

空間分割による並列視線探索法の画像生成装置 MAGG への実装

竹安俊幸[†] 河合利幸[†] 精木順一[‡] 大西啓修[‡]

[†]大阪電気通信大学

[‡]三菱プレジジョン株式会社

[†]大阪府 寝屋川市 初町 18-8

[‡]神奈川県 鎌倉市 上町屋 345

あらまし

視線探索法は写実的な画像が生成できるが、高い計算コストを必要とする。これまでにさまざまな並列処理による高速化手法が提案されている。今回、我々は空間分割による並列化を行い、並列画像生成装置 MAGG 上に実装した。物体空間は、視線の進路決定や部分空間の管理を容易にするために均等分割する。分割数を十分多くし、1つのプロセッサには複数の部分空間を割り当てる。隣接する部分空間をプロセッサの配置に従って割り当てることで、通信量を減らしている。また、負荷の高い部分空間は複数のプロセッサに適応的に割り当て、各プロセッサの負荷を均一化している。

和文キーワード 視線探索法 並列処理 空間分割法 適応的負荷分散 トランスピュータ

An implementation of parallel ray tracer for image generation system MAGG using space subdivision algorithm

Toshiyuki TAKEYASU[†] Toshiyuki KAWAI[†] Jun-ichi ABEKI[‡] Hironobu OHNISHI[‡]

[†]Osaka Electro-Communication University

[‡]Mitsubishi Precision Co.,Ltd

[†]18-8, Hatucho, Neyagawa, Osaka, 572, Japan

[‡]345, Kamimachiya, Kamakura, Kanagawa, 247, Japan

Abstract

We have developed a parallel ray tracer for the image generation system which has 86 transputers. It is based on a space subdivision algorithm.

In this algorithm, each processor requires only a part of scene database. However, it is difficult to balance the load of them.

This time, we have devised an adaptive load balancing method without subspace deformation. An object space can be subdivided into a number of subspaces regularly to simplify the management, which are statically assigned to the processors at the beginning. If a processor has a subspace with heavy load, others will assist the processing of ray packets in the subspace.

英文 key words Ray tracing, Parallel processing, Space subdivision algorithm, Adaptive load balancing, Transputer

1 はじめに

視線探索法は現在、最も高品質なコンピュータ画像を生成できる手法の一つである。その反面、画像生成時間が長時間におよぶ。これを解決するために、様々な高速化手法が提案されている。その中の1つに並列計算機を用いた視線探索法の並列化がある。

並列化の手法としては、生成される画面を小画面に分割し、それぞれを並列に計算する画面分割法 [1][2][3] と、物体の存在する3次元空間を分割し、その部分空間を各プロセッサに割り当てて並列計算を行う空間分割法 [5] がある。

画面分割法では、各プロセッサは全ての物体データを持たなければならない、生成可能なシーンは各プロセッサの記憶容量によって左右される。この問題を解決するためには物体データの逐次転送方式がある。データ逐次転送方式では、ホストプロセッサ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画像生成速度の低下を招く。これはこの方式の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の効率が伸びないことがわかっている [1]。

これに対し、空間分割法は、物体の存在する3次元空間を分割し、その部分空間を各プロセッサに割り当て、プロセッサ間で視線情報のバケットをやりとりすることで画像を生成する。この手法では各プロセッサは担当する空間に存在する物体データだけを保持し、そのプロセッサに送られてきた視線情報のバケットについて交差判定及び輝度計算を行う。従って、メモリの使用効率が改善されるだけでなく、特定のプロセッサへの通信要求の集中が回避できる。

しかし、透過物体や反射物体が存在するような新たな視線バケットの発生しやすい部分空間や、空間内の物体数が極端に多い部分空間においては計算負荷の上昇が著しい。このようなシーンの画像生成では、特定部分空間の計算速度が全体の計算速度に影響を与える。解決法としては空間中に存在する物体量が均一になるように部分空間の形状を変形させ、計算負荷の平均化を図る手法 [5] がある。この手法では負荷の事前計算が必要で、その計算は容易ではない。

本稿では空間分割法による視線探索法の並列画像生成装置 MAGG における並列化手法と実行時の計算負荷の平均化手法について報告する。

2 画像生成装置 MAGG

2.1 ハードウェア構成

MAGG は高速に画像を生成するために開発された並列処理装置で、制御プロセッサ、5枚の描画プロセッサカード (GPU カード)、描画バス (Gバス) と呼ばれる2本の高速バス、2枚のフレームバッファ、ビデオ出力カード、ビデオ入力カー

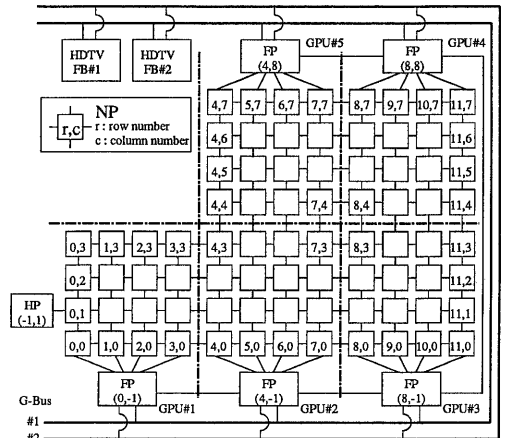


図 1: MAGG のハードウェア構成

ドから構成されている。

MAGG は合計 86 台のプロセッサで構成されており、プロセッサには INMOS 社のトランスピュータ T800 が使用されている。T800 は内部に浮動小数点演算機構や 4 チャンネルのシリアルリンク、マルチタスキング処理を高速に実行する機能を持ち並列処理に適している。

各プロセッサは図 1 のように接続されている。

HP 以外のプロセッサが MAGG 本体に存在し、FP が 1 台と NP が 16 台ずつ 1 枚の GPU カードに実装されている。

制御プロセッサ HP (Host Processor) は、パーソナルコンピュータ (PC-9801) の拡張ボードに 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で接続されている。

FP (Fork Processor) は、合計 5 台あり 256KB の局所メモリと G バスを用いて 40MB の共有メモリとフレームバッファにアクセスできる。また、シリアルリンクによって同一 GPU カード内の 4 台の NP と接続され、他のカードの FP ともシリアルリンクアダプタ経由で接続されている。

NP (Node Processor) は、各 GPU カードに 16 台ずつ、合計 80 台実装されている。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、GPU カード間を結合することで NP ネットワークを構成する。

2.2 プロセッサ間通信

並列処理では、プロセッサ間の同期をとったりデータを転送するため、プロセッサ間の通信が必要となる。MAGG 上の各プロセッサでは画像生成プロセスと通信プロセスが並行動

作しており、通信プロセスによってプロセッサ間通信を実現している。プロセッサ間通信はシリアルリンク転送とDMA転送の2種類の方法で行うことができる。

シリアルリンクによるバケット転送は最大1024バイトのデータを1個のバケットとして、各プロセッサの通信プロセスによって中継され、転送先のプロセッサに送られる。

各プロセッサの通信プロセスはFIFOバッファを持ち、自分宛のバケットを格納する。バッファには約3000個のバケットを格納することができ、バッファが一杯の場合、バケットはシリアルリンク上を回遊し、バッファが空くまで待たされる。

HPとFPは、NPへのバケットのブロードキャスト機能を持つが、本手法では1対1の通信機能のみを使用している。

DMA転送は、FPのアドレス空間にある40MBの共有メモリおよびフレームバッファとNPの局所メモリ間でのみ利用可能な機能で、高速データ転送を実現している。

DMA転送を使用するためには、転送元・転送先のプロセッサではそれぞれのメモリアドレスが必要で、転送を開始する時点で同期をとる必要がある。また表1に示すハードウェアによる制約がある。

表 1: DMA 転送の制約条件

プロセッサ	制約条件
FP	共有メモリ上のデータの先頭アドレスおよび転送データの長さは8の倍数
NP	局所メモリ上のデータの先頭アドレスは2Kバイト境界にあること

本手法においては、DMA転送はFPからNPへの転送時のみ必要で、NP側のアドレス情報を持ったDMA転送要求バケットがシリアルリンク転送でFPに到着した時点でDMA転送を開始するようにしている。

3 空間の分割方法

空間分割法とは、物体の存在する3次元空間を部分空間に分割し、視線情報を各部分空間に進行させながら、それぞれの部分空間で視線探索法を実行する手法である。

各部分空間は担当する空間に存在する物体データだけを保持し、その空間に送られてきた視線情報のバケットについて交差判定及び輝度計算を行う。この部分空間をそれぞれプロセッサに割り当て、視線情報のやりとりをプロセッサ間通信で行うことで並列処理が可能となる。

3.1 空間の分割とプロセッサへの割り当て

空間の分割は、個々の部分空間の管理と視線バケットの処理を簡単に行えるように3次元メッシュ状に分ける。図2の

ように分割平面は視点座標系の各軸に垂直に作成する。

このとき分割数が使用するプロセッサ台数より十分多くなるように空間を細かく分割し[6]、1台のプロセッサに複数の部分空間を割り当てる。

均等分割による利点は

- 部分空間の管理を画一的に行える。
- 視線バケットの進路計算が3DDDAを用いて高速に行える。

である。

さらにMAGGのプロセッサの配置を考慮して空間の分割は以下の条件を満たすように行う。

- X,Y軸方向の分割数は4の倍数
- Z軸方向の分割数は5の倍数

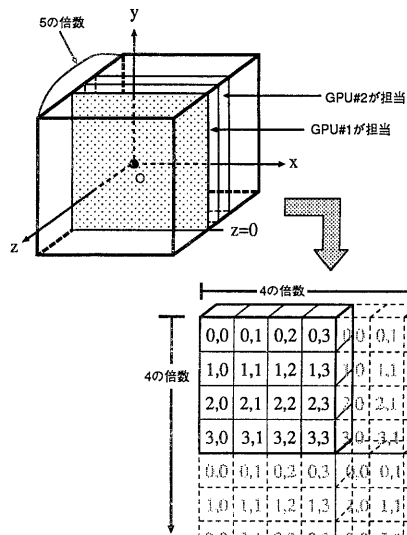


図 2: 空間の分割と NP への割り当て

すなわち、Z軸方向に分割された空間をGPUカード毎に割り当て、X,Y軸方向に分割された部分空間をNPの配置に沿って割り当てていく。NPの配置が部分空間の配置となるため、視線バケットのX,Y軸方向への進行は最高3台のNPを経由するバケット転送ですむ。また、Z軸方向の視線バケットの送信もGPU#1とGPU#5間以外は4台のNPを経由するバケット転送ですむ。

3.2 部分空間データ

部分空間データは空間分割による視線探索法を行う際に必要となるデータの集合である。これらのデータは全体のシーンを構成するデータから、その部分空間に必要な情報のみを抽出して構築される。

本研究では、シーンデータはクラスタツリーと呼ぶ木構造を用いて格納されている。このうち葉の部分にあたる部分に物体データを配置し、節や根の部分にクラスタと呼ぶデータが配置されている。クラスタデータは下位クラスタを閉包する外接直方体の座標値を持つ。部分空間データの作成は、このクラスタツリーの上位クラスタから部分空間との座標値の比較を行い、内部に存在するクラスタ、物体データを抽出、再構成することで行う。

3.3 部分空間の管理

部分空間に関する全ての情報は部分空間情報管理テーブルから取り出せる構造になっている。部分空間情報管理テーブルのエントリは各部分空間毎に用意され、部分空間番号によって選択できる。

部分空間のデータ構造を図3に示す。

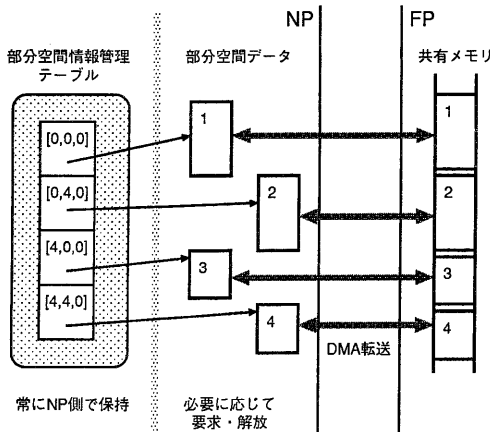


図3: 部分空間のデータ構造

NPは部分空間管理情報テーブルのエントリを常に保持している。部分空間データは、必要になった時点で、同一GPUカード内のFPに部分空間番号の情報を持った要求バケットを送り、FPの共有メモリ上からDMA転送で逐次転送する。この時NPの局所メモリの空き領域が不足していれば既に存在する部分空間データを解放する。この方式により、各NP

に割当てられる部分空間データの合計が局所メモリの容量を超えている場合でも画像生成を行うことが可能になる。

4 並列化手法

MAGG上の各プロセッサはそれぞれ表2のように動作する。

表2: 各プロセッサの動作

HP	シーンデータの読み込み
FP	前処理, 同一GPUカード内のNPの制御
NP	各担当部分空間に到着する視線バケットの処理

HPは、シーンデータを読み込み、FPに転送する。転送後は、基本的に画像生成中はデータのやりとりを行わずFPからの終了報告を待ち続ける。

FPは、前処理としてHPからシーンデータを受信し解析を行い、物体の座標変換やクラスタツリーの生成、交差判定時に必要な数値の事前計算を行う。この時に部分空間の作成および各部分空間内のクラスタツリーの再構築を行う。前処理は1台のFPが行い、他のFPは構築されたデータのアドレス情報もらい、NPの要求に答える。

前処理終了後、前処理を行ったFPは全NPが部分空間情報テーブルを受信したのを確認すると、視点を含む部分空間を持つNPに1次視線発行要求バケットを発行する

前処理終了後全FPは、同じGPUカード内のNPからの要求バケットの処理を行う。要求バケットには

- 部分空間データの転送要求
- フレームバッファへの輝度値書き込み要求
- 負荷分散要求

等がある。

NPでは部分空間情報管理テーブルを受信した後、到着するバケットを種類別に処理するバケット処理プロセスと、視線バケットを視線探索法を用いて処理するレンダリング処理プロセスを並行に動作させる。この並行動作にはスレッドの機能を使用する。

バケット処理プロセスはNPのFIFOバッファを調べ、バケットが到着しているなら取り出し、その種類に応じた処理を行う。取り出された視線バケットは進行先の部分空間の視線バケットキューに入れられる。

レンダリング処理プロセスはNPが担当する部分空間の視線バケットキューを走査し、キューにある視線バケットの情報を取り出し、部分空間内の視線探索を行う。反射屈折が発生する場合には新たな視線バケットの生成を行い、視線が部

分空間外に出る場合には次の部分空間を3DDDAによって求めシリアルリンク転送を行う。

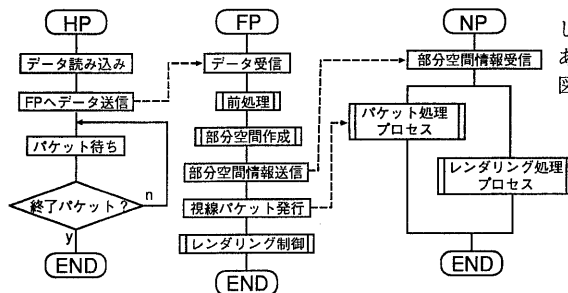


図4: 各プロセッサの動作

トリーをDMA転送によってFPから受け取る。受け入れなかった場合にはFPは新たな分散先を選び負荷分散要求を行う。転送終了後、NPは元の部分空間を担当していたNPに対し負荷分散許可パケットを送る。受け取ったNPはキューにある視線パケットを一定の割合で負荷の移動先のNPに送る。図5は上述の処理の手順を示す。

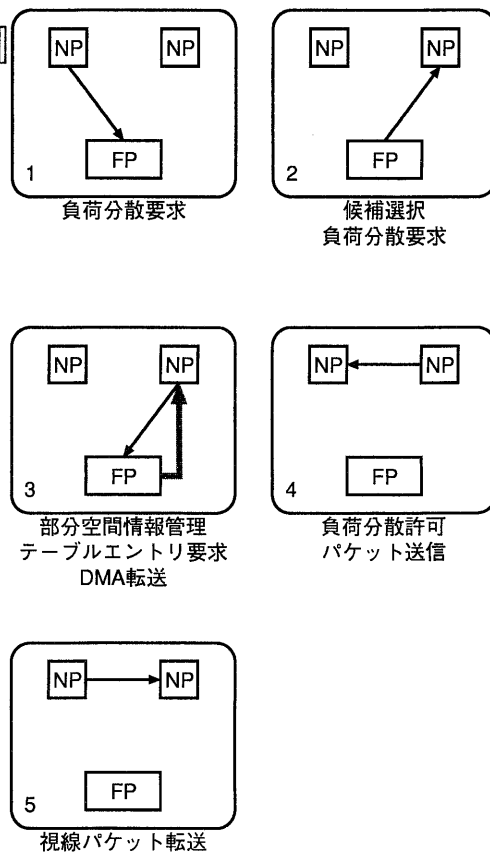


図5: 負荷分散開始時の処理

5 負荷分散手法

空間の分割個数をプロセッサの台数より十分多くし、各プロセッサに周期的に割り当てることで物体量の偏る領域の特定プロセッサへの集中を防いでいる。しかし、均等分割によって部分空間を作成している限り、各部分空間における物体量を完全に均一化することは不可能である。よって各部分空間の間に計算負荷の差が発生するのは避けられない。

そこで、負荷の高い部分空間は画像生成中に複数のプロセッサに適応的に割り当てる負荷分散手法を考案した。各NPは負荷を自ら監視し、負荷の高い時にはFPに負荷分散先NPの要求を行う。FPは負荷の小さいNPに適応的に負荷の高い部分空間を追加割り当てる。当該部分空間への視線パケットの一部はそれらのNPに再転送される。

部分空間の負荷の大きさは、その部分空間の物体データの量と、キューに溜る視線パケットの量によって以下の式によって間接的に決定する。

部分空間負荷 = 視線パケット数 × 部分空間における物体量

負荷分散先NPの決定はFPが行う。FPは画像生成開始前に各NPの持つ物体データ量を調べ、負荷の移動先として利用可能なNPをリストアップしておく。また、そのシーンのしきい値の設定を行い、各NPに報告しておく。

画像生成開始後NPは各部分空間のキューの状態を監視し、負荷を計算する。設定したしきい値を超えた部分空間が発生した場合にはそのNPは負荷分散の要求をFPに対し行う。

FPは負荷分散の利用先としてリストアップしておいたNPの中から1台を選び出し負荷分散要求を行う。

要求を受けたNPは自らの負荷を計算し、負荷分散を受け入れるかどうか決定する。受け入れる場合、NPは負荷分散を行う部分空間に対応する部分空間情報管理テーブルのエ

視線パケットは負荷分散元のNPから負荷分散先のNPに転送されるため他のプロセッサは視線パケットの送信先を変更する必要がない。図6は適応的負荷分散の様子を示す。例えば、部分空間Cへの視線パケットは最初全てNP#1へ送られ、そのうち半数がNP#2に送られる。

ただし、負荷分散先のNPが自分の負荷が高くなったのを検知すれば負荷分散元のNPに対し視線パケットの転送の中止を指示する。分散先のNPは当該部分空間への視線パケ

トが無くなるとその空間情報管理テーブルのエントリを解放する。

この適応的な負荷分散手法により、プロセッサ間の計算負荷を平均化することができる。

今後は並列処理効率と負荷分散の効果の測定と評価を行う必要がある。

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] 大西, 河合, 情木, 大西, “画像生成装置 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.
- [3] 大西, 河合, 情木, 大西, “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 回全国大会講演論文集, Vol.2, 5U-1, pp.499-500, Oct. 1991.
- [4] 大西, 情木, 戸村, 吉良, “ハイビジョン CG 用高速画像生成装置の並列化手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, IE89-61, 1989.
- [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] 窪田, 西村, 小林, 中村, 重井, “光線追跡法のための空間分割型並列処理の負荷分散法”, 電子情報通信学会全国大会論文集, Vol.6, pp.318, 1987.
- [7] 竹安, 大西, 河合, 情木, 大西, “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 回全国大会講演論文集, Vol.2, 5U-2, pp.501-502, Oct. 1991.

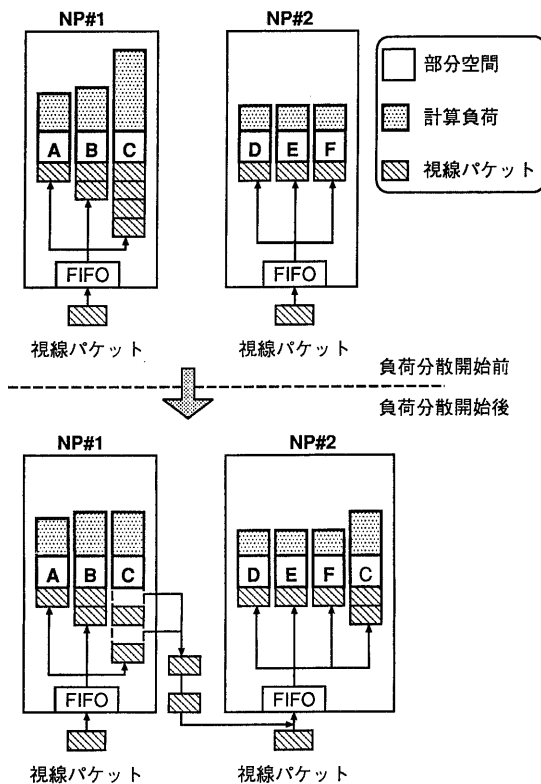


図 6: 適応的負荷分散

6 まとめ

並列画像生成装置 MAGG 上で物体空間を均等分割して空間分割法を行う並列化手法を提案した。

各部分空間データは FP の共有メモリから DMA 転送を行うことで NP のメモリ容量の制限を緩和することができた。

空間分割法において各プロセッサの負荷の均一化は重要で、そのための負荷分散手法として、部分空間の形状変化の無い適応的負荷分散手法を考案した。アルゴリズム自体は簡単であるが、負荷分散の開始を決定するしきい値の算出にはさらに検討が必要である。