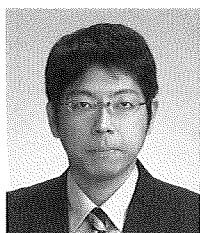


高精度高速シミュレーションと実環境数値モデルによる 電波環境可視化システム

Visualization System for Radio Wave Environment by High Accuracy and
Fast Simulation and Realistic Numerical Model

1091013



研究代表者

仙台高等専門学校
知能エレクトロニクス工学科 准教授

園 田 潤

[研究の目的]

近年、携帯電話、無線 LAN、GPS、ETC など電波を使った様々なデバイスは、我々の生活に欠かせないものになっている。このような電波を使ったデバイスは今後も増加すること、また、高速・大容量通信の要求から高周波化することが予想されるため、電波の局所集中による人体への影響や、周囲の機械の誤作動など、電波環境の悪化が懸念され問題視されている。本研究では、この問題を解決するために、実際の使用環境における数値シミュレーションベースの電波環境可視化システムの開発を目的とする。本システムが実現できれば、空間の電波分布を事前に把握できるため、電波を使ったデバイスを安全に使用でき、人間や周囲の機械との調和が促進できる。

本研究では、数値シミュレーション手法として FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法を、実環境モデル構築にはステレオカメラによる 3次元計測を用い、(1) FDTD 法の高精度化・高速化と、(2) ステレオカメラによる室内環境数値モデルの構築を研究課題とする。

[研究内容, 成果]

1. 研究内容

1.1 最適 2 次 FDTD 法とその高精度化

4 点の空間 M 次精度中心差分は、 $f(\xi)$ のテーラー展開の高次項を考慮すれば、式 (1) になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\xi)}{\partial \xi} = & a_1 \frac{f(\xi + \frac{1}{2}\Delta) - f(\xi - \frac{1}{2}\Delta)}{\Delta} \\ & + \frac{1-a_1}{3} \frac{f(\xi + \frac{3}{2}\Delta) - f(\xi - \frac{3}{2}\Delta)}{\Delta} + O(\Delta^M) \end{aligned} \quad (1)$$

最適 2 次 FDTD 法は数値分散誤差を最小にする a_1 を探索する。一方、従来手法である空間 2 次、4 次精度の FDTD 法、FDTD(2,4)法では、式 (1) を用いれば、FDTD(2,4)法は $a_1 = 9/8$ 、従来の FDTD 法は $a_1 = 1$ である。

式 (1) の両辺をフーリエ変換すると、式 (2) の数値的波数 $\tilde{k}$ が得られる。ここで、 k は物理的波数である。

$$\begin{aligned} \tilde{k} = & \frac{2}{\Delta} \left[a_1 \left(\sin \frac{k\Delta}{2} - \frac{1}{3} \sin \frac{3k\Delta}{2} \right) + \frac{1}{3} \sin \frac{3k\Delta}{2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

最適2次FDTD法は、式(2)の数値的波数 $\tilde{k}$ を物理的波数 k に近づくように、すなわち、式(3)に β を与え、 Θ が最小になるような係数 a_1 を求める方法である。

$$\Theta = \int_{-\beta}^{\beta} (k\Delta - \tilde{k}\Delta)^2 d(k\Delta) \quad (3)$$

ここで、 $0 \leq \beta \leq \pi$ である。Tamらは $\beta = \pi/2$ 、Wangらは $\beta \approx 0.6\pi$ とし、 $\partial\Theta/\partial a_1 \rightarrow 0$ となる a_1 を式(3)から数値的に求め、それぞれ $a_1 = 1.15505040$ 、 $a_1 = 1.17036295$ を得ている。一方、FDTD(2,4)法は $\beta \rightarrow 0$ で $a_1 = 1.125$ である。

我々は、TamらやWangらが式(3)に β を与えることで数値的に求めた a_1 を、式(3)を解析的に解くことにより式(4)に示す β の値による係数 a_1 を導出している。

$$a_1 = \frac{8(27\sin\frac{\beta}{2} - \sin\frac{3\beta}{2}) - 12\beta(9\cos\frac{\beta}{2} - \cos\frac{3\beta}{2})}{60\beta - 90\sin\beta + 18\sin 2\beta - 2\sin 3\beta} + \frac{6\beta - 18\sin\beta + 9\sin 2\beta - 2\sin 3\beta}{60\beta - 90\sin\beta + 18\sin 2\beta - 2\sin 3\beta} \quad (4)$$

係数 a_1 の取りうる範囲は、およそ $1.125 \leq a_1 \leq 1.289$ であり、全伝搬角で数値分散誤差が最小になる係数 a_1 を分散関係式から算出した結果 $\Delta = \lambda/5$ のとき $a_1 = 1.144770296$ 、 $\Delta = \lambda/10$ で $a_1 = 1.129655712$ 、 $\lambda/20$ で $a_1 = 1.126134825$ を得た。

図1に全伝搬角 θ 、 ϕ の平均誤差 $e_{\theta\phi}$ のクーラン数依存性($\Delta = \lambda/5$)を示す。図1より、 $e_{\theta\phi}$ の最小値と比較すると、従来のFDTD法、最適2次FDTD法、FDTD(2,4)法に比べ数値分散誤差を小さくできる。また、セルサイズが大きいほど数値分散誤差を小さくできる。

高精度最適2次FDTD法の計算コストを、図1に示した全伝搬角 θ 、 ϕ の平均誤差 $e_{\theta\phi}$ で評価する。図1より、高精度最適2次FDTD法は $\Delta = \lambda/5$ 、クーラン数0.1で $e_{\theta\phi} = 1.5 \times 10^{-3}$ となるが、FDTD(2,4)法で $e_{\theta\phi} = 1.5 \times$

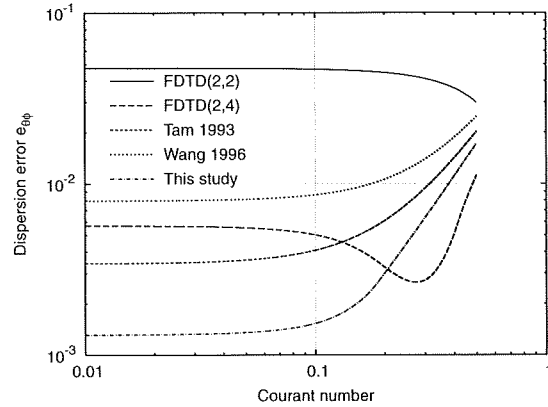


図1 各FDTD法における数値分散誤差 $e_{\theta\phi}$ のクーラン数依存性($\Delta = \lambda/5$)

10^{-3} を得るには $\Delta = \lambda/10$ 、クーラン数0.3にする必要がある。このことから、FDTD(2,4)法と比較すると、使用メモリは $1/8$ 、計算時間は $3/8$ に軽減できる。

1.2 ステレオカメラを用いた3次元計測

本研究では、ステレオカメラによる3次元計測の取得データを用いて空間の数値モデルを構築する。ステレオカメラによる3次元計測では、測定対象の3次元座標 (x, y, z) は式(1)で求まる。

$$\begin{cases} x = \frac{x_l + x_r}{2(x_l - x_r)} B \\ y = \frac{f}{x_l - x_r} B \\ z = \frac{z_l + z_r}{2(x_l - x_r)} B \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 (x_l, z_l) 、 (x_r, z_r) は左右2枚の画像の対応座標、 f は焦点距離、 B はカメラ距離である。

1.3 3次元計測情報による室内環境数値モデルの構築

式(5)のようなステレオカメラを用いた3次元計測により得られた3次元座標をもとに、FDTD法用の数値モデルを構築する。本手法では任意方向に置かれた物体にも対応できるように、物体の内外判定に平面の方程式を用いる。FDTD法用の数値モデル構築の手順は、(1)物体の特徴点座標を入力し、(2)特徴点の座

標をもとに物体を構成するすべての面の方程式を求める。ここで、3点 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) を通る平面の方程式は式(6)で、また式(6)の各成分 a, b, c, d の導出は式(7)で表される。(3)算出した面の方程式に不等号を組み合わせることで物体の内部を表す条件式を作成し、(4)物体の内部に位置するセルにその物体の電気定数 ϵ, μ, σ を与える。

$$ax + by + cz = d \quad (6)$$

$$a = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, b = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$c = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}, d = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

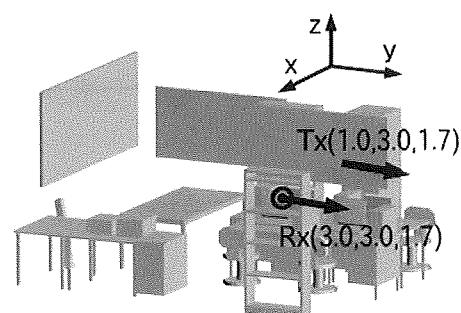
2. 研究成果

2.1 FDTD 数値モデルの構築

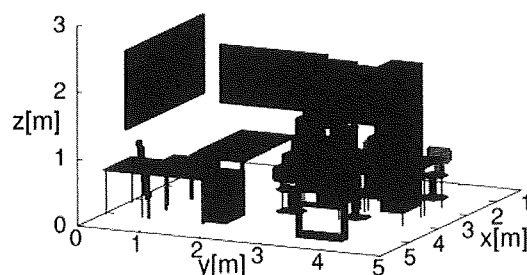
1. 2, 1. 3節で示した実環境数値モデル構築法により、例として、実際の研究室の数値モデルを構築する。研究室の大きさは、 $x = 4.5$ m, $y = 4.5$ m, $z = 3.0$ mであり、室内にはPCなどの直方体の物体が25個、テーブル7個、イス5個、棚2個が存在するものとする。ここでは、室内の物体の電気定数はすべて $\epsilon_r = 5.0$, $\sigma = 10^{-2}$ S/mとした。セルサイズは0.01 mと0.03 mとした。

図2に構築したFDTD用数値モデルを示す。図2(a)は物体の内外判定のもととなる平面を3次元表示させたものであり、図2(b)はセルサイズ0.03 mで構築したFDTD法用数値モデルである。図2より、室内環境のFDTD法用数値モデルを構築できることが確認できる。

数値モデル構築に要する時間を評価する。評価にはCPUがCore 2 Duo 1.86 GHz、メモリ2 GBのPCを用いた。図2のモデルにおいて、座標入力から数値モデル構築までに要する時間は、セルサイズ0.03 mで15.8秒、0.01 mでは425.2秒であった。数値モデル構築に要する時間は、解析領域の大きさのほか、モデル化する



(a) 平面の方程式による3Dモデル表示



(b) FDTD 法用数値モデル

図2 研究室内の数値モデル

物体の個数に比例して増加する。また、物体の内外判定に使用する平面の方程式の数が物体の形状によって違うため、物体の種類によってモデル構築時間が異なる。直方体、テーブル、イス、棚1個あたりのモデルに要する時間は、それぞれ0.13, 0.67, 0.79, 1.07 sであり、複雑な形状ほど数値モデル構築に時間を要することが分かる。

2.2 室内環境数値モデルを用いたFDTD法による電波伝搬散乱解析

図2の数値モデルを用いてFDTD法による電波伝搬散乱解析を行う。解析空間は 4.5 m $\times$ 4.5 m $\times$ 3.0 mとし、上下面と側面3面に10セル分の厚さの壁を設けた。セルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01$ m, $\Delta t = 10^{-11}$ sとした。壁にはコンクリート ($\epsilon_r = 6.0$, $\sigma = 10^{-2}$ S/m)、物体には木材 ($\epsilon_r = 3.0$, $\sigma = 10^{-2}$ S/m) の電気定数をそれぞれ与え、(1)空間内に物体が存在しないとき、(2)テーブルのみ配置したとき、(3)すべての物体を配置したときの3条件で解析を行った。計算はMPI (Message Pas-

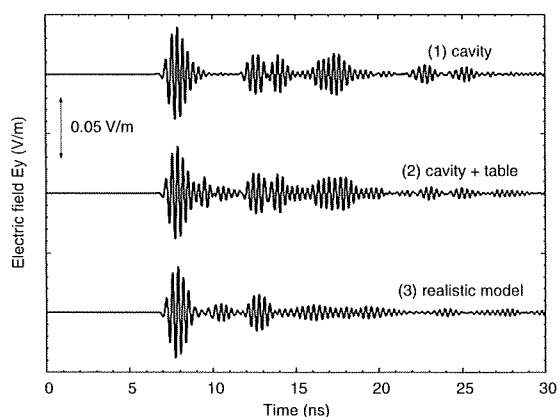


図3 FDTD法による解析結果

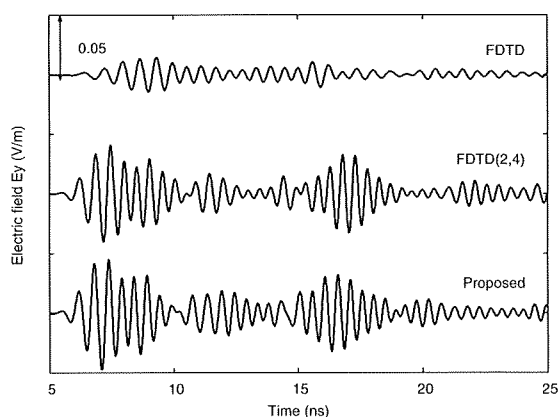
sing Interface) を用いた並列化により高速化・大規模化を行った。

図2の数値モデルにおけるFDTD法による解析結果を図3に示す。図3は、波源から x 方向に2.0 m離れた観測点における電界 E_y の波形である。図3より、室内のモデル化により解析結果に違いが生じていることがわかる。例えば、9 ns付近の電界 E_y を見てみると、(1) モデルを使用しなかった場合の E_y は0.015 V/m程度であるのに対し、(2) テーブルのみ、(3) すべての物体を配置した場合では、それぞれ0.02 V/m, 0.01 V/mとなっている。今回の解析から、数値モデルの精度を上げることにより、解析した電磁界応答も現実になることが確認できた。

2.3 高精度化した最適2次FDTD法の並列計算による電波伝搬散乱解析

図4にFDTD法、FDTD(2,4)法、高精度最適2次FDTD法で計算した図2のモデルの波源から2.0 m離れた観測点における電界 E_y を示す。

計算パラメータは、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05$ m, $\Delta t = 10^{-11}$ sとした。図4より、従来のFDTD法は数値分散誤差が大きいこと、また、高精度最適2次FDTD法とFDTD(2,4)法は細部で一致しないことが分かる。図1で高精度最適2次FDTD法の方が数値分散誤差は小さいことを示したが、図4においても、高精度最適2次


 図4 高精度化した最適2次FDTD法を用いた実環境室内モデルにおけるパルス解析 ($\Delta = \lambda/5$)

FDTD法の方が数値分散誤差は小さく計算結果の精度も高いと考えられる。

ここまでは計算結果の確認のために、1点の観測点における電界値の時間応答を示したが、FDTD法では時間毎の全領域の電磁界値すべてを計算できるので、電磁界分布を可視化可能である。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、従来手法に比べ高精度で高速に計算する電磁界解析法として、最適2次FDTD法の高精度化と並列計算による高速化・大規模化を試み、さらに、これまで実現できていなかった実環境モデルにおける高精度な電磁界解析を行った。この結果、(1) 従来手法より使用メモリを12%、計算時間を38%に削減できる手法を開発し、(2) 精度の高い実環境モデルを用いることにより精度の高い電磁界解析が可能になることを示した。

今後の課題・展開として、(1) ビデオ画像を用いた実環境モデルの全領域・高速自動構築、(2) GPGPUやCell/B.E.など高速ハードウェア実装によるリアルタイムシミュレーション、(3) 計算した電磁界分布を実シーンに重ねて表示する超現実感システムへの展開が挙げられる。

[成果の発表, 論文等]

論文発表

1. J. Sonoda, H. J. Kim, and M. Sato: "High-Accuracy Optimal Second-Order FDTD for Analysis of Large-Scale Three-Dimensional Electromagnetic Wave Propagation" IEEE Trans. on Antennas and Propagation, (manuscript in preparation).
2. J. Sonoda, T. Oyamada, Y. Kanazawa, H. J. Kim, and M. Sato: "Analysis of Electromagnetic Wave Propagation on Large-Scale and Realistic Model Using High-Accuracy Optimal 2nd-Order FDTD Method" IEEE Trans. on Antennas and Propagation, (manuscript in preparation).
3. 小山田拓司, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之: "実環境数値モデルを用いた FDTD 法による電波伝搬解析", 電気学会論文誌 (投稿中)

学会発表

1. 園田潤, Hee Joon Kim, 佐藤源之: "高精度最適 2 次 FDTD 法による大規模実モデル電波伝搬解析", 信学総大・講演論文集 CS-1-6 (2010. 3)
2. 小山田拓司, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之: "実環境電波伝搬散乱解析のための 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, 信学総大・講演論文集 B-1-42 (2010. 3)
3. 小山田拓司, 園田潤, 金澤靖: "実環境数値モデルを用いた FDTD 法による電波伝搬解析", 平成 22 年東北地区若手研究者研究発表会講演資料 YS-8-C2, pp.71-72 (2010. 2)
4. 小山田拓司, 園田潤: "実環境電波伝搬解析のための FDTD 数値モデルの構築", 平成 21 年度第 3 回情報処理学会東北支部研究会, 資料番号 09-3-10 (2009.12)