

歩行の始点終点座標と建物外形を利用した屋内歩行軌跡推定方式の提案と評価 Indoor Tracking Based on Pedestrian Dead Reckoning Using Building Shape

秋山 高行[†] 鴨志田 亮太[†] 林 秀樹[†] 佐藤 暁子[†]
Takayuki Akiyama Ryota Kamoshida Hideki Hayashi Akiko Sato

1. はじめに

加速度センサなどの高精度なセンサを搭載したスマートフォンの急速な普及を受け、位置情報サービス市場が拡大している。従来の携帯電話向け地図・ナビゲーションサービスに加え、位置情報を基軸にしたコミュニティ系サービス、AR (Augmented Reality) 系サービスなど国内外において適用サービス分野の多様化が進んでいる。

特に、作業者の移動履歴を収集・把握・分析することにより、作業行動の効率向上や作業者の安全確認、トラブル対応、作業計画の最適化を行う、などといった移動履歴を活用するサービスに注目が集まってきている。

これまで、屋外における測位サービスは、端末が搭載する GPS (Global Positioning System) による位置測位をベースに実現されてきた。しかし、近年、測位手法の多様化が進み、GPS 信号の届かない屋内における常時測位が可能となりつつあり、建物内や地下街などに対象範囲を広げたサービスが提供され始めている。

建物内や地下街のような GPS による測位が利用不能である場合の測位技術は、2つの方式がある。1つは、測位機器を環境側に設置することで測位する“環境測位”と、環境側には一切機器を設置せずに歩行者の携帯する端末のみで測位する“歩行者自律測位”である。

“環境測位”では、測位機器の発する信号を受信し、信号強度や信号到達時間を利用して、測位機器との距離を算出し、受信者の絶対位置を推定する。近年、無線 LAN の利用が活発化しており、無線 LAN の電波強度を利用した環境測位方式が注目を集めているが、無線 LAN の電波は揺らぎが大きいと、位置情報サービスに十分な測位精度を得るためには、設置台数を増やすか、無線 LAN の電波強度を事前に測定し、フロア内の電波強度分布を学習しておく、などの手法がある。これらの方式では、利用者側の運用コストがかかることが問題となってしまう。一方、“歩行者自律測位”は、既知の位置からの相対位置を、歩行者が携帯する端末内蔵センサから得られるデータによって連続的に推定することで、現在の位置を推定する測位方式である。環境側へのコストが発生しないため、汎用的な屋内測位への適用が見込まれているが、相対位置の推定方式であり、前状態の誤差が後の状態で累積するため、基点座標を与える必要がある。

本研究では、建物内の人間の移動軌跡を大量に長時間収集することを目的として、一般的に入手可能な情報のみを利用する汎用的な屋内測位方式を提案する。従来では除去困難であった歩行者特性や環境に依存するセンサノイズを、web など公開されている建物情報を利用して除去することで歩行軌跡を推定する。歩行実験によって提案方式を評価し、8人の歩行者の2日間のデータに対して、歩行距離 220m における推定誤差平均 4.47m を達成し、歩行者特性や環境変化に対して頑健な汎用性の高い方式であることを確認した。

2. 関連研究

屋内における測位技術には、前述したように、大きく分けて2種類の方式が存在する。1つは、測位機器を環境側に設置することで測位する“環境測位”と、環境側には一切機器を設置せずに利用者の携帯する端末のみで測位する“歩行者自律測位”である。

“環境測位”では、無線 LAN や UWB (Ultra-Wideband: 超広帯域無線)、DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications: デジタルコードレス電話規格) を測位機器として利用するネットワークベース方式がある [1][2][3][4][5][6][7]。これらの方式では、測位機器の発する信号をユーザが携帯する端末が受信する。受信した信号強度は、測位機器からの距離に応じて変化するため、測位機器の設置位置と受信強度からユーザの現在位置を推定する。このような方式を利用する利点は、ユーザは端末の信号受信を常時実施する必要がなく、自己の位置が必要な場合のみ、測位信号を受信すればよい。しかし、その一方で、測位機器以外からの電子機器が発する無線信号が誤差を引き起こし、また、建物内の壁による信号の反射や散乱によって、受信する信号がマルチパスで到達するために、信号強度と距離の関係に誤差が大きく生じ、測位精度を著しく低下させる、といった問題が存在する。精度以外にも、測位機器の設置コストや維持管理コストがかかるといった費用面での問題もある。また、磁気センサやレーザセンサ、超音波センサ、赤外線センサや気圧センサの変化量などを絶対座標と 1対1 に対応づけて、位置を計測するセンサベース方式もある [8][9][10][11]。これらの方式では、前述のような測位誤差はほとんど生じないが、センサと座標が 1対1 に対応しているため、カバーエリアを広げるほど、設置・維持管理コストが増大するという問題がある。

一方、“歩行者自律測位” (Pedestrian Dead Reckoning) は、既知の位置からの移動分を、移動体が携帯する加速度センサ、角速度を計測するジャイロセンサ、方位センサから得られるデータによって連続的に推定することで、現在の位置を推定する測位方式であり、移動速度/距離を推定する技術と、移動方向を推定する技術により構成される [12][13][14][15][16][17]。技術課題は、歩行者の移動距離の推定・積算による誤差の除去と、センサの姿勢 (方位) 角の推定誤差の除去、の二つである。人間の歩行動作は高度に統制された運動であるため、人に装着されたセンサ群から得られる出力データに含まれる歩行固有の特徴的なパターンに着目することによって、歩行動作を検出することが可能である。携帯端末のみで測位可能で、環境側の設置コストは少ない一方、過去のセンサデータの誤差がその後の測位結果に累積するため、安定した測位を行うためには、累積誤差の除去が大きな課題となっている。また、歩行者による歩行パターンの違い、地磁気の乱れ、ジャイロセンサの温度特性などによる様々な要因による誤差が存在することも問題となっている。

従来では、歩行者自律測位が前提とするセンサ群を一般ユーザが携帯する状況が無かったため、環境測位によるアプローチが主流であった。しかし、近年のスマートフォンの急速な普及を受け、歩行者自律測位を利用して、測位インフラ構築コストを大幅に低減した高精度な測位を提供することが実現性を帯びてきている。

測位環境構築コストを下げ、十分な測位精度を実現するために、歩行者自律測位の汎用性と精度を向上する方式が、いくつか提案されている。Woodman ら[20]は、無線 LAN による測位結果を、建物図面を利用したパーティクルフィルタによって補正し、さらに、足に装着したセンサを利用した高精度な歩行者自律測位によって得られる歩行軌跡形状と建物図面より得られる通路形状とを合致させることによって、建物内の絶対座標を推定する方式を提案している。また、Robertson ら[23]は、複数の歩行者が足に装着するセンサによって得られる測位結果から、自動的に建物図面を生成し、歩行者自律測位に利用する方式を提案している。これらの方式では、センサを足に装着するため、実際の装着仕様とかけ離れており、また、建物内の通路形状や無線 LAN 電波状況の事前測定、他の多数の歩行者の情報が必要とするため、様々な環境に汎用的に利用できる方式ではなかった。

本研究では、歩行者の歩行環境へ機器を設置せず、また、環境に関する詳細な情報を得ずに汎用的に測位サービスを提供することを目的として、“歩行者自律測位”に基づき、歩行環境に依存する誤差を自動的に除去するアプローチを取る。本論文では、汎用的な Android 端末を使用し、建物に関する一般的に入手可能な情報のみを利用して、場所や日時に依存するセンサノイズを事前学習なしに除去することでフロア内水平方向の歩行軌跡を推定する方式を提案する。次章以降にて詳細に説明する。

3. 提案方式

3.1 従来の課題と屋内で利用可能な建物情報

歩行者自律測位に基づく歩行軌跡推定には、少なくとも 1 つの既知の座標が必要である。既知の座標に対して、加速度センサとジャイロセンサによって、歩行速度と歩行方向を推定し、位置座標を時々刻々更新する。そのため、各時刻の座標の誤差が累積し、歩行軌跡の終点座標の誤差が大きくなる。こうした累積誤差を除去するために、歩行軌跡に関する情報を活用する工夫が必要である。まず、端末装着者の建物内での歩行について考察し、歩行軌跡推定に活用可能な情報を整理する。

建物内を移動する歩行者の場合、建物外から建物内へ入場→建物内移動→建物内から建物外へ退場、の 3 通りの移動となる。さらに、建物内の移動は、フロア内水平

方向の移動と、フロア間鉛直方向の移動に分けられる(図 1)。

歩行者の場合、建物入場・退場の時刻は GPS 信号の減衰などにより抽出することが可能であり、また、入口の座標を事前に入手可能である。建物内では、フロア間移動の歩行パターンとフロア内移動の歩行パターンでは異なるため、フロア内水平方向とフロア内鉛直方向の切り替え点の時刻は推定可能である[24]。フロア内の階段やエレベータの位置は、フロアマップなどで提供されており、入手可能である。そのため、本研究では、フロア内移動の始点(入場点)と終点(退場点)の座標が既知であるものとする。そのため、本研究で構築する屋内歩行軌跡推定システムは、図 2 のように、建物入退場・フロア間の垂直方向移動を検知する処理部と、フロア内の水平方向の移動を推定する処理部によって構成される。本論文では、フロア内の水平移動の推定方式について述べる。

歩行軌跡推定誤差には、端末に起因する誤差と、端末装着者に起因する誤差、環境に起因する誤差が考えられる。ジャイロセンサには、温度に依存する一定値の誤差(ジャイロドリフト)が存在することが知られており、温度は環境に依存する。また、磁気方位センサは、鉄筋などの環境側の磁場の変化の影響を非常に受けやすい。本研究では、環境起因の誤差を除去するために上記の情報を利用する方式について述べる。

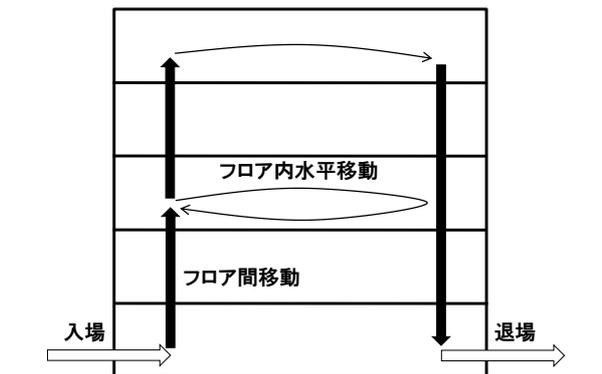


図 1. 建物内歩行の概要

3.2 歩行の始点終点と建物外形を利用する方式

3.2.1 歩行距離の算出方式

まず、本研究の歩行速度の算出方式について述べる。

Android 携帯に搭載されている 3 軸の加速度センサから歩行周期を検出し、ピッチ(歩数/時)を取得し歩行状態及び歩数を検知する方式を利用した。本研究の歩行解析では、歩数のみを推定し、以下の関係式を利用することで、歩行速度に応じた歩幅の調整を実施している。

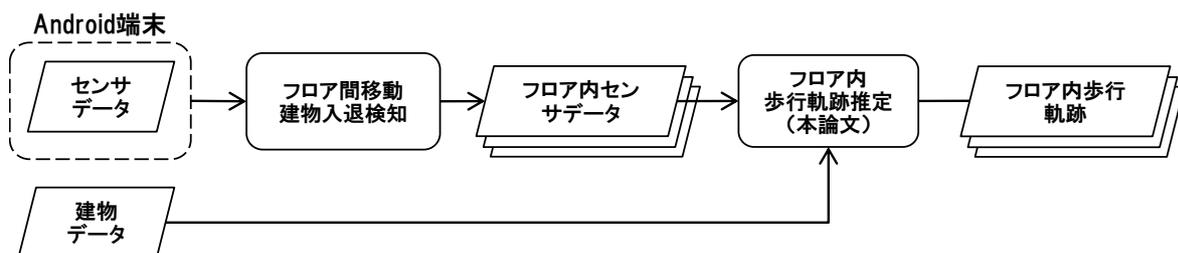


図 2. 屋内歩行軌跡推定方式の構成

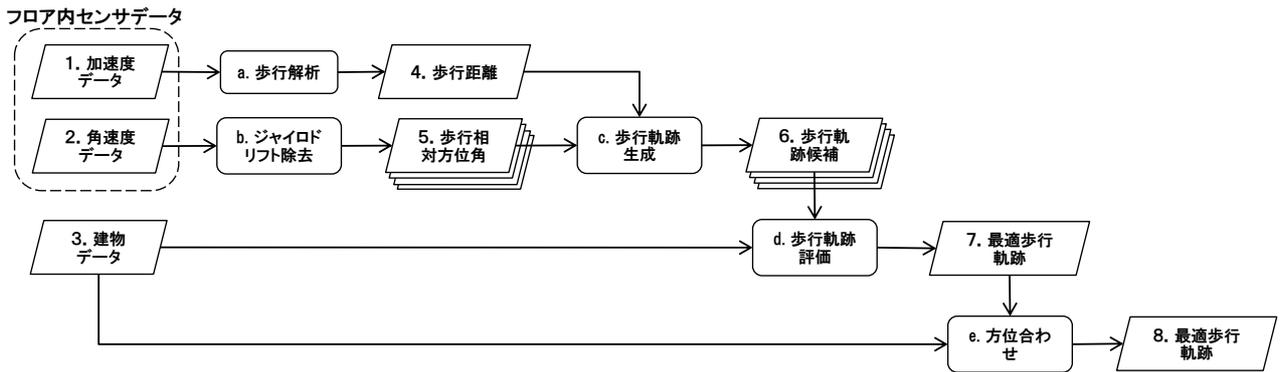


図 3. 歩行の始点終点座標が同一の場合の推定方式

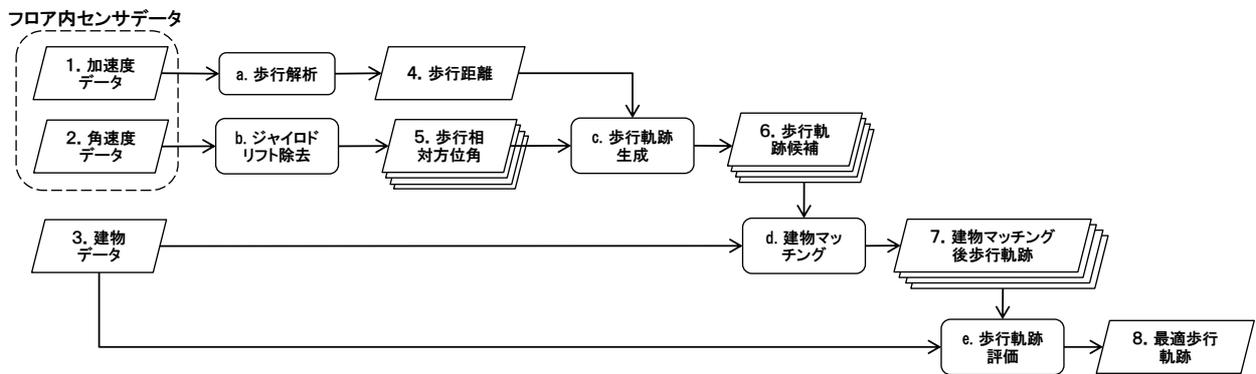


図 4. 歩行の始点終点座標が異なる場合の推定方式

$$v_t(s) = s \cdot p_t - 0.1 \quad \dots (1)$$

v_t は、時刻 t における歩行速度であり、 s は、平均的な

歩幅を表す定数で、本方式では 0.4 を利用した。 p_t は、時刻 t におけるピッチ（1 秒当たりの歩数）を表し、加速度センサによって推定される推定値である。 端末を腰や足などに固定して装着した場合には、歩数の推定精度は 97% 程度であり比較的容易であるが、歩幅や歩行速度の推定は困難であることが知られている。

3.2.2 始点終点が同一の場合

まず、始点と終点の座標が同一の歩行軌跡の推定方式について述べる。 本研究では、端末を固定装着し、歩行解析の歩数推定の誤差は小さいとみなし、既知の始点座標を利用して推定した歩行軌跡の終点座標値と、正解歩行軌跡の終点座標値との誤差は、ジャイロセンサの誤差によるものと近似する。 そのため、ジャイロセンサの環境起因の誤差を除去することによって、真の終点座標値と推定した終点座標値との誤差を最小にする。 つまり、以下の式で表わされる誤差関数 E を最小にするジャイロドリフト d を選択する。

$$E(d) = |EP - EP(d)| \quad \dots (2)$$

EP は、歩行軌跡の終点座標の正解値、 $EP(d)$ は、ジャイロドリフト d を除去したときの推定歩行軌跡の終点の座標値である。

あるジャイロドリフトの値を設定し、相対方位から除した歩行軌跡は以下の式で表わされる。

$$x_t(d) = x_0 + \int_0^t v_t \cdot o_t(d) dt \quad \dots (3)$$

x_t は、時刻 t における推定座標であり、 v_t は、時刻 t における推定歩行速度、 o_t は、時刻 t におけるジャイロドリフト d を除去後の推定歩行方向ベクトルである。

歩行軌跡の絶対方位については、歩行軌跡を既知の始点について回転する場合に、推定した歩行軌跡の建物内の割合が最も大きくなる角度に回転する。 つまり、以下の式で計算される値を最大にする θ を選択する。

$$E_{\text{building}}(\theta) = \frac{L_{\text{within}}(\theta)}{L_{\text{all}}} \quad \dots (4)$$

$L_{\text{within}}(\theta)$ は、推定歩行軌跡を、始点を中心として回転角 θ だけ回転したときの歩行軌跡の建物内に存在する長さであり、 L_{all} は、推定歩行軌跡の全長である。

(3) を満たす θ が複数存在する場合は、平均値を取ることにする。 本方式の全体の処理の流れを図 3 に示す。

3.2.3 始点終点異なる場合

次に、始点座標と終点座標が異なる歩行軌跡の推定方式について述べる。 この場合、始点座標と終点座標の距離の誤差には、歩行距離の誤差と歩行方向の誤差が含まれる。 歩行距離の誤差は、正解軌跡の始点終点の距離を利用して補正し、絶対方向についても同様に補正する。

つまり、以下のように、ジャイロドリフト除去後の歩行軌跡を補正する。

(2) 式で算出される推定歩行軌跡を、既知の歩行軌跡の始点終点座標を用いて拡大/縮小する。

$$\mathbf{x}_t(\mathbf{d}) = \mathbf{x}_0 + \frac{|\mathbf{y}_{\text{end}} - \mathbf{y}_0|}{|\mathbf{x}_{\text{end}} - \mathbf{x}_0|} \int_0^t \mathbf{v}_t \cdot \mathbf{o}_t(\mathbf{d}) dt \quad \dots (5)$$

さらに、既知の始点・終点座標を利用して、方向変換する。 $\mathbf{R}(\delta)$ は、回転行列である。

$$\mathbf{x}_t(\mathbf{d}) = \mathbf{x}_0 + (\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_0) \mathbf{R}(\delta) \quad \dots (6)$$

$$\cos \delta = (\mathbf{x}_{\text{end}} - \mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{y}_{\text{end}} - \mathbf{y}_0) \quad \dots (7)$$

最終的に、上記の過程で推定した歩行軌跡が、最も建物内に存在し、かつ、最も全長が長くなるジャイロドリフト値を選択し、推定結果とする。つまり、以下の式で算出される値を最大にするジャイロドリフト値を選択する。

$$E_{\text{building}}(\mathbf{d}) = \frac{L_{\text{in}}(\mathbf{d})}{L_{\text{all}}} \quad \dots (8)$$

全体の処理の流れを図4に示す。

次節で、提案方式の評価結果について述べる。

4. 評価実験

4.1 データセットと評価方法

まず、測定環境、実験経路、測定機器を表1に示す。端末は、図5のように、歩数を検知しやすくするためベルトに固定して腰回りに装着した。実験は、端末を装着した測定者が建物内を歩行し、装着した端末から得られるセンサーデータと歩行経路の始点終点座標、建物外形情報によって、歩行軌跡を推定する。推定結果を評価しやすくするため、歩行者には予め決められた経路を歩行してもらった。歩行経路は、歩行者自律測位方式の推定誤差が歩行経路長や歩行経路における屈曲点に依存するため、単純な経路と複雑な経路の2パターンを始点終点座標が同一の場合と異なる場合のそれぞれについて用意した。また、本方式の歩行者特性への依存性と歩行環境の影響を評価するために、8名の歩行者の異なる日の歩行データを収集した。

歩行環境である日立製作所中央研究所内の建物の外形図を図6に示す。中央の長方形部分が5階のフロア図であり、参考のため、壁などの構造物の情報も掲載している。本論文では、5階フロア図ではなく、一般的に公開されている建物外形情報のみを利用している。

歩行軌跡の推定精度を評価する指標として、各時刻の歩行軌跡が正解軌跡とどれほどずれているのかを定量的に評価した。実際に歩行した正解経路と推定経路の各時刻における誤差の平均値によって算出した。各時刻の正解座標は、歩行解析による歩数の推定精度が100%と仮定して、各時刻の累積歩数と総歩数から算出した。

表1：実験条件

場所	(株)日立製作所 中央研究所 (20m×60m)
日時	2011年12月19日 10:00-17:00 2011年12月22日 10:00-17:00
歩行者	中央研究所研究者8名
経路	単純経路2パターン(1, 2)と 複雑経路2パターン(3, 4)
端末	Samsung GALAXY S II (ベルトに固定)



図5 端末装着様式

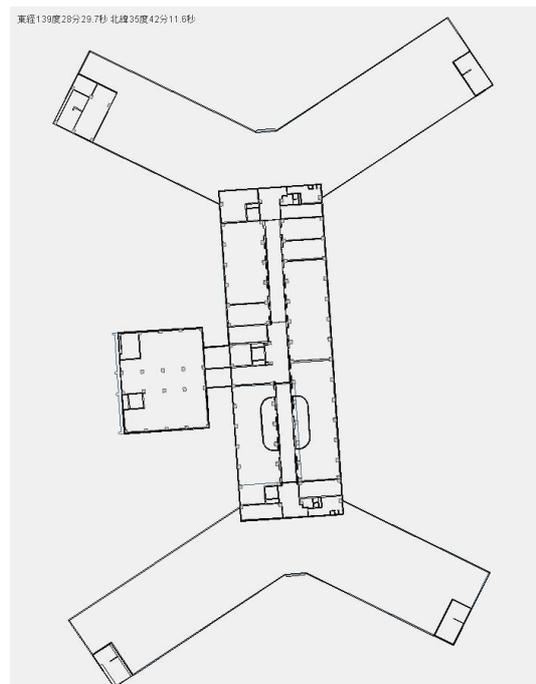


図6 歩行環境の外形図
(中央の長方形が5階フロア, 20m×60m)

4.2 評価結果

歩行軌跡の始点・終点が同一である場合の歩行軌跡推定方式の評価結果について述べる。

始点・終点座標が同一である経路 1 と 3 の歩行軌跡推定結果を図 7, 8 に示す。推定軌跡の形状から、始点・終点座標を利用することによって、ジャイロセンサの誤差を除去できていることが分かる。一方、絶対方向に関しては、経路 1 のようなフロア内を短く歩行するような軌跡では、方向合わせ時に複数の解が発生してしまうために、正しい方向に合わせることができない。しかし、経路 3 のように、フロア内を十分に長く広く歩き回る場合には、推定された歩行軌跡がフロア内に収まる方向の範囲が狭くなるために、推定精度が上がる。また、経路 1, 3 双方において、歩行距離の誤差が乗っていることがわかる。始点・終点座標が同一である場合には、歩幅を一定値として算出しているためである。

次に、歩行軌跡の始点・終点座標が異なる場合の歩行軌跡推定方式の評価結果について述べる。

始点・終点座標が異なる経路 2 と 4 の歩行軌跡推定結果を図 9, 10 に示す。始点・終点座標を利用することによって、ジャイロセンサの誤差を推定できることが分かる。また、始点・終点座標の方向成分を利用することで絶対方向に関する推定も推定できているため、精度が歩行軌跡の始点・終点座標が異なる場合では推定精度が向上することがわかる。さらに、始点・終点座標には、歩行距離に関する情報も含まれているため、歩行方向のみならず、歩行軌跡の長さについても補正する効果があることも推定精度向上の要因である。

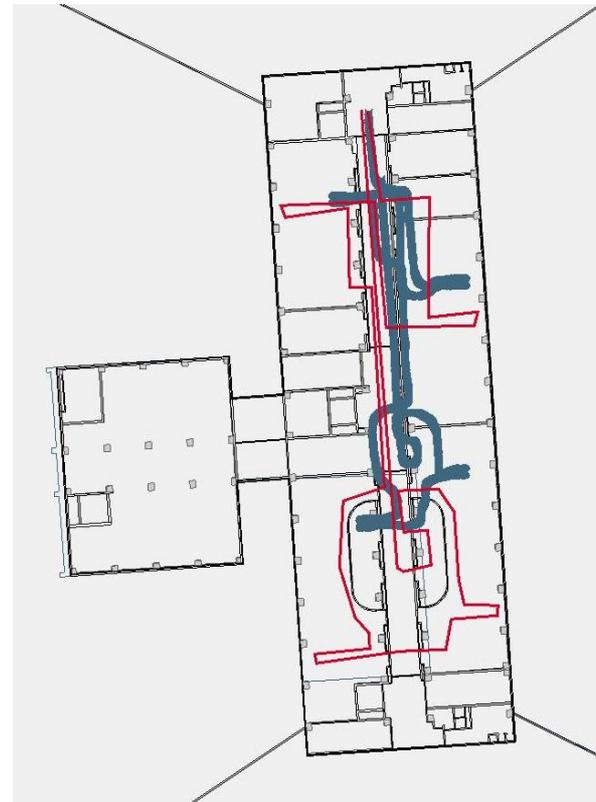


図 8 経路 3 の推定結果
(赤線：正解経路, 青線：推定軌跡)

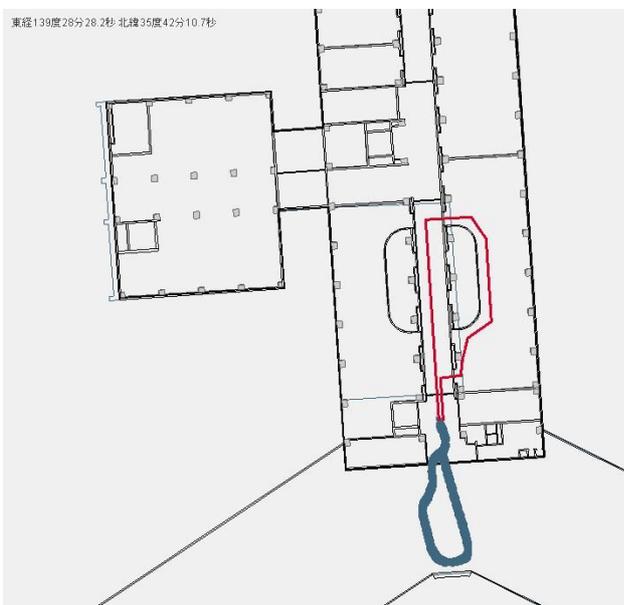


図 7 経路 1 の推定結果
(赤線：正解経路, 青線：推定軌跡)

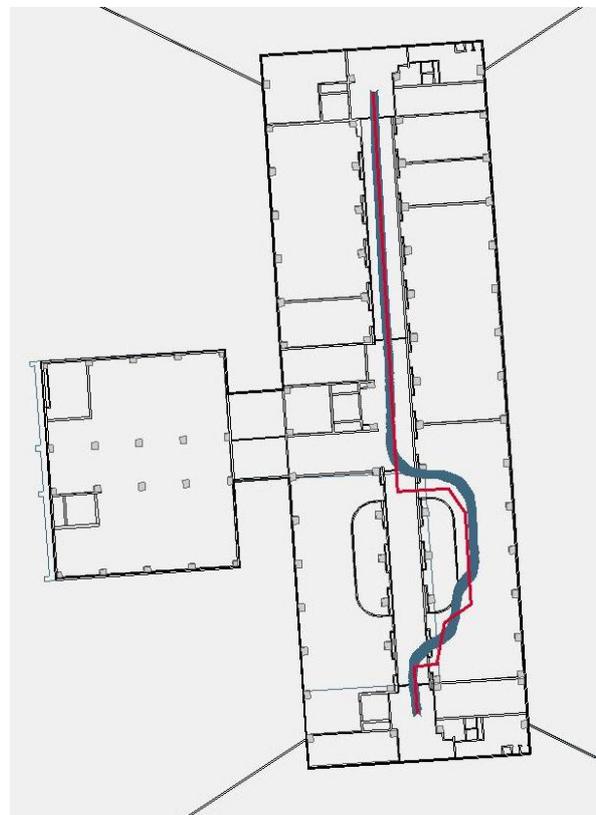


図 9 経路 2 の推定結果
(赤線：正解経路, 青線：推定軌跡)

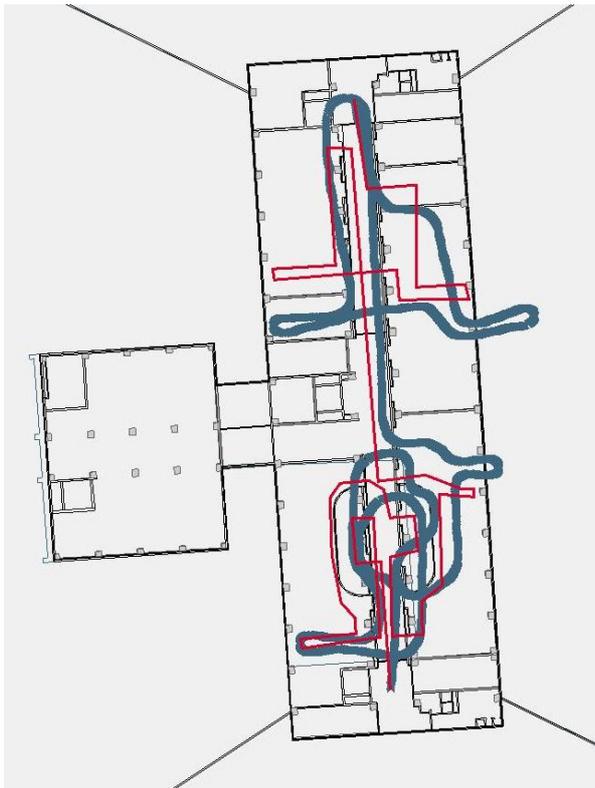


図 10 経路 4 の推定結果
(赤線：正解経路，青線：推定軌跡)

提案方式を複数の歩行者の複数日の実験に適用した総合結果について述べる(表 2, 3)。歩行者毎の推定誤差を図 1 1, 1 2 に示す。

始点終点座標が異なる場合の推定方式の方が、始点終点座標が同一の場合よりも、全ての経路において精度が高い。これは、前述したように、始点終点座標が異なる場合には、歩行距離の推定精度が向上するためである。異なる日の推定精度を比較すると、ほぼ同程度の推定精度を保っており、環境の影響を受けやすい環境測位よりも汎用性があり、頑健な推定方式であると考えられる。

歩行者毎の推定誤差の結果を見ると、特に始点終点座標が異なる場合の経路 2, 4 では、異なる歩行者においても、ほぼ同等の推定精度を保っている。歩幅や歩数解析の精度は、歩行者の特性に依存するが、本提案方式では、始点終点座標を利用することによって、歩行者特性の違いに対して頑健な推定結果を出すことが可能であることがわかる。

表 2. 始点・終点座標が同一の場合の推定誤差[meter]

	経路 1		経路 3	
	12/19	12/22	12/19	12/22
最小値	3.54	4.24	3.18	3.69
平均値	12.7	14.3	7.17	8.23
最大値	19.7	18.6	11.2	10.6

表 3. 始点・終点座標が異なる場合の推定誤差[meter]

	経路 2		経路 4	
	12/19	12/22	12/19	12/22
最小値	0.826	1.20	2.51	2.82
平均値	2.34	3.68	4.49	5.82
最大値	6.50	7.10	7.84	12.6

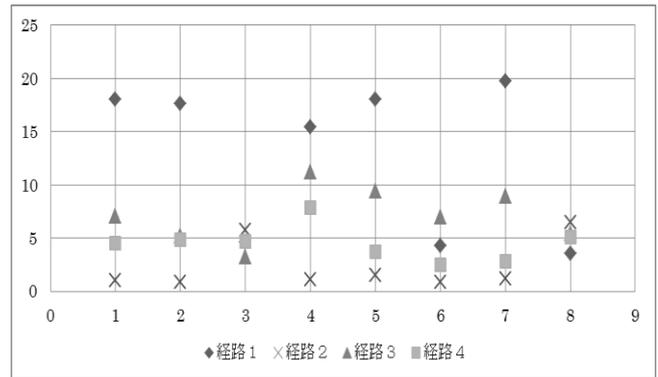


図 1 1 12/19 の各歩行者の推定結果
(縦軸：推定誤差，横軸：歩行者番号)

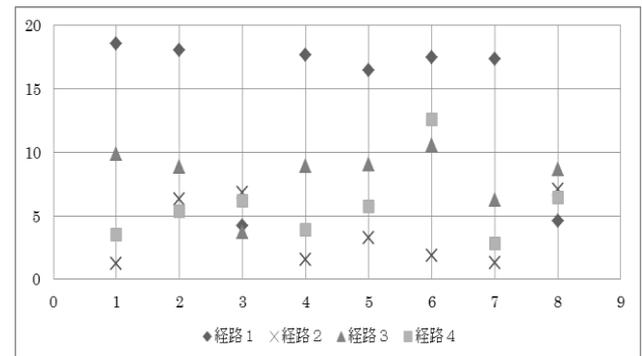


図 1 2 12/22 の各歩行者の推定結果
(縦軸：推定誤差，横軸：歩行者番号)

最後に提案方式の計算時間について述べる(図 1 3)。使用した計算機のスペックを表 3 に示す。歩行軌跡の始点・終点座標を利用する方式では、歩行時間に対して線形に計算時間が増大する。これは、歩行軌跡の始点・終点座標を利用する方式では、ある値の範囲内の複数のジャイロドリフトを除去した歩行軌跡を生成し、建物内比率を計算しているためである。160 秒程度の歩行時間に対して、0.6 秒程度の計算時間となるため、1 時間で 22.5 秒、8 時間で 180 秒程度である。作業者の 1 日の移動履歴を収集するには十分な計算速度であると考えている。

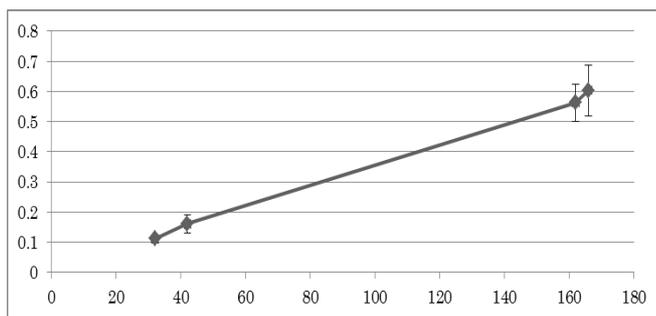


図 13 歩行距離と計算時間
(縦軸：計算時間[sec], 横軸：歩行時間[sec])

表 4. 計算機のスペック

OS	Windows 7 Professional 64bit
CPU	Intel (R) Core(TM) i7-2600K (RAM 16.0 GB, 3.40GHz)

5. 結論と今後の課題

本論文では、歩行者自律測位に基づき、スマートフォンを用いた屋内空間における歩行軌跡推定方式の提案と検証を行った。歩行者自律測位方式をベースとして、汎用的に入手可能な建物外形情報と入口出口の座標、階段やエレベータの座標を利用して、汎用的に高精度な測位を実現する。これにより、屋内空間を対象として、人間の移動履歴をどこでも大量に収集することが可能となる。

本方式の有効性を検証するために、現実の複数の歩行データに対して検証実験を行った。その結果、8人の歩行者の2日間のデータに対して、歩行距離220mにおける推定誤差平均4.47mを達成し、歩行者特性や環境変化に頑健な方式であることを検証できた。

今後は、屋内測位サービスの普及と共に、詳細な屋内地図情報の整備が進むと考えられるため、より多くの建物情報を利用して高精度化を目指す。また、スマートフォンに搭載されるセンサの種類も豊富になることも予想され、本研究では利用していない多種類のセンサによって得られる情報を活用することを今後検討する。さらに、無線LANなどのインフラも整備されていくことが予想され、構築されるインフラ設備と効果的に連携するような方式も今後、検討していく必要がある。

また、本研究では、過去の移動軌跡を解析することを主目的とし、建物内を歩行し終わってから計算を開始し測位結果を出力する構成となっている。そのため、現在の作業状況や未来の作業状況の予測などへ適用できない。今後は、本方式をベースとして、リアルタイムに測位結果を計算できるようにする方式を検討する必要があると考えている。また、リアルタイム化の際には、Android端末内で処理するには計算負荷が大きいと思われるので、センサデータのサンプリング間隔と推定精度とのバランスや、歩行軌跡の簡略化などを今後、検討する。

さらには、建物内外遷移時刻推定、フロア間遷移時刻推定も含めて、統合的な建物内歩行軌跡推定システムの実現を目指す。その際には、歩行軌跡推定の誤差も含めた包括的な誤差の低減が必要となると考えられる。また、今回、歩行者が利用した建物入口やエレベータが既知で

あることを前提としたが、実際には、フロア内に複数の入口・出口が存在することもあるため、正しい始点終点座標を推定する方式も必要となると考えられる。

参考文献

- [1] H. S. Cobb, "GPS pseudolites: Theory, design, and applications," Ph. D. dissertation, Stanford University, September 1997.
- [2] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based User Location and Tracking system," in proceedings of IEEE INFOCOM 2000, 2(3), pp. 775-784, March 2000.
- [3] H. Wang, H. Lenz, A. Szabo, J. Bamberger, and U. Hanebeck, "WLAN-Based Pedestrian Tracking Using Particle Filters and LowCost MEMS Sensors," Proceedings of Workshop on Positioning, Navigation and Communication, pp. 1-7, 2007.
- [4] H.-S. Ahn and K. H. Ko, "Simple pedestrian localization algorithms based on distributed wireless sensor networks," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 10, pp. 4296-4302, Oct. 2009.
- [5] Ingram, S. J. Harmer, D. Quinlan, M., "Ultra-Wideband Indoor Positioning Systems and Their Use in Emergencies", in proceedings of Position Location and Navigation Symposium 2004 (PLANS 2004), pp.706-715, April 2004.
- [6] B. B. Parodi, H. Lenz, A. Szabo, H. Wang, J. Horn, J. Bamberger and J. Obradovic, "Initialization and Online-Learning of RSS Maps for Indoor/Campus Localization," IEEE/ION PLANS 2006, San Diego, USA, April, 2006.
- [7] M. Vossiek, L. Wiebking, P. Gulden, J. Wiegardt, C. Hoffmann, "Wireless local positioning - concepts, solutions, applications," IEEE Microwave Magazine, vol. 4, no. 4, pp. 77-87, December 2003.
- [8] D. Obradovic, H. Lenz and M. Schupfner, "Sensor Fusion in Siemens Car Navigation System," IEEE Conference on Machine Learning and Signal Processing, Sao Luis, Brazil, 2004.
- [9] R. Want, A. Hopper, V. alcao and J. Gibbons, "The active badge location system," ACM Transactions on Information Systems, 10(1), pp. 91-102, January 1992.
- [10] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan, "The Cricket Location-Support System," in proceedings of MOBICOM 2000, pp. 32-43, August 2000.
- [11] Hui Wang, Henning Lenz, Andrei Szabo, Joachim Bamberger, Uwe D. Hanebeck, "Fusion of Barometric Sensors, WLAN Signals and Building Informaion for 3-D Indoor/Campus Localization," in proceedings of International Conference on Multi-Sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 2006, Heidelberg, Germany.
- [12] Q. Ladetto and B. Merminoid, "Digital magnetic compass and gyroscope integration for pedestrian navigation," in 9th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia, May 27-29 2002.
- [13] Q. Ladetto, J. van Seeters, S. Sokolowski, Z. Sagan, and B. Merminod, "Digital magnetic compass and gyroscope for dismounted soldier position and navigation," in NATO-RTO Meeting: Military Capabilities enabled by Advances in Navigation Sensors. Istanbul, Turkey: NATO Research and Technology Agency, Sensors & Electronics Panel, October 14-16 2002.
- [14] C. D. Cliff Randell and H. L. Muller, "Personal position measurement using dead reckoning," in Proceedings of the Seventh International Symposium on Wearable Computers, C. Narayananwami, Ed. IEEE Computer Society, October 2003, pp. 166-173.
- [15] Q. Ladetto, V. Gabaglio, and B. Merminoid, "Two different approaches for augmented GPS pedestrian navigation," in International Symposium on Location Based Services for Cellular Users, Locellus, 2001.
- [16] G. Gartner, A. Frank, and G. Retscher, "Pedestrian navigation systems in mized indoor/outdoor environment - the NAVIO project," in 9th International Symposium on Planning & IT (CORP 2004 & Geomultimedia04), February 2004, pp. 165-171.
- [17] G. Abwerzger, B. Ott, and E. Wasle, "Demonstrating a GPS/EGNOS/Loran-C navigation system in difficult environments as part of the ESA project SHADE," in EURAN 2004 Conference, Munich, Germany, June 2004.
- [18] M. Kourogi, N. Sakata, T. Okuma and T. Kurata, "Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/RFID/Self-contained

- Sensor System," 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2006), pp. 1310-1321, 2006.
- [19] S. Beauregard, H. Haas, "Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning," in proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '06), pp. 27-36, 2006.
- [20] O. Woodman and R. Harle, "Pedestrian localization for indoor environments," Proc. 10th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp), pp. 114-123, 2008.
- [21] T. Judd and V. Toan, "Use of new pedometric dead reckoning module in GPS denied environments," Proc. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 120-128, 2008.
- [22] C. Randell, C. Djiallis, and H. Muller, "Personal position measurement using dead reckoning," Proc. 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC), pp. 166-173, 2003.
- [23] Robertson, P., Angermann, M, Krach, B., Simultaneous Localization and Mapping for Pedestrians using only Foot-Mounted Inertial Sensors. In Proc. UbiComp 2009, ACM (2009) 93-96
- [24] M.Kouroggi et.al., "Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera," Proc. 2nd IEEE and ACM ISMAR. Pp.103-112, 2003.