

## ネットワーク性能に対するノード密度分布の影響を 評価するためのモビリティ生成手法

上野 瑛次郎<sup>†1</sup> 廣 森 聡 仁<sup>†1</sup>  
山 口 弘 純<sup>†1</sup> 東 野 輝 夫<sup>†1</sup>

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。このような影響を調べるために様々なモビリティモデルが提案されているが、既存のモビリティモデルにおいては、主に個々のノードの移動について規定するものが多く、ノードの移動によって生じノード全体として観測されるノード密度分布のようなモビリティ特性について、様々なものを実現することが困難である。本稿では、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だけでなく、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。

### Mobility Models for Evaluating Impacts of Node Density Distribution on Network Performance

EIJIRO UENO,<sup>†1</sup> AKIHITO HIROMORI,<sup>†1</sup>  
HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>†1</sup> and TERUO HIGASHINO<sup>†1</sup>

In mobile wireless networks, node mobility has a great impact on performance of communication protocols and applications. Many mobility models are 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 the node density distribution. Through experiments, we show that for given variety of node density distributions the method can determine the corresponding selection probabilities of destinations of the waypoint model with sufficient randomness of movement like the RWP model. We also show this feature is valuable for elaborate performance evaluation of mobile wireless networks.

### 1. ま え が き

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]. 特に、モバイルアドホックネットワーク (MANET) 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、ノードの移動やそれによって生じるノード分布を十分に考慮する必要がある。例えば、近い将来、事故防止を目的とした車車間通信が一般的に用いられることも想定されるが、個々の車両は道路上を走行するだけでなく、信号で停止することを繰り返すため、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多くの客が滞在するような状況が頻繁に観測される。車や人が不均一に散らばったこのような状況でさえ、無線システムは問題なく稼働していなければならない。MANET のルーティングプロトコルや DTN のデータ収集プロトコルなどは様々なノード分布において動作することが求められる。

モバイルワイヤレスネットワークの性能評価においてよく用いられるモビリティモデルに、Random Waypoint Model(RWP) が挙げられる [3]. 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。このようなランダムモビリティを用いることで、無線システムの性能評価においていくつかの特性を示すことができるが、同時に欠点も存在する。例えば、RWP では、領域中央のノード密度が高く、周辺のノード密度が低くなりやすく、都市部での車車間通信や MANET アプリケーションの性能評価に必要となるような、様々なノード密度分布を生成することは困難である。一方、トレースベースのモビリティモデルでは、現実的な歩行者の動きを再現することが可能であるが、モビリティモデルに対する要求毎に、新たな観測データが必要するため、多大なコストを要する。

本稿では、Weighted Way Point モビリティを拡張し、様々なノード密度分布を実現する Waypoint モビリティモデルを生成する手法を提案する。提案手法では、ノードの移動とノード密度分布の関係性を解析し、指定されたノード密度分布を実現するだけでなく、そのノード密度分布を維持し続けることができるノード移動の重み付けを導出する。また、評価実験では、ノードが均一に散らばっている状況や、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、それらを実現するノード移動の重み付けを導出できていることを示す。さらに、生成したモビリティモデルを利用し、MANET のルーティングプロトコル AODV の性能評価を行い、ノード密度分布とネット

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院 情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

ワーク性能の関連性を簡単に評価できることを示す。

## 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 [1, 2], 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 [4].

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) [3] や、Random Direction Model (RD) [5] が挙げられる。これらの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、これらのモビリティモデルを対象とし、モビリティ特性の性質を解析する研究もいくつか行われている [6-8]. これらの研究では、ノード密度分布は一律ではなく、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、ノードがランダムに移動する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 [9, 10]. Gloss らは、目的地や移動速度などの移動パラメータをセル毎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 [9]. また、Hsu らは、Weighted Way Point Model (WWP) を提案している [10]. 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利用し、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、トレースに基づくモビリティモデルと同じように、この手法は歩行者のトレース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、トレースデータを得るためのコストが問題となる。

また、このようなランダムモビリティモデルにおいては、ノード速度分布とノード密度分布が、初期状態と定常状態では異なるため、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 [11, 12]. 定常状態に到達する前の状態は、モビリティ特性が変化しており解析に向かないため、評価実験においては避けるべきである。そのため、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 [13-18]. 文献 [13] では、RWP におけるノード速度分布に着目し、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 [11]. このモビリティモデルでは、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 [15] 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の解析を行っている。Nain らは、RD におけるノード密度分布を解析し、RWP と比較してその有用性について言及している [16]. また、文献 [17] 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"

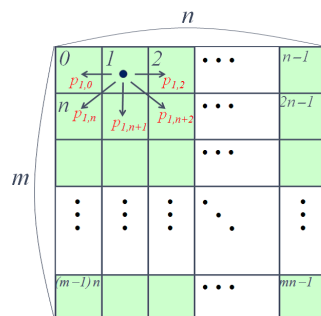


図1 提案モビリティモデルにおけるシミュレーション領域

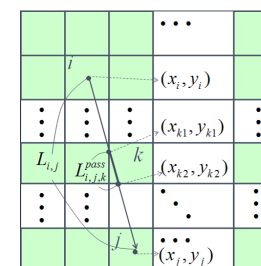


図2 セル k における通過時間

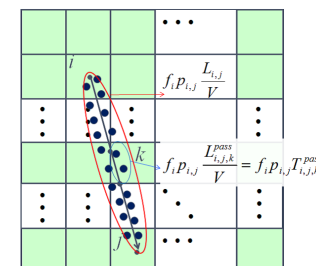


図3 セル k におけるノード数

が提案されている。

これらの様々な手法と比較し、本稿で提案する手法は下記のような特徴を持つ。まず、与えられた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ことができる。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り、遭遇時間間隔のような様々なモビリティ特性による影響を調査することができる。次に、上記の目的のために、定常状態を維持し続けるモビリティモデルの特性を定式化し、同様に、そのために必要なノードの動きを式として表している。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. 提案する Waypoint モビリティモデル

本章では、時間が経過したとしても、シミュレーション領域内のノード密度分布を維持できる Waypoint モビリティモデルを提案する。まず、提案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、移動確率に基づきノードが移動する限り、いかなる移動確率であっても、ノード密度分布に関する定常状態が存在することを示す。さらに、移動確率と、その移動確率に基づきノードが移動した結果に生じるノード密度分布の関係性を示す。最後に、提案モビリティをシミュレーションにおいて使用する際、定常状態からシミュレーションを開始するための初期条件を示す。

### 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移動を行う。但し、提案するモビリティモデルにおいては、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ている。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。

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

次に、移動確率に基づきノードが移動する枠組みにおいて、いかなる移動確率においても、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。ある時間  $t$  において、セル  $j$  を出発地セルとして移動するノード数(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  $T_{i,j}^{pass}$  とすると、 $f_j^t$  に関し、下記の式が成り立つ。

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

ノード密度分布がある定常状態で落ち着いていると仮定すると、各セル間を移動するノード数は一定と考えられ、定常状態において、単位時間あたり、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、下記の式が成り立つ。

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

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

式(3)は行列式(4)に変形できる。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に変動しない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  $p_{i,j}$  は全て0であるため、どのノードも常に同じセルの中を移動し続けることを意味するため、目的に適さない。従って、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常に0であるため、この行列のランクは  $m \times n$  にはなりえない。つまり、この行列は常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に変動しない状況が存在することがわかる。これは、各セル上の存在するノード数に変動しないことを意味し、あらゆる移動確率の組に対し、ノード密度分布に関する定常状態が存在することがわかる。

### 3.2 ノード密度分布の導出

移動確率とノード密度分布の関係を示すためには、各セルについて、そのセルを通過するノードの数と、そのセルの通過に要する時間を導出する必要がある。

まず、ノードがあるセル上を通過するのに要する時間を示す。あるセル  $i$  からセル  $j$  へと移動するノードについて、通過するセル毎についてその通過時間を導出するために、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ノードについて考える。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、それぞれの地点に対し、セル内の積分を取ることでセル  $i, j$  間の平均移動距離  $L_{i,j}$  を導出できる。各セルの一辺の長さを  $z$  とすると、 $L_{i,j}$  は次のように求めることができる。

$$L_{i,j} = \frac{1}{2z^2} \int_0^z \int_0^z \int_0^z \int_0^z \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} dx_i dx_j dy_i dy_j$$

同様に、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  $L_{i,j,k}^{pass}$  は、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、以下の式で求めることができる。

$$L_{i,j,k}^{pass} = \frac{1}{2z^2} \int_0^z \int_0^z \int_0^z \int_0^z \sqrt{(x_{k2} - x_{k1})^2 + (y_{k2} - y_{k1})^2} dx_i dx_j dy_i dy_j$$

全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する。従って、セル  $i$  からセル  $j$  へ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。 $T_{i,j,k}^{pass}$  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。

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

次に、あるセルを通過するノードの数を示す。単位時間あたりに、セル  $i$  から出発し、セル  $j$  へと移動するノードの数は、 $f_i p_{i,j}$  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。様々な出発地セルと目的地セルの組み合わせでノードがセル  $k$  を通過するため、セル  $k$  内に存在するノード

ドの総数  $d_k$  は以下の式で表せる.

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

式 (4) は、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  $f_j$  との関係を示すに留まっており、式 (4) のみでは、それぞれの変数の値を確定することができない. ある移動確率に対するノード密度分布を求めるために、ノード総数が 1 と仮定すると (式 (7)), 式 (6) と式 (7) より式 (8) が導かれる. さらに、式 (8) と式 (4) から  $f_j$  を求めることができ、 $d_i$  のそれぞれの値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、また、 $p_{i,j}$  に基づき、ノードを移動させる限り、このノード密度分布を維持することができる.

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

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

### 3.3 定常状態からシミュレーションを開始する条件

本節では、定常状態のノード密度分布から、シミュレーションを開始する方法について説明する. 定常状態のノード密度分布を再現するためには、ノードの初期位置を適切に設定するだけでなく、それを維持できるよう、各ノードの初期の目的地セルを適切に設定する必要がある. まず、 $d_i$  に基づき、セル  $i$  内に存在するノード数を決定し、その数のノードをセル内にランダムに配置することで、ノードの初期位置を設定する. 次に、各ノードの初期の目的地セルを設定する. ある時間において、セル  $k, j$  間を移動するノードの内、セル  $i$  に存在するノードの数は  $f_k p_{k,j} T_{k,j,i}^{pass}$  で表せる. 従って、ある時間において、セル  $i$  に存在するノードの内、セル  $j$  を目的地セルとするノードの総数は、 $\sum_{k=0}^{mn-1} f_k p_{k,j} T_{k,j,i}^{pass}$  で表せる. これを割合としたものが、移動確率  $p'_{i,j}$  であり、これは、定常状態において、セル  $i$  内に存在するノードの中で、セル  $j$  を目的地セルとして移動するノードの割合を示す. この移動確率  $p'_{i,j}$  に基づき、各ノードの初期の目的地セルを設定する.  $p'_{i,j}$  を適応した後、新たに目的地を選択する際には、従来の  $p_{i,j}$  を適応することで、定常状態のノード密度分布

を維持することができる.

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

## 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

前章では、移動確率からその移動確率により実現されるノード密度分布が求められることを示した. しかしながら、評価実験においては、各ノードの動き方を示す移動確率でモビリティモデルを指定するよりも、ノード全体として観測されるノード密度分布によりモビリティモデルを指定できることが好ましい. 本章では、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手法について述べる. 任意のノード密度分布を実現させる方法として、各ノードに初期配置されたセル内のみを移動させる方法や、目的地セル毎に待機時間を調整する方法が挙げられる. しかしながら、前者の方法はモビリティモデルの目的に適さず、後者の方法は遭遇時間に代表されるモビリティ特性への影響が考えられる. 一方、提案手法では、上記のような意図的な操作は行わず、移動確率のみを調整することで、様々なノード密度分布を生成することを目指す.

### 4.1 移動確率導出問題の定式化

まず、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  $D_k$ 、ノードの移動速度  $V$ 、目的地到着後の停止時間  $T^{pause}$  は、あらかじめ定数として与えられるものとする. 3.2 節に示したように、これらの定数を用いて、 $T_{i,j,k}^{pass}$  が計算され、ある移動確率からノード密度分布を求めることができる.

以下に、この問題における入力パラメータと出力パラメータを示す.

#### ● 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  $D_k$
- 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  $d_k$
- セル  $j$  を出発地セルとして移動するノード数  $f_j$

入力として与えられたノード密度分布に近いノード密度分布を実現できるよう、入力されたノード密度と出力されたノード密度の差を最小にする以下の目的関数を利用し、その時の

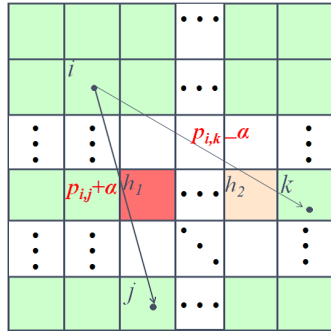


図4 移動確率に対する操作

移動確率を解とする.

$$\min \sum_{k=0}^{mn-1} |d_k - D_k| \quad (10)$$

但し, 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, 各変数について, 以下の制約を満たさなければならない.

$$\sum_{k=0}^{mn-1} d_k = 1 \quad (11)$$

$$\forall i \sum_{j=0}^{mn-1} p_{i,j} = 1 \quad (12)$$

$$\forall i, j \ 0 \leq p_{ij} \leq 1 \quad (13)$$

#### 4.2 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のが困難である. 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, 4.1 節で示した制約を満たしつつ,  $p_{i,j}$  のうち二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, 提案方式の詳細について述べる.

まず, 全ての移動確率が等しい  $p_{i,j} = 1/mn (\forall i, j)$  を初期の移動確率とする. このアルゴリズムでは, 4.1 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二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  $\alpha$  だけ増加させ, セル  $i$  からセル  $k$  へノード

- (I) Random Waypoint(RWP)
- (II) Flat
- (III) Gradation
- (IV) Checkerboard
- (V) Manhattan1
- (VI) Manhattan2

表1 評価実験で対象とするノード密度分布

Region	100(m)×100(m)
Duration	1800(s)
Number of Nodes	200
Node Velocity	1.5(m/s)
Pause Time	[10-20](s)
Radio Range	10(m)

表2 シミュレーション環境

が移動する確率  $p_{i,k}$  を  $\alpha$  だけ減少させる (図4). この  $\alpha$  の値は, 値が変更された二つ移動確率が  $[0, 1]$  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. この移動確率の変更による影響は, 全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時, アルゴリズムを終了する.

#### 5. 提案する Waypoint モビリティモデルの評価

本章では, 様々なノード密度分布でシミュレーションを実行できるよう, 評価実験を通し, 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とそのモビリティモデルの性質を示す. ここでは, 表1の(I)から(VI)までの六つのノード密度分布に関して, いくつかの実験を行った. 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, 1800 秒間のシミュレーションを実施した. 表2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. 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応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3に示す. 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5に示す. (II) は一様なノード分布, (III) は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, (IV) はノード密度の高いセルと低いセルが交互に並ぶ分布となっている. また, (V), (VI) はマンハッタンモビリティ [19] におけるノード密度分布を表している. これら二つのノード密度分布では, 建物や障害物となるセルに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. これらの図からわかるように, 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を

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
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

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

(II) Flat

6.00	5.00	4.00	3.00	2.00
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00
6.00	5.00	4.00	3.00	2.00

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

(III) Gradation

3.00	4.00	3.00	4.00	3.00
4.00	6.00	4.00	6.00	4.00
3.00	4.00	3.00	4.00	3.00
4.00	6.00	4.00	6.00	4.00
3.00	4.00	3.00	4.00	3.00

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

(IV) Checkerboard

4.00	4.50	5.00	4.50	4.00
4.50	0.00	5.50	0.00	4.50
5.00	5.50	6.00	5.50	5.00
4.50	0.00	5.50	0.00	4.50
4.00	4.50	5.00	4.50	4.00

3.95	4.41	4.96	4.41	3.95
4.39	0.41	5.34	0.41	4.39
5.00	5.43	5.92	5.43	5.00
4.39	0.41	5.34	0.41	4.39
3.95	4.41	4.96	4.41	3.95

(V) Manhattan1

4.00	5.00	6.00	5.00	4.00
5.00	0.00	0.00	0.00	5.00
6.00	6.50	7.00	6.50	6.00
5.00	0.00	0.00	0.00	5.00
4.00	5.00	6.00	5.00	4.00

3.96	4.92	5.89	4.92	3.96
4.86	0.35	0.14	0.35	4.86
5.92	6.45	6.85	6.45	5.92
4.86	0.35	0.14	0.35	4.86
3.96	4.92	5.89	4.92	3.96

(VI) Manhattan2

表 3 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)(%)

実現できていることがわかる。表 3 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、高々 0.1% であった。一方で、表 3 の (V)、(VI) から、提案手法により、マンハッタンモビリティの正確なノード密度分布の実現は困難であることがわかるが、建物、障害物セルのノード密度を 1% 未満に抑えることができ、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。

また、六つのノード密度分布において、各ノードの無線リンク数を表す次数を測定した。表 4 に、シミュレーションにより測定されたノード次数を示す。当然ながら、ノードの次数はノード密度分布とほぼ同じ形になっており、ノード密度が高いセルに存在するノードほど、次数が高い結果となっている。

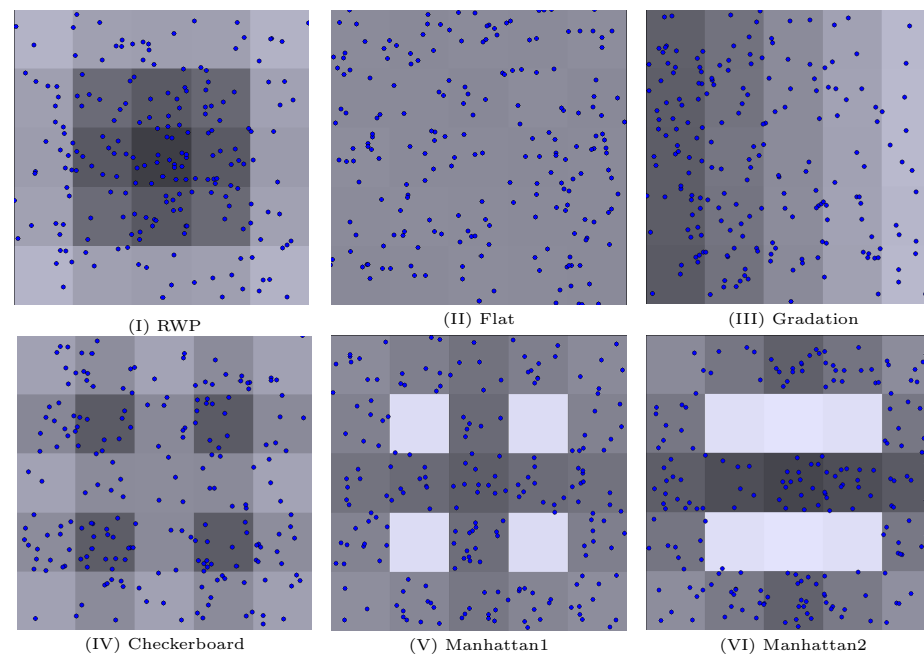


図 5 測定されたノード密度分布のスナップショット

あるノードの無線通信範囲を別のノードが通過するのに要する時間を遭遇時間と定義する。図 6 に、六つのノード密度分布における遭遇時間の相補累積分布関数 (CCDF, complementary cumulative distribution function) を示す。この図に示されるように、(I) の遭遇時間が他のノード密度分布と比較し、やや短くなっている。しかしながら、このグラフの両軸は対数軸であり、この差は軽微であり、提案手法により全く異なるノード密度分布を生成しても、(I) に示される RWP の遭遇時間とほぼ同じ傾向を示していることがわかる。

さらに、六つのノード密度分布において、ノードが異なる二十個のセルを訪れるのに要する時間 (巡回時間) を計測した。図 7 に、巡回時間の CCDF を示す。この図より、(II) の巡回時間が他のシナリオに比べて短くなっていることが分かる。これは、ノードが一樣に分布しているため、どのセルも通過する確率がほぼ等しいからと考えられる。一方で、ノード密度の高いセルとノード密度の低いセルが離れている (I) や (III) では、多くのセルを訪れるのに時間がかかっている。このようなノード密度分布においては、ノードはノード密度



3.09	4.89	5.04	4.50	3.02
4.81	8.19	9.02	7.68	4.68
5.00	8.71	10.68	9.39	5.17
4.64	7.84	9.15	8.29	4.66
2.80	4.43	4.63	4.73	2.87

(I) RWP

8.12	7.72	5.39	3.80	2.36
9.44	8.08	5.92	4.09	2.52
9.07	7.62	5.92	4.33	2.63
8.68	7.85	5.71	4.20	2.71
7.65	7.43	5.39	4.11	2.61

(II) Flat

4.63	5.39	5.28	5.50	5.02
5.60	5.97	5.76	6.06	5.46
6.09	6.21	6.05	6.07	5.80
6.10	6.55	6.17	6.20	5.48
5.25	5.53	5.88	6.08	5.05

(III) Gradation

4.34	6.26	4.97	6.09	4.23
5.87	8.39	6.32	8.15	5.89
4.94	6.12	5.61	6.32	5.14
5.85	8.26	6.05	8.07	6.20
4.55	5.87	4.61	5.87	4.42

(IV) Checkerboard

4.95	5.69	7.01	5.74	4.92
5.75	2.25	6.90	2.41	5.39
6.74	7.01	8.71	6.86	6.51
5.61	2.27	6.78	2.40	5.45
4.89	5.65	6.96	5.78	5.07

(V) Manhattan1

4.82	6.35	7.68	6.88	5.28
6.16	2.01	0.43	2.23	6.87
7.97	7.96	9.11	8.35	8.21
6.38	2.05	0.63	2.18	6.35
5.02	6.30	7.28	6.16	5.23

(VI) Manhattan2

表 4 各セル毎の平均ノード次数

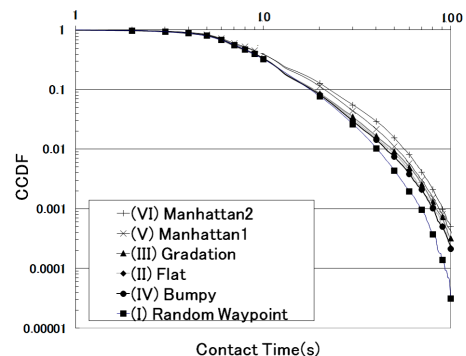


図 6 遭遇時間の相補累積分布

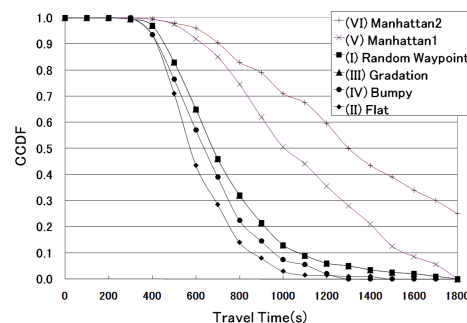


図 7 巡回時間の相補累積分布

の低いセルを目的地として選びにくく、ノード密度の高いセル付近を移動する傾向にあるためである。また、(V) や (VI) のシナリオでは、非常にノード密度の低いセルが存在するため、他のシナリオと比較し二十個のセルを訪れるまでに相当の時間がかかっている。これらの結果から、ノード密度の高いセルと低いセルの位置によって、巡回時間は大きく異なることが分かる。

## 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

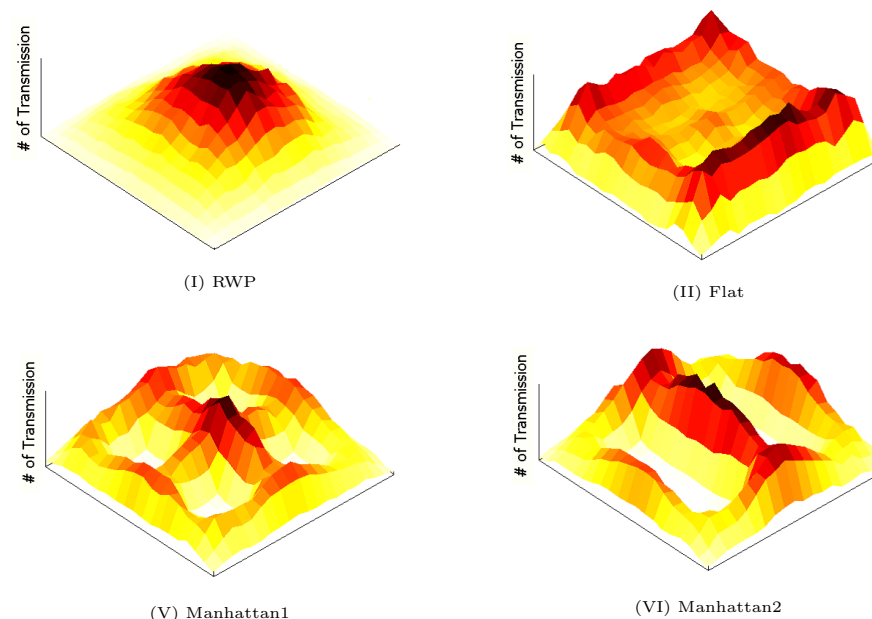


図 8 各セル毎の packets 通過数

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時、(I) RWP, (II) Flat, (V) Manhattan1, (VI) Manhattan2 の四つのノード密度分布に対して、表 2 のパラメータでシミュレーションを実行した。図 8 は、この四つの事例において、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わかる。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わかる。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わかる。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し、かつそのノード密度分布を維持できるモビリティモデルを生成する手法を提案した。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。今後の課題としては、移動確率を導出するアルゴリズムや高速化や、正六角形のセル形状を導入し、より広い領域を対象により複雑なノード密度分布を生成することを目指す。

## 参 考 文 献

- 1) Gavish, B. and Sridhar, S.: The impact of mobility on cellular network configuration, *Wireless Networks*, Vol.7, No.2, pp.173–185 (2001).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 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).
- 8) Hyytia, E., Lassila, P. and Virtamo, J.: Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model with Applications, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.5, No.6, pp.680–694 (2006).
- 9) Gloss, B., Scharf, M. and Neubauer, D.: A More Realistic Random Direction Mobility Model, *The 4th COST 290 MC meeting* (2005).
- 10) 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).
- 11) 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).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) Navidi, W. and Camp, T.: Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.3, No.1, pp.99–108 (2004).
- 15) 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).
- 16) 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).
- 17) Boudec, J.-Y.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).
- 18) Yoon, J., Liu, M. and Noble, B.: A General Framework to Construct Stationary Mobility Models for the Simulation of Mobile Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.5, No.7, pp.860–871 (2006).
- 19) 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).