

インタラクティブに落雷アニメーションを生成する ビジュアルシミュレーション手法

西 祐貴¹ 床井 浩平²

概要: 物理シミュレーションの目的は、現実世界の現象を正確に再現することにあるが、近年はこれを映像表現に応用することが試みられている。そこで本研究は、VFX をポストプロダクション作業の段階において作成することを目的としたビジュアルシミュレーションの開発を行う。本研究が提案するビジュアルシミュレーションは、雷を直感的に操作することを目標とする。本研究が提案する手法は、ラプラス方程式からシミュレーション空間の電位勾配を決定し、それによる進展確率によって雷の大まかな放電経路を生成する。その後、Perlin Noise を付加することで最終的な雷の放電経路を決定する。また、レンダリング時に放電経路に対してグローを生成し、雷を線光源の集まりと仮定して、3D シーンのライティングに用いる手法を提案する。

An Interactive Visual Simulation Method for Generating a Lightning Animation

Nishi Yuuki¹ Tokoi Kohe²

Abstract: The purpose of the physical simulation is to accurately reproduce the behavior of the real world. In recent years it has been attempted to apply it to the image representation. In this research, we are developing of visual simulation in order to apply the making a VFX in the stage of post-production work. The goal of visual simulation that we proposed is to intuitively manipulate the thunder. Technology that we proposed determines the potential gradient of the simulation space from the Laplace equation and generate a rough discharge path of the lightning by the progress probability. Then, the Perlin Noise is added to the discharge path. In addition, the proposed technique generates a glow to the discharge path at the time of rendering. Finally assuming the lightning a collection of line light sources, we propose a method for use in 3D scene lighting.

1. はじめに

近年、物理シミュレーションシステムはエンターテイメントの分野にも幅広く応用されている。映像制作やゲームなどのエンターテイメント分野で物理シミュレーションの結果を用いて非現実的な映像を作成する際は、観測者に不自然さを感じさせないだけの精度や正確性をシミュレーションによって確保したうえで、映像を制作した人の意図

が映像を見る人に伝わるかどうか重要となる。そのためには、誇張表現などの様々なデザイナーによる演出をビジュアルシミュレーション結果に反映する必要がある。また、そのビジュアルシミュレーションには、デザイナーの試行錯誤に耐えうるだけの対話性が確保されていなければならない。

このことから、エンターテイメント分野での応用を目的としたユーザーの入力にリアルタイムに応答するシミュレーション機能と演出が可能な描画機能を統合したビジュアルシミュレーション手法を開発することは有用であるといえる。本研究では、大規模な放電現象である雷をビジュアルシミュレーションの題材とした。本論文では、対話的

¹ 和歌山大学大学院 システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

² 和歌山大学 システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

に落雷アニメーションを自動生成するビジュアルシミュレーションの手法と本研究に必要な知識について解説する。

なお、本論文でのリアルタイムとは「入力データに対して即時応答があること（60fps程度）」と定義し、インタラクティブという言葉は、「ユーザーの入力に対応した結果をリアルタイムに反映し、対話的な処理が可能であること」と定義する。

2. 関連研究

コンピュータグラフィックスにおける表現や演出を追求したシミュレーションとして、モーションブレンダーを拡張したカートゥーンブレンダー [1] や、動きを考慮した水彩画風リアルタイムレンダリングにおける GPU の応用 [2] などがある。対話的な物理シミュレーションとしては、ユーザ制御可能な風による樹木の揺れのビジュアルシミュレーション [3] や、Sparta[4] がある。

雷のような放電現象をモデル化して CG で可視化したものに、Physically Based Animation and Rendering of Lightning[5] や、Visual Simulation of Lightning[6] がある。前者は、Sosorbaram らの DBM(Direct Breakdown Model)[7] によってシミュレーションを行い、APSF[8] によって雷を光源として描画している。後者は、パーティクルシステムを用いて放電経路を生成し、レイトレーシングを拡張した手法で雷を描画している。いずれも、写実的な雷や放電現象の描画を目標としている。また、NVIDIA は確率的 L-System とビルボードを使用してリアルタイムな雷のレンダリング [9] を行った。これは周囲の 3D オブジェクトのライティングや大気を照らすグロー処理も行われているが、放電経路に物理的裏付けがなく、ユーザーがインタラクティブに方向を指定することはできない。インタラクティブな落雷シミュレーションとしては、スクリーンをなぞることで自由な稲妻を作成するビジュアルシミュレーション [10] や、岩手大学の松山らによる Real-time animation of spark discharge?, iwate 提案されている。松山らの手法は、GPU を用いることで電位勾配が考慮された放電経路をインタラクティブに生成でき、リアルタイムに描画が可能である。しかし、放電を主軸に置いているため、周囲へのライティングが行われていない。

本研究はこれらに対して、ユーザーが指定する任意の二点間に電位勾配を考慮した経路をインタラクティブ生成し、周囲の 3D シーンに対する陰影計算を含むリアルタイムな落雷アニメーションの描画手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 準備

提案手法について述べる前に、雷や放電の原理について説明する。正電荷と負電荷が近くに存在すると、両電荷間の吸引力によって中和しようとする。このときにおこる電

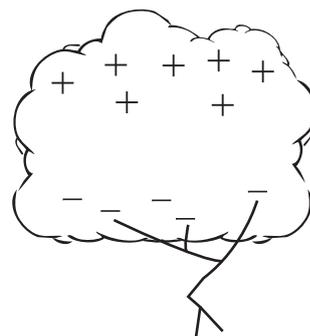


図 1 下向き負極性落雷

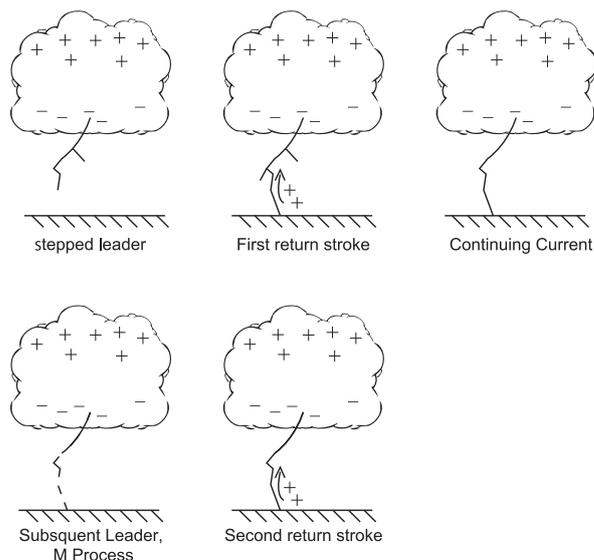


図 2 落雷の放電過程

子の移動によって電流が流れる。また、電気エネルギーの強さを電位と呼び、電流は電位の高い方から低い方へと流れることが分かっている [12]。

雷放電も同様に、雲内に存在する電荷の反応によって引き起こされる。どの電荷と反応を起こすかによっていくつかの種類に分けられるが、本研究では負電荷が地上の正電荷との中和を目指すために起こる下向き負極性落雷 [14] に着目し、雷の起点を負電荷、シーン中のオブジェクト、雷の終点に正電荷が存在するとする。

雷放電にはいくつかの過程があるが、ここでは落雷の再現に関して必要な視覚的な状態遷移のみを記述する。まず、段階的に大気を絶縁破壊する放電がある。これを Stepped Leader と呼ぶ。この放電が段階的に進む理由は、先端の電荷密度が低くなり後方からの電荷補給を待つて再び強い局所電界が満足された時に次の絶縁破壊が進行するためである。2 番目にみられる First Return Stroke とは、放電経路の形成がほぼ成し遂げられた瞬間に、形成された放電経路を通して地上から雲へ流れる電流である。次に、Continuing Current と呼ばれる放電経路の発光が続き、Subsequent Leader が引き起こされる。M Process 以降の過程で発光強度が増すことがあり、それが M Process

と呼ばれる。Continuing Current が起きずに Subsequent Leader が引き起こされる場合もあり、最後に地上からの放電である Subsequent Return Stroke がある [15]。本研究では、これらの現象を再現し、コントロールすることを目指す。

3.2 放電経路生成手法

本研究では、DBM を応用した放電経路生成手法を提案する。

Step1.

まず、シミュレーションを行う空間を格子に分割し、一つ一つのセルに電位を設定する。このとき、大気中の電位は 1 のラプラス方程式に基づく。これを 2 の差分方程式に変形する。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\phi_{i,j,k} = \frac{1}{6}(\phi_{i+1,j,k} + \phi_{i-1,j,k} + \phi_{i,j+1,k} + \phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j,k+1} + \phi_{i,j,k-1}) \quad (2)$$

そして、放電の起点にあるセルに負電荷が存在し、電位を -1 とする。ユーザーが指定した終点やシーンのオブジェクトがあるセルを電位 0 として境界条件を設定すると、シミュレーション空間中の各セルの電位値が求まる。

通常、ラプラス方程式を使用した DBM をシミュレーションに用いる場合、リアルタイムに計算を行うことが難しくなるが、本研究では 2 式を GPU を用いて解くことによって、リアルタイムに計算を行うことを試みる。

Step2.

次に、設定した電位からどのようにして放電経路を生成

するかということを説明する。Stepped Leader に観測されるステップ状の放電経路を生成するために、雷の先端にある節から次に進む地点を繰り返し決定することが必要である。その繰り返す計算手法を次に述べる。最初に、雷の起点を第一の雷の節とする。そして、現在の節が存在するセルの電位勾配ベクトルから一定の探索範囲 θ (探索角度)、 r (探索距離) 内にあるセルの中から、正規乱数を用いてランダムにセルを選択する。選択されたセルの進展確率 p_i を以下の式で計算し、もっとも高いセルを目指して進む。進展確率が同等、あるいは非常に近い値を持つ場合などは、分岐を生成する。

$$p_i = \frac{(\phi_i)^\gamma}{\sum_{j=1}^n (\phi_j)^\gamma} \quad (3)$$

この式において γ は調整値である。

また、雷が一回の計算において進む距離は、長さ l を平均とし、正規乱数によってばらつきを持たせる。この手法により、空間中の電位を考慮しながら、放電経路特有のブレを再現できる。

Step3.

雷の経路を高速に生成するために、Step1,2 では大まかな経路のみを決定し、細かなブレを付加することで最終的な経路を決定するという処理を行う。このとき、使用するノイズは Perlin Noise 使用する。Perlin Noise とは、多様なスケールのノイズを生成し、加算合成をおこなうことでより自然なばらつきを作りだすことができる手法である？。

これらの手順を示した図を 3.2 に示す。図 3.2 は、2 次元で示しているが、実際は 3 次元で行う。

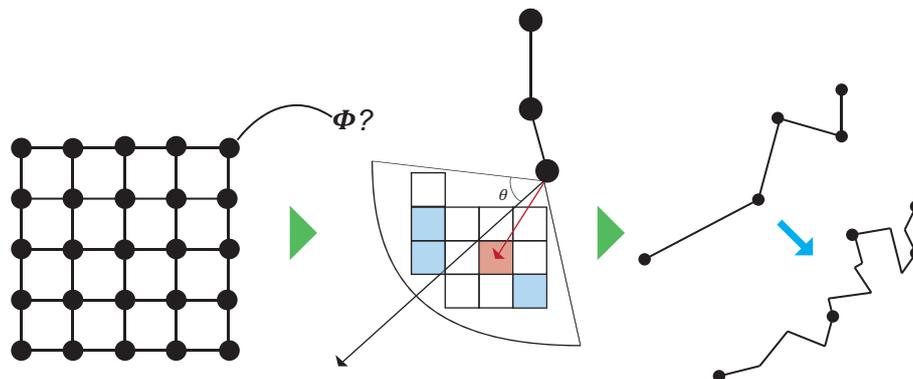


図 3 放電経路生成手順

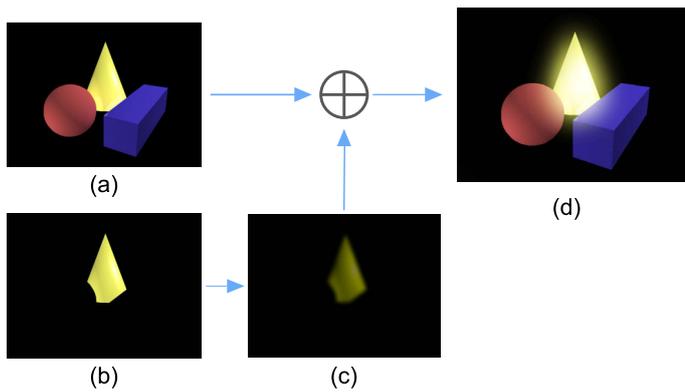


図 4 real-time glow によるグロー処理の手順

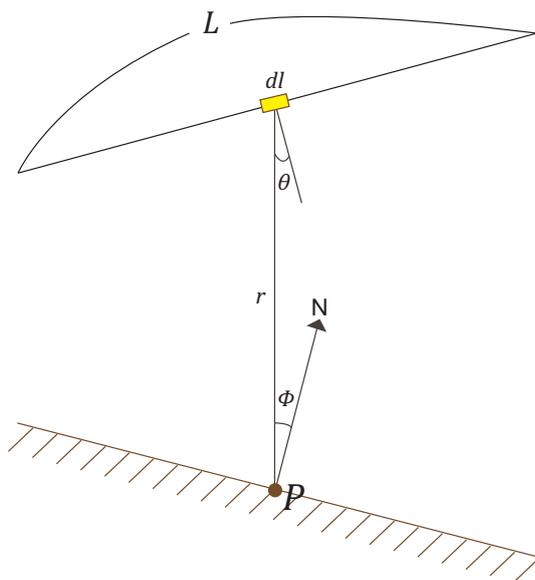


図 5 線光源をモデル化した図

3.3 雷のレンダリング手法

本研究では、ビルボードを用いて雷をレンダリングした。このビルボードは雷の進行方向のベクトルと、それと直行しスクリーンと平行なベクトルを含む平面上に配置する。

また、雷が大気を照らすグロー効果は James らによる real-time glow[17] を用いて再現する。これは、光源をレンダリングした画像に乗算、ぼかし処理を加えた後、元画像と加算合成することで実現する手法である。

3.4 雷による周囲のライティング

雷は、M Process の段階において周囲の大気や周囲にあるオブジェクトを明るく照らすことができるほど強く発光する。このため、雷自身のレンダリングやリアルタイムグローによるグロー表現以外にも、雷自身を光源とした陰影計算を行う必要がある。この節では、雷を線光源の集まりとしてモデル化し、周囲に対する陰影づけを行う手法について説明する。

線光源は、微小な点光源の集まりとして定義され、 P 地点での放射照度 I_P は以下の式でモデル化されている。

$$I_P = \int_0^L \frac{\cos \theta \cos \Phi}{r^2} dl L(P) \quad (4)$$

L は線光源の長さで、 r は点 P と微小な線光源 dl との距離、 θ と Φ はそれぞれ距離 r と線光源に対する垂線の角度、点 P が存在する面の法線ベクトルと距離 r との角度である。なお、 $L(P)$ は点 P における放射輝度である。しかし、この式は積分を使用しているため、雷の経路すべてを線光源として捉えると計算量が膨大になってしまうのは明白である。そこで、本研究では 3.2 の Step2 において、電位勾配に基づいて作成した雷のたまかな進行方向を線光源の集合とする。その際、分岐の経路を考慮せず基点から終点に向かう単一の経路のみを扱う。

4. 考察

本論文では、雷の経路をインタラクティブに生成し、雷を光源とした周囲の陰影計算も含め、リアルタイムな描画を行う手法を提案した。この手法を実装し、検証を行うことが必要である。また、3.2 節のラプラス方程式を GPU で解く際、さらに高速にこれを解くために SOR 法 [18] の導入を検討する。

雷や放電のビジュアルシミュレーションはいくつか存在するが、本研究は実際の 3D シーンにインタラクティブに介入できるビジュアルシミュレーションの開発を目標とする。

参考文献

- [1] 川岸 祐也, 初山 和秀, 近藤邦雄, カートゥンブレンダー: セルアニメーションのための非写実的モーションブレンダー, 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告 2002(33), p 37-42, 一般社団法人情報処理学会, 2002
- [2] 向 友香, 床井 浩平: 動きを考慮した水彩画風レンダリング手法, 映像情報メディア学会技術報告 36(19), p 27-30, 一般社団法人映像情報メディア学会
- [3] 朱 晓宇, Abdul Hadi Bin Mohdnazir, 伊藤弘樹, 菊池 司: ユーザ制御可能な風による樹木の揺れのビジュアルシミュレーション
- [4] 狐塚 諒太: 「Sparta」CG の炎や煙を直感的に作れる世界で最初の手書きアプリ
<http://camp-fire.jp/projects/view/237>.
- [5] T. Kim, M.C. Lin: “Physically based animation and rendering of lightning,” Proceeding PG '04 Proceedings of the Computer Graphics and Applications, 12th Pacific Conference pp. 267 - 275
- [6] Todd Reed Brian Wyvill: “Visual simulation of lightning,” Proceeding SIGGRAPH '94 Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p 359-364
- [7] L Niemyer, L. Piertronero and H.J. Wisemann: “Fractal Dimension of Dielectric Breakdown,” Phys. Rev. Lett., 52, p.1033-1036 (1984)
- [8] S. Narasimhan and S. Nayar. Shedding light on the weather. Proceedings of IEEE CVPR, 2003.
- [9] NVIDIA :
<http://www.youtube.com/watch?v=aFmvmwGcbNY>
- [10] 田中 惇也, 菊池 司: 稲妻形状を制御可能とするビジュアル

ルシミュレーション手法の開発

- [11] Katsutsugu Matsuyama , Tadahiro Fujimoto , Norishige Chiba , Visual Comput , Published online: 24 August, 2006
- [12] 東京電機大学, 入門 電磁気学, 東京電機大学出版局, 2006, p6
- [13] 北川 信一郎, 雷と雷雲の科学, 森北出版, 2001
- [14] 饗庭 貢, 雷の科学, コロナ社, 1990
- [15] 河崎 善一郎, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 80, No. 7, 2004
- [16] Ken Perlin : http://freespace.virgin.net/hugo.elias/models/m_perlin.htm
- [17] Greg James John O'Rorke : real-time glow, GPU Gems, p293-310 ,2004
- [18] 伊里 正夫, 韓 太舜, 佐藤 創, 星 守 : 情報処理技術の数学, p47 , 9月6日 ,1996