

# 適応的ビーム分割による高周波電磁波伝搬の高速可視化

曹 晔逸†  
Xiaoyi Cao

牧野 光則†  
Mitsunori Makino

白井 宏†  
Hiroshi Shirai

篠田 庄司†  
Shoji Shinoda

## 1. はじめに

携帯電話, PHS などに代表される移動体通信にとって, 電磁波障害物が多い都市部における基地局配置問題の解決は重要な課題であり, 電磁波解析, グラフ・ネットワーク理論などさまざまな立場からの研究が進められている[1]-[11]. また, 最近では無線 LAN の普及に伴う情報セキュリティに関する懸念が強くなってきており, 電磁波の到達・非到達を的確に把握することがますます重要となっている. 概況理解のために, 特に, 広い都市空間中の電磁波伝搬状況を少ない計算コストで提示し, 無線通信システムの信頼性, 危険性について少なくとも手がかりを与える手法が必要である.

これまで, 著者らはコンピュータ・グラフィックス(CG)のレンダリング法であるビーム・トレーシング法[12]を援用して, 高周波電磁波の伝搬状況を近似計算し, 可視化する方法を提案している[13]. この方法は, 基地局から射出するレイに対して隣接関係を持たせ, 隣接する3本のレイで1個のビーム(多面体)を定義し, レイが反射する度に新たなビームを構成する. このとき, 電磁波の非伝搬領域をビームが含まないようにするため, ビームを再帰的に分割する. この方法により, 反射を含む電磁波の到達・非到達を3次元空間中で判定でき, 干渉の影響を含む電磁波の強さを計算できる. しかし, 再帰的な分割はビーム数を冗長とし, 計算時間を増大させる恐れがある.

そこで, 本論文では, 建物などの地理情報が主に三角パッチで与えられることに着目し, パッチの境界を探索して効率的にビームを分割する手法を提案する. 提案手法では, ビーム分割箇所の決定に従来法より多い計算を要するが, 1回の分割で伝搬・非伝搬領域を区別できる. このため, 総ビーム数は従来法より少なくなり, ボリュームデータ化の計算コストが低下する.

## 2. 適応的ビーム・トレーシングを用いた電波伝搬の追跡と可視化

### 2.1 レイ・トレーシングとビーム定義

本論文では, 電磁波を複数のレイで表現し, レイ・トレーシング法により伝搬範囲を追跡する. 第1世代のレイはアンテナから等間隔に3次元空間の全方向へ向けて放射する. このために, アンテナを中心とする仮想的な球形のスクリーンを用いる. レイはアンテナを始点とするベクトルとして配置し, 電磁波反射物体に交差した場合にはそれぞれの正反射方向へ配置し, 電磁波透過物体と交差した場合にはそれぞれの透過(屈折)方向へ配置する. 隣接する3本のレイを稜線とする多面体によりビームを構成し, 電磁波伝搬領域として定義する. 基地局(アンテナ)から発した第1世代のビームは4面体となる. 1回以上反射し, 物体表面から発したビームは一般に5面体となる(図1).

† 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻

‡ 中央大学理工学部電気電子情報通信工学科

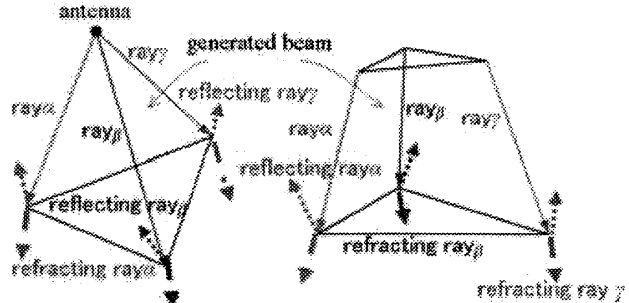


図1: 隣接レイによるビームの定義

### 2.2 ビームのボリューム化

ビームデータを可視化すれば, 伝搬状況を表現できる. 2.1で得られたビームが複数同一領域中に存在し, 干渉を生じる場合がある. この状況を可視化するために, 対象ボクセルを各ビームが含まいか否かを判定し, 対象領域を立方体(セル)の集合とし, それぞれのビームに含まれるセルの中心(ボクセル)に到達する電磁波の電力密度を計算する.

### 2.3 レンダリング

すべてのビームに対して計算が終了したら, 各ボクセルに格納された電力密度をレイ・キャスト法[15]で可視化する. レイ・キャスト法は表面を定義できないボリュームデータの任意視点からの可視化に適しており, 電磁波伝搬の可視化に有効である. また, 各物体(建物, 地面)はレイ・トレーシング法で可視化する.

### 2.4 従来のビーム分割法[13], [14]と問題点

初期配置により生成したレイのみでビームを構成し, その内部を電磁波伝搬領域とすると, あるビーム内部に物体(建物等)が含まれる場合があり得る. この場合, 本来物体の影となり電波が伝搬しない領域の取り扱いが不正となる.

そこで, 影ができる可能性がある領域に対してレイを追加生成し, ビームの分割処理を行う. レイの追加生成は, ビーム分割判定により選ばれた隣接するレイ2本の始点の midpoint を新たなレイの始点とし, レイ2本の中間方向を新たなレイの方向ベクトルとして配置し, 追跡する. 分割された2つのビームに対して, 再帰的に分割し, 影ができる恐れが少なくなるまで再分割する(図2).

ビーム分割は, ビーム領域に建物などの電波障害物を含めないために行われる. このために, 従来法ではビームを構成する隣接レイの中間に新たなレイを定義するが, 状況に応じた配置ではない. したがって, 新たに定義されたレイが電波伝搬領域・非伝搬領域の境界に存在することは期待できず, 再帰的にビームを分割し, レイを定義することが必要である. この結果, 従来法には以下の問題がある.

- (1) 電波伝搬領域・非伝搬領域を区別するまでに多数のレイ生成・追跡が必要であり、計算時間を要する。
- (2) 電波伝搬領域を構成するビームが多数となり、ボリュームデータ化の計算時間増大につながる。

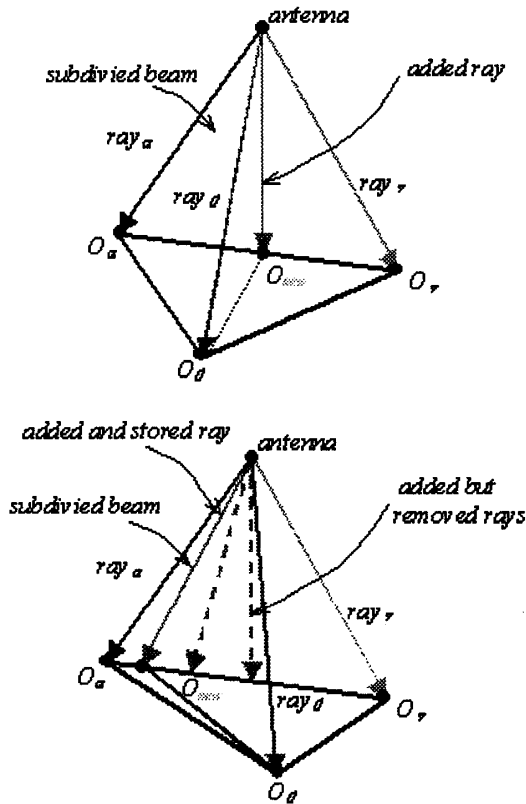


図2: 従来アルゴリズムによるビームの分割処理

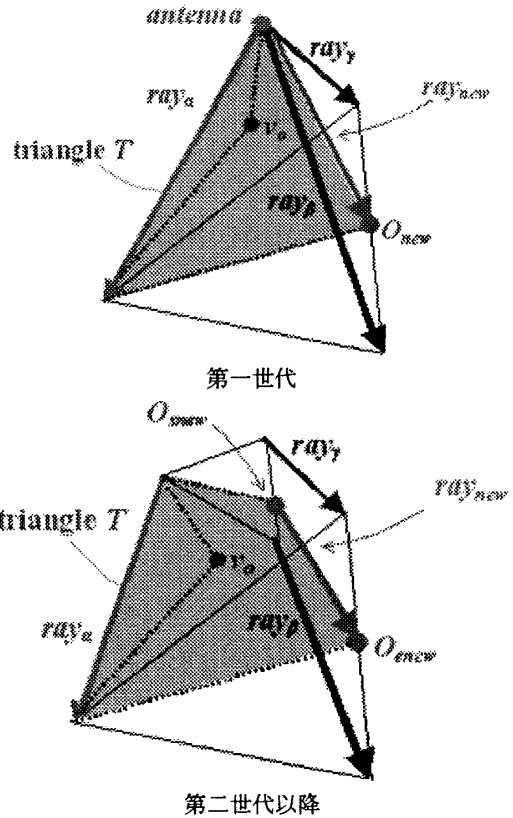


図3: 提案アルゴリズムによるビームの分割処理(1)

### 3. 三角パッチに特化したビーム分割法

#### 3.1 概要

本論文では、建物などの地理情報が三角パッチで定義されることが多い点に注目し、三角パッチに特化したレイ配置、ビーム分割法を提案する。

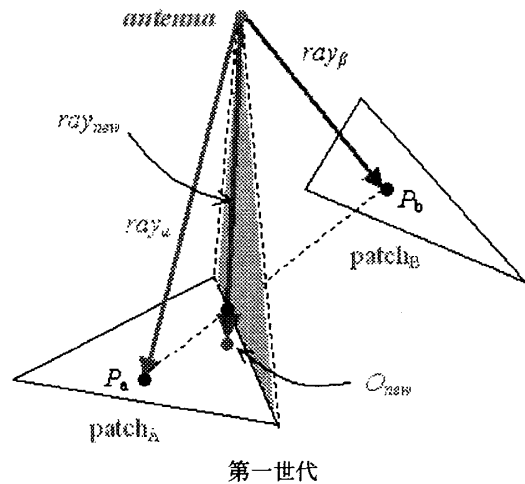
提案手法では、電波伝搬領域と非伝搬領域の境界に位置するレイを求め、その後ビームを分割する。これにより、ビームの分割回数およびレイの配置は複雑となるが、ビーム総数の減少が期待される。

#### 3.2 ビーム内部に物体が含まれる場合

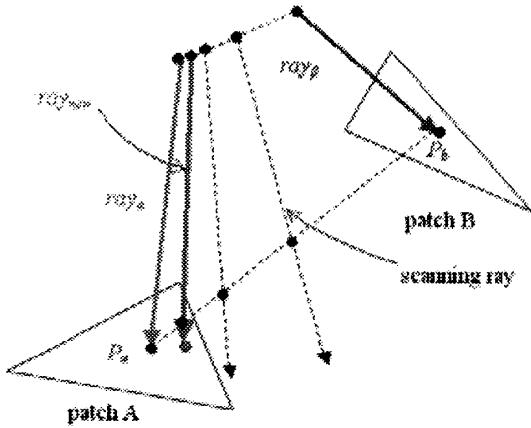
1個のビームの内部にある物体が完全・不完全に内包される場合、物体(三角パッチ)の頂点( $v_o$ )とビームの頂点・稜線( $ray_a$ )で構成される三角形(triangle  $T$ )により、ビームを2個に分割する(図3)。

#### 3.3 ビームが異なる物体に交差する場合

ビームが異なる物体に交差する場合、レイ()物体(三角パッチ  $P_a, P_b$ )の頂点・境界線とビームの頂点・稜線により、ビームを2つに分割する(図4)。



第一世代



第二世代以降

図4: 提案アルゴリズムによるビームの分割処理(2)

### 3.4 特徴

提案手法では、ビームは、隣接ビームと稜線と面を共用するので、重なり、抜けが発生しない。また、1回ビームを分割すれば、同一分割条件により、追加レイを生成する必要がない。従って、ビームの分割回数およびビーム数は減少する。また、1回の分割で伝搬・非伝搬を区別できる。このため、総ビーム数は従来法より少なく、かつ、ボリュームデータ化の計算コストも低くなる。

## 4. シミュレーション

### 4.1 各種設定

本章では、提案手法のシミュレーション結果と考察を述べる。シミュレーションは アンテナ出力 $P_t=20\text{mW}$ 、アンテナ利得 $G_t=1$ 、周波数をPHSが使用する1.9GHzとする。対象空間を $400\text{m} \times 400\text{m} \times 100\text{m}$ とし、ボクセルを $2,000,000(=200 \times 200 \times 50)$ 個配置した。シミュレーションには、EMT EUS-10 CPU:Ultra SPARC Iii, 440MHzを使用した。

### 4.2 中央大学後楽園キャンパスの例

初期レイ数と初期ビーム数の設定による計算時間の変化を図5に示す。図5から、初期レイ数を482と初期ビーム数を960に設定すると、可視化の計算コストと可視化結果の精度のバランスがよいことが分かる。この場合のレイおよびビームの総数について表1に、また、ボリュームデータ化に関する計算時間を表2に示す。

表1 レイ及びビームの総数

使用方法	最終レイ数[本]	最終ビーム数[個]	計算時間[s]
従来法	10403	10881	52.71
提案法	2973	3075	13.55

表2 ボリューム化の計算時間

使用方法	ボリューム化の計算時間[s]
従来法	9770.07
提案法	2435.16

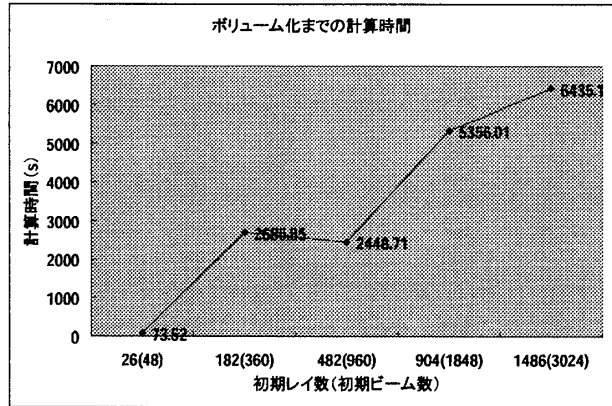
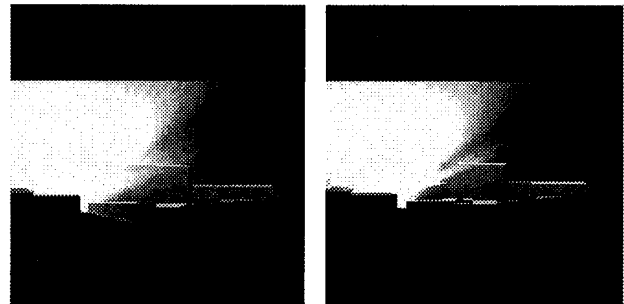


図5: 計算時間



従来アルゴリズム

提案アルゴリズム

図6: シミュレーション結果

シミュレーション結果を従来手法と提案手法の双方について図6に示す。図6から、提案アルゴリズムにより生成された画像は建物で反射を繰り返すことで、アンテナから直接見えない領域への電磁波伝搬が確認できる。

### 4.2 結果に対する評価

表1より、中央大学後楽園キャンパスをモデルとして同じ環境で提案手法を用いた結果、最終レイ数と最終ビーム数は約30%、計算時間は約50%低減したことが確認される。また、表2より、提案手法により、ボリューム化計算時間は約30%の低減が確認された。図6で従来アルゴリズムと提案アルゴリズムのレンダリング結果を比べると、見た目では提案アルゴリズムにより生成された画像と、従来アルゴリズムによる画像との違いがあまりない、しかし、生成されたボリュームデータを比較すると、ボクセル全体の約6.91%は電力密度が非ゼロ(従来法)からゼロ(提案法)になった。この原因は、従来法では最初からビームの分割回数を一定の閾値に設定し、ビームを構成するレイが異なる物体に交差しても、分割回数が設定された閾

値を越えた場合、ビームの再分割が行わないためと考えられる。一方、提案法では、分割条件を満たす場合、一回のみでビームを分割する。したがって、提案アルゴリズムにより、計算コストを低減し、かつ、高精度の結果を得たことが確認される。

## 5. むすび

本論文では、都市部における無線通信システムの信頼性、危険性を概略提示することを目的として、高周波電磁波伝搬の高速可視化手法を提案した。本手法では従来法の問題点であった分割法を改良し無駄なビームを生成せず、ビーム分割回数及びビーム数を減少できる。従って、処理時間が減り、シミュレーションの効率が高くなる。

一方、本手法は三角パッチに特化した手法のため、曲面に依じたビームの分割がなされない。第二に、回折のより適切な考慮である。回折は、提案手法により追跡が可能である。但し、回折を表すビームが広がる傾向が反射・透過の場合より強いいため、より効率的なビーム分割が望ましく、改良を進める予定である。

## 謝辞

本研究の一部は中央大学 21 世紀 COE プログラム「電子社会の信頼性向上と情報セキュリティ」、中央大学理工学研究所共同研究、ならびに日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 C の補助を受けた。

## 参考文献

- [1] G. K. M. Liang, "Ray based models for site specific propagation prediction," Ph. D. Dissertation, Polytechnic University, 1997.
- [2] M. F. Cathedra et al., "Efficient ray-tracing techniques for three-dimensional analyses of propagation in mobile communications: application to picocell and microcell scenarios," IEEE Antennas & Propagation Magazine, Vol.40, No.2, pp.15-28, 1998.
- [3] H. Shirai, K. Hashiguchi, R. Sawai, M. Makino, A. Taguchi and S. Shinoda, "Electromagnetic wave propagation down the urban canyons of high rise buildings," Proc. of MDMC'98, pp.348-351, 1998.
- [4] 橋口 弘一, "地理情報に基づいた電磁波伝搬解析とその可視化に関する研究," 中央大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士論文, 2000.
- [5] 矢野 貴啓, "電磁波伝搬解析のための地理情報データベース構築についての研究," 中央大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士論文, 2000.
- [6] 関口秀紀, 大久潤, 白井宏, "3次元空間における電磁波伝搬の可視化について," 電気学会 電磁界理論研究会 研究会資料 EMT-03-53, 2003
- [7] 佐納由起子, 中本雅祥, 秦正治, 川村雅彦, "屋内置局における伝搬シミュレーション手法に関する検討," 2004 信学総大, B-1-11, Mar. 2004.
- [8] Yvo L. C. de Jonge, et al., "A building-transmission model for improved propagation prediction in urban microcells," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. VT-53, No. 2, pp. 490-502, Mar. 2004.
- [9] T. Whitted, "An improved illumination model for shaded display," Comm. of ACM, Vol.23, No.6, pp.343-349, 1980.
- [10] J. Amanatides, "Ray tracing with cones," Proc. of SIGGRAPH'84, Vol.18, No.3, pp.129-135, 1984.
- [11] R. L. Cook, T. Porter and L. Carpenter, "Distributed ray tracing," Proc. of SIGGRAPH'84, Vol.18, No.3, pp.137-145, 1984.
- [12] P. Heckbert and P. Hanrahan, "Beam tracing polygonal objects," Proc. of SIGGRAPH'84, Vol.18, No.2, pp.119-127, 1984.
- [13] M. Makino, A. Ohsaki, H. Shirai and S. Shinoda, "A visual simulation of ray propagation in the use of adaptive beam tracing for wireless communications systems," Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Dimensional Mobile Communications (MDMC'01), pp.125-132, June 11-12, 2001.
- [14] 大崎晃, 牧野光則, 白井宏, 篠田庄司, "適応的ビームトレーシングによる高周波電波伝搬のビジュアル・シミュレーション," 電子情報通信学会技術研究報告, CAS2000-97, Vol.100, No.574, pp.23-30, 2001.
- [15] A. Kaufman, "Volume visualization," IEEE Computer Press, 1991.