

参加型センシングにおけるセルラ通信の負荷軽減のための 端末間データ収集方式

玉井 森彦¹ 長谷川 晃朗¹

概要：第5世代移動通信システムの実現に向け、筆者らは、周波数共用により周波数資源の利用効率向上を行うシステムについて研究を行っている。その一環として、参加型センシングにより各モバイル端末がセンシングした周波数利用状況をインターネット上のサーバへ定期的にアップロードする方式を検討している。参加型センシングでは、データをアップロードするためにセルラ通信（3G, LTE など）に大きな負荷がかかるという問題がある。この負荷を軽減するため、本稿では、各端末がセンシングしたデータを、端末間通信を利用することで特定の少数の端末へ集中的に収集させるとともに、それらの端末で集約処理を行うことで効果的にデータ量を削減するための方式を提案する。提案方式のデータ量削減の効果を確認するため、シミュレーションによる実験を行った。実験より、端末間通信を利用せず各端末が独立してデータを集約する場合に比べ、提案方式は最大で約 4.2 倍データ量の削減が可能なが分かった。

1. はじめに

第5世代移動通信システムの実現に向け、筆者らは、移動通信に適している 6 GHz 以下の周波数を共用することによる周波数資源の確保を目指している [1]。共用周波数の利用には、既存無線システムへ与える干渉の回避が必須であり、そのために様々な位置と時刻において周波数の利用状況を把握するためのスペクトラムのモニタリング [2] を行うことが重要となる。スペクトラムのモニタリングのため、様々な位置にセンサを配置することが考えられる [3] が、センサを密に配置するためにはセンサの配置とそれらの維持に大きな労力を要する。

一方、スマートフォン等のモバイル端末の高機能化と爆発的な普及に伴い、一般のユーザが所持するそれらのモバイル端末を用いて、都市空間など広大な範囲を対象として、各種の物理量（温度 [4]、騒音レベル [5] など）をセンシングし、サーバへアップロードする参加型センシングシステムについての研究が盛んとなっている。参加型センシングでは、要所要所に配置した固定的なセンサを利用してセンシングするシステムに比べ、各端末がユーザにより管理されていることから、バッテリーの交換などの維持・管理の負担が大きく軽減されるとともに、ユーザの移動に伴い広大な範囲をカバーしたセンシングが可能であるという利点がある。筆者らは、スペクトラムのモニタリングにおい

て参加型センシングを利用 [1] することで、移動端末による様々な位置での周波数利用状況の把握に役立てることを検討している。

参加型センシングでは、センシング結果をインターネット上のサーバへアップロードする際には、セルラ通信（3G, LTE 等）、または Wi-Fi 等のインターネットとの接続を有する基地局やアクセスポイント（AP）との通信を行うことが想定される。セルラ通信については、Wi-Fi に比べ通信コストが高く、ユーザや通信事業者としては通信量をできるだけ削減したいという要求がある [6]。また、Wi-Fi についても他の通信方式（Bluetooth 等）との無線資源の共有を図る必要がある [7] ことや、AP の乱立による無線資源の非効率の利用による通信品質の悪化 [8] が問題となっており、センシング結果のアップロードによる無線資源の消費はできるだけ抑えたいという要求がある。また、Wi-Fi のカバレッジはセルラ通信に比べ狭い [9] ため、Wi-Fi のカバレッジ外に端末が位置する場合には、セルラ通信を使わざるをえない状況も少なくない。

このような背景から、本稿では、セルラ通信（または Wi-Fi）を用いてインターネットと接続する基地局（または AP）を介してアップロードされるセンシング結果について、そのデータ量を削減しこれらの通信による基地局（さらには、基地局を含むアクセス網）へかかる負荷を軽減するための方式を提案する。提案方式は、(1) 複数のデータに対し集約処理を実行しデータ量を削減する機能と、(2) 端末間通信を利用して複数端末のデータをまとめて集約す

¹ 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
Advanced Telecommunications Research Institute International

ることで、データ量削減の効果を高める機能からなる。

(1) については、センシング結果は空間及び時間に対し相関があるという性質を利用し、複数のセンシング結果について、空間及び時間が近いものどうしは集約が可能であると仮定する。そして、近い場所で近い時間にセンシングされた複数のデータの最大値、最小値、または平均値などを求める処理を実行することで、複数のデータから、その合計のデータ量よりも少ないデータ量で表現可能な、集約されたデータを生成する。

(2) については、端末どうしが移動に伴い偶然遭遇する機会を利用し、近距離無線通信方式 (Bluetooth, Wi-Fi Direct など) により自身の保持するデータを相手端末へ送信し、受信先の端末において相手端末のセンシング結果と自身のセンシング結果とを合わせて集約を実行する。これにより、近い場所で近い時間にセンシングを行った複数の端末間でセンシング結果を集約可能となるため、端末内のみで集約を行う場合に比べさらなるデータ量の削減が期待できる。効果的な端末間集約を実現するためには、端末どうしが遭遇した際に、どちらの端末のデータを相手端末へ送信するかを適切に決定することが重要である。提案方式では、各端末に対しランクと呼ばれる数値を割り当てる。そして、端末どうしが遭遇した際に互いのランクを交換し、ランクの小さい方の端末からランクの大きい方の端末へデータを送信するようにする。これにより、比較的大きなランクを持つ少数の端末により、他の端末のデータが集約的に収集されるようになり、結果として多くのデータをまとめて集約可能となり、効果的な集約が実現される。

提案方式の有効性をシミュレーションにより評価した。実験により、提案方式におけるデータ量削減の効果は、端末内でのみ集約を行う場合と比べ、最大で約 4.2 倍に向上可能なことが分かった。

2. 関連研究

2.1 センサネットワーク

固定した位置に設置されるセンサ間で構築される無線センサネットワークにおいて、少数のシンクノードに対し効率的にデータを集める方式が多数提案されている [10]。センサネットワークでは、各センサはバッテリーにより駆動するため、消費電力量を抑えてネットワーク全体の稼働時間を延長することが重要となる。センサ全体の電力消費に対し、特に通信による電力消費は大きな割合を占めるため、その効率化のためデータを集約して収集する方式が提案されている。データ集約の代表的な手法の一つとして、センサネットワーク上にシンクを根とするスパニングツリーを構築し、葉ノードから根ノードに向かって、データを集約処理を適用しつつデータを転送する方式が提案されている [11], [12], [13]。これらの提案では、具体的な集約処理として、複数データの最大値や平均値、中央値などを求める

ことでデータ量の削減を行っている。

一方、文献 [14], [15], [16] では、テキストデータの圧縮などにも用いられるハフマン符号化などのエントロピー符号化によりデータ量の削減を行う方式が提案されている。これらの方式では、データをロスレスで削減可能であるという利点がある一方、最大値や中央値などを求める統計処理に基づく集約方式に比べ、データ量削減の効果は小さい。しかし、最大値を求めるなどの集約を行った後、さらにエントロピー符号化によるデータ量の削減を行うことは可能である。

上で述べたような固定的なセンサネットワークを対象としたデータ収集方式では、ノードの位置が移動することを想定していないため、本稿で対象とするような端末位置が人の移動に伴い動的に変化するような状況に対し効果的に適用することは困難である。

2.2 参加型センシング

参加型センシング [4], [5], [17], [18], [19] は一般ユーザが所持するスマートフォン等のモバイル端末を利用して広域にセンシングを行う方式であり、各種センサを搭載した端末の普及などに伴い近年盛んに研究や実用化が行われている。参加型センシングではユーザの移動に伴い端末位置も移動するため、広域をカバーすることが可能になる。一方で、端末間通信を効果的に活用するためには、端末どうしが遭遇した際の偶然の機会を利用して効率よく通信する必要があり、そのための機構の設計と実装には相応のコストを要する。そのため、端末間通信を利用せず、各端末が直接セルラ通信等を利用してサーバへデータをアップロードすることを前提とした提案が多い。

一方、端末間通信を活用した提案として、文献 [20], [21] が挙げられる。これらの提案では、センシング結果に含まれるプライバシー情報 (GPS 座標など) を保護することを目的としている。端末どうしが遭遇した機会を利用して端末間でデータの交換や集約を行うことでデータを匿名化し、センシング結果を収集するサーバの管理側によるプライバシー情報の抽出を妨げつつ、データの劣化度合いも可能な限り小さくする方式を提案している。

データ量の削減を目的として端末間通信を利用するものとして、文献 [22] が挙げられる。この提案では、本稿の提案と同様、端末間通信を利用して自身の保持するデータを相手端末へ送信することで、相手端末上で複数端末のセンシング結果をまとめて集約可能とし、データ量を削減する。この提案では、シンクノードへデータを収集するセンサネットワークについての研究と同様、端末全体の集合の内いくつかの端末がシンクを担っており、シンクを介してインターネット上のサーバへデータをアップロードすることを想定している。DTN (Delay Tolerant Network) 向けのルーティング方式の一つである Binary Spray-and-Wait [23]

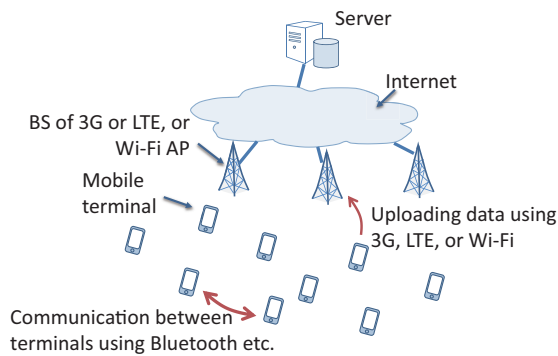


図1 参加型センシングシステム

を基本とし、それをデータの集約を行うよう拡張した方式を提案している。これにより、端末間でデータの複製を流通させつつ、集約によるデータ削減により端末間通信の効率を向上し、結果としてシンクまでより小さい遅延と到達率でデータを到着させる。

本稿での提案は、文献 [22] とは異なり、シンクの役割を担う端末は存在しておらず、どの端末も指定の時刻においてセルラ通信等のインターネットとの接続網を介して直接サーバへデータのアップロードを行うことを想定している。また、集約を行う目的は、セルラ通信等のアクセス網への負荷を軽減することである。集約によるデータ削減量を増加させるために端末間通信を利用して、特定の端末へデータを効率よく届けることは目的としていない。従って本稿での問題設定では、Spray-and-Wait 等によるデータの複製を作成することは集約の効率を減少させるだけであり有効でない。提案方式では、端末の持つデータを相手端末へ「移動」させる、という操作を繰り返すことで集約の効率を向上する。

3. 想定環境と仮定

想定する参加型センシングシステムの構成を図1に示す。各モバイル端末として、ユーザ自身が携帯しているスマートフォンなどの端末や、車両内に存在する車載端末などを想定する。モバイル端末は、自身の移動に伴い様々な位置、時刻において、端末が搭載するセンサを用いて周波数利用状況^{*1}をセンシングする。センシング結果は、端末のローカルのストレージに一定時間保存され、ある定められた時刻において、セルラ通信の基地局、または Wi-Fi の AP を介してインターネット上のサーバへアップロードされる。また、各モバイル端末は Bluetooth, Wi-Fi Direct 等の近距離無線通信方式により、互いに近くに位置する端末どうしで通信可能であるとする。

以下では、モバイル端末の数を N とし、モバイル端末

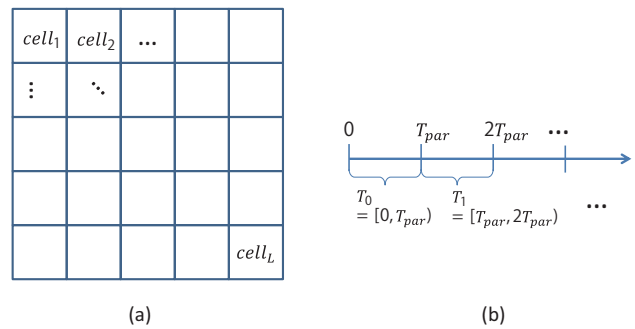


図2 空間の分割 (a) と時間の分割 (b)

の集合を $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ とする。各端末 u_i は無線インタフェースの MAC アドレスなどに基づき一意な ID が割り当てられているとし、端末 u_i の ID を $id(u_i)$ と表記する。各モバイル端末は、ある周期 T_{sen} (例えば、10 秒) に基づきセンシングを行うものと仮定する。また、ある周期 T_{up} (例えば、3600 秒) に基づき自身が保持するセンシング結果をセルラ通信等を介してサーバへアップロードすると仮定する。 T_{sen} , T_{up} は参加型センシングのサービス提供者により適切な値に設定されることを想定する。

各端末において、センサにより取得されたデータを「raw データ」と呼ぶ。各 raw データには、センシングが実施された位置、時刻、及びセンサにより取得された値が含まれるものとする。ある raw データ r について、センシングが実施された位置、時刻、及びその時のセンサの値をそれぞれ $pos(r)$, $time(r)$, $value(r)$ と表記する。ここで、集約処理としては、複数の値の最小値、最大値、平均値、中央値などを求めることを指す。

センシングが実施された位置と時刻に近い複数のセンシング結果は、互いに近い値である可能性が高い。そこで、空間と時間がある範囲内に収まる複数のセンシング結果を互いに集約可能であると仮定する。集約可能なデータの範囲を定めるため、空間と時間について、それぞれ次のような分割を考える。空間については、二次元平面を考え、それがグリッド状に分割されているものと仮定する。図2 (a) のように、グリッド内の各矩形 (セルと呼ぶ) を $cell_i$ と表記する。また、時間については、図2 (b) のように、ある一定時間 (T_{par}) を考え、 T_{par} ごとに分割されているものと仮定する。また、各 $i \in \{0, 1, 2, \dots\}$ について、時間区間 T_i を $[iT_{par}, (i+1)T_{par})$ と定義する。各セルの幅及び T_{par} は参加型センシングのサービス提供者により適切な値に設定されることを想定する。

M 個の raw データ r_i ($i = 1, 2, \dots, M$) について、あるセル $cell_s$ と時間区間 T_t が存在して、全ての i ($i = 1, 2, \dots, M$) に対し、 $pos(r_i) \in cell_s \wedge time(r_i) \in T_t$ が成り立つとき、 M 個の raw データを集約可能であるとする。このとき、集約後のデータを $agg(\{r_1, \dots, r_M\})$ と表記する。図3に2つの raw データ r_1 と r_2 を集約する例を示す。この例では、

^{*1} なお、周波数利用状況に限定せず、温度、騒音レベルなどをセンシングする場合についても、以下で述べる前提や提案方式は一般性を失わない。

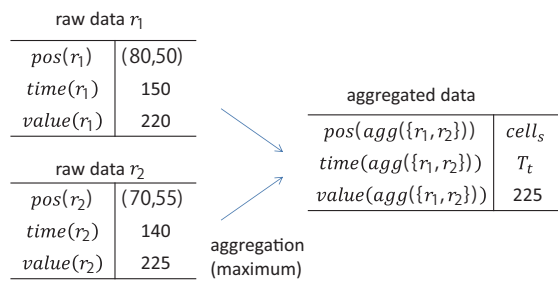


図3 データの集約

複数の値の最大値を集約後の値としている。 M 個の raw データの集約を行うことで、集約前のデータ量に対し、集約後のデータ量をおおよそ $1/M$ に削減することが可能である。

各端末は、一定周期 (T_{hel} とする) に基づき「Hello パケット」を送信し、自身の周囲に位置する端末に対し、自身の存在を通知するものとする。Hello パケットを受信した端末は、Hello パケットの送信元端末との近距離無線通信により、自身の持つ raw データの集合を相手端末へ送信するか、もしくは相手端末から raw データの集合を受信することが可能であるとする。また、 T_{hel} は参加型センシングのサービス提供者により適切な値に設定されることを想定する。ある端末から受信した raw データの集合を、さらに他の端末との遭遇時に相手端末へ送信することも可能とする。例えば、端末 u_1 と u_2 が遭遇し、 u_2 は u_1 から raw データの集合を受信したとする。その後、 u_2 が u_3 と遭遇した際、 u_2 は u_1 から受信した raw データの集合と、自身が直接センシングした raw データの集合とを合わせて u_3 へ送信することも可能である。

ある端末において、自身のセンサにより取得した raw データの集合に対して行う集約処理を「端末内集約」と呼ぶ。一方、他の端末から受信した raw データを一つ以上含む raw データの集合に対して行う集約処理を「端末間集約」と呼ぶ。

なお本稿では、集約処理はサーバへデータをアップロードする直前にのみ行うものとし、端末間でデータを移動する際には全て raw データのまま送受信を行うものとする。端末間通信により周囲の無線環境に与える干渉やバッテリー消費のことを考慮すると、端末間通信自体の負荷も軽減できることが望ましいが、これは今後の課題とする。また、集約処理として中央値などを求める場合には、一度集約を行ったデータに対し再度集約を行うことができない [24] ため、サーバへのアップロード直前まで全てのデータを raw データのまま保持しておくことが求められる。

4. 提案方式

本章では、上記で述べた想定と仮定に基づき、効果的な端末間集約を実現するための端末間でのデータ収集方式に

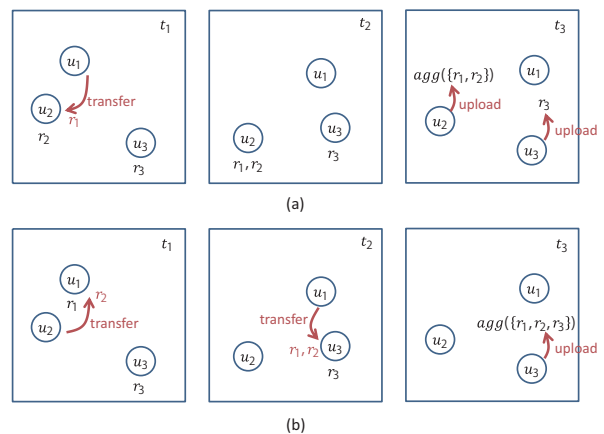


図4 端末間集約の例。(a) u_1 から u_2 へデータを送信する場合。(b) u_2 から u_1 へデータを送信する場合。

ついて詳細を述べる。

効果的な端末間集約のためには、端末どうしが遭遇した際に、データをどちらの端末からもう一方の端末へ送信するかを適切に決定することが重要となる。例えば、図4のように、端末 u_1 , u_2 , u_3 が存在し、各々センシングを行い、raw データ r_1 , r_2 , r_3 をそれぞれ保持している状態を考える。図4(a)では、時刻 t_1 において、 u_1 と u_2 が遭遇し、 u_1 から u_2 へデータが送信された場合を示している。その後、時刻 t_2 において u_1 と u_3 が遭遇するが、 u_3 は自身のデータを保持したままであったとする。最終的に t_3 において u_2 は $agg(\{r_1, r_2\})$ を、 u_3 は r_3 を、それぞれサーバへアップロードする。結果として、アップロードされたデータ量は、raw データ2つ分のデータ量に相当する。一方、図4(b)では、 t_1 において u_2 から u_1 へデータが送信された場合を示している。その後、 t_2 において、 u_1 から u_3 へデータが送信されたものとする。最終的に、 t_3 において u_3 は $agg(\{r_1, r_2, r_3\})$ をサーバへアップロードする。結果として、アップロードされたデータ量は、raw データ1つ分のデータ量に相当する。以上のように、端末どうしが遭遇した際に、どちらの端末のデータをもう一方の端末へ送信するかを適切に決定することで、最終的により多くのデータ量の削減を行うことが可能となる。

提案方式では、効率の良い端末間データ集約を行うため、各端末に対し「ランク」と呼ぶ数値^{*2}を割り当てる。そして、端末どうしが遭遇した際に、ランクの小さい方の端末が保持する全ての raw データを、ランクの大きい方の端末へ移動させる。「各端末が自身よりもより大きいランクを持つ端末に対してデータを移動する」という操作が複数の端末間で多段階に行われることで、ランクの大きな値を持つ比較的少数の端末の集合に対し、その他多くの端末のデータが集中的に収集され、結果としてより多くの端末から集

^{*2} 本稿の範囲では実数値を考えるが、より一般的には、半順序集合の要素でもよい。

めたデータをまとめて集約可能となることが期待できる。

ここで、各端末のランクをどのように割り当てるかが問題となる。ランクの割り当て方として、本稿では、端末 ID に基づく方法 (ID-based ranking)、データサイズに基づく方法 (Data size-based ranking)、遭遇回数に基づく方法 (Contact-based ranking) の 3 つを考える。端末 ID に基づく方法では、各端末は自身の ID をそのままランクの値とする。データサイズに基づく方法では、各端末は自身が保持している raw データの数をランクの値とする。従って、より多くの raw データを保持する端末により大きなランクが割り当てられる。遭遇回数に基づく方法では、ある一定期間において各端末がどの端末と遭遇したかをあらかじめ記録しておき、各端末について、その期間内に自身が遭遇した相手端末の個数をランクの値とする。従って、より多くの端末と遭遇する端末に、より多くのデータが集まるようになる。人のモビリティは、日中は職場や学校に滞在し夜間は家に滞在するなどの一定の規則性を有することから、良い精度で予測可能であることが報告されている [25]。各端末のモビリティの予測方式 [26] や端末間の遭遇を表現するグラフ上での中心性を求める方式 [27] が提案されており、これらの方式に基づき各端末のランクをあらかじめ求めるものとする。

Algorithm 1 Send or receive data

```

procedure alg1_sub( $x_1, x_2$ )
1: if  $x_1 < x_2$  then
2:   send data to  $u_{peer}$ .
3: else
4:   receive data from  $u_{peer}$ .
5: end if
procedure alg1_main( $u_{self}, u_{peer}$ )
6: if  $rank(u_{self}) \neq rank(u_{peer})$  then
7:   call alg1_sub( $rank(u_{self}), rank(u_{peer})$ ).
8: else
9:   call alg1_sub( $id(u_{self}), id(u_{peer})$ ).
10: end if

```

端末どうしが遭遇した際に、まず、互いに自身のランクを相手端末に通知する。各端末では自身のランクと相手端末のランクの比較を行うことで、自身がデータ送信者となるか受信者となるかを決定する。その際のアロリズムを Algorithm 1 に示す。各端末では、相手端末のランクを得た後、alg1_mainを実行する。なお、 u_{self} は自端末、 u_{peer} は相手端末を意味するものとする。また、 $rank(u_i)$ は端末 u_i のランクを意味するものとする。自身と相手端末のランクが異なる値の場合には、ランクの小さいほうがデータを送信し、ランクの大きい方がデータを受信する。また、ランクの値が等しい場合には、端末 ID に基づく方法によりデータの送受信者を決定する。

表 1 シミュレーションの設定

パラメタ名	設定値
ノード数	400
シミュレーション時間	5000 (s)
通信可能範囲	100 (m)
エリアサイズ	2×2 (km ²)
ノードのモビリティモデル	Random Waypoint
ノードの移動速度	[0.5, 1.5] (m/s)
ノードの停止時間	1 (s)
センシング周期	1 (s)
Hello パケット送信周期	10 (s)
集約可能範囲	空間 (セル幅): 250 (m) 以内 時間 (T_{par}): 100 (s) 以内

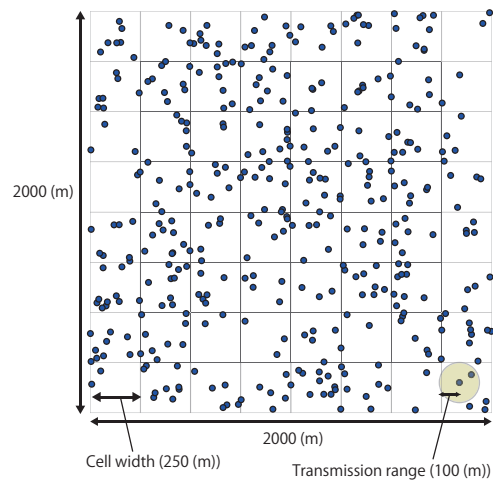


図 5 シミュレーションエリア (ノード数は 400)

5. 実験

提案方式におけるデータ集約によるデータ量削減の効果を明らかにするため、シミュレーションによる実験を行った。実験では、2 (km) 四方のエリア内に、モバイル端末を表すノードを 400 ノード配置した。各ノードの初期位置は、一様乱数に基づき決定した。各ノードは、Random Waypoint モビリティモデル [28] に基づき移動を行う。Random Waypoint モデルにおけるノードの停止時間は 1 (s) とし、移動速度は区間 [0.5, 1.5] (m/s) から一様乱数により決定した。各ノードのセンシング周期 (T_{sen}) は 1 (s) とし、その周期が経過する度に raw データが 1 つ生成されるものとした。集約可能なデータの範囲を定める各セルの幅は 250 (m) とし、 T_{par} は 100 (s) とした。Hello パケットの送信周期 (T_{hel}) は 10 (s) とし、各ノードは自身の位置の半径 100 (m) 以内のノードと通信可能とした。シミュレーションの設定の一覧を表 1 に示す。また、エリア内へのノードの初期配置の例を図 5 に示す。

集約によるデータ量削減の効果の大小を定義するため、raw データ 1 つ分のデータ量を 1 とし、集約可能な複数の raw データを集約すると、raw データ 1 つ分と等しいデー

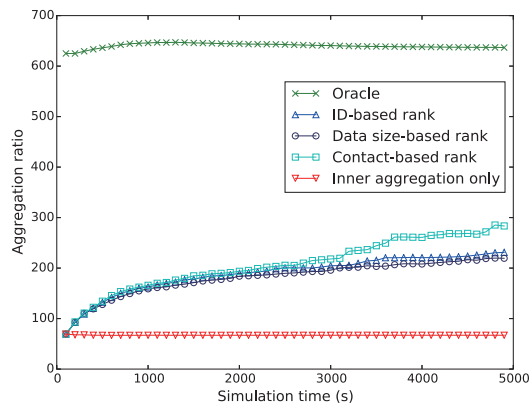


図 6 各方式の集約比の時間変化

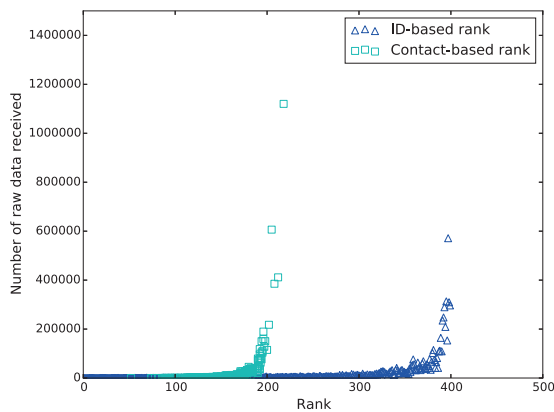


図 7 ランクと各端末が受信した raw データ数との関係

量になるものとした。例えば、集約可能な n 個 (n は任意の自然数) の raw データを集約すると、データ量は 1 となる。集約の効果の大きさを測る指標として、データ圧縮の評価指標として用いられる圧縮比 [29] と同様に、「集約比」を次のように定義する：

$$\text{集約比} = \frac{\text{集約前のデータ量}}{\text{集約後のデータ量}} \quad (1)$$

実験では、提案方式によるランクの割り当て方として、端末 ID に基づく方法、データサイズに基づく方法、遭遇回数に基づく方法の 3 つを使用し、それぞれにおける集約比を計測した。なお、遭遇回数に基づく方法によりランクを割り当てた場合には、あらかじめ Random Waypoint モデルに基づく各ノードの移動経路から各ノードの他ノードとの遭遇回数に基づくランクを求め、その後再度各ノードを同一経路に沿って移動させながら端末間集約を行い集約比を計測した。また比較のため、端末内集約のみにより集約を行う方式（すなわち端末間集約を行わない方式）について集約比を計測した。また参考のため、全ての raw データが仮に 1 つの端末に全て収集された理想的な場合（「オラクル」と呼ぶ）についても集約比を計測した。

実験結果を図 6 に示す。図 6 より、端末 ID に基づく方

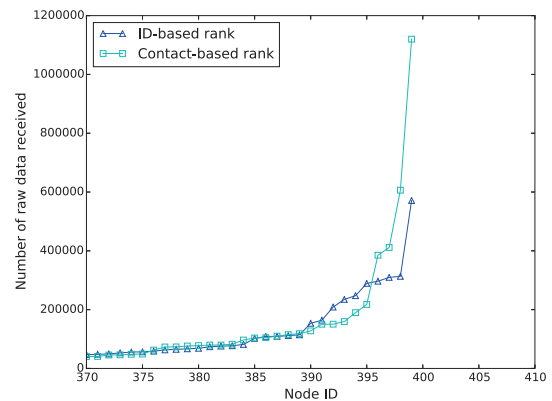


図 8 受信した raw データ数の多い上位ノードの受信 raw データ数

法とデータサイズに基づく方法はほぼ同じ性能であり、それぞれ端末内集約のみの場合に比べ、最大で約 3.4 倍、約 3.3 倍の集約比となった。また、遭遇回数に基づく方法は、それらよりも性能が向上し、端末内集約のみの場合に比べ、最大で約 4.2 倍の集約比となった。また、端末 ID に基づく方法とデータサイズに基づく方法では、2000 秒程度まで集約比が急速に向上した後、集約比の向上度合いは非常に緩やかになることが分かる。このことは、これらのランク割り当て方法を用いる場合には、セルラ通信等を介したサーバへのデータのアップロード周期 (T_{up}) を 2000 秒程度に設定しておけば十分な集約効果が得られることを示しており、それ以上の大きな値を設定しても、サーバがデータを得られるまでの遅延時間に見合ったデータ量削減効果は望めないことを意味している。一方、遭遇回数に基づく方法では、2000 秒以降も集約比の明らかな向上が見られることが分かる。また遭遇回数に基づく方法では、オラクルが達成する性能の約 45% 程度まで達成可能なが分かる。

また、提案方式による各端末へのランク割り当てにより、ランクのより大きな端末へ raw データが集中して収集されているかを調査した。結果を図 7 に示す。図では、5000 秒経過した時点における、端末 ID に基づく方法と遭遇回数に基づく方法の各々について、各端末のランクと他端末から受信した raw データ総数との関係を示している。図より、ランクの大きい少数の端末集合により多くの raw データが受信されていることが確認でき、提案方式により多数の端末のデータをまとめて集約するための効果的なデータ収集が実現されていることが分かる。さらに、端末 ID に基づく方法と遭遇回数に基づく方法との差に注目するため、各々について、他端末から受信した raw データ総数の多い上位 30 端末について、受信 raw データ総数の昇順にソートした結果を図 8 に示す。図 8 より、遭遇回数に基づく方法では、上位 4 端末に集中的に特に多くの raw データが受信されていることが分かる。この違いにより、図 6 における端末 ID に基づく方法と遭遇回数に基づく方法との性能差が生じていると考えられる。

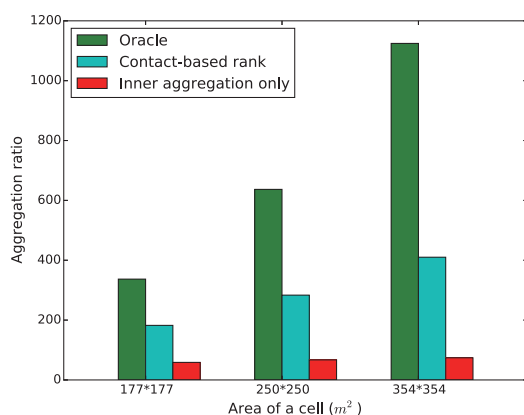


図 9 セルの面積と集約比との関係

最後に、セルの面積と集約比との関係について調査するための実験を行った。実験では、端末内集約のみ行う方式、提案方式（遭遇回数に基づく方法）、オラクルの3つについて、セルの面積（m²）が177×177、250×250、354×354のそれぞれの時、5000秒経過した時点での各方式の集約比を計測した。セルの面積以外のパラメタの設定値は、表1と同一である。結果を図9に示す。図より、セルの面積を増加させることで、提案方式は集約比が明らかに向上することが分かる。ただし、集約比の向上度合いはオラクルに比較して緩やかである。一方、端末内集約のみの場合には、セルの面積を増加させることによるデータ量削減の効果はほとんど得られない。従って提案方式は、アプリケーションで必要とするデータの精度と、どの程度の集約比（すなわちデータ量削減効果）を得たいかにより、セルの面積を適切に設定することが重要であると言える。

6. おわりに

筆者らは、周波数共用のための広域での周波数利用状況の把握に向け、参加型センシングの利用を検討している。本稿では、参加型センシングにおいて、セルラ通信等のインターネットと接続する無線アクセス網に対し、センシング結果の送信によりかかる負荷を軽減する方式を提案した。提案方式では、端末どうしが遭遇した際に、端末間通信によりセンシング結果を送受信し合うことで、時間の経過に伴い少数の端末群に他の端末のデータを集中して保持させ、集約によるデータ量削減効果を向上する。シミュレーションにより、端末内集約のみの場合との比較により提案方式のデータ量削減の効果を確認した。実験結果より、遭遇回数に基づくランク割り当てを行う場合、提案方式は端末内集約のみの場合と比べ、最大で約4.2倍データ量の削減が可能であることが分かった。

シミュレーションにおいて、Random Waypoint モデルによる評価を行ったが、今後、人のより現実的な移動を反映したモビリティモデルを用いて評価を行う予定である。

また、スペクトラムのモニタリングにおいて提案方式を利用することで、どの程度の遅延と精度で周波数利用状況を把握可能かについても、今後調査を行う予定である。

謝辞

本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」の「複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術に関する研究開発」の一環として実施した。

参考文献

- [1] 玉井森彦, 長谷川晃朗, 新保宏之, 武内良男: “移動センサによる周波数センシングにおけるデータ収集網の構築方式に関する一検討,” 信学総大 通信講演論文集 1, p. 616, 2016.
- [2] T. Yücek and H. Arslan: “A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 11, No. 1, pp. 116–130, 2009.
- [3] R. Deng, J. Chen, C. Yuen, P. Cheng, Y. Sun: “Energy-efficient Cooperative Spectrum Sensing by Optimal Scheduling in Sensor-aided Cognitive Radio Networks,” *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 61, No. 2, pp. 716–725, 2011.
- [4] X. Yu, H. Zhao, L. Zhang, S. Wu, B. Krishnamachari, V. O.K. Li: “Cooperative Sensing and Compression in Vehicular Sensor Networks for Urban Monitoring,” In *Proc. of ICC’10*, pp. 1–5, 2010.
- [5] R. K. Rana, C. T. Chou, S. S. Kanhere, N. Bulusu, W. Hu: “Ear-Phone: An End-to-End Participatory Urban Noise Mapping System,” In *Proc. of IPSN’10*, pp. 105–116, 2010.
- [6] J. Lee, Y. Yi, S. Chong, Y. Jin: “Economics of WiFi Offloading: Trading Delay for Cellular Capacity,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 13, No. 3, pp. 1540–1554, 2014.
- [7] S. Rayanchu, A. Patro, S. Banerjee: “Airshark: Detecting Non-WiFi RF Devices using Commodity WiFi Hardware,” In *Proc. of IMC’11*, pp. 137–154, 2011.
- [8] A. Farshad, M. K. Marina, F. Garcia: “Urban WiFi Characterization via Mobile Crowdsensing,” In *Proc. of NOMS’14*, pp. 1–9, 2014.
- [9] K. Lee, J. Lee, Y. Yi, I. Rhee, S. Chong: “Mobile Data Offloading: How Much Can WiFi Deliver?,” *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 21, No. 2, pp. 536–550, 2013.
- [10] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados: “Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 2, pp. 551–591, 2013.
- [11] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong: “TAG: a Tiny AGgregation service for ad-hoc sensor networks,” In *Proc. of OSDI’02*, pp. 131–146, 2002.
- [12] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong: “The Design of an Acquisitional Query Processor For Sensor Networks,” In *Proc. of SIGMOD’03*, pp. 492–502, 2003.
- [13] N. Shrivastava, C. Buragohain, D. Agrawal, S. Suri: “Medians and Beyond: New Aggregation Techniques for Sensor Networks,” In *Proc. of SenSys’04*, pp. 239–249, 2004.
- [14] K. C. Barr, K. Asanović: “Energy-Aware Lossless Data Compression,” *ACM Trans. on Computer Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 250–291, 2006.
- [15] E. P. Capo-Chichi, H. Guyennet, J.-M. Friedt: “K-RLE :

- A new Data Compression Algorithm for Wireless Sensor Network,” In *Proc. of SENSORCOMM’09*, pp. 502–507, 2009.
- [16] F. Marcelloni, M. Vecchio: “A Simple Algorithm for Data Compression in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Communications Letters*, Vol. 12, No. 6, pp. 411–413, 2008.
- [17] A. T. Campbell, S. B. Eisenman, N. D. Lane, E. Miluzzo, R. A. Peterson: “People-Centric Urban Sensing,” In *Proc. of WICON’06*, Article No. 18, 2006.
- [18] J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, A. Parker, N. Ramanathan, S. Reddy, and M.B. Srivastava: “Participatory Sensing,” In *Proc. of World Sensor Web Workshop (WSW’06)*, 2006.
- [19] N. D. Lane, S. B. Eisenman, M. Musolesi, E. Miluzzo, A. T. Campbell: “Urban Sensing Systems: Opportunistic or Participatory?,” In *Proc. of HotMobile’08*, pp. 11–16, 2008.
- [20] D. Christin, J. Guillemet, A. Reinhardt, M. Hollick, S. S. Kanhere: “Privacy-preserving Collaborative Path Hiding for Participatory Sensing Applications,” In *Proc. of MASS’11*, pp. 341–350, 2011.
- [21] K. Xing, Z. Wan, P. Hu, H. Zhu, Y. Wang, X. Chen, Y. Wang, L. Huang: “Mutual Privacy-Preserving Regression Modeling in Participatory Sensing,” In *Proc. of Infocom’13*, pp. 3039–3047, 2013.
- [22] D. Zhao, H. Ma, S. Tang, X.-Y. Li: “COUPON: A Cooperative Framework for Building Sensing Maps in Mobile Opportunistic Networks,” *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 26, No. 2, pp. 392–402, 2015.
- [23] T. Spyropoulos, K. Psounis, C. S. Raghavendra: “Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks: The Multiple-Copy Case,” *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 16, No. 1, 2008.
- [24] P. Jesus, C. Baquero, P. S. Almeida: “A Survey of Distributed Data Aggregation Algorithms,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 1, pp. 381–404, 2014.
- [25] C. Song, Z. Qu, N. Blumm, A.-L. Barabási: “Limits of Predictability in Human Mobility,” *Science*, Vol. 327, pp. 1018–1021, 2010.
- [26] Y. Chon, E. Talipov, H. Shin, H. Cha: “Mobility Prediction-based Smartphone Energy Optimization for Everyday Location Monitoring,” In *Proc. of SenSys’11*, pp. 82–95, 2011.
- [27] Y. Zhu, B. Xu, X. Shi, Y. Wang: “A Survey of Social-Based Routing in Delay Tolerant Networks: Positive and Negative Social Effects,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 1, pp. 387–401, 2013.
- [28] D. B. Johnson, D. A. Maltz: “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks,” *Mobile Computing*, The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Vol. 353, pp. 153–181, 1996.
- [29] S.K. Mukhopadhyay, S. Mitra, M. Mitra: “A lossless ECG data compression technique using ASCII character encoding,” *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 37, No. 4, pp. 486–497, 2011.