

推薦論文

# 停止するユーザの移動経路に基づいた 位置プライバシー保護のためのダミー生成手法

加藤 諒<sup>1,a)</sup> 岩田 麻佑<sup>1</sup> 原 隆浩<sup>1</sup> 鈴木 晃祥<sup>1</sup> 荒瀬 由紀<sup>2</sup> シェ シン<sup>2</sup>  
西尾 章治郎<sup>1</sup>

受付日 2013年2月15日, 採録日 2013年10月9日

**概要:** GPS 技術の発展にともないユーザの位置情報を利用した位置情報サービスが数多く提供されている。位置情報サービスは、サービス利用時にユーザの位置情報を送信する必要があり、ユーザの住所などの個人情報が露見する可能性がある。このようなプライバシーを保護するために、筆者らは先行研究において、実環境における制約条件を考慮し、ダミーの位置情報を生成するユーザ位置曖昧化手法を提案した。しかし、この手法は、ユーザが停止せずに移動を続ける環境を想定しており、いくつかの地点で停止しながら移動するという、より自然なユーザの行動に対応することは難しい。そこで本論文では、ユーザが停止しながら移動する状況を想定し、予測されたユーザの行動をもとに、いくつかの地点で停止しながら移動するダミーを作成するユーザ位置曖昧化手法を提案する。地図データ上で停止しながら移動するユーザの動きをシミュレーションし、先行研究の手法と比較した結果、提案手法が有効であることを確認した。

キーワード：位置情報サービス, 位置プライバシー, GPS

## A Dummy-based Method Based on User Trajectory with Pause for Location Privacy Protection

RYO KATO<sup>1,a)</sup> MAYU IWATA<sup>1</sup> TAKAHIRO HARA<sup>1</sup> AKIYOSHI SUZUKI<sup>1</sup> YUKI ARASE<sup>2</sup>  
XING XIE<sup>2</sup> SHOJIRO NISHIO<sup>1</sup>

Received: February 15, 2013, Accepted: October 9, 2013

**Abstract:** Because of the advance of GPS (Global Positioning System) technologies, a variety of services using user's position have become available. Since location information may reveal private information, preserving location privacy has become a significant issue. To protect this privacy, in our previous work, we have proposed a dummy-based method. This method protects user's location privacy by generating dummies based on some restrictions in a real environment, and sending the information with the user's location information. However, the previous work assumes a simplified mobility model in which users keep moving and do not stop. When we assume a more realistic mobility model in which users often pause for visiting some attractions, etc, it becomes more difficult to generate dummies which move naturally. In this paper, we assume that the user's movement is known in advance and propose a dummy-based method based on the user's trajectory. In this method, dummies move naturally while stopping at several positions. We simulated the user's movement on the real map information and verified the effectiveness of our proposed method when compared to the previous method.

**Keywords:** location based services, location privacy, GPS

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>2</sup> マイクロソフトリサーチアジア  
Microsoft Research Asia

a) kato.ryo@ist.osaka-u.ac.jp

本論文の内容は2012年10月のマルチメディア通信と分散処理ワークショップにて報告され、マルチメディア通信と分散処理研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

## 1. はじめに

GPS 技術の発展とともに、ユーザの位置に対応した情報を提供する位置情報サービスが展開されている。しかし、位置情報サービスを利用する際には、ユーザは自身の位置をサービスプロバイダへ通知する必要があり、この位置情報が流出することにより、ユーザの訪問箇所が特定され、住居や勤務先、行動パターンなどを第三者に把握される可能性が指摘されている。

このようなユーザの位置情報（位置プライバシー）の保護を目的とした既存研究は多数行われている [2], [3], [4], [9]. その 1 つとして、ダミーの位置情報を生成するユーザの位置曖昧化手法がある [9]. この手法では、サービスプロバイダに位置情報を通知する際、同時に複数のダミーの位置情報も送信する。それにより、送信された位置情報のうち、ユーザの位置を一意に特定することが困難になり、ユーザの位置の曖昧化が可能になる。しかし、既存の手法では、サービスの対象領域としてユークリッド平面を想定しており、実環境においてはユーザが存在できない場所にダミーが生成される可能性がある。さらに、ユーザの移動速度を考慮しておらず、直前の問合せにおけるダミーとの位置関係によりダミーを特定される可能性がある。このように、既存の手法では実環境における制約を十分に考慮できていない。

そこで筆者らは、先行研究において、上記のような実環境における制約条件を考慮したダミー生成手法を提案した [14], [15]. この手法では、ダミーをユーザの周囲にグリッド状に配置することで、十分にユーザの位置の曖昧性を確保しつつ、道路などの実環境における制約を考慮することで、ダミーの移動が不自然にならないようにしている。さらに、ユーザとダミーの移動経路を交差させることで、ユーザの位置が目撃情報などで一時的に特定された場合でも、その曖昧性を短時間で回復できるようにしている。

しかし、先行研究ではユーザが停止することなく移動し続けるという環境を想定していた。そのため、ユーザがコンビニに立ち寄りたり、休憩地点で休憩したりするなど、いくつかの地点で停止しながら移動するといった、より現実的な動きをする状況を想定すると、先行研究の手法では自然に動くダミーを作成することは困難である。たとえば、ユーザがある地点で停止する際、停止しているのがユーザであると特定されないように、ダミーも適宜停止させる必要がある。しかし、ユーザの周囲でグリッドを保ちながら移動するダミーの周辺に停止可能な観光地や店などのスポットがあるとは限らない。そのような停止可能な地点がない場合、ダミーを強制的に停止すると、不自然な動きになってしまう。逆に、ダミーが停止せずに移動し続けると、最初に停止したものがユーザ自身であると簡単に識別できてしまう。

そこで本論文では、ユーザがいくつかの地点で停止しながら移動するという環境において、自然なダミーの動きを作成することのできるユーザ位置曖昧化手法を提案する。提案手法では、ユーザの停止地点や停止時間も含めた行動予測が可能な状況を想定し、既知であるユーザの行動に基づいて、実環境における制約条件を考慮したダミーの行動を決定する。ここで、提案手法では、ユーザの行動を予測できる（既知である）と想定している点が重要である。先行研究の手法では、このような想定がないため、ダミーの生成は刻一刻と変化するユーザの行動にリアルタイムに適用して行われていた。そのため、上述のように、ユーザが停止した場合への対応が困難であった。一方、本研究では、ユーザの行動を既知としているため、ユーザの行動を考慮して事前にダミーの行動プランを生成できる。このような想定は実環境では必ずしも妥当ではないが、ユーザが事前に行動プランを登録したり、ユーザの過去の行動履歴から予測したりなど、ある程度の精度で予測できる場合も多い。たとえば、文献 [16] では、ユーザの GPS 情報の履歴を用いて、ユーザが頻繁に訪れる領域（ROI）を調べ、ROI を用いて、今後のユーザの移動経路を予測する手法（CRPM）を提案している。CRPM によって、ユーザが次に訪れる ROI を、平均で約 70% の精度で予測することができる。このような、ユーザの位置情報の履歴などを用いてユーザの行動を予測する研究は、今後も発展していくものと考えられる。さらに筆者らは、ユーザが事前に移動経路をシステムに入力してもらうことで、高い精度でユーザの行動を推定できるものと考えている。これは、ユーザにとってある程度の負担となる作業であるが、ユーザ本人の位置プライバシーを保護するという直接的な利益があるため、実現可能性は十分にあるものと考えられる。以上のような理由と、問題の単純化の観点から、本研究では、ユーザの行動は 100% の精度で推定できるという想定を設定した。この予測の精度が低い場合への対応については、今後の課題と考え、本論文では対象としない。

提案手法ではまず、ダミーが停止すべき時間および地点を決定し、その時間にその地点を経由して移動を行うダミーの行動を決定する。この際、ユーザや他のダミーがあまり存在しない地点にダミーを停止させることで、ユーザの位置が曖昧になるようにする。また、ユーザや他のダミーと停止する地点を共有して交差をさせることで、ユーザの位置が一時的に特定された場合でも、その曖昧性を短時間で回復できるようにする。

以下では、2 章で既存研究とその問題点について説明し、3 章でユーザの移動経路に基づくダミーを用いた位置曖昧化手法について述べる。4 章で評価実験と結果を示し、最後に 5 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

本章では、ユーザの位置プライバシーの保護を目的とした代表的な3つの手法について述べる。

文献 [1], [3], [6], [7], [13] では、ユーザが直接自身の位置情報をサービスプロバイダに送るのではなく、信頼された第三者サーバを利用する手法が提案されている。第三者サーバは自身の管理するユーザの位置情報からあらかじめ決められた  $k$  人以上のユーザを含むような領域を選択し、その領域に対するクエリをサービスプロバイダに送信する。これによりユーザの位置を  $\frac{1}{k}$  以上の確率で特定不可能になる。ただし、この手法では完全に信頼できる第三者サーバの存在を前提としており、実環境で用いるのは困難である。

文献 [2], [5], [11] では、自身の位置情報として、ユーザ位置ではなく、ユーザ付近の交差点や建物などのあらかじめ決められた地点を送信する手法が提案されている。これにより、プロバイダはユーザの正確な位置を知ることはできなくなるが、特に近隣に適切な地点が存在しない場合、ユーザ位置との乖離が大きくなるため、サービスの質が低下してしまう。

文献 [4], [8], [9] では、自身の位置情報と一緒に架空の位置情報であるダミー情報をクエリに付加して、図 1 のようにサービスプロバイダにサービス要求をする手法が提案されている。サービスプロバイダはクエリ中に含まれるすべての位置情報に関連する情報を返信する。返信された情報を受け取ったユーザは自身の位置に対応する情報以外をフィルタリングし、自身の位置情報に関連する情報のみを取得できる。サービスプロバイダは受信した位置情報群として送られてきた情報の1つ1つを区別できないため、ユーザの位置を正確に知られる可能性は小さくなる。このようなダミーを用いた手法は、第三者サーバを必要とせず、サービスの質が低下することもない。そのため、本論文ではダミー手法を採用する。しかし、文献 [4], [8], [9] の手法ではダミーの生成位置に制約がなく、高速道路などの通常ユーザが存在しえない場所にもダミーを生成する可能性があるなど、実環境における考慮が不足している。

筆者らは先行研究において、これらの実環境における制約を考慮し、ユーザの周囲にダミーをグリッド状に配置す

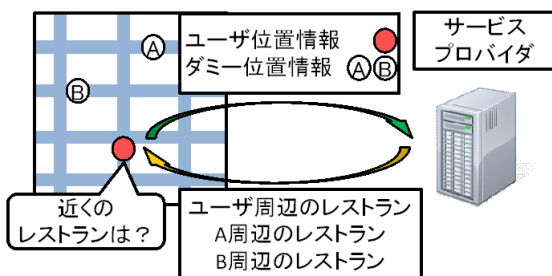


図 1 ダミーを用いた位置情報サービスの利用例

Fig. 1 Example of dummy-based approach.

る手法を提案した [14], [15]. しかし、先行研究では、ユーザは停止することなく移動し続けるといった動きを想定しており、ユーザが停止する状況を考慮していない。そのためこの手法では、ユーザの停止に対応し、自然な地点で停止するといったダミーの作成は困難である。一方、本研究の提案手法では、予測したユーザの行動をもとに、ユーザと同様に停止しながら移動するダミーの行動を決定する。既知であるユーザの行動を考慮することで、ダミーを自然なタイミングで自然な位置に停止させることができる。

## 3. ユーザの行動に基づいたダミーの移動経路生成手法

本章では、実環境を想定したダミー生成の際に考慮すべき条件について述べた後、それらの条件を考慮したユーザの停止に対応するダミーの移動経路生成手法について説明する。

### 3.1 ダミー生成の際に考慮すべき条件

ダミーを用いた位置曖昧化手法では、考慮すべき条件がいくつかある。以下では、各条件とそれに対する提案手法のアプローチについて述べる。

#### ● 移動可能性

サービス要求が頻発する場合、前後のクエリにおけるダミーとの位置関係を考慮する必要がある。たとえば、あるユーザが一度サービスを要求してから、3分後に新たにサービス要求した場合を考える。この際、新しいクエリにおいて、直前のクエリのどのダミー位置からも3分間で到達不可能な位置にダミーが存在する場合、その位置情報はユーザではないと容易に推測できてしまう。

そこで、提案手法では、実際の地図情報を用いてダミーの移動距離を計算することで、直前のダミー位置から移動可能な距離内にダミーが生成されることを保証する。

#### ● 追跡可能性

短期間の連続したサービス要求の際には、ユーザの追跡可能性も考慮しなければならない。追跡可能性とは、短い時間間隔で複数の位置情報が与えられた際に、それらを結合することにより、その軌跡を推測できてしまう性質を指す。これにより、ある特別な経路の通過など何らかの理由でユーザの位置がいったん特定されたとき、その前後のサービス要求時のユーザ位置まで特定されてしまう可能性がある。たとえば、図 2 (a) のようにユーザの移動可能な範囲内をダミーが通過しない場合、ユーザの位置をいったん特定できると、ユーザの行動軌跡 (前後の位置情報) を完全に追跡できてしまう。このような追跡を防ぐためには、図 2 (b) のように、ユーザとダミー経路を定期的に交差することが有効である [8]. 交差により、サービスプロバイダはユーザに対応する軌跡と交差した複数のダミーの軌跡の区別が困難になる。

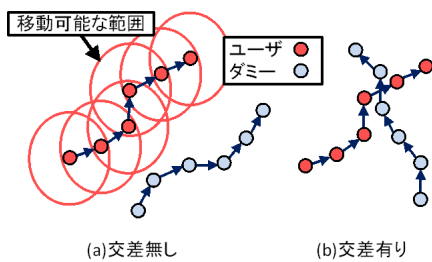


図 2 追跡可能性  
Fig. 2 Traceability.

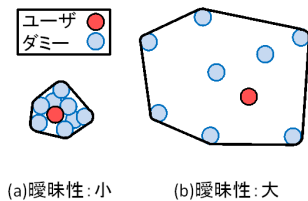


図 3 アノニマスエリア  
Fig. 3 Anonymous Area.

そこで提案手法では、ユーザとダミー、またはダミー間で停止する地点を共有させることで交差を発生させ、追跡可能性を低下させる。

● アノニマスエリア

ユーザの位置プライバシーを保護するためには、複数の位置情報から一意に特定できないだけでなく、どの程度の大きさの領域に位置情報が曖昧化されているかも重要である。たとえば、図 3(a) のようにユーザ付近にダミーを配置した場合、複数の位置情報の中から、ユーザの位置を容易に特定できない。しかし、このようなダミーの配置は、ダミーの存在範囲が小さいため、ユーザが存在する可能性のある領域が小さく絞り込めてしまい、ユーザのおおよその位置の予測が可能になってしまう。

そこで本論文では、Lu ら [9] の定義に基づき、ユーザとすべてのダミーを包括する凸多角形をアノニマスエリアと定義し、その大きさをユーザ位置の曖昧度の評価値として用いる。たとえば、図 3 の場合は、(b) の方がアノニマスエリアが大きいので、ユーザの位置曖昧性は大きい。

提案手法では、ユーザとダミーによるグリッド領域を明示的に作成するわけではないが、ユーザおよびダミーが少ない領域にダミーを移動させることにより、おおよそのグリッド領域を作成し、ユーザの要求するアノニマスエリアの保証を試みる。

3.2 ダミーの行動決定方法

本研究では、ユーザはある目的地を持って移動を開始し、移動中にいくつかの停止地点で停止しながら、最終的に目的地に到達するという移動を想定する。たとえば、会社への移動の途中に、コンビニなどの停止地点に寄り道しながら向かうというような状況である。

ユーザが所有するモバイル端末上のシステムは地図情報を保持しており、ユーザやダミーが通っても不自然ではない道路、コンビニエンスストアやレストランなどの停止しても不自然ではない位置をすべて把握しているものとする。現在、地図情報に加えて、住所や店の属性情報などを提供するサービス\*1が普及している。そのようなサービスを利用することにより、ユーザが停止しても不自然でない位置を、システムが把握することが可能である。

そして、それぞれの停止地点で、ユーザやダミーが最小  $T_m$  秒から最大  $T_M$  秒までの範囲で停止し、停止地点間は最短路を通って移動するものとする。また本研究では、ユーザの停止地点、停止時間、移動経路といったユーザの行動がすべて事前に予測できるものと想定する。

以上のような想定環境下で、提案手法では、ユーザが指定したダミーの個数、アノニマスエリアのサイズ、さらに、予測されたユーザの行動に基づいて、ダミーが停止すべき地点（停止地点）、その地点に到着すべき時間（停止地点到着時間）を決定する。そして、停止地点に向かって移動し、停止地点到着時間にそこに到着し、その後停止するというダミーの行動スケジュールを生成する。

具体的には、以下の手順を要求されたダミー数だけ繰り返す。ダミーの行動を 1 つずつ順に決定する。初めのダミーの行動は、ユーザの行動のみを考慮して決定し、2 番目以降のダミーの行動は、ユーザと生成済みダミーの行動を考慮して決定する。

- (1) アノニマスエリア確保のための停止地点（基準地点）および停止地点到着時間（基準地点到着時間）の決定
- (2) 追跡可能性低下のための停止地点（共有地点）および停止地点到着時間（共有地点到着時間）の決定
- (3) 基準地点および共有地点を通るダミーの移動経路の決定

以下では、これらの手順について詳細に説明する。

3.2.1 アノニマスエリア確保のための基準地点および基準地点到着時間の決定

まず、アノニマスエリアを十分に確保できるように、ユーザおよび生成済みダミーの存在が少ない領域とその時間を求め、その領域内に生成中ダミーの通るべき地点、時間を 1 つ決定する。このダミーの場所および時間をそれぞれ、基準地点、基準地点到着時間と定義し、基準地点到着時間には必ず基準地点に生成中ダミーが存在するように全体の移動経路を決定する。

基準地点および基準地点到着時間を決定するアルゴリズムを Algorithm 1 に示す。具体的には、以下の手順で 1 つの基準地点および基準地点到着時間を決定する。

- (1-1) グリッド領域の生成 (Algorithm 1 の 6~8 行目): ユーザの総移動時間を一定時間ごと（時区間）に区切

\*1 OpenStreetMap project (<http://www.openstreetmap.org/>).

**Algorithm 1** : 生成中ダミー ( $k$  番目) の基準地点および基準地点到着時間の決定

```

1: input: ユーザおよび生成済みダミーの移動経路  $D = \{D_0, \dots, D_{k-1}\}$ 
   (停止地点, 停止地点到着時間, 停止時間), シミュレーション終了時間  $t_{end}$ 
2: output: 生成中ダミー ( $k$  番目) の停止地点および停止地点到着時間  $PP$ 
3:
4:  $t \leftarrow 0$ 
5: repeat
6:   //  $T[s]$  ごとにグリッド領域を作成
7:    $t \leftarrow t + T$ 
8:    $t$  のときの  $D$  の平均位置を中心とした  $3 \times 3$  のセル  $G = \{G_0, \dots, G_8\}$  を持つグリッド領域を作成
9:   for  $i = 0$  to  $8$  do
10:     $G_i.exist_t \leftarrow G_i$  に位置する  $D$  の数
11:   end for
12: until  $t \geq t_{end}$ 
13: // ユーザおよびダミーが存在する数が最少のセルを取得
14:  $G_{base} \leftarrow \min(\sum_{t=0}^{t_{end}} G_0.exist_t, \dots, \sum_{t=0}^{t_{end}} G_8.exist_t)$  となる  $G_i$ 
15: //  $T$  秒間のユーザおよびダミーの存在数が最少となる最初の時刻を取得
16:  $t_{base} \leftarrow \min(\sum_{t=0}^T G_{min}.exist_t, \dots, \sum_{t=t_{end}-T}^{t_{end}} G_{min}.exist_t)$  となる時刻
17: repeat
18:    $p_{base} \leftarrow \text{GetPausePosition}(t_{base})$ 
19: until  $p_{base}$  が  $G_{base}$  に存在
20: return  $PP \leftarrow \langle p_{base}, t_{base} \rangle$ 
21:
22: // 停止地点の取得
23: function GetPausePosition(時間  $t$ )
24:   要求アノニマスエリアサイズ  $anonymousArea$ 
25:   停止地点の集合  $P = \{P_0, \dots, P_m\}$ 
26:    $center \leftarrow t$  のときの  $D$  の平均位置
27:   repeat
28:      $p \leftarrow \text{random}(P_0, \dots, P_m)$ 
29:   until  $p$  が  $center$  を中心とした  $anonymousArea$  の中に存在
30:   return  $p$ 

```

り, 各時区間でユーザと生成済みのダミーの平均位置を中心とするグリッド領域を作成する.

(1-2) 各グリッドに存在するユーザ, ダミー数のカウント (Algorithm 1 の 9~11 行目): 各時区間において, ユーザおよび生成済みダミーがグリッド領域内のどのセルにどれだけ存在するのかを算出する.

(1-3) 基準地点の決定 (Algorithm 1 の 14 行目および 17~20 行目): 連続的にユーザや生成済みダミーが最も少ない時間およびセルを算出して, 基準地点を設定する.

(1-4) 基準地点到着時間の決定 (Algorithm 1 の 16 行目) 手順 (1-1) では, グリッド領域を図 4(a) のように,  $3 \times 3$  の正方形とし, その領域の大きさは, ユーザの設定するアノニマスエリア  $S$  を満たすように, 1 辺の長さを  $\sqrt{S}$  とする. 各セルごとにグリッド ID を設定し, ユーザと生成済みダミーの平均位置を領域の中心とする. そして, 手順 (1-2) において, 図 4(b) の表のように, 配置したグリッド

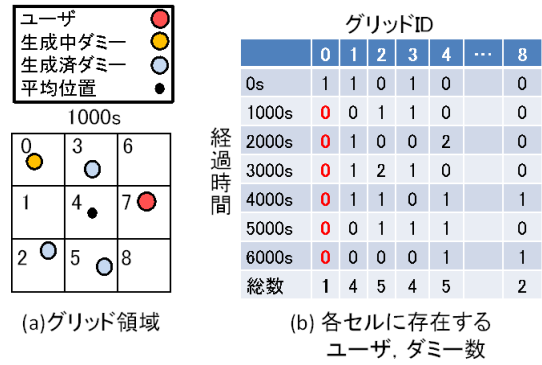


図 4 グリッド領域の利用  
**Fig. 4** Example of determining the base pause position and base pause start time.

に対してユーザおよび生成済みダミーが各セルにどれだけ位置するのかを算出する. これにより, 連続的にユーザ, ダミーの存在する数が少ない領域と時間を特定することが可能になる. 手順 (1-3) において, すべての時区間で各セルに存在するユーザおよび生成済みダミーの総数を算出し, 総数が最少である領域内でランダムに基準地点を配置する. 手順 (1-4) では, 決定した基準地点のある領域 (セル) で, ユーザおよび生成済みダミーが存在する数が連続的に最少である時区間内の最初の時刻を基準地点到着時間とする.

たとえば, 図 4 の例では, グリッド領域を一定時間 (1,000 秒) ごとに作成し, すべての時区間 (0 秒から 6,000 秒) で, 各グリッド ID のセルごとにユーザおよび生成済みダミーの存在する総数を算出している. グリッド ID が 0 の領域には, 1,000 秒から 5,000 秒の間にユーザもダミーも存在しておらず, 他の領域よりもユーザやダミーの存在する数が連続的に少なく, 結果的にユーザ, ダミーの存在する総数が最少になっている. そのため, 基準地点をグリッド ID が 0 の領域内に設定し, 1,000 秒を基準地点到着時間とする.

こうして決定した基準地点に基準地点到着時間には生成中ダミーを到着させ, 停止させるという行動スケジュールを生成することにより, アノニマスエリアの確保が期待できる. また, その後の時間においても生成中ダミーがその領域 (つまり, ユーザやダミーの少ない領域) に位置する可能性が高くなる.

**3.2.2 追跡可能性の低下のための共有地点および共有地点到着時間の決定**

追跡可能性を低下させるため, 3.2.1 項で決定した基準地点および基準地点到着時間をもとに, ユーザや生成済みダミーとできる限り多くの停止地点を共有させ, 交差を発生させる. この停止地点を共有地点, 共有地点に到達すべき時間を共有地点到着時間と定義する.

共有地点および共有地点到着時間を決定するアルゴリズムを Algorithm 2 に示す. 具体的には, 以下の手順で 1 つ

**Algorithm 2** : 生成中ダミー ( $k$  番目) の共有地点および共有地点到着時間の決定

```

1: input: ユーザおよび生成済みダミーの移動経路  $D = \{D_0, \dots, D_{k-1}\}$ 
   (停止地点, 停止地点到着時間, 停止時間, 交差回数 cross), 生成中ダ
   ミー ( $k$  番目) の停止地点および停止地点到着時間  $PP_{in}$ , 最大停止時
   間  $T_M$ 
2: output: 生成中ダミー ( $k$  番目) の停止地点および停止地点到着時間
    $PP$ 
3:
4: repeat
5:    $D_{mincross} \leftarrow \min(D_0.cross, \dots, D_{k-1}.cross)$  となる  $D_i$ 
6:    $p_{shared} \leftarrow \text{random}(D_{mincross}$  の停止地点)
7:    $t_{shared} \leftarrow p_{shared}$  に到着する時間
8:   if  $PP_{in}$  に含まれるすべての停止地点到着時間  $\leq t_{shared}$  then
9:     repeat
10:       $t_{last} \leftarrow \max(PP_{in}$  に含まれる停止地点到着時間)
11:       $p_{last} \leftarrow PP_{in}$  に含まれる  $t_{last}$  に到着する停止地点
12:    until Reachable( $p_{last}, t_{last}, p_{shared}, t_{shared}, T_M$ )=TRUE
13:   else if  $PP_{in}$  に含まれるすべての停止地点到着時間  $\geq t_{shared}$ 
   then
14:     repeat
15:       $t_{first} \leftarrow \min(PP_{in}$  に含まれる停止地点到着時間)
16:       $p_{first} \leftarrow PP_{in}$  に含まれる  $t_{first}$  に到着する停止地点
17:    until Reachable( $p_{shared}, t_{shared}, p_{first}, t_{first}, T_M$ )=TRUE
18:   else
19:     repeat
20:       $t_{previous} \leftarrow t_{shared}$  の前の  $PP_{in}$  に含まれる停止地点到
      着時間
21:       $p_{previous} \leftarrow PP_{in}$  に含まれる  $t_{previous}$  に到着する停止
      地点
22:       $t_{next} \leftarrow t_{shared}$  の後の  $PP_{in}$  に含まれる停止地点到着時間
23:       $p_{next} \leftarrow PP_{in}$  に含まれる  $t_{next}$  に到着する停止地点
24:    until Reachable( $p_{previous}, t_{previous}, p_{shared}, t_{shared}, T_M$ )
25:      =TRUE
26:    AND Reachable( $p_{shared}, t_{shared}, p_{next}, t_{next}, T_M$ )
27:      =TRUE
28:   end if
29:    $PP$  に  $\langle p_{shared}, t_{shared} \rangle$  を追加
30:    $D_{mincross}.cross \leftarrow D_{mincross}.cross + 1$ 
31:   生成中ダミーの交差回数  $\leftarrow$  生成中ダミーの交差回数 +1
32: until 生成中ダミーの交差回数  $\geq \text{ave}(D_0.cross, \dots, D_{k-1}.cross)$ 
33: return  $PP$ 
34:
1: //地点 A から地点 B に到達可能か到達不可能かのチェック
2: function Reachable(地点 A, 時間  $A_{time}$ , 地点 B, 時間  $B_{time}$ ,
   最大停止時間  $T_M$ )
3:   if  $A_{time} + T_M + A$  から B へ移動する時間  $\leq B_{time}$ 
4:     return TRUE
5:   else
6:     return FALSE
7:   end if

```

の共有地点および共有地点到着時間を決定する。(2-1) および (2-2) の手順を共有可能な地点がなくなるまで繰り返す, できる限り多くの共有地点を確保する.

(2-1) 共有可能な停止地点の探索 (Algorithm 2 の 5~25 行目)

(2-2) 共有地点, 共有地点到着時間の決定 (Algorithm 2

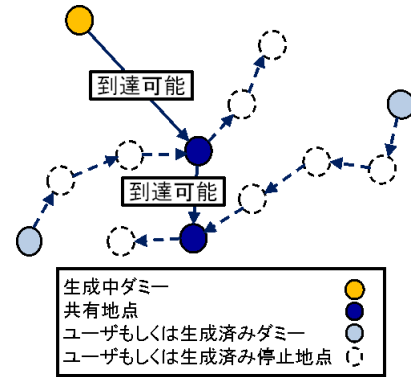


図 5 停止地点の共有

Fig. 5 Sharing pause positions of user and dummies.

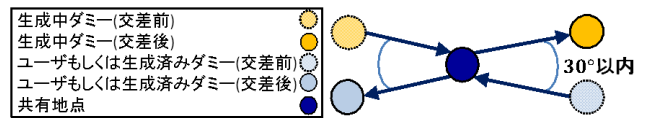


図 6 追跡可能性が低下しない交差

Fig. 6 Crossing not decreasing traceability.

の 26~28 行目)

まず手順 (2-1) で, 図 5 のように, 基準地点と基準地点到着時間から, 移動可能性を考慮し, 到達可能な範囲内に, ユーザや生成済みダミーの停止地点がないかを調べる. 手順 (2-2) では, 共有可能な停止地点が存在すれば, 発見した停止地点を生成中ダミーの共有地点とし, 共有地点において, ユーザや他のダミーと共有するために到達すべき時間を共有地点到着時間とすることで, 停止地点の共有を行う. 最初の共有地点および共有地点到着時間が決定した後, 決定した共有地点, 共有地点到着時間や基準地点, 基準地点到着時間をもとに, 手順 (2-1) により, 移動可能性を考慮して, 他に共有可能な停止地点はないかを検証し, 手順 (2-2) により, 生成中ダミーの共有地点, 共有地点到着時間を決定するという処理を繰り返す.

この際, ユーザとダミーで交差回数に大きな差があると, 交差回数の情報をもとにユーザを推測できる可能性がある. たとえば, ダミーがユーザのみと頻繁に交差をするような状況を考えて, 交差回数の多いものがユーザと推測され, 他の位置情報はダミーであると判別できてしまう恐れがある. そのため, ユーザおよびすべてのダミーの間で交差回数に大きな差が生じないように, ユーザとダミーの交差回数をシステム内で記録しておき, ユーザと生成済みのダミーの中で交差回数の少ないものから共有可能な停止地点がないかを調べる.

ここで, 図 6 のように, ユーザや生成済みダミーと, 生成中ダミーの進行方向が逆で, 向かい合って交差する際に, 交差後の進行方向も逆である場合, 引き返す動作は不自然である. このような場合, 交差後のユーザやダミーはそれぞれ交差前とおおよそ同じ進行方向をとっていると推測さ

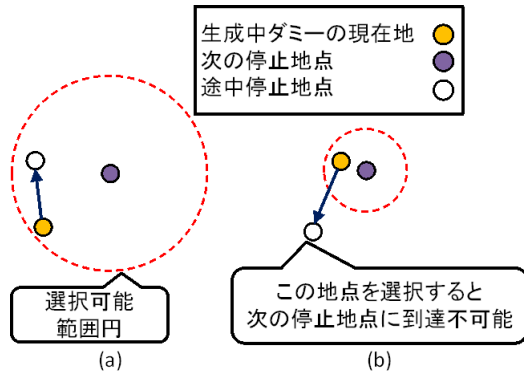


図 7 選択可能範囲円を用いた移動経路の決定

Fig. 7 Determining mid-pause positions based on the reachable area circle.

れ、交差によってユーザやダミーが紛れることはない。そのため、図 6 に示すように、生成中ダミーの進行方向と向かい合って交差するユーザもしくは生成済みダミーの進行方向の間の角度が  $30^\circ$  以内の場合、共有地点を設定しないこととする。

### 3.2.3 基準地点および共有地点を通るダミーの移動経路の決定

3.2.1 項、3.2.2 項で決定した基準地点と共有地点の集合を停止地点としてすべて結ぶだけでは、生成中のダミーが不自然な行動をとる可能性がある。たとえば、共有地点どうしが近く、共有地点到着時間に対して時間的に余裕がある場合、ある停止地点において、停止時間の最大値  $T_M$  を超えて、ユーザが止まりえないほど長時間停止することがある。このような場合、長時間停止しているのはダミーであると推測される可能性がある。そのため、移動可能性を考慮して、時間的に無理のないように追加の停止地点を設定し、それらの地点を経由するダミーの経路を生成する必要がある。そこで図 7 に示すように、選択可能範囲円を利用することで、基準地点や共有地点間に途中停止地点を設定し、途中停止地点においてもダミーを停止させる。これにより、無理のない移動経路を作成する。ここで、選択可能範囲円とは、次に目指すべき基準地点や共有地点を中心とした、その地点から、基準地点到着時間や共有地点到着時間までに移動可能な範囲を示した円であり、途中停止地点とは、次に目指すべき基準地点や共有地点へ向かうまでに設定する停止地点である。

ダミーの移動経路を決定するアルゴリズムを Algorithm 3 に示す。具体的には、以下の手順により、すべての基準地点および共有地点に到着時間にたどり着き、それらの地点で停止しながら動く生成中ダミーの行動を決定する。

(3-1) 初期位置の決定 (Algorithm 3 の 4~13 行目) : 3.2.1 項、3.2.2 項で決定した生成中ダミーの基準地点や共有地点のうち、最も早い到着時刻を持つ停止地点に到着可能な初期位置を決定する。

### Algorithm 3 : 生成中ダミー ( $k$ 番目) の移動経路の決定

```

1: input: 生成中ダミー ( $k$  番目) の停止地点および停止地点到着時間
    $PP_{in}$ , 最小停止時間  $T_m$ , 最大停止時間  $T_M$ , シミュレーション終了
   時間  $t_{end}$ 
2: output: 生成中ダミー ( $k$  番目) の停止地点, 停止地点到着時間, 停止
   時間
    $PP_{out} = \{ \langle position_0, start_0, pause_0 \rangle, \dots, \langle position_n, start_n, pause_n \rangle \}$ 
3:
4:  $s_{dest} \leftarrow \min(PP_{in}$  に含まれる停止地点到着時間)
5:  $p_{dest} \leftarrow PP_{in}$  に含まれる  $s_{dest}$  に到着する停止地点
6:
7: //初期位置の決定
8:  $pause_0 \leftarrow 0$ 
9:  $start_0 \leftarrow 0$ 
10: repeat
11:    $position_0 \leftarrow \text{GetPausePosition}(0)$ 
12: until Reachable( $position_0, 0, p_{dest}, s_{dest}, T_M$ )=TRUE
13:  $PP_{out}$  に  $\langle position_0, start_0, pause_0 \rangle$  を追加
14:
15: //初期位置以降の停止地点の決定
16:  $i \leftarrow 1$ 
17: repeat
18:   repeat
19:     //途中停止地点の決定
20:      $pause_i \leftarrow \text{random}(T_m, T_M)$ 
21:     repeat
22:        $position_i \leftarrow \text{GetPausePosition}(start_{i-1} + pause_{i-1})$ 
23:     until  $position_{i-1}$  から  $position_i$  へ到達可能
24:      $start_i \leftarrow start_{i-1} + pause_{i-1} + position_{i-1}$  から
      $position_i$  へ移動する時間
25:      $PP_{out}$  に  $\langle position_i, start_i, pause_i \rangle$  を追加
26:      $i \leftarrow i + 1$ 
27:   until Reachable( $position_i, start_i, p_{dest}, s_{dest}, T_M$ )=FALSE
28:   //途中目的地を停止地点として決定
29:    $position_i \leftarrow p_{dest}$ 
30:    $start_i \leftarrow s_{dest}$ 
31:    $pause_{i-1} \leftarrow s_{dest} - start_{i-1} - position_{i-1}$  から  $p_{dest}$  へ移
     動する時間
32:    $PP_{out}$  に  $\langle position_i, start_i, pause_i \rangle$  を追加
33:   //途中目的地の更新
34:    $s_{dest} \leftarrow \min(start_i$  より遅い  $PP_{in}$  に含まれる停止地点到着
     時間)
35:    $p_{dest} \leftarrow PP_{in}$  に含まれる  $s_{dest}$  に到着する停止地点
36: until  $start_i > \max(PP_{in}$  に含まれる停止地点到着時間)
37: repeat
38:    $pause_i \leftarrow \text{random}(T_m, T_M)$ 
39:    $position_i \leftarrow \text{GetPausePosition}(start_{i-1})$ 
40:    $start_i \leftarrow start_{i-1} + pause_{i-1} + position_{i-1}$  から  $position_i$ 
     へ移動する時間
41:    $PP_{out}$  に  $\langle position_i, start_i, pause_i \rangle$  を追加
42:    $i \leftarrow i + 1$ 
43: until  $start_i \geq t_{end}$ 
44: return  $PP_{out}$ 

```

(3-2) 各基準地点、共有地点までの行動の決定 (Algorithm 3 の 16~36 行目) : 移動可能性を考慮し、生成中ダミーの基準地点や共有地点間に途中停止地点を適宜設定する。

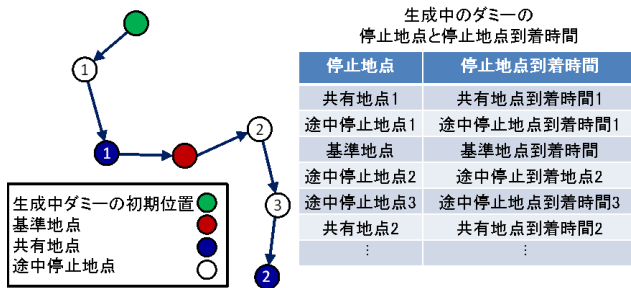


図 8 最終的に決定されるダミーの行動

Fig. 8 Example of determining dummy's movement.

(3-3) ユーザの移動時間の終了まで停止地点を決定 (Algorithm 3 の 37~43 行目)

手順 (3-1) で、最も早い時間の基準地点到着時間もしくは共有地点到着時間における基準地点もしくは共有地点を途中目的地とし、その途中目的地を中心とした選択可能範囲円の中でランダムにダミーの初期位置を設定する。そして手順 (3-2) で、初期位置の次に向かうべき停止地点である途中目的地までの経路を決定する。途中目的地に到着するまでの時間が長い場合 (最大停止時間  $T_M$  以上の場合)、図 7(a) に示すように、途中目的地に到達する時間から選択可能範囲円を算定し、その選択可能範囲円の中でランダムに途中停止地点を決定する。これを繰り返すことで徐々に途中目的地である基準地点や共有地点に近づく。この際、図 7(b) のように選択可能範囲円が小さくなり、途中停止地点を新たに設定すると、途中目的地に到着時間までに到達できなくなる。このような場合、途中停止地点は設定せず、次の停止地点を途中目的地と設定することにより、初期位置から途中目的地までの停止地点を順次決定する。

途中目的地に到達すると、次に到達時間の早い基準地点、共有地点を次の途中目的地とし、手順 (3-2) を繰り返すことで、基準地点と共有地点のすべてを経由して移動するダミーの行動を決定する。つまり、生成したダミーは、基準地点、共有地点、途中停止地点という 3 種類の停止地点に、それぞれの停止地点到着時間に到着し、そこで少しの時間停止することを繰り返しながら移動する。さらに、手順 (3-3) で、ユーザの移動時間が終了するまで、手順 (3-2) で決定した最後の基準地点もしくは共有地点から、ランダムに停止地点およびその停止地点での停止時間を順次決定する。生成した最終的なダミーの移動経路の例を図 8 に示す。

#### 4. 評価実験

提案手法の有効性を確認するために、地図上でユーザの動きをシミュレーションできるネットワークシミュレータ MobiREAL [10] を用いて、京都の街を再現し、評価実験を行った。ユーザの動きは、道路上をランダムに停止しながら移動するモデルを利用した。ユーザやダミーの停止地点

表 1 パラメータ

Table 1 Parameters used in experiment.

| パラメータ                        | 範囲  |
|------------------------------|---|
| サービス利用間隔 [s]                 | 180   |
| 歩行速度 [m/s]                   | 1.30  |
| 領域 [m <sup>2</sup> ]         | 15,200 <sup>2</sup>   |
| ダミー数 [個]                     | 16, 25  |
| 最大停止時間 [s]                   | 600   |
| 最小停止時間 [s]                   | 60  |
| 要求アノニマスエリア [m <sup>2</sup> ] | 1,000 <sup>2</sup> , 1,200 <sup>2</sup> , ..., 2,000 <sup>2</sup> |
| ユーザの行動の予測精度 [%]              | 0, 20, ..., 100   |

は、交差点間の道路に 50 [m] 間隔で位置するものとした。また、シミュレーションにおける各パラメータは表 1 のように定めた。

#### 4.1 評価指標

本評価では以下の 3 つの性能指標を用いた。

- **AAAR-Count (Anonymous Area Achieving Ratio - Count)**

要求されたアノニマスエリアを、ダミー配置により実際に達成できた回数のサービス利用 (要求) の総数に対する割合を AAAR-Count と定義する。実際に確保できるアノニマスエリアの大きさは、要求されたアノニマスエリアの大きさよりも大きくなる場合も、小さくなる場合も存在する。AAAR-Count は、要求アノニマスエリアをどの程度の頻度で達成できたかを示しており、常時達成できた場合には 100% となる。

- **AAAR-Size (Anonymous Area Achieving Ratio - Size)**

要求されたアノニマスエリアに対する、ダミー配置により実際に達成できたアノニマスエリアの平均面積の割合を AAAR-Size と定義する。AAAR-Size の値が 100% よりも大きければ、平均的にユーザの要求以上にユーザ位置を曖昧化できたと見なすことができる。

- **MTC (Mean Time to Confusion)**

ある位置情報がユーザのものである確率を、ユーザ確率と呼ぶ。ここで、何らかの原因によりユーザ位置が特定されたとき、ユーザ確率は 1 となる。その後の、各々の位置情報のユーザ確率の遷移を以下の条件により求める。ある時点において、ユーザ確率が  $\alpha$  であるダミー (もしくはユーザ) とユーザ確率  $\beta$  のダミーが、次の時点で図 9(a) のようにお互いの移動可能範囲に入った場合、2 つのダミーは区別不可能となる。このとき、両ダミーのユーザ確率を  $\frac{\alpha+\beta}{2}$  と計算する。

このように求めた、各々のダミーのユーザ確率に、既存研究 [12] で提案されている MTC を適用し、ユーザの追跡可能性を評価する。MTC はダミーのユーザ確率  $p_i$  としたときのエントロピー  $H = -\sum p_i \log p_i$  が閾値を超えるまでの時間である。本論文では、閾値を 1 とし、ユーザ位置が



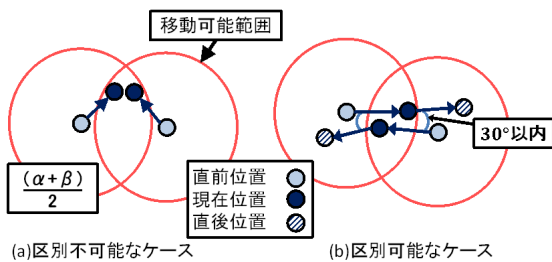


図 9 ユーザ確率の計算方法  
Fig. 9 Transition of probability of being the user.

サービスプロバイダに特定され、エントロピーが0になった時点から、エントロピーが1を超えるまでにかかる時間の平均をMTCとする。この指標は、ユーザ位置が特定されてから再び曖昧化させるまでの平均時間であるため、この値が小さければ追跡可能性が小さいということを表している。

ユーザ確率を計算する際、お互いの移動可能範囲に入った場合でも、図9(b)のように向かい合って交差（本論文では30°以内の交差）し、両者の進行方向が変化する場合は、ユーザ確率を低下させない。これは、ユーザが進入方向とは真逆に方向転換するのは不自然なため、両者の交差後の進行方向を容易に判別できてしまうからである。

#### 4.2 評価手法

本実験では、以下の3つの手法の性能を比較する。

##### (1) 比較手法

ユーザの行動を予測できない状況を想定した、先行研究の提案手法 [14], [15]。この手法では、アノニマスエリアを確保し、ユーザの動きの変化に対応させるため、ダミーをユーザの周りにグリッド状に配置し、移動させる。また、追跡可能性を低下させるため、適切なタイミングでユーザおよびダミーのグリッド内での相対位置を互いに交換し、交差を促す。この手法はユーザの行動を予測できると想定していないため、ダミーの生成はユーザの行動にリアルタイムに対応して行われる。そのため、ユーザが停止しながら移動する際に、ダミーも適宜自然に停止しながら移動することが難しくなり、不自然な場所で停止してしまう。したがって、視覚的にユーザを特定されてしまう可能性があるが、本評価ではその欠点は無視するものとする。

##### (2) 提案手法

予測したユーザの行動に基づいて、停止地点で停止しながら自然に移動するダミーを生成する提案手法。

##### (3) 提案手法 (AAAR-80)

80%以上のAAAR-Countを達成できるように設定アノニマスエリアを拡大した提案手法。準備実験を行った結果、提案手法が非常に低いAAAR-Countとなることがあった。これを防ぐには、提案手法の設定アノニマスエリアを実際にユーザが要求するアノニマスエリアよりも大きく設定す

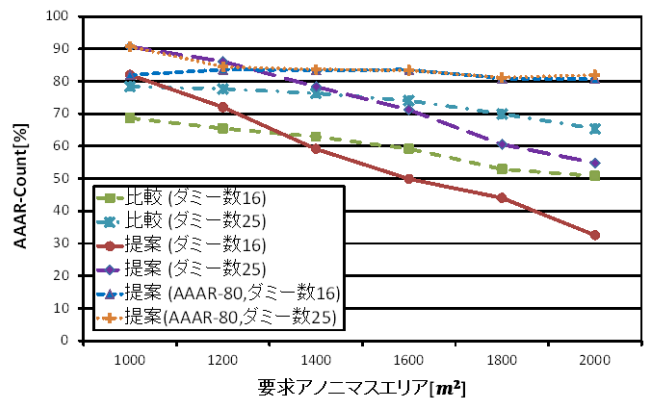


図 10 AAAR-Count  
Fig. 10 AAAR-Count.

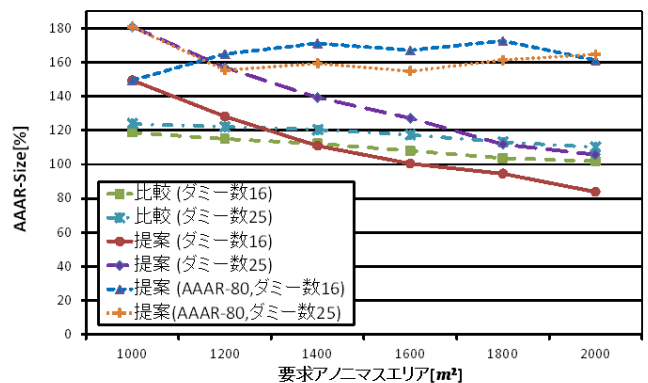


図 11 AAAR-Size  
Fig. 11 AAAR-Size.

る必要がある。この手法により、要求アノニマスエリアを十分に確保できる際の提案手法の有効性を確認する。

#### 4.3 実験結果

##### 4.3.1 AAAR

さまざまな要求アノニマスエリアに対する、AAAR-CountおよびAAAR-Sizeを調べた。その結果をそれぞれ図10、図11に示す。また、ユーザの行動の予測精度は100%とした。

要求アノニマスエリアが大きくなるに従い、提案手法、比較手法ともにAAAR-Count、AAAR-Sizeの値が小さくなっている。これは、両手法において、ユーザ、ダミー間で交差を発生させることで追跡可能性を低下させるため、ユーザやダミーとの距離が近くなり、アノニマスエリアが小さくなっていく傾向があることに起因する。そのため、要求アノニマスエリアが大きくなると、それを十分に満たすことがより困難になる。

ダミー数が16のとき、提案手法と比較手法を比較すると、要求アノニマスが小さい場合 (AAAR-Countでは、要求アノニマスエリアが1,200<sup>2</sup> [m<sup>2</sup>]以下、AAAR-Sizeでは、要求アノニマスエリアが1,400<sup>2</sup> [m<sup>2</sup>]以下)、提案手法は比較手法に比べ、AAAR-Count、AAAR-Sizeともに大きく

なっている。これは、比較手法は、つねに要求アノニマスエリアの大きさに合わせて、ダミーをユーザの周囲にグリッド状に配置させるため、要求アノニマスエリアが小さい場合は、道路の形状などの制約が大きく影響し、グリッド状のダミーの配置が崩れてしまい、アノニマスエリアの大きさを確保できない状況が多く発生するためである。それに対し、提案手法は、要求アノニマスエリアの大きさに合わせたグリッド領域内で、ユーザやダミーの数が少ない領域に基準地点を設定し、その地点にダミーを移動させるという動作を事前に決定する。そのため、道路などの制約の影響を受けないため、要求アノニマスエリアが小さい場合にはそれを確保できる。要求アノニマスエリアが大きい場合（AAAR-Count では、要求アノニマスエリアが約  $1,400^2$  [m<sup>2</sup>] 以上、AAAR-Size では、要求アノニマスエリアが約  $1,400^2$  [m<sup>2</sup>] 以上）、提案手法は、比較手法に比べ、AAAR-Count、AAAR-Size ともに値が小さくなる。これは、提案手法はアノニマスエリアを確保するための基準地点は1つであるのに対して、できる限り多くの停止地点を共有させることで、ユーザとダミーを積極的に交差させるためである。そのため、要求アノニマスエリアが大きい場合には、それに対応するのが難しくなる。

提案手法、比較手法ともに、ダミー数が16の場合と25の場合を比べると、すべての要求アノニマスエリアで、ダミー数が25の場合の方がAAAR-Count、AAAR-Sizeともに大きくなっている。提案手法では、その値の差の平均は、AAAR-Countでは16.6%、AAAR-Sizeでは24.8%となる。これは、ダミー数が多くなると、ダミーを広範囲に分散でき、アノニマスエリアが大きくなるからである。

提案手法において、各要求アノニマスエリアに対して、80%以上のAAAR-Countを達成するための、設定アノニマスエリアの大きさを調べた。その結果を表2に示す。図10、図11の提案手法(AAAR-80)は、表2に示す設定アノニマスエリアの値を用いた際の提案手法のAAAR-Count、AAAR-Sizeを示している。

ダミー数が16の場合、要求アノニマスエリアが  $1,000^2$  [m<sup>2</sup>] のときは、設定アノニマスエリアの大きさも  $1,000^2$  [m<sup>2</sup>] で80%のAAAR-Countを達成できるが、要求アノニマスエリアが大きくなるに従い、設定アノニマスエ

表2 AAAR-Count80%を達成する設定アノニマスエリア

Table 2 Anonymous area size as input to achieve 80% of AAAR-Count.

| 要求アノニマス<br>エリア [m <sup>2</sup> ] | 設定アノニマスエリア<br>(ダミー数16) [m <sup>2</sup> ] | 設定アノニマスエリア<br>(ダミー数25) [m <sup>2</sup> ] |
|----------------------------------|--|--|
| $1,000^2$                        | $1,000^2$                                | $1,000^2$                                |
| $1,200^2$                        | $1,500^2$                                | $1,200^2$                                |
| $1,400^2$                        | $2,000^2$                                | $1,600^2$                                |
| $1,600^2$                        | $2,300^2$                                | $1,900^2$                                |
| $1,800^2$                        | $3,800^2$                                | $2,800^2$                                |
| $2,000^2$                        | $6,200^2$                                | $4,500^2$                                |

リアの増加割合が大きくなる。たとえば、要求アノニマスエリアが  $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] のとき、80%のAAAR-Countを達成するために  $6,200^2$  [m<sup>2</sup>] の設定アノニマスエリアが必要になる。本実験では、歩行速度を  $1.3$  [m/s]、サービス利用間隔を  $180$  [s] としているため、サービス利用間隔の間、停止せずに移動し続けたとしても  $234$  [m] しか進むことができず、 $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] の要求アノニマスエリアをつねに満たし続けることは困難である。そのため、設定アノニマスエリアをかなり大きめに設定する必要がある。ダミー数が25の場合、要求アノニマスエリアが  $1,200^2$  [m<sup>2</sup>] 以上のとき、ダミー数が16の場合と比べて、80%のAAAR-Countを達成する設定アノニマスエリアの大きさは小さくなる。たとえば、要求アノニマスエリアが  $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] のときには、80%のAAAR-Countを達成する設定アノニマスエリアは  $4,500^2$  [m<sup>2</sup>] と、その差は  $1,700^2$  [m<sup>2</sup>] となる。これは、上述のように、ダミー数が増えると、ダミーを広範囲に分布できるため、アノニマスエリアの確保につながるからである。

表2に示す設定アノニマスエリアを用いた場合では、ダミー数が16と25ともに、80%のAAAR-Countを達成するだけでなく、AAAR-Sizeも、提案手法および比較手法に比べて、大きな値となる。

#### 4.3.2 MTC

ユーザの追跡可能性の評価を行うため、さまざまな要求アノニマスエリアにおいて、ユーザ確率が曖昧になるまでの時間MTCを調べた。その結果を図12に示す。また、ユーザの行動の予測精度は100%とした。

要求アノニマスエリアが小さい場合、提案手法、比較手法はともに、ユーザやダミー間の距離が近くなり、それぞれの移動可能範囲内に位置することが多く、MTCは小さくなる。一方、要求アノニマスエリアが大きくなると、ユーザやダミー間の距離が離れるため、MTCも大きくなる。

提案手法と比較手法を比較すると、提案手法は、ダミー数が16と25ともに、すべての要求アノニマスエリアにおいて、比較手法よりもMTCを低減できている。また、ダミー数が16のとき、要求アノニマスエリアが  $1,000^2$  [m<sup>2</sup>]

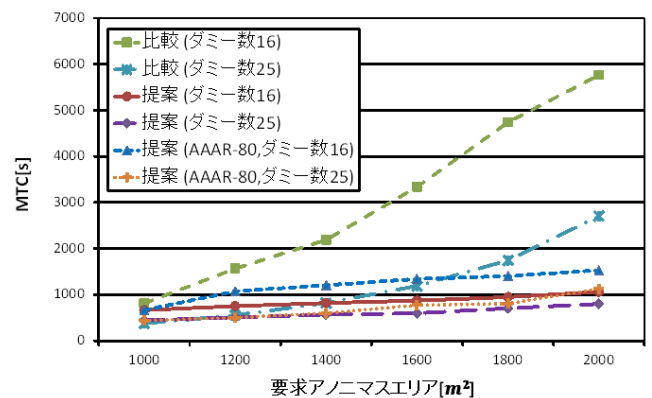


図12 MTC

Fig. 12 MTC.

の場合は、提案手法と比較手法の MTC の値の差は 148 [s] だが、 $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] の場合は、4,710 [s] となり、要求アノニマスエリアが大きくなるに従って、その値の差が大きくなる。これは、比較手法は、要求アノニマスエリアの大きさに合わせてユーザの周囲にグリッド状にダミーを配置し、ユーザの動きに合わせてダミーの動きが不自然にならないようなタイミングで無理なく交差を発生させているため、交差の機会が少ないことに起因する。一方、提案手法は、要求アノニマスエリアの大きさにかかわらず、積極的に停止地点を共有させることで、交差を発生させている。また、比較手法では、ダミーはつねにグリッドを保持しようとするため、ダミーとユーザはある程度同じような方向に対して移動を行うのに対し、提案手法は、ユーザやダミーがそれぞれの目的地を持って、各々の方向に移動する。そのため、提案手法では、停止地点を共有させる以外にも、ユーザやダミーが互いの移動可能範囲内に入る機会が多く、MTC のさらなる低減につながったと考えられる。

提案手法、比較手法ともに、ダミー数が 16 の場合と、25 の場合を比較すると、すべての要求アノニマスエリアで、ダミー数が 25 の場合の方が MTC が小さく、提案手法では、その値の差の平均は 251 [s] となる。これは、ダミー数が多くなると、ユーザやダミーが互いの移動可能範囲内に入る可能性が高くなり、また、提案手法では、ユーザと停止地点を共有するダミーが増え、ユーザの交差回数が増えるからである。

提案手法において、ダミー数 16 と 25 とともに、80% の AAAR-Count を達成する設定アノニマスエリアを用いても、すべての要求アノニマスエリアにおいて、提案手法 (AAAR-80) の MTC は比較手法よりも小さな値となる。特に、要求アノニマスエリアが  $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] の場合は、MTC の差はダミー数 16 で 4,240 [s]、ダミー数 25 で 1,905 [s] と非常に大きい。要求アノニマスエリアと設定アノニマスエリアが等しい提案手法と比較手法 (AAAR-80) を比べると、要求アノニマスエリアが大きい場合 (ダミー数 16 では  $1,200^2$  [m<sup>2</sup>] 以上、ダミー数 25 では  $1,400^2$  [m<sup>2</sup>] 以上) では、提案手法 (AAAR-80) の方が MTC が大きな値となるが、その差は小さい。具体的には、要求アノニマスエリアが  $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] と大きい場合でも、その差は、ダミー数 16 で 468 [s]、ダミー数 25 で 329 [s] と、比較手法との差と比べると小さい値になる。この結果より、80% の AAAR-Count を達成するために、提案手法の設定アノニマスエリアを拡大しても、MTC の増加分はそれほど小さくなく、追跡可能性を十分に低く保てることが分かる。

ダミー数が 16 の提案手法と、ダミー数が 25 の比較手法と比べると、要求アノニマスエリアが大きい場合 ( $1,600^2$  [m<sup>2</sup>] 以上) では、ダミー数が 16 の提案手法の方が、MTC が小さくなる。特に、要求アノニマスエリアが  $2,000^2$  [m<sup>2</sup>] の場合は、MTC の差は 1,644 [s] と非常に大きい。ダミー数

が増加すると、通信コストやサービスの利用コストが増加するため、提案手法はコストを抑えつつ MTC を低減できることが分かる。

#### 4.3.3 ユーザ行動の予測精度の影響

ユーザの行動の予測精度の変化による、提案手法の AAAR-Count、AAAR-Size および MTC の変化を調べた。AAAR-Count の結果を図 13、AAAR-Size を図 14、MTC を図 15 に示す。ここで、要求匿名領域は  $1,600^2$  [m<sup>2</sup>]、ダミー数は 16 とした。

この実験では、ユーザの行動を、停止地点、停止時間、停

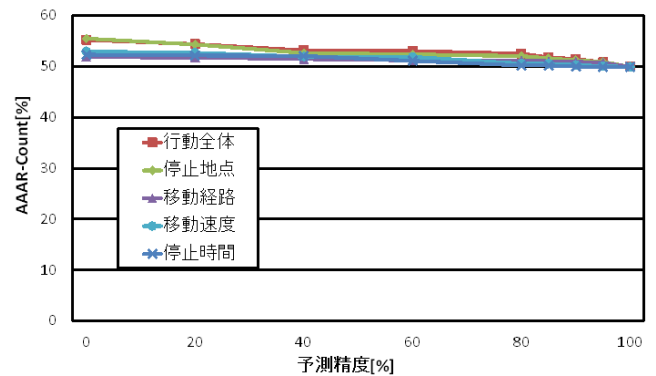


図 13 予測精度と AAAR-Count

Fig. 13 AAAR-Count with various prediction accuracy.

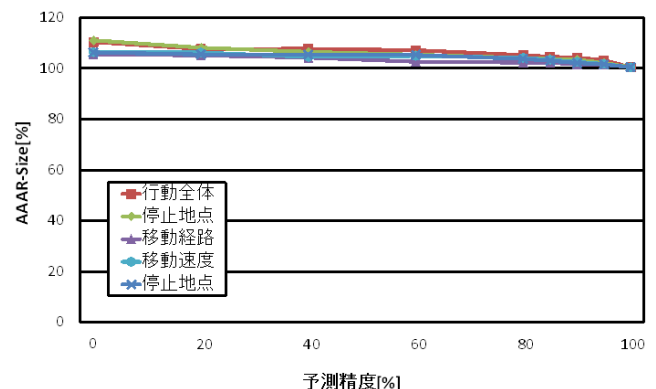


図 14 予測精度と AAAR-Size

Fig. 14 AAAR-Size with various prediction accuracy.

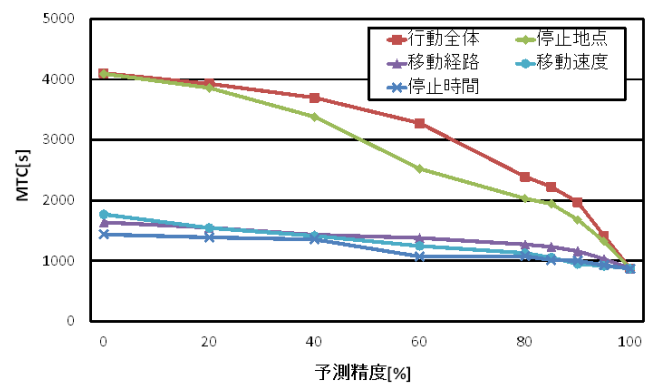


図 15 予測精度と MTC

Fig. 15 MTC with various prediction accuracy.

止地点間の移動速度、および、停止地点間の移動経路の4つを選択する行為から構成されるものと考え、それぞれについての予測精度を与えた。ここで、予測精度とは、ユーザの行動を事前に正確に予測できる確率であり、各停止地点において次の停止地点までの行動に対して判定される。たとえば、停止地点の予測精度がX[%]であるとき、次の停止地点が予測どおりである確率がX[%]となる。その結果、ユーザの総移動経路に含まれる停止地点の中で、約X%の停止地点が正しく予測され、約(100-X)%の停止地点が誤って予測されることになる。停止地点に対して誤った予測が行われる場合、現在の停止地点から、次の(予測に従わない)停止地点を経由して、その次の停止地点に到着するまでの距離の総和が、元の距離の総和より長くない範囲でランダムに、異なる停止地点が設定される。また、予測と異なる停止時間は、ユーザの最大停止時間と最小停止時間の間でランダムに設定され、予測と異なる移動速度は、平均歩行速度1.3[m/s]、速度分散 $0.2^2 [(m/s)^2]$ でランダムに設定される。予測と異なる移動経路は、次の停止地点への距離が、つねに短くなる範囲でランダムに設定される。さらに、ユーザの行動全体の予測精度(グラフでは「行動全体」と表記)として、これら4つ(停止地点、停止時間、停止地点間の移動速度、および、停止地点間の移動経路)のすべてに対して等しく予測精度を与えたものも評価した。つまり、ユーザの行動全体の予測精度がY[%]のとき、停止地点、停止時間、停止地点間の移動速度および停止地点間の移動経路の予測精度がそれぞれY[%]となる。

図13および図14より、予測精度が低下すると、すべての場合においてAAAR-CountおよびAAAR-Sizeが若干増加する。これは、予測されたユーザの行動を基にダミーの移動を決定しているため、ユーザの行動の予測精度が低下するに従い、ユーザがダミー群(ダミー群によって形成されるアノニマスエリア)から大きく外れて位置することが多くなるからである。つまり、ユーザのみの行動が乱れることで、むしろ、アノニマスエリアが大きくなるのが分かる。

図15より、予測精度が低下すると、すべての場合においてMTCが増加している。これは、予測されたユーザの行動を基にダミーの共有地点を決定しているため、ユーザの行動の予測精度が低下するに従い、ユーザが共有地点において、ダミーと交差する機会が少なくなるからである。さらに、上述のようにユーザがダミー群から大きく外れることがあるため、共有地点以外で、ユーザとダミーが互いの移動可能範囲に入る可能性が小さくなることも、MTCが増加する要因の1つであると考えられる。また、停止地点の予測精度が低下すると、停止時間、移動速度および移動経路の場合に比べて、MTCの増加分が大きくなる。これは、停止地点が予測から外れると、予定された共有地点にユーザが停止しないことがあることに加えて、上述のように

ユーザがダミー群から大きく外れてしまう可能性が高くなるからである。ここで、要求アノニマスエリア $1,600^2 [m^2]$ のときの比較手法のMTCは3,338[s]であり、比較手法よりも低い追跡可能性を実現するためには、停止地点の予測精度は最低限で60[%]は必要となる。一方、停止時間、移動速度および移動経路が予測と異なる場合は、停止地点は変更されず、停止地点到着時間が変更されるだけであるため、MTCの増加分はそれほど大きくない。以上の結果から、提案手法は、ユーザの停止時間、移動速度および移動経路の変化に対しては、ある程度、ロバストであるといえる。

## 5. おわりに

本論文では、位置情報サービス利用におけるユーザの位置プライバシー保護を目的として、停止をとまなうユーザの行動を考慮したダミーの生成手法を提案した。提案手法では、ユーザがいくつかの地点で停止しながら移動する際に、あらかじめ予測されたユーザの行動を参考に、ユーザと同様にいくつかの地点で停止しながら自然な移動を行うダミーの行動スケジュールを生成する。この際、ダミーをユーザや他のダミーの存在が少ない場所に移動させることでアノニマスエリアを確保する。さらにユーザや他のダミーの停止地点を共有させることにより、交差を発生させ、追跡可能性を低下させる。

評価実験の結果、提案手法は、先行研究[14]で提案した比較手法に比べ、ユーザのような自然な停止を行いつつ、追跡可能性を低減できていることを確認した。要求アノニマスエリアが $1,400^2 [m^2]$ 以上の場合には、その達成度は比較手法に比べて低くなってしまいが、システム内で設定アノニマスエリアを大きくすることによって改善できることを確認した。また、ダミー数を増やすことも要求アノニマスエリアの確保に有効であると確認した。

今後は、ユーザの要求するアノニマスエリアを確保するために、ユーザもしくはダミーの存在が少ない地点に停止地点を増やすなど、ダミーの行動を改善する予定である。また、実際に人の目でユーザとダミーの動きを見た際に、どの程度ユーザを曖昧化できているか、視認性の評価を行う予定である。さらに、ユーザの行動予測が外れてしまった場合でも、ユーザの行動に対応できるように提案手法を拡張することを検討している。

本論文では、ユーザが公共交通を利用するような移動モデルを想定していない。ユーザが徒歩で移動している中で、公共交通を使用した場合を考えると、ユーザを特定されないように、ダミーも公共交通を利用しながら移動を行うように生成しなければならない。公共交通を利用するダミーを生成する場合、公共交通の出発時刻や到着時刻などを考慮して、基準地点、共有地点および途中停止地点を決定するなど、提案手法を拡張しなければならない。たとえば、電車の時刻表の情報を用いて、ダミーがある駅に停止

し、電車の出発時間になると、次の駅に向けて動き出し、到着時間に次の駅に到着するように移動を決定する必要がある。また、公共交通の利用中は、徒歩で移動中に比べて、追跡可能性を低下するという観点からは、有効な交差のタイミングが大きく制限される。たとえば、ユーザが電車で移動中の場合、ダミーがユーザと同一の沿線を使用して交差をしようとしても、出発駅、出発時間、到着駅、到着時間から、ユーザおよびダミーの移動経路が容易に区別される場合が多いものと考えられる。このような交差は、追跡可能性の低下の観点からは、有効な交差であるとはいえない。そこで、提案手法において共有地点を決定する際に、出発駅を同時刻に共有することなどで交差を発生させる必要がある。出発駅を共有することで、電車の利用後、ユーザとダミーのそれぞれが降りた駅を判別できなくなり、その後の移動軌跡の特定が困難になる。

**謝辞** 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究(24650038)の助成およびマイクロソフトリサーチアジアの研究助成(CORE 9)によるものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] Gruteser, M. and Grunwald, D.: Anonymous Usage of Location-Based Services through Spatial and Temporal Cloaking, *Proc. ISENIX MobiSys* (2003).
- [2] Duckham, M. and Kulik, L.: Simulation of Obfuscation and Negotiation for Location Privacy, *Proc. CONSID*, pp.31-48 (2005).
- [3] Gedik, B. and Liu, L.: Location Privacy in Mobile Systems: A Personalized Anonymization Model, *Proc. ICDCS*, pp.620-629 (2005).
- [4] Kido, H., Yanagisawa, Y. and Satoh, T.: An Anonymous Communication Technique using Dummies for Location-based Service, *Proc. IEEE Int'l Conf. on Pervasive Service*, pp.88-97 (2005).
- [5] Ardagna, C.A., Cremonini, M., Damiani, E., di Vimercati, S.D.C. and Samarati, P.: Location Privacy Protection through Obfuscation-Based Techniques, *Proc. DBSec*, pp.88-97 (2005).
- [6] Cheng, R., Zhang, Y., Bertono, E. and Prabhakar, S.: Preserving User Location Privacy in Mobile Data Management Infrastructures, *Proc. PET*, pp.393-412 (2006).
- [7] Chow, C.Y., Mokbel, M.F. and Liu, X.: A Peer-to-Peer Spatial Cloaking Algorithm for Anonymous Location-Based Services, *Proc. GIS*, pp.171-178 (2006).
- [8] Yanagisawa, Y., Kido, H. and Satoh, T.: Location Traceability of Users in Location-Based Services, *Proc. Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems Workshops (MobiQuitous 2006)* (2006).
- [9] Lu, H., Jensen, C.S. and Yiu, M.L.: PAD: Privacy-Area Aware, Dummy-Based Location Privacy in Mobile Services, *Proc. MobiDE*, pp.47-60 (2007).
- [10] MobiREAL web page, available from (<http://www.mobireal.net>).
- [11] Yiu, M., Jensen, C., Huang, X. and Liu, H.: Spacetwist: Managing the Trade-Offs Among Location Privacy, Query Performance, and Query Accuracy in Mobile Services, *Proc. Int'l Conf. on Data Engineering (ICDE 2008)*, pp.366-357 (2008).

- [12] Shokri, R., Freudiger, J., Jadhwal, M. and Hubaux, J.P.: A Distortion-Based Metric for Location Privacy, *Proc. WPES*, p.6 (2009).
- [13] Masanori, M. and Yoshiharu, I.: Anonymizing User Location and Profile Information for Privacy-aware Mobile Services, *Proc. GIS-LBSN*, pp.69-75 (2010).
- [14] Suzuki, A., Iwata, M., Takahiro, H., Xie, X. and Nishio, S.: A User Location Anonymization Method for Location Based Services in a Real Environment, *Proc. GIS*, pp.398-401 (2010).
- [15] 鈴木晃祥, 岩田麻佑, 荒瀬由紀, 原 隆浩, Xing Xie, 西尾章治郎: ダミーを用いた位置曖昧化手法の評価, *Proc. DPSWS*, pp.194-199 (2011).
- [16] Chen, L., Lv, M., Ye, Q., Chen, G. and Woodward, J.: A Personal Route Prediction System Based on Trajectory Data Mining, *Information Sciences: An International Journal*, Vol.181, No.7, pp.1264-1284 (2011).

#### 推薦文

本論文では、ユーザ位置情報を利用した位置情報サービスにおいて、ユーザの住所などの個人情報の露見を防ぐことを目的として、ユーザの移動時にダミーの位置情報を生成するユーザ位置曖昧化手法を提案している。現在広く普及している位置情報サービスに関わる重大な問題を扱っており、実用化が大きく期待される技術である。以上より本論文は推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 勝本道哲)



加藤 諒 (学生会員)

2013年大阪大学工学部電子情報工学科卒業。現在、同大学大学院情報科学研究科博士前期課程在学中。ユーザの位置プライバシー保護に関する研究に興味を持つ。



岩田 麻佑

2009年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2013年同大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。Web情報システムおよび検索技術に興味を持つ。



原 隆浩 (正会員)

1995年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同博士後期課程中退後、同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手。2002年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手。2004年同准教授となり、現在に至る。工学博士。データベースシステム、モバイルネットワーク、分散処理の研究に従事。1996年情報処理学会山下記念研究賞受賞。2000年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003年情報処理学会研究開発奨励賞受賞。2008年、2009年情報処理学会論文賞受賞。日本データベース学会、電子情報通信学会、IEEE、ACMの各会員。



シェ シン

1996年中国科学技術大学計算機科学技術学院卒業。2001年同大学大学院計算機科学技術系博士系後期課程修了。工学博士。同年マイクロソフトアジア研究所に入社し、空間データマイニング、位置情報サービス、ソーシャルネットワーク、ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。現在はMicrosoft Research Asiaのリードリサーチャおよび中国科学技術大学のゲストPh.D.アドバイザーを務める。2009年SIGSPATIAL中国支部設立。Ubicomp and Pervasive Conference Seriesの運営委員を務める。ACM、IEEE、China Computer Federation (CCF)の各会員。



鈴木 晃祥

2012年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。ユーザの位置プライバシー保護に関する研究に興味を持つ。



西尾 章治郎 (フェロー)

1975年京都大学工学部数理工学科卒業。1980年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手、大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授を経て、1992年大阪大学工学部教授、2002年大学院情報科学研究科教授となり、現在に至る。その間、大阪大学サイバーメディアセンター長、大学院情報科学研究科長、理事・副学長を歴任。データベースシステムにおけるデータおよび知識管理に関する研究に従事し、紫綬褒章、立石賞功績賞等を授与される。日本学術会議会員。本会では理事を歴任し、論文賞、功績賞を受賞。IEEE、電子情報通信学会フェロー。



荒瀬 由紀 (正会員)

2006年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了、2010年同博士後期課程修了。情報科学博士。同年Microsoft Research Asiaに入社し、Natural Language Computingグループ研究員となる。言い換え表現抽出、統計的機械翻訳、ウェブデータマイニングに関する研究に従事。ACL、日本データベース学会の各会員。