

モバイルセンサネットワークにおける 端末密度情報収集手法について

粉川 博明¹ 寺井 元基² 神崎 映光³

概要: 本稿では、端末に搭載されたセンサから取得したセンサデータを収集、活用するモバイルセンサネットワークにおいて端末密度情報を低負荷に収集する手法を提案する。提案手法では、位置情報を利用したフラディングを用いて、全端末へクエリを伝播しつつ、データ収集のための転送木を構築する。クエリを受信した各端末は、過去に他端末から受信したビーコン情報をもとに自身の周辺における端末数を推定し、推定した情報が密度推定に大きな影響を与えると判断した場合にのみ、推定した情報を送信する。この情報を転送木を介して収集することでトラフィックを削減しながら高精度な端末密度情報を取得する。さらに本稿では、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いたシミュレーション実験を行い、提案手法の有用性を確認する。

1. はじめに

近年、スマートフォンやウェアラブルデバイスをはじめとした携帯型端末の普及に伴い、これらに搭載されたセンサを利用して気圧、温度、位置をはじめとしたセンサデータを収集し、さまざまなアプリケーションへ活用することへの関心が高まっている。携帯型端末からセンサデータを収集する方法として、携帯電話回線や Wi-Fi などの通信インフラを利用することが考えられる [7]。しかし、これらの通信インフラは通信帯域が限られており、また多数のアプリケーションが共有している通信資源である。さらに、通信インフラを利用するアプリケーションは年々増加してきている中、限られた通信帯域をセンサデータの収集のために占有してしまうのは好ましくない。このような背景のもと、通信インフラを使わず携帯型端末同士の無線マルチホップ通信のみを用いてセンサデータを収集するモバイルセンサネットワークが注目されている [3], [4]。モバイルセンサネットワークでは、携帯型端末（以降、端末と呼ぶ）が取得したセンサデータを、データを集約、管理するシンクと呼ばれる端末に収集する。シンクと直接通信が行えない端末が取得したデータは、複数の端末を介する無線マルチホップ通信を用いて、シンクへ転送する。

モバイルセンサネットワークの応用として、都市部やイベント会場など、特定の地理的領域内における混雑度の分

布を要求するものが考えられる。たとえば都市部においては、多数の人で混雑している箇所では通行が困難となり、またインフルエンザ等の感染症に感染するリスクが高くなる。このような混雑箇所をモバイルセンサネットワークを利用して特定できれば、通信インフラの有無にかかわらず、混雑箇所を避けて安全に素早く移動できる経路のナビゲーションが可能になるものと考えられる。

ここで、都市部などにおいてモバイルセンサネットワークを構築する端末の多くは人が持ち歩いているものであるため、これら端末の密度が取得できれば、高精度で混雑度が推測できるものと考えられる。端末密度を取得する単純な方法としては、対象領域内に位置する全端末から位置情報を収集することが考えられるが、特に端末密度が高い領域では、データ収集のためのトラフィックが著しく増大し、パケット衝突等が頻発する可能性がある。

一方、端末として想定されるスマートフォンをはじめとした機器には、ヘッドセットやウェアラブル機器といった周辺機器と無線接続を行うために、BLE (Bluetooth Low Energy) をはじめとした近距離無線を行うデバイスを備えていることが一般的である。このような環境において、各端末は、他の機器との接続確立や接続維持、データ共有などを行うため、定期的にビーコンを発信している。このビーコンは、近距離無線を行う通信範囲内において容易に受信が可能である。

本稿では、モバイルセンサネットワークにおいて、端末が発信するビーコンを用いた密度推定により、低負荷かつ高精度な密度情報収集を実現する手法を提案する。提案手

¹ 島根大学大学院自然科学研究科理工学専攻
² 島根大学総合理工学部
³ 島根大学学術研究院理工学系

法では、位置情報を利用したフラッディングを用いて、全端末へクエリを伝播しつつ、データ収集のための転送木を構築する。クエリを受信した各端末は、過去に他端末から受信したビーコン情報をもとに自身の周辺における端末数を推定し、推定した情報が密度推定に大きな影響を与えると判断した場合にのみ、推定した情報を送信する。この情報を転送木を介して収集することで、トラフィックを削減しながら高精度な端末密度情報を取得する。さらに本稿では、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いた実験を行い、その有用性を検証する。

以下では、2章で本稿において想定する環境について述べる。3章で関連研究について述べ、4章で提案手法について述べる。5章で、提案手法の評価について述べ、最後に6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

2.1 端末

各端末は自由に移動し、GPS (Global Positioning System) や既存の測位手法 [2] により、自身の位置情報を常に把握しているものとする。また、自身が過去に移動した経路について、十分に長い期間保持しているものとする。

また、各端末は、自身を中心とする半径 R_c [m] の範囲内に位置する他端末と相互に無線通信可能であるものとする。さらに、各端末は、BLE をはじめとした近距離無線を用いて、自身の識別子を付与したビーコンを I_b [s] の間隔で定期的に発信しているものとする。ビーコンの到達範囲は $R_b (< R_c)$ [m] であり、到達範囲内に位置する周辺端末は、ビーコンを発信した端末の存在を認識する。

2.2 シンクおよびアプリケーション要求

センサデータを収集するシンクは、端末を利用するユーザが周辺の密度情報を要求した際に、当該端末がシンクとなる場合等を想定し、ランダムな位置に現れるものとする。

シンクが端末密度を推定する対象とする領域は、縦横の比が $S_v:S_h$ となる矩形を想定する。シンクは、観測領域を $k \cdot S_v \times k \cdot S_h$ (k は 1 以上の整数) の矩形領域に分割し、図 1 に示すように、分割した各領域内に位置する端末数を要求するものとする。以降、分割した個々の領域をセルと呼ぶ。

3. 関連研究

荻原らは、文献 [5] において、モバイル端末がアクセスポイントを検索するために送信するプローブ要求を用いて、アクセスポイント周辺に存在する端末の密度を推定する手法を提案している。この手法では、無線信号の受信強度を示す RSSI (Received Signal Strength Indicator) の揺らぎをクラスタ分析し、これに基づき端末数を推定する。木村らは、文献 [1] において、Wi-Fi や Bluetooth を用いて MAC アドレスを収集することで混雑度を推定する手法を提案し

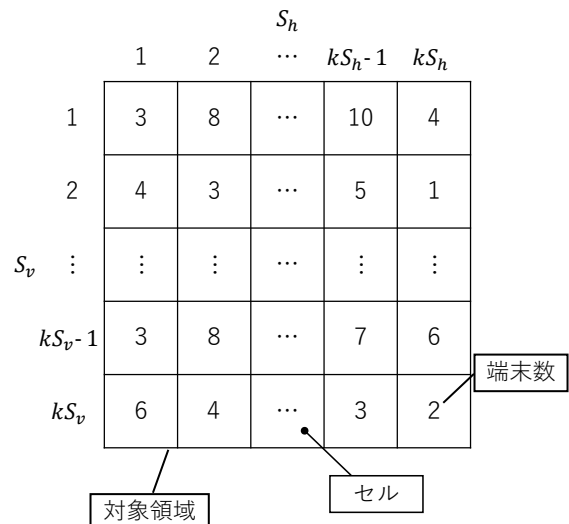


図 1: アプリケーション要求

ている。これらの手法は、各モバイル端末が発信する無線信号を用いて端末密度を推定する点が提案手法と類似している。しかし、端末密度を推定する対象となる領域が、アクセスポイント周辺に限定されており、広範囲における端末密度情報を取得できない。さらに、シンクとなる存在の位置が固定されており、通信インフラに接続しているアクセスポイントにおいてのみ端末密度を推定する点が、本稿の想定と異なる。

Onur らは、文献 [4] において、モバイル端末において、受信電波強度を用いた密度推定を行う手法を提案している。この手法では、密度推定を行う端末が、他の端末から受信した無線信号の電波強度を利用して、自身の周辺における端末密度を推定する。また、周辺の端末も同様の密度推定を行い、その情報を集約することで、推定精度を向上している。Weppner らは、文献 [6] において、端末間で Bluetooth を用いたアドホック通信を行い、通信範囲内の端末数および受信電波強度のばらつきをもとに、周辺の端末密度を推定する手法を提案している。これらの手法は、他端末が発信する無線信号を利用し、モバイル端末において端末密度を推定する点で、提案手法と類似している。しかし、前述した手法と同様、個々の端末の周辺における端末密度のみを推定の対象としており、広範囲における端末密度情報を取得できない。なお、これらの手法によって個々の端末が生成した密度情報を、提案手法を用いて収集することで、広範囲における端末密度分布を取得できる可能性がある。

米村らは、文献 [7] において、加速度センサを用いた混雑度推定手法を提案している。この手法は、混雑している場所を歩く際の歩幅が小さくなることを利用しており、センサから得られた加速度から端末利用者の歩幅を推定し、これをもとに周辺の混雑度を推定する。この研究は、都市部などにおける混雑度推定を行う点で本稿の想定環境と類似している。しかし、個々の端末周辺の混雑度のみを推定の

対象にしており、推定する対象となる領域が限定される。ただし、これらの手法で個々の端末が生成した混雑度情報を、提案手法を用いて収集することで、端末密度分布を取得できる可能性がある。

4. 提案手法

本章では、本稿で提案する端末密度情報の収集手法について述べる。

4.1 動作概要

提案手法では、各端末が定期的に発信するビーコンを利用し、各端末が一定時間内に受信できたビーコンから自身の周辺における端末数を推定する。この情報を、観測領域内に位置する一部の端末のみから収集することで、データ収集に要する通信量を削減する。

2.2節で述べたとおり、本論文で想定するアプリケーションでは、観測領域を複数のセルに分割し、各セルごとの端末数を要求する。ここで、セル内に位置する端末は、その滞在期間が長いほど、当該セル内に位置する他端末からのビーコンを受信する機会が多いものと考えられる。また、当該セル内を大きく移動していた場合、より広範囲においてビーコンを受信する機会を得ているものと考えられる。すなわち、当該セル内において、長期間に渡って大きく移動している端末ほど、当該セル内でビーコンを受信する機会が多く、セル内の端末数をより正確に推定できるものと考えられる。提案手法ではこのことを考慮し、各セル内における滞在期間および移動距離に基づき、データを収集する端末を選択する。これにより、収集するデータ数を削減しつつ、高精度での密度情報推定を行う。

以下では、4.2節において、各端末においてビーコンを集計し、端末密度推定のための情報を生成する手順について述べる。4.3節において、アプリケーション要求を全端末に通知する手順について述べ、4.4節において、シンクへ返信するデータの生成手順について述べる。最後に4.5節において、生成したデータを収集する手順について述べる。

4.2 各端末における端末密度情報の生成

各端末は、他の端末が発信したビーコンを受信し、そのビーコンを発信した端末の識別子、ビーコンを受信した時刻および位置座標を一定時間記録する。同じ端末から再度ビーコンを受信した場合は、最新のものを記録し、古いものは破棄する。たとえば図2において、ビーコンの情報を保持する期間が10[s]である場合、図の破線で示す経路に沿って移動している。端末 n_1 は、期間中に受信したビーコンに関して、図中の表に示す情報を保持する。ここで、端末 n_5 から受信したビーコンについては、情報を保持する期間以前のものであるため保持していない。

また、各端末は、後述するクエリによって密度情報を要

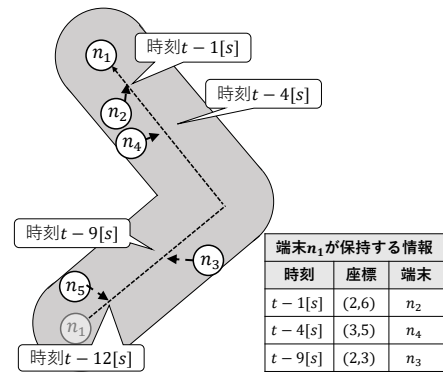


図 2: ビーコンの受信

求された際、その時点で自身が位置しているセルを導出した後、自身が記録しているビーコンの情報をもとに、自身が把握している端末数に関する情報である端末密度情報を生成する。端末 n_i が生成する端末密度情報には、以下に示す情報を含む。

- ビーコン受信端末数 N_i^b
 この値は、当該セル内においてビーコンを受信した端末数である。たとえば図2の端末 n_1 が、図3に示す領域分割が行われるクエリを受信した場合、この端末は当該セル内において3台の端末からビーコンを受信しているため、ビーコン受信端末数 N_1^b は3となる。
- ビーコン被覆面積 S_i
 この値は、ビーコン情報を保持する期間内に、当該セル内において端末 n_i がビーコンを受信可能であった範囲（ビーコン被覆範囲）の面積である。たとえば図3の端末 n_1 は、図3における色のついた領域を、自身のビーコン被覆範囲とし、この面積をビーコン被覆面積 S_1 とする。
- ビーコン受信期間 T_i
 この値は、端末 n_i が当該セル内に滞在していた期間である。なお、ビーコン情報を保持する期間より長い期間に渡って当該セル内に滞在していた場合は、ビーコン情報を保持する期間をビーコン受信期間とする。

4.3 アプリケーション要求の通知

各端末は、シンクにおいて発生するアプリケーション要求を事前に把握していないため、密度推定を行うためには、対象領域内に位置する全端末にアプリケーション要求を通知する必要がある。この通知は、シンクにおいて生成するデータ要求メッセージであるクエリを伝搬することで行う。

アプリケーションからの要求を受け取ったシンクは、要求に応じたクエリを生成する。クエリには、アプリケーション要求に関する情報として、対象領域およびセルの分割数に関する情報を含む。また、クエリを転送した端末の情報として、転送元端末の識別子と位置情報、およびシン

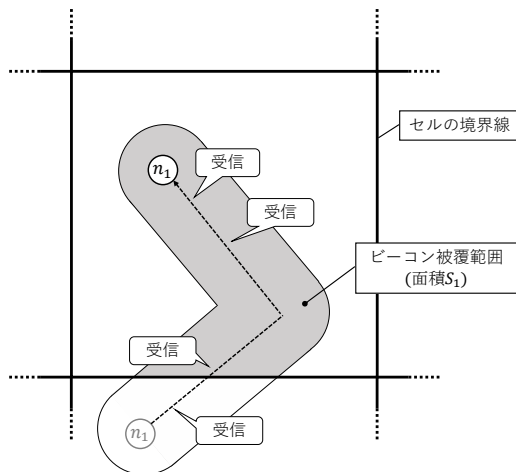


図 3: 端末密度情報の生成

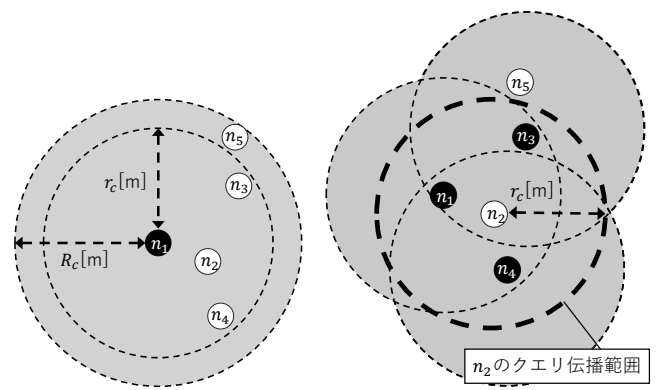


図 4: 端末 n_1 発信時

図 5: 端末 $\{n_3, n_4\}$ 発信時

クからのホップ数に関する情報を含む。さらに、後述するデータ収集に関する情報として、収集開始時刻、シンクの識別子、および最大ホップ数を含む。

生成したクエリの伝搬は、文献 [3] で提案された手法において用いている位置依存フラッディングプロトコルに従って行。このプロトコルは、以下の手順により、必要最小限のトラフィックで観測領域全体にクエリを伝搬する。

まず、クエリを生成したシンクは、自身の通信範囲内にクエリを送信する。このとき送信するクエリに含まれる情報のうち、クエリを転送した端末に関する情報として、自身の識別子および位置情報を付与する。また、ホップ数の初期値は 0 に設定する。シンクからのクエリを受信した端末は、自身とシンクとの距離が、予め定められた閾値 r_c [m] ($< R_c$ [m]) である場合、受信したクエリの転送元端末からの距離が大きいほど短くなる待ち時間を設定する。ここで、クエリ転送端末を中心とした半径 r_c [m] の円で規定される範囲を、その端末のクエリ伝播範囲と呼ぶ。待ち時間内に他の端末が転送したクエリを受信し、他のクエリ転送端末の範囲によって、クエリが指定する観測領域と自身のクエリ伝播範囲が重なる領域の全体が被覆された場合、クエリの転送を中止する。待ち時間内に該当領域が被覆されなかった端末は、クエリ内の転送元端末に関する情報を自身のものに更新し、ホップ数を 1 増加させたクエリを転送する。この動作例を図 4 および図 5 に示す。図 4 では、端末 n_1 がクエリを転送しており、閾値 r_c 内に位置する端末 $\{n_2, n_3, n_4, n_5\}$ がクエリを受信している。これらの端末のうち、 n_1 のクエリ伝播範囲内に位置する端末 $\{n_2, n_3, n_4\}$ は、端末 n_1 と自身との距離に応じた待ち時間を設定する。その結果、図 5 に示すように、端末 n_1 からの距離が大きい端末 n_3 および n_4 が、端末 n_2 よりも先にクエリを送信する。これらのクエリを受信した端末 n_2 は、端末 $\{n_1, n_3, n_4\}$ の転送範囲によって自身のクエリ伝播範囲全体が被覆されているため、クエリの転送を中止する。一方、 n_5 はク

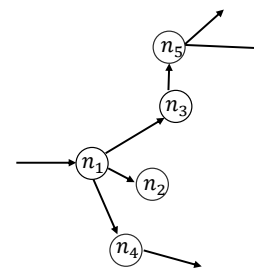


図 6: 転送木の構築

エリを受信しているものの、 n_1 のクエリ伝播範囲外に位置するため、受信したクエリを破棄する。

さらに、各端末は、クエリをはじめて受信したとき、自身にクエリを転送した端末を親ノードとして記録する。これにより、クエリを生成したシンクを根、クエリを転送した各端末を内部節点とする木構造のネットワーク (転送木) を構築する。この転送木は、後述するデータ収集時に利用する。たとえば、図 4 において、端末 n_1 が送信したクエリを受信した端末 $\{n_2, n_3, n_4\}$ は、それぞれ端末 n_1 を親ノードとして記録する。また、図 5 において、端末 n_3 が送信したクエリを受信した端末 n_5 は、端末 n_3 を親ノードとして記録する。その結果、図 6 に示す転送木が構築される。

4.4 返信データの生成

クエリを受信した各端末は、クエリに含まれる情報及び自身の位置情報から自身が位置するセルを導出し、4.2 節で述べた手順に従って、端末密度情報を生成する。この情報を各セル内において選出される代表端末に集約し、これを用いてセル内の端末密度を推定する。

以下では、それぞれの手順について詳述する。

4.4.1 代表端末の決定

提案手法では、代表端末をクラスタヘッドとし、クラスタヘッドと直接通信可能な端末群で構成される 1 ホップクラスタ単位で、セル内の端末数に関する情報を生成する。

まず、クエリ受信時に自身が位置するセルを導出した端

末は、自身がクエリを発信するまでの間に受信したクエリの中で同一セルに位置する端末が発信したものが無い場合、自身が代表端末であると判断し、クエリ内に自身が代表端末となったことを示す情報（代表フラグ）を付与して送信する。代表フラグが付与されたクエリを受信した端末は、そのクエリがはじめて受信したものであり、かつ自身の位置するセルと同一のセル内に位置する端末が発信したものである場合、当該端末を代表とするクラスタに所属する。

一方、クエリ受信後、自身がクエリを発信するまでの間に同一セルに位置する端末が発信したクエリを受信したものの、その中に代表フラグが付与されたものが存在しなかった場合も、自身が代表端末であると判断し、代表フラグを付与したクエリを送信する。

また、代表端末となった端末は、4.2節で述べた手順によって導出した端末密度情報を代表フラグと同様にクエリに付与して送信する。この情報は、後述する処理において利用する。

4.4.2 クラスタ内の端末数推定

各端末は、クラスタ内の他端末が送信したクエリまたは端末密度情報を受信するたびに、受信した端末密度情報および自身が生成した端末密度情報を用いて、次式に従ってセル内の端末数 N_{cell} を推定する。

$$N_{cell} = \frac{\sum_{k \in N_{cluster}} \frac{S_{cell} \cdot N_k^b \cdot P_k}{S_k}}{\sum_{k \in N_{cluster}} P_k} \quad (1)$$

上式の $N_{cluster}$ は同一クラスタ内に所属する端末の集合である。また S_k および N_k^b は、端末 n_k の端末密度情報に含まれるビーコン被覆面積およびビーコン受信端末数であり、 S_{cell} は当該セルの面積である。また、 P_k は、端末 n_k から受信した情報の信頼度であり、次式によって算出する。

$$P_k = \frac{1}{2} \left\{ \alpha \cdot \frac{S_k}{S_{cell}} + (1 - \alpha) \cdot \frac{T_k}{T_{rec}} \right\} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (2)$$

上式の T_{rec} は、各端末が受信したビーコンを記録しておく期間を示し、 α は予め全端末共通で設定される定数である。上式により、 α の値が大きいほど、ビーコン被覆面積の大きい端末の信頼度が高く設定され、 α の値が小さいほど、ビーコン受信期間が大きい端末の信頼度が高く設定される。

4.4.3 送信待ち時間の算出

4.1節で述べたとおり、トラヒックを抑えつつ、精度の高い推定を行うためには、ビーコン被覆面積およびビーコン受信期間の大きい端末の生成した端末密度情報を優先的に収集することが有効であるものと考えられる。これを実現するため、上述した信頼度に基づき、信頼度の高い端末から優先的に端末密度情報を送信するタイマを設定する。具体的には、端末 n_i は、クエリあるいは他端末が送信した端末密度情報を受信した後、自身の端末密度情報を送信するまでの待ち時間 T_i^W を、次式に従って設定する。

$$T_i^W = (1 - P_i) \cdot Timer_{max} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (3)$$

上式の $Timer_{max}$ は待ち時間の最大値であり、予め全端末共通で設定される定数である。上式により、信頼度の高い端末ほど短い待ち時間が設定され、優先的に端末密度情報を送信する。

待ち時間を設定した各端末は、代表端末を含むクラスタ内の他端末が送信した端末密度情報を受信するたびに、4.4.2項の手順により、クラスタ内に位置する端末群の情報から推定されるセル内の端末数を算出する。同時に、自身の生成した端末密度情報を除いた場合に推定されるセル内の端末数も算出する。その後、自身の密度情報を除いた場合の推定端末数に対し、自身の情報を用いた場合の推定端末数の割合が $[E_{min}, E_{max}]$ ($E_{min} < 1.0 < E_{max}$) の範囲内にある場合、自身の端末密度情報が推定結果に与える影響が小さいものと判断し、端末密度情報の送信を停止する。たとえば図7において、 $[E_{min}, E_{max}] = [0.7, 1.3]$ に設定されており、セル全体の面積が $10,000[m^2]$ であるものとする。代表端末である端末 n_1 がクエリ伝搬と同時に送信した端末密度情報を受信した端末 $\{n_2, n_3, n_4\}$ は、受信した端末密度情報、および自身のもつ端末密度情報を用いて、セル内の端末数を推定する。たとえば端末 n_3 は、端末 n_1 の送信した情報のみを用いた場合の推定端末数として 50 台 ($= \{(S_{cell}/S_1) \times N_1^b \times P_1\} / P_1 = \{(10000/200) \times 1 \times 10\} / 10$)、自身の端末密度情報を加えた場合の推定端末数として 87.5 台 ($= \{(S_{cell}/S_1) \times N_1^b \times P_1\} + \{(S_{cell}/S_3) \times N_3^b \times P_3\} / P_1 + P_3 = \{[(10000/200) \times 1 \times 10] + [(10000/200) \times 2 \times 30]\} / 10 + 30$) を算出する。この結果より、算出した値の比率が $87.5/50 = 1.75$ となり、この値が $E_{max} (= 1.3)$ を上回るため、自身の生成した端末密度情報が推定結果に与える影響が大きいものと判断し、この情報を送信する。これを受信した端末 n_2 は、現在送信されている端末 $\{n_1, n_3\}$ が生成した端末密度情報から導出される推定端末数が 87.5 となることを認識する。また、自身の端末密度情報を加えた場合の推定端末数として 83.3 台 ($\approx \sum_{k \in \{n_1, n_2, n_3\}} (S_{cell}/S_k) \times N_k^b \times P_k / \sum_{k \in \{n_1, n_2, n_3\}} P_k = (500 + 3000 + 1500) / (10 + 30 + 20)$) を算出する。この結果より、算出した値の比率が $83.3/87.5 = 0.952$ となり、この値が $[0.7, 1.3]$ の範囲に収まるため、端末 n_2 は自身の生成した情報が推定結果に与える影響が小さいものと判断し、情報の送信を停止する。

4.5 データ収集

クエリ内で指定された収集開始時刻になると、各代表端末は、シンクへのデータ転送を開始する。転送木上の各ノードとなる端末は、シンクからのホップ数が大きいほど短くなる送信待ち時間を設定する。送信時間になった端末は、それまでに受信したデータを転送木上の親ノードとな

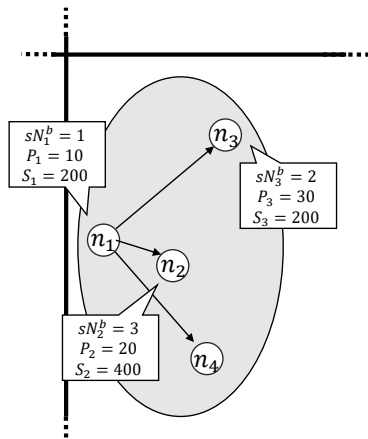


図 7: 端末密度情報の送信判定

る端末へを送信する。パケットを受信した親ノードでは ACK をパケットを送信した子ノードへ送信する。ACK を受信しなかった子ノードは一定期間後パケットを再送する。また、端末が代表端末であった場合は、自身が導出した推定端末数に関する情報をデータに付与して送信する。この処理を繰り返すことにより、すべての代表端末が導出した推定端末数に関する情報が、シンクまで転送される。

4.6 端末密度分布の導出

全ての代表端末から推定端末数に関する情報を収集したシンクは、受信した情報を用いて各セルの端末数を推定する。具体的には、各セルに対し、当該セルにおける推定端末数の平均値を算出し、この値をセル内の端末数として扱う。

5. 性能評価

本章では、提案手法の有用性を検証するために行ったシミュレーション実験について述べる。

5.1 評価環境

実験は ns-3.29 上でを行い、 $500[m] \times 500[m]$ の二次元平面上に、 N 台の端末を配置した。各端末は、ランダムウェイポイントモデルに従い、領域内からランダムに選択した位置に向けて等速で移動するものとした。移動速度は $[0.5, 2.0][m/s]$ の範囲からランダムに決定するものとし、目的地に到着した端末は、次の目的地および移動速度を新たに選択して移動を繰り返すものとした。無線通信範囲はおおよそ $100[m]$ となるよう、送信電力を $10.9[dBm]$ に設定した。

密度情報の要求は、 N 台の端末のうち 1 台が行うものとし、シミュレーション開始から $10[s]$ 後にクエリを送信するものとした。クエリ内に含まれる収集開始時刻は、クエリ発行時刻の $1[s]$ 後とし、セルの分割数は 5×5 、信頼度を算出する際に用いる α の値は 0.5 、閾値 r_c の値は $70[m]$ とした。その他、通信に関する設定は表 1 に示すものに設

表 1: 通信に関するパラメータ設定

無線通信規格	IEEE802.11b
伝搬損失モデル	LogDistancePropagationLossModel
伝搬遅延モデル	ConstantSpeedPropagationDelayModel
通信プロトコル	UDP

表 2: メッセージサイズ (l は付与するデータ数)

手法	端末の種類	手順	サイズ [B]
単純	全端末	クエリ伝搬	41
		収集	29
提案	代表端末	クエリ伝搬	64
	代表端末でない端末	代表端末収集	48
	全端末	収集	21
		収集時受信端末	受領確認

定した。

実験では、端末数 N を変化させ、それぞれの環境において $15[s]$ 経過させるシミュレーションを 100 回試行した。

5.2 評価手法

実験では、4.4 節で述べたセル単位での情報集約の効果を検証するため、すべての端末から位置情報を収集する単純な手法との性能を比較した。単純手法では、4.3 節で述べた位置依存フラッディングによるクエリ伝播を行い、構築された転送木に沿って、すべての端末が自身の位置情報を返信するものとした。

5.3 評価指標

実験では、以下の 3 つの指標それぞれについて、平均値を測定した。

トラヒック

各端末で送信されたメッセージサイズの総量。各メッセージのサイズを表 2 に示す。

データ収集率

各代表端末が収集開始時刻に送信したパケット数に対する、実際にシンクに到達したパケットの数の割合。

推定誤差

各セルにおいてシンクが推定した端末数と、実際の端末数との差分。この値は、実際の端末密度とシンクが推定した端末密度の差が大きいほど大きくなる。

5.4 評価結果

端末数 N を変化させた場合のシミュレーション結果を図 8, 図 9, および図 10 に示す。グラフの横軸は端末数を表し、縦軸はそれぞれ、図 8 はトラヒック、図 9 はデータ収集率、図 10 は推定誤差を表す。

図 8 の結果より、端末数の増加にともなって、いずれの手法においてもトラヒックが増加することがわかる。また

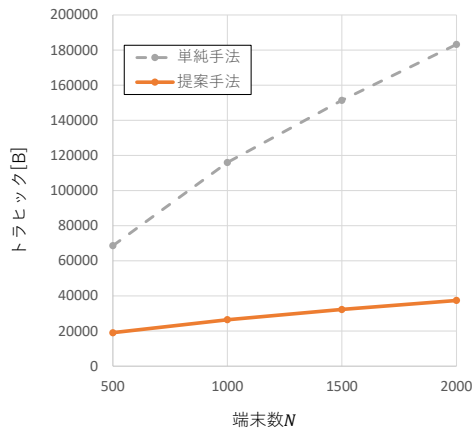


図 8: トラフィック

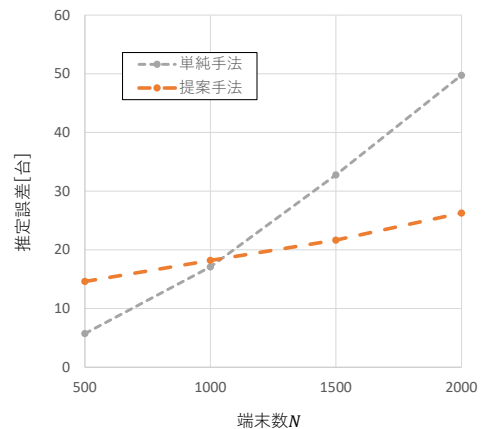


図 10: 推定誤差

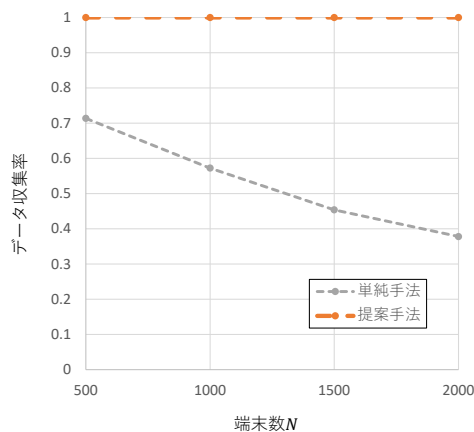


図 9: データ収集率

単純手法と比較して提案手法はトラフィックを大きく抑制している。これは、提案手法が一部の端末からのみデータを収集しているためであると考えられる。

図 9 の結果より、端末数の増加に伴い、単純手法におけるデータ収集率が低下している。これは、図 8 で述べたトラフィックの増加に伴い、パケット衝突が頻発したためであると考えられる。一方、提案手法では、端末数に関わらずすべてのデータ収集に成功しており、トラフィックの抑制により、パケット衝突によるデータ収集の失敗を抑制できているものと考えられる。

図 10 の結果より、いずれの手法においても推定誤差が発生しており、端末数の増加に伴い増加していることがわかる。一方、提案手法では、単純手法と比較して推定誤差の増加が小さく、端末数が大きい環境においても推定誤差を抑えられていることがわかる。この結果より、4.4 節の手順によって一部の端末のみから生成した密度情報により、高精度な端末密度推定が行えることがわかる。

6. おわりに

本稿では、モバイルセンサネットワークにおいて端末密

度情報を低負荷に収集する手法を提案した。また、シミュレーション実験によって、誤差を小さく抑えつつ、トラフィックを削減できることを確認した。

提案手法では、単純手法と比較して推定誤差の増加を抑制できるものの、依然として推定した端末数に誤差が生じている。今後は、推定精度を向上させるための閾値の適切な設定等について検討する予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費・基礎研究(C)(20K11767), および東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 木村卓哉, 佐藤翼, 袴田和則, “スマートフォンを用いた歩行者混雑予測システムの研究,” 情報処理学会全国大会論文集, pp.33-34 (2017).
- [2] N. Malhotra, M. Krasniewski, C. Yang, S. Bagchi and W. Chappell, “Location estimation in ad hoc networks with directional antennas,” Proc. Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2005), pp.633-642 (2005).
- [3] K. Matsuo, K. Goto, A. Kanzaki and T. Hara, “Efficient periodical boundary detection through boundary crossing record and sensor data overhearing in dense MWSNs,” Pervasive and Mobile Computing, vol.49, pp.45-61 (2018).
- [4] E. Onur, Y. Durmus and I. Niemegeers, “Cooperative density estimation in random wireless ad hoc networks,” IEEE Communications Letters, vol.16, no.3, pp.331-333 (2012).
- [5] 梅谷智弘, 澤田祐志, 田村祐一, “無線 LAN 信号強度を利用した屋内環境における状態変化検出の検討,” システム制御情報学会論文誌, vol.28, no.4, pp.140-146 (2015).
- [6] J. Weppner and P. Lukowicz, “Collaborative crowd density estimation with mobile phones,” Proc. Int. Workshop on Sensing Applications on Mobile Phones (PhoneSense 2011) (2011).
- [7] 米村淳, 大岸智彦, 井戸上彰, 小花貞夫, “スマートフォンを用いた人の混雑度推定手法の提案と評価,” 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信, vol.2013-MBL-67, no.5, pp.1-8 (2013).