

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20360176

研究課題名(和文) ユビキタス情報通信ネットワーク構築のための電波伝搬推定に関する研究

研究課題名(英文) Research on Electromagnetic Wave Propagation Estimation for Constructing Ubiquitous Information Communication Networks

研究代表者

白井 宏 (SHIRAI HIROSHI)

中央大学 理工学部 教授

研究者番号：00196594

研究成果の概要(和文)：

都市空間に存在する複雑な多層構造ビル内外を伝搬する電磁波を高速かつ正確に予測し、その結果を表示するためのシステムを構築した。主となるシステム開発ポイントは次のようなものである。i)建物の壁による反射や透過を推定する上で重要となる建築材料の電気定数を効率よく推定する測定法の開発。ii)壁の厚みによる内部多重反射効果を効率よく組み入れるための解析手法の開発。iii)人体影響等、複雑な伝搬環境における電磁波散乱を解析するための数値解法の開発。iv)三次元空間上の電磁波伝搬を効率よく解析して、その結果をわかりやすく表示する可視化システムの開発。

研究成果の概要(英文)：

Fast and efficient estimation/visualization system has been developed for analyzing high frequency electromagnetic wave propagation in an urban environment with complex building structures. The developed system includes i) reliable measurement method for estimating electrical parameters of building materials; ii) an analytical method for considering the multiple internal bouncing effect inside the building walls; iii) a numerical method for calculating the scattering field due to the complicated structures such as human bodies; and iv) a fast visualization system for displaying electromagnetic field variation in a three dimensional space.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

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：電磁波伝搬、SBR法、可視化、高周波漸近解析、FDTD法

1. 研究開始当初の背景

近年、携帯電話や無線 LAN 等による移動

通信が盛んになるにつれ、我々の生活環境の中には電波があふれ、それに伴って使用周波数の逼迫、他システムとの混信や干渉ならび

に環境問題等の社会問題も起きている。

無線通信システムの設計・構築において、その使用周波数に応じた電波伝搬の特性を調べることは、いわゆる不感地帯をなくし効率的なサービスを提供するために重要な要素となっている。

電波の伝搬は、その伝搬路付近の自然地形や人工建造物の影響を大きく受ける。そのため、通信障害の予測、あるいは生活環境における電波の強度分布推定には詳細な地理情報も必要となり、都市部における電波伝搬環境は、高層建築物の影響を受けて、ますます複雑なものになってきている。特に高層ビルの内外で用いられる高速無線 LAN ネットワークシステムや種々の情報・サービスを統合した近未来のユビキタスネットワークの設計には、ビルの多層構造や通信対象機器の立体的な位置関係を考慮した立体的な通信伝搬解析が必要になり、従来の平面的な通信回路設計手法をそのまま適用して解析できないので、新しい解析手法の提案が必要である。

近年、情報通信の高度化、大容量化に伴い、使用周波数が高くなり、波長が散乱体に比べて相対的に小さくなると、以前にも増して、物体の局所構造が電波の伝搬に強く影響するようになり、電磁界強度分布の予測は難しくなっている。安定した通信チャネルを確保し、移動体通信の不感地帯を減らすことは重要であるけれども、そのための不必要な過度の電波放射は、周りの生活環境や人体への影響も懸念されるため避けるべきである。加えて情報通信セキュリティ上からも不必要な場所への電波漏えいは、避けるべきであり、今後は効率がよくかつ安全なユビキタス・移動体基地局の配置が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、ユビキタス高度情報通信の高速かつ高品質な情報通信サービスに向けて、都市空間に存在する複雑な多層ビルディング構造内外における電波伝搬環境の予測を、高速かつ正確に行う解析・表示システムを構築することを目的とする。

都市部における電波伝搬予測の研究は、移動体通信の発展から近年、欧米諸国でも研究が行われているが、地域特定型というより、統計的な手法が多い。また都市計画の進んだ欧米諸国の都市は、広範囲に渡って区画の整備がなされ、町並みも整然としているため、統計処理や経験的な伝搬予測が比較的簡単である。しかし区画の整備が遅れた日本の都市部の場合に、欧米の理論をそのまま適用するのは難しく、日本の現状に適応した電波伝搬の予測プログラムの開発が必要である。加えて多層のビル構造物内のフロアプランま

で含めた建物内および内外の伝搬解析の例はほとんどないのが、現状である。

研究代表者(白井)と研究分担者の一人(牧野)は、文部科学省から平成 14 年度から 5 年間採択された中央大学 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(研究代表者: 辻井 重男)」の事業推進担当者として、「無線ネットワークの信頼性と電磁波漏えい」の研究テーマを担当してきた。この研究によって、通信のための過度な電磁波放射は情報セキュリティの点からも好ましくないことを指摘しており、本申請研究によってより好ましい無線通信ネットワークの構築設計につなげたい。

3. 研究の方法

申請者らは、以前から電波の周波数が高いことを念頭に置いた光線理論に基づいた高周波近似解析法について研究し、その適応性を種々の場合に対して調べてきている。光線理論は、電波の散乱現象を、光線の反射、透過及び回折などを用いて表すため、物理的なイメージをつかみやすい。また、光線の散乱は局所的な現象として取り扱うことができるために、大きな空間を対象とするときにも、遠くにある物体の影響を無視して考えることができるため、計算時間を大幅に短縮できて便利である。

以前に助成を受けた科学研究費補助金「移動体通信のための大都市空間における電磁波伝搬の予測に関する研究(基盤研究 C: H13-15)」ならびに「ユビキタス高度情報通信のための電波伝搬予測に関する研究(基盤研究 C: H17-19)」において、高層ビルが林立する大都市空間内のビルの形状情報やビル構造を考慮した電波伝搬解析システムの開発を行い、これら研究から、幾何光学的な手法による高周波散乱解析手法の有効性が示された。今回の申請研究は、この成果をもとに建物内外の立体的な配置や構造ならびに建築材料を考慮して、さらに精度の高い電波伝搬環境の解析を目指す。

今回の研究は、建物内外の立体的な配置や構造ならびに建築材料を考慮した電波伝搬を解析する。そのため、建物外部、あるいは建物内部における電波伝搬の推定に関する先行研究の成果を生かして、特に建物内外を透過して伝搬する電波を、効率よく推定するために、伝搬・透過量の鍵となる建物材料の電気定数を広い周波数範囲に亘って高速に測定し、それらの特性を考慮した統合的な電波伝搬推定を行う。複雑な都市環境や室内環境をモデルとした電波伝搬を解析するときには、有限要素法などの数値解法も考えられるが、使用周波数が高いと、細部にわたる標

本点を抽出する必要がある。その結果として大容量の記憶容量を確保しなければならなくなり、効率のよい計算は期待できず、その適用は困難である。本研究では、数値解法と相補的な立場にある光線理論に基づいた高周波近似解析法を用いる。

この光線理論は、光線追跡法等のコンピュータグラフィックスの可視化の技術と類似しているため、そうした技術と連携して画像表示も工夫することができる。通常の電波の伝搬強度の計算は、観測点を決めて、その点に到達する電波を見つけては、その強度を計算する。この場合、観測点を変えるたびに、すべての計算を繰り返さなくてはならないので効率的でなく、ある地域全体の強度分布を計算するには適さない。そこで、ある空間に伝搬する通信基地局アンテナからの電波を追跡し、その都度その点の電波の強度を追加記憶していけば、一度の計算で、すべての情報を蓄えることができ、計算時間を大幅に短縮できることになる。

建物外部、あるいは建物内部における電波伝搬の推定に関する先行研究の成果を生かし、本申請研究では、特に建物内外の電波伝搬を効率よく推定するために、伝搬・透過量の鍵となる建物材料の電気定数を広い周波数帯に亘って高速に測定し、それらの特性を考慮した統合的な電波伝搬推定を行う。

4. 研究成果

都市空間や建物内の電波伝搬特性を光線理論で解析する上で一番重要なのは、建築物の壁等による多重反射および透過・回折の問題である。反射波は、可視領域の伝搬に大きな影響を与え、直接波との干渉により、基地局が直接見えている場合でも信号強度が弱くなることもある。透過波は、壁を通した屋内通信や建物外から透過した電波を用いた通信のために、また回折波は、高層建築物の陰となる領域で重要な成分となり、いずれも伝搬強度は低いけれども通信に必要な波となりうる。

電波の反射・透過量は、その建造物のビル壁の材質、表面等で変化し、また周波数分散性があるので、周波数によっても、また入射角によっても反射、透過率が変化する。都市部の高層建築物の主要部材は、そのほとんどが、鉄筋コンクリートであり、建物内のフロアプランのための間仕切り壁もコンクリート、合板木材やパネル等でできている。こうした壁材等は、移動体通信に用いる高周波の電波に対して、損失誘電体と考えることができる。先行研究では、建物内の無線 LAN 基地局等からの見通し伝搬を主に考えていたので、建物壁による

多重反射は考慮しているが、壁材の損失性を考えて内部透過の影響は少ないと考え、壁表面の反射を考えていた。しかし比較的薄いパネル材などについては、材質内の透過量も多く、壁内の多重反射や多重透過の効果も必要となることを新たに示した。多層空間内での伝搬、あるいは屋外から屋内への透過の場合には、天井、床、壁、窓を透過した伝搬が主となることから建築材料の内部構造や厚さを把握し、それらの電気定数を測定することによって伝搬量を推定することになる。

先行研究の結果や文献調査等により、都市空間に存在する複雑な多層構造ビル内外を伝搬する電磁波を高速かつ正確に予測し、その結果を表示するためのシステムを構築するために、研究代表者と研究分担者で研究を進めた結果、大きく分けて以下のような4つの点に研究成果をまとめることができた。

(1) 電気定数の測定法の開発

建物壁等の建築材料の電気定数は、その材料による電磁波の反射や透過量を推定する上で必要となる。この電気定数は、温度・湿度の影響を受けたり、使用する周波数によって変化する周波数分散性をもっていたりする材料が、多く、こうした電気定数を効率よく推定する測定法の開発が望まれる。

建築材料の電気定数の測定法に関して、従来から広く用いられている同軸プローブ法による測定がある。その方法によると、材料の表面に直接同軸プローブを接触させることになり、その材料の表面の粗さや平面度が問題になる。また波長に対して相対的にサンプル資料の大きさが小さくなる低い周波数帯においては、測定の際の校正は、通常短絡、開放、蒸留水の3種類を用いて行うが、開放の場合に周辺の影響が大きいことを示し、正確な測定のためには、開放端に近くに吸収体を置くなどの工夫や開放端の測定の代わりに、別の校正溶液を用いることを示した。

高速の無線通信の場合には、直接届く波に対して、多重反射・透過することにより、遅延して到達する波の影響を知ることが重要であり、それらをすべて合成した定在波的な考えで伝搬損を考えるのではなく、遅延プロファイルまでも考えた伝搬状況を知る必要がある。この場合、連続波送信ではなく、むしろパルス波による通信と考えたほうが便利である。パルス波は、その波の持つ周波数スペクトルが広いので、ある物質の反射・透過を考えたとき、一度の測定でそのパルス波のスペクトル帯域の特性が取得できることになり都合がよい。また材料中の不均質な他材料（例えば、コンクリ

一ト中の鉄筋)や内部構造(中空構造)等を検出し、それらの影響を時間差等から分離することができる。そこで、散乱体材料にパルス波を照射した場合の散乱応答の解析結果から、効率よく材料の電気定数を推定するためのアルゴリズムを考え、実際の建築材料による反射・透過特性の測定実験によってその手法の妥当性を確認した。

当初、直方体のサンプルに対する表面反射特性から、その材料の定数を推定する方法を検討した。しかしながら、材料を整形加工することが大変な場合もあり、もう少し一般的な形状に対しても測定が可能であるかも考慮した。比較的損失の大きな媒質に対しては、電磁波照射に対して表面反射の寄与に対して内部に透過して深部から再度して反射して戻ってくる寄与が小さいので、直方体に整形していなくても表面反射係数から精度が高い推定が可能であることが示された。

本測定法によれば、材料に非接触で比較的広範囲な周波数帯域の測定が可能となり、同軸プローブ法による測定の代用となる可能性を示すことができた。

(2) 壁の内部多重反射効果を効率よく組み入れるための解析手法の開発

ユビキタス移動通信を実現するためには、ビル内の部屋、間切りの影響、ビル間の道路・通路の影響、あるいは基地局と移動局それぞれのアンテナ高の影響をも考えなければならない。これらは、光線理論では透過・回折効果に相当するものであり、例えば、室外伝搬では建築物群による影の領域、室内伝搬では内壁の裏側の領域など、移動体通信の不感地帯となる可能性のある不可視領域における伝搬に対して重要である。したがって、この透過・回折効果をどの程度まで伝搬モデル内に考慮しなければいけないかを検討する必要がある。特に室内伝搬モデルでは、前述の透過波の寄与により、内壁による影領域においても不感領域とはならない場所が存在する可能性がある。このため、回折効果の寄与が大きくかつ必要不可欠な範囲、すなわち透過波がほとんど観測されない範囲を特定することが重要となる。

最初に建物群を多角形近似することによって、それらの散乱物体による電波の伝搬予測をするための効率のよい光線追跡アルゴリズムを考案した。建物外の伝搬環境においては、主たる寄与となる直接波と反射波による推定に、回折波の寄与を加え、より幅広い空間における伝搬予測を可能にした。その理論解析の結果は実測の結果と比較することにより、解析の妥当性を確認している。

室内伝搬モデルの解析においては建物壁や部屋の間仕切り壁による透過波を効率よく計算する方法を考案した。通常壁の厚みを考慮しないと、その壁による透過損の計算には誤差が大きくなる。しかし壁の厚みを考慮すると、壁内の多重反射のために計算時間が非常にかかることが予想された。そこで、こうした多重反射の影響を集約的に扱う手法を提案し、通常透過波の寄与に多重反射の影響を含めて解析することで、高速かつ正確に計算できることを確かめた。

(3) 複雑な伝搬環境における電磁波伝播のための数値解法の開発

都市部における正確な電波伝搬解析を行うためには、建物の壁や建物内の部屋の備品類の影響のほかに、居住している人体の影響も考える必要がある。こうした電磁波の人体影響については、最近社会的関心も深まっており、特にミリ波帯のような超高周波帯における影響について、解析する必要がある。

人体の内部組織・器官はそれぞれ異なる電気定数を持っている。したがって人体に侵入した電磁波の影響を正確に解析するためには、人体の各種内部器官・組織の構造とその電気定数を考慮した電磁波伝搬解析が必要となる。こうした人体情報は、MRIの画像データから起こしたデータをもとに作られるが、詳細なデータを得るために解像度を上げれば、上げるほど新たな微細組織が現れるために、その同定も困難となる。そこで同定する人体各種器官の大きさが解析結果に及ぼす影響について、各組織の分割数を変化させることによって解析結果の収束の様子を調査し、精度を保つために必要な分割数についての知見を得た。また電磁波が入射することによって、人体内に励振される電界によって局所的に導電電流が流れ、組織の抵抗成分によって温度上昇が起きることが知られている。この温度上昇は実際の人体の場合には血流によって拡散するため、血流を考慮した場合と考慮しない場合にはその温度上昇に大きな差が現れる。したがって電磁波の人体影響がどのくらいあるのか、そしてその解析結果が正しいのかを調べる実測を行うためには、こうした熱の拡散方程式を組み入れた温度上昇まで考慮した解析が必要となる。そこで人体を皮膚、脂肪、筋肉の3層で近似したモデルについて、電磁波入射による各部における電界の大きさと局所的な熱発生に伴う温度上昇を熱拡散が考慮されていない場合とされた場合と比べてどの程度変化があるかを求め、熱拡散の考慮の必要性について論じた。

(4) 三次元空間上の伝搬を効率よく解析・表示する可視化システムの開発

前述のような人体や複雑な構造物を効率よく表現し、それらによる三次元電波伝搬の様子を効率よく解析して、その結果をわかりやすく表示するための可視化システムの開発は、目に見えない電磁波の伝搬の挙動を理解するうえで、重要である。

解析する空間の建物配置、建物内のフロアプランや詳細な人体情報等の情報データベースを用いたデータ処理を行うことにより電磁波伝搬解析を実行し、画像処理・可視化プログラムの作成により、種々の角度から観察した立体画像、断面画像を高速に表示することが可能となった。

また得られた画像は立体視が可能なように処理できるような機能もつけて、電磁波伝搬状況を多面型バーチャルリアリティ設備で効率的に表示するためのレイトレーシング法の改良を行い、本学に設置されている立体視設備に実装・検証した。本成果は本研究の成果の可視化に貢献すると共に、GPUを用いた高速レイトレーシングを電波伝搬計算に用いる可能性を見出した。

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 27 件)

- ① Ryoichi Sato, Hiroshi Shirai, "Modification of Ray-launching Method For Accurate 2D Indoor Propagation Analysis," IEICE Transaction on Electronics, 査読有, Vol.E94-C, No.1, 2011, pp.55-58.
- ② Akio Kanezaki, Akimasa Hirata, Soichi Watanabe, Hiroshi Shirai, "Parameter Variation Effects on Temperature Elevation in a Steady-state, One-dimensional, Thermal Model for Millimeter Wave Exposure of One- and Three-layer Human Tissue," Physics in Medicine and Biology, 査読有, Vol.55, 2010, pp.4647-4659.
- ③ Akio Kanezaki, Akimasa Hirata, Soichi Watanabe, Hiroshi Shirai, "Effects of dielectric permittivities on skin heating due to millimeter wave exposure," BioMedical Engineering Online (オンラインジャーナル), 査読有, 2009, <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/8/1/20>.
- ④ Ryoichi Sato, Hiroshi Shirai, "Efficient Ray-launching Method For 2D Indoor Propagation Analysis," IEICE Transaction on Electronics, 査読有, Vol.E92-C, No.1, 2009, pp.40-45.

[学会発表] (計 24 件)

- ① Hiroshi Shirai, Jun Ohisa, "FDTD Cell Size Study for SAR Evaluation for Human Head Exposure to Near EM Field," 2011 Progress In Electromagnetics Research Symposium in Cambridge (PIERS 2011 in Marrakesh), 2011年3月20日, Marrakesh, Morocco.
- ② Yosuke Nara, Mitsunori Makino, "An Efficient Ray Tracing with LOD Control by Head Tracking and Human Eyesight," International Workshop on Advanced Image Technology 2011 (IWAIT2011), 2011年1月8日, Jakarta, Indonesia.
- ③ Ryoichi Sato, Hiroshi Shirai, "Electromagnetic Plane Wave Diffraction by a Wide Slit on Conducting Plane with Finite Thickness" The 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010年9月24日, 富山県富山市.
- ④ Hiroshi Shirai, Masayuki Ishikawa, "Complex Permittivity Estimation by Free Space RCS Measurement," The Third International Conference on Communications and Electronics (HUT-ICCE2010), 2010年8月12日, Nha Trang, Vietnam.
- ⑤ Ryoichi Sato, Hiroshi Shirai, "Efficient Ray-launching Analysis for Indoor Propagation Including Multiple Reflection Effect Inside Walls," 2009 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2009年9月14日, Turin, Italy.
- ⑥ Ryoichi Sato, Hiroshi Shirai, "On Multiple Scattering Between Slits in an Infinite PEC Screen," 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009年6月3日, Charleston, USA.

⑦ 池田正彦, 牧野光則, 「都市空間における高周波電磁波伝搬提示システムの没入環境下での実現」, 芸術科学会第 24 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 2008 年 10 月 22 日, 北海道札幌市.

⑧ Ryoichi Sato, Hiroshi Shirai,
“Simplified Ray-launching Analysis for Indoor Propagation Including Multiple Reflection Effect Inside Walls,” 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008 年 7 月 7 日, San Diego, USA.

[その他]
ホームページ等

<http://www.elect.chuo-u.ac.jp/shirai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 宏 (SHIRAI HIROSHI)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号 : 00196594

(2) 研究分担者

牧野 光則 (MAKINO MITSUNORI)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号 : 90238890

佐藤 亮一 (SATO RYOICHI)
新潟大学・人文社会・教育科学系・准教授
研究者番号 : 00293184