

セルラ通信網と D2D 通信を併用する インセンティブベースクラウドセンシング方式の提案

松田哲史^{1,2} 稲田徹¹ 石原進²

概要: 運転者が渋滞時に先方の道路状況を取得するケースや、観光客が目的地の混雑状況を問い合わせるケースなど、特定の場所の現状に関するセンシングデータ（以下、データ）を提供するサービスの需要が今後増加すると期待される。こうしたサービスをデータ取得に必要なセンサ設置と運用にかかる費用を抑えて実現するため、データを取得する端末に支払うインセンティブ量をリバースオークションで決める Pull 型モバイルクラウドセンシング（以下、Pull 型リバースオークション）を利用することを考える。Pull 型リバースオークションでは、リバースオークション実行に必要なサーバと端末間のセルラ通信量がサービス運用費用増加の原因となる。本研究では、D2D 通信とセルラ通信を併用することでサーバと端末間のセルラ通信量を減らす Pull 型リバースオークション方式を提案する。提案方式をシミュレーションで評価し、セルラ通信のみを利用する既存の Pull 型リバースオークション方式と比較して、提案方式が、同等のリバースオークション結果を得ることができ、サーバと端末間のセルラ通信量を減らす効果を示すことを確認した。

キーワード: D2D 通信, クラウドセンシング, MCS, リバースオークション, インセンティブ

1. はじめに

運転者が渋滞時に先方の道路状況を取得するケースや、観光客が目的地の混雑状況を問い合わせるケースなど、特定の場所の現状に関するセンシングデータ（以下、データ）を提供するサービスの需要が今後増加すると期待される。こうしたサービスの提供において、センシングデータ（以下、データ）取得に必要なセンサの設置と保守運用にかかる費用が課題となる。予めセンサを設置することなくセンシングデータ収集を行う手法に、モバイルクラウドセンシング（MCS）[1]がある。MCS のシステムは、利用者の都合に合わせてセンシングデータ取得に協力するスマートフォンや車などのセンサを備え移動するデータ取得協力端末（以下、端末）と、端末を利用してデータを収集するサービス事業者が運用するサーバ（以下、サーバ）から成る。本論部では、サーバと端末間の通信は、利用者数の増加に伴いサービスエリアの拡大が進んでいるセルラ通信網で行うことを想定する。本論文では、端末間直接通信（D2D 通信）を用いることで既存方式よりもサーバと端末間のセルラ通信量を削減可能とするインセンティブベースの MCS 方式を提案する。

MCS において、端末がデータを取得するように動機付けてデータ取得の成功確率を高める手法に、端末によるデータ取得に対してサーバがインセンティブを支払うインセンティブベースの MCS [2]がある。インセンティブベースの MCS では、サーバがより質の高いデータをより少ないインセンティブで取得することが課題となるが、この課題の解決方法の 1 つにリバースオークション[2]がある（図 1）。リバースオークションを用いる MCS では、サーバが落札者

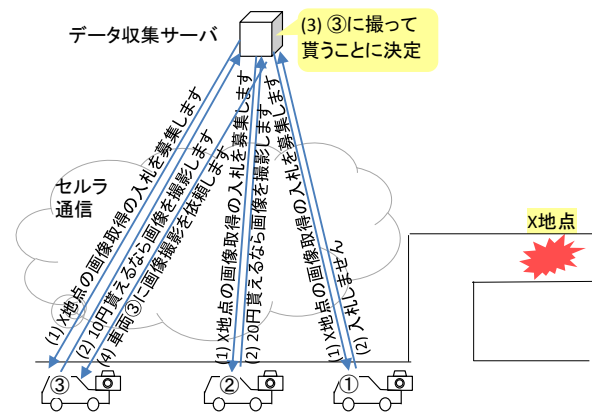


図 1 リバースオークションを用いる MCS の例

を決めるオークシヨナの役割を務め、端末に入札募集を送信する。端末はサーバに、入札募集対象のデータ取得要求に対する取得予定のデータの品質を示す情報と要求インセンティブを含む入札情報を送信する。サーバは、端末が提示する入札情報の中で評価値が最も大きいものを送信した端末にデータの取得を依頼する。

リバースオークションを用いる MCS で入札募集を端末に配信する方法に、端末から入札募集問い合わせを受けたことをトリガにサーバが入札募集を送信する Pull 型と、サーバが一方向的に端末に入札募集を送信する Push 型が存在する[1]。本研究では、Pull 型を使用するリバースオークション方式（以下、Pull 型リバースオークション）を使用することを前提として議論を進める。Pull 型リバースオークションは、その動作の起点が移動端末側にあるので、端末が利用者の都合に合わせてセンシングデータ取得に協力するという本研究における前提と親和性が高い。

指定場所の現状に関するセンシングデータを取得するサービスを Pull 型リバースオークションで実現する上で、サーバと端末間の通信量を減らすことが課題となる。課題となる理由を以下に説明する。Pull 型リバースオークションでのデータ取得では、以下の 3 つの性質が求められる。

1 三菱電機株式会社
Mitsubishi Electric Corporation
2 静岡大学
Shizuoka University

- i) **Timeliness** 決められた時間内にデータを所得できる
- ii) **Quality** より品質の良いデータを取得できる
- iii) **Cost** より安価にデータを所得できる

これらの性質を満たすため、データ取得要求の発生から予め決められた時間 T_q 内に、データを取得する可能性がある端末全てからサーバが入札情報を受信し、評価値が最も大きい入札情報を選ぶ必要がある。このようなオークションに参加するために、端末は T_q 以下の周期でサーバに入札募集を問い合わせ、データを取得する意思があれば入札情報を送信する必要がある。端末がサーバに入札募集を問い合わせるメッセージと入札募集のデータ量は小さいものの、全端末が定周期で送受信するので、これらの入札募集問い合わせと入札募集に関する通信は、システム運用におけるセルラ通信費用を大きく増やす可能性がある。また、複数の端末がサーバに入札情報を送信するための通信量も、システム運用におけるセルラ通信費用を増やす可能性がある。以上のことから、システム運用におけるセルラ通信費用削減のために、サーバと端末間の入札募集問合せ、入札募集、入札情報の通信量を減らすことが、Pull型リバースオークションの課題となる。

本論文では、既存方式であるセルラ通信のみを用いるPull型リバースオークションよりもサーバと端末間のセルラ通信量を削減可能なPull型リバースオークション方式を提案する。提案方式は以下の特徴をもつ。

- 1) 既存方式をベースにD2D通信を併用し、サーバが端末（以下、代表端末）の協力を得て、入札募集配信と入札情報収集をD2D通信経由で行うことで、既存方式よりサーバと端末間のセルラ通信量を削減。
- 2) 既存方式と同じ時間内に同等のリバースオークション結果を得ることが可能。
- 3) 悪意ある代表端末が意図的に入札募集の配信や入札情報の収集を止める（パケットロスを起こす）と、リバースオークションが正しく実行されない問題に、代表端末を複数選出することで対処。

本論文の貢献は、上記方式の提案と、シミュレーション評価で提案方式の効果を確認したことである。以下、2節で関連研究を説明し、3節で提案方式のベースとなる既存方式を説明する。4節で提案方式を説明し、5節で提案方式のシミュレーションによる評価結果を説明し、6節にまとめを述べる。

2. 関連研究

本研究が対象とするリバースオークションを用いるMCSの関連研究を整理する。

Leeら[3]はReverse Auction based Dynamic Pricing Virtual Participatory Credit (RADP-VPC)という、サーバが落札端末決定時に端末に付与するインセンティブ量の決定方法を提案している。RADP-VPCは、リバースオークションに参加

する端末数を一定以上確保するため、落札できなくてもオークションに継続して参加する端末に相対的に多くのインセンティブを付与する方式である。[3]はサーバと端末間の通信方法に言及していない。

Zhangら[4]は、リバースオークションにおいて、全端末の入札情報を受信してからサーバが落札端末を決めると落札端末決定に時間がかかる課題に対して、一定数の端末から入札情報を受信した後に、新たに端末から入札情報を受信する度に落札端末を決定するアルゴリズムを提案している。[4]はサーバと端末間の通信方法に言及していない。

以上のリバースオークションを用いるMCSの既存研究は、サーバと端末間の入札募集と入札情報の通信はセルラ通信などで行う前提にしており、サーバと端末間の通信量を削減する方法には言及していない。

次に、リバースオークションを用いるMCSが対象ではないが、MCSにおけるサーバと端末間のセルラ通信量の削減手法の関連研究を整理する。

Motaら[5]は、MCSでD2D通信を利用することでサーバと端末間のセルラ通信量を減らすD2D Extended Sensing (D2D-ES)とD2D Content Dissemination (D2D-CD)を提案している。D2D-ESでは、サーバにセンシングデータを送信する代表端末が決まっている前提で、端末がセンシングデータをD2D通信で代表端末に送信し、代表端末がサーバにまとめてセンシングデータを送信する。これにより、端末がサーバにセンシングデータを送信するためのセルラ通信量を減らす。一方、D2D-CDでは、サーバから情報を受信する代表端末が決まっている前提で、代表端末がサーバから受信した情報を他の端末にD2D通信で配信する。これにより、サーバが端末に情報を送信する際に、サーバが端末に情報を送信するためのセルラ通信量を減らす。[5]はリバースオークションに言及していないが、端末への入札募集配信にD2D-CD、端末の入札情報収集にD2D-ESの考え方を適用することで、セルラ通信量削減が可能である。しかし、[5]にはPull型リバースオークションの実現に必要な代表端末の決定方法とD2D-ES、D2D-CDの使用方法は含まれないので、[5]の方式だけではPull型リバースオークションのセルラ通信量削減を実現することはできない。

松本ら[6]は、車が車載カメラで撮影し保有する画像をサーバにアップロードし、ドライバが望む場所の画像情報をサーバが提供するシステムにおいて、車がサーバにアップロードする画像を必要なものに限定しサーバと端末間のセルラ通信量を減らす方法を提案している。[6]は、車が保有する画像のメタデータ（撮影位置、時刻等）を車車間のD2D通信で交換し、自車と近隣の車が保有する画像のメタデータを併せて車がサーバに報告することで、必要な画像を保有する車をサーバが効率的に見つけ、見つけた車に必要な画像のアップロードを要求する方式を提案している。[6]が提案する方式は、車が自発的に撮影し保有する画像デー

タが対象で、端末が保有するメタデータを D2D 通信を併用しサーバに送信する方式なので、[6]の手法で Pull 型リバースオークションのセルラ通信量を削減することはできない。

以上をまとめると、D2D 通信を併用することでサーバと端末間のセルラ通信量を削減する MCS の既存研究は存在するが、Pull 型リバースオークションでのサーバと端末間の通信量削減にそのまま適用できるものはない。

3. 既存方式

本節では、まず、セルラ通信のみを使用する Pull 型リバースオークション方式の手順 (図 2) を説明する。この方式は、リバースオークションを用いる MCS の既存研究 [3][4]が前提としているものと同等と考えられる。以下、サーバでは任意の位置 (Point of Interest, 以下 POI) に対するデータ取得要求が任意の時刻に発生するものとする。Pull 型リバースオークションでは、端末から入札募集問い合わせがあった場合、その端末が現在有効なデータ取得要求を満たす可能性が高いならば、サーバはその端末にデータ取得要求を含む入札募集を送信する。

- 1) 端末は、周期 T_q で自端末の位置を含む「入札募集問い合わせメッセージ」をサーバに送信する。
- 2) サーバは、各端末からの入札募集問い合わせメッセージに含まれる端末位置に基づいて入札募集に含めるデータ取得要求を選び、「入札募集問い合わせ応答メッセージ」で端末に入札募集を送信する。データ取得要求には、データ取得要求 ID、POI、取得対象データの仕様 (センサ種別など)、支払いインセンティブ量の最大値、落札決定時刻の情報が含まれる。本論文では、データ取得要求が発生した時刻から設定パラメータ T_L 時間後の時刻を落札決定時刻とする。
- 3) 端末は、入札募集問い合わせ応答メッセージに含まれる入札募集の内容に基づいて自身の入札内容を決めて、入札内容を表す入札情報を「入札情報メッセージ」でサーバに送信する。入札情報には、データ取得要求 ID、

入札端末の識別情報、データ取得予定位置、取得データの仕様、要求インセンティブ量、データ取得予定時刻が含まれる。なお、入札情報に対して評価値 (大きいほど評価が高い) を計算するための評価関数が定義されており、サーバはこの評価関数を知るものとする。

- 4) サーバは、データ取得要求発生から、 T_q 時間後までの間に受信した入札情報メッセージの中で、評価値が最も大きい入札情報を送信した端末をデータ取得端末に選び、データ取得端末に「落札結果メッセージ」を送信してデータ取得を依頼する。落札結果メッセージは、データ取得端末が送信した入札情報の内容を含む。
- 5) 端末は、データ取得要求に含まれる落札決定時刻までに落札結果メッセージを受信しなければ、落札できなかったと判断する。落札結果メッセージを受信した端末は、落札結果メッセージに含まれる情報に基づいてデータを取得し、サーバにデータ取得要求 ID とデータを含む「データメッセージ」を送信する。データメッセージを受信したサーバは、データ取得要求に対するデータの処理を行う。

サーバは、端末から入札募集問い合わせメッセージを受信した時に、以下の考え方で端末に送信する入札募集問い合わせ応答メッセージに含める入札募集の内容を決める。サーバは、現在有効な自身のデータ取得要求、すなわち発生後の経過時間が T_q 未満のデータ取得要求の中で、端末がデータ取得の依頼対象になる可能性があるものを、その端末に送信する入札募集に含める。例えば、その端末の現在位置が POI に近いなどの観点から、その端末がデータ取得の依頼対象となるかを判断する。

本稿では、ここで述べた既存手法を後で提案手法と比較するが、そこで用いるシミュレーションモデルでは、個々のデータ取得要求に対して、端末がデータ取得の依頼対象になる可能性があるか否かを、サーバが以下の手順で決めるものとした。端末から受信した入札募集問い合わせメッセージに含まれる端末位置情報に基づいて、サーバは最新の端末位置のデータベース (以下、端末位置 DB) を更新する。そして、端末位置 DB の情報に基づいて、データ取得要求の POI を中心とする円内に存在する端末数の推定値が設定パラメータ θ_n 以上となる最小の半径 R の値を求める。 R が設定パラメータ R_{max} より大きい場合は、 R を R_{max} に設定する。端末位置 DB に記録される端末の位置がこの円内にあれば、サーバはその端末がデータ取得要求に対するデータ取得を行う可能性があり、データ取得の依頼対象になる可能性があると判断する。

なお、入札募集と入札情報のデータは、改竄防止と送信元認証のため電子署名などの方法で保護されるものとする。

4. 提案方式

本節では、既存方式と比較して、サーバと端末間のセル

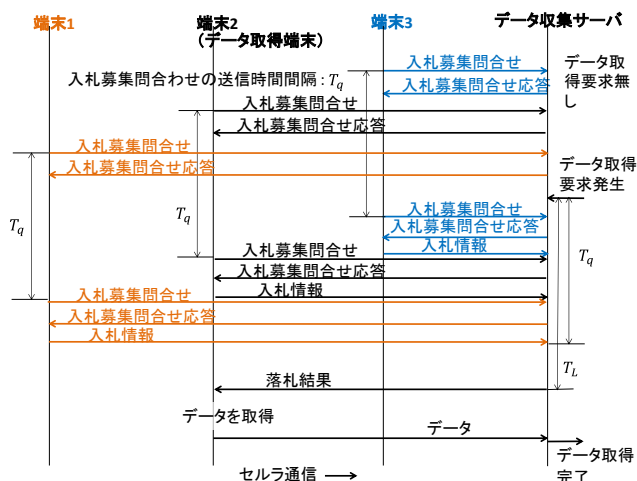


図 2 既存方式の手順例

ラ通信量を削減可能な Pull 型リバースオークション方式を提案する。

4.1 提案方式の概要

提案方式は以下の特徴を持つ。以下では、ある端末の近隣端末を、その端末が 1 ホップの D2D 通信で通信できる端末であると定義する。

1) 既存方式をベースに D2D 通信を併用することで、既存方式よりもサーバと端末間のセルラ通信量を削減。

近隣端末の中から選出される代表端末がサーバと近隣端末間の入札募集の配信と入札情報の収集を D2D 通信経路で中継するため、サーバと端末間の通信量が削減される。

2) 既存方式と同じ時間内に同等のリバースオークション結果を得ることが可能。

既存方式と同じ時間内に同等のリバースオークション結果を得るため、提案方式では、既存方式と同じ時間内に、データ取得要求に対する入札募集を既存方式と同等の端末集合に配信する。そのため、a) 各端末の近隣端末の中から選ばれたいずれかの代表端末がサーバに入札募集を問い合わせる時間間隔を T_q 以下にし、さらに、b) サーバが代表端末に送信する入札募集に含めるデータ取得要求の集合が、既存方式が代表端末と近隣端末に配信する入札募集に含めるデータ取得要求の集合と同等になるように、代表端末と近隣端末の位置に基づき、サーバが代表端末に送信する入札募集に含めるデータ取得要求を選ぶ。

3) 悪意ある代表端末が意図的に入札募集の配信や入札情報の収集を止める（パケットロスを起こす）と、リバースオークションが正しく実行されない問題に対処。

D2D 通信で交換するメッセージに基づいて、近隣端末の中から複数の端末が自分の判断で代表端末になり、複数の代表端末にサーバが同じ入札募集を配信することで上記問題に対処する。具体的には、端末は、サーバに新たな入札募集を問い合わせる代表端末（以下、新規代表端末）になるか否かを判断する。新規代表端末が決まると、新規代表端末が受信する入札募集と同じ入札募集を受信するためにサーバに入札募集を問い合わせる代表端末（以下、関連代表端末）が $(M - 1)$ 台 (M は設定パラメータ) になるように、新規代表端末の近隣端末の集合 N_n に属する端末は、関連代表端末になるか否かを判断する (図 3)。新規代表端末は「新規入札募集問合せメッセージ」、関連代表端末は「関連入札募集問合せメッセージ」で、サーバに入札募集を問い合わせる。こうすることで、サーバは N_n に属する端末との間で、複数の代表端末経由で入札募集の配信と入札情報の収集を行うことができる。これにより、複数の代表端末の中に悪意がない端末が 1 台存在すれば、サーバと N_n に属する端末間の入札募集の配信と入札情報の収集が可能となり、悪意ある端末が原因でリバースオークションが正しく実行されない確率を減らすことができる。

以下に、提案方式でのリバースオークション手順 (図 4) の骨子を説明する。以下の説明では、入札情報に対して評価値を計算するための評価関数が定義されており、サーバと端末の両者がこの評価関数を知るものとする。

- (1) 近隣端末と D2D 通信で交換するメッセージに基づいて各端末は、サーバに「新規入札募集問合せメッセージ」 (Q_n) を送信する新規代表端末、または、「関連入札募集問合せメッセージ」 (Q_r) を送信する関連代表端末になるか否かを判断する。
- (2) 代表端末から受信した Q_n または Q_r の内容に基づいて、サーバは代表端末に送信する入札募集の内容を決定し、入札募集を含む「新規入札募集問合せ応答メッセージ」 (R_n)、または、「関連入札募集問合せ応答メッセージ」 (R_r) を代表端末に送信する。
- (3) R_n または R_r を受信すると、代表端末は、サーバから受信した入札募集を含む「D2D 入札募集メッセージ」を、新規代表端末の近隣端末が受信できるように D2D 通信 (2 ホップ) で同報する。
- (4) D2D 入札募集メッセージを受信した端末は、D2D 入札募集メッセージに含まれる入札募集に対して入札するかを判断する。入札する場合は、端末は入札情報を含む「D2D 入札情報メッセージ」を D2D 通信 (2 ホップ) で代表端末に同報する。同報する理由は、2 ホップのユニキャスト通信に必要なルーティング情報管理が困難な車間通信のようなケースに対応するためである。
- (5) 代表端末は、自分が送信した D2D 入札募集メッセージに対して受信する D2D 入札情報メッセージに含まれる

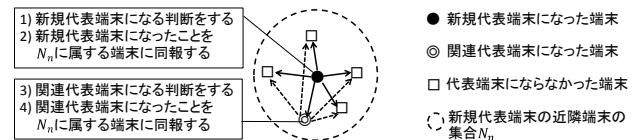


図 3 代表端末の選出例

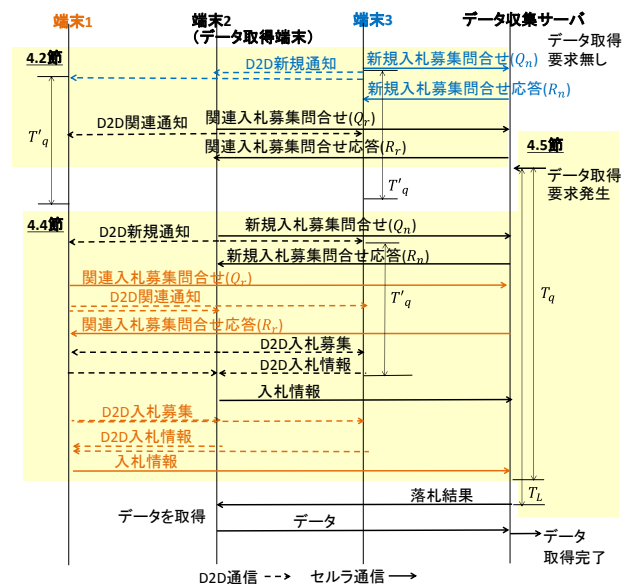


図 4 選出する代表端末数が 2 の場合の提案方式手順例

入札情報の中で、評価値が最も大きい入札情報を入札情報メッセージでサーバに送信する。

- (6) サーバは、複数の代表端末から受信する入札情報メッセージに含まれる入札情報の中で、評価値が最も大きい入札情報を送信した端末をデータ取得端末に選ぶ。そして、セルラ通信でサーバがデータ取得端末に落札結果メッセージを送信する。
- (7) 落札結果メッセージを受信したデータ取得端末は、センシングデータを取得し、データメッセージでサーバに送信する。

以下、4.2で(1)の詳細、4.3で(2)の詳細、4.4で(3)、(4)、(5)の詳細、4.5で(6)の詳細を説明する。

4.2 代表端末の選出方法

提案方式では、近隣端末とD2D通信で交換するメッセージに基づいて、端末は自分が代表端末になるか否かを判断する。代表端末の選出方針を以下に説明する。

- i) 各端末の近隣端末の中からいずれかの代表端末がサーバに入札募集を問い合わせる時間間隔を T_q 以下にする。 T_q より短い周期 T'_q で、端末は自分が新規代表端末になるか否かを判断することで、任意の端末の近隣端末の中から新規代表端末がサーバに入札募集を問い合わせる時間間隔を T_q 以下にする。

- ii) 近隣端末の中から複数の代表端末を選出
 端末は、過去 T'_q 時間内に近隣端末もしくは自身が新規代表端末になっていなければ、新規代表端末になり、自身が新規代表端末になったことをD2D通信で自身の近隣端末の集合 N_n に同報する。

N_n に属する端末は、 N_n に属する端末の中で関連代表端末になった端末の数が $(M-1)$ 未満 (M は設定パラメータ)であるならば関連代表端末となり、自身が関連代表端末となったことをD2D通信で N_n に属する端末に同報する。 N_n に属する端末は、同報される情報に基づき関連代表端末になった端末数を管理する。これにより、 N_n に属する端末の中で $(M-1)$ 台が関連代表端末になるようにする。

以下に手順を説明する(図4)。端末は、ランダムに決めた最初のタイミングから T'_q 時間周期で、新規入札募集問合せメッセージ(Q_n)をサーバに送信するか否かを判断する。具体的には、過去 T'_q 時間内に他端末から「D2D新規通知メッセージ」を受信しておらず、かつ、自端末が Q_n を送信していなければ、端末はサーバに Q_n を送信し新規代表端末になる。同時に、新規代表端末になったことを自身の近隣端末の集合 N_n に属する端末に通知するため、1ホップのD2D通信でD2D新規通知メッセージを同報する。D2D新規通知メッセージを受信した端末(以下、端末B)はランダム時間待機する。待機時間は0から設定パラメータ T_s の間のランダム値とする。この待機中に他の端末から受信した「D2D関連通知メッセージ」の数が $(M-1)$ 未満ならば、新規代表端末がサーバから受信する入札募集と同じ内容

の入札募集をサーバから受信するために、端末Bはサーバに関連入札募集問合せメッセージ(Q_r)を送信する。同時に、関連代表端末になったことを N_n に属する端末に通知するため、2ホップのD2D通信でD2D関連通知メッセージを N_n に属する端末に同報する。端末Bは、自身の待機中に受信したD2D関連通知メッセージの数が $(M-1)$ 以上ならば何もしない。

4.3 入札募集問合せメッセージと入札募集問合せ応答メッセージ内容の決定方法

4.3.1 方針

提案方式では、代表端末から受信する Q_n または Q_r の内容に基づいて、サーバは新規入札募集問合せ応答メッセージ(R_n)、または、関連入札募集応答メッセージ(R_r)の内容を決める。4.1 2)-b)に述べた入札募集に含めるデータ取得要求を選ぶ処理、ならびに3)に示した問題への対処に必要な、代表端末が Q_n または Q_r でサーバに送信する近隣端末の位置情報の管理方法と、サーバが代表端末に送信する入札募集に含めるデータ取得要求の選び方の方針を説明する。

- (a) 端末が Q_n または Q_r でサーバに送信する近隣端末の位置情報の管理方法

端末は、設定パラメータ T_b の周期で、自端末の位置をD2D通信で近隣端末に同報する。近隣端末が同報する情報に基づき、端末は近隣端末の位置情報と数を管理する。

代表端末は、自身と近隣端末全ての位置を包含する最小の円Cと、自身と近隣端末を合わせた端末数を求める。代表端末は、円Cの中心O、半径 r の情報(図5。以下、近隣端末存在範囲)と端末数を、 Q_n または Q_r で送信する近隣端末の位置情報に含める。近隣端末存在範囲を用いることで、近隣端末数が増えても、 Q_n または Q_r に含める自身の近隣端末の位置情報のデータ量は変わらないようにできる。

- (b) サーバが代表端末に R_n または R_r で送信する入札募集に含めるデータ取得要求の選び方

サーバが代表端末に送信する入札募集に含めるデータ取得要求の集合が、既存方式が代表端末と近隣端末に配信する入札募集に含めるデータ取得要求の集合と同等になるようにするため、 R_n で送信する入札募集に含めるデータ取得要求を以下のように選ぶ。 Q_n または Q_r に含まれる代表端末の近隣端末存在範囲に基づいて、既存方式と同様の考え方により、データ取得要求のPOIを中心とする円内に存在する端末数の推定値が θ_n 以上となる最小の半径 R の値を求める。そして、POIを中心とする半径 R の円に、代表端末もしくはその近隣端末の位置が含まれる可能性がある場合は、データ取得要求を R_n で送信する入札募集に含める。

近隣端末の中から複数選出する代表端末と同じ入札募

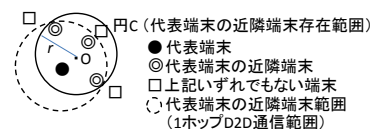


図5 代表端末の近隣端末存在範囲の例

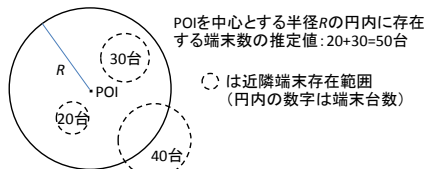


図6 半径 R の円内に存在する端末数の推定値の計算例

集を配信するために、 R_r に含める入札募集は、 Q_r に対応する Q_n に対して送信した R_n に含めた入札募集と同じにする。

以下、4.3.2で R_n または R_r で代表端末にサーバが送信する入札募集の内容決定方法を説明する。

4.3.2 サーバが代表端末に送信する入札募集の内容決定方法

サーバが代表端末に送信する入札募集の内容決定方法は、4.3.1のb)で説明したように既存方式と同様の考え方に基づくが、既存方式といくつかの点で異なる。

既存方式では、入札募集を問い合わせた端末がデータ取得の依頼対象になる可能性があるデータ取得要求を、その端末に送信する入札募集に含める。しかし、提案方式では、新規代表端末から受信した Q_n に対して、現在有効なデータ取得要求の中で、新規代表端末、もしくはその近隣端末がデータ取得の依頼対象になる可能性があるものを、その新規代表端末に送信する入札募集に含める。

既存方式では、サーバは端末位置情報 DB を管理する。しかし、提案方式では、サーバは端末位置情報 DB の代わりに代表端末の最新の近隣端末存在範囲と端末数のデータベース（以下、近隣端末情報 DB）を管理する。そして、 Q_n と Q_r に含まれる代表端末の近隣端末存在範囲と端末数に基づいて、近隣端末情報 DB を更新する。データ取得要求の POI を中心とする円内に存在する端末数の推定値を求める際、円が代表端末の近隣端末存在範囲を包含する場合のみ、近隣端末情報 DB に記録される端末数が円内に存在するとみなす（図6）。近隣端末情報 DB に記録される新規代表端末の近隣端末存在範囲と、データ取得要求の POI を中心とする半径 R の円に重なりがあれば、新規代表端末もしくはその近隣端末がデータ取得の依頼対象になる可能性がある」と判断する。

既存方式では Q_r 相当のメッセージはない。提案方式では、関連代表端末から受信した Q_r に対して、 Q_r に対応する Q_n に対して送信した R_n に含めた入札募集と同じ内容の入札募集を送信する。

4.4 代表端末による入札募集配信と入札情報収集方法

代表端末が、サーバから受信した入札募集を D2D 通信で近隣端末に配信し、D2D 通信で近隣端末から入札情報を収集し、入札情報をサーバへ送信する手順を説明する（図4）。サーバから入札募集を含む R_n または R_r を受信した代表端末は、D2D 通信（2 ホップ）で入札募集を含む「D2D 入札募集メッセージ」を同報する。D2D 入札募集メッセージを受信した端末は、メッセージ中の入札募集の内容に基づき

入札するか否かを判断する。入札する場合、端末は D2D 通信（2 ホップ）で入札情報を含む「D2D 入札情報メッセージ」を同報する。D2D 通信（2 ホップ）を用いる理由は、関連代表端末が、新規代表端末の近隣端末との間で入札募集と入札情報を送受信できるようにするためである。代表端末は、D2D 入札募集メッセージを送信してから設定パラメータ T_w 時間が経過した時点で、自端末の入札情報と、 T_w 待機する間に D2D 入札情報メッセージで受信した他端末の入札情報の中で評価値が最も大きい入札情報を選ぶ。そして、選んだ入札情報を含む入札情報メッセージをサーバへ送信する。

4.5 代表端末から受信する入札情報メッセージに基づきサーバがデータ取得端末を決める方法

代表端末から受信する入札情報メッセージに基づき、サーバがデータ取得端末を決める方法を説明する（図4）。サーバは、データ取得要求が発生してから T_q 時間が経過した時点で受信済みの入札情報メッセージに含まれる入札情報の中で、評価値が最も大きい入札情報を選び、その入札情報を作成した端末をデータ取得端末に選ぶ。そして、データ取得端末にセルラ通信で落札結果メッセージを送信し、端末にセンシングデータ取得を依頼する。

5. 提案方式の評価結果

5.1 評価項目

提案方式について、既存方式に対するセルラ通信量削減効果と、意図的にパケットロスを起こす代表端末の影響軽減効果の確認を目的にシミュレーションで評価した。シミュレーションの概要を以下に説明する。端末は $500\text{m} \times 500\text{m}$ のエリアを Random Way Point (RWP) [7]で移動させた。各端末の要求インセンティブ量は、シミュレーション開始時に端末毎に一様乱数で決める固定値とした。入札募集に対して、端末は移動経路上で POI に最も近い位置をデータ取得する位置に選び、その位置で取得するデータ内容に基づいて入札情報を作成することとした。データ取得要求は一様乱数で選んだ POI に対して 5s に 1 回発生させた。入札情報の評価値は、POI と端末がデータを取得する位置の距離、データ取得にかかる時間、要求インセンティブ量に基づいて決めた。シミュレーションは自作のシミュレータで実施した。

既存方式に対するセルラ通信量削減効果は、以下の2つを比較することで確認した。

- ・既存方式の入札募集問合せメッセージ、入札募集問合せ応答メッセージ、入札情報メッセージの合計数
- ・提案方式の新規入札募集問合せメッセージ、関連入札募集問合せメッセージ、新規入札募集問合せ応答メッセージ、関連入札募集問合せ応答メッセージ、入札情報メッセージの合計数

既存方式と提案方式で対応するメッセージのサイズは同等

なので、メッセージ数で通信量を比較した。また、提案方式のデータ取得結果と既存方式のデータ取得結果の差を評価する目的で、データ取得端末に選定された端末の入札情報の評価値の差を確認した。シミュレーションは、意図的にパケットロスを起こす代表端末が存在しない条件で、端末台数が 250 台、500 台、750 台の各条件で、1000 秒分のシミュレーションを異なる乱数シードで 10 回実行した。

意図的にパケットロスを起こす代表端末の影響軽減効果の確認は、提案方式の設定パラメータ $M = 2$ の場合と $M = 1$ の場合のそれぞれについて、以下の 2 ケースでのデータ取得端末の入札情報の評価値の差を確認することを行った。

- ・代表端末になった場合に意図的にパケットロスを起こす端末が全端末の 5% 存在する場合
- ・意図的にパケットロスを起こす代表端末が存在しない場合

シミュレーションは、端末台数 500 台で、意図的に入札募集の配信や入札情報の収集を行わない端末をシミュレーション開始時に乱数で決定し、1000 秒分のシミュレーションを乱数シードを変えて 10 回実行した。

5.2 評価環境

本節ではシミュレーション条件を説明する。最初に環境に関する条件を説明する。D2D 通信は、端末が送信する電波が届く距離が 50m のユニットディスクモデルを採用し、干渉や輻輳によるパケットロスは起きないとした。D2D 通信の伝送速度は 1Mbps とした。端末が移動するエリアは、1 辺が 50m の正方形セルが 10×10 のグリッド状に配置される 500m×500m の正方形のエリアとした。データ取得要求は周期 5s で発生させ、POI は端末が移動するエリア内の位置を一様分布の乱数で選択した。

端末移動に関する条件を説明する。端末は Random Way Point (RWP) [7] で移動し、ランダム時間の停止と、ランダムに選ぶ目的地へのランダムに選ぶ速度での移動を繰り返した。端末の停止時間は、0s から 5.0s の間の値を一様乱数で選んだ。移動目的地の選択は、10×10 の各セルに対して端末の目的地セルを等確率で選択し、セル内の位置は一様分布の乱数で決定した。この条件でも、端末の移動によりセル毎の端末密度にばらつきが生じる [8]。このため、今回のシミュレーションで、POI における端末密度が高い場合と低い場合の両方が混在するケースでの方式の評価を行ったといえる。端末移動速度は、歩行者を想定して 0.1m/s と 3.0m/s の間の値を一様乱数で選んだ。

端末のリバースオークション動作に関する条件を説明する。端末が要求するインセンティブは、シミュレーション開始時に端末毎に 1.0 から 10.0 の間の値から一様乱数で選ぶ固定値を使用した。データ取得要求に対する支払いインセンティブの最大値は、インセンティブ量が原因でデータ取得ができないことが起きないように 10.0 にした。入札募

表 1 既存方式と提案方式のパラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
T'_q	12.45s	T_s	0.5s
T_L	12.95	M	2
θ_n	20	T_b	1s
R_{\max}	150m	T_w	1.6s
T_q	5s		

集に対して、端末は以下の考え方で入札情報の内容を決めるものとした。端末は、現在の移動形態（停止、移動）が終了する時刻が落札決定時刻以前の場合、落札決定時刻での自分の位置が分からないので入札しない。現在の移動形態が終了する時刻が落札決定時刻以降の場合、落札決定時刻以降に現在の移動形態で POI に最も近くなる位置と時刻を求め、そこでセンシングデータを取得する想定で入札情報を作成する。

入札情報を評価するための評価関数を説明する。評価関数は、入札情報に示される 1) POI と端末がセンシングデータを取得する予定位置の距離、2) 落札決定時刻と端末がセンシングデータを取得する予定時刻の間の時間（以下、データ取得時間）、3) 要求インセンティブ量の 3 つの要素それぞれの評価値（評価値は 0 以上 1 以下）を、 $1/3$ の重みを付けて加算することで 0 以上 1 以下の評価値を得るものを採用した。但し、1) から 3) のいずれかの評価値が 0 ならば、入札情報の評価値は 0 にした。1) から 3) の関数形を以下に示す。

- 1) 距離の評価関数

入力 は POI とデータ取得予定位置の距離 d 。

$$E_Q(d) = \left(1 - \frac{d}{120m}\right) \quad (d \leq 100m), \quad 0 \quad (d > 100m)$$

- 2) データ取得時間の評価関数

入力 はデータ取得時間 t ($t \geq 0$)。

$$E_T(t) = \left(1 - \frac{t}{40s}\right) \quad (t \leq 30s), \quad 0 \quad (t > 30s)$$

- 3) 要求インセンティブ量の評価関数

入力 は要求インセンティブ量 c ($c > 0$) と支払い可能最大インセンティブ C ($C > 0$)。

$$E_C(c, C) = \max\left(1 - \frac{c}{C}, 0\right)$$

既存方式と提案方式がシミュレーションで使用したパラメータ値を表 1 に示す。

5.3 既存方式に対する提案方式のセルラ通信量削減効果

端末数により、提案方式の既存方式に対するセルラ通信量の削減効果と、提案方式と既存方式のデータ取得端末の入札情報の評価値の差異がどのように変化するかの評価結果を説明する。図 7 に、提案方式のセルラ通信メッセージ数の既存方式のセルラ通信メッセージ数に対する比率と 95% 信頼区間を端末台数毎に示す。図 8 に、提案方式と既存方式で、データ取得端末の入札情報の評価値が異なるデータ取得要求が合計 1970 個のデータ取得要求に占める割合を、提案方式のデータ取得端末の入札情報の評価値が大きい場

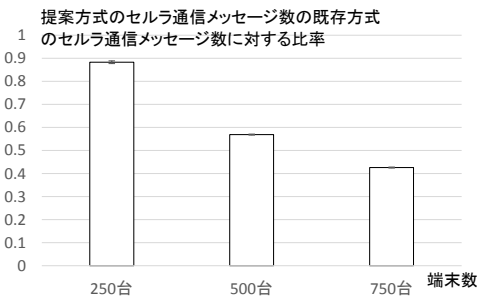


図7 提案方式の既存方式に対するセルラ通信量の比率

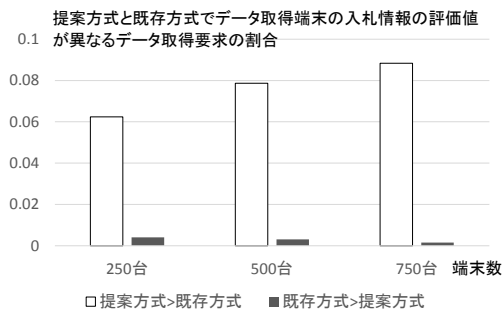


図8 提案方式と既存方式でデータ取得端末の入札情報の評価値が異なるデータ取得要求の割合

合と逆の場合に分けて端末数毎に示す。

図7の結果では、提案方式のセルラ通信メッセージ数の既存方式のセルラ通信メッセージ数に対する比率は、端末数250台で0.883、500台で0.569、750台で0.426であり、端末数が増えると提案方式のセルラ通信量削減効果が高くなる。端末数が増えると近隣端末数が増えることが期待されるので、この結果は妥当である。図7の結果から、近隣端末数が一定数以上存在する環境で、提案方式は既存方式よりもセルラ通信量を削減する効果があることを確認した。

図8の結果で提案方式と既存方式のデータ取得端末の入札情報の評価値を比較すると、データ取得端末の入札情報の評価値が異なる割合は、端末数250台で0.067、500台で0.082、750台で0.090であり、端末数が増えると大きくなる。また、提案方式のデータ取得端末の入札情報の評価値が大きい場合が大部分を占めており、その割合は端末数が増えると大きくなる。一方、提案方式のデータ取得端末の入札情報の評価値が小さい場合の割合は端末数が増えると小さくなる。これは、サーバが端末に送信する入札募集に含めるデータ取得要求の集合について、提案方式が既存方式よりデータ取得要求の集合が大きい場合が多いことが原因と考えられる。提案方式が既存方式よりデータ取得要求の集合が大きい場合が多い理由は、4.3.1で説明した代表端末の近隣端末存在範囲の求め方から、実際より広い範囲に新規代表端末とその近隣端末が存在するとみなす場合が多いため、新規代表端末とその近隣端末がより多くのデータ取得要求の依頼対象になる可能性があるためである。

5.4 提案方式による意図的パケットロスを起こす代表端末の影響軽減効果

設定パラメータ M による、意図的にパケットロスを起こす

す代表端末の影響軽減効果の評価結果を説明する。 $M=2$ の場合は、意図的にパケットロスを起こす代表端末が存在する場合と存在しない場合で、データ取得端末の入札情報の評価値が異なるデータ取得要求の数は1970個中0個であった。 $M=1$ の場合は、意図的にパケットロスを起こす代表端末が存在する場合と存在しない場合で、データ取得端末の入札情報の評価値が異なるデータ取得要求の数は1970個中1個であった。データ取得端末の入札情報の評価値が異なる場合、意図的にパケットロスを起こす代表端末が存在する場合の入札情報の評価値は、意図的にパケットロスを起こす代表端末が存在しない場合よりも小さかった。この結果から、設定パラメータ M に、意図的にパケットロスを起こす代表端末の影響軽減効果があることを確認した。

6. おわりに

本論文では、特定の場所の現状に関するセンシングデータを提供するサービスへの適用を想定して、サーバと端末間のセルラ通信量を削減可能なリバースオークションを用いるモバイルクラウドセンシング方式を提案した。提案方式は、サーバが代表端末の協力を得て、近隣端末への入札募集配信と端末からの入札情報収集をD2D通信経路で行うことで、サーバと端末間のセルラ通信量を削減する。提案方式は、既存方式と同じ時間内に同等のリバースオークション結果を得ることが可能で、悪意ある代表端末が意図的にパケットロスを起こす場合の影響を軽減可能である。また、シミュレーション評価により提案方式の効果を確認した。データ取得のために端末が移動経路を変更する場合の追加評価と、代表端末の選出方法と新規入札募集問合せ応答メッセージの内容決定方法の改善余地が無いかの検討が今後の課題である。

参考文献

- [1] J. Wang, et al., "Task Allocation in Mobile Crowd Sensing: State of the Art and Future Opportunities", IEEE Internet of Things journal, Early access, Aug. 2018.
- [2] X. Zhang, et al., "Incentives for Mobile Crowd Sensing: A Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, Issue 1, pp.54-67, first quarter 2016.
- [3] J. Lee et al., "Dynamic pricing incentive for participatory sensing", Pervasive and Mobile Computing, No.6, pp.693-708, 2010.
- [4] X. Zhang, et al., "Free Market of Crowdsourcing: Incentive Mechanism Design for Mobile Sensing", IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, Vol.25, No.12, pp.3190-3200, Dec. 2014.
- [5] V. Mota, et al., "Towards scalable mobile crowdsensing through device-to-device communication", Journal of Network and Computer Applications, No.122, pp.99-106, 2018.
- [6] 松本, 他, "車間通信による近接車両間協調動作とセルラネットワークを用いた低サーバ負荷車載カメラ画像提供手法", 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.11, pp.2106-2116, Nov. 2016.
- [7] "Random waypoint model", https://en.wikipedia.org/wiki/Random_waypoint_model, (参照 2019-07-21)
- [8] 上野, 他, "ネットワーク性能に対するノード密度分布の影響を評価するためのモビリティ生成方法", 情報処理学会研究報告 Vol.2010-MBL-6 No.16, pp.1-8, 2010