

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760284

研究課題名（和文） 実環境モデルを用いた GPU 上の高精度 FDTD 法による
3次元電波環境イメージング研究課題名（英文） 3D Electromagnetic Wave Imaging using High Accuracy FDTD on GPU
with Realistic Environment Models

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・准教授

研究者番号：30290696

研究成果の概要（和文）:

FDTD 法を用いた実環境の電波伝搬散乱解析を実現するために、Bundler と PMVS による 3次元復元技術を応用した簡便な実環境 FDTD 数値モデル構築システムを開発した。さらに、実際に構築した室内 FDTD 数値モデルと GPU 実装した FDTD 法を用いて室内の電波環境解析を行い、実環境における電波環境を高速に解析できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）:

To analyze electromagnetic wave scattering in realistic environments with the FDTD method, we have developed a modeling system using the Bundler and the PMVS with the OpenGL. Also, we have analyzed electromagnetic wave environments with our constructed realistic numerical models using the FDTD method on GPUs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1400 千円	420 千円	1820 千円
2011 年度	800 千円	240 千円	1040 千円
年度			
年度			
年度			
総計	2200 千円	660 千円	2860 千円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：電磁界解析，FDTD 法，高精度 FDTD 法，GPU，実環境数値モデル

1. 研究開始当初の背景

近年増加の一途をたどる電波を使ったデバイスを安全に使用するために、これまで多くの実験や数値シミュレーションによる電波環境の可視化に関する研究が行われている。実験による電波測定では、広範囲の測定には時間とコストがかかることや、アンテナや同軸ケーブルなど金属を用いた測定系による測定誤差が問題であった。一方、これまでの数値シミュレーションでは、デバイス単体のみで使用環境が考慮されていない解析

や、使用環境を簡略化したモデルによる Ray-tracing 法や FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法によるものがほとんどであった。これに対して近年、車内や飛行機内の構造、室内の周期的に配列された椅子等、実環境に近いモデルでの解析が行われ始めている。また、シミュレーション手法についても、Ray-tracing 法と FDTD 法の組み合わせによる 3次元解析や、高精度 FDTD 法による室内電波伝搬解析が行われている。しかしながら、これまでの研究では、解析モデ

ルが簡易的なものであるため可視化の精度が低いことや、シミュレーション手法も複雑で高速化・大規模化が容易ではないこと等の問題があり、実用に耐える電波環境イメージングは実現できていなかった。以上の背景から本研究では、(1) 実環境の高精度数値モデルを構築し、(2) 簡便で高精度・高速な最FDTD法を開発することにより、高精度・高速3次元電波環境イメージングシステムを構築する。

2. 研究の目的

本研究では、実環境モデルを用いた高速・高精度FDTD法による3次元電波環境イメージングシステムの構築を目的とする。この目的を達成するために、(1) 実環境FDTD数値モデル構築システムの開発と、(2) FDTD法の高精度化・高速化、(3) (1)と(2)による実環境下のリアルタイム3次元電波環境イメージングシステムの構築を目的とする。

(1) 実環境FDTD数値モデル構築システムの開発では、レーザーステレオカメラ等の高価な計測器を用いずに市販のデジタルカメラを用いた3次元計測およびFDTD数値モデル構築システムを構築する。ここでは、数値モデル構築の精度を数%程度を目標とする。

(2) FDTD法の高精度化・高速化においては、従来のFDTD法の精度を保持した解析ができるようなパラメータ決定の定式化を行うとともに、我々がすでに開発している高精度化した最適2次元FDTD法の適用を検討する。また、超高速な画像処理用プロセッサGPUを用いた高速FDTDプログラムを開発し、従来のマルチコアやCellなどと比較する。

(3) 実環境下のリアルタイム3次元電波環境イメージングシステムの構築では、実環境FDTD数値モデルを用いたGPU上のFDTD計算により、1分程度で電波環境を可視化することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 実環境FDTD数値モデル構築システムの開発

実際の環境化における数値シミュレーションによる電波環境のイメージングを行うためには、実環境の数値モデルが必要である。これまで、簡易モデルによるシミュレーションは行われてきたが、実際の環境を用いたシミュレーションはほとんど行われていなかった。実環境数値モデル構築では、レーザーステレオカメラなど高価な測定器を用いた解析が考えられる。ステレオカメラを利用した手法では、比較的高精度な3次元計測を行えるが、キャリブレーションなどで厳密なカメラパラメータの取得や設定が必要になる問題がある。一方、CADを利用した手法では様々な物体のモデリングが可能である

が、CADモデルが存在しない場合には物体寸法の計測作業が必要で人的コストが高くなる問題がある。そこで本研究では、既存の3次元復元技術であるSfMを応用することで、簡便なFDTD数値モデル構築システムを開発する。

SfMとは、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座標計算を行い物体を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に利用されている。SfMシステムにBundlerがあり、その補間システムにPMVS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て利用することができ、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。そのため、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とPMVSにより生成される3次元環境モデルは座標と色情報で表されるので、この3次元環境モデルをベースにスケールリング、物体配置、材料設定を行うことで、FDTD数値モデルを構築できる。

開発するSfMによるFDTD数値モデル構築過程を説明する。デジタルカメラで任意の位置から撮影した画像群を用いて、最初に、BundlerとPMVSにより3次元復元を行う。一般的には、Bundlerのみでは復元された点群は疎であることから、PMVSによる補間を行う。次に、復元した3次元環境モデル中の物体をOpenGLにより描画した基準形状でトレースし、実際のスケールをひとつ与えることで復元した環境モデル全体のスケールリングを自動で行う。最後に、FDTD法のセルサイズと解析領域の大きさを与え、OpenGLで配置した物体の座標と形状を元に物体内外を判定し、物体内部の各セルに材料に対応した ϵ 、 μ を代入することで数値モデルが得られる。

(2) FDTD法の高精度化・高速化

数値計算であるFDTD法では、浮動小数点数の丸め誤差と、空間2次元精度の中心差分であるためテーラー展開の高次項の打ち切り誤差(数値分散誤差)が生じる。丸め誤差は、特に単精度変数の使用によるくり返し計算で誤差が蓄積され増大することが知られている。低減法としてカハンのアルゴリズムが提案されているが、計算コストが増大する問題がある。このため一般的には倍精度変数が使用されるが、Cell B.EやGPUなど単精度計算が高速なハードウェアの発展や、メモリ使用量の低減のために単精度変数が用いられることも多い。しかしながら、くり返し計算が多いFDTD法の単精度計算における丸め誤差の定式化は行われていない。数値分散誤差は分散関係式で記述され、例えば、セ

ルサイズを $\lambda/20$ としても 10λ の伝搬で 11.2% の数値分散誤差が生じ、この誤差は伝搬距離に比例して増加する。低減法として時間 4 次精度手法などが提案されているが、境界条件の適用や計算量が増大する問題があるため、現在でも従来の FDTD 法が使用されている。このように従来の FDTD 法を用いるときには、計算資源の有効使用のためのパラメータ決定や、得られた結果に対する誤差の検討のために誤差を把握しておく必要がある。特に、近年の計算機性能の向上により、FDTD 法による大規模解析が行われている。大規模計算では丸め誤差や数値分散誤差が大きくなるため、誤差を事前に把握した解析や、解析結果に含まれる誤差の把握が必要である。本研究では、FDTD 法の計算精度を保證することを目的に、大規模解析や単精度計算が高速なハードウェアを用いた解析が必要となる、くり返し計算による丸め誤差の定式化と、数値分散誤差のセルサイズと伝搬距離による定式化を行う。

丸め誤差の有効桁は、単精度変数では 6.7 桁、倍精度変数では 15.16 桁程度であるが、くり返し計算により増大する。FDTD 法のような時間ループのくり返し計算では、丸め誤差が蓄積され増大し、解析結果に含まれる丸め誤差の割合が増加する。ここで、FDTD 法の電磁界計算で生じる丸め誤差を定式化する。倍精度の丸め誤差は、有効桁が 10 桁程度であるので、ここでは単精度について検討する。図 1 に FDTD 法の単精度計算で生じる丸め誤差の最大値を示す。図 1 は波源から 1 波長離れた観測点において FDTD 法で計算された電界値と、解析解を比較して求めた丸め誤差の最大値である。図 1 より、単精度を用いた三次元計算では 10^5 ステップの計算で有効桁が 2 桁まで低下することが分かる。図 1 の結果より、単精度計算で生じる丸め誤差 e_r は、時間ステップ数を n_t とすると $e_r = 10^{-7} n_t$ で表される。

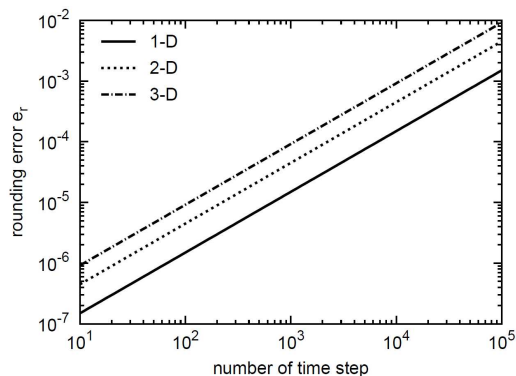


図 1 丸め誤差の定量化

分散関係式から数値分散誤差を求められるが、パラメータが多く複雑である。本研究

では分散関係式から求められる数値分散誤差のセルサイズと伝搬距離による簡易式を導出する。図 2 に数値分散誤差 e_R の最大値を示す。図 2 より、セルサイズ $\Delta = \lambda/m$ と伝搬距離 $R = n\lambda$ による数値分散誤差 e_R の簡易式を導出すると $e_R = 1.7 n/100 \log(m)^{-1} (\%)$ が得られる。

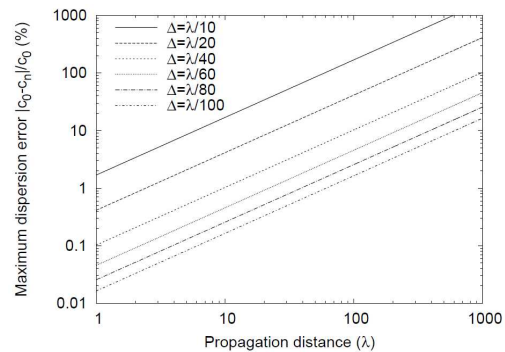


図 2 数値分散誤差の簡易式の導出

FDTD 法の高速化に関する研究は、これまでにスーパーコンピュータ、PC クラスタ、FPGA、Cell/B.E. 等の高速ハードウェアによる実装が行われてきた。近年、画像処理用のプロセッサである GPU (Graphical Processing Unit) の性能が急速に向上しており、科学技術計算への利用も拡大している。FDTD 法でも GPU を用いた高速化に関する研究が盛んに行われており、CPU に比べ数十倍高速に計算できることが報告されている。これらのようなこれまでの FDTD 法の GPU 実装に関する研究では、C/C++ の GPU 開発環境である CUDA (Compute Unified Device Architecture) やマルチコア PC や GPU 等の異機種混在環境用並列プログラミングフレームワークである OpenCL を用いたものがほとんどであった。しかしながら、CUDA や OpenCL ではソースコードを大きく書き換える必要があるため、GPU 実装が容易でないことや、これまで科学技術計算に広く用いられてきた Fortran には対応していない問題があった。そこで本研究では、CUDA コードとは別に、GPU 実装を容易にし現有ソースコードを有効活用できるようにすることを目的に、ディレクティブによる FDTD 法の GPU 実装の検討を行う。

(3) リアルタイム 3 次元電波環境イメージングシステムの構築

(1) で開発した実環境 FDTD 数値モデル構築システムと、(2) の高精度高速 FDTD 法により、室内環境における電波環境可視化として、ポインティングベクトルの可視化を行う。

4. 研究成果

(1) 実環境 FDTD 数値モデル構築システムの開発



図3 室内環境の FDTD 数値モデル化

図3に示す室内の机やPCなどが配置された研究室内 $2.10 \times 1.60 \times 1.20$ m のモデル化例を示す。撮影には、デジタルカメラ Canon EOS Kiss X2 を用い、画素数 1500×1000 の画像群を使用する。Bundler と PMVS の実行には、CPU Intel Core i7 860 2.80 GHz、メモリ 4GB、グラフィックボード ATI Radeon HD 3450、ビデオメモリ 256 MB の PC を使用する。

図4に、Bundler と PMVS により3次元復元した後、スケーリングを行った研究室内モデルを示す。Bundler や PMVS では、画像が多いほど復元できる座標数が増えるが復元時間も比例して増加する。100枚でおおよそ260000点を1時間程度で復元できるので、ここでは100枚程度の画像を使用することとする。図4は、112枚の画像を使用した結果である。図4から、Bundler と PMVS では、床などの特徴点が少ない箇所の復元は困難となるが、ディスプレイや机など特徴点が多い箇所の復元できることが分かる。ここで、図4は全評価点AからPが見えるように全体像を示しているが、視点移動や物体ごとの拡大ができる。図4の3次元環境モデルを使用し、構築した FDTD 数値モデルの描画図を図5に示す。図5では、ディスプレイとキーボードをプラスチック、机とPCを金属として、計16個の物体を配置し、床、壁、天井をコンクリートとして周囲を囲っている。

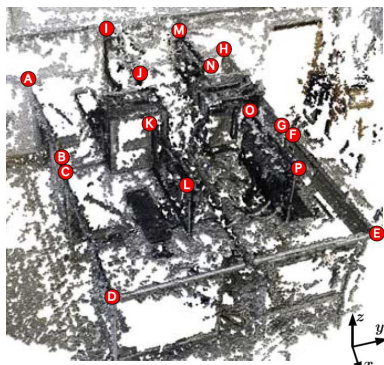


図4 Bundler と PMVS による3次元復元

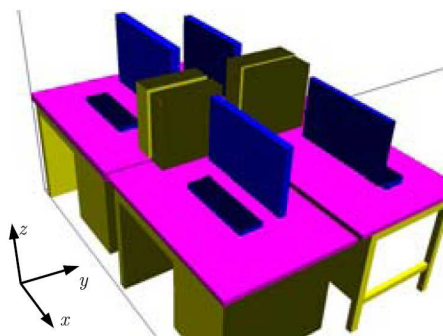


図5 OpenGL による FDTD 数値モデル化

図4に示した点Aを原点とし、BからPの各点における実際の座標との誤差 e (%) を評価する。ここでは、Bundler と PMVS による3次元復元後にスケーリングを行った後の誤差 e_1 と、OpenGL で物体を配置した後の誤差 e_2 を評価する。誤差 e_1 および e_2 は、3% 以内であり、安価で精度のよい実環境 FDTD 数値モデル構築システムが開発できた。

(2) FDTD 法の高精度化・高速化

FDTD 法の高速度化として、GPU による高速化を評価する。使用する GPU は NVIDIA 社の Fermi 系 GPU でハイパフォーマンスコンピューティング用途の Tesla C2070、およびコンシューマ用途の Geforce GTX 580 である。ここでは、CUDA 4.0 による CUDA 実装の他に、ディレクティブ実装として Portland 社の PGI Accelerator C/C++ Workstation 11.10 を用いる。また、比較に用いる CPU は Intel 社の高速 CPU である Core i7 980X 3.33GHz、コンパイラは gcc 4.4.3 で最適化オプション -O3 である。ここで、CPU による計算は1コアのシングルスレッドとする。FDTD 法のくり返し計算における丸め誤差は十分小さいことを確認しているため、計算は単精度で行う。また、CUDA、ディレクティブともに共有メモリ使用を明示したプログラムは書かずコンパイラ依存によるキャッシュ使用とする。

計算時間を評価するために、自由空間中の点電流源による電波伝搬問題を解析する。解析領域は $256 \times 256 \times 256$ とする。解析領域中央に点状電流源 J_x を設置し、-3 dB のパルス幅が 0.5 ns でパワースペクトルが -30 dB となる周波数が 800 MHz のガウシアンパルスを励振する。ここで、セルサイズは ≈ 0.01 m、時間ステップは $t = 1 \times 10^{-11}$ s とする。CUDA では CPU 1 コアの計算時間と比較して、Geforce GTX 580 では単精度で 126.94 倍、倍精度で 45.16 倍、Tesla C2070 では単精度で 63.34 倍、倍精度で 23.14 倍が得られた。ディレクティブでは CPU 1 コアの計算時間と比較して、Geforce GTX 580 では単精度で 39.24 倍、倍精度で 24.12 倍、Tesla C2070 では単

精度で 25.70 倍, 倍精度で 14.13 倍が得られた。ディレクティブと CUDA の計算時間比をみると, ディレクティブでは CUDA と比較して Geforce GTX 580 では単精度で 30.9 %, 倍精度で 53.4 %, Tesla C2070 では単精度で 40.7 %, 倍精度で 61.2 % の性能が得られた。

(3) リアルタイム 3 次元電波環境イメージングシステムの構築

室内環境モデルにおける電波環境解析に適用する。解析するモデルは, (1) で構築したモデルである。解析領域は, 3.2 m × 4.8 m × 3.2 m であり, 周囲は Mur の 1 次吸収境界条件で終端している。解析領域の中心に点状電流源 J_x を設置しガウシアンパルスを励振する。波源から y 方向に 1.0 m 離れた観測点における電界を観測する。観測時間はパルス励振後から 10 ns までとする。FDTD 法のセルサイズや時間ステップは(2)と同じである。モデル中の電気定数は, 壁, 床, 天井をコンクリート ($\epsilon_r = 5.0$, $\sigma = 0.0001$ S/m), 机の天板を木材 ($\epsilon_r = 4.0$, $\sigma = 0.0001$ S/m), ディスプレイやキーボードをプラスチック ($\epsilon_r = 2.3$, $\sigma = 0.0$ S/m), 机の脚, 引き出し, パソコン本体は金属としている。

図 6 に, ディレクティブにより GPU GTX 580 で計算した観測点における電界 E_x の時間応答を示す。図 6 は, 室内のモデル化を行わない場合と, 机のみ配置した場合, 机, PC, ディスプレイ, キーボードをモデル化した場合の比較である。図 6 の結果から, 実際の環境に近いモデルを用いたときにはモデル化を行わない場合と比べ, 観測波形に大きな差が現れることが分かる。高速な CPU を用いても 5 時間程度を要する計算が, CUDA 実装では 45 秒, ディレクティブでは 97 秒と, 1 分程度で計算できることを示した。

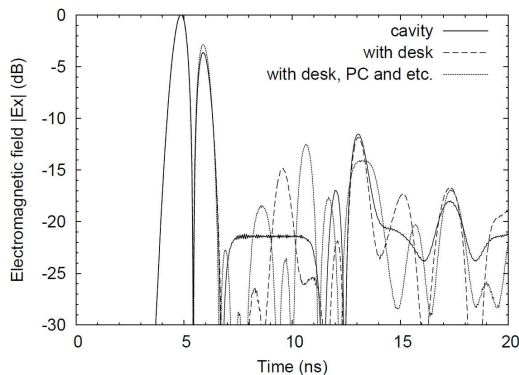


図 6 室内環境における受信電界の相違

図 7 に解析空間中のポインティングベクトル分布を示す。図 7 は, GPU で計算した電磁界からポインティングベクトル $S = E \times H$ を計算し, 図 4 の解析モデルにマッピングした結果である。図 7 のポインティングベクトル

は, 大きさと方向を三角錐の色と向きで表現したものであり, 大きさは 10 dB から 30 dB まで 5 階調でカラー表示している。図 7 の結果から, 電磁波が波源から放射され伝搬する様子や, 9 ns 後では散乱波のため PC やディスプレイ周辺ではエネルギー分布が高くなっていることが分かる。このように GPU を用いることにより空間中の電波環境を高速リアルタイムで計算できるので, 電波デバイス使用時のホットスポット等を迅速に把握でき, 電磁環境改善に有効である。

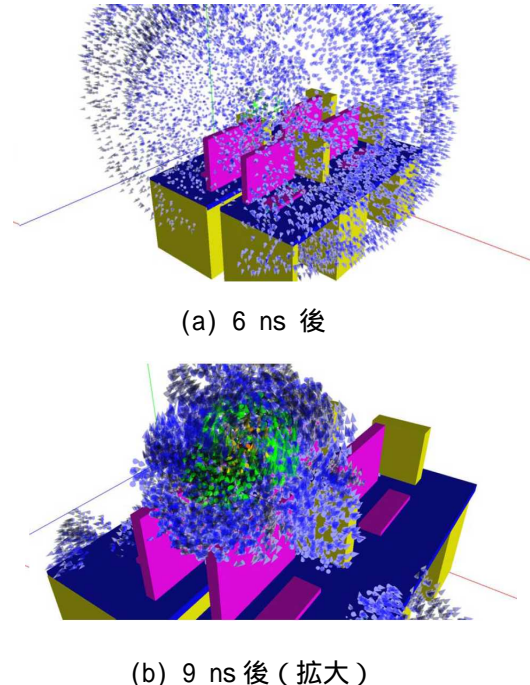


図 7 ポインティングベクトル分布

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 1 件)

1. S.Endo, J.Sonoda, M. Sato, and T. Aoki, "Acceleration of FDTD Method Using a Novel Algorithm on the Cell B.E.", IEICE Trans. Inf. & Syst., 査読, vol.E94-D, No.12, pp.2338-2344, Dec. 2011.

〔学会発表〕(計 15 件)

1. 小関勇気, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之, "GPU を用いた FDTD 法によるポインティングベクトル分布のリアルタイム可視化", 電子情報通信学会総合大会講演論文集 B-4-26, p.356, March 2012 (岡山大学).

2. 嶺岸琢磨, 小関勇気, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之, "Kinect による室内電波環境解析のための FDTD 数値モデル構築", 電子情報通信学会総合大会講演論文集 B-4-27, p.357, March 2012 (岡山大学).

3. 園田潤, 佐藤源之, "GPU を用いたディレクティブによる FDTD 法の高速度化と室内電波環境解析への応用", 電子情報通信学会環境電磁工学研究会技術報告 EST2011-114, pp.19-24. Jan. 2012 (九州大学).
4. 小関勇氣, 藤原脩, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之, "SfM システムで構築した実環境 FDTD 数値モデルと GPU による高精度高速電波環境解析", 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会技術報告 PRMU2011-162, pp.167-172. Jan. 2012 (大阪電気通信大学).
5. 小関勇氣, 園田潤, 昆太一, 佐藤源之, "FDTD 法における丸め誤差伝播の定量化", 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-11-107, pp.7-11, Nov. 2011 (雨晴温泉).
6. 藤原脩, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之, "SfM システムを用いた実環境 FDTD 数値モデルの構築", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 A-20-4, p.225, Sept. 2011 (北海道大学).
7. 園田潤, 佐藤源之, "Fermi GPU を用いたディレクティブによる FDTD 法の高速度化", 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.299, Aug. 2011 (東北学院大学).
8. 園田潤, 佐藤源之, "Fermi GPU を用いたディレクティブによる FDTD 高速計算", GTC Workshop Japan 2011, P07, July 2011 (東京ミッドタウン).
9. 園田潤, 佐藤源之, "コンパイラディレクティブを用いた GPU 上の FDTD 高速計算による電波伝搬散乱解析", 電気学会全国大会講演論文集 1-019, p.27, March 2011 (大阪大学).
10. 園田潤, 小関勇氣, 佐藤源之, "丸め誤差と数値分散誤差の簡易式による FDTD 法の計算精度保証", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, CS-1-3, March 2011 (東京都市大学).
11. 園田潤, 佐藤源之, "コンパイラディレクティブを用いた FDTD 法の GPU 実装", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-34, March 2011 (東京都市大学).
12. 園田潤, 佐藤源之, "二次元および三次元 FDTD 法で生じる数値分散誤差の簡易式", 信学技報, AP2010-130, pp.73-77, Dec. 2010 (機械振興会館).
13. 園田潤, 佐藤源之, "大規模電波伝搬解析で生じる FDTD 法の数値分散誤差の簡易式", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1-24, p.24, Sept. 2010 (大阪府立大学).
14. 園田潤, 及川貴瑛, 小山田拓司, 金澤靖, 佐藤源之, "実環境数値モデルと FDTD 並列計算による大規模電磁波シミュレーション", 第9回情報科学技術フォーラム FIT2010 講演論文集 A-017, pp.189--190, Sept. 2010 (九

州大学).

15. 藤原脩, 園田潤, 小山田拓司, 金澤靖, 佐藤源之, "高精度最適 2 次 FDTD 法と拡張現実感を用いた空間電波環境のイメージング", 平成 22 年度電気学会基礎・材料・共通部門大会, p.105, Sept. 2010 (琉球大学).

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・准教授

研究者番号: 30290696