

## 画像生成システムSIG2の性能評価

平井 誠 西村 健二 安部 美乃夫 高畠 一哉  
松下電器産業株式会社 情報通信研究センター

高級な素材を用いた住宅のインテリアのデザインおよびプレゼンテーションのために、フォトリアルな画像を会話的な時間内に生成できるSIG2 (Shaded Image Generator 2) を開発し、その性能評価を進めている。本報告では試作したインテリアシミュレーションソフトウェアの問題点について述べ、検討を行う。

ラジオシティ法、スキャンライン法、レイトレーシング法をSIG2で並列実行するソフトウェアを実装し、測定を行った。その結果、十分な並列化効率が得られており、数千ポリゴン程度では会話的応答速度が得られるが、実用システムに必要な数万～数十万ポリゴンの処理のためにはいくつかの問題点があることがわかった。

## Photo-realistic Rendering System and its Evaluation

Makoto HIRAI Kenji NISHIMURA Minobu ABE Kazuya TAKABATAKE  
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Information and Communications Research Center  
1006, Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571, Japan

We have developed photo-realistic rendering system for the application of design and presentation. We named this system Shaded Image Generator 2(SIG2). We have analyzed its performance using simulation programs for interior coordination.

In this system, we implemented three algorithms: parallel radiosity algorithm, parallel scanline algorithm and parallel ray-tracing algorithm. These can be efficiently executed on SIG2. It can generate images with several thousands of polygons at interactive speed.

Through this evaluation, we found out several points for further study in the case of actual design and presentation where 10000 to 100000 polygons are processed.

## 1. まえがき

半導体技術の進歩により、コンピュータグラフィックス（CG）は、ますます応用分野が広がり、盛んに利用されるようになった。そのなかでも、建築物や工業製品のデザインやプレゼンテーション用に高品質な画像を生成したいというニーズが増しつつある<sup>1</sup>。

これらの応用では、高い現実感と簡便な操作性が特に重要である。近年の種々のアルゴリズムの考案により、現実感を高める種々の効果を上げられるようになった<sup>2</sup>。

しかし、高い現実感を得るには、細部までの詳細な形状や光の状態を再現できることが必要で、データ量が膨大になることは避けられない。例えば、NHKで放映された「人体」や「春日局」の中のCGシーンでは、100万ポリゴンの形状データや200Mバイトのテクスチャデータが使用されている<sup>3</sup>。

一方で、簡便な操作性を得るためには、上記の種々のアルゴリズムを実装し、大量のデータを処理しつつも、会話的な応答速度で画像生成することが必要である。

我々は、最大10MIPS/20MFLOPSの性能をもつユニットプロセッサ（UP）を36台並列に動作させるマルチプロセッサシステムSIG2を開発し<sup>4</sup>、CGシステムとして評価検討を進めてきた。本報告では、上記の応用システムを実現する上での問題点を把握する目的で行なった画像生成実験について報告する。

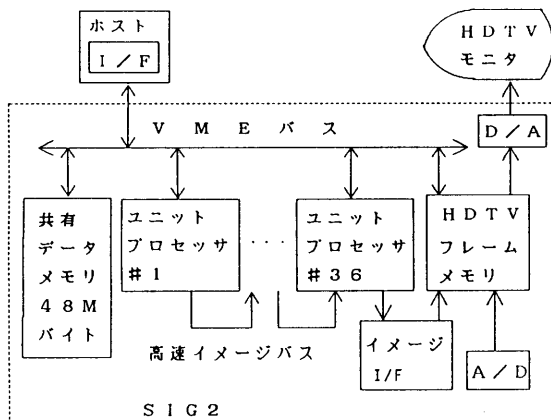


図1 SIG2システム構成図

## 2. システムの特徴と構成

### 2.1 SIG2の特徴

3次元画像生成を高速に実行するシステムのアーキテクチャとしては、特定のアルゴリズムに最適な構成を採用することが最も効果的である。しかしながら、スキャンライン法やレイ・トレーシング法など種々のアルゴリズムが考案されているが、それぞれに長所、短所があり特定のアルゴリズムですべての応用に対処するのは困難である。

一方、非常に大量の浮動小数点演算が必要な点や、画面分割による並列処理が可能である点は、3次元画像生成処理の持つ大きな特徴である。

このような特徴を持つ3次元画像生成に柔軟に対応しその処理を高速に行なうために、SIG2では、プログラマブルで高速の浮動小数点演算が可能なUPを複数台、汎用のVMEバスで接続した構成を採用した。SIG2の主な特徴は以下のとおりである。

- ① 10MIPS/20MFLOPSのRISC型プロセッサを用いたマルチプロセッサ構成
- ② 汎用のVMEバスを採用しシステム構成の変更が容易
- ③ 各UPは高速のVMEバスマスタとして使用可能
- ④ 専用の高速イメージバス(10Mピクセル/秒)を設け、HDTV画像を5コマ/秒転送可能
- ⑤ HDTV規格対応(解像度:1920×1035ピクセル、色分解能:RGB各8ビット)
- ⑥ UNIX上にプログラム開発環境、実行環境を構築

### 2.2 ハードウェア構成

SIG2のシステム構成を図1に示す。SIG2は、36台のUPがVMEバスで結合されたマルチプロセッサ・システムである。VMEバスを採用しているので、汎用のCPUボードやメモリ・ボードなどと組み合わせることも可能で、システム構成の変更は容易である。各UPは、ホスト・コンピュータがVMEバスを通して各UPのコードメモリに書き込んだプログラムを独立して実行できる。

各UPが計算した輝度データは、高速イメージバスを通してイメージ・インターフェースに送られ、シリアル/パラレル変換を経て、HDTVフレームメモリに書き込まれる。また速度を要求しない場合には、VMEバスを通してHDTV用フレームメモリにアクセスすることもできる。UPのデータをVMEバスに接続されたメモリボードに入れ、各UPはこのデータを共有することもできる。UPは、米Weitek社のプロセッサ・チップセットXL8032を中心に、2.5Mバイトのコードメモリ、4.25Mバイトのデータメモリ、VMEバス・インターフェース、高速イメージバス・インターフェース等で構成している。

### 2.3 ソフトウェア構成

XL8032用のソフトウェア開発には、SUN-OSや、XENIX上で動作するCコンパイラ、アセンブラ、リンカ等が利用できる。これらに独自のスタートアップ・ルーチン、モニタプログラムとライブラリを用意して、ソフトウェア開発環境を構築した。

プログラム実行環境は、図2に示すようにホスト（UNIXマシン）上のサーバプログラム、デバイスドライバ、UP上のモニタプログラムから成っている。UPのユーザプログラムが発生したシステムコールは、サーバプログラムによってホスト上のシステムコールに変換され、その結果がユーザプログラムに返されるので、UPのユーザプログラムはあたかもUNIX上で動作しているように見える。

また、マルチプロセッサの起動には、UNIXと同様にfork（）を用いて行ない、プログラムの起動

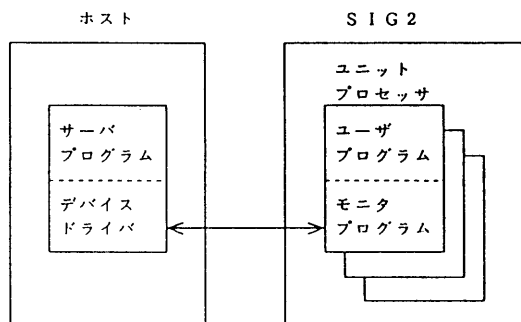


図2 SIG 2のプログラム実行環境

にexec（）を使用できる。したがって、SIG 2のソフトウェア開発はUNIX上のソフトウェア開発とまったく同じ環境で、C言語、アセンブリ言語を利用して行なうことができる。また、標準のUNIXのツール群をすべて利用できるので、良好なソフトウェア開発環境を提供できる。

### 2.4 インテリア シミュレータ

SIG 2を住宅のインテリア・デザインおよびプレゼンテーションに応用した場合の問題点を検討するために、アプリケーション・プロトタイプ・ソフトウェアとしてインテリア・シミュレータを試作した。その構成を図3に示す。ネットワークを介して接続されたワークステーションまたはSIG 2のホストコンピュータのマウスを用いて、コマンドを入力する。入力されたコマンドに従い、HDTVモニタ上にメニューを表示する。表1にコマンドの一覧と平均実行時間を、写真1に照度表示コマンド実行時のメニューを示す。

写真1では、朝昼夕夜の光源設定によりラジオシティ法を用いて既に照度計算された結果をスキャンライン法を用いて表示している。データ量は、形状データが3000ポリゴン、テクスチャデータが71種類で計1.7Mバイト、照度データが1シーンあたり300Kバイトである。プロトタイプ・ソフトウェアとしては、まずまずの結果が得られたが、次のような問題点がある。

①データ量 写真1の画像を連続視点移動する場合には、4Mバイトのデータメモリが必要で、UPのデータメモリを使い切る。実用には写真1よりもさらに細かい形状、テクスチャ、照度データが必要となる。

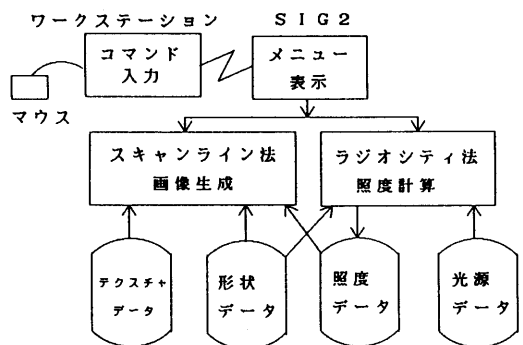


図3 インテリアシミュレータのソフトウェア構成図

表1 インテリアシミュレータコマンド

コマンド	平均実行時間
家の外観表示・選択	1秒
家の間取表示・選択	1秒
視点の移動	1秒
視点の連続移動	5コマ/秒
家具の選択・変更	0.5秒
家具の連続移動	5コマ/秒
テクスチャの選択・変更	0.5秒
光源設定・照度再計算	3分/シーン
家具移動・照度再計算	10秒/シーン
照度表示	1秒

②UP数 プロトタイプでは36UPを使用した、UP数を減らしても実用になるシステムが必要である。特に連続視点移動の必要性がない応用を考慮する。

③他の画像生成手法 光の透過・反射や一般拡散面での相互乱反射などインテリアの印象を改善するいくつかの効果を得るために、レイトレーシング法などの画像生成手法も必要である。

以下の各章では、ラジオシティ法、スキャンライン法、レイトレーシング法において、データ量とUP数を変えたときのSIG2の処理速度・並列処理効率を評価し、上記の問題点に検討を加える。

### 3. ラジオシティ法の実験と評価

ラジオシティ法は、物体表面を四角形（パッチ）に分割し、パッチ間での光エネルギーの伝達率（フォー

ムファクタ）を求め、与えられた光源設定とフォームファクタから得られるパッチ数に等しい次元の連立一次方程式を解くことにより、パッチ上の照度を得る手法である。ガウス・ザイトルの連立方程式の解法により高速に照度が得られる利点があるが、パッチ数に対し、 $O(n^2)$ の大きさのメモリが必要になる<sup>5</sup>。

SIG2では、光源からの直射光による照度分布に比べて物体相互間の乱反射による間接光照度分布は急激な変化をしないことに着目し、直射光照度はパッチを分割したサブパッチ単位で求め、パッチ数が小さくても現実に近い照度分布が得られる手法を用いた<sup>6</sup>。

写真1 a～dでは、サブパッチ数30206、パッチ数2613である。図4に処理の概要を、表2に親プロセス数1、子プロセス数35での処理時間を示す。

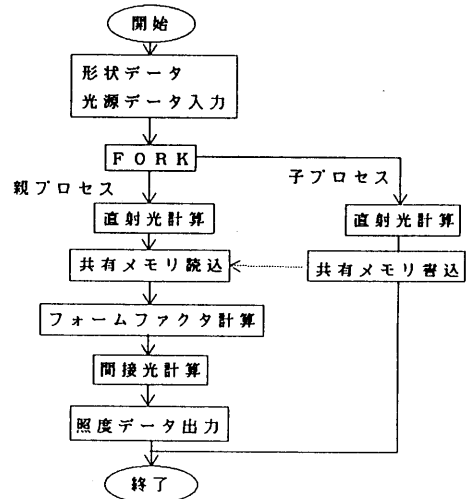


図4 ラジオシティ法の処理の概要



写真1 インテリアシミュレータの画面

a 朝	b 昼
c 夕	d 夜

表2 ラジオシティ法の処理時間（写真1 a～d）

光源設定	a 朝 平行光源 ×2	b 昼 平行光源 ×1	c 夕 スポット ×5	d 夜 スポット ×23
直接光計算				
親ノドス	1.10s	0.30s	8.53s	80.48s
子ノドス平均	5.29s	3.21s	11.03s	94.68s
子ノドス最大	5.87s	3.88s	12.13s	102.25s
並列化効率	90.1%	82.7%	90.9%	92.6%
フォーマット計算	26.86s	24.86s	29.83s	28.38s
非零行列要素数	336,333	88,710	512,059	196,537
間接光計算	2.78s	1.20s	3.91s	1.89s
全処理時間	171s	160s	167s	256s

直接光計算の実際の処理時間は子プロセスの処理時間の最大値となる。最も効率よく並列実行できた場合、実際の処理時間は子プロセスの平均処理時間となるので、並列化効率は平均処理時間／最大処理時間でえられる。80%以上の並列化効率が得られた。

全処理時間のうち、データの入出力に約120秒要しており、サブパッチへの分割・照度マップの作成につい

ても並列化を検討する必要がある。入出力以外では光源数10以下でフォームファクタ計算に、10以上で直接光計算に最も時間がかかっている。

#### 4. スキャンライン法の実験と評価

スキャンライン法は、多角形（ポリゴン）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、汎用プロセッサで高速に画像を生成できる利点がある。インプリメントした処理の流れを図5に示す。

測定は、親ノドスを1UPで、子ノドスを34UPで実行した場合について行った。子ノドスは34走直線おきに画像を生成する。物体データは、写真2a～dの64\*リゴソから成る\*の本数を変化させたデータと、写真3a～dの3000\*リゴソから成る住宅の一部を表現したデータを用いた。写真3では\*に71種類計1732Kバイト、照度マップに

526種類計320Kバイトを使用している。生成画素数は832×512である。

写真2 スキャンライン法の測定データ

a 576*リゴソ	b 9216*リゴソ
c 576*リゴソ	d 9216*リゴソ

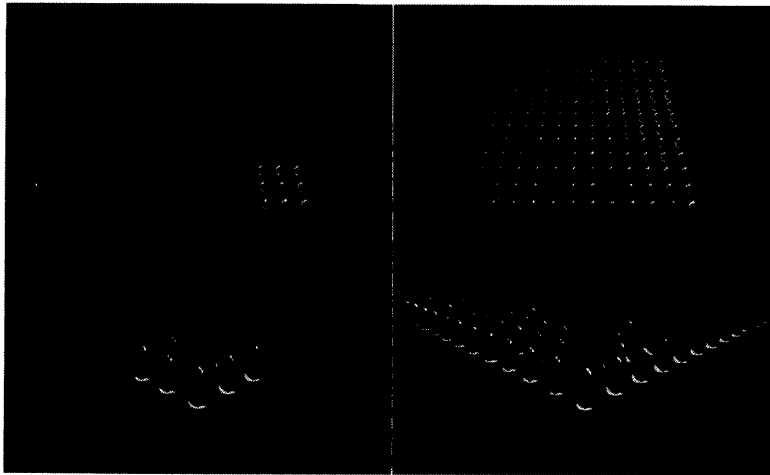


写真3 スキャンライン法の測定データ

a 二階から	b 応接間
c ソファから	d 上空から

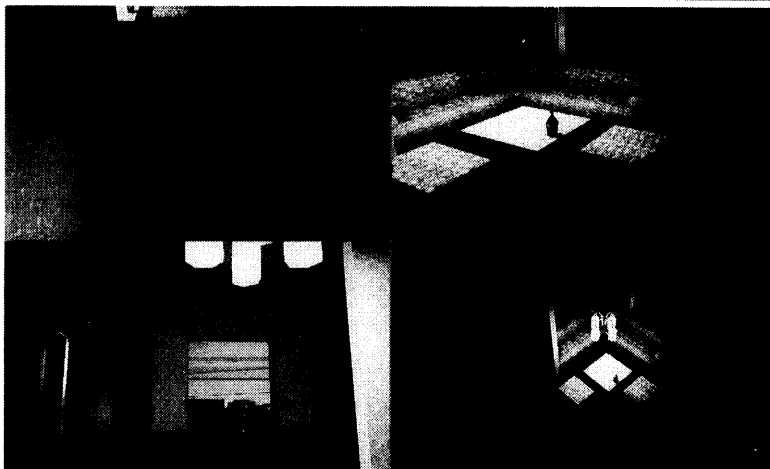


表3 スキャンライン法の処理時間(写真2)

処理	親プロセス実測値[ms]・ 34子プロセス平均値(並列化効率)				外挿値[s]	
	576	3136	6400	9216	10万	100万
視点座標変換・透視変換	2.9	15.5	31.5	45.3	0.5s	5s
クリッピング	16.5	91.8	187.9	270.7	2.9s	29s
Yソート	視点ab 11.2	81.4	184.9	320.8	4.8s	63s
	視点cd 13.0	101.3	245.0	463.0	6.4s	84s
形状データ転送・Yソートリスト転送	8.2	43.5	88.0	127.0	1.4s	14s
セグメントリスト作成	視点ab 8.0 (87%)	46.2 (94%)	95.1 (95%)	136.5 (95%)	1.5s	15s
	視点cd 15.0 (95%)	70.7 (97%)	132.3 (97%)	180.9 (98%)	2.0s	20s
Xソート	視点ab 2.0 (60%)	14.6 (77%)	34.6 (85%)	53.8 (79%)	0.9s	11s
	視点cd 9.1 (93%)	56.0 (85%)	115.3 (90%)	162.9 (85%)	2.7s	33s
Zソート・マッピング	視点ab 27.6 (73%)	30.9 (87%)	48.0 (87%)	62.6 (88%)	0.5s	5s
	視点cd 33.5 (71%)	68.9 (90%)	105.8 (93%)	133.6 (94%)	0.9s	8s

表4 スキャンライン法の処理時間(写真3)

処理	親プロセス実測値[ms]・ 34子プロセス平均値(並列化効率)			
	写真3a	写真3b	写真3c	写真3d
視点座標変換・透視変換	26.4	25.1	23.1	26.5
クリッピング	37.9	44.7	37.3	70.1
Yソート	15.3	25.0	15.7	71.0
形状データ転送・Yソートリスト転送	21.5	24.9	20.7	36.9
セグメントリスト作成	20.2 (85%)	31.2 (95%)	24.7 (93%)	42.4 (95%)
Xソート	10.9 (80%)	17.5 (93%)	10.2 (92%)	22.8 (91%)
Zソート・マッピング	96.6 (92%)	105.1 (94%)	99.7 (93%)	96.8 (94%)

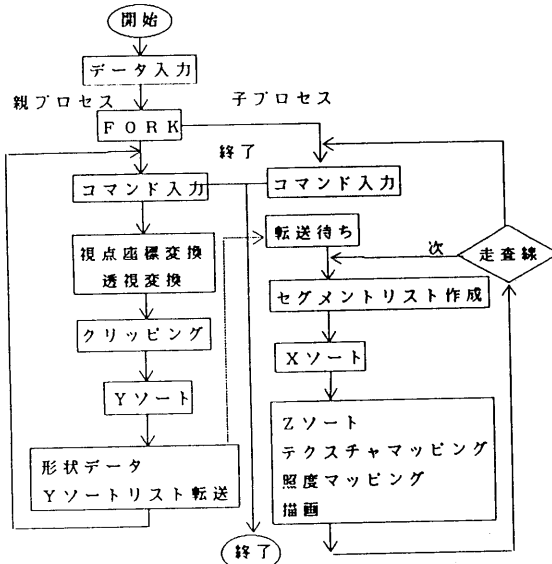


図5 スキャンライン法の処理の概要

写真2のデータの処理時間の測定値と外挿値を表3に、写真3のデータの処理時間を表4に示す。

表3の測定値から、視点座標変換・透視変換、クリッピング、形状データ転送・Yソートリスト転送、セグメントリスト作成、Zソート・マッピングは、ポリゴン数  $n$  に対して  $O(n)$  の処理時間がかかることがわかる。ただし、視点cdの場合はZソート・マッピングの処理で描画する面積がポリゴン数に比例しないため  $O(n)$  より処理時間が短い。

一方、Yソート、Xソートは、 $O(n \log n)$  の処理時間がかかる。そのため、表3に示した外挿値のように10万ポリゴンから100万ポリゴンを処理する場合には、Yソート、Xソートの処理がネックになる。特に視点cdのように1つの走査線に多くのポリゴンが重なる場合は、子プロセスではX

ソートがネックとなり、UP数の少ないシステムでは処理全体のネックとなる。しかし、写真3のインテリアのデータのように通常はクリッピングによってデータの大部分を除外できるため、表4に示した処理時間と表3の3000ポリゴンの処理時間を比べても、Yソート、Xソートの全処理時間に対する割合は小さい。

並列化効率についてはラジオシティ法の場合と同様にして、子プロセスの平均処理時間/最大処理時間で求めた。ラジオシティ法の場合と異なり、予め定めた処理対象(ラジオシティ法の場合はバッチ、スキャンライン法の場合は走査線)を処理するため、処理負荷を分散できず、並列化効率が60%になる場合がある。しかし、写真3のインテリアのデータでは、どの視点からでも80%以上の並列化効率が得られた。

### 5. レイトレーシング法の実験と評価

レイトレーシング法は、光線の反射・屈折・影付の表現、2次曲面・陰関数の等値曲面・ソリッドモデルの直接的処理が行なえるため表現能力の高い手法である。しかし、すべての画素を通る光線、その光線が物体表面から反射・屈折した光線について処理するために、スキャンライン法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手法が提案されている<sup>7</sup>。本システムでは階層的直方体バウンダリ法と空間等分割法をインプリメントした。処理の概要を図6に示す。

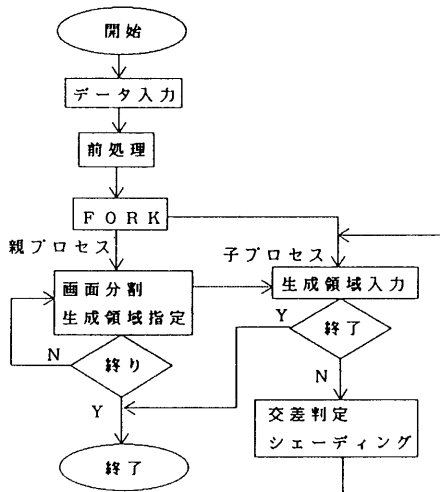


図6 レイトレーシング法の処理の概要

表5 レイトレーシング法の実験の物体データ

写真	三角板	2次曲面	屈折反射影付	マッピング
4 a	140	0	—	—
4 b	6160	0	—	—
4 c	140	0	屈折反射	—
4 d	6160	0	屈折反射	—
5 a	2	37	—	3種類 68136△付
5 b	87	5	屈折反射影付	3種類 47204△付
5 c	2	3	屈折反射影付	1種類 64△付
5 d	4170	0	屈折反射影付	—

測定は、親プロセスを1UP、子プロセスを35UPで行った。物体データは、写真4 a~dの3角錐を積み上げたシーンで、3角錐の数を変化させた場合と、透過・反射の処理を加えた場合と、写真5 a~dの典型的なC

Gシーンをを用いた。画素数は832×512で行った。写真4.5の各画像の物体データの詳細を表5に示す。

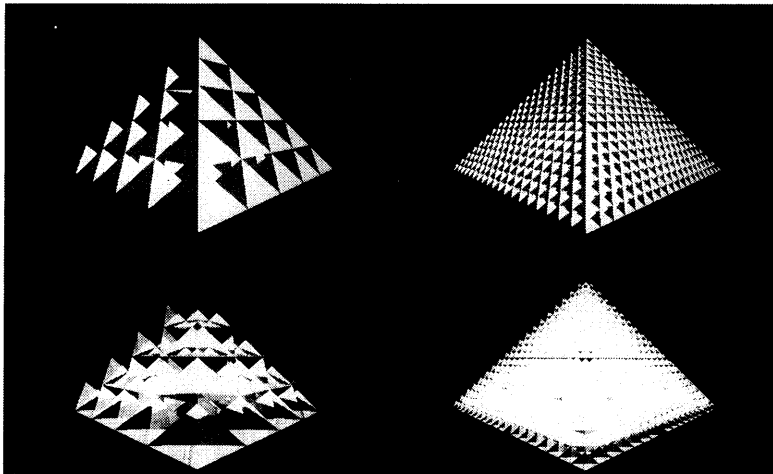


写真4 レイトレーシング法の測定データ

a 140△マッピング	b 6160△マッピング
c 140△マッピング 屈折反射	d 6160△マッピング 屈折反射

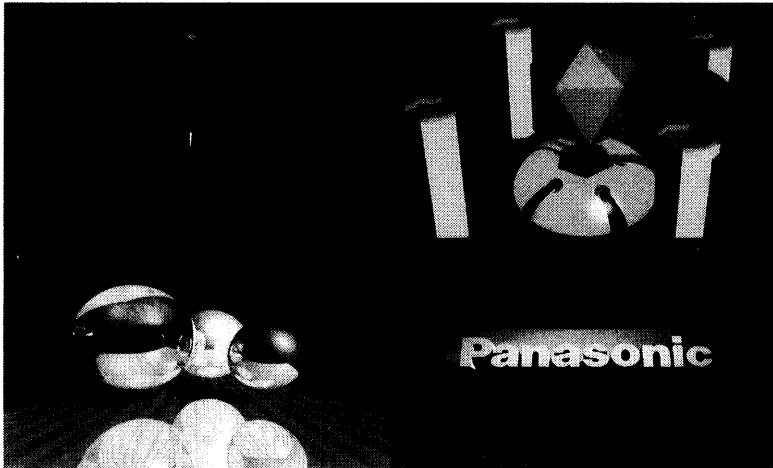


写真5 レイトレーシング法の測定データ

a BONTEN	b PILLARS
c PANPH	d PANASONIC

表6 レイトレーシング法の処理時間（写真4）

方法	前処理[s]		35子アプレクス最大値(並列化効率)			
	140	6160	透過反射なし		透過反射各3回	
階層的直方体 バウンダリ法	0.08	3.04	5.53 (98%)	75.14 (97%)	52.2 (96%)	1668.8 (95%)
空間等分割法 10x10x10分割	0.09	3.13	4.83 (95%)	8.00 (97%)	37.2 (97%)	203.3 (99%)
20x20x20分割	0.11	3.16	5.01 (95%)	6.24 (96%)	35.0 (97%)	105.3 (98%)
30x30x30分割	0.15	3.22	5.37 (96%)	6.03 (96%)	35.8 (97%)	86.5 (98%)

表7 レイトレーシング法の処理時間（写真5）

方法	35子アプレクス最大値[s](並列化効率)			
	写真5a	写真5b	写真5c	写真5d
階層的直方体 バウンダリ法	9.1 (98%)	12.0 (98%)	13.5 (97%)	23.6 (92%)
空間等分割法 10x10x10分割	9.9 (99%)	15.6 (98%)	16.2 (98%)	34.4 (98%)
150x20x5分割	—	—	—	25.0 (95%)

写真4のデータの処理時間を表6に、写真5のデータの処理時間を表7に示す。

写真4のデータのように物体が互いに重なり合わず、空間内に均一に分布している場合は、表6に示したように空間等分割法により、階層的直方体バウンダリ法を用いた場合に比べて1桁以上の処理速度が得られた。しかし、写真5のデータのように物体数が少ない場合や空間内に偏って物体が分布している場合は、表7に示したように階層的直方体バウンダリ法の方が速い場合もある。空間内に偏って物体が分布している場合にも、オクトリ法を用いて効率よく空間を分割することができるが、画像生成の効率はよくないという報告がある<sup>7)</sup>。インテリアのデータは空間内に物体が偏って分布しており、実用化に向けてさらに研究の必要がある。

レイトレーシング法では、表6、7に示したように90%以上の高い並列化効率が得られた。しかし、空間内に偏って物体が分布している場合や、ここには示していないがアンタイエイリアシングを行った場合には、それ以外の場合に比べて並列化効率が低い傾向にあった。

## 6. あとがき

画像生成システムSIG2のインテリアシミュレータ、ラジオシティ法、スキャンライン法、レイトレーシング法における性能について報告した。数千ポリゴン程度の実験用データでは会話的応答速度が得られた。

しかし、今後実用化を進めるには、数万～数十万ポリゴンのデータを処理する要求があるため、共有メモリの効率的利用、画像生成システム用の仮想記憶方式、物体データの分割・部分処理・合成手法について検討する必要がある。

## 参考文献

1. 牧登、"建築CG/建築CAD"、日経CG No.35,1989/8
2. 中前栄一郎、"3次元コンピュータグラフィックス技法"、情報処理 Vol129, No.10, pp.1082,1988/10
3. 松野美茂他、"ハイテックラボでのメイキングオブ人体免疫CG"、PIXEL No.83,1989/8
4. 安部美乃夫他、"画像生成システムSIG2"、情報処理学会グラフィックスとCAD,89-CG-37-9,1989/2
5. 西田 他、"影および拡散照度を考慮した三次元物体の陰影表示"、情報処理学会グラフィックスとCAD,84-CAD-14-2,1984
6. 西村健二他、"光の相互反射を考慮した高速画像生成のための一手法"、情報処理学会第37回全国大会, pp.1693,1988/10
7. 村上公一他、"Voxel分割を用いた高速化レイトレーシング"、情報処理学会第32回全国大会, pp.2081,1986