

推薦論文

時刻により変化する都市歩行流を再現する モビリティモデルの提案と評価

前田 久美子^{†1} 中村 雅俊^{†1} 梅津 高朗^{†1,†2}
山口 弘純^{†1,†2} 東野 輝夫^{†1,†2}

ネットワークシミュレーションにより無線ネットワークアプリケーションの正確な評価を行うには、より現実的なモビリティモデルが必要とされている。本論文では都市における歩行者の行動に焦点を当て、時間的な変化が再現できるモビリティモデルである Time Slot Urban Pedestrian Flows (TSUPF) を提案する。提案モデルにより、駅前で電車が到着すると一時的に人が増加する、イベント会場から大勢の観客が周辺の駅などに向かい徐々に拡散していく、といったような時間的な変化のあるシナリオに基づいた性能評価を行うことが可能となる。ワイヤレスメッシュネットワークシステムにおける負荷分散プロトコルの評価事例を通して、提案モデルの有用性を示す。

Representing Temporal Density Variation in Urban Pedestrian Flows

KUMIKO MAEDA,^{†1} MASATOSHI NAKAMURA,^{†1}
TAKA AKI UMEDU,^{†1,†2} HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2}
and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

In order for the precise evaluation of mobile wireless network applications, more realistic mobility models are needed in wireless network simulations. In this paper, we propose a new mobility model called *Time Slot Urban Pedestrian Flows* (TSUPF) that focuses on the behavior of pedestrians in urban areas and can represent temporal variation of their density on roads. Through the case study of a load-balancing protocol in wireless mesh networks, we show the usefulness of the proposed mobility in the performance evaluation of wireless networks.

1. はじめに

モバイルワイヤレスネットワークのシミュレーションでは、モビリティモデルがプロトコルやアプリケーションの性能に影響を与えることが知られており^{1),2)}、近年、現実的なモビリティモデルに関する研究がさかに行われている^{3)–8)}。

我々は無線ネットワークシミュレーションにおいて、現実の都市の歩行者の動きをシミュレーションするためのモビリティモデル Urban Pedestrian Flows (UPF)⁹⁾ を提案し、無線ネットワーク向けシミュレータ MobiREAL¹⁰⁾ に実装してその有用性を示した。しかし、UPF モデルでは道路ごとの歩行者密度の偏りは再現できなかったが、その偏りは静的なものであり、時間による密度の変化を再現することはできなかった。本研究では、この UPF モデルを道路単位でのノード密度の時間的な変化を再現できるように拡張した新しいモビリティモデル Time Slot Urban Pedestrian Flows (TSUPF) を提案する。

TSUPF では、時間を一定間隔ごとに分割したタイムスロットとして取り扱い、いくつかの観測地点における任意のタイムスロットでの通行量（単位時間あたりに通過するノード数）を入力として与える。提案モデルでは、特徴的な変化を示すような地点における通行量を与えておけば、通行量が与えられた場所や時間がある程度限られていても、経験則に基づいて与えられていない箇所の通行量を補完し、個々のノードの移動経路や通行量の遷移の現実性を考慮したモビリティシナリオを合成できるような仕組みを備えている。このモデルにより、たとえば電車が到着する前後で駅前の通行量が一時的に増加する、あるいはライブや野球などのイベントの終了を起点にイベント会場から大勢の観客が周辺の駅などに向かい徐々に拡散していく、といったような時間的な通行量の変化が比較的容易に再現可能となり、時々刻々と変化する状況に対応する必要があるプロトコルなどの性能評価をより現実的な環境下で行うことが可能となる。ワイヤレスメッシュネットワークシステムにおける負荷分散プロトコルの評価事例を通して、提案モデルの有用性を示す。

†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 2007 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウムにて報告され、MBL 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。

2. 関連研究

モバイルワイヤレスネットワークのシミュレーションによる性能評価のために、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デルは多数提案されている³⁾⁻⁸⁾。たとえば、文献 3) では建物(障害物)による電波の遮断を再現する領域のモデルと、ノードが建物を回避して移動するモビリティモデルを導入し、ネットワークシミュレータ GloMoSim¹¹⁾ と ns-2¹²⁾ において提案するモデルを利用できるよう拡張している。また、文献 4) ではシミュレーション領域を住宅地やビジネス街など特徴に応じて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、既存の交通計画手法を用いて推定している。また、文献 5) では Weighted Way Point (WWP) モデルを提案しており、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。また文献 8) では、無線ネットワークのトレースからユーザの移動を推定し、推定した移動から生存時間や主要な建物間の遷移確率などモビリティの特徴を示すメトリクスを抽出、さらにそれらメトリクスに基づいたシミュレーション用のモビリティモデルの提案を行っている。

しかし既存研究で提案されているモビリティモデルはホットスポットなどの主要な領域におけるノードの密度を再現することを目的としているものがほとんどであり^{4),5),8)}、領域間の移動は Random Way Point を利用するなど非常に抽象化されている。このため、携帯電話ネットワークのように単一の基地局が比較的大きなエリアをカバーするような環境の評価を行う場合や、図書館や喫茶店などに導入された無線 LAN のようにユーザが長時間ほとんど移動しないような環境におけるユーザ数や負荷を評価する場合ではある程度現実的な評価結果を得ることができるが、地下街全体を複数のアクセスポイントでカバーするネットワーク上を移動端末がローミングしていくといったようなユーザの移動を考慮したシステムでは、歩行者の移動経路などに性能が大きく影響を受けるため十分な評価結果を得ることが難しい。一方、提案する TSUPF モデルは与えられた道路構造上で現実的な移動経路を見積もり、道路単位での密度を取り扱うモデルであり、既存のモデルに比べて前述のような環境でもより現実に近い性能が得られるものと考えられる。また歩行者密度の時間的な変化に関しても、既存手法では半日から 1 日にわたるマクロな視点でのホットスポットなどにおける密度の変化を再現しているが、提案手法は数十分から数時間にわたる市街地などにおける道路上の密度の変化を、移動経路の現実性を考慮したうえで再現することを目的としており、

既存研究とは違ったアプローチでモビリティの現実性を考慮したモデルであるといえる。

無線ネットワークシミュレーションのモビリティモデルには交通工学などの分野のモデルを採用しているものも存在しているが⁴⁾、既存のモデルを利用しているか否かにかかわらずシミュレーション用のモビリティモデルを提案するうえで重要なことは、シミュレーションによる性能評価に対するモビリティモデルの影響や有用性を明らかにすることであるといえる。移動経路や空間的な密度分布の違いによる性能評価への影響は我々が提案する UPF モデルによりすでにくらか評価を行っている¹⁰⁾。本論文では無線メッシュネットワークにおける負荷分散を目的としたプロトコルに関するケーススタディを通し、密度の時間的な変化を再現可能なモビリティモデルである TSUPF の有用性を示す。

3. Time Slot Urban Pedestrian Flows

本章では、通行量の時間的な変化が再現可能な Time Slot Urban Pedestrian Flows (TSUPF) モビリティのモデル化手法について説明する。TSUPF モデルでは、市街地などにおける道路上を駅や店、オフィスなどの建物から別の建物へと移動する歩行者をモデル化の対象としており、A. 歩行者は出発地から目的地までを最短経路で移動する、B. 移動速度を大きく低下させるような混雑は発生しない(歩行者密度はつねに一定以下である)という仮定をおいている。よって、非常に混雑した環境や道に迷うなどで屋外をふらふら歩き続けるような歩行者は TSUPF ではモデル化の対象外となる。また、対象となる領域については各道路沿いに建物が立ち並ぶような比較的都心部を想定しており、いたるところが移動経路の始点・終点となりうると考えている。

本章では、まず 3.1 節で TSUPF でのモデル化に必要な入力である道路構造を表すグラフと通行量について、次に 3.2 節で通行量が与えられていない箇所の通行量の補完手法について、最後に 3.3 節で個々の歩行者の移動軌跡の導出手法について説明する。

3.1 入力

まず、対象とするシミュレーション領域における交差点や駅などの建物の入り口を頂点、道路を辺とした有効グラフ $G = (V, E)$ を入力として指定する。

提案手法の入力として必要とされるのはいくつかの道路における歩行者の単位時間あたりの通行量(単位時間あたりに道路上のある地点を通過する歩行者数)の調査のみであり、経路に関する歩行者への詳細なアンケートなどは必要としない。またすべての観測地点について時刻による通行量の変化を観測する必要はなく、たとえば駅前などの特徴的な変化を示す一部の地点についてのみ、ある程度の時間にわたる通行量の変化を観測し、他の地点につ

いては任意の時刻における観測値のみを入力として与えた場合でも、次節で説明する手法により経験則に基づいて通行量を補完し、歩行流を導出する。

辺 e_x の時刻 t における通行量の観測値を $R_{x,t}$ とする。提案モデルでは簡単のため、時刻 t は対象時間を適当な周期で分割したタイムスロット番号を表すものとする。たとえば全体で 600 秒分の観測結果があり、1 タイムスロットの時間を 60 秒とした場合、各観測値は時刻 0~9 のいずれかのタイムスロットにおける通行量として与えられる。なお道路構造を有効グラフとして取り扱うため、実世界における同じ道路上でも歩行者の移動方向により通行量を個別に扱う必要がある。また、通行量の代わりに密度の観測値を入力として用いることも可能である。その場合は、移動方向ごとの歩行者の比率を指定し、文献 9) に示される式により密度から通行量に変換して利用する。

3.2 通行量の補完

本節では与えられた通行量から、他の道路・時刻の通行量を補完する手法について説明する。提案手法では先に述べた 2 つの仮定に加え、C. “人通りの多い道路、少ない道路は時刻によらずある程度決まっている”，という経験則が成り立つものとして通行量の補完値を決定する。

補完値を導出する前に、まず補完値の計算に利用する“時間補完値”と“経路分散度”を定義する。辺 e_x での時刻 t における通行量の時間補完値 $t_{x,t}$ とは、前述の経験則 C. を考慮して通行量を補完した値であり、辺 e_x での他の時刻における通行量から時刻 t の通行量を線形補完した値とする。時間補完値 $t_{x,t}$ は、辺 e_x において時刻 t より前(後)でかつ t に最も近い通行量が与えられている時刻を t_1 (t_2) とすると、次の式で定義される。

$$t_{x,t} = \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} R_{x,t_1} + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} R_{x,t_2} \quad (1)$$

また、辺 e_x から辺 e_y への経路分散度 d_{xy} とは、辺 e_x を通過する/した歩行者のうち、辺 e_y を通過すると期待される歩行者の割合を表したものである。経路分散度の一例を図 1 に示す。グラフ内の括弧外の数字は、中央付近の最も太い線で表された辺を e_x とした場合の、矢印付き実線で示された各辺 e_y に対する経路分散度 d_{xy} を示している。

各辺 e_x から他の辺 e_y への経路分散度 d_{xy} は次のように計算する。まず、与えられた道路構造グラフ G 上で各頂点間の最短経路を計算し、それら経路のうち辺 e_x を含む経路に含まれるすべての辺の集合およびそれらの接点からなるグラフを G_x とする。この G_x を、辺 e_x を基準とした最短経路グラフと呼ぶ。なお頂点間の最短経路が複数存在する場合はどれか 1 つの経路のみを最短経路として採用することとする。図 1 の例では最短経路グラフ

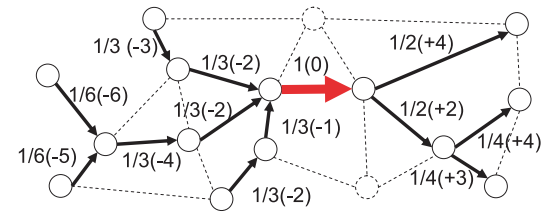


図 1 経路分散度と移動時間
Fig.1 Distribution degree and travel time.

G_x は実線で示される辺と頂点に相当する。仮定 A. に基づき、辺 e_x を通過する歩行者の経路は最短経路グラフ G_x 上に存在するものとする。そのため、図 1 において、太線で示される辺 e_x から点線で示される辺 e_y への経路分散度 d_{xy} は 0 となる。

最短経路グラフ G_x は辺 e_x の始点・終点をそれぞれを根とした 2 つの木構造を辺 e_x で接続したグラフと見なすことができる。なお、 e_x の始点側のグラフを辺 e_x の入力グラフ G_{i_x} 、終点側のグラフを出力グラフ G_{o_x} と呼ぶ。このとき、経路分散度 d_{xy} を最短経路グラフ G_x 上の各節点 v で以下の条件が成り立つように決定する。

- (1) v の入力辺間(または出力辺間)の経路分散度の比は、各辺の時間補完値の比に等しい。
- (2) v の入力辺の経路分散度の総和は出力辺のそれに等しい。

ここで条件 (1) は経験則 C. に基づくものである。なお、この経路分散度は通行量の補完値を決定するための目安とする値であり、最終的に導出されるモビリティにおいて該当する値そのものを表すものではない。

また、辺 e_x の中点から辺 e_y の中点までの移動時間を l_{xy} で表し、これを両辺の中点間の経路長を与えられた平均移動速度定数で割ったものとして定義する。図 1 の括弧内の数字が、太線の辺 e_x から各辺 e_y までの移動時間 l_{xy} の例である。なお、辺 e_x の出力グラフ G_{o_x} に含まれる辺 e_y への移動時間 l_{xy} は正の値、入力グラフ G_{i_x} に含まれる辺への移動時間は負の値とする。

辺 e_y の時刻 $t + l_{xy}$ における通行量の観測値 $R_{y,t+l_{xy}}$ のうち d_{yx} の割合に相当する歩行者は、時刻 t で辺 e_x を通過する/したと期待される。そこで、辺 e_x の時刻 t における通行量のうち d_{xy} の割合は、通行量 $R_{y,t+l_{xy}}$ が観測値として与えられていた場合はその通行量に含まれており、その値の影響を受けると考える。

上記の考えに基づき、まず辺 e_x の時刻 t における通行量のうちの程度の割合が他辺で

の観測通行量による影響を受けるかを導出する．辺 e_x の入力グラフ G_{i_x} 上の辺 e_y のうち、その辺の時刻 $t + l_{xy}$ に観測通行量が与えられており、かつ辺 e_y から辺 e_x に至る経路上のどの辺 e_z の時刻 $t + l_{xz}$ にも観測通行量が与えられていないような辺の集合を $S_{i_x,t}$ とする．辺 e_x の時刻 t の通行量のうちのいくらかは、 $S_{i_x,t}$ に含まれる辺の観測通行量により決定されると考えられる．そのような通行量の総和 $\alpha_{x,t}$ を以下の式で定義する．

$$\alpha_{x,t} = \sum_{e_y \in S_{i_x,t}} d_{yx} * R_{y,t+l_{xy}}$$

また、辺 e_x の入力グラフ G_{i_x} 上の葉の接辺 e_y のうち、その辺の時刻 $t + l_{xy}$ に観測通行量が与えられておらず、かつ辺 e_y から辺 e_x に至る経路上のどの辺 e_z の時刻 $t + l_{xz}$ にも観測通行量が与えられていないような辺の集合を $F_{i_x,t}$ とする． $F_{i_x,t}$ に含まれる辺の経路分散度の総和 $f_{x,t}$ が、辺 e_x の通行量のうち他辺の観測通行量により決定されない割合となる．

$$f_{x,t} = \sum_{e_y \in F_{i_x,t}} d_{xy}$$

また、出力グラフ G_{o_x} についても同様に、他辺により決定される分の通行量 $\beta_{x,t}$ と他辺により決定されない割合 $g_{x,t}$ を定義する．

以上により定義された $f_{x,t}$ 、 $\alpha_{x,t}$ 、 $g_{x,t}$ 、 $\beta_{x,t}$ を用い、辺 e_x の時刻 t における通行量の補完値 $R'_{x,t}$ を以下の式で定義する．

$$R'_{x,t} = \alpha_{x,t} + (t_{x,t} + \delta)f_{x,t} = \beta_{x,t} + (t_{x,t} - \delta)g_{x,t} \quad (2)$$

この式により、他辺での観測通行量により決定されない分の通行量を、時間補完値 $t_{x,t}$ とのずれが入力グラフの値と出力グラフの値とで均等になるように定めている． δ の方程式 (2) から得られる式とあわせて、最終的に通行量の補完値 $R'_{x,t}$ を以下の式で定義する．

$$R'_{x,t} = \frac{f_{x,t}\beta_{x,t} + g_{x,t}\alpha_{x,t} + 2f_{x,t}g_{x,t}t_{x,t}}{f_{x,t} + g_{x,t}} \quad (f_{x,t} \neq 0 \vee g_{x,t} \neq 0) \quad (3)$$

$$R'_{x,t} = \frac{\alpha_{x,t} + \beta_{x,t}}{2} \quad (f_{x,t} = g_{x,t} = 0)$$

通行量が入力として与えられていないすべての辺と時間において式 (3) により $R'_{x,t}$ を計算し、この値を利用して個々の歩行者の移動経路を決定する．

3.3 TSUPF に基づくモビリティモデル

先にも述べたとおり前節で利用した経路分散度は通行量の補完値を決定するための目安となる値であり、その値を採用した場合、通行量の補完値どうして矛盾が生じるため移動軌跡の決定には利用しない．本節では入力として与えられた通行量と前節の手法により導出さ

れた通行量の補完値を満たし、かつ各歩行者は必ず最短経路上を移動するという条件のもとで個々の歩行者の移動軌跡を生成する手法について説明する．

まず初期状態として、各辺（道路）の通行量に応じた数の歩行者を生成し、辺上に一様に分布するよう配置する．以降、歩行者は生成された辺を基準とした最短経路グラフ上に存在する辺のみをたどって移動する．いずれかの頂点（交差点）に到着した歩行者は、最短経路グラフに含まれる到着頂点を始点とした辺のうち、辺の通行量より算出される現在までの想定通過人数に対する、現在までの実際の通過人数の割合（通行量達成割合）が最も小さい辺を経路として選択する．ただし、その頂点を始点とした辺が存在しない場合（最短経路の終端に到着した場合）や、選択した辺の通行量達成割合がすでに 1 を超えていた場合は到着した頂点を経路の終点とし、その場で歩行者を消去する．また、一定時間間隔（たとえばタイムスロットが切り替わるタイミング）で通行量達成割合が 1 に満たない辺を探索し、該当する辺上に一様に不足分の歩行者を生成・配置する．

この手法では各歩行者の移動経路を動的に決定するため、歩行者が領域上に存在する時間（生存時間）や各地点を移動経路の始点・終点とする（各地点で生成・消去される）歩行者の数を制御することが難しい．4.1 節ではモデル化の一例においてこれらの値を評価する．

4. 実験

本章では TSUPF によりモデル化されたモビリティについて評価を行うとともに、ワイヤレスメッシュネットワークシステムにおける負荷分散プロトコルの評価事例を通して、提案する時間的な変化モデルの有用性を示す．

4.1 モビリティの評価

本章では JR 大阪駅前、500 m×500 m の範囲における歩行流のモデル化を行い、歩行者の生存時間および頂点（交差点）ごとの歩行者生成、消去割合を評価した．提案モデルでは直接取り扱っていないモビリティの特徴量を評価することで、提案モデルについて考察を行う．

実験では文献 9) で時間変化のない UPF モビリティを導出するのに用いた観測値を利用し、そこに駅に通じる道路である辺 3↔7 における通行量の変化を指定するデータを加えることで、時間的な変化のあるモビリティを作成した．

密度の計測はデジタルカメラを用いて撮影を行い、撮影範囲内に存在する歩行者の数と、道路幅・道路長から算出した．大阪駅前の地図と道路のグラフ構造を図 2 に、密度の観測値を表 1 に示す．グラフの頂点数は 34、辺の数は 43 である．43 カ所の道路の密度の計測

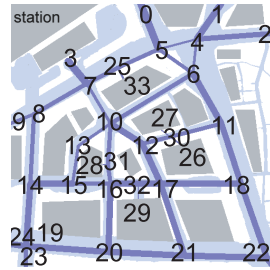


図 2 大阪駅前の地図
Fig. 2 Downtown Osaka city.

表 1 密度の測定結果
Table 1 Measured density of streets.

辺	幅	密度	辺	幅	密度	辺	幅	密度
9-8	7	0.033	19-20	12	0.035	11-30	8	0.040
8-7	8	0.059	20-21	12	0.023	30-12	8	0.040
7-25	8	0.041	21-22	12	0.027	0-5	14	0.034
25-5	8	0.041	8-14	8	0.045	5-6	7	0.050
5-4	4	0.025	14-19	12	0.026	6-11	12	0.060
4-2	10	0.013	19-23	8	0.058	11-18	12	0.063
15-13	6	0.005	3-7	14	0.060	1-4	12	0.002
13-10	6	0.005	7-10	6	0.065	4-6	5	0.030
10-6	8	0.030	10-31	8	0.046	30-26	3	0.013
14-15	12	0.008	31-16	8	0.045	30-27	3	0.066
15-16	8	0.006	16-20	12	0.008	28-31	3	0.025
16-32	12	0.012	10-12	12	0.015	32-29	3	0.012
32-17	12	0.012	18-22	12	0.026	25-33	3	0.053
17-18	12	0.013	12-17	12	0.012			
24-19	12	0.032	17-21	12	0.012			

幅の単位 = m, 密度の単位 = person/m²

に要した時間は学生 2 人で約 30 分であった。

TSUPF モビリティの作成では、静的な UPF モビリティの作成に用いた上記観測値を 0 秒の状態のものとして利用し、さらに辺 3→7, 7→3 において、各辺の 0 秒の通行量を 1 とした場合にその通行量との比が図 3 に示されるような変化を示す通行量を、図 3 において ‘+’ や ‘×’ で示される時刻に与えた。モデル化した時間は 600 秒、1 タイムスロットは 10 秒とした。歩行者の移動速度は 1.1~1.7 m/s の一様分布に従って決定した。

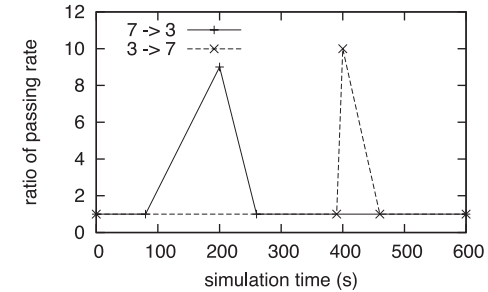


図 3 辺 3↔7 の入力通行量
Fig. 3 Specified passing rate of edge 3↔7.

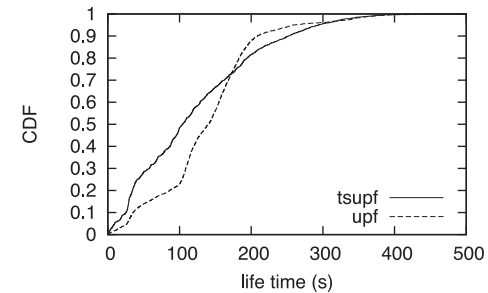


図 4 歩行者の生存時間の累積分布
Fig. 4 Distribution of node lifetime.

図 4 に導出されたモビリティにおける歩行者の生存時間（領域内滞在時間）の累積分布を示す。“tsupf” は提案手法における、“upf” は文献 9) でモデル化した UPF モビリティにおける生存時間の分布を示している。分布の形状がやや異なっているが、これは移動経路の偏りによるものと考えられる。UPF ではモビリティの導出に利用している線形計画法の性質上、入力として与えられた移動経路の候補に対して実際に利用される経路が少なく、210 通りの候補に対して歩行者が 1 人以上通行する移動経路の数は 40 通りであった。一方、TSUPF では移動経路が最短経路に限定されるが、可能性として 561 通り考えられる移動経路のうち 379 通りの経路が実際に利用されており、移動経路の多様性はある程度確保されている。

次に、各交差点を通過した歩行者の数と消去された歩行者の数を測定した結果を図 5 に示す。pass は各交差点を通過した歩行者数、delete(path) は自身の最短経路グラフの終端

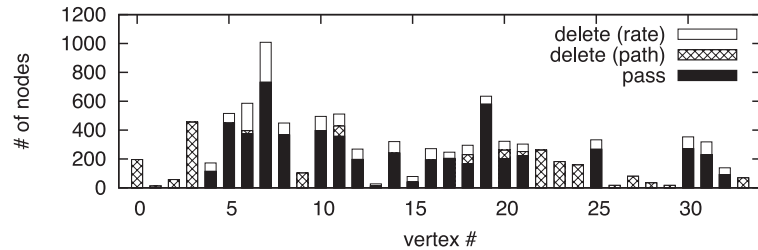


図 5 頂点ごとの通過・消去歩行者数
Fig. 5 Deletion ratio of pedestrians.

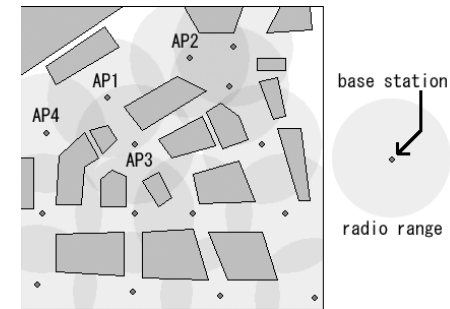


図 6 アクセスポイントの配置
Fig. 6 Arrangement of APs.

に到着したため消去された歩行者数, delete(rate) は終端には到着していないが通行量達成割合が 1 を超えていたため消去された歩行者数である。

6番と7番の頂点において delete(rate) が目立っている。6番の頂点での delete(rate) である歩行者は 32%と全交差点の中で5番目に多いが、実際に地下街への出入り口があるためこの付近を移動経路の端点とする歩行者が多く、観測値の影響が自然に表れた結果であると考えられる。7番の頂点では 27%と全交差点の中で8番目に大きいですが、こちらは意図的に辺 3⇄7 に大きな通行量を入力として与えたことによる他辺の通行量とのひずみの影響と考えられる。

もし、実環境における各道路沿いなどを移動経路の始点・終点とするような歩行者の割合を入力として与え再現することができれば、さらに現実の環境に近づけることが可能である。これはすなわち図 5 に示した歩行者の消去割合を制御することであり、前述のようなひずみの改善とあわせて提案手法の拡張を行うことが今後の課題である。

4.2 ケーススタディ

本節では、大阪駅前 500m×500m の領域をカバーするワイヤレスメッシュネットワークシステムにおける負荷分散プロトコルに関する事例を通して、密度が動的に変化するモビリティの有用性を示す。

本実験におけるメッシュネットワークは図 6 のように配置されたアクセスポイント (AP) により構成され、各端末は近隣の AP に接続することによりネットワークを利用できる。エンド端末と AP の無線伝播距離はそれぞれ 100m と 200m とする。実験で評価するプロトコルでは、AP が自身の担当する範囲 (自身の無線半径) を調整する (トポロジ調整を行う) ことで負荷分散を図り、クライアントの密度の変化に対応する。

実験では 4.1 節で作成した時間的な変化を取り入れたモビリティモデル上で評価を行った

ため、密度の変化が最も激しいと思われる AP1 の無線半径を調整した。具体的には、AP1 は一定時間間隔で隣接する AP (AP2, AP3, AP4) のクライアント数を取得し、自身のクライアント数がどの AP のクライアント数よりも多ければ無線半径を 10m 小さく、どの AP のクライアント数よりも少なければ無線半径を 10m 大きくする。

図 7 に時間経過に対する無線半径とクライアント数の変化の様子を示す。fix は無線半径を 100m で固定した場合の、5 (s), 30 (s) はそれぞれ 5, 30 秒間隔で無線半径の調整を行った場合の AP1 から AP4 のクライアント数の最大値 (左側の軸) を、range は AP1 の無線半径 (右側の軸) を表している。また、図 8 にそれぞれの場合で生じたハンドオフの回数を示す。

図 7 の 200 秒過ぎをみると、5 秒間隔で調整を行った場合は、クライアント数の増加を多少抑えることができていたが、30 秒間隔の場合はクライアント数の増加に無線半径の調整が追いついておらず、増加を抑えられていないことが分かる。このように無線半径の調整間隔が短いほど、クライアント数の動的な変化に対し速やかに対応できるが、その代わりにハンドオフの回数 (図 8) や AP の負荷が増加してしまう。

以上のように、TSUPF は既存のモビリティでは再現が困難であった、密度が時間経過に応じて変化するという環境化における、無線ネットワークシステムの性能評価を可能としている。特に、今回の実験で評価した負荷分散プロトコルにおいて無線半径の調整間隔の適切な値をシミュレーションにより見積もる場合は、TSUPF のような歩行者密度や移動経路の現実性を考慮し、かつ密度の動的な変化を再現可能なモビリティが必要となってくる。このように、TSUPF は無線ネットワークアプリケーションやプロトコル、インフラの設計

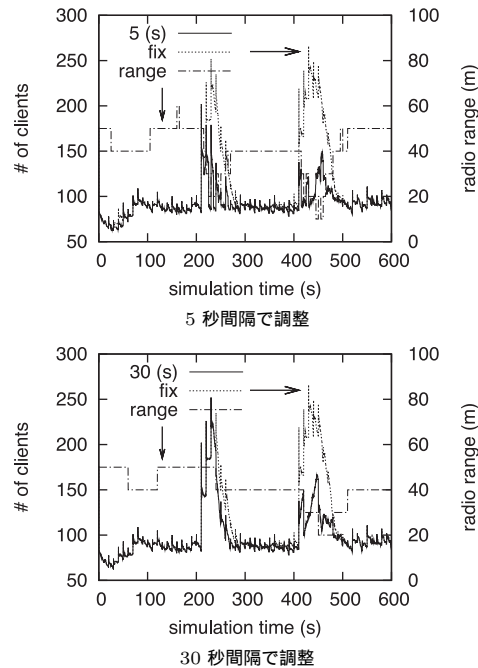


図7 クライアント数と無線半径
Fig. 7 Radio range and number of clients.

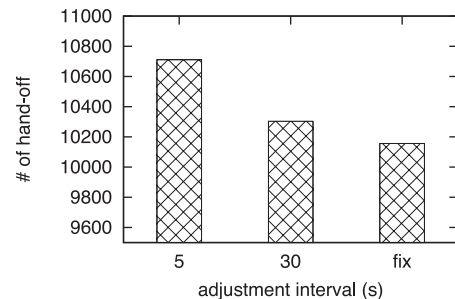


図8 ハンドオフ回数
Fig. 8 Occurrence of hand-offs.

においてシミュレーションにおける評価環境の幅を広げるものであり、有用となるケースが十分にあると考えられる。

5. おわりに

本論文では都市における歩行者の行動に焦点を当てた、密度の時間的な変化が再現可能なモビリティモデルである Time Slot Urban Pedestrian Flows (TSUPF) を提案した。提案モデルでは与えられた観測値から経験則により通行量を補完することで、少ない観測地からでも比較的現実的なモビリティが再現可能であり、今後の無線ネットワークシステムの性能評価や設計、検証において有用であると考えられる。

今後の課題としては、導出されたモビリティの現実性の検証や、歩行者の生成、消去割合の調整、車にも適したモビリティを表現するための渋滞の導入、およびモビリティの特性がネットワークの様々な性能指標にどのような影響を与えるのかをより詳細に評価していくことなどがあげられる。

参考文献

- 1) Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications & Mobile Computing (WCNC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 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, *AdHoc Networks Journal*, Vol.1, No.4, pp.383-403 (2003).
- 3) Jardosh, A., BeldingRoyer, E.M., Almeroth, K.C. and Suri, S.: Towards Realistic Mobility Models For Mobile Ad hoc Networks, *Proc. ACM MobiCom*, pp.217-229 (2003).
- 4) Hollick, M., Krop, T., Schmitt, J., Huth, H.-P. and Steinmetz, R.: Modeling Mobility and Workload for Wireless Metropolitan Area Networks, *Computer Communications*, Vol.27, No.8, pp.751-761 (2004).
- 5) Hsu, W.-J., Merchant, K., Shu, H.-W., Hsu, C.-H. and Helmy, A.: Weighted way-point mobility model and its impact on ad hoc networks, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, No.1, pp.59-63 (2005).
- 6) 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).
- 7) 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)*, pp.20–24 (2004).
- 8) Kim, M., Kotz, D. and Kim, S.: Extracting a mobility model from real user traces, *Proc. IEEE Infocom* (2006).
- 9) Maeda, K., Sato, K., Konishi, K., Yamasaki, A., Uchiyama, A., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: Getting Urban Pedestrian Flow from Simple Observation: Realistic Mobility Generation in Wireless Network Simulation, *Proc. 8th ACM/IEEE Int. Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pp.151–158 (2005).
- 10) 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.47, No.2, pp.405–414 (2006).
- 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) ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/>

(平成 20 年 1 月 4 日受付)

(平成 20 年 7 月 1 日採録)

推薦文

本論文では都市における歩行者の行動に焦点を当てたモビリティモデルである Urban Pedestrian Flows (UPF) を, 駅前で電車が到着すると一時的に人が増加するといったような時間的な密度の変化が再現できるように拡張したモデルを提案した. さらに, ワイヤレスメッシュネットワークシステムにおける負荷分散プロトコルの評価事例を通して, 提案する密度の動的な変化モデルの有用性を示した.

本研究成果では人の流れを交通流シミュレータ的に扱うモデルの有効性を示すことでモビリティモデルの研究の発展に大きく貢献するものであり, 推薦論文として推薦する.

(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 渡辺 尚)



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情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了. 同年同大学院博士後期課程進学. 無線ネットワークのシミュレーションや性能評価に関する研究に従事.



中村 雅俊 (学生会員)

平成 19 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了. 同年同大学院博士後期課程進学. ネットワークの性能試験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情報数理系専攻博士前期課程修了. 同年同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). 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.



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 年同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 年同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、大阪大学大学院情報科学研究科教授。博士 (工学)。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。
