

レイトレーシング法を高速処理する専用並列レンダリング・マシンの構想 2P-4

権 五鳳 村上和彰 富田眞治
(九州大学大学院総合理工学研究科)

1.はじめに

我々はフォトリアルなアート用3次元画像を高速に生成する並列レンダリング・マシンのアーキテクチャを検討している。その一方式として、以下の特長を有するマシン・アーキテクチャを提案する。

- ①レイトレーシング法に特化したレンダリング
- ②画面分割によるマルチプロセッサ方式
- ③1本の光線に対するマクロパイプライン処理
- ④空間等分割法による高速交差判定
- ⑤積和演算器による高速交点計算

2.基本方針

レイトレーシング法はリアルな画像生成が可能である反面、処理時間が膨大になるという欠点がある。その主な原因は次の2点である。

- ①すべての画素について光線追跡を行う。
- ②物体と光線との交差判定を多量に行う。

まず、②の交差判定の高速化方法としては、i) 外接体を利用して階層的に探索する方法、ii) オクツリーで空間分割して階層的に探索する方法、iii) 空間を等分割して3DDDAで探索する方法、などがある。探索速度の点で有利なのは、iii) の空間等分割法^[1]である。

また、①に対する解決策としては、画素ごとの処理がまったく独立している点に着目して、マルチプロセッサ上で画素単位で並列処理する画面分割方式が一般的である。しかし、データを格納するメモリについてアクセス競合等の問題が生じることから、接続可能なプロセッサ数には必ずと限界がある。

そこで、我々は以下の3レベルにおいて、それぞれ並列化および高速化を図ることとした。

- ①マルチプロセッサ・レベル：画面分割方式による画素単位の並列処理を行う。
- ②プロセッサ・レベル：1本の光線に関して、次の3ステージから成るマクロパイプライン処理を施す；
 - a) 物体探索ステージ（空間等分割法）
 - b) 交点計算ステージ
 - c) シェーディング・ステージ
- ③ステージ・レベル：各ステージ内部では、さらに演算パイプライン処理を施す。

3.概要

3.1 マシン構成

本マシンは複数のPE (Processing Element) から成るマルチプロセッサ・システムであり、ホストコンピュータのバックエンド・プロセッサに位置する。分散メモリ構成を採り、各PEは固有のローカルメモリを有する。プログラム、プリミティブデータ(物

体の位置、形状、色、光学係数等)、ボクセルデータ(ボクセル中の物体の有無)、光源データ等の同一コピーを全PEに配置する。

3.2 全体の処理の流れ

本マシンにおける画像生成処理は、ホストコンピュータで行う前処理と各PEで独立に行う本処理とに分かれる。

前処理は、さらに次の2種類の処理に分かれる。

- ①ボクセルデータの生成：物体空間を等間隔のボクセルに分割する。ボクセルの中の物体の有無を調べ、物体がある場合は当該物体の識別子をボクセルデータに登録する。
- ②1次光線の生成：画面の各画素に対応する1次光線を生成する。

ホストコンピュータは前処理を終えると、処理結果を各PEに転送し、各PEは本処理を開始する。各PEでは、図1に示すように、物体探索、交点計算、シェーディングの3ステージからなるマクロパイプライン処理を施す。以下、各ステージの機能について詳述する。

4.物体探索ステージ

4.1 設計方針

交差判定は探索問題であることから、一般に処理時間が長く、その長さも一定とならない。これらの影響を軽減するため、以下の理由により、交差判定法として空間等分割法を採用した。

- ①ボクセルの大きさが一定で、かつ、次のボクセルに進む際単純な増分計算しか要しないので高速である。
- ②探索を階層的に行わないので処理時間が一定である(階層的探索では、処理時間にバラツキがある)。

交差判定は、物体探索ステージと次段の交点計算ステージとに分けて行う。さらに、物体探索ステージはすべての光線に対して必ずその処理を施す必要があることからボトルネックになる恐れがある。そこで、図1に示すように、本ステージの演算器を多重化(図では4個)する。

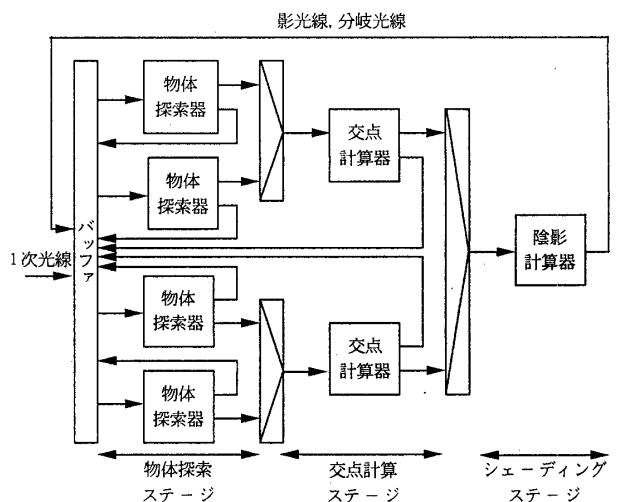


図1. マクロパイプラインの構成

A Parallel Rendering Machine for the Ray-Tracing Algorithm

Obong GWUN, Kazuaki MURAKAMI and Shinji TOMITA
Kyushu University

4.2 処理の概要

物体探索ステージでは、光線に沿ってボクセル・トラバースを行う。その処理の流れは以下のようになり、これらはパイプライン化される。

- ①最前段のバッファから光線を受け取り、注目ボクセル中のプリミティブの有無を調べる。
- ②光線が次に進むボクセルを3DDDA^[2]で求める。
- ③プリミティブの有無により、次段のステージを決める；
 - a) 有：次段の交点計算ステージに進む。
 - b) 無：最前段のバッファにフィードバックする。ただし、物体空間の終わりに達した場合、i) 1次光線ないし分岐光線なら処理終了、ii) 影光線ならシェーディング・ステージに進む。

5. 交点計算ステージ

5.1 処理の概要

交点計算ステージでは、前段の物体探索ステージから送られた光線およびボクセルに関して交点計算を行う。その処理の流れは以下のようになり、これらはパイプライン化される。

- ①ボクセル内のすべてのプリミティブについて、5.2節で述べる演算器を用いて交点計算を行う。
- ②光線の種類、交点の有無により、処理は次のようになる；
 - a) 1次光線ないし分岐光線：交点がある場合③へ進む。それ以外は、最前段のバッファにフィードバックする。ただし、最終ボクセルの場合、処理終了。
 - b) 影光線：交点がある場合、処理終了。それ以外は、最前段のバッファにフィードバックする。ただし、最終ボクセルの場合、シェーディング・ステージに進む。
- ③交点をソートする。

5.2 交点計算の高速化

5.1節の処理①を高速化するための演算器について考察する。ここで、サーフェスを2次曲面で記述するものとする。2次曲面および光線は次式でそれぞれ表現される。

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Iz + J = 0$$

$$x = U_x \cdot t + V_x \quad y = U_y \cdot t + V_y \quad z = U_z \cdot t + V_z$$

上式から次式が得られる。

$$\alpha t^2 + \beta t + \gamma = 0$$

$$\alpha = A \cdot U_x^2 + B \cdot U_y^2 + C \cdot U_z^2 + \dots$$

$$\beta = 2A \cdot U_x \cdot V_x + 2B \cdot U_y \cdot V_y + 2C \cdot U_z \cdot V_z + \dots$$

$$\gamma = A \cdot V_x^2 + B \cdot V_y^2 + C \cdot V_z^2 + \dots$$

このtに関する2次方程式を高速に解くには、その係数 α, β, γ を高速に求めなければならない。このための演算器構成方式としてTARAI演算器^[3]が提案されているが、本マシンではパイプライン処理との親和性から図2に示す積和演算器を採用する。本演算器は、係数 α, β, γ の、i) 最大3個のデータの乗算、ii) それら乗算結果の総和、といった特徴を利用して、2個の浮動小数点乗算器と1個の浮動小数点加算器を連結した3段の演算パイプライン構成を採る。

演算の流れは以下のとおりである。

- ①第1段目の乗算器の両入力ポートは、光線の方向ベクトル \vec{U} および始点ベクトル \vec{V} を保持するラッチにバス接続されている。ここから、2個のソースオペランドを受け取り乗算を行う。
- ②第2段目の乗算器の一方の入力ポートは、前段の乗算器の出力ポートに接続されている。他方の入力ポートは、プリミティブデータ(2次曲面の係数を保持)を格納しているRAMに接続されている。RAMから必要なデータを読み出して、前段の乗算結果に掛け合わせる。
- ③第3段目の加算器の一方の入力ポートは、前段の乗算器の

出力ポートに接続されており、必要な回数分(α は6回、 β は12回、 γ は10回)だけ前段からの乗算結果を累算する。総和結果を2次方程式の根を求める演算器に渡す。

6. シェーディング・ステージ

シェーディング・ステージでは、揮度計算、および、影光線と分岐光線の生成を行う。その処理の流れは以下のようになり、これらはパイプライン化される。

- ①輝度計算：光線に対応する画素座標を用いて、フレームバッファに揮度を加算する。これは光線の種類により、次のように処理される。
 - a) 1次光線：環境光成分を加算。
 - b) 分岐光線：環境光成分に寄与値を掛けて加算。
 - c) 影光線：影光線の揮度を加算。
- ②影光線の生成：影光線を生成し、前世代の寄与値に拡散反射係数を掛け合わせて、最前段のバッファにフィードバックさせる。
- ③分岐光線の生成：反射光線および透過光線を生成し、前世代の寄与値に鏡面反射係数および透過係数をそれぞれ掛け合わせて、最前段のバッファにフィードバックさせる。このとき、新しい寄与値がしきい値以下なら、その分岐光線はフィードバックさせない。

7. おわりに

本稿では、レイトレーシング専用の並列レンダリング・マシンのアーキテクチャを提案した。本マシンはマルチプロセッサであると同時に、各プロセッサをレイトレーシング法に特化したマクロパイプライン・プロセッサとした点に特長がある。今後は、各ステージ内部の演算パイプライン処理の詳細、そのハードウェア構成、および、マルチプロセッサの全体構成について検討を進めていく。

参考文献

- [1] A.Fujimoto et al.: "ARTS: Accelerated Ray-Tracing System", IEEE CG&A, 6 (4), pp.16-26, April 1986.
- [2] J.M.Snyder et al.: "Ray Tracing Complex Models Containing Surface Tessellations", Proc. SIGGRAPH'87, pp.119-128, July 1987.
- [3] 吉田ほか "グラフィックス計算機SIGHTの基本構成", 情処研報, 85-CA-60-4 (1985年12月)。

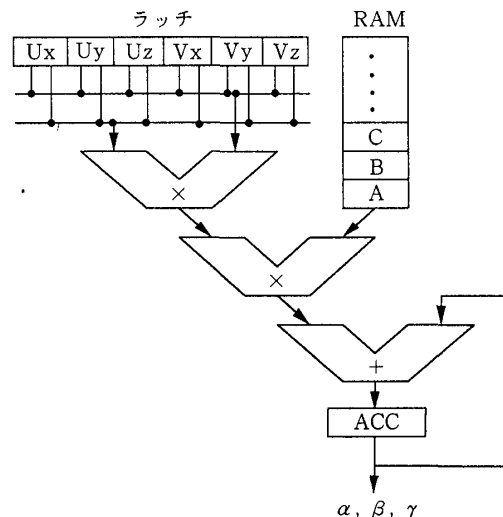


図2. 積和演算器の構成