

修士論文

インセンティブを用いた
参加型センシングにおけるコスト削減
について

平成 26 年度修了

三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 情報工学専攻

辻森 智哉

目次

はじめに	1
第1章 研究背景	2
1.1 携帯端末の発展	2
1.2 参加型センシング	2
1.3 インセンティブ	4
第2章 関連研究	5
2.1 Two-stage Stackelberg game	5
2.2 リバースオークション	5
2.3 ゲーミフィケーション	6
2.4 カバレッジと質を考慮したノード選択	6
第3章 参加型センシングにおけるインセンティブモデル	7
3.1 シミュレーションシナリオ	7
3.2 フィールド	8
3.3 PoI	8
3.4 センシング参加ユーザ	9
3.4.1 移動モデル	9
3.4.2 センシング依頼に対する希望報酬額	9
3.4.3 センシング依頼に対する入札行動	10
3.4.4 センシング依頼入札後の行動	12
第4章 時間連動型インセンティブ	13
4.1 提案手法1	13
4.2 シミュレーション実験1	14
4.3 シミュレーション条件1	14
4.4 実験結果1	16

4.5	実験結果 1 に対する考察	16
4.6	提案手法 2	18
4.6.1	単位時間当たりの報酬増加額の最適化	18
4.6.2	最小報酬額の最適化	18
4.7	シミュレーション実験 2	19
4.8	シミュレーション条件 2	19
4.9	実験結果 2	19
4.10	実験結果 2 に対する考察	19
 第 5 章 相関のあるセンシング情報におけるインセンティブ		22
5.1	PoI のクオリティ	23
5.1.1	時間的相関を持つ情報のクオリティ	23
5.1.2	空間的相関を持つ情報のクオリティ	23
5.1.3	時間・空間的相関を持つ情報のクオリティ	24
5.2	問題点	25
5.3	提案手法	25
5.4	シミュレーション実験 1	27
5.5	シミュレーション条件 1	28
5.6	実験結果 1	29
5.7	実験結果 1 に対する考察	30
5.8	シミュレーション実験 2	31
5.9	シミュレーション条件 2	32
5.10	実験結果 2	32
5.11	実験結果 2 に対する考察	32
 おわりに		34
 謝辞		35
 参考文献		36

はじめに

近年，スマートフォンやタブレット端末などの携帯型端末の普及が急速に進んでいる．スマートフォンには，GPS，加速度センサ，磁気センサ，気圧センサ等の多数のセンサが搭載されており，様々な情報の取得が可能である．参加型センシングは，これらのセンサから取得した情報を多くの person から収集することにより，環境センシングやイベント情報の共有など大規模なセンシングを行うことを目的としている．参加型センシングでは，従来のセンシングのような固定センサの設置の必要がなく，維持コストもかからないという利点がある．一方で，ユーザのセンシング依頼地点までの移動やセンサ情報の取得に伴う電池消費などがユーザへのコストとなってしまう，センシングに参加するユーザを確保することが困難であるという問題がある．この問題を解決するため，ユーザを積極的にセンシングに参加させるためのインセンティブの導入が必要となる．インセンティブとは，センシングの見返りとしてユーザに与える報酬である．ユーザを積極的にセンシングに参加させるためには大きなインセンティブを与えればよいが，センシング依頼を出すクライアント側としてはユーザに与える報酬はコストになってしまう．コストの肥大化は参加型センシングの継続を経済的に圧迫してしまうので，参加型センシングの実現にはコストの削減が不可欠な問題となる．

本研究では，センシングする情報が時間・空間的な相関を持っていない場合と，相関を持っている場合の2つの状況を想定する．センシングする情報に時間・空間的な相関のない場合について，センシング依頼からの経過時間に基づき動的に報酬額を決定する時間連動型インセンティブを提案する．センシングする情報に時間・空間的な相関のある場合について，実行待ちのセンシング依頼を考慮したセンシング依頼数の削減によるインセンティブの低減手法を提案する．

本稿では，第1章において研究背景として参加型センシングとインセンティブについて述べる．第2章では関連研究について述べる．第3章では参加型センシングにおけるインセンティブモデルについて述べる．第4章では時間連動型インセンティブについて述べる．第5章では相関のあるセンシング情報におけるインセンティブについて述べる．

第 1 章

研究背景

本章では、参加型センシングが注目されるきっかけとなった携帯端末の発達、参加型センシングの実現化に向けた課題について述べる。そして、参加型センシング実現化の課題に対する解決策として提案されているインセンティブについて説明する。

1.1 携帯端末の発展

スマートフォンやタブレット端末などの多種のセンサを搭載した携帯端末が急速に普及している。これらの端末はインターネットとの親和性が高く、パソコンと同じようなウェブ閲覧機能を有しており、情報の受発信力において従来の携帯電話を大きく上回っている。また、端末の内部には加速度センサや磁気センサ、GPS、マイクなどのセンサが搭載されており、近年では温度センサや気圧センサなどの様々なセンサが内蔵されている機種も登場した。通常、これらのセンサは本来の電話としての機能に必要であったものや、画面の自動回転などの端末の操作性の改善に利用されてきた。しかし、これらのセンサは以上の用途とは別にユーザの取り巻く実世界の環境を認識したり、ユーザ自身の行動を認識することに用いられることが増えてきている。

さらに、現在入手できる主要な端末では SDK や API、開発ツールなどが既に用意されており、センシングアプリケーションを用意に構築できる基盤が整っていると言える。アプリケーションの配布環境においても Apple Appstore や Google Play などのように全世界につながる配布環境が用意されており、専用の端末を用いずとも、大規模で広範囲なセンシング、データ分析がスマートフォン普及以前よりはるかに容易に行えるようになった。

また、携帯端末の特徴として人々は日常生活において常に端末を持ち歩くことになるので、以前よりもさらに密な情報収集が可能となる。そして、端末所持者から提供されたセンシング情報の分析を行い、より人々の生活に密着したサービスの提供が可能となることにより、より快適なユビキタス社会の実現に近づくことになると言える。

1.2 参加型センシング

参加型センシング (Participatory Sensing)[1][2][3] は、一般ユーザの持つスマートフォンを新たなセンシング機器として活用し、環境モニタリングや交通状況の監視など、大規模なセンサネットワークを構築することを目的としている。参加型センシングでは、情報を取得したい地点の付近に

存在する一般ユーザにセンシングを依頼し、データの収集を行う。そのため、従来のような測定機器を設置せずに、気温や湿度などの環境情報を高粒度でセンシングすることができる。また、参加型センシングでは人をセンサノードとして利用するので、人が感じるその場の雰囲気などの抽象的な環境情報についても収集することが可能である。しかし、参加型センシングの実用化のためには、多くの課題が残っている。以下で、代表的な課題について説明する。

- プライバシーの保護

センシングにユーザの個人情報が保存された携帯端末を利用する点、センシングの内容によっては現在位置やユーザの行動などの情報を共有する点から、参加型センシングはユーザのプライバシーへの十分な配慮が必要である。さらに、周囲の状況をセンシングする場合においては、端末ユーザだけでなく、意図せず他人の個人情報を送信してしまう危険性も存在し、ユーザ以外の情報にも配慮したセンシングアプリケーションを開発しなければならない。

- ユーザへの負担

ユーザにあるセンシング地点に対しての依頼を行う場合、その地点の付近にユーザが存在する場合であれば、ユーザに大きな負担はかからない。しかし、センシング地点の付近にユーザが存在しない場合、ユーザに移動に伴う時間的・体力的負担を強いことになる。ボランティア的なユーザによって構成されている参加型センシングでは、以上のような場合、センシング情報の不足する地点が発生することになる。

また、センシングアプリケーションによる携帯端末の消費電力も、ユーザのセンシング参加を妨げる要因となる。ユーザには携帯端末で行うメインのタスクを持っており、限られたバッテリーの中でボランティア的に電力を消費し、センシングを行うことはユーザにとって多大なストレスになる。特に、参加型センシングで重要度の高い、端末の位置情報とそのデータをサーバに送信する際の消費電力は、携帯端末における消費電力の比率が大きく、実用化に向けた課題となっている。

センシングアプリケーションはできるだけ多く、広範囲のユーザに利用されることが望ましい。しかし、前述したプライバシー、ユーザへの負担の問題によって、ユーザがセンシングアプリケーションを利用する際には、リスクとコストが生じてしまい、ユーザが参加型センシングへの参加に消極的になってしまうことが考えられる。このリスクとコストの問題を解決するために、インセンティブの導入が提案されている。

1.3 インセンティブ

インセンティブとは、センシングを実行するユーザに見返りとして与える報酬である。インセンティブを参加型センシングに導入することで、ボランティア的なユーザに加え、一般ユーザの参加型センシングへの参加も期待できるようになる。ユーザが訪れにくい場所へのセンシングに大きなインセンティブを与えることで、ユーザを惹きつけてセンシングを実行してもらうことが期待できるが、インセンティブの増加は参加型センシングの継続を経済的に圧迫してしまうので、インセンティブは可能な限り削減する必要がある。よって、参加型センシングにおけるインセンティブには、センシングする情報の質やセンシングするフィールド、センシングに参加するユーザの数などを考慮した動的なシステムを導入することが望ましい。

第 2 章

関連研究

前章で述べたように参加型センシングにおけるインセンティブは，センシングの成功率を上げつつも，可能な限り削減することが必要になる．そのため，インセンティブモデルにオークションやゲーミフィケーションなどの様々な要素を取り入れた研究が行われている．本章では，参加型センシングにおけるインセンティブモデルと，参加型センシングにおけるコスト一定化でのセンシングノード選択手法の従来研究について述べる．

2.1 Two-stage Stackelberg game

Yang らは，クライアントとユーザの行動を two-stage Stackelberg game としてモデル化し，最小の総報酬額でのセンシングを行う Platform-Centric Model を提案している [4]．このモデルでは，第 1 ステージでクライアントからセンシングタスクと総報酬額の提示が行われる．このとき，ユーザは実行するセンシングタスクの割合に応じて報酬を受け取る．第 2 ステージでユーザはセンシングタスクと報酬を確認し，自分の利益が最大化する戦略を作り，クライアントに戦略を提出する．クライアントはユーザの戦略を確認後，それぞれのユーザに対しセンシングタスクと報酬を送り，選ばれたユーザはセンシングタスクを行う．クライアントは第 1 ステージの総報酬額の提示によって，ユーザの行動を制御することができ，センシングを成功させるための最小の総報酬額でセンシング依頼を行う．

2.2 リバースオークション

Yang らは，Platform-Centric Model に加えて，センシングタスクに対しリバースオークションを行う User-Centric Model を提案している [4]．リバースオークションとは，最も安い入札をしたユーザに購入の権利を与えるオークション方式である．User-Centric Model では，ユーザによって提出された入札を入力として受け取ってオークションを行い，オークションの勝者のユーザの集合を決定し，それぞれの勝者のユーザに報酬を支払い，センシングタスクを実行させる．

2.3 ゲーミフィケーション

上山らは、報酬額の低減を目的としてゲーミフィケーションを取り入れたインセンティブを提案している [5]。ゲーミフィケーションとは、ゲームデザインの技術を課題解決のために利用する方法である。提案するインセンティブモデルでは、獲得した報酬ポイントにおいてユーザのステータスが増加するレベル制度を設定している。レベルの高いユーザは低いユーザに比べ多くのポイントを獲得できるようにすることで、ユーザのセンシングへの参加を促している。ゲーミフィケーションを導入した参加型センシングにおけるクライアントがユーザに支払う報酬ポイント数を最小化するための報酬額最小化ユーザ選択問題を定義し、貪欲法に基づくアルゴリズムによってこの問題を解くことで、クライアントが支払う総報酬ポイント数の期待値を最小化するという手法を提案している。

2.4 カバレッジと質を考慮したノード選択

坂本らは、参加型センシングでのコスト一定化におけるデータの質とカバレッジを考慮したノード選択手法を提案している [6]。データの質・位置・収集コストのそれぞれがバラバラなデータ群に対して、総コスト一定の条件下でデータの質・カバレッジを総合的に評価した最適なノード選択を行う手法を提案し、シミュレーションにより評価を行っている。データの質を考慮せずカバレッジのみを最大化する GBMC アルゴリズムとの比較を行い、約 5% ほどカバレッジが減少したが、データの質が約 8% 増加するという結果となった。

第 3 章

参加型センシングにおけるインセンティブモデル

本研究では、シミュレーションにより、参加型センシングにおけるインセンティブモデルの実験を行う。本章では、参加型センシングのシミュレーションのシナリオ、実装する各モデルとその動作について示す。シミュレーションは、主にフィールド、ユーザ、クライアントによって構成されており、本章でそれぞれのモデルについて説明する。

3.1 シミュレーションシナリオ

本研究における参加型センシングは、センシングの依頼者であるクライアントと、センシングを行いクライアントに情報を送るユーザによって構成される。参加型センシングの概要を図 18 に示す。

クライアントはセンシング対象地点である PoI(Point of Interest) の情報の獲得を目的としており、ユーザに対し PoI のセンシング依頼を発行する。クライアントによって発行されるセンシング依頼は、センシングの内容、PoI、報酬額、制限時間の 4 つの要素で構成されており、携帯端末回線を通し、すべてのユーザに対して依頼の発行を知らせることができる。報酬は、ユーザがセンシング依頼を受け、センシング依頼を達成した時に、クライアントからユーザに支払われる。制限時間は、センシング依頼が有効な時間であり、ユーザが制限時間内にセンシングを完了した場合のみ報酬が支払われる。

ユーザは参加型センシングに興味を持っており、センシング依頼の受信やセンシング情報の送信が可能なアプリケーションを自身の携帯端末にインストールしているものとする。それぞれのユーザはクライアントによって発行されたセンシング依頼を受信し、センシング依頼の実行に要するコストを計算する。算出したコストよりもセンシング実行時に受け取る報酬額が大きく、制限時間内でのセンシング依頼の実行が可能であるとき、ユーザはクライアントに対しセンシング依頼に対する入札を行う。入札したユーザの中からクライアントによって選択されたユーザは、PoI に移動してセンシングを実行し、クライアントから報酬を受け取る。

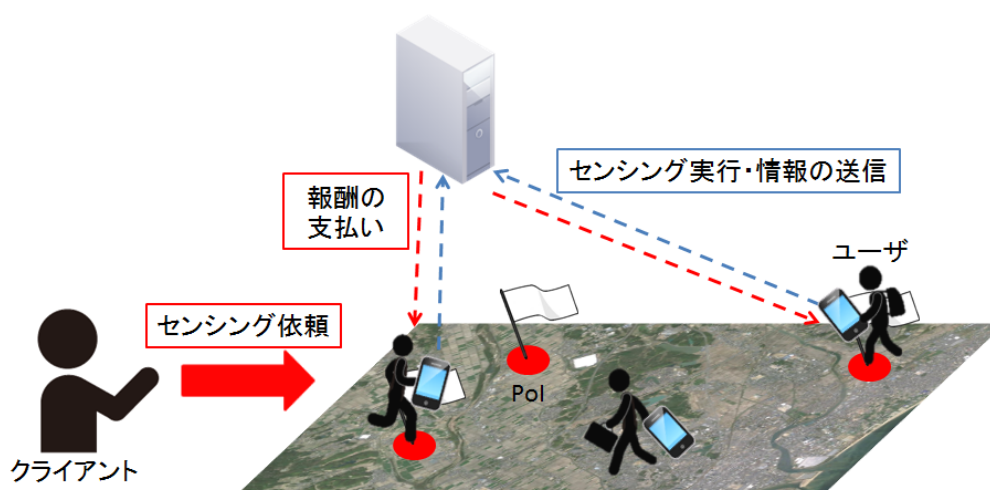


図 1 参加型センシングの概要

3.2 フィールド

参加型センシングのシミュレーションを行うフィールドは、実際の地図データを利用する。地図データは、シミュレータ The ONE[7] で使用されているヘルシンキ近郊の実際の道路図を用いる。使用するヘルシンキ近郊の地図データを図 2、道路データを図 3 に示す。



図 2 ヘルシンキ近郊



図 3 道路データ

3.3 PoI

クライアントがセンシング依頼を行う PoI は、それぞれフィールドの道路上からランダムに一点を選択する。PoI でのセンシング内容は、ユーザが PoI 周辺の情報を収集するものとする。そのた

め、ユーザはセンシング実行のために PoI まで移動し、携帯端末によって周辺の情報を収集するため、一定時間停止する。一定時間停止後、ユーザのセンシング実行・データの送信が完了したものとみなす。

3.4 センシング参加ユーザ

センシング参加ユーザの行動について、以下のモデルを実装する。

3.4.1 移動モデル

実世界においてユーザはそれぞれ目的を持っており、その目的地に向かって移動する。そして、目的地に到着すると目的を実行し、終了すると別の目的地を設定し、次の目的地へと移動する。さらに、ユーザは数時間先までの行動に対して、計画を立てて行動している。

以上のモデルを再現するために本研究では、ユーザにそれぞれランダムウェイポイントモデル [8] に従った行動予定を持たせ、それに基づき行動するように設定した。

ランダムウェイポイントモデルは、以下のような順番で振る舞う。

1. 目的地，移動速度をランダムに設定
2. 目的地へ最短経路で移動
3. 目的地に到着後，ランダムな時間だけ停止
4. 1. に戻る

以上のようなランダムウェイポイントモデルによって作成された数サイクル分の行動予定をそれぞれのユーザに設定し、ユーザは時間経過ごとに行動予定に従った行動をする。

3.4.2 センシング依頼に対する希望報酬額

ユーザは行動計画に従った行動中にセンシング依頼を受信し、センシングに参加すると判断した場合、センシング依頼に対する入札を行う。ユーザのセンシングへの参加判断は、ユーザのセンシング依頼に対する希望報酬額と、センシング依頼の実行によりクライアントから獲得できる報酬額によって決定される。ユーザのセンシング依頼に対する希望報酬額とは、ユーザがセンシング依頼を実行する際に最低限獲得したい報酬額であり、ユーザのセンシング実行にかかるコストと同値である。以下で、ユーザのセンシング依頼に対する希望報酬額算出のための、センシング実行コストの計算方法を説明する。表 1 に、ユーザの希望報酬額計算の記号表を示す。

ユーザはセンシング依頼の実行にかかるコストを、センシングの実行にかかる時間を元に算出するとする。ユーザのセンシング依頼の実行にかかる時間は、PoI への移動時間とセンシングの実行時間の 2 つの合計時間である。従って、ユーザ u_i のセンシング依頼 w_j 実行にかかる時間を以下の

式 (1) で定義する．その際，ユーザの行動計画中の PoI までの最短距離は，図 4 に従い計算する．

$$st_{i,j} = wt_j + ud_{i,j}/v_i \quad (1)$$

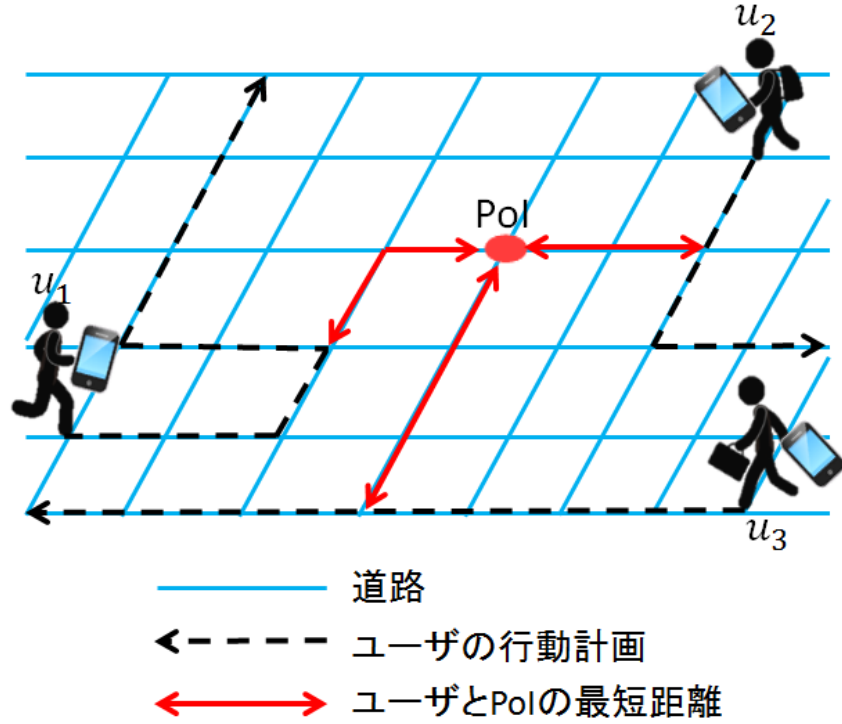


図 4 ユーザと PoI の最短距離

式 (1) で計算した $st_{i,j}$ を用いて，ユーザ u_i のセンシング依頼 w_j 実行に対する希望報酬額を，以下の式 (2) により計算する．

$$r_{i,j} = \alpha_i * st_{i,j} \quad (2)$$

3.4.3 センシング依頼に対する入札行動

ユーザは，センシング依頼の実行によって獲得できる報酬がユーザの希望報酬額より大きかった場合に，センシング依頼に対する入札を行う．ただし，ユーザはそれぞれの利益を最大化することのみに着目して行動する．よって，後述するインセンティブモデルごとに，ユーザの入札のタイミングをそれぞれ設定する．

- 固定報酬の場合

固定報酬額の場合，時間が経過しても報酬額が変化することがない．よって，ユーザはセン

表 1 ユーザの希望報酬額計算の記号表

$st_{i,j}$	ユーザ u_i のセンシング依頼 w_j 実行にかかる時間
wt_j	センシング依頼 w_j 自体を行うための時間
$ud_{i,j}$	u_i の行動計画中の w_j の poi_j までの最短距離
v_i	u_i の速度
$r_{i,j}$	ユーザ u_i のセンシング依頼 w_j に対する希望報酬額
α_i	u_i の単位時間当たりの希望報酬額

シング依頼が発行された瞬間に、センシング実行により獲得できる報酬額と希望報酬額の比較を行い、利益が出ると判断した場合に、センシング依頼に対して入札を行う。入札では、ユーザは自分のユーザ ID をクライアントに送信する。ただし、同時に複数のユーザによる入札が行われた場合、クライアントはユーザに現在地から PoI までの距離を申告させる。そして、PoI までの距離の近いユーザに対して、クライアントはセンシングの実行を依頼する。

- 時間連動型報酬の場合

センシング依頼発生からの経過時間による時間連動型報酬の場合、ユーザがセンシング依頼に対する入札を待機するほど、報酬額が増加していく。しかし、ユーザは行動計画に従って移動しており、行動計画中で現在位置が最も PoI に近い場合、時間が経過するほど移動によって PoI までの最短距離が大きくなり、PoI までの移動にかかるコストが増加することになる。よって、ユーザのセンシング依頼に対する入札のタイミングを、ユーザがセンシング依頼を制限時間内に実行可能であり、PoI とユーザの現在位置が最も近づく瞬間と設定する。すなわち、ユーザは移動中の最も PoI に近づく瞬間にセンシング依頼に対する入札を行う。入札では、ユーザは自分のユーザ ID をクライアントに送信する。ただし、同時に複数のユーザによる入札が行われた場合は、固定報酬の場合と同様に、PoI までの距離が近いユーザに対し、センシングの実行を依頼する。

- リバースオークションによる報酬の場合

リバースオークションは、2 位価格オークション [9] で行うこととする。リバースオークションにおける 2 位価格オークションでは、一番低い価格で入札したユーザが二番目に低い入札価格で依頼を落札することになる。つまり、センシング依頼の落札ユーザは、二番目に低い入札価格で落札することになり、自分の入札価格と落札価格の差分を利益として受け取ることになる。以上のオークションを参加型センシングのインセンティブモデルで行う。オークションにおけるユーザのセンシング依頼に対する入札はユーザ ID と入札価格によって構成され、ユーザは入札価格に自分のセンシング希望報酬額を設定する。また、ユーザは

センシング依頼のオークション期間中いつでも入札を行うことができることとする。

3.4.4 センシング依頼入札後の行動

ユーザはセンシング依頼に対して入札を行い、クライアントは落札に成功したユーザにセンシング依頼の落札通知を送信する。落札通知を受け取ったユーザは PoI に向かうが、ユーザが元の目的地で停止時間中である場合は、停止時間終了後に PoI に向けての移動を開始する。PoI 到着後、ユーザはセンシングのために一定時間 PoI で停止する。一定時間停止後、ユーザによるセンシングが完了し、ユーザはクライアントからセンシングに対する報酬を受け取る。その後、ユーザの行動計画に従い元の目的地、または、次の目的地に向けての移動を再開する。

センシング依頼に対して入札を行ったが、落札できなかったユーザには、クライアントがセンシング依頼落札失敗通知を送り、ユーザは元の行動を続ける。

第 4 章

時間連動型インセンティブ

前章で参加型センシングのインセンティブモデルについて説明した。本章では、センシングする情報に時間・空間的な相関がない参加型センシングについて扱う。時間的な相関がないとは、ある地点の現在の状態を、前回の同地点のセンシング情報から予想できないことである。空間的な相関がないとは、ある地点のセンシング情報がその付近のセンシング情報と全く関係を持たないことである。つまり、クライアントがある地点の情報を取得したい場合、実際にユーザによってその地点でセンシングされた情報を獲得することでしか、その地点の情報を知ることができない場合を想定する。時間・空間的な相関がない情報としては、交通情報、行列情報などが考えられ、これらの情報に対するセンシングでは、クライアントの許容する期限内に情報を収集しつつ、報酬額を抑えることが重要になる。そのため、本章では時間・空間的な相関のない参加型センシングにおける、時間連動型インセンティブモデルを提案する。

4.1 提案手法 1

クライアントがセンシングの参加ユーザの現在位置や分布状況などをリアルタイムで知ることには、プライバシーや GPS の現在地取得に伴う消費電力の問題によって困難である。よって、クライアントがユーザの PoI までの移動に伴うコストを算出することは現実的ではない。また、ユーザには個人差があり、移動距離・センシング内容が同じであっても希望報酬額が異なることは十分考えられる。以上のような状況で、クライアントがセンシング依頼の報酬を固定額で提示する場合、報酬額が PoI 付近のユーザの希望報酬額より小さいとき、ユーザはいつまでもセンシング依頼に対して入札を行わず、センシングが失敗してしまう。一方で、提示する報酬額が大きすぎる場合、クライアントを経済的に圧迫して参加型センシングの継続を困難にしてしまう。よって、参加型センシングにおける報酬額は動的に決定することが望ましい。

そこで、センシング依頼発生からの経過時間に基づき、報酬額の増額を行う時間連動型インセンティブを提案する。経過時間に基づき報酬額の増額を行うことにより、PoI の周囲に存在するユーザの希望報酬額まで報酬を自動的に引き上げ、ユーザによるセンシング依頼の入札の増加が期待できる。また、リバースオークションのようなオークション時間が存在しないので、ユーザはいつまでもセンシング依頼に対して、入札を行うことができる。以下に、時間連動型インセンティブを計算する式 (3) を示す。計算式に使用する記号は、表 2 に示す。

$$R_i(t) = \min(R_{max}, R_{min} + inc_i(t - t_i)) \quad (3)$$

inc_i は単位時間当たりの報酬の増加額であり，以下の式 (4) により計算する．

$$inc_i = (R_{max} - R_{min}) / (tl_i - wt_i) \quad (4)$$

表 2 時間連動型インセンティブの記号表

$R_i(t)$	時刻 t でのセンシング依頼 w_i の報酬額
t	現在時刻
R_{min}	最小報酬額
R_{max}	最大報酬額
inc_i	w_i の単位時間当たりの報酬の増加額
t_i	w_i の依頼発生時刻
tl_i	w_i の依頼制限時間
wt_i	w_i のセンシングにかかる時間

4.2 シミュレーション実験 1

時間連動型インセンティブモデルのシミュレーションによる実験を行う．クライアントによりシミュレーション時間中のランダムな時間にユーザに対しセンシング依頼が行われることを想定する．センシング依頼内容の PoI はランダムな場所に出現させる，センシング依頼の実行にかかる時間はすべて同じ時間とする．固定報酬型インセンティブモデルと，提案手法である時間連動型インセンティブモデルで，センシング依頼の制限時間を変更して，実験を行い比較する．評価する項目は，センシング成功回数，センシング 1 回当たりのユーザに支払った報酬額の平均，センシング依頼 1 回当たりのユーザに余分に支払った報酬額とする．ユーザに余分に支払った報酬とは，報酬額から依頼落札ユーザの希望報酬額を引いた残り金額である．シミュレーションの実行画面を図 5 に示す．

4.3 シミュレーション条件 1

シミュレーション実験で使用した移動モデルのパラメータを表 3 に，実験環境のパラメータを表 4 に，固定額のパラメータを表 5 に，時間連動型報酬のパラメータを表 6 に示す．ユーザの移動範囲半径とは，ユーザの初期位置を円の中心とした時のユーザの行動範囲の半径である．フィールド

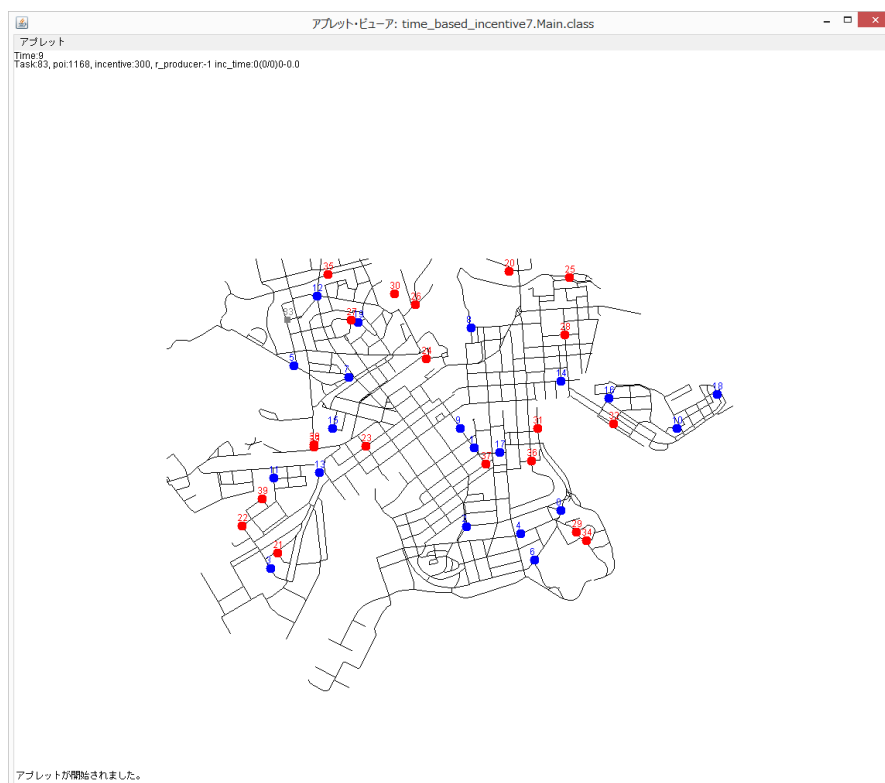


図 5 シミュレーションの実行画面

上のユーザ数を歩行者 50 人とした場合と、歩行者 30 人、車 20 人とした場合の 2 通りの条件で、シミュレーション回数分の実験を行い、評価項目の平均を算出する。

表 3 移動モデル

	歩行者	車
最高速度 [m/分]	80	583
最低速度 [m/分]	60	416
移動範囲半径 [km]	1	10
最大待機時間 [分]	60	
最小待機時間 [分]	10	
単位時間当たりの希望報酬額 α [円/分]	10 ~ 20	

表 4 実験環境

フィールド [km^2]	4*4
依頼回数 [回]	100
シミュレーション時間 [時間]	100
センシング依頼制限時間 tl [分]	10 ~ 60
センシングにかかる時間 wt [分]	5
シミュレーション回数 [回]	5

表 5 固定額による報酬

報酬額 [円]	100,200,300
---------	-------------

表 6 時間連動型報酬

最大報酬額 R_{max} [円]	500
最小報酬額 R_{min} [円]	100

4.4 実験結果 1

シミュレーションによる実験結果を以下に示す．図 6, 7 にセンシング成功回数，図 8, 9 にセンシング 1 回当たりのユーザに支払った報酬額の平均，図 10, 11 にセンシング依頼 1 回当たりのユーザに余分に支払った報酬額を示す．

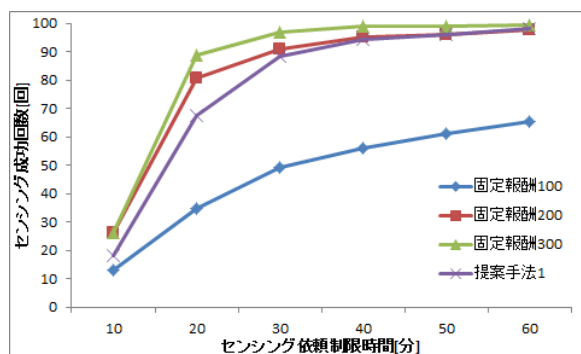


図 6 センシング成功回数 (歩行者 50 人)

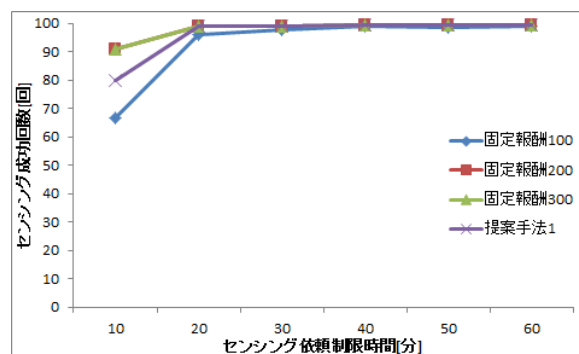


図 7 センシング成功回数 (歩行者 30 人，車 20 人)

4.5 実験結果 1 に対する考察

図 6, 7 の結果より，センシング依頼の制限時間が短い場合，提案手法の成功数が固定報酬額 200, 300 より下回る結果となった．原因として，提案手法による報酬がユーザの希望報酬額に到達する前に，ユーザが PoI をセンシングの実行にかかる時間が制限時間を超えてしまうため，センシ

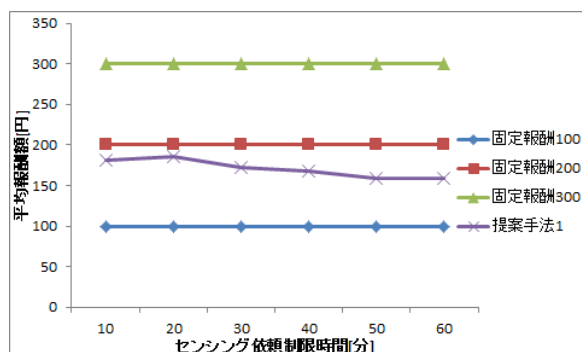


図 8 センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額
(歩行者 50 人)

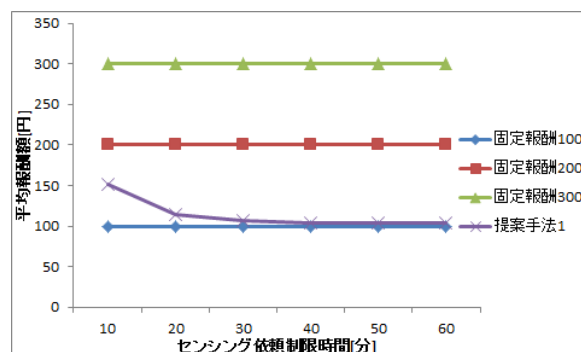


図 9 センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額
(歩行者 30 人, 車 20 人)

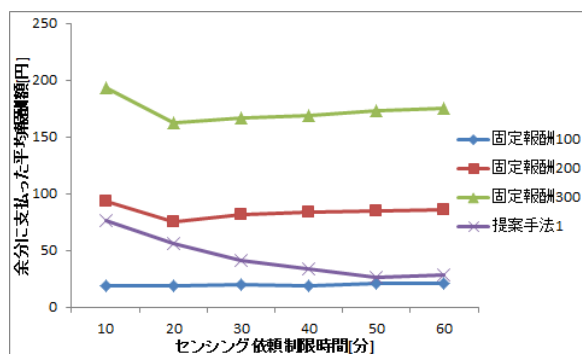


図 10 センシング依頼 1 回当たりの余分に支払った平均報酬額 (歩行者 50 人)

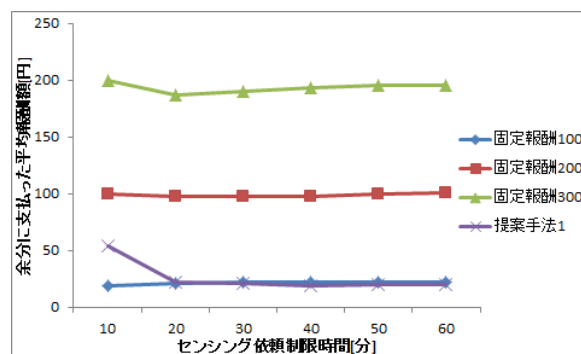


図 11 センシング依頼 1 回当たりの余分に支払った平均報酬額 (歩行者 30 人, 車 20 人)

ング成功回数が下がってしまったと考えられる。

図 8, 9 の結果より, 提案手法はセンシング依頼の制限時間が長くなるに従い, 支払う報酬額が小さくなっていることが確認できる。これは, 制限時間が長くなるに従い, 単位時間当たりの報酬の増加額が小さくなること, PoI の周囲を通過するユーザが増えセンシングに参加するユーザが増加したためであると考えられる。

図 10, 11 の結果より, ユーザに支払った余分な報酬において, 提案手法は固定報酬額 200, 300 より大きく低減されている。しかし, 提案手法は制限時間が短い場合において, 固定報酬額 100 を大きく上回る結果となってしまった。これは, 制限時間が短い場合では, 提案手法の単位時間当たりの報酬の増加額が大きく, ユーザが PoI に最も接近するまでの間に, 報酬額が高騰してしまったためであると考えられる。

センシング成功回数と報酬額の両方を考慮した場合, 提案手法はセンシング依頼の制限時間が長い場合において固定報酬額 200, 300 とほぼ同じセンシング成功回数を持ちつつ, 報酬額を低減することができる。よって, 時間連動型報酬は制限時間の長いセンシング依頼に対して, 固定報

報酬よりも有効である．

4.6 提案手法 2

実験結果 1 より，提案手法 1 はセンシング依頼の制限時間が短い場合において，センシング回数で固定報酬額よりも劣る結果となった．このような時間連動型報酬でのユーザによるセンシングの落札が難しい状況で，センシング成功確率を上げるためには，短時間で報酬をユーザの希望額まで引き上げる必要がある．そこで，過去のセンシングの成功確率を計算し，単位時間当たりの報酬の増加額を最適化する．また，提案手法 1 では，最小報酬額を固定額としているため，最小の報酬額が PoI 付近のユーザの希望報酬額よりもそもそも高く設定されている可能性がある．そのような場合，クライアントは無駄な報酬を常に支払うことになるので，最小報酬額の最適化が必要になる．この問題を解決するため，過去のセンシングで最小報酬額での入札をカウントし，最小報酬額の最適化を行う．

時間連動型インセンティブモデルに対する改善手法を提案手法 2 とし，以下でその説明を行う．

4.6.1 単位時間当たりの報酬増加額の最適化

過去のセンシング依頼の情報からセンシングの成功確率を計算する．センシングの成功確率は以下の式 (5) により計算する．計算式に使用する記号は，表 7 に示す．

$$p_i = swc_i / wc_i \quad (5)$$

表 7 センシング成功確率計算の記号表

p_i	センシング依頼 w_i 発行時点のセンシング成功確率
swc_i	センシング依頼 w_i 発行時点の過去のセンシング成功回数
wc_i	センシング依頼 w_i 発行時点の過去のセンシング依頼回数

このセンシングの成功確率 p_i を用いて，センシング依頼 w_i の単位時間当たりの報酬の増加額 inc_i を最適化する．最適化された単位時間当たりの報酬の増加額は以下の式 (6) により計算する．

$$inc_i = (R_{max} - R_{min}) / ((tl_i - wt_i) * p_i) \quad (6)$$

4.6.2 最小報酬額の最適化

過去のセンシング依頼の情報から最小報酬額での入札回数をカウントする．最適化された最小報酬額は以下の式 (7) により計算する．計算式に使用する記号は，表 8 に示す．

$$R_{imin} = R_{min} * 0.9^{mc_i} \quad (7)$$

表 8 最小報酬額最適化計算の記号表

R_{imin}	センシング依頼 w_i の最小報酬額
mc_i	センシング依頼 w_i 発行時点の最小報酬額の入札回数

4.7 シミュレーション実験 2

提案手法 2 を実装したインセンティブモデルのシミュレーションによる実験を行う．想定する状況はシミュレーション実験 1 と同様とする．提案手法 1 のインセンティブモデル，提案手法 2 のインセンティブモデル，参加型センシングのインセンティブモデルとして代表的なりバースオークションのインセンティブモデル [4][9] で，シミュレーション実験 1 と同様の項目で比較を行う．

4.8 シミュレーション条件 2

シミュレーション，提案手法 1，2 のパラメータはシミュレーション条件 1 と同様である．リバースオークションのパラメータは，表 9 に示す．

表 9 リバースオークションによる報酬

最大報酬額 R_{max} [円]	500
オークション時間 [分]	1

4.9 実験結果 2

シミュレーションによる実験結果を以下に示す．図 12，13 にセンシング成功回数，図 14，15 にセンシング 1 回当たりのユーザに支払った報酬額の平均，図 16，17 にセンシング依頼 1 回当たりのユーザに余分に支払った報酬額を示す．

4.10 実験結果 2 に対する考察

図 12，13 の結果より，提案手法 1 と提案手法 2 でセンシング成功回数にあまり差はなかった．原因として，単位時間当たりの報酬増加額の最適化による報酬の早期引き上げが，最小報酬額の最適化によって相殺されたからである考えられる．提案手法とリバースオークションの比較では，リ

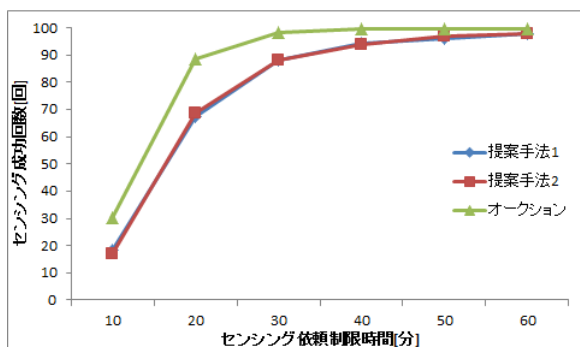


図 12 センシング成功回数 (歩行者 50 人)

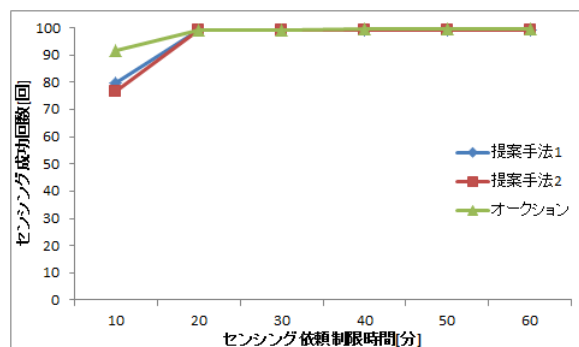


図 13 センシング成功回数 (歩行者 30 人, 車 20 人)

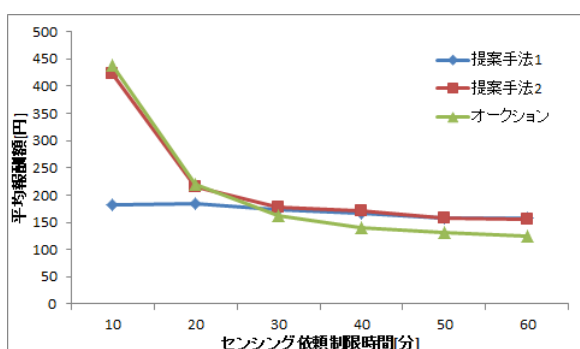


図 14 センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額 (歩行者 50 人)

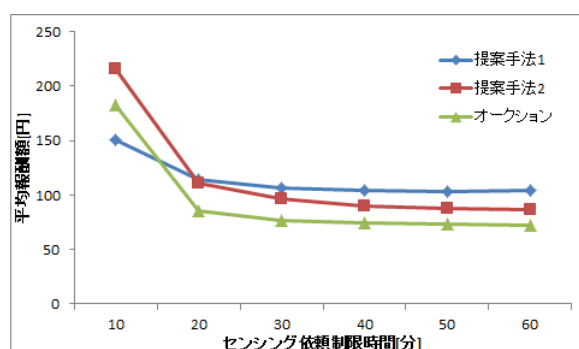


図 15 センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額 (歩行者 30 人, 車 20 人)

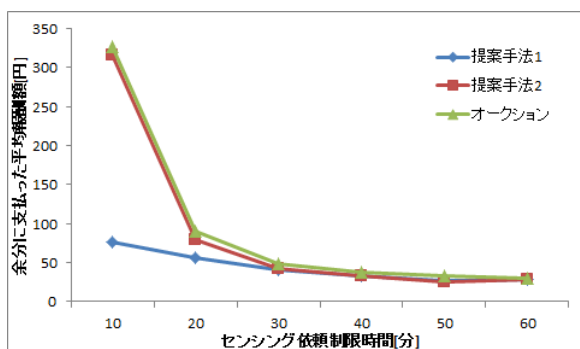


図 16 センシング依頼 1 回当たりの余分に支払った平均報酬額 (歩行者 50 人)

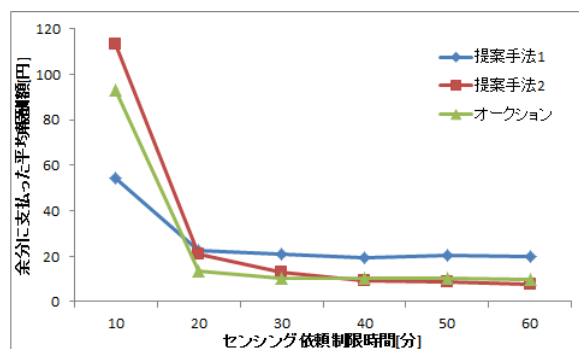


図 17 センシング依頼 1 回当たりの余分に支払った平均報酬額 (歩行者 30 人, 車 20 人)

バースオークションが提案手法 1, 2 を上回った。これは、リバースオークションのオークション時間を 1 分と設定したことにより、依頼ユーザが短時間で決定したためである。依頼ユーザが短時間で決定されたことにより、ユーザの移動時間が提案手法 1, 2 より長くなり、より広範囲のユーザがセンシングに参加したためだと考えられる。

図 14, 15 の結果より, センシング依頼の制限時間が短い場合, 提案手法 1 の方が提案手法 2 より報酬額が低減されていることが確認できる. 単位時間当たりの報酬増加額の最適化による報酬の早期引き上げにより, 短時間で報酬が高騰したためであると考えられる. また, 図 15 のセンシング依頼の制限時間が 20 分以上の場合では, 提案手法 2 が提案手法 1 を下回っている. 最小報酬額の最適化により, 最小報酬額が引き下げられたことで, 全体の報酬額が下がったためであると考えられる. 提案手法 1, 2 とリバースオークションの比較では, センシング依頼の制限時間が短い場合, 提案手法 1 がリバースオークションを下回っている. これは, 制限時間が短いので PoI へ制限時間内に到達できるユーザが少なくなり, オークションへの参加者が集まらないため, リバースオークションの報酬額が高騰したためである. また, 制限時間が長くなるに従い, PoI へ制限時間内に到達できるユーザが増えることにより, オークションへの参加者が増加するので, 報酬額が下がり, 提案手法 1 と逆転することになる.

図 16, 17 でも同様に, 制限時間の短い場合は提案手法 1 が余分にユーザに支払った報酬が抑えられているが, 制限時間が長くなるに従い, 提案手法 2, リバースオークションが逆転していく結果となった.

センシング成功回数と報酬額の両方を考慮する場合, 提案手法 1 と提案手法 2 では, センシング依頼の制限時間が短い場合, 提案手法 1 の方が報酬額を抑えられている点で提案手法 2 より良い結果となった. しかし, 制限時間が伸びていくに従い, 提案手法 2 の方が報酬を抑えられている箇所も存在する. よって, センシング依頼の制限時間が短い場合は提案手法 1, 制限時間が長い場合提案手法 2 が有効であると考えられる.

提案手法 1, 2 とリバースオークションをセンシング成功回数と報酬額の両方を考慮し比較した場合, センシング成功回数ではリバースオークションが常に上回っており, 報酬額でも制限時間が長くなるに従い, 提案手法 1, 2 より低減されている. よって, センシングの成功を重視する場合と制限時間が長い場合はリバースオークションモデル, 制限時間が短くセンシングの成功よりも報酬額の低減を重視する場合は提案手法 1 が有効である.

第 5 章

相関のあるセンシング情報におけるインセンティブ

前章でセンシングする情報に時間・空間的な相関のない場合の参加型センシングにおけるインセンティブモデルについて、提案手法を実装し実験を行った。本章では、センシングする情報に時間・空間的な相関があるものとする。そして、一定時間フィールド上の複数の PoI の情報を収集し続ける参加型センシングを想定し、そのインセンティブモデルについて扱う。時間的な相関があるとは、PoI の過去のセンシング情報から PoI の現在の状態を推測できることである。また、空間的な相関があるとは、PoI の状態がその付近の PoI のセンシング情報から推測できることである。

時間・空間的な相関のある情報としては、気温、気圧、天気などの環境情報が挙げられる。時間・空間的な相関のある情報に対するセンシングでは、PoI の前回のセンシング情報と、PoI の周囲のセンシング情報を利用して、現在の PoI の状態を推測することによってセンシング依頼数を削減し、報酬の低減を図ることが重要となる。そのため、本章では時間・空間的な相関のある参加型センシングにおけるインセンティブモデルについて、提案手法を実装し、実験を行う。

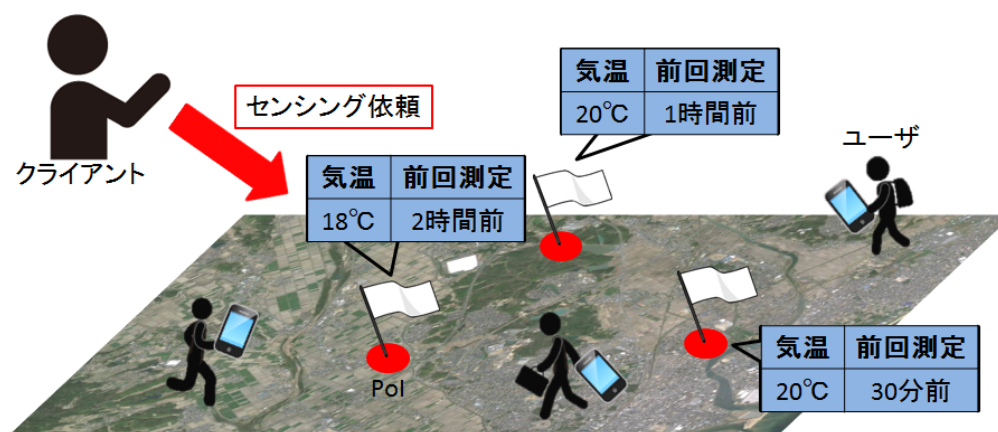


図 18 時間・空間的な相関のある情報の参加型センシングの概要

5.1 PoI のクオリティ

本研究において、過去または周囲のセンシング情報から推測される PoI の状態の正確性をクオリティ、PoI のクオリティが 0% になるまでの時間をセンシング情報の有効期限と呼ぶ事とする。以下で、時間的相関を持つ情報のクオリティ、空間的相関を持つ情報のクオリティ、時間・空間的相関を持つ情報のクオリティの計算について説明する。

5.1.1 時間的相関を持つ情報のクオリティ

時間的な相関のある情報をセンシングする場合、注目する PoI の前回のセンシング情報から現在の PoI の状態を推測することができる。よって、前回のセンシング情報から現在の状態の推定が困難になる時点で新たなセンシング依頼を発行するべきである。本研究では、データのクオリティがあらかじめ設定されたクオリティの閾値を下回った時点で、センシング依頼を発行することとする。前回のセンシング情報から獲得するクオリティの計算式を式 (8) よって定義する。計算式に使用する記号を表 10 に示す。時間的相関を持つ情報のクオリティを図 19 に示す。

$$tq_i(t) = \max(0, 1 - (1/et_i)(t - bt_i)) \quad (8)$$

表 10 時間的相関によるクオリティの計算の記号表

$tq_i(t)$	poi_i の時刻 t における前回のセンシング情報から獲得するクオリティ
et_i	poi_i のセンシング情報の有効期限
t	現在時刻
bt_i	poi_i が前回センシングされた時刻

5.1.2 空間的相関を持つ情報のクオリティ

空間的な相関のある情報をセンシングする場合、PoI の周囲のセンシング情報が、PoI のセンシング情報と類似することになる。よって、PoI の周囲でセンシングが行われた場合、PoI の現在の状態を周囲のセンシング情報より推測することができるので、クオリティが増加する。空間的相関により PoI が周囲のセンシング情報から獲得するクオリティを式 (9) によって定義する。計算式に使用する記号を表 11 に示す。空間的な相関を持つ情報が獲得するクオリティを図 20 に示す。

$$sq_{i,j}(t) = \max(0, (1 - d_{i,j}/d_{max}) - (1/et_i)(t - bt_j)) \quad (9)$$

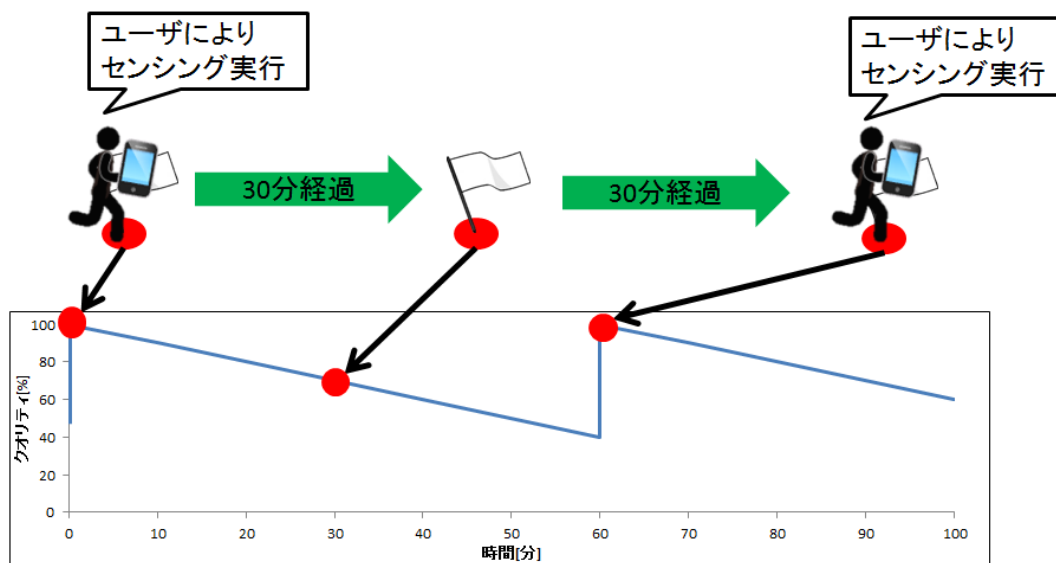


図 19 時間的な相関によるクオリティ

表 11 空間的相関により獲得するクオリティの計算の記号表

$sq_{i,j}(t)$	時刻 t における poi_j のセンシング情報から poi_i が獲得するクオリティ
$d_{i,j}$	poi_i , poi_j 間の距離
d_{max}	センシングする情報が空間的相関を持つ最大距離

5.1.3 時間・空間的相関を持つ情報のクオリティ

センシングする情報が時間的相関と空間的相関の両方を持つ場合について説明する．以降で，注目する PoI を poi_i , poi_i の周囲に存在する空間的相関を持つ PoI を poi_j と呼ぶこととする．センシングする情報が時間・空間的相関を持つので， poi_i の状態は poi_i でのセンシング実行，または， poi_j でのセンシング実行によって推測することができる．よって， poi_i の前回のセンシングから獲得するクオリティと poi_j から獲得するクオリティを比較する．そして，獲得するクオリティが大きい方を poi_i のクオリティとし，そのセンシング情報を poi_i の状態推定のために利用する．以下に周囲の PoI のセンシング地点から獲得するクオリティを考慮した poi_i のクオリティを計算する式 (10) を示す．計算式に使用する記号を表 12 に示す．時間・空間的相関を持つ情報のクオリティの変化を図 21 に示す．

$$q_i(t) = \begin{cases} sq_{i,j}(t) & \text{if } (d_{i,j} < d_{max} \wedge tq_i(t) < sq_{i,j}(t)) \\ tq_i(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

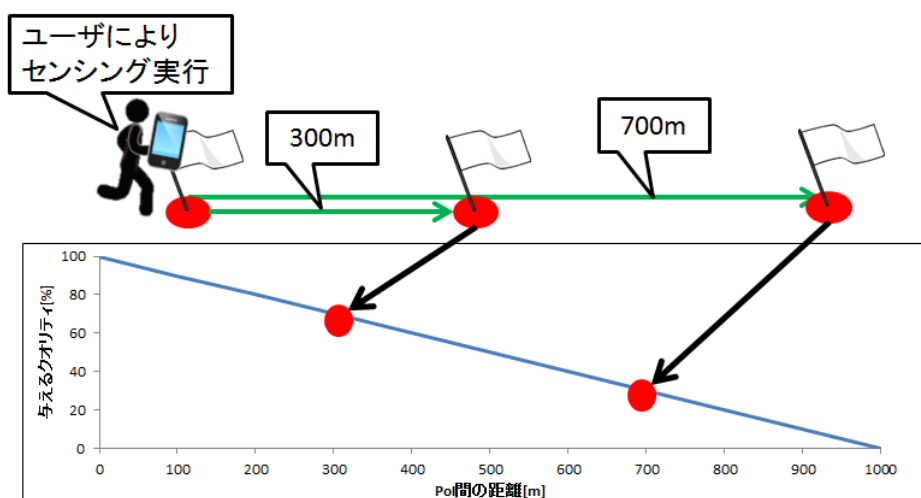


図 20 空間的な相関を持つ情報が獲得するクオリティ

表 12 時間・空間的相関により獲得するクオリティの計算の記号表

$q_i(t)$	時刻 t における poi_i のクオリティ
----------	----------------------------

5.2 問題点

センシングする情報が時間・空間的相関を持つ場合、PoI の状態は周囲のセンシングによっても推測可能である。よって、 poi_i のクオリティが閾値を下回った時点でセンシング依頼を発行する場合、無駄なセンシング依頼を発行してしまうことが考えられる。つまり、 poi_i のクオリティが閾値を下回った時点で、 poi_j がセンシング依頼を発行しユーザによるセンシング実行待ち状態である場合、 poi_i のクオリティが poi_j のセンシングによって増加することが決定しているにも関わらずセンシング依頼を発行することになってしまう。時間・空間的相関を持つ情報の問題点を図 22 に示す。

このような無駄なセンシング依頼を削減するため、以下で実行待ちのセンシング依頼を考慮したセンシング依頼数の削減を提案する。

5.3 提案手法

時間・空間的な相関がある情報の参加型センシングに対して、実行待ちのセンシング依頼を考慮したセンシング依頼数の削減による報酬の削減を提案する。

提案手法では、注目する PoI の周囲に存在する PoI の実行待ちセンシング依頼に着目する。以

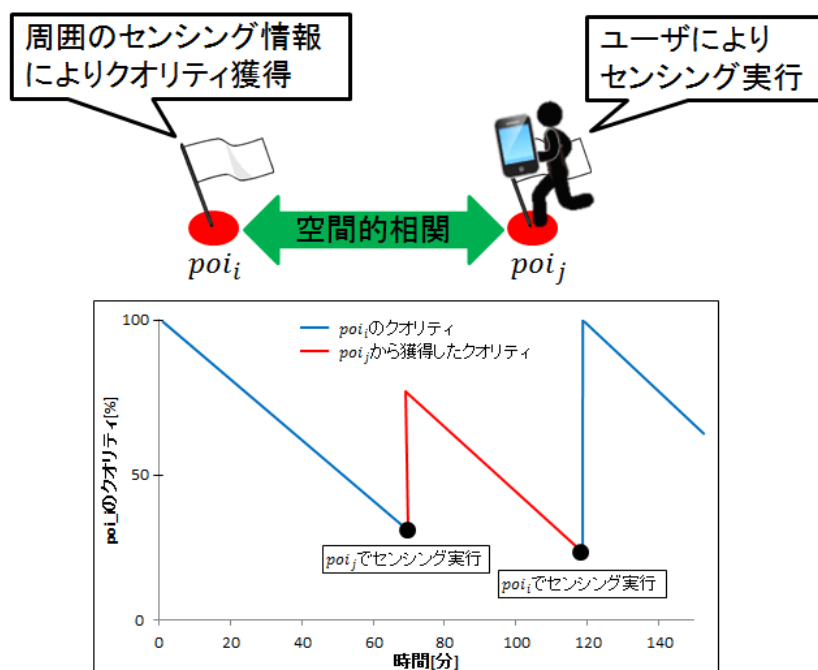


図 21 時間・空間的相関を持つ情報のクオリティ

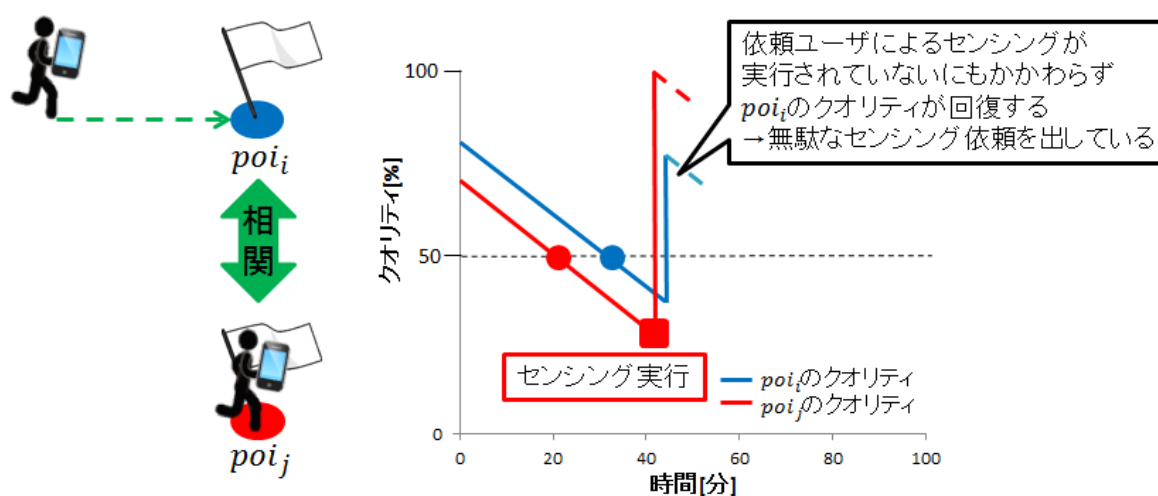


図 22 時間・空間的相関を持つ情報のセンシングにおける問題点

下で、提案手法の動作を説明する．提案手法を図 23 に示す．

1. 予約クオリティの設定

センシングする情報に空間的相関があるとき， poi_i の状態は poi_j のセンシング情報からも推測可能である．よって， poi_j がセンシングされた場合の poi_i のクオリティの増加する値

を予約クオリティとして設定する．

2. poi_j のセンシング実行待ち検索・センシング依頼発行の停止

poi_i のクオリティがセンシング依頼発行のクオリティ閾値を下回ったとき，センシング依頼が発行される．しかし， poi_i のクオリティは空間的相関により， poi_j のセンシングでも増加する．よって，以下の 3 つの条件を満たした場合， poi_i のセンシング依頼の発行を停止する．

- poi_i のクオリティが閾値を下回った時点で， poi_j がセンシング実行待ち状態である．
- poi_i による poi_j の予約クオリティが閾値以上である．
- poi_j のセンシング依頼制限時間を poi_j のセンシング完了予想時間として登録しておき， poi_i のセンシング情報の有効期限内に poi_j のセンシング完了予想時間が存在する．

以上の提案手法により，センシング依頼数の削減を行い，総報酬額の削減を行う．

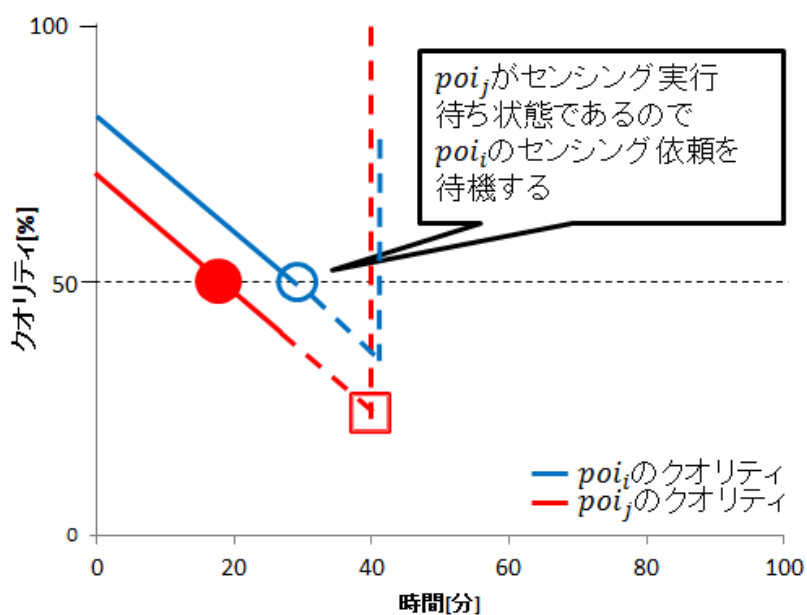


図 23 提案手法

5.4 シミュレーション実験 1

提案手法を実装したインセンティブモデルのシミュレーションによる実験を行う．提案手法を実装するインセンティブモデルは，センシング情報の有効期限内のセンシングの成功を重視するため，リバースオークションを元にしたモデルとする．クライアントは，ユーザに対して，クオリティが閾値を下回った PoI へのオークション形式のセンシング依頼を行う．センシング依頼は，セ

ンシング内容，PoI，オークション開始価格，制限時間で構成される．ここで，制限時間は PoI のセンシング情報の有効期限が切れるまでの時間とする．ユーザがセンシング依頼に対して希望報酬額での入札を行い，一番低い金額での入札を行ったユーザが二番目に低い入札の金額で依頼を落札する．依頼を落札したユーザは制限時間内に PoI へ到達し，センシングを行い，データを送信する．ユーザはセンシング情報の送信後，クライアントより報酬を受け取る．ただし，制限時間内にユーザによる入札が行われなかった場合は，制限時間をセンシング情報の有効期限にリセットし再度センシング依頼が行われる．

実験では，周囲の PoI の実行待ちセンシング依頼を考慮しないインセンティブモデルを従来手法とし，提案手法との比較を行う．評価する項目は，フィールド上の全ての PoI に対する総センシング回数，PoI の平均クオリティ，ユーザに支払った総報酬額，センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額，全ての PoI の総タイムアウト回数，全ての PoI の総タイムアウト時間とする．平均クオリティとはシミュレーション時間中の PoI のクオリティの平均，タイムアウト回数とは PoI のクオリティが 0% になった回数，タイムアウト時間とはクオリティが 0% となった期間である．

5.5 シミュレーション条件 1

シミュレーション実験で使用した移動モデルのパラメータは第 4 章の表 3 と同様である．実験環境のパラメータを表 13 に，PoI のパラメータを表 14 に示す．フィールド上のユーザ数を歩行者 50 人とした場合と，歩行者 30 人，車 20 人とした場合の 2 通りの条件で，シミュレーション回数分の実験を行い，評価項目の平均を算出する．

表 13 実験環境

フィールド [km^2]	4*4
PoI[箇所]	30
シミュレーション時間 [時間]	12
シミュレーション回数 [回]	5

表 14 PoI 実験条件

センシング情報の有効期限 [分]	30 ~ 90
センシングにかかる時間 [分]	5
空間的な相関を持つ最大距離 [km]	1
センシング依頼を発行するクオリティの閾値 [%]	50

5.6 実験結果 1

シミュレーションによる実験結果を以下に示す．図 24, 25 に総センシング回数，図 26, 27 に平均クオリティ，図 28, 29 に総報酬額，図 30, 31 にセンシング依頼 1 回当たりの平均報酬額，図 32, 33 に総タイムアウト回数，図 34, 35 に総タイムアウト時間を示す．

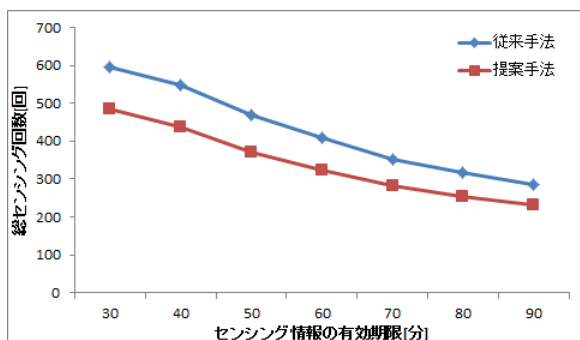


図 24 総センシング回数 (歩行者 50 人)

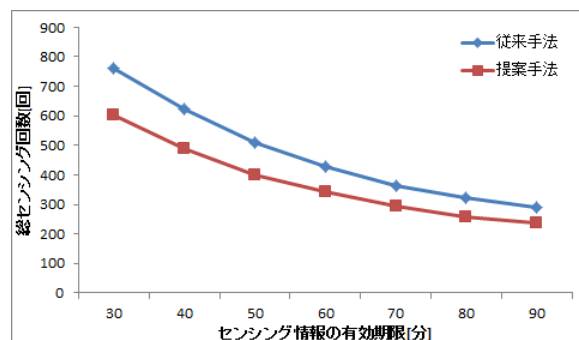


図 25 総センシング回数 (歩行者 30 人，車 20 人)

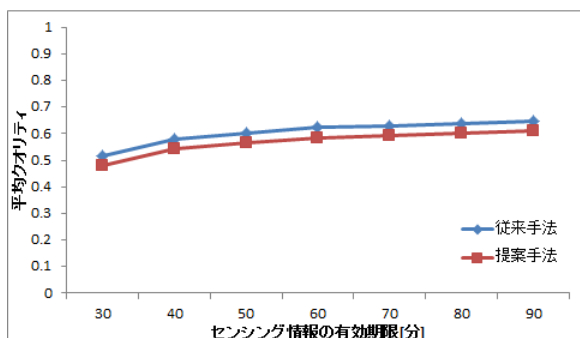


図 26 平均クオリティ (歩行者 50 人)

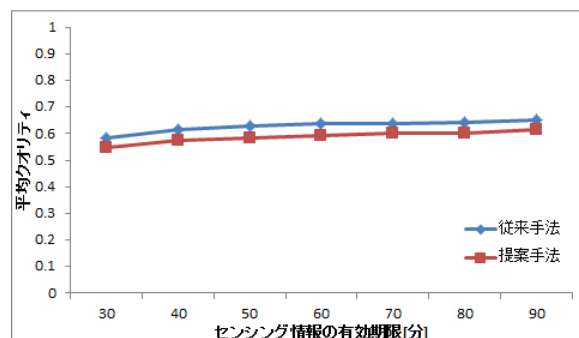


図 27 平均クオリティ (歩行者 30 人，車 20 人)

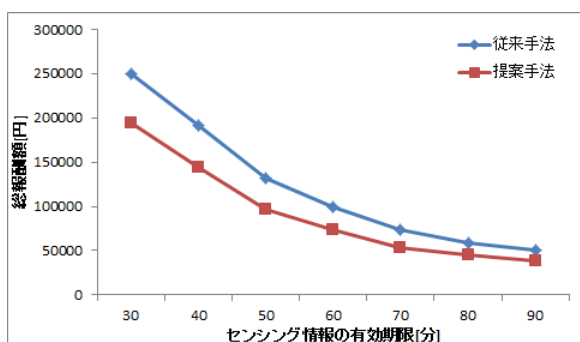


図 28 総報酬額 (歩行者 50 人)

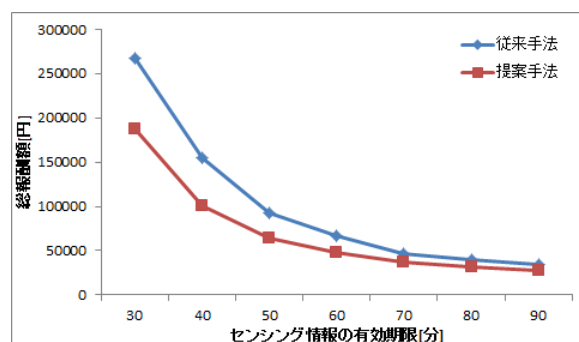


図 29 総報酬額 (歩行者 30 人，車 20 人)

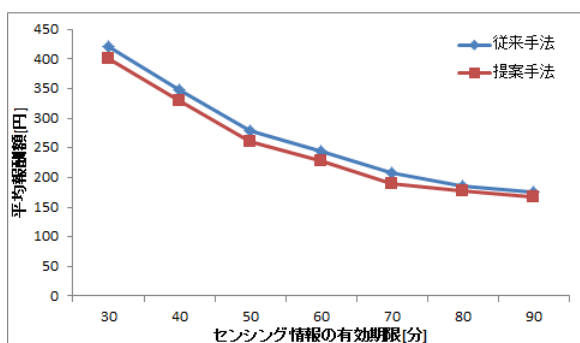


図 30 センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額
(歩行者 50 人)

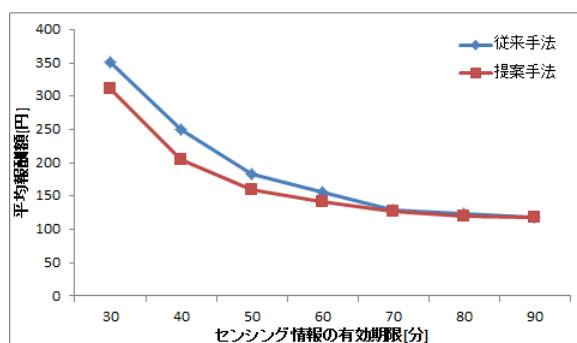


図 31 センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額
(歩行者 30 人，車 20 人)

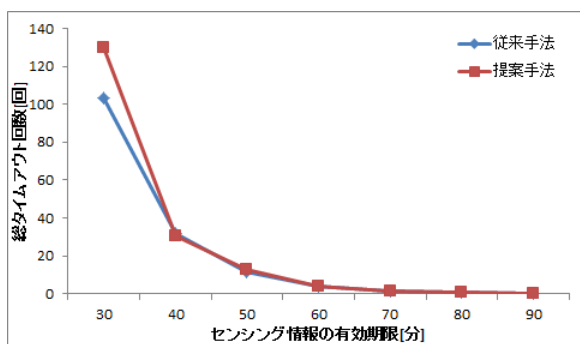


図 32 総タイムアウト回数 (歩行者 50 人)

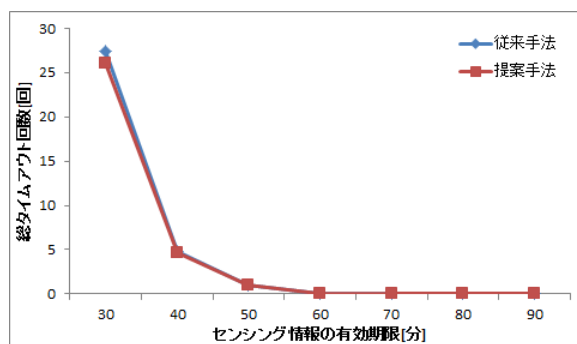


図 33 総タイムアウト回数 (歩行者 30 人，車 20 人)

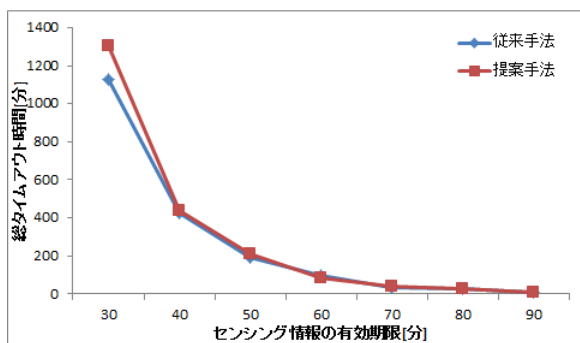


図 34 総タイムアウト時間 (歩行者 50 人)

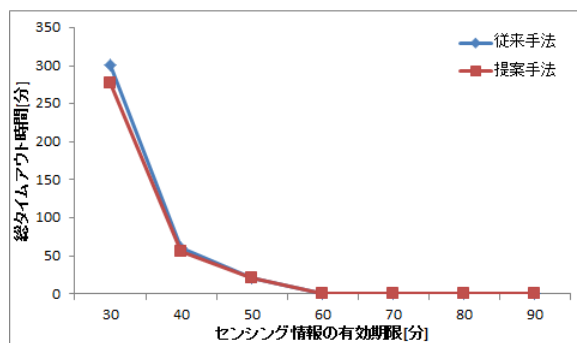


図 35 総タイムアウト時間 (歩行者 30 人，車 20 人)

5.7 実験結果 1 に対する考察

図 24 の結果より，提案手法では従来手法より総センシング回数が約 18～20% 削減されている．また，図 25 の結果においても同様に，総センシング回数が約 19～21% 削減されている．提案手法のセンシング依頼の削減によって，総センシング回数が削減されていることが確認できる．

図 26 の結果より，提案手法では従来手法より平均クオリティが約 5～7% 減少している．また，図 27 の結果においても同様に，平均クオリティが約 6～7% 減少している．平均クオリティが減少した原因は，センシング依頼数を削減したためである．センシング依頼数を削減したことにより，クオリティが最大値まで増加する回数が減少したので，平均クオリティが減少する結果となったと考えられる．

図 28 の結果より，提案手法では従来手法より総報酬額が約 22～27% 削減されている．また，図 29 の結果においても同様に，総報酬額が約 19～35% 削減されている．提案手法により，センシング依頼数が削減され，総報酬額が削減されたことが確認できた．

図 30 の結果より，提案手法では従来手法よりセンシング依頼 1 回当たりの報酬額が約 4～9% 減少している．また，図 31 の結果においても同様に，センシング依頼 1 回当たりの報酬額が約 0～18% 減少している．提案手法によりセンシング依頼数が削減されたことで，センシング依頼 1 回当たりのオークションの参加ユーザが増え，オークションによる報酬額の競り下げが進み，センシング依頼 1 回当たりの報酬額が削減されたと考えられる．

図 32 の結果より，センシング情報の有効期限が 30 分の場合に提案手法では従来手法より総タイムアウト回数が約 25% 増加し，それ以外ほぼ変わらない結果となった．センシング情報の有効期限が 30 分の場合では，センシング依頼数の削減によってクオリティが最大まで増加する回数が減少したため，タイムアウトする PoI が増加してしまったと考えられる．また，図 33 の結果では，総タイムアウト回数はほぼ変わらない結果となった．これは，参加ユーザに歩行者ユーザよりも移動能力の高い車ユーザが存在することにより，PoI のセンシング情報がタイムアウトする前にセンシングを行うことが可能になったためであると考えられる．

図 34 の結果より，センシング情報の有効期限が 30 分の場合に提案手法では従来手法より総タイムアウト時間が約 16% 増加し，それ以外ほぼ変わらない結果となった．総タイムアウト回数が増加してしまったため，総タイムアウト時間も増加してしまったと考えられる．図 35 の結果も同様に，総タイムアウト時間はほぼ変わらない結果となった．

提案手法により，クオリティが数 % 減少するものの，総報酬額を数十 % 削減することができた．センシング依頼数を削減することにより，総報酬額を削減しているため，クオリティと総報酬額はトレードオフの関係になっている．そのため，本手法はクオリティの減少が許容でき，総報酬額の削減が求められる状況において有効である．

5.8 シミュレーション実験 2

シミュレーション実験 1 では，センシング情報の有効期限が全ての PoI で同じものとして，提案手法による実験を行った．シミュレーション実験 2 では PoI ごとにセンシング情報の有効期限にばらつきがある場合を想定して，提案手法を実装したインセンティブモデルの実験を行う．評価す

る項目は、シミュレーション実験 1 と同様である。

5.9 シミュレーション条件 2

実験で使用したパラメータは実験 1 と同様である。センシング情報の有効期限のばらつきは表 15 に示すように、センシング情報の有効期限を 60,75,90 分の中から PoI ごとにランダムに設定する。フィールド上のユーザ数を歩行者 50 人とした場合と、歩行者 30 人、車 20 人とした場合の 2 通りの条件で、シミュレーション回数分の実験を行い、評価項目の平均を算出する。

表 15 PoI 実験条件

センシング情報の有効期限 [分]	60,75,90
------------------	----------

5.10 実験結果 2

シミュレーションによる実験結果を以下に示す。表 16 にユーザ数を歩行者 50 人とした場合の実験結果、表 17 にユーザ数を歩行者 30 人、車 20 人とした場合の実験結果を示す。

表 16 歩行者 50 人の場合の実験結果

	従来手法	提案手法
総センシング回数 [回]	340	281
平均クオリティ	0.637	0.603
総報酬額 [円]	64189	51365
センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額 [円]	188.8	183.5
総タイムアウト回数 [回]	0.4	0.2
総タイムアウト時間 [分]	7.6	2

5.11 実験結果 2 に対する考察

総センシング回数は歩行者 50 人の場合で約 17%、歩行者 30 人、車 20 人の場合でも約 17% 削減された。センシング情報の有効期限にばらつきがある場合でも、センシング依頼の削減が行われていることが確認できた。

平均クオリティは歩行者 50 人の場合で約 5%、歩行者 30 人、車 20 人の場合で約 6% 減少している。実験 1 と同様に提案手法によりクオリティが数 % 減少する結果となった。

表 17 歩行者 30 人，車 20 人の場合の実験結果

	従来手法	提案手法
総センシング回数 [回]	349	289
平均クオリティ	0.644	0.608
総報酬額 [円]	41024	31125
センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額 [円]	117.3	107.3
総タイムアウト回数 [回]	0	0
総タイムアウト時間 [分]	0	0

総報酬額は歩行者 50 人の場合で約 20%，歩行者 30 人，車 20 人の場合で約 24% 削減された．総センシング回数の削減により，数十 % の総報酬額が確認できた．

センシング依頼 1 回当たりの平均報酬額，総タイムアウト回数，総タイムアウト時間に関しては，実験結果 1 と類似した結果となった．

以上の結果より，センシング情報の有効期限にばらつきがある場合でも，報酬額の削減における提案手法の有用性を示すことができた．提案手法のセンシング依頼発行停止条件に， poi_j のセンシング完了予想時間を考慮する条件が含まれていることで，クオリティの減少速度が異なる場合においても，センシング依頼の停止が正常に機能したためであると考えられる．また，報酬額は削減できたが，センシング情報の有効期限が均一の場合と同じくクオリティも数 % 減少する結果となった．よって，センシング情報の有効期限にばらつきがある場合でも，クオリティの減少が許容でき，総報酬額の削減が求められる状況において，提案手法は有効である．

おわりに

本研究では、インセンティブを用いた参加型センシングにおいて、時間連動型インセンティブを提案した。さらに、相関のあるセンシング情報におけるインセンティブに対して、実行待ちセンシング依頼を考慮したコスト削減手法を提案した。提案手法の有用性を調べるため、シミュレーションによる実験を行った。

時間連動型インセンティブでは、固定報酬額と比較するとより少ない報酬額でのセンシングが実現できた。また、改善手法を実装した時間連動型インセンティブでは、制限時間の短いセンシング依頼に対しては報酬額が増加してしまう結果となったが、制限時間の長いセンシング依頼に対しては報酬額の減少が確認できた。時間連動型インセンティブとオークション型インセンティブを比較した場合、センシング成功回数ではオークションが時間連動型を上回る結果となった。しかし、制限時間の短いセンシング依頼に対しては、単純な時間連動型インセンティブはオークションに対して成功回数は劣るが、報酬額の低減される結果となった。

相関のあるセンシング情報における実行待ちセンシング依頼を考慮したコスト削減手法では、クオリティが数 % 低下するものの、数十 % の総報酬額の低減が確認できた。クオリティと総報酬額はトレードオフの関係になっており、クオリティが減少する代わりに報酬額の低減が求められる場合、本手法は有効である。

今後の課題として、特定のセンシング情報において、時間・空間的な相関を定式化し、提案手法の検証を行う必要がある。また、ユーザの希望報酬額についても、実際にアンケートや参加型センシングを実施したデータを用いて、より現実の人の行動に近づけたユーザの行動モデルを考案することが必要である。

謝辞

日頃から多くの御指導を頂きました太田義勝教授，鈴木秀智准教授，テーブウィロージャナボン・ニワット助教に深く感謝いたします．そして，何かとお世話になりました落合美子事務員に感謝いたします．また，本論文作成にあたって特にお世話になりました太田義勝教授に深く感謝いたします．最後に，熱心に討論して頂いた研究室の諸氏に感謝いたします．

参考文献

- [1] E . Milusso , N . D . Lane , K . Fodor , R . Peterson , H . Lu , M . Musolesi , S . B . Eisenman , X . Zhang and A . T . Campbell , “ Sensing meets mobile social networks:the design , implementation and evaluation of the CenceMe application ” , Proceedings of the 6th International Conference on Embedded Networked Sensor System(SenSys 2008) , Raleigh , North Carolina , USA , pp337-350 , 2008 .
- [2] S . Konomi , N . Thepvilojanapong , R . Suzuki , S . Pirttikangas , K . sezaki and Y . Tobe , “ Askus:Amplifying mobile actions ” , Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Computing(Pervasive 2009) , Nara , Japan , pp202-219 , 2009 .
- [3] N . D . Lane , E . Miluzzo , H . Lu , D . Peebles , T . Choudhury and A . T . Campbell , “ A servey of mobile phone sensing ” , Communications Magazine IEEE , Vol . 48 , No . 9 , pp140-150 , 2010 .
- [4] Dejun Yang , Guoliang Xue , Xi Fang and Jian Tang , “ Crowdsourcing to Smartphones:Incentive Mechanism Design for Mobile Phone Sensing ” , Proceedings of the 18th International Conference on Mobile computing and networking(MobiCom) , pp173-184 , 2012 .
- [5] 上山 芳隆 , “ ユーザ参加型センシングにおけるゲーミフィケーションを取り入れたインセンティブ機構 ” , 修士論文 , 奈良先端科学技術大学院大学 , 2014 .
- [6] 坂本 敬太 , 青木 俊介 , 伊藤 昌毅 , 瀬崎 薫 , “ クラウドセンシングにおけるカバレッジと質を考慮したノード選択手法の検討 ” , マルチメディア , 分散 , 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム , 2014 .
- [7] The ONE , (<http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/>) , (2015 年 1 月現在)
- [8] D . B . Johnson and D . A . Maltz , “ Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks ” , Kluwer Academic Publishers , chapter 5 , pp153-181 , 1996 .
- [9] G . Danezis , S . Lewis and R . Anderson , “ How much is location privacy worth? ” , Proceedings of WEIS , 2005 .