

ボーダー・レイトレーシングの 画質と高速化率

橋本 秋彦

末永 康仁

N T T 電気通信研究所

レイ・トレーシング (RT) [1] は最も忠実性の高いアルゴリズムとして有名であるが、大きな計算コストを要する。我々は、透視投影像を利用してレイトレーシング画素を選択し高速化を図る手法：ボーダー・レイトレーシング (BRT) [5] を提案した。本論文は BRT を速度と画質に関して、RT 及び従来的高速化手法 [3] と比較する実験について述べる。実験の結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 生成画素数を N^2 とすると、高速化率は N に比例する。
- (2) 高速化率はプリミティブの種類や属性に強く依存する。
- (3) 透視投影像の生成時間は無視できる程小さい。
- (4) RT に対する平均の誤差量は $0.2/256$ から $0.3/256$ 程度である。

Border Ray-tracing :

Picture quality and Acceleration rate

Akihiko HASHIMOTO

Yasuhito SUENAGA

NTT Electrical Communications Laboratories

1-2356, Take, Yokosuka, Kanagawa, 238-03 Japan

Ray Tracing (RT)[1] is known as the most accurate rendering algorithm, though it requires a long computation time. Border Ray Tracing (BRT)[5] is an accelerated RT method using perspective images to reduce the number of pixels which really need RT computation.

In this paper, the ability of the BRT is measured in comparison with the standard RT and the previously reported accelerated RT algorithm [3].

Following results have been obtained by the experiment.

- (1) Acceleration rate is almost proportional to N , where $N*N$ is the number of pixels.
- (2) Acceleration rate varies considerably, depending on primitives.
- (3) Perspective image generation time is negligibly small.
- (4) The average error against original RT image is very small: e.g., only from $0.2/256$ to $0.3/256$.
- (5) Though only seldom, degradation occurs for highlighted part. However, this phenomenon is easily removed by small modification in BRT algorithm.

1. はじめに

レイ・トレーシングアルゴリズム^[1]は、自然現象に対し最も忠実な表現能力を持つアルゴリズムとして有名であり、現在も多くの研究者によってその表現能力は更に拡張されつつある。しかし、その強力な表現能力にもかかわらず、他のアルゴリズムと比較するとレイ・トレーシングは余り使用されていない。これはレイ・トレーシングが莫大な計算コストを要求する事による。スーパーコンピュータ、或は近年盛んに研究されている専用コンピュータを用いても画像生成に数十秒以上は要し、実時間生成の可能なスキャンライン法、Zバッファ法に比べるとその差は歴然としている。

レイ・トレーシングの高速化に関する研究は以前から多くの研究者によって行われてきた。今まで提案されてきた高速化手法は、高速化の着目点から、以下の3種類に大別できる。

空間分割型: 1画素当りの交点計算量を削減する方法(プリミティブ存在領域法^[1]、空間分割法^[2])

画素補間型: 補間を用いる方法(画素選択型光線追跡法^[3]、光束追跡法^[4]、ボウダー・レイトレーシング^[5])

併用型: 他のアルゴリズムを併用する方法(Zバッファ法^[6]、スキャンライン法^[7]との併用)

画素補間型に属する手法の特徴は、再帰的な手続きを用いて、画像のいたる部分に存在するコヒーレンシーを最大限に利用する点にある。このため、画素補間型に属する手法は併用型に属する手法と比較して、次に述べる優れた性質を備えている。

- A 1. 生成画像が高精細化する程、高速化の効果が増大する。
- A 2. プリミティブの形状、プリミティブの属性によらず高速化できる。反面、画素補間型に属する手法は補

間による画質の劣下という欠点を持つ。劣下要因を分類すると、

- B 1. 補間で近似した事による誤差
- B 2. 補間の際に生じる見落としやエッジの欠け

に分けられ、特に後者は画質劣下の大きな要因でもある。

2. ボウダー・レイトレーシング

ボウダー・レイトレーシング^[5]は画素補間型に属する手法で、予め物体の透視投影像を作り、これを参照してレイトレーシング適用画素・補間画素の選択を行う高速化手法である。

ボウダー・レイトレーシングは従来の手法(画素選択型光線追跡法^[3])と比較すると、以下の効果が期待される。

- 1) 直接見える物体は必ず透視投影像上に存在するため、補間領域内に治まる様な小さな物体も把握でき、小さな物体の中抜けや、エッジの欠けに起因する画質の劣下を軽減できる。
- 2) より効率の高い画素の選択・補間が行え、レイトレーシングを行う画素数の減少が図れる。
- 3) レイが交差する最初の物体は透視投影像からわかるので、初めの交点計算は1個の物体だけで良い。

今回は、高速化率と画質について様々な条件の元で、ボウダー・レイトレーシング、画素選択型光線追跡法、標準レイ・トレーシングの比較を行った。

3. 実験

実験環境、及び画像データの概要を以下に示す。

使用言語	C
C P U	VAX11/780+FPA
色階調	R,G,B 各 8 b i t

今回の実験に用いたプログラムは、プリミティブ存在領域法、空間分割法など他の高速化手法を併用していない。実験に用いた3種類の画像データA、B、Cの詳細をTable 1に示す。

ボーダー・レイトレーシングの補間の可否判定は、選択した4点をレイトレーシングした結果、4点の輝度値の分散が補間判定輝度値 Δ 以下、かつ、4点の交差履歴が総て等しい場合に補間可能とする。

なお、アルゴリズム^[7]は過去に発表したものから若干変更された。主な変更点は、

1. 2領域を別々に補間判定する場合、補間可能な領域は補間する。従来は2領域が同時に補間可能でなければ再分割をしていた。
2. 補間の判定条件のうち、輝度値判定は4点の輝度値の分散の大小で比較する。従来は輝度値と輝度平均値の差の大小で比較していた。

写真1(文末)に、画像データAの $N = 256$, $\Delta = 4, 8, 16, 32, 64, 128$ における生成画像とレイトレーシング点を、ボーダー・レイトレーシングと画素選択型光線追跡法について示す。

3-1. 画素数による高速化率の変化

生成画像の一辺毎の画素数を N として、 $N = 128, 256, 512, 1024$ の画像生成を行った。補間判定輝度値 $\Delta = 16$ である。

図1に、標準レイ・トレーシングとボーダー・レイトレーシングの N による生成時間を示す。

図2に、標準レイ・トレーシングの生成時間に対する高速化率を示す。

図3に、 $\Delta = 16$ におけるレイトレーシング画素の全画素に対する割合を、ボーダー・レイトレーシングと画素選択型光線追跡法について示す。

図4に、透視投影像生成時間の全時間に占める比率を示す。

考察

図1より、標準レイ・トレーシングは N^2 乗で生成時間が增大する(全画素数と画像の生成時間が比例する)のに

Table 1 Experiment data A, B, C

primitive data	A	B	C
plane (mirror)	2	0	57
ball (mirror)	1	49	0
total	4	50	71

(Relative CPU time)

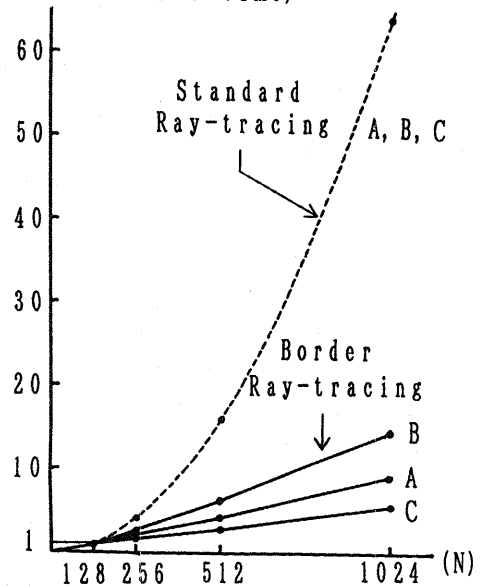


Fig. 1 Relative CPU time ($\Delta=16$)

(Relative acceleration rate)

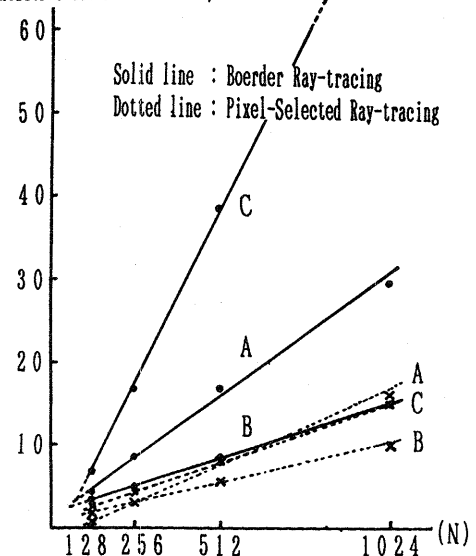


Fig. 2 Relative acceleration rate Vs Standard Ray-tracing ($\Delta=16$)

対して、ボーダー・レイトレーシングはNに比例する(全画素数の1/2乗に生成時間が比例する)事が判る。

これは図2が示す様に、高速化率がNに比例して増大する事による。この効果は画素選択型光線追跡法にも見られ、画素補間型に属する高速化手法の示す共通の性質と言える。空間分割型や併用型に属する高速化手法にこの効果はない。

ボーダー・レイトレーシングは画素選択型光線追跡法と比較すると、4割から5倍程度高速である。これは、ボーダー・レイトレーシングが透視投影像を参照して効率よくレイトレーシング画素を選択するからである(図3)。

その他の高速化の効果として、透視投影像の書き込み情報を利用して交点計算量を削減する効果がある。即ち、レイの追跡時において初めの交点計算だけは、透視投影像の情報から1回で済む。この効果はプリミティブ数が多い程顕著となり、陰影のみをつける場合は最大で2倍高速化される。

ボーダー・レイトレーシングの透視投影像生成時間のオーバーヘッドはほとんど無視できる。この時間はNに従って増大するが、図4よりN=1024の場合でも、ボーダー・レイトレーシング実行時間の1~5%しか占めない事が判る。

3-2. 補間条件による誤差量の変化

誤差量errの定義を次のように定める。

$$err = \frac{1}{3} (|r-r_0| + |g-g_0| + |b-b_0|)$$

ただし、(r,g,b)は実験画像の画素値、(r₀,g₀,b₀)は同座標の標準レイ・トレーシングの画素値とする。

図5に、N=512において補間判定輝度値Δを変化させた場合の誤差量とレイトレーシング選択画素数の関係を示す。

図6に、データBのN=512, Δ

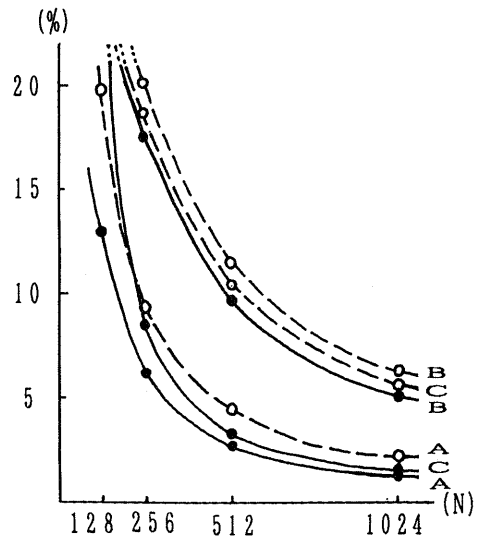


Fig. 3 Ray-traced area ($\Delta=16$)

Solid line : Border Ray-tracing
Broken line : Pixel-selected Ray-tracing

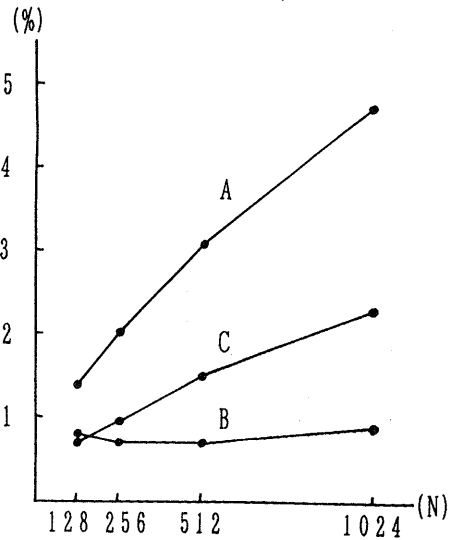


Fig. 4 Perspective image synthesizing time rate ($\Delta=16$)

= 16におけるボーダー・レイトレーシングと、画素選択型光線追跡法の誤差分布グラフを示す。

考察

誤差量は、Δが増大するとあるレベルから急激に多くなり、一定の誤差量に達するとその後は増えない。この飽和現象が存在するのは、Δがあまり大

きくなると、補間判定がほとんどレイトレース時の交差履歴によって決まるせいである。画像Cの様に輝度変化の小さな画像では、初めから補間判定が交差履歴によって決まるため、ほとんど誤差量に変化がない。

一方、レイトレース適用画素数は、 Δ が増大するに従って初めは急激に、そして次第に緩やかになりながら一定の値に集束する事が示された。この一定の値に集束する理由も誤差量の場合と同じである。

図5より、少ない誤差量とレイトレース適用画素数を両立させる Δ が存在する事が判る。この最適な Δ の値は画像によって変わり、予測をつける事が難しい。本実験で用いた標準値 $\Delta = 16$ は、どの画像の最適値にも比較的近いものである。

ポーター・レイトレーシングは、画素選択法より補間画素数が多いにもかかわらず、パラメータや画像データの種類によっては、むしろ誤差量が小さい事もある。この理由は両者の輝度値差判定方法の違いにある。即ち、前者は分散の大きさで判定するのに対して、後者は平均値との差で判定する事による。

ポーター・レイトレーシングの $\Delta = 16$ における1画素当りの平均誤差量は0.3階調に過ぎない。しかし、図6より、僅かではあるが10階調以上の誤差を持つ部分が存在する事が判る。

この誤差は以下に説明するメカニズムで発生する。

今、図7(a)の様に極めて小さい球上の4点にレイが当たったとする。たまたま4点の輝度値が等しい場合、交差した物体が同じ球なので交差履歴も等しく補間をしてしまう。その結果、図7(b)の様にハイライトの抜けが生じる。

この画質劣下の現象は、輝度レベルで画素を補間する全ての手法^{[3][5]}に

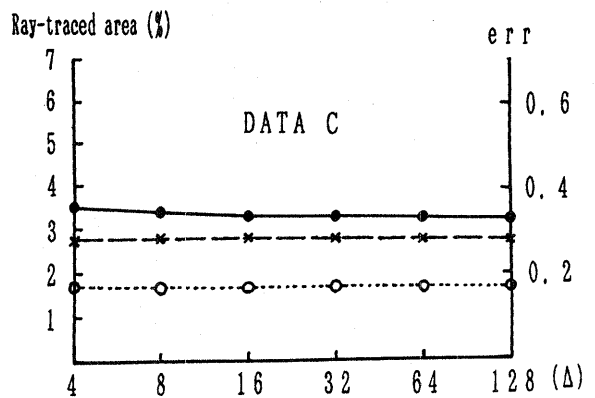
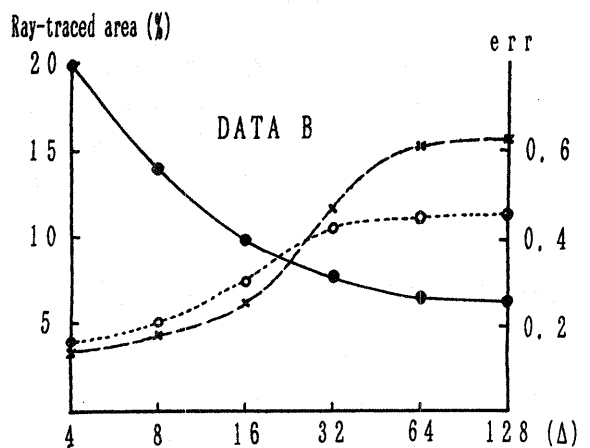
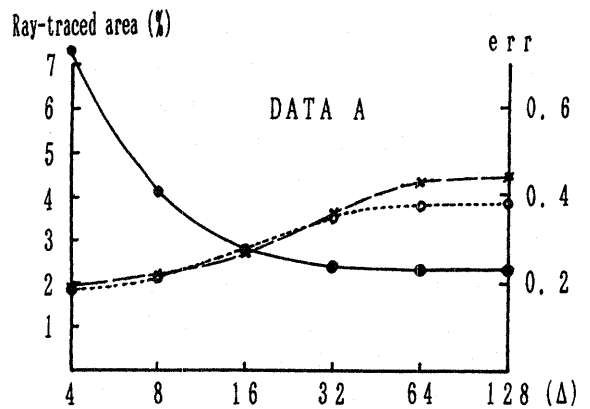


Fig. 5 Error rate and Area of ray-traced pixels

Solid ball and Solid line : Area of ray-traced pixels (Border Ray-tracing)
 Cross and broken line : Error rate (Border Ray-tracing)
 Blank ball and dotted line : Error rate (Pixel-selected Ray-tracing)

存在するものであり、従来の輝度値と交差履歴のみを比較する判定方法では除去できない。除去するためには、各々のレイの反射角の情報を何等かの形で判定に用いる必要がある。

5. まとめ

実験結果より以下の事が判った。

1. 高速化率は表示画素数 N^2 に従って増大し、増加率は $O(N)$ である。
2. 高速化率はプリミティブの種類に強く依存し、平面ではその効果が大きい。
3. 透視投影像の生成時間は無視できる程小さい。 N の増大に伴って透視投影像の生成時間が全体に占める割合は増加するが、 $N = 1024$ の場合でも、全生成時間の 1~5% である。
4. 輝度差判定値 $\Delta = 16$ の場合、誤差量は 1 ピクセル当り、 0.2~0.3 階調である。
5. ハイライトが欠ける画質劣下が存在し、補間判定が輝度値と交差履歴の比較だけでは防止できない。

近年、CG が医用画像、映画、ハイビジョン、印刷広告に用いられるにつれて、高速・高精細化の要求は益々高まってきている。従って、今後ボーダー・レイトレーシングなど画素補間型に属する高速化手法は、空間分割型と並ぶ有力な高速化手法となるだろう。ただし、そのためには画質劣下に関する検討が更に必要と思われる。

ボーダー・レイトレーシングは、平面主体の画像を生成する場合に著しい高速化の効果を発揮する。従って、Border Reps 表現で記述された画像データを生成する場合、特に有効であると考えられる。更に、スムーズシェーディングをアルゴリズム内に取り入れる事ができるならば、ボーダー・レイトレーシングを用いる事によって、スキ

ャンライン法の代わりにレイ・トレーシングを統一的に用いる事も可能である。

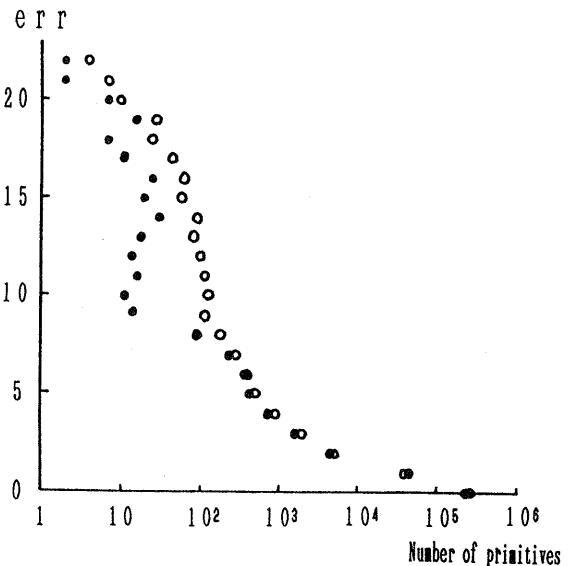


Fig. 6 Distribution of error rate
Only red pixels of data B

Solid ball : Border Ray-tracing
Blank ball : Pixel-selected Ray-tracing

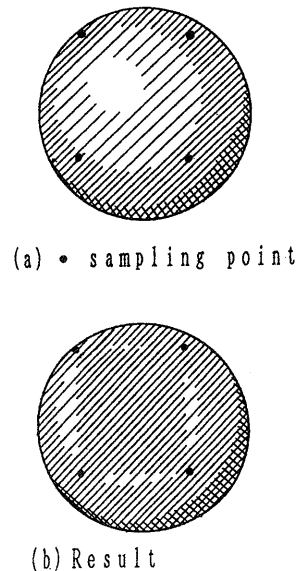


Fig. 7 The lack of highlight
on the very small ball

6. 今後の課題

補間判定に、レイの反射角・交点上の物体の曲率・ハイライト係数、入射光の方向などを取り入れ、ハイライトの欠けを防止する必要がある。

また、影や鏡に映り込んだ物体も含めて透視投影像を生成した場合の高速化率と画質を評価する必要がある。

(謝辞)

日頃熱心な御検討を頂く研究グループの皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1 T. Whitted: "An improved ...", CACM, vol. 23, no. 6, pp343-349, '80
- 2 藤本: "レイトレーシング"の高速化技法について ...", PIXEL, no. 37, pp98-107, Oct, '85
- 3 秋本, 間瀬: "画素選択型光線追跡法", 信学論, vol. J69-D, no. 12, pp1943-52, '86
- 4 新谷, 高橋, 内藤: "光束追跡法による ...", 第33回情処全大, 4Q-4, pp2111-2, '86
- 5 橋本, 間瀬, 秋本: "ホーター・レイトレーシング"法", 信学会, PRU86-110, '87
- 6 H. Weghorst, ...: "Improved comp-...", ACM Tr. on Gr., vol. 3, no. 1, pp52-69, '84
- 7 多田村, 中前, 西田: "局所レイトレーシング"による...", 信学会, グラフィックスとCAD19-2, '85

$\Delta=4$

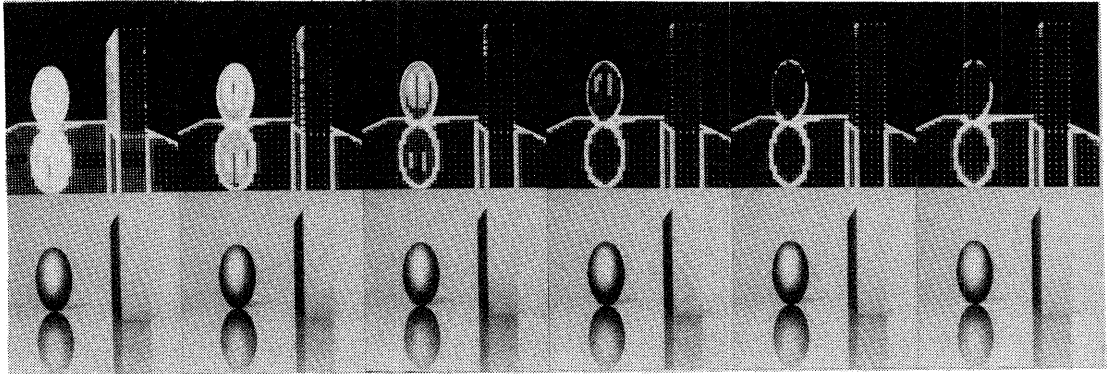
$\Delta=8$

$\Delta=16$

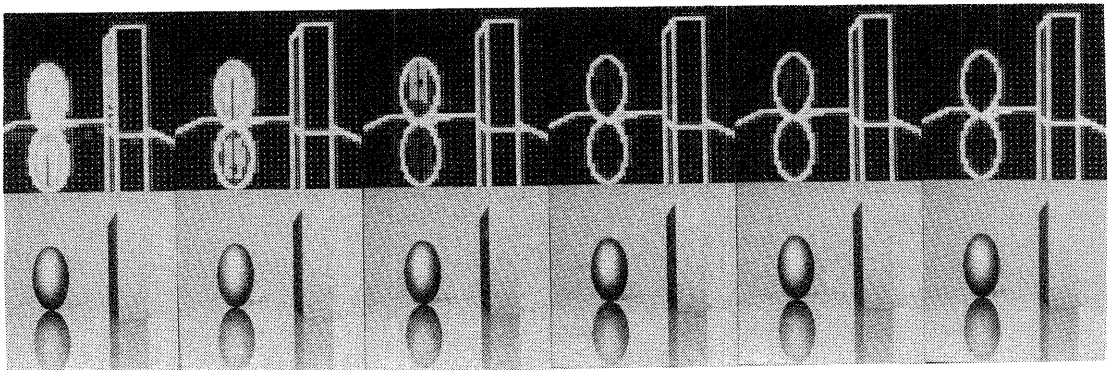
$\Delta=32$

$\Delta=64$

$\Delta=128$



Border Ray-tracing



Picture 1

Pixel-selected Ray-tracing