

光線ボリュームバッファを用いた ボリュームとポリゴンの混在シーンの生成方法 —透視投影への拡張—

梶原 景範[†] 高橋 裕樹[†] 中嶋 正之[†]

ボリュームオブジェクトがポリゴンオブジェクトまたはボリュームオブジェクトと互いに干渉したシーンを、光線ボリュームバッファを用いることによって効率的にレンダリングする方法を信学ソ大 2001 及び信学総全国大会 2002 で提案した。本論文では、上記提案においては平行投影であった投影法を透視投影にアルゴリズムを拡張した。光線ボリュームの生成において、従来平面であった進行する光波面を X,Y,Z 軸の正負方向に頂点を持つ 8 面体にするることによって、視点がボリュームの中に入って行くことが可能なことを特徴とする。

A Method of Rendering Scenes Including Volumetric Objects using a Ray-Volume Buffer —Expansion to Perspective Projection—

KAGENORI KAJIHARA,[†] HIROKI TAKAHASHI[†]
and MASAYUKI NAKAJIMA[†]

This paper describes a rendering method that simultaneously renders both volumetric and polygonal objects. It is also possible to render volumetric objects intersected by polygonal ones or volumetric ones in the same scheme. The method is expanded for perspective projection from the method of parallel projection proposed in the 2001 IEICE society conference. In order for eye point to be able to go into a volume, an octahedral wave-front instead of a plane one is used in calculation of colors and translucency at voxels in ray-volume. The octahedral wave-front has its center at eye point and its axes parallel for x, y and z axis of a ray-volume.

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ(VR)等で用いられる実時間画像生成は、高性能なビデオアクセラレータや OpenGL が広く使われるようになり、成熟した技術となりつつある。一方、近年ボリュームレンダリングに関する研究が盛んに行われ、小規模のボリュームであれば、ボリュームレンダリング専用ボードを付加した PC により実時間表示が可能になった¹⁰⁾。

今後、映像のリアリティの向上のためには、ボリュームとポリゴンが混在したシーンの映像生成の必要性が高まると考えられる。例えば、訓練用シミュレータにおけるボリュームで出来た煙幕とその中を進む戦車、手術シミュレータにおける身体あるいは臓器と、それに挿入された手術機器、ゲームにおけるボリュームで出来たブッシュとポリゴンで出来た怪獣などの映像である。

戦車や AH1S などの攻撃用ヘリコプタの訓練用シミュレータにおいて実戦さながらの訓練をするには、自機を敵から隠したり目標の視認性の悪さを模擬するために、ブッシュや樹木などの複雑な地物に加えて、もうもうたる砂塵、煙幕、火炎や煙などを模擬する必要がある。しかも、それらは互いに干渉しあっているのが普通である。このように複雑な、あるいは不定形の物体を模擬するにはボリュームオブジェクトのレンダリングが必要である。

しかし、Ray-cast 法などによるボリュームレンダリングで、ゲーミングエリア全体を高精彩に実時間映像発生することは、現在では技術的にまだ非現実的である。そこで、現在航空機などの大規模なシミュレータに一般的に使用されているポリゴンベースのビジュアルシステムを基として、ボリュームとポリゴンの両オブジェクトが混在し互いに干渉するシーンを、光線ボリュームバッファを用いて、すべてポリゴンとしてレンダリングする方法を参考文献¹⁾²⁾³⁾に提案した。

本論文では、前記参考文献における提案では平行投

[†] 東京工業大学 大学院 情報理工学研究科
Graduate School of Information Science & Engineering,
Tokyo Institute of Technology

影法であった投影法を、透視投影に拡張した。従来、光線ボリュームの計算において光の進行波面を平面としていたが、本提案では視点を中心とし、ボリュームに平行な軸を持つ 8 面体とした。それにより、視点がボリュームの中に入って行くことができることを特徴とする。

第 2 節で関連研究と本提案方式の特徴について述べ、第 3 節で光線ボリュームバッファ方式、特に光線ボリュームの生成について述べ、第 4 節で各方式についての実験比較とシミュレーション結果を示し、最後に残された問題について述べる。

2. 関連研究と本提案方式の特徴

2.1 関連研究

Kreeger らは、ポリゴンが混在した状態をボリュームレンダリングするために、ポリゴンをボリュームの層ごとにスライスすることによって、ボクセルとポリゴンの位置関係を調べて層ごとに Ray-cast でレンダリングしている⁵⁾。彼等の方式の長所は、半透明ポリゴンのデプスソートが不要なことであり、短所はスライスにより 1 つの三角形が多数の小さい三角形に分割されること、および処理が複雑なことである。

Giertsen らは、ボリュームとサーフェスを同時にレンダリングするのに Scan-Plane Buffer (SPB) と Multiple-Layer z-Buffer (MZB) を用いてスキャンラインオーダのレンダリングをした⁶⁾。彼等の方式の特徴は、ボリュームのメッシュ構造を問わないことである。欠点としてはエイリアシングが生じやすいことである。

Levoy は Ray-Trace 法をボリュームレンダリングに拡張し、ボリュームとポリゴンの混在したシーンの映像生成を行う方法を提案した⁷⁾。彼の方式の長所は、リアルな映像生成とアルゴリズムが比較的シンプルであることであり、短所としては計算負荷が大きいこと、エイリアシングが生じやすいことである。

Bitter らは、ボリュームレンダリングにおいて、色の合成計算をボリュームの層ごとに計算し積算する Ray-Slice-Sweep Volume Rendering 法を提案している⁸⁾。しかし、Ray の計算に線形補間を使用し、しかも Sweep しているため、本論文で指摘している光線の拡散が生じ映像はボケるといった欠点がある。

2.2 本提案方式の特徴

ポリゴンと干渉したボリュームをレンダリングする場合、ボリュームの、ポリゴンの手前にある部分と後ろ側にある部分を知る必要がある。関連研究では、それぞれこのための処理に工夫がなされている。すなわ

ち、Kreeger らはボリュームの層ごとにボリュームをポリゴンとともにスライスし、Giertsen らはスキャンラインごとにビューボリュームをスキャンラインプレーンでスライスし、Levoy は Ray-Trace 法によって、ボリューム中のポリゴンの位置を確認しながらレンダリングしている。

本提案手法では、このための処理を必要とせず、光線ボリュームバッファと 3D テクスチャマッピングによってこの機能を実現する。光線ボリュームバッファの生成は、ポリゴンとの干渉を全く考慮する必要がなく、単純なボリュームレンダリングと等価な計算量で可能である。また、3D テクスチャマッピングは、最近のグラフィックハードウェアでは、レンダリング速度に対するペナルティなしにポリゴンのレンダリングができる。

本提案手法によれば、光線ボリュームバッファの生成部分をソリッドテクスチャジェネレータとして局所的に追加することによって、従来型のグラフィックスシステムをボリュームオブジェクトを扱えるよう機能拡張することが可能である。

また、本提案手法ではボリュームもポリゴンとして表示するが、全ボクセルを処理して得たテクスチャをマッピングするので、同じくボリュームをポリゴンで表示する Marching Cube 方式⁹⁾と異なり、ボリュームの持つ質感・量感も十分に表現できる。また、逆にポリゴンをボクセルに変換することもないので量子化の問題もない⁴⁾。

本提案手法の欠点は、ボリュームデータを直接レンダリングする方式に比べて、光線ボリュームバッファ用の大量のメモリを必要とすることである。また、半透明ポリゴンはデプスソートされている必要があるが、これは本提案手法の適用目的である現在主流のデプスバッファ方式のグラフィックスシステムの欠点であって、半透明ポリゴンは本来 BSP (Binary Space Partitioning) 等によりソートされている必要がある。

3. 光線ボリュームバッファ方式

この節では、まず基本的なアプローチ、光線ボリュームバッファ生成すなわち光線の伝播の模擬、ボリュームとポリゴンの干渉の模擬方法について簡単に述べ、透視投影法における光線ボリュームの生成法について詳しく述べる。ボリュームとポリゴンの干渉の模擬方法の詳細については参考文献^{1)?)2)3)}を参照されたい。

3.1 基本的なアプローチ

光線ボリュームバッファを用いた、ボリュームとポリゴンの混在シーンのレンダリングの基本的なアプ

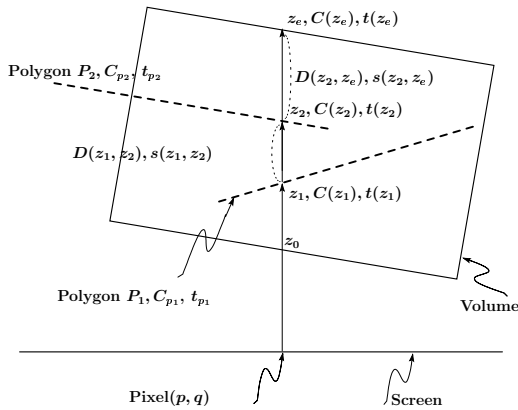


図1 Polygonの挿入

ローチは次のとおりである．すなわち，フレーム処理の初段でボリュームの中を通過する光線の色とそこまでの透過度をボクセルごとに計算し，その結果を光線ボリュームバッファに格納しておく．ボリュームと干渉するポリゴンは，光線ボリュームバッファを3Dテクスチャマッピングして表現する．ボリュームも，光線ボリュームをマッピングしたその輪郭ポリゴンとして表示する．これによって，干渉の状態を調べる複雑な処理を必要とせず，かつ Ray-cast 系のプロセッサを持たない従来のデプスバッファ方式のポリゴングラフィックスでレンダリングが可能になる．また，ボリュームと干渉するボリュームは，規則的に配列した半透明ポリゴンの層として模擬することによって，同じスキームでボリュームとボリュームの干渉シーンのレンダリングが可能である．

3.2 光線ボリュームの生成—光線の伝播の模擬—

ボリューム内の光線の伝播を模擬し光線ボリュームを生成する．すなわち，各ボクセルのスクリーンからの奥行きを z とし，そこを通過する光線の色 $C(z)$ ，およびそこまでの透過度 $t(z)$ を次式により計算し光線ボリュームバッファに格納しておく．ここで $\psi(\eta)$ および $\phi(\xi)$ は，それぞれ奥行き η におけるボリュームの色および奥行き ξ における不透明度である．

$$C(z) = \int_0^z \psi(\eta) e^{-\int_0^\eta \phi(\xi) d\xi} d\eta \quad (1)$$

$$t(z) = e^{-\int_0^z \phi(\xi) d\xi} \quad (2)$$

3.3 ボリュームと干渉したポリゴンの表示

図1はスクリーン上の画素 (p, q) において奥行き z_1, z_2 に，それぞれ色 C_{p_1} ，透明度 t_{p_1} の半透明なポリゴン P_1 と，色 C_{p_2} ，透明度 t_{p_2} の半透明な P_2 が挿入された状態を示す．

このとき，画素 (p, q) に見える色 C_{pq} は次式により

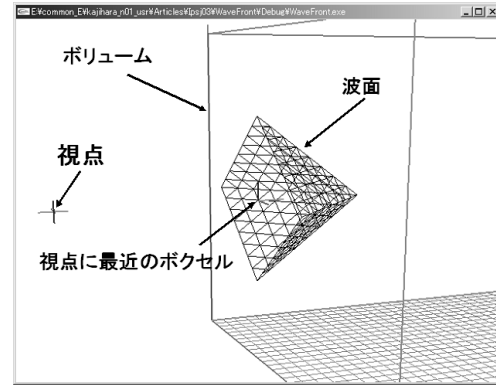


図2 ボリュームの中の光の波面

得られる．この式の導出に関しては参考文献²⁾を参照されたい．ここで， $C(z_*)$ ， $t(z_*)$ は奥行き z_* における光線ボリュームの色及び透明度であり， z_e はボリュームの終端の奥行きである．

$$C_{pq} = C(z_1)(1 - t_{p_1}) + t(z_1)C_{p_1} + t_{p_1}\{C(z_2)(1 - t_{p_2}) + t(z_2)C_{p_2}\} + t_{p_1}t_{p_2}C(z_e). \quad (3)$$

3.4 透視投影法における光線ボリュームの生成

透視投影に基づいた光線ボリュームの生成，すなわち式(1)，(2)の $C(z)$ 及び $t(z)$ の計算方法について述べる．ボリューム内の光線の伝播の模擬において，視点がボリューム内にある場合を許すために，光の進行する波面を，視点を中心とした，正確には視点到最も近いボクセルを中心とした各座標軸方向に頂点を持つ8面体として模擬した．視点がボリューム外の場合は，図2に示すように波面は8面体の一部になる．ボクセルを通過する光線の色及び減衰率の計算において，線形補間を用いると光が拡散し像がボケることを参考文献²⁾で示した．この現象は透視投影においても同様あるいはより著しく，この様子を図3に示す．図3(a)ステップ0は，波面上のあるボクセルが高い輝度を持っていることを示す．波面が進行しステップ3になるとかなり光は拡散し減衰していることが分かる．

図4は高階(3階)の補間を用いて場合を示す．光の拡散はある程度改善されるが，依然として著しい．図4に示すように3階の高階補間を用いても光の拡散は激しい．これは，8面体の波面の場合，波面がボリュームの格子に対して傾斜していて，ボクセルを通過する光が直前の波面において，ボクセルのほぼ中間を通過するという幾何的な関係により生じる．図5は波面の進行を表し，図6はステップ n の波面の上にステップ $n-1$ ， $n-2$ の波面を重ねて示したものである．前のステップの波面のグリッドは三角形格子の重心に

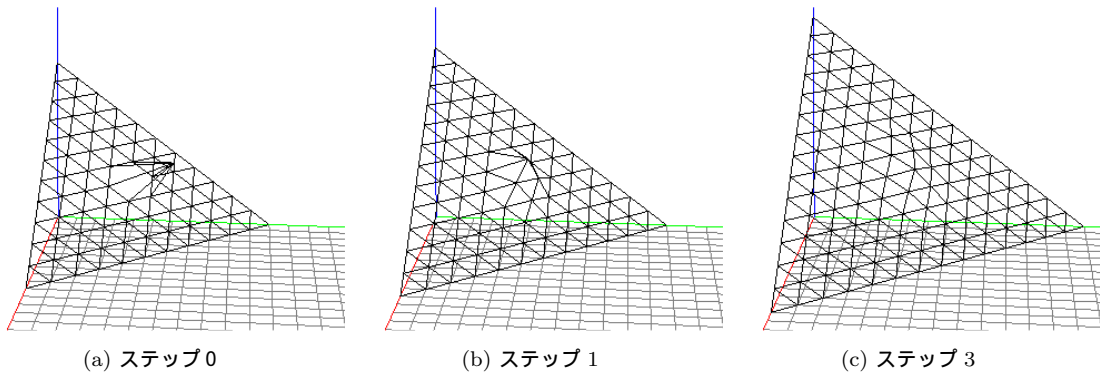


図 3 線形補間による波面伝播の模擬

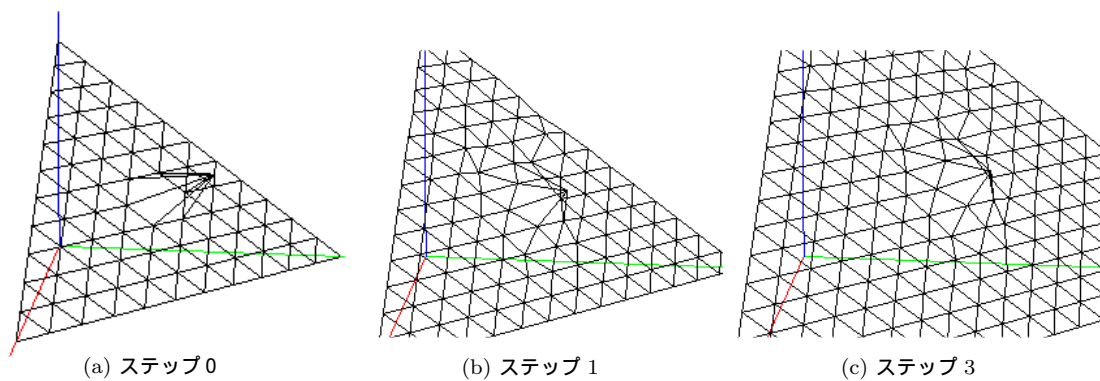


図 4 高階補間による波面伝播の模擬

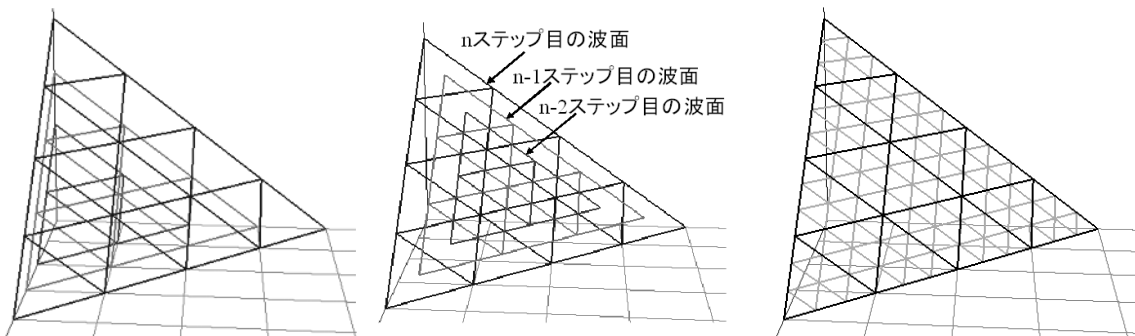


図 5 波面の進行

図 6 波面の関係

図 7 サブ grid

位置しているため、図 8 に示すように波面の計算格子を 3 倍密にしたサブグリッドを用いてこの問題を解決した。

4. 実 験

4.1 各方式によるシミュレーション結果の比較

各方式に基づいてシミュレーションした結果を次に示す。図 9 は線形補間による光伝播計算に基づいたレンダリング結果、図 10 は 3 階の高階補間による光伝播計算に基づいた映像を示す。図 11 はサブ grid を用

いた線形補間による光伝播計算に基づいた映像、図 10 はサブ grid を用いた 3 階の高階補間による光伝播計算に基づいた映像を示す。モデルは $128 \times 128 \times 110$ ボクセルで、シミュレーションは Athlon 1MHz ですべてソフトウェアで行った。図 9、図 10、図 11 及び図 12 の光線ボリュームの生成にそれぞれ約 7.5 秒、200.0 秒、96.1 秒、及び 284.7 秒を要した。

4.2 デモシンのシミュレーション

図 13 は霧のかかる樹木の中を視点が通過するシーンのシミュレーション結果である。このシーンはサブ

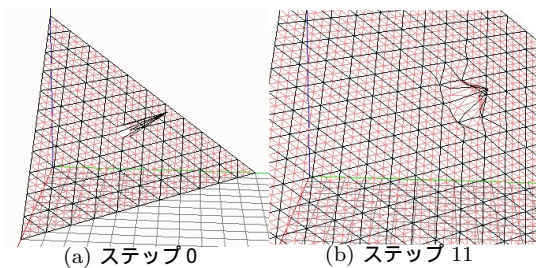


図 8 サブ grid を用いた波面の伝播

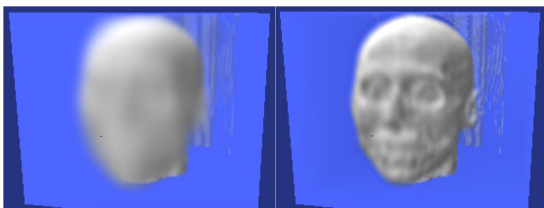


図 9 線形補間による光伝播 図 10 高階補間による光伝播

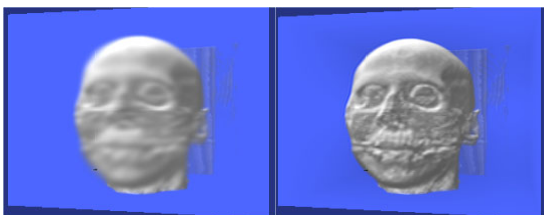


図 11 サブ grid 及び線形補間 図 12 サブ grid 及び高階補間

grid を用いた 3 階の高階補間によって生成した。図 14 は雲の中を紙飛行機が飛行するシーンを平行投影によって生成した。図 15 は前記シーン中の上方の飛行機の後方に追従する視点から見たシーンで、線形補間を用いた透視投影によって生成したものである。前方の飛行機が下の薄い雲に突っ込み続いて自機も雲の中に入り、自機が下の雲から出ると前機が上の濃い雲に入っていく、続いて自機が濃い雲に入り、それから出ると前方に前機が見える様子が模擬されている。

5. おわりに

光線ボリュームバッファを用いたボリュームとポリゴンの干渉シーンの生成方法²⁾を、透視投影に拡張する手法を提案し実験で確認した。これにより本提案手法の訓練用シミュレータへの適用の可能性を示すことができたと考える。今後の課題としては、より計算量の少ないアルゴリズムの開発、ならびに処理の並列化及びハードウェアの効率的な活用による高速化であると考える。

参 考 文 献

- 1) 梶原, 高橋, 中嶋, “光線ボリュームバッファを用いたボリュームとポリゴンの混在シーンの生成方法”, 信学ソ大 D-11-79, 2001.
- 2) 梶原, 高橋, 中嶋, “光線ボリュームバッファを用いたボリュームとポリゴンの混在シーンのレンダリング方法”, 映情学誌, Vol.56, No.10, pp.1607-1612, 2002.
- 3) 梶原, 高橋, 中嶋, “光線ボリュームバッファを用いたボリュームとポリゴンの混在シーンのレンダリング方法—ボリュームとボリュームの干渉シーンのレンダリングへの拡張—”, 第 18 回 NICO-GRAPH 論文コンテスト論文集, pp.33-38, 2002.
- 4) A. Kaufman, D. Cohen, R. Yagel, “Volume Graphics”, IEEE Computer, vol.26, no.7, pp.51-64, July 1993.
- 5) K. Kreeger, A. Kaufman, “Mixing Translucent Polygons with Volumes”, Proceedings Visualization '99, pp.191-198, 1999.
- 6) C. Giertsen, A. Tuchman, “Fast Volume Rendering with Embedded Geometric Primitives”, Visual Computing — Integrating Computer Graphics with Computer Vision, T.L. Kunii(ed), Springer Verlag, pp.253-271, 1992.
- 7) M. Levoy, “A Hybrid Ray Tracer for Rendering Polygon and Volume Data ” IEEE Computer Graphics & Applications 10(2), 33-40, Mar. 1990.
- 8) I. Bitter, A. Kaufman, “A Ray-Slice-Sweep Volume Rendering Engine”, In Proc. of Eurographics/SIGGRAPH workshop on graphic hardware 1997, pp.121-130, 1997.
- 9) W. Lorensen, E.H.Cline, “Marching Cubes: A High Resolution 3-D Surface Construction Algorithm”, In Proc. of SIGGRAPH '87 in Computer Graphics 21,4, July 1987.
- 10) H. Pfister, J. H. Hardenburg, H. Lauer, S. Sailor, “The VolumePro Real-Time Ray-Casting System” Proceedings of the ACM SIGGRAPH '99 Conference pp131-138, Aug. 1999.

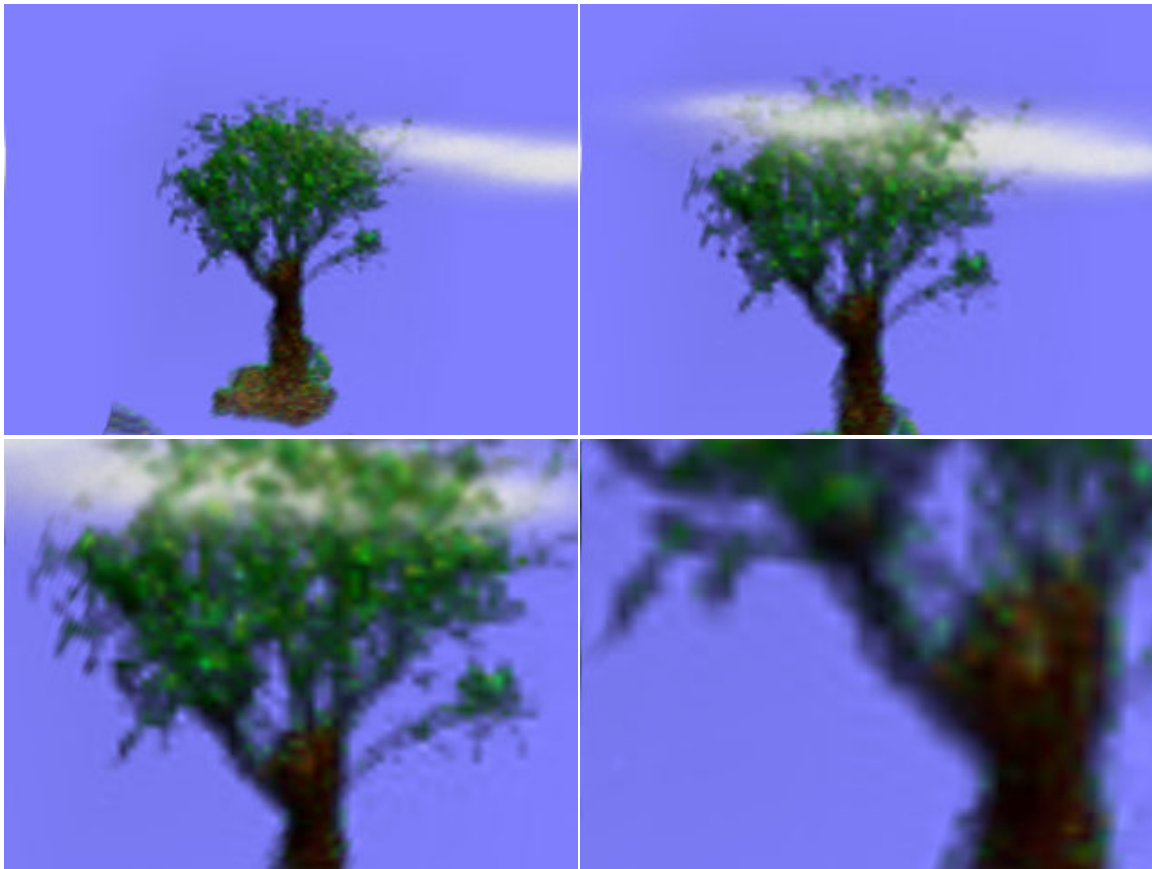


図 13 樹木と霧

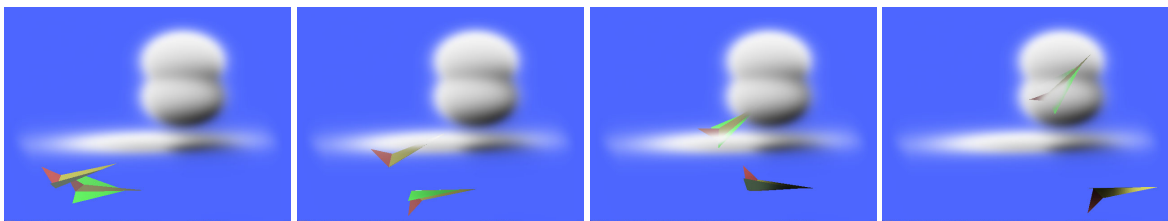


図 14 雲の中の飛行：平行投影

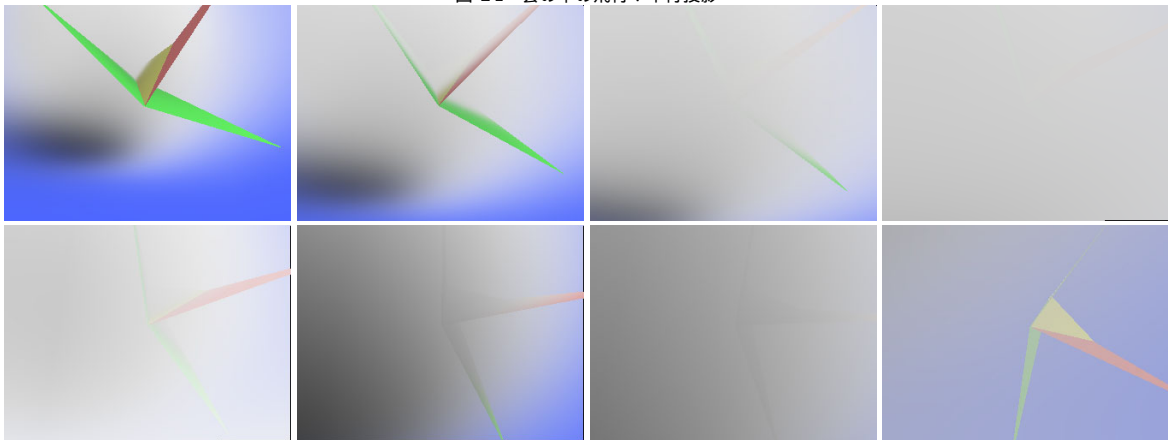


図 15 雲の中の飛行：透視投影