

推薦論文

任意のノード密度分布を実現可能な Waypoint モビリティモデルの提案

上野 瑛次郎¹ 廣森 聡仁^{1,a)} 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

受付日 2011年4月7日, 採録日 2011年10月3日

概要: モバイルワイヤレスネットワークにおいては, ノードの移動が通信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いる. リンクの維持時間やネットワークの接続性などを評価するためには, 個々のノードの動きだけでなく, いくつかのノードの関係から観測されるノード次数やノード配置などの移動特性について, 網羅的に評価できることが望まれる. 本論文では, 移動特性の1つであるノード密度分布に着目し, ネットワーク性能に対するノード密度分布の影響を評価するために, 様々なノード密度分布を実現し, かつそのノード密度分布を維持し続けることができる Waypoint モビリティモデルを生成する手法を提案する. 評価実験では, 提案手法により様々なノード密度分布が実現できることを示すとともに, 具体的な事例を用いてノード密度分布とネットワーク性能の関連性を比較的容易に評価できることを示す.

キーワード: モビリティモデリング, ウェイポイントモビリティ, モバイルワイヤレスネットワーク, ネットワーク性能評価

A Waypoint Mobility Model with Various Node Distributions

EIJIRO UENO¹ AKIHITO HIROMORI^{1,a)} HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹

Received: April 7, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: In mobile wireless networks, node mobility has a great impact on performance of communication protocols and applications. Many mobility models have been proposed to evaluate such impacts. However, these existing mobility models do not take it into account to realize various node density distributions. In this paper, in order to evaluate the impacts of node density distribution on network performance, we propose a new method to generate a waypoint mobility model that realizes various node density distributions and maintains them. Through experiments, we have shown that for given variety of node density distributions the proposed method can determine the corresponding probabilities of destination choice. We have also shown this feature is valuable for elaborate performance evaluation of mobile wireless networks.

Keywords: mobility modeling, waypoint mobility, mobile wireless network, network evaluation

1. 概要

モバイルワイヤレスネットワークにおいては, ノードの移動がネットワーク性能に大きな影響を与えることが知られている [1], [2], [3]. 特に, Mobile Ad-hoc Network

(MANET) や Delay/Disruption Tolerant Network (DTN) を利用し, かつ都市部で動作するようなアプリケーションを設計する際には, ノードの移動を十分に考慮する必要がある. たとえば, 都市部における車両は走行と停止を繰り返すため, 道路の箇所により車両の密度は大きく異なる. また, ショッピングモールでは, いくつかの店の周辺だけに

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp

本論文の内容は 2010 年 11 月のモバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会にて報告され, 同研究会主査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.

多くの客が滞在するような状況が頻繁に観測される。このように、車や人が不均一に存在する状況を含む、様々な状況においてもシステムが正しく稼働することが望まれ、たとえば、交差点における出会い頭の事故を防ぐための車々間通信など、いかなる場合においてもある一定以上の性能を求められるようなアプリケーションに対しては、様々なモビリティの基で網羅的な性能評価を行う必要がある。

モバイルワイヤレスネットワークを対象とした性能評価では、Random Waypoint Model (RWP) がしばしば用いられる [4]。RWP では、各ノードが他のノードと独立して目的地や速度、停止時間を決定する。このようなモデルは一定の汎用性を備える一方で、中央部の密度が高いノード密度分布のみしか生成できないため、網羅的な性能評価には不向きである。一方、現実的な環境における性能評価のために、トレースベースのモビリティモデルが頻繁に用いられる。このモビリティモデルでは、観測データを基に、実世界におけるノードの移動を再現することができるが、再現したい状況ごとに、新たな観測データを必要とするため、様々な状況を再現することは困難である。また、ノードの移動速度など移動特性に対する定常性を必ずしも保証できないため、ノード移動の影響を定性的に評価する用途には不向きである。さらに、モバイルワイヤレスネットワークにおけるネットワーク性能は、無線による互いの通信範囲や干渉範囲などが大きく影響し、ノード間の相対的な位置関係が密接に関わることから、個々のノードの動きを指定可能なモビリティモデルよりも、各ノードの次数、ノード密度などノード集合として定められる移動特性を指定可能なモビリティモデルのほうが、ノード移動によるネットワーク性能への影響を直感的かつ効率良く評価することができる。

本論文では、あるノード密度分布が与えられたとき、そのノード密度分布を実現するとともに、そのノード密度分布を維持し続ける Waypoint モビリティモデルを提案する。このモビリティモデルにおいては、対象とする領域は複数のセルに分割され、各ノードは、目的地として各セルを選択する確率（移動確率）に基づいて、あるセルを目的地と選択し、そのセルへと移動する動作を繰り返すものとする。提案手法では、任意のノード密度分布を実現するために、移動確率とノード密度分布の関係性を明らかにする。この関係性を基に、指定されたノード密度分布を実現し、かつそのノード密度分布を維持し続けることができる移動確率を導出する問題を、指定されたノード密度分布と提案手法において実現されるノード密度分布の差を最小にするような移動確率を決定する最適化問題として定式化する。この問題は非線形制約を含むため、効率的に解を導出するためのヒューリスティックなアルゴリズムを提案する。また、ノード密度分布だけでなく、個々のノードの動きについての条件を指定できるよう、移動確率に基づく移動特性をい

くつか定義し、その移動特性に対する制約を満たすような移動確率を導出する。評価実験では、ノードが均一に分布する状況や、ノード密度の高い領域や低い領域が交互に並んでいるような状況など、様々なノード密度分布に対し、それらを実現する移動確率をそれぞれ導出できていることを示す。また、提案手法により導出したモビリティモデルにおいて、MANET のルーティングプロトコル AODV を対象とした性能評価を行い、ノード密度分布とネットワーク性能の関連性を簡単に評価できることを示す。

以下、本論文の構成を示す。2 章では関連するモビリティモデルを紹介する。3 章では移動確率とノード密度分布の関係性を示し、4 章において、与えられたノード密度分布を実現する移動確率決定する問題を定義し、その問題に対するヒューリスティックなアルゴリズムを提案する。提案するモビリティモデルに対する評価実験と利用事例をそれぞれ 5 章と 6 章に示す。最後に、7 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

無線ネットワークにおいては、モビリティがネットワーク性能に大きく影響を及ぼすことが知られており [3], [5], その影響を評価するために様々なモビリティモデルが提案されている [1]。

頻繁に用いられるシンプルなモビリティモデルとしては、Random Way Point Model (RWP) [4] や、Random Direction Model (RD) [6] などのランダムモビリティモデルがあげられる。これらのランダムモビリティモデルは、多くのネットワークシミュレータで実装され簡単に利用できるため、様々な比較実験で用いられている。また、これらの性質を解析する研究もなされており [7], [8], [9], 生成されるノード密度分布は一様ではなく、シミュレーション領域の中央にノードが集中することが示されている。

一方で、これらのモビリティモデルにおいて、入力パラメータを調整することにより、現実的な状況を再現する研究も進められている [10], [11]。Gloss らは、目的地や移動速度などの移動パラメータをセルごとに変更するセルベースのモビリティモデルを提案している [10]。また、Hsu らは、Weighted Way Point Model (WWP) を提案している [11]。WWP では、喫茶店や大学などの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定め、マルコフモデルにより領域間のノード移動をモデル化している。しかしながら、入力パラメータを求める際に、移動軌跡など歩行者の観測データを必要とするため、様々なシミュレーションシナリオを用意しようとする場合には、観測データを取得するためのコストが問題となる。

また、性能評価においては、現実的なノード移動を再現できるだけでなく、ネットワーク性能がどのような要因から影響を受けているかを調査できるよう、移動特性が変化し

ないことが求められる。しかしながら、このようなランダムモビリティモデルにおいては、ノード速度やノード分布が初期状態から変化し、定常状態に到達するまでに、ある程度の時間を必要とすることが知られている [12], [13]。定常状態に到達する前の過渡的な状態における評価実験は避けるべきである。そのような過渡的な状態に対する解析に関する研究が多数行われている [14], [15], [16], [17], [18], [19]。文献 [14] では、RWP におけるノード速度分布に着目し、各ノードに指定するノード速度分布と定常状態におけるノード速度分布が異なることを初めて示し、定常状態に到達するまでの状態がシミュレーション結果に重大な影響を及ぼすことについて言及している。さらに、RWP を拡張した “sound mobility model” が提案されている [12]。このモビリティモデルでは、過渡的な状態を避けるため、シミュレーションを通して、ノードの平均速度を維持できるように設計されている。一方、文献 [16] では、McGuire が RWP におけるノード密度分布の定常状態について解析している。Nain らは、RD におけるノード密度分布を数理的に解析し、ノードが一様に分布する状況を簡単に作れることを示している [17]。また、文献 [18] では、定常状態からシミュレーションを開始できる “random trip model” が提案されている。

これらの様々な手法と比較し、本論文で提案する手法は下記のような特徴を持つ。まず、個々のノードの動きを入力として与えるのではなく、対象領域を複数個のセルに分割し、各セルごとに実現したいノード密度を入力として与え、領域全体で様々なノード密度分布を実現することができるようにしている。これにより、ネットワークプロトコルやアプリケーションの性能評価を行う際に、高密度のセルと低密度のセルが混在するような、多様なノード分布パターンに対する評価実験が可能となる。上記の目的のために、提案手法では、つねに定常状態を維持するためのノードの移動に対する条件を示している。我々の知る限り、定常状態を維持するだけでなく、様々なノード密度分布を実現するモビリティモデルは提案されていない。

3. 移動確率に基づく Waypoint モビリティモデル

まず、提案するモビリティモデルの特徴である、移動確率に基づいたノードの移動について説明し、移動確率に基づき移動する限り、いかなる移動確率であっても、ノード密度分布について定常状態が存在することを示す。次に、このモビリティモデルに対し、ある移動確率が与えられたとき、その移動確率によりノードを移動させ、定常状態に到達したときのノード密度分布を導出する方法を説明する。また、提案するモビリティモデルをシミュレーションにおいて使用する際、過渡的な状態を避け、常に定常状態でシミュレーションを実行するための初期条件を示す。

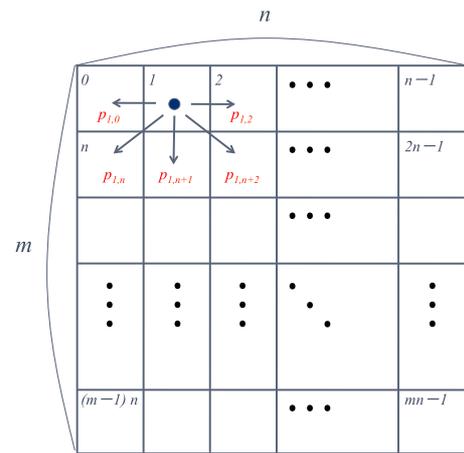


図 1 シミュレーション領域

Fig. 1 Simulation area.

3.1 移動確率に基づくノード移動

提案するモビリティモデルにおいても、従来の Waypoint モビリティモデルと同様に、各ノードは領域内から目的地を選択し、その目的地に向かって一定速度で直線移動を行う。また、ノードは目的地に到着すると、その目的地に一定時間停止した後、新たに別の目的地を選択し、再びその目的地に向かって直線移動を行う。ただし、シミュレーション領域は、図 1 のように $m \times n$ 個の正方形セルに分割され、左上のセルから順に番号を付与されるものとする。そのため、ノードが目的地を選択する際には、まず、目的地とするセル（目的地セル）を選択し、その後、そのセル内からランダムに目的地を選択する。この目的地セルの選択は移動確率に基づき行われる。移動確率 $p_{i,j}$ は、セル i から移動しようとするノードが、セル j を目的地セルとする確率を表し、以下の式が成り立つ。

$$\sum_{j=0}^{mn-1} p_{i,j} = 1 \quad (0 \leq i \leq mn-1) \quad (1)$$

移動確率は出発地と目的地のセル間ごとに定めるため、シミュレーションにおいて、 $p_{i,j}$ のために必要となるメモリ量は $O(mn^2)$ となる。また、目的地セルの選択する際に行う $p_{i,j}$ の参照は、セル数にかかわらず一定時間で実行できるため、既存の Waypoint モビリティモデルと同程度の計算量でシミュレーションを実行することができる。

次に、移動確率に基づきノードが移動する枠組みでは、いかなる移動確率に対しても、ノード密度分布に関する定常状態が存在することを示す。ある時刻 t において、セル j を出発地セルとして移動するノード数（ノード流量）を f_j^t 、ノードがセル i, j 間を移動するのに要する時間を $T_{i,j}^{pass}$ 、到着地で停止する時間を T^{pause} とする。セル j から出発するノードの数はそのセルに到着したノードの数と同じであるため、 f_j^t に関し、下記の式が成り立つ。

$$f_j^t = \sum_{i=0}^{mn-1} f_i^{t-T_{i,j}^{pass}-T^{pause}} p_{i,j} \quad (0 \leq j \leq mn-1) \quad (2)$$

本論文では、ノード密度分布が変化しない状況を、単位時間あたりのセル間のノード流量が一定である状態とし、これを定常状態と定義する。定常状態において、単位時間あたりにセル j を出発地セルとして移動するノード数を f_j とすると、式 (3) が成り立つ。

$$f_j = \sum_{i=0}^{mn-1} f_i p_{i,j} \quad (0 \leq j \leq mn-1) \quad (3)$$

式 (3) は以下の行列式 (4) に変形できる。

$$\underbrace{\begin{pmatrix} p_{0,0}-1 & p_{0,1} & \cdots & p_{mn-1,0} \\ p_{0,1} & p_{1,1}-1 & \cdots & p_{mn-1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{0,mn-1} & p_{1,mn-1} & \cdots & p_{mn-1,mn-1}-1 \end{pmatrix}}_{(\mathbf{P}-\mathbf{E})} \underbrace{\begin{pmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{mn-1} \end{pmatrix}}_{\mathbf{F}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{0}} \quad (4)$$

この式における f_j が解を持つ、すなわち、セル間を移動するノード数がある一定数で推移する状況が存在するためには、(i) $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ 、(ii) $\mathbf{P} - \mathbf{E} = \mathbf{0}$ 、(iii) $(\mathbf{P} - \mathbf{E})$ が非正則、のうち、いずれかを満たさなければならない。(i) は、各セルを出発地セルとして移動するノードの数が 0、すなわちどのノードも移動しないことを意味するため、モビリティモデルの定義から外れる。また、(ii) は、 $p_{i,i}$ のみが 1 で他の $p_{i,j}$ はすべて 0 であるため、どのノードもつねに同じセルの中を移動し続けることを意味し、目的に適さない。したがって、式 (3) が解を持つためには、(iii) を満たさなければならない。式 (1) より、行列 $(\mathbf{P} - \mathbf{E})$ における各列の総和はつねに 0 であるため、この行列のランクは必ず $m \times n$ 未満である。つまり、この行列はつねに非正則となっており、あらゆる移動確率に対して、セル間を移動するノード数が変動しない状況、すなわちノード密度分布に関するある定常状態が存在することを示している。

3.2 ノード密度分布の導出

上記の変数と式を用いることで、各セルのノード密度を移動確率により表すことができる。移動確率とノード密度の関係を示すために、各セルについて、ある時間においてそのセルに存在するノードの数とそのセルの通過に要する時間（通過時間）を導出する。

まず、通過時間を導出する方法について説明する。図 2 のように、出発地セル i から目的地セル j へと移動する

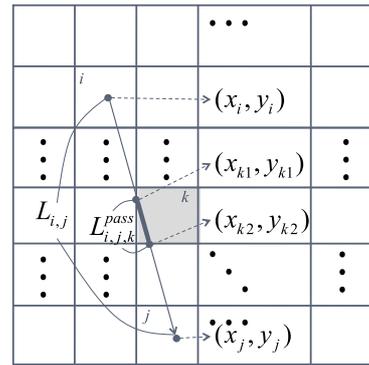


図 2 セル k における通過距離
Fig. 2 Transit distance on cell k .

ノードは、セル i 内の点 (x_i, y_i) から出発し、セル j 内の点 (x_j, y_j) を目的地として移動するものとする。このノードがセル i の出発地からセル j の目的地へと移動する距離は、 $\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ で表せる。ノードの出発地と目的地は、出発地セル内、目的地セル内からランダムに決定されることから、セル i 内の出発地とセル j 内の目的地のすべての組合せに対し移動距離を求め、その平均を計算することにより、セル i, j 間の平均移動距離 $L_{i,j}$ を導出することができる。点 (x_i, y_i) と点 (x_j, y_j) を結ぶ線分とセル k の辺との交点をそれぞれ (x_{k1}, y_{k1}) 、 (x_{k2}, y_{k2}) とすると、セル i からセル j へと移動するノードがセル k を通過するときの通過距離を、 $\sqrt{(x_{k2} - x_{k1})^2 + (y_{k2} - y_{k1})^2}$ の式で求めることができる。出発地と目的地のすべての組合せに対し、この通過距離を求め、平均をとることで、セル i からセル j へと移動するノードがセル k を通過するときの平均通過距離 $L_{i,j,k}^{pass}$ を求めることができる。ここで、すべてのノードは同じ速度 V で移動し、目的地到着後にその地点で同じ時間 T^{pause} だけ待機するものと仮定する。このとき、セル i からセル j へと移動するノードがセル k を通過するときの平均通過時間 $T_{i,j,k}^{pass}$ は以下の式で表すことができる。

$$T_{i,j,k}^{pass} = \begin{cases} \frac{L_{i,j,k}^{pass}}{V} & (j \neq k) \\ \frac{L_{i,j,k}^{pass}}{V} + T^{pause} & (j = k) \end{cases} \quad (5)$$

$T_{i,j,k}^{pass}$ の値が 0 である場合は、セル i からセル j へと移動するノードはセル k を通過しないことを意味する。また、定常状態におけるセル間のノードの平均速度を基に $T_{i,j,k}^{pass}$ を求めることで、確率分布からノードの速度を導出するなど、各ノードの速度が異なる状況を扱うことができる。その際、速度が遅いノードは、速度が速いノードと比較し、セル間に滞在する時間が長くなるため、定常状態におけるセル間のノードの平均速度は、基となる確率分布の平均とは異なる点に注意する必要がある [20]。

次に、あるセルに存在するノードの数を表現する。セル i から出発しセル j へと移動する単位時間あたりのノード

の数は、 $f_i p_{i,j}$ で表せる。さらに、セル i からセル j へ移動する際に、セル k を通過する時間は $T_{i,j,k}^{pass}$ であるため、セル i からセル j へ移動しているノードのうちセル k 内に存在するノードの数は、 $f_i p_{i,j} T_{i,j,k}^{pass}$ (図 3) と表せる。出発地セルと目的地セルのすべての組合せにおける通過ノード数の総和が、セル k 内に存在するノードの総数 d_k となる。

$$d_k = \sum_{i=0}^{mn-1} \sum_{j=0}^{mn-1} f_i p_{i,j} T_{i,j,k}^{pass} \quad (6)$$

前述した行列式 (4) は、そのランクが必ず $m \times n$ 未満であるため、移動確率 $p_{i,j}$ と単位時間あたりにセルから出発するノード数 f_j との関係のみを示しており、これらの変数の値を確定することはできない。ある移動確率に対するノード密度分布を求めることができるよう、式 (4) に別の式を加えることで、そのランクを $m \times n$ とする。ここでは、 d_i をノード総数の割合と考え、 d_i の総和を 1 と仮定し、式 (7) と式 (6) より式 (8) を導く。式 (8) と式 (4) を組み合わせた行列のランクは $m \times n$ となり、 f_j を求めることができる。また、この f_j と式 (6) から、 d_i を計算することができる。このような手続きを経ることにより、ある移動確率 $p_{i,j}$ に対するノード密度分布を導出することができる。

$$\sum_{k=0}^{mn-1} d_k = 1.0 \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^{mn-1} \sum_{k=0}^{mn-1} p_{0,j} T_{0,j,k}^{pass} \cdot f_0 + \sum_{j=0}^{mn-1} \sum_{k=0}^{mn-1} p_{1,j} T_{1,j,k}^{pass} \cdot f_1 + \dots + \sum_{j=0}^{mn-1} \sum_{k=0}^{mn-1} p_{mn-1,j} T_{mn-1,j,k}^{pass} \cdot f_{mn-1} = 1.0 \quad (8)$$

3.3 定常状態からシミュレーションを開始する条件

シミュレーションにおいて、定常状態に到達する前の過渡的な状態を避けるためには、定常状態におけるセル間のノード流量をシミュレーション開始時より再現する必要がある。提案するモビリティモデルでは、各ノードの目的地

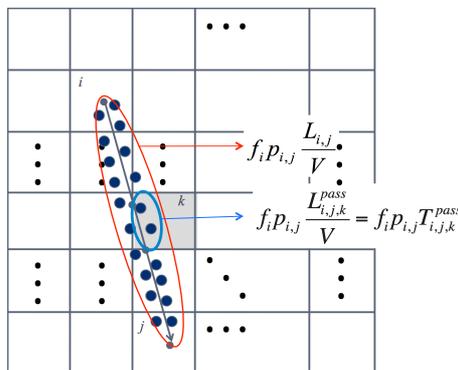


図 3 セル k におけるノード数

Fig. 3 The number of nodes at cell k .

を適切に設定することにより、シミュレーション開始時から、そのようなセル間のノード流量を再現する。定常状態では、セル k において、出発地セル i から目的地セル j を移動するノードの数は $f_i p_{i,j} T_{i,j,k}^{pass}$ である。そのため、セル k において、目的地セルが j であるような割合は式 (9) で表せる。この初期移動確率 $p'_{k,j}$ を利用し、各ノードの初期目的地セルを設定することで、定常状態のノード密度分布をシミュレーション開始時から再現でき、新たに目的地を選択する際には、 $p_{i,j}$ を適応することで、そのノード密度分布を維持することができる。

$$p'_{k,j} = \sum_{i=0}^{mn-1} \frac{f_i p_{i,j} T_{i,j,k}^{pass}}{d_k} \quad (9)$$

4. 指定されたノード密度分布を実現する移動確率導出問題

本章では、提案するモビリティモデルにおいて、移動確率のみを調整することで、与えられたノード密度分布を実現する移動確率を導出する手法を提案する。また、その手法において、ノード密度分布だけでなく、個々のノードの動きに対する条件を指定できるよう、いくつかの移動特性を移動確率によって定義し、移動制約に対する制約を満たした移動確率を導出する。

4.1 移動確率による移動特性

本節では、移動確率によるノード移動に対し、ノード移動の移動特性として、後戻り性とランダム性の 2 つを定義する。

ある方向に移動していたノードが突然反転して、逆方向へと移動するような状況は現実世界ではあまり観測されない。このような不自然な動きをするノードを減らすために、ノードの後戻り性を定義する。ここでは、ノードの後戻りとは、ある方向から目的地セルに到達した後、来た方向へと移動することとする。以下、移動確率によりノードの後戻り性を表す。図 4 で示されるように、すべてのセル

A_i^{LT}	A_i^T	A_i^{RT}
A_i^L	i	A_i^R
A_i^{LB}	A_i^B	A_i^{RB}

図 4 セル i を中心としたセル集合の分割

Fig. 4 Geographical cell grouping for cell i .

を、セル i を中心に、セル i との位置関係に従い、8つのセル集合に分割する。セル i から θ 方向に存在するセル集合を A_i^θ とする。また、単位時間あたりに、 A_i^θ に属するセルを出発地とし、かつセル i を目的地として移動するノード流量と、セル i を出発地セルとして A_i^θ に属するセルへノードが移動する確率を、それぞれ f_θ , $p_{i\theta}$ とする。これらはそれぞれ式 (10), (11) で表せる。セル i において後戻りするようなノード、つまり、セル i を出発地として移動するセルのうち、ある方向からセル i に到達した後、同じ方向へと移動するノードの割合は式 (12) で表せる。

$$f_{\theta i} = \sum_{k \in A_i^\theta} f_k p_{ki} \quad (10)$$

$$p_{i\theta} = \sum_{k \in A_i^\theta} p_{ik} \quad (11)$$

$$b_i = \frac{\sum_\theta f_{\theta i} p_{i\theta}}{f_i} \quad (12)$$

また、現実的なノード移動の指標の1つとして、ノード移動のランダム性があげられる。たとえば、一方通行の道や複数のノードが集団で移動するような場合には、どのノードも同じ方向に移動するため、ランダム性が低い移動といえる。一方、スクランブル交差点をノードが移動する場合には、交差点を様々な方向から横切っていくため、ランダム性が高い移動といえる。ここでは、移動方向だけでなくノード密度を考慮し、あるセル i におけるノード移動のランダム性を、図4に示すようなセル集合ごと、セル集合の合計ノード密度とそのセル集合へと移動するノード数の相関とする。その相関が高ければ、各セル集合のノード密度に応じてノードが移動していることから、ランダム性が高いと判断する。以下、移動確率によりノード移動のランダム性を表す。 A_i^θ に属するセルのノード密度の和は式 (13) で表せる。 A_i^θ に属するセルへと移動するノードとしては、直接そのセルを目的地セルへと到達するノードだけでなく、直線経路上に障害物が存在するために直接 A_i^θ に到達できない場合を考慮し、別のセルを経由し、最終的に A_i^θ に属するセルへと到達するノードも含めるものとする。その際、図5に示されるように、2つの直線経路がなす角度が90度より小さい場合には、大きく迂回していると判断しその対象から外す。この条件を満たし、 A_i^θ に属するセルへ移動する確率 $p'_{i\theta}$ は式 (14) で表される。ここで $N_{i,k}$ は、セル i を出発し、別の目的地セルを経由してセル k に到達する経路のうち、経路がなす角度が90度より大きくなるようなセルの集合である。

$$d_i^\theta = \sum_{k \in A_i^\theta} d_k \quad (13)$$

$$p'_{i\theta} = \sum_{j \in A_i^\theta} p_{i,j} + \sum_{j \in N_{i,k} \setminus A_i^\theta} \sum_{k \in A_i^\theta} p_{i,j} p_{j,k} \quad (14)$$

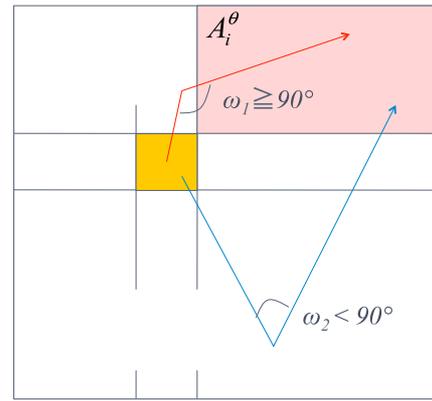


図5 自然なノードの動きと不自然なノードの動き

Fig. 5 Natural and unnatural node movement for region A_i^θ .

4.2 移動確率導出問題の定式化

次に、提案するモビリティモデルにおいて、与えられたノード密度分布を実現する移動確率を導出する問題を定式化する。セル k において実現したいノード密度の割合 D_k 、ノードの移動速度 V 、目的地到着後の停止時間 T^{pause} は、あらかじめ与えられるものとする。また、3.2節に示したように、これらを用いて、 $T_{i,j,k}^{pass}$ を計算できる。これらの入力パラメータから、移動確率 $p_{i,j}$ 、セル k におけるノード密度 d_k 、単位時間あたりにセル j を出発地セルとして移動するノード数 f_j を導出する。

● 入力パラメータ

- 入力ノード密度：セル k において実現したいノード密度の割合 D_k
 $\sum_{k=0}^{mn-1} D_k = 1$ を満たすものとする。
- ノードの移動速度 V
- 目的地到着後の停止時間 T^{pause}

● 出力パラメータ

- 移動確率 $p_{i,j}$
- 出力ノード密度：移動確率 $p_{i,j}$ により実現されるセル k のノード密度の割合 d_k
- セル j を出発地セルとして移動するノード数 f_j

指定されたノード密度分布を実現する移動確率を導出する問題を、 D_k と d_k の差を最小にする以下の式を目的関数とする最適化問題とし、指定されたノード密度分布に近いノード密度分布を実現する移動確率を導出する。3.2節で示した方法により、様々な移動確率に対し、 d_k および f_j を導出できるため、この最適化問題では、目的関数の値が最も小さい移動確率を解として導出する。

$$\min \sum_{k=0}^{mn-1} |d_k - D_k| \quad (15)$$

ただし、3.1節や3.2節で示したように、ノード密度分布を維持するために、以下の制約を満たさなければならない。

$$\sum_{k=0}^{mn-1} d_k = 1 \quad (16)$$

$$\forall i \sum_{j=0}^{mn-1} p_{i,j} = 1 \quad (17)$$

$$\forall i, j \ 0 \leq p_{i,j} \leq 1 \quad (18)$$

4.3 移動確率導出アルゴリズム

上記のような非線形の制約式を持つ最適化問題は、一般的に厳密解を求めることが困難である。そこで、移動確率を段階的に変化させ、目的関数の値を少しずつ向上させることにより、指定されたノード密度分布を実現する。提案方式では、4.2節で示した制約式(16), (17), (18)を満たしつつ、 $p_{i,j}$ のうち2つの移動確率の値を変化させ、目的関数の値が向上した場合にのみ、その移動確率の値の変更を採用し、それを繰り返すことで、指定されたノード密度分布を実現する移動確率を導出する。以下、移動確率導出方法の詳細について述べる。

まず、すべての移動確率が等しい状態、すなわち $p_{i,j} = 1/mn$ ($\forall i, j$) を初期の移動確率とする。このアルゴリズムでは、4.2節の制約が満たせるよう、同一のセルを出発地セルとする2つの移動確率に対してのみ、それらの値を変更する操作を行う。具体的には、セル*i*からセル*j*へノードが移動する確率 $p_{i,j}$ を α だけ増加させ、セル*i*からセル*k* ($k \neq j$) へノードが移動する確率 $p_{i,k}$ を α だけ減少させる(図6)。この α の値は、値が変更された2つの移動確率が $[0, 1]$ の範囲に収まるよう、 $p_{i,k} \leq \alpha \leq 1 - p_{i,j}$ の範囲からランダムに決定される。また、このとき、 $p_{i,j}$ から4.1節で示した移動特性を計算し、求められる移動特性が満たされる範囲で α を決定することにより、指定されたノード密度分布を実現するだけでなく、ノード移動に対する制約を満たすモビリティモデルを導出することができる。この移動確率の変更による影響は、すべてのセルのノード密度へと波及するため、移動確率の変化からセルのノード密度への影響を予測することは困難である。そこで、提案方式では、移動確率の操作に関わるセル*i*, *j*, *k* をランダムに決定し、その操作により得られた移動確率に

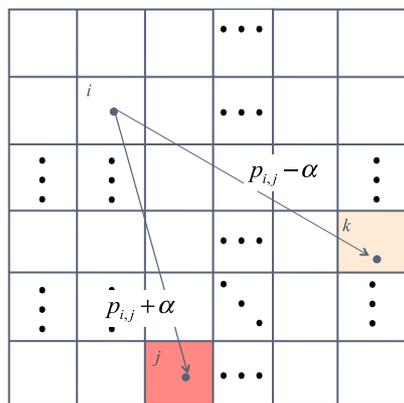


図6 移動確率に対する操作

Fig. 6 Cell selection to change the node density distribution.

より目的関数の値が向上した場合には、その移動確率に対し次の操作を行う。一方、目的関数の値が向上しなかった場合には、その移動確率を破棄し、以前の移動確率に対し次の操作を行う。この移動確率に対する試行を繰り返し、目的関数の値が十分に小さくなったとき、アルゴリズムを終了する。

提案アルゴリズムでは、各セルのノード密度を段階的に目的のノード密度に近づけるため、より細かなセルに領域を分割し、対象とするセル数が増加する場合には必要となる計算時間も増加する。このような場合には、密度分布の対称性を考慮する、地理的な制約を加えるなど、移動確率に対する操作を効率的に行う必要がある。

5. 提案するモビリティモデルの評価

本章では、指定されたノード密度分布に対し、提案手法が適切な移動確率を導出できることを示す。ここでは、Random Waypoint のノード密度分布 (I) RWP、一様なノード分布 (II) Flat、左のセルほどノード密度が高く、右のセルほどノード密度が低い分布 (III) Gradation、ノード密度の高いセルと低いセルが交互に並ぶ (IV) Checkerboard、2つのマンハッタンモビリティ [2] のノード密度分布 (V) Manhattan1、(VI) Manttan2 の6つのノード密度分布に対し、評価実験を行った。どの実験においても、 $100(m) \times 100(m)$ のシミュレーション領域を対象とし、600秒間のシミュレーションを実施した。表1に実験環境を示す。

まず、提案手法により導出された移動確率を用いて、指定されたノード密度分布が実現できているかについて確認を行った。(I) 以外は、提案手法によりこれらのノード密度分布を実現する移動確率を導出する。また、(V), (VI) では、建物や障害物に相当する非常に低いノード密度を指定することで、道となる領域のみをノードが移動するモビリティを生成している。指定されたノード密度分布と、提案手法により導出された移動確率を適用したシミュレーションにより測定された平均ノード密度分布を表2に示す。誤差が0.1%以上であったセルは網掛けで示している。同様に、測定されたノード密度分布のスナップショットを図7に示す。これらの図表から、提案手法により導出された移動確率を用いることで、指定された様々なノード密度分布

表1 シミュレーション環境
Table 1 Simulation environment.

Region	100 (m)×100 (m)
Duration	600 (s)
Number of Nodes	200
Node Velocity	1.5 (m/s)
Pause Time	15 (s)
Radio Range	10 (m)

表 2 指定されたノード密度分布 (左) と測定された平均ノード密度分布 (右) (%)

Table 2 Input (left) and measured (right) density (%).

2.25	3.09	3.16	3.11	2.29
3.10	5.36	6.11	5.52	3.00
3.25	6.12	7.31	6.08	3.26
3.04	5.36	6.17	5.45	3.04
2.19	3.07	3.25	3.13	2.28

(I) RWP (測定された平均ノード密度分布のみ)

4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3.99	4.05	4.00	4.01	3.90
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.01	4.02	4.10	3.96	4.04
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3.92	4.03	4.02	4.04	4.01
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3.97	3.96	3.99	4.01	4.01
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.07	4.01	3.93	3.97	4.01

(II) Flat

6.00	5.00	4.00	3.00	2.00	5.85	5.08	4.00	2.99	2.03
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00	5.96	5.02	4.00	2.98	1.97
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00	6.00	4.90	3.97	3.01	2.00
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00	6.00	4.95	3.95	2.97	2.10
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00	6.09	5.07	4.03	3.05	2.02

(III) Gradation

3.00	4.00	3.00	4.00	3.00	3.01	3.92	2.94	4.00	3.00
4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	4.14	6.04	4.07	6.07	4.03
3.00	4.00	3.00	4.00	3.00	2.98	3.99	3.94	4.01	2.92
4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	3.94	5.99	4.02	6.01	3.91
3.00	4.00	3.00	4.00	3.00	3.01	3.99	3.01	4.00	3.00

(IV) Checkerboard

4.00	4.50	5.00	4.50	4.00	3.95	4.41	4.96	4.41	3.95
4.50	0.00	5.50	0.00	4.50	4.39	0.41	5.34	0.41	4.39
5.00	5.50	6.00	5.50	5.00	5.00	5.43	5.92	5.43	5.00
4.50	0.00	5.50	0.00	4.50	4.39	0.41	5.34	0.41	4.39
4.00	4.50	5.00	4.50	4.00	3.95	4.41	4.96	4.41	3.95

(V) Manhattan1

4.00	5.00	6.00	5.00	4.00	3.96	4.92	5.89	4.92	3.96
5.00	0.00	0.00	0.00	5.00	4.86	0.35	0.14	0.35	4.86
6.00	6.50	7.00	6.50	6.00	5.92	6.45	6.85	6.45	5.92
5.00	0.00	0.00	0.00	5.00	4.86	0.35	0.14	0.35	4.86
4.00	5.00	6.00	5.00	4.00	3.96	4.92	5.89	4.92	3.96

(VI) Manhattan2

を実現できていることが分かる. 表 2 に示されるように, (II), (III), (IV) の例においては, 指定されたノード密度と測定されたノード密度との差は, たかだか 0.15% であった. 一方で, 表 2 の (V), (VI) から, 他のノード密度分布と比較し, 建物, 障害物セルのノード密度の誤差が大きいたことが示されているが, 0.5% 未満に抑えることができおり, マンハッタンモビリティのノード密度分布もほぼ実現できているといえる.

6. 提案手法を利用した性能評価事例

本章では, ノード密度分布とネットワーク性能の関係性を示すことを目的とし, 提案手法を利用し, MANET の

ルーティングプロトコルである AODV を対象とした性能評価を行った. 具体的には, 各ノードが 60 秒間隔でランダムに選択された宛先ノードにパケットを送信するとき, (I) RWP, (II) Flat, (V) Manhattan1, (VI) Manhattan2 の 4 つのノード密度分布に対して, 表 1 のパラメータでシミュレーションを実行した. 図 8 は, この 4 つの事例において, 各セルにおいてパケットが通過した数を示している. (I) においては領域の中央にネットワークトラフィックが集中している一方で, (II) では領域の境界付近のトラフィックが多くなっていることが分かる. これは, (II) のノードが外周セルで止まる頻度が高く, 外周セルを通るパケットの経路が安定しやすいからであると考えられる. ま

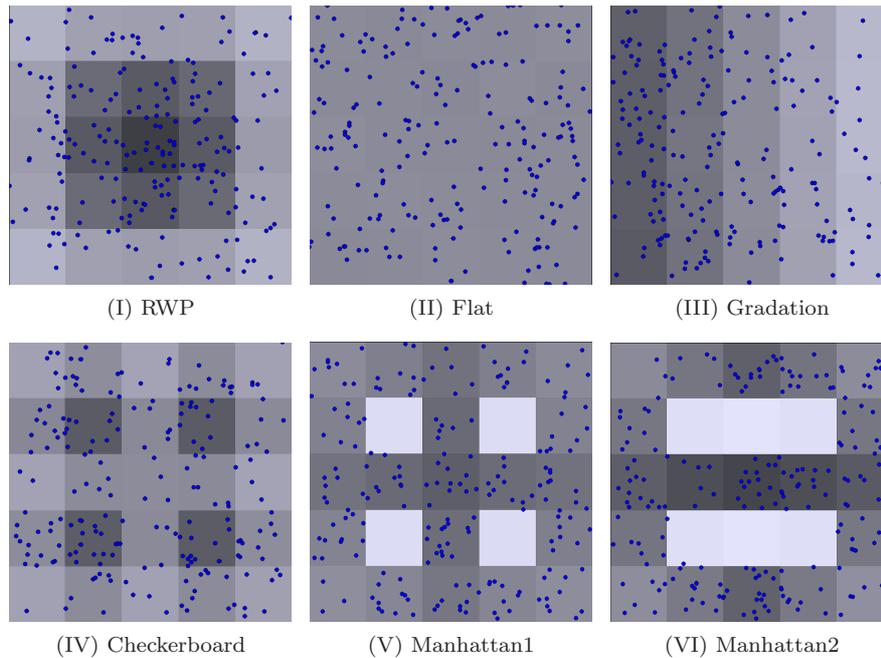


図 7 測定されたノード密度分布のスナップショット
 Fig. 7 Snapshots of six node density distributions.

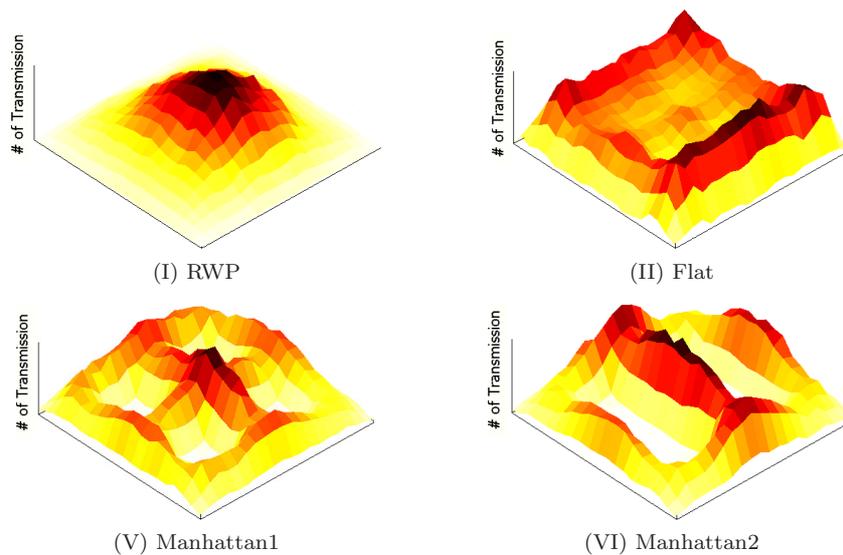


図 8 AODV を用いたときの各セルごとのパケット通過数
 Fig. 8 Number of packet transmission on ad-hoc networks.

た、(V) と (VI) では、パケットが道の交差部分のセルを通る必要があることから、それらのセルにおけるトラフィックが高くなっていることが分かる。さらに、(V) と (VI) を比較すると、(VI) では交差部分となる箇所が少ないことから、(VI) の領域中央の道により多くのトラフィックが集中していることが分かる。このように、様々なノード密度分布を実現するモビリティモデルを利用することで、ノード密度分布とネットワーク性能の関連性を簡単に評価することができる。

7. まとめと今後の課題

本論文では、様々なノード密度分布を実現することがで

きる新しい Waypoint モビリティモデルを提案した。提案手法では、与えられたノード密度分布を実現する移動確率を導出する問題を定式化し、ヒューリスティックアルゴリズムによって解を得ている。また、評価実験を行い、様々なノード密度分布に対し、提案手法により、そのノード密度分布を実現する移動確率を導出できることを示した。さらに、AODV を対象に、提案手法で生成したモビリティモデルを用いることで、ノード密度分布とネットワーク性能との関連性を簡単に評価できることを示した。今後の課題として、より現実的なシミュレーションで性能評価を行えるように、動的なノード密度分布の変化や、ノードの生成・消滅を考慮したモビリティモデルを考案していきたい。

参考文献

- [1] Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A survey of mobility models for ad hoc network research, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.2, No.5, pp.483–502 (2002).
- [2] Bai, F., Sadagopan, N. and Helmy, A.: The IMPORTANT Framework for Analyzing the Impact of Mobility on Performance of Routing for Ad Hoc Networks, *Ad Hoc Networks Journal*, Vol.1, No.4, pp.383–403 (2003).
- [3] Royer, E.M., Melliar-Smith, P.M. and Moser, L.E.: An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks, *IEEE Int. Conference on Communications*, pp.857–861 (2001).
- [4] Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.C. 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).
- [5] Gavish, B. and Sridhar, S.: The impact of mobility on cellular network configuration, *Wireless Networks*, Vol.7, No.2, pp.173–185 (2001).
- [6] Bettstetter, C.: Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.5, No.3, pp.55–67 (2001).
- [7] Chu, T. and Nikolaidis, I.: Node density and connectivity properties of the random waypoint model, *Computer Communications*, Vol.27, No.10, pp.914–922 (2004).
- [8] Rojas, A., Branch, P. and Armitage, G.: Experimental validation of the random waypoint mobility model through a real world mobility trace for large geographical areas, *Proc. 8th ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'05)*, pp.174–177 (2005).
- [9] Hyytia, E., Lassila, P. and Virtamo, J.: Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model with Applications, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.5, No.6, pp.680–694 (2006).
- [10] Gloss, B., Scharf, M. and Neubauer, D.: A More Realistic Random Direction Mobility Model, *The 4th COST 290 MC Meeting* (2005).
- [11] Hsu, W.J., Merchant, K., Shu, H.W., Hsu, C.H. 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).
- [12] Yoon, J., Liu, M. and Noble, B.: Sound mobility models, *Proc. ACM Mobile Int. Symp. on Computing and Networking (MobiCom'03)*, pp.205–216 (2003).
- [13] Lin, G., Noubir, G. and Rajaraman, R.: Mobility Models for Ad hoc Network Simulation, *Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'04)*, Vol.1, pp.454–463 (2004).
- [14] Yoon, J., Liu, M. and Noble, B.: Random Waypoint Considered Harmful, *Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'03)*, Vol.2, pp.1312–1321 (2003).
- [15] Navidi, W. and Camp, T.: Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.3, No.1, pp.99–108 (2004).
- [16] McGuire, M.: Stationary distributions of random walk mobility models for wireless ad hoc networks, *Proc. ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'05)*, pp.90–98 (2005).
- [17] Nain, P., Towsley, D., Liu, B. and Liu, Z.: Properties of Random Direction Models, *Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'05)*, Vol.3, pp.1897–1907 (2005).
- [18] Boudec, J.L. and Vojnovic, M.: Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models, *Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'05)*, pp.1312–1321 (2005).
- [19] Yoon, J., Liu, M. and Noble, B.: A General Framework to Construct Stationary Mobility Models for the Simulation of Mobile Networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.5, No.7, pp.860–871 (2006).
- [20] Camp, T., Navidi, W. and Bauer, N.: Improving the accuracy of random waypoint simulations through steady-state initialization, *Proc. Int. Conference on Modeling and Simulation*, pp.319–326 (2004).

推薦文

モバイルノードの様々なノード密度分布を実現するモビリティモデルを生成するという問題設定と提案手法に新規性があり、より現実的なプロトコル性能評価を行ううえでも提案手法は実用性があることから、学術的な価値が高いと考えられる。

(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会
主査 竹下 敦)



上野 瑛次郎 (学生会員)

平成 21 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業、平成 23 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におけるノードモビリティのモデリング手法に関する研究に従事。



廣森 聡仁 (正会員)

平成 16 年大阪大学大学院基礎工学部情報科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。同年同大学助手。現在, 同大学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。