

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：51303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12496

研究課題名(和文) 落雷予測のための高精度3D地形モデルと超高速GPUクラスタによる雷放電電磁界解析

研究課題名(英文) Analysis of Lightning Electromagnetic Field with High-precision 3D Terrain Model and GPU Cluster for Lightning Prediction

研究代表者

園田 潤 (Sonoda, Jun)

仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工学科・教授

研究者番号：30290696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：落雷により生じる電磁界の伝搬を、高速かつ実際の地形や構造物を考慮した高精度モデルで解析するために、本研究では電磁界解析で広く使用されているFDTD法を拡張したMW-FDTD法の3次元かつCPUやGPUで並列計算するプログラムを開発した。実際に地形モデルだけではなく、ビルや住宅等の構造物をモデル化した実際の問題に近いモデルの解析として、仙台市のモデルを考え、山間部で生じた落雷による電磁界が都市部の都市構造で大きく変化することを解析で明らかにし、実際の問題により近い問題で雷放電電磁界を解析できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Analysis of lightning electromagnetic field using the finite-difference time-domain (FDTD) method have been studied in recent year. However, large-scale analysis on real environment have not been considered, because the FDTD method requires huge computational cost on large-scale analysis. We proposed a three-dimensional moving window FDTD (MW-FDTD) with parallel computation and applied to large-scale analysis of lightning electromagnetic field with a real numerical terrain model. In this study, we have studied about large-scale analysis of lightning electromagnetic field with real urban models considering many buildings using our MW-FDTD with parallel computation. We have shown effects of observed electromagnetic field on urban model.

研究分野：電磁波工学・計算電磁気学

キーワード：雷放電電磁界 FDTD MW-FDTD 数値地図モデル UAV-SfM GPU

1. 研究開始当初の背景

近年、落雷による電気設備など社会インフラの被害が増加しているが、例えば、電力会社では落雷位置標定システム LLS (Lightning Location System) により雷活動を観測しており、従来は困難であった冬季の上向き落雷の捕捉率や標定精度の向上などが研究されている。このうち LLS の標定誤差は、雷放電電磁界が有限の導電率をもつ起伏のある大地に沿って伝搬する際に歪むことで、受信センサの観測電磁界の受信時刻が遅れることにより生じる。

これまでに FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法により落雷で生じる電磁界の伝搬を解析する研究が行われている。例えば、大地と電離圏を想定した 2 次元モデルでの解析や、大地や高層構造物などを想定した簡易モデルによる解析、近接雷を想定した近傍領域の電磁界の解析などが行われている。しかしながら、FDTD 法は計算量が多い手法であり、大規模領域の計算では計算コストが大きくなる問題があるため、実際の地形や都市構造のような大規模領域における 3 次元の雷放電電磁界解析はこれまでほとんど行われていなかった。この問題に対し、従来の FDTD 法の計算コストを削減する MW-FDTD (Moving Window FDTD)法が提案されており、電離圏導波管モデルの雷パルスの長距離伝搬解析などに応用されている。しかしながら、これらは 2 次元解析であり、実際の地形などを考慮した 3 次元解析はこれまでほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

我々はこれまでに FDTD 法の計算量と使用メモリを低減する MW-FDTD 法の 3 次元並列計算手法により、10 波長程度以上の国土地理院数値地形モデルを用いた雷放電電磁界を解析したが、地形モデルのみでありビルなどの構造物は考慮されていなかった。そこで本研究では、構造物をモデル化した数値地図を用いた雷放電電磁界解析を行い、実際の地形上の地上構造物による観測電磁界への影響を明らかにする。また、実際の構造物を高精度にモデル化する無人航空機 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を用いた 3 次元復元技術 SfM (Structure from Motion) による UAV-SfM で雷放電電磁界解析用の FDTD 数値モデルを構築する手法を開発する。

3. 研究の方法

3.1 3次元 MW-FDTD 法の並列計算による雷放電電磁界解析

従来の FDTD 法と MW-FDTD 法の相違を図 1 に示す。従来の FDTD 法が解析領域全体の電磁界を計算するのに対し、MW-FDTD 法は電磁波が伝搬するごとに波の近傍領域のみをメモ

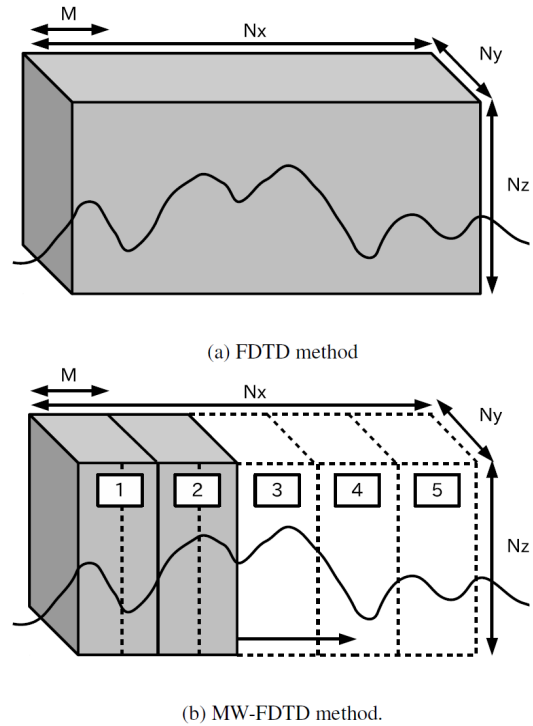


図 1 FDTD 法と MW-FDYD 法の比較

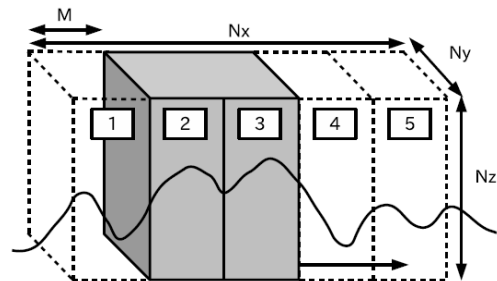


図 2 MW-FDTD 法の領域移動

リ上に確保し計算する手法であり、従来の FDTD 法に比べ計算量と使用メモリが少なく済むという利点がある。

MW-FDTD 法の原理を図 1 2 に示す MW-FDTD 法では、解析領域の一边を複数のブロックに分け、1 ブロックの大きさを解析小領域  $M$  とする。ここで  $M$  は、対象とする電磁波の波長を  $\lambda$ 、セルサイズを  $\Delta$  とすると、 $M > \lambda / \Delta$  となるように設定し、また、観測したい電磁界の時間範囲を  $t_0$ 、伝搬速度を  $v$  とすると、 $M = t_0 v / \Delta$  で決めることができる。ここで、波源がブロック 1 内にある問題を考えると、MW-FDTD 法ではまず波源近傍のブロック 1, 2 のみを計算する。電磁波が伝搬しブロック 2 の終端に到達すると、ブロック 2 の電磁界値と媒質定数をブロック 1 に、ブロック 3 の媒質定数をブロック 2 に転送することで、図 2 に示すように、ブロック 2, 3 の領域の

電磁界を計算する．これを繰り返し行うことによって，伝搬方向の電磁界を計算する．ここで，電磁波がブロックの終端に到達したかの判定は，ブロックの  $x$  軸終端の  $yz$  平面にしきい値を設定することで行う．ここでは入射波の振幅の  $-40$  dB に設定する．MW-FDTD 法の使用メモリと計算量を示す．解析領域を  $N_x \times N_y \times N_z$  とすると，従来の FDTD 法は  $N_x \times N_y \times N_z$  全体をメモリ上に確保し，解析領域すべての電磁界を計算する．一方，MW-FDTD 法は，図 1, 2 に示したように， $2M \times N_y \times N_z$  の領域のみをメモリ上に確保し，この領域のみの電磁界を計算する．これより，MW-FDTD 法では従来の FDTD 法に比べ計算量・使用メモリとも  $2M/N_x$  に低減することができる．MW-FDTD 法は領域分割型の手法であるので，並列計算が可能であり，本研究でも PC/GPU クラスタによる並列計算を行う．

### 3.2 UAV-SfM による FDTD 数値モデル構築

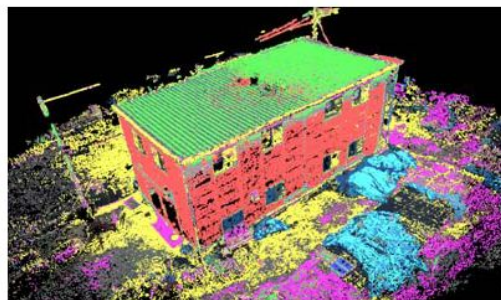
写真などの 2 次元画像を用いた 3 次元復元では，これまでカメラ 2 台を用いるステレオカメラが用いられてきたが，専用機器が必要になることや複数のカメラパラメータを得る必要があるなどの問題があった．SfM は市販のカメラ 1 台で任意の位置から撮影した複数枚の 2 次元画像から，対応点抽出と相対的な 3 次元座標を計算することで物体を 3 次元復元する技術で，ロボット制御やコンピュータ上での物体の再構成などに利用されている．SfM 実装のひとつに Bundler があり，その補間システムに PMVS (Patch-based Multi-view Stereo) がある．Bundler では焦点距離や画素数の異なる画像を組み合わせることが可能で，ステレオカメラとは異なり厳密なカメラパラメータの設定が不要である．このため，市販のデジタルカメラで撮影した任意の適当な画像を使用し，容易に物体の 3 次元復元を行うことができる．Bundler はフリーウェアであるが，近年では PhotoScan や Pix4D など市販ソフトウェアも発売されている．SfM で生成される 3 次元モデルは相対的な 3 次元座標と色情報を持つ点群で表されるので，この点群の情報からスケールリング，物体抽出・配置，材料設定を行うことで，FDTD 数値モデルを構築できる．

UAV は，近年ドローンとも呼ばれる無人航空機であり，2015 年 12 月の航空法改正により人口集中地区や目視外での飛行は許可申請が必要になるなど取り扱いはやや複雑になっているが，比較的安価に 4K などの高画質の動画が得られる．UAV で撮影した動画から SfM や点群ライブラリ PCL を用いることにより，屋内外環境の FDTD 数値モデルを構築できる．

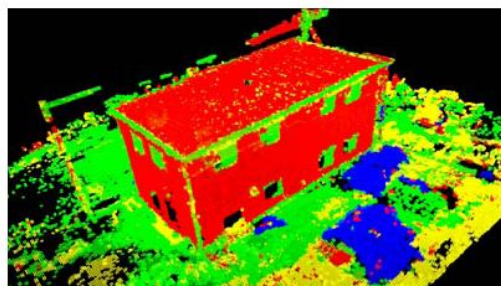
1 棟の屋外構造物を例に UAV-SfM による FDTD 数値モデル構築の手順を述べる．対象物



(a)



(b)



(c)

図 3 UAV-SfM による FDTD 数値モデル構築

を UAV で上空から撮影し，複数枚の 2 次元画像を得る．(1) 複数枚の画像群から対象構造物を図 3(a) のように Bundler などの既存の SfM 技術を用いて 3 次元復元し，相対的な 3 次元座標と RGB による色情報を持つ点群を得る．次に，(2) 得られた相対座標を持つ点群から環境中の既知の長さをを用いた絶対座標へのスケールリングおよび原点の決定，基準水平面決定によるカメラの軸補正，色情報に基づく物体抽出を行い，図 3(b) のような絶対座標を持ち物体が識別された点群を得る．最後に，(3) 抽出した物体に電気定数を与えることで図 3(c)の FDTD 数値モデルを得る．このとき，(2) で得られた物体毎に色分けされた点群を FDTD 法の空間セルで分割し，格子点に最も近い点群をその格子点の点群とする．

## 4. 研究成果

### 4.1 MW-FDTD 法と都市構造モデルを用いた雷放電電磁界解析

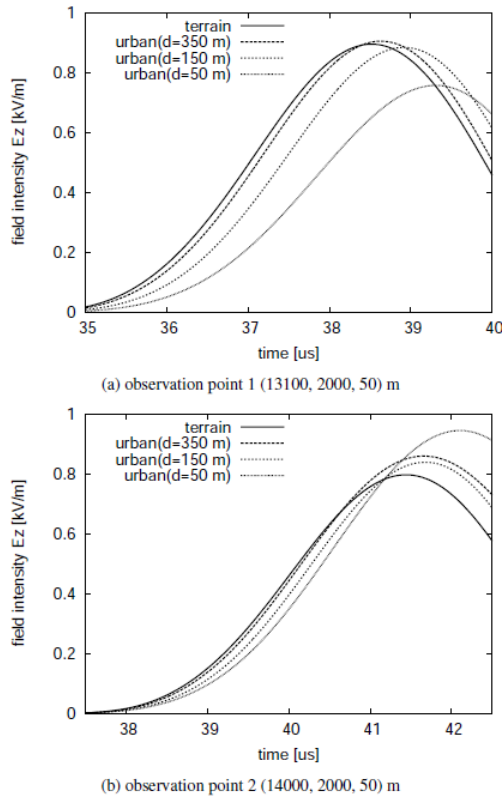


図4 地上構造物による観測波形の変化

地形モデルに都市構造を組み込んだモデルを作成し、地形モデルと構造物による観測電磁界の影響を解析する。解析モデルは、地表面上(11000, 1000, 50) m から(13000, 3000, 50) m の  $2000 \times 2000$  m の領域に、間隔  $d$  m 高さ  $h$  m 大きさ  $50 \times 50$  m の構造物を配置する。波源として、仙台市青葉区下愛子付近の地表面上(3000, 2000, 130) m から高さ方向に(3000, 2000, 3500) m まで線状電流源  $J_z$  を設置し、Heidler 関数パルスを励振する。仙台市宮城野区榴ヶ岡付近の観測点 1 (13100, 2000, 50) m と、観測点 2 (14000, 2000, 50) m における電界  $E_z$  を観測する。地上構造物による観測電磁界の影響を調べるために、地形のみのモデルの解析結果と比較する。図 4 に間隔  $d=50, 150, 350$  m とした場合の観測点 1 と 2 における  $E_z$  の時間応答を示す。ここで、構造物の高さ  $h$  は 100 m, 大きさは  $50 \times 50$  m である。図 4 の結果より、図 4(a) の構造物群に近い観測点 1 における  $d = 350$  m では地形のみのモデルとの差は小さいが、間隔  $d$  が小さいほど地形モデルとの差が大きくなることわかる。図 3(b) の構造物群から離れた観測点 2 の結果からも、 $d = 50$  m と間隔が小さく構造物の密度が高くなると地形のみのモデルとの差も大きくなる。

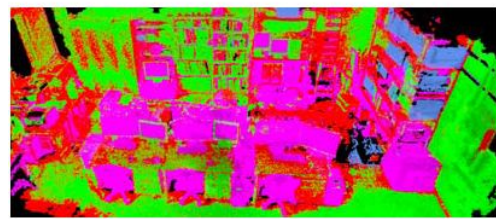
#### 4.2 屋内外雷放電解析のための UAV-SfM による高精度 FDTD 数値モデル構築



(a)



(b)



(c)

図5 UAV-SfM による屋内外 FDTD 数値モデル

図 2 と同様に室内環境下における FDTD 数値モデルを構築し、屋内外における FDTD 数値モデルを構築する。図 5 に UAV-SfM により構築した室内 FDTD 数値モデルを示す。図 5(a) が 150 枚の画像を用いた SfM による 3 次復元後の相対座標を持つ点群、図 5(b) はスケールおよび軸補正と物体抽出後の絶対座標を持つ点群、図 5(c) は FDTD 数値モデルである。図 5(b) でことが定性的に確認できる。図 2(c) や図 5(c) において物体抽出のしきい値を 20 とした結果を示したが、前述のように環境中の光源のあたり方で色が変化するため、や環境中の光源を考慮した定量的な評価、また物体の材質自動識別が今後の課題である。ここで、UAV-SfM により構築した屋内外 FDTD 数値モデルの定量評価として、モデル化したいくつかの物体の大きさの精度を検討する。評価は、図 2 の屋外構造物および図 5 の研究室において、(b) スケールおよび軸補正と物体抽出後の点群と、(c) FDTD 数値モデルの点群における 2 点の絶対座標  $(x_1, y_1, z_1)$  と  $(x_2, y_2, z_2)$  から大きさを測定し相対誤差を求める。ここでは、図 2 の屋外構造物では建物の高さや奥行き、図 5 の室内環境では机の高さ、ディスプレイの幅と高さなどを測定する。また、スケールにおける既知の長さとして、図 2 では建物の幅を、図 5 では机の幅を用いる。UAV-SfM により構築した屋内外 FDTD 数値モデルを物体の大きさで評価した結果、最大誤差は屋外環境では 4.3%、屋内環境では 2.8% であり、屋外構造物および室内環境では数%

程度の誤差であった。室内環境に比べ屋外構造物で誤差が大きい原因は、屋外ではカメラと物体との距離が離れているため撮影した画像の分解能が低下するためと考えられる。

以上のように、地形モデルに加えビルや住宅等の地上構造物による落雷による雷放電電磁界解析について、大領域を高速に計算できる手法を開発した。また、地上構造物や構造物の中の物体をモデル化するための手法として、UAV-SfMによるFDTD数値モデル構築手法を開発した。これからにより、実際により近い雷放電電磁界を計算することが可能になった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

園田潤, 今野海航, 橋本瑞樹, 金澤靖, 佐藤源之, "屋内外シームレス電波環境解析のための UAV-SfM による FDTD 実環境マルチスケール数値モデル構築", 電子情報通信学会論文誌 B, 2017.9.

J. Sonoda, K. Kaino and M. Sato, "A Simple Approximation Formula for Numerical Dispersion Error in 2-D and 3-D FDTD Method", IEICE Trans. Electronics, vol.E99-C, No.7, pp.793-796, July 2016.

及川貴瑛, 園田潤, 本間規泰, 佐藤源之, "3次元 MW-FDTD 法の並列計算による数値地図と都市モデルを用いた雷放電電磁界解析", 電気学会論文誌 A, Vol.136, No.5, pp.235-240, May. 2016.

今野海航, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之, "深度センサで構築した FDTD 数値モデルの誤差が電磁界解析に及ぼす影響の定量評価", 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J99-C, No.5, pp.243-246, May 2016.

R. Matsunaga, M. Hashimoto, Y. Kanazawa, and J. Sonoda, "Accurate 3-D reconstruction of sands from UAV image sequence," Proc. of 2016 ICAICTA, Aug. 2016.

[学会発表](計 6 件)

園田潤, 今野海航, 金澤靖, 佐藤源之, "深度センサで構築した FDTD 数値モデルの誤差が電磁界解析に及ぼす影響の定量評価", 電子情報通信学会電磁界理論研究会技術報告 EMT2015-21, pp.71-75, July. 2015.

園田潤, 我妻達也, "UAV で空撮した動画と SfM による FDTD 数値モデル構築の精度

検討", 平成 27 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, Aug. 2015.

園田潤, 今野海航, 金澤靖, 佐藤源之, "深度センサを用いた複数の物体が存在する複雑な室内実環境 FDTD 数値モデル構築" 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Sept. 2015.

園田潤, 本間規泰, "落雷で生じる電磁界の長距離伝搬の GPU クラスタによる高速解析", 電気学会 A 部門大会, Sept. 2015.

園田潤, 今野海航, 橋本瑞樹, 金澤靖, 佐藤源之, "屋内外シームレス電波環境解析のための SfM や深度センサによる FDTD 実環境マルチスケール数値モデル構築", 電子情報通信学会総合大会講演論文集 BCS1-3, March 2016.

園田潤, 今野海航, 橋本瑞樹, 金澤靖, 佐藤源之, "屋内外シームレス電波環境解析のための UAV-SfM による FDTD 実環境マルチスケール数値モデル構築", 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会技術報告 EST2016-39, pp.175-180, July. 2016.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

園田 潤 (SONODA, Jun)

仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工  
学科・教授

研究者番号: 30290696