

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19日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500065

研究課題名（和文） 超高速・超広帯域モバイルネットワーク実現のための基盤研究

研究課題名（英文） FUNDAMENTAL STUDY TO REALIZE A ULTRA HIGH-SPEED AND EXTREMELY WIDE BAND MOBILE NETWORK

研究代表者

大宮 学 (OMIYA MANABU)

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：30160625

研究成果の概要（和文）：次世代の超高速・超広帯域モバイルネットワークを実現するための屋内伝搬推定及び回線設計に有効な数値計算法に関する基礎的研究を実施した。研究成果として、時間領域差分法に基づく屋内伝搬推定ツール、屋外から屋内への侵入波伝搬推定ツール及び回線設計法を開発した。さらに、大規模計算機システムを利用した数値シミュレーションから、大規模なモデルに関しても合理的な時間内で高精度な数値結果が得られることを確認した。

研究成果の概要（英文）：A fundamental study on numerical simulation methods to estimate indoor radio propagation characteristics and to design propagation channels was carried out in this research that is useful to build the next generation ultra high-speed and extremely wide band mobile network. As research results, we proposed and developed several numerical tools based on the finite difference time domain technique for estimations of indoor and outdoor-to-indoor propagation characteristics and design methods of propagation channel. Furthermore, it is confirmed that numerical simulations using the high-performance computing systems always offer the highly accurate results in the reasonable elapsed time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	0	0	0
2013年度	0	0	0
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，計算機システム・ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク，センサネットワーク，移動体通信，屋内電波伝搬，広帯域無線 LAN，MIMO-OFDM，FDTD 法，RSSI

1. 研究開始当初の背景

ユビキタスネットワーク社会においては場所、時間および利用方法に依存することなく、必要な情報にアクセスし、利用できなければならない。その基盤技術はモバイルネットワーク環境である。例えば、自動車または

電車などの移動体や、ビル内及び地下街などにおいて携帯端末、無線 LAN 及び地上デジタル放送(ワンセグ放送)などを利用する機会が増えている。特に、ワンセグサービスでは一般視聴に加え、防災目的に大地震及び自然災害に備えたモバイル端末に対する緊急時

の情報提供手段としての利用が考えられている。

これらサービスでは変調方式として、移動体通信では MIMO-OFDM 方式、地上デジタル放送では OFDM 方式が同一チャネル干渉やフェージングに対してロバストで優れた伝送方式であることから実用化あるいは現在鋭意検討されている。しかし、固定受信の場合と異なり、モバイル受信では受信環境の時間的な変化を考慮しなければならない。モバイルネットワークでは、送信帯域にわたって一定の受信品質を確保する必要がある。さまざまな利用環境に対して最適な基地局やアクセスポイントの配置及び送信電力などのパラメータをモバイルネットワーク環境にとって最適になるように設定する必要がある。

上記の議論は空間内での電波伝搬問題を解明することに対応し、受信環境と受信劣化要因に関する現象を的確に捉えられなければならない。これまで行われている検討では、レイトレーシング法に基づく解析、フリスの伝搬公式の拡張やアンテナ伝達関数を伝搬公式に組込む試みが行われている。これら推定法は単純なモデルを用いた原理の確認が目的である。したがって、実環境に適用するには誤差分析が必須であり、その困難さから必ずしも実用上満足できるものではない。また、屋内モバイル環境での解析では、狭い空間内に什器および人体などの散乱体・遮蔽物が多数配置されており、前述の簡易解析手法では取り扱いが困難であり、数値解析における計算負荷の急激な増加により解析そのものが非現実的であることが明らかになっている。一方、電波伝搬の実験測定では、場所・時間・費用及び労力の点で限定されたものにならざるを得ず、方式設計に必要な情報を十分に得られていない。

2. 研究の目的

本研究は、次世代の超高速・超広帯域モバイルネットワークを実現するための屋内電波伝搬推定及び回線設計のための手法に関する基盤研究であり、緊急に対応すべき下記技術課題に取り組む。

(1) 屋内伝搬等比較的限定された空間での精度の高い電波伝搬モデル及び伝搬特性推定法を明らかにすること。

(2) レイトレーシング法などの既存の電波伝搬推定法に代わる数値シミュレーション法を開発し、遅延プロファイルや遅延スペクトルなど通信方式設計に必要な基本特性を推定できる手法を開発する。

本研究においては、上記の課題を解決し、大規模な屋内でのモバイルネットワーク環境を想定した高精度な電波伝搬推定法の開発を目的として大規模電磁界解析システムを開発を行う。大規模かつ複雑な環境である

屋内モバイルネットワーク環境下での電波伝搬推定及び受信性能評価を高精度に解析評価するために、研究代表者が開発を行っている時間領域差分 (FDTD) 法を適用する。自由空間、周囲環境、人体及び無線デバイスを含む全電磁界空間を一度に取り扱い、高精度な電波伝搬推定と受信特性評価を可能にする解析手法を提案する。これにより、丸ごとシミュレーションが実用的なレベルに到達していることを示す。

3. 研究の方法

電磁界解析における FDTD 法の有効性は、実環境を忠実にモデル化することで、実用的かつ高精度な評価と推定を実現できることである。しかし、3次元空間をセルと呼ばれる微小な直方体で離散化することから、大容量な主記憶容量を必要とする。さらに、膨大な数の繰り返し計算処理には大規模分散メモリ型並列処理が必須である。本研究においては、解析プラットフォームとしてスーパーコンピュータを使用し、大規模・大容量・高速処理を備えた高精度な電波伝搬推定法を実現する。これにより、技術的及びコスト的に多くの問題を抱えた実験的検討に置き換わる有効な方法を提供する。

解析結果の妥当性を検証するために、市販の高速無線 LAN システムを利用した実験を行う。さらに、学会論文誌で報告されている屋内電波伝搬に関する実験・測定結果と、本研究で開発される電波伝搬推定法及び評価法を適用した結果を比較することで、研究成果の妥当性と有効性を検証する。一方、高精度解析には精度の高い数値モデルの開発が必須である。そのための、モデルファイルの仕様決定や CAD ファイルから数値データを生成するためのコンバータツール、家具や什器などの作成やデータベース化を行うことで、再利用性の向上と作業時間の短縮を図る。

本研究で利用するスーパーコンピュータ等の計算機システム及びコンパイラや可視化システムなどの必要なソフトウェア等が既存設備として、研究代表者が所属する情報基盤センターでサービスされ、それら設備の利用法および活用法を熟知している。

4. 研究成果

(1) 時間領域差分 (FDTD) 法に基づく電波伝搬特性推定のための、大規模かつ高速な解析を実現するソフトウェアの開発を行った。分散メモリ型並列処理と大容量主記憶容量を利用できるようにするために、解析ソフトウェアには、解析対象を任意の座標軸方向に領域分割して並列計算するための手法とパラメータ設定方法、軸方向に長い解析モデルの高精度解析を実現するための高性能 CPML 吸収境界条件の実装を行った。また、波源とし

て、建物侵入波及び無線送信用アンテナを考慮することを可能にした。これら開発によって、ほとんどの無線通信環境を高精度に取り扱うことができる数値シミュレーションに対応した解析ソフトウェアを完成させた。その構成を図1に示す。解析ソフトウェアは多くの電磁界問題に適用可能な汎用ソフトウェアであり、その適応事例の提示や有効利用法などを引き続き提示していく。

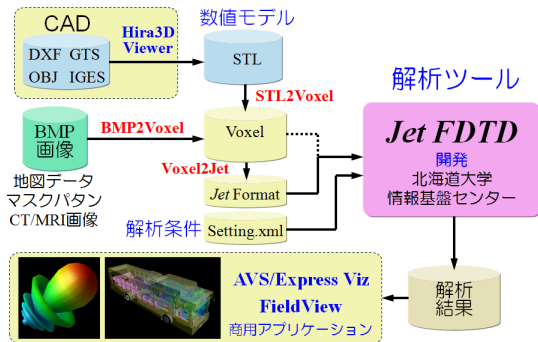


図1. 解析ソフトウェアの構成

(2) 3種類の高精度数値解析モデルの開発を行い、数値解析と実験結果との比較検討に適用した。開発した解析モデルは、①本学情報科学研究科棟9階フロア、②本学情報基盤センター北館2階から4階、③市街地モデルである。前述の解析モデル①及び②は、いずれも2.4GHz帯センサネットワーク及び無線LANシステムに適用するため空間分解能10mmで製作した。特に、目視することができないが、電波伝搬に影響があると考えられる床下、天井裏及び壁面内部の構造と建築材料のモデリングを忠実に行った。また、前述の解析モデル③は空間分解能50mmとした。

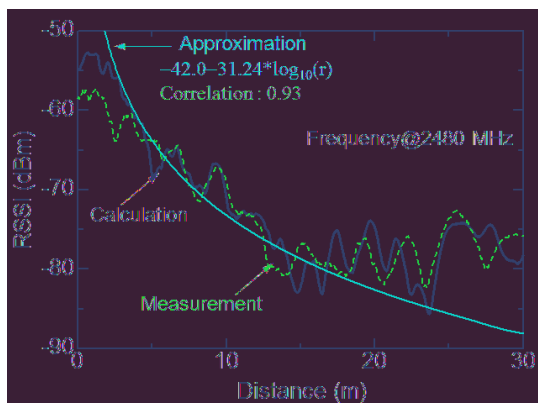


図2. センサネットワークの伝搬損特性

上記の解析モデルに関して数値シミュレーションを行い、その結果を実験結果と比較することで、開発した解析ソフトウェアと解析モデルの有効性を検証した。解析モデル①を利用したセンサネットワークの伝搬損特

性を図2に示す。同図から、数値解析結果は実験結果をよく推定していることが分かる。また、解析モデル③を利用した市街地伝搬特性推定では、この分野における一般的な手法の一つであるレイトレーシング法では困難であったUHF帯での解析が、本提案手法を利用することで可能になることを示した。

(3) 電波伝搬特性推定用ソフトウェアの有効性を確認するため、IEEE802.11n規格に基づく市販の無線LANシステムを利用した測定結果と数値シミュレーション結果の比較検討を行った。2.4GHz帯における屋内伝搬特性の測定を次の3種類の環境で行った。すなわち、①大規模オフィス環境(本学情報科学研究科棟9階と2階)、②一般的なオフィス環境(本学情報基盤センター北館2階から4階)、③2階建て戸建住宅である。

はじめに、測定手法及び特性評価方法について提案を行った。図3から図5に大規模オフィス環境における数値解析結果及び実験結果を示す。図3に示す受信電界強度分布の数値解析結果は無線LANアクセスポイントの無線到達範囲や構造物による反射・回折などの影響を明確に示している。また、図4から実験結果と数値解析結果がよく一致していることが分かる。図5に受信電界強度値とデータスループットの実験により得られた関係を示す。測定に利用した市販の無線LANシステムの伝送特性は受信電界強度とスループットが線形な関係にあることを示している。この関係を近似する直線の式は上記3種類の屋内環境すべてに対して同一であることを示した。これは、市販の無線LANシステムではデザインおよびコストの観点から機器寸法やアンテナ素子数などに物理的な制約が課せられており、期待されるMIMO-OFDM方式の特性が十分実現されていないためであることを明らかにした。これら研究成果に基づいて、計算機シミュレーションにより屋内の任意の場所での電界強度値を推定することで、近似式を利用したスループット値の推定法を提案した。

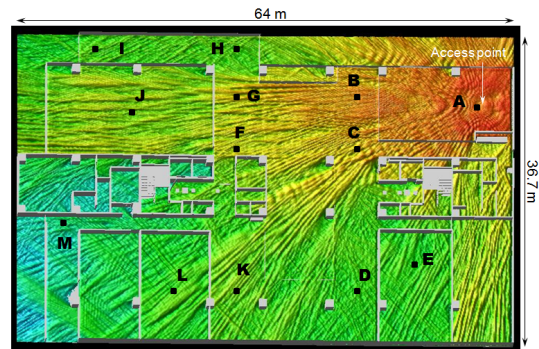


図3. 大規模オフィス環境における無線LANシステムの受信電界強度分布のシミュレーション結果。

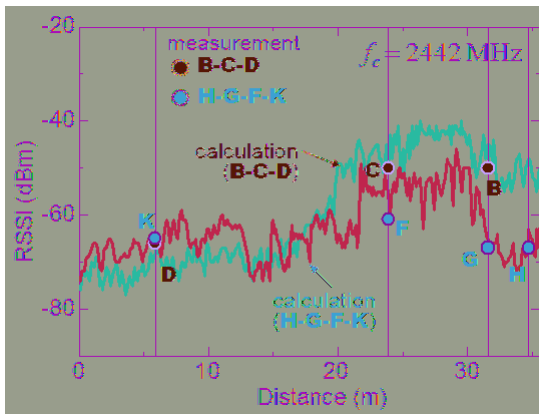


図4 受信電界強度値に関する実験結果と数値解析結果の比較.

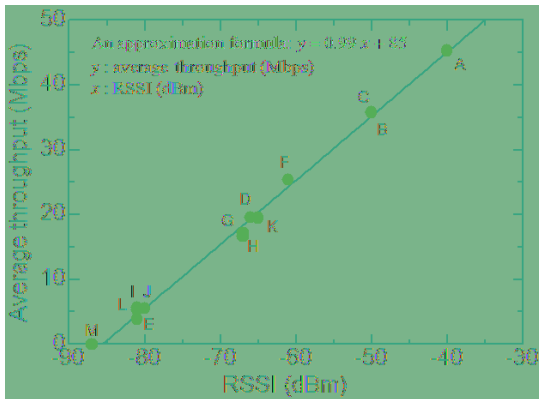


図5 受信電界強度値とデータスループットの関係(実験結果, 周波数 2442MHz).

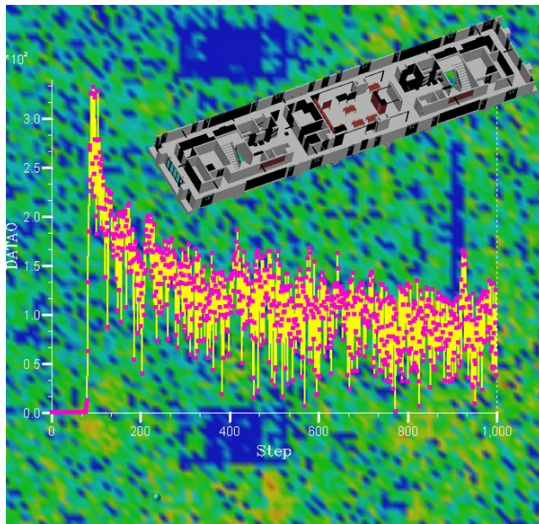


図6 遅延プロファイル推定法.

(4) 電波伝搬特性推定ソフトウェアについて、MIMO-OFDM方式の特性評価に有効な遅延プロファイル及び遅延スプレッドを定量的に推定する計算アルゴリズムを提案し、その実装を行った。提案手法は、時間領域解析データと可視化システムを組み合わせ、観測面内の任意の点を指定することで遅延プロ

ファイルを描画し、同時に遅延時間を決定する。その手法を大規模オフィス環境及び2階建て戸建住宅に適用し、シミュレーション結果の妥当性について議論した。

図6は、背景を観測点周辺における受信電界強度の瞬時分布を示し、図面中央に観測点における受信電界強度値の時間変化をグラフ表示にした可視化手法である。解析結果では、グラフ表示による伝搬遅延プロファイルとコンタ図による到来角度プロファイルを同時に提供することで、廊下に沿った見通し内環境では指数関数モデルに準じた伝搬特性となることを明らかにした。

(5) これまでは、数値シミュレーションにおいて理論ピーク性能 5TFlops, 主記憶容量 5.1TB を有するスーパーコンピュータを利用してきた。2011年11月から、理論ピーク性能 172TFlops, 総主記憶容量 17TB の大型計算機システムが利用可能になったことから、本研究で開発を行った解析ソフトウェアの移植とチューニングを行った。その結果、4倍以上の高速化を実現するとともに、より大規模な解析対象に対して最大 20 時間程度で解析結果が得られることを確認した。

このシミュレータを利用して戸建住宅及び一般的なオフィス環境において、IEEE 802.11n規格に準拠した市販の2.4/5GHz帯デュアルバンド無線LANシステムを利用した屋内伝搬特性の実験及び数値解析を行った。数値シミュレーションでは、空間分解能 5mm として、構造物及び什器等の伝搬環境の数値モデル化を行った。これら数値モデルを利用して得られた電界強度分布(RSSI)に関する数値解析結果と実験結果を比較検討し、周波数 2.4GHz 帯と同様に 5GHz 帯においても両者がよく一致することを確認した。

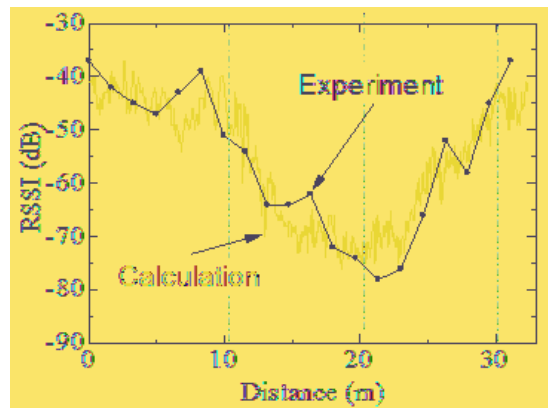
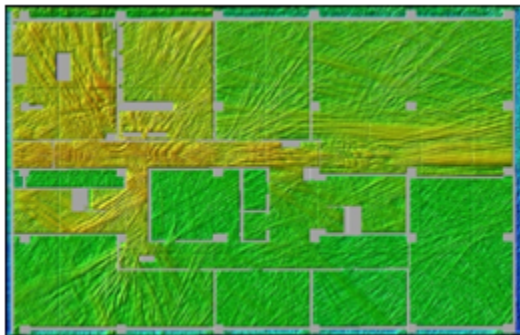


図7 伝搬損失特性の比較 (オフィス環境, 周波数 5200MHz)

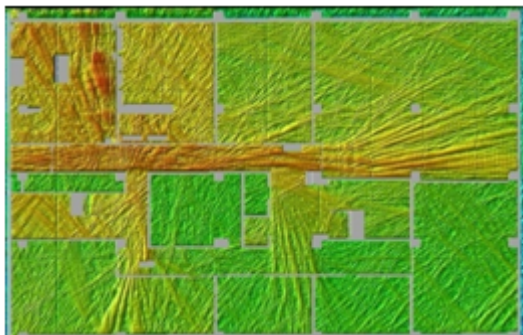
図7は2000周期後の伝搬損失特性を測定結果と比較して示している。ただし、オフィスビル内の周回コースに沿って時計回りに移動しながら測定を行った。測定はおおよそ 2m

間隔で行い、それを黒丸で示している。計算結果は、測定結果の変化を良く推定していると考えられる。ただし、局所的な RSSI の変化の大きさや位置が異なっているのは、室内に設置された什器をすべて考慮していないためと考えられる。精度を向上するためには、室内に設置された什器等を考慮したシミュレーションを行うことが必要であると考えている。

図 8 に、床面から高さ 820mm の平面内における電界強度分布の可視化結果を示す。無線 LAN アクセスポイントが設置されている廊下に沿って直線的に伝搬しているようすが分かる。周波数 5200MHz においては、見通し外環境では見通し内環境に比較して電界強度値が極端に小さいことが分かる。これは、高周波数になるほど直進性が増すという定性的な電磁波の性質と一致する。アクセスポイントに隣接している研究室は什器等をモデル化しているため、複雑な電界強度分布になっている。一方、それ以外の研究室については内部の什器をモデル化していないことから、壁面で透過や反射を繰り返し直線的に伝搬している。



(a) 周波数 5200MHz



(b) 周波数 2442MHz

図 8 受信電界強度分布。
建物断面の面積は 32.33m×19.95m

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 13 件)

- ① Syahrial, H. Takeno, Y. Nakatsu, T. Hasegawa, and M. Omiya, Indoor

Propagation Characteristics at 2.4 GHz for IEEE802.11n Wireless Local Area Network, TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, 査読有, 2011, pp. 1361-1366.

- ② Y. Nakatsu, H. Takeno, T. Hasegawa, and M. Omiya, Comparison of Indoor Propagation Characteristics at 2.4 and 5 GHz for IEEE802.11n Wireless Local Area Network, Proceedings of 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2011, pp. 1-4.
- ③ H. Takeno, Y. Nakatsu, T. Hasegawa, and M. Omiya, Throughput Measurements and Numerical Prediction Methods for IEEE802.11n Wireless LAN Installations at 2.4 GHz in a Residential Two-Story House, Proceedings of 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2011, pp. 1-4.
- ④ 長谷川公嗣, 武野紘和, 中津悠斗, 大宮学, IEEE802.11n 無線 LAN による RSSI と平均 throughput の関係, 情報処理学会論文誌, 査読有, vol. 52, 2011 年, pp. 1-12.
- ⑤ 中津悠斗, 武野紘和, 長谷川公嗣, 大宮学, 戸建住宅における IEEE802.11n 無線 LAN システムの 2.4/5GHz 屋内伝搬特性の比較検討, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 35, 2011, pp. 17-20.
- ⑥ 武野紘和, 中津悠斗, 長谷川公嗣, 大宮学, 戸建住宅における 2.4GHz 帯 IEEE802.11n 無線 LAN システムの伝搬特性と数値評価, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 35, 2011, pp. 13-16.
- ⑦ 長谷川公嗣, 武野紘和, 中津悠斗, 大宮学, FDTD 法を用いた複数形状の人体モデルによる伝搬損失特性の比較, 日本シミュレーション学会論文誌, 査読有, vol. 3, 2011 年, pp. 24-35.
- ⑧ H. Takeno, Y. Nakatsu, T. Hasegawa, and M. Omiya, Radio Wave Propagations through Floors in the Adjacent of a High-Speed Indoor Wireless Local Area Network Office Environment, Proceedings of 2010 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2010, pp. 543-546.
- ⑨ Y. Nakatsu, H. Takeno, T. Hasegawa, and M. Omiya, Considerations on Indoor Propagation Concerning to Wideband Wireless LAN System, Proceedings of 2010 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2010, pp. 539-542.
- ⑩ 中津悠斗, 武野紘和, 長谷川公嗣, 大宮学, 無線 LAN の屋内環境での広帯域電波伝搬推定, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 34, 2010, pp. 35-38.
- ⑪ 武野紘和, 中津悠斗, 長谷川公嗣, 大宮学, 無線 LAN システムの複数階にお

- る伝搬特性, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 34, 2010, pp. 31-34.
- ⑫ 長谷川公嗣, 庄司知史, 大宮 学, センサネットワークにおけるセンサノード位置推定のための計算機シミュレーション, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 33, 2009, pp. 63-66.
- ⑬ 庄司知史, 長谷川公嗣, 大宮 学, 村本充, 市街地における伝搬損失特性の数値解析, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 33, 2009, pp. 59-62.

〔学会発表〕(計 13 件)

- ① 中津悠斗, 戸建住宅におけるデュアルバンド無線 LAN システムの屋内伝搬特性, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2011 年 10 月 22 日, 公立ほこだて未来大学(函館市).
- ② 武野紘和, 戸建住宅内伝搬遅延プロファイルの推定と評価, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2011 年 10 月 22 日, 公立ほこだて未来大学(函館市).
- ③ 武野紘和, 戸建住宅における伝搬遅延プロファイルの数値解析, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011 年 9 月 16 日, 北海道大学(札幌市).
- ④ 中津悠斗, 戸建住宅における無線 LAN システムの屋内伝搬損失特性, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011 年 9 月 16 日, 北海道大学(札幌市).
- ⑤ 中津悠斗, 5GHz 帯無線 LAN システムの屋内電波伝搬特性, 2011 年電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 14 日, 東京都市大学(東京都).
- ⑥ 武野紘和, 無線 LAN システムの戸建住宅内伝搬, 2011 年電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 14 日, 東京都市大学(東京都).
- ⑦ 中津悠斗, 大規模オフィス環境における無線 LAN システムの伝搬特性, 平成 22 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2010 年 10 月 24 日, 北海学園大学(札幌市).
- ⑧ 武野紘和, 無線 LAN システムの複数フロア伝搬解析, 平成 22 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2010 年 10 月 24 日, 北海学園大学(札幌市).
- ⑨ 武野紘和, IEEE802.11n 無線 LAN システムの複数フロア伝搬とスループット, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010 年 9 月 16 日, 大阪府立大学(堺市).
- ⑩ 中津悠斗, 広帯域無線 LAN システムの屋内伝搬特性, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010 年 9 月 16 日, 大阪府立大学(堺市).

- ⑪ 長谷川公嗣, センサネットワーク位置推定のための屋内伝搬シミュレーション, 平成 21 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2009 年 10 月 17 日, 北見工業大学(北見市).
- ⑫ 庄司知史, 市街地における MHz 帯無線伝搬損失特性の FDTD 解析, 2009 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2009 年 9 月 15 日, 新潟大学(新潟市).
- ⑬ 長谷川公嗣, センサネットワークにおける RSSI の数値解析, 2009 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2009 年 9 月 15 日, 新潟大学(新潟市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://fox49.hucc.hokudai.ac.jp/~omiya/records/fund.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大宮 学 (OMIYA MANABU)

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号: 30160625

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者