ダミーを用いた位置曖昧化手法の評価

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

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．しかし，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，この情報をもとに住所などの個人情報が露見してしまう可能性がある．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，実環境を考慮したダミーを用いたユーザ位置曖昧化手法を提案した．この手法では，実環境における利用を想定して様々な制約条件を設け，それに従いダミーの位置情報を複数生成し，ユーザの位置情報と一緒に送信することにより，ユーザのプライバシを保護する手法である．本稿では，この手法の評価を機械的観点，視認的観点の二つの観点から詳細に行う．

Evaluations of a Dummy-based User Location Annonimization Method

Akiyoshi SUZUKI ,[†1] Mayu IWATA ,[†1]
Yuki ARASE ,[†2] Takahiro HARA ,[†1] Xing XIE [†2]
and Shojiro Nishio [†1]

Because of the advance of GPS (Grobal 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 anonymization method. This method protects user's location privacy by generating dummies considering some restrictions in a real environment, and sending the information with the user's location information. In this paper, we evaluate our proposed method in detail by both computational and observational evaluations.

†1 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
†2 マイクロソフトリサーチアジア
Microsoft Research Asia

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，ユーザが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の保護を目的とした既存研究は多数行われている．その一つとして，ダミーの位置情報を利用したユーザ位置曖昧化手法[5] がある．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．これにより，送信された位置情報のうち，ユーザ位置を一意に特定することが困難になり，ユーザ位置の曖昧化が可能になる．しかし，このようなユーザ位置曖昧化手法では，ユーザが頻繁に位置情報サービスを利用する場合，問合せの時間間隔が短いため，前後の問合せ間で移動不可能な位置関係にある位置情報はダミーであるといった推測が可能になる．

このような推測に対応するために，筆者らは先行研究において，実環境における制約を考慮したダミー生成手法[8] を提案した．提案手法では，PAD 手法を踏襲しダミーをグリッド状に配置することで，十分な位置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して，各サービス利用間隔で移動可能な範囲を決定し，ダミーの移動がユーザとして不自然にならないようにする．

提案手法ではさらに，追跡可能性という観点にも着目した．追跡可能性とは，ある時点でユーザの位置が特定した場合に，位置情報の履歴を遡ったり，逆にその後のユーザの位置情報を追跡したりできてしまう性質である．提案手法では，ダミーとユーザを定期的に交差させることで，追跡可能性を低下させた．

本稿では，この提案手法を機械的観点，視認的観点から評価した．機械的評価では，ユーザとダミーが要求された程度にまばらに生成されているか，ダミーとユーザの相対位置に偏りがないかという点，および，ユーザの追跡可能性を評価した．視認性評価では，被験者がどの程度ユーザを識別することが可能であるかを評価した．

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 章でダミーを用いた位置曖昧化手法について述べる．4 章で機械的評価の結果，5 章で視認性評価の結果を示し，最後に 6 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

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の中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

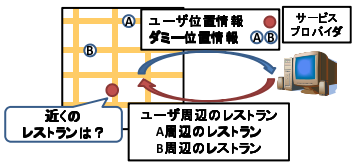

図 1 ダミーを用いた位置情報サービスの利用例

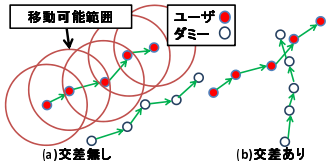

図 2 ユーザ追跡可能性

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．

また，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を提案している[5]．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道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た．そこで，筆者らは実環境を考慮したダミーの配置[8]を提案している．なお，本研究では GPS により，限りなく正確なユーザ位置情報を取得できるような環境を想定している．

3. 実環境におけるユーザの追跡可能性を考慮したダミー生成手法

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，それらを考慮したダミー生成手法[8]について説明する．

3.1 実環境における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．

- **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．例えば，あるユーザが一度サービス要求してから，3 分後に新しくサービス要求した場合を考える．この際，3 分後のクエリ中に，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はないと容易に推測できてしまう．

そこで，本手法では，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，直前のダミーの位置から移動可能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，その軌跡を推測出来てしまう性質を指し，これにより，ある特定の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．このような推測を防ぐためには，ユーザとダミーの経路が定期的に**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，各ダミーが次に移動する目的地をユーザ付近に設定することで，ダミーをユーザの位置付近に分布させ，その目的地をダミー同士で交換することで，ユーザとダミーとの交差を発生させる．

- **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[5]の定義に基づき，ユーザとすべてのダミーを包含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．Lu の提案手法では，ユーザの要求に応じて，ダミーをユーザの周りにグリッド状に配置することによって，ユーザの要求するアノニマスエリアを満たすように設定しているが，移動可能性や実際の地図との対応は考慮されていない．

提案手法では，アノニマスエリアの大きさに合わせて，ダミーの目的地をグリッド状に決定する．これにより，道路の情報を考慮した上で，ユーザの要求するプライバシを満たすようにダミーの位置を設定する．

3.2 ダミー制御の手順

3.2.1 ダミーの初期位置の設定

サービス利用開始時，ダミーはユーザの周囲に**図 4** のようにグリッド状に配置する．この時，ダミーの配置がユーザの設定する要求アノニマスエリア S をみたすためには，ユーザとダミーによって形成される正方形の一辺の長さが $\sqrt{S}$ となればよいので，ダミー数が N の場合のグリッドのセルの大きさ L を式 (1) によって決定する．

$$L = \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{N}-1} \tag{1}$$

そして各セルにインデックス番号を設定し，ダミーとユーザにランダムに割り当てること

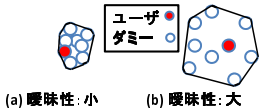

図 3　アノニマスエリア

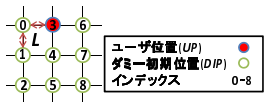

図 4　ダミー初期位置

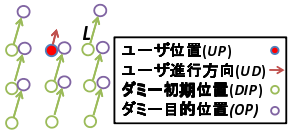

図 5　ダミーの目的地

で，図 5 のようなグリッド状に配置する．このとき，ユーザのセルのインデックスもランダムに割り当てることで，ユーザとダミーの初期位置が常に固定される事を防ぐ．次にダミーに割り当てられたセルのインデックスに基づき，ダミーの初期位置の座標を設定する．

ユーザ位置を UP(User Position)，ユーザに割り振られた配置番号を $UPID$(User Position ID)，各ダミーに割り振られた配置番号を $DPID$(Dummy Position ID) としたとき，各ダミーの初期位置 DIP_i(Dummy Initial Possition) は，ユーザとの相対位置から，式 (2)，(3) で与えられる．

$$DIP_i(x) = UP(x) + (DPID_i/\sqrt{N} - UPID/\sqrt{N}) \cdot L \quad (2)$$

$$DIP_i(y) = UP(y) + (DPID_i \ mod \ \sqrt{N} - UPID \ mod \ \sqrt{N})) \cdot L \quad (3)$$

例えば，**図 4** でユーザ配置番号 $UPID = 3$，ダミーの配置番号 $DPID = 7$，ダミー数 $N = 9$ の場合は，ダミーはユーザ位置から x 方向に L，y 方向に L だけシフトした位置を初期位置として設定する．ただし，実際には，ダミー初期位置 DIP_i が地図上で道の上にはない可能性があるので，最終的なダミーの初期位置は，DIP_i に一番近い交差点とし，これによりダミーが確実に道上に生成されるようにする．

3.2.2　２回目以降のダミー位置の計算

２回目以降のダミーの位置は，直前のサービス要求時の位置から各ダミーで設定する目的地までの最短経路をユーザの歩行速度で歩いた場合に到達可能な位置を求めることによって決定する．

この際，道の制限上目的地に辿りつけないダミーがいる一方で，目的地に辿りついて時間的に余裕のあるユーザはそれ以上移動するのをやめてしまう．このような条件でダミーの移動を続けると徐々に多くのダミーがユーザの動きについていけなくなり，ユーザがダミーを位置的に先導する原因になってしまい，それがユーザを特定するためのヒントになってしまう可能性がある．

そのような状況を防ぐために，各ダミーの目的地 OP(Objective Point) は**図 4** のように，DIP で求めたユーザを基準とした位置よりもユーザの進行方向に L シフトした位置に設定することで，配置的に余裕のあるダミーがユーザを基準とした DIP 時格子点よりユーザの進行方向に進んだ位置に移動できるようにする．OP は具体的には次の式 (4)，(5) で与えられる．

$$OP_i(x) = DIP(x) + UD(x) \cdot L \quad (4)$$

$$OP_i(y) = DIP(y) + UD(y) \cdot L \quad (5)$$

3.2.3　ダミーの目的地交換

3.2.2 節で述べたようにダミーの移動を行うだけでは，ユーザの追跡可能性について十分に考慮できていないため，提案手法では，ダミーの移動を制御する際，適切なタイミングで，目的地を交換することにより，ユーザとダミー間，ダミー同士の交差を促し，追跡可能性をさらに低下させる．目的地を交換すると，ダミーがユーザの移動方向と同じ方向に移動しづらくなり，その結果，ユーザが先導するような形になる可能性があるため，目的地交換はユーザがダミーの方向に移動しているタイミングで行うものとする．

目的地交換は，各ダミーの配置番号を交換することにより実行するが，この際ユーザとダミーの位置関係を考慮せずに，配置番号を決定してしまうと，ユーザの進行方向との関係から，ダミーが自身の目的地にたどり着けず，グリッドの形が崩れてしまう可能性がある．例えば，**図 6** において配置番号を 0 から 2 に変更されたダミーはユーザの動きと反対方向に移動するだけなので，簡単に配置位置に移動できる．一方，配置番号を 2 から 0 に変更されたダミーはユーザの進行方向と同じ方向に移動しながら，ユーザの進行方向にある目的地に向かうので，ユーザと同じ速度分布で移動していると，簡単には自身の配置位置に到達できない．結果として，配置番号 2 に元々いたダミーは目的地に近付くことができず，配置番号 0 にいたダミーが配置番号 2 の場所に移動するだけになってしまう．このような目的地交換を繰り返すと，ユーザの進行方向に対して，ユーザよりも前を先行するダミーの数が少なくなるので，ユーザにダミーが追従する形になる一つの原因になってしまう．また，グリッドの形が崩れるので要求アノニマスエリアの確保も困難になる．

そこで，提案手法では，目的地交換後の配置位置の変化が大きくならないように，ユーザとダミーの配置に適した配置番号を割り振ることにより目的地交換を実行する．本研究では，ダミーの動きを道路上に制限しているため，ダミーの位置は理想的なグリッド状にはならず，**図 7** のように崩れた形になる．この状態でユーザ位置を基準にしたグリットの各格子点に対して，最も近いダミーに各配置番号を割ると，配置番号の組合せが目的地交換前の組合せから変化する．これにより，前の配置からの変化を小さく抑えたまま目的地交換することが可能になる．以下に配置番号決定の手順を示す．

(1) ユーザ配置番号の決定

ユーザの配置番号 $UPID$(User Position ID) は，その時点でのダミーの配置を考慮して適切なものを選択しなければならない．そこで，$UPID$ は，直前のサービス要求時のユーザ位置 UP とダミー平均位置 AP との相対位置を元に決定する．ダミー平均位置が中心となるように，区画長を参照した格子状の枠をあてはめ，ユーザがその格子のどこの領域にいるかによって $UPID$ を決定する．例えば，**図 8**(a) の場合，$UPID = 2$ となる．

(2) ダミー配置番号の決定

ユーザに割り振られた配置番号以外のすべての配置番号について，ユーザとの相対位置から DIP と同じ計算で配置位置を求める．**図 8**(b) のようにその配置位置に一番近いダミーを，その配置番号と対応づけることによって，各ダミーの配置番号を決定する．

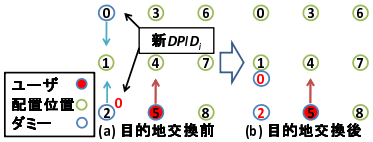

図 6　ランダムな目的地交換

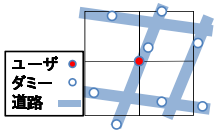

図 7　道による配置の歪み

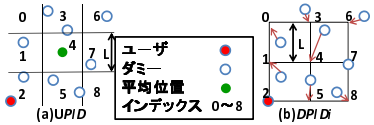

図 8　ユーザ配置番号の決定

表 1　パラメータ

パラメータ	範囲
サービス利用間隔 [秒]	180
平均歩行速度 $[m/s]$	1.30
速度分散 $[(m/s)^2]$	0.2^2
領域 $[m^2]$	15200×15200
ダミー数 [個]	6^2
要求アノニマスエリア $[m^2]$	100^2, 200^2,....,1000^2

4. 評価実験

地図上での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[6] を用いて，京都の街を再現した．さらに，ルートラボ[4] から得た京都駅付近の 5 通りのユーザ経路に基づいて，ユーザの動きを再現し，提案手法として，目的地交換を行う Dest-Ex，目的地交換無しの No-Dest-Ex の 2 つの手法，比較手法として L シフトなしで目的地交換を行う PAD-Ex，目的地交換無しの PAD，**図 9** のようにユーザを中心とした半径 $\sqrt{\frac{S}{\pi}}$ の領域内でランダムに移動させる手法 Ran-Move の 3 つの手法をそれぞれ適用して評価実験を行った．また，シミュレーション時のパラメータは**表 1** のように定めた．

4.1 評価指標

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

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に達成できたアノニマスエリアの平均面積の割合を AAAR と定義する．ユーザとダミーは道の制約上常に指定したグリッド上に入れるわけではないため，グリッドが配置が崩れることにより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 の値が 100% よりも大きければ，平均的にユーザの要求する曖昧度よりもよりユーザ位置を曖昧化することができてい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 10** 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．

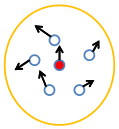

図 9　Ran-Move

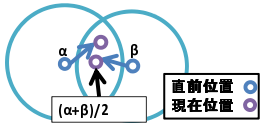

図 10　ユーザ確率の遷移

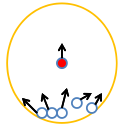

図 11　ユーザ直進時の Ran-Move

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[7] 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を p_i とおく時，$H = -\Sigma p_i \log p_i$ で計算されるエントロピーがある設定値を超えるまでの時間であり，本稿では，基準のエントロピーを 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，これ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．

- **VULR(Variance of User Location Rank)**

ダミーがユーザに追従する形になることが多い場合，サービスプロバイダがユーザ位置を推測しやすくなってしまう．そこで，各サービス要求時に，ユーザが自身の進行方向に基準としたときの，ユーザ・ダミー位置の相対的な順序におけるユーザの順位を記録しておく．それを元に，それぞれの順位になる確率を求め，その分散を VULR と定義し性能指標とする．VULR 大きいとユーザが進行方向に対してある特定の順位（特に先頭）になる確率が高いので，ユーザの順位による推測を行いやすくなる．

4.2 実験結果

4.2.1 AAAR

ユーザの位置曖昧度の評価を行うため，さまざまな要求アノニマスエリアに対する達成度を調べた．その結果を**図 12** に示す．

Ran-Move 以外の 4 つの手法はすべておおよそ 100% の達成度を実現できている．これは，4 つの手法は，グリッド状にダミーの配置を決定し，アノニマスエリアをしっかりと確保できているのに対し，Ran-Move が各ダミーの配置に対してそこまで制限を設けておらず，例えばユーザが直進し続けた場合には，**図 11** のようにユーザの進行方向と反対の位置に全ダミーが集まってしまうことにより十分に大きなアノニマスエリアを確保できなかったからである．

4.2.2 MTC

図 13 に，ダミー数 N =36 の時の各要求アノニマスエリアに対する MTC の値を示す．要求アノニマスエリアが小さい場合，すべての手法においてダミーはユーザ付近に生成されるため，ユーザが他のダミーの移動範囲内に位置する事が多く，MTC は小さな値となる．一方，要求アノニマスエリアが大きくなると，ダミーの生成位置がユーザから離れた位置に

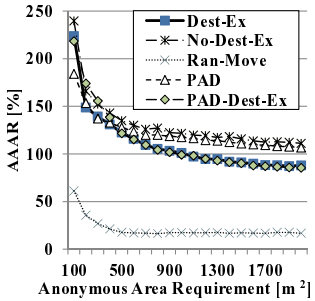

図 12 AAAR

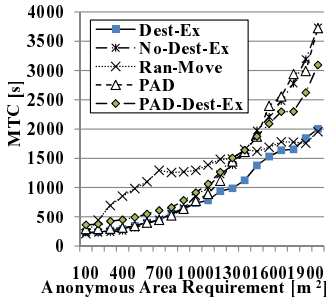

図 13 MTC

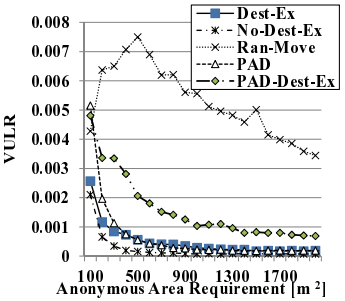

図 14 VULR

なるため，MTC の値も大きくなる．また，Dest-Ex は No-Dest-Ex と比べて 10%〜40%小さな値となっている．これは，目的地交換を行うことで交差を誘発することができていたということをしめす．さらに，PAD-Ex と比べると，Dest-Ex の方が 15%〜37%小さな値となっている．これは PAD-Ex では，L シフトをしないため，ユーザがダミーを先導するような形になってしまい交差が発生しくくなったためである．最後に要求アノニマスエリアが大きい場合には Ran-Move の MTC の値が小さく比較的小さくなる傾向が見られた，これは，Ran-Move ではダミーは指定された範囲内を動くという制約しか与えられていないため，他の手法より比較的自由に移動することが可能であったので，アノニマスエリアの変化の影響を受けにくかったということが考えられる．

4.2.3 VULR

図 14 に，ダミー数 N =36 の時の各要求アノニマスエリアに対する，ユーザの進行方向に対する順位の分散を示す．すべての要求アノニマスエリアに対して，領域内ランダム移動の VULR が，その他の手法より大きくなっている．これは，ダミーが領域内をランダムに移動する場合，ユーザの動きに対応した動きをできないため，ある一定時間ユーザが直進すると，**図 11** のようにユーザの進行方向と反対の方向にダミーが集中し，ユーザが進行方向に対して先頭になることが多かったためである．一方，要求アノニマスエリアが小さいとき，すべての手法において VULR が大きくなる傾向が見られた．これは，アノニマスエリアが小さいとき，ダミーがユーザの近くに分布するため，ユーザが進行方向を少し変化させただけで，先頭に近い位置になることが多かったからである．また，L シフトをする手法は L シフトしない手法と比べて分散が小さくなっている．これは L シフトがユーザが頻繁になるのを未然に防いだためである．また，Dest-Ex は，No-Dest-Ex の手法と比べて，VULR が大きくなった．これは，3.2.3 節で説明したように，目的地交換により，ダミーが自分の新しい目的地に移動する際，ユーザの進行方向に対して並行に移動できないため，ユーザが進行方向に対して先頭に近い位置になりやすいからである．

5. 視認性評価実験

4 章では，機械的観点から，各指標における提案手法の評価を行ったが，各ユーザ・ダミーの機械的には計算できないような動きを見た上で人間がユーザを言い当てることができる可能性は否定出来ないため，視認性における評価実験を行った．

視認性実験では，ネットワークシミュレータ MobiREAL[6] 上で，すべてのダミーとユーザの ID が各サービス利用ごとにランダマイズされている状態の中で観察し，ユーザを特定してもらい，特定できた理由を回答してもらった．評価環境は，4 章と同じ環境の中で，ダミー数 16 個，4 通りの要求アノニマスエリア (500^2 [m^2], 1000^2 [m^2], 1500^2 [m^2], 2000^2 [m^2]) で行った．また，サービス利用間隔が視認性に与える影響を見るために，2 種類のサービス利用間隔 (60 秒, 180 秒) について実験を行った．各パラメータに対して，ユーザの 4 種類の基本的な動き（直線移動，引き返し，右折，左折）それぞれについて 3 通りずつ切り出したもの，合わせて 12 種類のユーザデータを作成し，各データについて 4 回ずつ評価を行い一つのパラメータにつき合計 48 回の実験結果の平均を評価した．実験は 22 人の被験者が参加し，各被験者はパラメータ毎に平均 2 回程度，最大 4 回の評価を行った．

5.1 正 答 率

図 15，**図 16** はそれぞれサービス利用間隔が 60 秒, 180 秒の時の正答率および，ユーザを特定した理由を示している．正答率は被験者が正しくユーザを特定できた確率である．位置情報等のヒントが与えられない場合には，正答率は 1/（ダミー数+1）になるはずであり，本実験においてもそれに近い値をとることが望ましい．二つのグラフより，提案手法 (Dest-Ex, No-Dest-Ex) は視認性の観点でも，ほとんどの場合においてプライバシを保護することが可能であった．さらに，大きな傾向として，L シフトをしない手法，目的地交換をする手法の方が正答率が高いくなっていた．また，ユーザの特定理由としては，「ユーザが自身の進行方向に対して他のダミーを先導するような位置にいることが多かった．(位置先導)」，「ユーザの方向転換に続くようにダミーが方向転換を行うことが多かった．(方向転換先導)」の二つが代表的なものであった．これら二つの代表的な特定理由を元に，上で挙げた二つの傾向の原因について考察する．

- 位置先導
  位置先導を理由に上げる被験者は L シフトしない手法（PAD，PAD-Ex）ほど多く，また，目的地交換を行うもの (Dest-Ex，PAD-Ex) ほど多いという傾向が見られた．これは，L シフトにユーザがダミーを先導しないようにする効果があったのと，目的地交換がユーザが先導する状況を作る原因になる可能性があるということを示している．また，位置先導は要求アノニマスエリアが小さいときの方が多く回答されていた．これは，アノニマスエリアが小さい時にはダミーとユーザが密集して存在するため，ユーザがダミーよりも，少し前を移動するだけで，先導する様子が目立つことが理由として考

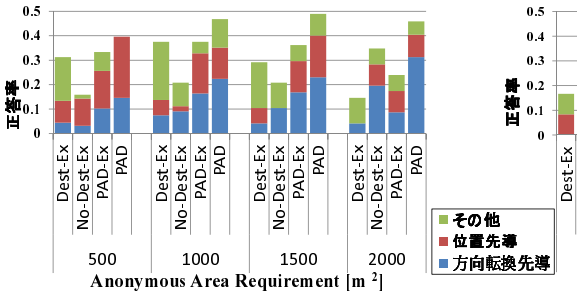

図 15　正答率（サービス利用間隔 60 秒）

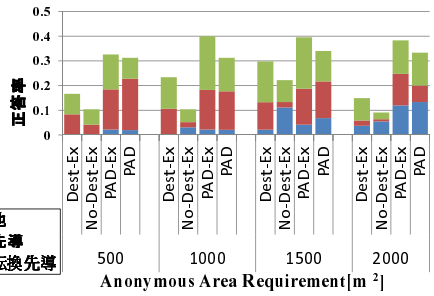

図 16　正答率（サービス利用間隔 180 秒）

えられる．

- 方向転換先導
  方向転換先導を理由に上げる被験者は，サービス利用間隔が長くなるにつれて少なくなるという傾向が見られた．これは，大きなサービス利用間隔においては，ユーザが方向転換を行うタイミングにサービス利用を行う可能性が低減されるため，明確に方向転換のタイミングを観測することが難しくなるためと考えられる．また，方向転換先導は目的地交換を行わない手法（No-Dest-Ex と PAD）においてより多く回答される傾向が見られた．これは，目的地交換を行わないと，高い確率でダミーがユーザの進行方向と同じ方向に移動してしまうために，ユーザの方向転換先導が際立って見えるという効果があり，逆に，目的地交換を行うものと，ユーザの進行方向とは違った方向に移動するダミーが存在するため，ユーザの方向転換を目立たなくする効果があることがわかった．また，要求アノニマスエリアが大きくなるにつれて方向転換先導を特定理由に上げる被験者が多くなる傾向が見られたが，これは，要求アノニマスエリアが小さいとき，道路の制約上，ダミーがユーザ付近にグリッド状に並ぶのが難しくダミーが常に目的地に近い場所に向かうために様々な方向に移動するのに対して，アノニマスエリアが大きい時には，道路の制約が小さく，ダミーがきれいなグリッド状に並ぶため，ユーザの方向転換が際立って見えるという効果につながった為である．
- 二つの理由のバランス
  60 秒, 180 秒の両方のサービス利用間隔において，Dest-Ex と PAD-Ex に対する正答率は，要求アノニマスエリアの大きさが 500^2m^2 の場合には比較的小さく，要求アノニマスエリアの大きさが大きくなるに連れて大きな値になるが，2000^2m^2 の場合には非常に小さな値となっている．これは，要求アノニマスエリアが小さいときに顕著な位置先導と，要求アノニマスエリアが大きいときに顕著な方向転換先導の二つの要因のバランスが関係している，つまり，正答率が一番高いとき，二つの要因をユーザ特定に最も効率的に利用できる状態であることを示している．

6. ま と め

本稿では，位置情報サービスにおけるユーザの位置プライバシ保護を目的とした，ユーザ位置曖昧化のためのダミー位置生成手法を，機械的観点と，視認的観点から評価した．機械的評価では，提案手法が要求アノニマスエリアを十分に満たせていること，ユーザの進行方向に対するダミーとの相対位置に偏りがないこと，交差を発生させることにより追跡可能性を低減できていることを確認した．視認性評価においても，ユーザが「位置的に先導すること」,「方向転換のタイミングが先導すること」がユーザ特定の大きな原因になっていることが判明し，これらに，提案手法で用いている，L シフトと目的地交換が大きく影響を与えていることを確認した．また，今回の実験を通してユーザが多くの場合大通りを通っていて，大通りを通っていないものをダミーとして除外できる等の意見も得ることができた．

文献 [8] の提案手法では，ユーザの現在位置と進行方向だけを参考にダミーの移動を決めており，これがユーザが先導するケースが生じた原因であると考えられる．そのため，今後はユーザの将来の動きを予想し，それに基づいてダミーの移動経路を決定するように手法を拡張することで，この問題を解決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. COSIT*, 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 Services*, pp. 88-97, 2005.
4) ルートラボ．*http://latlonglab.yahoo.co.jp/route/*.
5) 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.
6) MobiREAL web page. *http://www.mobireal.net.*
7) R. Shokri, J. Freudiger, M. Jadliwala, and J. P. Hubaux: A Distortion-Based Metric for Location Privacy.Submitted to WPES, p. 6, 2009.
8) A. Suzuki, M. Iwata, Takahiro. H, X. Xie, S. Nishio: A user location anonymization method for location based services in a real environment: *In Proc. ACM-GIS*, pp. 308-401, 2010.