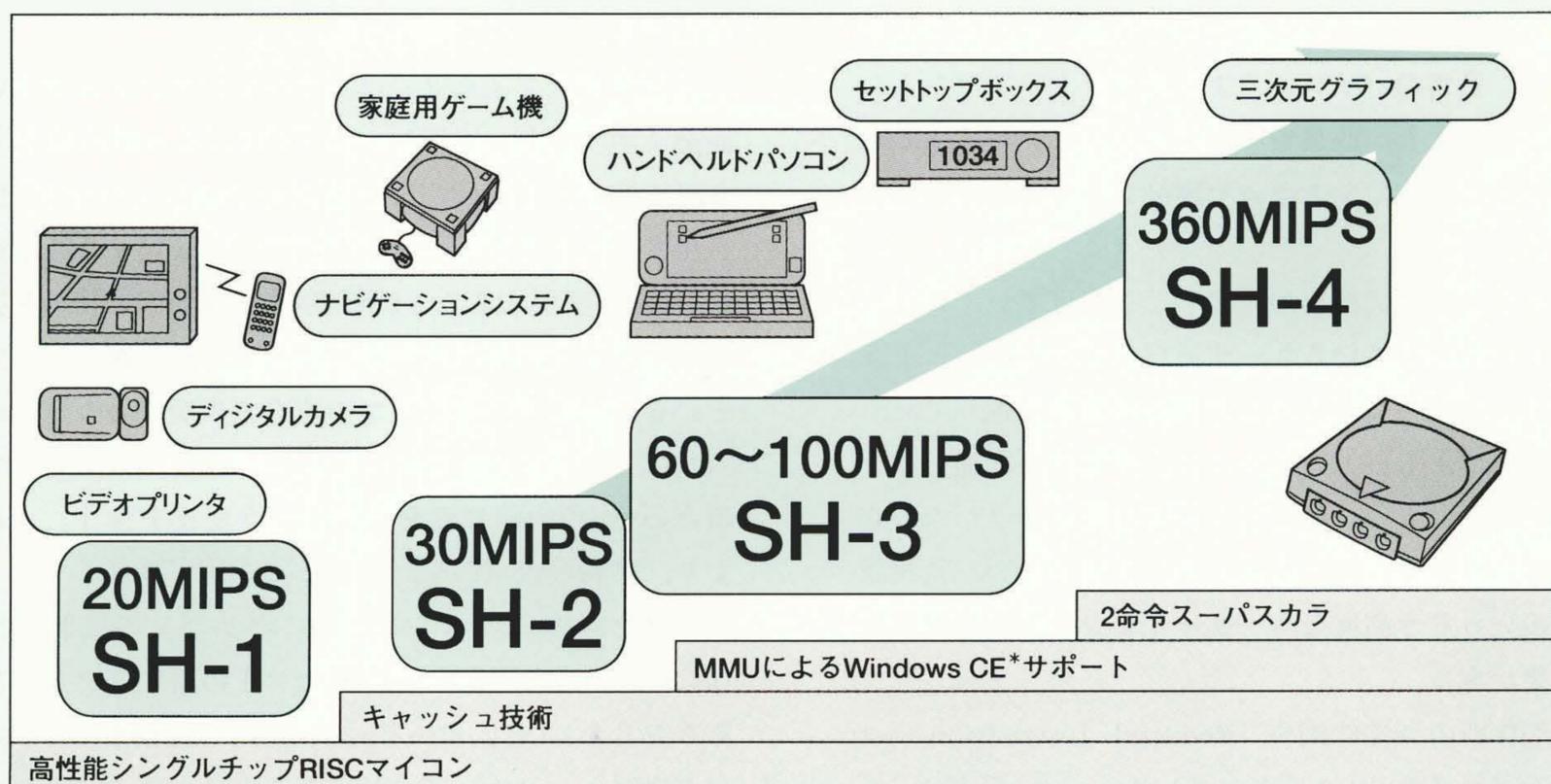


高性能エンターテインメントシステムと 高性能プロセッサ“SH-4”

Entertainment Systems and High-Performance Processor “SH-4”

中川典夫 *Norio Nakagawa*

荒川文男 *Fumio Arakawa*



注：略語説明ほか MIPS (Million Instructions per Second), MMU (Memory Management Unit), RISC (Reduced Instruction Set Computer) マイコン(マイクロコンピュータ), *Windowsは、米国およびその他の国における米国Microsoft Corp.の登録商標である。

高性能シングルチップRISCマイコン「SuperHシリーズ」の応用分野

SuperHシリーズの最上位機種であるSH-4は、三次元グラフィックの高速化をサポートし、高性能アミューズメントシステムに対応する。

1998年7月20日に、株式会社セガ・エンタープライゼスは次世代高性能エンターテインメント機である“DreamCast”^{※)}の発表会を開催し、そこのデモンストレーション画像の迫力や精密さは好評であった。このDreamCastの心臓部には日立製作所のプロセッサ“SH-4”が採用されている。

SH-4は、日立製作所の高性能RISC (Reduced Instruction Set Computer) マイクロコンピュータ「SuperHシリーズ」の最上位機種として、次世代のマルチメディア機器に対応するために開発したもので、ゲーム機を足がかりに仕様のチューンアップを行った。これは、ゲーム

機にはマルチメディア時代の機器に必要なすべての要素が含まれていると考えたためである。SH-4の開発では、(1) CPU (Central Processing Unit) 性能の向上により、ミドルウェアのサポートを行うこと、(2) コミュニケーションには三次元グラフィックのサポートが必須であること、(3) 画像や音声などのデータ転送能力の向上が必要なことの3点を特に考慮した。

この結果、内部動作周波数200 MHzのSH-4では、整数性能360 MIPS (Million Instructions per Second)、画像処理性能5 Mポリゴン/s、最大データ転送能力として800 Mバイト/sを実現することができた。

※) DreamCastは、株式会社セガ・エンタープライゼスの登録商標である。

1 はじめに

本格的なマルチメディア時代の到来に向けて、より安価で、高性能、多目的に使用できる機器の開発が求められている。このような機器を実現するには、そこに使用されるプロセッサの飛躍的な性能向上が必要である。これは次の要因によるものである。

(1) これまで専用のハードウェアで実行していた通信などの機能をソフトウェアで実現することにより、いっそう小さく、安価なシステムが開発できる。さらに進んだ機器では、通常のパソコンのようにソフトウェアを入れ替えることにより、改良やバージョンアップができるなど、柔軟性に富んだシステムを構築できることが求められている。

(2) マルチメディア機器の市場をより広げていくには、パソコンを活用しているユーザーだけでなく、いっそう広い層のユーザーにもこれらの機器の普及を進めていくことが必要である。そのためには、世界的に共通なインタフェースとともに、使用者に親切な使い勝手が求められている。つまり、画質の向上や、手書き入力、音声認識などのいっそう高度なユーザーインタフェースを実現する必要がある。

日立製作所の高性能RISC(Reduced Instruction Set Computer)マイコン(マイクロコンピュータ)“SH-4”では、これらのニーズにこたえるために、ゲーム機を足がかりにさまざまな機能の追加や見直しを行った。

ここでは、機能追加を行ったSH-4の浮動小数点内積演算機能による、三次元グラフィックの高速化について述べる。

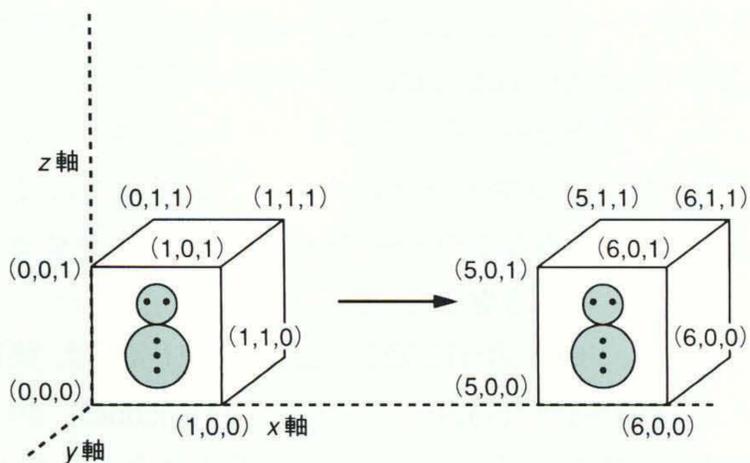


図1 正六面体の表示

正六面体を四角形のポリゴンで表示した場合、8個の座標で表現できる。

2 三次元グラフィックの概要

近年、映画や学術的な分野だけでなく、ゲーム機器でも三次元グラフィックが主流になってきている。次世代高性能アミューズメント機器でも、高性能三次元グラフィックのサポートは必須である。

画像処理には、(1)プロセッサが行う座標計算などのジオメトリック法と、(2)グラフィックチップが行う配色などの描画法がある。このジオメトリック法について以下に述べる。

三次元グラフィックでは、すべてのオブジェクトの表面を「ポリゴン」と呼ばれる三角形(四角形の場合もある。)で覆い、その頂点の三次元の座標(x,y,z)で画像を表現するとともに、この頂点の座標を変換することにより、移動を表現することができる。正六面体の移動を図1に示す。正六面体は四角形のポリゴンを使用したとすると、6枚のポリゴンと八つの頂点で表現できる。この正六面体を平行にx軸方向に5移動させるには、すべての頂点のx座標の値に5を足すという変換を行う。これにより、移動後の頂点を計算することができる。

これを画面に表示するためにポリゴンの投影を行う(図2参照)。高速化するには、 $z=1$ の所にスクリーンがあると考え、 $(x,y,z) \rightarrow (\frac{x}{z}, \frac{y}{z}, 1)$ に変換を行う。これをグラフィックチップに与えることにより、描画を行う。CPU(Central Processing Unit)による三次元グラフィックでは、この座標変換と投影を高速に行う手段を提供する必要がある。

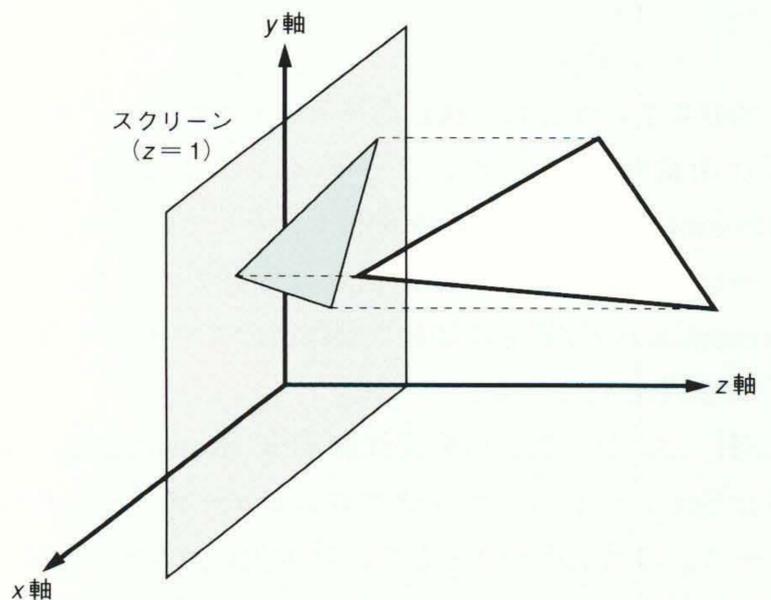


図2 ポリゴンの投影

三次元のポリゴンを $z=1$ に置かれたスクリーンに投影して描画させる。

3 高性能アミューズメント機器での性能要求

高性能アミューズメント機器での三次元グラフィックの性能に対する要求は、これまでの常識を超える非常に高いものである。こらは次の二つの要因による。

(1) ポリゴンの増加

球をポリゴンで表示した例を図3に示す。同図(a)は球を正八面体で表現しようとしたもので、これは球とは認められない。しかし、同図(b)のようにもっと三角形を増やせば、より球に近く見えてくる。つまり、高性能アミューズメント機器では、より細かいポリゴンを使用した、より精彩な表現、高精度の表示が目標である。しかし、三角形が多いと頂点も当然増えることになり、より多くのデータが必要であり、さらに、これらを動かすための座標数も増加することになる。

(2) 変換数の増加

一つ一つのオブジェクトを詳細に表現するだけでなく、実物により近い表現が求められている。例として、手のポリゴンを図4に示す。これまでは、手と言えは、遠景では棒のように表現し、近景の手だけの画面に切り替えた場合には、きちんとしたクラスタと関節で表現したモデルを使用するといった、詳細に描画する手法が採られてきた。しかし、最近の傾向として、ズームアップやズームダウンが自由にできるようなソフトウェアが当然のものようになってきており、また、ゲームソフトウェアの開発も大がかりになってきて、場面場面に応じ

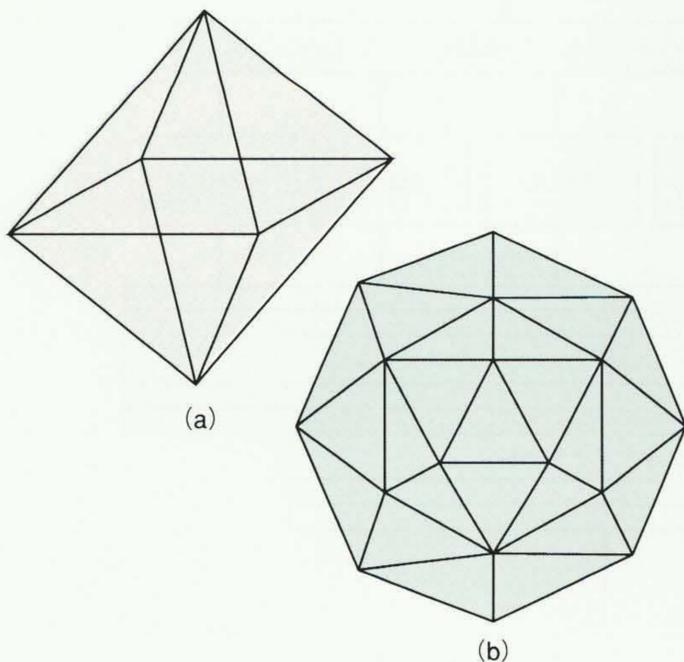


図3 球表現とポリゴン数

球を表現するために使用するポリゴンを増やすと、より滑らかに見える。

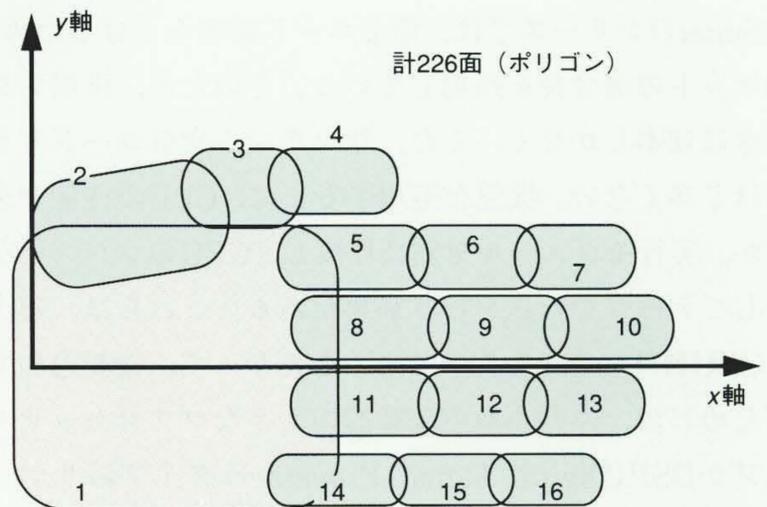


図4 手のポリゴンモデル

手を正確に表現するには、関節などを含めて16クラスタと226面のポリゴンが必要になる。

たモデルの再構成などの手法は現実的ではなくなっている。一つのオブジェクトを一つのモデルで表現することになるので、すべてを詳細なモデルで表現ようになる。そのため、人の位置から指の先の座標まですべてを毎回計算する必要があり、変換する座標だけでなく、変換の数自体も増加してきている。

(3) 力学演算の導入

より高精度に表現した画像は、より滑らかに動かすことが求められる。動き、つまり時間軸に沿って、物をどのように動かしていくかについては、現在、理論的なものではなく、モデルを実際に動かしてみて決定する方法が採られている。しかし今後は、動きを重力や筋力などの自然法則に沿って正確に計算し、これらの計算結果を反映することにより、いっそう自然な動作が表現することが求められる。ただし、これを実現するには、さらに計算が増えることを意味している。

4 SH-4での解法

上記の課題を解決するために、汎用プロセッサによるサポート方法を検討した。汎用プロセッサによってすべての機能をそれぞれ実現することも可能であるが、コストや開発期間の問題が生じる。そのため、(1)浮動小数点によるサポートと、(2)行列演算器のサポートの二つを行うことにした。

4.1 浮動小数点

浮動小数点によるサポートの必要性について以下に述べる。

(1) CPUの性能の阻害

SuperHシリーズでは、命令コード効率を上げるため、16ビットの命令長を採用している。そのため、汎用レジスタは16本しかなく、また、空いている命令コードもそれほど多くない。機能を追加するには、CPUの性能を奪うか、実行モジュールを別に作成し、CPUのレジスタを介してデータを転送を行う必要がある。これらは、確実にCPU自体の性能を阻害する。したがって、機能追加するためには、浮動小数点演算器のようなコプロセッサタイプかDSP(Digital Signal Processor)タイプのサポートを行う必要がある。

(2) 絶対表現範囲の広さ

浮動小数点では十進数で70けた以上の表現が可能であるのに対し、固定小数点では、十進数で10けたくらいの表現範囲しかない。そのため、多種のマルチメディアに対して汎用的に対応するには、固定小数点ではその制限がボトルネックになる可能性がある。

滑らかな動きを現実感が出るように力学演算を行う場合、ジャンプや落下では、当然、等速運動ではなく、重力による加速度運動で物体の位置を計算する必要がある。また、衝突や跳ね返りなどといった方向性を持つ運動量の計算や、さらに、粘りや空気抵抗などのより複雑な計算を行うには、固定小数点では、有効なけた数を常に確認しながらプログラムを作成する必要がある。

例えば、10,000 tのロケットが、100 m/sで移動する場

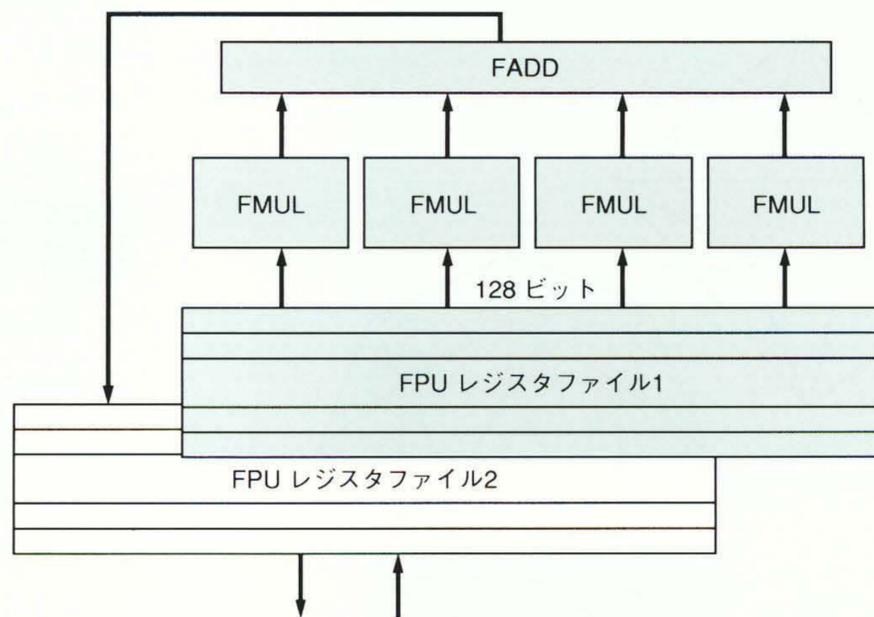
合の運動量は1,000,000,000 kg・m/sであるが、10 mgの髪の毛が5 cm/sで動く場合、0.0005 kg・m/sになる。三次元グラフィックで遠景と近景を同時に扱う場合を考えると、位の差が13以上あり、固定小数点では表現しきれない。もちろん、プログラマが、けたを正確に把握することによってこのような問題を回避することは可能であるが、過剰な労力を要することになる。

(3) 相対精度の保持

画像を例にすると、32ビットのデータ長があれば、整数でも1 mmから2,000 kmまでの表現が可能である。これは、静止画では十分な表現力であるが、動画として、動くものを表現しようとした場合、切り捨て誤差の累積が問題となる。つまり、演算のたびに最下位けた数の丸めが常に行われるので、 $\frac{1}{2}$ の確立で必ず誤差が出る。最小表現精度は1 mmであっても、これが累積すると、100回の動作(演算)後、最大50 mmの誤差になってしまう可能性がある。1,000 km離れて見ている場合は問題ないが、1 mくらいから見て50 mmずれると、元の図形の印象を大きく変えてしまう。例えば、手が体から離れて見えたり、逆に食い込んで見えたりする。現在、画像ソフトウェアでは、この補正やスケールの調整などでかなり綿密なくふうを凝らすことにより、動画を表現している。一方、浮動小数点の場合、有効けた数を常に一定に保つので相対誤差が一定になり、このような処理は本質的に必要がない。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ i' \end{pmatrix}$$

- 座標変換演算：4クロック
(4クロックで28演算)
- 演算中にスーパースカラ制御で他のレジスタファイルにオペランド(演算数)を装荷・記憶



注：略語説明 FADD (Floating-Point Addition), FMUL (Floating-Point Multiplier), FPU (Floating Point Unit)

図5 浮動小数点四次元内積演算器

四次元のベクトルの内積を1クロックで実現できるハードウェアを機能追加した。これにより、アフィン変換などを高速に計算し、要求されている性能を満足することができた。

以上により、今回、浮動小数点によってサポートすることにした。

4.2 行列演算器

三次元グラフィックの座標変換は一般的にはアフィン(擬似)変換と呼ばれ、 3×4 の行列式で表現するか、または平行移動分を削除して 3×3 で実現している。

しかし、変形が加わるため、正式なグラフィック変換では 4×4 の行列が必要である。SH-4では、最近の急速な画像処理技術の進歩を考慮して、変形までをサポートするために、 4×4 行列演算器を実現した。この演算器を使用することにより、画像処理だけでなく、力学系や電磁波系すべてのアプリケーションに対応することが可能である。

以上の理由により、命令では図5に示す演算をサポートすることにした。つまり、行列式は 4×4 であるが、アフィン変換を行う場合は、命令を3回発行すれば実現でき、さらに、実行時間のオーバーヘッドは平行移動も同時に演算できるので、 3×3 だけをサポートした場合と変わらない。さらに、今後のグラフィックで変換を高速に行うには、座標変換ごとに座標を求めるのではなく、オイラー角や中心座標系の導入、さらに、変換行列自体の演算を前もって行い、ベクトルは最後に1回変換をかければ求められる方式が必要になる。このような演算は、 3×3 でも不可能ではないが、アルゴリズムが複雑になるので、どうしても 4×3 以上の行列が必要になると判断した。

5 三次元グラフィックの実測結果

実際の三次元グラフィック性能を確かめるために、簡易モデルを使用してプログラムを作成し、テストした。

(1) モデルの構成

簡易モデルとして、手のモデルを使用した(図4参照)。このモデルの手は、たなごころと5本の指からできていて、さらにそれぞれの関節で区分する。それぞれをクラスターで分割し、合計16個のクラスターで構成する。それぞれのクラスターでは、たなごころはポリゴン数30、他のクラスターはポリゴン数12から13で表現して、合計226面のポリゴンで表す。

(2) プログラム概要

上の動きを5本の指にわたって行う演算の手順を図6に示す。個別の演算の意味は次のとおりである。

- (a) move(): 現行列に平行移動行列を掛ける。
- (b) rotateY(): 現行列にy軸回転行列を掛ける。

```

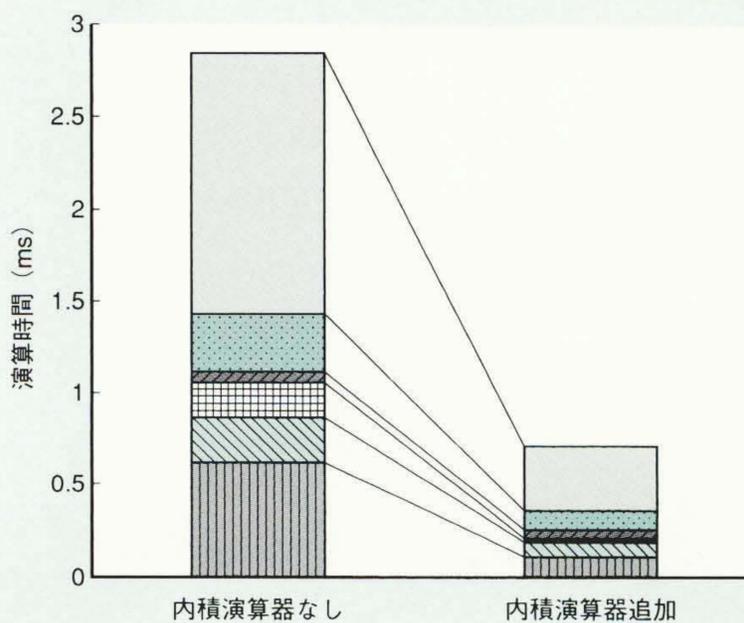
/* C: クラスターの接続: 番号は図に対応
C1--C2--C3--C4
--C5--C6--C7
--C8--C9--C10
--C11--C12--C13
--C14--C14--C16 */
move(C1, 任意位置); rotate(C1, 任意回転); 座標変換(C1)
move(C2->1); rotateY(C2, 1度); 座標変換(C2)
move(C3->2); rotateY(C3, 1度); 座標変換(C3)
move(C4->3); rotateY(C4, 1度); 座標変換(C4)
move(C5->1); rotateY(C5, 1度); 座標変換(C5)
move(C6->5); rotateY(C6, 1度); 座標変換(C6)
move(C7->6); rotateY(C7, 1度); 座標変換(C7)
    
```

図6 変換の計算順序

各クラスターに対して変換を行い、最終座標を決定する。その後、投影、表裏判定を行う。

- (c) rotate(): 現行列にオイラー角指定などの任意回転行列を掛ける。
- (d) 座標変換(): 現行列にクラスター内のオブジェクトを作用させる。

以上によって求めた座標を投射し、光量計算などを経て、表示を行う。



注: □(その他), ▤(頂点変換), ▥(重なり判定)
▦(表裏判定), ▧(法線変換), ▨(座標変換)

図7 内積演算器による効果

内積演算器を持つことにより、三次元グラフィックの高速化が図れる。

(3) 実測結果

上記のプログラムを実測したところ、SH-4では、ジオメトリック演算能力として約5Mポリゴン/sを実現できる見込みを得た。内積演算器を入れなかった場合と、入れた場合の性能の比較を図7に示す。

6 おわりに

ここでは日立製作所のシングルチップRISCマイコン“SH-4”で3~4倍の性能を実現した三次元グラフィックの高速化について述べた。

高性能アミューズメント機器については、グラフィックの高速化だけでなく、データ転送レートの大幅な向上やキャッシュ制御のオーバヘッド削減など、さまざまな高速化を行った。

チップ写真を図8に、チップの諸元を表1にそれぞれ示す。表1からもわかるとおり、今回発表したSH-4は、消費電力よりは、むしろ性能を追求したCPUとしている。しかし、基本アーキテクチャは同じである。現在、回路とデバイスのチューニングを行い、Windows CEなどを搭載した、携帯用機器向けの低電圧・低消費電力版の開発を推進中である。

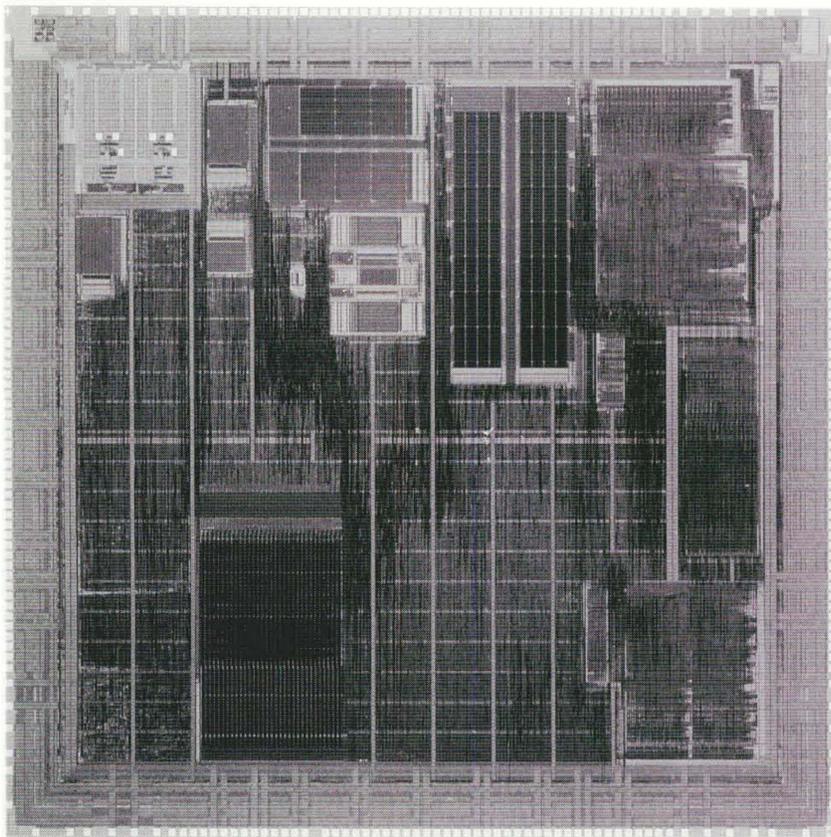


図8 SH-4チップ
三次元グラフィックにはこのチップがキーとなる。

表1 SH-4チップの諸元

消費電力よりも性能を重視している。

動作周波数	内部：200 MHz, 外部：100 MHz
性能	整数部：200 MHzで360 MIPS, 167 MHzで300 MIPS
	浮動小数点部：200 MHzで1.4 GFLOPS, 167 MHzで1.12 GFLOPS(ピーク時)
スーパスカラ	2命令同時実行
キャッシュ容量	8kバイト(命令用), 16kバイト(データ用)
メモリ	SDRAM, DRAM(EDO, ハイパページ), SRAM直結インタフェース
最大データ転送	800 Mバイト/s
周辺モジュール	4チャンネルDMAC, タイマ, SCI/SCIF, RTC
消費電力	200 MHzで1.5 W
プロセス	0.20 μ m 5 LM 1.8V, 3.3V I/O
パッケージ	256 BGA, 208 QFP 64ビット データバス

注：略語説明

FLOPS(Floating-Point Operations per Second)
SDRAM(Synchronous Dynamic Random Access Memory)
EDO(Extended Data Output)
SRAM(Static RAM)
DMAC(Direct Memory Access Controller)
SCI(Serial Communication Interface)
SCIF(Serial Communication Interface with FIFO)
RTC(Real-Time Clock)
LM(Layer Metal)
I/O(Input and Output)
BGA(Ball Grid Array)
QFP(Quad Flat Package)

参考文献

- 1) F. Arakawa, et al.: SH-4 RISC Microprocessor for Multimedia, Hot CHIPS, IX, pp. 165~176(1997-8)
- 3) O. Nishii, et al.: A 200 MHz 1.2W 1.4 GFLOPS Microprocessor with Graphic Operation Unit, Int. Solid-State Circ. Conf. (1998-2)
- 4) F. Arakawa, et al.: SH-4 RISC Multimedia Microprocessor, IEEEMICRO Chips, Systems, Software, and Application(1998-3, 4)

執筆者紹介



中川 典夫

1983年日立製作所入社、半導体事業本部 システムLSI事業部 先端マイコン本部 SH設計部 所属
現在、マイクロプロセッサの設計と開発に従事
E-mail: nakagawn@cm. musashi. hitachi. co. jp



荒川 文男

1986年日立製作所入社、中央研究所 システムLSI研究部 677研究ユニット 所属
現在、マイクロプロセッサの研究と開発に従事
E-mail: arakawa@crl. hitachi. co. jp