

フィードバック制御による雲のアニメーション制御

楠元克敏[†] 土橋宜典[†] 山本 強[†]

CGを用いて生成される映像の中で、雲の表示は重要な要素の一つである。雲を表現する効果的な方法として、流体シミュレーションに基づく手法はリアルな動きや形状を表現することができる。しかし、従来研究では、雲の形状・動きはシミュレーションに使用するパラメータの初期値に依存し、ユーザーが意図した形状・動きを表現することは困難である。本稿では、ユーザーが指定した形状の雲が自動生成される方法を提案する。提案手法により、パラメータを試行錯誤的に設定してシミュレーションを繰り返すことなく、所望の形状の積乱雲を生成することができる。

Controllable Shape of Clouds Animation with Feed Back Control

KATSUTOSHI KUSUMOTO,[†] YOSHINORI DOBASHI[†]
and TSUYOSHI YAMAMOTO[†]

Display of clouds is one of the important factors in creating images of outdoor scenes by using computer graphics. Methods based on fluid simulation are often used since they can simulate realistic movement and shape of clouds. However, the shape and movement of the simulated clouds depend on initial values of the parameters used in the cloud simulation. Therefore, it is difficult to create shape and movement of clouds that users intend. In this paper, we propose a method for generating clouds with shapes that users specified. By using our method, the cumulonimbus with desired shapes can be generated without repeating simulations with various parameter values determined by trial and error.

1. はじめに

3次元コンピュータグラフィックスの技術を用いて表現される自然現象の中でも、煙、炎、水といった流体現象の表現は、物理シミュレーションに基づく方法を利用することで、より写実的な表現が可能である。そのため、流体シミュレーションを応用した多数の研究が行われ、様々な方法が提案されている。映像制作を行う上で、自然現象が制作者の意図した形状や動きをすることが望まれることがある。流体シミュレーションによる自然現象の表現は、よりリアルな形状や動きを表現することが可能であるが、制作者の意図を反映させることは困難である。そのため、自然現象の表現において、その形状や動きをコントロールする研究に注目が集まっており、コンピュータゲーム、映画などのアニメーション制作への応用が期待されている。

自然現象の形状や動きをコントロールする研究の中には、煙や水などを文字や動物などユーザーが指定した形状に変化させたり²⁾⁸⁾⁷⁾³⁾⁵⁾、炎の骨格を指定することでその動きや形状をコントロールする研究が行

われている⁴⁾。しかしながら、このような研究分野において、煙、炎、水などを対象とした研究は多数行われているが、雲の形状や動きをコントロールする研究はほとんど行われていない。

屋外景観の映像を作成する場合、景観背景の表現に雲の表示はとりわけ重要な要素である。雲の表現においても、流体力学の物理シミュレーションに基づいた方法は、よりリアルな雲を表現することができ効果的である。しかし、従来の研究では、雲の形状はシミュレーションに使用する様々な初期パラメータに依存し、ユーザーが意図した形状の雲を表現することは困難である。

そこで本稿では、ユーザにより指定された形状の雲が自動生成される方法を提案する。提案法では、ユーザにより指定された輪郭形状に一致するようにシミュレーションパラメータをコントロールする。以降、本稿の構成は、2章で関連研究についての簡単な説明を行い、3章で提案手法の詳しい処理について述べる。次に4章で提案手法を用いた実験についての説明、考察を行い、最後に5章でまとめとする。

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市

2. 関連研究

2.1 自然現象のコントロール

前節で述べたように、煙、炎、水などの自然現象の動きや形状をコントロールする研究は多数行われている。Fattilらの研究²⁾では、driving force term, gathering term と呼ばれる外力を加えることにより、あらかじめ指定した形状に煙が変化するアニメーションの生成方法を提案している。Hong らは、目的形状からジオメトリックポテンシャルと呼ばれるスカラー場を生成し、これを用いて自然な煙の形状変化のアニメーション手法を提案している³⁾。Shi らは目標とする形状の骨格や、モーフィングを用いることで、煙や水が人や動物などに形状変化する方法を提案している⁷⁾⁸⁾。また、Lamorlette らは、炎に骨格をもたせ、骨格を動かすことで炎の基本的な動きを指定し、さらに Kolmogorov noise を用いて細部の動きを表現することで、炎の動きや形をインタラクティブに指定できる方法を提案している⁴⁾。雲の動きや形状をコントロールする研究に関しては、Liu らの方法が提案されているが、流体シミュレーションに基づくものではない。

以上に挙げたように、炎、煙、水を対象とした流体現象のコントロール方法に関する研究は多数行われているが、雲を対象とした研究はほとんど行われていない。

2.2 雲の流体シミュレーション

雲を表現する方法はいくつか存在するが、流体シミュレーションによる方法がリアリティを追求するには有効である。宮崎らは、Stam の提案した流体シミュレーションの近似解法⁹⁾を用いて、大気流体モデルをシミュレーションすることで、リアルな雲を生成する方法を提案した⁶⁾。しかし、生成される雲の形状や大きさは、熱源の配置、熱源の強さ、風の方向、水蒸気量などの初期値として設定される様々なパラメータに依存し、ユーザーが意図した雲を生成するためには、それらのパラメータの調節しなければならない。ユーザーの意図する形状によく一致する雲を生成するためのパラメータを見つけ出すことは極めて困難であり、膨大な手間と労力を必要としてしまう。

本稿では、上述の問題を解決するため、雲の流体シミュレーションをコントロールすることで、ユーザーの意図した形状の雲を自動生成する方法を提案する。

3. 提案手法

提案手法におけるシミュレーションの流れを図1に示す。提案手法では、あらかじめ雲の形状の輪郭線を

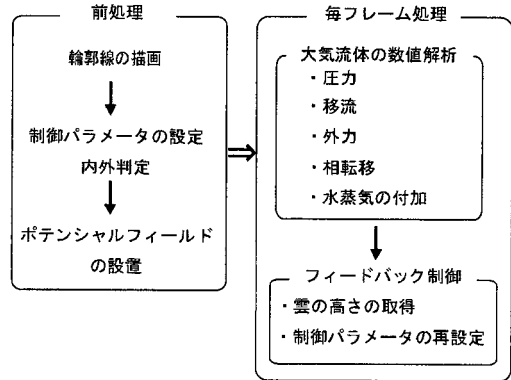


図1 シミュレーションプロセス

ユーザーが描くことにより指定し、その輪郭線をもとに、シミュレーションに使用されるパラメータをフィードバック制御によりコントロールする。これにより、輪郭線に沿った積乱雲が自動生成される。雲のシミュレーションは宮崎らの手法⁶⁾に基づき、水蒸気密度、雲密度、温度、速度の値の時間変化を計算する。雲の形成は水蒸気から雲への相転移により行われる。基本的な考え方は、指定された輪郭線から雲の高さを求め、その高さまで雲が成長するようにシミュレーション制御を行う。これは潜熱量を制御することで実現する。潜熱とは、水蒸気から水滴（雲）への相転移の際に放出される熱のことで、雲の発達を促す浮力を生み出す。そのため、潜熱が大きいほど雲は鉛直方向へより高く発達する。しかしながら、潜熱の制御のみでは、指定した輪郭線を超えて雲が発生してしまう。そこで、指定された輪郭線を基にポテンシャルフィールドを生成し、輪郭線付近で外力を作用させることで、より正確に輪郭線に近い形状となるよう雲を生成する。

前処理では、制御のための輪郭線、ポテンシャルフィールドなどの設定を行う。毎フレーム処理では、大気流体シミュレーションを行い、雲の高さをフィードバックすることで、パラメータを再設定し、指定した形状に雲が時間変化しながら発達する映像を生成する。

以降、3.1節で大気流体のモデルについて、3.2節で雲のコントロール方法について、3.3節でシミュレーションと可視化について詳しく説明する。

3.1 大気流体モデル

雲のシミュレーションには以下に示す大気流体モデルを利用する。簡略化のため、大気を密度は一定で非圧縮、非粘性の流体であると仮定する。このとき、大気の流れ場の発展方程式は次式の非圧縮、非粘性

Navier-Stokes 方程式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} - \nabla p + \mathbf{B} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u} = (u, v, w)$ は大気流体の速度ベクトル、 p は圧力、 \mathbf{B} は浮力、 \mathbf{f} は浮力以外の外力である。式 (1) は運動量保存側を表す速度場の発展方程式であり、右辺第 1 項の移流項、第 2 項の圧力項、 \mathbf{B} 、 \mathbf{f} などの外力項で構成される。移流項とは速度場による大気流体の移動を表すものである。また、圧力項は圧力勾配による速度への影響、外力項は外力による速度場への影響を表す。式 (2) は質量保存則を表す連続の式である。浮力 \mathbf{B} については、水滴 (雲) の落下による周辺空気の引きずりも考慮して次式で表される。

$$\mathbf{B} = k_b \frac{T - T_0}{T_0} \mathbf{z} - k_g q_c \mathbf{z} \quad (3)$$

ここで、 T は空気塊の温度、 T_0 は静力学的平衡状態にある大気温度 (環境温度) である。 q_c は雲密度、 k_b 、 k_g はそれぞれの項の作用を調節する係数、 \mathbf{z} は鉛直方向の単位ベクトルである。式 (3) の第 1 項は空気塊と周囲の大気との温度差が浮力を生み出すことを表す。すなわち、暖かい空気塊は上昇し、冷たい空気塊は下降する。第 2 項は前述の水滴の落下にともなう周辺空気の引きずりを表している。

雲密度と水蒸気密度の発展方程式はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)q_c + C_c \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)q_v + C_c + S_v \quad (5)$$

$$C_c = \alpha(q_v - q_s) \quad (6)$$

ここで、 q_v は水蒸気密度である。式 (4) および (5) の第 1 項はそれぞれ雲密度、水蒸気密度の移流を表す。 C_c は相転移のための値であり式 (6) のように表される。 S_v は水蒸気源からの供給量である。また、 α は相転移の割合を調節するための比例係数であり、相転移率と呼ばれる。 q_s は飽和水蒸気密度である。式 (4)(5)(6) から、 $C_c > 0$ の場合、水蒸気が雲 (水滴) へ凝結し、 $C_c < 0$ の場合、雲 (水滴) が水蒸気へ気化する。

温度の発展方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)T - \Gamma_d v_z + Q C_c + S_T \quad (7)$$

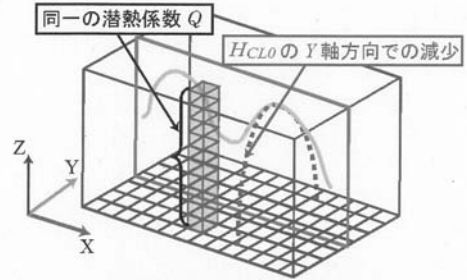


図 2 シミュレーション空間

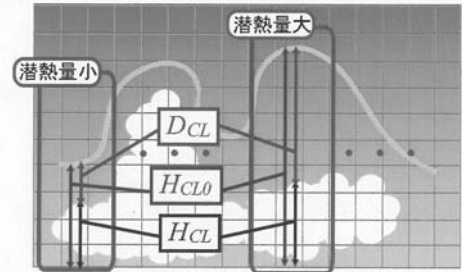


図 3 フィードバック制御

ここで、 Γ_d は乾燥断熱減率、 Q は潜熱係数と呼ばれ、これらも各項を調節するための係数である。また、 v_z は鉛直方向の速度ベクトル、 S_T は熱源からの熱量である。式 (7) の右辺第一項は温度の移流を、第二項は飽和に達しない空気塊の上昇にともなう断熱冷却による温度の低下を、第三項は相転移により発生する潜熱を表す。

3.2 雲のコントロール方法

3.1 節で示した大気流体モデルのシミュレーションをコントロールすることで、目標とする雲の形状を自動生成させる。シミュレーション空間を 3 次元格子に分割することで、解析を行う。コントロール方法にフィードバック制御と、ポテンシャルフィールドによる外力の作用を利用する。さらに、雲の発達が遅れている位置には、自動的に水蒸気を加えることで雲の発達を促す。以降に、各制御方法について詳しく説明する。

3.2.1 フィードバック制御

提案手法では、図 2 に示すシミュレーション空間を想定する。シミュレーション空間の最下層の各格子点 (i, j) において、その上方における輪郭線から決まる目標の高さ $H_{CL0}(i, j)$ と、シミュレーションにより生成された各フレームにおける雲の高さ $H_{CL}(i, j, t)$ との差 $D_{CL}(i, j, t)$ が最小となるよう PD 制御を用いて潜熱量を制御する (図 3 参照)。ここで、 i, j はそれぞ

れ X 軸, Y 軸成分における格子点番号, t は時間である。輪郭線はシミュレーション空間の Y 軸方向の中央部分に指定する。 $H_{CLO}(i, j)$ の設定については, Y 軸中央部分は輪郭線から取得し, その他の部分は, Y 軸中央から離れるほど, その高さを二次関数的に減少させる (図 2 参照)。

PD 制御とはフィードバック制御の一種であり, 入力値を出力値と目標の偏差の一次関数として制御する比例制御 (P 制御) と, 出力値の時間変化の大きさに比例した入力を行うことで, 急激な出力値の変化を抑制する微分制御 (D 制御) を組み合わせた制御方法である。P 制御により, 雲が輪郭線より下方にあるほど潜熱量が大きくなり雲の発達が促され, 目標に近づくほど潜熱量は少なくなり雲の発達は抑制される。また, D 制御により, 雲の急激な発達・下降を抑制し, 不自然な動きを防ぐことができる。PD 制御の計算式を上記で定義した変数を用いて次式のように表す。

$$Q(i, j, t) = K_P(i, j)(D_{CL}(i, j, t)) + K_D(i, j)\left(\frac{d(D_{CL}(i, j, t))}{dt}\right) + Q_0(i, j) \quad (8)$$

ここで, $Q(i, j, t)$ は式 (7) で使用する潜熱係数, $Q_0(i, j)$ は目標値に達したときにその状態を維持するための潜熱係数の値である。また, $K_P(i, j)$, $K_D(i, j)$ はそれぞれ P 制御, D 制御を調節するための係数である。式 (8) 右辺第一項は P 制御を, 第 2 項は D 制御を表す。 $K_P(i, j)$, $K_D(i, j)$, $Q_0(i, j)$ は, $H_{CLO}(i, j)$ を基に算出する。式 (8) を用いて決定した潜熱係数 $Q(i, j, t)$ は, 図 2 に示すように, Z 軸方向にはすべて同一の値を用いる。したがって, 水平方向の格子点数と同じ数の潜熱係数を制御することとなる。

また, $H_{CL}(i, j, t)/H_{CLO}(i, j)$ を雲の到達度とし, すべての格子点での到達度の平均を毎ステップ算出する。到達度がその平均を下回る格子点には, その差分の大きさに比例した水蒸気量を加える。こうすることで, 水蒸気の少ない部分でも雲の発生を促すことができる。

3.2.2 ポテンシャルフィールドによる外力

前述したように, 潜熱量の制御だけでは, 目的の形状の雲を生成することは難しい。そこで, 仮想のポテンシャルフィールドを配置し, そこから得られる外力により改善を図る。外力には次式を用い, 外力項として式 (1) に付加する。

$$F(q_e, \rho) = q_e \nabla \rho \quad (9)$$

ここで, ρ はポテンシャルフィールドの値を表す。こ

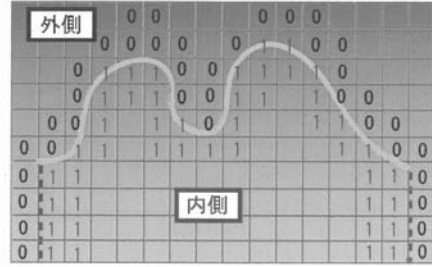


図 4 内外判定とポテンシャルフィールド

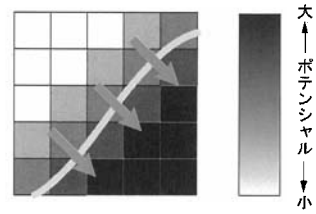


図 5 ポテンシャルフィールドによる外力

の外力は雲が輪郭線を超えるのを抑制するよう働く。ポテンシャルフィールドの設定については, まず, 図 4 に示すように, 指定した雲の形状の内外判定を行い, その内側には 1 を, 外側には 0 をシミュレーション空間の Y 軸中央の XZ 平面の各格子点に割り付ける。Y 軸方向にはすべて同一の値を設定する。次に, その結果にガウスフィルタ処理を施したものをポテンシャルフィールド ρ として用いる。そして, 毎フレームその勾配に比例した値を外力として加える。図 5 に示すように, ポテンシャルフィールドの勾配は輪郭線の境界付近ほど大きくなるため, この外力は, 形状の境界付近ほど強く, 遠ざかるほど弱くなるように作用する。また, 雲の密度に比例させることで, 雲の密度が存在する領域にのみ外力が作用する。

3.2.3 コントロールの処理手順

コントロールの処理手順について以下に示す (図 1 参照)。まず, 目標とする雲の形状をユーザーがマウス操作により描くことで指定する。指定した輪郭線を基に, シミュレーション空間の XY 成分の格子点ごとに雲の発達する目標値を設定する。次に, 目標値を基に, 各種パラメータを決定する。具体的には, 潜熱係数と PD 制御に使用する各制御パラメータの設定を行う。次に, 輪郭線を基にポテンシャルフィールドを設置する。ポテンシャルフィールドによる外力を作用させた大気流体のシミュレーションを行い, 毎ステップでの雲の高さを取得する。取得した値をフィードバックすることで, PD 制御を用い, 潜熱係数を決定する。

以上の処理を毎ステップ繰り返す。目標とする雲の形状を変化させる場合は、キーフレームで再び輪郭線を指定する。

3.3 シミュレーションと可視化

シミュレーション空間は、 $n_x \times n_y \times n_z$ の格子に分割する。各格子点には速度 \mathbf{u} 、水蒸気密度 q_v 、雲密度 q_c 、温度 T を割り付ける。初期状態として速度は微小な乱数を与え、雲密度はすべての格子で 0 とし、水蒸気密度、温度に対してはそれぞれ、環境水蒸気密度、環境温度となるよう水平方向で一定な値として与える。ここで環境温度は高度に対して線形に減少するよう設定し、環境水蒸気密度は高度に対して指数関数的に減少するよう設定する。また、熱源についてはユーザにより指定された位置、あるいはノイズ関数により設置する。境界条件は上下境界では固定境界条件とし、左右境界では周期境界条件とする。数値計算には Stam が提案した高速で安定な流体方程式の近似解法を利用して、雲のコントロール処理を考慮した大気流体モデルを離散的なタイムステップに分けて計算し、各格子に割り当てられた状態量を時間とともに更新させる。可視化については、土橋らの手法を利用する¹⁾。

4. 実験結果

提案手法を用いて、雲のアニメーションをコントロールした結果を図 6、図 7 に示す。図 6(a)、図 7(a) はそれぞれ、指定した輪郭線も付加した画像である。実験環境は、CPU:Pentium4 3.41GHz, グラフィックスハードウェア:NVIDIA GeForce7600GS を搭載した PC である。グラフィックス API には OpenGL を使い、生成した出力画像の解像度は 480×480 である。実装例 1, 2 ともに、シミュレーションで用いた格子数は $160 \times 80 \times 100$ であり、1 フレームあたりのシミュレーション時間は約 13 秒である。実装例 1 では、比較的一般的な雲の形状の輪郭線を指定し、実装例 2 では、特徴的な輪郭線を指定した。提案手法により、輪郭線を指定するだけで、様々な形状の積乱雲を生成することが可能である。本節で示した雲をシミュレーションパラメータを調整して生成することは極めて難しい。しかし、雲が目標に達した後は、時間経過とともに、輪郭線付近に大量の雲が溜まり、積乱雲の特徴であるバブル状の形状が失われ不自然な映像となってしまう場合がある。この問題については、今後の課題とする。

5. まとめ

本稿では、ユーザーが指定した輪郭に沿った雲が自

動生成される方法を提案した。提案手法により、雲の輪郭線を指定するだけで、細かいパラメータを設定することなく、ユーザーの意図を反映した形状の積乱雲を生成することが可能となった。

今後の課題として、輪郭線だけでなく、雲の 3 次元の形状まで指定・制御できる手法の開発が挙げられる。また、目標到達後の時間経過にともない、雲が不自然な映像とならないような改善が必要である。

謝辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) により行われた。

参考文献

- 1) Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. In *Proc. SIGGRAPH '00*, pp. 19–28, 2000.
- 2) R. Fattal and D. Lischinski. Target-driven smoke animation. In *tog (Proc. of SIGGRAPH 2004)*, pp. 441–448, 2004.
- 3) J. Hong and C. Kim. Controlling fluid animation with geometric potential. In *Computer Animation and Virtual Worlds (CASA 2004)*, Vol. Vol. 15, pp. 147–157, 2004.
- 4) A. Lamorlette and N. Foster. Structural modeling of flames for a production environment. In *Proceedings of SIGGRAPH 2002*, pp. 729–735, 2002.
- 5) A. McNamara, A. Treuille, Z. Popovic', and J. Stam. Fluid control using the adjoint method. In *ACM Transactions on Graphics*, pp. 449–456, 2004.
- 6) R. Miyazaki, Y. Dobashi, and T. Nishita. Simulation of cumuliform clouds based on computational fluid dynamics. In *EUROGRAPHICS 2002 Short Presentations*, pp. 405–410, 2002.
- 7) L. Shi and Y. Yu. Controllable smoke animation with guiding objects. In *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, pp. 140–164, 2005.
- 8) L. Shi and Y. Yu. Taming liquids for rapidly changing targets. In *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 229–236, 2005.
- 9) J. Stam. Stable fluids. In *In SIGGRAPH 99 Conference Proceedings, Annual Conference Series, August 1999*, pp. 121–128, 1999.



(a)



(b)

图 6 实装例 1



(a)



(b)

图 7 实装例 2