

## 高速画像生成装置—MAGIC— の動作と性能

玉邑嘉章 秋本高明 三ツ矢英司

NTT 電気通信研究所

3次元CGのための各種の処理に適用できる強力な処理環境の実現を目的として、高速画像生成装置—MAGIC (Multiprocessor-based All-round Graphic Image Computer)—の試作を進めている。本稿では、MAGICの動作と、画像生成時の性能について報告する。

MAGICは、ベクトルや行列計算を並列に実行するベクトル演算ユニット (VP) と、スカラー処理を行うスカラー演算ユニット (SP) をもつ強力なプロセッシングエレメント (PE) により構成される。PEはアーキテクチャに依存するマイクロプログラム命令により動作するが、柔軟なプログラミング環境を実現するため、マイクロプログラムを機能別に分類して、汎用的な命令セットによるプログラムを可能としている。

代表的な画像生成アルゴリズムである、スキャンライン法と光線追跡法をインプリメントし、その処理時間により、MAGICの性能を評価した。その結果、1台のPEあたり、少なくとも、汎用計算機VAX11/780(FPA付)の10倍以上の性能が得られることを確認した。

### Multiprocessor-based All-round Graphic Image Computer - MAGIC - ( System functions and Performance )

Yoshiaki TAMAMURA, Taka-aki AKIMOTO and Eiji MITSUYA

NTT Electrical Communications Laboratories  
1-2356, Take, Yokosuka, Kanagawa, 238, Japan

The authors, aiming at the realization of a processing system which can execute various image generating algorithms in a short time, have designed an image generating system called MAGIC (Multiprocessor-based All-round Graphic Image Computer).

This paper presents system operations and the performance to generate images from 3-dimensional graphic data.

Magic consists of high performance processing elements (PEs), which have a vector processing unit (VP) and a scalar processing unit (SP), execute architecture-dependent microprogram instructions. To obtain high speed execution with easy programming, functional instruction sets are provided by classified PE instructions.

To observe system performance, a scan-line algorithm and ray tracing algorithm are implemented on MAGIC. The experimental results have proven that one PE has a processing capability more than ten times faster than the VAX11/780 with an FPA.

## 1. まえがき

高度情報化社会に向けて、コミュニケーション手段の高機能化や多様化が進んでいる。その一方で、情報化社会といわれる今日においてもなお、お互いのイメージを正確に伝達することには多くの困難を伴うことが多い。それは、各人が心に描いたイメージを表現する言語の限界でもあり、価値観や立場の違いに基づく認識の相違のためでもある。このような個人の価値観の違いを越えて、意志の疎通を図るためには、情報の認識を支援することができるコミュニケーション手段が重要になってくる。

視覚メディアは、言語では表現しにくい状況を具体的かつ直感的に表すことができるため、優れたコミュニケーション手段を提供することができる。なかでも、コンピュータ・グラフィックス（CG）は、抽象的なイメージを視覚的な画像として具体的に表現する技術であり、効果的なコミュニケーション手段を実現するものとして、注目される。

しかしながら、一部で実用になりつつあるとはいうものの、CGをより身近な技術として利用するためには、簡便に意図やイメージをリアルな画像として表現することができるようにする必要があり、このためには、多くの技術的な課題を解決する必要がある。特にCGにおける大きな問題は、画像生成の処理が膨大で、時間がかかりすぎることであり、会話形式による簡便なイメージ表現や、動きの表現などを困難にしている。

筆者らは、リアルな画像生成に関する研究を進めると共に、柔軟かつ強力なCGの処理環境を実現することを目的とした高速画像生成装置の試作を進めてきた<sup>(1-4)</sup>。本装置は、CGおよび画像処理に柔軟に適用できることから、MAGIC（Multiprocessor-based All-round Graphic Image Computer）と呼んでいる。

MAGICは、すでに画像生成装置として開発された、LINKS<sup>(5-6)</sup>やSIGHT<sup>(7-8)</sup>、などと同様に、プロセッシングエレメント（PE）から構成されるマルチプロセッサ・システムである。特に、画像生成時に煩雑に現れるベクトルや行列を高速に処理する並列演算アーキテクチャを採用してPEあたりの処理能力を向上させると共に、高速データ転送機構により装置全体のスループットの向上を図っている。PEの並列演算機構は、SIGHT<sup>(7)</sup>と同様な機能をもつが、本装置ではすべての演算器をMIMDで制御するようにしており、より柔軟な動作を行うことができる。

これまでに、1台のPEから成る基本装置を完成し、

その動作を確認すると共に、トップクラスの性能が得られる見通しを得ている<sup>(4)</sup>。本稿では、MAGICの動作と、画像生成実験による性能評価について報告する。

## 2. MAGICの特徴

3次元CGの基本技術である、3次元物体の形状データをもとに陰影画像を作成する画像生成処理は、処理量が膨大であり、処理時間がかかりすぎるばかりか、その表現能力にも限界があり、取り扱える物体の形状や光学的性質が制限されるという問題がある。現在、この種の問題について、精力的に研究が進められており、さまざまな複雑な物体を表現する多くの手法が提案されている状況にある。

MAGICは、主として、柔軟かつ強力なCG処理環境のための装置として開発した装置であり、種々のCG処理アルゴリズムの開発に適用できる柔軟性と、画像生成における膨大な処理を短時間で実行する高速性をあわせもった、汎用画像生成装置である。このような機能を満足させるために、MAGICでは次のような考え方に基づく構成をとっている。

- (1) プログラマブルかつ強力な処理能力をもつプロセッシングエレメント（PE）を単位としたマルチプロセッサ構成による並列処理。
- (2) PEでの画像生成処理におけるベクトル/行列の局所並列演算アーキテクチャの採用。
- (3) ベクトルプロセッサ（VP）とスカラープロセッサ（SP）の独立または並列動作による柔軟性と高速性の両立。
- (4) データアクセスおよびデータ転送の高速化による装置全体のスループットの向上。

## 3. ハードウェア構成

上記のように、MAGICは画像生成処理を実行するプロセッシングエレメント（PE）を単位として構成されるマルチプロセッサ・システムである。図1に装置全体の構成を示す。図に示す各ブロックは、それぞれモジュール化されたハードウェアに対応し、これらは共通のインタフェースにより接続される。主なモジュールの概要を以下に示す。

### (1) プロセッシングエレメント（PE）

PEは、ロードされるプログラムに従って、実際の画像生成演算を実行する処理ユニットである。PEの構成を図2に示す。

a) 演算部

PEの演算部は、3組の32ビット浮動小数点演算器(FPP)の並列接続により構成されるベクトル演算ユニット(ベクトルプロセッサ(VP)と呼ぶ)と、FPPと算術論理演算器(ALU)の並列接続により構成されるスカラー演算ユニット(スカラープロセッサ(SP)と呼ぶ)により成る。VPは3次元ベクトルや行列の3要素の並列演算、パイプラインによる積和演算などを実行する機能をもつ。SPは浮動小数点スカラー演算、参照テーブル(LUT)による関数演算のほか、整数演算、転送・判断処理等を行う。また、VPとSPとを同時に実行させることにより、4次元ベクトル/行列の並列演算やパイプライン演算を行うことができる。

b) データメモリ

形状データ等を格納する大容量のデータベースメモリ(DBM)と、処理用高速バッファとして使用する高速キャッシュメモリ(CM)をもち、これらはそれぞれ4ワード幅の内部データベースを介して演算部と結合されている。また、データアクセスの高速化を図るため、専用のアドレス生成器(AG)をもち、1次元のみでなく、画像などの2次元データのメモリアドレスを直接算出

ることができる。DBMは主制御部のメモリ空間にも割り付けられており、同時アクセスを可能にしている。

(2) バス構成

各モジュールは、32ビットアドレス空間をもつ共通システムバスにより接続され、モジュール単位での増減が可能である。また、大量の画像データを転送する際のバスネックを防ぐため、各PEとディスプレイメモリ(DM)を接続する高速バス(ハイパーバスと呼ぶ)と、複数のDM内の画像をディスプレイに表示するためのビデオバスを設けている。特に、ハイパーバスは、40Mバイト/sec以上データ転送能力をもっているため、簡単な動画程度の表示が可能である。

(3) 表示部

高精細の1024×1024画素の画像をノンインタレース表示する機能を持つ。ディスプレイメモリ(DM)内には、2画面を格納でき、ズーム、パン機能により、任意の領域を拡大/移動して、表示することができる。

(4) 主制御部(CP)

主制御部は、汎用マイクロプロセッサで構成され、各PEへのプログラムおよびデータのロード、各リソースの状態管理と制御を行う。

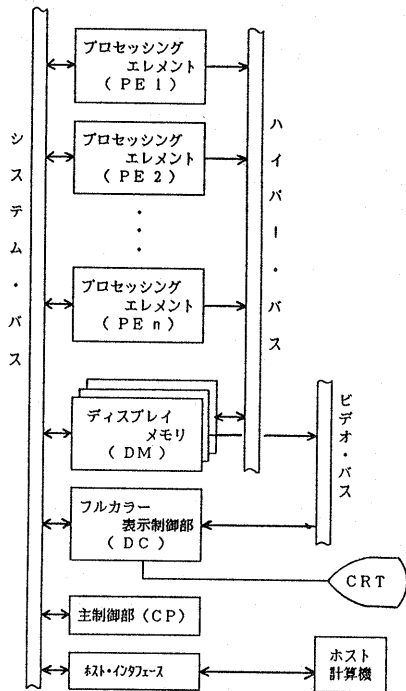


図1 MAGICの構成

4. MAGICの制御と動作

4.1 装置制御

MAGICは、主制御部(CP)から各PEに対して、マイクロプログラムと処理用データをロードし、これを実行させることによって動作する。CPのメモリ空間に

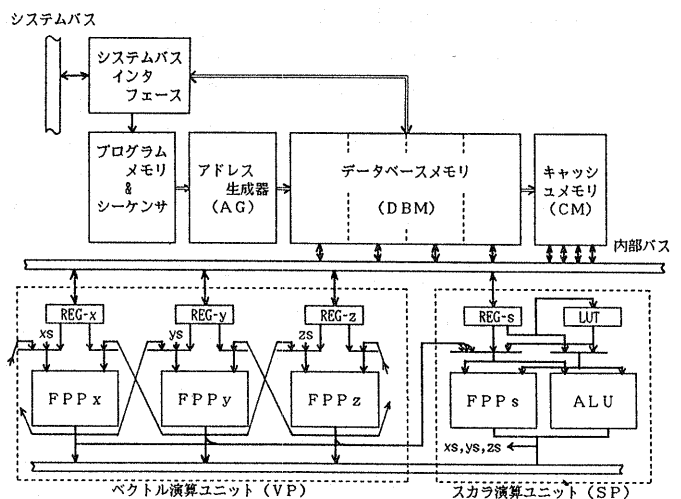


図2 PEの構成

は、図3に示すように、すべてのPEのデータベースメモリ（DBM）と、ディスプレイメモリ（DM）がマッピングされているため、これらを直接操作することが可能である。具体的には、32ビットのアドレスを8ビットのセグメントで分割し、セグメント1～254を各PEに、セグメント255をすべてのPEに対応づけている。即ち、セグメント1～254を選択すれば、対応する各々のPEに対して、ブロードキャスト用の255番目のセグメントを用いれば、すべてのPEに対して、それぞれアクセスできる。ブロードキャストモードは、同一のプログラムとデータに基づき、各PEで部分画面を作成する場合に有効な機能である。

PEは、ベクトルプロセッサ（VP）や、スカラープロセッサ（SP）の各演算器、アドレス生成器、および数多くのデータベースをもつ。これらの制御は、256ビット長のフィールドを持つ水平型マイクロプログラムによって、それぞれ独立に行うことができる。すなわち、PEは、MIMDモードで動作するため、各部を細かく制御すれば、各演算器でそれぞれ異なった演算を行わせるなどの柔軟な処理が可能である。

#### 4.2 PEの動作と演算レベル

PEは、並列演算アーキテクチャをもつ処理ユニットであり、内部の各演算器をフルに活用するような最適な動作を行えば、極めて高い処理能力を引き出すことができる。しかし、マイクロプログラムを直接記述することは、その開発も困難であるのみならず、強くアーキテクチャに依存したものとなる。

柔軟で使いやすい処理環境を実現するためには、アーキテクチャに独立な高級言語によるプログラミングを可能にする必要がある。このため、MAGICでは、以下に示す3つのレベルに対応する命令セットを定め、これをユーザプログラムにより参照できるようにしている。

##### (1) レベル1

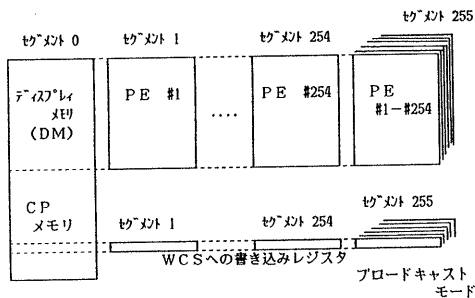


図3 主制御部（CP）へのマッピング

SPまたはVPのどちらか一方が動作し、他がアイドル状態であるようなモードである。明かにSPのみの動作は、汎用計算機と同様に、極めて柔軟な処理環境をユーザに提供できるが、効率は上がらない。また、VPのみによる動作は、3次元ベクトルなどの3要素の並列演算を行う基本命令となる。

##### (2) レベル2

SPとVPが同期し、一体となって動作するモードで、ベクトルや行列の演算が主体となる。このようなモードでは、極めて効率の良い動作が可能であるが、アーキテクチャに依存する処理であるため、主としてマクロ命令セットとして解放する。

##### (3) レベル3

SPとVPが同期して動作するが、それぞれ独立な演算を行うモードである。このような動作を最適に行うことができれば、最も高い効率を得ることができる。しかし、かなり大きな処理単位で最適化をする必要があり、その制御は極めて複雑となる。このため、特に高速の処理を必要とするような汎用処理モジュールをライブラリとして提供する場合に、使用するものとする。

#### 4.3 プログラム環境

上記の制御レベルに対応して、以下のような基本的な命令セットを定め、図4に示すようなプログラム環境を

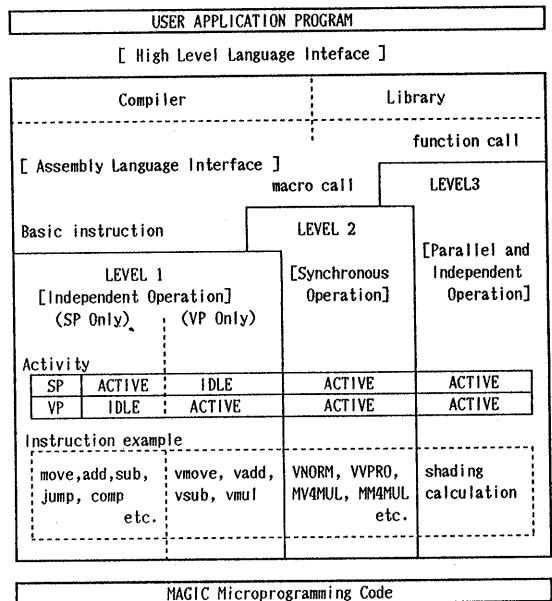


図4 MAGICのプログラミング環境

提供している。これらの命令は、コンパイラまたはライブラリにより利用される。

(1) 基本命令

レベル1で標準的な処理を行うマイクロプログラムを、一般のアセンブラ命令形式で表現したもので、SPによる一般の転送・算術論理演算、VPによるベクトル演算などがある。表1に主な命令とその実行時間を示す。ただし、DBMとCMでメモリアクセス時間が異なるため、データの入出力先に応じて命令実行時間が異なる。例えば、演算結果をCM内に格納する場合には、演算と同時にアドレス計算を行うためレジスタ間演算と同じ時間で実行できるが、DBM内のデータを参照して演算する場合には、アドレス計算とDBMアクセス時間が加算されるため3倍程度の時間がかかる。

(2) マクロ命令

複数のマイクロプログラムステップで記述されるマクロ命令で、レベル1で動作する関数演算・3次元ベクトル/行列演算、レベル2で動作する4次元ベクトル/行列演算などがある。表2に主なマクロ命令とその実行時間を示す。

(3) 基本ライブラリモジュール

主としてレベル3の動作による最適化を図った処理をライブラリモジュールとして実現すれば、これをブラックボックスとして関数呼び出しにより利用することができる。

5. 画像生成処理の実行と性能

MAGICへの基本的な画像生成プログラムのインプリメントと、これを用いた画像生成処理の性能を処理時間により評価した結果について述べる。

5.1 画像生成アルゴリズムのインプリメント<sup>(3)</sup>

代表的な画像生成アルゴリズムである、スキャンライン法と光線追跡法を選び、主として基本命令とマクロを用いて、基本的なプログラムをインプリメントした。ただし、今後の改良や拡張などにも容易に対応できるようにするため、全体の処理をそれぞれ独立した処理モジュールに分割し、これを階層的に組み合わせた構成をとっている。処理モジュールを独立に動作させるためには、各モジュール内で使用するリソースの状態を他に影響させないようにする必要がある。従って、レジスタ内容の待避や復帰などのオーバーヘッドを伴うことになるため、CM内にスタック領域を設けて、これをできるだけ小さくしている。

(1) スキャンライン処理

スキャンライン法は、多面体で構成される物体の表示アルゴリズムの一つであり、特別なハードウェアを用いなくても、汎用計算機で高速に画像生成を行うことができるという利点がある。インプリメントした処理の流れと処理概要を図5に示す。これは約20個の処理モジュールで構成されている。この方法による画像生成は、スキャンライン毎にアクティブエッジテーブル(AET)を更新する処理と、各エッジ区間内を輝度値で塗りつぶす処理(スキャン変換処理)から成る。

(2) 光線追跡法

Whitted<sup>(9)</sup>により提案された光線追跡法は、光学的な反射・屈折現象を表現でき、さらに通常2次曲面で表現された物体を直接取り扱えるため、忠実な画像を作成することができる。しかしその反面、すべての画素を通る光線を追跡するために処理が膨大となり、スキャンライ

表1 主な基本命令と実行時間

| 演算種別   |             | 命令形式                                 | 実行時間*   |
|--------|-------------|--------------------------------------|---|
| S<br>P | 転送・整数・論理演算  | MOV, ADD, SUB, AND OR, NOT, XOR etc. | 0.18 μs (R-R)<br>0.18 μs (R-C)                  |
|        | 浮動小数点演算     | FADD, FSUB, FMUL                     | 0.30 μs (C-R)<br>0.45 μs (R-D)<br>0.50 μs (D-R) |
| V<br>P | 転送・ベクトル四則演算 | VMOV, VADD, VSUB, VMUL               |   |

\* (R-R) は入力と出力先を示す。ただし、R: レジスタ、C: キャッシュメモリ(CM)、D: テンポラリメモリ(DBM)

表2 主なマクロ命令と実行時間

| 分類        | 演算命令    | 実行時間    |
|-----------|---------|---------|
| 関数演算      | 浮動小数点割算 | 0.63 μs |
|           | 平方根     | 1.57 μs |
|           | SIN     | 3.28 μs |
|           | COS     | 3.03 μs |
| 3次元ベクトル演算 | ベクトル正規化 | 3.4 μs  |
|           | ベクトル内積  | 0.5 μs  |
|           | ベクトル外積  | 3.3 μs  |
| 行列演算      | ベクトル×行列 | 4.5 μs  |
|           | 行列×行列   | 20.0 μs |

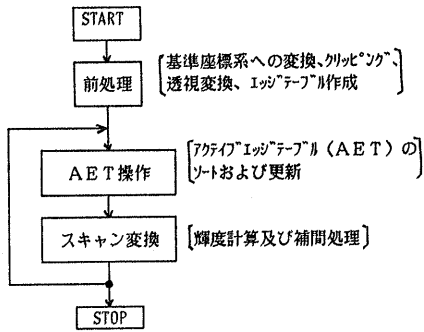


図5 スキャンライン処理の概要

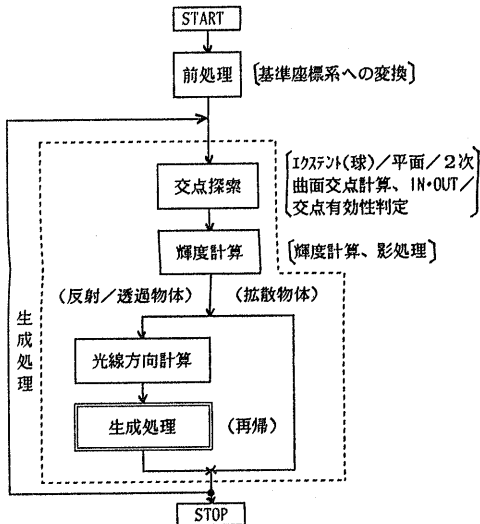


図6 光線追跡法による画像生成処理の概要

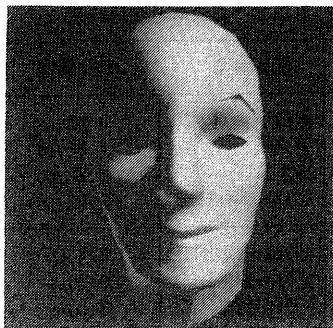
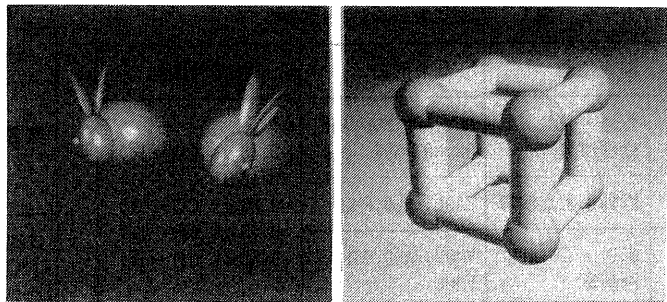


図7 スキャンライン法による生成画像の例  
[顔] (Fa)



(a) [兎] (Ra)

(b) [立方格子] (Qg)

ン法等に比べて、桁違いの処理時間がかかる。このため、種々の高速化処理手法が提案されている<sup>(5,10,11)</sup>が、ここでは、球エクセントを用いた交点計算の高速化を図った処理をインプリメントした。大まかな処理の流れを図6に示す。これは16個の処理モジュールで構成されている。なお、3次元物体データは、2次元曲面をプリミティブとする階層的なCSGモデルで記述する<sup>(12)</sup>。

### 5.2 画像生成時間による性能評価

1台のPEで構成される基本的な装置を完成し、上記の画像生成プログラムを用いて、処理時間によりその性能を評価した。なお、MAGICでの処理時間は、計時用のカウンタをPEのクロックで動作させ、この値を読み取るにより測定している。

#### (1) 画像生成時間

画像作成に使用したデータの種別と、その作成条件を表3に示す。

表3 画像種別と作成条件

| 処理      | 画像 | 名称          | 物体モデル                 | 作成条件                           |
|---------|----|-------------|-----------------------|--------------------------------|
| スキャンライン | Fa | [顔]         | 三角板646枚               | 512×512画素                      |
|         | Lo | [タイルミッドループ] | 三角板368枚               |                                |
|         | Nt | [NTTロゴ]     | 三角板196枚               |                                |
| 光線追跡    | Sh | [反射球]       | 反射球×16                | ・Sh, Qgは点光源1個、Ra, Rcは点光源2個で照明。 |
|         | Ra | [兎]         | 精円体×10、球×6、平面×6       |                                |
|         | Qg | [立方格子]      | 球×8、円柱×8、平面×17        |                                |
|         | Rc | [兎と円盤]      | 半透明・反射[兎]、円柱×1、反射平面×2 |                                |

表4 MAGICによる画像生成時間(スキャンライン法)

| 画像  | 全処理時間(s) | スキャン変換処理 |      | AET操作処理 |      | その他の処理 |      |
|-----|----------|----------|------|---------|------|--------|------|
|     |          | 時間 s     | 割合 % | 時間 s    | 割合 % | 時間 s   | 割合 % |
| F a | 2.80     | 1.72     | 61.9 | 0.57    | 20.8 | 0.36   | 13.0 |
| L o | 2.78     | 1.96     | 70.4 | 0.39    | 14.2 | 0.36   | 12.8 |
| N t | 1.95     | 1.30     | 66.6 | 0.25    | 12.7 | 0.36   | 18.5 |

表5 MAGICによる画像生成時間(光線追跡法)

| 画像    | 全処理時間(s) | 交点探索処理 |      | 輝度計算処理* |      | その他の処理 |      |
|-------|----------|--------|------|---------|------|--------|------|
|       |          | 時間 s   | 割合 % | 時間 s    | 割合 % | 時間 s   | 割合 % |
| S h   | 168.3    | 135.9  | 80.7 | 6.6     | 3.9  | 25.8   | 15.3 |
| R a   | 235.9    | 213.0  | 90.4 | 3.2     | 1.4  | 19.4   | 8.3  |
| Q g   | 233.2    | 190.4  | 81.6 | 18.5    | 7.9  | 24.3   | 10.4 |
| R c   | 336.0    | 292.6  | 87.1 | 14.3    | 4.2  | 29.1   | 8.7  |
| Q g s | 408.6    | 190.3  | 46.6 | 194.0   | 47.5 | 24.3   | 5.9  |
| R c s | 607.2    | 292.7  | 48.2 | 285.5   | 47.0 | 29.0   | 4.8  |

\* 輝度計算には、影処理のため光源方向の交点探索が含まれる。  
 \*\* Q g s、R c sはそれぞれ、Q g、R cに影を付加したものの。

スキャンライン処理により画像生成を行った結果を表4に、生成画像の一例を図7にそれぞれ示す。この手法によれば、3秒以内で画像の生成・表示が行えるため、疑似的な動画の作成・確認にも使用できる。なお、図5の各処理のそれぞれに要した累積時間を測定したところ、表にみられるように、AET更新処理に1/5程度の時間がかかっている。これは、SP動作によるソート処理であるため、効率が悪くなっていることを示している。

光線追跡法による処理結果を表5に、生成画像の例を図8に、それぞれ示す。この手法では、物体と光線との交点探索に最も時間がかかり、表のように本装置でも全処理時間の80%以上を占めている。

## (2) 汎用計算機との比較

MAGICにインプリメントしたプログラムは、あらかじめ汎用計算機(VAX11/780)上でC言語により開発し、これを忠実にMAGICに移植したものである。これを用いて、VAX11/780(FPA付)を使用して、表3の画像の生成処理時間を測定した。ただし、VAXのタイムは分解能が悪いため、微小な時間を精度良く測定することができず、若干の誤差を含んでいると考えられる。

スキャンライン処理および光線追跡処理におけるVAXとMAGICの処理時間による性能比較を表6、表7にそ

表6 MAGICとVAXの性能比較(I)  
-スキャンライン法-

| 画像  | トータル処理 | スキャン変換 | AET操作 | その他  |
|-----|--------|--------|-------|------|
| F a | 18.3   | 23.7   | 8.4   | 11.7 |
| L o | 19.5   | 23.8   | 5.9   | 13.6 |
| N t | 17.8   | 21.1   | 7.2   | 14.7 |

\* MAGICの値を1とした場合の処理時間比率を示す。

表7 MAGICとVAXの性能比較(II)  
-光線追跡法-

| 画像    | トータル処理 | 交点探索 | その他  |
|-------|--------|------|------|
| S h   | 14.8   | 15.5 | 11.7 |
| R a   | 12.0   | 12.2 | 10.0 |
| Q g   | 17.7   | 18.9 | 13.0 |
| R c   | 16.6   | 15.6 | 23.4 |
| Q g s | 16.0   | 18.4 | 13.9 |
| R c s | 12.3   | 11.4 | 13.1 |

\* MAGICの値を1とした場合の処理時間比率を示す。

れぞれ示す。これらの結果から、MAGICは少なくとも、VAXの10倍以上の画像生成処理能力を持っているといえる。特に、輝度計算や交点計算などのベクトル/行列演算を主体とした処理において、MAGICのアーキテクチャが有効に働いている。

## 6. あとがき

本稿では、筆者らが開発を進めてきた高速画像生成装置-MAGIC-の動作と、画像生成処理における性能を中心に報告した。現在のところ1台のPEを最も基本的な画像生成アルゴリズムにより動作させているに過ぎないが、それでもスキャンライン法で数秒、光線追跡法で数分程度で陰影画像(512×512画素)が生成・表示できている。また、VAX11/780と比較して、少なくとも10倍以上のパフォーマンスが得られている。従って、PEの性能についていえば、現在までに発表されているこの種の装置の中でも、トップクラスであるといえる。

画像生成装置を実現する主要な目的は、会話形式で操作するに十分な高速レスポンスを得ることであり、さらには、光線追跡法により実時間でリアルな動画を生成することであろう。これはまだ完全には実現されていないが、ソフトウェアによる高速化と合わせれば、すでに現

実に近いものとなりつつあり、ハードウェアの急速な進歩を考えれば、時間の問題でもある。

一方、CGをより身近な技術とするためには、まだ多くの技術的課題を解決する必要がある。今後、MAGICを各種の画像生成アルゴリズムを高速で実行する汎用的な装置として利用し、これらの課題に取り組む予定である。さらにMAGIC自身についても、プロセッサの追加による処理能力の増大と、ソフトウェア開発環境の整備を行い、より強力な処理環境を実現する予定である。

(謝辞) 日頃よりご指導いただき当所知的画像処理研究グループ末永康仁リーダ、画像処理研究室小杉信室長に感謝します。また、討論いただいた画像処理研究室ならびに知的画像処理研究グループの各位に感謝します。

#### [参考文献]

- (1) 玉邑,三ツ矢,秋本;"高速画像生成処理装置の基本構成"、TV学会画像処理・画像応用研究会、IPA-86、(1986.10)
- (2) 三ツ矢,玉邑,秋本;"高速画像生成装置におけるプロセッサユニットの構成"、情処学会グラフィックスとCAD研究会、no.24-2 (1986.11)
- (3) 秋本,玉邑,三ツ矢;"高速画像生成装置における画像生成ソフトウェア"、情処学会グラフィックスとCAD研究会、no.24-3 (1986.11)
- (4) 秋本,玉邑,三ツ矢;"高速画像生成装置の基本動作と性能"、昭和62年信学全大、no.1639 (1987.3)
- (5) 出口他;"コンピュータグラフィックスシステムLINKS-1における画像生成の高速化手法"、情処論文誌、vol.25、no.6、pp.944-952 (1984)
- (6) 河合,大村;"LINKS-2"、NICOGRAPH '86論文集、pp.1-10 (1986.11)
- (7) 吉田,成瀬,高橋;"グラフィックス計算機SIGHTの基本構成"、情処学会計算機アーキテクチャ研究会、no.85-53 (1985.12)
- (8) 吉田,高橋,成瀬;"CG計算機SIGHTプロトタイプ機の性能評価"、昭和62年信学全大、no.1638 (1987.3)
- (9) T.Whitted;"An Improved Illumination Model for Shaded Display"、Comm.ACM、vol.23、no.6、p.343-349 (1980)
- (10) 秋本,間瀬;"画素選択型光線追跡法"、信学論文誌(D)、vol.J69-D、no.12、pp.1943-1952 (1986)
- (11) 橋本,末永;"ボーダーレイトレーシング法の画質と高速化率"、情処学会グラフィックスとCAD研究会 (1987.7)
- (12) 秋本,玉邑,末永;"共通中間言語を利用した3次元画像記述の一手法と、高速画像生成装置MAGICへの適用"、情処学会グラフィックスとCAD研究会 (1987.7)