

画像生成装置 MAGG のための並列双方向視線探索法

寺西忠勝[†] 河合利幸[†] 小沢一雅[†] 精木順一[‡] 大西啓修[‡]
†大阪電気通信大学 †三菱プレシジョン株式会社
†寝屋川市初町 18-8 †鎌倉市上町屋 345

あらまし

我々はこれまで視線探索法の並列化に関する研究を行ってきたが、今回は、より写実的な画像生成が可能な双方向視線探索法の並列化を行った。双方向視線探索法は光線探索と視線探索からなる。光線探索では、物体を構成するエレメントを各プロセッサに動的に割り当て、光源からエレメントに向かう光線の処理を並列化している。視線探索では、画面分割法を用いて並列化している。使用した計算機は 86 台のトランスピュータで構成されている。エレメントを含むシーンデータは共有メモリ上に配置し、各プロセッサのキャッシュメモリとの間で DMA 転送を行っている。本稿では、システムの概要、並列化手法、並びにキャッシュ容量を変化させた場合の並列処理効率について報告する。

和文キーワード 双方向視線探索法 並列処理 空間分割法 画面分割法 トランスピュータ

A Study of Bidirectional Ray Tracing Algorithm for Parallel Image Generation System MAGG

Tadamasa TERANISHI[†] Toshiyuki KAWAI[†] Kazumasa OZAWA[†]
Jun-ichi ABEKI[‡] Hironobu OHNISHI[‡]
†Osaka Electro-Communication University
‡Mitsubishi Precision Co.,Ltd
†18-8,Hatsu-cho,Neyagawa
‡345,Kamimachiya,Kamakura

Abstract

This paper describes a parallel processing technique for bidirectional ray tracing which improves the reality of the image drastically. It is organized from two phases, i.e. light ray tracing and viewing ray tracing. In light ray tracing, pairs of a light source and an element of objects are distributed to each processor dynamically. In viewing ray tracing, we use a screen subdivision algorithm. Our system consists of 86 transputers. All of the scene data are placed on shared memories, and only the required parts of them can be transferred to the cache memory on each processor by means of DMA on-the-fly. We also show some experimental results.

英文 key words Bidirectional ray tracing , Parallel processing , Space subdivision algorithm , Screen subdivision algorithm , Transputer

1 はじめに

近年、コンピュータグラフィックスによる写実的な3次元画像が、様々な分野で広く求められている。写実的な3次元画像生成アルゴリズムには、ラジオシティ法 [2] や、双方向視線探索法などがあるが、膨大な計算時間がかかるため高速化が望まれている。高速化の一手法として並列計算機を用いた並列処理が考えられる。我々はこれまで視線探索法の並列化に関する研究 [6, 7] を行ってきたが、今回は、より写実的な画像生成が可能であり、かつ並列処理に適した双方向視線探索法を取り上げることにした。双方向視線探索法は逆方向視線探索(光線探索)と視線探索からなる。逆方向視線探索では、物体を構成するエレメントを各プロセッサに動的に割り当て、光源からエレメントに向かう光線の処理を並列化している。また、視線探索では、従来我々が用いていた画面分割法による並列化に加えて空間分割法を用いて高速化している。本稿では、画像生成装置 MAGG の概要について述べ、並列化手法、並びにキャッシュ容量を変化させた場合の並列処理効率について報告する。

2 MAGG のハードウェア構成

MAGG は、ハイビジョン CG 画像を高速に生成するために開発された並列処理装置で、GPU カード、フレームバッファカード、ビデオ入力カード、ビデオ出力カードを実装している。

MAGG システムには合計 86 台のトランスピュータ (T800) が使用されている。T800 は、INMOS 社の開発したプロセッサで、1 台あたり約 10MIPS の処理能力をもつ。各プロセッサ間の接続は図 1 のようになっている。

制御プロセッサ HP (Host Processor) は、パーソナルコンピュータ (NEC PC-9801) の拡張ボード上に 1 台実装されている。2MB の局所メモリを持ち、MAGG 本体内のプロセッサとシリアルリンクにより接続されている。また、HP は、MS-DOS の機能を利用して、ファイルアクセスや、キーボードからの入力、モニタへの表示等を行う。

GPU カードに実装されているプロセッサは、FP (Fork Processor) と NP (Node Processor) に分けられる。

FP は、各カードに 1 台ずつ、合計 5 台ある。各 FP は、256KB の局所メモリを持つ他、G バスを用いて、各カード 8MB ずつ、合計 40MB の共有メモリとフレームバッファへアクセスできる。また、シリアルリンクによりカード内の 4 台の NP と接続されており、シリアル

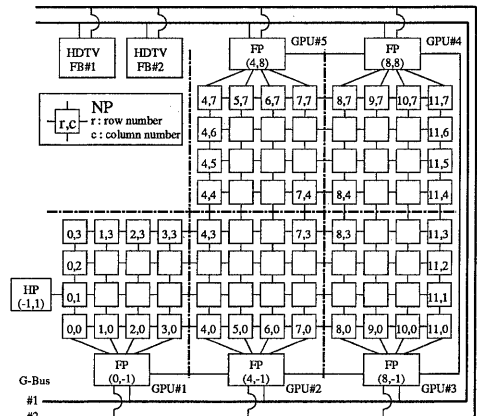


図 1: プロセッサ間の接続

リンクアダプタ経由で他のカードの FP とも接続されている。

NP は、各カードに 16 台ずつ、合計 80 台ある。各 NP は、512KB の局所メモリを持ち、シリアルリンクにより 4×4 の 2 次元メッシュ状に結合されている。カード間で結合することにより、NP ネットワークを構成する。

各トランスピュータ間の通信は 1024 バイトを 1 個のバケットとして、シリアルリンク経由で行われる。また、共有メモリおよびフレームバッファと NP 局所メモリとの間で DMA 転送を行うことができる。

3 双方向視線探索法

双方向視線探索法とは逆方向視線探索法と視線探索法を組み合わせたものであり、4 つの成分に分解できる間接光のうちの 3 成分まで求めることができる。図 10 のような鏡の反射光による拡散反射や図 11 のような集光を表現することができる。

3.1 間接光

間接光は 4 つの成分に分解して考えることができる (図 2)。それらの成分を考慮した大域照明モデルを次に示す。

- 拡散拡散反射成分

拡散反射光による拡散反射の成分であり、ラジオシティ法で計算することができる。視点独立の成分である。

- 鏡面拡散反射成分

鏡面反射光による拡散反射の成分であり、逆方向視線探索法 [3] で計算することができる。視点独立の成分である。

- 拡散鏡面反射成分

拡散反射光による鏡面反射の成分であり、視線探索法で計算できる。視点依存の成分である。

- 鏡面鏡面反射成分

鏡面反射光による鏡面反射の成分であり、視線探索法で計算できる。視点依存の成分である。

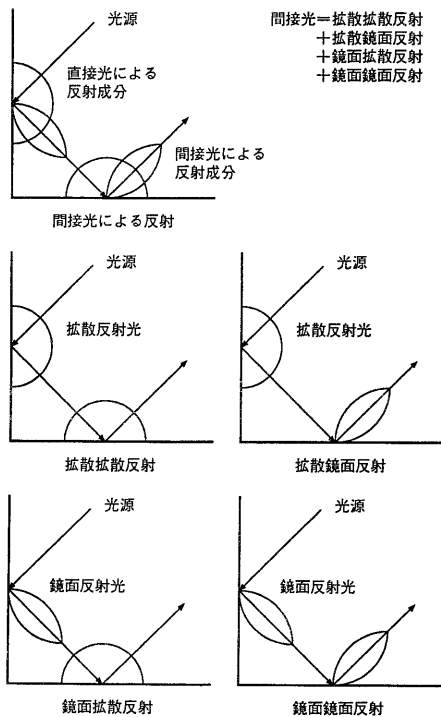


図 2: 間接光の 4 成分

3.2 アルゴリズム

本手法では、光源は点光源に限定しており、単位立体角当たりのエネルギー量は一定で指向性はないものとする。物体は三角パッチで構成されており、更に 1 枚以上の三角形のエレメントに分割される。なお、交差判定を行う最小単位はパッチであり、エネルギー計算の最小単位はエレメントとしている。交差判定には空間分割法を用いて高速化を図っている。

本手法は以下の流れで処理される。

- 前処理フェイズ
- 逆方向視線探索フェイズ
- 頂点輝度計算フェイズ
- 視線探索フェイズ

3.2.1 前処理フェイズ

ファイルからシーンデータを読み込み、パッチからエレメントを生成したり視点座標変換等の処理を行う。

3.2.2 逆方向視線探索フェイズ

光源からあるエレメントに向けて複数本の光線を出す。この光線を一次光線と呼ぶ。この一次光線が他のエレメントと交差すれば、光線はそのエレメントに届かなかったことになり処理を打ち切る。他のエレメントと交差しなければ、光線の持つエネルギーをそのエレメントに与え、反射物体ならば反射方向に、透過物体であれば透過方向に二次光線を出す。二次光線がエレメントに交差しなければ、その光線の処理を打ちきる。エレメントに交差すれば最初に交差したエレメントに光線のエネルギーを与え、更に反射方向と透過方向に二次光線を出す。この処理を再帰的に行う。これを全てのエレメントについて繰り返すことで直接光の拡散反射成分と間接光の鏡面拡散成分を求める。

エレメントに与えるエネルギー量は、光源からエレメントを見た時の立体角を求めて計算する。エレメントを三角形としたのは立体角を求めるのが容易だからである。光源を中心とする単位球にエレメントを投影すると球面三角形ができる。立体角を求めることはこの球面三角形の面積を求めることであり、面積は球面三角形の 3 つの角度から求められる。

光源と頂点 A,B からなる平面を α とし、同様に光源と頂点 B,C, 光源と頂点 C,A からなる平面を β, γ とする。

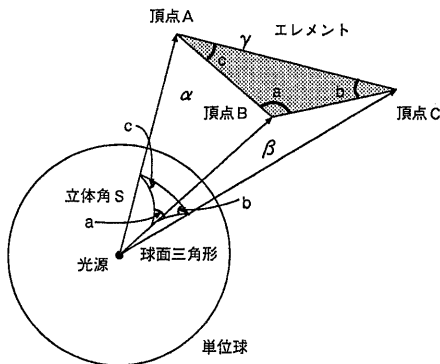


図 3: 立体角

平面 α と平面 β の平面角を a , 平面 β と平面 γ の平面角を b , 平面 γ と平面 α の平面角を c とするとこれらは球面三角形の 3 つの角度と等しいことから, 面積 s は次式で求まる.

$$s = a + b + c - \pi$$

単位立体角当たりの光源からのエネルギー量 E は, 光源とエレメント間に遮蔽物がないとすれば

$$E \cdot s$$

となる. 光源からエレメントに対して n 本の光線を出し, そのうち m 本がエレメントに届いたとすると,

$$\frac{E \cdot s}{n} \cdot m (\text{ただし, } 0 \leq m \leq n)$$

がエレメントに届いたエネルギー量となる.

3.2.3 頂点輝度計算フェイズ

逆方向視線探索フェイズで計算されたエレメントのエネルギーからエレメントの頂点の輝度値を求める. まず最初にエレメントの輝度値を求め, 次に頂点を共有するエレメントの輝度値を平均してその頂点の輝度値とする. なお, エレメントの輝度値はエレメントのエネルギーを面積で割ったものである.

3.2.4 視線探索フェイズ

視点から画素に向かって視線を出し, パッチとの交差判定を行う. 交差したパッチから交差したエレメントお

よびその位置を求め, エレメントの 3 頂点の輝度値から線形補間により拡散反射成分を求める. 交差した物体が鏡面反射物体なら光源方向に影視線を出し, 他の物体と交差しなければ直接光の鏡面反射成分を求める. 更に反射方向, 透過屈折方向に視線を出し同様の計算を再帰的に繰り返す. この処理で視点依存である直接光の鏡面反射成分と間接光の鏡面鏡面成分と拡散鏡面成分が求まり, 先で求めた成分を加えて最終的な画像を生成する.

3.3 空間分割法

本手法では空間分割法を用いて交差判定を高速化している [5]. 物体が定義されている空間 (これを物体空間と呼ぶことにする) を同じ大きさの立方体空間 (これを部分空間と呼ぶことにする) に分割する. 交差判定時には視線 (または光線) が通過する部分空間に含まれるパッチに対してのみ交差判定を行うため効率的に処理ができる (図 4). なお, 視点や光源位置が物体空間に含まれていなくともよい.

4 並列化手法

4.1 負荷分散

逆方向視線探索フェイズと視線探索フェイズでは並列処理を行う. その他のフェイズは並列処理を行っていない.

特定のプロセッサに負荷が集中すると, そのプロセッサにおける処理に時間がかかり, 全体の処理時間が長くなる. 並列処理効率を向上させるためには, 各プロセッサの負荷を均一化する必要がある. 負荷を均一化するために逆方向視線探索フェイズと視線探索フェイズでの処理は以下のように行う.

逆方向視線探索フェイズは, 光源からエレメントに向かう光線の処理がエレメントごとに独立であることから, エレメントを各プロセッサに割り当てて, そのエレメントに向かう光線の処理を並列化する. エレメントの数がプロセッサの数に比べ非常に多いので, 5 台の FP がカード内の NP に対して, 光源 1 つとその光源からの 1 次光線の目標となるエレメントとを動的に割り当てることで負荷分散を行う. FP が割り当てるエレメントは, カード内の共有メモリ上にあるエレメントである.

視線探索フェイズは, 視点から画素に向かう視線の処理が視線ごとに独立であることから, 従来の画面分割法 [6, 7] と同様に画面をいくつかの小画面に分割し, この小画面を各プロセッサに割り当てて並列化を行う. 分割

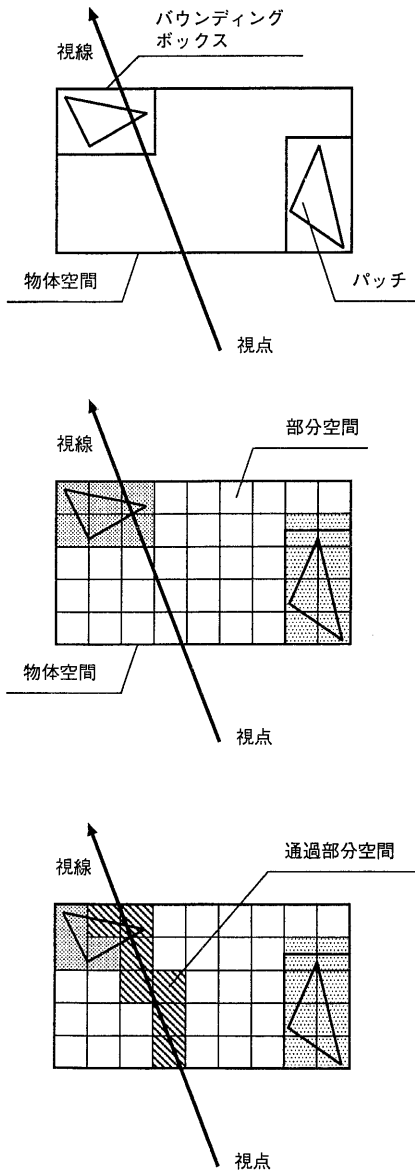


図 4: 空間分割法

する小画面の数をプロセッサの数よりも十分多くし、動的に割り当てることで負荷分散を行う。

4.2 並列処理手順

HP, FP, NP の 3 種類のプロセッサの処理内容は、それぞれ異なる。また、各フェイズによっても異なる。

● 前処理フェイズ

HP はファイルからシーンデータ等を読み込み、前処理で必要となるデータを FP に転送する。FP はエレメントの作成や視点座標変換等の前処理を行う。

● 逆方向視線探フェイズ

NP は、カード内の FP に一次光線の目標となるエレメントの要求バケットを出す。FP がそのバケットを受け取ると未処理のエレメントを割り当てる。NP は、割り当てられたエレメントに向かう光線の処理を行う。交差判定に必要なバッチデータ等は、NP の局所メモリ上のキャッシュにある場合はそれを用い、無い場合はカード内の FP を通して共有メモリから逐次転送して用いる。また、光線のエネルギーをエレメントに加算する時には、エレメントが格納されている共有メモリのカード内の FP に対して、光線のエネルギーの加算要求バケットを送る。FP は、NP からバケットで送られてきた光線のエネルギーをエレメントのエネルギーに加算する処理を行う。

● 頂点輝度計算フェイズ

1 台の FP が頂点輝度計算を行う。

● 視線探索フェイズ

NP は画面割り当て要求バケットを HP に送る。HP はこのバケットが届けば NP に小画面を割り当てる。NP で交差判定に必要なバッチデータ等は、逆方向視線探索フェイズと同様に NP の局所メモリ上のキャッシュにある場合はそれを用い、無い場合はカード内の FP を通して共有メモリから逐次転送して用いる。NP で求められた輝度情報は、カード内の FP にバケットで送られる。FP は、NP からバケットで送られてきた輝度値をフレームバッファに書き込む。

4.3 データ管理方式

NP の局所メモリは 512KB と小さいため全てのデータを持つことができない。そのため、部分空間データと

パッチデータ、エレメントデータ、頂点輝度データの4種類は各GPUカードの共有メモリ上に分割して配置する。視点や光源データ等のその他のデータは局所メモリ上に置く。これら4種類のデータはそれぞれ2KBのブロックにまとめられ、図5のように共有メモリ上に配置する。

NPは必要となったデータが局所メモリ内のキャッシュにある場合はそれを使い、無い場合はカード内のFPにそのデータのDMA転送要求パケットをシリアルリンク経由で送る。FPがDMA転送要求パケットを受け取った時点でDMA転送が行われる。なお、キャッシュはLRU法を用いて参照時間の新しいものから検索され、古いものから順に更新される。

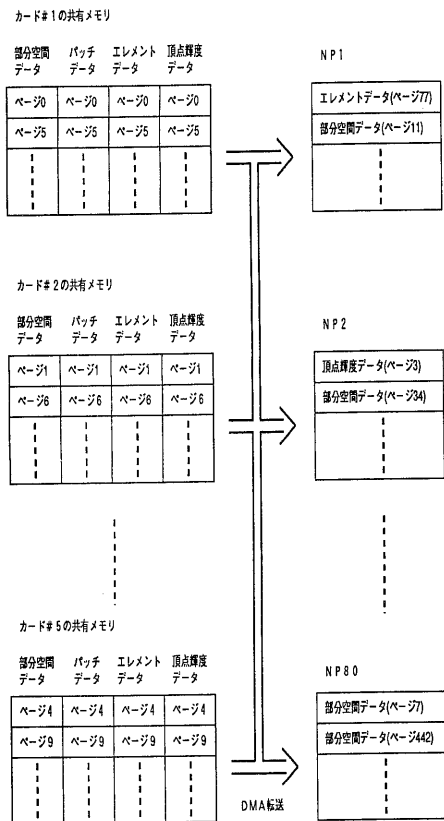


図5: データ管理

逆方向視線探索フェイズでは、光線がエレメントにエネルギーを与える度に共有メモリ上のエレメントのエネルギーに加算する必要がある。書き込み要求パケットは、エレメントデータの置かれている共有メモリと同一カード内のFPにシリアルリンク経由で送られる。受け取ったFPは、光線のエネルギーをエレメントのエネルギーに加算する。これは、対象エレメントデータの置かれている共有メモリと同一のカード内のFPのみが加算することを意味し、複数のプロセッサによる同一データの書き込みを防いでいる。このエレメントのエネルギーは、逆方向視線探索フェイズでは参照されないため、NPのキャッシュ内にあるエレメントデータを更新する必要はない。なお、5枚のカードにエレメントデータを分散したのは、書き込み要求パケットが特定のFPに集中するのを防ぐためである。

5 評価実験

並列処理効率を評価するために以下の条件で実験を行った。

- 実験画像(図10)は200×200画素で反射回数1回とした。
- NPのキャッシュブロック数は20,40,60,80ブロックの4種類とした。
- NPの使用台数は5,10,20,40,60,80台の6種類とした。

なお、物体空間は336個(336ブロック)の部分空間で構成されており、パッチデータ、エレメントデータは共に448個で、それぞれ49ブロック、34ブロックであった。頂点データは576個、3ブロックであった。

この結果、図6, 7, 8, 9が得られた。図6は、プロセッサの数を変えたときの描画時間を示す。図7は、キャッシュブロック数が80個の場合、プロセッサの数を変えたときの各フェイズの処理時間を示す。図8は、プロセッサ数が80台の場合、キャッシュブロック数を変えたときのキャッシュのヒット率を示す。図9は、プロセッサ数が80台の場合、キャッシュブロック数を変えたときの各フェイズの処理時間を示す。

キャッシュブロック数が80ブロックの場合が最も速い。逆にキャッシュブロック数が少ない場合は、プロセッサの数を増やしても描画時間に変化は見られない。これはDMA転送の待ち時間が計算時間に比べて大きすぎるためと考えられる。

また、キャッシュブロック数が少ない場合は、部分空間データのヒット率が極端に悪いことがわかる。これは他のデータに比べ部分空間データの総ブロック数が多いためと考えられる。

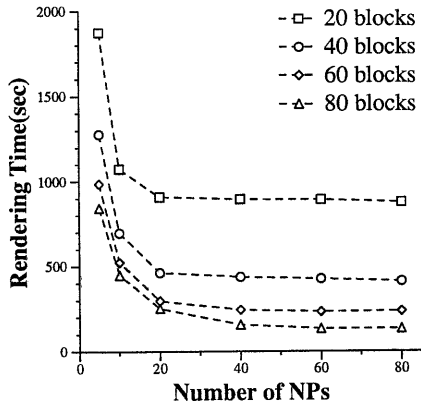


図 6: プロセッサ数と処理時間 (1)

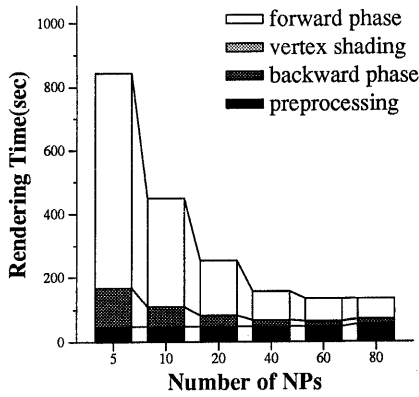


図 7: プロセッサ数と処理時間 (2)

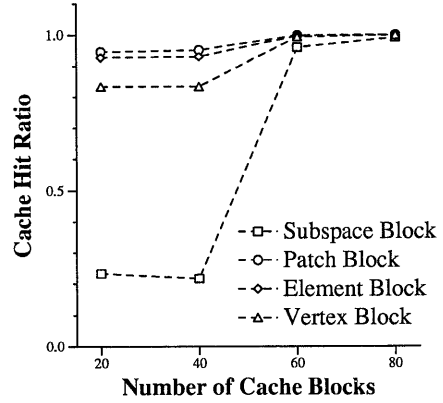


図 8: キャッシュブロック数とヒット率

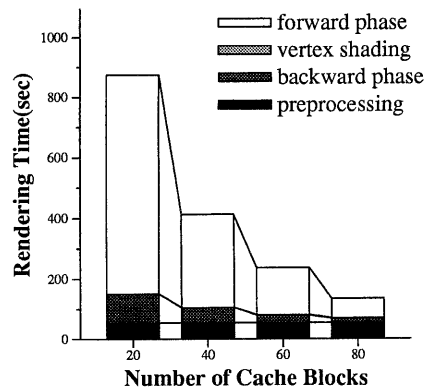


図 9: キャッシュブロック数と処理時間

6 むすび

データ逐次転送方式では、NP から FP への転送要求が増加するに従って、転送待ち時間が増大し性能低下を

招く。この方式では避けられない問題で、プロセッサ数の増加に対して、通信時間と計算時間の比で決まる一定の値以上並列処理効率が伸びない [1]。そのため、キャッシュ容量がデータ容量に比べて著しく小さい場合は並列処理効率が伸びていない。特に部分空間データのヒット率が悪いことが分かったので、キャッシングするデータの構造を変えるなどしてキャッシュのヒット率を改善する必要がある。

現在は点光源に限定した実装となっているので、今後は面光源についても考慮したいと考えている。

参考文献

- [1] 西村, 出口, 辰己, 河田, 白川, 大村, “コンピュータグラフィックスシステム LINKS-1 における並列処理の性能評価”, 信学論 (D), J68-D, Vol. 4, pp. 733-740, 1985.
- [2] M. F. Cohen, S. E. Chen, J. R. Wallace and D. P. Greenberg, “A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation”, *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 75-84, August 1988.
- [3] J. Arvo and D. Kirk, “Backward Ray Tracing”, *SIGGRAPH'86 course notes*, Dallas, Tex., Aug. 18-22, 1986.
- [4] J. R. Wallace, M. F. Cohen and D. P. Greenberg, “A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods”, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 311-324, July 1987.
- [5] M. Dippe and J. Swensen, “An Adaptive Subdivision Algorithm and Parallel Architecture for Realistic Image Synthesis”, *Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, pp. 149-158, 1984.
- [6] 大西充久, 河合利幸, 精木順一, 大西啓修, “画像生成システム MAGG における並列視線探索法の検討”, 電子情報通信学会春季全国大会論文集, Vol. 7, pp. 367, 1991.
- [7] 大西充久, 竹安俊幸, 河合利幸, 精木順一, 大西啓修, “画像生成装置 MAGG のための画面分割による並列視線探索法”, 情報処理学会第 43 回全国大会論文集, Vol. 2, pp. 499-500, 1991.

- [8] 竹安俊幸, 大西充久, 河合利幸, 精木順一, 大西啓修, “画像生成装置 MAGG のための空間分割による並列視線探索法”, 情報処理学会第 43 回全国大会論文集, Vol. 2, pp. 501-502, 1991.

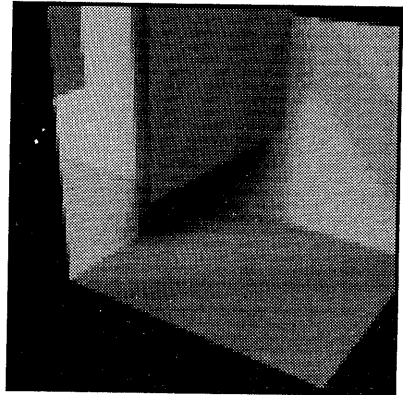


図 10: 実験シーン A(反射物体)

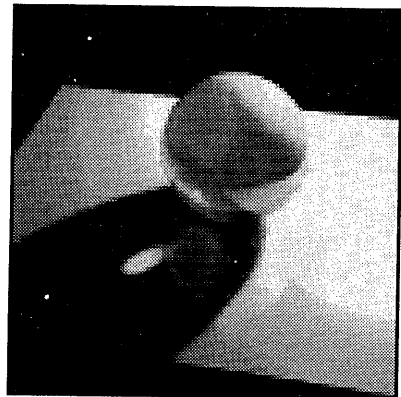


図 11: 実験シーン B(透過物体)