

2003年度 卒業論文

3DCGにおける
霧雲のリアルタイムな表現に関する研究

指導教員：渡辺 大地

メディア学部 渡辺研究室 3DCG アプリケーション構築プロジェクト
学籍番号 00P397
横内 政洋

2003年度 卒業論文概要

論文題目

3DCGにおける
霧雲のリアルタイムな表現に関する研究

メディア学部
学籍番号：00P397

氏名

横内 政洋

指導
教員

渡辺 大地

キーワード

霧雲、グレゴリー曲面、リアルタイムレンダリング、*uv* マッピング

雲は空でよく見られる自然物であり、雲はその形状の種類などから天候、季節、地形と様々な景観を表現している。インタラクティブなコンテンツであるゲームや景観シミュレーションなどで、仮想空間の天候や季節の移り変わり、地形などをよりリアルに表現するために雲は重要なものである。本研究では表現する雲として霧雲というものに着目した。霧雲は、横に広がるなだらかな丘のような形状で山にかかっている雲のほとんどが霧雲である。このことから山地などの3Dシーンで霧雲を表現することでゲームや景観シミュレーションなどのインタラクティブなコンテンツなどで、よりリアリティが付加されると考えられる。

そこで本研究では霧雲をリアルタイムに表現することを目的とする。本研究では、雲の元の形となるポリゴンを作成し、透明度の違うテクスチャを貼ったポリゴンの面の重ね合わせを用いた雲の表現手法をベースとし、本研究では雲の元の形にグレゴリー曲面を用いる。この手法をベースとすることで、霧雲の特徴である横に広がるなだらかな丘のような形状を曲面を用いることで表現でき、曲面についてはグレゴリー曲面を用いることで山地などの複雑な地形に合うように曲面を接続して霧雲を表現することができる。また、本研究ではベースとする手法において、2つの問題点を解決した。1つ目は、真横から見た際に重ね合わせる面の階層が顕著に見える問題点を階層の間隔を狭めること階層を目立たなくする。階層の間隔を狭めることで雲の厚さが薄くなるのを重ねる面を追加することで解決した。2つ目は、真上から見た際にテクスチャの輪郭が明確に見える問題点を重ね合わせる面を下から上にいくに従い微小に大きくすること透明度の違う面が重なり輪郭部分が外側にいくに連れ薄くなる。こうすることで輪郭が不明瞭になり真上から見た際の問題点を解決した。本研究ではベースとする手法の問題点を解決し、霧雲のリアルタイムな表現を実現した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	従来手法	1
1.3	目的	3
1.4	論文構成	4
第2章	雲の生成法	5
2.1	雲の生成	5
2.1.1	雲の形状	5
2.1.2	曲面生成	5
2.2	本研究での生成設定	6
2.2.1	曲面生成	6
2.2.2	曲面の色設定	7
2.2.3	曲面の重ね合わせ設定	8
2.3	結果	9
第3章	評価と今後の課題	16
3.1	評価	16
3.1.1	実行結果	16
3.1.2	問題点	18
3.2	今後の課題	20
第4章	まとめと今後の展望	21
	謝辞	22
	参考文献	23

目 次

2.1	色と透明度を設定した真上から見た曲面	7
2.2	真横から見た近くの雲	10
2.3	真横から見た雲が薄くなった画像	11
2.4	真横から見た際の曲面を追加した雲	12
2.5	曲面の拡大を行っていない雲	13
2.6	曲面の拡大を行った雲	13
2.7	重ねる曲面の数を 15 に設定した雲	14
2.8	重ねる曲面の数を 30 に設定した雲	15
3.1	4×4 の重ねる曲面の数が 20 の霧雲	17
3.2	10×10 の曲面数 20 の霧雲	18
3.3	視点が曲面に近い画像	19
3.4	視点が雲の中に入った画像	19

第 1 章

はじめに

1.1 背景

雲は空でよく見られる自然物であり、雲はその形状の種類などから天候、季節、地形と様々な景観を表現している。インタラクティブなコンテンツであるゲームや景観シミュレーションなどで、仮想空間の天候や季節の移り変わり、地形などをよりリアルに表現するために雲は重要なものである。本研究では表現する雲として霧雲というものに着目した。霧雲 [1][2] とは、現れる高さが地表～600Mの間で、霧が厚くなったような雲である。形状は横に広がるなだらかな丘のようで、山にかかっている雲のほとんどの場合が霧雲である。このことから山地などの3Dシーンに霧雲を表現することでゲームや景観シミュレーションなどのインタラクティブなコンテンツなどで、よりリアリティが付加されると考えられる。

1.2 従来手法

雲を表現するのにあらかじめ用意しておいた雲の画像を読み込んだり、生成した雲の画像を描画するシーンに常に視点の正面を向く矩形に貼り付けることで雲を表現する手法 [4] がある。この手法は、比較的に対称な雲や遠方でまったく動いてないように見える雲を表現するのに向いている。また、描画速度については、描画する形状が平面なので速い。しかし、2D画像を平面に貼り付けているので、視

点の高さがあがると平面であることが見えてしまう。

信号を受信していないテレビの砂嵐のように特定の色の無作為な集合の画像と円や楕円といった基本となる形状を合成して雲を表現する手法 [3][13] がある。この手法は、P.Elinas、W.Stuerzlinger ら [3] が述べているように中距離の雲を表現するのに向いている。だが、視点に近かったり、ボリューム感のある雲の表現には向いていない。

多数の粒子を操作して雲を表現する手法 [5][12][15] がある。粒子はそれぞれが運動や寿命、質量、空気抵抗などが設定でき、粒子の動きに物理法則をあてはめることにより現実のものに限りなく近い雲が表現できる。この手法は、雲のような複雑な形状を表現するのに向いている。しかし、雲を表現するためには多くの粒子が必要である。また、それぞれの粒子の運動などの計算コストがかかる。よって、フレームベースの表現を目的とした雲の表現となる。この手法を用いて雲の生成を行った研究として Mark J. Harris と Anselmo Lastra らによるものと W.Reeves によるものがある。彼らの研究ではある程度高速な雲の描画を実現したが、問題点として大きな雲になると粒子の数が多くなり計算処理がかかるので表現する雲の大きさが限られているということである。

空間を密度や濃度を持った微小な立方体で分割し雲を表現する手法がある。この手法は精密な雲を表現するのに数多くの立方体を使うのでデータが多くなり、フレームベースの表現を目的とした雲の表現となる。ボリュームレンダリング [6][8][10][14] の手法を用いた研究として土橋ら [6] による手法があげられる。彼らの対象とする雲も積雲である。彼らの手法では空間内のデータが多くなり計算コストがかかるが、計算の効率化が計られており現状ではまだリアルタイムとはいかないがある程度の描画速度を得ている。

雲の元になる形状に上方にいくに従って透明なテクスチャを貼った面を重ねていくことで、雲の不明瞭な境界を表現する手法 [7] がある。この手法は、元になる形状やテクスチャを貼った面を用いていることで計算コストがかからずリアルタイムに描画できる。しかし、雲を見る角度により雲のリアリティを欠く問題がある。

1.3 目的

本研究では霧雲をリアルタイムに表現することを目的とする。明石 [7] の手法においてリアルタイムに境界の不明瞭な雲を生成するのに雲の元になるポリゴンを作成し、透明度の違うテクスチャを貼ったポリゴンの面を重ねていくところに着目した。雲の元の形に曲面を用いることで霧雲の特徴である横に広がったなだらかな丘のような形状を表現できるからである。本研究では、霧雲を見る角度を霧雲が現れる高さが地表～600Mの間ということより真横～見下ろすような角度を想定する。本研究では、この透明度の違うテクスチャを貼ったポリゴンの面の重ね合わせを用いた雲の表現手法をベースとし、霧雲のリアルタイムな表現を提案する。ベースとする手法は、雲の元になる形状に、上方にいくにしたがって半透明になるような複数のテクスチャを貼った面を重ねていくことで、雲の境界面が不明瞭な点を表現する。また、重ねるテクスチャを貼った面の数を増減することで雲のボリュームを変更することができる。しかし、このベースとする手法において以下の問題がある。

1. 真横から見た際に階層が見える
2. 真上から見た際にテクスチャの輪郭が明確に見える

1における階層が見えてしまう問題は、テクスチャを貼った面の間隔が大きくなると顕著になる。この問題は、テクスチャの間隔を狭めることで階層を目立たなくする。階層が目立ってしまうのは、テクスチャを貼った面に近づくにつれ間隔が拡大して見えるからである。そこで、視点の位置に応じて階層が目立たないように曲面間隔を狭めることで問題を解決する。間隔を狭めるだけでは、狭まった分だけ雲が薄くなってしまう。これを、新たに曲面を追加することで雲の厚さを保つ。

2の問題は、テクスチャの輪郭が明確に見えてしまう問題である。そこで、本研究ではまず灰色の曲面を中心から外側にいくにつれ透明になるよう設定する。そして、重ねる曲面を下から上にいくに従い拡大率を大きくする。また、重ねる曲

面を下から上にいくに従い透明になるように設定する。こうすることで、曲面の透明な輪郭部分が段階的に重なり輪郭が不明瞭なることで問題を解決する。

1.4 論文構成

本論分では、第2章において雲の生成手法について述べる。第3章では、評価と今後の課題を述べる。第4章では、まとめと今後の展望を述べる。

第 2 章

雲の生成法

2.1 雲の生成

2.1.1 雲の形状

雲の形状は、大まかな雲の形状となる曲面を作成し、この曲面を複数重ね合わせることで雲の形状を表現する。

2.1.2 曲面生成

まず、雲の形となる曲面を生成する。本研究では、霧雲のなだらかな形状を表現するためグレゴリー曲面 [11] を用いる。グレゴリー曲面において横方向のパラメータを u 、縦方向のパラメータを v とし、それぞれの方向のパラメータが 3 次であることを双 3 次といい、双 3 次の Gregory パッチは、左下の端点を P_{000} 、左上の端点を P_{030} 、右下の端点を P_{300} 、右上の端点を P_{330} とする 12 個の制御点による四辺形ができ、この四辺形の内部の 8 個の制御点との計 20 個の制御点 $P_{ijk}(i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3; k = 0, \dots, 1)$ で表現される。 $0 \leq u, v \leq 1$ である双 3 次の Gregory パッチの曲面表現式は次のようになる。

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) Q_{ij}(u, v)$$

ただし、 $B_i^3(u)$ と $B_j^3(v)$ は (2.1) 式で定義される Bernstein 基底関数である。 n は曲線の次数である。

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-1} \quad (2.1)$$

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$$

また、パッチの制御点 P_{ijk} と Q_{ij} には、次のような関係がある。

- $i \neq 1,2$ または $j \neq 1,2$ のとき

$$Q_{ij}(u, v) = P_{ij0}$$

- $i=1,2$ かつ $j=1,2$ のとき

$$Q_{11}(u, v) = \frac{uP_{110} + vP_{111}}{u + v} \quad (2.2)$$

$$Q_{12}(u, v) = \frac{uP_{120} + (1-v)P_{121}}{u + (1-v)} \quad (2.3)$$

$$Q_{21}(u, v) = \frac{(1-u)P_{210} + vP_{211}}{(1-u) + v} \quad (2.4)$$

$$Q_{22}(u, v) = \frac{(1-u)P_{220} + (1-v)P_{221}}{(1-u) + (1-v)} \quad (2.5)$$

この曲面表現式によるグレゴリー曲面は、隣接する複数の曲面との接続性に優れ、滑らかに接続する複数の曲面を生成できる。このことより、山地などの複雑な地形に沿った霧雲を生成するのに有用である。

2.2 本研究での生成設定

2.2.1 曲面生成

曲面は、真上から見た際に正方形になる 4 本の境界曲線による四辺形領域内を凹凸に変形したものである。この際、なだらかな曲面にするようにする。あまりにも凹凸な曲面であると、霧雲としては不自然な形になってしまう。

2.2.2 曲面の色設定

雲の形状の色を設定するのに全体が灰色で中心から外側に行くにつれ透明になっていくテクスチャを生成する。また、複数の曲面を接続するさいには全体が一様な灰色のテクスチャを生成する。生成したテクスチャを曲面に対して正確にテクスチャマッピングするために uv マッピングを行う。 uv マッピングとは、テクスチャを正確にマッピングするためにモデルのすべての頂点に uv 値の設定を行い、面ごとに細かくテクスチャ画像のどの部分をマッピングするかを指定するテクスチャマッピングの方法である。 uv 値とは、ポリゴンに対しマッピング画像のどの部分をマッピングするかという情報である。 u 、 v はともに $0 \sim 1$ の値をとり、 $(0,0)$ が左上隅、 $(1,0)$ が右上隅、 $(0,1)$ が左下隅、 $(1,1)$ が右下隅のテクスチャ画像のピクセルになる。図 2.1 は、色と透明度を設定した曲面の真上からの画像である。



図 2.1: 色と透明度を設定した真上から見た曲面

2.2.3 曲面の重ね合わせ設定

生成した曲面の四隅の点による四角形の中心を O とし、中心 O から視点の距離を L 、曲面と曲面の幅を r とすると曲面の間隔は (2.6) 式によって設定する。

$$r = \frac{L}{200} \quad (2.6)$$

そして、一定の間隔で配置した曲面を上方にいくほど透明に設定する。この重ねる曲面ごとの透明度の設定は、元の曲面の上に重ねる曲面の数を l 、透明度を $0 \sim 1$ の値をとり 0 が完全透明で 1 が完全不透明とし、 i 番目の曲面の透明度を α_i とする。曲面の透明度は (2.7) 式によって設定する。

$$\alpha_i = 1 - \frac{0.9i}{l} \quad (2.7)$$

これまでの処理だと、視点が最初に設定した位置から移動し、雲に近づいた際に曲面との間隔が大きく見えてしまい階層が顕著に表れてしまう。曲面の間隔の狭める設定方法は、生成した曲面の四隅の点による四角形の中心を O とし、中心 O から視点の距離を L 、曲面の間隔を r とし、視点が中心 O に対して移動した距離を m 、狭める曲面の間隔を R とする。これらの設定で狭める曲面の間隔を (2.8) 式によって算出した。

$$R = \frac{m}{L} \quad (2.8)$$

しかし、この処理だけでは曲面の間隔が狭まることにより元の雲の厚さより薄くなってしまふ。次に、視点が雲に近づくことで曲面の間隔が狭まり雲が薄くなってしまふのを、曲面を追加していくことで雲の厚みを保つようにする。狭まった新たな曲面の間隔を r' 、曲面の数を L 、基準となる視点の最初の位置で設定した雲の厚さを R' とすると

$$r'(L+1) \leq R'L \quad (2.9)$$

が成り立つ場合に r' の間隔で一番上の曲面の上に追加する。曲面の追加に伴い、(2.7) 式により曲面の透明度を設定する。以上の処理により、真横から見た場合の

階層が顕著に表れてしまう問題点を解決している。

次に、真上から見た場合に重なる曲面の輪郭が明確に見えてしまう問題の解決をする。まず、視点の雲を見る角度により重ね合わす曲面を、下の曲面から上の曲面になるに従って大きくなるように拡大率を設定する。こうすることで曲面の透明な輪郭部分が段階的に重なり不明瞭な輪郭を表現することで問題を解決する。拡大率の設定方法は、生成した曲面の四隅の点による四角形の中心を O 、中心 O と視点を結ぶ線が一番下の曲面の四隅の点を含む平面となす角を $\theta(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$ 、重なる曲面の数を L 、重なる曲面で一番下の曲面から k 番目の曲面の拡大率を P_k とすると、(2.10) 式によって設定する。

$$P_k = 1.0 + \frac{k}{1000} \sin \theta \quad (2.10)$$

2.3 結果

視点の位置に応じた曲面の間隔設定や曲面の拡大処理を行い、明石の手法で問題となっていた真横から見た場合の階層が顕著に表れてしまう問題点と、真上から見た場合にテクスチャの輪郭が明確に見えてしまう問題点を解決し、境界面が不明瞭な霧雲が生成できた。図 2.2 では、階層が見えてしまっている。

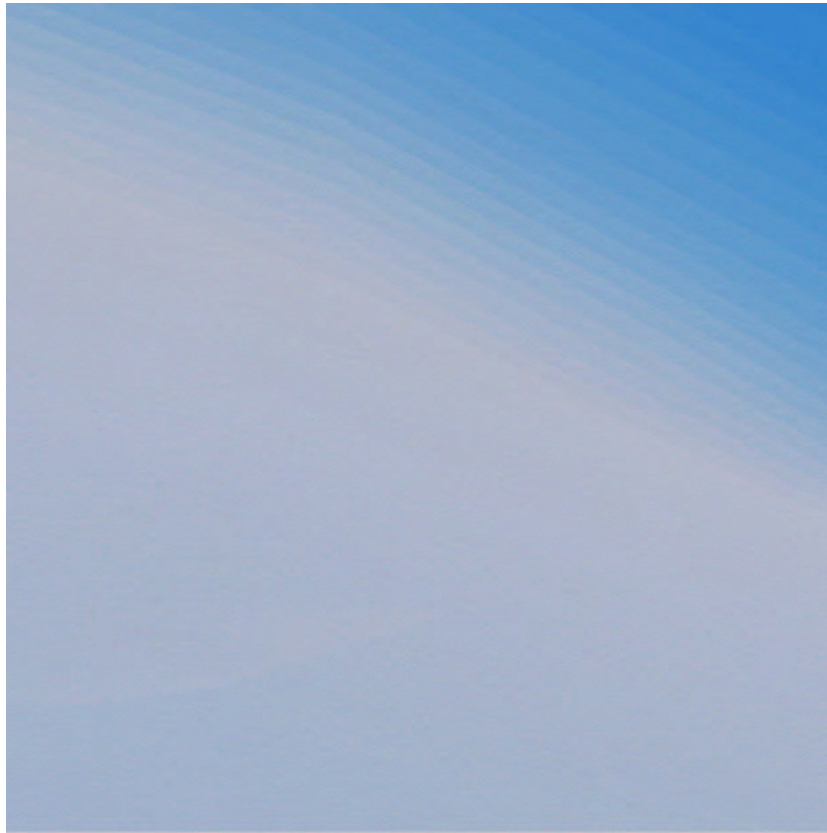


図 2.2: 真横から見た近くの雲

図 2.3では、図 2.2で見えていた階層を目立たなくするために曲面間隔を狭めたが雲が薄くなっている。

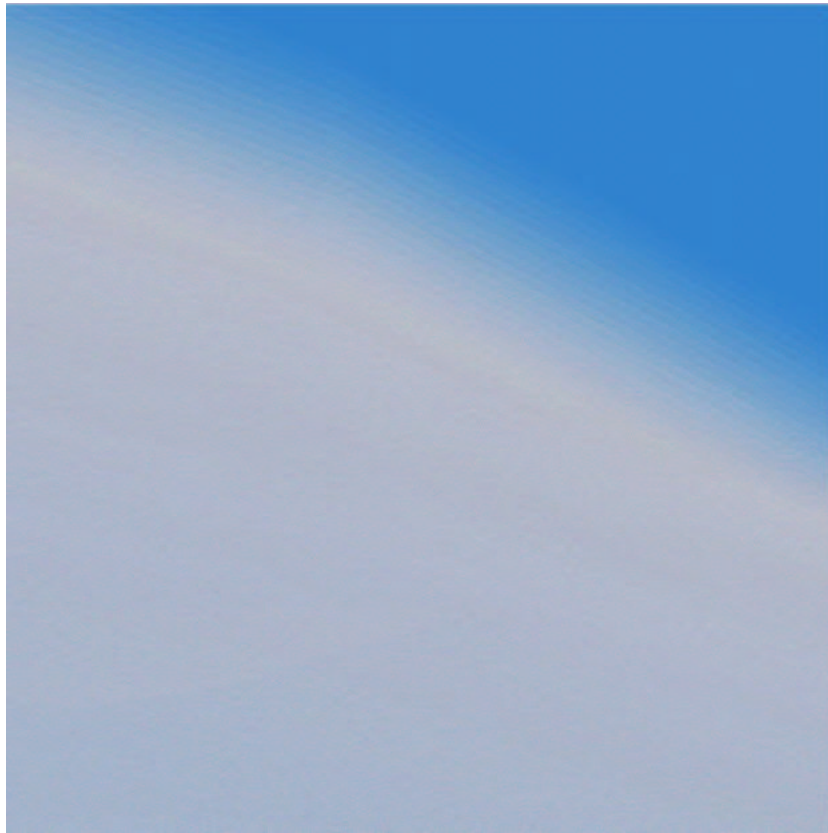


図 2.3: 真横から見た雲が薄くなった画像

図 2.4では、曲面を追加し雲の厚さを保ちつつ階層を目立たなくしている。



図 2.4: 真横から見た際の曲面を追加した雲

図 2.5は、曲面の拡大を行っておらず曲面の輪郭が明確に見えている。図 2.6では、曲面の拡大を行うことで曲面の透明な輪郭部分が段階的に重なり不明瞭な輪郭を表現している。



図 2.5: 曲面の拡大を行っていない雲

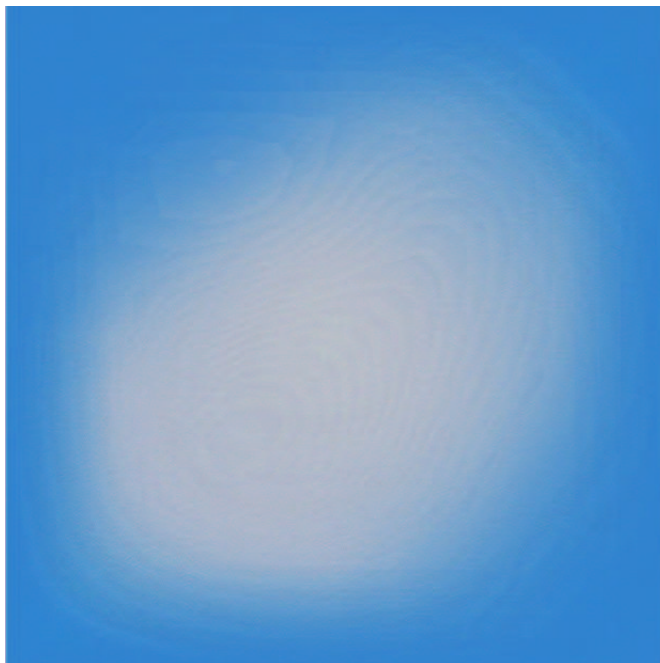


図 2.6: 曲面の拡大を行った雲

図 2.7は重ねる曲面の数を 15 に設定して生成した雲の画像で、図 2.8は重ねる曲面の数を 30 に設定して生成した雲の画像である。図 2.7と図 2.8を見比べてみるとボリューム感の違いが見て取れる。図 2.7では、重ねる曲面の数が少ないことで若干境界面の不明瞭さが粗い。図 2.8では、重ねる曲面の数が多いため境界面の不明瞭さがきめ細かくなっている。図 2.7より、重ねる曲面の数が 15 もあれば十分境界面の不明瞭さを見て取れる。

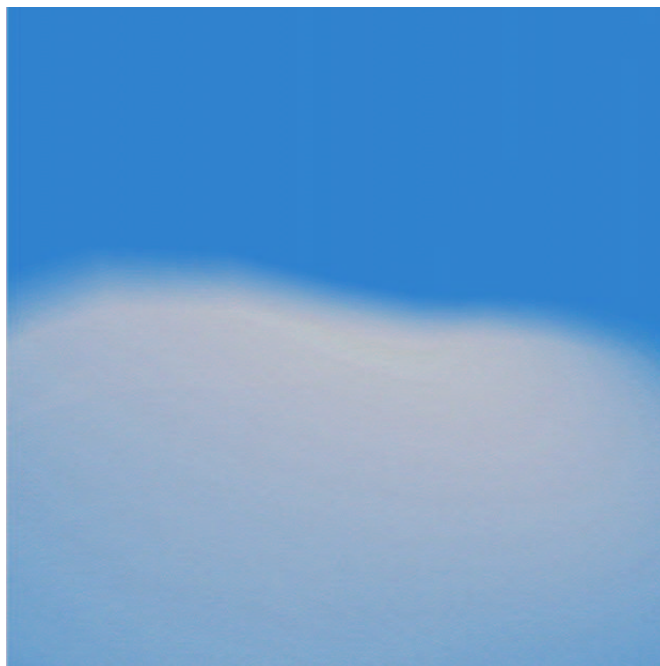


図 2.7: 重ねる曲面の数を 15 に設定した雲

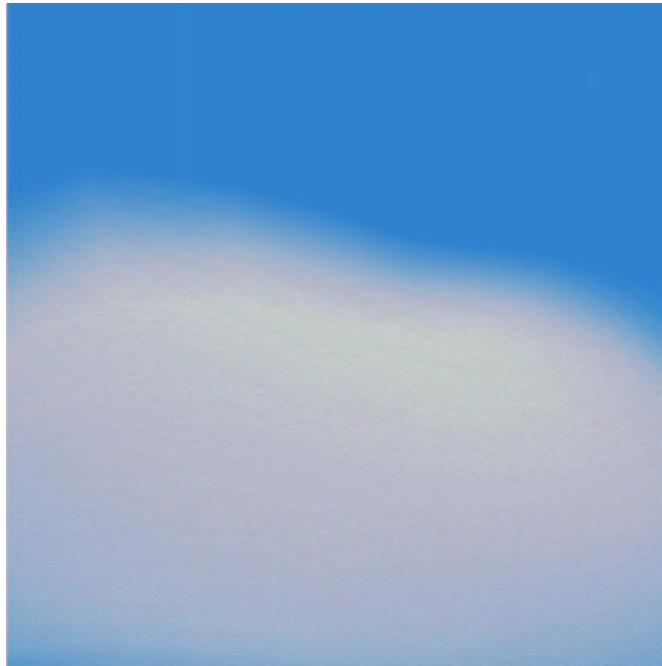


図 2.8: 重ねる曲面の数を 30 に設定した雲

第 3 章

評価と今後の課題

3.1 評価

3.1.1 実行結果

雲の生成に使用した環境は、表 3.1 である。

表 3.1: 実行環境

OS	Windows2000
CPU	AMD Athlon 1.33GHz
ビデオカード	RADEON8500DV
MEMORY	1024MB

表 3.1 の環境での実行結果が表 3.2 である。曲面数は、重ねる曲面数である。曲面分割数はメッシュが 4×4 、 5×5 、 8×8 、 10×10 でメッシュが 4×4 から 10×10 になるにつれ曲面が滑らかになる。 4×4 から 10×10 のそれぞれの行に曲面数に対応した環境での FPS を示す。FPS は、1 秒間に描画するコマ数である。FPS の数値が高ければ滑らかな描画となる。一般的にアニメでは FPS が 24 や 30 で表現されており FPS 値 24 をリアルタイムな描画の指標とする。

表 3.2: 実行結果

曲面数 \ 曲面分割数	10	15	20	25	30	35	40	45	50
4 × 4	108	80	65	55	47	42	37	34	32
5 × 5	81	67	55	45	40	36	31	28	27
8 × 8	51	38	30	26	22	19	17	15	14
10 × 10	39	29	23	19	16	14	12	11	10

表 3.2の実行結果を見てみると、重ねる曲面の数が多くなるに連れ処理が遅くなっているが、重ねる曲面の数が 20 までならリアルタイムに描画できている。図 3.1は、曲面の分割数が 4 × 4 の設定で重ねる曲面の数が 20 の画像で、図 3.2は、曲面の分割数が 10 × 10 の設定で重ねる曲面の数が 20 の画像である。図 3.1と図 3.2を見比べてみると図 3.2のほうが曲面が滑らかである。



図 3.1: 4 × 4 の重ねる曲面の数が 20 の霧雲

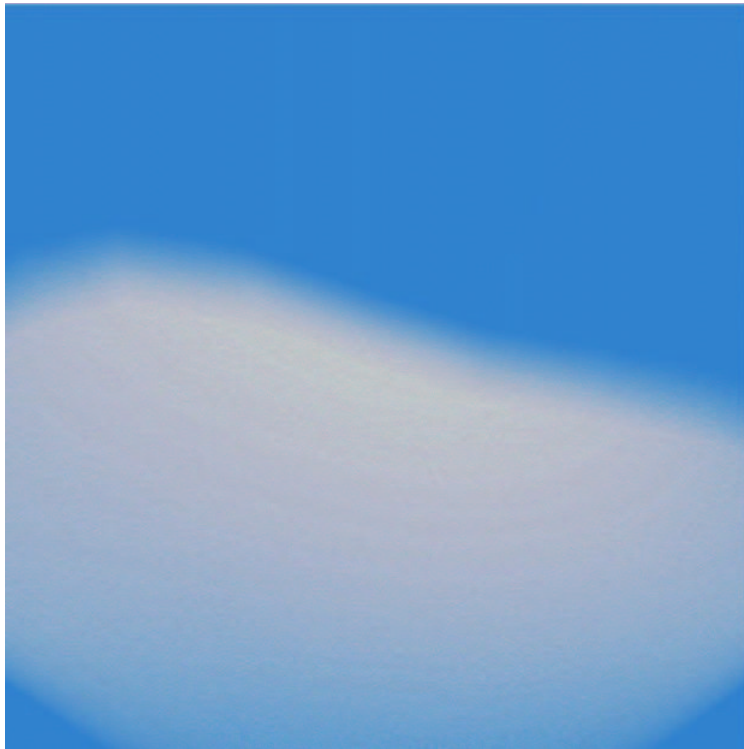


図 3.2: 10×10 の曲面数 20 の霧雲

3.1.2 問題点

今回生成した雲では、視点をある程度近くに移動した際にも階層が顕著に表れることがないようになった。しかし、視点と曲面との距離が著しく近かったり、接触している時には階層が顕著に表れてしまう。また、一番下の曲面の下、つまり雲の中に視点が入ると空洞に見えてしまう。

図 3.3は、視点が曲面と著しく近い画像であり、図 3.4は視点が雲の中に入ってしまった画像である。

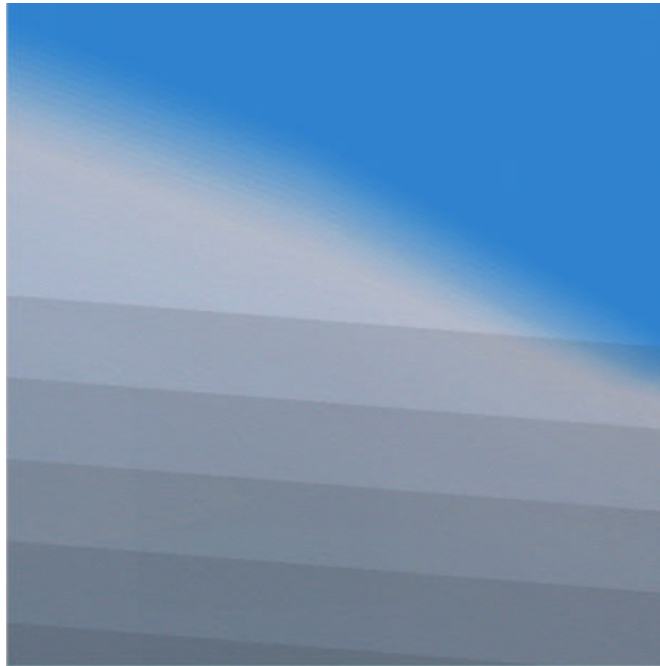


図 3.3: 視点が曲面に近い画像



図 3.4: 視点が雲の中に入った画像

3.2 今後の課題

今後の課題として、以下の3つがあげられる。

- 視点が雲の中に入った時の表現
- 視点が曲面に接触した時の問題
- 雲の移動や変形の表現

視点が雲の中に入った時の表現と視点が曲面に接触した時の表現は、視点が移動し雲の中に入るといった表現のため問題解決が不可欠である。また、長い時間経過や風などを考慮する雲の移動や変形といった表現も必要である。

第 4 章

まとめと今後の展望

本研究では、霧雲をリアルタイムに表現することができた。問題となっていた真横から見た場合の階層が顕著に表れてしまう点と、真上から見た場合にテクスチャの輪郭が明確に見えてしまう点が解決できた。

今後の展望として、時間経過に伴い霧雲が晴れていく表現を重ね合わせている曲面ごとの透明度を時間経過に合わせて変化させることで実現できるかと思われる。また、現在ではすべての曲面が色、形状ともに同じで、それぞれの曲面自体の透明度を変えて重ねているが、これをそれぞれの曲面を上下の曲面を考慮して曲面上の位置ごとに色と透明度を設定することで、より複雑な形状の雲が生成できると思われる。また、時間変化に伴い曲面上の位置ごとの色と透明度を変化させることで雲の変形、移動も表現できるとと思われる。

謝辞

1年間卒業研究と卒業論文でご指導頂いた本校メディア学部の渡辺大地講師と電気通信大学の和田篤氏、グレゴリー曲面でご支援いただいた大久保隆氏、卒業研究の参考にさせていただいた明石好平氏、研究室の学友にこころより深く感謝します。

参考文献

- [1] 雲をつかむような話, <http://contest.thinkquest.gr.jp/tqj2001/40457/frontindex.html>.
- [2] 全気象京都分会, <http://web.kyoto-inet.or.jp/people/taki-ryo/index.html>.
- [3] P. Elinas, W. Stuerzlinger, "Real-time Rendering of 3D Clouds", to appear in Journal of Graphics Tools, 2001.
- [4] ビルボーディング, <http://www.microsoft.com/japan/msdn/library/>.
- [5] Mark J. Harris and Anselmo Lastra, "Real-Time Cloud Rendering", Computer Graphics Forum (Eurographics 2001 Proceedings), 20(3):76-84, September 2001, <http://www.cs.unc.edu/harrism/clouds/>.
- [6] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita, "A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds", SIGGRAPH 2000 pp. 19-28.
- [7] 明石好平, "リアルタイムにおける雲の表現に関する研究", 東京工科大学メディア学部卒業論文 2002年度.
- [8] R. Miyazaki, S. Yoshida, Y. Dobashi, T. Nishita, "A Method for Modeling Clouds based on Atmospheric Fluid Dynamics", Pacific Graphics 2001 pp.363-372 2001-10.

- [9] 白山 晋, "CGにおける物理シミュレーション", 計算工学講演会論文集 vol.5 (2000年5月) pp43-46.
- [10] 西田友是, "リアリスティックな自然景観 CG 画像の追求", 第16回 NICOGRAPH/MULTIMEDIA 論文コンテスト p.199-203, 2000-11, <http://nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp/nis/>.
- [11] 鳥谷浩志・千代倉弘明 編著, "3次元CADの基礎と応用", 共立出版株式会社.
- [12] W.Reeves, "Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", ACM Transactions on Graphics, Vol.2, No.2, April 1983, ACM.
- [13] G.Gardner, "Visual Simulation of Clouds", SIGGRAPH 1985, pp.297-303.
- [14] Y.Dobashi, T.Nishita, T.Okita, "Animation of Clouds Using Cellular Automaton." Proc. of Computer Graphics and Imaging'98, 1998, pp251-256.
- [15] パーティクルシステム (日本語版), <http://home3.highway.ne.jp/senequis/particle.html>.