1ZC-05

空間特性を考慮した三次元リヒテンベルク図形の生成

西田 良輔 中山 雅紀 藤代 一成 慶應義塾大学 理工学部情報工学科



図 1: 本手法を用いた二次元リヒテンベルク図形の生成例.右に進むほど時間が経過している.(a)の白い点が開始点で あり、実行すると(b)のように、灰色で示された電子を分布させ、枝を成長させる.赤色の点は次に枝が伸びる電子の候 補を示し、黄色の点は枝に吸収された電子を示す.(c)や(d)のように、新たな電子の候補を検索し、そこへの枝の成長 を繰り返す.枝の成長が完了すると、(e)のように枝は色付けされ、時間の経過が可視化される.

1 背景と目的

雷などの放電現象は,絶縁体内部に過剰な電荷が流れ, 絶縁破壊を引き起こすことによって現れる.雷の形状表現 は CG にも用いられ,その再現には物理法則に従う絶縁破 壊のシミュレーションが必要になる.L.Niemyer ら [1] は, 絶縁破壊モデルとして,確率的に破壊が進行する Dielectric Breakdown Model (DBM)を考案し,その DBM から派 生した研究も知られている.しかし,電磁気学に基づき, 任意方向の破壊の伝搬に対応している手法は少数である.

そこで本稿では、特徴的な形状をもつ絶縁破壊痕である Lichtenberg figures (リヒテンベルク図形)の生成に注目 し、三次元にも拡張可能な絶縁破壊の伝搬シミュレーショ ン手法を提案する.通常、絶縁体内部では電子が自由に移 動しないが、耐電圧以上の電圧が加わると電子が移動し、 移動した跡は導体へと変化する.そのため、電子が通った 跡の電位が0に変化するモデルが必要となる.したがって、 本手法では複数の電子および電子間に伸びる枝の二種類を 用意して、絶縁破壊をモデリングする.

2 概要

本手法によるリヒテンベルク図形の生成では,絶縁体に 過剰な電荷が帯電し,ある1点の電位を0に変更して,電 子が絶縁体を移動すると仮定する.そこで,はじめに,電 位を0にする開始位置の電子を吸収済み状態に指定し,そ の後,空間全体に電子を分布させる.そして,以下のよう なアルゴリズムを実行する:

Generation of 3D Lichtenberg figures taking spatial properties into account

- 1. 吸収済み状態の電子から、ある距離以内の範囲にあ る電子をすべて選択状態に変更する.
- 2. 選択状態の電子から一番近い吸収済み状態の電子へ 枝を伸ばす.
- 3. すべての選択状態の電子を吸収済み状態に変更する.

以上のステップを繰り返し,すべての電子が吸収済み状態 になれば終了となる.実行例を図1に示す.

3 手法

本手法の手順を詳しく説明する.

3.1 電子の分布

絶縁体内部でリヒテンベルク図形が見られる領域には, 過剰な電荷が帯電している.しかし,実世界において帯電 している電子の個数は膨大であるため,本手法では互いに 隣接する複数の電子を代表電子(以降単に電子と称する) に置き換えることを考える.その密度は一定かつ位置はラ ンダムであると仮定して,図3(a)のように配置した.

3.2 電子にはたらく引力

電位0の点を発生させると電場が変化し,電位0の領域 付近の電子は電位0の方向に強い引力を受ける.そこで本 手法では,電子に対して引力を与える作用素として,電子 と同じ大きさでかつ符号を反転させた電荷を電位0の領域 に配置することで,引力を計算する.その際,基準値F以 上の力が作用する場合に,電子が移動すると仮定すると,

4-119

Nishida Ryosuke, Nakayama Masanori, Fujishiro Issei Department of Information and Computer Science, Keio University







(a) 検索半径 R の違いによる比較

(b) 電子の個数 N の違いによる比較

(c) 開始位置の違いによる比較

図 2: 二次元リヒテンベルク図形の生成結果: (a) 右に進むほど R が大きく、枝が直線的である. (b) 右に進むほど N が 大きく、枝の密度が大きい. (c) 白色の領域には電子が存在せず、すべての場合で障害物を避け、枝が成長している.



(a) 開始点と電子の分布 (I

(b) 枝を伸ばす電子の検索

図 3: 本手法における電荷分布の例: (a) 水色の点が絶縁 破壊の開始点であり, 灰色の点は枝が伸びていない電子を 表す. (b) 開始点から円で示される距離 R 以内の領域に存 在する点を選択状態に変更し, 赤色に変化させている.

基準値 Fの力が発生する距離 R は,比例定数 k と電子の 電荷量 q 用いて, クーロンの法則により次式で表される:

$$R = q\sqrt{\frac{k}{F}}$$

したがって、電位0の領域へ電子が吸収されて発生する、 絶縁破壊痕を表現する枝が伸びる可能性がある領域は、半 径 R 以内に限られる.そこで、本手法では図 3(b)のよう に、電位0の領域から距離 R 以内に存在するすべての電 子を検索し、選択状態に設定する.その後、選択状態に設 定されたすべての電子に対して、一番引力を受ける方向、 すなわち一番距離の短い電子を求める.

3.3 枝の配置

すべての移動可能な電子の移動方向を求めたのち,電子 と電位0の点の間に電位0となる枝を配置し,電子を電位 0の点へ変化させる.枝は図4のように電子間を直線で結 び,枝上には電子に対して引力を発生させる要素として, 複数の電荷を等間隔に配置する.これらの操作をすべての 移動可能な電子に対して実行する.



図 4: 本手法により生成した絶縁破壊痕を表す枝. 黄色で 示される粒子間に長方形の枝が存在し,電子に対して引力 を発生させる粒子を枝上に等間隔に配置している.

3.4 枝の成長

前項までの操作を繰り返すことで電位0の領域が伝播され、それに伴い枝も成長する.すべての電子が吸収済みの 状態になるとアルゴリズムは終了し、枝を虹色に着色し、 生成の経過を可視化する.

4 実行結果

本手法では、任意に設定可能なパラメタとして、電位 0 の点からの検索範囲の半径 R,単位面積あたりの電子の個 数 N,伝搬の開始位置の三種類の値を変化させて、シミュ レーションを実行した.図1に示したように、枝は開始点 から順に成長している.半径 R だけを変化させた様子は 図 2(a)に示され、枝分かれの個数と角度に影響を与える ことが確認された.電子の個数 Nを変化させた様子は図 2(b)に示され、枝の密度に変化を与えた.障害物と開始点 の設定による変化は図 2(c)に示され、指定の形状に柔軟に 対応していることがわかる.

5 結論と今後の課題

本稿では絶縁体内部に存在する電子にはたらく力に着目 し、多様に設定可能なパラメタによって制御される絶縁破 壊の伝搬モデルを構築した.過剰電子が放電して発生する リヒテンベルク図形の生成に関して、パラメタによる形状 の変化を確認し、条件に合致する形状のリヒテンベルク図 形が得られた.

現モデルでは,稀に不自然な三方向以上の枝分かれが発 生することがあり,実世界の形状とは異なるため,さらに 検討を続ける.また,枝に配置する電子の間隔と電荷密度 との関係を精査し,形状変化への影響を吟味しなければな らない.さらに,より現実に近い形状を得るために,枝の 各点に太さのパラメタを導入する必要がある.最終的には 標題のとおり,三次元へのモデル拡張を狙いたい.

謝辞

本研究の一部は、令和元年度科研費挑戦的研究(開拓) 19H05576の支援により実施された.

参考文献

L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann: "Fractal dimension of dielectric breakdown," *Physical Review Letters*, Volume 52, Number 12, Pages 1033—1036, 1984.
Copyright ©2020 Information Processing Society of Japan.

All Rights Reserved.