

機関番号：14401  
 研究種目：研究活動スタート支援  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21800028  
 研究課題名（和文）ユビキタスネットワークにおけるアドホック通信を用いた高効率な移動端末密度推定法  
 研究課題名（英文）Highly Efficient Density Estimation for Mobile Nodes using Ad Hoc Communication in Ubiquitous Networks  
 研究代表者  
 内山 彰 (UCHIYAMA AKIRA)  
 大阪大学・大学院情報科学研究科・特任助教  
 研究者番号：70555234

## 研究成果の概要（和文）：

スマートフォンなどの携帯端末を保持した歩行者を対象に、サービスを利用する各端末が協調して低通信量になるよう負荷を分散しながら周辺の端末密度分布を推定する方式を考案した。さらに、GPS が利用できない屋内環境でも端末の密度推定を可能とするため、移動端末間でのアドホック通信に基づき協調して端末位置を推定する方式を設計した。性能評価を行い、密度推定法の通信量が約34%に抑えられることを確認するとともに、位置推定の誤差は無線到達距離の50%程度であることが分かった。

## 研究成果の概要（英文）：

In this research, we have proposed a cooperative and efficient method to estimate distribution of pedestrians holding mobile devices such as smartphones. The proposed method is highly efficient in terms of communication traffic and computation cost at mobile nodes. Furthermore, we have designed a cooperative localization based on ad hoc communication among nodes in order for estimating positions of nodes even in areas such as underground cities where GPS cannot be used. We have confirmed communication traffic in the density estimation is approximately 34% of a simple approach and the average localization error is 50% of a maximum radio range.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,040,000	312,000	1,352,000
2010年度	970,000	291,000	1,261,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,010,000	603,000	2,613,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：計算機システム・ネットワーク

キーワード：ワイヤレスネットワーク、位置推定、アドホックネットワーク、モバイルネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

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、ASVプロジェクトなどが実証実験を進めている。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 DSSS や国土交通省のスマートウェイ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。総務省の u-Japan 政策の立案など近年ユビキタスネットワーク社会の実現を目指した様々な研究開発が進められており、多様なアプリケーションが期待されている。

ここ数年で一般に普及しつつある iPhone などのスマートフォンでは GPS による位置取得機能および無線 LAN や Bluetooth による通信機能を備えており、これらのデバイスを保持した多数の歩行者が街中を往来しながら互いに情報を交換することが実現可能となる環境が整いつつある。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。

## 2. 研究の目的

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（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。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。のみならず、GPS が利用できない地下街などの屋内でも端末の位置を推定できるようにすることで、都市部を含めた多様な環境で端末密度の推定が可能となる。そこで本研究では計算負荷を分散した通信量の少ない端末密度推定法のみならず、GPS が利用できない環境でも数 m の誤差で端末の位置を推定する方式を考案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 端末密度推定法

目的とする端末密度推定法では、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必要がある。そこで各移動端末が周辺端末の移動を自律協調的に予測することにより、トラフィックの削減を実現する。また、負荷分散のため周辺の端末密度に基づき確率的に密度予測の更新と情報伝搬を行う。

提案手法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。

これらの情報が観測されてから遠方へ統合・伝搬される様子を図 1 に示す。簡単のため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  $a \sim a_0$ 、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

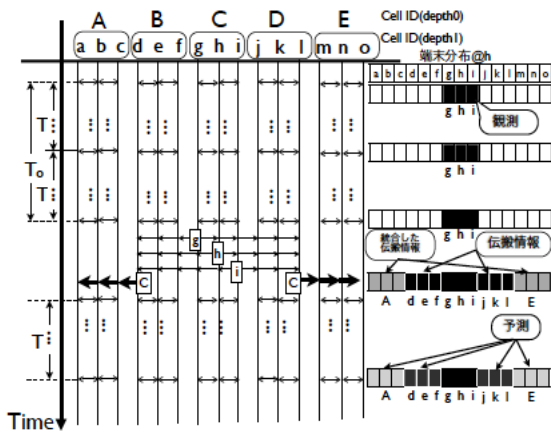


図1 情報の生成と伝搬・統合の流れ

の正方領域の一边よりも大きく、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))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

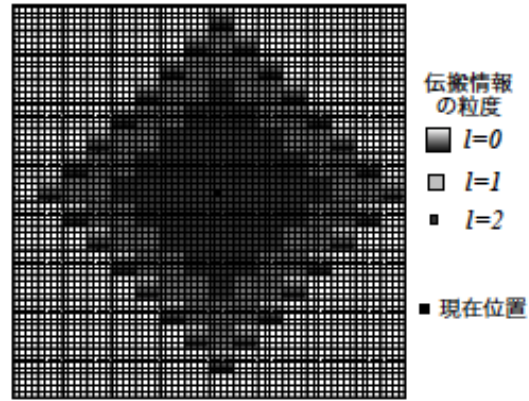


図2 密度・移動情報の伝搬

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。

提案手法は、図2のように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。図2では中心のセルが端末の現在位置の場合に、現在位置から遠ざかるほど伝搬情報の粒度が粗くなる( $l=0$ に近づく)ことを示している。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。

端末密度推定法の性能評価を行うため、情報が統合されることで粒度が1段階粗くなるごとにその伝搬距離は $1/2$ となることに着目し、数値解析を行った。その結果、単純なアプローチの約34%の通信量であることがわかった。提案手法は周辺端末密度に応じて確率的に計算負荷を分散できることは自明であり、性能評価結果と合わせて計算負荷の分散とトラフィック量の低減を実現できることを確認した。

## (2) 位置推定法

端末密度推定法にとって必要不可欠な各端末の位置情報を地下街などのGPSが使えない屋内環境でも得られるようにするため、密度推定法と合わせて端末の位置推定法を考案した。

端末間の通信情報と対象領域の各所に少数設置したいくつかの位置基準局の情報を用いて、移動端末の位置を推定するアルゴリズムの設計開発を行った。建物等で無線伝搬が阻害されるなどの理由によりネットワークが分断されやすい状況での利用を考慮し、各移動端末は位置基準ノードの位置情報に

加え、遭遇した移動ノードの情報を利用する

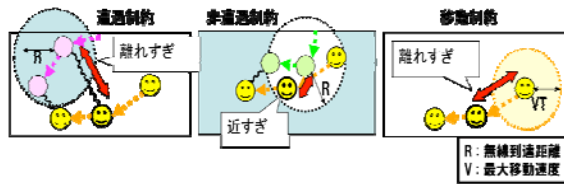


図3 端末の接続関係を利用した位置推定

方式を採用している。提案方式では無線移動端末が過去の移動軌跡を保持し、近隣の端末間でその軌跡情報を無線アドホック通信で送受信してそれら移動軌跡間の整合性がとれるように軌跡を修正していくことで、推定位置精度を徐々に向上させる(図3)。様々な環境とモビリティを想定したシナリオによる評価の結果、最大無線到達距離の約0.5倍の位置誤差に抑えられることがわかり、単純に空間情報のみを用いる場合よりも精度が大幅に向上した。

また、さらに高精度な位置推定を実現するため、指向性アンテナを用いた移動端末の位置推定法を考案した(図4)。指向性アンテナを用いた位置推定はこれまでに多数提案されているが、本方式では全体としての位置推定誤差を最小にするために限られた数の指向性アンテナを使ってどの方向にアンテナを向けるかというアンテナスケジューリング問題を定義し、それに対するスケジューリングアルゴリズムを考案しているという点に新規性がある。実証実験により性能を評価した結果、80%の端末が4m以下の誤差で位置を推定でき、最悪でも位置推定誤差は6m以下であることが確認できた(図5)。

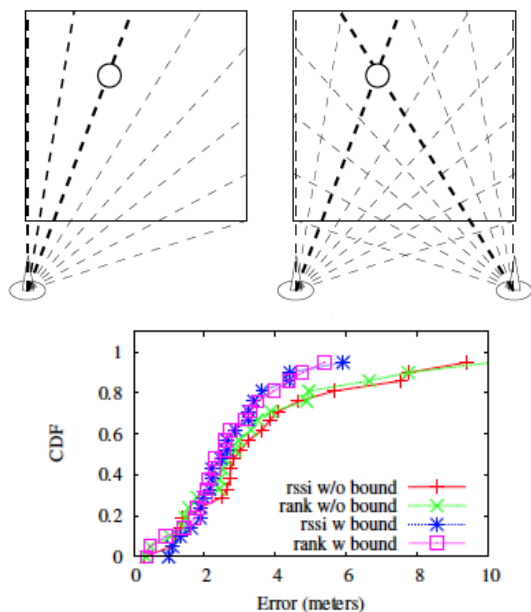


図5 位置推定誤差の累積分布

#### 4. 研究成果

考案した端末密度推定法は国際会議(学会発表④)ならびに国内研究会(学会発表③)において発表を行った。また、指向性アンテナを用いた移動端末の位置推定法(学会発表②)は、その有用性が認められパーベイシブ(ユビキタス)コンピューティングの分野で最も権威のある国際会議の1つであるPerCom2010に採択された。また、移動端末がアドホック通信の接続情報に基づき協調して位置を推定する方式の研究結果をまとめた論文が情報処理学会の推薦論文として採録されている(雑誌論文②)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

①木山 昇, 内山 彰, 山口 弘純, 東野 輝夫, ノード群の相対位置関係に基づく位置推定アルゴリズムの評価手法, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 52, No. 1, pp. 209-219, 2011.

②木山 昇, 楠田 純子, 藤井 彩恵, 内山 彰, 廣森 聡仁, 梅津 高朗, 中村 嘉隆, 大出 靖将, 田中 裕, 山口 弘純, 東野 輝夫, 災害時救急救命支援に向けた電子トリアージシステムの設計開発, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 51, No. 9, pp. 1916-1929, 2010.

[学会発表](計9件)

①野上 大樹, 内山 彰, 中田 康城, 東野 輝夫, 電子トリアージ評価のための多人数参加型シミュレータの設計, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOM2010)シンポジウム論文集, 2010. 7. 8, 岐阜県. (野口賞受賞)

② Thadpong Pongthawornkamol, Shameem Ahmed, Akira Uchiyama, Klara Nahrstedt, Zero-knowledge Real-time Indoor Tracking via Outdoor Wireless Directional Antennas, Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2010. 4. 1, Mannheim, Germany.

③内山 彰, 山口 弘純, 東野 輝夫, 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, 情報処理学会MBL研究会, 2009. 9. 11, 専修大学生田キャンパス.

④Junji Hamada, Akira Uchiyama, Hirozumi Yamaguchi, Shinji Kusumoto, Teruo

Higashino, Self-Estimation of  
Neighborhood Density for Mobile Wireless  
Nodes, Proceedings of International  
Conference on Ubiquitous Intelligence and  
Computing, 2009.7.9, Brisbane, Australia.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内山 彰 (UCHIYAMA AKIRA)

大阪大学・大学院情報科学研究科・特任助教  
研究者番号：70555234