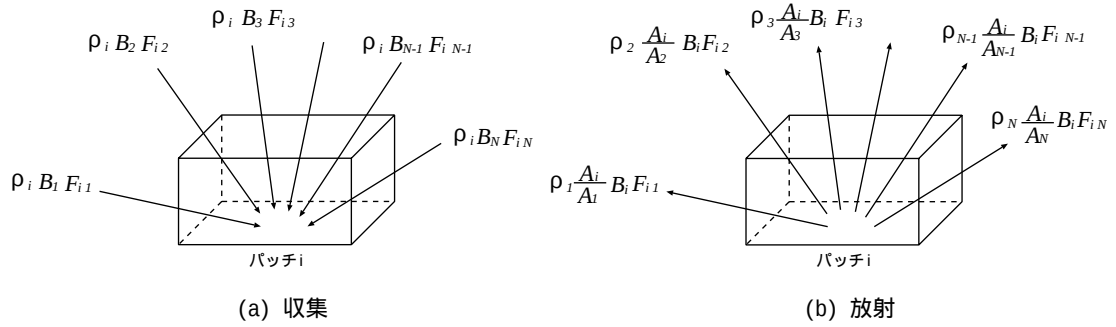


図 2.6: ラジオシティの収集と放射

ここで、

B_j : パッチ j が収集するエネルギー (ラジオシティ) の総量
[エネルギー/単位時間/単位面積]

E_j : パッチ j から自己放射されるエネルギーの量
[エネルギー/単位時間/単位面積]

ρ_j : パッチ j の反射率

F_{ji} : パッチ i からパッチ j へのフォームファクタ

また、式 (2.2) で示したフォームファクタの対称性より、式 (2.17) は以下のように変形することができる。

$$B_j = E_j + \rho_j \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A_j} B_i F_{ij} \quad (2.18)$$

この計算のそれぞれの過程で使われるフォームファクタ F_{ij} は、ある 1 つのパッチ i 上の半立方体だけを使って計算できるフォームファクタである。そして図 2.6(b) で示すように、各過程で、パッチ i の影響 (そのパッチから環境への放射=shooting) を、他のすべてのパッチのラジオシティに追加していく。

このステップは、解が収束するようにパッチ i について数回繰り返される。そのたびにパッチ i のラジオシティの推定値はより正確になっていく。しかし、環境 (i 以外のパッチ) には、以前の B_i の影響がすでに含まれている。この場合、以前と現在の B_i の値の差 ΔB_i のみを考慮すればよい。 ΔB_i を未放射ラジオシティ (unshot radiosity) と呼ぶ。

- ソーティング

この収束に加えて、できるかぎり速く正確に解が改善されることが望ましい。

パッチ j の最終的なラジオシティ B_j は、ほかのすべてのパッチからの影響の合計である。最も大きい影響、すなわち最大の $B_i A_i$ を持つパッチ群の影響を最初に加えるようにすれば、この合計の最終値に最も速く達する。

普通光源は多くのパッチにとって最も重要な照明源であるので、光源を最初に処理したあとでは、多くの環境はすでに十分よく明りに照らされている。この規則に従って処理される次のパッチ群は、その光源から最も多くの光を受け取ったパッチとなる。そして、次々とこの処理を繰り返していく。

- 周囲の項 (ambient term)

以上の手続きを使うことにより、計算途中のイメージは、暗黒の環境から十分に照明に満たされたシーンへと漸進的に明るさを増していく。最終シーンはすべての散乱光の相互反射を含んだものとなる。計算の初期段階のシーンは照明が不十分である。大域照明が正確に表現されていないので、特に、直接光を受けていない部分で不十分である。

そこで任意の周囲光の項を加えて大域照明に効果を近似させる。ただし、この値は、計算している時点のすべてのパッチのラジオシティの推定値と環境の反射率に基づいたものである。周囲の項を加えるのは表示のためであり、解を求める計算自身には加えない。この周囲の項の寄与も、計算が進むに従って徐々に減らしていく。初期のイメージにこの項を加えると実用的なイメージがすぐにできる。

パッチ同士が見えるか見えないといった情報や、パッチ間の幾何学的な関係を知らなくとも、フォームファクタの最初の有効な近似解は導ける。パッチ i からパッチ j へのフォームファクタは、環境全体の面積に占めるパッチ j の面積比率で近似できる。正確なフォームファクタと同様、それはすべて足し合わせると 1 になる。したがって、式 (2.19) が成り立つ。

$$F_{ij} \approx \frac{A_j}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.19)$$

環境の平均反射率は、パッチの反射率に面積で重み付けした加重平均として、式 (2.20)

で表される。

$$\rho_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2.20)$$

環境に放射する任意の単位エネルギー（値は1）に対して、そのうちの ρ_{ave} が平均して反射される。そのうちのいくつかが再び反射され、これが繰り返される。したがって全体の相互反射ファクタ R は式 (2.21) のように幾何級数の和で表される。

$$R = 1 + \rho_{ave} + \rho_{ave}^2 + \rho_{ave}^3 + \cdots = \frac{1}{1 - \rho_{ave}} \quad (2.21)$$

周囲のラジオシティ項は、これらの仮定から導く。この項は単に、まだフォームファクタを介して放射されていないラジオシティ量を面積で加重平均し、それを相互反射ファクタ R に乗じたものである。

$$Ambient = R \sum_{j=1}^N (\Delta B_j F_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.22)$$

したがって、この周囲のラジオシティの寄与を処理途中で加えていけば、個々のパッチの推定値は改善されていく。ここで、ほかのパッチのラジオシティの放射を受けたパッチ i のラジオシティを B_i と仮定すると、改善された推定値は式 (2.23) で示される。

$$B'_i = B_i + \rho_i Ambient \quad (2.23)$$

この B'_i の推定値は表示の目的だけに用いる。周囲の影響は ΔB_i には加わらないし、解を求める計算の中では実際に放射されることはないからである。計算が進むにつれて、未放射エネルギーの平均値は減少し、したがって周囲項もそれに伴い減少する。 B_i と B'_i の値は収束し、初期の周囲項を伴ったイメージは、ラジオシティ方程式であたえられる大域照明の、より正確な推定値に変わっていく。

また、Cohen らは、この手法においては、未放射ラジオシティの大きいパッチの放射により隣接パッチ間の輝度差が大きくなったパッチを、さらに細かいエレメントと呼ばれる単位に分割することで、繊細な輝度分布の表現を可能にした。これらの手法により、以下のアルゴリズムによりラジオシティ値を求めることができる。

1. すべてのパッチのうち未放射エネルギーが最大であるパッチ i を選択する。
2. パッチ i から他のパッチ j へのフォームファクタ $F_{ij}(j = 1, 2, \dots, N)$ を求める。
3. 他の各々のパッチ (エレメント) がパッチ i から収集するエネルギーを式 (2.18) より算出し、各々のパッチ (エレメント) のもつエネルギーに加算する。
4. 環境ラジオシティ B'_i を求め、各パッチのラジオシティに加算する。この値は表示用のためだけに用いる。解算のためのラジオシティ値は別の変数に保存する。
5. パッチ i の未放射エネルギーは 0 になるので (1) に戻り、 i 以外のパッチを選択する。すべてのパッチの未放射エネルギーがしきい値以下になったら計算を中止し、各パッチ (エレメント) のラジオシティ値を決定する。
6. Z バッファ法によりレンダリングを実行する。

このアルゴリズムにおいては、フォームファクタは必要になったものだけをその都度計算するため、フォームファクタに使用するメモリはパッチ数に比例するのみである。また、反復途中で計算を中断しても、放射エネルギーの大きいパッチ (光源を構成するパッチなど) からは既にエネルギーを収集している。このため、ある程度反復した段階で最終値に漸近している。したがって、反復途中のラジオシティを用いても、ある程度写実的な画像を生成することが可能である。

2.5 まとめ

本章では、ラジオシティ法の特徴、ラジオシティ方程式、フォームファクタの計算法について述べた。また、ラジオシティ法の計算手法について、従来の手法と漸進法の二種類の手法の特徴を説明した。

ラジオシティ法は、光の相互反射を考慮したリアルな画像を生成できるレンダリング手法である。しかし、フォームファクタを計算するために、非常に大きな計算量とメモリを必要とする。その問題点を解決する手法として、Cohen らにより漸進法が提案された。この手法は、一部のフォームファクタを使い、徐々に解に近づけていくため、計算量とメモリ量を節約できる。また、計算途中でも CG 画像を得ることができる。

第 3 章

ラジオシティ法の並列化

3.1 はじめに

本章では、従来研究について述べた後、従来の並列化手法であるヘミキューブの等分割を用いてフォームファクタを並列計算する手法について、従来手法とは異なるヘミキューブの分割法を提案する。また、ヘミキューブの階層分割を用いたフォームファクタ計算を行う並列化手法を提案する。

3.2 従来の並列化手法

ラジオシティ法はリアルな画像が得られる半面、非常に多くの計算時間を必要とするため、以前から並列計算による高速化の研究がなされている。

並列化手法として、ソフトウェア的的手法とハードウェア的的手法があり、従来の研究では、以下のような並列化手法を用いた研究が行われてきた。

3.2.1 ソフトウェア的手法

Lamotte らはレイトレーシングを基にした、パッチから放射される光線を分割し、ラジオシティ法に応用する手法を提案した [5]。この手法はレイトレーシング法ではよく用いられる並列化手法であり、光線ごとに PE への割り当てを行う。

Singh らはパッチを階層的に分割する階層型ラジオシティ法の並列化手法を提案している [9]。この並列化手法では、ポリゴンを各プロセッサに分散させて処理している。各ボ

リゴンの処理量には大きな差があるため、静的に割り当てを行うと処理時間がかなり不均衡になってしまう。

ヘミキューブの分割による並列化手法を用いた研究がいくつかなされている。この手法は、ヘミキューブ法によるフォームファクタ計算を行う際、ヘミキューブを分割し、プロセッサに割り当て、担当するメッシュ部分についてのみ計算を行う手法である [12][14]。阿部により行われた研究では、通信速度の問題があり、プロセッサ数が多くなると通信時間の占める割合が大きくなり、台数効果が得られなかった。

上嶋らは、パッチの分割による並列計算を行った [4]。パッチをプロセッサに割り当てて並列計算する手法は既に多くの研究がなされているが、この手法の欠点は、PE 間のメッセージ通信が比較的多いため、通信速度の遅い計算機では通信がボトルネックとなるということである [12]。

上嶋らは、半球法を用いてフォームファクタ計算する手法の並列化手法を提案した [15]。半球法は精度の面では優れているが、半球面への投影や半球面上の領域の計算が複雑である。この並列化手法は半球表面を 2 次元に分割しプロセッサに処理を割り当てるという手法である。

3.2.2 ハードウェア的手法

大谷らは、MIMD 型の並列計算機の各プロセッサに、画像バッファ用メモリとスキャンライン等の処理を行う専用の LSI を搭載したマシンを開発した [4]。この LSI は多数のポリゴンを実行ライン Z バッファ法により隠面処理してマッピング処理するために開発されたマルチプロセッサ専用 LSI である。

成見らは、ラジオシティ計算専用の Disk Array を開発し、フォームファクタなどをメモリの代わりに高速な Disk Array におく方法を提案した [8]。このシステムは、一度計算したフォームファクタを Disk Array 上に保存しておくため、同じ室内の壁の色を変えたりライトの輝度や位置を変えというような場合に有効である。しかし、何度も照明計算をしないかぎり前に計算したフォームファクタは使われることがないので、同じシーンの照明計算を何度も行う場合でないとメリットは少ない。

Kobayashi らは、並列画像生成システム ($M\pi$)²を用いたラジオシティ法を提案した [13]。このシステムでは、光の伝播の局所性を利用してオブジェクト空間を分割し、各部分空間をプロセッサに分散配置する。2 パスレンダリング法というレイトレーシング法とラジオ

シティ法を統合して画像を生成する手法を用いている。しかし、レイトレーシング法、ラジオシティ法どちらも膨大な計算時間を必要とするため、2つの手法の統合によりさらに膨大な計算時間を必要とする。

これらのハードウェア的手法は、ラジオシティ法の並列化と併用することにより高速に処理しようというものであるが、専用のハードウェアの開発にコストがかかっており、低コストでの開発が望まれる。

3.3 等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法

3.3.1 フォームファクタ計算の並列化

3.2.2節で述べたように、フォームファクタ計算の際にヘミキューブを等分割してプロセッサに割り当てる手法は既にいくつか行われている。これは、等分割したヘミキューブの表面のメッシュを各プロセッサに処理を割り当てて、ポリゴンの描画を行わせる手法である。

ヘミキューブを用いたフォームファクタ計算は、ヘミキューブの各表面についてパッチが投影されているかどうかを判定し、パッチが投影されていればデルタフォームファクタ計算を行う。各表面のパッチを含むメッシュのデルタフォームファクタの和を求めることにより、ひとつのパッチのフォームファクタが求まる。ヘミキューブの5つの平面は、視点方向が異なるため、ひとつのプロセッサで同時に5つの表面のフォームファクタ計算を行うことはできない。この手法では、各プロセッサは5つの表面すべての計算を担当しているため、ひとつの表面の処理が終わるごとに視点方向を変える処理を行い、次の表面のデルタフォームファクタを求める。

解像度8のヘミキューブをプロセッサ数が4台で並列化する場合のプロセッサへの割り当てを、図3.1に示す。図のように分割した領域にライン番号をふっておく。プロセッサ PE_0 からプロセッサ (PE_{n-1}) までの n 台とすると、ヘミキューブのライン l は、 $(l \bmod PE_n)$ 番のプロセッサがデルタフォームファクタ計算を担当する。図3.1では、プロセッサ PE_0 はライン $0, 4, 8, \dots, 36$ を担当することになる。

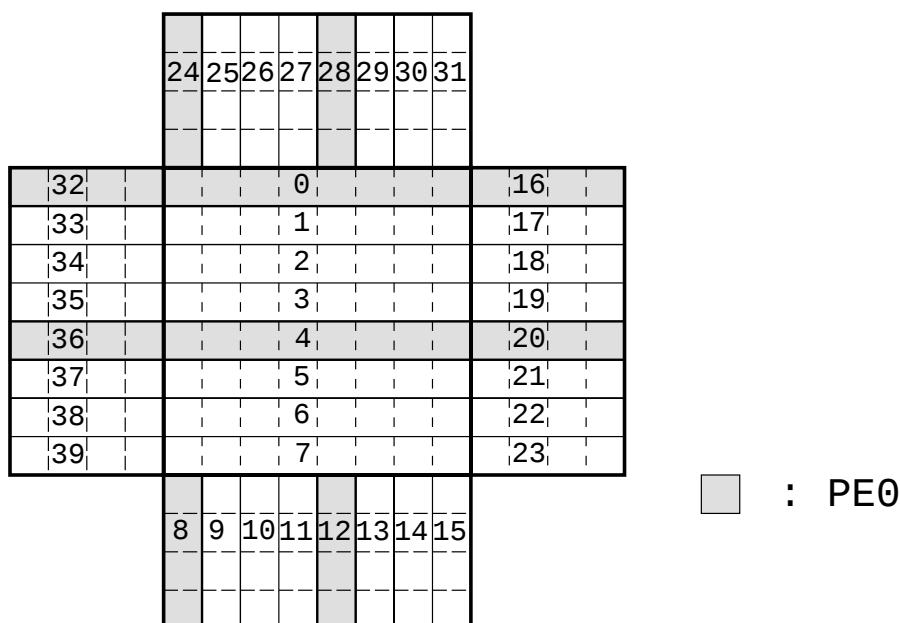


図 3.1: 従来のヘミキューブの割り当て

3.3.2 並列漸進法のアルゴリズム

等分割ヘミキューブ法を用いた並列ラジオシティ法は、図 3.2 に示すような流れになる。

はじめに各プロセッサ内で最大のラジオシティを持つパッチを決定する。次に、プロセッサ間通信により、全パッチの中の最大未放射エネルギーを持つパッチ i を決定する。その後、各プロセッサが並列にパッチ i とのフォームファクタ計算を行い、通信により全プロセッサが完全なフォームファクタを得る。最後に、各プロセッサが自分の担当するエレメントへの放射の処理を並列に行う。この処理を未放射エネルギーがしきい値以下になるまで繰り返し行う。以上のように、最大未放射エネルギーをもつパッチの決定、フォームファクタ計算、エレメントへの放射の処理を並列化している。

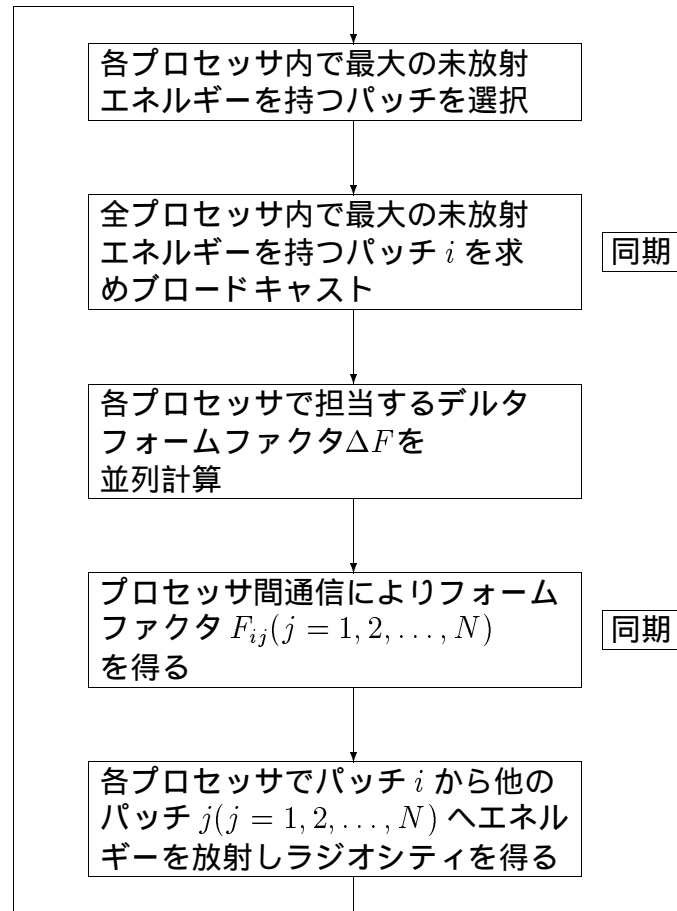


図 3.2: 等分割ヘミキューブ法を用いた並列ラジオシティ法のアルゴリズム

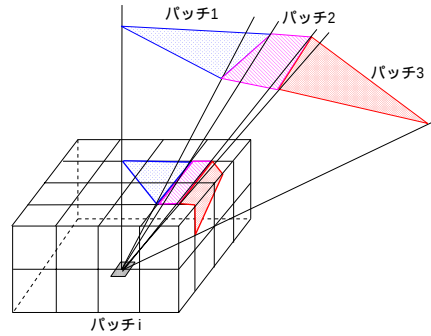


図 3.3: ヘミキューブへの投影

3.4 階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法

3.4.1 ヘミキューブの階層分割

ヘミキューブを用いてフォームファクタ計算を行うラジオシティ法では、エリアシング、精度が問題となる。精度を上げるためにヘミキューブのメッシュの大きさを細かくすると処理時間が長くなる。

そこで本報告では、ヘミキューブを階層的に分割してフォームファクタ計算を行う階層型ヘミキューブ法を提案する。この階層型ヘミキューブ法は、ヘミキューブ全体のメッシュを細かくするのではなく、必要な部分だけメッシュを細かくすることにより画像の精度の低下を抑えつつ計算量を低減する手法である。

この階層型ヘミキューブ法は、先ず等分割したヘミキューブを用いてデルタフォームファクタ計算を行い、フォームファクタ F_{ij} を求める。求めたフォームファクタ F_{ij} としきい値 F_{eps} を比較し、フォームファクタの方が大きい場合には分割数を増やしたヘミキューブ上でデルタフォームファクタ計算を行い、フォームファクタ F_{ij} の再計算を行う。そのため、パッチによってフォームファクタ計算に用いられるヘミキューブの分割数は異なる。

図 3.3 は、パッチ i をヘミキューブの中心にし、パッチ 1、パッチ 2、パッチ 3 をヘミキューブに投影された例である。階層型ヘミキューブ法では図 3.4 のようにデルタフォームファクタを求めることになる。フォームファクタの再計算を行うかどうかは、 $F_{ij} > F_{eps}$ に従って決まる。パッチ 2 とパッチ 3 は階層化されたヘミキューブ上でフォームファクタの再計算が行われる。

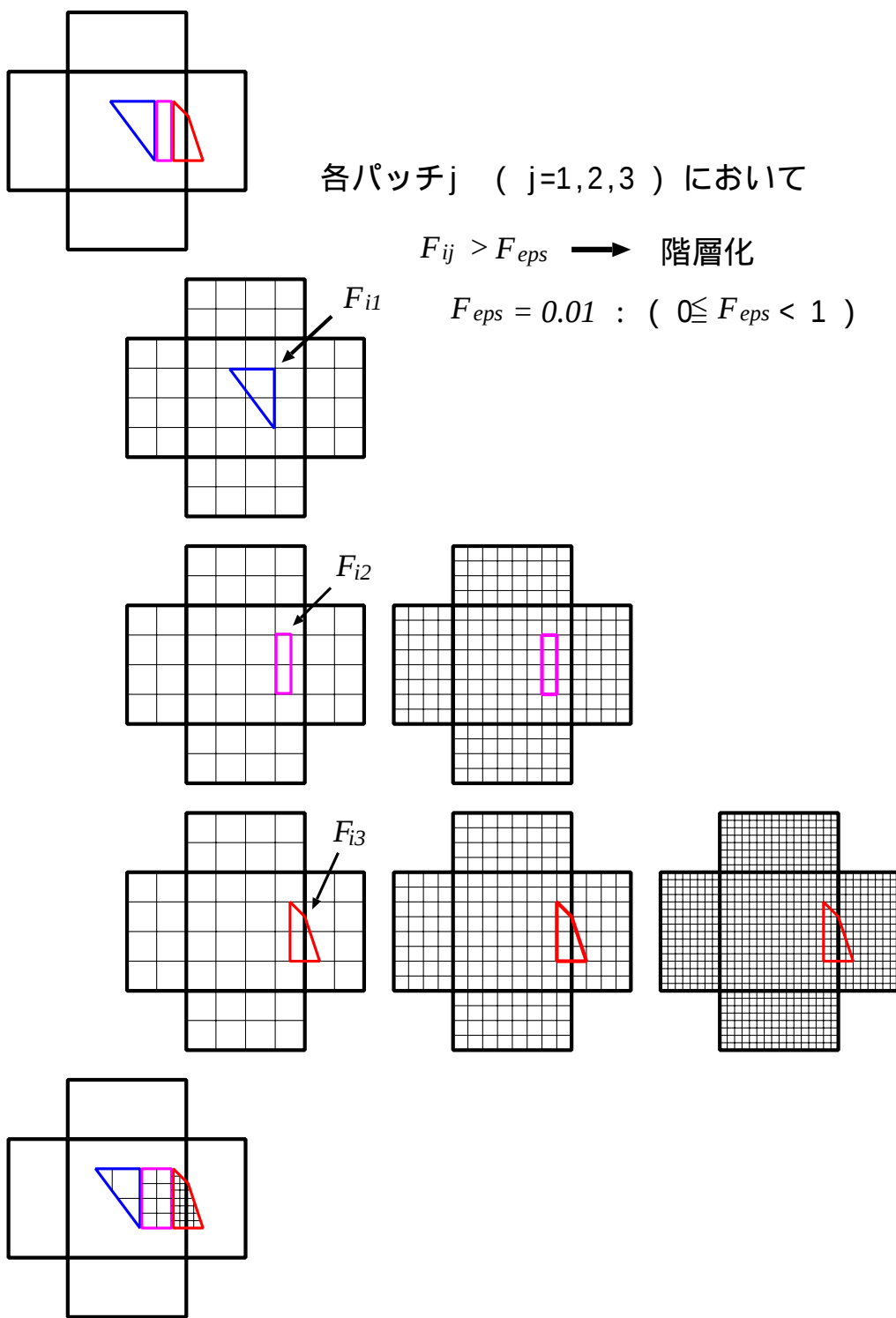


図 3.4: ヘミキューブの階層分割

3.4.2 フォームファクタ計算におけるプロセッサへの処理割り当て

デルタフォームファクタの計算では、ヘミキューブの5つの面のメッシュを図3.5の展開図の実線で示すように1ラインごとの領域に分割する。そして、各ラインを描画処理の単位として、各プロセッサへの割り当てを行う。この図はヘミキューブの分割数 $L = 8$ のヘミキューブをプロセッサ6台で並列化する場合を示している。プロセッサの処理量を同じくするため、上面と側面のプロセッサ数の割り当て比を2:1とし、各プロセッサが同じ面積を担当する等面積マッピング法を提案する。プロセッサ PE_0 からプロセッサ PE_{n-1} までの n 台での各プロセッサが担当する領域 (j, k) は以下の式により表される。

$$j = \begin{cases} 0, & \text{for } (PE_i \bmod 6) = 0 \\ (PE_i \bmod 6) - 1, & \text{for } (PE_i \bmod 6) \neq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$k = \begin{cases} \frac{PE_i}{6} + (PE_i \bmod 6) + 2l \times \frac{n}{6}, & \text{for } j = 0, \quad l = 1, 2, \dots, \frac{L}{6} \\ \frac{PE_i}{6} + l \times \frac{n}{6}, & \text{for } j \neq 0, \quad l = 1, 2, \dots, \frac{L}{6} \end{cases} \quad (3.2)$$

式(3.1)、式(3.2)より図3.5の場合では PE_0 が担当する領域は $(0, 1), (0, 3), (0, 5), (0, 7)$ となる。

この方法では、ヘミキューブに必要なメモリ領域を各プロセッサに分散でき、プロセッサ n 台の場合、1台の場合の $1/n$ のメモリ領域でよいという利点がある。ポリゴンデータは全プロセッサにもたせ、パッチデータを各プロセッサに分散させる。各パッチを分割したエレメントデータは、そのエレメントデータを含むパッチデータが置かれているプロセッサが持つことになる。全プロセッサがポリゴンデータを持っているため、座標などのデータをプロセッサ間で転送する必要はない。また、各プロセッサが担当する描画部分のパッチデータとエレメントデータを持つことによりラジオシティエネルギー放射の際のデータ転送も不要となる。ヘミキューブへの描画の際には、全プロセッサが担当する部分の描画を並列に行い、デルタフォームファクタを計算する。その後、デルタフォームファクタの合計を求め、プロセッサ間通信により各パッチの完全なフォームファクタを得る。

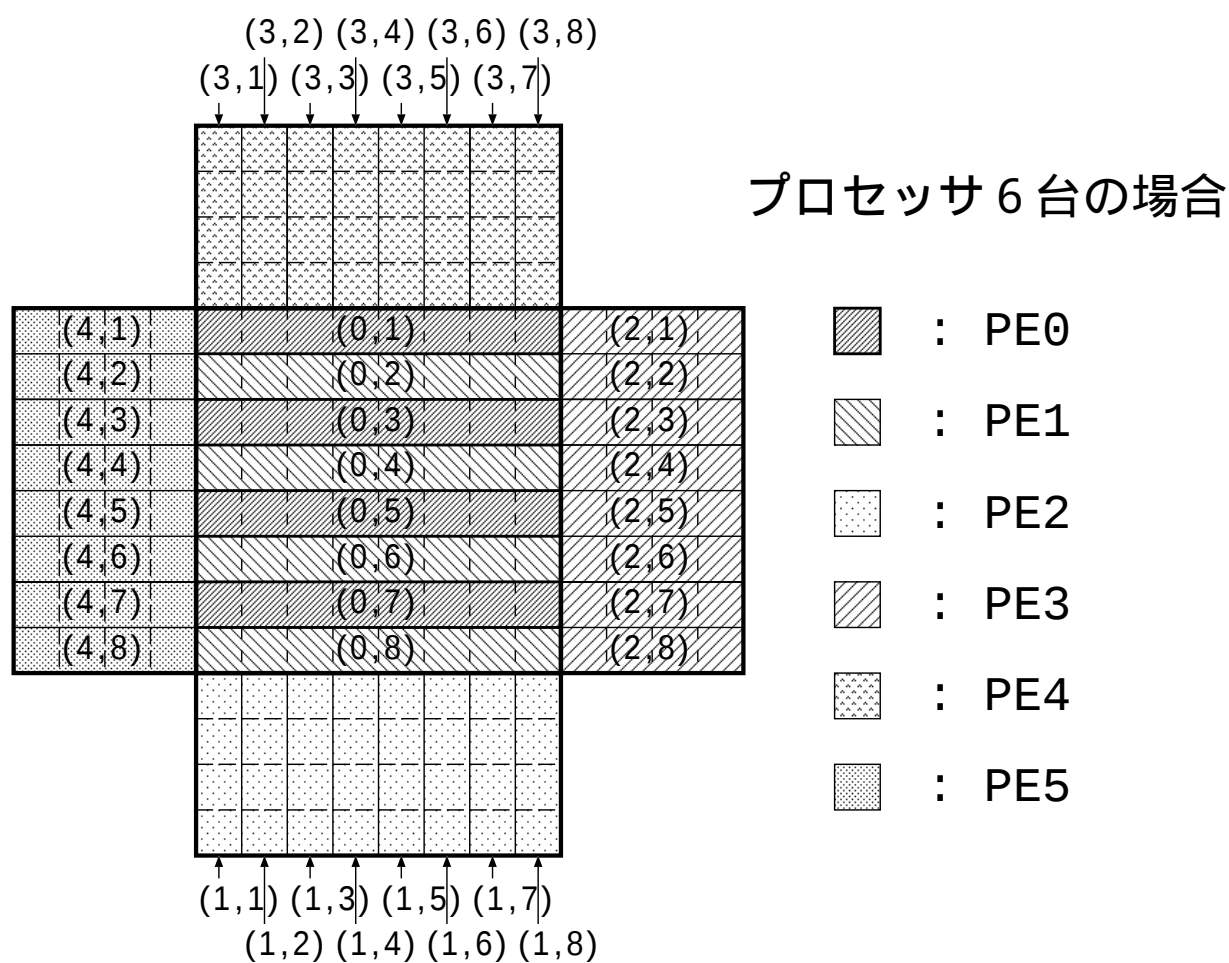


図 3.5: 等面積マッピングによるヘミキューブの割り当て

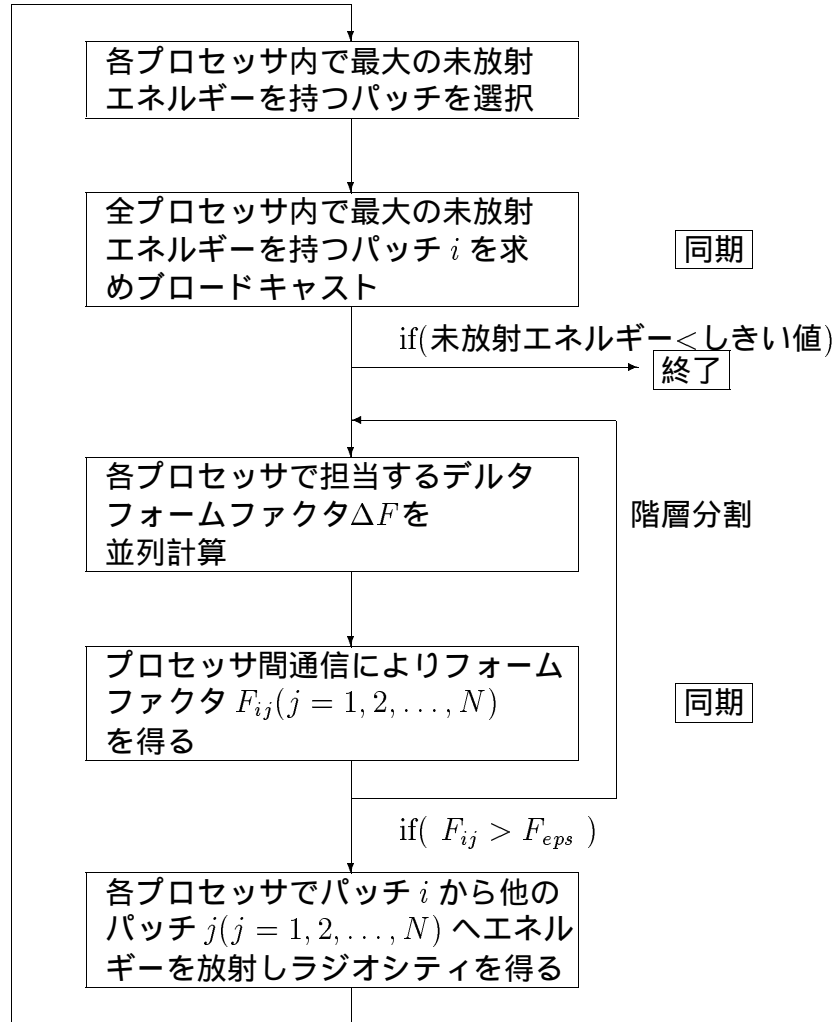


図 3.6: 階層分割ヘミキューブ法を用いた並列ラジオシティ法のアルゴリズム

3.4.3 並列漸進法のアルゴリズム

3.4.2節までの議論を踏まえた並列漸進法のアルゴリズムを図 3.6に示す。はじめに各プロセッサ内で最大のラジオシティを持つパッチを決定する。次に、プロセッサ間通信により、全パッチの中の最大未放射エネルギーを持つパッチ i を決定する。その後、各プロセッサが並列にパッチ i とのフォームファクタ計算を行い、通信により全プロセッサが完

全なフォームファクタを得る。求めたフォームファクタがしきい値 F_{eps} より大きいパッチについては、分割数を増やしたヘミキューブを用いてフォームファクタを再計算する。最後に、各プロセッサが自分の担当するエレメントへの放射の処理を並列に行う。この処理を未放射エネルギーがしきい値以下になるまで繰り返し行う。

3.5 まとめ

本章では、従来のラジオシティ法の並列化手法を紹介し、ヘミキューブの階層分割によるフォームファクタ計算の並列化手法を提案した。この手法は、画像精度の低下を抑えつつ、フォームファクタの計算量を低減することが特徴である。4章では、等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法と階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法について、分散メモリ型並列計算機 T3E 上で並列処理性能を比較する。

第 4 章

分散メモリ型並列計算機 T3E 上での並列処理性能

4.1 はじめに

本章では、本研究の提案するヘミキューブの階層分割による並列化手法について、超並列計算機 T3E 上で並列処理性能を測定し、得られた結果に対する検討を行う。

4.2 オブジェクト画像のファイル形式

入力するオブジェクト画像のデータファイルは 1 つの環境定義ファイルと 1 つ以上のモジュール定義ファイルからなり、それぞれ図 4.1、図 4.2 に示されるようなフォーマットで記述されたファイルである。この環境定義ファイルからは図 4.3 のような 2 つの立方体のある室内の画像が生成される。

性能評価に使用したオブジェクト画像データの各種パラメータは表 4.1 のとおりである。生成されるオブジェクト画像が漸進法により徐々に高品質な画像に変化していく過程を図 4.4 に示す。

```

WORLD picture room      /* World name */
COMMENT color cube      /* Entity filename */
cube.ent               /* Scaling vector(sx,sy,sz) */
< 0.3 0.3 0.6 >         /* Rotation vector(rx,ry,rz) */
< 0.0 0.0 30.0 >        /* Translation vector(tx,ty,tz) */
< 0.3 0.40 0.0 >
COMMENT yellow box
y_box.ent
< 0.3 0.3 0.3 >
< 0.0 0.0 30.0 >
< 0.7 0.5 0.0 >
COMMENT floor
floor.ent
< 1.0 1.0 1.0 >
< 0.0 0.0 0.0 >
< 0.0 0.0 0.0 >
COMMENT ceiling
ceiling.ent
< 1.0 1.0 1.0 >
< 180.0 0.0 0.0 >
< 0.0 1.0 1.0 >
COMMENT white wall
w_wall.ent
< 1.0 1.0 1.0 >
< 270.0 0.0 0.0 >
< 0.0 0.0 1.0 >
COMMENT blue wall
b_wall.ent
< 1.0 1.0 1.0 >
< 0.0 90.0 0.0 >
< 0.0 0.0 1.0 >
COMMENT red wall
r_wall.ent
< 1.0 1.0 1.0 >
< 0.0 270.0 0.0 >
< 1.0 0.0 0.0 >
COMMENT light
light.ent
< 0.2 0.2 1.0 >
< 180.0 0.0 0.0 >
< 0.4 0.6 0.995 >
END_FILE

```

図 4.1: 環境定義ファイルの形式

```

ENTITY colored cube /* Entity name */
VERTEX
< 0.0 0.0 0.0 > /* Vertex vector(x,y,z) */
< 1.0 0.0 0.0 >
< 1.0 0.0 1.0 >
< 0.0 0.0 1.0 >
< 1.0 0.0 0.0 >
< 1.0 1.0 0.0 >
< 1.0 1.0 1.0 >
< 1.0 0.0 1.0 >
< 1.0 1.0 0.0 >
< 0.0 1.0 0.0 >
< 0.0 1.0 1.0 >
< 1.0 1.0 1.0 >
< 0.0 1.0 0.0 >
< 0.0 0.0 0.0 >
< 0.0 0.0 1.0 >
< 0.0 1.0 1.0 >
< 0.0 0.0 0.0 >
< 0.0 1.0 0.0 >
< 1.0 1.0 0.0 >
< 1.0 0.0 0.0 >
< 0.0 0.0 1.0 >
< 1.0 0.0 1.0 >
< 1.0 1.0 1.0 >
< 0.0 1.0 1.0 >
END_VERT
SURFACE
[ 0.0 0.0 1.0 ] [ 0.0 0.0 0.0 ] /* Reflectance verctor(r,g,b) and */
[ 1.0 1.0 0.0 ] [ 0.0 0.0 0.0 ] /*      Initial exitance vector(r,g,b) */
[ 1.0 1.0 1.0 ] [ 0.0 0.0 0.0 ]
[ 0.0 1.0 1.0 ] [ 0.0 0.0 0.0 ]
[ 1.0 0.0 0.0 ] [ 0.0 0.0 0.0 ]
[ 0.0 1.0 0.0 ] [ 0.0 0.0 0.0 ]
END_SURF
PATCH
0 { 0 1 2 3 } /* Patch id and included vertices */
1 { 4 5 6 7 }
2 { 8 9 10 11 }
3 { 12 13 14 15 }
4 { 16 17 18 19 }
5 { 20 21 22 23 }
END_PATCH
ELEMENT
0 { 0 1 2 3 } /* Element id and included vertices */
1 { 4 5 6 7 }
2 { 8 9 10 11 }
3 { 12 13 14 15 }
4 { 16 17 18 19 }
5 { 20 21 22 23 }
END_ELEM
END_ENTITY

```

図 4.2: オブジェクト定義ファイルの形式

表 4.1: オブジェクト画像データ

	Instances	Surfaces	Patches	Elements	Vertices
room1	17	64	268	844	1224
room2	18	72	2007	2623	2195
room3	83	95	527	1952	3939
room4	83	458	602	752	2194

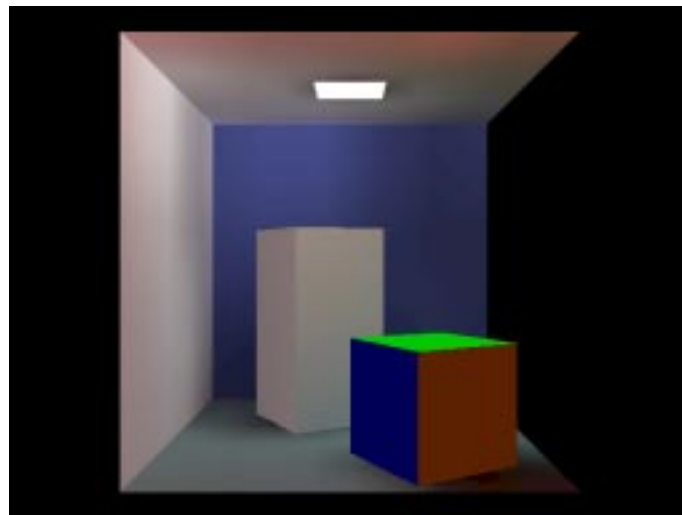


図 4.3: オブジェクト画像の例

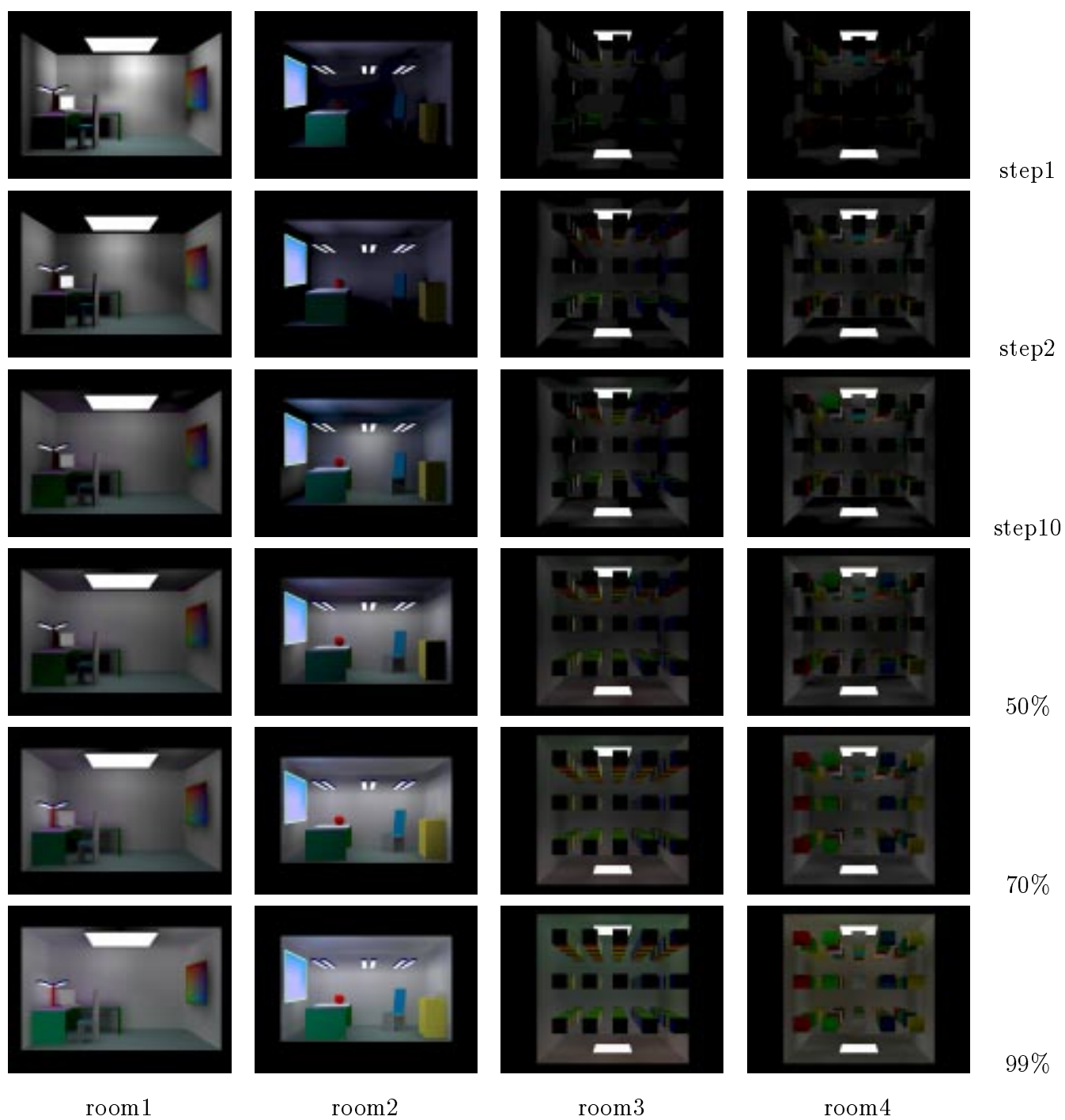


図 4.4: 漸進法による変化

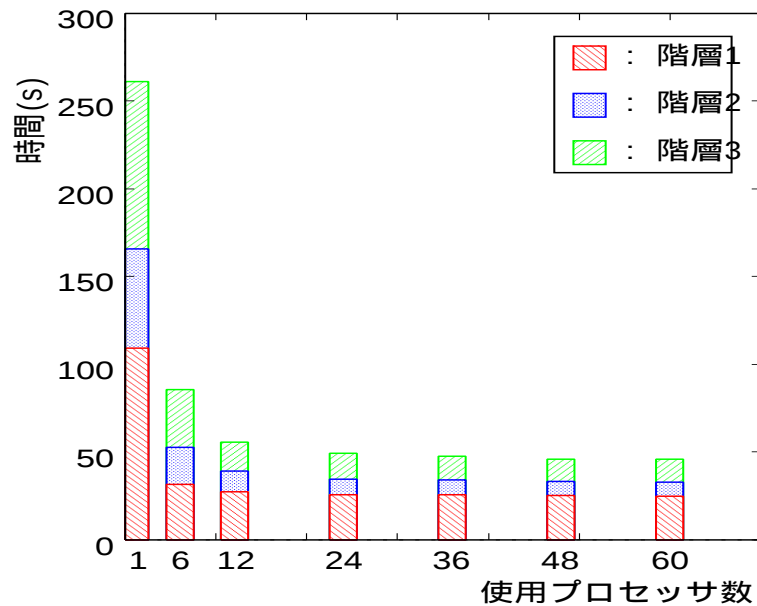


図 4.5: 階層型ヘミキューブ法の処理時間の割合 (room2)

4.3 並列処理性能の比較

並列処理性能の評価において、階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法では、1 台のプロセッサを用いた逐次処理と 6、12、24、36、48、60 台のプロセッサを用いた場合の処理時間を測定する。オブジェクト画像データを読み込み、ラジオシティ計算が終了するまでの時間を全処理時間とする。

4.3.1 階層型ヘミキューブ法の処理時間

階層型ヘミキューブ法によるフォームファクタ計算は、階層化が進むにつれて計算量は少なくなる。しかし、ヘミキューブのメッシュの数が増えるため計算時間が増大する。ここでは、3 階層まで階層化したフォームファクタ計算の処理時間を調べる。階層型ヘミキューブ法によるフォームファクタ計算における処理時間について、room2 の結果を図 4.5 に、room4 の結果を図 4.6 に示す。グラフの階層 1 は、はじめにすべてのフォームファクタ計算を行った時の処理時間を示す。階層 2、階層 3 はフォームファクタの値が大きいパッチの再計算における処理時間である。階層化がすすむとヘミキューブのメッシュが細くなり、各階層のデルタフォームファクタの計算量は増えていく。そのため、階層回数

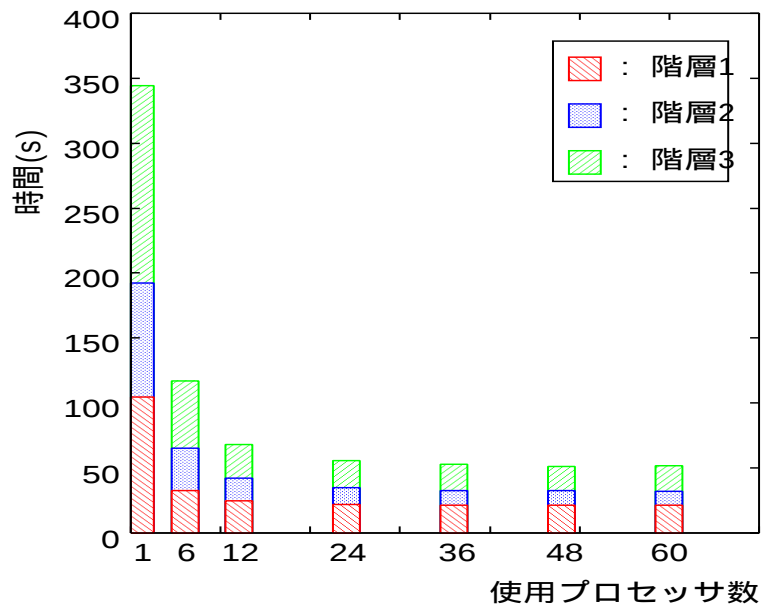


図 4.6: 階層型ヘミキューブ法の処理時間の割合 (room3)

の増加により全体の処理時間がかなり大きくなってしまう。高品質な画像を得るには、オブジェクト画像が複雑になるほど高い解像度のヘミキューブを必要とする。処理時間を短くするためには、オブジェクト画像に合わせた解像度のヘミキューブを用いるようにし、階層回数を多くしないようにすることも必要である。

4.3.2 各プロセッサの処理時間差

等面積マッピング法を用いることにより各プロセッサの処理量は均一になる。ここでは、負荷分散を評価するためプロセッサ間の処理時間の偏りがどれくらいであるかを調べる。ここで、処理時間差を式 (4.1) のように定義する。

$$\begin{aligned}
 (\text{処理時間差}) &= (\text{処理時間の一番長いプロセッサの処理時間}) \\
 &\quad - (\text{処理時間の一番短いプロセッサの処理時間}) \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

room1、room2、room3、room4 のフォームファクタ計算における処理時間差を図 4.7に示す。オブジェクト画像によって多少差があるが、全体の処理時間からみると各プロセッサの処理時間差は 1% 以下であった。このことから、等面積マッピングによる処理割り当て

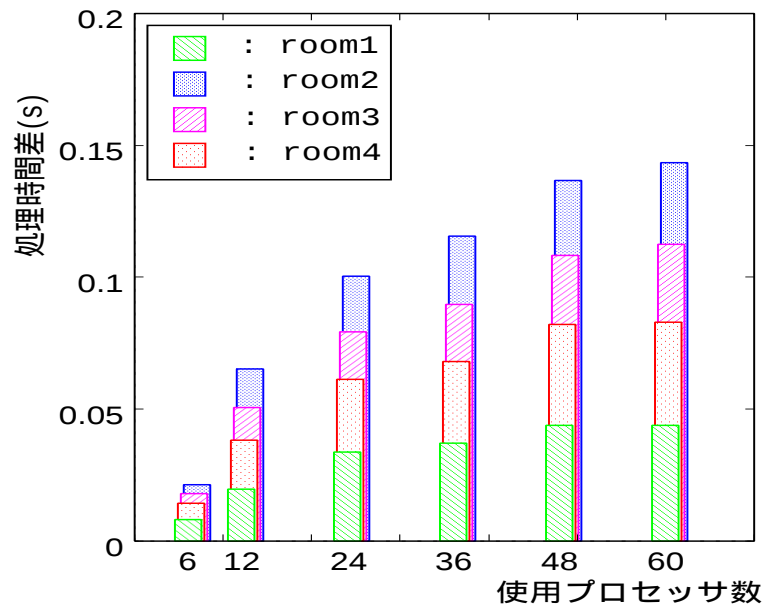


図 4.7: 階層型ヘミキューブ法の処理時間差

を行うことにより、フォームファクタ計算におけるプロセッサ間の処理の均一化が行われていることが分かる。

4.3.3 等分割ヘミキューブ法と階層型ヘミキューブ法の比較

本研究では階層分割によるフォームファクタ計算、等面積マッピング法によるプロセッサへの処理割り当てを提案した。これらの有効性を調べるため従来手法である等分割ヘミキューブ法との処理時間の比較を表 4.2 に示す 3 つの手法を用いて行う。

表 4.2: 比較に用いる 3 手法

手法	ヘミキューブの分割法	プロセッサへの処理の割り当て
手法 (1)	等分割	従来のマッピング法
手法 (2)	等分割	等面積マッピング法
手法 (3)	階層分割	等面積マッピング法

手法 (1) はヘミキューブの分割法、プロセッサへの処理の割り当てとも従来の手法である。手法 (2) は従来のヘミキューブの分割法と等面積マッピング法による割り当てによる手法である。手法 (3) は提案する階層型ヘミキューブ法と等面積マッピング法を用いた手法である。手法 (1) は 1 台のプロセッサを用いた逐次処理と 2、4、6、8、12、16、24、32、36、48、60、64 台のプロセッサを用いた場合の処理時間を測定する。手法 (2)、手法 (3) は 1 台のプロセッサを用いた逐次処理と 6、12、24、36、48、60 台のプロセッサを用いた場合の処理時間を測定する。

処理性能の比較に使用したオブジェクト画像は、room1、room2、room3、room4 の 4 つである。それぞれの処理時間を図 4.8、図 4.9、図 4.10、図 4.11 に示す。

すべてのオブジェクト画像において、等面積マッピング法を用いた手法 (2)、手法 (3) は処理時間が従来の手法 (1) に比べ、かなり短縮されている。以上から、等面積マッピング法は、従来のプロセッサへのマッピング法より有効であると考えられる。

4.4 考察

階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法は逐次処理において等分割ヘミキューブ法より処理時間が短縮できるという結果になった。また、提案した等面積マッピングによるプロセッサへの処理の割り当ては、階層型ヘミキューブ法、等分割ヘミキューブ法のどちら分割法においても従来の手法より処理時間を短縮することができた。

階層型ヘミキューブ法によるフォームファクタ計算の並列化では 1 つのパッチのフォームファクタ計算における通信と同期に要する時間が、等分割ヘミキューブ法よりも長くなる。これは、階層の深さと同じだけの通信と同期が行われるためである。しかしながら、通信時間に関しては、全処理時間に対する割合があまり大きくないので大きな影響はないと考えられる。同期に関しては、オブジェクト数の増加に従い、漸進法のループ回数、フォームファクタ計算の回数も増加するため、オブジェクト画像が複雑になると重要な問題になると考えられる。そのため、階層化するフォームファクタの値の大きさや階層化する回数を制限するなど階層化を行う条件を検討する必要がある。また、同期回数を低減するためオブジェクト画像に合わせた解像度でヘミキューブを用いて階層化することも考えられる。

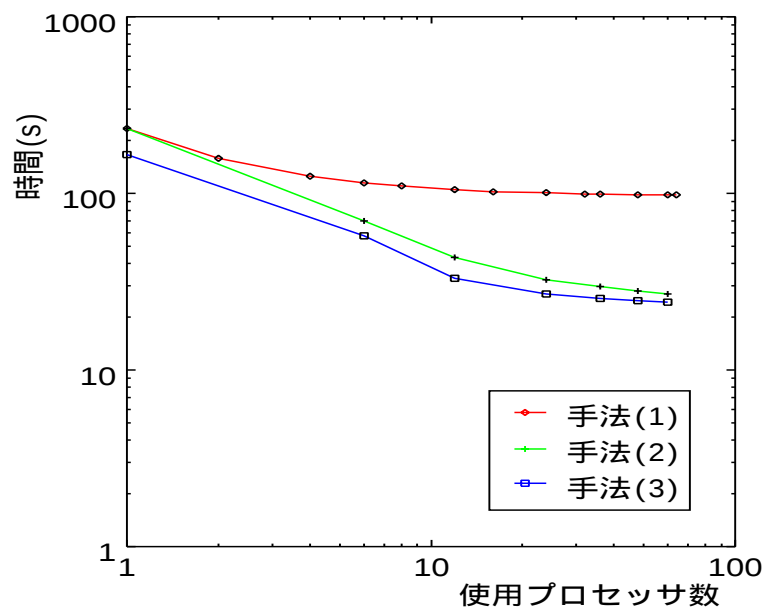


図 4.8: 各手法の処理時間 (room1)

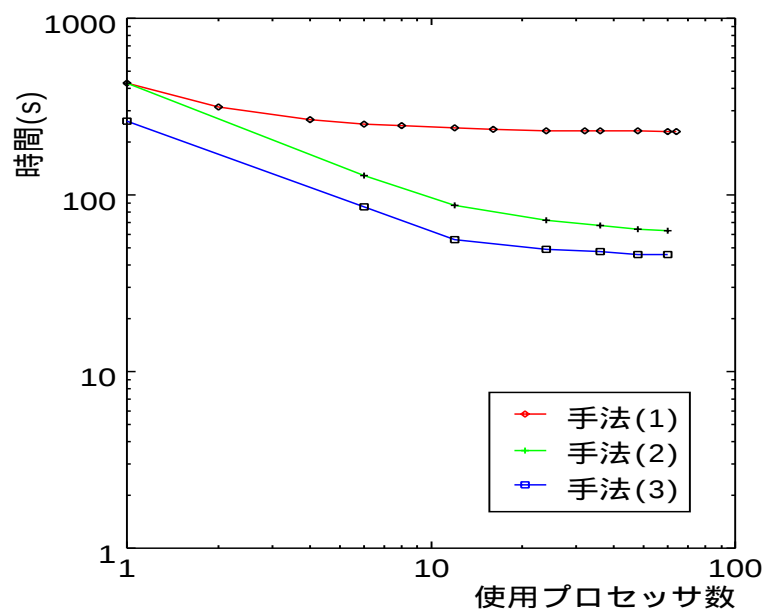


図 4.9: 各手法の処理時間 (room2)

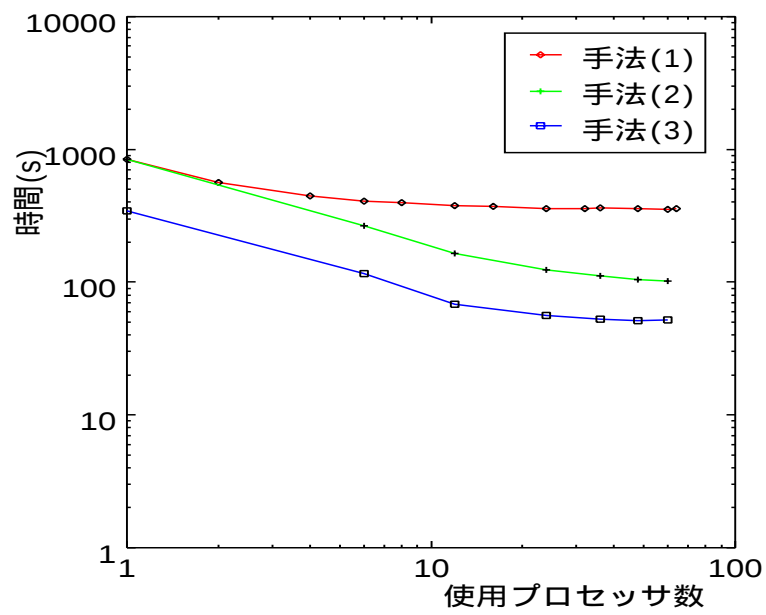


図 4.10: 各手法の処理時間 (room3)

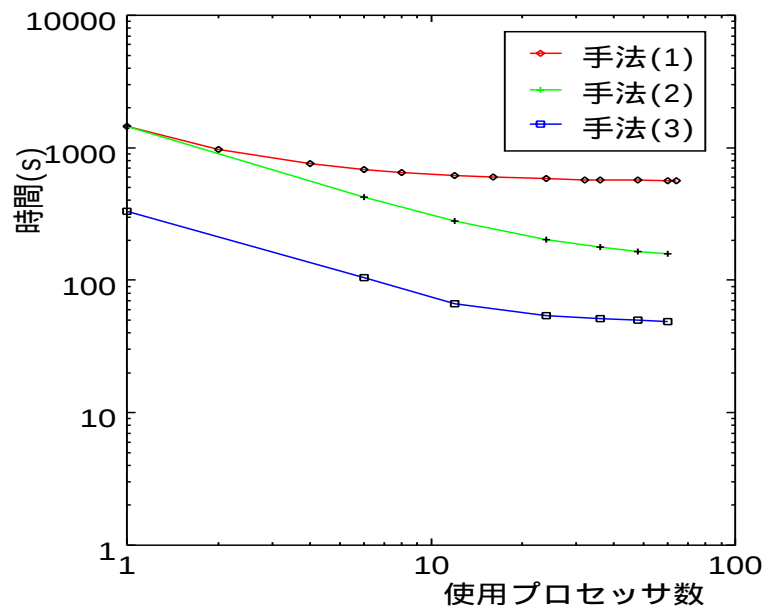


図 4.11: 各手法の処理時間 (room4)

4.5 まとめ

本章では、第 3 で提案した階層型ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法について分散メモリ型並列計算機 T3E 上で並列処理性能の評価を行った。また、従来の等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法との並列処理性能の比較を行った。

第 5 章

結論

5.1 まとめ

コンピュータの普及するにしたがって、様々な分野で CG が使われるようになってきている。今日では、CG は情報処理の一つの重要なツールとして定着しているといえる。

ラジオシティ法は非常に現実感の高い画像を生成できる手法として注目されている。しかし、処理時間が膨大なため、高速に画像生成を行うのは困難であった。

本論文では、ラジオシティ法による画像生成の高速化を目的とした階層型ヘミキューブ法を用いた並列ラジオシティ法を提案し、分散メモリ型並列計算機 T3E 上で並列性能評価を行い、その結果について考察した。以下に本論文の内容を統括する。

第 2 章では、3 次元レンダリング手法であるラジオシティ法の特徴と生成法について述べた。生成法に関してはラジオシティ方程式、フォームファクタ計算を求める方法について詳しく述べた。

第 3 章では、従来手法である等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法の並列化手法について述べた。また、本研究で提案する階層型ヘミキューブ法と分割したヘミキューブをプロセッサに分散させる方法について述べた。

第 4 章では、第 3 章で提案した手法について分散メモリ型並列計算機 T3E 上で並列性能評価を行った結果を示し、考察を行った。

本研究で提案した手法では、等分割ヘミキューブ法を用いたラジオシティ法より処理速度が優れているという結果になった。また、3.4.2 節において提案したヘミキューブのプロセッサへの分散法は、等分割ヘミキューブ法においても有効であるという結果であっ

た。しかし、フォームファクタ計算において必要なプロセッサ間通信と同期は、等分割ヘミキューブ法に比べて階層型ヘミキューブ法の方が多くなる。この問題は、オブジェクト画像が複雑になるほど、同期回数が多くなるため重要な問題になると考えられる。

5.2 今後の課題

今後は、同期回数を低減するため、オブジェクト画像に合わせた解像度でヘミキューブを階層化する手法や階層化するフォームファクタの値の大きさや階層化する回数を制限するなど階層化を行う条件の検討を行いたい。また、より複雑なオブジェクト画像について性能評価を行い、この手法における最適なプロセッサ数を詳しく調べる必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導、御鞭撻を戴いた北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 堀口進教授に深く感謝致します。

また、さまざまな面で御教授戴きました阿部亨助教授には心より感謝いたします。

平石邦彦教授には、サブテーマで熱心にご指導を戴き、厚く御礼申し上げます。

有益な御助言を戴いた山森一人助手、超並列計算機 T3E の利用にあたりご配慮戴いた井口寧助手に厚く感謝いたします。

さらに、本研究を行うにあたり、日頃からさまざまな面で御力添えを戴いた同研究科、マルチメディア統合システム講座の浅野英城氏、大峯誠氏、寺井浩司氏に感謝致します。

また、日頃よりお世話になった堀口研究室、阿部研究室の皆様に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Michael F.Cohen,Donald P.Greenberg, “The Hemi-cube: A radiosity solution for complex environments”, Computer Graphics(SIGGRAPH '85), Vol.19,No.3,pp.31-40,Aug.1985
- [2] Michael F.Cohen,Shenchang E.Chen,John R.Wallace,Donald P.Greenberg, “A progressive refinement approach to fast radiosity image generation”, Computer Graphics(SIGGRAPH '88), Vol.22,No.4,pp.75-84,Aug.1988
- [3] Pat hanrahan,David Salzman,Larry Aupperle, “A rapid hierarchical radiosity algorithm”, Computer Graphics(SIGGRAPH '91) Vol.25,No.4,pp.197-206,Aug.1991
- [4] 大谷尚毅, 米田泰司, 日高教行, 浅原重夫, 鷲島敬之, “ラジオシティ法の一並列化手法”, 情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム, pp.95-104,Sep.1993
- [5] Wim Lamotte,Frank V.Reeth,Luc Vandeurzen,Eddy Flerackers, ”Parallel processing in radiosity calculations”, CGI '93,pp.485-496,1993
- [6] Michael F.Cohen,John R.Wallace, “Radiosity and realistic image synthesis”, Academic Press, 1993
- [7] 阿部毅, 大野義夫, 西田友是, 近藤邦雄, 中嶋正之, “並列グラフィックスアルゴリズムのサーベイ”, 情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム, pp.9-16,May 1994
- [8] 成見哲, 牧野淳一郎, 戎崎俊一, 大村皓一, “ラジオシティ計算専用 *DiskArray* システム”, 情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム, pp.19-24,Oct.1994

- [9] J.P.Singh,A.Gupta,M.Levoy, “Parallel visualization algorithms: performance and architectural implications”, IEEE Computer, vol.27,no.7,pp.45-55,July 1994
- [10] Ian Ashdown, “Radiosity: A programmer’s perspective”, John Wiley & Sons, 1994
- [11] 大石進一, 牧野光則, “グラフィックス”, 日本評論社, 1994
- [12] 上嶋明, 山崎勝弘, 渡部透, 得丸英勝, “マルチトランスピュータシステム上でのラジオシティ法的高速化”, 情報処理学会並列処理シンポジウム, pp.19-26,May 1995
- [13] H.Kobayashi,H.Yamaguchi,Y.Toh,T.Nakamura, “ $(M\pi)^2$: A hierarchical parallel processing system for multipass rendering method”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E-79-D,pp.8,Aug. 1995
- [14] 阿部寛之 “並列ラジオシティ法による画像生成の高速化”, 北陸先端科学技術大学院大学 修士論文, 1997
- [15] 上嶋明, 山崎勝弘, “分散メモリ型並列計算機 AP1000+上でのラジオシティ法の並列化”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II,No.7 pp.1852-1859,1997

研究業績

- [1] 分散メモリ型並列計算機を用いたラジオシティ法的高速化

佐藤敦、阿部亨、堀口進

電気関係学会北陸支部連合大会 E-23,pp288,(1997)