

都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析に関する研究

Performance Analysis for Large-Scale Mobile Wireless Networks in Urban Environments



東野 輝夫 (Teruo HIGASHINO, Ph. D.)
大阪大学大学院情報科学研究科教授
(Graduate School of Information Science and Technology,
Professor, Osaka University)
IEEE ACM 情報処理学会 電子情報通信学会 ソフトウェア科学会 会員
受賞: 電気通信普及財団賞 テレコムシステム技術賞(2012) (2005)
大阪大学 功績賞 (研究部門) (2011) 情報処理学会 創立 50 周年記念論文賞受賞 (2010) 情報処理学会 フェロー (2002) IEEE Senior Member (1998) など
著書: 水野 忠則 相田 仁 東野 輝夫 太田 剛 西垣 正勝 共訳:
「コンピュータネットワーク 第4版」日経 BP 社 p.848 (Dec. 2003)
研究専門分野: 情報ネットワーク モバイル・コンピューティング
分散システム

あらまし 無線 LAN や Bluetooth、ZigBee などの無線通信技術の発展に伴い、携帯無線端末同士で通信を行うモバイルワイヤレスネットワークの研究が活発に進められている。このようなネットワークでは、移動端末のモビリティがネットワークの性能に大きな影響を与えることが知られており、都市環境での人や車が保持する端末間での情報伝達を考えた場合、人や車のモビリティを考慮したシステム設計が必須となっている。本稿では、(a)スマートフォンや PDA などの携帯端末を持つ多数の歩行者が近隣のショップ情報を取得する、(b)都市を走行する車両と路側の基地局群が協調しながら地域情報や迂回経路情報を伝達する、(c)地震などの災害で既存のネットワークインフラが遮断された際に被災地域内の人や車の携帯端末間の無線通信機能を用いて時々刻々と変化する災害地情報や緊急情報を被災地内の住民に伝達する、といった都市環境での様々な情報伝達システムを設計する場合に必要なネットワークシミュレーション技術と、携帯移動端末の無線通信機能と GPS 機能のみを用いた災害現場の地図生成手法に関する筆者らの研究成果について概説する。

1. 序論

近未来のユビキタス社会においては、次世代携帯電話網を含め、アドホック・ネットワーク、車々間通信、広帯域無線通信ネットワークが互いに連携して柔軟な相互接続性を実現し、それらに接続された多数の携帯端末やセンサにより地域適応的かつ高信頼な情報伝達が可能な社会へ移行していくと考えられる。このような社会を実現するには、数万ノード規模で人や車が移動する都市環境下でユビキタス通信機能を利用したネットワークサービスを実現した場合に、人や車の行動がそれらのネットワークサービスの性能にどのように影響するかをできるだけ正確に予測・評価し、その結果に基づき情報共有方式を立案できることが望ましい。また、総務省の「安心・安全な社会の実現に向けた情報通信技術のあり方に関する調査研究会」報告書においても、都市部での災害時に避難者の携帯電話や車両から得られる移動情報をリアルタイムに可視化して防災センターで表示する技術や、その情報を元に避難指示情報をどの地域の間や車両を介して伝搬させるのが最も被害を減らすことに有用かを評価するシステムの開発などが早急実現されるべき技術として提言されている。このように、都市スケールで人や車などの行動パターンをモデル化し、それらの行動モデルに基づき安心・安全な社会を実現するための情報共有方式を開発することに対する社会的期待は極めて大きい。

また、多数の人々が利用する交通システムや高層ビル群から構成される都市は、大量のエネルギーやCO₂を排出している。エコフレンドリーな次世代社会を実現するには、環境負荷が少なく、安心して快適に生活できる都市基盤の実現（都市のスマート化）が不可欠である。現在、日本のみならず北米、欧州、中国など、都市環境問題を抱える世界の先進・新興各国を中心に、スマートシティやスマートグリッド構築に向けた環境型プロジェクトが立ち上がり、環境負荷が低く持続可能な社会の実現に向けた機運が高まっている。国の第4期科学技術基本計画においても、クラウドコンピュ

都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析に関する研究

Performance Analysis for Large-Scale Mobile Wireless Networks in Urban Environments

ーティング等の高度化による環境負荷の少ない低炭素社会の実現や、サイバーフィジカルシステムなどを用いた社会システム全体の効率化などのソリューション指向型研究開発の推進が謳われている。

このような都市環境においては、都市街区に設置された大気センサや人感センサ、路側に設置された車両検知センサ、モノや建造物に取り付けられた RFID タグ、人が保持する携帯情報端末や車載通信機器に搭載された GPS、加速度センサなど、あらゆるタイプのモノや移動体がセンサを備え、路側機や屋内外の無線基地局、3G/4G 網などとシームレスに連携することが想定される。それらの通信インフラを活用して、センサからグローバルに収集されたデータはデータベースに蓄積・共有されるとともに、その膨大なデータ分析結果は人や車の移動・交通流制御、インフラ共有や物流効率化などのためにフィードバックされ、環境改善や省エネルギー化に寄与すると考えられる。ICT によるそのようなグリーンセンシングシステムを実現するには、(i) 3G や 4G/WiMAX、無線 LAN などの大規模な無線ネットワークインフラストラクチャを活用したセンシングデータの集積技術や、(ii) センサやスマートフォンなどを用いた人・車・モノおよび環境のセンシング技術、(iii) クラウドなどを活用したセンシングデータの蓄積と知識化技術、ならびに、(iv) 収集したデータに基づく人・車・モノ・環境の制御技術の 4 つを密に連携させ、包括的なシステム設計・評価を行うシミュレーション技術を開発し、様々なテストベッドを構築できることが望ましい。しかし、基本的に独立システムである無線ネットワーク、クラウドデータベース、センサそれぞれのスループットやキャパシティ、予想されるセンシングデータの量およびコンテンツ、移動体の行動パターンなどを考慮し、一貫性のあるシステム設計・評価を行うことは容易でない。また、グリーンセンシングシステムが社会基盤システムとして運用されるためには、多岐にわたる環境設定で多数の事前シミュレーションを行い、費用対効果の検証、耐

規模性(スケーラビリティ)や堅牢性、環境改善効果、ユーザ参加に対するベネフィット、安全性(セキュリティホール)等、その有用性・安全性ならびに現実性をシミュレーション環境等で検証することが大前提となる。

本稿では、このような都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析に関する研究について、筆者らの研究グループで実施した研究の概要について報告する。また、WiFi 通信の履歴(接続エントリー)情報と無線端末の GPS 情報のみを用いた災害現場の地図をリアルタイムに自動生成する手法についても報告する。

2. シミュレーション関連研究

これまでに国内外の研究機関で無線ネットワークを対象としたシミュレーション関連システムが多数開発されている。ns-2 wireless extension や ns-3⁽¹⁾ などパブリックドメインのシミュレータの多くは、IEEE802.11 などの無線ネットワークのシミュレーションモデルを備えるものの、都市型の無線 WAN、無線 LAN、センシングデータ送信に必要な ZigBee や Bluetooth などの無線 PAN シミュレーション機能が十分でないものも多い。一方、商用ソフトウェアでは GSM/UMTS、CDMA、LTE や WiMAX などの広域セルラー網、IEEE802.16 メッシュネットワークなどの無線 MAN、IEEE802.11 をはじめとする無線 LAN 系をそれぞれ対象とした特定ソフトウェアが数多く存在する。また、ZigBee などの無線 PAN 系などを含め多くのネットワークモジュールを実装し、汎用シミュレータの実現を目指している QualNet⁽²⁾、IEEE802.11p モジュールや電波伝搬高速計算モジュールなどをサポートし都市環境や車両通信シミュレーションを強化しつつある Scenargie⁽³⁾ など、無線ネットワークシミュレーションを中心として都市環境を抽象化した環境を再現することを目指しているものも幾つか存在する。しかし、それらはあくまで無線ネットワークの性能評

都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析に関する研究

Performance Analysis for Large-Scale Mobile Wireless Networks in Urban Environments

価を中心としており、人や車などのエネルギー消費媒体を含む都市環境の再現とセンシングのための枠組みは提供されていない。

一方、都市シミュレータの多くは、例えば都市のヒートアイランド現象のシミュレーションなど、主として都市計画（環境アセスメントや防災、危機管理など）における特定用途向けに開発されてきた。また車両を中心とした都市交通ネットワークのシミュレーションシステムは各国で研究開発が進められており、米フロリダ大の CORSIM⁽⁴⁾、米 CMU の GrooveNet⁽⁵⁾ などが代表的である。これらの都市計画シミュレータの多くは地理情報システム（GIS）と連携して地形や道路ネットワークを再現している。さらに、近年米国の UrbanSim⁽⁶⁾ やカナダの ILUTE⁽⁷⁾ など、スマートシティを対象としたシミュレーションが開発されつつある。また IBM により開発された都市開発シミュレーションゲームである CityOne⁽⁸⁾ は交通渋滞や水不足、エネルギー問題などをはじめとする多くの課題を含むシナリオを提供し、経済や環境などを考慮してそれらの課

題を解決するためのシミュレーションゲーム環境を提供している。これらのシミュレータは、都市プランナーが環境改善やエコ化のために行う意思決定プロセスの学習あるいは事前予行の支援等を主目的としており、センシングやデータの伝送や処理を行う ICT システムについてはそのほとんどが抽象化されている。

本研究では、無線ネットワークを対象としたシミュレーション技術をベースに、都市環境シミュレーション技術などを連携させることで、都市のスマート化に資する新しいタイプのシミュレーション技術を構築しようとしている。

3. シミュレーション技術の研究概要

本研究は、筆者らの研究グループで開発した無線ネットワークシミュレータ *MobiREAL*⁽⁹⁾ をベースにしている。*MobiREAL* は、都市部における歩行者の現実的な行動を再現可能なネットワークシミュレータであり、**図 1** に示すとおり、人や車などのノード移動をシミュレーションする動作シミュレーション部と無線ネ

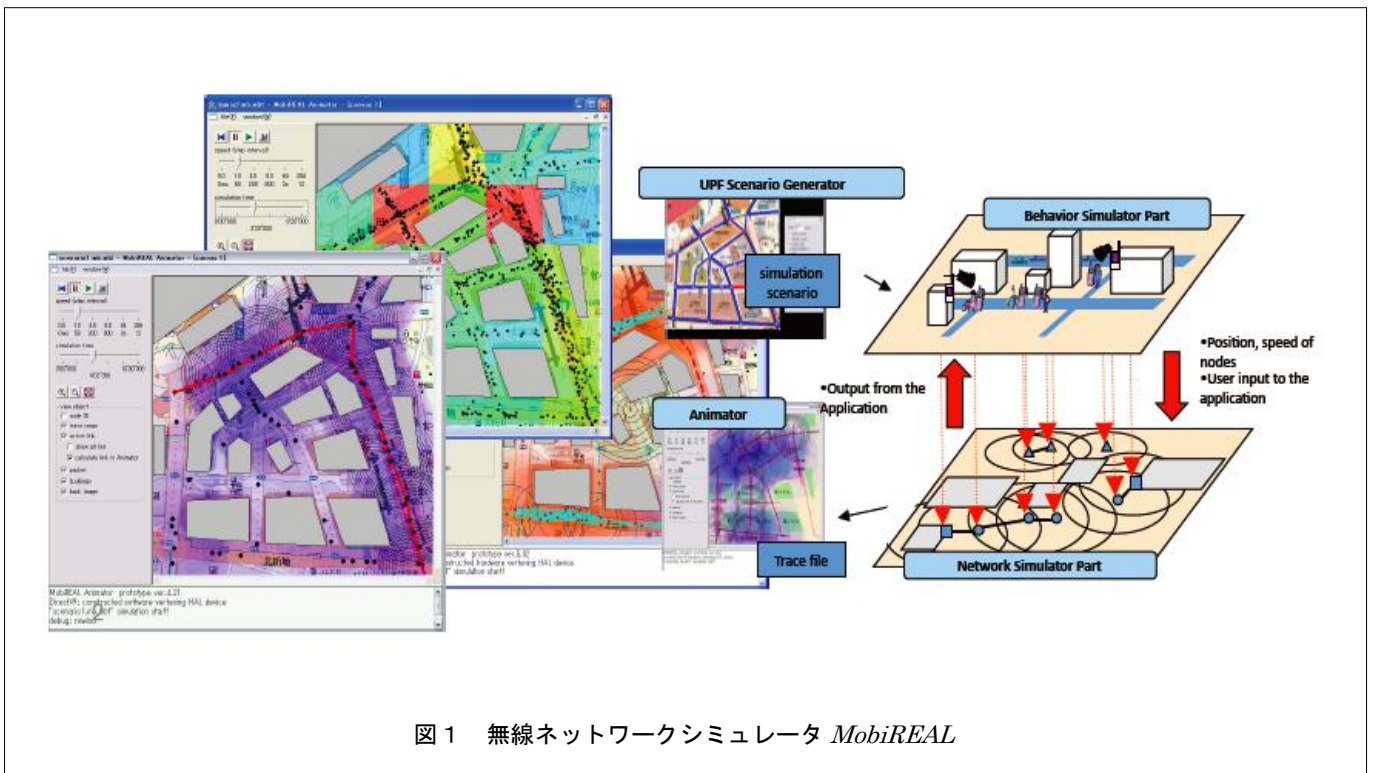


図 1 無線ネットワークシミュレータ *MobiREAL*

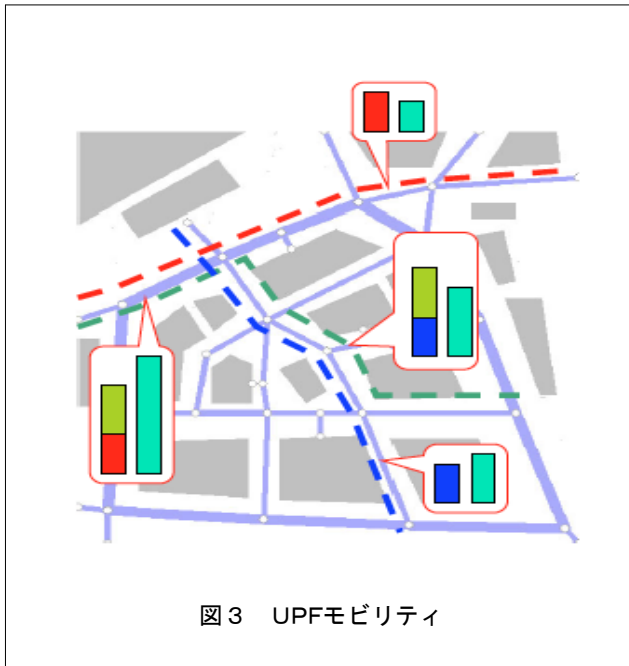


ネットワークのシミュレーションを行うネットワークシミュレーション部の2つが相互に連携しながらシミュレーションを行う点が特徴である。一般に無線ネットワークシミュレータの多くは、図2 (a)のようにノードがランダムに移動する、あるいは、図2 (b)のようにノードは道路に沿って移動するが移動方向は各交差点でランダムに選択されることを前提にネットワークシミュレーションが行われることが多い⁽¹⁰⁾。いずれの場合もノード密度やノード間の距離が場所に依存せずほぼ一定になるため、例えば、ベースステーションからの通信性能やノード間のマルチホップ通信の性能が場所に依存せずほぼ一定になってしまう。一方、現実の都市環境では、図2 (c)のようにノード密度が場所によって一定でないため、通信性能も場所によって異なる。また、人や車の通行が極端に少ない場合は、ベースステーションからの通信やノード間のマルチホップ通信がうまく働かないことも考えられる。そのような場合は、中断や切断が多発したり、大きな伝送遅延が生じることも多いため、信頼性のあるデータ転送を実現するためには、遅延耐性ネットワーク (Delay Tolerant Network (DTN)) ベースの通信方式⁽¹¹⁾、例えば、通

信相手がいない場合は中継ノードがデータを一時保持し、通信相手が見つかった場合に転送する (Store-and-Forward 方式) などの工夫が必要であるが、図2 (a)や図2 (b)のようなランダムベースのモビリティでは、このような遅延耐性ネットワークベースの通信方式の性能評価が正しく行われたい。このため、筆者らの研究グループで開発した無線ネットワークシミュレータ *MobiREAL* では、UPF (Urban Pedestrian Flow) モビリティと呼ばれる歩行者モビリティを考案している⁽¹²⁾。UPF モビリティでは、図3のように駅前から各建物への経路など、歩行者の出発点と到着点の候補の組を選び (図3の大阪駅前の例の場合、200パターン程度を抽出)、経路上の複数の地点で歩行者数を計測する。それらの歩行者数は、図3の左側の計測地点や図の中心部の計測地点での歩行者数は、2つの経路を歩く人数の和にそれぞれ相当する。また、図3の上側や下側の計測地点での歩行者数は、当該経路を歩く人数にそれぞれ相当する。それらの関係を線形計画問題として形式化し、各経路を歩く人数の推定値を計算し、それらを重ね合わせることで、現実に近い歩行者モビリティを生成している (図3の例の場合、実

都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析に関する研究

Performance Analysis for Large-Scale Mobile Wireless Networks in Urban Environments



際の歩行者の計測数との誤差は 10%以内であった)。類似の手法で、車両モビリティ⁽¹³⁾も合成することで、都市環境における人や車の現実的なモビリティを合成し、実環境に近い無線ネットワークのシミュレーション環境を構築している。

なお *MobiREAL* のソフトウェアは、ホームページ (<http://www.mobireal.net/>) 上で公開しており、これまでに国内外 42 カ国 400 以上の研究機関で試用されている。また、「移動ノードシミュレータおよびこれを実装するプログラム」(特許第 4534047 号) として特許が成立している。

4. シミュレーション技術の拡張と将来展望

筆者らの研究グループでは、現在、都市環境を構成する移動体やビルディングとそれらのセンシングデータ、無線通信システムならびにセンシングデータを解析するクラウドデータベースを精密にモデル化し、それらとの連携シミュレーションやシナリオ生成支援機能、可視統計化機能などを備えた都市シミュレーションシステム *HumanS*⁽¹⁴⁾を開発し、実際の地下街や都市空間などを対象に、人や車の密度や時間的な変化が

当該区域のエネルギーや CO₂ 排出量にどのような影響を与えるかを推定したり、大規模災害時の適応的避難誘導システムの設計評価などを行っている⁽¹⁵⁾。*HumanS* では、オフィスビルの照明や空調のエネルギー消費量をモデル化し、人のモビリティや環境センサの性能・設置率などの条件によって、当該区域のエネルギーや CO₂ 排出量がどのように変化するかを評価できるようになっている。都市における人、センサ、通信、物理空間(地理環境)、アクチュエータを含む制御システム(フィードバックシステム)を実データとリンクさせながら、なるべく包括的かつ高精度に人や車のモビリティを含む都市環境を再現できるシミュレーションシステムの実現を目指した研究を行っている。

5. 移動無線端末を用いた災害現場の地図生成

地震などの大規模災害における救助活動では、災害現場の環境を早急に正確に把握することが重要となる。なかでも災害現場の地理情報は傷病者の救助、搬送を行う上で必要不可欠である。災害現場の地理情報を得るには既存の地図を利用する方法が考えられるが、私有地など詳細な地図が存在しない場所や、災害により当該区域の地図に大きな変化が生じている場合もある。

そこで、本研究では WiFi 通信の履歴(接続エントリー)情報と無線端末の GPS 情報のみを用いたリアルタイム地図生成手法を考案した^{(16),(17)}。提案手法では、無線端末のアドホック通信機能と GPS 測位機能のみを仮定し、複数の端末(15~20 端末程度)が 5~6 分程度対象領域(数百メートル四方)を移動する過程で収集された端末の位置情報や通信履歴を用いて対象領域の地図をリアルタイムに自動生成する。

提案手法では、図 4 のようにサーバで収集されたすべての無線端末の移動履歴と無線通信の接続エントリーから障害物の有無を推定し、両者を統合することで対象領域の地図を自動生成する。無線端末を所持して移動できる範囲は建物などの障害物がないものと判断し、無線端末群の移動履歴から得られる端末群の推定位置

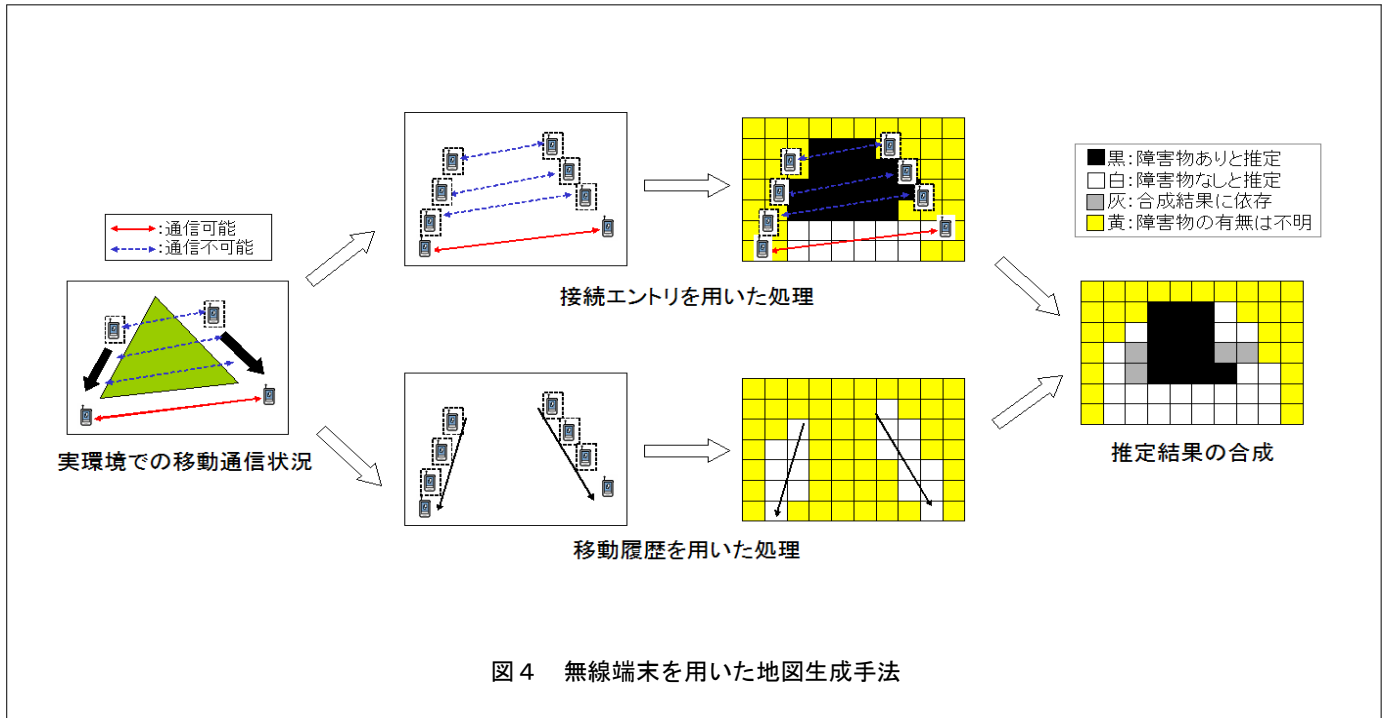


図4 無線端末を用いた地図生成手法

には障害物が存在しないと判断する。ただし、障害物が存在しない領域すべてを端末群が移動するとは限らないため、障害物が存在しないにも関わらず障害物と判定される場合が考えられる。そこで、画像処理技術の一つである膨張・収縮処理を繰り返し行うクロージングと呼ばれる処理を用いて、障害物が存在すると判定されたあるセルに対し、その周辺のセルに障害物が存在しない場合はそのセルも障害物が存在しないと判定するように推定結果を修正する。次に、無線端末同士の通信履歴から、ある2つの端末が互いに見通し通信（十分な強度の通信）が可能で、且つそれらの2端末間の推定距離が無線の通信範囲 R_{max} 以内の場合、それらの端末間には障害物が存在しないと判断する。また、2端末間の推定距離が R_{max} 以内であるにも関わらず無線通信の接続エントリが存在しない場合や電波強度が想定以上に弱い場合、それらの端末間に障害物が存在すると判断する。しかし、上記で述べた移動履歴、接続エントリから得られる障害物の有無の判断情報は、GPSの位置誤差がない場合は正しく機能するが、GPSの位置情報はかなりの誤差を含んでおり、必

ずしも正しく障害物の有無を判断できるとは限らない。電波強度に関しても、理想的な電波伝搬モデルによる電波強度の計算値と実測した電波強度との間にはマルチパスや電波の干渉により誤差が生じる。従って、あるセル（例えば 1 m^2 のセル領域）に障害物が存在する（しない）という情報が一度得られただけでそのセルに障害物が存在する（しない）と判定することは好ましくない。そこで、移動履歴、接続エントリのサンプル数を増加させることで誤差の影響をできるだけ小さくし、各セルにおける障害物の有無を高精度に推定する。また、建物などの障害物に近づくと、突然GPSの推定位置が大きくずれてしまうことがある。このため、各GPSの推定位置の時間変化から、当該端末のGPSの推定位置が従前より大きくずれてしまう場合、そのような端末からの移動履歴や無線通信の接続エントリ情報は除外するなどの工夫をすることで、当該領域の障害物を高い精度で推定している。

図5に示すような $150\text{m} \times 190\text{m}$ 領域の大阪大学歯学部を対象とした実証実験を行った。提案手法における無線範囲 R_{max} は 25m 、 50m 、 75m で、セルサイ

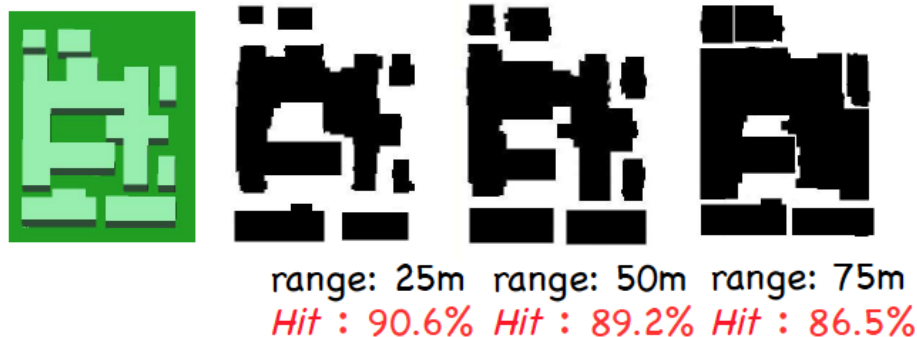


図5 自動生成された地図の形状

ズを1mとした。20人の歩行者がランダムに対象領域を移動したとき、地図生成に要する時間は300秒であり、セル認識（各1m²セルが障害物か通行可能領域かの判断）の正答率は、それぞれ90.6%、89.2%、86.5%であった。

6. まとめ

本稿では、都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析のための無線ネットワークシミュレーション技術と、携帯移動端末の無線通信機能とGPS機能のみを用いた災害現場の地図生成手法の概要を紹介した。今後も、都市における人や車、センサ、通信、物理空間（地理環境）、アクチュエータを含む制御システム（フィードバックシステム）を高精度に再現できる都市シミュレーションシステムの開発を行っていきたいと考えている。

参考文献

- (1) ns-3 Simulator Home Page :
<http://www.nsnam.org>.
- (2) QualNet Simulator Home Page :
<http://www4.kke.co.jp/network/qualnet/>.
- (3) Scenargie Simulator Home Page :
<http://www.spacetime-eng.com/jp/labSimulator.html>.
- (4) CORSIM Microscopic Traffic Simulation Model Home Page :
<http://www.mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm>
- (5) GrooveNet Hybrid-Network Simulator for Vehicular Networks Home Page :
<http://www.seas.upenn.edu/~rahulm/Research/GrooveNet/>.
- (6) UrbanSim Home Page :
<http://www.urbansim.org/Main/WebHome>.
- (7) ILUTE Home Page :
http://www.civ.utoronto.ca/sect/traeng/ilute/ilute_the_model.htm.
- (8) CityOne Home Page :
<http://www-01.ibm.com/software/solutions/soa/innov8/cityone/>.
- (9) MobiREAL Simulator Home Page :
<http://www.mobireal.net/>
- (10) T. Camp, J. Boleng and V. Davies : “A survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research”, *Wireless Communications and*

都市環境での大規模ワイヤレスネットワークの性能解析に関する研究

Performance Analysis for Large-Scale Mobile Wireless Networks in Urban Environments

Mobile Computing, Vol.2, NO.5, pp.483-502, (2002).

理学会創立 50 周年記念論文賞受賞)。

- (11) Delay Tolerant Networking Research Group
Web Page : <http://www.dtnrg.org/wiki>.
- (12) Kumiko Maeda, Akira Uchiyama, Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi, Keiichi Yasumoto and Teruo Higashino : “Urban Pedestrian Mobility for Mobile Wireless Network Simulation”, *Ad Hoc Networks, Elsevier*, Vol.7, No.1, pp.153-170, (2009).
- (13) Takaaki Umedu, Kumiko Isu, Teruo Higashino and C. K. Toh : “An Intervehicular-Communication Protocol for Distributed Detection of Dangerous Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.59, No.2, pp.627-637, (2010).
- (14) Takumi Kanaya, Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino : “HumanS : A Human Mobility Sensing Simulator”, *Proc. of 5th IFIP Int. Conf. on New Technologies, Mobility and Security (IFIP NTMS2012)*, pp.1-4, (2012).
- (15) 中田 圭佑、前田 久美子、梅津 高朗、廣森 聡仁、山口 弘純、東野 輝夫 : “災害現場の被災者や救援者の行動記述とそれを用いたネットワークシミュレーション環境の提案”、情報処理学会論文誌、Vol.50、No.9、pp.2327-2339, (2009)。
- (16) Shinichi Minamimoto, Sae Fujii, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino : “Map Estimation Using GPS-equipped Mobile Wireless Nodes”, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol.6, No.6, pp.623-641, (2010).
- (17) 南本 真一、藤井 彩恵、山口 弘純、東野 輝夫 : “移動無線端末の位置情報と通信情報を用いた災害現場地図の自動生成”、情報処理学会論文誌、Vol.51、No.12、pp.2169-2183、(2010)。(情報処

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。