

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の開発

西 祐貴¹ 床井 浩平¹

概要: 本研究では、ユーザーが指定した任意の二点間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の開発を行った。提案手法は、方向性を持った放電経路を、雷の進行方向を中心に分布する正規乱数をもとに生成する。また、これを強烈的な発光源としてユーザーに知覚させるために、レンダリング時に放電経路に対してグローを生成する。提案手法はこれをリアルタイムで実行することにより、ゲームなどの対話的なアプリケーションの視覚効果として利用できる。

1. はじめに

1.1 研究背景

自然現象を物理法則に基づいてシミュレートし、その結果をコンピュータグラフィックスで表現する研究は盛んに行われている。近年では、物理シミュレーションシステムはエンターテインメント分野にも幅広く応用されている。

物理シミュレーションの結果を映像制作やゲームなどのエンターテインメント分野で利用する際は、大規模な自然現象を人為的に制御するなどの非現実的な表現が求められることがある。このとき、物理シミュレーションにより再現される現象や運動において、その精度や正確性は重要ではない。

一般的に、先に述べた人為的に制御された大規模な自然現象のような非現実的な映像を作成する際は、それに対して人があらかじめ抱いているイメージにどれだけ近づけるかが課題になる。そのために、映像作品には誇張表現などの様々な演出が付加される。

一方、現在利用されている物理シミュレーションシステムは現実の物理現象の精密な再現を目的としている。このため、物理シミュレーションシステムをエンターテインメントに応用する場合は、シミュレーション結果をビジュアル化したのちに、観察者を納得させるための演出や表現を人の手で付加しなければならない。

このことから、エンターテインメント分野での応用を目的とした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「演出に特化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。そこで本研究では、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対象にした。

本論文では、対話的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について解説し、それによる生成画像を示す。提案手法は描画を含めた全ての処理をリアルタイムで実行し、生成する映像には演出として誇張表現を導入できるようにした。また、タッチパネルを用いたユーザーインタフェースによって雷の経路をインタラクティブに制御できるようにした。

1.2 関連研究

雷をモデル化し、放電パターンを生成する手法には、Sosorbaram らの DBM(Direct Breakdown Model) がある [1]。これは、DLA(Diffusion Limited Aggregation) モデル [2] と呼ばれる自己相似性を持つ図形の成長モデルに対して電磁気学の視点を取り入れ、落雷による絶縁破壊パターンをシミュレートするモデルである。このモデルは、2次元のラプラス電場において、樹木のように自己相似性を示す絶縁破壊パターンの導出に成功し、さまざまな研究に応用されている。

雷の放電現象を DBM によってシミュレートし、CG で可視化したものに Physically Based Animation and Rendering of Lightning[3] や、Visual Simulation of Lightning[4] がある。いずれも、放電現象を正確にシミュレートし、再現することを目標としている。

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のものとして、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 [5] 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 [6] などがある。

¹ 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

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 [7] や, Sparta[8] がある。

雷を題材にした対話的なビジュアルシミュレーションには、稲妻形状を制御可能とするビジュアルシミュレーション法の開発 [9] がある。ユーザーがなぞった画面上に稲妻が表示されるといふもので、雷独特の軌跡を電荷の確率によって表現し、落雷時の複数の過程の特徴を捉えて描画している。

2. 提案手法

2.1 落雷の状態遷移

雷放電の最初の過程として、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。放電経路がステップ状に形成される理由は、Stepped Leader における絶縁破壊がステップ的に行われるからである。先端の電荷密度が低くなると後方からの電荷補給を待つ。再び強い局所電界が満足されるとき、初めて次の絶縁破壊が進行する。

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。このとき発光強度が増すことがあり、それが M Process と呼ばれる [10]。これらの一連の状態遷移を図 1 に示す。

提案手法は、Stepped Leader による枝分かれを残したまま Return Stroke 以降の行程による強い発光を描く。その後、枝のみを先に消去し、一本の雷の発光が遅れて消えるように描画する。その際、誇張表現として、落雷の前後に起点からその周囲へと発せられる小さな放電を生成する。落雷後の小さな放電の発生はランダムとする。本研究が描画する雷の状態遷移図を図 2 に示す。

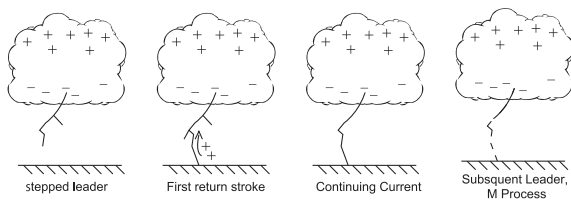


図 1 雷の状態遷移

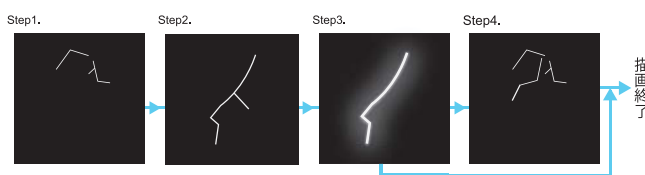


図 2 提案する落雷アニメーションの状態遷移図

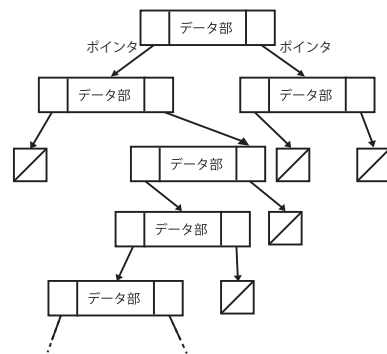


図 3 雷のデータ構造

2.2 雷のデータ構造

提案手法は、雷を表すデータ構造として木構造である二分木を採用する。ポインタを用いてノード同士のリンクを実装し、図 2.2 に示すデータ構造を再現した。

2.3 放電経路の再現

提案手法では、電位勾配を起点から目標点に向かうベクトルとし、Box-Muller 法に基づいた正規乱数によって放電に見られるステップ状の経路を擬似的に表現した。この手法は、Physically Based Animation and Rendering of Lightning[3] や、Visual Simulation of Lightning[4] のように放電経路を電荷的に正確に再現するものではないが、DBM よりも計算負荷が小さい。

正規乱数 (x, y) は Box-Muller 法を用いて $(0, 1)$ 一様乱数 (X, Y) から次式により得られる。

$$x = \sqrt{-2 \log X} \cos 2\pi Y \quad (1)$$

$$y = \sqrt{-2 \log X} \sin 2\pi Y \quad (2)$$

これにより得られた正規乱数をもとに経路を生成する手順を次に示す。

Step1.

Box-Muller 法で z 軸中心に分布する正規乱数 $N(N_x, N_y, N_z)$ を求める。 x, y をそれぞれ式 1, 2 で求め、 z を $z = \sqrt{1 - y^2 - x^2}$ として求める (図 4)。

Step2.

$(0, 0, 1)$ と雷の進行方向 $\mathbf{V}(V_x, V_y, V_z)$ に直行するベクトル $\mathbf{T}(T_x, T_y, T_z)$ を外積によって求め、 $(0, 0, 1)$ と \mathbf{T} の角 α を内積によって求める。

座標に対して、 \mathbf{T} を軸に α 回転する変換行列 \mathbf{M} は、正規乱数をもとに決定した点をベクトル \mathbf{V} 中心に分布する点 $\mathbf{N}'(N'_x, N'_y, N'_z)$ に変換する行列変換である (図 5)。

Step3.

雷の現在の先端ノード位置を $\mathbf{P}(P_x, P_y, P_z)$ とすると、回転変換行列 \mathbf{M} を使用して次式で次ステップにおける雷の先端ノード $\mathbf{P}'(P'_x, P'_y, P'_z)$ を求めることができる。

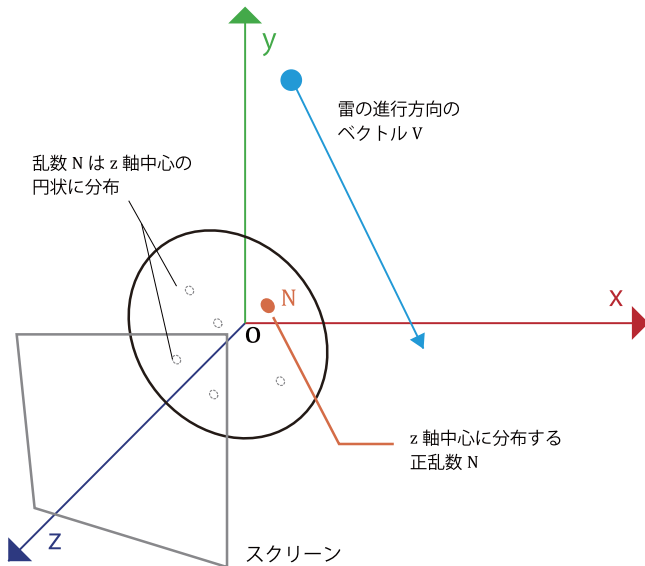


図4 z軸中心に分布する正規乱数

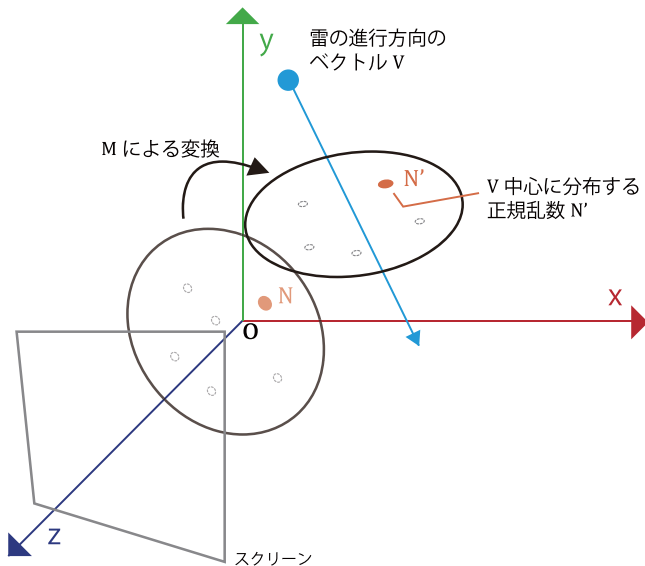


図5 Mによる回転変換

$$\begin{pmatrix} P'_x \\ P'_y \\ P'_z \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

この手続きによって現在の先端ノードに、新たな子として追加されるノードの座標が求まる。新たに追加されたノードがこの手続きを実行することによって再び子を新しく追加する。この手続きを根ノードを開始点として再帰的に処理を行うことで放電経路を生成することができる。

また、1ステップごとに各ノードにおいて枝分かれが発生する可否を決定する。本研究で開発した枝分かれ条件式には、Sosorbaramらが示した以下の法則を使用している。

$$N(r) \sim r^D \quad n(r) \sim \frac{dN(r)}{dr} \sim r^{(D-1)}$$

r はシミュレーションを行う空間の半径を表しており、

N は枝の総長を表している。 n は枝の総数を表しており、 D における値は 1.7 が適当であることが示されている [1]。

枝分かれ発生条件の一つにこれらの式を利用し、他の条件式として節のどちらかに子を持っていないこと、 $[0,1)$ の範囲内である一様乱数が、基準値以上であることを条件とした。基準値は変数で与え、基準値が小さければより多くの枝分かれが発生し、基準値が大きければ枝の本数は少なくなる。

上記の条件式を満たすノードは、枝分かれが発生するとして先の手順を実行する、これにより、そのノードにおけるもう一つの子を求め、新たなノードとして追加する。

2.4 ビルボードを用いた雷のレンダリング

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。

2.5 FBO を用いたグロー処理

本研究では、Jamesらによる real-time glow[11] を用いて雷が大気を照らすグロー効果を再現した。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のち、元画像と加算合成することで実現した。このグロー処理の計算量は非常に少ない。また、ぼかし処理を行う際に、 $n \times m$ の二次元畳みこみをそれぞれ n , m 軸ごとに処理を分割し、二回の一次元畳みこみとみなして処理を行うことでぼかし処理の高速化を行っている [11]。

本研究は、OpenGL の FBO(Frame Buffer Object) を 3 種類用いることでグロー処理を実現した。それぞれ framebuffer object A, B, C として説明する。A, B は 1024×1024 画素、C は 128×128 画素とする。

まず、A, B には通常の雷をレンダリングし、C には枝分かれしない太い雷をレンダリングする。次に、B, C に乗算とぼかし処理を行う。このときの C におけるぼかし直径は B のぼかし直径より大きな画素を用いる。これにより、雷の進行方向に沿った大きなグローが再現できる。このように、雷の周りを重点的に照らすグローと大気を大きく照らすグローを別々に再現する。最終的に、A が保持する雷の元画像と B, C で処理を行った計 3 枚の画像で加算合成を行い、一つの画像として出力する。図 2.5 にこの手順を示す。

なお、テクスチャはバイリニア補間してサンプリングしている

3. 実行結果

提案手法に基づいて 2 節で述べた落雷アニメーションを描画した結果を示す。実験には CPU Intel Core 2 Quad 3.00GHz, メモリ 8GB, OS Windows 7 Professional 64bit, GPU NVIDIA Quadro FX1800, ビデオメモリ 768MB を

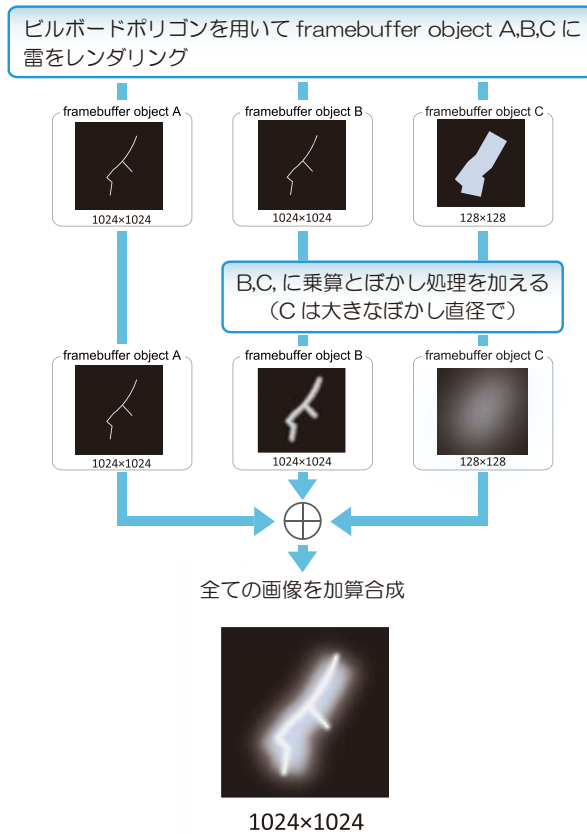


図 6 3 種類の FBO によるグロー処理の実装

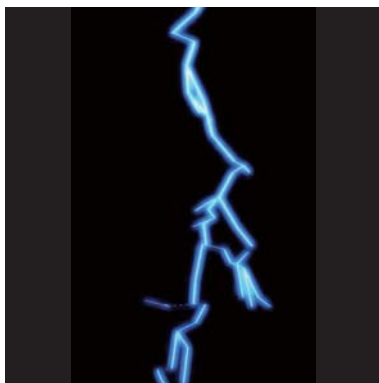


図 7 描画した枝分かれる雷

搭載した Windows 7 Professional(64bit) のパソコンを使用した。タッチパネルには LG 23ET83 を使用した。

3.1 Stepped leader

本研究は、Stepped leader 状態を表現するとして枝分かれした放電経路を描画した。Physically Based Animation and Rendering of Lightning[3] や、Visual Simulation of Lightning[4] と比べると、1 つの節から次の節までの距離が長い。表示解像度 800 × 600 にリアルタイム (フレームレート 60fps) に放電経路を描画することができた。描画結果を図 7 に示す。

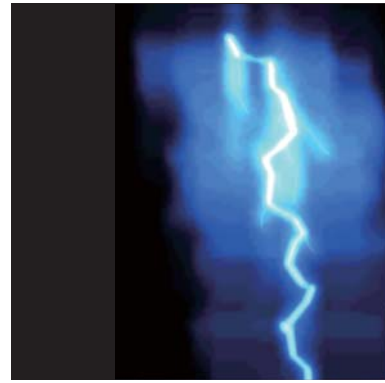


図 8 強い雷光の再現

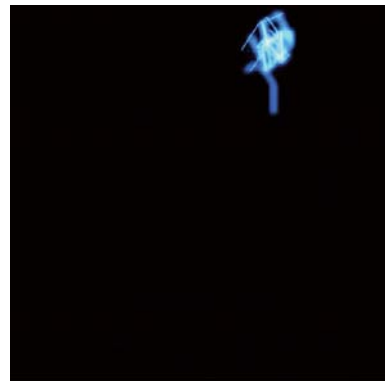


図 9 開始充電

3.2 Return stroke, M Process

Stepped leader の後、First Return Stroke が始まり、Continuing Current, Subsequent Leader, M Process へと放電現象の過程が進行する。しかし、M Process が非常に強い光を放つために正確に落雷の様子を把握できることはない。

そのため、First Return Stroke から M Process までを同じ強い光として描画した。ぼかし直径は時間に合わせて変化させた。また、Stepped Leader による枝分かれの経路はこの状態中に消えるように設定しておく。この描画結果を図 8 に示す。2.5 節で述べた手法を使用することで M Process における大きなグローを表現できた。

3.3 小さな放電の表現

誇張表現として落雷前後に描画する線香花火のような小さい放電を再現した。これは、生成した複数の放電経路の表示を切り替えることで実現した。落雷前に描画する小さい放電のことを開始充電と定義し、落雷後の小さな放電を余韻放電と定義する。開始充電は 1 ~ 5 フレーム毎に表示を切り替え、余韻放電は 6 ~ 15 フレーム毎に表示を切り替えた。図 9 に開始充電、図 10 に余韻放電を示す。



図 10 余韻放電

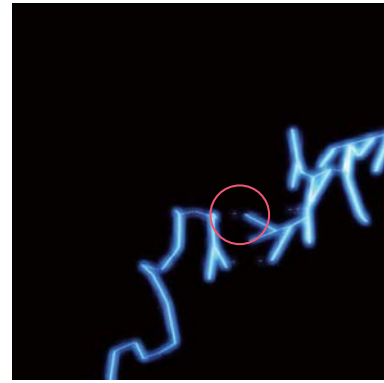


図 13 ビルボード表現によって途切れた雷

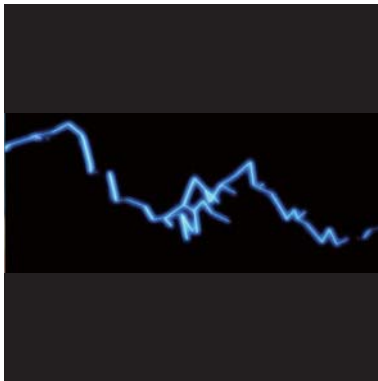


図 11 左から右へ放電する雷



図 12 目標点付近まで達しない放電経路

3.4 ユーザー操作への対応

ユーザーがどのような起点と目標点を入力しても、二点間に放電経路をリアルタイムに生成することができた。例として左から右へ放電する雷の描画結果を図 11 に示す。

しかし、放電経路が目標点付近に達していない時点でも経路作成が終了する場合があった。終了条件を見直し、修正する必要があると考えられる。

4. おわりに

4.1 課題

本研究が提案したビジュアルシミュレーションの放電経路生成の際にユーザーが決定できるのは、方向と枝分かれの条件式のみである。シミュレーションとしての有用性を

高めるために、任意の放電形状を形成できるように改善する必要がある。描画における課題は、M Process におけるグロー効果のグラデーションの階調を滑らかにすることが第一に挙げられる。また、ビルボード変換を用いてポリゴンを描画するとスクリーンと平行な向きのポリゴンは描画されない。これは、提案手法において雷が途切れたように見えてしまう原因となった(図 12)。

ビルボードを用いた描画が適当であったかどうか検討することが求められる。最後に落雷前後の小さな放電についての課題を述べる。細かい放電は本研究のように放電経路の表示を素早く切り替えることで表現することもあるが、?に素早い流れのように表現する場合もある。どちらの表現も選択できるように改良して表現の幅を大きくすることが望ましい。

4.2 まとめ

本研究ではユーザーに物理現象を操作している感覚を与えることを目標に、任意の二点間において落雷アニメーションを自動生成する手法を開発した。

雷のデータはポイントを用いた二分木で構成し、放電経路生成には Box-Muller 法を応用した手順を用いた。雷はビルボードポリゴンを用いて描画し、real-time glow[11]の手法を用いてグロー効果表現を付加した。その結果、ユーザーのさまざまな入力に対して対話的に落雷アニメーションが生成できた。

しかし、大きなグローを再現する際は、ぼかしにおけるグラデーションの階調が粗くなった。他にも、ビルボードにポリゴンを使用したために雷が途切れるように見えてしまうことがあった。

参考文献

- [1] L Niemyer, L. Piertronero and H. J. Wisemann : "Fractal Dimension of Dielectric Breakdown," Phys. Rev. Lett., 52, p.1033-1036 (1984)
- [2] T. A. Witten and L. M. Sander : "Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon," Phys. Rev. Lett., 47 1400 (1981) Longman (2000).

- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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トラッカー, 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
- [6] 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
- [7] 朱 暁宇, 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
- [8] 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>.
- [9] 田中 惇也, 菊池 司: 稲妻形状を制御可能とするビジュアルシミュレーション手法の開発
- [10] 河崎 善一郎, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 80, No. 7, 2004
- [11] Greg James John O'Rorke : real-time glow, GPU Gems, p293-310 ,2004