

計算負荷分散を考慮した 近隣端末の分散型移動予測手法の提案

内山 彰^{†1,†2} 山口 弘純^{†1,†2} 東野 輝夫^{†1,†2}

本稿では、通信機能付き車載器や歩行者端末などの移動無線局が、GPS などにより取得した位置情報を一定間隔で無線ブロードキャスト送信している環境で、各端末が、位置情報を直接受信できない比較的遠方領域の端末分布状況も把握するための方法を提案する。各端末は、周辺端末がブロードキャストしている端末位置情報を継続的に監視し、周辺領域の局所的な移動予測関数を動的に生成する。生成した移動予測関数は、ある時点における周辺領域の端末分布情報とともに、遠方領域に対し（マルチホップブロードキャスト通信や広域通信を通じて）無線送信する。これにより、各端末は自身の周辺端末の位置情報に加え、端末位置情報を直接受信できない遠方領域の移動予測関数と、ある時点での端末分布情報が取得できる。これらを利用し、各端末は他端末の移動予測計算を行うことで、遠方領域を含めた端末の分布把握を可能としている。この際、通信ならびに計算量が移動端末間でなるべく公平になるように工夫している。提案手法の通信量解析を行い、設計の妥当性を検証した。

Distributed Neighborhood Density Estimation for Mobile Nodes

AKIRA UCHIYAMA,^{†1,†2} HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2}
and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

In this study, mobile terminals, which are on-board units of vehicles or pedestrians' mobile phones, are assumed to transmit their location information by periodical notification messages like as DSRC safety messages. Then we propose a method to allow each mobile terminal to obtain the distribution of the other terminals' location by autonomous collaboration of those terminals. Each mobile terminal observes location notification messages from their neighboring terminals and creates functions to predict their movement. These functions are transmitted to a distant region which we cannot reach by one-hop broadcast. As a result, each mobile terminal can obtain location information in its neighborhood region and prediction functions for a distant region, and can predict the distribution of terminals for some period. Complexity analysis is given to

assess the validity of protocol design.

1. はじめに

高度交通システムにおいては、DSRC を用いたドライバーおよび歩行者の状況把握の研究開発や実用化実験が盛んである。例えば ITS 情報通信システム推進会議においては、5GHz 帯や 700MHz 帯の DSRC 車車間通信システムの実験用ガイドラインが定められ、セーフティドライビングシステムのために各車両が発信する車両情報やその通信方式などについての提案がなされており¹⁾、ASV プロジェクトなどが実証実験を進めている²⁾。また、衝突防止などのクリティカルアプリケーションだけでなく、より広域の渋滞情報や先行道路の道路状況把握など、安全運転支援への活用も進められており、警察庁および新交通管理システム協会が推進する DSSS³⁾ や国土交通省のスマートウェイ⁴⁾ などが知られている。さらに、交通弱者である歩行者の GPS 携帯電話機に DSRC 発信機を装備し、車両側に位置情報を通知することで、さらに高度な安全運転支援を行う試みもなされている⁵⁾。

このように、車両や歩行者が位置情報を発信し、それを路車間や車車間通信、人人間通信などの狭域通信、さらには携帯電話網や WiMAX などの広域通信を活用して伝達することで、様々なアプリケーションへの応用が期待されるが、なかでも特に、周囲数 km レベルでの車両または歩行者の分布状況ならびにその移動状況を把握することは、スマートな車両ナビゲーションや歩行者ナビゲーションの実現には不可欠である。例えば混雑した市街地において、局所的な渋滞を迂回し経路を最適化する車両ナビゲーションを実現できたり、花火大会など数万人レベルで人が集まるイベントや災害時の都市部からの徒歩帰宅（帰宅難民）において、人々がある特定経路に殺到することなく、安全で効率の良い分散的な行動を実現できる可能性がある。

しかし、そのような数 km レベルでの人や車の移動状況把握をサービスとして実現するためには、低コストであるのみならず、歩行者端末などの電池容量制約を考慮し、各端末の通信負荷や計算負荷をできるだけ少なくする必要がある。各端末が位置情報を常時サーバに

†1 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

†2 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

(DSRC 路側機や広域通信網を利用して)アップロードすることも考えられるが、歩行経路に常に路側機が設置されている可能性は現在のところ高くなく、また、広域通信における上り通信コストも無視できない。一方で、無数の端末が参加するサービスであることを活用し、自律分散型の分散計算システムを導入し、端末あたりの通信量や計算量を可能な限り削減するとともに、システム全体のデータ通信量も削減し、公平な負荷分担による低コストで軽量のサービスを実現する必要があると考えられる。一方で、データ通信量を削減することにより、情報精度が低下する可能性があるため、精度を如何に維持しながら、データ量削減ならびに負荷分担の公平性を実現するかが課題となる。

我々は、文献 6) で、各移動端末が周辺端末の密度を自律協動的に予測することで、データ収集にかかるトラフィックを削減しながら端末分布を把握する基本概念を提唱している。しかし、この方法では、人や車の移動を画一的なあるパターンに当てはめて予測するため、そのような予測にも当てはまりやすいマクロな交通流にしか対応できないといった問題がある。また、各端末が行うべき通信およびデータ処理の量は、存在する端末数に応じて軽減されることが理想であるが、そのような分散処理の公平性のための設計がなされていない。これらの要件を満足するためには、端末移動予測による通信量削減といった文献 6) の基本方針を保持しながら、目的に見合う適切なプロトコルと処理方法を新たに設計する必要がある。

本稿では、車両や歩行者などの各移動端末が GPS などにより自身の位置ならびに速度ベクトルを取得可能であり、それを一定時間間隔でブロードキャスト送信している環境を想定する。このもとで、各端末がなるべく少ない通信量ならびに計算処理量で端末分布の変化を把握するためのデータ処理方法ならびに通信プロトコルを提案する。各端末は周辺端末がブロードキャストしている端末位置情報を継続的に監視し、自身の周囲の領域の局所的な移動予測関数を動的に生成する。生成した移動予測関数は、ある時点における自身の周辺領域(1 ホップブロードキャスト範囲の領域)の端末分布情報とともに、自身がその状況を直接は把握できない遠方の領域に(マルチホップブロードキャスト通信や広域通信を通じて)送信する。これにより、各端末は、自身の周辺端末の位置情報に加え、端末位置情報を直接受信できない遠方領域の移動予測関数と、ある時点での端末分布情報が取得できる。これらを利用し、各端末は他端末の移動予測計算を行うことで、端末ごとに位置情報を遠方領域までブロードキャスト送信することなく、遠方領域を含めた端末の分布把握が可能となる。

提案手法は、地理領域をグリッド化し、正方セル単位で移動予測関数を生成するが、全体として処理すべきデータ量を削減するため、遠方領域に対しては、複数のセルを 1 セルと見

なしたより大きいセルを単位とした移動予測関数ならびに端末分布情報を送信する工夫をしている。また、端末間で可能な限り公平な処理負担を実現するため、予測した端末分布情報を利用し、各処理に参加するか否かを周辺端末数に依存する確率に基づき決定することで、特定の端末に負荷が集中しない、完全にフラットな自律分散型処理を実現している。

提案手法の性能解析のため、アドホック通信によるマルチホップ送信のみを仮定した環境で、(1) 各端末が全領域に自身の位置情報をマルチホップブロードキャスト通知する方式、ならびに (2) 提案方式において、必要な通信量を解析し、その有用性を評価している。

1.1 関連研究

VANET における情報収集のための手法としては、路面情報や気象情報、交通情報等のデータの収集ならびに配信を念頭においた様々な手法が提案されている⁷⁾⁻¹⁰⁾。また、無線センサネットワーク(Wireless Sensor Network, WSN)においては、例えば地理的に近い場所で観測された気温観測値など類似性が高いために冗長度が高いデータなどを集約しネットワークトラフィックを削減する方法や、与えられたクエリに対し、WSN ノードがそれぞれ中間状態を計算する方法など、多くのデータ集約手法が提案されている¹¹⁾⁻¹⁴⁾。これらは本質的に、情報ソースまたは情報中継ノードにおける、データの冗長性などに着目したデータ圧縮ならびに削減方法であるのに対し、提案手法は、各端末に個別の予測をさせることで扱うデータ量を削減させている点で大きく異なる。また、商用システムでは、ホンダのインターナビなど、過去の蓄積データを元に渋滞予測を行うサービスも存在する¹⁵⁾が、過去の蓄積データはマクロ交通流の予測には有効である一方、数 km の範囲で発生する局所的かつ突発的な混雑状況の予想は困難であると想定される。提案手法は、そのような比較的狭域の局所的な分布ならびに移動状況の把握を主眼としている。また、提案手法は今後普及が期待される車車間通信や、人間間通信を想定した場合の情報量やその伝達方法の効率について考慮した設計になっている点で異なる。

2. 概要

提案手法では、以下を仮定する。

- 端末の移動を正方領域間の上下左右の移動にマッピングし、最大でも T 秒間に隣接領域への移動しかしないものとする。
- 各端末は GPS などの測位方式により現在位置を取得できる。
- 各端末は数十 m 程度の近距離通信距離を持つ無線機器を搭載している。時間を長さ T_0 秒のタイムスロットに分割し、端末間での時刻は緩やかに同期しているも

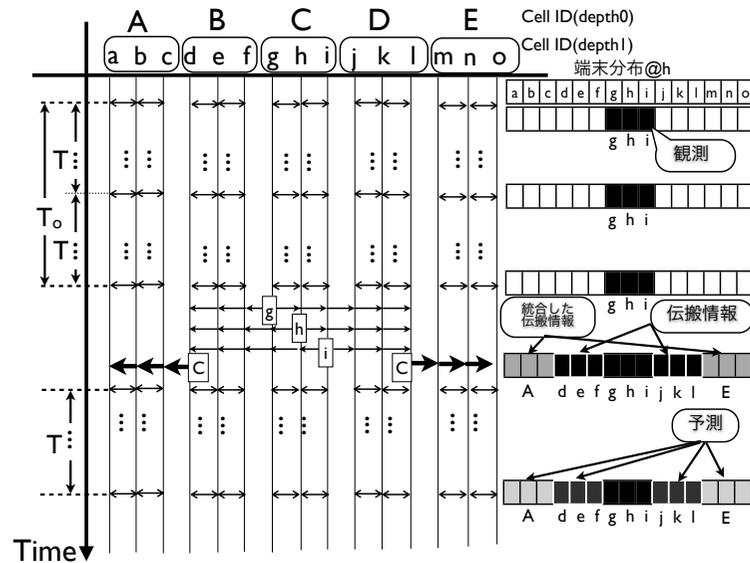


図1 交通情報の生成と伝搬・統合の流れ

のとする。各端末はGPSにより取得した現在位置と T 秒前の位置を T 秒ごとに隣接端末にブロードキャストする。提案手法の目的は、通信・計算負荷を考慮しつつ各端末が比較的遠方も含めた領域の端末分布状況を把握できるようにすることである。このため、直前のタイムスロットで生成された予測関数とある時点での端末分布情報を利用して各端末が次のタイムスロット(T_0 秒間)における周辺端末分布を予測する。各領域で生成された交通情報はあらかじめ決められた範囲内で伝搬される。その際、距離に応じて交通情報を統合することで、通信・計算負荷を分散させる。

図1に示す例を用いて交通情報の生成と遠方への伝搬・統合の流れを説明する。簡単のため一次元で各正方領域は2層に階層化されており、階層が深いほど正方領域は小さい。第 l 階層の正方領域は第 $l+1$ 階層の正方領域を N 個集約した領域であり、この例では $N=3$ としている。ここでは最も深い階層の領域を $a\sim o$ 、最も浅い階層の領域を $A\sim E$ とし、また、無線到達距離は最も深い階層での正方領域の一辺よりも大きく、隣接する領域に到達する程度であると仮定する。図1では隣に表記されている領域を隣接しているものとする。

まず1タイムスロットの間、各領域内に存在するある1端末が T 秒ごとに交通量を観測

し、無線範囲内の端末、すなわち自身を含む隣接領域に送信する。このとき領域 h に存在する端末は、 g, h, i の観測情報を得ることができるため、 g, h, i の領域内の密度分布を知ることができる。観測はあらかじめ定められた期間(例では $2T$ 秒)だけ継続され、長期間の観測に基づく高精度な予測関数を生成する。

次に、最終的に生成された予測関数と最新の交通量を当該領域の交通情報とし、遠方の領域に伝搬させる。交通情報の伝搬範囲は最上位の階層における領域を単位として考える。各端末が取得する交通情報は、近隣領域については詳細な(深い階層での)交通情報、領域が遠方になるほど統合され粗くなった(浅い階層での)交通情報となるよう、交通情報を統合しながら伝搬させる。図1では領域 C に属する g, h, i の交通情報の統合・伝搬の流れを示している。3回の観測によりそのタイムスロットにおける予測関数生成を完了した後、 g, h, i に存在する1端末ずつが g, h, i の交通情報をあらかじめ定められた範囲(B, C, D)内(例では最上位階層で隣接している領域)にLocation-Based Multicast (LBM)⁽⁶⁾などのgeocastルーティングプロトコルを用いて伝搬させる。最も深い階層の各領域が同じ範囲に伝搬を行うため、 h は $d\sim l$ の情報を得ることができる。この情報には予測関数とある時点における密度分布が含まれている。一方、 C から離れている領域 A, E に属する端末に対しては、 g, h, i の情報ではなくそれらを統合した C の交通情報が伝搬される。その際、 g, h, i の情報を得られる領域内で、かつ g, h, i からの距離が最も大きい領域(d, l)内の端末が交通情報の統合および伝搬を行う。このようにして最も浅い階層での A, E に関する端末分布と予測関数を h に属する端末は得られる。これらの得た情報を利用して、 A, E および $d\sim f, j\sim l$ の端末分布を定期的に予測し、更新する。

3. アルゴリズム

3.1 定義

3.1.1 対象領域

領域はグリッドで分割されるものとする。図2に示すようにセルは階層化されており、深さ l のとき対応するセルの辺長は $2^{-l}w$ である。深さは0以上 L 以下の整数で表される。以降ではセルの階層を明示する必要がある場合、深さ l のセル R を $R(l)$ と表記する。深さの同じセル $R(l)$ と $S(l)$ がいずれかの辺を共有するとき、 $S(l)$ は $R(l)$ と1隣接であると呼び、深さ l におけるセル間の距離は1とする。0隣接は $R(l)$ そのものとする。この下で $R(l)$ と $k-1$ 隣接であるセルと1隣接であり、かつ $R(l)$ と $k-2$ 隣接でないセルを k 隣接と定義する。このとき各セルについて最小となるセル間距離をそのセルに対する距離とす

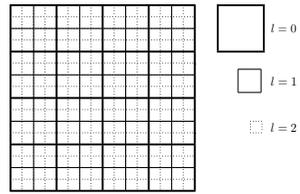


図2 階層構造による領域表現

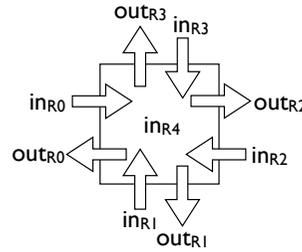


図3 交通量

る。以降、深さ l におけるセル \mathcal{R}, S 間の距離を $d_l(\mathcal{R}, S)$ と表す。

3.1.2 交通情報

セル $\mathcal{R}(l)$ の交通情報は (1) 方向 d を引数とした予測関数 $f_{\mathcal{R}}^{in}(d), f_{\mathcal{R}}^{out}(d)$, (2) 交通量 $I_{\mathcal{R}}$ で表される。予測関数 $f_{\mathcal{R}}^{in}(d), f_{\mathcal{R}}^{out}(d)$ に方向 d を与えることで、 $\mathcal{R}(l)$ への流入総数を 1 としたときの、方向 d へのその後 $2^{L-l} \cdot T$ 秒間の流出数を得ることができる。従って $\mathcal{R}(l)$ への流入総数が与えられれば流出数を予測可能である。

交通量はセル \mathcal{R} の各辺に対する端末流入数 $I_{\mathcal{R}}$ として表される。図 3 に示すように左辺から反時計回りに各辺に対して $0, \dots, 3$ の ID を対応づけ、ID4 を領域内に滞在している端末数としてそれぞれの流入数を以下のように表す。

$$I_{\mathcal{R}} = \{in_{\mathcal{R}0}, in_{\mathcal{R}1}, in_{\mathcal{R}2}, in_{\mathcal{R}3}, in_{\mathcal{R}4}\} \quad (1)$$

なお、総流入数は $in_{\mathcal{R}4}$ を除いた全流入数の和である。また説明のため流出数 $O_{\mathcal{R}}$ についても同様に定義する。ただし端末分布予測に流出数は不要なため、交通情報に含めて伝搬させる必要はない。

$$O_{\mathcal{R}} = \{out_{\mathcal{R}0}, out_{\mathcal{R}1}, out_{\mathcal{R}2}, out_{\mathcal{R}3}\} \quad (2)$$

3.2 交通情報の協調生成

各端末 j は T 秒ごとに自身の現在位置 $p_j(t)$ と T 秒前の位置 $p_j(t-T)$ をブロードキャストする。端末 i はタイムスロットの開始時刻から T 秒間、他端末から受信した位置情報を記憶する。 T 秒経過後、 i は無線範囲内のセル $\mathcal{R}_0, \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_n$ に対して、交通量を生成する。なお、これらの交通量は深さ最大 (L) のセルについて生成される。交通量の生成は、受信した位置情報を各領域への流入・流出数に変換することで行う。

各セルの長期観測に基づき高精度な予測関数を生成するため、端末 i は観測した各セルの交通量をブロードキャストする。ここではできるだけ正確な交通量が各セル \mathcal{R} につき一度

だけブロードキャストされれば良い。そこで交通量の正しさを提案手法により推定されたセル \mathcal{R} の端末数 $e_{\mathcal{R}}$ と、実際に観測した端末数 $d_{\mathcal{R}}$ の差で定義し、その差が小さいほど交通量が正しいものとみなす。この基準に従い、以下の範囲でランダムに選んだ時間だけ待機してからブロードキャストを実行する。

$$\left[0, \frac{|e_{\mathcal{R}} - d_{\mathcal{R}}|}{e_{\mathcal{R}}}\right] \quad (\text{if } e_{\mathcal{R}} > 0) \quad (3)$$

ただし、 $e_{\mathcal{R}}$ が不明、または 0 の場合は λ をあらかじめ与えられるパラメータとして、 $[0, \lambda]$ の範囲で待機時間をランダムに決定する。待機中に他端末がセル \mathcal{R} に対する情報を送信した場合、 i は \mathcal{R} の交通量送信を中止する。

i で生成された交通量を受信した端末 k は、同様にして続く T 秒間でセル \mathcal{R} に対して交通量を生成し、 i から受信した交通量に加算してブロードキャストする。以上のようにしてセル \mathcal{R} を観測可能な端末が時間とともに変化しても、過去の観測情報を最新の予測関数に反映させ、長期的な各領域の移動傾向を予測できるようにしている。

3.3 予測関数の生成

予測関数の生成に必要な情報は、 T_0 秒間の領域 \mathcal{R} への各方向からの流入数、および T_0 秒間の領域 \mathcal{R} からの各方向への流出数である。これらの情報を基に T 秒間あたりの流入数を 1 としたときの流入出割合を以下のように計算し、方向 d に対する予測関数とする。ここで過去のタイムスロットで生成した予測関数 $f_{\mathcal{R}}^{in}(d)', f_{\mathcal{R}}^{out}(d)'$ を新たに生成する予測関数に反映させるため、パラメータ α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を導入し、 α が大きいほど過去の予測関数の影響が大きくなるようにする。ただし、過去の予測関数が存在しない場合は現時点で得られた最新の交通量のみを用いて予測関数を生成する。

$$f_{\mathcal{R}}^{in}(d) = (1 - \alpha) \frac{T}{T_0} \frac{in_{\mathcal{R}}(d)}{\sum_{e=0}^3 in_{\mathcal{R}}(e)} + \alpha f_{\mathcal{R}}^{in}(d)' \quad (4)$$

$$f_{\mathcal{R}}^{out}(d) = (1 - \alpha) \frac{T}{T_0} \frac{out_{\mathcal{R}}(d)}{\sum_{e=0}^3 in_{\mathcal{R}}(e)} + \alpha f_{\mathcal{R}}^{out}(d)' \quad (5)$$

3.4 交通情報の統合方法

交通情報の統合は (1) 交通量および (2) 予測関数について行われる。以下では図 4 に示すように深さ l のセル $\mathcal{R}(l)$ に対して、深さ $l+1$ で $\mathcal{R}(l)$ に含まれるセルを左下から反時計回りに $S_0(l+1), S_1(l+1), S_2(l+1), S_3(l+1)$ とする。以降では S_e の添字 e について、4 を法とする世界で考える。

交通量の統合は各方向 d についてそれぞれ以下のように行われる。

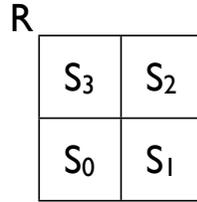


図 4 交通情報の統合

$$in_{\mathcal{R}(d)} = in_{S_{d-1}(d)} + in_{S_d(d)} \quad (6)$$

ただし $d = 4$ の場合のみ，以下のように定義する．

$$in_{\mathcal{R}(d)} = \sum_{e=0}^3 in_{S_e(d)} \quad (7)$$

また予測関数の統合は各方向 d について以下のように行われる．

$$f_{\mathcal{R}}^{in}(d) = \frac{f_{S_{d-1}}^{in}(d) + f_{S_d}^{in}(d)}{\sum_{e=0}^3 \{f_{S_e}^{in}(e) + f_{S_{e+1}}^{in}(e+1)\}} \quad (8)$$

$$f_{\mathcal{R}}^{out}(d) = \frac{f_{S_{d-1}}^{out}(d) + f_{S_d}^{out}(d)}{\sum_{e=0}^3 \{f_{S_e}^{in}(e) + f_{S_{e+1}}^{in}(e+1)\}} \quad (9)$$

3.5 交通情報の伝搬と統合

周囲の端末分布を予測するためには予測対象領域より広範囲の交通情報を取得し，外部から予測対象領域への流入量および予測対象領域から外部への流出量を予測する必要がある．一方で遠方の領域に関して詳細な交通情報は必要なく，一定時間の流出量が分かれば，近隣領域の端末分布予測に利用可能である．そこで，広範囲の交通情報をトラフィックを抑えつつ伝搬させるため，あらかじめ決められた領域内で交通情報を伝搬させ，その領域の境界付近の端末群が領域内の交通情報を統合して外側の領域に伝搬する．その際，領域を指定した伝搬処理は Location-Based Multicast (LBM)⁶⁾ などの geocast ルーティングプロトコルによって実現する．

3.5.1 伝搬情報の粒度

伝搬させる交通情報の粒度（どの階層の情報として送るか）は要求によって異なるが，ここでは各端末が存在しているセルに近い領域は深さ最大 (L) の交通情報として送り，距離

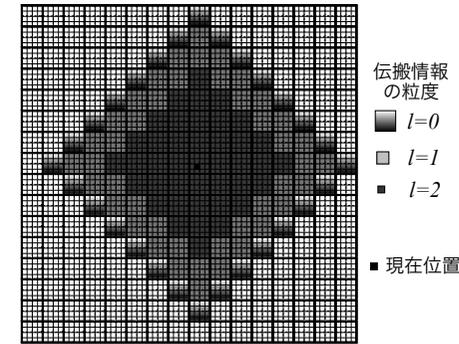


図 5 交通情報の粒度と伝搬範囲

が遠くなるに従って指数的に交通情報の粒度は粗くなって行くものとする．このため m をパラメータとして，ノード i の現在位置 p_i を含む深さ 0 のセル \mathcal{R} に対して，深さ l で p_i を含む領域 $S(l)$ の情報は，以下の式を満たす深さ 0 の領域 $S'(0)$ 内にブロードキャストされる．

$$\begin{aligned} &\text{for } \mathcal{R}(0) \ni p_i, \text{ broadcast } S(l) \ni p_i \text{ to } \forall S'(0) \\ &\text{s.t. } \sum_{k=l+1}^L 2^{m-(L-k)} < d_0(\mathcal{R}, S') \leq \sum_{k=l}^L 2^{m-(L-k)} \quad (\text{if } l < L) \\ &d_0(\mathcal{R}, S') \leq 2^m \quad (\text{if } l = L) \end{aligned}$$

図 5 に $L = 2, m = 2$ の場合の伝搬範囲例を示す．深さ 2 (最大) における交通情報は，深さ 0 における現在位置を含むセル \mathcal{R} から距離 2^2 以下にある領域内に対して伝搬させる．深さ 1 における交通情報は，深さ 0 で \mathcal{R} から距離 2^2 より大きく， $2^2 + 2^1$ 以下に存在する領域内で伝搬される．最後に深さ 0 における交通情報は，深さ 0 における距離が $2^2 + 2^1$ より大きく， $2^2 + 2^1 + 2^0$ 以下の領域内で伝搬される．

3.5.2 統合の負荷分散

交通情報の粒度とその伝搬範囲は 3.5.1 節で定義される．セル間距離が遠くなるほど交通情報の粒度は粗くなっていくので，交通情報の統合は交通情報の粒度が粗くなる境界付近で行う．その際，各端末は提案手法により得られた周辺領域の端末分布を基に統合計算と統合した交通情報の伝搬を行うか否かを確率的に決定する．具体的には，伝搬対象となるセル $S_0(l)$ の交通情報に対して， $d_0(S_0(l), \mathcal{R}(0)) = \sum_{k=l}^L 2^{m-(L-k)}$ となる $\mathcal{R}(0)$ に含まれるセ

ルで、かつ $d_0(S_0(l), U(0)) = \sum_{k=l}^L 2^{m-(L-k)} + 1$ であるセル $U(0)$ と辺の一部を共有する深さ L のセル

$$\mathcal{R}_U^1(L), \mathcal{R}_U^2(L), \dots, \mathcal{R}_U^{2^L}(L)$$

について、以下で計算可能な U と辺を共有する境界端末分布数 N_U を求める。

$$N_U = \sum_{k=1}^{2^L} in_{\mathcal{R}_U^k} \quad (4)$$

計算された N_U に従い確率 $1/N_U$ で、 $S_0(l)$ を含むセルに関する交通情報の統合および伝搬を行う。セルの統合は深さ $l-1$ で $S_0(l)$ を含むセル $\mathcal{R}(l-1)$ に含まれている深さ l のセルに対して行われる。統合した交通情報は 3.5.1 節で定義される範囲内でブロードキャストされる。

3.6 端末分布の更新

各端末は各スロットで得られた周辺領域の予測関数および交通量を基に、続くタイムスロット内での周辺セル端末分布予測を行う。深さ l の領域 $\mathcal{R}(l)$ に対する予測関数 $f_{\mathcal{R}}^{out}(d)$ に時刻 $t-T$ から t の T 秒間における流入総数 $I_{\mathcal{R}}@t$ を与えると、時刻 $t+2^{L-l}T$ における各方向への流出数 $O_{\mathcal{R}}@(t+2^{L-l}T)$ が得られる。端末分布の更新頻度は T 秒であるので、 $O_{\mathcal{R}}@(t+2^{L-l}T)$ を各方向についてそれぞれ 2^{L-l} で割った値を T 秒ごとの \mathcal{R} からの流出数とする。 $\mathcal{R}(l)$ からの流出数は $\mathcal{R}(l)$ に隣接するセル $S(l)$ にとっての流入数である。 $\mathcal{R}(l)$ から $S(l)$ 側への流出数を $out_{\mathcal{R}}(d_S)$ とすると $S(l_S)$ への流入数は、

$$out_{\mathcal{R}}(d_S) \cdot \frac{1^{l_S-l}}{2} \quad (10)$$

となる。ただし、 $l > l_S$ の場合は、 $\mathcal{R}(l)$ と $S(l_S)$ が共有する辺と同じ辺で $S(l_S)$ に隣接しているその他のセルから $S(l_S)$ への流出数の総和を、該当する方向からの $S(l_S)$ への流入数とする。例えば、 $\mathcal{R}(1)$ から $S(2)$ への流出数は $\mathcal{R}(1)$ からの予測流出数の $1/2$ となる。一方、 $S(2)$ から $\mathcal{R}(1)$ への流出数はそのまま他の $\mathcal{R}(1)$ に隣接するセルからの流入数とともに加算される。

以上のようにして予測した時刻 $t+T$ における各領域からの流出数を時刻 t における各領域の端末数に加減算することで、時刻 $t+T$ における各領域の端末数を予測することができる。同時に、時刻 $t+T$ における各領域への流入数がかかるので、同様に時刻 $t+2T, t+3T, \dots, t+T_0$ における端末分布を予測することができる。

```
GenerateTrafficInformation(){
  foreach(R ∈ RadioRange){
    R.Input = MapToInput();
    R.Output = MapToOutput();
    wait = rand(0, |eR - dR|/eR);
    timeout(wait, broadcast(R, RadioRange));
  }
}
Aggregate(S(layer)){
  V(0) = cell(0) ⊃ S(layer);
  candidate = nodes ∈ cells(L) at granularity borders of V(0);
  if(Prob(1/(# of candidates))){
    R(layer-1) = cell(layer-1) ⊃ S(layer);
    aggregate(∀U(layer) ∈ R(layer-1));
    geocast(aggreated_R);
  }
}
UpdateDensity(t){
  foreach(R ∈ TargetRegion)
    R.Output@(t+T) = R.Prediction(R.Input@t);
  foreach(R ∈ TargetRegion){
    foreach(S ∈ NeighboringCell(R))
      R.Input@(t+T) = S.Output@(t+T);
      R.Density@(t+T) = R.Density@t - R.Output@t + R.Input@(t+T);
    }
}
```

図 6 疑似コード

4. 性能評価

ここでは周辺端末分布を取得する際、予測関数の利用と距離に応じた交通情報の統合による通信量削減の効果を見積もる。今、あるセル $\mathcal{R}(0)$ に関する交通情報を伝搬させることを考える。伝搬範囲とそれぞれの範囲における情報の粒度は 3.5.1 節で述べたように $\mathcal{R}(0)$ からの距離によって定まり、情報の粒度が 1 段階粗くなるごとにその伝搬距離は $1/2$ になる。今、粒度 L の情報が伝搬される範囲の面積を 1 とすると、粒度 $L-1$ の情報が伝搬される範囲の面積は $(1+(1/2))^2$ となる。また、粒度 L の単位面積あたりのデータ量を 1 とすると、粒度 $L-1$ の単位面積あたりのデータ量は $1/4$ である。従って、粒度 l の情報が伝搬

される範囲の面積は以下の式で表される．

$$\left\{ \sum_{i=l}^L \left(\frac{1}{2}\right)^{(L-i)} \right\}^2 - \left\{ \sum_{i=l+1}^L \left(\frac{1}{2}\right)^{(L-i)} \right\}^2 \quad (11)$$

また，単位面積あたりのデータ量は

$$\left(\frac{1}{4}\right)^{L-l} \quad (12)$$

である．従って，最大の深さが L のとき，提案手法により伝搬される通信量は

$$\sum_{l=0}^{L-1} \left[\left\{ \sum_{i=l}^L \left(\frac{1}{2}\right)^{(L-i)} \right\}^2 \left(\frac{1}{4}\right)^{L-l} - \left\{ \sum_{i=l+1}^L \left(\frac{1}{2}\right)^{(L-i)} \right\}^2 \left(\frac{1}{4}\right)^{L-l} \right] + 1 \quad (13)$$

$$= \frac{4}{7} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{L+1} \right\} - \frac{1}{5} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{4L} \right\} + 1 \quad (14)$$

となる．

ここで，単純なアプローチとして同じ伝搬範囲に対して，情報の統合を一切行わずに粒度 L で情報を伝搬させた場合の通信量を考えると，以下ようになる．

$$\left\{ \sum_{i=0}^L \left(\frac{1}{2}\right)^{(L-i)} \right\}^2 = \left\{ \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{L+1}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)} \right\}^2 \quad (15)$$

式 (13) (15) を基に伝搬される通信量を見積もると，たとえば $L = 2$ のとき提案手法では 1.30，単純なアプローチでは 196 となる．また，通信量の上界を求めるため $L \rightarrow \infty$ とすると，提案手法は 1.371，単純なアプローチは 4 となる．以上のように情報統合の効果によって遠方に伝搬される情報の粒度が粗くなるため，通信量削減が実現できることが分かる．

5. おわりに

本稿では歩行者端末や車載器などの移動無線局が，GPS などにより取得した位置情報を一定間隔で無線ブロードキャスト送信している環境で，各端末が位置情報を直接受信できない比較的遠方領域の端末分布状況も把握するための方法を提案した．提案手法では周辺端末の位置情報監視に基づき，周辺領域の移動予測関数を動的に生成する．生成した予測関数は，ある時点における周辺領域の端末分布情報とともに遠方領域に対して送信され，各端末の周辺領域の移動予測関数に基づく移動予測計算に利用される．これによって各端末は遠方

領域を含めた端末分布の把握が可能となる．このとき提案手法では，通信ならびに計算量が移動端末間であるべく公平になるように工夫している．通信量解析により設計の妥当性を検証した．

参 考 文 献

- 1) : ITS 情報通信システム推進会議. <http://www.itsforum.gr.jp/>.
- 2) 国土交通省他: 先進安全自動車 (ASV) プロジェクト. <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/>.
- 3) : 安全運転支援システム (DSSS). <http://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>.
- 4) : スマートウェイ推進会議. <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/index/indexSmartWay.html>.
- 5) OKI: プレスリリース: 歩行者の安全を支援する世界初の携帯電話用 DSRC 車々間通信アタッチメントを開発. <http://www.oki.com/jp/press/2009/01/z08113.html>.
- 6) 濱田淳司, 内山彰, 山口弘純, 楠本真二, 東野輝夫: アドホック通信を用いた移動ノードの密度推定法, 情処研報, MBL-48, No.17-24 (2009).
- 7) Korkmaz, G., Ekici, E., Özgüner, F. and Ümit Özgüner: Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems, *Proc. of ACM VANET*, pp. 76-85 (2004).
- 8) Lochert, C., Scheuermann, B. and Mauve, M.: Probabilistic aggregation for data dissemination in VANETs, *Proc. of ACM VANET*, pp.1-8 (2007).
- 9) Yu, B., Gong, J. and Xu, C.-Z.: Catch-up: a data aggregation scheme for vanets, *Proc. of ACM VANET*, pp.49-57 (2008).
- 10) Zhao, J. and Cao, G.: VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in vehicular ad hoc networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.57, No.3, pp.1910-1922 (2008).
- 11) Gupta, I., Renesse, R.V. and Birman, K.: Scalable fault-tolerant aggregation in large process groups, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN)*, pp.433-442 (2001).
- 12) Madden, S., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M. and Hong, W.: TAG: a Tiny AGgregation service for ad-hoc sensor networks, *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, Vol.36, No.SI, pp.131-146 (2002).
- 13) Boulis, A., Ganeriwal, S. and Srivastava, M.B.: Aggregation in sensor networks: an energy accuracy trade-off, *Ad Hoc Networks*, Vol.1, No.2-3, pp.317-331 (2003).
- 14) Papadopoulou, M. and Schulzrinne, H.: Effects of power conservation, wireless coverage and cooperation on data dissemination among mobile devices, *Proc. of ACM MobiHoc*, pp.117-127 (2001).

- 15) 本田技研工業株式会社: インターナビ・テクノロジー. <http://www.premium-club.jp/technology/>.
- 16) Ko, Y.-B. and Vaidya, N.H.: Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-Based Multicast Algorithms, *Proc. of WMCSA*, pp.101-110 (1999).