

粒子ベースによる雲のビジュアルシミュレーション

菊池 司⁺ 村岡一信⁺⁺ 千葉則茂⁺
⁺岩手大学工学部情報工学科 ⁺⁺盛岡短期大学

あらまし

映像コンテンツの制作には、CGを中心としたデジタル映像技術の利用が不可欠となっている。近年、特に映画の制作においては、実写映像とCG映像の違和感のない合成技術が開発、利用されており、自然界に存在する様々な物体や現象をリアルに表示するCG技術の開発が、ますます重要なテーマとなっている。

本報告では、雲の映像生成のための3次元CG手法を提案する。本手法では、雲を多数の雲塊から構成されていると見なし、それぞれの雲塊を1つのパーティクル(雲粒子)によって表し、ビジュアルシミュレーションを行っている。本手法は、このパーティクルを温度、気圧、空気密度の関係により定義される浮力と、パーティクル同士の相互作用力、さらにパーティクルが大気より受ける作用力によって運動させるモデリング法と、パーティクル群から生成されるボリュームデータから、等方散乱、ミー散乱、およびレイリー散乱を一次結合した位相関数による一次散乱のみを考慮した雲のレンダリング法からなる。

Particle-based Visual Simulation of Clouds

Tsukasa Kikuchi⁺ Kazunobu Muraoka⁺⁺ Norishige Chiba⁺
⁺Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University
⁺⁺Morioka Junior College

Summary

Computer graphics(CG) is a key technology for producing visual contents. Currently, computer generated imagery(CGI) techniques are being developed and applied, particularly in the field of film production, to provide total composition of real images and CG images. Therefore, the development of CG technologies that are capable of realistically displaying a variety of objects and phenomena that exist in the natural world is becoming increasingly important.

This paper proposes a three-dimensional CG technique for generating cloud images. The proposed technique regards cloud as a group of cloud masses, each of which is represented by a single particle (cloud particle) for the visual simulation of cloud. This technique consists of a modeling process and a rendering process. The modeling process moves each particle according to the ascending force, which is dependent on the relationship between temperature, atmospheric pressure, and air density, the force of interaction between particles, and the repulsive force the particle receives from the atmosphere. The rendering process takes into account only the first-order scattering using the phase function, which is coupled from isotropic scattering, Mie scattering, Rayleigh scattering in the volume data defined by the cloud particles.

1. はじめに

実写映像とCG映像の違和感のない合成技術が可能となり、映像産業においては、CGを用いた映像の占める割合が年々高まっている。そのため、自然界に存在する様々な物体や現象をリアルに表示するCG技術の開発がますます重要なテーマとなっている。

一方、自然物や自然現象の表現においては、その形成メカニズムに基づいた手続きのなモデリング法(シミュレーション法)が開発できれば、形や運動を自動生成するというアニメーションも可能な表現法が実現可能である。

自然物の中でも、雲の映像生成に関する研究には、モデリングをフラクタル手法や $1/f$ ノイズで行ったもの[Gar94][Gar85]や、物理ベースのレンダリングアルゴリズムを提案したものがある[Kaj84][Nis96]。これらの手法においては、モデリングはインタラクティブに行われており、時間変化に伴う雲の発生・成長・消滅や運動までは表現しきれていない。

一方、雲の全体的な動きに着目したCG映像の生成に関しては、クラウドボールを用いた台風のアニメーション[大口91]や、雲の実写画像に基づいたメタボールによる3次元雲のアニメーション[土橋97]、雷雲等の数値シミュレーションによる雲の可視化[Llo95]などがあげられる。しかしながら、主な目的が気象学上の可視化であるため、雲のスケールが大きく、通常の景観映像の生成には向いていない。

また、景観映像の生成を目的とし、雲の発生・成長・消滅や運動を含んだシミュレーション法を提案したものとしては、気流の場をあらかじめ関数定義し複雑な数値計算を避ける手法[松田95]や、渦場による雲粒子の運動モデル[清水95]があげられる。前者は関数定義による気流の場を考慮したものであり、アニメーションも作成されている。しかしながら、モデルの記述に不明なところが多く、提案手法をインプリメントすることは難しく、その能力を確認することは困難である。また、いずれも粒子ベースの積乱雲を中心としたモデルであるが、積乱雲の成長のシミュレーションにおいて、満足できる結果が示されていない。

本報告では、雲を雲塊を表す多数のパーティ

クルから構成されていると見なし(図1参照)、そのパーティクルを温度、気圧、空気密度の関係により定義される浮力と、パーティクル同士の間相互作用力、さらにパーティクルが大気より受ける作用力によって運動させるモデリング法と、等方散乱、ミー散乱、およびレイリー散乱を一次結合した位相関数による一次散乱のみを考慮したレンダリング法を提案する。

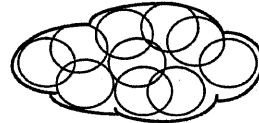


図1. パーティクル(雲粒子)モデル

2. 雲粒子の運動モデル

ここでは、パーティクル(以下雲粒子とする)の運動モデルについて説明する。

雲は主に空気の上昇に伴って発生して様々な形を形成する。これは水蒸気を含んだ空気が冷えて過飽和に達し、水蒸気が凝結すること起因する[高橋82]。大気中で空気が冷える過程にはいろいろの型があり、空気中の水蒸気の量ともあいまって、それにより生ずる雲の形、厚さ、量などいろいろ違ってくる。

大気中で空気が冷える過程で重要なのは、上昇気流に伴う断熱冷却と熱対流である。本モデルでは関数定義される上昇気流モデルとは別に、大気温度、雲粒子温度、気圧、空気密度から雲粒子の浮力を計算し、雲粒子の運動モデルとする手法を提案する。

すなわち、雲粒子に働く力 F として以下のような力を定義し、オイラー法により雲粒子の運動シミュレーションを行う。

$$F = f_a + f_g + f_m + f_r \quad (1)$$

f_a : 浮力
 f_g : 重力
 f_m : 雲粒子間力
 f_r : 大気より受ける力

以下、これらの力について説明する。

(1) 浮力 f_a

高度 $h = 0$ の場合 :

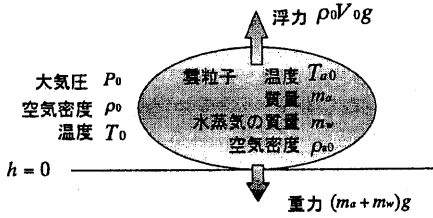


図2. 高度 $h=0$ の場合

まず、高度 $h = 0$ を考える。図2において、雲粒子の温度 T_{a0} 、質量 m_a 、水蒸気の質量 m_w は初期値を与えるものとし、さらに大気と雲粒子内の気圧は同じものと仮定すると、雲粒子の空気密度 ρ_{a0} は理想気体の状態方程式より次式で表現される[木村 84]。

$$\rho_{a0} = \frac{P_0}{2.8705T_{a0}} = \frac{1013.25 \text{ [hPa]}}{2.8705T_{a0}} \quad (2)$$

P_0 : 大気圧 = 1013.25 [hPa]

したがって、体積 V_0 は次式で表される。

$$V_0 = \frac{m_a}{\rho_{a0}} \quad (3)$$

よって、浮力 f_a は次式で表される。

$$|f_a| = \rho_0 V_0 g \quad (4)$$

高度 h の場合 :

次に雲粒子が上昇し、高度が h の場合において、高度 $h = 0$ の場合と同様に、浮力 f_a は次式で表される。

$$|f_a| = \rho_h V_h g \quad (5)$$

$$V_h = \frac{m_a}{\rho_{ah}} \quad (6)$$

$$\rho_{ah} = \frac{P_h}{2.8705T_{ah}} \quad (7)$$

$$T_{ah} = \text{Const} \cdot P_h^{0.19025} \quad (8)$$

$$\text{Const} = \frac{T_{a0}}{P_0^{0.19025}} = \frac{T_{a0}}{1013.25^{0.19025}} \quad (9)$$

ここで、大気圧 P_h 、空気密度 ρ_h は理科年表[理科 97]より求めるものとする。

(2) 重力 f_g

図2より重力 f_g は次式で表される。ただし、方向は重力方向とする。

$$|f_g| = (m_a + m_w)g \quad (10)$$

(3) 雲粒子間力 f_m

雲粒子の体積を粒子間に働く斥力の存在を仮定することにより実現する。また、粒子間が離れすぎないように、引力も仮定する。

本モデルでは、

- (a) 安定状態では相互作用力は働かない
- (b) ある一定距離より小さいときは斥力が働く、および
- (c) ある一定距離より大きいときは引力が働く、

で定義する相互作用力 f_m を働かせることにする(図3参照)。

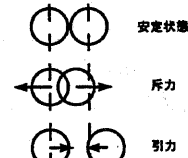


図3. 相互作用力

なお、本報告では図4に示すような相互作用力を用いる。

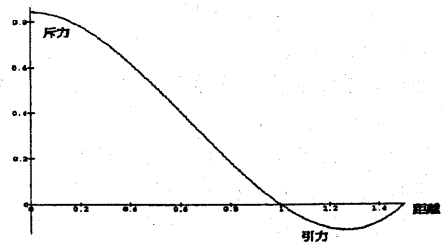


図4. 相互作用力の大きさ

(4) 大気から受ける力 f_r

雲は真空中で生成・消滅を繰り返すわけではない。雲の周囲には必ず空気（あるいは凝結していないため可視化されていない水蒸気かもしれない）が存在している。そのため、雲粒子には雲粒子間だけではなく、大気からの作用力も働いていると考えられる。

そこで、大気から受ける力として斥力 f_r を仮定する。ただし、この斥力には自然な揺らぎを与えるため、 $1/f^\beta$ ノイズにより各格子点からの斥力にばらつきを持たせるものとする。斥力 f_r の定義は以下の通りである。

なお、大気からの斥力についても図4に示した相互作用力の斥力を用いる。

- (1) 3次元 $1/f^\beta$ ノイズを生成する。
- (2) 空間上に配置された各格子点に $1/f^\beta$ ノイズ成分を図4に示す相互作用力の斥力の大きさに加え、大気からの斥力 f_r とする。

3. 雲のレンダリング

ここでは、一次散乱のみを考慮したレンダリング法を用いた。

雲のレンダリングに関しては、前述のように多重散乱を考慮した物理ベースのレンダリング手法[Nis96]があげられるが、計算時間の観点から、本シェーディングモデルでは、等方散乱、ミー散乱、およびレイリー散乱を一次結合した位相関数による一次散乱のみを考慮している。

4. シミュレーション例

図5にかなとこ雲まで成長シミュレーションを行った結果のレンダリング例を示す。

今回のシミュレーションでは、 $1/f^\beta$ ノイズの β は $\beta = 15$ とした[Ben85]。

また、今回のレンダリングには、それぞれの雲粒子に雲塊を表す3次元テクスチャをマッピングする手法を採用した[Chi97]。3次元テクスチャは、メタボールの密度分布[千葉97]を基本として、密度分布に揺らぎを加えるスクランブル手法を適用した[河合97][クワ96]。

ここで、(1)はステップ100、粒子数1145、

(2)はステップ300、粒子数2843、(3)はステップ500、粒子数3890、(4)はステップ700、粒子数4926、(5)はステップ1000、粒子数6417である。

なお、図5のレンダリングには雲粒子群より得られるボリュームデータを、 $128 \times 128 \times 128$ のボクセル配列1つに格納し、ボリュームレンダリングをする手法を用いた。レンダリング時間はHP C160 16.3 SPECfp95を使用し、10分から15分程であった。

また図6に雲粒子1個に対応するボリュームデータを $16 \times 16 \times 16$ のサイズの3Dテクスチャとして、各雲粒子にマッピングすることによりレンダリングした画像を示す。雲粒子のデータは図5(5)のものと同じものを用いた。この手法では、画像の解像度を高く取れる一方、数時間の計算時間を必要とするという問題がある。これは、雲の内部に存在するような粒子にも3Dテクスチャをマッピングしているためである。この問題に対して現在、雲の内部を表すような別の3Dテクスチャを用意して、マッピングすべき数を格段に削減し、高速化を図るという手法について検討を行っている。

5. まとめ

雲の形成や運動のシミュレーション(モデリング)法として、雲塊を表す多数のパーティクルにより雲を構成し、そのパーティクルを温度、気圧、空気密度の関係により定義される浮力と、パーティクル同士の相互作用力、さらに大気とパーティクルの間に働く相互作用力によって運動させるモデリング法を提案した。シミュレーション例により、自然な揺らぎを伴う複雑な形状が表現できることが示せた。

さらに映像生成手法として、等方散乱、ミー散乱、およびレイリー散乱を一次結合した位相関数による一次散乱のみを考慮したレンダリング法を提案した。レンダリング法に関しては前述したように、計算の高速化が今後の課題として残されている。

シミュレーションにおいては、雲粒子の消滅モデルの実現、また、積雲や巻雲といった種々の雲に対応した汎用性のあるシミュレーション法の構築などが今後の課題である。

謝辞

本論文で提案した技術の一部は、情報処理振興事業協会の創造的ソフトウェア育成事業の一つのテーマ「高度なマルチメディア・コンテンツ制作基盤技術：“自然”のCG」において開発されたものである。

参考文献

- [Chi97] N. Chiba, K. Muraoka, A. Doi, J. Hosokawa, "Rendering of Forest Scenery Using 3D Textures", THE JOURNAL OF VISUALIZATION AND COMPUTER ANIMATION, Vol. 8, pp. 191-199, 1997
- [Gar94] G. Y. Gardner, "Modeling Amorphous Natural Features", SIGGRAPH'94, Course Note (Course 22), 1994
- [Gar85] G. Y. Gardner, "Visual Simulation of Clouds", Computer Graphics, Vol. 19, No. 3, pp. 297-303, 1985
- [Kaj84] J. T. Kajiya, B. P. Von Herzen, "Ray Tracing Volume Densities", Computer Graphics, Vol. 18, No. 3, pp. 165-174, 1984
- [Llo95] Lloyd Treinish, Deborah Silver, "Visualization Blackboard", IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 12-15, May, 1995
- [Nis96] T. Nishita, Y. Dobashi, E. Nakamae, "Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light", SIGGRAPH'96, pp. 379-386, 1996
- [大口 91] 大口孝之, 上田明彦, 佐藤雅弘, "台風・コンピュータアニメーションによる科学啓蒙映像の制作", 第7回 NICOGRAPH 論文集, pp. 365-374, 1991
- [河合 97] 河合直樹, "画像変形を利用したマーブリング模様制作", 第13回 NICOGRAPH 論文集, pp. 11-21, 1997
- [クワ 96] クワディオ・ミッシェル, "1/f ノイズのCGへの応用に関する研究", 岩手大学大学院工学研究科修士課程情報工学専攻修士論文, 1996
- [清水 95] 清水英之, 牧野光則, 大石進一, "粒子の成長を考慮した積乱雲の表現", 1995年 第11回 NICOGRAPH 論文集, pp. 142-149, 1995

[土橋 97] 土橋宜典, 西田友是, 山下英生, "雲画像からのメタボールによる3次元雲の生成およびアニメーション手法", Visual ComputingグラフィクスとCAD 合同シンポジウム'97 予稿集, pp. 73-78, 1997

[松田 95] 松田夏子, 倉立尚明, 鈴木薫, "時間および視点変化を考慮した雲の可視化", 1995年電子情報通信学会総合大会, D-668, pp. 394, 1995

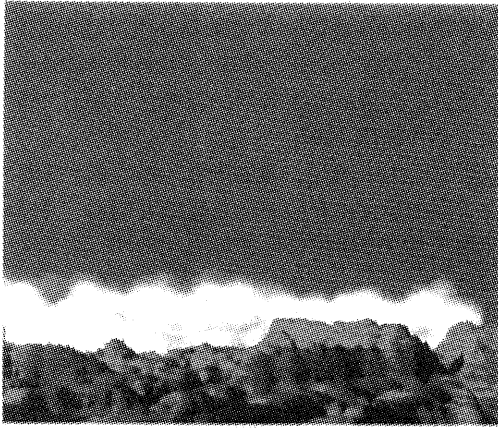
[Ben85] Benoit B. Mandelbrot, 広中平祐, "フラクタル幾何学", 日経サイエンス社, 1985

[木村 84] 木村竜治, "地球流体力学入門", 気象学のプロムナード 13, 東京堂出版, 1984

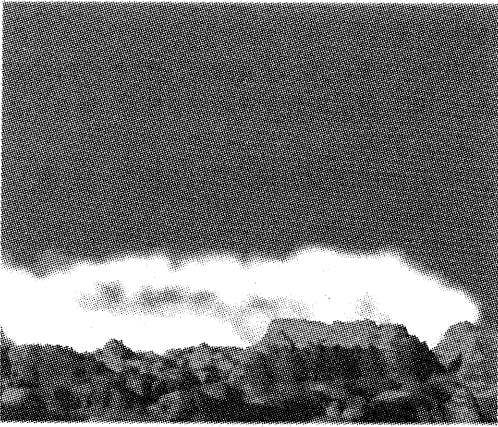
[高橋 82] 高橋浩一郎, "雲を読む本", 講談社, 1982

[千葉 97] 千葉則茂, 土井章男, "3次元CGの基礎と応用", 新情報教育ライブラリ M-10, サイエンス社, 1997

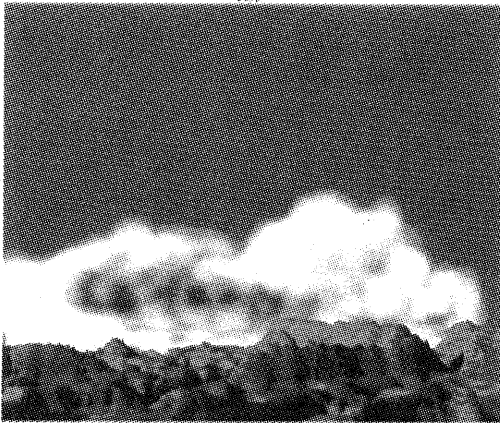
[理科 97] 国立天文台編, "理科年表", 丸善



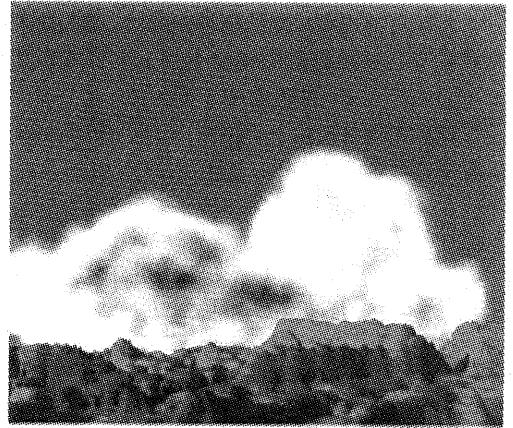
(1)



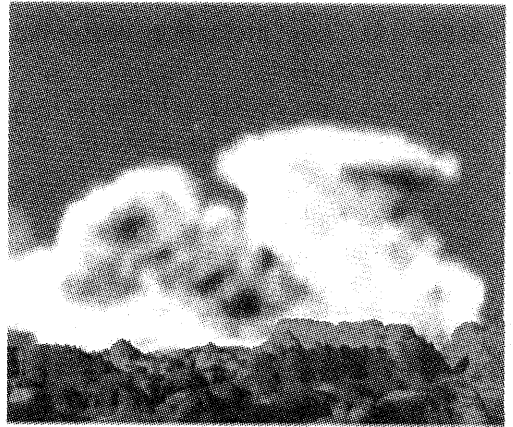
(2)



(3)



(4)



(5)

図5. レンダリング例 (低解像度)

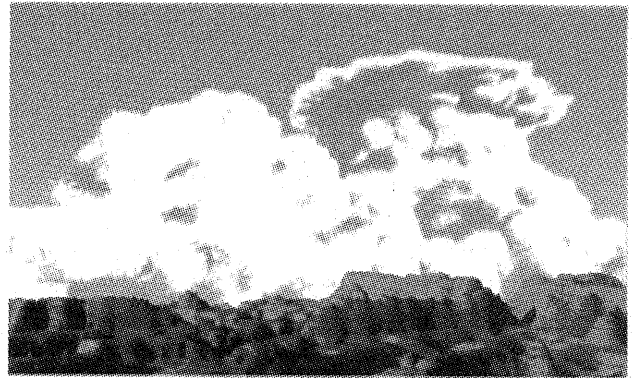


図6. レンダリング例 (高解像度)