3次元コンピュータグラフィックスにおける アンチエイリアシングの高速化アルゴリズム ACCELERATED ALGORITHM OF ANTIALIASING AT 3 DIMENSIONAL COMPUTER GRAPHICS

笠原 信一*
Shinichi KASAHARA

Aliasing phenomenon in Computer Graphics images and animations is serious problem to lose quality. Techniques to solve the problem, namely antialiasing technique, have been researched and developed, but these usual techniques have weak point to consume much calculation time. This paper proposes a new antialiasing algorithm that keeps image quality and speeds calculation up. Applying different antialiasing method to each step at rendering process, namely finding visible object, shadow casting, mapping, and reflecting, is main strategy of the new algorithm proposed here. Appropriate different method for each step can optimizes image quality and calculation time.

Keywords : 3 Dimensional Computer Graphics, Aliasing, Antialiasing, Acceleration

3次元コンピュータグラフィックス, エイリアシング, アンチエイリアシング, 高速化

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) の画像は、ピクセルと呼ばれる格子状に並んだ微小の画素の集まりで構成されており、離散化されたデジタル画像である。従って、アナログの三次元空間をデジタル化する過程で、情報が欠落し画像が劣化することがある。この現象をエイリアシング(aliasing)と呼んでいる。具体的には、CG 画像の中でエッジのギザギザ (図1) や遠方での不正な縞模様 (図2) といった現象となって現れる。また動画では、そのエッジのギザギザや縞模様が揺れ動くことによって、画面のちらつきを引き起こす。

この問題を解決する技術を総称してアンチエイリアシング (antialiasing)^{1), 2)}と呼んでおり、CG の画像品質を向上させる上で不可欠の技術である。これまでに様々なアンチエイリアシング手法が開発され画質の改善が図られてきたが、これらの手法は一方で計算負荷の増大という問題を招いている。コンピュータの処理能力は飛躍的に進歩しているが、それに比例して制作される画像も複雑化高度化しており、現在でも計算時間は CG 制作のネックになっている。特に建築分野の CG は、ごく限られた対象者へのプレゼンテーション手段として制作されることが多いため、他分野 (工業製品業界、コマーシャル業界、映画業界など) の CG と比べて、より短期間に低コストで制作する需要が高いが、建築分野の CG 制作現場では、例えば 3 分程度のアニメーション作成の計算に数日間という

膨大な計算時間をかけるのは珍しくない。建築分野における CG 利用推進のためには、画像の品質と共に計算時間が重要な要素である。本研究は、この問題を解決するために、高品質の CG を作成するソ

図1 注1) エイリアシング現象 (ギザギザのエッジ)

図2 エイリアシング現象 (遠方での不正な縞模様)

* 鹿島建設(株) IT ソリューション部 担当部長・修士(芸術工学)

Senior Manager, IT Solutions Department, Kajima Corporation, M. Design

フトウェアのアンチエイリアシング処理を高速化する新アルゴリズムを開発する事を目的としている。

本稿で提案する新アルゴリズムは、アンチエイリアシング処理を画像全体に一律に行うのではなく、「物体処理、光源処理、材質処理といったエイリアシングの発生過程に注目し、各要因ごとにエイリアシングの発生する箇所を抽出して、必要な部分のみにアンチエイリアシング処理を行う」ことによって高速化するという点に新規性がある。

2. エイリアシングの発生原因

エイリアシングの発生は、連続的な変化（アナログ）をサンプリングで離散（デジタル）化することによる情報欠落が原因である。1ピクセルの幅よりも細かく情報が変化する部分では、ピクセル単位でその変化を表現しきれず、情報が間引かれる結果として、画質の劣化が生じる。

図3にエッジのギザギザの発生原因を示す。左図の原画像をデジタル画像で表現する事を考える。画像領域を格子状の細かいピクセルに分割し、各ピクセル中央のサンプル点での色を求め、その色をピクセルの色として代表させると、結果は右図のようにエッジが階段状に表現される。

図3 エッジのギザギザの原因

3. 既往のアンチエイリアシング技術

CG 画像のエイリアシングの問題を改善する技術はこれまで多くの研究があり、国際コンピュータ学会 ACM のグラフィックス部門の学術論文誌である「Computer Graphics」や「ACM Transactions on Graphics」などを中心に発表されている。それらの研究は解析的アプローチと離散化アプローチに大別される。

解析的アプローチは、画像の中でエイリアシングの発生する要因に対して、図形処理的に予めエイリアシングの発生する箇所を解析し、その箇所にフィルタをかけてエイリアシングを消去しようとする試みである。このアプローチは、高速に処理できる長所があるが、物体のエッジ^{3),4),5),6),7),8),9),10)}や表面模様^{11),12),13),14)}といった特定のエイリアシング要因を改善するもので、それ以外の要因（影や反射など）を含んだ複雑な画像には対応できず、適用範囲が限定的である。

一方の離散化アプローチは、1ピクセル内をさらに細かく分割してサンプリングすることによってピクセル内に埋もれている情報を抽出しエイリアシングを消去しようとする試みである。このアプロ

ーチは、計算時間の増大を招くが、エイリアシング発生要因に関知しないので任意の画像に適用できる汎用性がある。また、解析的な複雑な処理によらずサンプル数を増やすだけでありアルゴリズムが単純であるという長所もある。サンプリング方法には、均等サンプリング¹⁵⁾と確率的サンプリング^{16),17),18),19),20),21),22)}がある。

本研究は、CG 画像全般に汎用的に適用できる高速化手法の実現をめざしているため、解析的アプローチではなく離散化アプローチを採用している。

なお、アンチエイリアシング技術には、これらのソフト的な方法以外に、ハードウェアによって処理する技術^{23),24),25),26)}もある。ハードウェアによる手法はゲームのようなリアルタイム CG のための技術であり、本研究で対象としているソフトウェアによる高品質 CG の制作のための技術とは目的やアプローチが異なる。

以下に、本研究で採用している離散化アプローチの既往技術の概要を示す。

3.1 均等スーパーサンプリング法

エイリアシングの発生は、サンプル数の不十分さが原因であるので、サンプル数を増やすことによってエイリアシングが改善される。図3では、各ピクセルに対してサンプルは1点であるが、これに対して、ピクセルをさらに格子状のサブピクセルに分割し、サブピクセルごとにサンプル点を取り、それらの点での値の平均値をピクセルの値とする手法が均等スーパーサンプリング法¹⁵⁾である。

図4に均等スーパーサンプリングの様子を示す。図4左図は、図3右図の左上端の1ピクセルを拡大したものである。1ピクセルが36のサブピクセルに分割されている。この手法では、複数のサンプル点の色の平均値をピクセルの色とするので、図4右図のように各ピクセルは色の境界部分で中間の色を持つようになる。図3右図でピクセルの色が白又は黒のいずれかであるのと比べて、色が滑らかに変化している。

図4 均等スーパーサンプリングによるエッジの平滑化

図5にスーパーサンプリング法によるCG画像作成処理全体の流れを示す。左図がメインルーチンで、右図がレイトレーシング法²⁸⁾により影、反射、表面模様などを考慮してサブピクセルの色を計算するルーチンである（本稿はレイトレーシング法が論点ではないので、右図は基本的な流れのみを簡略的に示している）。この右図の処理を本稿では「色計算」ルーチンと呼ぶ。

(a)は画像の格子状のピクセルのループで、点線部分がスーパーサ

ンプリング処理である。各ピクセルをさらに分割したサブピクセルごとに(b)、「色計算」ルーチンを実行して色を求め(c)、各サブピクセルの色を平均して(d)、ピクセルの色を求める。

図5 スーパーサンプリングによる画像作成の流れ図

3.2 確率的スーパーサンプリング法

均等スーパーサンプリング法は、サンプル点が格子状に規則的に並んでいるが、規則的な間隔のサンプリングでは、いくらサンプルを多くとってもエイリアシング発生を完全に解決することはできない。そこで、スーパーサンプリング時に、図4左図のようなサブピクセル中央点でのサンプリングではなく、図6のように乱数によってサンプル点の位置を乱して不規則にする方法が、確率的スーパーサンプリング法^{16),17),18)}である。図2のような不正な縞模様は、模様の周期性とサンプリングの周期性の干渉が原因であるので、サンプリングの周期性をくずせば縞の発生を解消できる。

この時に、サンプル数を固定するのではなく、サンプル数を次第に増やしていきながら値の収束状況を調べ、収束したと判断した時点でサンプリングを打ち切る漸進確率サンプリング法^{19),20),21),22)}も考案されている。

3.3 スーパーサンプリング法の計算時間の問題

既往のスーパーサンプリング法の問題は計算負荷の増大である。サブピクセルの数を増やすほど画質は向上するが、それに比例して計算時間も増加する。例えば、4×4のサブピクセルで計算すると、スーパーサンプリングしない場合に比べて16倍の計算時間がかかる。効率的なCG制作のためには、アンチエイリアシング処理を高速化する方法が重要である。

確率的サンプリングは均等サンプリングよりもさらに計算時間がかかる。レンダリングの高速化手法として、スキャンライン法²⁷⁾とレイトレーシング法²⁸⁾の統合技術^{注3)}があるが、確率的サンプリングをおこなうと、この統合技術が使えなくなる^{注4)}からである。確率的サンプリングは、ハリウッドのCG映画制作のように、計算

図6

時間はいわず究極の品質を求める場合には適しているが、建築分野でのCGでは計算時間の効率も重要な要素であり、確率的サンプリングを利用することは現実的でない。

4. アンチエイリアシング高速化の新アルゴリズム

本研究は、建築分野のCGの制作を前提にしているため、計算時間に不利な確率的サンプリング法を採用せず、均等スーパーサンプリング法を拡張してアンチエイリアシングを高速処理する新アルゴリズムを提案する。

4.1 新アルゴリズムの着眼点

画像の中でエイリアシングが発生するのは、色の急激な変化箇所であるが、図1を見ても分かるように、画像の大半の部分は色の急激な変化はなく、この部分にスーパーサンプリングを行っても計算時間がかかるだけで画質には影響しない。そこで、「エイリアシングの発生するエッジを抽出し、そのエッジ箇所にだけスーパーサンプリングを行う事によって画質を低下させずに高速化する」のが新アルゴリズムの第一の着眼点である。

画像の各ピクセルの色は、影、材質模様、反射像といった様々な成分の重なりで構成されており、同じピクセルでも成分ごとにアンチエイリアシング処理の必要性は異なる。例えば、模様がマッピングされた面に影が生じている場合、影内部のピクセルでは、模様成分にはアンチエイリアシングが必要でも、影成分には必要ない。そこで、「エイリアシングを一律に捉えるのではなく、その発生要因に注目し、同じピクセルの中でも必要な成分にだけスーパーサンプリングを行う」のが、新アルゴリズムのもう一つの着眼点である。

つまり、エイリアシング発生「場所」と「成分」を特定し、必要な部分だけにピンポイントでスーパーサンプリングする点に高速化の独創性がある。以下に新アルゴリズムの流れを示す。

4.2 物体エッジのアンチエイリアシング

まず、画像の中で物体のエッジ部分を抽出して、物体エッジのアンチエイリアシングをおこなう。本研究では、物体エッジの抽出方法として、サブピクセルの面番号(サブピクセルでの可視面の識別番号)を使用する方法を考案した。各サブピクセルの面番号は、そのレンダリングの前処理としてスキャンライン法によって高速に求めることができる。この面番号を利用し、「ピクセル内のサブピクセルの面番号が同一でない場合にのみスーパーサンプリングを行う」ようにする。これにより物体エッジの存在しないピクセルのスーパーサンプリングが省略され処理が高速化する。図7にその様子

図7 物体エッジの判定

を示す。このピクセルでは、面番号1のサブピクセルと面番号2のサブピクセルが混在しているので、このピクセル内に物体のエッジが存在すると判定しスーパーサンプリングを行う。

なお、透過物体の場合は、一つのサブピクセルに複数の面番号が存在するので、サブピクセルごとに透過で見えるすべての面番号を保存して判定要素として使う必要がある。

図8 (640×400 ピクセル、4×4 サブピクセル) の計算時間は、均等スーパーサンプリング法では24秒^{注2)}であったが、新アルゴリズムでは4秒^{注2)}で、6.0倍の高速化であった。両手法で画質の違いはない。図9は、図8の計算でスーパーサンプリングされたピクセルを黒で表示したものである。この図から、物体のエッジが適切に抽出されていること、スーパーサンプリングされたピクセルが画像全体のごく一部であることがわかる。これが、新アルゴリズムによって画質を劣化させずに高速化が実現する理由である。

図8 物体エッジのアンチエイリアシング

上記のアルゴリズムは、さらに改良することができる。モデルによっては、一つの面が三角形に分割されている場合や、地形のように曲面が細かい面の集まりで表現されている場合がある。このような

図9

モデルでは、面のエッジは見えない（又ははっきりとは見えない）ので、この面とおしは擬似同一面とみなして、スーパーサンプリングする箇所をさらに絞り込むことができる。そこで、「同一面番号でなくても、同じ材質で同じあるいは近い向きの面は、同一面番号である」とみなす。二つの面の向きが近いかどうかの判定は、両面の垂直ベクトルのなす角度によっておこなうことができる。

4.3 影のエッジのアンチエイリアシング

上記の判定法は、物体のエッジのエイリアシングのみを解消する方法であり、この方法を使って作成した画像は、物体のエッジは平滑化されるが、影のエッジはギザギザのままになる（図10）。同一面であれば影の有無に関わらずスーパーサンプリングを省略するためである。そこで、影のエッジを抽出してスーパーサンプリングする新たな方法が必要となる。

新アルゴリズムでは、影のエッジ部分を抽出する方法として、ピ

クセルごとに影の重複する回数を記憶しておき、「隣接の四つのピクセルで影の重複回数が異なれば影のエッジであるとみなし、このピクセルをスーパーサンプリングする」ようにした（図11）。

図11を640×400ピクセル（サブピクセル4×4）のサイズで計算すると、均等スーパーサンプリング法では41秒^{注2)}であったが、新アルゴリズムでは6秒^{注2)}で、6.8倍の高速化であった。両手法で画質の違いはない。均等スーパーサンプリング法では影計算によって計算時間が17秒増加（図8の計算からの増加量）しているが、新アルゴリズムでは2秒しか増加していない。図12は、図11の計算でスーパーサンプリングされたピクセルを黒で表示したものであるが、図12と図9を比べて黒の部分があまり増加していないことが、影を計算しても計算時間があまり増加しない理由である。

図10^{注1)} 平滑な物体エッジとギザギザの影エッジ

図11^{注1)} 影エッジのアンチエイリアシング

この影エッジ判定のアルゴリズムは、通常の場合は問題ないが、隣接する四点のピクセルの情報で判定しているため、影の幅が1ピクセル以下のような非常に細かい影は識別できないという限界がある。

図12

しかし、物体のエッジの明瞭性に比べて影のエッジはあいまいであるので、物体のエッジほどの厳密な処理をほどこす必要はない。エッジの明瞭度に見合った計算精度を使い分けるという意味で、妥当な方法と言える。

4.4 反射像のエッジのアンチエイリアシング

鏡面での反射像のエッジもエイリアシング発生要素であり、反射像についても新たなアンチエイリアシング処理のアルゴリズムが必要である。

本研究のアルゴリズムでは、スキャンライン法の情報を計算高速化に利用しているが、スキャンライン法は鏡面での映り込みが扱えないので、反射像のエッジのアンチエイリアシングの高速化には利用できない。そこで、「鏡面については、反射像のエッジ部分を抽出せず、すべてスーパーサンプリングする」ようにする。その結果を図13に示す。

図13を640×400ピクセル（サブピクセル4×4）のサイズで計算すると、均等スーパーサンプリング法では61秒^{注2)}であったが、新アルゴリズムでは29秒^{注2)}で、2.1倍の高速化であった。両手法で画質の違いはない。

図13^{注1)} 反射像のアンチエイリアシング

このアルゴリズムは、画像における鏡面部分の面積が少ない場合には高速化に寄与するが、鏡面部分が多くを占める画像ではあまり高速化が期待できない限界がある。そこで、広い鏡面領域を含む画像を高速化したい場合には、画質を犠牲にすることになるが、「鏡面ではすべてスーパーサンプリングせず、隣接する四つのピクセルの鏡面反射成分を平均化してアンチエイリアシングする」方法も選択肢に加える事ができる。この方法は、反射のエッジ部分の画質を低下させるが、影や模様といった他の成分の画質には悪影響を及ぼさない。

図14^{注1)} スーパーサンプリングなしの反射像

図14にこの方法で作成した画像を示す。図14を640×400ピクセル（サブピクセル4×4）のサイズで計算した計算時間は7秒^{注2)}であった。図13と比べて、反射像のエッジ部分が若干ぼやけたように表示されているが、計算時間は大幅に改善している。

4.5 材質の模様のアンチエイリアシング

物体表面にマッピングされる材質の模様もエイリアシングの原因となる。図2の不正な縞模様は、マッピングの模様から生じるエイリアシングの例である。ここまでの手法は、材質の模様については関知しておらず、材質の模様のために新たなアンチエイリアシングアルゴリズムが必要となる。

材質の模様のアンチエイリアシング手法については、MIPマップ法¹³⁾がすでにある。本研究では、基本的にこのMIPマップ法を採用し、それに改良を加えて処理する方法を考案した。MIPマップ法は既往の手法であるので、ここでの詳しい説明は省略し、注5)に概略のみを記している。

図15 MIPマップ法の適用

図15は、図2の画像を既往のMIPマップ法で表現した画像である。遠方での縞模様がなくなり、画質が大幅に改善されている。ただ、MIPマップ法は、注5)で示すように、遠方で画像精度を落としてエイリアシングを消去するアルゴリズムであるので、画像がぼやけた表現になるのが否めない。そこで、本研究では、MIPマップ法にスーパーサンプリング法を組み合わせ、ぼやけを改善する方法を考案した。

マッピングは計算負荷の軽い処理であり、高速化しても全体の計算時間に大きな影響がない。そこで新アルゴリズムでは、「マッピング処理に関してはエッジを抽出せず、マッピングされるすべてのピクセルでスーパーサンプリングを行う」。ここで言うスーパーサンプリングはマッピング処理のみのスーパーサンプリングである点に高速化のアイデアがある。図5を見て分かるように、通常のスーパーサンプリングは「色計算」ルーチン全体をスーパーサンプリングするが、ここでは、「色計算」ルーチンの中の「模様のマッピング」部分だけをスーパーサンプリングし、残りの部分はスーパーサンプリングしない。「色計算」ルーチンで計算負荷がかかるのは、交点計算や影計算などの残りの部分であるため、この部分をはじくことによって、すべてのピクセルにスーパーサンプリングしても高速化が実現する。

このアルゴリズムで問題となるのは、物体処理（4.2節）ではスーパーサンプリングしないがマッピング処理ではスーパーサンプリングする、という状況が発生することである。マッピングするためにはあらかじめ物体処理でマッピングする場所の座標値を求めてお

く必要があり、この状況は、マッピングする時にその配置位置が分からないことを意味する。

この問題を解消するために、4.2 節で活用したスキャンライン法との統合技術^{注3)}をここでも利用する。図7のようにスキャンライン法ですべてのサブピクセルでの可視物体の面番号が計算されているので、この面番号情報からその場所の座標値を逆算する(サブピクセルでの面番号情報を使ってその面の平面方程式を取り出し、その平面と、サブピクセルの位置と視点を結んだ直線との交点を求める)。通常のCG処理の流れでは、3次元空間から2次元の画面へ座標変換(投影)をおこなうが、ここでは、逆に、画面(2次元)から空間(3次元)に座標変換し、元の座標値を推定する。

図16がこのアルゴリズムで作成した画像である。図15と比較して、遠方の模様がより詳細に表現されている。図16(1024×384ピクセル、4×4サブピクセル)の計算時間は、均等スーパーサンプリング法では50秒^{注2)}であったのに対し、本アルゴリズムでは同じ画質で7秒^{注2)}で、7.1倍の高速化であった。

図16 MIPマップ法とスーパーサンプリングの合成

4.6 新アルゴリズムの処理の流れ

図17に新アルゴリズム全体の流れ図を示す。図5と比較して分かるように、図17の(a), (b), (h)の部分が、既往のスーパーサンプリング法から改良した新アルゴリズムの部分である。

下段の「色計算」ルーチンを使って、はじめにピクセル中央点での色を計算する(a)。次にこのピクセルがスーパーサンプリングが必要かどうかを判定する(b)。この判定の中で、(c)が反射像のエッジのための処理(4.4節)、(d)が物体のエッジのための処理(4.2節)、(e)が影のエッジのための処理(4.3節)である。スーパーサンプリングが必要ないと判定された場合(f)は、(a)で求めた色をピクセルの色として使う。必要と判定された場合にのみ、スーパーサンプリングを行う(g)。

材質の模様については、(h)でスーパーサンプリングする。(h)で処理することによって、(a)の時点で模様についてはスーパーサンプリングされるので、(f)でスーパーサンプリングが省略された場合でも、模様についてはスーパーサンプリングされる(4.5節)。

(e)の影重複回数の判定は、(a)の時点で(i)の処理の時に影の重複回数を保存することによって可能となる。そのために、(a)の処理を(b)の前で行っている。

5. 新アルゴリズムの高速化の効果

新アルゴリズムの高速化の効果は、画像の複雑さに大きく影響される。画像の複雑さによってスーパーサンプリングされる領域が変化するからで、エッジの少ない単純な画像ほど高速化の効果が高く

図17 新アルゴリズムの処理の流れ

図 18 アンティエイリアシング高速化アルゴリズムの適用例

なる。そこで高速化の効果を評価するには、実際に建築分野で制作されるようなモデルで計算時間を実測するのが妥当であろう。計算時間測定に使用した画像は図 18 で、このモデルは 28,000 の面と 22 の光源で構成され、ほぼすべての物体の表面に模様がマッピングされている。画像サイズは 1024×768 ピクセルで、サブピクセル数は 1 ピクセルあたり 16 (4×4) を採用している。

この画像作成に要した計算時間は、均等スーパーサンプリング法では 17 分 30 秒^{注 2)}であったのに対し、新アルゴリズムを適用すると 4 分 31 秒^{注 2)}で、3.9 倍の高速化であった。作成された画像の画質は両手法で同等であり、高速化による画質劣化は無い。

新アルゴリズムは、作成する画像のサイズが大きくなるほど、高速化の効果が高くなる特徴がある。図 18 の画像サイズを変更して、均等スーパーサンプリング法（既往アルゴリズム）と新アルゴリズムで計算時間^{注 2)}を測定した結果を表 1 に示す。

大きな画像ほど新アルゴリズムが高速化に有利なのは、画像が大

きくなるほど、エッジが属するピクセルの割合が小さくなり、その結果スーパーサンプリングする領域が少なくなるからである。図 19 にその様子を示す。左図では、エッジ上にあるピクセル（スーパーサンプリングするピクセル：灰色）が全ピクセルの 4/9 (44%)であるのに対して、画像サイズを大きくした（ピクセルを細かくした）右図では、8/36 (22%)に減少している。

図 19 画像サイズによるスーパーサンプリング領域の変化

表 1 画像サイズによる高速化率の変化

画像サイズ (ピクセル)	既往アルゴリズム	新アルゴリズム	高速化率
256×192	1 分 6 秒	34 秒	1.9
512×384	4 分 23 秒	1 分 39 秒	2.7
1024×768	17 分 30 秒	4 分 31 秒	3.9
2048×1536	69 分 52 秒	12 分 21 秒	5.7

6. まとめ

建築分野の CG 制作にとって、エイリアシング現象は画像を劣化させる重大な問題であり避けて通れないが、これを解消するには大きな計算時間を要するのがネックとなってきた。本研究では、高画質を維持したまま高速にエイリアシングを処理する新アルゴリズムを考案し、CG 制作効率を向上させることに成功した。

新アルゴリズムのアイデアは、物体、影、模様、反射といった表現要素ごとにエイリアシングの発生箇所を抽出し、必要部分にのみ

アンティエイリアシング処理を行う、という点にある。既往の方法は、表現要素に関知せず一律にアンティエイリアシング処理しており、これに比べて新アルゴリズムは、処理は複雑になるが、大きな高速化が実現する。

謝辞

本稿執筆にあたり、関東学院大学工学部の山崎均教授から貴重な指摘とご指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

注釈

- 注 1) エイリアシングの違いを分かり易くするために、小さな画像を拡大し、エッジを強調して表示している。
- 注 2) 計算時間は CPU 1.7GHz Petium4 マシンによる測定値である。
- 注 3) CG 制作の主な手法として、スキャンライン法²⁷⁾とレイトレーシング法²⁸⁾の二つがある。レイトレーシング法は、各ピクセルごとに物体との交点計算を処理するのに対して、スキャンライン法は、ピクセルの横方向の集まりであるライン単位で物体との交点計算を一括処理するので、スキャンライン法の方が高速である。一方、反射や影などの表現に関してはレイトレーシング法が勝っている。従って、スキャンライン法でも可能な処理はスキャンライン法を使い、レイトレーシング法でしか表現できない部分にのみレイトレーシングを使うことによって、高度な表現力を維持しながら、大幅な高速化が実現できる。これがスキャンラインとレイトレーシングの統合技術である。
- 注 4) サブピクセルのサンプル点が規則的に配置されていれば、スキャンライン法が使えるが、確率的サンプリング法ではサンプル点が直線上に並んでいないのでスキャンライン法が使えず、すべてレイトレーシング法により計算しなければならない。
- 注 5) MIP マップ法¹³⁾は、図 20 のようにあらかじめマッピングする画像を複数の精度で用意しておき、視点からの距離に応じて最適な精度の画像をマッピングに使う手法である。つまり、視点から近いところには高精度の画像を、遠いところには荒い精度の画像をマッピングする。この時、精度の異なる画像が切り替わる境界で不連続にならないように、両方の画像を混合して滑らかに切り替わる処理を行う。

図 20 精度の異なるマッピング用画像の組

参考文献

- 1) Foley, J., Dam, A., Feiner, S. and Hughes, J., *Computer Graphics Principles and Practice, second edition*, 617-646, Addison-Wesley, 1990
- 2) <http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/aliasing/alias0.htm>, 1993
- 3) Crow, F., The Aliasing Problem on Computer Generated Shaded Images, *Communications of the ACM*, vol.20, no.11, 799-805, November 1977
- 4) Catmull, E., A Hidden-surface Algorithm with Anti-aliasing, *Computer Graphics*, vol.12, no.3, 6-11, August 1978
- 5) Bloomenthal, J., Edge Inference with Applications to Antialiasing, *Computer Graphics*, vol.17, no.3, 157-162, July 1983
- 6) Carpenter, L., The A-buffer, an Antialiased Hidden Surface Method, *Computer Graphics*, vol.18, no.3, 103-108, July 1984
- 7) 柴本, 荒岡, ポリゴン表示におけるエッジフィルタリング法, *情報処理学会論文誌*, vol.29, No11, 1011-1018, Nov. 1988
- 8) Max, N., Cone-Spheres, *Computer Graphics*, vol.24, no.4, 59-62, August 1990
- 9) McCool, M., Analytic Antialiasing with Prism Splines, *Computer Graphics*, vol.29, no.3, 429-436, August 1995
- 10) Guenter, B. and Tumblin, J., Quadrature Prefiltering for High Quality Antialiasing, *ACM Transactions on Graphics*, vol.15, no.4, 332-353, October 1996

- 11) Feibush, E., Levoy, M. and Cook, R., Synthetic Texturing using Digital Filtering, *Computer Graphics*, vol.14, no.3, 294-301, July 1980
- 12) Norton, A., Rockwood, A. and Skolmoski, P., Clamping: a Method of Antialiasing Textured Surfaces by Bandwidth Limiting in Object Space, *Computer Graphics*, vol.16, no.3, 1-8, July 1982
- 13) Williams, L., Pyramidal Parametrics, *Computer Graphics*, vol.17, no.3, 1-11, July 1983
- 14) Cant, R. and Shrubsole, P., Texture Potential MIP Mapping, a New High-quality Texture Antialiasing Algorithm, *ACM Transactions on Graphics*, vol.19, no.3, 164-184, July 2000
- 15) Crow, F.C., A comparison of antialiasing techniques, *IEEE CG&A*, vol.1, no.1, 40-48, Jan. 1981
- 16) Cook, R., Porter, T. and Carpenter, L., Distributed ray tracing, *Computer Graphics*, vol.18, no.3, 137-145, July 1984
- 17) Dippe, M. and Wold, E., Antialiasing through Stochastic Sampling, *Computer Graphics*, vol.19, no.3, 69-78, July 1985
- 18) Cook, R., Stochastic sampling in computer graphics, *ACM Transactions of Graphics*, vol.5, no.1, 51-72, January 1986
- 19) Mitchell, D., Generating Antialiased Images at Low Sampling Densities, *Computer Graphics*, vol.21, no.4, 65-72, July 1987
- 20) Painter, J. and Sloan, K., Antialiased Ray Tracing by Adaptive Progressive Refinement, *Computer Graphics*, vol.23, no.3, 281-288, July 1989
- 21) Kirk, D. and Arvo, J., Unbiased Sampling Techniques for Image Synthesis, *Computer Graphics*, vol.25, no.4, 153-156, July 1991
- 22) Mitchell, D., Spectrally Optimal Sampling for Distribution Ray Tracing, *Computer Graphics*, vol.25, no.4, 157-164, July 1991
- 23) Haeberli, P. and Akely, K., The Accumulation Buffer: Hardware Support for High-Quality Rendering, *Computer Graphics*, vol.24, no.4, 309-318, August 1990
- 24) Schilling, A., A New Simple and Efficient Antialiasing with Subpixel Masks, *Computer Graphics*, vol.25, no.4, 133-141, July 1991
- 25) Molnar, S., Eyles, J. and Poulton, J., PixelFlow: High-Speed Rendering Using Image Composition, *Computer Graphics*, vol.26, no.2, 231-240, July 1992
- 26) http://www.nvidia.com/object/feature_intellisample.html
- 27) Watkins, G.S., *A Real Time Visible Surface Algorithm*, Ph.D. Thesis, UTEC-CSc-70-101, NTIS AD-762 004, Computer Science Department, University of Utah, Salt Lake City, UT, June 1970
- 28) Whitted, T., "An improved illumination model for shaded display," *Communication of the ACM*, 23(6), 343-349, June 1980

(2005年1月21日原稿受理, 2005年7月19日採用決定)