停止を伴うユーザの移動経路を考慮したダミーによる位置曖昧化手法

加藤 諒[1]　岩田 麻佑[2]　原 隆浩[2]　鈴木 晃祥[2]　荒瀬 由紀[3]　Xing Xie[3]　西尾 章治郎[2]

概要：GPS 技術の発展に伴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．そこで本稿では，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．

1. 序論

GPS 技術の発展に伴い，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) の保護を目的とした既存研究は多数行われている [1][2][3][4]．その一つとして，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 [4]．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，直前の問い合わ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 [7][8]．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ったり，休憩地点で休憩するなど，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．例えば，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，ダミーは停止することができなくなってしまう．

そこで本稿では，ユーザがいくつかの地点で停止しなが

[1] 大阪大学 工学部電子情報工学科
Division of Electronic and Information Engineering, School of Engeneering, Osaka University
[2] 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
[3] マイクロソフトリサーチアジア
Microsoft Research Asia

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応して行われていた．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．このような想定では，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．この予測の精度が低い場合の対応については，今後の課題と考え，本稿では対象としない．

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 章で本稿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．

Gedik らは，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を提案している [2]．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．

Duckham らは，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を提案している [1]．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，特に近隣に適当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．

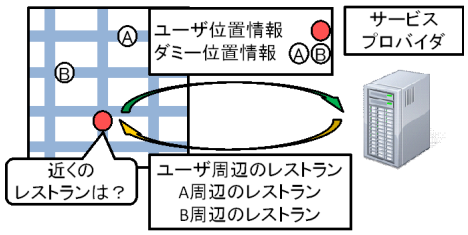

図 1 ダミーを用いた位置情報サービスの利用例

Lu らは，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負荷して**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を提案している [4]．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一つ一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．しかし，この手法において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得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．

これらの実環境における制約を考慮し，筆者らは先行研究において，ユーザの周囲にダミーをグリッド状に配置する手法を提案した [7][8]．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制約について述べた後，それらの制約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制約条件

ダミーを用いた位置曖昧化手法では，考慮すべき制約がいくつかある．以下では，各制約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

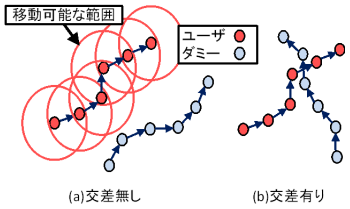

図 2 追跡可能性

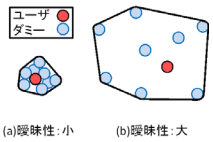

図 3 アノニマスエリア

ダミーとの位置関係を考慮する必要がある．例えば，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ある場合，その位置情報はユーザで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し，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一旦特定された時，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．例えば，**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，ユーザ位置を一旦特定できると，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，ユーザとダミー経路が定期的に図 2(b) のように交差する方法が有効と考えられる．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．

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．例えば，**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，ユーザに対応する位置情報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く，ユーザの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が予測可能になってしまう．

そこで本稿では，Lu ら [4] 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．例えば，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，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において，連続的に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，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．例えば，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をしながら向かうというような状況である．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，停止しても不自然ではない位置を全て把握しているものとする．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 秒までの間でランダムな長さの時間停止し，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，ユーザが要求したダミーの個数，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，以下の手順で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）を決定し，それらの地点で停止しながら，自然に移動するダミーの行動を生成する．

(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行動の決定

(1) ～ (3) の手順を要求されたダミー数だけ繰り返し，全てのダミーの行動を決定する．初めのダミーはユーザの行動のみを考慮してダミーの行動を決定し，2 番目以降のダミーはユーザと生成済みのダミーの移動を考慮して，新しいダミーの行動を決定する．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，ダミーの通るべき地点，時間を求める．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ダミーが存在するように全体の移動経路を決定する．具体的には，以下の手順で基準地点および基準地点到着時間を決定する．

(1) グリッド領域の生成：ユーザの総移動時間を一定時

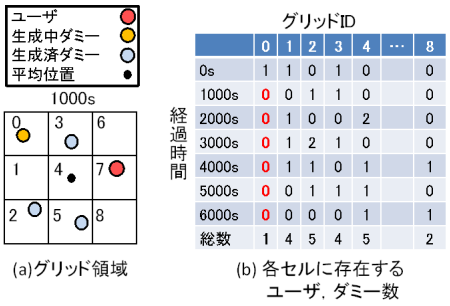

図 4 グリッド領域の利用

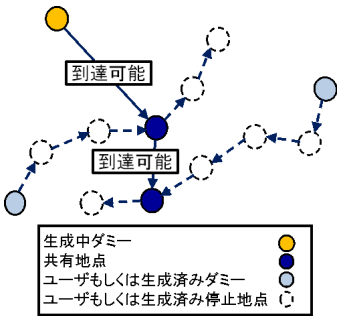

図 5 停止地点の共有

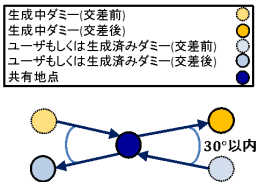

図 6 追跡可能性が低下しない交差

間ごとに区切り，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．

(2) 各グリッドに存在するユーザ，ダミー数のカウント：各時間において，ユーザおよび生成済みダミーがどのグリッド領域内の各セルにどれだけ存在するのかを算出する．

(3) 基準地点の決定：連続的にユーザや他のダミーが最も少ない時間およびセルを算出する．

(4) 基準地点到着時間の決定

手順 (1) では，グリッド領域を**図 4**(a) のように，3×3 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，一辺の長さを $\sqrt{S}$ 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 (2) において，図 4(b) の表のように，配置したグリッド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．そして，手順 (3) において，総移動時間で各セルに存在するユーザおよび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 (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．例えば，図 4 の例では，グリッド領域を一定時間 (1000 秒) ごとに作成し，各グリッド ID のセルごとにユーザおよび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 1000 秒から 5000 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，基準地点はグリッド ID が 0 の領域内と設定し，1000 秒を基準地点到着時間と設定する．

こうして決定した基準地点に基準地点到着時間にはダミーを到着させ，停止させるという行動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

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，さらに，追跡可能性を低下させるため，ユーザや生成済みのダミーと停止地点を共有することで，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．具体的には，以下の手順で共有地点および共有地点到着時間を決定する．

(1) 共有可能な停止地点のチェック

(2) 共有地点，共有地点到着時間の決定

手順 (1) では，**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，ユーザや生成済みのダミーの停止地点がないかを調べる．手順 (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の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，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，生成中のダミーの共有地点，共有地点到着時間を順次増やしていく．(1) および (2) の手順を共有可能な地点がなくなるまで繰り返し，できるだけ多くの共有地点を確保する．

この際，ユーザおよび全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，ユーザや生成済みのダミーと，生成中の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ため，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 に示すような場合は共有地点を設定しないこととする．

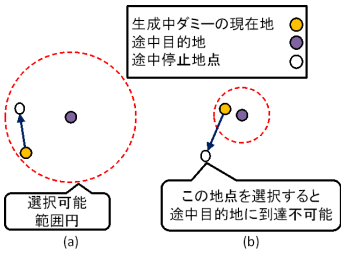

図 7 選択可能範囲円を用いた移動経路の決定

3.2.3 基準地点および共有地点を通るダミーの行動の決定

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全て結ぶだけでは，生成中のダミーが不自然な行動をとる可能性がある．例えば，共有地点同士が近く，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 を越えて，ユーザが止まり得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停止地点を経由するダミーの経路を生成する．具体的には，以下の手順により，全ての基準地点および共有地点を経由するようにダミーの行動を決定する．

(1) 初期位置の決定：基準地点到着時間および共有地点到着時間の中で，最も早い時間に到着すべき地点に到着できるように初期位置を決定する．

(2) 各基準地点，共有地点までの行動の決定：移動可能性を考慮し，基準地点や共有地点間に途中停止地点を適宜設定する．

(3) ユーザの移動時間が終了するまで停止地点を決定

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．

まず，手順 (1) では，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 (2) で図 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指定し，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付ける．そして，図 7(b) のように選択可能範囲円が小さくなり，他の途中停止地点を選択してしまうと到着時間に途中目的地に到達できない場合，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決定し，それらを結ぶ経路を作成する．

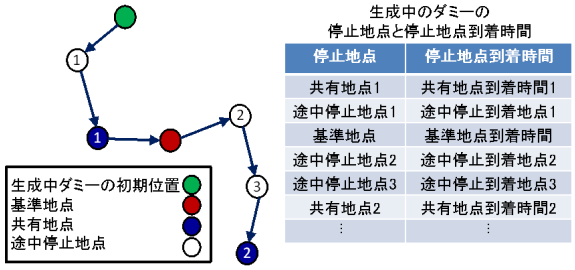

図 8 最終的に決定されるダミーの行動

表 1 パラメータ

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^2]	15200^2
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^2]	$1000^2, 1200^2, \cdots, 2000^2$

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 (2) を繰り返すことで基準地点と共有地点の全てを経由して移動するダミーの行動を生成する．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) で，ユーザの移動時間が終了するまで，手順 (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行動の例を**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[5] 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

本評価では以下の三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，実際のダミー配置により達成できた回数の割合を 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

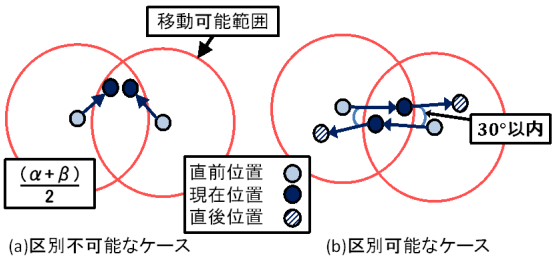

図 9 ユーザ確率の計算方法

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，実際のダミー配置により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時，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 α であるダミーとユーザ確率 β 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，二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 [6] 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 $H = -\sum p_i \log p_i$ が閾値を越えるまでの時間である．本稿では，閾値を 1 とし，ユーザ位置が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．

また，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 (本稿では 30° 以内の交差) し，両者の進行方向が変化する場合は，ユーザ確立を低下させない．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，以下の三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 [7][8] の提案手法．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ことがあると考えられるが，本研究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方法．

(3) 提案手法 (AAAR-80)

80%以上の AAAR-Count を達成できるよう設定アノニマスエリアを拡大した提案手法．提案手法では，できる限り多くの共有地点を設定し，積極的に交差をさせるため，要求されたアノニマスエリアよりも狭い範囲内にユーザやダミーが固まってしまい，一時的にアノニマスエリアが要求アノニマスエリアよりも小さくなってしまうことがある．ここで，AAAR-Count および AAAR-Size 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ることで改善可能である．この手法では，80%以上の AAAR-Count を達成するように設定アノニマスエリアを拡大させ，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

以下に，評価実験の結果を示す．

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．

要求アノニマスエリアが大きくなるに従い，提案手法，比較手法共に 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しまう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

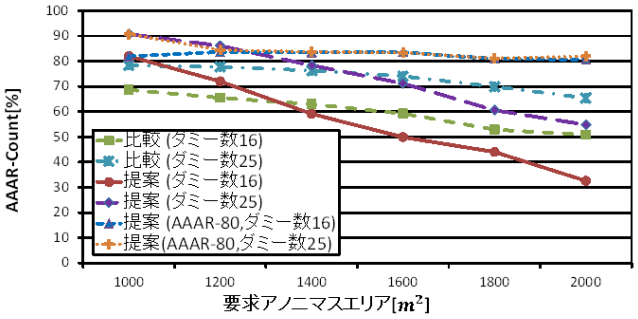

図 10 AAAR-Count

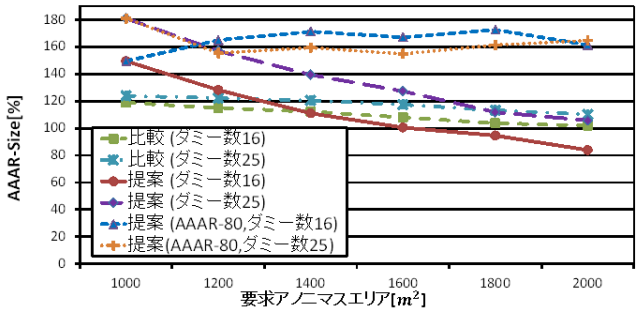

図 11 AAAR-Size

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 1200^2[m^2] 以下，AAAR-Size では，要求アノニマスエリアが 1400^2[m^2] 以下)，提案手法は比較手法に比べ，AAAR-Count，AAAR-Size 共に大きくなっている．これは，比較手法は，常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 1400^2[m^2] 以上，AAAR-Size では，要求アノニマスエリアが約 1400^2[m^2] 以上)，提案手法は，比較手法に比べ，AAAR-Count，AAAR-Size 共に値が小さくなる．これは，提案手法は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，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からである．

提案手法，比較手法共に，ダミー数が 16 の場合と 25 の場合を比べると，全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 共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．

表 2 AAAR-Count80%を達成する設定アノニマスエリア

要求アノニマスエリア [m^2]	設定アノニマスエリア (ダミー数 16)[m^2]	設定アノニマスエリア (ダミー数 25)[m^2]
1000^2	1000^2	1000^2
1200^2	1500^2	1200^2
1400^2	2000^2	1600^2
1600^2	2300^2	1900^2
1800^2	3800^2	2800^2
2000^2	6200^2	4500^2

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 1000^2[m^2] のときは，設定アノニマスエリアの大きさも 1000^2[m^2] 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，設定アノニマスエリアの増加割合が大きくなる．例えば，要求アノニマスエリアが 2000^2[m^2] のとき，80%の AAAR-Count を達成するために 6200^2[m^2] 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，2000^2[m^2] の要求アノニマスエリアを常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 の場合は，要求アノニマスエリアが 1200^2[m^2] 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．例えば，要求アノニマスエリアが 2000^2[m^2] 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 4500^2[m^2] と，その差は 1700^2[m^2] 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繋がるからである．

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 の場合共に，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．

要求アノニマエリアが小さい場合，提案手法，比較手法は共に，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

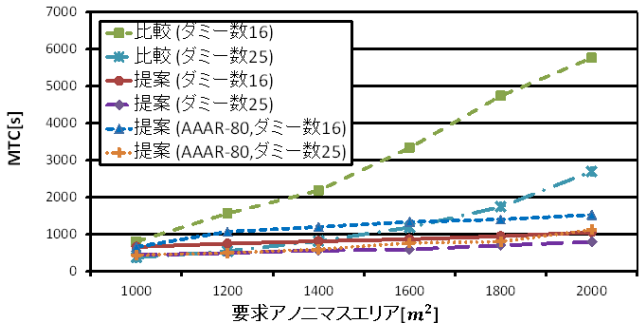

図 12 MTC

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 の場合共に，全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 $1000^2[m^2]$ の場合は，提案手法と比較手法の MTC の値の差は 148[s] だが，$2000^2[m^2]$ の場合は，4710[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関わらず，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，ダミーは常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 の更なる低減に繋がったと考えられる．

提案手法，比較手法共に，ダミー数が 16 の場合と，25 の場合を比較すると，全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 共に，80%の AAAR-Count を達成する設定アノニマスエリアを用いても，全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 $2000^2[m^2]$ の場合は，MTC の差はダミー数 16 で 4240[s]，ダミー数 25 で 1905[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提案手法 (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 $1200^2[m^2]$ 以上，ダミー数 25 では $1400^2[m^2]$ 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 $2000^2[m^2]$ 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大きくなく，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 ($1600^2[m^2]$ 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 $2000^2[m^2]$ の場合は，MTC の差は 1644[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．

5. まとめ

本稿では，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保護を目的として，停止を伴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を生成する．ダミーの行動を生成する際には，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 [7] 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 $1400^2[m^2]$ 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うが，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，より現実的な状況に適用可能なように，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．

謝辞 本研究の一部は，マイクロソフトリサーチアジアの研究助成によるものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

[1] M. Duckham and L. Kulik: Simulation of Obfuscation and Negotiation for Location Privacy, *In Proc. CONSIT*, pp. 31–48, 2005.

[2] B. Gedik and L. Liu: LocationPrivacy in Mobile Systems: A Personalized Anonymization Model, *In Proc. ICDCS*, pp. 620–629, 2005.

[3] H. Kido, Y. Yanagisawa, and T. Satoh: An Anonymous Communication Technique using Dummies for Location-based Service, *In Proc. IEEE Int'l Conf' on Pervasive Service*, pp. 88–97, 2005.

[4] H. Lu, C. S. Jensen, and M. L. Yiu: PAD : Privacy-Area Aware, Dummy-Based Location Privacy in Mobile Services, *In Proc. MobiDE*, pp. 16–23, 2008.

[5] MobiREAL web page. *http://www.mobireal.net*.

[6] R. Shokri, J. Freudiger, M. Jadliwala, and J. P. Hubaux: A Distortion-Based Metric for Location Privacy, *In Proc. WPES*, p. 6, 2009.

[7] A. Suzuki, M. Iwata, Takahiro. H, X. Xie, and S. Nishio: LocationPrivacy in Mobile Systems: A User Location Anonymization Method for Location based Services in a Real Environment, *In Proc. GIS*, pp. 308–401, 2010.

[8] 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, *In Proc. DPSWS*, pp. 194–199, 2011.