

光線追跡法における領域分割のための基礎検討

富澤 良明[†], 河合 善之[†], 岡田 稔^{††}

[†]名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻, ^{††}名古屋大学情報処理教育センター

あらまし 光線追跡法はリアルなコンピュータグラフィクスを生成するには有力な手法の一つである。しかし、各ピクセル毎にサンプリングをするため莫大な計算量を必要とする。本論文では光線追跡法における計算量削減のために、スクリーンを光線追跡木のコヒーレンスに基づいて分割する。本手法では、ビームトレーシング法で用いられていた線形近似による屈折変換を Snell の法則に基づいて改良した屈折変換を導入し、この変換を用いた領域分割を行なった。これにより、光線追跡法の大幅な高速化とビームトレーシング法に比べ、より正確に物理法則に従う画像を生成することが可能である。

A Basic Investigation of a Region Segmentation in Bundled Light Tracing

Yoshiaki TOMIZAWA[†], Yoshiyuki KAWAI[†] and Minoru OKADA^{††}

[†]Dept. of Information Electronics, Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{††}Education Center for Information Processing, Nagoya University

Abstract The ray tracing is one of the most useful tools to create a realistic CG(Computer Graphics) image. However it needs an enormous calculate time, because it takes a pixel-by-pixel sampling. We divided the screen into coherent reagonis based on ray tree coherences, so that we can reduce the calculate time in ray tracing. In this method, we introduce the refraction transformation improved the linear approximate refraction transformation in the Beam tracing, based on the Snell's law. We propose a region segmentation method using this refraction transformation. This enables the ray tracing to create image in high speed with more physical fidelity.

1 はじめに

光線追跡法 [1] はリアリティの高いコンピュータグラフィクスを生成するには有力な手法の一つである。光線追跡法においては視点とスクリーンの各画素とを結ぶ光線でサンプリングするため莫大な計算量が要求される。このことが光線追跡法の大きな欠点の一つとしてあげられる。

これまで光線追跡法の高速度手法として、バウンディングボリュームを用いた手法やボクセル、オクトリ [2] を用いて空間を分割して管理する手法などが用いられてきた。これらの手法は交差判定の回数を削減することを目的としている。また、他の手法としてビームトレーシング法 [3] がある。この手法はサンプリング数そのものを削減することを目的としている。

本研究では光線追跡法の高速度手法としてビーム

トレーシング法を改良し、スクリーン上を光線追跡の軌跡(光線追跡木)が同じであるいくつかの領域に効率的に分割し、各分割領域で数本の光線を追跡することにより画像を生成する。本論文では特にこのための領域分割法について基礎検討を行なう。

本研究とビームトレーシング法との主要な相違点はビームトレーシング法において用いられている屈折変換は線形近似変換(tangent law)であるのに対して、本研究では Snell の法則に基づいて屈折変換を行っていることである。これにより、ビームトレーシングにおける入射光は垂直もしくはその周辺であるという条件がなくなり、臨界面による全反射も考慮することが可能となる。尚、文献 [3] では述べられていないアルゴリズムの詳細を本論文で明らかにする。

また、ビームトレーシング法では触れられていない多角形の優先権についても考察する。

2 領域分割法

光線追跡木の深さ（以下、レベルと呼ぶ）が1（反射、屈折なし）における領域分割の例を図1, 2に示す。図1はチェックの板の上に六面体の不透明物体が乗っている状況である。これをスクリーン上で光線追跡木が同じとなる領域で分割すると図2の様になる。ここでは、背景も含めて7つの領域に分割されている。

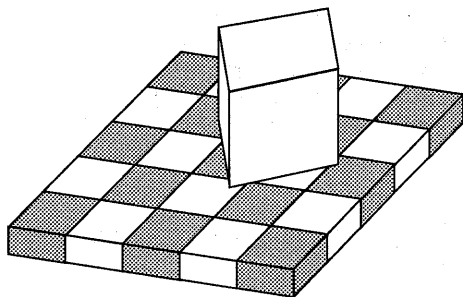


図1: 定義物体の一例

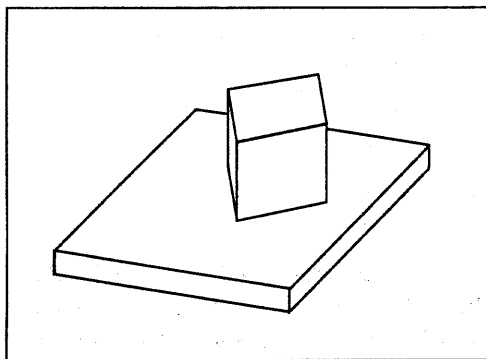


図2: 図1のレベル1における分割例

2.1 領域分割の基礎戦略

2.1.1 前提条件

本論文で提案する手法には以下の前提条件がある。

1. 定義物体はすべて平面多面体であること。
2. 無限平面は存在しないこと。すなわち、多角形のエッジを形成する頂点が存在すること。

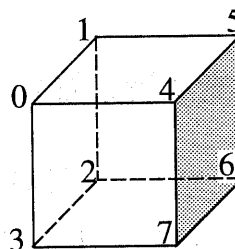


図3: 注目多角形

2.1.2 アルゴリズムの流れ

透明な六面体を一例にあげ、アルゴリズムの流れを説明する。また視点の位置は観測者の視点であり、レベル1における物体は図3の実線で示す通りである。

以下、頂点がある平面に反射して写り込んでいる点の座標を求めることを反射変換と呼び、またある平面を通して屈折して見える点の座標を求めることを屈折変換と呼ぶことにする（2.2参照）。

1. 定義された物体の全ての頂点（図3では頂点0,1,2,3,4,5,6,7）を求める。
2. レベル1における可視多角形（図3では四角形0154,4567,0473）を全てを見つける。これはそれぞれの多角形の法線ベクトルとそれぞれの多角形からの視線方向ベクトルとの内積をとればよい。内積の値が正ならば可視、そうでなければ不可視多角形となる。
3. 2で見つけた全ての可視多角形の中から一つの可視多角形に注目する（図3では頂点4567からなるグレーの四角形）。その注目した多角形（以下、注目多角形と呼ぶ）を含む無限平面による半空間領域において視点と異なる領域の頂点（図3では頂点0,1,2,3）を屈折変換し（図4）、同じ領域の頂点（このレベルにおいて図3では存在しない）を反射変換する。このとき、注目多角形を含む無限平面上にある頂点（図3では頂点4,5,6,7）はどちらの変換も施さない。
4. 屈折、反射変換により新しく生成された頂点（図4では0',1',2',3'）と多角形上の従来の頂点

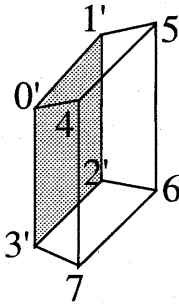


図 4: 屈折変換

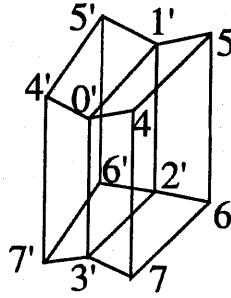


図 5: 反射変換

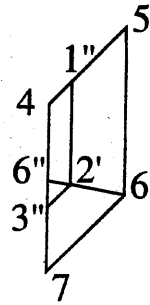


図 6: クリッピング

(図4では4,5,6,7)により、新しく多角形(図4では四角形 $0'1'2'3'$, $2'1'56$, $3'2'67$, $3'0'47$, $0'1'54$)が生成される。

- 新しく生成された多角形の一つを次の注目多角形(図4では頂点 $0', 1', 2', 3'$ からなるグレーの四角形)とし、3と同様に注目多角形を含む無限平面による半空間領域において視点と同じ領域の頂点(図4では頂点4,5,6,7)を反射変換(図5)し、異なる領域の頂点(図4では存在しない)を屈折変換し、注目多角形を含む無限平面上の頂点(図4では頂点 $0', 1', 2', 3'$)はどちらの変換も施さない。

- 3~5の操作を全ての可視多角形について再帰的に行なう。
- 以上の操作により生成された全ての頂点をスクリーンに投影し、それぞれのレベルにおける注目多角形でクリッピングを行ない領域分割は終了する。

ここで、再帰は次の条件をもって終了する。

- 木の深さがあらかじめ決めておいた最大値を越えたとき。
- 分割された領域が完全拡散面または無限遠領域であるとき。

2.2 反射変換, 屈折変換

二つの点 A, B と物体との一つの境界面(平面 X)がある状況を考える。図7は視点と点 A (点 B)を含み、境界面(平面 X)に垂直な平面における断面図である。このとき視点からは点 A, B は図7の点

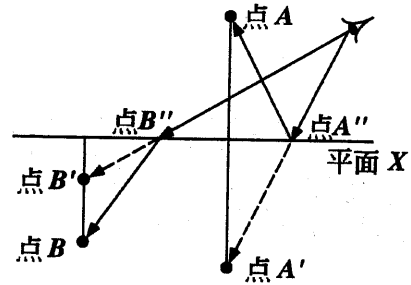


図 7: 反射変換と屈折変換

A', B' にそれぞれあるように見える。点 A' の座標を求めるために平面 X に関して点 A を反射変換すると本論文では表現し、点 B' の座標を求めるために平面 X に関して点 B を屈折変換すると表現する。また図7における点 A'', B'' をそれぞれ反射点、屈折点と呼ぶ。

2.2.1 従来法と問題点

平面を界面とする反射変換は、それぞれの頂点をその平面に関して鏡像の位置に写像する線形変換である。

屈折変換は Snell の法則に従うため、一般的には線形変換ではない。そこで、Heckbert は入射光が垂直もしくはその周辺である、すなわち入射角度が小さいときに限るという前提条件により正接則(tangent law)に基づくビームトレーシング法を提案している。ビームトレーシング法における屈折変換は線形近似変換を用いている。そのためその結果として物理的に正しくない画像が生成され得る。例

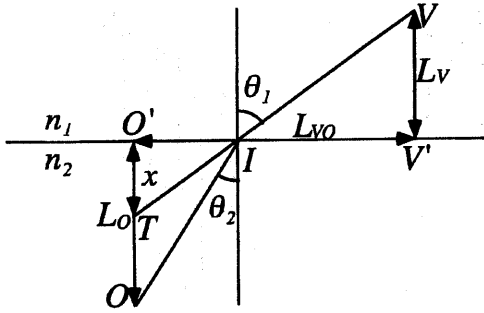


図 8: 屈折変換計算

えば全反射効果は見られない。それは臨界角が存在しないことに由来する。

2.2.2 本手法

本研究では反射変換は従来法通りの頂点を注目多角形に関して鏡像の位置に写像する手法を用いたが、屈折変換には物理的により正確な画像を生成するために Snell の法則により導出した次式を使い、点 T の座標を求める。(図 8 参照)

$$n^2 x^4 + 2n^2 L_V x^3 + \{n^2(L_V^2 + L_O^2) - (L_O^2 + L_V^2)\}x^2 - 2L_O L_V x - L_O^2 L_V^2 = 0$$

ここで、 n は比屈折率 (n_2/n_1)、 V は視点、 O は屈折変換させたい頂点である。

また、 V' と O' はそれぞれ V 、 O を注目多角形上に垂直投影した点であり、 L_V 、 L_O と $L_{V'O}$ はそれぞれ VV' 間、 OO' 間そして $V'O'$ 間の距離である。

また本研究で用いた変換は頂点を変換させ、その頂点間を線で結ぶという直線変換を行なっている。

2.3 全反射に関して

比屈折率が 1 以下のときに全反射が起こる可能性がある。その場合臨界角度 θ_c を屈折率から求める。そして注目多角形の法線ベクトル \vec{m} と視点と注目頂点とを結ぶ方向ベクトル \vec{l} とのなす角 θ を求める。すなわち比屈折率が 1 であると仮定したときの入射角を求める。それが臨界角度以上であれば全反射が起こると仮定する (図 9 参照)。

この手法は物理法則に正確に従っているわけではないが、少なくともこれにより全反射の効果を見ることが可能となる。

2.4 シェーディング

分割された領域をどのようにシェーディングするかは、分割された領域の状況によって変わる。ただし、以下の条件にはまだ検討の余地がある。

1. 分割された領域が画素の大きさに対して十分大きいとき

分割されたそれぞれの領域は多角形であるからその多角形の各頂点について光線追跡を行ない各領域の積算減衰率を計算する。(このとき分割された一領域内において積算減衰率は等しい。なぜならそうなるように分割したからである。) その終点が無限遠ならばその分割された多角形領域の色は無遠色で、また終点が背景ならばその終点を頂点とする多角形で背景をクリッピングし、積算減衰率を考慮にいれてマッピングする。

2. 分割された領域が画素の大きさに対して数倍程度のとき

分割された領域の中の一点について光線追跡を行ない、その終点の色とその領域における積算減衰率とからその領域内の画素値を決定する。

2.5 物体が複数または凹物体に関して (多角形の優先権)

ある頂点に注目したとき、その頂点は注目多角形に関して反射変換されるべきなのか、屈折変換されるべきなのか、あるいはこの注目多角形に関しては変換をされないかの判断は、単一物体でかつ凸物体に限ると注目多角形を含む無限平面が作る半空間領域に関してその頂点が視点と同じ領域に存在するか

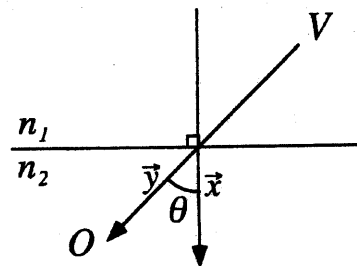


図 9: 全反射条件

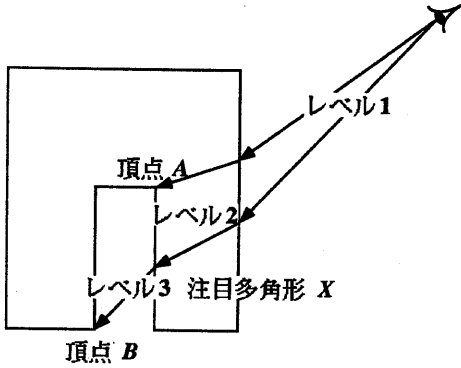


図 10: 凹物体問題

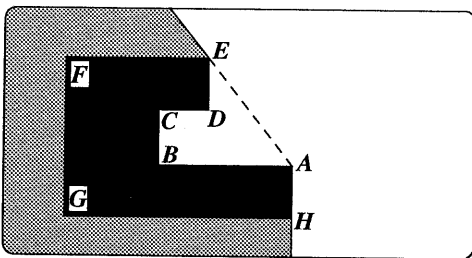


図 11: 不透明物体の可視レベル例

否かを判断するだけで良い。しかし、物体が複数または凹物体になるとそれほど単純な問題ではない。なぜなら図 10 に示す頂点 A と B は注目多角形 X に関して凸物体に限った方法では屈折変換を施されるのであるが、頂点 A はレベル 2 において屈折変換を施されるのに対し、頂点 B はレベル 3 において屈折変換を施された後レベル 2 において屈折変換を施されなければならない。そこで、この問題に関してはあらかじめその頂点の各レベルにおける可視領域をリストアップしておけば良い。その方法として図 11, 12 に示すように視点に関係なく頂点のそのレベルにおける可視領域を求める。

図 11 は頂点 A についての可視領域図であり、不透明凹多面体を真上から見た図である。ここで黒い領域が多面体を表し、白い領域が頂点 A の可視領域を、またグレーの領域は不可視領域を表している。すなわち、図 11 において頂点 A は白い領域でのみ見ることができることを表している。また、図 12 は図 11 の物体を透明にし、同様に真上から見た図であり、白い領域がレベル 1 における頂点 A の可視領域を表し、薄いグレーの領域がレベル 2 における

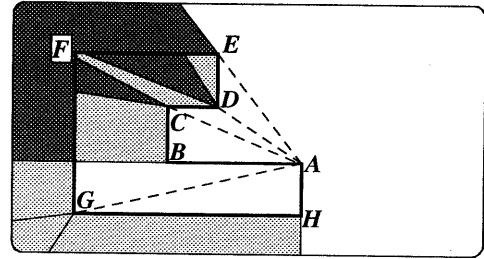


図 12: 透明物体の可視レベル例

可視領域をまた濃いグレーの領域はレベル 2 までの不可視領域を表している。

2.6 物体が複数または凹物体に関して（屈折変換）

この問題は 2.5 の問題と同様に定義物体が複数または凹物体になったとき生じる問題である。それは図 13 における頂点 B の注目多角形 X 上への屈折点 B'' に関してである。頂点 A に関しては視点と頂点 A との間には交差多角形が一つ（注目多角形 X のみ）であるのに対して、頂点 B に関しては視点とそ

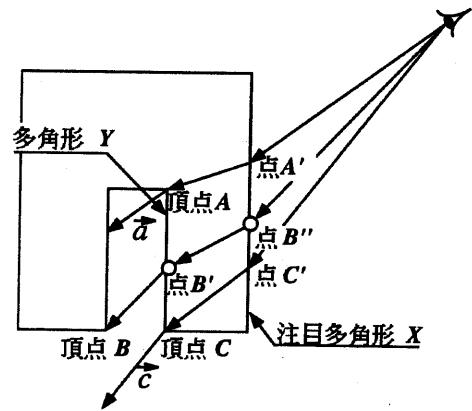


図 13: 屈折変換問題

の間には交差多角形が 2 つ（注目多角形 X と多角形 Y ）がある。今回用いた屈折変換は光線の始点と屈折させたい頂点の座標、それと平面の方程式とから Snell の法則を用いて導いたものである。そのた

めこの場合、点 B'' を探すには B' を見つけなければならない。しかしここで B' を求めるには始点となる B'' が必要となり、計算ができないという問題が生じる。

そこで、ベクトル \vec{a} とベクトル \vec{b} を使ってベクトル $B'B$ を線形補間により求める。そうすることにより頂点 B とベクトル $B'B$ から点 B' が求まり、これと視点から B'' が求められる。

3 実験

実験は定義物体が一つの透明六面体で行なった。この屈折率は1.4でレベルは2である。結果を図14に示す。

この結果は背景を含めてそれぞれの領域が光線追跡木の等しい10の領域(背景を含む)に分割できたことを示している。

また、ビームトレーシング法において入射角が小さくなければならないという条件があったが、本手法ではその条件に縛られないことを示している。

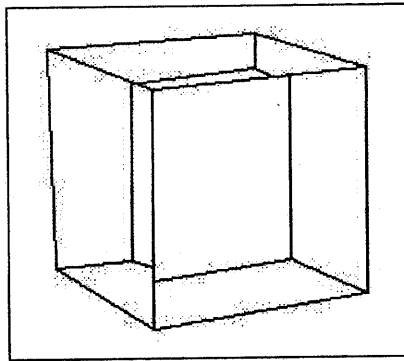


図 14: 分割結果

本実験は画像サイズ 256×256 , 512×512 と 1024×1024 で行なったところ計算時間は同じであった。これは本手法における領域分割の計算時間は画像サイズにはよらないことを示している。SPARC-station10 (SuperSPARC) にて0.06秒であった。

4 まとめ

スクリーンを光線追跡木が同じである領域に分割する一手法を提案した。本手法は Heckbert によっ

て提案されたビームトレーシング法の改良である。本来屈折は非線形であるがビームトレーシング法では入射光は垂直またはその周辺の角度に限定することにより、屈折変換に線形近似を用いた。

本研究ではこの点を線形近似ではなく Snell の法則に基づいて式を導出し、導出した式で屈折変換を行なった。これによってビームトレーシング法より計算量は増加するが、より物理的に正しい画像が生成できる。

また、ビームトレーシング法では説明のなかった多角形の優先権について考察した。これにより視点の移動には関係なく多角形の優先権を記述できるため、物体が不動である空間を視点移動する (walk through) ようなアニメーションを作る際、有用であると思われる。

本研究では、定義物体は多角形に限定したが、これを拡張すると一般の形状の物体も表現可能と思われる。しかし、これにはさらなる調査が必要となる。その他の今後の課題としてすべての実装を完了すること、物体定義を平面だけでなく曲面に拡張することや現在直線変換を用いている屈折変換を非線形変換に拡張することなどが挙げられる。

謝辞

我々は本論文を書くにあたり貴重な助言を頂いた岡田研究室の諸氏に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] T. Whitted, "An Improved Illumination Model for Shaded Display", *Comm. ACM*, Vol. 23, No. 6, pp. 343-349, 1980.
- [2] G. Wyvill, "Space Division for Ray Tracing in CSG", *IEEE Graphics and Application*, April, pp. 28-34, 1986.
- [3] P. S. Heckbert, and P. Hanrahan, "Beam Tracing Polygonal Objects", *Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, pp. 119-127, 1984.
- [4] M. Shinya, T. Takahashi, and S. Naito, "Principles and Applications of Pencil Tracing", *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 45-54, 1987.