

推薦論文

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

中田 圭 佑^{†1} 前田 久美子^{†1} 梅津 高 朗^{†1,†2}
廣 森 聡 仁^{†1,†2} 山口 弘 純^{†1,†2} 東野 輝 夫^{†1,†2}

災害時に携帯電話や小型センサデバイスどうして無線通信を行い、緊急情報の伝搬や被災者のバイタルサイン情報を救援者（救助隊や医療班）に迅速に伝搬させ、災害時の救命救急作業の高度化を目指した様々な研究開発が進められている。本論文では、まず災害現場で無線通信端末を持つ被災者や救援者の行動を形式的に記述するためのモデルを提案する。提案モデルは、災害現場の被災状況や被災者らの行動範囲の動的な変化を指定する地理モデル、被災者や救援者らの行動パターンを記述するためのノードモデル、対象とする救援活動の内容を指定するシミュレーションシナリオから構成される。次に、これらのモデルを無線ネットワークシミュレータ MobiREAL 上に導入し、そのシミュレータを用いて、無線通信端末上で動作する実アプリケーションの動作や性能を検証する機能も実現した。提案モデルを用いた評価実験により、災害現場を再現したもとの無線通信端末の有無による救命支援システムの評価が容易に行えることを示せた。また、400 ノードからなるネットワークシミュレーションを介した実アプリケーション動作実験では十分小さい遅延で実アプリケーションの通信が実現できることを示した。

A Network Simulation Methodology Using Human Behavior Models in Disaster Area

KEISUKE NAKATA,^{†1} KUMIKO MAEDA,^{†1}
TAKAAKI UMEDU,^{†1,†2} AKIHITO HIROMORI,^{†1,†2}
HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2} and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

In this paper, we propose a new simulation environment to evaluate computer-supported life-saving activities in disaster area. The environment includes the modeling of human behavior, their activities and dynamic change of geographi-

cal regions' attributes in disaster areas as well as a disaster scenario description language. These models have been implemented into our wireless network simulator MobiREAL along with a function to simulate communication traffic of application programs running on real terminals. Experimental results have shown that the proposed environment facilitated the evaluation to assess effectiveness of life-saving activities using networked applications. Furthermore, simulation of application traffic could be done with reasonable simulation delay, which did not affect the performance of the application.

1. はじめに

地震や火災などの都市災害が発生した場合、短時間に多数の傷病者が発生する可能性がある。しかし膨大な数の傷病者に対し、治療を行う医療チームや医療設備は限られており、災害現場において多くの傷病者を救うためには、救命可能な傷病者の選別や傷病者に対する治療順位の決定を迅速に行う必要がある。近年、このような災害現場における救命活動を支援するために、通信端末を活用した支援システムの研究開発がさかんに行われている^{1)–6)}。

そのような支援システムを設計開発する際には、無線通信端末の活用が救命救急支援にどのように役立つのかをできるだけ正確に評価できることが望ましい。無線通信端末の性能評価手法の1つとして、ネットワークシミュレーションがあげられるが、無線ネットワークにおいては、ノードの移動（モビリティ）がプロトコルやアプリケーションの性能に大きな影響を与えることが知られており、評価目的ごとに適切なモビリティモデルを用いる必要がある^{7)–9)}。特に、救命活動の支援システムのように特定現場での使用を意図して開発される場合、意図した性能が発揮できるかや救命活動支援の効果や課題発見を対象環境において行う必要があるといえる。

これまでに、現実的なノードの移動を実現するために、人や車両の通常行動をモデル化した様々なモビリティモデルが考案されている^{10)–20)}。しかし、災害環境では逃げまどう被災者や、傷病者を救出する救助隊などが通常とは大きく異なる行動をとるため、これら汎用性の高いモビリティモデルでは災害現場の再現が難しい。また災害地ではビルなど建造物の倒

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science Technology and Agency, CREST
本論文の内容は2008年7月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウムにて報告され, 同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

壊による通行止めなどの地理的要因が行動に大きな影響を与えるため、これらのモデル化も現実性を高める重要な要素となる。

本論文では、災害時における救命支援システムやそれを用いた救命活動の適切な評価のためのシミュレーション環境を提案する。本論文ではまず、災害現場で無線通信端末を持つ被災者や救援者の行動を形式的に記述するためのモデルを提案する。提案モデルは、(i) 時刻に応じて変化する災害進行状況や避難個所などを表現するための地理モデル、(ii) 無線通信端末などから得た情報に基づき被災者や救援者らの行動パターンの動的な変化を記述するためのノードモデルならびにその記述例、ならびに、(iii) 災害発生や救援活動に関わる人々の出現や消滅を指定するための災害シミュレーションシナリオ、から構成される。次に、これらのモデルを我々が開発した無線ネットワークシミュレータ MobiREAL 上に導入し、そのシミュレータを用いて無線通信端末上で動作する実アプリケーションの動作や性能を検証する機能も実現した。提案モデルを用いた評価実験により、災害現場を再現したもとの無線通信端末の有無による救命支援システムの評価が容易に行えることを示した。また、400 ノードからなるネットワークシミュレーションを介した実アプリケーション動作実験では十分小さい遅延で実アプリケーションの通信が実現できることを示した。

以下、2 章では関連研究と提案環境との差異について説明し、3 章では我々が開発しているネットワークシミュレータ MobiREAL について簡潔に述べる。4 章では提案する地理モデル、ノードモデルおよびシミュレーションシナリオについてその記述例とともに述べ、5 章では実機アプリケーションの検証機能について説明する。6 章では、提案環境を用いた性能評価について述べ、7 章でまとめと今後の課題について触れる。

2. 関連研究

2.1 救命・避難活動支援システムに関する関連研究

米国では、アメリカ国立航空宇宙局 (NASA) やアメリカ合衆国連邦緊急地帯管理庁 (FEMA)、The National Library of Medicine (NLM) などのプロジェクトで、無線ネットワークを用いた救命・避難活動支援システムに関する研究が進められている。たとえば、AID-N (Advanced Health and Disaster Aid Network) プロジェクト¹⁾ では、センシング機器を用いて取得した傷病情報を ZigBee 経由で基地局に転送するシステムが開発されている。また、CodeBlue^{2),3)} では、腕時計型センサから取得した生体情報をアドホックネットワーク経由で収集するシステムが開発されている。Tech Specs プロジェクトでは、WHISARD⁴⁾ と呼ばれる災害時用のネットワークを形成している。このように、大規模災害

時に IC タグや簡易なセンシング機器を用いて、傷病者の症状や被災情報を無線ネットワーク経由で収集する研究が多くの研究機関で進められている。

一方、国内でも同様の試みが数多く実施されている。たとえば、情報通信研究機構 (NICT) では、無線 LAN を用いた大規模な被災情報収集実験が実施されている⁵⁾。また、文部科学省の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」⁶⁾ では、レスキューロボットなどと連携して高度な防災インフラを構築する試みがなされている。

2.2 モビリティに関する関連研究

無線ネットワークの性能評価実験をネットワークシミュレータ上で行う際、通信を行うノードのモビリティモデルとして、Random Way Point モデル²¹⁾ のような単純なモデルがよく用いられる。一方、現実的なモビリティを実現する研究も進められており、その手法の 1 つとして、観測データと地理情報から現実的なモビリティを合成するモビリティモデルが多数提案されている^{10)–17)}。たとえば、文献 10) では、建物を回避して移動するモビリティモデルを導入し、さらに、この手法をネットワークシミュレータ GloMoSim¹¹⁾ と ns-2¹²⁾ 上に実装している。文献 13) では、住宅地やビジネス街など特徴に応じて、シミュレーション領域をいくつかのゾーンに区分し、ゾーン単位でのノード種別ごとの密度の変遷を交通計画手法に基づき推定している。この手法は、特定の場所や時間におけるノード密度やパケット伝播率の予測を主な目的としており、アプリケーションから受け取ったデータに基づいてノードの行動を動的に変化させるような状況は想定していない。文献 14) では、Weighted Way Point (WWP) モデルが提案されている。WWP モデルでは、喫茶店や大学などのある程度人の多い領域を定義し、各領域での滞在時間の分布と領域間の遷移確率を与えることによって、マルコフモデルを用いて領域間のノードの移動をモデル化している。文献 16) では、社会における人間関係を考慮に入れたグループベースのモビリティモデルが提案されている。

また、現実世界のユーザの移動を細かく模倣することにより、ノードのモビリティモデルを現実世界に近づけている研究も行われている^{18)–20)}。これらの手法では、どのようにノードを細かく制御するか、どのような現実的な要素を導入するかについて焦点をおき、現実世界におけるノードの挙動をシミュレーション上で実現しようとしている。文献 18) においては、モバイルアドホックネットワークを対象としたルーティングプロトコルの評価のため、個々のノードの目的に沿ったノード移動が実現できる枠組みを提案している。また、文献 19) においては、モビリティモデルだけでなく、US Bureau of Labor Statistics (BLS) における Use of Time Study などの人間の行動に関する統計情報を利用し、統合的にノー

ドの行動を扱うことができる枠組みを提案している。このように、精度の高いネットワークシミュレーションが行えるよう、より現実世界に近いモビリティモデルが提案されているが、それらのほとんどは通常環境を対象としている。

これに対し本論文では、災害環境における被災者および救援者の行動を記述するための地理モデルとノードモデルを導入し、ノードモデルについては被災者、救助隊、医療班の参照記述（リファレンスデザイン）も提供している。また、それらのモデルと実時間シミュレーション機能を用い、災害現場を再現したシミュレーション環境のもとで実機アプリケーションを検証できる機能を提供している。さらに、計算機システムの導入が救命活動をどのように効率化させるかといった、システム導入に不可欠な評価が提案環境を用いることで容易に可能であることを示している。これらの点で提案環境は既存のアプローチとは大きく異なる新しい試みであり、有用性も十分備えているといえる。

3. MobiREAL の概要

本論文で提案するシミュレーション環境は MobiREAL シミュレータ上に実装しているため、本章では、まず MobiREAL の基本構成および機能について述べる。

3.1 シミュレーション領域のモデル化

MobiREAL におけるシミュレーション領域は、閉領域と閉領域でない領域（自由移動領域）で表現される。閉領域は多角形で指定され、さらに、ノードが進入できない閉領域（進入不能領域）とノードが進入できる閉領域（進入可能領域）に区分される。進入不能領域は建物内部などノードの存在を許していない閉空間を表し、進入可能領域は広場など特定の出入り口がある閉空間を表す。図 1 の例では、灰色の矩形が進入不能領域、白の矩形が進入

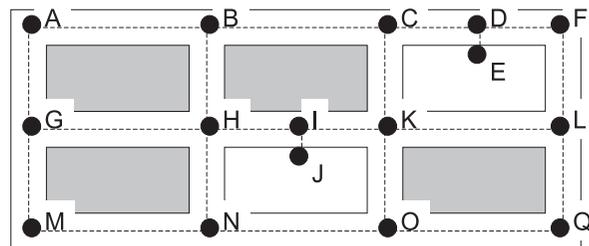


図 1 MobiREAL のシミュレーション領域モデル
Fig. 1 Modeling of simulation field in MobiREAL.

可能領域を表し、進入可能領域には E や J のように、閉多角形の辺上に入出口を指定する。ノードは指定された出入り口を経由することにより、閉空間の外側から内側へ、内側から外側へ移動することができる。一方、自由移動領域は通路などを表す。

行動指定の簡単化のため、自由移動領域においては、交差点の中央や進入可能領域の出入り口など、自由移動領域上の座標を線分で結んだグラフを、自由移動領域の通路構造として指定できる（図 1）。各ノードが自由移動領域を移動する際には、この通路構造情報を参照することにより、目的地の指定や経路計算を簡単化できる。

3.2 ノード行動のモデル化

MobiREAL では、ノードが自身の周辺環境やネットワークシステムの振舞いに応じて、行動を動的に変化させる挙動を記述可能な確率つきイベント発生モデル（Condition-Probability-Event モデル、以下 CPE モデル）を用いて、ノードの行動を記述する。CPE モデルは、行動規則が異なるノード種別ごとに指定し、ノードインスタンスの生成時にノードが使用する CPE モデルのインスタンスを指定できる。これにより、たとえば都市部における通勤客や買い物客など、行動が異なるノードが混在する環境をモデル化できる。

CPE モデルでは、ノードの行動などを指定する動作（action）、それが実行されるための実行条件（condition）ならびに条件成立時の実行確率（probability）の組をルールとよぶ。CPE モデルはルールの並び、任意に定義可能な内部変数の集合、ならびにあらかじめ定義された外部変数の集合から構成される。CPE モデルは実行可能なモデルであり、ルールの並びをその先頭から走査し、各ルールについて実行条件の判定ならびに実行確率判定を行う。それらがともに成立すればそのルールの動作が実行され、そうでなければ走査を継続する。いずれかのルールが実行されるか並びの最後まで走査が完了した場合、走査は先頭に戻る。この走査を一定周期で行う。

外部変数は当該ノードの外部から更新または参照される変数であり、シミュレーション時刻 T 、周辺ノードの位置情報 E 、ネットワークシステムからのデータ出力 AO 、ネットワークシステムへのデータ入力 AI 、自身の現在位置 P 、および速度ベクトル V からなる。一方、内部変数はそのノードのみが更新および参照できる変数である。実行条件や実行確率の指定には外部変数や内部変数を引数として用いることが可能であり、動作はそれらの変数への代入文の集合を指定する。

CPE の記述例を表 1 に示す。この例では 2 つのルールからなり、ルール E1 では混雑地帯を迂回する行動を記述している。N(6 min, 2 min) は、条件が満足されてから 1 になるまでの時間が平均 6 分、標準偏差 2 分の正規分布に従うような確率値を返す関数である。E1

表 1 CPE モデルによる歩行者の行動記述例
Table 1 Example behavior description of a pedestrian in CPE model.

[CPE Description]			
	Condition	Prob.	Action
E1	crowded(P,dst.r,E) 周辺の端末所持ノードの位置情報 E から進行方向 (現在地 P, 目的地までの経路 dst.r より計算) のノード密度が高い (混雑している) と判断	N(6 min, 2 min)	dst.r=detour_path(E,P,dst.p); 混雑している道路を除いたグラフで P から現在の目的地 dst.p までの経路を再計算
E2	late(T,P,V,dsr.r,dst.t) 目的地の到着予想時刻 (現在時刻 T, 現在地 P, 速度ベクトル V, 目的地までの経路 dst.r より計算) が到着予定時刻よりも少し遅い	1.00	V=fast(); 早歩き程度の速度になるよう V を再計算

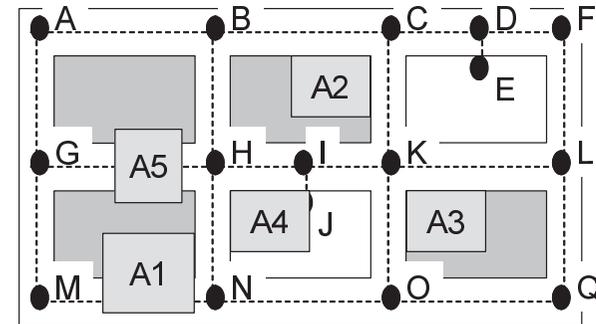
では最終目的地までの経路を表す経由地列 (自由移動領域上の構造グラフの頂点列) r などが格納されたオブジェクト dst に対し, 周辺の端末所持ノードの位置情報 E により混雑を検出した場合は迂回路を計算する行動が記述されている. CPE モデルは, 内部に P および V の更新関数を備え, 最近の経由地と現在の速度などを引数として 1 走査ごとにそれらの関数を呼び出すことでノードの位置および速度ベクトル更新が行われる.

4. 提案する災害環境モデル

本章では, 災害現場における救命活動支援システムの有無や救助および医療隊員の人数, 行動ポリシーなどの違いにより生じた救出人数の差異測定などを目的として, 災害環境モデルを提案する. この災害環境モデルは, 災害現場を表現するための地理モデル, 災害時の人の行動モデル, シミュレーションシナリオから構成される. 以下, それぞれについて説明する.

4.1 地理モデル

災害現場では救護所など災害時特有の領域が存在し, また建物の倒壊による通行止めなど時間経過により環境変化も生じる. そこで, 提案環境では MobiREAL の静的な領域モデルを拡張し, エリアとよばれる動的な領域を導入する. エリアは矩形であり, 自由移動領域および閉領域の区分を問わず, 領域内の任意の地点に MobiREAL の領域とは独立に指定できる. エリアどうしは重複してもかまわないが, 重複の際の優先度は別途指定しておくものとする (その詳細は省略する). 各エリアは, (識別子, 初期頂点のならば, 生成時刻, 拡大関数, 属性, 行動制限指定) の 6 項組として指定する.



	生成時刻	拡大関数	属性	行動制限
A ₁	60	300 秒ごとに 1.2 倍	被害発生域	被災者のみ進入不可
A ₂	130	時刻 600 秒に 2 倍	被害発生域	被災者のみ進入不可
A ₃	0		避難所	エリア内のノード数が 300 以上の場合進入不可
A ₄	300		現場救護所	
A ₅	180	時刻 540 秒に 1.5 倍, 時刻 1,200 秒に消滅	ハザード	全ノードの侵入および退出不可

図 2 エリアの指定例 (初期頂点のならばは省略)
Fig. 2 Example specification of areas.

生成時刻になるとそのエリアは初期頂点のならばで指定された位置と大きさをシミュレーション領域上に生成される. また, 時刻とそのときの面積拡大率 (または頂点座標) を指定できる拡大関数に従い, その位置と大きさを時間経過に応じて更新できる. 図 2 にエリアの指定例を示す. たとえば, エリア A_1 は, エリア生成時刻から 300 秒経過ごとにその面積を 1.2 倍するよう指定されている. これにより火災の延焼による災害の拡大などを表現できる. 属性は, 被害発生域, 避難所, 現場救護所, ハザードなど, そのエリア内部でのノードの行動が異なると思われる種別でエリアを分類する目的で用いる. したがってこの属性は後述するノード行動モデルで参照される. 行動制限指定では, そのエリアにノードが進入ならびに退出が可能かを, そのエリアに存在するノード数およびノード属性 (CPE モデルの種別, 詳細は後述) を用いて指定する. たとえばエリア A_3 では, 行動制限指定を用い, 300 ノードまで滞在可能であることを表現している. また, A_5 にあるように, 拡大関数を利用し, 建造物倒壊による通行禁止区域など, 動的に変化する進入不可能な領域を指定することもできる.

4.2 ノードモデル

ノードモデルは、行動が異なる様々な人の行動を区分するため複数の CPE を用いる。異なる CPE によるノードの種別をノード属性とよぶ。たとえば被災者（または傷病者ともよぶ）、救助隊および医療隊を区別するために異なる CPE を用いる場合、各ノードはノード属性として被災者、救助隊または医療隊のいずれかを持つ。ここで、災害時の人の行動は存在する場所により大きく異なることに着目する。たとえば医療隊は現場に到着すると現場救護所に向かって移動し、現場救護所内では救命医療活動に従事する。また、現在移動中であれば周辺の重症者を発見して報告する行為を行ったり、救護所内での医療行為中であればその救護所に存在する傷病者の症状を把握したりなど、その状態によりとるべき行動も異なる。したがって、そのような状況を直感的に記述するため、あるノード属性を記述する CPE 記述は 1 つまたは複数のサブ CPE と、どのサブ CPE を実行すべきかを示す状態変数、ならびにそれらサブ CPE に共通の内部変数および外部変数から構成し、これを拡張 CPE モデルとよぶ。拡張 CPE モデルでは 1 状態に 1 つのサブ CPE が割り当てられ、走査周期ごとに現状態に割り当てられたサブ CPE のみが走査される。現状態はルールの動作記述部で更新できる。

また、各ノードは通信端末の有無を内部変数として保持している。これにより、シミュレーション内で、通信可能なネットワークノードだけでなく、通信が行えない非ネットワークノードを扱うことができる。そのほかに各ノードは自身が現在属するエリア、自身が把握している他ノードの位置や属性、自身が把握しているエリアのリストを保持し、これをスコープとよぶ。スコープの更新はルールの動作で明示的に行うことができる。また、現在どのエリアに属するかは、各ノードが走査周期ごとに全エリアに対する存在判定を行うことで得る。このスコープを用いることで、自身が把握する災害地の情報に依存した行動を決定する様子を表現できる。たとえばスコープ内に全エリア情報を保持するノード N_1 と、エリア情報を保持しないノード N_2 が図 2 の地点 G から地点 H へ最短経路で移動する場合、ノード N_1 については自由移動領域の構造グラフと「ハザード」エリア（進入不能領域）を考慮して $G \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow H$ と計算できるのに対し、 N_2 では、自由移動領域の構造グラフのみを考慮し $G \rightarrow H$ と移動を開始し、 A_5 に進入した瞬間に進入不能エリアに進入したことを検知し、スコープに A_5 を追加したうえで最後の地点 G に引き返す。次にエリア A_5 を考慮して $G \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow H$ を決定する。このようなモデルは、たとえば災害現場支援システムにより、現場状況などが救助隊に伝わりと救命活動効率がどの程度向上するかなどを評価する際にきわめて有効となる。

4.3 災害時の人の行動記述

本研究では災害時における被災者（傷病者）、傷病者を救助する救助隊、傷病者を診察し現場治療を行う医療隊の行動を前節で提案した拡張 CPE モデルで記述する。我々の研究グループでは、救命救急医療に関わる医療関係者とともに災害時救命救急救援システムの研究を進めており、それら医療従事者の意見と文献 [22] を基に、被災者、救助隊、医療者の行動モデルの決定および検証を行っている。図 3 にそれらの記述を与える。なお、いくつかのルールの実行確率にみられる各 F_i は 0 から 1 の実数定数である。

4.3.1 被災者（傷病者）

被災者（または傷病者）の拡張 CPE 記述では、初期状態と最終状態を除く S1 から S6 までの 6 状態が導入され、それぞれにサブ CPE が割り当てられており、現状態に対応するサブ CPE が実行される。状態はルールの動作部で更新される。各状態の意味と状態間遷移を右側の遷移図で示す。また、「全状態」で示されるルール群は、すべてのサブ CPE の先頭に付加される共通のルール群を示している。また、傷病の深刻さを示す傷病レベルおよび、治療済みか否かを表す治療フラグを外部変数として持つ。

以下、状態 S_i の j 番目のルールを $S_{i,j}$ で表す。被災者は災害が発生する以前はごく一般的な都市歩行流²³⁾に基づき対象空間全域を移動している。この状態は S1 で表現され、S1 では拡張 CPE の外部（具体的にはシミュレーションシナリオ）からその歩行流に従った目的地が設定される。災害発生時刻にはルール S1.1 が実行され、スコープに含まれる「避難所」の 1 つに向かって移動するよう目的地が設定され、避難移動状態に移行する。移行後の状態は S2 で表現される。もし、どの避難所もスコープに含まれなければ、情報交換によりスコープが拡大し、避難所がスコープ内に現れるまでランダム移動を行う。S2 においては、災害発生時に「被害発生域」エリアに存在した場合はルール S2.1 で傷病を負う（傷病レベルが増加する）。また傷病を負った被災者は移動不能となり状態 S3 へと移行する。避難所に到着した被災者はルール S3.2 でその場への滞在が指定される。無事避難が完了した被災者は、救急車による病院への搬送などにより、シミュレーションから消滅することができる。この割合を調整することにより、優先的に病院へ搬送する必要がある傷病者の選択方針や、避難所定員を考慮した被災者誘導方法などの評価を行うことができる。状態 S3 は負傷により被害発生域から自力で脱出できない状態であり、救助隊からの関数 Conveyance の呼び出しによって、救助隊と同一の目的地および歩行速度を設定し、状態 S4 に移行する。状態 S4 は救助隊に搬送されている状態であり、「現場救護所」エリアに到着した場合は状態 S5 に移行する。状態 S5 は「現場救護所」に搬送された状態であり、未治療でありかつ被災



図 3 拡張 CPE によるノード行動の記述

Fig. 3 Description of human activities using extended CPE model.

者を探索している医療隊に遭遇すれば(医療隊ノードによる当該ノードの Cure 関数が呼び出された場合), ルール S5.1 で治療が行われる。治療が完了したノードは, 病院に搬送されたと思われ後述するシミュレーションシナリオでの指定に従い消滅する。

4.3.2 救助隊

救助隊は生成されるとスコープ内の「被害発生域」エリアに目的地が設定され, そこへの移動を開始する。移動中の状態を S1 で表す。状態 S1 では当該エリアに到着後, 傷病者を探索する状態 S2 に移行する。S2 で傷病者を探索し, 発見すると傷病者救出時刻を設定し状態 S3 に移行する。S3 に移行後, 傷病者救出時刻にその傷病者を「現場救護所」へ運搬する状態である S4 に移行する。なおこのとき, 発見した傷病者の関数 Conveyance を目的地と移動速度とともに呼び出すことで, その傷病者はそれらの値を用いて搬送状態 S4 に移行する。状態 S4 で「現場救護所」に到着した場合, 再び傷病者を救助するために被害発生域へ向かう状態 S1 へと移行する。

なお, スコープを用いることで「複数の被害発生域とエリア内の傷病者の人数などが(たとえば災害時救援支援システムなどから得られた情報として)スコープに登録されていれば各エリア内の傷病者ノード数に対する救助隊ノード数の比が最小のエリアを目的地として選択する」といった高度に組織化された救助隊も表現できる。一方, そのような情報が(支援システムの不在により)スコープに登録されず, 最寄のエリアに向かうような救助隊も表現できる。このように支援システムの有無で救助隊の移動に差異が発生するような状況も容易に実現できる。

4.3.3 医療隊

医療隊は生成されるとスコープ内の「現場救護所」エリアに目的地が設定され, そこへの移動を開始する。移動中の状態を S1 で表す。状態 S1 では当該エリアに到着後, 未治療の傷病者を探索する状態 S2 に移行する。S2 では傷病者を探索し, 発見すると治療中を表す状態 S3 に移行する。S3 では, 治療が完了するとルール S3.1 で「現場救護所」エリアの再選択を行うか, またはその場で他の傷病者の治療を継続する。

救助隊のモデリング同様, 支援システムが存在する場合にはスコープにつねに医師が不足する「現場救護所」の情報が登録され, 状態 S3 でそのようなエリアへの移動を行うような動作を記述することができる。

4.4 シミュレーションシナリオ

図 4 にシナリオ記載例を示す。シミュレーションシナリオでは, 各ノード属性ごと, どの時刻にどれだけのノードを発生させるかを指定する。たとえば救助隊および医療隊は救急

```
void scenario::Initiator(){
    //時刻 0 に 300 の傷病者ノードを生成
    while( nodenum < 300 ) generate(new sufferer());
}

void scenario::Run(){
    int RESCUEINTERVAL = 360;
    //360 秒間隔で 3 ノードずつ救助隊ノードを生成
    if(((TimeNow() % Time( RESCUEINTERVAL)) == 0) && (rescue_number <= 12)){
        for( int i=0; i< 3; i++){
            generate( new rescue());
            rescue_number++;
        }
    }

    int DOCTORINTERVAL = 480;
    //480 秒間隔で 3 ノードずつ医療隊ノードを生成
    if(((TimeNow() % Time( DOCTORINTERVAL)) == 0) && (doctor_number <= 9)){
        for( int i=0; i< 3; i++){
            generate( new doctor());
            doctor_number++;
        }
    }

    //600 秒間隔で 5 ノードずつ治療済みの傷病者ノードを削除
    int DELETEINTERVAL = 600;
    if((TimeNow() % Time( DOCTORINTERVAL)) == 0){
        for( int i=0; i< 5; i++){
            delete_node( Depend_Level, ProportionStyle);
        }
    }
}
```

図 4 シミュレーションシナリオ
Fig. 4 Simulation scenario.

機関ごとに構成人数や到着のタイミングが異なるが, そのような状況もシナリオで指定できる。また, 指定された条件を満足したノードの消滅操作も指定できる。たとえば, 各現場救護所内の治療済みの傷病者が傷病の深深度に応じた順で一定時刻ごとや任意のタイミングで病院に搬送される様子を表す場合, 任意の時間間隔ごとに最も傷病レベルの高い傷病者ノードを消滅させる関数を呼び出す形で記述する。

5. アプリケーション検証に向けたシミュレーション環境の構築

災害現場での救命活動を支援するシステム（支援システム）においては、システムを実機で動作させ、そのユーザビリティなどを災害現場に即した環境で評価することがきわめて重要である。そのような評価の例として、現場医師が医師用の情報端末を利用して災害現場本部から処置すべき傷病者の位置情報を受け取った場合、その情報で正しく傷病者を認識できるかの検証などがあげられる。一方で災害現場を再現した実環境試験はコストの観点から容易には実施できない。そこで本章では、そのような支援システムの実機上の動作を、前章で述べた災害時の地理モデルならびに行動モデルのもとで検証する機能（アプリケーション検証機能）とその有用性について説明する。

本機能の実現のため、MobiREAL シミュレータのリアルタイムシミュレーション機能ならびに実機との連携機能²⁴⁾を利用する。図5に本機能を実現するシステム構成図を示す。実機群はLANなど遅延の小さいネットワークを介してMobiREAL シミュレータが提供する実機インタフェースと接続する。実機インタフェースによるシミュレータと実機の接続の概念図を図6(a)に示す。実機インタフェースは、接続された実機をシミュレーションネットワークの1ノードに関連付けし、実機上のアプリケーションデータストリームは、それをキャプチャするインタフェースを利用することで、シミュレーションネットワークのそれらに変換され、そのネットワーク内処理がMobiREALでリアルタイムシミュレーションされる。また、シミュレーションパケットが実機に対応するノードに到着した場合はそれを実データに変換してアプリケーションに与える。これにより、実アプリケーションがあたかも災害現場などのネットワークを介して通信しているような状況でアプリケーションの振舞いを検証できる。シミュレータとの連携用APIとしてアプリケーション層、トランスポート層、およびネットワーク層APIがMobiREALで用意されており、評価内容に応じた選択が可能である。

また、本システムではノードコントローラとよばれるノード制御プログラムを提供する。図6(b)に示すように、ノードコントローラを介して指定した1つ以上のノードの移動を操作でき、そのノードおよび周辺ノードの位置は仮想空間内に反映される。本システムでは仮想空間として、外部からの空間制御インタフェースが豊富に提供されているLindenLab社のSecondLife²⁵⁾を用いている。具体的には、ノードコントローラは操作対象のノードの識別番号と現在地などを一定時間間隔でMobiREALに送信し、MobiREALでは操作対象ノードの周辺ノードの情報を仮想空間内に反映させ、操作対象ノードからの1人称視点で

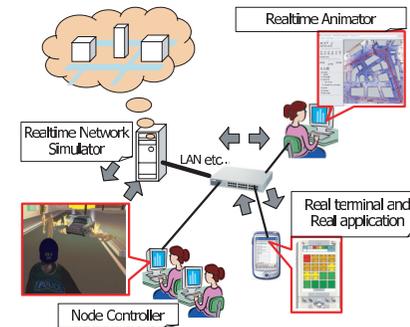


図5 アプリケーション検証機能を実現するシステム構成図
Fig. 5 System architecture for application testbed with MobiREAL.

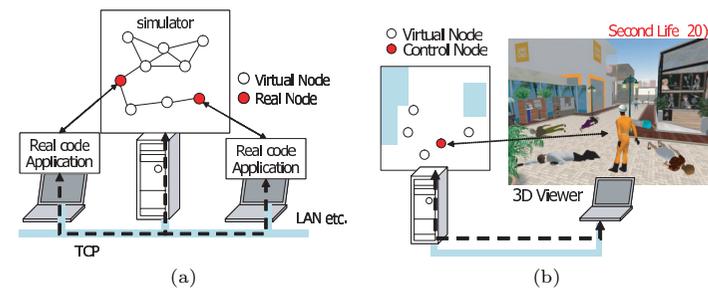


図6 (a) 実機とシミュレータの連携, (b) ノードコントローラによる位置操作
Fig. 6 (a) Association of real nodes with virtual nodes, (b) mobility control via node controller.

周囲の状況を再現する。MobiREALと仮想空間との連携はTCP通信により実現し、テキストベースで情報の交換を行う。これにより、たとえば前述のように情報端末で受け取った位置情報を参照しながら、3次元空間内で正しく傷病者を特定できるかなどの検証に利用できる。

最後に、リアルタイムアニメータと呼ばれる表示系により、シミュレーションしているネットワークのノードやリンク、無線到達半径、パケット伝搬の様子などをシミュレーションのリアルタイム進行に従って表示する機能も提供する。その実行例を図7に示す。

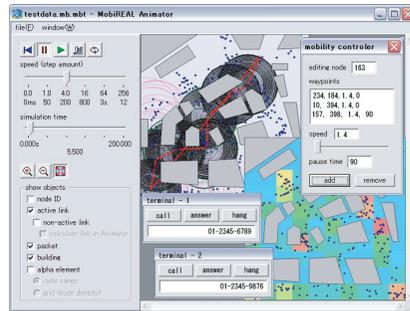


図 7 MobiREAL リアルタイムアニメータ
Fig. 7 MobiREAL realtime animator.

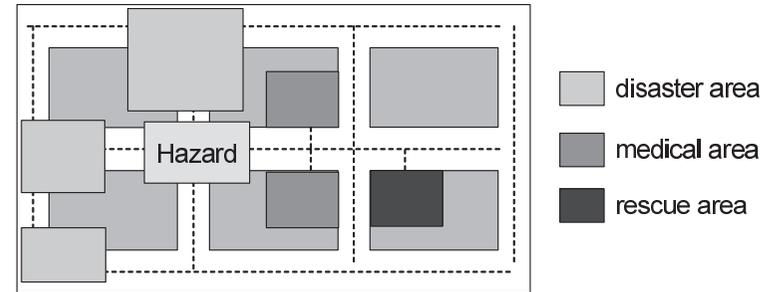


図 8 シミュレーション領域
Fig. 8 Field in this simulation.

6. シミュレーション事例と実験結果

6.1 災害環境モデルを利用したシミュレーション事例

本節では、提案する災害環境モデルを簡単な災害支援システムと災害状況に適応し、提案モデルの有用性について考察する。評価実験では、2.1 節で述べた近年の救命・避難活動支援システム¹⁾⁻⁵⁾に基づき、提案モデルを用いて、街中で多数の傷病者が発生する災害状況を表現し、傷病の程度を継続的に把握する傷病データ収集システムに対しシミュレーションを行う。さらに、そのシステムにより救命支援がどの程度効率的になされたかについて評価を行う。また災害時の具体的なモビリティは災害ごとに異なるため、ここでは抽象レベルの提案モデルを用いたうえで、災害時の一例として考えられる具体的なモビリティを決定している。

図 8 で示されるシミュレーション領域およびエリアにおいて、シミュレーション実験を行った。また、ノードに適応した各種パラメータを表 2 に示す。シミュレーション時間は 3,600 秒とし、シミュレーション開始 60 秒後に災害が発生するものとする。その際、被災者 300 名の中から被害発生域内に位置している被災者 50 名を傷病者とし、各災害エリア内の傷病者数は被害発生域の大きさに比例するように定める。傷病者の傷病レベルは、総務省消防庁で制定されているトリアージ方式での START (Simple triage and rapid treatment) 法と呼ばれる判定基準に基づき、5 段階に分類される。無傷の被災者は初期段階では通信端末を所持しない非ネットワークノードであり、他の被災者と直接遭遇した際 (互いの距離が 3m 以内であるとき) には、情報交換を口頭で行い各々のスコープを更新するものとする。

表 2 実験ノードパラメータ

Table 2 Node parameters in the simulation.

ノード種別	傷病レベル	症状悪化率 (60s ごとに判定)	初期ノード数	出現ノード数	移動速度 (m/s)
被災者	無傷	-	300	-	0.5 - 1.2
	I (軽症)	0.005		5	
	II (重症)	0.01		20	
	III (重体)	0.02		20	
	IV (死亡)	-		5	
救助隊	-	-	-	360s ごとに 3 ノード (合計 12 ノード)	1.2 - 1.5
医療隊	-	-	-	480s ごとに 3 ノード (合計 9 ノード)	0.8 - 1.2

一方、傷病者に対しては、災害発生後に出現する 12 部隊の救助隊、10 部隊の医療隊により、現場救護所への運搬や治療が行われるものとする。医療隊による傷病者の治療は、カテゴリ III の傷病者 → カテゴリ II → カテゴリ I の傷病者 → カテゴリ IV の傷病者の順に治療がなされる。支援システムがある場合には、治療とともに傷病者に通信端末が取り付けられ、傷病レベルの収集および共有が行われる。救助隊および医療隊は、初期状態では災害に対するスコープをまったく持たないものとし、現場救護所の通信端末からの無線通信により、各々のスコープが更新される。傷病者に通信端末を取り付けられた後、傷病者が病院に搬送されるまで、その通信端末は傷病の程度を 5 秒間隔で現場救護所のゲートウェイに対し情報を送信する。ゲートウェイに到着した情報は、すべての救助隊ノードと医療隊ノード

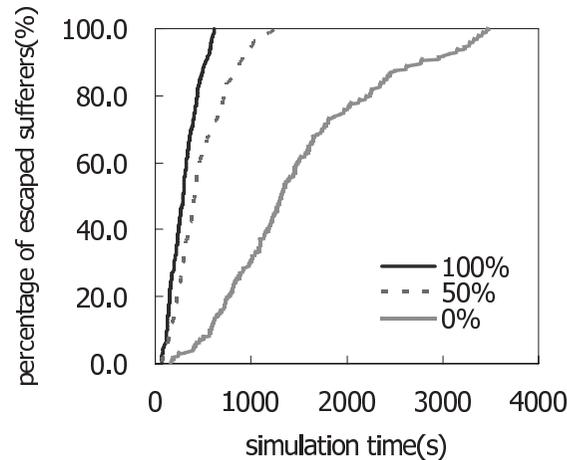


図9 避難完了ノード数

Fig. 9 The number of nodes which have reached escaping areas.

のスコープに即座に反映される。傷病者の通信端末からゲートウェイまでの情報伝播はフラディング方式で行われ、MAC層はIEEE 802.11 DCF + RTS/CTSを採用し、通信端末の無線伝播距離は5mとする。治療後、傷病者は病院へと搬送されシミュレーション領域から消滅する。ここでは、現場救護所と病院間を救急車が定期的に往復しており、10分ごとに5名の傷病者が病院へと搬送されるものとする。

まず、上記シミュレーションシナリオにおいて、事前知識により避難行動がどの程度円滑に行われたかについて評価を行った。シミュレーション領域において、あらかじめ避難エリアの存在を知っている被災者の割合を100%、50%、0%とし、それぞれについて避難に要した時間を計測した。計測結果を図9に示す。図9では、横軸がシミュレーション時刻、縦軸は全ノードに対してその時点での避難が完了した被災者の割合を示している。いずれの場合においても、被災者同士の情報交換により避難エリアを把握できることから、時間が経過するにつれ、避難が完了した被災者の数は増加している。しかしながら、事前に避難エリアを知っている被災者の割合が多いほど、避難行動が早い時間で完了していることが分かる。

次に、同じシミュレーションシナリオにおいて、通信端末の有無により、救命支援の効率性がどの程度異なるかについて評価を行った。図10に、通信端末の用いた場合(a)と用いない場合(b)のそれぞれについて、シミュレーション時刻ごと、各傷病レベルの傷病者数を示

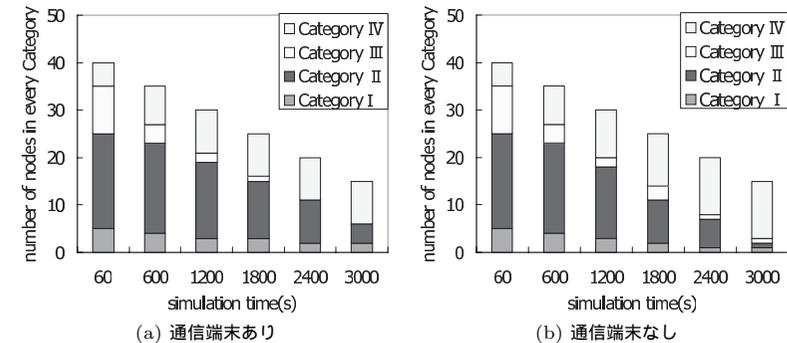


図10 カテゴリ別の傷病者数

Fig. 10 The number of injured nodes by START form category.

す。いずれの場合においても、医療隊は自分が属している現場救護所の状況は把握できるが、(a)のように傷病の程度を救援隊、医療隊全体で共有することにより、傷病の程度が重い傷病者の存在を把握することができる。そのため、適切に傷病者の運搬や治療を優先が可能となることから、時間経過とともに傷病の重い傷病者(カテゴリIII)の数が減少していることが分かる。一方、(b)の場合には、災害発生時は、カテゴリIIIであったものの、適切に治療が行えなかったために、カテゴリIVとなってしまう傷病者の数が多いことが分かる。支援システムを導入することにより、救助隊による傷病者の運搬や医療隊による傷病者の治療が適切に行われることが分かった。

このシミュレーション事例のように、災害環境における事前情報の程度や支援システムの有無により、避難活動や救命活動の効率性は大きく変わる。提案する地理モデルやノードモデルを用いることにより、これらの災害状況を簡単に実現かつ評価が行うことができ、災害環境での避難活動および救命活動を支援するシステムの開発におおいに有用であるといえる。

6.2 提案するシミュレーション環境のオーバーヘッド評価

提案環境では、災害現場での救命活動を支援するシステムを実機で動作させ、そのユーザビリティなどを災害現場に即した環境で評価できる機能を備えている。しかしながら、これらの機能は便利であるものの、シミュレーション自体に大きな影響を与えるのであれば問題となる。本節では、提案するこれらのシミュレーション環境によるオーバーヘッドを評価する。評価実験では、実機連携機能、ノードの動的制御機能がシミュレーション全体に及

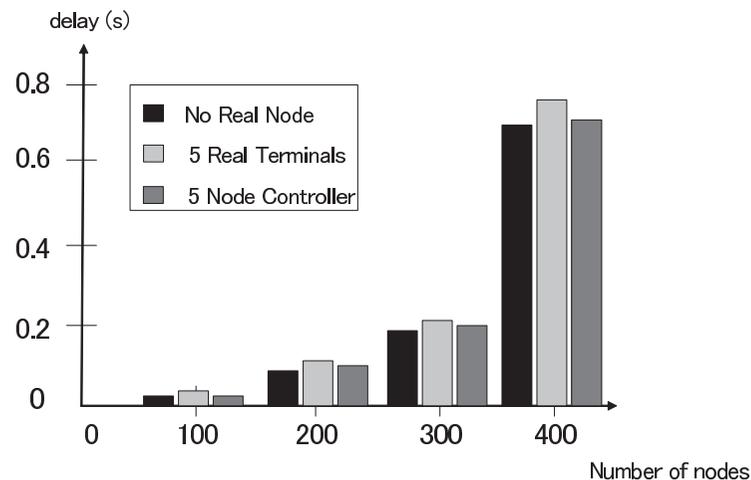


図 11 シミュレーションでの実時間に対する遅延時間
Fig. 11 Delay of simulation clock from real clock.

ばす影響を測定した。シミュレータは一般的な性能のデスクトップ PC (CPU : Pentium4 3.40 GHz, メモリ : 2 GB) 上で動作させた。また、実機ノード動作, ノードコントローラの動作にノート PC (CPU : PentiumM 1.6 GHz, メモリ : 1.5 GB) を用いた。シミュレーション領域は 500 m×500 m, シミュレーション時間は 60 秒, MAC 層は IEEE 802.11 DCF + RTS/CTS を用い, 各ノードの無線伝播距離は 100 m と設定した。

拡張機能を用いない場合, 5 ノードの実機連携, 5 ノードの動的制御を行った場合のそれぞれについて, シミュレーションのノード規模を 100, 200, 300, 400 と変化させ, 実時間に対するシミュレーション時間 (シミュレーション全体に要した時間) の遅延時間を計測した。測定結果を図 11 に示す。この評価実験から分かるように, 拡張機能を用いない場合の遅延時間とほぼ同等の遅延時間となっており, 実機連携機能, ノードの動的制御機能のオーバーヘッドは小さく, 拡張機能によりシミュレーションの利便性や効率性を高めつつも, シミュレーション自体の効率を損なっていないことが分かる。

7. ま と め

本論文では災害現場での通信端末を用いた救命活動支援システムの有無および, 救助および医療隊員の人数, 行動ポリシなどの違いによる救出人数の差異測定を目的として, 災害環

境を再現するための地理モデル, 人間の行動モデルを提案し, それを用いて救命活動およびその支援システムを評価するためのシミュレーション環境の設計開発について述べた。

現在, 救命救急に従事する医療関係者などへのヒアリングを予定しており, それに基づくノード行動モデルの検証と改善を行う予定である。また, リアルタイムシミュレーションのスケラビリティを向上させ, 数十台程度の実機を含む支援システムシミュレーションがストレスなく動作する環境の実現に向けて, 課題発見と技術開発を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Gao, T., Massey, T., Selavo, L., Crawford, D., Chen, B., Lorincz, K., Shnayder, V., Hauenstein, L., Dabiri, F., Jeng, J., Chanmugam, A., White, D., Sarrafzadeh, M. and Welsh, M.: The Advanced Health and Disaster Aid Network: A Light-Weight Wireless Medical System for Triage, *IEEE Trans. Biomedical Circuits and Systems*, Vol.1, No.3, pp.203–216 (2007).
- 2) Shnayder, V., Chen, B., Lorincz, K., Fulford-Jones, T.R. and Welsh, M.: Sensor Networks for Medical Care, Harvard University Technical Report (2005).
- 3) Malan, D., Fulford-Jones, T.R., Welsh, M. and Moulton, S.: CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care, *Proc. International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, pp.203–216 (2004).
- 4) Lenert, L.A., Palmer, D.A., Chan, T.C. and Rao, R.: An Intelligent 802.11 Triage Tag For Medical Response to Disasters, *Proc. American Medical Informatics Association 2005 Symposium*, pp.440–444 (2005).
- 5) 情報通信研究機構報道発表: 電子タグと無線 LAN アドホックネットワークを用いた大規模災害時の被災情報収集実験を実施。http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h17/051117/051117.htm
- 6) 文部科学省: 大都市大震災軽減化特別プロジェクト。http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203
- 7) Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, Vol.2, No.5, pp.483–502 (2002).
- 8) Bai, F., Sadagopan, N. and Helmy, A.: The IMPORTANT Framework for Analyzing the Impact of Mobility on Performance of Routing for Ad Hoc Networks, *AdHoc Networks Journal*, Vol.1, No.4, pp.383–403 (2003).
- 9) Maeda, K., Sato, K., Konishi, K., Yamasaki, A., Uchiyama, A., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: Getting Urban Pedestrian Flow from Simple Ob-

- servation: Realistic Mobility Generation in Wireless Network Simulation, *Proc. 8th ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'05)*, pp.151–158 (2005).
- 10) Jardosh, A., BeldingRoyer, E.M., Almeroth, K.C. and Suri, S.: Towards Realistic Mobility Models For Mobile Ad hoc Networks, *Proc. ACM Mobile Int. Symp. on Computing and Networking (MobiCom'03)*, pp.217–229 (2003).
- 11) Zeng, X., Bagrodia, R. and Gerla, M.: GloMoSim: A Library for the Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks, *Proc. ACM Parallel and Distributed Simulation (PADS'98)*, pp.154–161 (1998).
- 12) VINT Project: The Network Simulator ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/>
- 13) Hollick, M., Krop, T., Schmitt, J., Huth, H. and Steinmetz, R.: Modeling Mobility and Workload for Wireless Metropolitan Area Networks, *Computer Communications*, Vol.27, No.8, pp.751–761 (2004).
- 14) Hsu, W., Merchant, K., Shu, H., Hsu, C. and Helmy, A.: Weighted waypoint mobility model and its impact on ad hoc networks, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, No.1, pp.59–63 (2005).
- 15) Saha, A.K. and Johnson, D.B.: Modeling mobility for vehicular ad-hoc networks, *Proc. 1st ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, pp.91–92 (2004). (poster paper).
- 16) Musolesi, M., Hailes, S. and Mascolo, C.: An Ad Hoc Mobility Model Founded on Social Network Theory, *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'04)*, pp.20–24 (2004).
- 17) Hong, X., Gerla, M., Pei, G. and Chiang, C.: A group mobility model for ad hoc wireless networks, *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'99)*, pp.53–60 (1999).
- 18) Ray, S.: Realistic Mobility for MANET Simulation, Master's thesis, The University of British Columbia (2003).
- 19) Kim, J., Sridhara, V. and Bohacek, S.: Realistic Simulation of Urban Mesh Networks, Technical Report, The University of Delaware (2006).
- 20) Frangiadakis, N., Kyriakakos, M., Hadjiefthymiades, S. and Merakos, L.: Realistic Mobility Pattern Generator: Design and Application in Path Prediction Algorithm Evaluation, *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp.765–769 (2002).
- 21) Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y. and Jetcheva, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)*, pp.85–97 (1998).
- 22) 吉岡敏治, 田中 祐, 松岡哲也, 中村 顕: 集団災害医療マニュアル阪神・淡路大震災に学ぶ新しい終端災害への対応, へるず出版 (2000).
- 23) Maeda, K., Uchiyama, A., Umedu, T., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: Urban Pedestrian Mobility for Mobile Wireless Network Simulation, *Ad hoc Networks*, Vol.7, No.1, pp.153–170 (2009).
- 24) 前田久美子, 小西一樹, 佐藤和基, 山口弘純, 安本慶一, 東野輝夫: 現実的なシミュレーションシナリオが記述可能な無線ネットワークシミュレータ MobiREAL, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.2, pp.405–414 (2006).
- 25) Linden Lab: Second Life. <http://secondlife.com/>

(平成 21 年 1 月 14 日受付)

(平成 21 年 6 月 4 日採録)

推 薦 文

本論文は, 災害救助・避難訓練を目的とした災害現場で利用される無線ネットワークシステムの開発支援環境を提案している. この支援環境では, 災害時特有の環境を再現するためのノードモデル, モビリティモデル, 地理モデルを MobiREAL 上に実装した. また, MobiREAL と 3DViewer を連携させ, 臨場感ある災害訓練などを可能とした. 災害救助・避難訓練に対して示された高い実用性は論文誌の推薦論文としてふさわしい.

(マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム
プログラム委員長 串間和彦)



中田 圭佑 (学生会員)

平成 19 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業, 平成 21 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了. 在学中, 無線ネットワークシステムの評価手法および評価環境に関する研究に従事.



前田久美子（学生会員）

平成 18 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。平成 21 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士（情報工学）在学中，アドホックネットワークに関する研究に従事。



梅津 高朗（正会員）

平成 13 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年大阪大学大学院博士後期課程進学。平成 14 年同大学院博士後期課程退学後，同大学院情報科学研究科助手。平成 19 年より同研究科助教。博士（情報科学）。高度交通システム，アドホックネットワーク用ミドルウェアや開発環境の研究に従事。



廣森 聡仁（正会員）

平成 16 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 17 年株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ入社。平成 20 年より大阪大学大学院情報科学研究科助教。博士（工学）。モバイルアプリケーションやモバイルネットワークの設計および性能評価に関する研究に従事。IEEE 会員。



山口 弘純（正会員）

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学院情報科学研究科助手。平成 19 年より同研究科准教授。博士（工学）。分散システムや無線通信プロトコルの設計および実装に関する研究に従事。IEEE，電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫（フェロー）

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年大阪大学助手。現在，同大学院情報科学研究科教授。工学博士。分散システム，通信プロトコル，モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会，ACM 各会員。IEEE Senior Member。本会フェロー。