

レーザレンジスキャナと携帯端末による位置ナビゲーション手法

A New Method for Navigation using Range Scanners and Mobile Phone

和田 悠佑^{†1} 山口 弘純^{†1†2} 東野 輝夫^{†1†2}
 WADA Yusuke^{†1} Hirozumi YAMAGUCHI^{†1†2} Teruo HIGASHINO^{†1†2}

1. まえがき

イベントスペースやオフィス、商業施設といった空間における歩行者の位置情報の重要性が高まっている。人々の移動履歴情報に基づくマーケティング調査、人の行動に合わせてエネルギーを管理するスマートホームやスマートビルディングといったエネルギー管理システム、美術館・博物館や商業施設などにおけるパーソナルナビゲーションシステムといった歩行者の正確な位置情報を利用した様々なサービスが期待されている。人の行動を多様なセンサで計測する技術をヒューマンセンシング技術と呼び、次世代のシステムやサービスへの活用が期待されており、近年非常に注目されている。

歩行者の位置を計測する方法として、GPS、カメラ、RFID タグ、モバイルデバイスに搭載されたコンパスやジャイロセンサ、様々なセンサを利用した方法が提案されている。中でもレーザレンジスキャナ (LRS) による歩行者の計測が注目を集めている。レンジスキャナは、センサから物体までの距離を正確に取得することができるセンサで、広範囲を高速にスキャンすることが可能である。実際に市販されている LRS [1] では、距離 30m、視野角 270 度の扇形領域をスキャンすることが可能である。計測データは計測対象までの距離情報のみであり、計測対象となる歩行者のプライバシーを侵害するおそれが少ないため、歩行者の計測されることに対する抵抗感を低減することができる。また、センサのデータサイズは映像等と比べると小さいため計算コストも比較的小さい。しかし一方で、LRS はカメラと同様、センサの見通しを邪魔する障害物 (オクルージョン) により計測対象を見失いやすく、多数の移動体が複雑に移動している空間においては、計測領域内の全ての歩行者の移動軌跡を完全に計測することが難しい。また、各歩行者を区別することができないため、スマートフォンなどを持つ被検出者への位置フィードバックができず、パーソナルナビゲーションなどに活用できない。

我々の研究グループは屋内環境における各歩行者の正確な位置・移動軌跡をリアルタイムに推定することを目標とし、LRS とモバイル端末の WPAN 通信を活用した移動軌跡推定手法を提案してきている [2, 3]。これらの提案手法では、モバイル端末同士が Bluetooth のような信号到達距離が比較的短い (10m 程度) デバイスを用いて相互に通信を行い、その通信記録から得られるネットワークトポロジ情報と、LRS によって計測した歩行者の正確な物理位置位置集合の整合性を最大とするように、モバイル端末と位置との対応を決定することで、各モバイル端末の位置情報を推定する。シミュレーションによる評価の結果、先行研究では平均 80% の精度で位置推定が可能である

ことを示している。その一方で、先行研究 [2, 3] では、通信から得られる周辺のモバイル端末の存在情報を利用した判別を行うため、モバイル端末密度が比較的高い状況ではこの特徴量が多くの端末で類似し、判別性能不足による精度低下につながる場合が多い。

そこで本研究では、周辺のモバイル端末の存在情報だけでなく、その時間変化に注目し、端末間の位置関係をより高精度に把握することで、位置推定精度を向上させるアルゴリズムを提案する。先行研究とは基本的なシステムアーキテクチャを共有するが、提案手法ではより分解能に優れるモバイル端末間のトポロジの時間変化に着目することで、先行研究よりも早く多数の歩行者を特定することを可能としている。シミュレーション実験を行い、提案手法での正答率は最大で 13% 程度先行研究よりも高いことを示した。また、歩行者密度や障害物の有無など様々な状況でのシナリオを用いてシミュレーション実験を行い、どのような設定においても安定した精度を達成できることを示している。

2. 関連研究

屋内の位置行動推定技術やオブジェクトトラッキング技術はこれまでに活発に研究されている分野であり [4–6]、赤外線、UWB、超音波送受信器、RFID、WiFi など多様なデバイスや無線通信方式を活用した方法論や技術が開発されている。本稿ではこれらに加え、本研究で利用するレーザレンジスキャナを用いる技術についても述べる。

2.1 GPS (Global Positioning System)

現在、一般的に用いられている測位技術に GPS があるが、地下や屋内では衛星からの電波を受信できずに正しい測位ができないうえに、見通しの良い屋外であっても数メートルから数十メートルの誤差が発生する [7]。IMES (Indoor Messaging System) などの疑似 GPS 機器などの開発も進んでいるものの、すべての施設に 10m 間隔などで設置することなどはコストの課題もあり容易ではない。

2.2 測距に基づく位置推定

シグナルの送受信が可能でノード (例えばモバイル端末) では、光や電波伝搬を用いた測量原理を用いるものが多く提案されている。ToA (Time of Arrival) や TDoA (Time Difference of Arrival), AoA (Angle of Arrival) などの方式では、距離あるいは距離差測定を行うことで距離誤差が最小となる点を推定位置と決定する。ToA は 2 ノード間の電波伝搬時間と伝搬速度から距離を計算する方法である [6]。TDoA は 2 ノード間、あるいは時刻同期した複数のノード間で実行され、前者では伝搬時間の異なる 2 種類のシグナルを用いて 2 ノード間の距離を推定し、後者ではターゲットが発するシグナルを複数ノードで受信した時刻の差からノード間距離の差を算出し、距離誤差が最小の点を計算する。AoA は指向性アンテナ (あるいはアンテナアレイ) か、position sensitive detector [8] のよ

†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 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

うなセンサーで角度を検出し、複数ノードからのシグナルを用いてそれらのノードまでの距離を推定する。

測距の精度は無線通信方式に依存する場合が多い。例えば UWB は時間分解能が高いために、屋内ではしばしば生じる反射によるマルチパス伝搬を検出できる（直接波を検出できる）といった特徴があり [9]、このような技術を活用したシステムとして Ubisense [10] などがある。しかし、UWB は利用帯域幅が広いために電波出力も限られており、数十 m 程度の屋内空間での測位には適さない。ActiveBat [11] や Cricket [12,13] などの超音波ベースのシステムも比較的高精度な測距を可能とするものの、UWB と同様の課題がある。

電波を用いた距離推定の多くは、受信電波強度 (RSS) が距離の対数に比例して減衰するといったモデルを用いて推定距離に変換し、最小二乗法を用いて誤差最小化を図る場合が多い。ゼロコンフィギュレーション位置推定 [14] は AP 間および AP-クライアント間の RSS 情報を用いてオンラインキャリブレーションを行う。また、EZ localization [15] ではクライアントのみならず AP も位置推定の対象とし、クライアントのわずかな GPS 受信情報をアンカーとした位置推定を行っている。

これらの方式は基本的には見通し通信を必要とすることから、屋内での運用は 10m 以下程度の比較的短距離に限られる場合も多く、広域での運用では多数のアンカーあるいは測距機器の設置が必要となる。

2.3 インフラ型センサを用いたトラッキング

カメラを用いた位置推定は、カメラを設置して歩行者の頭部や全身を撮影し、画像処理技術を用いて人物を検出して位置を推定する方法が多い。監視カメラという既存インフラを利用することが可能で、精度も比較的高いという特徴を持っている。しかし、歩行者のプライバシー保護の観点からカメラ撮影が難しい場面も多い。データサイズが大きく計算コストがかかる点や、キャリブレーションの問題を抱えている点もデメリットとして考えられる。プライバシー保護のために歩行者の顔や服の色をデータベース化せず、画像差分から歩行者の存在する位置を撮影し、Dead-Reckoning による推定位置と比較して、各歩行者の位置を特定する手法もある [16]。しかし、この手法では 10m × 10m の空間に 3 人の歩行者を発生させているような非常に低密度の環境でのシミュレーション評価結果のみ示されている。

レーザレンジスキャナを用いる位置推定手法は、レンジスキャナによって計測されたデータから歩行者を抽出する方法が一般的である。最もシンプルな方法は、人の腰の高さに地面と水平にレンジセンサを設置し、各時刻のスキャンデータの差分から歩行者の移動軌跡を得るものである [17,18]。レンジスキャナはデータサイズも小さく、キャリブレーションも用意であるというメリットを持つが、見通し線上にない物体を検出することができず、歩行者が障害物や別の歩行者の陰に隠れると見失ってしまうという弱点を持っている。障害物による検出率低下を防ぐために、歩行者の足首の高さにレンジスキャナを設置し、歩行者の歩行リズムを検出することで移動軌跡を抽出する手法も提案されている [19,20] が、いずれの場合も取得データはセンサに対する向きと距離のデータだけであるため、個々の歩行者を判別することができず、一度見失ってしまった歩行者を再び見つけたとしてもそれらの歩行者が同一人物であるか

否か判定することは難しい。

2.4 自律型トラッキング

Dead-Reckoning は、加速度センサやジャイロセンサのような加速度や角速度を計測するセンサを用いて速度情報を取得し、取得データに基づいて移動形態（徒歩、自転車、自動車）やおおよその次の位置を予測する技術である。スマートフォンなどの携帯電話の一部にはこれらのセンサを搭載しているものがあり、ユーザの行動をデータ化する手法の一つとして注目されている。Dead-Reckoning は通信基地局や外部にセンサや通信基地局を必要とせず自律的に自身の位置を推定できるというメリットを持つが、誤差が累積しやすいことが知られている。誤差を補正する手法としては、自律走行ロボットが Dead-Reckoning を用いて自身の位置を推定する際にカメラを用いて目印を見つけ、目印との距離を用いて Dead-Reckoning の誤差を補正する方法 [21] などが提案されている。また、本研究で想定しているスマートフォンのようなモバイル端末を用いた DR (歩行者用自律航法) の研究も盛んになってきている。誤差を軽減するため、近年になって複数ノードが協調する概念も、我々の研究グループを含め、いくつかのグループで発表されてきている [22,23]。

2.5 提案手法の新規性および有用性

上記の従来手法と比較し、提案手法では、通常はトラッキングデバイスとしてスタンドアロンで用いるレーザレンジスキャナを、各歩行者が保持するスマートフォンなどのモバイル端末に位置情報をフィードバックするシステムとして設計することを目的とした新しい手法である。屋内位置推定技術の多くは短距離で比較的高精度な測距を行える赤外線、超音波、UWB などの技術を用いるものが多いが、比較的広大な商業施設やビルをカバーする場合には設置コストが無視できない。一方、測距範囲が比較的広い WiFi 等では安定した精度を達成できないといった課題があり、映像解析技術に基づくカメラトラッキングでは位置情報フィードバックが困難である。これらに対し、提案手法は高精度なトラッキングデバイスとモバイル端末の近接通信技術のみを仮定して、モバイル端末の高精度な位置推定を実現している。レーザレンジを用いた我々のグループの先行研究と比較し、本研究では近接通信の時間変化に着目したより効率のよいアルゴリズムを開発し、それら先行研究や、カメラと RFID を使って類似の個人認識を試みている類似研究 [16] などとは異なり、より広域・高密度での高精度位置推定を実現しているため、有用性も高いと言える。

3. レーザレンジスキャナを用いた歩行者計測

本研究で、歩行者の計測を行うために用いるレーザレンジスキャナの特性と、レンジスキャナを用いた歩行者計測方法について述べる。

3.1 レーザレンジスキャナの特性

レンジスキャナの例として、北陽電機株式会社の UTM-30LX [1] の仕様を表 1 に示す。

レンジスキャナはレーザ光の伝播時間を用いて、センサから対象物までの距離を計測することができるセンサである。表 1 に示されるように、270 度、30m という広範囲を非常に小さな誤差で高速に計測することができる。センサの取得データは、センサに対する対象物の方向と対象物までの距離という位置情報のみであるため、計測の際に歩行者の個人情報に侵害するお

表 1 UTM-30LX の仕様 (北陽電機資料より抜粋)

項目	仕様
計測距離	0.1 ~ 30m
観測角	270°
分解能	ステップ角: 0.25°
測定間隔	25ms/scan
測定精度	0.1 ~ 10m: ± 30mm, 10 ~ 30m: ± 50mm

それが少なく、また、データサイズが小さいため計算コストも比較的小さい。ただし、レンジスキャナには計測対象である歩行者が柱などの物陰や別の歩行者の陰に隠れてしまうと、計測対象者を見失ってしまうという欠点 (オクルージョン問題) がある。また、顔や服の色といった情報の取得ができないため、個々の人物を識別することが難しい。

3.2 レーザレンジスキャナによる歩行者検出・軌跡検出

レンジスキャナでの計測は、歩行者の腰の高さに地面と平行に取り付けて計測する方法 [17,18] をとる。歩行者を検出するためには、図 1 で示す背景差分法を用いる。図 1(a) で示されるように事前に歩行者が存在しない状態で計測対象領域をレンジスキャナで測成し、壁や柱といった障害物となる物体までの距離を背景として登録する。この背景登録時に各角度について計測した距離を b_θ とする。計測対象領域内に歩行者が現れ、図 1(b) のようにレンジスキャナによって歩行者までの距離 d_θ が計測される時、 $d_\theta < b_\theta$ の関係を満たす。それぞれの角度に対し、 $d_\theta < b_\theta$ の関係を満たしているレーザ照射点を検出点と呼ぶ。検出点は歩行者の腰の表面に該当する位置に現れる。

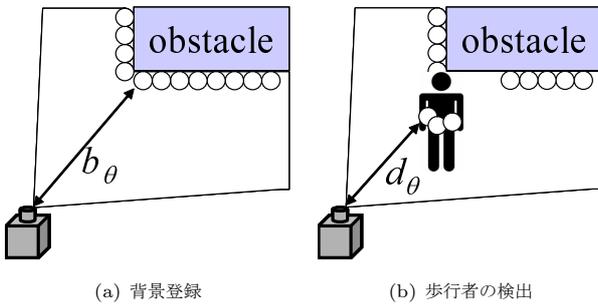


図 1 背景差分法による歩行者の検出

次に得られた検出点に対し、図 2(a) のようにクラスタリング処理を行う。クラスタリング処理は、歩行者の腰の半径を R_w としたとき、クラスタ内のどの 2 点間距離も R_w 以下であるような検出点の集合を作る処理である。次に、図 2(b) のように各クラスタの検出点集合をもとに、歩行者の腰に該当する円の中心点を計算する。この歩行者の中心点を歩行者のスカン点と呼び、これらの一連のアルゴリズムによって、各時刻でのレンジスキャナの計測結果からスカン点集合を生成する。取得したスカン点にはそれぞれ固有の ID が割り振られる。

歩行者の移動軌跡は、取得したスカン点集合と直前のスカンで取得したスカン点集合を比較することによって得られる。歩行者の最大速度を V_{max} [m/s]、スカン間隔を T_{scan} [s] としたとき、取得したスカン点集合と直前のスカン点集合の中から 2 点間距離が $V_{max} \cdot T_{scan}$ [m] 以内であるような組み合わせを見つけ、つなぎ合わせることで同一の歩行者であると判断し、歩行者の移動軌跡を抽出することができる。

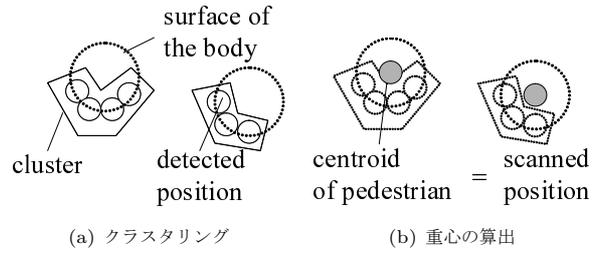


図 2 歩行者を表すスカン点の決定

同一の歩行者であると判断されたスカン点には同じ ID を与える。ただし、レンジスキャナでの計測では、歩行者が物陰や他の歩行者の陰に隠れて正しく検出されない場合がある。見失ってしまったスカン点は、スカン点の比較を行った時に $V_{max} \cdot T_{scan}$ [m] 以内につなぎ合わせる組み合わせが見つからなかった点として発見することができる。なお、本研究では、移動体の速度は変化しにくいという特徴 [24] を利用し、見失ってしまった点を線形予測を用いて補完している。

4. 軌跡推定手法

4.1 想定環境

提案手法では、軌跡推定の対象となる全ての歩行者が Bluetooth のような通信到達距離の比較的短い通信デバイスを備えたスマートフォンなどのモバイルデバイスを保持していると、それぞれのデバイスは固有の ID を持っているものとする。これらのモバイルデバイスを持つ歩行者を以降ノードと呼ぶ。ノードの最大無線通信到達距離 R_{max} と最大移動速度 V_{max} は既知であるとする。各ノードは WiFi や無線 LAN などを通じて計算サーバと接続しており、計算サーバは計測対象領域に存在するノード集合 $N = \{n_i | i = 1, 2, \dots, M\}$ を把握している。

各ノード n_i は短距離通信デバイスを使い、一定時間間隔 T_{beacon} で自身の ID i を通知するビーコン・メッセージ b_i をブロードキャストしているとし、通信範囲の各ノード n_j は受信したビーコン・メッセージ b_i を記録しておく。現在時刻を t とすると、各ノードは T_{beacon} 毎に $[t - T_{beacon}, t]$ に受け取ったビーコン数に関する情報 (後述) を自分の ID j と併せて計算サーバに送る。

また、計測対象領域には歩行者の位置情報を取得するためのレーザレンジスキャナが設置されている。レンジスキャナは歩行者の腰の高さに地面と水平に設置されており、レンジスキャナの設置位置やスカン方向は既知であるとする。背景登録は完了しており、レーザの当たった点から歩行者のスカン点集合を取得することができる。各レンジスキャナはスカンによって得られたスカン点集合データを計算サーバに送信している。以降、スカンが実施された時刻 t において検出され、サーバに送信された M^t 個のノードの座標点集合を $P^t = \{p_k^t | k = 1, \dots, M^t\}$ で表す。

図 3 にアーキテクチャの概念図を示す。同図では、2 つのレンジスキャナがノード位置をスカンし、サーバに送信している様子が表されている。レンジスキャナのスカン域は色付きの領域で示されている。いずれかのレンジスキャナのレーザが当たっているノードはその存在と位置を検出されるが、障害物の陰やスカン域外に存在するノード (白色の領域に存在するノード) は検出されない。また、各ノードはビーコン・メッ

メッセージを送信し、その通信到達距離内に存在するノードがビーコンを受信・記録する。受信ビーコン数に関する情報は無線 LAN などを通じ計算サーバへと送信される。

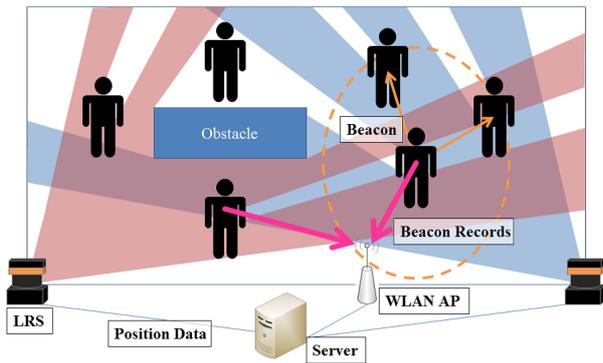


図 3 提案手法の動作環境

4.2 提案手法の概要

我々の研究チームは、これまでにレーザレンジスキャナによる計測結果と、各時刻でのモバイルデバイスの持つビーコンの数を基準に歩行者を特定する手法 [2, 3] を提案している。これまでの手法では、受信したビーコンから他のノードとの接続性（以下では便宜上、通信リンクとよぶ）を求め、ビーコンを受信した時刻 t において、ノード n_i が持っている受信ビーコン数（通信リンク数）と、時刻 t に取得したスキャン点から得られる見かけの通信リンク数を比較することで、ノード N_i に対応するスキャン点 p_k^t を推定するアルゴリズムである。見かけの通信リンク数とは、スキャン点同士の位置関係（ユークリッド距離）から推測される通信リンク数を指す。あるスキャン点 p_k と p_l の 2 点間距離がモバイルデバイスの（予想）通信到達距離 R_{max} よりも小さい場合、 p_k と p_l に対応するノード同士はビーコンの送受信を行ったと推測される。従って、スキャン点 p_k の見かけの通信リンク数は、 p_k から半径 R_{max} 以内に存在する他のスキャン点の数に等しい。スキャン点 p_k がノード n_i であると判断するために乖離度と呼ばれる指標を導入し、「ノード n_i の通信リンク数とスキャン点 p_k の見かけのリンク数の差」と定義する。ノード集合 N とスキャン点集合 P の要素を 1 対 1 に対応づけた時に、全体の乖離度の総和が最小となるような、ノードとスキャン点の対応づけを行う。また、 T_{beacon} 毎の割り当てを利用して、ノードの移動軌跡を求めている。

これに対し、本研究では移動体の特性を考察し、通信リンクの変化を表す指標として「新しいリンク数」と「失ったリンク数」を導入する。計測対象領域内の歩行者の多くは移動しているため、例えばあるビーコン送信時刻 t とその前のビーコン送信時刻 $t - T_{beacon}$ にそれぞれ $|B|$ 個のビーコンを受け取ったとしても、歩行者の移動によって、 t に受信したビーコン集合 $B^t = \{b_i^t | i \text{ は時刻 } t \text{ にビーコンを送信した送信者の ID}\}$ に含まれるビーコン送信者 ID と $t - T_{beacon}$ に受信したビーコン集合 $B^{t-T_{beacon}}$ に含まれるビーコン送信者 ID とは異なる可能性がある。そこで、あるビーコン送信時刻 t とその一つ前のビーコン送信時刻 $t - T_{beacon}$ でのそれぞれの受信ビーコン集合 $B^t, B^{t-T_{beacon}}$ のうち、 B^t に含まれていて $B^{t-T_{beacon}}$ に含まれていない ID の数 ($|B^t - B^{t-T_{beacon}}|$) を「新しい通信リンク数」、 B^t に含まれておらず $B^{t-T_{beacon}}$ に含まれて

いる ID の数 ($|B^{t-T_{beacon}} - B^t|$) を「失った通信リンク数」と定義する。

各ノードは、一定間隔 T_{beacon} 毎に周囲のノードからのビーコンを受信し、直前の周期内で受信したビーコン集合と比較して、新しい通信リンク数、失った通信リンク数を計算する。各ノードはビーコン受信後に、通信リンク数、新しい通信リンク数、失った通信リンク数の 3 つのリンク情報と自身の ID を計算サーバに送信する。スキャン点に対しても同様に、時刻 t に通信到達範囲 R_{max} 以内に存在しているが、時刻 $t - T_{beacon}$ では通信到達範囲に存在していなかったようなスキャン点の数を「見かけの新しい通信リンク数」、時刻 t に通信範囲に存在していないが、時刻 $t - T_{beacon}$ では通信範囲に存在していたようなスキャン点の数を「見かけの失った通信リンク数」とよぶ。本研究においては、スキャン点 p_k がノード n_i であると判断するための新しい乖離度を「ノード n_i の通信リンク数とスキャン点 p_k の見かけの通信リンク数の差」、「ノード n_i の新しい通信リンク数とスキャン点 p_k の見かけの新しい通信リンク数の差」、「ノード n_i の失った通信リンク数とスキャン点 p_k の見かけの失った通信リンク数の差」の 3 項組で定義する。これを用いて、全体の乖離度の総和が最小となるようなノード集合 N とスキャン点集合 P の要素を対応づける。

4.2.1 新しい乖離度の有効性の調査

理想的に、あるビーコン送信時刻でノードの数と同数のスキャン点を取得できたとする。ノード数とスキャン点数は同じであるため、従来の乖離度を用いた時に全体の乖離度の総和が 0 になるようなノードとスキャン点の対応づけの方法が存在する。ここで問題となるのは、ノード集合やスキャン点集合の中に、同じ通信リンク数を持つノード、同じ見かけの通信リンク数を持つスキャン点が多くあると、それらの対応づけの組み合わせ総数が増大し、対応づけの確からしさが低下することである。このような確からしきの低下を防ぐために、指標としての乖離度はノードやスキャン点をなるべく一意に決定できるように、個々のノードに固有のものであることが望ましい。例えば、 L 本の通信リンクを持つノードが 1 つしかなく、 L 本の見かけの通信リンクを持つスキャン点が 1 つしかなければ、これらは誤りなく一意に対応づけることができる。しかし、従来手法のようなノードの空間的分布に依存する指標では、ノード密度が増大するにつれてある程度の統計的類似性が生じることに加え、地理的に近接したノードが（それらの周辺ノード群のノード分布は類似すると思われるため）、指標として類似の値を持つことになると想定される。

乖離度の評価項目がどの程度ノードに固有であるかを調べるため、従来手法における「通信リンク数」と、提案手法における「通信リンク数」、「新しい通信リンク数」、「失った通信リンク数」の 3 項組が、どの程度ノードの固有性を満たすか（評価項目について、同じ値を持たないか）をシミュレーションで評価した。シミュレーションのパラメータを表 2 に示す。

評価結果を図 4 に示す。図 4 は、各ビーコン送信時刻にあるノードに注目したとき、そのノードの持つ受信ビーコンに基づく評価項目の値と同じ値を持つノードが他にどれぐらい存在しているかの割合を調査し、その平均値についてのグラフである。青いグラフが従来手法の評価結果、赤いグラフが提案手法での評価結果を示している。例えば、従来手法では 15% 程度のノードは、自分と同じ評価値を持つノードが他に 5 台存在

表 2 乖離度の固有値評価シミュレーションのパラメータ

項目	値
計測領域	30 [m] × 30 [m] の障害物のない空間
歩行者数	90 [人] (0.1 [人/m ²])
移動モデル	Random Way-Point Model (歩行速度 0 [m/s] ~ 1.3 [m/s])
ビーコン到達距離	5.0 [m] (損失のない通信を仮定)
ビーコン送信間隔	3.0 [s]
試行回数	30 [s] のシミュレーションを 50 回試行

するようなノードであるということがグラフから読み取ることができる。提案手法では、70% 以上のノードが固有な評価値 (同じ評価値を持つ他のノード数が 0) であることがわかり、「新しい通信リンク数」と「失った通信リンク数」の項目を評価することによってノードの評価値の固有性 (ユニークさ) を高めることができたと言え、正しくスキャン点を取得できた場合のノード - スキャン点割り当て精度の向上を見込むことができる。

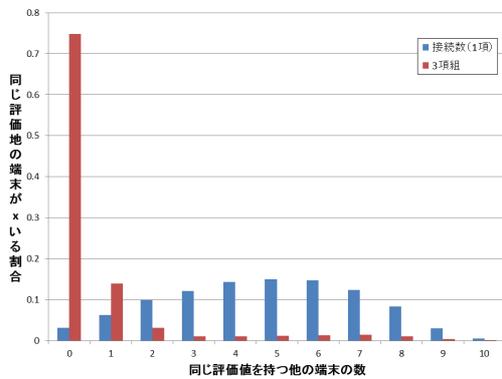


図 4 従来手法, 提案手法, それぞれの乖離度の固有さの評価

また, 表 2 のビーコン送信間隔を 1.0, 3.0, 5.0 秒と変化させて, 提案手法を評価した結果を図 5 に示す。

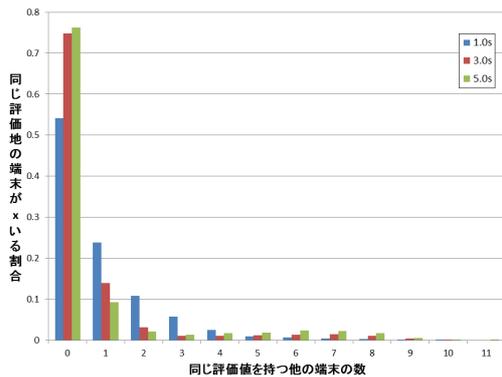


図 5 ビーコン送信間隔毎の提案手法の乖離度の固有さの評価

図 5 の結果から, 時間が経過し歩行者が移動によって起こる通信の相手の変化を捉えることで, 固有な評価値を持つノードを増えていることがわかる。従来手法では, ビーコン送信間隔を 0.1 秒間隔に設定しており高頻度の通信を想定していたが, 従来手法では, ビーコン送信間隔が 3 秒程度でもノードを識別するに足る評価値が得られると考えられる。

4.3 マッチングアルゴリズム

ビーコンの送受信が行われる時刻 t におけるノード集合とス

キャン点集合の対応づけ方法のアルゴリズムについて述べる。

計算サーバは時刻 t において, 各ノード n_i から T_{beacon} 間隔で送られてくる通信リンク数 $L^t(n_i)$, 新しい通信リンク数 $NL^t(n_i)$, 失われたリンク数 $RL^t(n_i)$ の値を記録している。また, レンジスキャナによる計測結果から, 各スキャン点 p_k^t の見かけの通信リンク数 $L^t(p_k^t)$, 見かけの新しい通信リンク $NL^t(p_k^t)$, 見かけの失われた通信リンク数 $RL^t(p_k^t)$ を算出する。見失ってしまった歩行者は線形予測によって補完し, スキャン点 p_k^t の見かけの 3 項組の算出時に実際には検出されていない歩行者もリンク数の中にカウントすることで, レーザレンジスキャナのオクルージョン問題を和らげる。

時刻 t において p_k^t がどれぐらい n_i らしいかを表す指標として乖離度 D^t を次の式で定義する。

$$D^t(n_i, p_k^t) = |L^t(n_i) - L^t(p_k^t)| + |NL^t(n_i) - NL^t(p_k^t)| + |RL^t(n_i) - RL^t(p_k^t)|$$

ID k のスキャン点 p_k^t がレンジスキャナによって継続して計測されており, k の移動軌跡情報を保持している場合, 直前のビーコン送受信時刻 $t - T_{beacon}$ にスキャンされたスキャン点 $p_k^{t-T_{beacon}}$ に対しても乖離度を求めることができる。ID k のスキャン点の軌跡の各ビーコン送受信時刻における乖離度の総和を, ID k の軌跡の乖離度と呼ぶ。

ノード集合とスキャン点集合の割り当ては, スキャン点に対してノードを割り当てたときのそれぞれの軌跡の乖離度の和が最小となるような割り当てを探することで実現する。尚, 本研究では, 歩行者の位置をリアルタイムに取得することを目標としているため, ノード集合とスキャン点集合の全ての組み合わせを評価せず, あるノードに対して最も確からしく対応するスキャン点を見つけて順々に組み合わせるといったグリーディ法を用いて実装を行っている。

5. 性能評価

本稿では, 提案手法をシミュレータ上に実装し, その性能評価および特性解析のためのシミュレーション実験を行った。

開発したシミュレータの実行の様子を図 6 に示す。図の左側の領域が実際の歩行者の位置を表示しており, 右側の領域のレンジスキャナによる計測結果から抽出した歩行者の位置を表示している。歩行者は水色の円として表示されており, 移動軌跡を灰色の線で表示している。黒い箱状のイラストがレンジスキャナの設置位置を示しており, ピンク色の領域がレンジスキャナのスキャン領域を表している。白色の部分はレンジスキャナによって検出されない領域である。

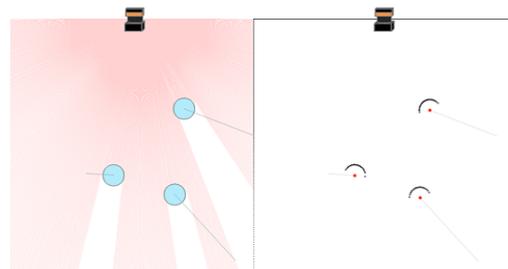


図 6 実装したシミュレータの GUI

5.1 シミュレーション環境

[計測対象領域]

計測対象領域は、30m × 30m の歩行者の出入りがない閉じた空間であるとする。

[障害物]

計測対象領域内の全ての障害物は勝手に移動したり、計測途中で出現・消失したりしないものとする。歩行者は障害物を通り越して移動することはできないものとする。ただし、歩行者の持つモバイルデバイスの通信電波は障害物の影響を受けないものとする。

[レーザレンジスキャナ]

レーザレンジスキャナは走査時間 25ms 毎に検出距離 15m、走査角 270 度の範囲をスキャンする。レンジスキャナの分解能は 0.25 度であり、角度毎に 1 本のレーザが照射される。背景登録は事前に済んでおり、歩行者だけを正確にスキャンすることができる。歩行者のスキャン点を得るためのクラスタリング処理には少なくとも 3 点の検出点が必要であるとする。レンジスキャナは四角形計測領域の各辺の中央に 1 台ずつ計測領域の中央を向くように設置され、歩行者のスキャン点情報を全て計算サーバに送信している。時刻 t に取得したスキャン点集合とその前の時刻 $t - 25[\text{ms}]$ に取得したスキャン点集合を比較することで、同一の歩行者のスキャン点を発見し軌跡情報を取得することができる。ただし、軌跡情報は歩行者が障害物などに遮られることなく、レンジスキャナによって計測されている間だけ取得できるものとする。また、移動体の速度は変化しにくいという特性 [24] を用いて、見失った歩行者を 3 秒間だけ線形予測を用いて補完し、見かけの通信リンク数を計算する際に利用する。

[モバイルデバイス]

モバイルデバイスは、通信到達距離 5m の短距離通信デバイスと WLAN への長距離通信デバイスを併せ持っているとする。短距離通信デバイスを用い、 T_{beacon} 秒間隔で周囲のデバイスに対しビーコン・メッセージをブロードキャストする。本研究では、距離 5m 内にいる全てのモバイルデバイスに対して損失なくビーコンを届けることができると仮定する。なお、一般には Bluetooth などの短距離通信の通信距離はこれより大きい場合が多いが、ここでは受信信号強度の閾値を比較的高めに設定することで 5m 程度の通信距離が実現できるとした [22]。各モバイル端末は時刻毎に受け取ったビーコンのリストを記録しており、時刻 t に受信したビーコンと時刻 $t - T_{\text{beacon}}$ に受信したビーコンを比較し、現在の通信リンクの数、新しいリンクの数、失われたリンクの数に自身の ID を併せて長距離通信デバイスを用いて計算サーバに送信する。

[歩行者]

全ての歩行者は軌跡推定の対象となっており、ビーコン・メッセージをやり取りするためのモバイルデバイスを所持している。歩行者の腰は半径 12.4cm の完全な円形としてモデル化した。歩行者は円の中心点の位置にモバイルデバイスを携帯しているとする。歩行者密度は 0.1 人/ m^2 程度を想定する。

[モビリティモデル]

ノードの移動モデルには、Random Way-point Model を利用する。目的地として計測領域上の一点をランダムに選択し、その点に向かって 0.0 [m/s] から 1.3 [m/s] の範囲でランダムに決めた一定の速度で移動する。目的地との間に障害物がある場合は、目的地を再設定する。目的地に到着した後は 0.0[s] ~ 3.0 [s] の範囲でランダムに選んだ時間その場に立ち止まり、

その後新しい目的地を再設定して移動を開始する。歩行者同士は接触しないものとし、進行方向に別の歩行者が存在していてそれ以上移動できなくなった場合、目的地を再設定する。

[評価方法]

手法の性能評価の指標として、ノード n_i に割り当てられたスキャン点 p_k の位置が、ノード n_i の真の位置を表す円の中に存在しているか否かを判定し、正しく存在している割合を調査する。全ノード数に対する正しく割り当てられた数の比をマッチング率と呼ぶこととする。30 秒間のシミュレーション評価を 50 回試し、平均各時刻における平均マッチング率を評価する。

5.2 障害物のない空間を想定したシナリオ

初めに、障害物の全く存在しない空間を対象としたシミュレーションを行う。歩行者数 90 [人]、ビーコン送信間隔を 3.0[s] として、それぞれのマッチング率を 0.1 秒間隔に調査し、50 回のシミュレーションの平均値をグラフ化した。従来手法 [2,3] (ある時刻における通信リンク数によるマッチング (4.2 節)) と提案手法のそれぞれを評価した結果を図 7 に示す。青い線が従来手法でのマッチング率、赤い線が提案手法でのマッチング率を示す。

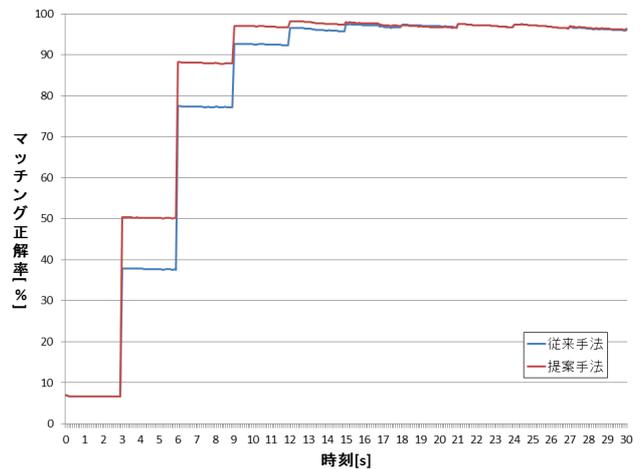


図 7 従来手法、提案手法それぞれのシミュレーション結果

また、提案手法について、歩行者数 90 [人] のまま、ビーコン送信間隔を 1.0s、3.0s、5.0s と変化させて、それぞれのマッチング率を 0.1 秒毎に調査したグラフを図 8 に示す。

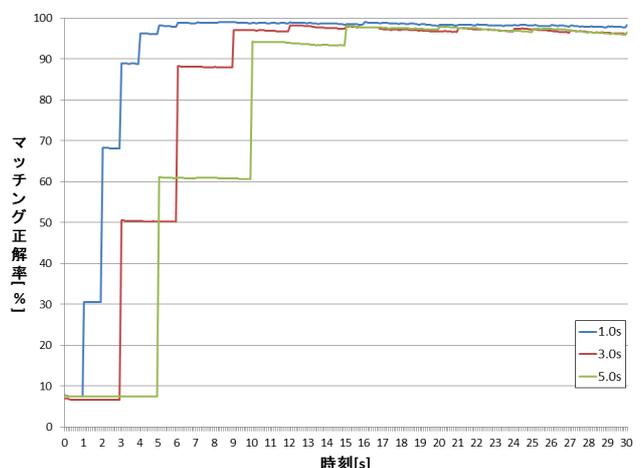


図 8 ビーコン送信間隔毎の提案手法の評価結果

最後に、提案手法について、ビーコン送信間隔を 3.0[s] としたまま、歩行者数を 45 人 ($0.05 \text{ 人}/\text{m}^2$), 90 人 ($0.10 \text{ 人}/\text{m}^2$), 135 人 ($0.15 \text{ 人}/\text{m}^2$) と変化させ、それぞれのマッチング率を 0.1 秒毎に調査したグラフを図 9 に示す。

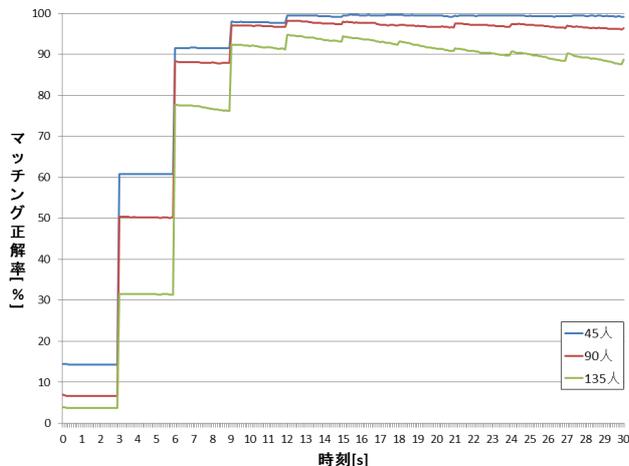


図 9 歩行者数毎の提案手法の評価結果

5.2.1 考察

図 7 から、従来手法、提案手法、どちらの結果でも十分な時間経過によって精度がほぼ 100% に近づいていくことがわかる。これは軌跡全体の乖離度を評価することで、歩行者を見分けることができていると考えられる。一方で、通信リンク数、新しい通信リンク数、失った通信リンク数の 3 項組を評価値として利用し、固有な評価値を持つノードの判別ができるため、時間経過が十分でない状態では提案手法の方が最大で 13% マッチング率が高い。短時間でより多くのノードを識別することは、歩行者の出入りする開空間への拡張を考える際に重要となる。

また、図 8 から、ビーコンの通信間隔を早めると、マッチング率が早く収束するようになることがわかる。しかし、例えば、送信間隔 1s と 3s を比較すると、通信間隔を 3分の 1 にしても収束の速さは 2分の 1 程度にしかなっていない。これは歩行者の移動による通信相手の変化が十分に起こっていないためである。実環境での利用では、ノード特定のスピードと、通信干渉やモバイル端末のバッテリーなどを問題のバランスを考慮した通信間隔を設定することが重要となる。

図 9 から、歩行者の増加によってマッチング精度が低下することがわかる。レンジスキャナの死角が増えることで、正しく検出されない歩行者が増え、見かけの 3 項組の値に誤差が累積するためである。正確な見かけの 3 項組の値を推定することが今後の課題となる。

5.3 障害物の存在する空間を想定したシナリオ

図 10 のように等間隔に $3.6\text{m} \times 1.8\text{m}$ のパネルを 9 個設置した展示会を想定した空間を対象としたシミュレーションを行った。図 10 中の灰色の物体がパネルを表す障害物で、ピンク色の領域がレンジスキャナのスキャン域である。白色の領域はレンジスキャナによって検出されない領域を示している。ビーコン送信間隔は 3.0 [s]、発生させる歩行者 90[人] のケースに対し、マッチング率を 0.1 秒毎に調査した。

5.3.1 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 11 に示す。図中の青い線が従来

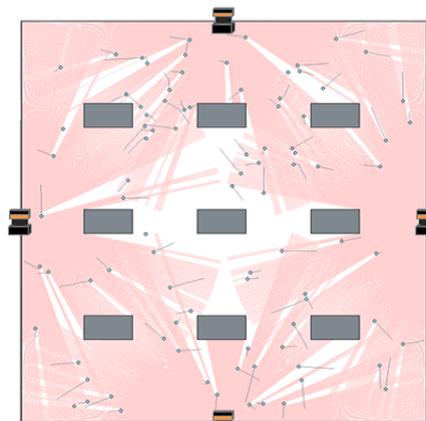


図 10 障害物のあるシミュレーション領域

手法での結果、赤い線が提案手法での結果を示している。

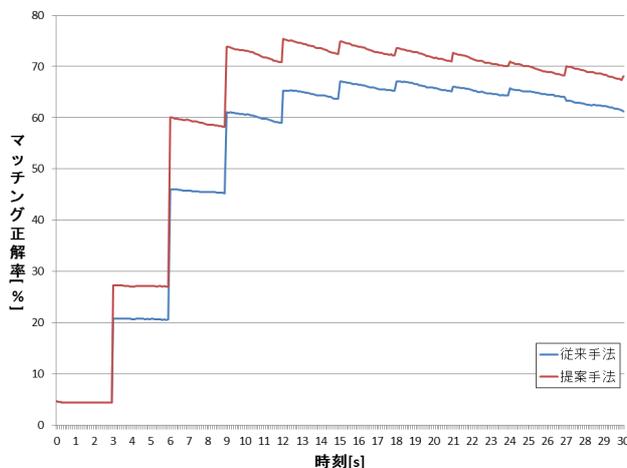


図 11 障害物の存在する空間でのシミュレーション結果

障害物の存在する空間では、レンジスキャナによって検出されない歩行者の数が増加し、全てのスキャン点を正しく取得できず、見かけの通信リンク数が実際の通信リンク数と異なりマッチング精度が低下する。しかし、全体として提案手法の方がマッチング精度は高く、最大で 14% の改善が確認できる。これは、評価値が細分化されている分がうまく働き、正しく検出できている歩行者に対するマッチングが正しく行われたためであると考えられる。提案手法では、障害物が存在する見通しの悪い空間であっても最大 75% 程度の歩行者を正しく識別することができる。スキャンできない領域に存在するノードを予想し、見かけの通信リンクの状態を実際の通信リンクに近づけることが今後の課題になる。

6. おわりに

本稿では、レーザレンジスキャナによる計測と歩行者の持つモバイルデバイス間の短距離無線通信情報を照らし合わせることで、歩行者の位置・移動軌跡を推定する手法について提案した。デバイス間の通信を併用することで、従来のレンジスキャナ計測で課題となっていた、障害物によって対象を連続して計測し続けられない点や、個々の歩行者を判別できない点の克服を目指した。シミュレーション実験による提案手法の性能評価を行い、先行研究で想定していたよりも混雑した空間にて、最大 13% 程度高いマッチング率が得られることを示した。

今後の課題としては、障害物の多い空間や、デバイスを持たない歩行者の混在する環境に対応できるようにアルゴリズムを拡張することや、実機実験による提案手法の有効性の評価が挙げられる。

参 考 文 献

- 1) 北陽電機株式会社：レンジスキャナ (測域センサ) UTM-30LX.
- 2) 木山敦之, 山口弘純, 東野輝夫：レーザレンジスキャナと無線通信を用いた歩行者の移動軌跡推定手法の検討, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集, pp.1221-1229 (2010).
- 3) 木山敦之, 山口弘純, 東野輝夫：ワイヤレスデバイスとレーザレンジスキャナを併用した移動体トラッキング, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.110, No.290, pp.7-12 (2010).
- 4) Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and Liu, J.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, Vol.37, No.6, pp. 1067 -1080 (2007).
- 5) Gu, Y., Lo, A. and Niemegeers, I.: A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks, *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, Vol. 11, No.1, pp.13 -32 (2009).
- 6) Zekavat, S. A.R. and Buehrer, R.M.(eds.): *Handbook of Position Location*, IEEE Press (2012).
- 7) K.A.Redmill, T.Kitajima and U.Ozguner: DGPS/INS integrated positioning for control of automated vehicle, *IEEE International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.172-178 (2001).
- 8) Wikipedia: *Position Sensitive Detectors*. http://en.wikipedia.org/wiki/Position_sensitive_device.
- 9) Molisch, A., Cassioli, D., Chong, C.-C., Emami, S., Fort, A., Kannan, B., Karedal, J., Kunisch, J., Schantz, H., Siwiak, K. and Win, M.: A Comprehensive Standardized Model for Ultrawideband Propagation Channels, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Vol.54, No.11, pp.3151 -3166 (2006).
- 10) *Ubisense*. <http://www.ubisense.net/>.
- 11) Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A. and Webster, P.: The anatomy of a context-aware application, *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '99, New York, NY, USA, ACM, pp. 59-68 (1999).
- 12) Priyantha, N., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The cricket location-support system, *Proc. MobiCom 2000*, pp.32-43 (2000).
- 13) Hazas, M. and Hopper, A.: Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning, *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, Vol.5, No.5, pp.536 - 547 (2006).
- 14) Lim, H., Kung, L.-C., Hou, J.C. and Luo, H.: Zero-Configuration, Robust Indoor Localization: Theory and Experimentation, *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pp.1 -12 (2006).
- 15) Chintalapudi, K., PadmanabhaIyer, A. and Padmanabhan, V.N.: Indoor localization without the pain, *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '10, New York, NY, USA, ACM, pp.173-184 (2010).
- 16) Teixeira, T., Jung, D. and Savvides, A.: Tasking networked CCTV cameras and mobile phones to identify and localize multiple people, *Proceedings of the 12th ACM international conference on Ubiquitous computing*, Ubicomp '10, New York, NY, USA, ACM, pp.213-222 (2010).
- 17) Fod, A., Howard, A. and Mataric, M.J.: Laser-Based People Tracking, *In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, pp. 3024-3029 (2002).
- 18) 李在勳, 金容植, 川田浩彦, 大矢晃久, 油田信一：測域センサを用いたセキュリティーシステムの開発—人物追跡・計数アルゴリズム—, 第24回日本ロボット学会学術講演会, 2B22 (2006.9).
- 19) 中村克行, 趙 卉菁, 柴崎亮介, 坂本圭司, 大鋸朋生, 鈴木尚毅：複数のレーザレンジスキャナを用いた歩行者トラッキングとその信頼性評価 (画像認識, コンピュータビジョン), 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol.88, No.7, pp.1143-1152 (2005-07-01).
- 20) H.Zhao and R.Shibasaki.: A Novel System for Tracking Pedestrians Using Multiple Single-Row Laser-Range Scanners, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, Vol. 35, No. 2, pp. 283-291 (2005).
- 21) 吉川毅：視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発 (第2報)-機能モジュールの開発と自律走行試験-, 北海道立工業試験場報告, Vol.296, pp.113-121 (1997).
- 22) Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Clearing a Crowd: Context-supported Neighbor Positioning for People-centric Navigation, *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Computing (Pervasive '12)* (2012). (accepted).
- 23) Jin, Y., Toh, H.-S., Soh, W.-S. and Wong, W.-C.: A robust dead-reckoning pedestrian tracking system with low cost sensors, *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '11)*, pp.222-230 (2011).
- 24) Rallapalli, S., Qiu, L., Zhang, Y. and Chen, Y.-C.: Exploiting temporal stability and low-rank structure for localization in mobile networks, *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '10, New York, NY, USA, ACM, pp.161-172 (2010).