

軌跡情報とモーションセンサ情報による 位置トラッキング手法の設計と実装

岩本 健嗣^{†1} 小林 亜令^{†1} 西山 智^{†2}

ユーザの位置情報の取得は、ユビキタスコンピューティングにおいて重要性を増している。屋外では、GPS を用いた位置取得手法が確立されており、実際にナビゲーションサービスなどに応用が進められている。しかし、屋内では GPS が利用できないため、様々な手法が考案されている。本研究では、屋内環境のターゲットとして、様々なユーザが訪れる駅や、商業施設などの公共空間を想定する。公共空間では、専用機器の配布が難しかったり、プライバシーの問題が生じたりするなど、利用者が限定可能な家庭やオフィスなどの環境とは、屋内位置取得手法に対する要件が異なる。本研究では、公共空間に特有の要件を、専用機器の非利用とプライバシーとし、これらを満たすために、環境に設置したカメラとユーザが持つ携帯端末を用いた ALTI と呼ぶ屋内位置取得手法を提案する。ALTI は、ユーザが特別な機器を持つ必要がなく、また、個人特定した位置情報を環境が管理することがないため、公共空間での利用に適した手法といえる。本稿では、既存の屋内位置取得手法を公共空間で用いる際の問題点について述べ、ALTI の設計、ならびに実装と評価について述べる。

ALTI: Design and Implementation of Indoor Location System for Public Spaces

TAKESHI IWAMOTO,^{†1} AREI KOBAYASHI^{†1}
and SATOSHI NISHIYAMA^{†2}

Location information of users is crucial for enabling ubiquitous application to adapt users' activities. The most popular way to obtain location information is GPS, which is equipped in a mobile phone and used for actual services such as human navigations. However, GPS cannot be used in indoor due to its nature, i.e. GPS uses radio waves from satellites. Therefore, several systems are developed and proposed as indoor location system. In this paper, we focus on the location system for indoor, especially, public spaces such as a shopping mall, an underground mall and a station where many general public visit. We point out two requirements for indoor location system in public space. First, in public space, we can not expect that all the people in the public spaces carrying

dedicated devices (special device issue). Second, many people do not want to have their location information managed by centralized server (privacy issue). We propose an indoor location system which utilize both a camera installed in the environment and a handheld device with motion sensors that users have. The method, called ALTI (Activity based Location Tracking and Identification), allows a handheld device to estimate each own location. Moreover, our methods prevent other users and environment from getting location information of specific user.

1. はじめに

近年、屋外における位置取得システムとして、GPS が一般的に利用されつつあり、携帯電話を利用したナビゲーション¹⁾ など、実際にサービスとして利用される例も増えている。しかし、GPS は衛星を利用するシステムであるため、地下や建物内では利用が難しい。屋外を想定したユビキタスコンピューティング環境と同様に、屋内を想定したユビキタスコンピューティング環境でも、位置情報の利用に対する要求は高まっている。そのため、屋内でユーザの位置情報を取得するために、様々な手法が考案されている。最も一般的に用いられている方法として、壁や天井などに設置した超音波センサや RF-ID を用いて屋内のユーザ位置を取得する手法がある。これらの手法では、環境側に機器を設置し、ユーザはその機器に対応したタグを持つ必要がある。また、手法によっては、環境に設置された機器で集中的にユーザの位置を把握するため、プライバシーの面において、利用者側が抵抗感を持つことも考えられる。

本研究では、これらの問題を解決するため、ALTI と呼ぶ位置取得手法を提案する。ALTI は、環境にカメラを設置し、画像解析によってその環境に存在する複数のユーザの位置情報を取得する手法である。このカメラによる位置情報だけでは個人特定はできないが、ALTI では、その位置情報を各ユーザの携帯端末に送信し、携帯端末がカメラで得られたユーザの位置情報を軌跡化し、その中から自身の軌跡を判別する。判別は、携帯端末上のモーションセンサを用いて推定する個人の歩行状態と照合することで実現する。本手法では、カメラを用いることで、タグなどの環境専用の機器に依存することがない。また、位置特定は個々

^{†1} 株式会社 KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories Inc.

^{†2} 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology

の端末上で行うため、他人に自身の位置を知られたり、環境に位置情報を管理されたりすることがない。本稿では、ALTIの設計と実装、ならびに評価について述べる。

2. 公共空間と既存の位置取得システム

本研究では、対象とする屋内環境を公共空間とする。公共空間とは、商業施設や駅などの不特定多数が利用する空間のことである。これに対し、オフィスや自宅などは、社員や家族といった特定のユーザのみが利用する空間であり、本研究では、これらを私的空間と呼ぶ。公共空間は、あらかじめ訪れるユーザが特定できなかったり、ユーザとシステム提供者との間に信頼関係が薄かったりするといった、私的空間とは異なる性格を持つ。本章では、まず、屋内での位置取得を目的とした既存のシステムの概要について述べ、次にこれらのシステムを公共空間で利用する際の問題について述べる。

2.1 超音波を用いた位置システム

超音波を用いたシステムとして ActiveBat²⁾ や、InterSense IS-600³⁾ などがある。ActiveBat は、超音波タグの発信機をユーザに持たせ、環境に受信機を設置し、精度の高い位置情報を取得できるシステムである。また、Cricket⁴⁾ では、逆に、環境側に発信機を置き、ユーザは受信機を持つ。この研究では、超音波と無線を同時に発信し、その到着時間差を用いて発信機と受信機の距離を測位する。複数の発信機との距離を利用し、受信機側で位置の測位を行う。

2.2 無線 LAN を用いた位置システム

IEEE802.11a/b/g といった無線 LAN 技術は、オフィスや家庭において LAN を構築するために一般的に利用され普及している。また、多くの PC や PDA などの端末が無線 LAN のインタフェースを備えている。RADAR⁵⁾ では、基地局でユーザの無線 LAN 端末からの電波強度を取得し、複数の基地局で得た電波強度を用いて位置を特定する。Ekahau⁶⁾ では、無線 LAN の電波強度をユーザの持つ端末で計測し、複数の基地局からの電波の強度を取得することで、その場所を特定する。この方式では、あらかじめ環境の詳細な測定を行い、電波強度のマップを作成する必要がある。

2.3 RF-ID を用いた位置システム

RF-ID タグリーダを用いて、近傍、もしくは接触したタグの ID を読み取ることで、位置情報を取得するシステムが考案されている。ユーザが小型のアクティブ RF-ID タグとスイッチを持ち、タグが定期的に送る ID を環境に設置されたリーダによって受信し、リーダ側で位置を把握するシステム⁷⁾ や、逆に、RF-ID リーダを持った携帯電話をユーザが持

ち⁸⁾、環境側に ID タグを埋め込むことで端末側で位置を取得するシステムがある。

2.4 画像認識を用いた位置システム

環境にカメラを設置し、撮影した画像から画像認識を用いて人物の位置を抽出するシステムである。カメラの撮影している座標系から部屋などの空間座標系への変換を行って空間上での位置を特定する。カメラでは不特定多数の物体の位置検出を行い、別途、個人識別を行うことで、個々の位置情報を得る。個人の識別は、顔認識を利用したり、カラーヒストグラムを用いたりすることで行う。たとえば、Easy Living⁹⁾ では、部屋内のユーザの位置をカメラでトラッキングし、あらかじめ登録した個人ごとのカラーヒストグラムを用いて、識別を行う。

2.5 公共空間における位置取得システム

まず、本研究におけるアプリケーションの利用シナリオについて述べる。

「ユーザ A は、洋服チェーン店に入店し、チェーン専用携帯アプリケーションを起動した。ユーザは訪れている店舗名をアプリケーションから選択した。その後、立ち止まって商品を手にとったり、眺めたりしながら店内を歩き、いくつかの商品を購入し、店をあとにした。後日、気になっていたが購入しなかった商品を確認するために、アプリケーションを起動すると、手に取ってチェックした商品が画面に表示され、振り返ることができた。その後、ユーザはネットショッピングでその商品を購入した」。

たとえば、上述のアプリケーションを実現する手段としては、RF-ID を配布するなど、屋内の位置を利用するための機器を配布して、商業施設内での位置情報を使ったアプリケーションなどが提案されている。特に携帯電話を利用する場合、環境で位置を取得した後、個々のユーザに対して、電子メールでプッシュ型の情報配信を行うようなサービスが考えられている。しかし、これを現実的に行えば、必ず RF-ID と、メールアドレスのような個人情報との紐付けが行われるため、結果的に、商業施設側で、個人情報と位置情報のマッピングが可能となってしまう。公共空間では、ユーザがシステム提供者を完全に信用できるとは限らないため、システムが、ユーザ個人を特定できる ID と位置情報を、集中的に管理することはプライバシーに関する大きな問題となりうる。そのため、サーバなどで位置を取得しないか、ユーザ特定のための ID と位置情報は別々に管理するなどして、サーバでは個人を特定しない必要がある。本研究におけるユーザ特定のための ID とは、名前やメールアドレスなどの個人情報とする。

また、このようなアプリケーションを実現するために、専用機器を利用することも考えられるが、私的空間と異なり、公共空間では、あらかじめ利用するユーザを特定できないため、

システム専用の機器やタグを利用する場合は、訪れた利用者によるその場で配布しなくてはならない。これは、ユーザがシステムを利用するつど、その場での対応が必要となってしまうため、現実的ではない。よって、ユーザが専用機器を利用しない手法であることが求められる。

本研究では、上述したシナリオを実現するため、公共空間での位置取得システムを以下の要件で評価する。

- 専用機器の非利用
- プライバシ

超音波を用いたシステムでは、環境に専用の設備を設置し、専用のタグをユーザに配布する必要がある。また、環境に設置した機器側でユーザのタグの位置を取得する場合、タグが実際にどのユーザと対応しているかを登録して管理すると、プライバシーも問題となる。

無線 LAN を用いた手法では、ユーザが無線 LAN 端末を持っていれば、特別な機器を配布する必要がなく、専用機器を配布する必要がない。各端末で自身の位置情報を把握する手法では、システムに個々の位置が管理されるといった問題はない。

RF-ID を用いたシステムでは、リーダを個人が持つ場合、環境にあるタグを読むことで、自身がどのタグの側にいるかを判断することができる。この場合、システムに個々の位置が管理されることはない。しかし、リーダをあらかじめユーザが持っていることは考えにくく、専用機器として配布する必要がある。逆に、リーダを環境に設置する場合、ユーザの持つタグの位置をリーダで読むことによって、システム側で位置を把握する。そのため、超音波などと同様にプライバシーの問題が生じる可能性がある。

画像認識を用いた場合、設置は既存の監視カメラなどを用いることで簡易に行うことができる。またユーザに特別な機器を持たせる必要がない。しかし、画像から個人を識別するためには、顔認識や個人の特徴としてカラーヒストグラムを登録するといった方法が必要となり、公共空間で訪れる客の顔やカラーヒストグラムを登録することは現実的でない。

上記の評価のまとめを、表 1 に示す。

個人の識別に関しては、画像認識を除くすべての手法で行うことができる。しかし、環境で個人識別を行う手法は、環境で個人の ID を管理することになるため、ほぼ正確な個人識別ができる反面、プライバシーの問題をともなう。また、超音波や無線 LAN など、個人機器側で行う場合、自分自身の位置を機器で把握するため、個人識別の必要がない。

専用の機器の非利用と環境による個人識別を行わないという 2 つの要件を満たす位置取得システムとして、無線 LAN によるシステムと画像認識があげられる。無線 LAN によるシステムは、複数の基地局からの電波強度などを用いて、位置情報の推定や計算を行う。よっ

表 1 既存の位置取得システム

Table 1 Existing indoor location system.

	専用の機器	個人識別の主体	動作条件
超音波	利用	個人機器側 or 環境	複数の受信機が到達できる範囲
無線 LAN	利用しない	個人機器側 or 環境	Wifi の基地局からの電波の範囲内 位置情報データベースが必要
RF-ID			
リーダを個人	利用	個人機器	リーダとタグ間の距離が Passive 型では至近距離
リーダを環境	利用しない	環境	Active 型では数十 m
画像認識	利用しない	別の仕組みが必要	カメラで撮影できる範囲

て得られる位置情報の粒度は基地局の設置状況や電波環境によって異なる。そのため、無線 LAN による位置システムを利用する場合、環境内の場所によって粒度が異なってしまう場合がある。この粒度を一定にしようとする、新たな基地局の設置や、電波環境の測定などが必要となる。アプリケーションを実際に提供するプロバイダは、特定の目的に従って位置情報に応じたサービスを提供する。その目的と、必要となる位置の粒度には密接な関係がある。たとえば、前述のアプリケーションシナリオでは、店舗が提供する商品が陳列される標準的な大きさが、粒度の目安となる。この粒度が、ある部分では、商品レベル、ある場所では棚レベルといった、チェーン内の店舗ごとや、店舗内の場所によって異なってしまうと、意図したサービス提供が不可能になってしまう。それに対して画像認識を用いる場合、その精度はカメラで撮影可能な範囲内においておおむね一定の粒度が期待できる。そのため、本研究では、一定の精度を備え、環境による個人識別を行わないシステムとして、画像認識を用いた位置システムを利用する。しかし、画像認識だけでは個人識別を行うことができないため、本研究では、画像認識による位置情報から、携帯端末によって個人位置特定を行う手法として、ALTI (Activity based Location Tracking and Identification) を提案する。

3. ALTI: 個人位置取得手法

本章では、本研究で提案する個人位置取得手法である、ALTI (Activity based Location Tracking and Identification) について述べる。ALTI の概略を図 1 に示す。

ALTI は、環境にセンサを設置し匿名の位置情報を検出する手法として、カメラを用いたトラッキングシステムを利用する。公共空間を想定した場合、監視や防犯目的でカメラが設置されている場合が多く、これらを利用できればあらたな設置コストを抑えることが可能である。また、ユーザが特別な機器を持つことなく、位置情報の取得が可能である。ALTI で

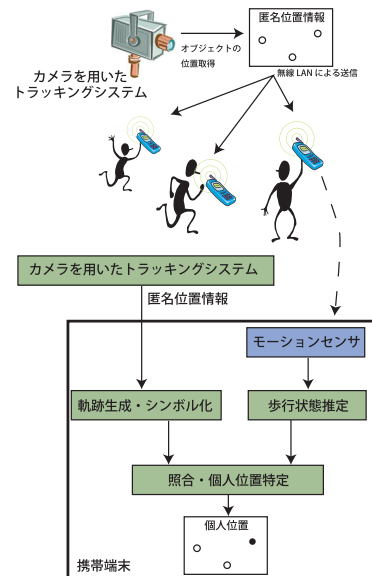


図 1 ALTI の概略
Fig. 1 Overview of ALTI.

は、カメラを用いたトラッキングシステムによって取得されたユーザの位置情報は、環境に設置されたサーバなどが管理する。しかし、カメラを用いる性質上、個人の特定は不可能であり、位置情報そのものは匿名である。匿名の位置情報からの個人の識別は、加速度やジャイロ、地磁気センサなどのモーションセンサを搭載した携帯端末を想定し、モーションセンサから歩行状態を推定することで行う。

ALTI では、カメラを用いたトラッキングシステムから得る複数のユーザの位置情報を、携帯端末に送信する。各携帯端末では受信した位置情報の列から複数ユーザの移動軌跡を生成する。また、同時にモーションセンサを用いて端末所持者の歩行状態を推定し、受信した軌跡と歩行状態を時系列に沿って比較することで、ユーザの軌跡を特定し、現在位置を決定する。そのため、ALTI によって得られる位置の精度は、軌跡を正しく特定できた場合、カメラを用いたトラッキングシステムの精度と同等となる。

携帯端末は、搭載されたモーションセンサのデータから、その携帯端末のユーザのみの歩行状態を推定することができる。そのため、正しく個人の軌跡を識別を行うことができるの

は、その個人の端末のみである。よって、環境や他のユーザに個人特定されたり位置を知られたりすることがなく、プライバシーの問題がない。

また ALTI では、実際にモーションセンサを搭載した携帯電話が発売されていることから、これを携帯端末のターゲットとする。現在、モーションセンサを搭載した携帯電話は必ずしも主流ではないが、MEMS 技術の発展により、センサの小型化、低価格化、省電力化が進んでいる。また、地図のヘディングや、スポーツ、ウェルネスへの応用といったモーションセンサを利用した実際のサービスも登場している。携帯電話を利用すれば、ソフトウェアの配布によって本手法を実現することが可能であり、その公共空間専用の機器を配布するといった必要もなくなると考えられる。

以上によって、ALTI では、画像認識を用いることで、特殊な機器を利用しないという特長を生かしつつ、モーションセンサを用いることで、画像認識だけでは難しい個人の特定を、個人の携帯電話内で他人に知られることなく行い、位置情報応用アプリケーションを利用できる。

ALTI における、個人位置特定の流れを以下に示す。

- (1) ユーザによるアプリケーションの起動などにより、対象となる店舗などの領域が決定される。
- (2) カメラを用いたトラッキングシステムで得られた、環境に存在するすべてのユーザの位置情報を、定期的に携帯端末に出力する。
- (3) 携帯端末は、連続的に受信した位置情報から軌跡を生成し、シンボル化した列として保持する。
- (4) 携帯端末のモーションセンサから得られたデータからユーザの歩行状態を連続的に推定し、時系列に保持する。
- (5) 軌跡と歩行状態を照合し、動き方を比較することで、すべての軌跡から端末のユーザ自身の軌跡を特定する。
- (6) その軌跡の現在位置をユーザの現在位置とする。

本手法では、動きが完全に同期する複数のユーザの位置を特定することはできない。しかし、想定する利用方法は、つねにユーザをトラッキングし続けるのではなく、2.5 節のシナリオで述べたように、商業施設内でのユーザの着目動作などをアプリケーションに通知することにある。そのため、識別できるタイミングで適切な位置情報を取得すること主眼とする。また、2 つの完全に同期するユーザが存在した場合は、複数候補が存在することがあらかじめ認識できるため、アプリケーションに対して誤ったユーザの軌跡を選択するといった

結果は避けられる。

3.1 カメラを用いたトラッキングシステム

本研究では、カメラによるトラッキングシステムを利用すること想定している。これまでカメラを用いてユーザをトラッキングする手法に関する様々な研究が行われてきた。たとえば、カメラを天井から真下に設置すると比較的容易に追跡できるが、天井高とカメラ画角の関係から1台のカメラで追跡できる領域は広くとれない。一方、カメラを水平、あるいは斜めに設置した場合、撮影領域は広くとれるが複数人の追跡を行おうとするとオクルージョンにより追跡精度が下がってしまう。したがってオクルージョンの処理を高精度で行う手法がいろいろ提案されてきた。単一カメラを用いて複数ユーザを追跡する代表的なものに BraMBLe¹⁰⁾ がある。BraMBLe では人間を4つの円をつないだ円筒形にモデル化し、カメラ画像から得られる複数のオブジェクトに対して Bayesian multi-blob tracker を用いてオクルージョン時も安定して追跡を行う。また複数のカメラを使用する場合においても基本的に単一カメラで追跡し、カメラ間の切替えを行う研究や^{11),12)}、複数カメラを用いて追跡する研究も多くある。

本研究では、これらの技術を用いることで、公共空間でも監視カメラのような既存のインフラを用いてカメラによるトラッキングが可能となることを想定する。

3.2 個人位置特定手法

ALTI では、携帯端末が受信した複数オブジェクトの位置情報から、モーションセンサからのデータを用いて、自分自身の位置を特定する。

この手法として、進行方向の加速度を2階積分して移動距離と移動方向を得ることで移動軌跡を算出し、カメラから得られた位置情報による軌跡と比較することで、自身の軌跡を選択する手法が考えられる。この手法では、端末から観測される加速度から重力加速度や進行方向以外の運動加速度を正確に差し引くことが重要になる。しかし、一般的に、携帯端末の保持方法に自由度を持たせると、地表面に対する端末姿勢が変化してしまい、端末から検出される重力加速度方向の推定が困難になる。重力加速度は、進行方向の加速度に対して比較的大きいため、結果として、検出された加速度から重力加速度を差し引いて、歩行方向の加速度を求めると、誤差が大きくなってしまう。本研究では、携帯電話の利用を想定しているため、特定の保持方法を強制することは難しい。そのため、加速度から軌跡を算出することはせず、モーションセンサから得られるデータとカメラから得られる座標情報のそれぞれを限られた状態にシンボル化し、それらを照合する手法を選択した。具体的には、モーションセンサから得られるデータから歩行状態の推定を行う。歩行状態は軌跡と照合するため、

移動の状態を示す、歩行、停止、右折、左折の4つのシンボルとする。同様に、カメラから得られる座標情報もオブジェクトごとに時系列に軌跡として保持し、形状から歩行、停止、右折、左折のシンボルを出力する。これらと比較することで、自身の軌跡を決定する。

カメラから得られる座標情報とセンサデータの間で、完全な時間同期が可能であれば、特定の1点でも自身の軌跡の決定は可能な場合が多い。たとえば、ある1つの軌跡のみが、ほかの軌跡と異なるシンボルを出力した場合、その軌跡シンボルが同時刻のあるユーザの歩行状態と適合すれば、その軌跡はそのユーザのものであることが決定する。しかし、カメラを用いたトラッキングシステムと携帯端末間は無線通信を仮定するため、完全な時刻同期をとることは難しい。そのため、本手法では、軌跡と歩行状態シンボルの算出は、一定時間区間ごとに行い、それらどうしを比較する。比較の結果、歩行状態シンボルと軌跡シンボルが適合した場合、その軌跡の該当区間に対してスコアを加算する。また、時間経過に応じて、各区間に付加されたスコアを減算する。結果として、軌跡ごとにすべての区間のスコアを合算し、現在最もスコアの高い軌跡を自身の軌跡として決定する。この方式によって、幅を持った時間区間ごとと比較し、また長時間軌跡を評価することができるため、厳密な時刻同期ができなくても、自身の軌跡を決定することができる。

4. 実 装

ALTI の実装の概要を図2に示す。本システムは、環境に設置した複数台のカメラと、その映像をもとにユーザの軌跡を出力する“カメラを用いたトラッキングシステム”、センサを搭載した“試作携帯端末”、ならびに“携帯電話”からなる。試作携帯端末は、本来、携帯電話上に実装する機能ではあるが、実際の携帯電話にモーションセンサのデータをアプリケーションで自由に取得可能な機器がないため、携帯電話と bluetooth で通信可能なハードウェアを試作し、一体としてユーザ側機器とした。

4.1 カメラを用いたトラッキングシステム

本システムでは、Vitracom Siteview¹³⁾ と呼ばれる動体検知ソフトウェアを利用し、この出力結果を統合するカメラ統合ソフトを実装した。

利用した Vitracom Siteview は、1台のカメラから取得した画像を分析し、カメラ内の動きを検出する。検出された結果から、ある一定以上の大きさのオブジェクトを動物体として記録する。検知結果を1秒間に5回、カメラ統合ソフトに送信する。

実際の環境において監視カメラなどを利用することを考えると、斜めに設置したカメラや魚眼カメラなどを利用する必要がある。3.1節に述べたような既存の技術を応用すること

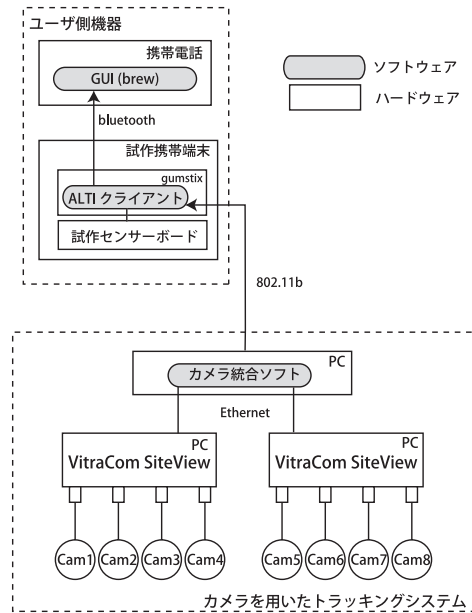


図 2 システム概要
Fig. 2 System overview.

で、可能となると考えられるが、本実装では、トラッキング技術には主眼を置かず、カメラ座標系から空間座標系への変換を簡易化するために、天井にカメラを真下に向けて設置し、カメラ座標と部屋の 2 次元座標がほぼ一致する環境での利用を仮定した。

この実現手法では、1 台の撮影範囲は狭くなるため、環境全体をカバーするために複数台のカメラを利用した。よって、本研究では最大 8 台のカメラ分の VitraCom Siteview の出力を統合するため、カメラ統合ソフトを実装した。カメラ統合ソフトには、複数の VitraCom Siteview から出力された動物体オブジェクトのデータを接続し、単一の座標系にマップする機能を実装した。また各カメラの画像を見ながらキャリブレーションを行い、適切にカメラ撮影範囲を接続する設定ツールを実装した。

カメラ統合ソフトは、統合された座標系内で検出された複数のオブジェクトの位置を、無線 LAN を用いて接続されたネットワークセグメントに対してブロードキャストで送信する。送信間隔は、VitraCom Siteview からの検知結果の通知と同様に 1 秒間に 5 回とした。送

表 2 位置情報フォーマット

Table 2 Format of location information.

カメラ ID	オブジェクトを認識したカメラの ID
メッセージ ID	メッセージの通し番号
時刻	カメラ統合ソフト上の時刻
オブジェクト ID	動物体のシステム上 ID
X 座標 : Y 座標	オブジェクトの位置

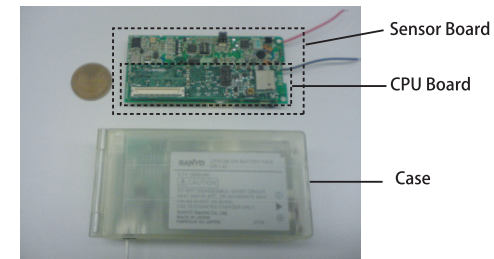


図 3 試作携帯端末の外観
Fig. 3 Mobile device.

信する項目を表 2 に示す。

4.2 試作携帯端末

ユーザの歩行状態を取得するため、モーションセンサを搭載した携帯端末を試作した。携帯端末の外観を図 3 に示す。本携帯端末で、ALTI クライアントを動作させ自身の位置の決定を行う。

携帯端末は、センサボードと CPU ボードからなり、センサボード上にはモーションセンサとして、3 軸加速度センサと 3 軸地磁気センサを搭載した。CPU ボードには、gumstix¹⁴⁾ を利用した。主な仕様を表 3 に示す。

4.3 ALTI クライアント

携帯端末で動作するソフトウェアとして、ALTI クライアントを実装した。ALTI クライアントは、カメラ統合ソフトから受信したオブジェクトの位置情報を処理し、軌跡のシンボル化、ならびに、モーションセンサデータからの歩行状態推定を行う。これらの情報を照合し、自身の軌跡特定を行い、結果を携帯電話の GUI 機能に送信する。

表 3 携帯端末の主なスペック
Table 3 Specification of mobile device.

CPU ボード	CPU	XScale 400 MHz
	OS	Linux 2.6.11
	ネットワーク	802.11b, bluetooth
センサボード	加速度センサ	日立製鋼 H34B
	地磁気センサ	旭化成 AK8971N
	I/O	I ² C

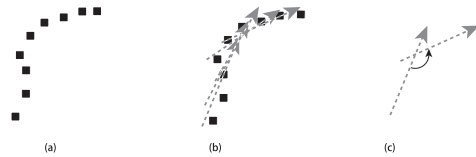


図 4 右左折の判定方法

Fig. 4 Deciding method for turning direction.

4.3.1 軌跡のシンボル化

トラッキングシステムから受信した軌跡データを処理し、軌跡から軌跡シンボルを抽出する。本実装では、600 msec の間、規定の距離以上動かなかった場合を停止と判定した。また右左折識別は、まず、各位置座標から、最小二乗法を用いて 5 点間の直線を導き (図 4 中 (b)), この直線を 5 点前の時点での直線と比較し、角度を求めた (図 4 中 (c))。この角度から、30 度の閾値を用いてカーブであるかどうかの判定を行った。

4.3.2 歩行状態推定

ALTI クライアントでは、モーションセンサとして、携帯端末に搭載された 3 軸加速度と 3 軸地磁気センサを利用し、歩行、停止、右折、左折の 4 種類のシンボル取得を行う。

● 歩行停止判定

一般的に、歩行時には、歩行運動による周期的な加速度の変移が発生する。この性質を利用し、3 軸加速度センサから得られた加速度を二乗和して、FFT (Fast Fourier Transform) で処理し、得られた周波数のパワースペクトルから歩行、停止の判定を行う¹⁵⁾。

実際に歩行を判定するための閾値を決定するため、被験者を用いて行った予備実験の結

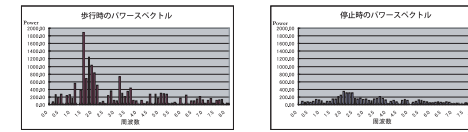


図 5 歩行・停止時のパワースペクトル (左: 歩行時, 右: 停止時)
Fig. 5 Power spectrum (left: during walking right: stop).

果を図 5 示す。

この実験から、歩行時には、1.8–2.2 Hz 付近に卓越周波数が観測され、またその他の周波数とは強さが大きく異なることが分かった。この結果から、本研究では 1.8–2.2 Hz 間と、それ以外の周波数帯の強さを比較し、その比を閾値で判定して、歩行、停止の推定を行う。

● 右左折判定

一般的に、3 軸地磁気と 3 軸加速度の値から重力方向の推定を行い、端末の姿勢を得ることができる。この姿勢情報は、地磁気を用いているため、絶対方位を持つ。そのため端末の特定軸が向いている方位を取得することができる。この方位の変化量を角速度として取得し、一定の角速度を超えた場合に右左折が起きたと判定する。しかし、前述したように、携帯端末の保持方法に自由度を持たせた場合、重力方向の推定は正確に行うことは難しい。本研究では、携帯電話を想定しているため、端末を手に持ち自然に手を振りながら歩いた状態が、最も重力方向の変化が激しい状態と仮定した。その結果、検出される進行方向は、手振り運動の周期に応じて変動することが分かった。そのため方位の変異に対してローパスフィルタを通し、平滑化したうえで角速度を算出し、30 度/秒を閾値として右左折判定を行った。

利用したモーションセンサの測定周期は、加速度データは 128 Hz、地磁気データは、32 Hz である。これらのデータから 16 Hz で端末姿勢の算出を行った。これらは、人間の歩行が 3 Hz 以下の周期運動であることを考えると、十分な頻度であると考えられる。

歩行・停止推定に用いたパラメータを表 4 に示す。

4.3.3 照合機能

照合は、歩行状態とすべての軌跡シンボルを比較し、適合した区間に対して、シンボルの種類によって重み付けされたスコアを加算した。スコアを加算された区間は、時間が経過するごとに一定の比率を乗じて減算することとした。

本実装で利用したスコア付けの重み、ならびに減算方法を表 5 に示す。停止は長時間続

表 4 歩行・停止判定のためのパラメータ

Table 4 Parameters for deciding stop and walking.

サンプル数	256 サンプル
FFT 算出頻度	8 Hz
卓越周波数	1.8 Hz-2.2 Hz
停止閾値	1.3 倍以下
歩行閾値	1.8 倍以上

表 5 スコア付けの重み

Table 5 Score.

カーブ(左右)	2.0
直進	2.0
停止時	0.5
時間による減算	200 ms ごとに 0.95 倍

く可能性があるため、カーブと直進は停止時の 4 倍の点を加算した。

結果として、軌跡ごとにすべての区間の合計スコアを計算し、現時点での最高スコアの軌跡を自身の軌跡として決定する。

4.4 携帯電話を用いた GUI 機能

携帯電話上に BREW を用いて GUI 機能を実現した。携帯電話として、東芝製 W32T を用いた。W32T の Bluetooth によって試作携帯端末と接続し、試作携帯端末から送られるアップデートメッセージを受け取り、GUI 画面にすべてのオブジェクトの位置と、自身と識別したオブジェクトの情報を表示する。

5. 評価

評価としてシミュレータによる実験と、実験環境における 2 つの実験を行い、ALTI の基本性能を評価した。

実験 1 では、シミュレータを用いて、個人の行動パターンと、ユーザ数、センサによる歩行状態の識別率をパラメータとして、ALTI の性能に与える影響を評価し、理論的な ALTI の基本性能を示す。ALTI の手法では、原理的には、まったく同じ行動をとる複数のユーザの区別はできない。しかし、一定時間内において、行動が異なれば、スコアに差がつくことで、識別できる。そのため、この実験では、行動パターン別に、複数ユーザの行動が連続する程度と、そのときの識別率を評価した。

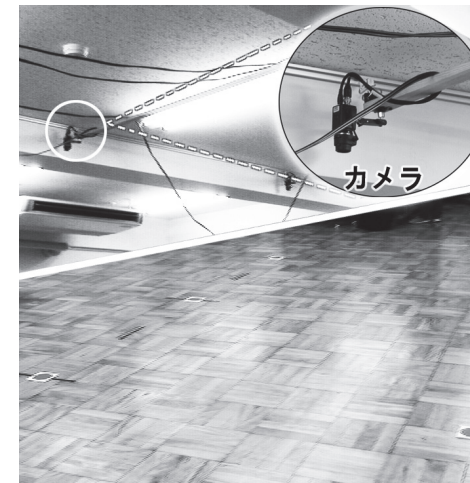


図 6 実験環境

Fig. 6 Experimental environment.

実験 2 では、被験者に歩行、停止、右左折の 4 種類の行動を行わせ、センサによる行動認識とカメラによる軌跡認識の基本性能を評価した。

実験 3 では、4 名に自由に歩行を行わせ、ALTI システムの個人識別率について、統合評価を行い、実験 1 で求めた原理的な性能と比較を行った。

実験環境として、7m × 9m の空間の部屋を用いた。41 万画素のアナログカメラ 6 台を床からの高さ 2.9m の天井に真下に向けて設置した。カメラ 1 台の撮影可能範囲は、床面で約 4.2m × 2.9m である。

実験環境の様子を図 6 に示す。

5.1 実験 1

ALTI における個人識別率は、実際の行動パターンによって影響を受ける。そのため、シミュレータを作成し、行動パターンによる、ALTI の個人識別精度の違いを評価した。シミュレータは、行動パターンと人数を設定すると、その空間における全ユーザによる軌跡パターンを作成する。その後、各ユーザのセンサによって認識される歩行状態を、認識エラーを恣意的に加えて生成し、全軌跡と歩行状態を比較し、該当ユーザを正しく認識する時間を結果として出力する。

表 6 行動パターン
Table 6 Patterns.

パターン	直進割合 (継続時間)	停止割合 (継続時間)	右折割合 (継続時間)	停止割合 (継続時間)
パターン 1	0.25 (2 秒)	0.25 (2 秒)	0.25 (2 秒)	0.25 (2 秒)
パターン 2	0.9 (6 秒)	0.1 (2 秒)	0.0 (0 秒)	0.0 (0 秒)
パターン 3	0.6 (6 秒)	0.2 (2 秒)	0.1 (1 秒)	0.1 (1 秒)

シミュレーションでは、3種類の行動パターンを設定した(表6)。各ユーザはパターンごとに設定した確率に従って、歩行、停止、右折、左折の行動を行うこととし、継続時間後に、前回の行動を除外して、次の行動を決定する。各行動の継続時間は、正規分布に従うものと仮定した。またその際の、平均値は表に示したとおりに設定した。

パターン1では、ALTIにとって最も理想的な行動パターンとして、4つの行動が同確率で起こるパターンを設定した。パターン2は、逆に、最も認識が困難な場合として、ほとんどが直進で、稀に停止が起こるユーザを想定した。またパターン2では、直進後でも、さらに直進を選択することを可能とし、直進が連続する可能性を高く設定した。これにより、最も認識しにくい状況におけるALTIの認識率を評価した。パターン3は、店舗における行動を想定し、設定した。現実に即した状況において、連続した行動パターンが起こる割合と、その際の個人識別率の評価を目的とする。

また、各パターンを評価する際に、センサの認識率に認識エラーを加えてその影響を調査した。具体的には、センサの認識内容は、対象となるユーザの軌跡から生成するが、この際一定の確率で正解とは異なる行動に変更した。認識エラーの起こる確率を0から0.4まで変化させた。各シミュレーションは、行動パターン、ユーザ数、センサ認識率を変化させ、120秒間行った。

結果を図7に示す。グラフ中の凡例は、歩行者数を示す。また、各パターンにおける、同期行動の長さ、ならびに同期行動中の認識率について表7に示す。

認識率は、その設定における全ユーザの認識率の平均を計算した。同期行動時間は、各ユーザの軌跡において、他のユーザの軌跡と同じ行動となった区間の長さの合計であり、全ユーザ間で平均した。また、この同期行動が起こっている区間の認識率を同期中認識率として、全体の認識率とは別に算出した。

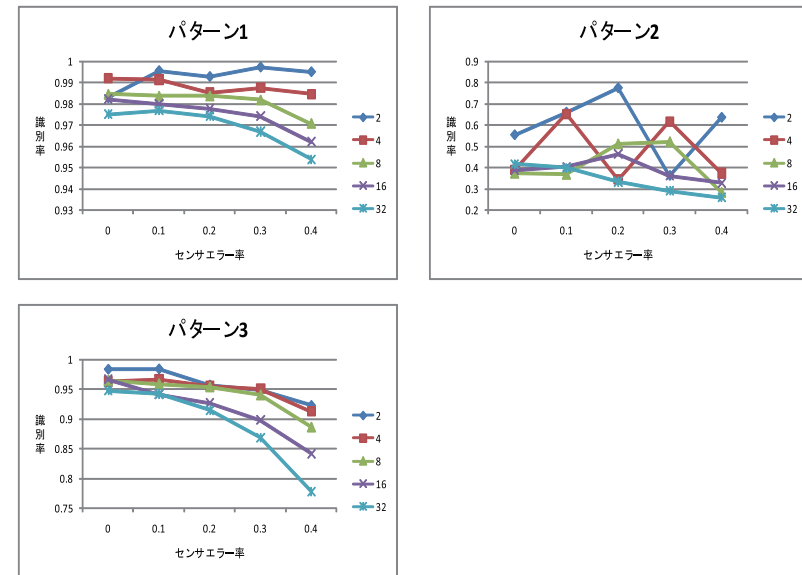


図 7 シミュレーションによる識別率
Fig.7 Simulation results.

表 7 同期行動の長さ、識別率
Table 7 Length of synchronized action and recognition ratio.

パターン	同期行動の長さ(秒)	同期行動中識別率(%)
パターン 1	30 秒	98%
パターン 2	115 秒	44%
パターン 3	69 秒	92%

パターン1では、他のパターンと比較して、最も認識率が良くなり、ユーザ数を32人、センサの認識エラーを0.4とした場合でも、95%の認識率を得ることができた。また、120秒中の同期行動時間は、平均で30秒ほどとなった。

パターン2では、すべてのパターン中で認識率は最悪となった。主な原因は、同期行動時間が平均で115秒となり、個々のユーザには120秒すべてが他の軌跡と同期することもあった。そのため、ほとんど他の軌跡とのスコア差がつかない場合があった。結果的に、特定の行動が高頻度に、長時間選択されるような状況では、十分な精度が得られないことが分

表 8 実験 2 の結果
Table 8 Result 2-1.

	直進	右折	左折	停止
軌跡認識	57.4%	75.7%	70%	92.2%
行動認識	81.8%	94.6%	78.4%	100%

かった。たとえば、単純な曲がり角や、駅の改札口のような多くの人が同じ行動を連続的にとるような環境には、ALTI の適用は難しい。

パターン 3 では、2 割のセンサ認識エラーがあっても、32 人での平均識別率は約 91% のであった。しかし、誤りである約 9% の内訳として、「同スコアの軌跡候補が複数あり認識不能な場合」と、「選択した軌跡が誤っている場合」の 2 つが考えられる。これらを誤りの種別として分けると、約 2.5% が選択した軌跡が誤っている場合であり、残りの約 7% が、認識不能であった。2.5 節で述べたように、本研究で想定するアプリケーションは、つねに正確な位置をトラッキングすることより、商品への着目などのイベントを取得することにある。そのため、識別不能の状態では、アプリケーションに明確な位置情報を出力しないといった処理をすることで、誤った商品を選択するといった誤動作を避けることができると考えられる。

また、センサのエラーの影響は、人数が多くなるほど大きくなり、パターン 3 でも、4 割の認識エラーを前提とすると、32 人の環境における認識率は約 78% となる。このため、実用的な精度を考えるとセンサによるエラーは、2 割程度に抑える必要があることが分かった。同期行動の長さは、120 秒中、平均で約 69 秒となり、半分以上の区間で他のいずれかの軌跡と同期した行動をとっていることが分かる。しかしながら、同期行動中の識別率は、全体の識別率とほぼ同じ、約 92% となった。これにより、ALTI による方式では、同期行動が半分程度の割合で起こっても、それまでの行動によって識別が可能なが分かった。

5.2 実験 2

実験 2 では、前述した実験環境において直進、右左折、停止の 4 種類の行動をユーザに連続して行わせ、その際のカメラによる軌跡の認識率と、センサによる行動の認識率を評価した。認識率は、たとえば、直進動作を被験者に行わせている場合、全区間のうち直進を認識した割合を正答率とした。結果を、表 8 に示す。

これらの結果では、軌跡認識の平均値が 73.8%、行動認識の平均値が 89% となった。また、実験 1 のシミュレータによる評価では、センサの認識内容だけにエラーを加えたが、実際には、センサの行動認識だけでなく、カメラによる軌跡の認識にもエラーは発生する。最

悪のケースを仮定すると、センサの誤認識と、軌跡の誤認識は、完全に別の区間で発生することが考えられ、その場合、シミュレータで設定したエラーは、センサと軌跡の誤認識との合算したエラーと同等と見なすことができる。実験 1 で述べたように、十分な個人識別率を得るために、エラーの合計を 20% 以下に抑える必要があるが、実験 2 での各エラーの平均は、26.2%、11% となり、合計で、37.2% となる。

しかし、直進コースでは、実験環境の都合上、コースの端点で折り返しが入ってしまう。折り返し時に、軌跡認識は停止、右左折を判定してしまうため、結果的にセンサ、軌跡双方の認識率が低くなっている。また、右左折時は、ユーザが、コースを大回りした場合に直線と認識している場合があり、軌跡の認識率が低くなっている。しかし、センサ側の行動認識では、右左折以外ではすべて直進を出力しているため、実際にユーザが直進していることによる認識率の低下と考えられる。これらの部分を除けば、合計でも 20% 程度のエラー率を達成することは可能と考えられる。

5.3 実験 3

実験 3 では、4 人のユーザに自由に歩行させ、それぞれの携帯端末において自身の識別を行い、正答率を評価した。実験環境の物理的な広さの制約のため、本実験では実際には各ユーザは別々に歩行した。4 人分のデータを本実験用に作成したシミュレータで統合し、各ユーザの軌跡が重ならないように仮想的に 1 つの空間に並べ、同時に歩行しているデータを作成して評価を行った。

最終的に得られた仮想空間上での 4 つの軌跡を図 8 に示す。また、各被験者の歩行時間は 50 秒である。

各被験者の携帯端末における正答率を表 9 に示す。

実験 3 では、4 人の平均認識率は、81.5% となる。実験 1 によるシミュレータのパターン 3 と比較すると、2 割の認識エラーを想定しても 15% 程度、理論値より認識率が低いことが分かる。

1 つめの原因として、シミュレータでは考慮されていない軌跡の分断の問題が考えられる。実際の環境による試験では、画像認識のエラーによって、1 度オブジェクトが消えてしまい、軌跡が途切れてしまうことがあった。この場合、新たなオブジェクトが発生し、軌跡が再度生成されるが、スコアが 0 に戻ってしまうため、識別率が下がってしまうことが分かった。2 つめの原因としては、携帯端末とカメラを用いたトラッキングシステムの間、行動認識結果の時間のずれが考えられる。2 つのシステムは、完全に時間を同期することができないため、動作を照合する際にずれが生じ、識別率を理論値より低下させていると考えられる。

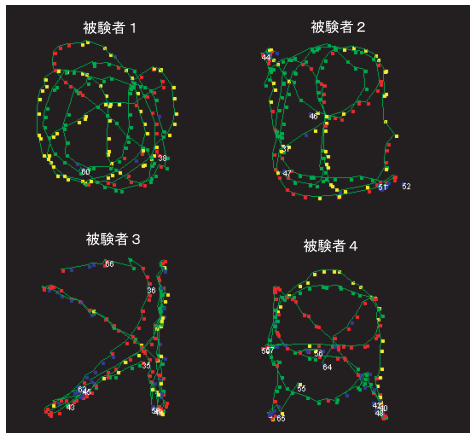


図 8 実験 3: 被験者ごとの歩行コース
Fig. 8 Experiment 3.

表 9 実験 3: 正答率
Table 9 Result 3.

被験者 1	89%
被験者 2	88%
被験者 3	79%
被験者 4	70%

軌跡の分断は、トラッキングシステムに対して、分断した軌跡間を時間と端点の距離を使って接続するような改良を行い、改善できると考えられる。時間同期に関しては、実際の携帯電話へ適用すれば、GPS 衛星から時間情報によって正確な実時間を得ることができる。これを、トラッキングシステムからのデータ内のタイムスタンプと比較することで、改善できると考えられる。

5.4 スケーラビリティに関する評価

ALTI の本実装における、スケーラビリティに関する評価を行った。評価項目として、トラッキングシステムの処理性能、サーバと携帯端末のデータ通信量、センサと全ユーザ軌跡情報による位置特定処理性能の 3 つについて評価した。

本実装で用いたトラッキングシステムは、専用の PC1 台で 4 台のカメラが利用でき、合計で 256 本の軌跡までの追跡に対応している。また、トラッキングシステムから携帯端末

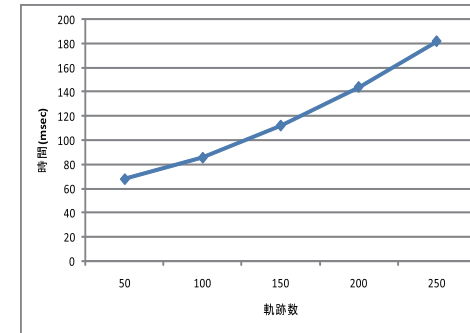


図 9 位置特定処理性能

Fig. 9 Performance of location identification.

には、軌跡 1 つに対して表 2 に示したデータが、1 秒に 5 回の頻度で送信される。1 つのデータ長は、54 byte であり、200 軌跡で、432 kbps の帯域を必要とする。本研究では、無線 LAN を想定しているため、十分に利用可能と考えられる。最後に、携帯端末において、センサデータからの行動推定処理、ならびに、軌跡情報の処理と位置特定処理にかかる時間の合計を、軌跡数を変化させて評価した。結果を図 9 に示す。

最大 250 軌跡で、処理にかかる時間は、約 187 msec となった。本方式では、1 秒に 5 回の位置特定処理を想定しているため、利用した端末の性能では十分であることが分かった。

6. 関連研究

モーションセンサとビデオカメラを用いた個人識別型位置検出手法¹⁶⁾では、本研究と同様に、環境に設置したカメラを用いてユーザを撮影し、ユーザの持つ加速度センサのデータと撮影によって得た位置情報を照合して、個人識別を行う。この研究では、加速度センサのデータから、移動距離や歩数を計測し、カメラの情報との照合を行っている。また、想定アプリケーションが幼児の行動分析であるため、ALTI とは異なり、照合は端末ではなく環境側にデータを集めて、非リアルタイムに行われる。

Azim¹⁷⁾では、環境に設置されたマーカを、ユーザが専用端末を用いて指し示すことで、各マーカからの方位角を求め、確率モデルに従って自身の位置を特定することができる。しかし、ユーザが各マーカを能動的に指し示したり、マーカの色を指定したりするといった入力をする必要がある。

デッドレコニングによる手法¹⁸⁾では、加速度センサを用いて、歩行動作と移動方向を検出することで、位置推定を行うことができる。この手法では、精度を保つためには、重力加速度を検出するために、鉛直方向の変化を小さくする必要があるため、センサの保持方法が体幹に近い位置に制限されてしまうという問題がある。また、誤差が蓄積されてしまい、長時間利用し、歩行距離が長くなるほど大きなずれを生じるため、マップマッチングなどの手法や、他のセンサと組み合わせて推定精度を維持する必要がある。

PlaceEngine 用いた位置履歴取得手法¹⁹⁾では、無線 LAN インタフェースを持つ小型端末や、PC などのクライアントによって、無線 LAN の基地局の ID 情報 (MAC アドレス) と信号強度 (RSSI) を収集する。あらかじめ収集した、基地局 ID と RSSI から位置情報のデータベースを検索し、自身の位置特定を行う。データベースは、多数のユーザ自身が位置情報を登録するで構築される。屋外においては、状況によっては GPS と比肩する位置精度を得られる。また、屋内でも状況によっては十分な精度が得られるが、前述したように、環境によってその粒度が一定しない可能性がある。本研究では、カメラによるトラッキングシステムによる位置検出を利用するため、一定の粒度が期待できる。

7. おわりに

本研究では、環境に設置したカメラから得られた複数のオブジェクトの位置情報から、携帯端末によって各ユーザ自身の位置を特定する手法として ALTI を提案した。ALTI は、公共空間での利用を考慮し、特定の機器やタグの配布を前提としない位置システムである。また、ALTI は、環境からは個人の位置を特定できないため、公共空間などユーザにとって信用できない場所でも、よりプライバシーに配慮した手法として利用することができる。本稿では、シミュレーションを用いた評価によって、複数のユーザが同期して行動する場合でも、その前後の行動の違いから識別が可能であることを示した。また、実環境での実験により、実際の識別率について評価を行った。今後は、識別率向上のために、軌跡が切断された際の接続処理や、時間同期の精度を向上させ、識別率の向上を図りたい。また、直進、停止、右左折の 4 種類の行動をもとに設計しているが、たとえば、折り返しのような特異な動きを加えた場合についても、今後、検討を行う。さらに、実際の店舗などの実環境での実証実験などを行い、有用性についても検証を行いたい。

参 考 文 献

- 1) Arikawa, M., Konomi, S. and Ohnishi, K.: Navitime: Supporting Pedestrian Navigation in the Real World, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.6, No.3, pp.21–29 (2007).
- 2) Harter, A., Hopper, A., Steggles, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Mobile Computing and Networking*, pp.59–68 (1999).
- 3) InterSense: IS-600. <http://www.isense.com/products/prec/is600/>
- 4) Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications, *Proc. 7th ACM MOBICOM* (2001).
- 5) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *INFOCOM (2)*, pp.775–784 (2000).
- 6) Ekahau: Ekahau RTLS. <http://www.ekahau.com/?id=4200>
- 7) NTT ドコモ: R-クリック. http://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/page/20030929b.html
- 8) KDDI: ニュースリリース. http://www.kddi.com/corporate/news_release/2005/0324/index.html
- 9) Brumitt, B., Meyers, B., Krumm, J., Kern, A. and Shafer, S.A.: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, *HUC*, pp.12–29 (2000).
- 10) Isard, M. and MacCormick, J.: BraMBle: A Bayesian Multiple-Blob Tracker, *Proc. 8th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'01)*, Vol.2, pp.34–41 (2001).
- 11) Cain, Q. and Aggarwal, J.: Automatic tracking of human motion in indoor scenes across synchronized video streams, *The 5th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'98)* (1998).
- 12) Khan, S., Javed, O. and Shah, M.: Tracking in Uncalibrated Cameras with Overlapping Field of View, *The 2nd IEEE Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance*.
- 13) Vitracom: Siteview. <http://www4.kke.co.jp/siteview/>
- 14) Gumstix Inc.: Gumstix. <http://gumstix.com>
- 15) 旭化成エレクトロニクス: 歩数演算装置, 特開 2005-157465 (2005).
- 16) 河合 純, 永田章二, 清水宏章, 新谷公郎, 金田重郎: モーションセンサとビデオカメラを用いた個人識別型位置検出手法, 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会 2004-UBI-5 (2004).
- 17) Iwasaki, Y., Kawaguchi, N. and Inagaki, Y.: Azim: Direction Based Service using Azimuth Based Position Estimation, *Proc. 24th International Conference on Distributed Computing Systems*, Tokyo, Japan, pp.700–709 (2004).
- 18) Kouroggi, M. and Kurata, T.: Personal Positioning based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera, *Proc. ISMAR03*,

pp.103-112 (2003).

19) 曆本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: PlaceEngine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤, インターネットコンファレンス, pp.95-104 (2006).

(平成 20 年 7 月 7 日受付)

(平成 21 年 1 月 7 日採録)



岩本 健嗣

1975 年生. 2000 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了. 2005 年慶應義塾より博士 (政策メディア). 現在, (株) KDDI 研究所 Web データコンピューティンググループ研究員. ユビキタスコンピューティング, 屋内位置情報, センサ応用アプリケーション等の研究に従事. 電子情報通信学会会員.



小林 亜令 (正会員)

1973 年生. 1996 年北海道大学工学部電子工学科卒業. 1998 年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年 KDDI 株式会社 (当時 KDD) 入社. 現在, (株) KDDI 研究所特別研究員. XML, SVG, 通信放送融合技術, センサデータ解析技術, ITS 等の研究開発に従事. 情報処理学会誌 SWG 幹事.



西山 智 (正会員)

1961 年生. 1984 年東京大学工学部電気工学科卒業. 同年国際電信電話 (現 KDDI) (株) 入社. 1991 年米国テキサス大学オースチン校計算機科学科修士課程修了. 現在, 独立行政法人情報通信研究機構委託研究グループ参事. この間, データベース, ネットワーク管理, ITS, エージェント通信, ユビキタス通信システムの研究に従事. 平成 17 年度本学会山下記念賞受賞. 電子情報通信学会会員.