

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	固定局の外部信号を用いた屋内歩行者測位システムに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	菊池典恭
Author(English)	Noriyasu Kikuchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10872号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小池 康晴,熊澤 逸夫,中村 健太郎,金子 寛彦,吉村 奈津江
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10872号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

固定局の外部信号を用いた屋内歩行者
測位システムに関する研究

東京工業大学大学院

総合理工学研究科

物理情報システム専攻

菊池 典恭

目次

第 1 章	序論.....	3
第 2 章	システム要件と歩行者自律航法の基本方式.....	9
2.1	緒言.....	9
2.2	ユースケース、システム要件及び技術的条件.....	9
2.2.1	ユースケース.....	9
2.2.2	システム要件.....	10
2.2.3	技術的条件.....	11
2.2.4	その他の事項.....	11
2.3	歩行者自律航法.....	12
2.3.1	初期姿勢推定 (Initial posture estimation).....	13
2.3.2	進行距離推定(Step length estimation).....	14
2.3.3	進行距離推定のパラメータ α 、 β の選定.....	14
2.3.4	他の部位に設置した場合の進行距離推定.....	16
2.3.5	姿勢推定(Heading estimation).....	17
2.3.6	PDR 位置計算(PDR position calculation).....	19
2.4	実験.....	19
2.5	従来方式の問題点.....	21
2.6	固定局設置により追加となる技術的条件.....	22
2.7	結言.....	22
第 3 章	進行方向及び絶対位置の修正に赤外線レーダを用いるシステム.....	25
3.1	緒言.....	25
3.2	システム構成.....	26
3.3	システムの動作.....	27
3.3.1	リセット処理(Reset Procedure).....	28
3.3.2	固定局の動作.....	29
3.3.3	ターゲットノードの動作.....	30
3.4	リセット処理の問題点.....	31
3.4.1	RSSI 閾値の選定.....	32
3.5	実験.....	35
3.5.1	歩行実験の手順.....	36
3.5.2	各システムの機能.....	38
3.6	歩行実験 1.....	38
3.6.1	固定局数による測位精度への影響.....	45
3.7	歩行実験 2.....	46

3.8	考察	49
3.9	結言	51
第4章	進行方向修正に受信電力によるゆう度評価を用いるシステム	53
4.1	緒言	53
4.2	システム構成及び基本動作	54
4.2.1	システム構成	54
4.2.2	無線通信の基本動作	55
4.2.3	スケーラビリティ	58
4.2.4	測位の基本動作	59
4.3	提案方式	60
4.3.1	概要	60
4.3.2	軌跡候補位置計算(Candidate position calculation)	60
4.3.3	ゆう度評価(Likelihood evaluation)	61
4.3.4	軌跡候補の再配置	63
4.4	実験	64
4.4.1	実験概要	64
4.4.2	実験システムの構成	64
4.4.3	歩行実験の手順	65
4.4.4	事前実験	66
4.4.5	評価に用いたシステム	67
4.5	歩行実験1	68
4.5.1	各システムの歩行軌跡	68
4.5.2	歩行距離と測位誤差の関係	70
4.5.3	測位精度の時間的推移	72
4.5.4	固定局数による測位精度への影響	74
4.5.5	軌跡候補数による測位精度への影響	74
4.6	歩行実験2	76
4.6.1	概要	76
4.6.2	各システムの歩行軌跡	77
4.7	考察	79
4.8	結言	81
第5章	結論	83
文献		88

第1章 序論

経営者にとって従業員の安全を確保することは責務である。従業員の安全性に留意せず、大事故につながった例もある。大事故を起こせば、社会的な責任を免れることはできず、最悪の場合、会社の倒産にも繋がりがねない。企業活動を継続するためにトラブルの発生を未然に防ぐことは重要であり、経営者は安全確保のために様々な施策を投じているが、全てのトラブルが事前に予期できるものとは限らない。例えば、従業員の突然の心臓発作などは予期することは難しいだろう。しかし、心臓発作が起きた従業員の位置や状態を直ぐに把握できれば、救急車を呼ぶなどの対処を瞬時に施すことで、従業員の損傷を最小限に抑えることができるかもしれない。

また近年では、施設の機械化が進められており、原子力発電所などの広大な施設を少ない人員で管理する場合がある。このような施設では人員同士の目が届かない場所でトラブルが発生した場合に発見が遅れることが考えられる。したがって、トラブルの発生を即座に特定し、従業員の安全を確保するために、従業員の位置をリアルタイムに推定するシステムの実現が期待されている。

リアルタイムに位置を推定するシステムの一つとして、個人が持つスマートフォンを利用したものが考えられる。最近のスマートフォンには、無線機の他に、加速度センサ、ジャイロ스코ープ、地磁気センサなどのセンサデバイスが備わっている。これらのデバイスから取得される情報を組み合わせて所定の計算を行うことで位置を推定することができる。しかし、従業員の位置推定への展開を図った場合、個人のスマートフォンを利用することは難しい場合がある。まず、全ての従業員が個人のスマートフォンを所持しているとは限らない。さらに、一部の工場では情報漏洩を懸念して、作業中に個人のスマートフォンを携帯することを禁止している場合もある。また、スマートフォンが備えるセンサデバイスの性能は測位精度に影響を与えるが、市販のスマートフォンに性能差があることから、個人のスマートフォンを利用することで、従業員全てにおいて統一した測位精度を保つことができないと考えられる。

したがって、個人のスマートフォンを利用するのではなく、専用の端末を利用するシス

テムを考える必要がある。当然、当該システムの専用端末は、従業員の本来の業務を妨げてしまう仕様であってはならない。例えば、サイズや重量が大きければ、引っ越し作業を行う人員にとっては負担となる。ここで、従業員が普段身に付けるものとして、従業員の社員証や IC カード等が考えられる。社員証は社員であることを証明するために常時携帯することが義務付けられることもある。また、財布などに何らかの IC カードを入れて持ち歩く人は多いと思われる。いずれにしても、小型であり、低コストとなる端末により位置や状態が監視できれば、従業員の業務への負担は変わらず、安全確保のための経営者の目的も果たすことができる。

次に、屋内および屋外の環境での利用において、従業員の位置を推定するために、適用可能な従来技術について考える。屋外での作業を想定した場合、GNSS (Global Navigation Satellite System)を備えた測位システムを利用することが一般的である。2018年には準天頂衛星システムが4機体制、2023年には7機体制で運用されることが閣議で決定されており、準天頂衛星が増加することにより、屋外の測位精度は10cm程度に改善するとされている[1]。測位精度が10cm程度となる条件は、オープンスペースを想定しており、電波伝搬の環境が影響すると考えられるが、少なくとも、現在の測位精度に比べれば改善されるため、従業員の位置を推定する一般的なアプリケーションにとっては十分な測位精度が期待できると考えられる。また、昨今ではGNSS技術は普及していることから測位機能を備えたデバイスのコストは既に低下している。したがって、屋外の従業員位置を推定するために、市販で入手可能なGNSSデバイスを用いたとしても技術的にも、コスト的にもハードルは高くないと考えられる。

一方、屋内での作業を想定した場合、GNSS技術では衛星から送られる信号が屋内には届かないため、測位そのものができないか、あるいは、測位精度が著しく低下してしまうことが考えられる。そこで以降では、屋内において小型の測位端末を利用することを想定した上で、測位方式としてどのようなものが導入できるかを考える。

自律的に測位するシステム

まず、単体のデバイスで自律的に測位するものとして歩行者自律航法(PDR、Pedestrian Dead Reckoning)がある。PDRは加速度センサやジャイロスコープなどのセンサを組み合わせて歩行者の位置を推定する技術である[2][3][4][5][6][7]。自律航法そのものは、航空や宇宙の分野に代表されるように、これまで様々な研究が進められてきた。しかし、航空や宇宙の分野における自律航法に比べて、歩行者用の自律航法であるPDRは一般的に安価なセンサデバイスで実現することが求められる。PDRで用いられる汎用的な加速度センサやジャイロスコープは、近年のMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術の発達により小型でかつ低コストとなってきた。しかし、小型で低コストである反面、航空や宇宙の分野で用いられるものに比べて測位精度が悪い。

さらに、計算処理と端末のバッテリーサイズを考慮して設計する必要がある。端末はモ

バイルで利用するため二次電池を必要とするが、小型な端末を実現するためには二次電池のサイズが限定される。近年のリチウムイオンバッテリー技術の発展により、薄型のリチウムイオンバッテリーが市販されてきているものの、サイズと電力量は基本的に比例の関係となるため、カード型を想定するような小型の端末において潤沢な電力を確保することはできない。したがって、PDRの動作時間を確保するためには低消費電力となるように軽量の計算処理に限定する必要があるが、これもまた測位精度とのトレードオフの関係となる。以上より、センサデバイスの性能が不十分であり、さらに、計算処理が単純なものに限定されることから、PDR単体での技術では十分な測位精度とならない場合が多い。

ただし、PDRで用いられる加速度センサやジャイロスコープは、測位ではなく歩行者の状態推定においても利用される。例えば、文献[8][9][10][11]では、加速度センサやジャイロスコープを利用して、停止、走行、階段の上昇下降などの歩行状態を推定している。したがって、歩行状態の推定のためにセンサデバイスが利用されるのであれば、測位においても同センサを利用した方が、ハードウェアの共通化により簡素な構成で両方の機能を実現できるという利点がPDRにはある。

次に、単体での測位として地磁気を使った技術が検討されている[12][13][14]。地磁気は歩行者の進行方向を推定する場合に利用される。ただし、地磁気を使った技術は、鉄筋のビルなどでは精度よく利用することができない。なぜなら、鉄筋ビルの建設現場では、金属の状況が常に変化するため、磁場も変化してしまうためである。

さらに、気圧センサを利用したものも検討されている[15]。ただし、一般的に気圧センサは高度を推定するために利用されており、平面方向の測位には利用できない。

固定局を利用する測位システム

また、自律的に単体のデバイスで測位するのではなく、固定局を施設に敷設して測位する技術が検討されている。

屋内でもGNSSと同じ技術を利用して測位する技術としてIMES(Indoor Messaging System)がある[16]。専用の基地局を施設内に設置する必要があるが、GNSSと同じ信号を送信するため、信号を受ける側の端末はハードウェアを変更する必要がない。例えば、スマートフォンは新たに外部デバイスを追加することなく、屋外と同じように屋内でも利用することができる。IMESは期待されている技術であるが、現在ではIMESは普及しておらず、さらに、現行のIMESの仕様では、近傍に測位対象が存在するかしないかを判断することに限定している。これにより、IMESの基地局が間欠した場所では位置が特定できないため、測位精度を上げるために、設置台数を増加させる必要がある。

次に、電波を利用した方式が検討されており、到来時間を用いた方式[17]と電力を用いた方式[18][19][20][21]に大別することができる。いずれの方式もIMESと同じように、施設に固定局を設置し、固定局から電波を送信あるいは受信することで測位を行う。

電波において到来時間を用いた方式では、固定局から送信される電波の受信時刻を測定

し、送信時刻と受信時刻から伝搬にかかる到来時間を求め、光の速さを乗じることで距離を計算し、複数の送信端末から受ける距離情報を基に位置を推定する。ここで、送信時刻および受信時刻を検出するためには、高速に動作するアナログデジタル変換器が必要となる。さらに、固定局間には高精度な時刻同期が必要となる。光の移動量を検出できるほどの高速なアナログデジタル変換は高価であることから、到来時間を用いた方式は測位精度こそ高いが、実現のためのコストが高いものとなっている。

電波において電力を用いた方式は、送信端末から送信される電波の受信信号の強度（受信強度：RSSI、Received Signal Strength Indicator）を測定し、RSSI 情報から測位するものである。RSSI が測定できれば、実験による統計的な結果、いわゆる電波伝搬特性から送信端末までの距離を推定することができる。到来時間を用いた方式と同様に、複数の送信端末と距離情報を用いることで位置が推定できる。ただし、電波伝搬の環境により RSSI は大きく変動するため、測距精度が十分とはならない。一般的に、到来時間を用いた方法に比べ、電力を用いた方式は低コストで実現できるが測距精度が低い。測位精度を改善するためには、設置台数を増やすことや送信回数を増やすなどの対策が必要となるため、コストや敷設の条件を考慮する必要がある。

また、画像認識を利用した方法も検討されている[23][24]。施設内にカメラを設置し、得られた画像についてパターン認識を行うことで、従業員の位置や状態を推定することができる。ただし、カメラは見通し内ではしか人を検出することができず、複数の人がカメラに映る場合などでは判別が難しくなる。また、カメラ自体も高価である。さらに、病院などではプライバシーの問題から設置が許可されない場合もある。

センサ等から推定された位置座標を既知のマップ上に矛盾がないように配置する方式としてマップマッチングも提案されている[25][26]。ただし、歩行経路が限られる場合には利用できるが、広場など明確な経路が定義できない場合には利用できない。

また、超音波を利用した測位技術は測位誤差 30cm 以下を実現している[27][28]。ただし、電波の到来時間を用いた方式と同様に、敷設する固定局間において高精度な時刻同期が必要であり、この実現に高速なアナログデジタル変換器を必要とするため、コストが高いものとなっている。

固定局の外部情報を用いる測位システム

さらに、自律した単体のデバイスの測位結果を外部情報の利用により補償するシステムが検討されている。いわゆるハイブリッド型測位システムと呼ばれるものである[29][30][31]。例えば、固定局から受ける電波と PDR を組み合わせる測位システム[18][32][33]や、固定局がレーザレンジファインダを備えることで PDR の測位を補うシステム[22]等がある。

電波と組み合わせるシステムでは、近年、無線デバイスのコストが低下してきていることから、敷設の導入コストは他のシステムに比べて低い。しかし、固定局の設置台数や電

波伝搬の環境が測位に影響するため、従来の技術では十分な測位精度が得られるまでには至っていない[18][35]。

また、レーザレンジファインダと組み合わせるシステムでは、固定局の近傍において精度良く測位できるが、レーザレンジファインダが高価であることと、レーザレンジファインダの設置は見通しの良い場所に限られることが課題となる。

以上より、屋内測位に関して様々な技術が検討されているが、それぞれ一長一短であり、対象とするユースケースを考慮して選択する必要がある、とりわけ、本論文で検討するユースケースへの展開を想定した場合、ここまで挙げた技術はいずれも、そのままの実装では満足できるものがない。

ここで、もう一度、PDRの測位精度に影響する劣化要因を分析すると、その一つに時間経過による推定方向の精度低下がある。方向は角速度を積分して算出するため、ジャイロスコープから得られる角速度に同一方向の誤差が生じると、推定方向の誤差として常に累積されてしまう。安価なジャイロスコープでは、角速度の誤差の原因である温度ドリフトを根本的に取り除くことが難しい。ただし、このような安価なデバイスを用いたPDRであっても、短い時間に限定すれば、推定位置の軌跡の概形は実際の軌跡と類似する[35]。以上を考慮すれば、PDRを基本的に利用しつつ、温度ドリフトに起因する角度の累積誤差を外部から得られる情報により修正することができれば、安価なデバイスの構成でありながら、システムの要件を満足できる可能性がある。

本論文では、短い時間においてPDRの軌跡の概形は実際の軌跡と類似するという特徴を生かし、PDRの進行方向の修正を可能とするシステムを提案する。具体的には2つのシステムを提案する。

まず、第一の提案システムでは、赤外線を利用し絶対位置を高精度に取得し、現在位置と進行方向を修正する方式を考える。センサを利用した位置推定を基本とし、さらに赤外線レーダを備えた固定局を利用することで、累積した位置の誤差をリセットし、進行方向も修正する。進行方向の修正に必要な2つの固定局の絶対座標を利用し、その座標をもとに計算される教師となるベクトルを計算することで、現在の進行方向を修正する。このとき、教師ベクトルの精度を上げるために、赤外線レーダを用いる。

次に、第二の提案システムでは、第一の提案システムの機能を踏襲しつつ、歩行中に近傍の固定局から受ける電波を利用して統計処理を行い、もっともらしい進行方向を推定する方式を考える。具体的には、加速度センサとジャイロスコープを利用して、任意の方向から相対的に計算されたPDRの結果を基準とし、この基準の軌跡に対して全方位を分割するように放射的に回転させながら配置した複数の軌跡を用意し、屋内に設置された固定局から連続的に送信される電波の受信電力を測定することで、それぞれの軌跡候補に対して受信電力に基づいたゆ度評価を施し、軌跡候補の中から評価値の高い軌跡を選択し、そ

第 1 章 序論

の現在位置を推定位置とする。

本論文は全 5 章から構成される。

第 2 章では、まず、本システムのユースケース、システム要件及び技術的条件を整理する。さらに、PDR の基本的な方式を確認し、システム要件を考慮した実機を構築し評価を行い、結果から問題点を明らかにする。また、短い時間において PDR の軌跡の概形は実際の軌跡と類似するという特徴に抽出し、提案方式への導入を促す。

第 3 章では、従来方式の問題点を解決するための方式として、赤外線レーダを用いた外部情報により進行方向を修正する測位システムについて説明する。

第 4 章では、第 3 章で扱った赤外線レーダを用いる測位システムの問題点を抽出し、それを解決するための方式として、電波を用いた外部情報を用いることで PDR の進行方向を修正するシステムについて説明する。

最後に、第 5 章で総括する。

第2章 システム要件と歩行者自律航法の基本方式

2.1 緒言

第2章では、最初に、ユースケース、システム要件及び技術的条件を整理する。次に、これらの条件を踏まえ、従来のPDR方式の適用を検討し、実験による検証を行い、従来のPDR方式の問題点を抽出する。さらに、問題点を解決するための対策を検討し、第3章及び第4章で示す提案システムへの導入を促す。

2.2 ユースケース、システム要件及び技術的条件

最初に、本システムの要件を整理する。測位技術は様々なアプリケーションへの展開が考えられるが、第1章でも述べたように、それぞれの測位技術には一長一短あり、対象とするアプリケーションに応じて測位技術を選択する必要がある。

本論文では、従業員の安全確保を目的とする測位システムのニーズを踏まえ、工場、オフィス、病院、建設現場等における作業員の位置をリアルタイムに推定するシステムの実現を目的とする。

2.2.1 ユースケース

システムのユースケースを検討する。ユースケースは、本システムの主な利用対象や利用条件のことである。

対象とする人は、本目的から、工場、オフィス、病院、建設現場等における作業員とし、対象とするエリアは、工場、オフィス、病院、建設現場等の屋内施設とする。

対象とするエリア内では作業員が走行するという動作は、頻繁には行われないと考えら

れるため、基本動作として歩行を対象とした測位方式を検討する。

また、平面方向の位置を推定し、対象とする端末の設置位置は、作業員の胸ポケットとする。以降では、従業員が身に付ける専用端末のことをターゲットノードと呼ぶことにする。

表1 ユースケース

項目	値
対象とする人	工場、オフィス、病院、建設現場等における作業員
対象とするエリア	工場、オフィス、病院、建設現場等の屋内施設
対象とする基本動作	歩行
対象とする測位結果	平面方向の人の位置（高さ方向は不要）
対象とする設置位置	胸ポケット

2.2.2 システム要件

次に、システム要件を検討する。システム要件は、ユースケースの対象者が本システムに要求する機能や条件のことである。

まず、測位精度については、実際の現場で本システムの用途をヒアリングした結果、作業員同士の接触をモニタリングしたいとの要望が多かったため、平均測位誤差を1m以内とする。

また、作業中はバッテリーの充電ができないため、少なくとも24時間の連続動作が可能であることをシステム要件とする。ここで、いずれの従業員も連続して24時間以上労働することは通常はないと考えられるため、業務が終了したときに、次の日までに充電するような使い方を想定する。端末の形状は、カード型であることとする。

リアルタイム性については、安全確保を実現するという目的を考慮すれば、観測者に測位結果を瞬時に伝える必要があるが、自動車の自動走行のように、ミリ秒レベルでのリアルタイム性は要求されないと考えられ、数秒から10秒程度の遅延があったとしても問題ないと思われる。したがって、測位結果の伝達に要する許容遅延時間を10秒以内とする。

また、作業員が所持する専用端末は、スマートフォンなどに比べて十分に安いコストで構築できる必要がある。具体的にはスマートフォンに比べて一桁程度安いものを想定する。

表2 システム要件

要件	値
平均測位誤差	1m 以内
連続動作時間	24 時間以上
端末の形状	カード型
許容遅延時間 (リアルタイム性)	10 秒以下
端末のコスト	スマートフォンに比べて 1/10 程度

2.2.3 技術的条件

次に、技術的条件を検討する。技術的条件は、システムの方式を設計するための具体的な制約のことである。技術的条件はシステム要件を考慮し設計する。

ターゲットノードのコストに支配的である CPU に注目すれば、システム要件から CPU は数百円程度で入手できるものを利用する必要がある。したがって、市販で入手可能な ARM 社製 Cortex-M0 コア(16MHz)相当で動作することを技術的条件とする。

ターゲットノードの形状はカード型であることを考慮し、具体的なサイズを 56mm×90mm とする。厚みは数 mm 以下とする。

また、ターゲットノードは、携帯できることが必須であるため、二次電池として小型化が可能なリチウムイオンバッテリーを選定する必要がある。カード型で薄型のサイズのことを前提とし、現在入手可能なものからリチウムイオンバッテリーの容量は 200mAh とする。

表3 技術的条件

要件	値
計算処理能力 (CPU クロック数)	16MHz 以下 (ARM 社製 Cortex-M0 コア(16MHz)など)
端末のサイズ	56mm×90mm (IC カードのサイズ) 厚み：数 mm 以下
バッテリー容量	200mAh

2.2.4 その他の事項

その他の検討事項として、測位システムの導入によるプライバシーへ影響を考える必要がある。例えば、カメラを利用した測位システムでは、測位に利用する静止画や動画がデータとして残る場合があり、測位以外の目的に利用される懸念がある。病院の関係者にヒアリングしたところ、測位を目的としたカメラであっても、カメラを院内に設置すること

自体が患者にとってのイメージが悪く、院内の雰囲気等への影響を考慮するとカメラを利用した測位システムの導入は敷居が高い、という意見が挙げられた。

本システムは測位時に位置情報以外のデータが残ることがない。また、病院への展開を図った場合、患者、医師及び看護師にカード型端末を配布することで、測位を行う目的があることをあらかじめ意識づけることができ、誤解を招きにくい。以上より、本システムの導入によるプライバシーへの影響は低いと考える。

2.3 歩行者自律航法

次に、ターゲットノードの構成について説明する。本章で扱うターゲットノードは、CPU、加速度センサ(Acceleration sensors)及びジャイロスコープ(Gyroscopes)から構成される。ターゲットノードは加速度センサ及びジャイロスコープから出力される信号を用いて PDR の計算処理を実行することで自己位置を推定する。以降の第3章及び第4章で扱うターゲットノードは、一部機能を追加するが基本的な構成は変わらない。

PDR の計算は様々な手法が検討されている[3]。本論文のターゲットノードは CPU の性能を考慮し、単純な方式を採用する必要があるため、PDR の計算において、進行距離推定(Step length estimation)と進行方向推定(Heading estimation)を用いた方式を採用する。具体的な計算手順は、初期姿勢推定(Initial posture estimation)、進行距離推定及び進行方向推定の処理を行い、これらの結果を統合して位置推定(PDR position calculation)の処理を行う。図1にターゲットノードが利用する PDR の位置計算手順のフローチャートを示す。

以下、2.3.1 では初期姿勢推定処理、2.3.2 では進行距離推定処理、2.3.5 では進行方向推定のための姿勢推定処理について説明する。

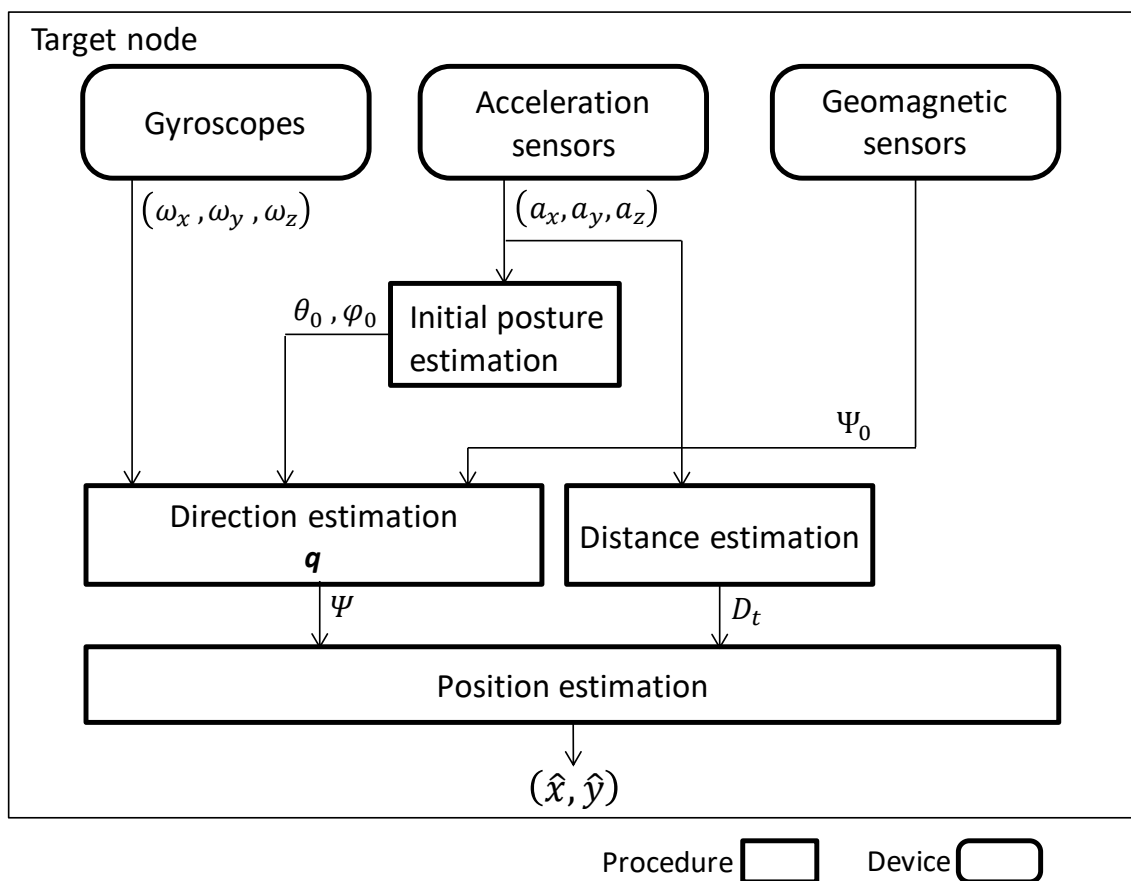


図1 PDRの基本動作フローチャート

2.3.1 初期姿勢推定 (Initial posture estimation)

ターゲットノードの姿勢は、世界座標系から端末座標系へ Z 、 Y 、 X 軸の順に回転させたときの角度として定義することができる。それぞれヨー角 Ψ 、ピッチ角 θ 、ロール角 φ と定義する。 Ψ は北極を基準とした世界座標系における進行方向であり、位置推定処理で利用する。

初期姿勢を $(\Psi_0, \theta_0, \varphi_0)$ とすれば、 θ_0 及び φ_0 は、加速度センサの値 (a_x, a_y, a_z) を用いて計算することができる。任意の姿勢にあるターゲットノードが完全に静止しているとき、重力加速度 g のみが検出されるので、 (a_x, a_y, a_z) は φ_0, θ_0, g を用いて式(1)として示すことができる。

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta_0 \\ g \cos \theta_0 \sin \varphi_0 \\ g \cos \theta_0 \cos \varphi_0 \end{bmatrix} \cdots (1)$$

式(1)を解くことで、 φ_0 及び θ_0 は式(2)として表すことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_0 = \tan^{-1} \frac{a_y}{a_z} \\ \theta_0 = \tan^{-1} \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \dots(2) \end{array} \right.$$

Ψ_0 は地磁気の値を利用して求める方式が提案されている[4][6][36]。

2.3.2 進行距離推定(Step length estimation)

進行距離 $d(t)$ の推定は、加速度センサから出力される (a_x, a_y, a_z) を用いて計算することができ、いくつかの推定方式が提案されている[3][4]。例えば、加速度から歩行周波数を分析する方式がある[36]。歩行周波数の分析には、高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)等を用いることが一般的である。ただし、歩行周期を正確に測るためには加速度を長い時間取得する必要があるため、大きなメモリー容量を必要とすることから、本システムのように非力なデバイスで構成される端末では精度よく計算することができない。そこで、提案システムでは加速度センサが受ける「振動の強さ」に注目した方式を用いる。

加速度センサの値 $(a_x(t), a_y(t), a_z(t))$ を用いて、振動の強さである $z(t)$ を式(3)のように定義すれば、 $z(t)$ により歩行速度 $v(t)$ は式(4)のように線形の式で近似できる[35][36][37][38]。

ここでサンプリング周期を T とすれば、 $d(t)$ は式(5)により求められる。

$$z(t) = \sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2} - g \dots(3)$$

$$v(t) \cong \alpha z(t) + \beta \dots(4)$$

$$d(t) = v(t)T \dots(5)$$

g は重力加速度とする。 α 、 β は実験的に得られる定数であり、2.3.3で求める。

2.3.3 進行距離推定のパラメータ α 、 β の選定

次に、 $z(t)$ と歩行速度 $v(t)$ の関係式である式(4)で用いるパラメータの α 、 β を実験により求める。これらのパラメータは、様々な速度の歩行を行い、加速度センサから得られる3軸の加速度を利用して、式(3)を計算し、その時の歩行速度と対応付けることで統計的に求めることができる。

本実験では、ターゲットノードを被験者の胸ポケットに取り付けて、10mの直線距離を様々なスピードに変えて歩行する。歩行速度を一定に保つために、実験中はメトロノームを利用し、歩行速度はテンポ40から140まで10テンポ刻みの11段階で実施し、各歩行速度では10回測定する。実験では4名の被験者で実施する。被験者のプロフィールを表4に

示す。

表4 被験者のプロフィール

Subject	Age	Sex	Setting height of device on body[m]
A	39	male	1.30
B	28	male	1.24
C	43	male	1.19
D	29	female	1.07

各被験者における $z(t)$ と $v(t)$ の関係を図2に示す。点が実験から得られた結果である。ここで近似式は最小二乗法により求めた。いずれの被験者の結果においても、 $z(t)$ と $v(t)$ の関係は線形の式で表せることが確認できる。本システムのユースケースでは動作として歩行を対象とする。歩行動作においては、本方式のように、加速度を利用した単純な計算であっても精度よく推定することができる。

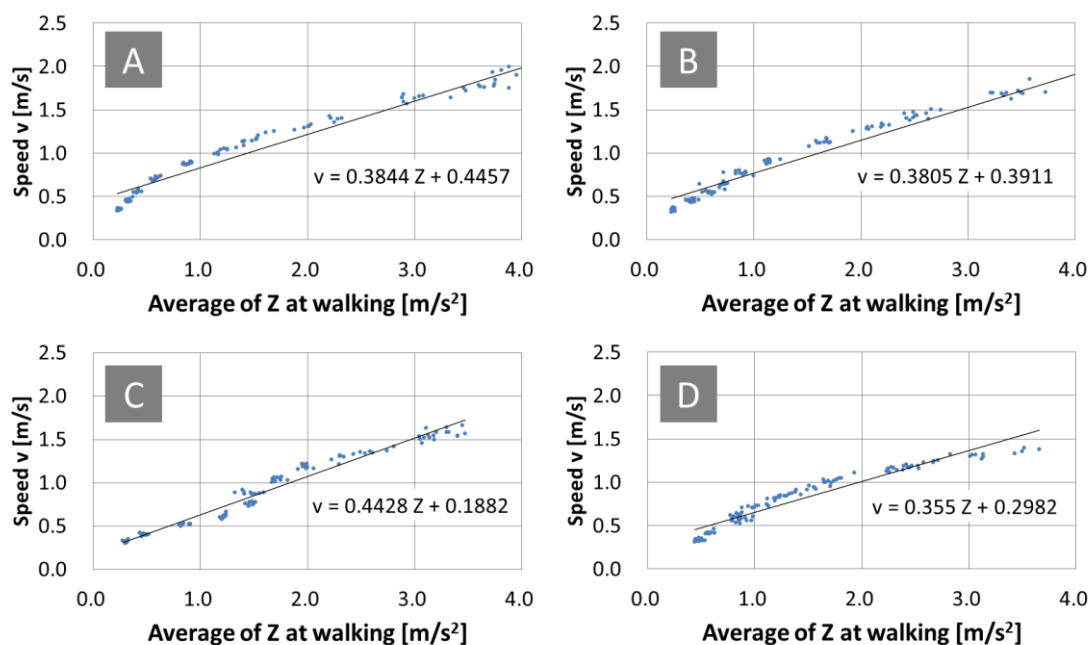


図2 z と歩行速度 v [m/s] の関係

次に、全員の測定結果を図3に示す。本論文では、全員の測定結果から同様に近似式を求め、 $\alpha=0.3716$ 、 $\beta=0.3519$ を求めた。以降では、実験的に求めた α 、 β を利用する。

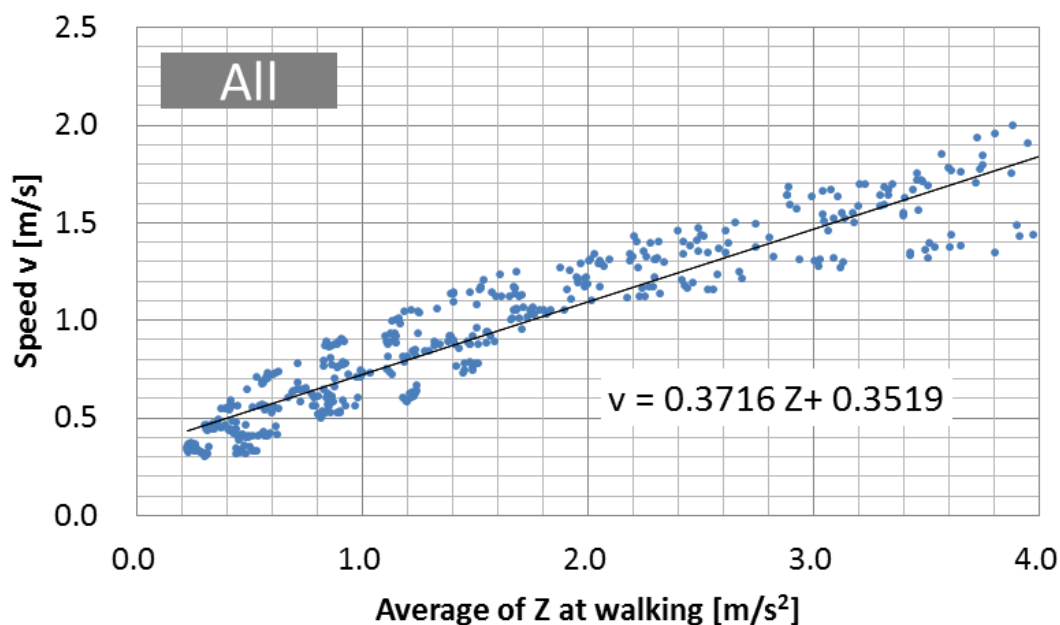


図3 Zと歩行速度 v [m/s]の関係

2.3.4 他の部位に設置した場合の進行距離推定

ターゲットノードは、胸ポケットへの設置が前提であることをユースケースで定めた。しかしながら、実際には胸ポケットだけでなく、他の部位に設置する場合が考えられる。また、将来的に他のシステムへの展開を考えた場合、カード型以外の形状のデバイスへ応用する可能性もある。そこで、ターゲットノードを胸ポケット以外の他の部位へ設置し、どのような影響があるのかを同様の実験により確認した。本実験は男性3名で行った。結果を図4に示す。

3名の結果から部位を変化させた場合であっても、傾きは異なるが線形の式で近似できることが確認できる。また、個人差はあるが、胸ポケットに設置した場合と傾向は変わらないと考えられる。以上より、腰、足首及び手首に設置した場合であっても、加速度から歩行速度を当該進行距離推定法により求められると考えられる。ただし、部位により式の傾きが異なることから、どの部位に設置したのかはあらかじめ知っておくか、あるいは、動的に設置の場所が変わったことを推定するアルゴリズムを実装する必要がある。

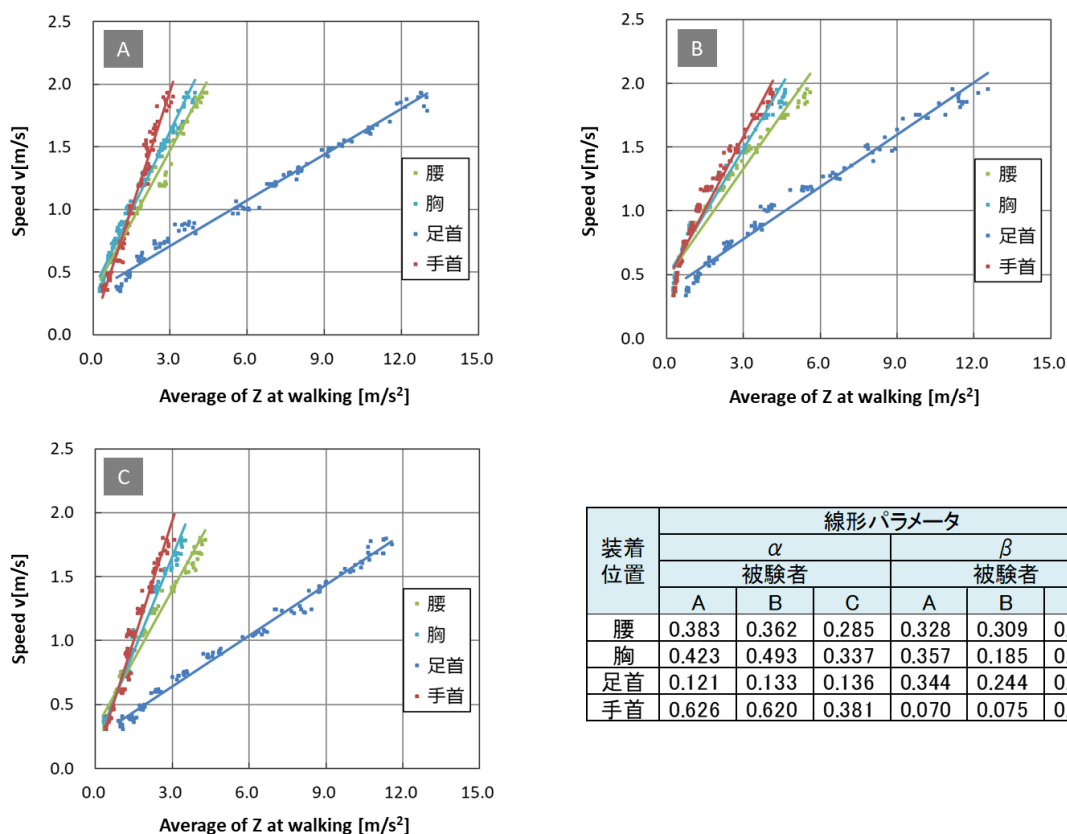


図4 他の部位に設置した場合のZと歩行速度 v [m/s]の関係

2.3.5 姿勢推定(Heading estimation)

進行方向は端末姿勢から得られる角度により推定することができる。ターゲットノードの端末姿勢($\Psi(t), \theta(t), \varphi(t)$)は、2.3.1で求めた初期姿勢をもとに、ジャイロスコプの値($\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$)から角度の変位を連続的に加算していくことで姿勢を計算することができる。計算方法には、クォータニオンを用いた方法とオイラー角を用いた方法があるが[39][40]、クォータニオンを用いた方法は、計算過程で生じる特異点がないため、いわゆるジンバルロックの影響を受けない。よって、ジンバルロックを考慮し、クォータニオンを用いた方法を本論文では利用することにする。

クォータニオンを $q=(q_0, q_1, q_2, q_3)$ と定義すれば、端末姿勢($\Psi(t), \theta(t), \varphi(t)$)を用いて式(6)として示すことができる。

$$\begin{cases} q_0 = \pm \frac{1}{2} \sqrt{1 + R_{(\psi, \theta, \varphi)11} + R_{(\psi, \theta, \varphi)22} + R_{(\psi, \theta, \varphi)33}} \\ q_1 = \frac{1}{4q_0} (R_{(\psi, \theta, \varphi)23} - R_{(\psi, \theta, \varphi)32}) \\ q_2 = \frac{1}{4q_0} (R_{(\psi, \theta, \varphi)31} - R_{(\psi, \theta, \varphi)13}) \\ q_3 = \frac{1}{4q_0} (R_{(\psi, \theta, \varphi)12} - R_{(\psi, \theta, \varphi)21}) \end{cases} \quad \dots(6)$$

ただし、座標変換行列 $R_{(\psi, \theta, \varphi)}$ は式(7)とし、 $R_{(\psi, \theta, \varphi)}$ の添え字は行列の各成分とする。

$$R_{(\psi, \theta, \varphi)} = \begin{bmatrix} R_{(\psi, \theta, \varphi)11} & R_{(\psi, \theta, \varphi)12} & R_{(\psi, \theta, \varphi)13} \\ R_{(\psi, \theta, \varphi)21} & R_{(\psi, \theta, \varphi)22} & R_{(\psi, \theta, \varphi)23} \\ R_{(\psi, \theta, \varphi)31} & R_{(\psi, \theta, \varphi)32} & R_{(\psi, \theta, \varphi)33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \sin\psi \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi \cos\varphi + \sin\psi \sin\theta \cos\varphi & \cos\psi \cos\varphi + \sin\psi \sin\theta \sin\varphi & \cos\theta \sin\varphi \\ \sin\psi \sin\varphi + \cos\psi \sin\theta \cos\varphi & -\cos\psi \sin\varphi + \cos\psi \sin\theta \sin\varphi & \cos\theta \cos\varphi \end{bmatrix}$$

…(7)

ここで、クォータニオンの基準値を $\mathbf{q}_0 = (q_{00}, q_{10}, q_{20}, q_{30})$ と定義すれば、動作開始時の \mathbf{q}_0 は、式(2)の初期姿勢 $(\Psi_0, \theta_0, \varphi_0)$ を用いて、式(6)から計算することができる。

クォータニオン \mathbf{q} の時間微分値は、ジャイロスコープの出力を用いて式(8)として表すことができ、式(9)に示すように、 \mathbf{q}_0 を基準として積分を行うことで現在のクォータニオン値が計算できる。

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad \dots(8)$$

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} q_{00} \\ q_{10} \\ q_{20} \\ q_{30} \end{bmatrix} \quad \dots(9)$$

さらに、式(9)に示す現在のクォータニオン値から、式(10)に示すように端末姿勢 (Ψ, θ, φ) が計算できる。

$$\begin{cases} \psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(q_2 q_3 + q_1 q_0)}{q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_0^2} \right\} \\ \theta = \sin^{-1} \left\{ -2(q_3 q_1 - q_2 q_0) \right\} \\ \varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(q_1 q_2 + q_3 q_0)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right\} \end{cases} \dots(10)$$

なお、端末を手に持ち自由に向きを変えながら歩行する必要がある場合などでは、歩行者の進行方向と端末の基準の向きが一致しなくなるため、歩行者に対しての進行方向推定処理はさらに複雑になる。このような場合、端末姿勢(Ψ, θ, φ)から回転行列を求め、端末座標系で取得された加速度(a_x, a_y, a_z)を世界座標系に変換し、世界座標系での加速度の各成分から歩行者の進行方向を推定するといった方式などが利用される[41]。

本システムは、端末は歩行者の胸ポケットに設置することをユースケースとしたため、端末を手に持ち自由に向きを変えながら歩行することは想定せず、 Ψ をそのまま歩行者の進行方向とみなすことにする。

2.3.6 PDR 位置計算(PDR position calculation)

時刻 t における推定位置($x_{PDR}(t), y_{PDR}(t)$)は、時刻 $t-1$ における推定位置($x_{PDR}(t-1), y_{PDR}(t-1)$)に単位時間に生じた変位を加算して計算する。すなわち、時刻 t において進行距離推定の処理から計算された進行距離 $d(t)$ と、姿勢推定の処理から計算された相対的な進行方向である $\Psi(t)$ を用いて、式(11)のように計算できる。

$$\begin{cases} x_{PDR}(t) = x_{PDR}(t-1) + d(t)\cos\Psi(t) \\ y_{PDR}(t) = y_{PDR}(t-1) + d(t)\sin\Psi(t) \end{cases} \quad (11)$$

2.4 実験

PDR方式の性能を確認するために歩行実験を行った。本実験で用いた装置の概形を図5に示す。装置は被験者の胸ポケットに固定して設置した。実験で利用するターゲットノードには、システム要件である16MHzのCortex-M0コア相当であることを考慮しNordic社製nRF51822を選定した。また、加速度センサ及びジャイロスコープとして両方を備えたInvenSense社製MPU-9250を実装した。

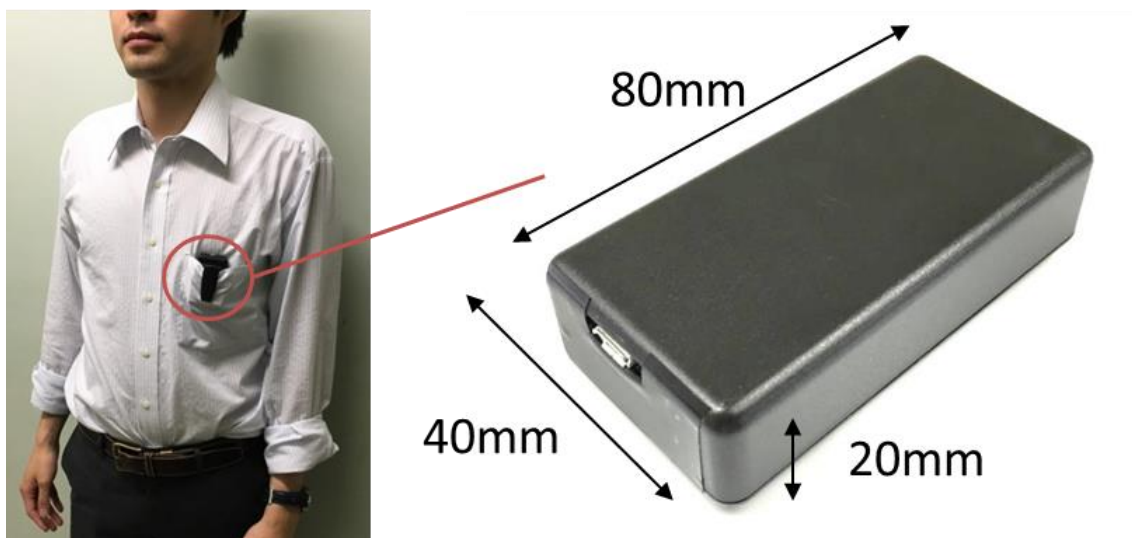


図5 実験用の装置

屋内の実験会場を利用し、歩行時における位置推定の精度を検証した。被験者は実験会場内のあらかじめ定められたルートに従って歩行し、その時の被験者位置を前述の PDR の手順により計算する。図 6 に歩行ルートを示す。被験者はスタート地点を基点とし、①から⑧の順に 8 の字を描くルートを歩行する。また、測位精度の時間的な推移を確認するため、本ルートを連続して 3 周(計 150m)歩行した。

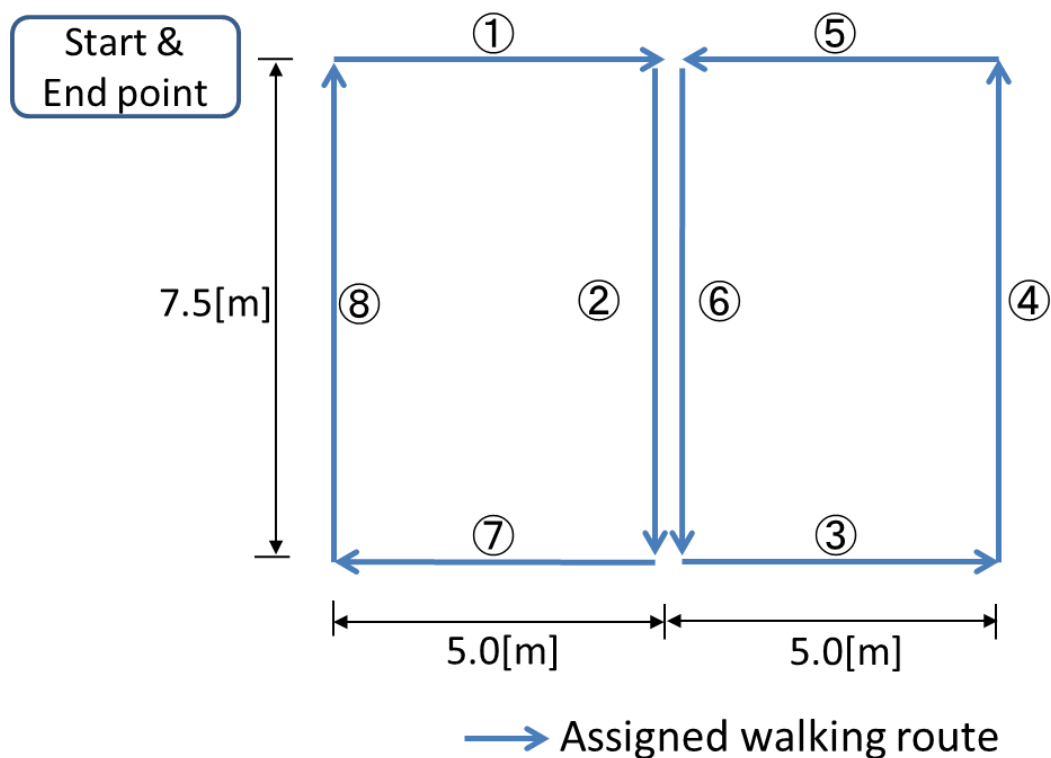


図6 歩行実験のルート

図7に歩行実験の軌跡の例を示す。1週目から3周目にかけて、歩行軌跡が時間の経過とともに、正解の歩行ルートに対して、回転していることが確認できる。

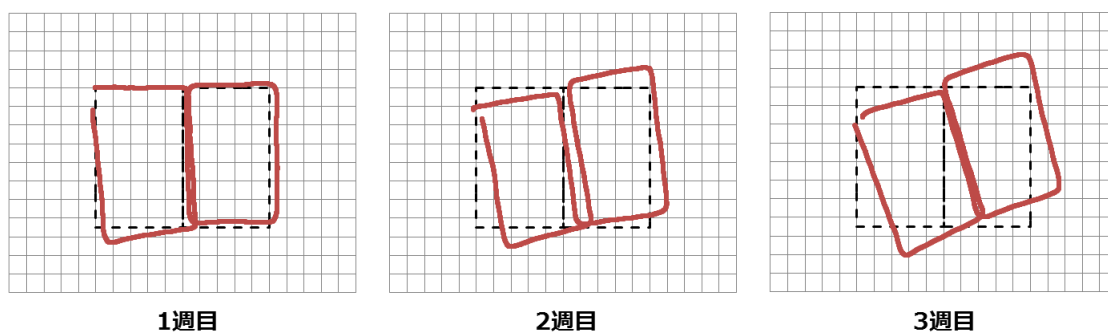


図7 歩行実験の軌跡の例

2.5 従来方式の問題点

図7の軌跡結果が示すように、進行方向に関しては、歩行を継続することで、ずれていくことが確認できる。一方、進行距離に関しては、3周の歩行において、軌跡の概形の尺度が大きく変化していない。つまり、歩行軌跡の誤差は、進行距離の推定誤差よりも進行方

向の推定誤差が支配的であると考えられる。

進行方向は、角速度を積分して算出するため、ジャイロ스코ープから得られる角速度に同一方向の誤差が生じると、推定方向の誤差として常に累積されてしまう。角速度の誤差の原因はジャイロ스코ープの温度ドリフト誤差であり、本課題を根本的に解決するためには、温度ドリフト特性の優れたジャイロ스코ープを選定することが有効であると考えられる。ただし、温度ドリフト特性の優れたジャイロ스코ープは高価であり、本システムの要件のように低コストを要求する端末への適用が困難である。

以上から、新たに外部情報を提供する装置を敷設して PDR の測位を補償することで、システムの性能改善を図るという方針に至った。以降では、施設に固定して敷設する装置のことを固定局(Anchor Node)と呼ぶことにする。

2.6 固定局設置により追加となる技術的条件

外部情報を利用する測位システムは、固定局の設置が必要であるため、固定局の設置密度を設計する必要がある。ここで、本システムのユースケースから工場、オフィス、病院、建設現場等の屋内施設での利用を想定するため、固定局は常時動作することが一般的に求められる。したがって、電力供給のために固定局をバッテリーで駆動させることは現実的ではないため、固定局の電源供給のために、近くのコンセント挿入口を用意する必要がある。ただし、一般的な施設では、1m のような短い間隔ではコンセント挿入口は存在しない。

また、固定局とターゲットノードは無線を介して通信を行うが、本ユースケースから利用が可能である汎用的な無線デバイスにおいて、その受信特性を確認すると、見通し外となる固定局から 10m 以上離れた場所では電波が受信できない場合がある。

したがって、1m 以上 10m 以下の間隔で固定局を設置する必要があることから、設置密度が $25\text{m}^2(5\text{m} \times 5\text{m})$ に 1 台となるように設計し、これを追加の技術的条件とする。なお、汎用的な無線デバイスの受信電力特性については後述の実験で確認する。

2.7 結言

第2章では、汎用的なデバイスを用いて従来の PDR 方式を実装し、歩行実験を行った。従来の PDR 方式による推定軌跡は、正解の軌跡に比べ、時間の経過とともに回転してしまう概形となることを確認した。この結果から、PDR の計算処理である進行方向推定と距離推定において、測位精度に大きく影響するのは進行方向推定であることを特定した。ただし、進行方向推定を改善させるためには、角速度の累積誤差の原因であるジャイロスコープの温度ドリフト誤差を低減させる必要があるが、本システムのように低コストを要求する場合、ドリフト特性の優れたジャイロスコープは一般に高価であるため適用できない。

以上から、新たに外部情報を提供する固定局を敷設して PDR 単体での測位を補償するこ

第 2 章 システム要件と歩行者自律航法の基本方式

とで、測位精度に支配的である進行方向推定の性能改善を図る方針に至った。ただし、本システムの要件から、ドリフト特性の優れたジャイロ스코ープが高価であることを理由とし導入できないように、固定局を加えたとしてもコストが大幅に増加する技術を適用することはできない。この点も踏まえ、第 3 章では、汎用的なデバイスを用いても実現可能となる固定局により、進行方向が修正できるシステムを提案し、その性能を評価する。

第3章 進行方向及び絶対位置の修正に赤外線レーダを用いるシステム

3.1 緒言

第 2 章では、歩行実験を行うことで、PDR の進行方向推定における角度誤差が累積されることを確認した。汎用的なジャイロ스코ープを用いた場合は、温度ドリフト特性に起因して測位精度が十分とならない問題を抽出し、外部情報を提供する固定局を新たに敷設して PDR の測位を補償するという設計方針に至った。

本節では、外部情報を利用するという観点に立ち、問題解決へのアプローチを検討する。最初に、測位誤差の原因である温度ドリフトの誤差を、新たに追加した固定局から得られる外部情報を基に、何らかの計算処理を施すことで推定できないか考える。

ここで、従来方式を確認すると、温度ドリフトなどの誤差を推定するために、カルマンフィルタ等の統計処理がしばしば用いられている[34][42]。カルマンフィルタは、内部のセンサ情報だけでなく、固定局から得られる外部の情報も組み合わせることで、システムのダイナミクスを推定し、計算处理的に各センサの欠点を補い、系全体の誤差を低減させることが可能である。例えば、温度ドリフトなどの誤差もダイナミクスの一要素として組み入れることができる。ただし、システムのダイナミクスを推定するためには、繰り返しの演算が必要となり、この一連の計算処理が負荷となる。また、正解値として利用する外部からの入力信号が精度よく取得できない場合や入力信号の誤差のモデルが精度良く規定できない場合には、ダイナミクスの推定精度が低下する。以上より、カルマンフィルタは本システムへの適用が困難であると判断する。

次に、ダイナミクスの推定ではなく進行方向を直接的に修正する方法を考える。第 2 章の歩行実験では、短い時間に限定すれば PDR の推定位置の軌跡の概形は実際の軌跡と類似することを確認した。何らかの手段により、歩行した 2 点間のベクトルが精度良く取得でき、これを教師ベクトルと呼べば、PDR が推定した現在までの大局的なベクトルと教師ベ

クトルを比較することで、PDR の進行方向を直接的に修正することが可能であると考えられる。このとき、ベクトルの回転は、カルマンフィルタのように負荷の重い計算処理ではなく、単純に計算できるため、本システムのような非力なデバイスであっても実行できる。この点に注目し、文献[43]では、屋内のランドマークを利用し、その基準となる位置情報を外部から得ることで、ターゲットノードの位置を直接的に修正する方式が提案されている。しかし、ランドマークの位置を電波により取得するため、認識誤差が大きく、測位精度が十分となっていない。

以上より、第 3 章では、低コストで実現可能なデバイスの利用を前提とし、屋内に敷設した固定局の座標を電波ビーコンにより取得していき、2つの固定局の座標から現在の進行方向を修正する方式を提案する。ただし、前述の文献[43]の結果を踏まえ、固定局に赤外線レーダを加え、歩行者を精度よく検出するシステムを検討する。

3.2 システム構成

システム構成の概要について図 8 に示す。ターゲットノードは第 2 章で示した一般的な PDR の測位処理を備える。さらに、無線機(Wireless terminal)を備えることで、固定局からビーコン(Beacon)を受信することができる。ビーコンには、固定局の座標が含まれているため、ターゲットノードはこの座標情報をもとに現在の位置と進行方向の修正を行う。

固定局はビーコンを定期的に送信する無線機と、固定局近傍における歩行者の通過を検出することができる赤外線レーダを備える。本システムで利用する赤外線レーダは、レーザレンジファインダのように、立体的な検出範囲を持つものではなく、赤外線を照射する方向の接点との距離を測定できるだけのものであり、検出距離も 5m 程度のものである。すなわち、十分に安価なデバイスを想定しており、システム要件である低コストでの実現を満たすことが可能なものである。

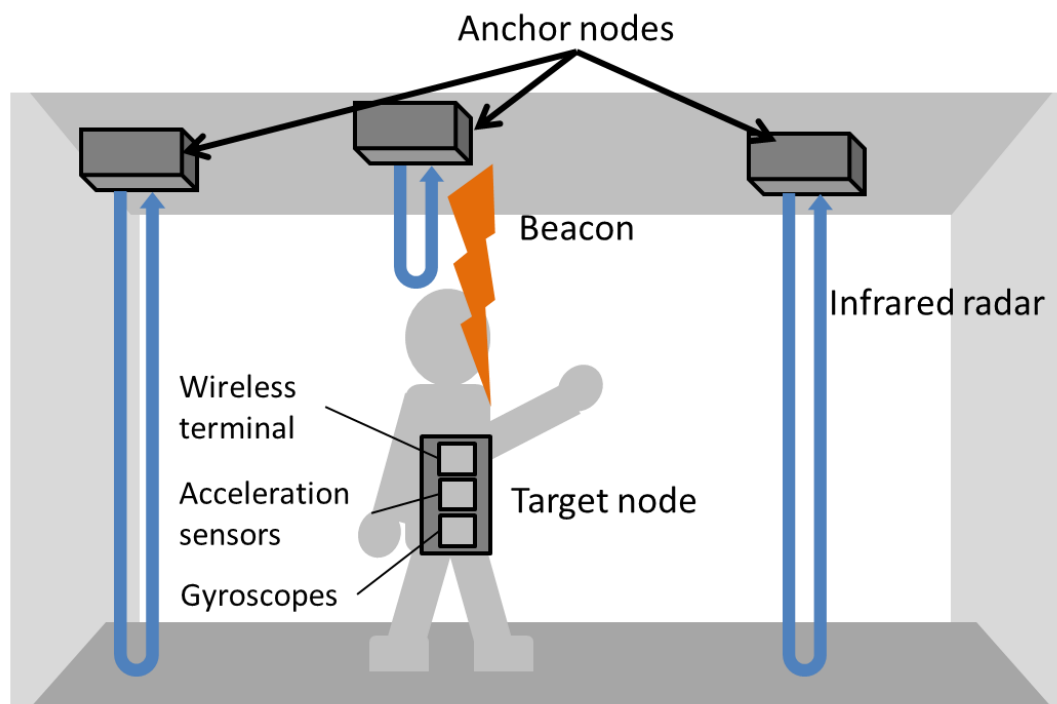


図 8 固定局を設置したシステム

3.3 システムの動作

提案システムは、赤外線レーダを用いて、固定局の直下をターゲットノードが通過した場合に、固定局の位置情報が含まれたビーコンをターゲットノードに送信し、ターゲットノードはこのビーコンから取得した位置情報をもとに、現在の絶対位置と進行方向をリセットする。動作のフローについて図 9 に示す。図の青の破線内は第 2 章で示した処理と同じであり、新たにリセット処理(reset procedure)及び固定局との連携が追加されている。以降では、赤外線レーダを用いた具体的なリセット処理について説明し、ターゲットノードと固定局の連携動作について説明する。

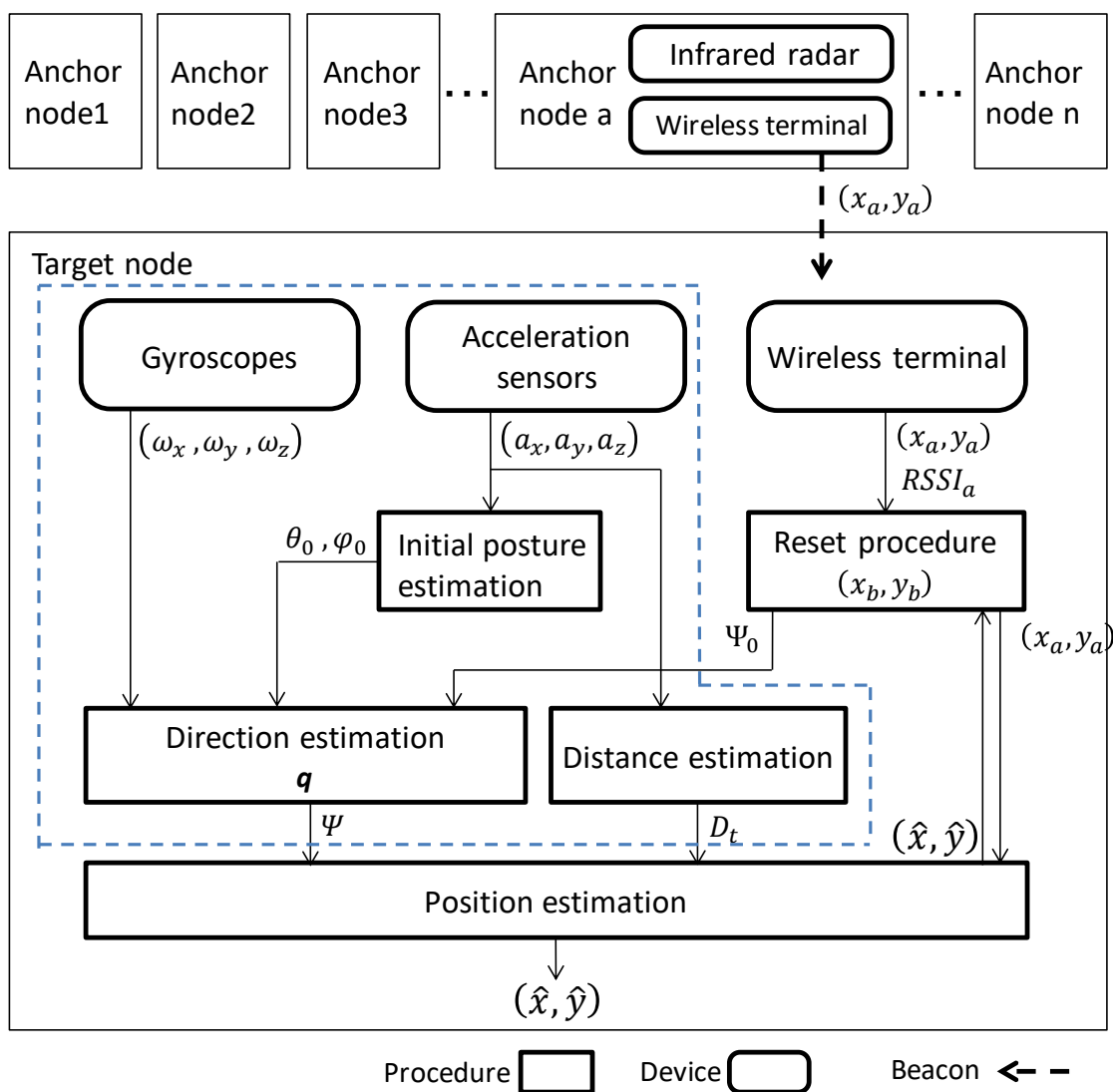


図9 提案システムの動作フローチャート

3.3.1 リセット処理(Reset Procedure)

位置と進行方向のリセット処理について図10に示す。

教師ベクトルの算出は、今回と前回のリセットされた2点の位置を用いる。今回リセットされた固定局の位置を (x_a, y_a) 、前回リセットされた固定局の位置を (x_b, y_b) 、現在の推定位置を (\hat{x}, \hat{y}) とすれば、教師ベクトルは「 (x_a, y_a) と (x_b, y_b) を結ぶベクトル」となる。また、「 (\hat{x}, \hat{y}) と (x_b, y_b) を結ぶベクトル」が前回リセットされた固定局の位置と現在の推定位置を結ぶベクトルであり、前回リセットされた位置から累積的に角度の誤差が発生していると考えられる。

したがって、進行方向の修正量 γ は「 (x_a, y_a) と (x_b, y_b) を結ぶベクトル」と「 (\hat{x}, \hat{y}) と (x_b, y_b) を結ぶベクトル」の内角となるため、式(12)のように表すことができる。

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{(\hat{x} - x_a)(\hat{x} - x_b) + (\hat{y} - y_a)(\hat{y} - y_b)}{\sqrt{(\hat{x} - x_a)^2 + (\hat{y} - y_a)^2} \sqrt{(\hat{x} - x_b)^2 + (\hat{y} - y_b)^2}} \right) \dots (12)$$

式(12)で求めた γ を用いて、現在の進行方向である Ψ を式(13)により修正する。

$$\Psi' = \Psi + \gamma \dots (13)$$

ここで、修正された Ψ' と現在の θ 及び ϕ を用いて、式(6)によりクォータニオンの基準値 q_0 を再計算し、以降は、更新された q_0 を利用し式(9)を更新していく。

また、推定位置は今回リセットされた固定局の位置 (x_a, y_a) に更新する。ただし、前回と同じ固定局によりリセットが検出された場合には、角度の修正量は計算できないため、位置の修正のみを実行する。

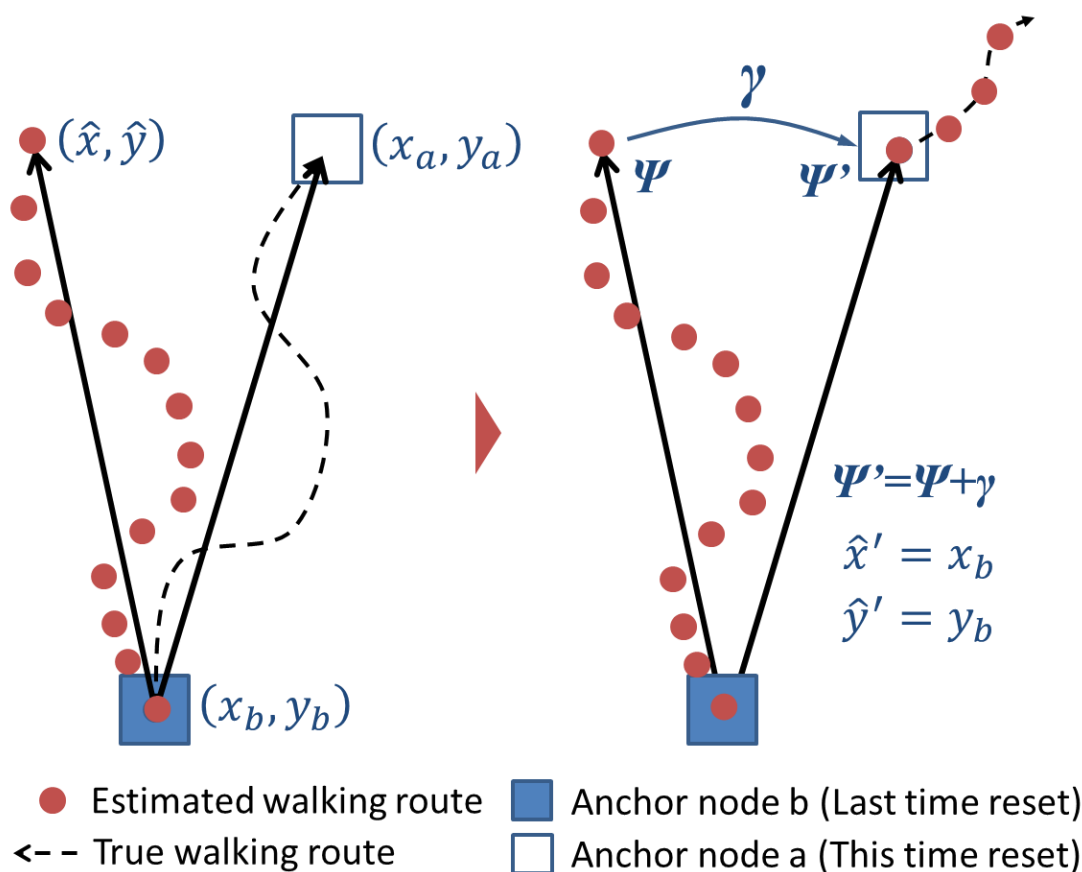


図10 位置と進行方向のリセット

3.3.2 固定局の動作

固定局のリセット処理に関する動作フローチャートを図11に示す。固定局は指向性の強

い赤外線レーダを備える。固定局は天井に敷設することを想定する。赤外線レーダは、そのビーム方向を天井から床に向け、床方向に存在する何らかの物体までの距離を計測することができる。

ここで、人を検出するために、赤外線レーダが反応する高さを制限する必要がある。赤外線レーダの検出距離は汎用的なもので5m以下のものは検出できるため、任意の検出範囲を設定することができる。

本システムでは、後述の歩行実験1の実験会場において、天井の高さを2.5mであったため、歩行者の身長を1.0mから2.0mと仮定し、計測された物体までの距離が1.5m以下になった場合に、固定局の真下に歩行者が存在すると判定するように設計する。固定局は歩行者の存在を判定するとビーコンを送信する。ここで、固定局をaとすれば、自身の位置情報である (x_a, y_a) を含めたビーコンを送信する。

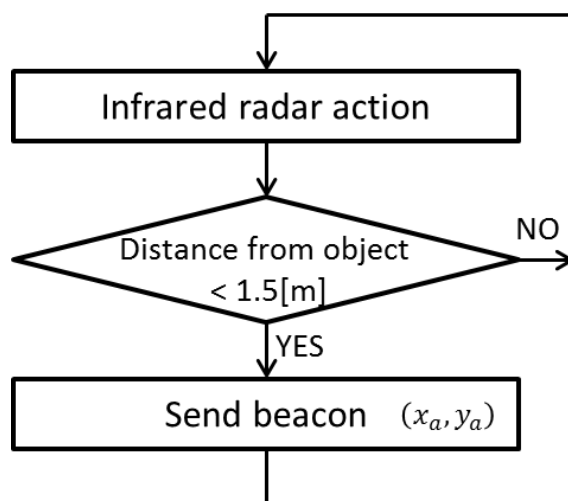


図11 固定局のリセット処理に関する動作フローチャート

3.3.3 ターゲットノードの動作

ターゲットノードのリセット処理に関する動作フローチャートを図12に示す。ターゲットノードはPDRの一連の処理を常に動作させることでリアルタイムに測位を行う。ターゲットノードを所持する歩行者は固定局の存在を意識することなく歩行するが、固定局は歩行者を検出するとビーコンを送信する。

ここで、ターゲットノードは、測位の継続中に、固定局からビーコンを受信した場合に、割り込み処理として受け、絶対位置と進行方向のリセットを実行する。

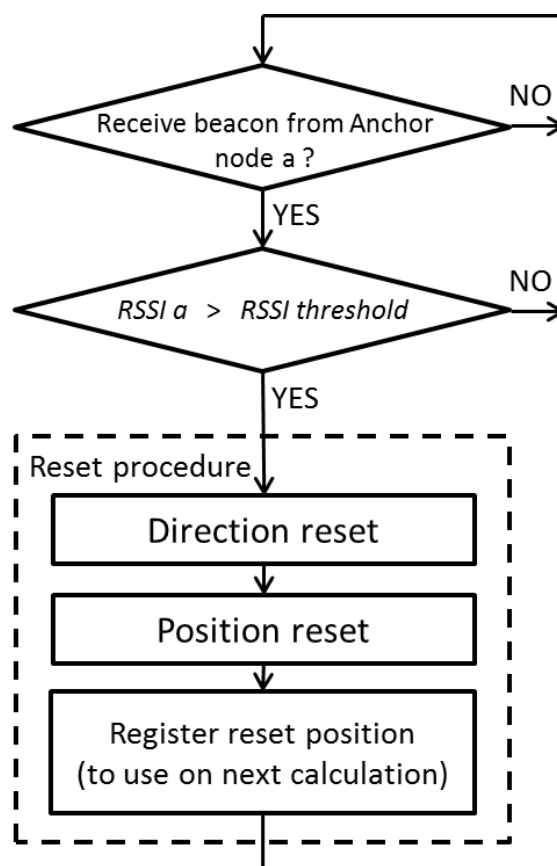


図 12 ターゲットノードのリセット処理に関する動作フローチャート

3.4 リセット処理の問題点

同じ環境で動作しているターゲットノードは 1 台とは限らないため、他の歩行者も固定局の真下を通過することがある。さらに、固定局はビーコンを特定のターゲットノード宛てに送信することができない。固定局は赤外線レーダにより何らかの物体を検出すると、直下に歩行者が存在すると判定し、ビーコンが発動する。これにより、自身のターゲットノードが固定局の真下の位置に存在しないにもかかわらず、他の歩行者により発動されたビーコンにより、自身のターゲットノードのリセット処理が実行されてしまうことが起きる(図 13)。

そこで、ビーコンを受信した場合には、受信強度を示す RSSI を確認し、RSSI の値が低いビーコン、すなわち、距離が遠い場所にある固定局から届いたと推定されるビーコンをフィルタリングする処理を加える。

このときのフィルタリングの閾値を RSSI 閾値(RSSI threshold)と呼ぶことにする。RSSI 閾値の具体的な値は実験的に求めることができる。また、効果的にフィルタリング処理をするためには、電波を遠方まで飛ばさず、局所的なエリアに限定して飛ばす必要がある。

本システムでは天井から床方向に対しての指向性が高いアンテナを利用することにする。

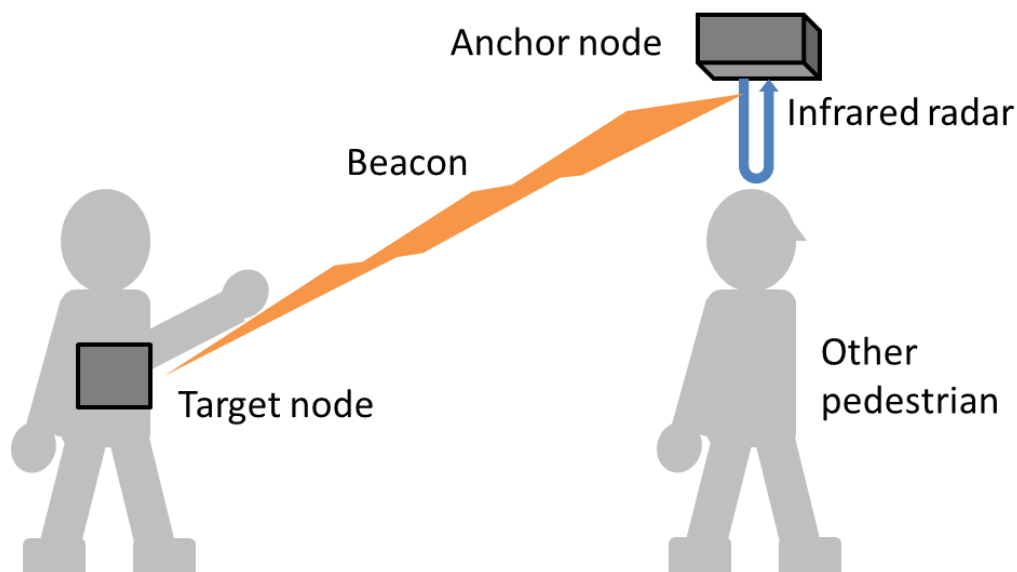


図 13 ビーコン同時受信の問題

3.4.1 RSSI 閾値の選定

RSSI 閾値を求める実験を行う。実験では天井に敷設した固定局が電波を連続的に送信し、歩行者の胸ポケットにターゲットノードを入れて、固定局から受ける電波の RSSI を測定した。このとき、固定局の直下を中心とする円において、円の半径を 0.0m から 3.0m まで 0.5m 刻みに変更しながら、円上を歩行して測定した。以降では、アンテナ直下から歩行した円までの距離をアンテナ距離(Distance from Antenna)と呼ぶ。

図 14 に設置イメージとアンテナの指向性を示す。なお、指向性の効果を確認するため、無指向性アンテナの測定も行った。指向性アンテナとしてバッファロー社製 WLE-DAH、無指向性アンテナとして同社製 WLE-NDR を利用した。指向性アンテナの水平及び垂直のビーム幅はいずれも 75° である。

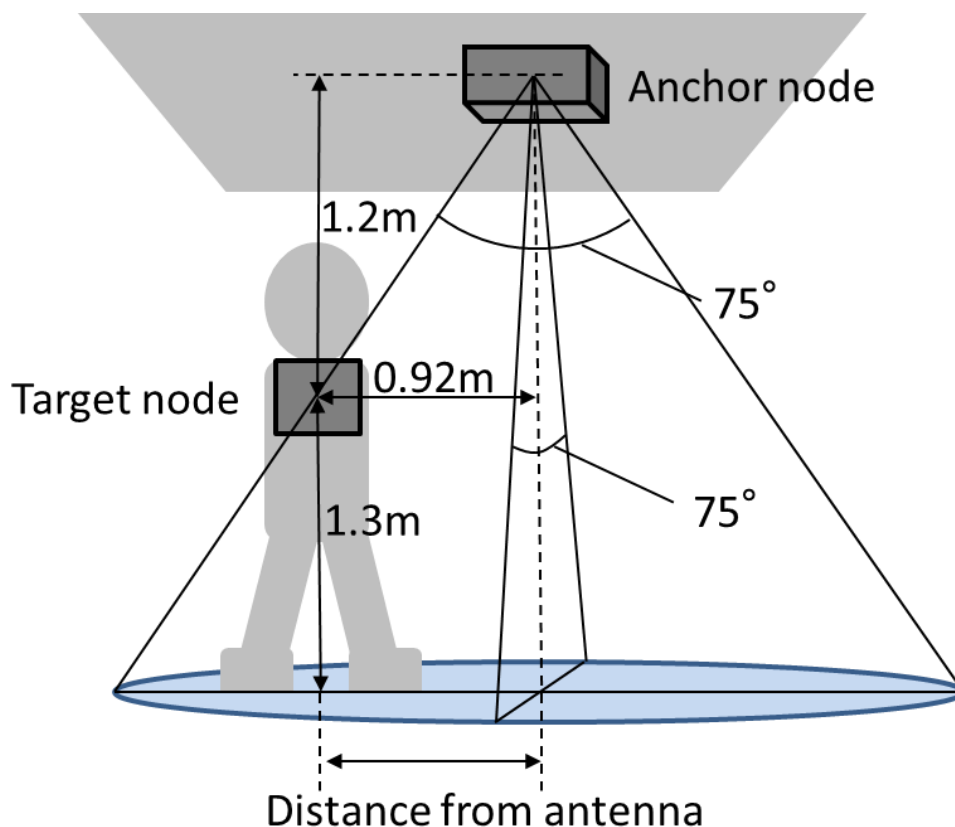


図 14 アンテナの設置

図 15 にアンテナ距離と平均 RSSI の関係を示す。横軸はアンテナ距離を示し、縦軸は測定 10000 回の RSSI の平均値を示す。グラフでは指向性アンテナを丸でプロットし、無指向性アンテナを中抜き丸でプロットした。

無指向性アンテナでは 3.0m までの範囲において RSSI の変化が少ないが、指向性アンテナでは 0.5m から 3.0m にかけて RSSI が低下することが確認できる。また、どちらのアンテナも、アンテナ直下の 0m では RSSI が低下する傾向となるが、これは歩行者の頭に端末が隠れてしまい、電波が見通し外となってしまったためと考えられる。指向性アンテナの結果から、距離に応じて RSSI が低下する傾向が確認できるため、遠方のビーコンをフィルタリングする効果はあると考えられる。

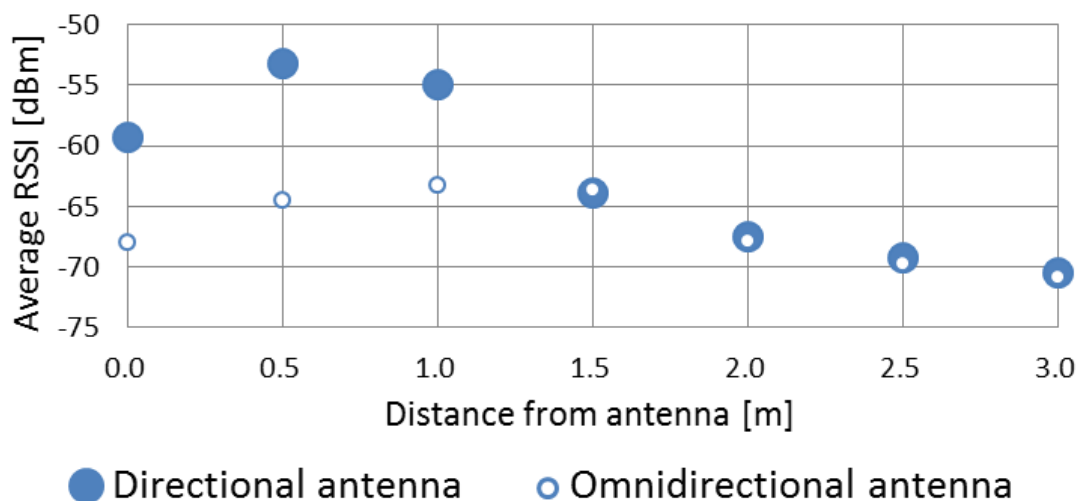


図 15 アンテナ距離と平均 RSSI の関係

次に、同実験で取得した指向性アンテナのデータを用いて、各アンテナ距離における RSSI と累積分布関数(CDF: Cumulative Distribution Function)の関係を求めた(図 16)。グラフが階段状になるのは、実験機の無線機能が RSSI を整数値でしか取得できないためである。図 16 の各グラフを比較すると、アンテナ距離が 1.0m 以下では RSSI が比較的高い値に確率が集中しており、1.5m 以上では RSSI が比較的低い値に確率が集中していることが確認できる。すなわち、本指向性アンテナを用いる場合は、固定局の近傍か否かを分離する境界を、アンテナ距離が 1.0m と 1.5m の間に設定することが効果的であると考えられる。以上から、1.0m と 1.5m を確率的に精度よく分離できる RSSI 閾値を求めるという問題に帰結する。つまり、1.0m では閾値以上の電波を受信する確率が高く、1.5m では閾値以上の電波を受信する確率が低くなる RSSI 値を探せばよい。

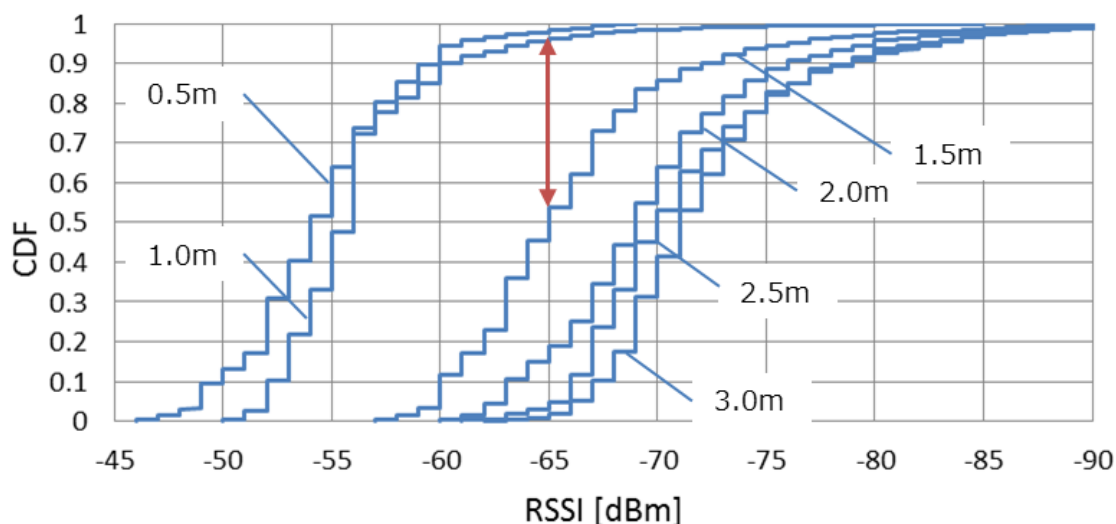


図 16 各アンテナ距離における RSSI と累積分布関数の関係

ここで、図 16 に示す 1.0m と 1.5m での累積分布関数の値を利用し、各 RSSI での差分値を計算する(図 17)。例えば、図 15 において -65dBm における差分値は矢印の長さとなり、RSSI 閾値はこの差分値が最大となるときの RSSI 値により求めればよい。図 17 より -60dBm において差分値は最大となるため、本値を RSSI 閾値として設定した。

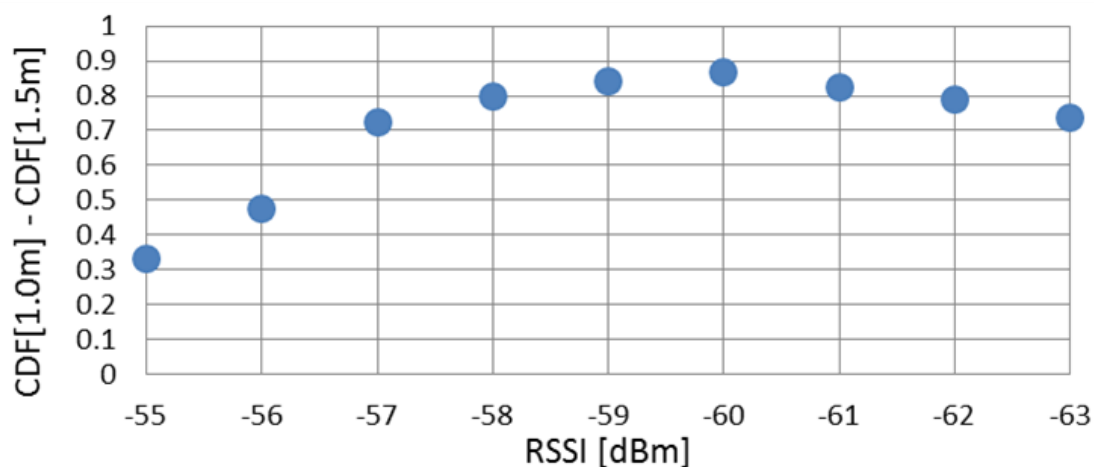


図 17 各 RSSI における 1.0m と 1.5m の CDF の差分値

3.5 実験

本システムの有効性を確認するため、基本特性の検証として歩行実験 1 を実施し、より実践的な環境での検証として歩行実験 2 を実施する。実験で利用するターゲットノードには、第 2 章の歩行実験で用いた装置を基本的な構成は同じである。また、無線機能は

SoC(System on Chip)である Nordic 社製 nRF51822 に含まれる。

3.5.1 歩行実験の手順

屋内の実験会場を利用し、歩行時における位置推定の精度を検証した。被験者は実験会場内のあらかじめ定められたルートに従って歩行し、その時の被験者位置を推定した。図 18 に、その歩行ルートと、歩行ルート上の 6 箇所に敷設した固定局 1 から 6 の位置を示す。被験者は、スタート地点を基点とし、①から⑧の順に 8 の字を描くルートを歩行する。また、測位精度の時間的な推移を確認するため、本ルートを連続して 3 周(計 150m)歩行することにした。なお、歩行実験 1 の実験会場は一般的な大型の会議室を利用した(図 19)。

また、正解位置を算出するため、被験者にはボタンを持たせ、歩行時の曲がるタイミングでボタンを押させることで、その時の時刻を記録した。これにより、前回の曲がり角と今回の曲がり角でボタンを押下した時刻の差から歩行時間が計算でき、さらに、曲がり角の位置は既知であることから、線形補完により正解位置を算出することができる。距離誤差は、正解位置とターゲットノードが計算した推定位置間の距離とした。被験者は 3 人とし、各条件で 10 回ずつ歩行した。実験では、通常の方法で歩行するように指示した。通常の方法の歩行は、図 3 に示す秒速 0.5m/s から 2.0m/s の範囲に入り、この範囲では加速度センサの値から距離が精度良く推定することができる。

また、固定局は 3.4.1 に示すものと同じ指向性アンテナを備え、設置方法も同様に天井から直下に指向性が向くようにした。さらに、本実験では角度の累積誤差の影響を検証するため、スタート地点におけるヨー角の初期値 ψ_0 は、あらかじめ正しい進行方向を設定して開始した。

なお、後述の歩行実験 2 においては、歩行ルートは異なるが、それ以外については上述と同様の方法及び条件で測定した。

また、個体差による影響を避けるため、同じ 1 台のターゲットノードを用いて実験を行う。さらに、温度特性の影響を避けるため、実験会場の室温を 27°C に設定し、十分な時間、室内にデバイスを放置した状態から電源を投入し測定を行い、それを被験者が変わる毎に繰り返す。

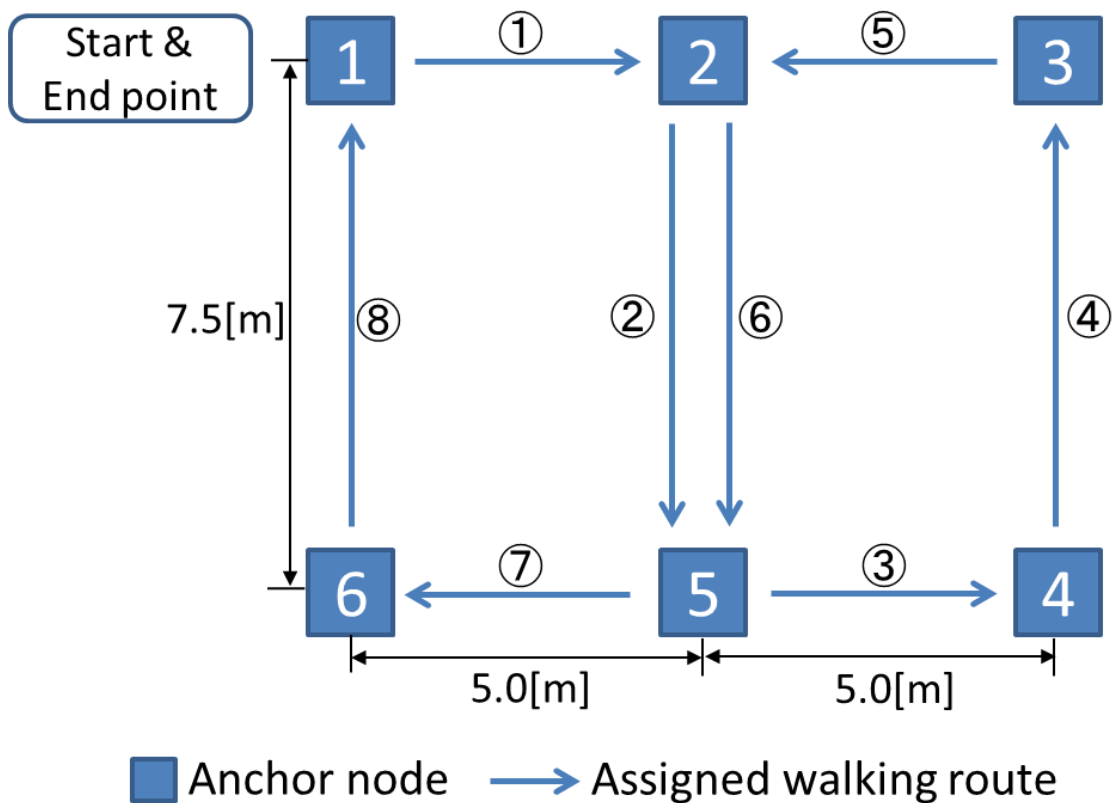


図 18 歩行実験 1 の歩行ルートと固定局の位置

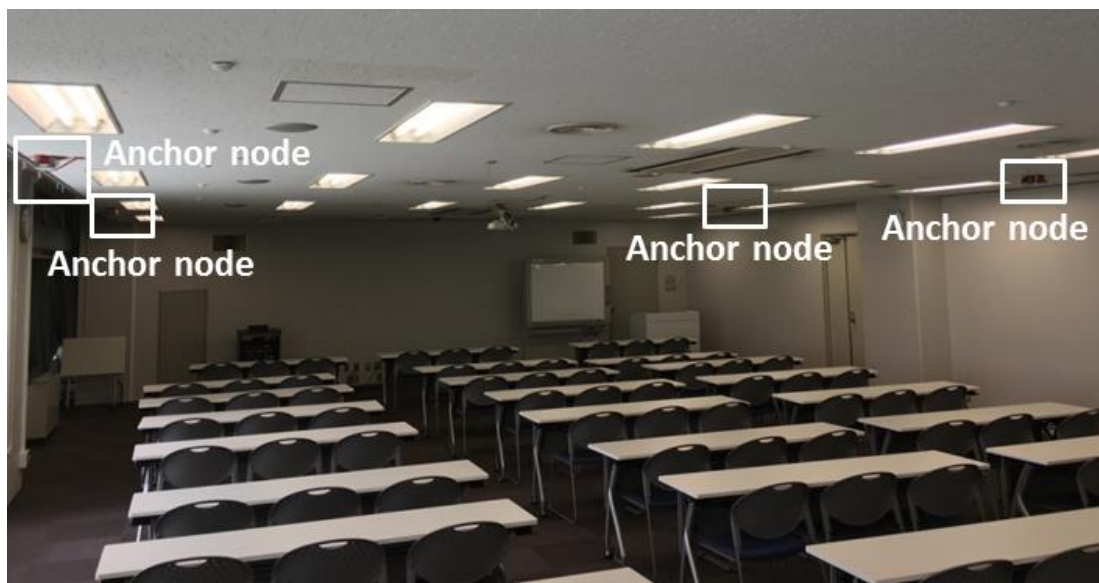


図 19 歩行実験 1 の実験会場

3.5.2 各システムの機能

歩行実験 1 では、提案システムと 2 つの従来システムを用いて歩行時の位置推定の精度を評価した。各システムの機能を表 5 にまとめる。

従来システムには、PDR 単体で動作させるシステム(以下、従来システム 1)と、提案システムと同じようにリセット処理を行うが、赤外線レーダは利用せず、受信ビーコンの RSSI 閾値のみでリセットを判定するシステム(以下、従来システム 2)を用いた。ここで、ビーコンは 1msec の周期で連続送信することとした。なお、従来システム 2 には、機能を統一するために、提案システムと同じように、リセット時に位置だけでなく進行方向も修正する処理を加え、また、進行方向の修正の効果を確認するために、従来システム 2 と提案システムのそれぞれにおいて、進行方向のリセットを行わないシステム(以下、方向リセットなしの従来システム 2 及び方向リセットなしの提案システム)についても評価した。

表 5 各システムの機能

	PDR	Radio	Infrared radar	Direction reset
(a) Conventional system1	○			
(b) Conventional system2	○	○		○
(c) Conventional system2 without direction reset	○	○		
(d) Proposed system	○	○	○	○
(e) Proposed system without direction reset	○	○	○	

3.6 歩行実験 1

最初にそれぞれの歩行軌跡の概形を確認するため、従来システム 1、従来システム 2、方向リセットなしの従来システム 2、提案システム及び方向リセットなしの提案システムについて、その一例を図 20 に示す。破線が歩行ルートを示し、実線が推定位置の軌跡を示している。

従来システム 1(図 20(a))では、軌跡が少しずつ回転してしまうことが確認できる。この現象が PDR の課題として取り上げている進行方向の累積誤差による測位精度の劣化であり、

ジャイロ스코ープのドリフト誤差に起因する。

従来システム 2(図 20(b))では、従来システム 1 と同じように軌跡が回転する現象は生じない。また、1 周目から 3 周目まで軌跡がほぼ重なって見えることから、リセット処理が同じ場所で実行されていると考えられる。ただし、RSSI を利用した方式であることから、電波伝搬の影響により RSSI が変動するため、精度の良い位置でリセットが実行されず、歩行ルートから外れてしまう場所がある。これにより、補正する角度が正しく修正できない。

一方、赤外線レーダを備えた提案システム(図 20 (d))では、正確な位置でリセットが実行されるため、推定の軌跡と歩行ルートがほぼ一致することが確認できる。また、方向リセットなしの従来システム 2(図 20(c))及び方向リセットなしの提案システム(図 14(e))はいずれも、軌跡が歩行ルートから大きくずれてしまっており、それぞれ(図 20(b))、(図 20(d))と軌跡の概形を比較することによっても、進行方向のリセット処理の効果を確認することができる。

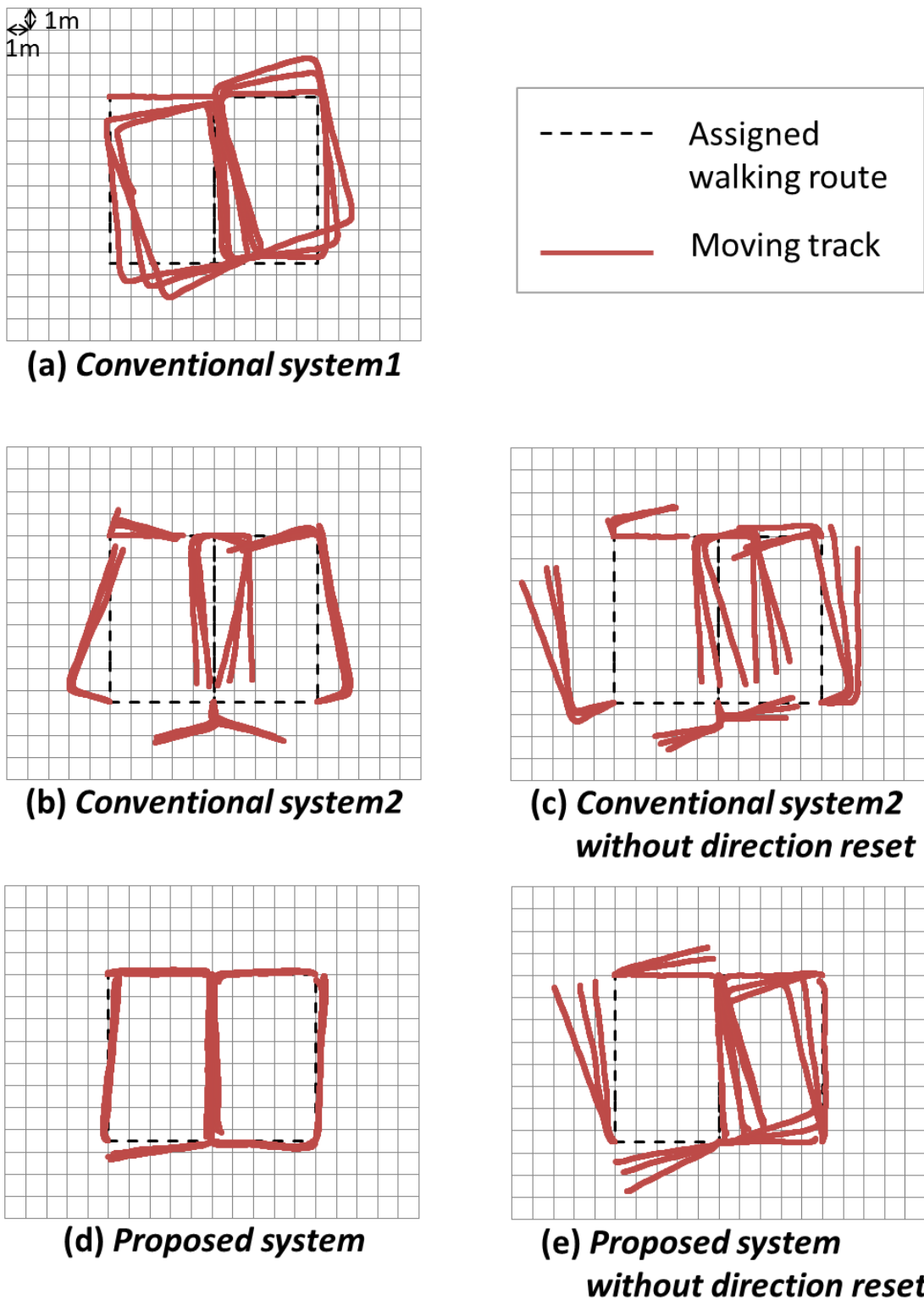


図 20 歩行実験 1 における軌跡の比較

第3章 進行方向及び絶対位置の修正に赤外線レーダを用いるシステム

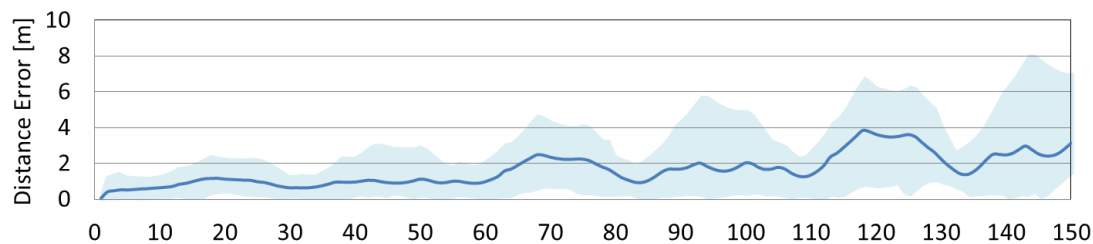
次に、距離誤差が発生する位置を確認するため、図 21 に示すように、スタート地点からの歩行距離と各地点での距離誤差の関係を評価した。横軸は歩行ルート 3 周分にあたる 150m までの歩行距離を示しており、縦軸は各歩行地点での距離誤差を示している。実線は被験者 3 人による計 30 回分の結果から求めた平均距離誤差(以下、平均距離誤差)を示しており、1m 区間毎の平均値として算出している。ハッチの部分は 30 回分の結果において得られた距離誤差の値の範囲を示している。また、グラフの縦の破線は、本来リセットが実行されるべき固定局の地点を示しており、そのときの固定局の番号を四角形内の番号に示している。

前述のように、従来システム 1(図 21(a))では軌跡が回転する影響により、歩行距離が進むと平均距離誤差も上昇する傾向となることが確認できる。

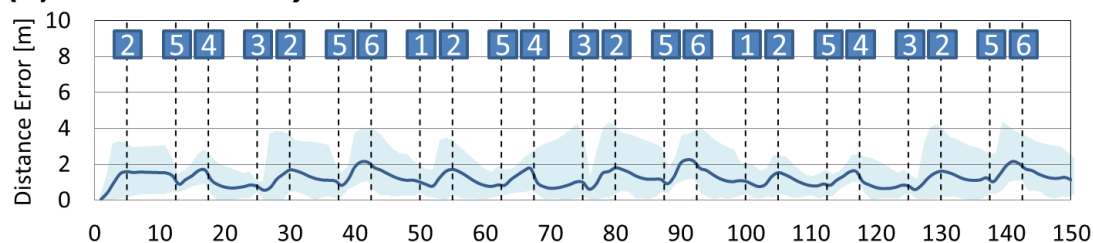
従来システム 2(図 21(b))では、リセットの効果により、従来システム 1 のような傾向とはならないが、リセットが本来実行されるべき位置からずれている場所がある。正しい位置でリセットされる場合、リセット位置の近傍で平均距離誤差が低下するが、例えば、固定局 2 の近傍のように、伝搬環境の影響により正しい位置でリセットされず、平均距離誤差が低下しない場所が確認できる。このような場所でリセットが実行されると、進行方向が正しく修正されないため、リセット後の平均距離誤差が低下しない。また、方向リセットなしの従来システム 2(図 21(c))では、歩行の前半については従来システム 2 と比べて平均距離誤差の傾向は同等となるが、歩行距離が進むとともに平均距離誤差も上昇していく傾向となる。

一方、提案システム(図 21 (d))では、赤外線レーダは指向性が高く近傍の環境の影響を受けにくいことから、固定局の直下でリセットが実行されるため、その度に、平均距離誤差が低下することが確認できる。さらに、誤差が累積される前にリセットが実行されるため、歩行を繰り返しても、平均距離誤差が低いままの状態を保っている。また、方向リセットなしの提案システム(図 21 (e))では、提案システムと同様にリセットの度に平均距離誤差が低下することが確認できるが、歩行距離が進むとともに、進行方向の累積誤差が大きくなるため、平均距離誤差も上昇していく傾向となる。

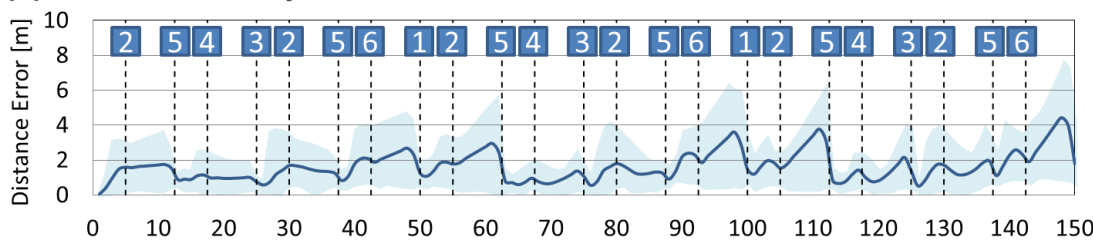
(a) Conventional system 1



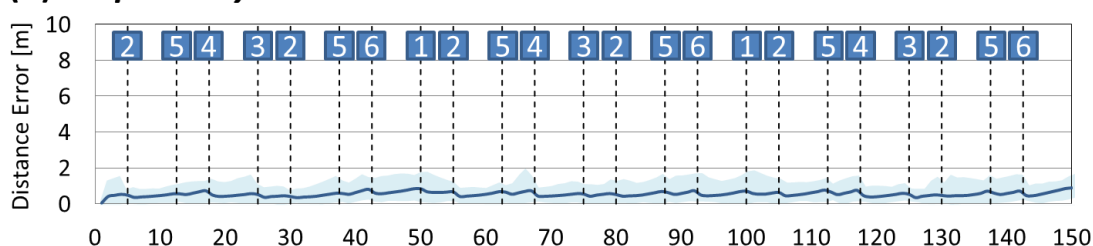
(b) Conventional system 2



(c) Conventional system 2 without direction reset



(d) Proposed system



(e) Proposed system without direction reset

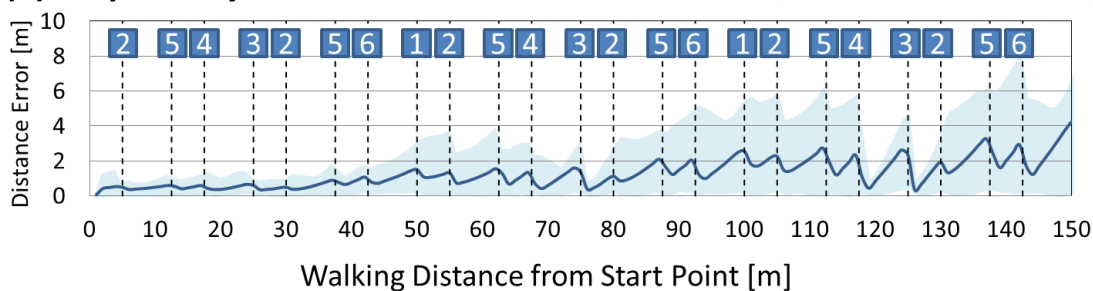


図 21 スタート地点からの歩行距離と距離誤差の関係

次に、測位精度の時間的推移を統計的に分析するため、1周目から3周目までの距離誤差

の累積分布関数を計算した(図 22)。図 22 では、距離誤差の低い部分に確率が集中する方式ほど、測位精度が良いと考えることができる。

これまでの議論と同じように、従来システム 1(図 22 (a))では進行方向の累積誤差により、距離誤差が1周目から3周目にかけて上昇していくことが確認できる。

従来システム 2(図 22 (b))及び提案システム(図 22 (d))では1周目から3周目にかけてCDFの傾向が大きく変わらないことから、リセットの効果が確認できる。ただし、電波と赤外線レーダではリセット位置の正確さが異なるため、提案システムの方が、従来システム 2 に比べて距離誤差が低い値に集中する。また、従来システム 1 と従来システム 2 を比較すると、2周目以降では逆転するものの、1周目では、むしろリセットを行わない従来システム 1 の方がよい結果となっている。リセット処理は常に行う方が良いわけではなく、PDR 単体でも歩行開始時のように測位精度が保てる場合には、リセットの精度を考慮して実行する必要があるといえる。例えば、総歩行距離が所定の閾値を超えた場合にのみ、電波によるリセットを実行する、という方法が考えられる。提案システムではリセットの位置が正確であるため、1周目においても、従来システム 1 と比較して測位精度が良い結果となる。

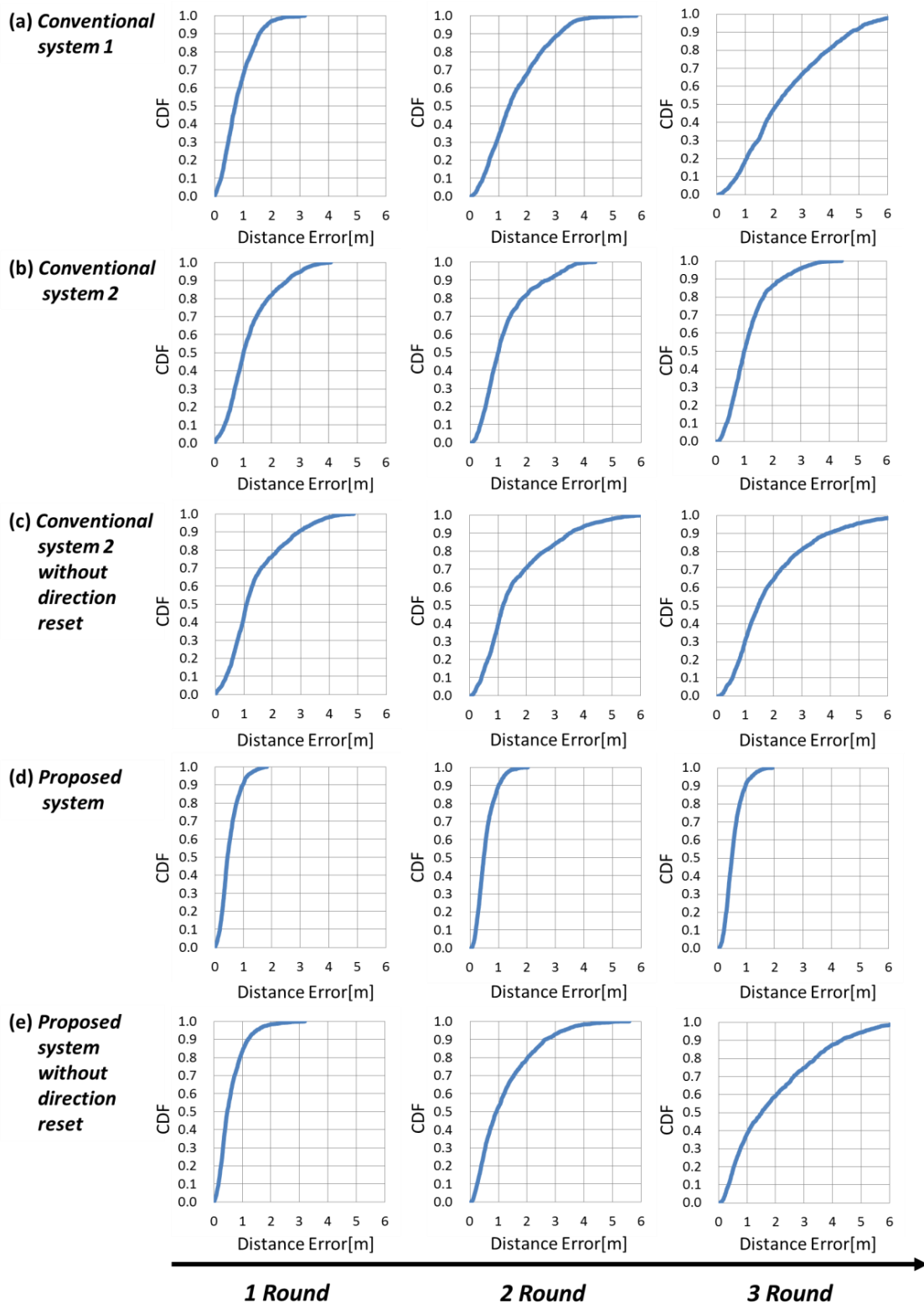


図 22 距離誤差の確率密度関数の時間的推移

3.6.1 固定局数による測位精度への影響

さらに、進行方向のリセットの効果を確認するため、固定局の台数を減らした場合についても同様に実験を行った。具体的には、図23に示す固定局1、3、4、6の4台を利用した場合と、同ノード1、3の2台を利用した場合について確認した。

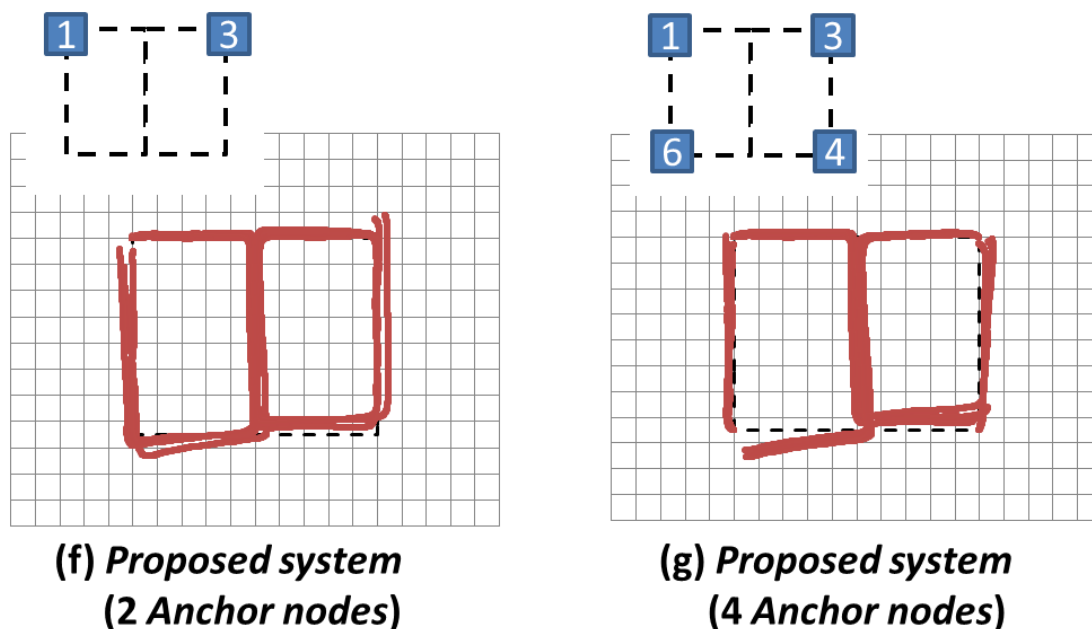
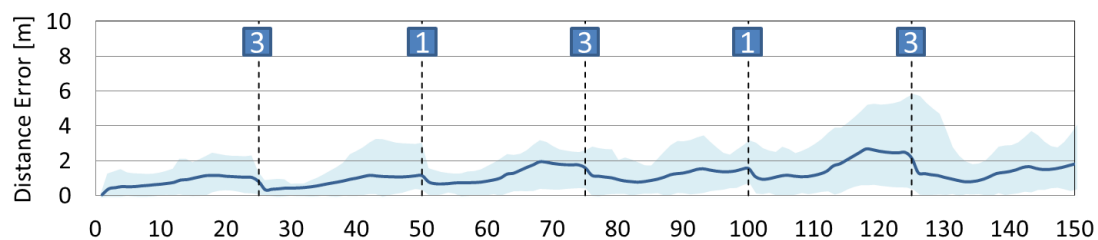


図23 軌跡の比較

図24に示すように、固定局を減らしても、軌跡の概形が大きく崩れていないことが確認できる。また、これまでの議論から想定されるように、いずれのノード数の場合も、固定局までは誤差が累積され、固定局を通過するたびに、平均距離誤差がリセットされる傾向を確認した。

(f) Proposed system (2 Anchor Nodes)



(g) Proposed system (4 Anchor Nodes)

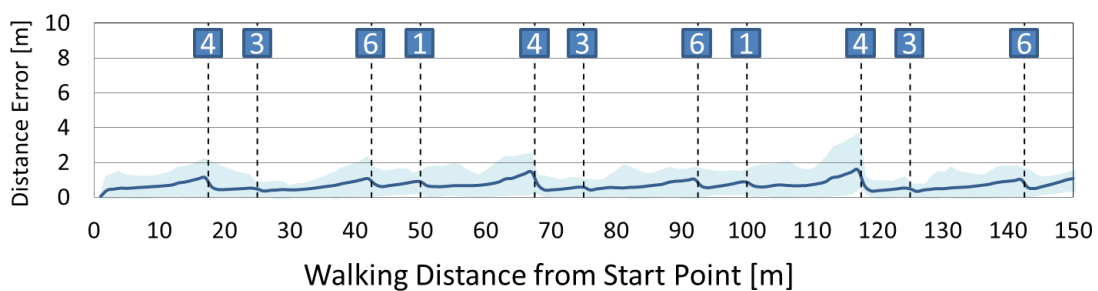


図 24 スタート地点からの歩行距離と距離誤差の関係

3.7 歩行実験 2

歩行実験 2 では提案システムの想定シーンを考慮し、より実践的な環境での位置推定を実施した。利用シーンは限定するものではないが、一例として、棚が並べられた倉庫から目的の物品を探し出し、搬送場所まで持ち込むというシーンを想定している。図 25 に歩行実験 2 の実験会場を示す。

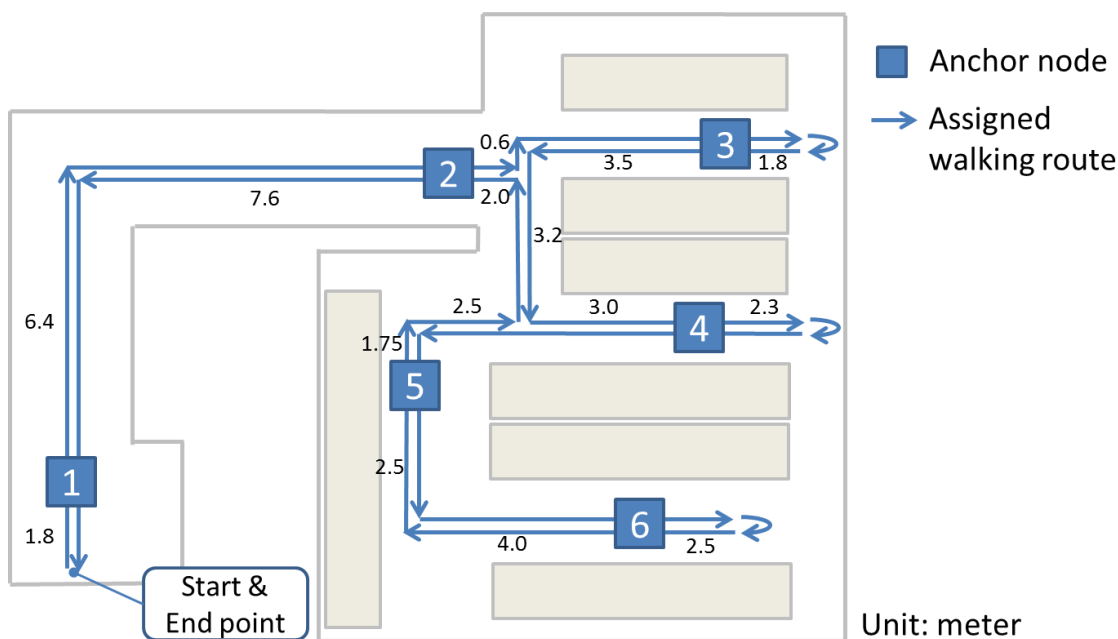


図 25 歩行実験 2 の歩行ルートと固定局の位置

歩行軌跡の概形について図 26 に示す。歩行実験 2 では歩行実験 1 のように 2 点間の移動ではなく、曲がり角や 180 度回転する動作も含まれるが、歩行実験 1 と同様の傾向となることが確認できる。

また、近接した固定局間で進行方向を修正する場合、リセット時の精度がその後の距離誤差に大きく影響する。例えば、従来システム 2(図 26(b))では固定局 5 から 2 へ移動する際のリセット処理において精度が悪いため、その後の軌跡が大きくずれる区間が確認できる。文献[25]の方式も、ランドマーク間が近接し、リセットの精度が悪い場合には、同様の現象が生じるものと思われ、進行方向を効果的に修正するためには、本提案システムのように高精度なリセット機能が必要であると考えられる。

さらに、固定局 3、4、6 の近傍では、180 度回転する動作となるが、いずれのシステムも歩行区間が短いにもかかわらず距離誤差が大きくなっている。180 度回転する動作は理想的には歩行者の位置は変化しないが、提案システムの距離推定では回転動作による振動で前進してしまうことが原因となっている。

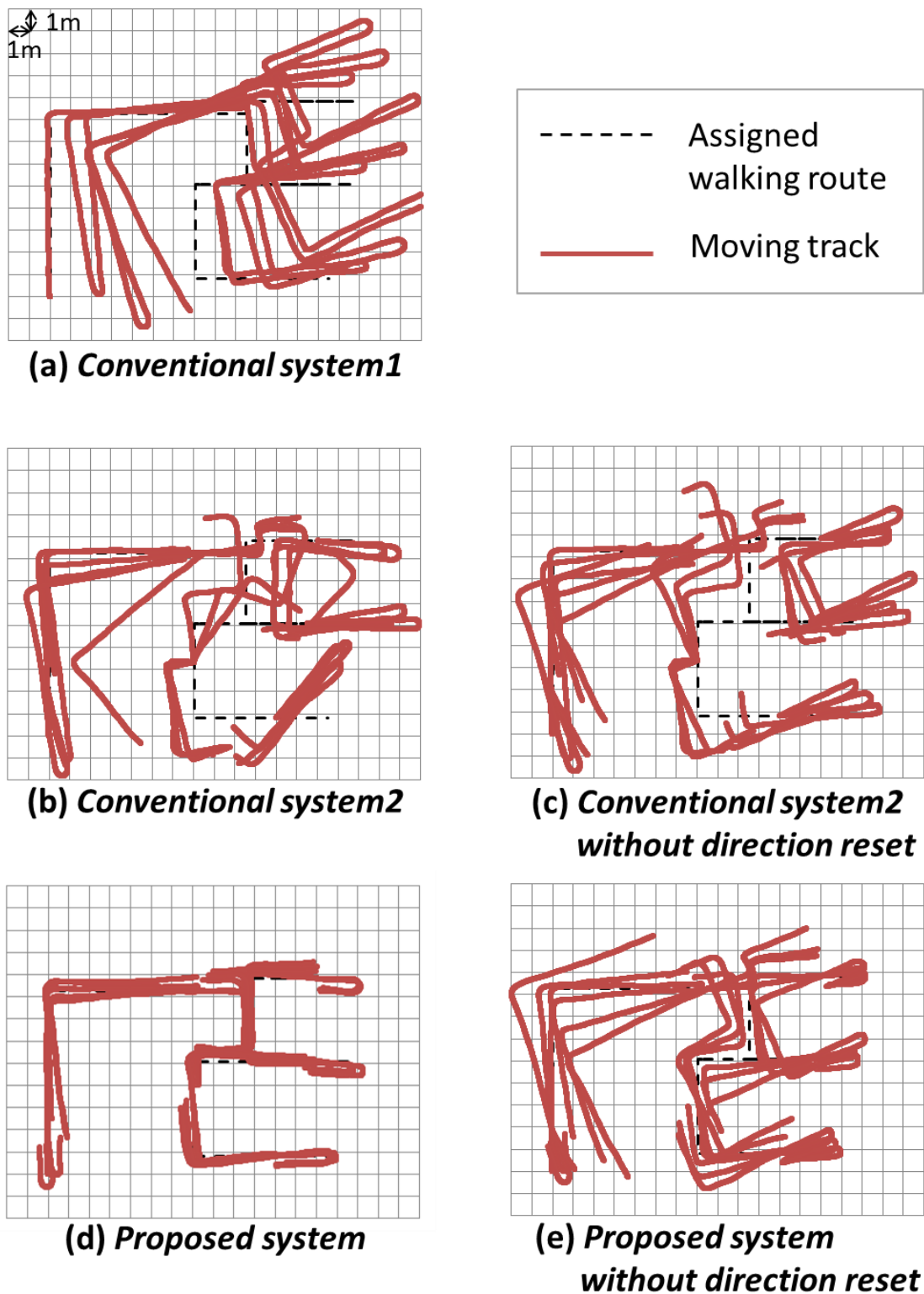


図 26 歩行実験 2 における軌跡の比較

3.8 考察

歩行実験1の「平均距離誤差の全歩行区間150mにおける平均値と最大値」について、各システムの結果を表6にまとめる。

従来システム2と提案システムのいずれも、進行方向をリセットすることで平均距離誤差が改善することが確認できる。しかし、リセットを実行することで、提案システムは平均距離誤差が1.27m(表3(e))から0.55m(表6(d))へ44%以下に改善するのに対して、従来システム2は1.64m(表3(c))から1.23m(表6(b))へ75%以下にしか改善しない。

表6 歩行実験1における距離誤差の平均値と最大値

		Distance Error [m]	
		average	Maximum
(a)	Conventional system1	1.64	8.11
(b)	Conventional system2	1.23	4.43
(c)	Conventional system2 without direction reset	1.64	7.78
(d)	Proposed system	0.55	2.03
(e)	Proposed system without direction reset	1.27	8.27
(f)	Proposed system (2 Anchor nodes)	1.17	5.88
(g)	Proposed system (4 Anchor nodes)	0.70	3.82

同様に、歩行実験2の「平均距離誤差の全歩行区間272mにおける平均値と最大値」を表7にまとめる。歩行実験2でも同様の傾向が確認でき、提案システムは平均距離誤差が1.58m(表7(e))から0.61m(表7(d))へ39%以下に改善するのに対して、従来システム2は2.19m(表7(c))から1.53m(表7(b))へ70%以下にしか改善しない。これは、従来システムにおいてリセットの精度が悪いため、進行方向を修正しても十分な効果が得られていないためと考えられ、システムを設計する上で、リセットの精度が重要となることを示している。

また、歩行実験1の環境では、固定局6台を用いた従来システム2(表6(b))よりも、同ノード2台だけを用いた提案システム(表6(f))の方が、平均距離誤差が低い結果となった。システムの導入において固定局を増やすといった手段をとるよりも、提案システムのように、位置と進行方向を精度良くリセットする手段をとる方が、システムの測位精度を向上させられる可能性がある。

なお、複数人が歩行する場合には、RSSI 閾値によるフィルタリングの性能が距離誤差に

影響し、固定局の直下から半径 1.5m 内に複数人の歩行者が存在する場合に、そのいずれかの歩行者が赤外線レーダに反応すると、残りの歩行者は誤検出によるリセットが発動し、最大で 1.5m 程度のリセット位置の誤差が発生する。ただし、提案システムのユースケースを考慮すると、固定局の直下半径 1.5m 以内に複数人が存在する確率は低く、発生しても一時的であると思われるため、平均距離誤差への影響は小さいと考えられる。一方、偶然的に上述の状況が連続して発生した場合には、常にリセットの精度が従来システム 2 と同じとなるため、最大誤差を見積もる上では、従来システム 2 の値を参照するべきであると考えられる。

また、歩行実験では、各固定局を歩行通路の天井に設置し、真下の歩行者を検出するようにしたが、通路の壁側面などに取り付けて真横や斜め下の歩行者を検出することもできる。この場合には、固定局の座標をそのままリセット位置とするのではなく、赤外線レーダから取得した歩行者までの距離を利用し、固定局から距離のずれを補正し、リセット位置とすればよい。

表 7 歩行実験 2 における距離誤差の平均値と最大値

		Distance Error [m]	
		average	Maximum
(a)	Conventional system1	4.64	26.79
(b)	Conventional system2	1.53	10.14
(c)	Conventional system2 without direction reset	2.19	16.96
(d)	Proposed system	0.61	2.82
(e)	Proposed system without direction reset	1.58	14.48

また、今回利用した赤外線レーダは、安価に入手が可能な汎用デバイスを利用しており、無線機を備えた固定局と比べても、十分に安価に入手することが可能である。よって、外部情報を利用するために、固定局を敷設する必要があるが、測位精度との費用対効果という面において、提案方式はリーズナブルな解決策として考えることができる。

次に、提案方式の課題を検討する。赤外線レーダは指向性が高いため、絶対位置をリセットするための検出精度は高いが、歩行するルートによっては赤外線レーダが歩行者を検出できない可能性がある。したがって、固定局の直下を歩行せずとも進行方向を修正できれば、システムの利便性が向上すると考えられる。第 4 章では、この課題について検討する。

3.9 結言

第 3 章では、電波及び赤外線レーダを使うことで、絶対位置をリセットし、累積的に生じる角度誤差を修正する測位システムを提案し、その検証を行った。

屋内の会議室において位置推定の歩行実験を行ったところ、272m の歩行ルート区間内の平均距離誤差は、提案システムでは 0.61m となり、PDR 単体で動作させる従来システムの 4.64m に対して、14%以下に改善した。この結果は、第 2 章のシステム要件で定めた平均測位誤差 1m 以下の目標値を満たすものである。また、本実験環境では、固定局 6 台を用いて電波によるリセットを行う従来システムよりも、同ノード 2 台だけを用いた提案システムの方が、平均距離誤差が改善する結果となり、導入コストの面で利点がある可能性を示した。さらに、今回利用した赤外線レーダは、安価に入手が可能な汎用デバイスを利用しており、本システムの要件である低コストでの実現を満たすことができる。

しかし、赤外線レーダは指向性が高いため、絶対位置をリセットするための検出精度は高いが、歩行するルートによっては赤外線レーダが歩行者を検出できない可能性がある。したがって固定局の直下を歩行せずとも進行方向が修正できれば、システムの利便性が向上すると考えられる。

第 4 章では、赤外線レーダの近傍を歩行しない場合でも、電波によるビーコンを利用することで進行方向を修正するシステムを提案し、その性能を評価する。

第4章 進行方向修正に受信電力によるゆがみ評価を用いるシステム

4.1 緒言

第2章では、PDRによる位置推定では、歩行を継続するとジャイロスコープの温度ドリフトにより推定の歩行軌跡が曲がる傾向となることを確認した。しかし、実際の歩行軌跡と概形は類似するため、何らかの方法で軌跡のずれを推定できれば、測位精度が改善できると考えられる。

第3章では、赤外線レーダを用いることで、進行方向の誤差を直接的に求め、歩行者の位置と角度を修正するシステムを提案した。これにより、歩行者が赤外線レーダの直下を通過する度に、それまで累積されていた進行方向の誤差がリセットされるため、測位精度が改善されることを確認した。

しかし、赤外線レーダは指向性が高いため、位置をリセットするための検出精度は高いが、歩行するルートによっては検出されない可能性がある。したがって、直下を歩行しない場合でも、進行方向を修正できれば、アプリケーションの利便性が向上すると考えられる。

また、ターゲットノードが備えるジャイロスコープからは相対的な回転角しか計算できないため、一般的には絶対方向の基準をいずれかのタイミングで推定する必要がある。絶対方向の推定には磁気センサがしばしば用いられるが、金属の影響を受けるため、本システムのユースケースのように、鉄筋ビルの建設現場等では精度よく利用できない場合がある[44]。そこで、磁気センサを不要とし、絶対方向の基準を必要としない方式が必要となる。

第4章では、これらの問題点を解決するために、全方位を分割するように放射的に回転させながら配置した複数の軌跡候補を用意し、センサを利用した歩行者自律航法の手順により軌跡候補の位置をそれぞれ同時に推定していき、屋内に設置された固定局から連続的に送信されるビーコンの受信電力を測定することで、それぞれの軌跡候補に対して受信電

力に基づいたゆう度評価を施し、軌跡候補の中から評価値の高い軌跡を選択し、その現在位置と推定位置とする屋内測位システムを提案し、本システムの有効性を実験的に評価する。

4.2 システム構成及び基本動作

4.2.1 システム構成

第 4 章の提案システムの概要について図 27 に示す。提案システムはターゲットノード及び固定局から構成される。

ターゲットノードは、これまでの章と同様に、測位の対象となる歩行者端末のことであり、近傍の固定局からビーコンを受信する無線機、加速度センサ、ジャイロスコップ、及びリチウムイオンバッテリーを備える。ターゲットノードのハードウェアとしての構成は第 3 章と同じである。

固定局は屋内に敷設する固定ノードのことであり、ターゲットノード宛てにビーコンを送信する無線機を備える。

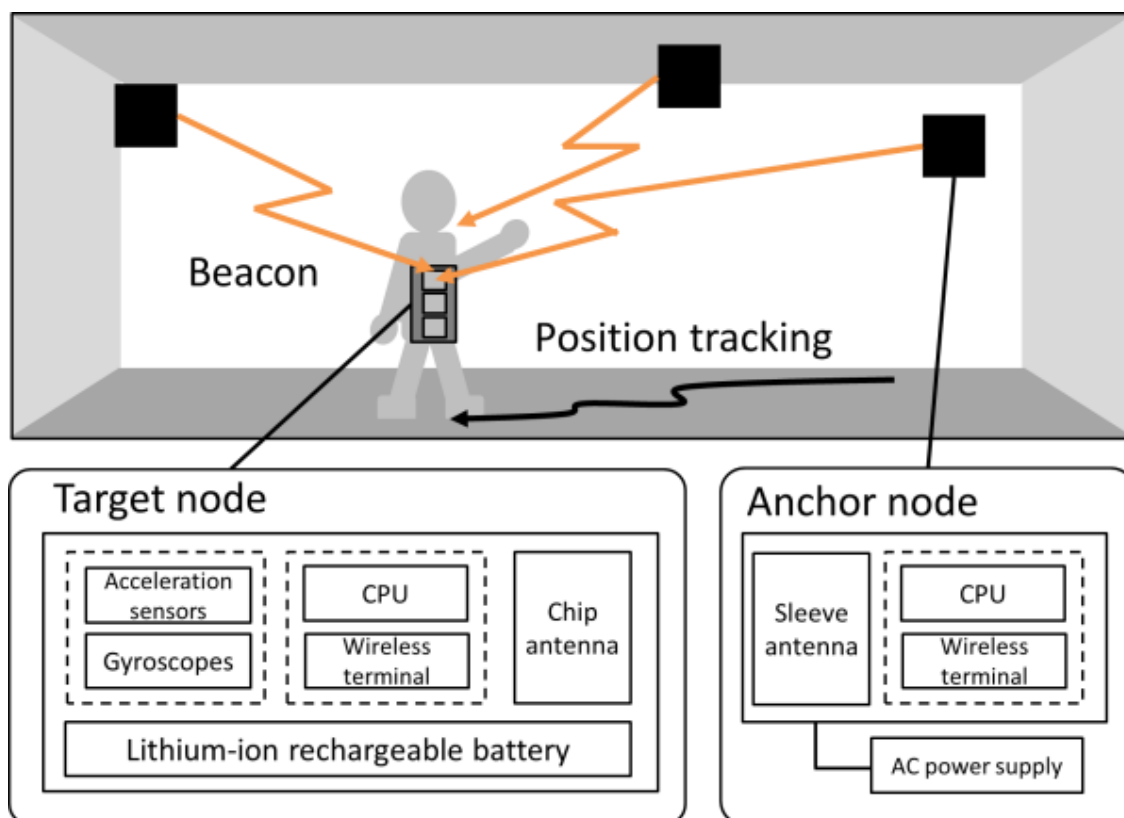


図 27 提案システム概要

4.2.2 無線通信の基本動作

無線通信の基本動作は消費電流の観点から設計する。ターゲットノードは携帯できることが必須であるため、二次電池として小型化が可能なりチウムイオンバッテリーを選定する。第 2 章の技術的条件により、リチウムイオンバッテリーの容量は 200mAh 以下である。

ここで 24 時間以上の連続動作がシステム要件であるため、平均消費電流は 8.3mA 以下にする必要がある。現在、普及している無線 LAN について一般に入手可能なチップやモジュールを調査すると、平均消費電流は 200mA 程度であり、要件を満たすことができない。したがって、低消費電力化を目的とし、汎用的なチップで実装できる方式を検討した。以下では通信手順を説明し、消費電流が要件を満たすかを確認する。

固定局とターゲットノードの通信のタイムチャートを図 28 に示す。それぞれの無線伝送速度は 1Mbps である。無線 LAN 等で用いられるパケットの衝突回避技術を実装することは、本システムのような非力なデバイスでは難しい。よって固定局はビーコンをランダムなタイミングで送信することとし、ビーコンの衝突をあらかじめ想定する設計とする。具体的にはビーコンの送信要求は一定間隔(Beacon interval)で発生し、送信要求発生後に 0 から次の送信要求が発生する時刻までのランダムな時間だけ待った後に送信する。ビーコンサイズは 100bit とし、各固定局の位置情報が含まれる。送信以外の時間はターゲットノードから測位結果を待ち受ける。

ターゲットノードはいずれかの固定局から 1 つのビーコンを受信するまで待ち続ける。受信が完了すると、加速度センサとジャイロスコープによるサンプリングを開始し、センサの取得情報とビーコン情報から測位計算を行い、その測位結果をブロードキャストで近傍の固定局宛てに送信する。ここで、利用時間を向上させるため、送信後は次の受信開始のタイミングまでスリープする。次の受信開始のタイミングはタイマにより一定間隔(以降、測位間隔、Localization interval)となるように設定する。

本通信手順では測位間隔でセンサのサンプリングを行うため、測位間隔が短いほど一般的には測位誤差も小さくなる。ただし、測位間隔と平均消費電流はトレードオフの関係であるため、システム要件を考慮して測位間隔を設計する必要がある。以降では平均消費電流と測位間隔の関係を求める。

図 28 に示すように、本システムのターゲットノードの測位間隔内には、受信処理、測位計算処理(図 28 (e))、送信処理(図 2(f))及びスリープの時間(図 28 (g))があり、平均消費電流は、各処理の消費電流と各処理が占める割合により決まる。

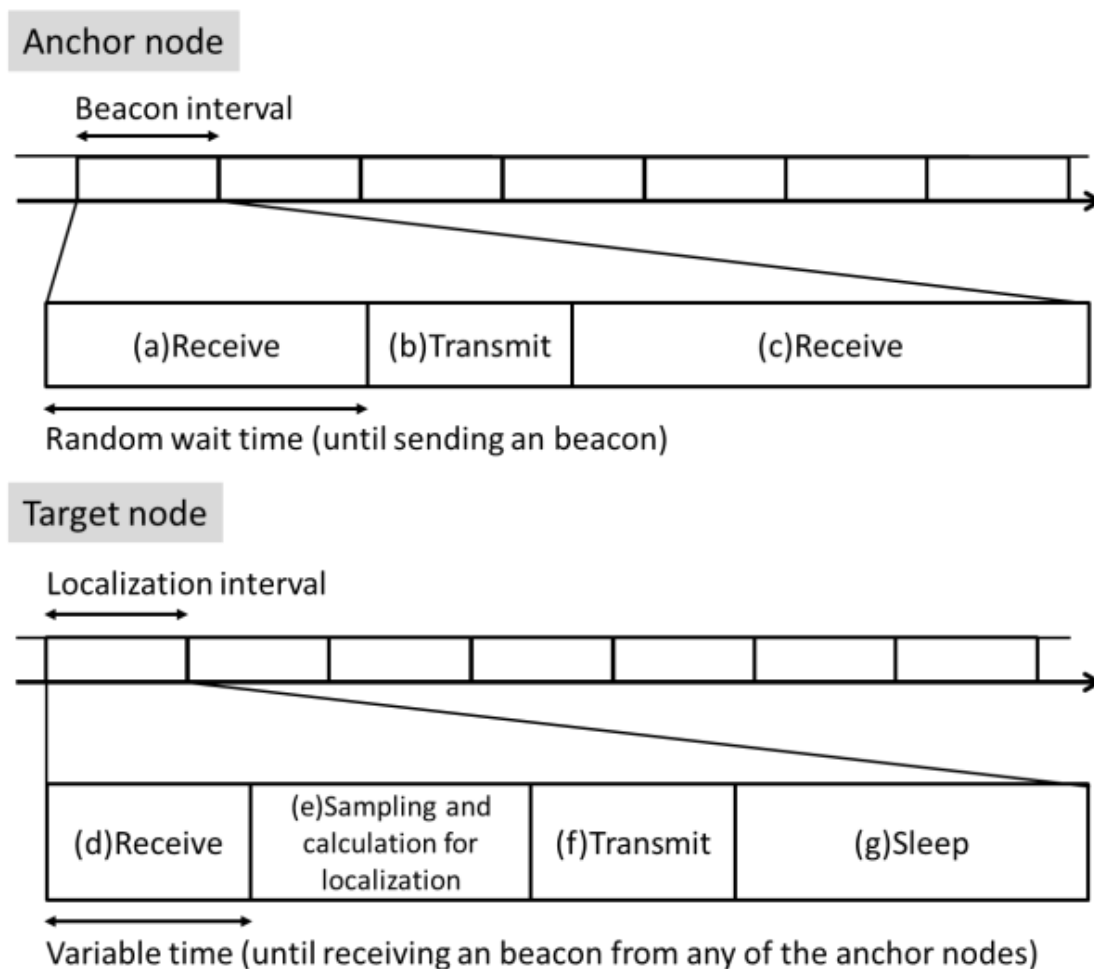


図 28 タイムチャート

受信処理の時間は、固定局から 1 つのビーコンを受信するまでの待ち時間となるため、近傍に存在する受信可能な固定局数により変わる。よって固定局数とビーコンを正しく受信するまでの時間の関係を計算機シミュレーションにより確認した(図 29)。計算機シミュレーションは図 28 の通信手順に従い、無線伝送中の劣化はないものとする。各固定局数の条件に対して 10^7 回の計算を行った。

固定局は図 28 の通信手順に従いランダムに送信開始時間が決まるため、固定局数の増加により、いずれかの固定局において送信開始までの時間が短い値となる確率も上がるため、ターゲットノードの受信処理時間は低下していく。更に固定局数が増えると、ビーコン衝突の影響が支配的となり、ビーコンを正しく受信できるまでの時間が上昇する。したがって図 29 のグラフの概形はバスタブ型となる。ここで適用条件より通信可能な固定局数は 3 台以上であるため、最悪値を想定し、3 台の場合の 2.71msec を受信処理時間の設計値とする。

送信処理時間は無線伝送速度とビーコンサイズから計算され 0.1msec となる。計算処理

時間は提案方式で設定するパラメータにより実際には変化するため、詳細については 4.5.5 で示すが、ここでは典型的な仕様に基づいて 0.42msec とした。残りの時間はスリープ時間となる。

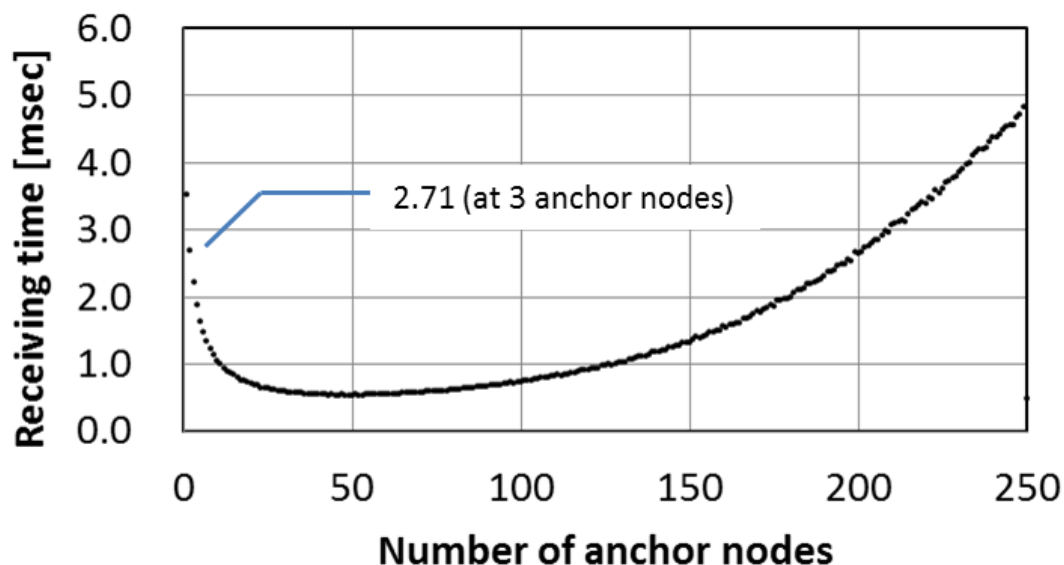


図 29 受信処理時間と固定局数の関係

次に、各処理実行時の消費電流を実測し、受信処理は 19.1mA、送信処理は 16.5mA、測位計算処理は 6.5mA、スリープ中は 0.01mA となることを確認した。以上の値から測位間隔と平均消費電流の関係を求めた(図 30)。

受信処理、送信処理及び測位計算処理の時間は測位間隔によらないため、測位間隔が長くなると相対的にスリープ時間の割合が高くなり、平均消費電流が下がる。本システムでは平均消費電流が 8.3mAh 以下(図 30 の破線)を満たした上で、測位間隔を短くすればよい。ため、測位間隔を 10msec とした。センサのサンプリング間隔も 10msec となる。

なお、同シミュレーションにおいて固定局から 1 つのビーコンも受信しない確率を求めたところ、固定局 3 台における当該確率は 5.6×10^{-4} 以下となった。以降は固定局数の増加と共に 当該確率は更に低下する傾向となる。本システムでは通信可能な固定局数が 3 台以上となることを適用条件とするため、 5.6×10^{-4} を当該確率の最悪値として見積もればよく、当該確率であれば測位への影響は十分に低いと判断できる。

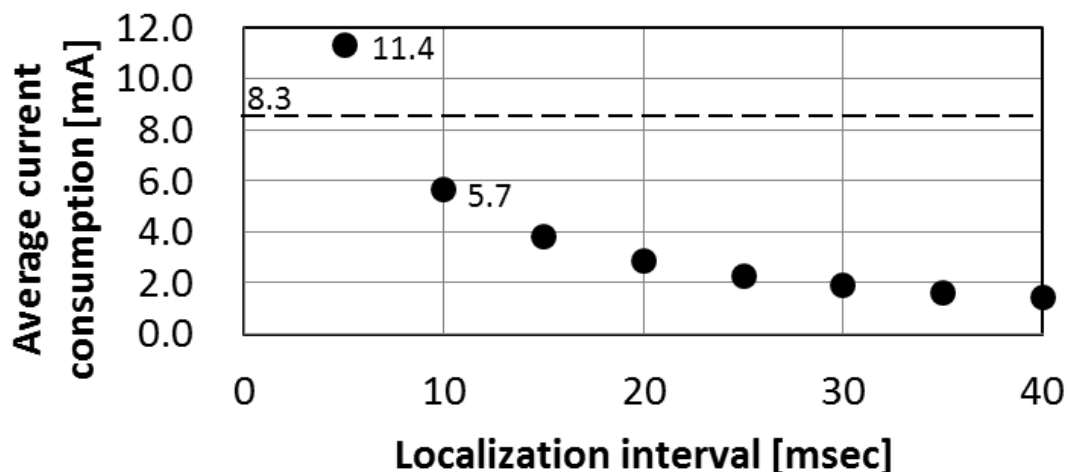


図 30 平均消費電流と測位間隔の関係

4.2.3 スケーラビリティ

ターゲットノードの台数が増加した場合の計算リソースと通信容量について確認する。計算リソースは本システムでは測位はターゲットノード側が行う。すなわち、他のターゲットノードが増えても、それぞれのターゲットノードが自律的に測位の計算を実行するため、計算量は変化しない。また、固定局側においては、ターゲットノードの増加により、ビーコンの頻度は増加する。ただし、固定局は測位の処理を実行しないため、計算リソースとしての負荷は変わらない。

次に通信容量を確認する。本システムでは、固定局は有線 LAN あるいは無線 LAN 等の本システムとは別系統の高速ネットワークを備え、ターゲットノードから受信した測位結果を遠隔のモニタに転送できるものとする。ターゲットノードの測位間隔は 10msec であり、その度に 100bit のデータを転送する場合、1000 台を同時に利用したとしてもトータルで 10Mbps のトラフィックとなる。ギガビットでの伝送が可能な高速ネットワークの通信帯域に占める割合は低いため、ターゲットノードの位置をリアルタイムに遠隔でモニタリングすることが可能である。

したがって、本ユースケースにおいてターゲットノードの台数の増加による計算リソース及び通信容量への影響は低く、測位精度への影響はなく、スケーラビリティとして特に問題ないと判断できる。

4.2.4 測位の基本動作

図 31 に第 4 の提案システムの測位方式を示す。基本的な測位方式は、第 3 章と同じである。ただし、図の破線内の処理を加えることで単体での PDR の結果を補正する。以降では破線内の処理について説明する。

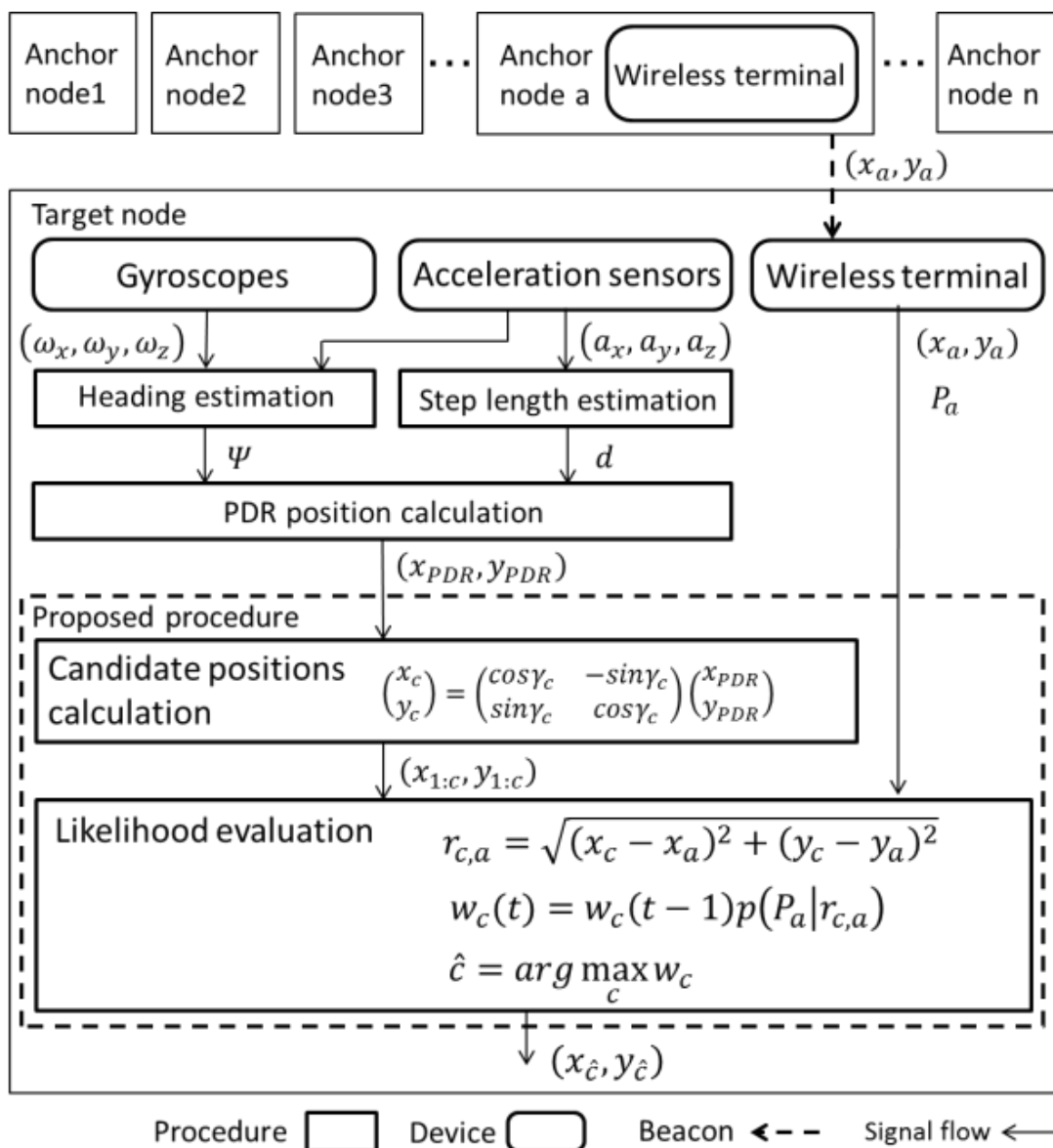


図 31 第 4 章の提案システムの動作フローチャート

4.3 提案方式

4.3.1 概要

提案方式では基準点(Reference point)を開始地点とし、任意の方向を初期方向として定め、初期方向から相対的に計算された PDR の基準(以下、基準 PDR、Reference PDR)を用意する。更に基準点を中心として、基準 PDR の軌跡を、全方位を分割するように放射的に回転させながら配置した複数の軌跡候補を用意する。全ての軌跡候補は、軌跡の形は基準 PDR と同じであるが開始時の進行方向が異なる。このとき、軌跡候補の中に実際の歩行ルートと近い軌跡が存在すると考え、後述のゆう度評価を施した上、その評価値が高い軌跡候補(以下、選択軌跡、Selected Locus)を選び、選択軌跡の現在位置を推定位置とする。例えば、図 32 に示すように、軌跡候補を 6 通り用意する場合には、軌跡候補の開始時点での進行方向を、基準点を中心として 60 度の間隔で回転させて設定する。次に後述の受信電力を用いたゆう度評価により軌跡候補 1-6 から選択軌跡を決め、その現在位置を推定位置(Estimated position)とする。図 32 では、実際の歩行ルート (Actual walking route)の推定として 4 番目の軌跡候補(Locus candidate 4)が選択軌跡として選ばれていることを示している。

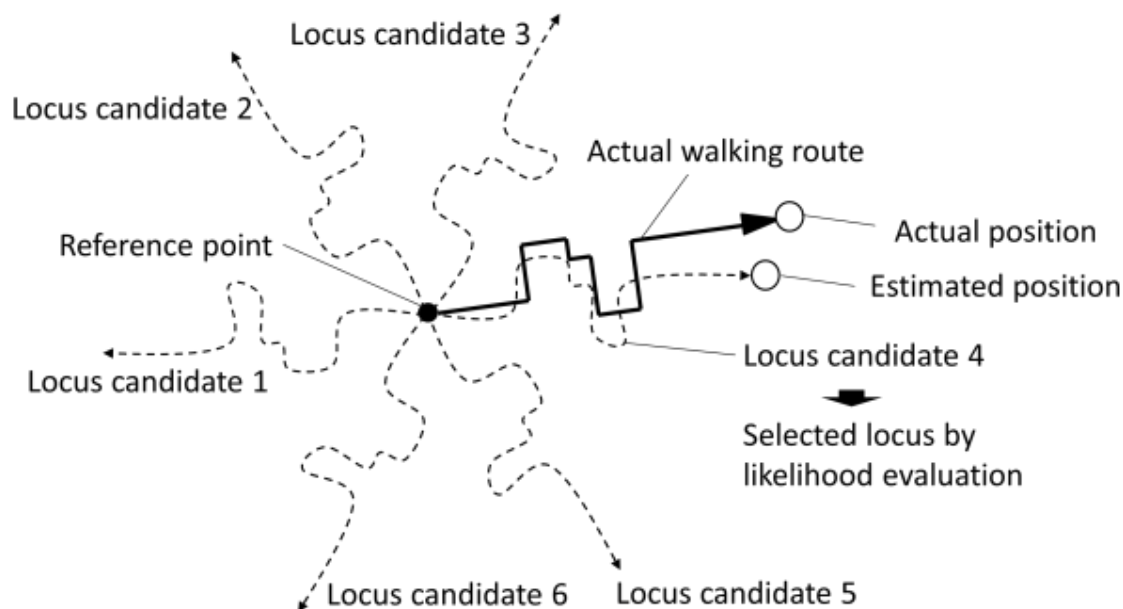


図 32 提案方式の概要

4.3.2 軌跡候補位置計算(Candidate position calculation)

2.3.6 に示した PDR の計算結果を PDR 推定位置($x_{PDR}(t), y_{PDR}(t)$)とすれば、軌跡候補の位置($x_c(t), y_c(t)$)は、式(14)のように、PDR 推定位置を基準点まわりに回転させることで計

算できる。ここで回転角度を γ_c [rad]とする。

$$\begin{pmatrix} x_c(t) \\ y_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma_c & -\sin\gamma_c \\ \sin\gamma_c & \cos\gamma_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{PDR}(t) \\ y_{PDR}(t) \end{pmatrix} \quad (14)$$

基準点を中心として全方向をカバーするために、 γ_c は式(15)のように計算する。ここで軌跡の候補数を C_{all} とする。

$$\gamma_c = 2\pi * \left(\frac{c}{C_{all}}\right) \quad (c = 1, 2, 3, \dots, C_{all}) \quad (15)$$

C_{all} は多いほど回転角度の間隔が狭まるため、実際の歩行ルートと一致する軌跡候補が選ばれる確率が高まるが計算処理時間が増える。軌跡候補数と計算処理時間の関係は4.5.5で確認する。

4.3.3 ゆう度評価(Likelihood evaluation)

ゆう度評価では、現在位置の推定において固定局から送られるビーコンを受信した場合に、当該受信電力となる確率を利用する。まず固定局 a の座標 (x_a, y_a) と軌跡候補 c の現在位置から、これらの距離 $r_{c,a}(t)$ を求める。

$$r_{c,a}(t) = \sqrt{(x_c(t) - x_a)^2 + (y_c(t) - y_a)^2} \quad (16)$$

距離 $r_{c,a}(t)$ だけ離れた現在位置で受信するビーコンの平均受信電力 $\bar{P}_{c,a}(t)$ は、実験による統計的な結果により式(17)として近似できる[19][45]。

$$\bar{P}_{c,a}(t) = \mu(r_{c,a}(t))^{-\varepsilon} \quad (17)$$

μ 、 ε は周波数帯や伝搬環境により実験的に求められる定数であり、4.4.4の事前実験において求める。

ここで、実際に受信した電力を $P_a(t)$ とすれば、本システムのように狭帯域信号を扱う無線機において、その受信電力変動は確率モデルとして規定できる。すなわち、軌跡候補 c が固定局 a からの距離 $r_{c,a}(t)$ の場所に存在するとした場合に、電力 $P_a(t)$ となるビーコンを受信する条件付き確率、つまり、ゆう度 $p(t)$ は式(18)として表せることが知られている[15]。

$$p\left(P_a(t) \mid r_{c,a}(t)\right) = \frac{1}{\bar{P}_{c,a}(t)} \exp\left(\frac{-P_a(t)}{\bar{P}_{c,a}(t)}\right) \quad (18)$$

次に、実際の歩行ルートに対して、各軌跡候補がどれだけ類似する軌跡であるかを評価する指標としてゆう度評価値 $w_c(t)$ を定義する。軌跡候補の現在位置と実際の歩行ルートの現在位置が近い場合、受信したビーコンから計算されたゆう度は高い値となる。ゆう度をビーコンが受信される毎に式(18)により計算し、1ステップ前のゆう度評価値に積み重ねて乗じていくことで、ゆう度評価値が高い軌跡候補が実際の歩行ルートに近いことを判断することができる。

ゆう度評価値の更新手順の例について図33に示す。図33では説明の便宜上、軌跡候補数は3通りとし、固定局 a からビーコンを1ステップ毎に必ず受信できる場合を考える。各

軌跡候補の位置を式(14)及び式(15)を用いて更新させていき、 a からビーコンを受信するたびに、その受信電力を利用してゆう度評価値を計算していく。時刻 t における軌跡候補 c のゆう度評価値 $w_c(t)$ は、1ステップ前のゆう度評価値 $w_c(t-1)$ に、式(18)に示すように、時刻 t に a から受信したビーコンの受信電力 $P_a(t)$ 及び a と c の距離 $r_{c,a}(t)$ から計算したゆう度 $p(t)$ を乗じて更新する(式(19))。

$$w_c(t) = w_c(t-1)p\left(P_a(t)\middle|r_{c,a}(t)\right) \quad (19)$$

選択軌跡を $\hat{c}(t)$ とすれば、 $\hat{c}(t)$ は時刻 t において軌跡候補の中から、ゆう度評価値が最大のもので選ばれる。すなわち、式(20)より $\hat{c}(t)$ を選択し、 $\hat{c}(t)$ の座標 $(x_{\hat{c}}(t), y_{\hat{c}}(t))$ をターゲットノードの推定位置とする。

$$\hat{c}(t) = \mathit{arg} \max_c w_c(t) \quad (20)$$

$w_c(t)$ を正規化すると軌跡候補の事前確率分布が求められる。更に $w_c(t)$ にゆう度 $p(t)$ を乗じること事後確率分布が求められる。つまり、提案方式は軌跡候補の中から事後確率が最大となるものを探索するため、いわゆる最大事後確率推定法(Maximum a posteriori estimation method)を行う。

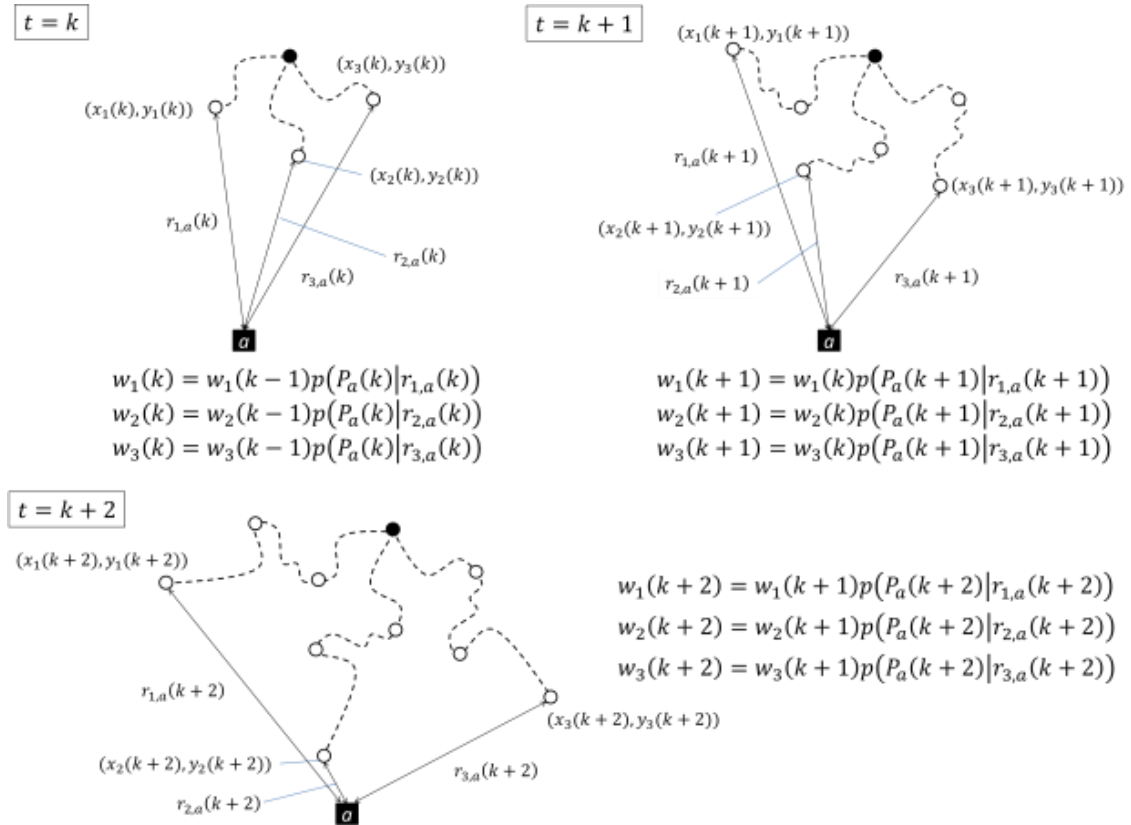


図 33 軌跡候補のゆう度評価

4.3.4 軌跡候補の再配置

4.3.3 の計算過程において、ゆう度評価値の低い軌跡候補を捨て、ゆう度評価値の高い軌跡候補の近傍に再配置すれば、4.3.3 に示す方法に比べて少ない候補数であっても、測位精度を改善できる可能性がある。ここでの再配置のことをパーティクルフィルタと同じようにリサンプリングと呼ぶことにする[46]。

図 34 にリサンプリングの概要を示す。黒丸は基準点を示し、白丸は各軌跡候補のゆう度評価値を示し、円が大きいほど、ゆう度評価値が高いことを示している。説明の便宜上、図の歩行者は直線上に移動しているとし、軌跡候補は 7 パターン用意する場合を考える。図 34 (a) は開始時あるいはリサンプリング直後の状態であり、この時点において、軌跡候補のゆう度評価値は、それぞれ等しい値となっている。歩行を継続し、ビーコンを受信するたびに式(10)を計算していくと、図 34 (b) に示すように、いずれかの軌跡候補にゆう度評価値が集中する、いわゆる退化が起こる。ここでリサンプリングを実行する。退化の判定は、式(21)を計算し、閾値 N_{thr} に対して $N_{eff}(t) < N_{thr}$ となった場合に実行する。

$$N_{eff}(t) = \frac{1}{\sum_{c=1}^{C_{all}} w_c(t)^2} \quad (21)$$

$N_{eff}(t)$ は 1 から C_{all} までの値をとり、有効な軌跡候補数の推定値として用いられる[47]。

次に、図 34 (c) に示すように、リサンプリング時は選択軌跡 $\hat{c}(t)$ の近傍に軌跡候補を再配置する。具体的には式(22)に示すように、 $\hat{c}(t)$ の座標を基準として、右回りと左回りに回転させた方向に新たな軌跡候補を配置する。 ζ は配置の角度間隔であり固定値とする。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_c'(t) \\ y_c'(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\gamma_c & -\sin\gamma_c \\ \sin\gamma_c & \cos\gamma_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\hat{c}}(t) \\ y_{\hat{c}}(t) \end{pmatrix} \\ \begin{cases} \gamma_c = +2\pi(c-1)\zeta & \left(c = 1, 2, 3, \dots, \frac{C_{all}}{2} \right) \\ \gamma_c = -2\pi\left(c - \frac{C_{all}}{2}\right)\zeta & \left(c = \frac{C_{all}}{2} + 1, \frac{C_{all}}{2} + 2, \dots, C_{all} \right) \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

リサンプリング時には、ゆう度評価値を式(23)によりリセットする。

$$w_c(t) = \frac{1}{C_{all}} \quad (23)$$

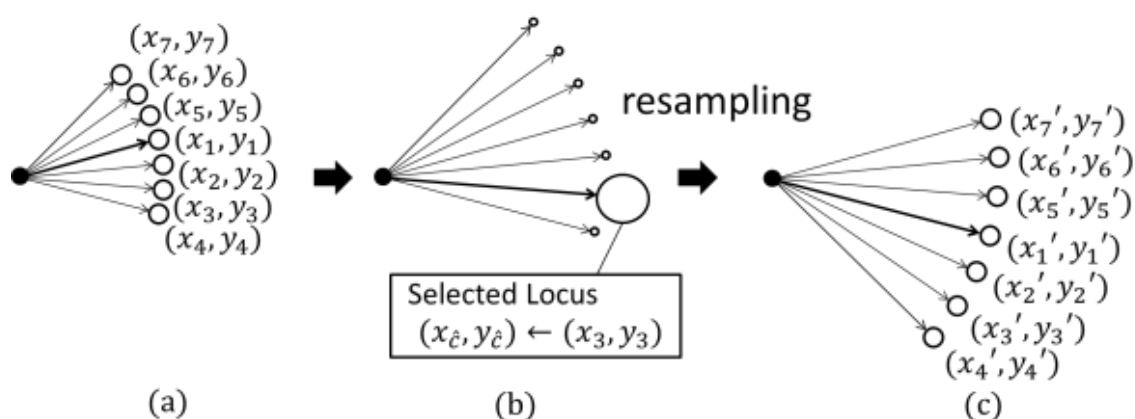


図 34 軌跡候補の再配置

4.4 実験

4.4.1 実験概要

本システムの有効性を確認するため、屋内の実験環境を利用し測位精度を検証した。歩行実験を行った被験者は実験環境内のあらかじめ定められたルートに従って歩行し、その時の被験者位置を推定した。基本特性の検証として歩行実験 1 を実施し、実践的な環境での検証として歩行実験 2 を実施した。

4.4.2 実験システムの構成

ターゲットノードのハードウェア構成は第 3 章と同じである。ターゲットノードのサイズはカード型の形状を考慮し $56\text{mm} \times 90\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ とした(図 35 左)。固定局の無線機は同 nRF52832 を実装し、アンテナは無指向性であるバッファロー社製 WLE-NDR を実装した(図 35 右)。

Target node



Anchor node



図 35 提案システムのターゲットノードと固定局

4.4.3 歩行実験の手順

図 36 に、歩行実験 1 の歩行ルートと実験環境の 6 箇所に敷設した固定局 1 から 6 の位置を示す。第 3 章の実験と同様に、歩行実験 1 の実験環境は一般的な大型の会議室(20m×12m)を利用した。ここで、システム要件より胸ポケットにターゲットノードを入れた作業員の歩行を対象とするため、固定局の高さは歩行者の平均的な胸の位置と同じになるように 1.3m とした。歩行者の胸の高さと固定局のアンテナ高を同一にすることで、アンテナの高低差を考慮せずに検証を進めることができるため、歩行実験の便宜上、このように設定した。

被験者は、スタート地点を基点とし、①から⑧の順に通常で歩行する。歩行実験 1 では、左折と右折の回数が同じなるように 8 の字を描くルートを歩行した。また正解位置を算出するため、被験者にボタンを持たせ、歩行中の曲がるタイミングでボタンを押させることで、その時の時刻を記録した。これにより、前回の曲がり角と今回の曲がり角でボタンを押下した時刻の差から歩行時間が計算でき、更に曲がり角の位置は既知であることから、線形補完により被験者の位置を算出することができる。本論文ではこの算出した位置を正解位置とし、正解位置とターゲットノードの推定位置の距離を測位誤差と定義した。被験者は 3 人とし、各条件で 10 回ずつ歩行した。表 8 に被験者のプロフィールを示す。

また、後述の 4.5.3 に示す測位精度の時間的な推移を確認するため、本ルートを連続して 3 周(計 150m)歩行した。なお、本実験では角度の修正に関する性能の検証を目的とするため、スタート地点において、あらかじめ正しい位置と進行方向を設定して開始するが、2 週目以降は正しい進行方向にリセットしないようにした。

表 8 被験者のプロフィール

Subject	Age	Sex	Stature[m]
A	40	male	1.86
B	35	male	1.75
C	28	male	1.75

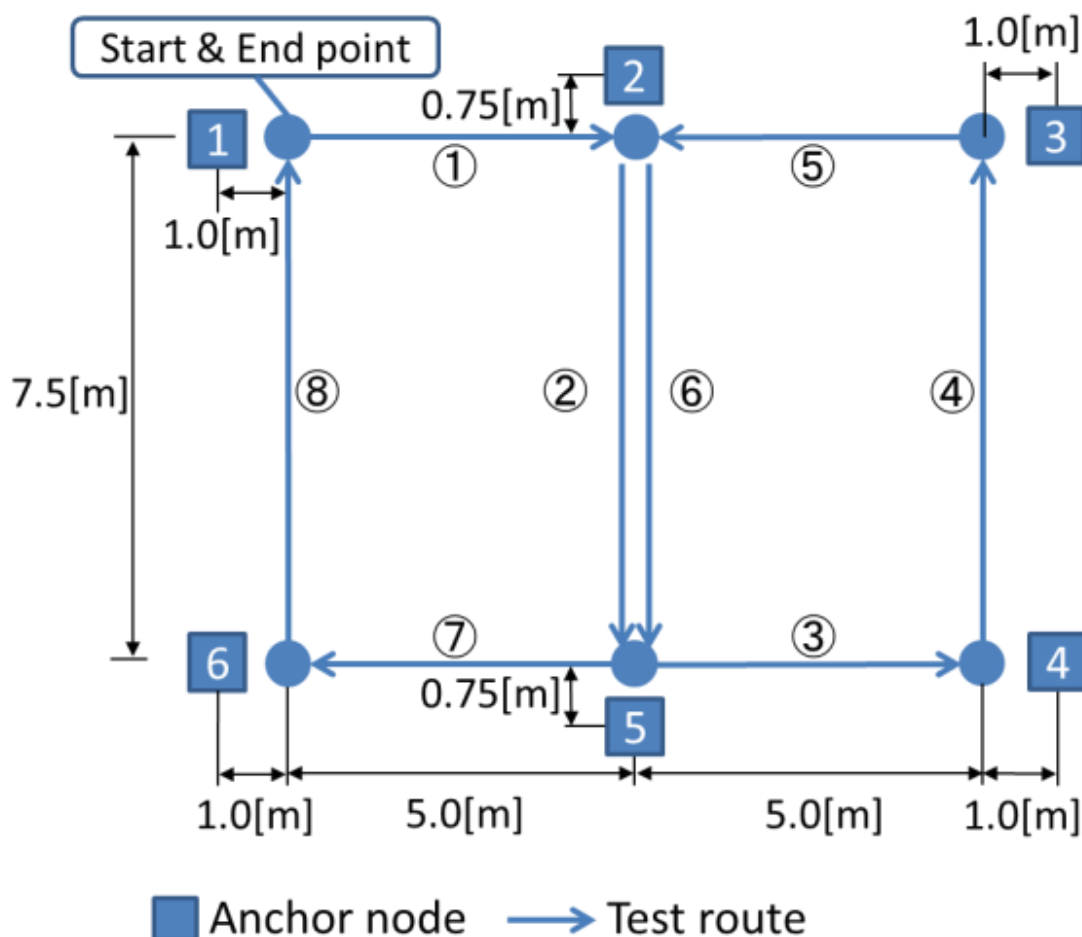


図 36 歩行実験 1 の歩行ルートと固定局の位置

4.4.4 事前実験

式(17)を計算するために必要な伝搬パラメータ μ 、 ϵ を実験的に求める。4.4.3 で示した手順と同じように実験環境を歩行し、各固定局が送信するビーコンの受信電力を測定していく。本システムのビーコンの送信出力は 0dBm とした。固定局までの距離は、同手順により求められる正解位置を利用して計算する。各歩行実験の歩行ルートで求めた受信電力と固定局までの距離の関係を図 37 に示す。本データの取得では設置された全ての固定局のビーコンを利用した。実験結果から最小二乗法を用いて伝搬パラメータを求め、歩行実験 1 の環境では $\mu = 1.4 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon = 1.23$ 、後述する歩行実験 2 の環境では $\mu = 4.7 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon = 1.82$ となった。なお歩行実験 2 では見通し外のビーコンを扱うことから、遠方から届くビーコンの受信電力が、本システムの受信感度である -92dBm 以下となる場合がある。したがって、伝搬パラメータ μ 、 ϵ を求める際には、受信感度の影響をなくすため、固定局からの距離が 8m 以内となる場所において受信したビーコンを利用した。

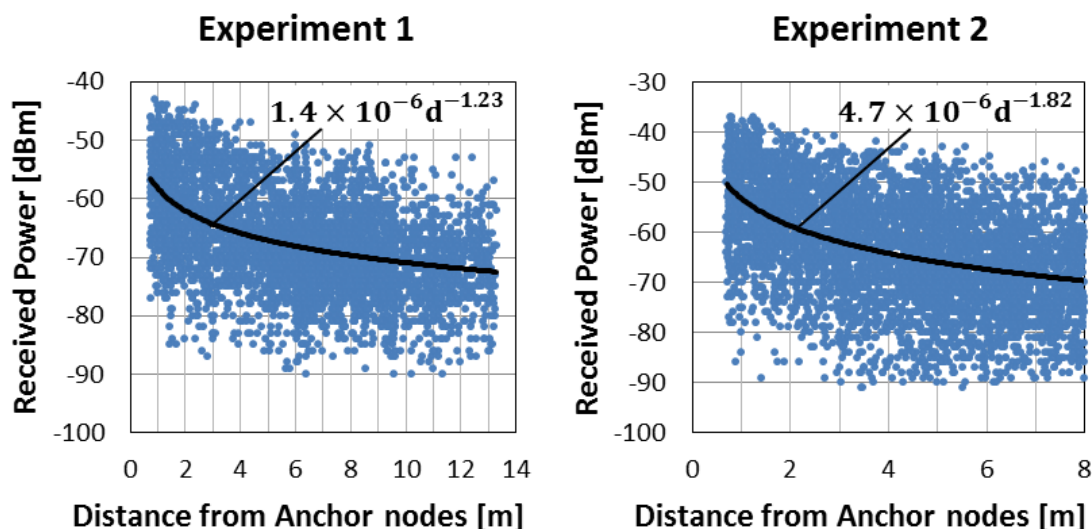


図 37 受信電力と固定局までの距離の関係

4.4.5 評価に用いたシステム

評価では 2 つの提案システムと 3 つの従来システムを用いた。提案システムには、第 3 章で説明した提案方式のうち、リサンプリングを実行しない方式を用いた提案システム 1(Proposed System 1. 以下、PS1)と、提案システム 1 に対してリサンプリングを実行する方式を用いた提案システム 2(Proposed System 2. 以下、PS2)を用いた。

また、比較対象である従来システムには、PDR 単体で動作させる従来システム 1(Conventional System 1. 以下、CS1)、電波を用いて推定する従来システム 2(Conventional System 2. 以下、CS2)、電波と PDR を用いて推定する従来システム 3(Conventional System 3. 以下、CS3)を用いた。なお、CS1 は 2.3 に記述した PDR の計算手順を利用し、CS2 及び CS3 は文献[18]を参考とし実装した。以下に簡単に示す。

CS2 は、電波のみを利用してパーティクルフィルタにより位置を推定する。

- (1) P_{all} 個のパーティクルを配置する
- (2) 式(18)と同様にビーコンを利用して各パーティクルのゆう度評価値を計算する
- (3) 正規化されたゆう度評価値を用いて全パーティクルの重心を推定位置とする
- (4) 式(21)の条件を満たした場合はリサンプリングを実行する。リサンプリングでは標準偏差 σ_{rsp} とする 2 次元正規分布に従って配置する。更にゆう度評価値を式(23)と同様に初期化する
- (5) (2)へ戻る

CS3 は、CS2 の手順を基本とし、式(11)で計算する PDR の信号を入力して各パーティクルの位置を更新する。その他の処理は上述の処理を行う。また、本実験で利用した各システムのパラメータを表 9 に示す。 P_{all} は本システムの計算リソースを考慮して値を決め、 N_{thr}

は文献[18]を参考に設定した。 σ_{rsp} 及び ζ はセンサの実力値により決める必要があり、事前検証により妥当性を確認し値を設定した。

表 9 各システムのパラメータ

System	Parameter		Value
CS2, CS3	P_{all}	Particle number	30
	N_{thr}	Resampling threshold	$0.1P_{all}$
	σ_{rsp}	Standard deviation at resampling	0.5
PS1	C_{all}	Number of locus candidates	360
PS2	C_{all}	Number of locus candidates	30
	N_{thr}	Resampling threshold	$0.1C_{all}$
	ζ	Angle interval at resampling	0.25

4.5 歩行実験 1

4.5.1 各システムの歩行軌跡

最初に、各システムの歩行軌跡の一例を図 38 に示す。破線が実際の歩行ルートを示し、実線が推定位置の軌跡を示している。全ての軌跡は 1 回の測定で同時に取得した結果である。

CS1(図 38(a))では、進行方向の累積誤差により、軌跡が少しずつ回転する現象が確認できる。CS2(図 38(b))では、CS1 のように軌跡が回転する現象は生じないが、伝搬環境の影響を受け、理論値と乖離した電力のビーコンを受信すると、パーティクルが誤った位置に連続的に更新されてしまう場合がある。

CS3(図 38(c))も、CS2 と同様に、理論値と乖離した電力のビーコンを受信すると、期待されないパーティクルにゆう度評価値が集中してしまう。この結果、PDR の計算結果による移動量を加算しても、当該パーティクルの事前位置の影響を強く受けて移動してしまうため、推定位置も誤ってしまう。一方、PS1(図 38(d))及び PS2(図 38 (e))では、ゆう度評価により軌跡候補から適切な候補が選ばれることで実際の歩行ルートと近い軌跡となる。

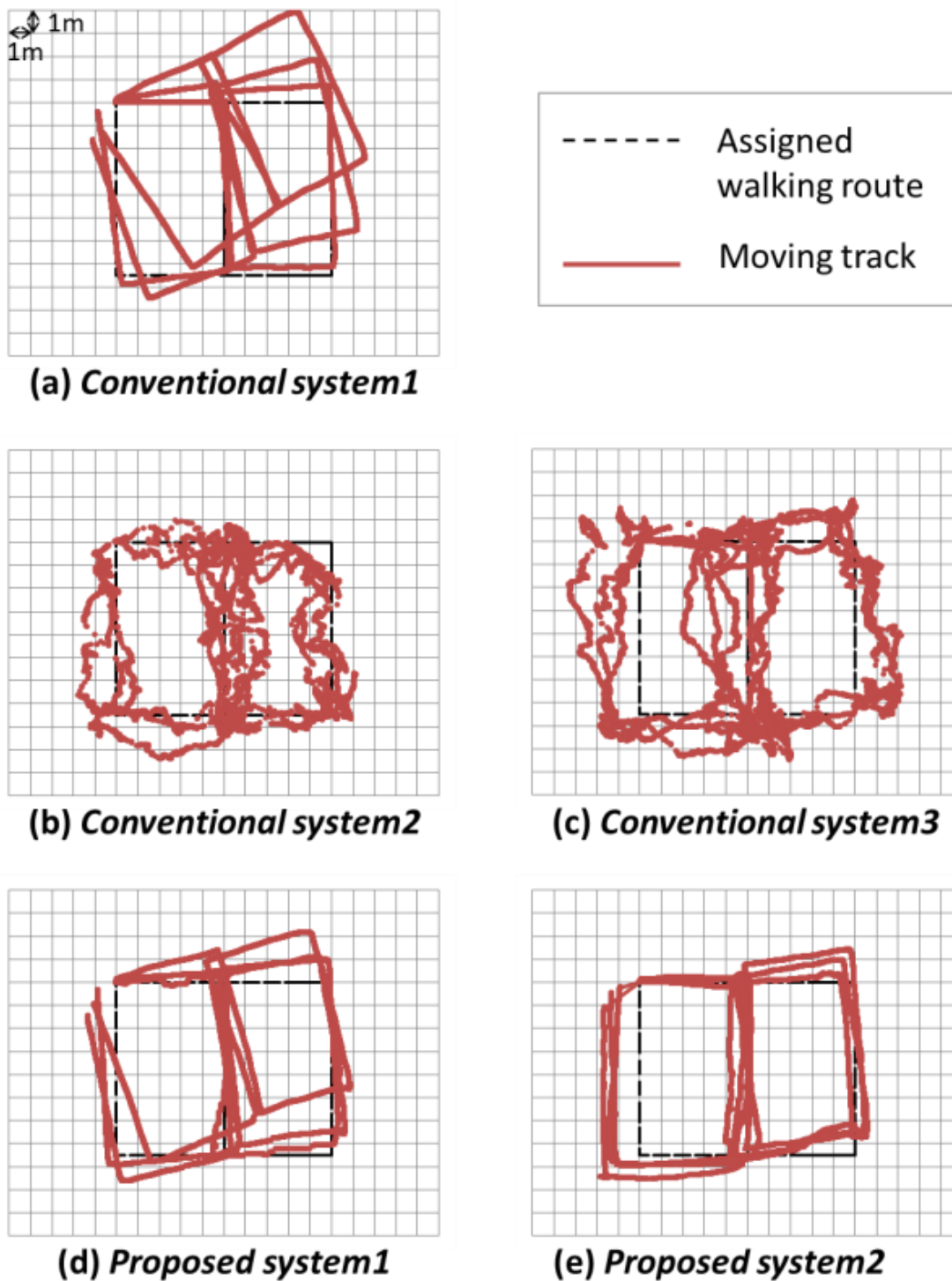


図 38 歩行実験 1 における軌跡の一例

4.5.2 歩行距離と測位誤差の関係

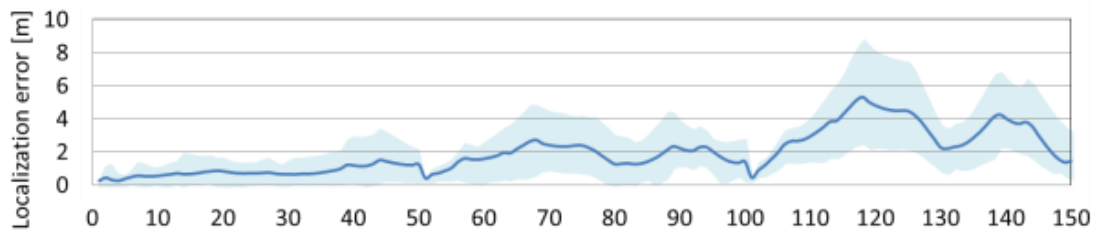
次に、測位誤差の発生原因を調査するため、図 39 に示すように、スタート地点からの歩行距離と各地点での測位誤差の関係を評価した。横軸は歩行ルート 3 周分にあたる 150m までの歩行距離を示しており、縦軸は各歩行地点での測位誤差を示している。実線は全データから求めた平均測位誤差(以下、平均測位誤差)を示しており、1m 区間毎にデータを集計して平均値を算出している。ハッチの部分は全データから得られた測位誤差の値の範囲を示している。グラフの破線は固定局が近傍に存在する位置であることを示している。

CS1(図 39 (a))では、軌跡が曲がる影響により、歩行距離が進むと平均測位誤差も上昇する傾向となる。CS2(図 39(b))及び CS3(図 39(c))では、固定局近傍を通過するたびに平均測位誤差が下がる傾向となる。これは固定局近傍では、電力が高いビーコンを受信する確率が高く、受信電力が高いビーコンは、ゆう度評価値の更新への影響が大きいためである。受信電力が高いビーコンは固定局の近傍に限られるため、その範囲内にパーティクルが存在すると、他のパーティクルに比べて、当該パーティクルのゆう度評価値は相対的に強く更新され、当該パーティクルが反映された正しい位置に速やかに移動される。

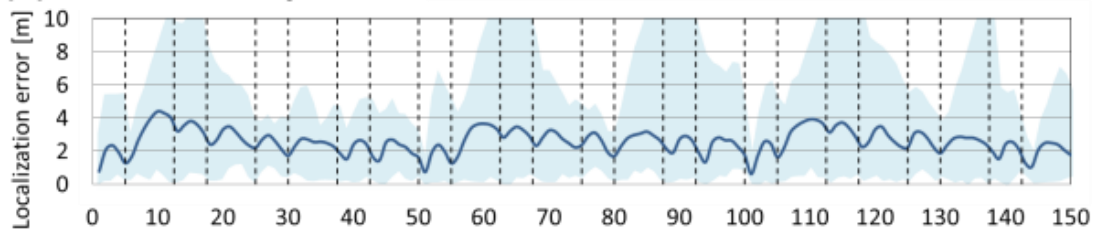
PS1(図 39 (d))及び PS2(図 39 (e))では、平均測位誤差が低いままの状態を保つことが確認できる。ただし、PS1 では、特に 3 周目において、PS2 に比べて平均測位誤差が劣化する傾向となる。これは、PS1 は退化が発生してもリサンプリングを実行しないため、過去に累積されたゆう度評価値の影響を強く受けるためである。電力が高いビーコンを受信しても、短い時間内ではゆう度評価値の相対的な大小関係が変わらず、過去に評価が高かった軌跡候補が選択されてしまう。

一方、PS2 はリサンプリングにより、PS1 のパーティクルで発生したゆう度評価値の退化を防ぐことができる。例えば、固定局の近傍である(図 39 (e))の★の位置では、他の場所に比べて特定の軌跡候補にゆう度評価値が強く重み付けされ、結果としてリサンプリングが発動され、測位誤差が改善する。

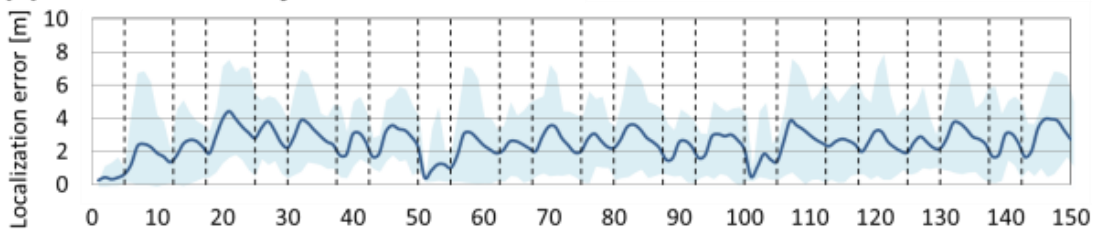
(a) Conventional system1



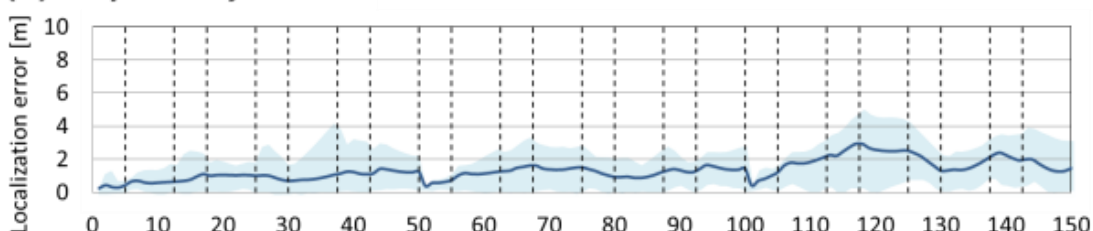
(b) Conventional system2



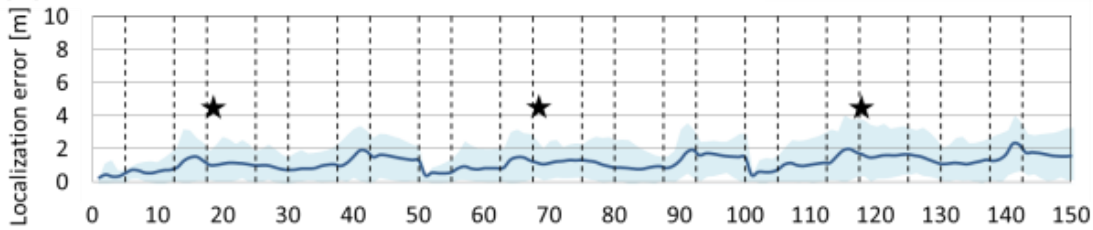
(c) Conventional system3



(d) Proposed system1



(e) Proposed system2



Walking distance from start point [m]

図 39 スタート地点からの歩行距離と測位誤差の関係

4.5.3 測位精度の時間的推移

次に、測位精度の時間的推移を分析するため、1周目から3周目までの測位誤差の累積分布関数（CDF、Cumulative Distribution Function）を計算した(図40)。図40では測位誤差の低い部分に確率が集中するほど、測位精度が高いシステムであると考えられる。

これまでの議論と同じように、CS1(図40(a))では進行方向の累積誤差により、測位誤差が1周目から3周目にかけて上昇していくことが確認できる。CS2(図40(b))及びCS3(図40(c))では1周目から3周目にかけてCDFの傾向が大きく変わらない。

PS1及びPS2はPDRの基本動作を備えるため、PDRの角度に関する誤差と、進行距離に関する誤差が影響する。角度に関しては、PS1及びPS2は提案方法により角度推定の劣化を低減でき、その結果、CS1に比べて測位誤差が改善する。更に4.5.2で議論したように、PS2はリサンプリングをすることで退化を防ぐことができるため、2周目、3周目において、PS1に比べて測位精度が劣化しない。ただし、PS1及びPS2のいずれも歩行を継続するとPDRの進行距離に関する誤差の影響により3周目のように測位精度が劣化する。これについては4.7で説明する。

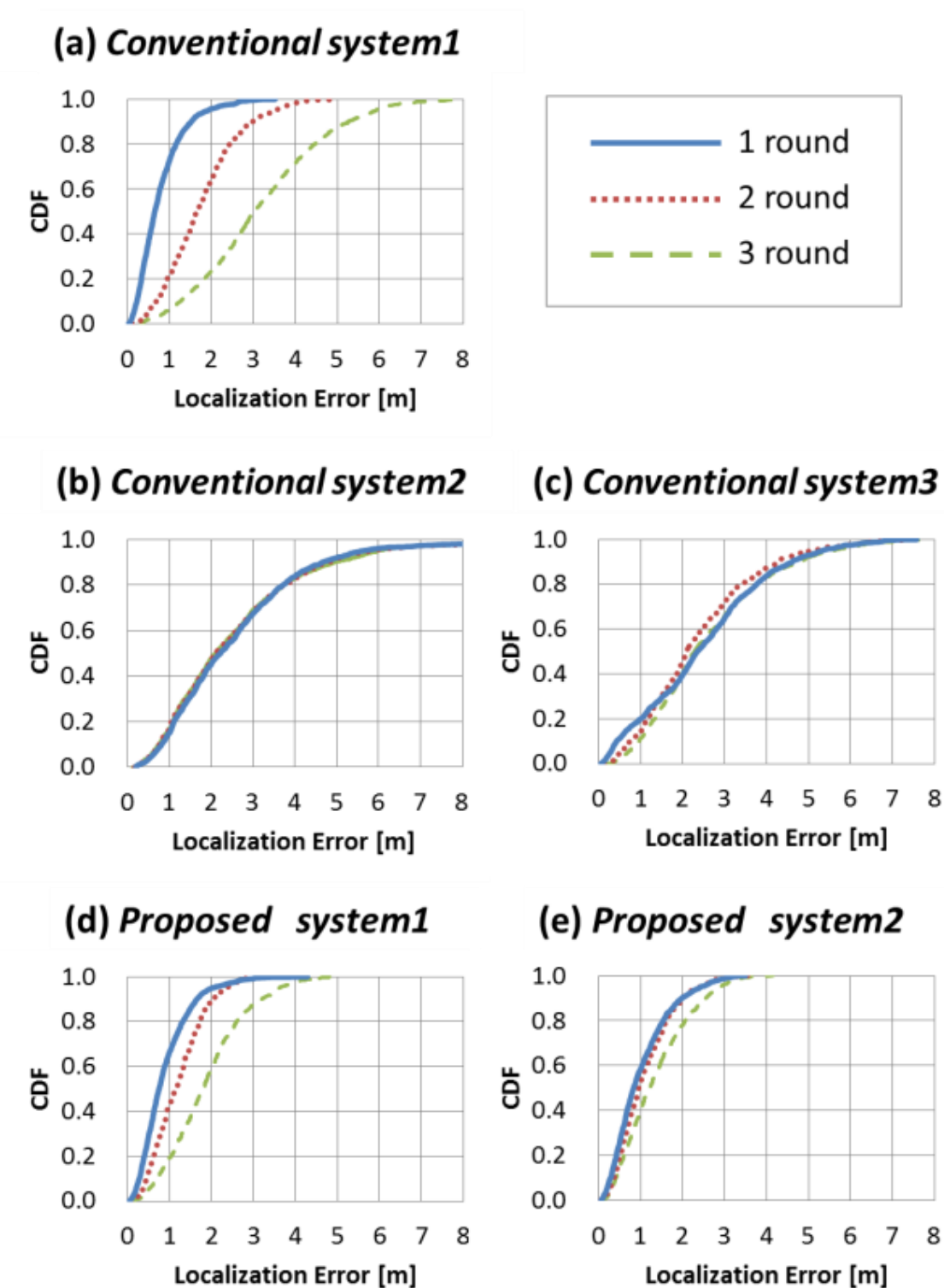


図 40 各周回における測位誤差の累積分布関数

4.5.4 固定局数による測位精度への影響

固定局の遠方を歩行した場合の角度修正の性能を確認するため、固定局の設置台数が 4 台、2 台の場合を評価した(図 41)。いずれのシステムも固定局が 6 台の場合に比べて測位精度は下がる。例えば 2 台の場合では、CS2 はほとんど推定できなくなる。CS3 ではビーコンが受信できない場所でもパーティクルの位置は PDR の計算結果を加算することで更新されるため、CS2 より測位精度が高くなる場所がある。

PS1 及び PS2 についても電力の高いビーコンを受信できない場所が増えるため、6 台の場合に比べて測位精度は劣化する。しかし、CS2 及び CS3 に比べれば、選択軌跡が正しく選ばれているため、大きく劣化することなく推定できている。

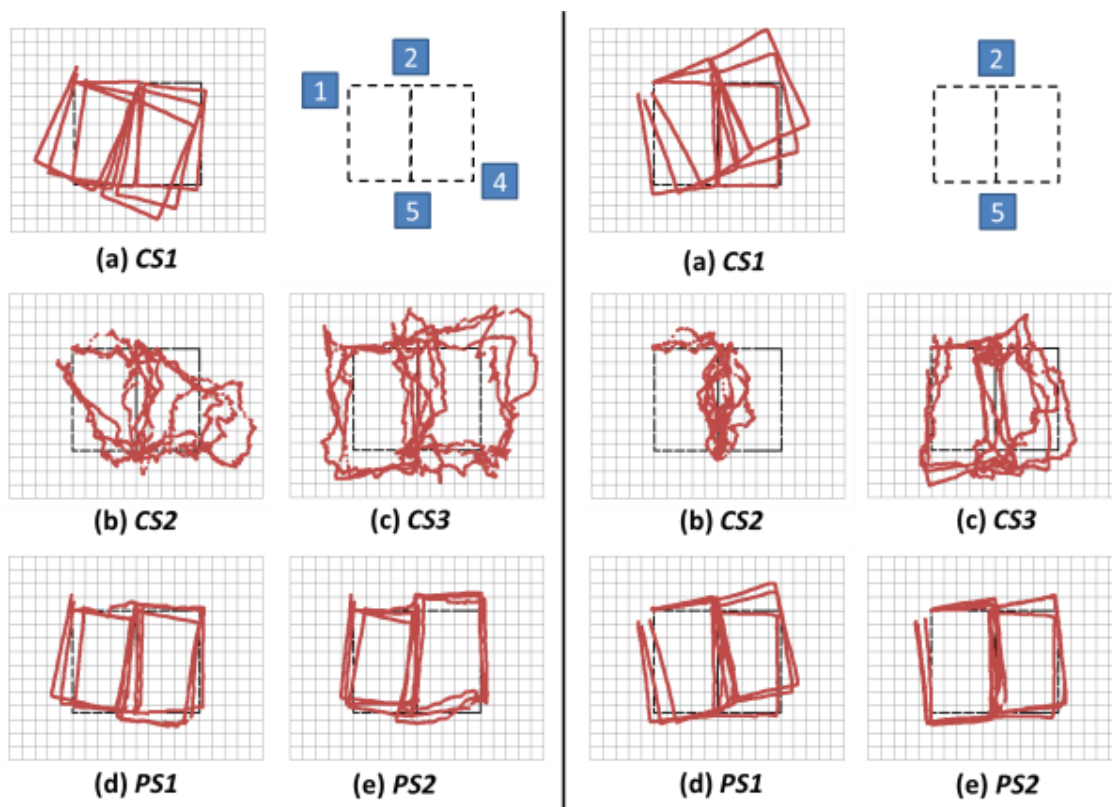


図 41 軌跡の一例(固定局 2 台及び 4 台)

4.5.5 軌跡候補数による測位精度への影響

次に、PS1 と PS2 において軌跡候補数による測位誤差の影響を調査した(図 42)。PS1 と PS2 のいずれも軌跡候補数の増加と共に測位誤差が改善する。

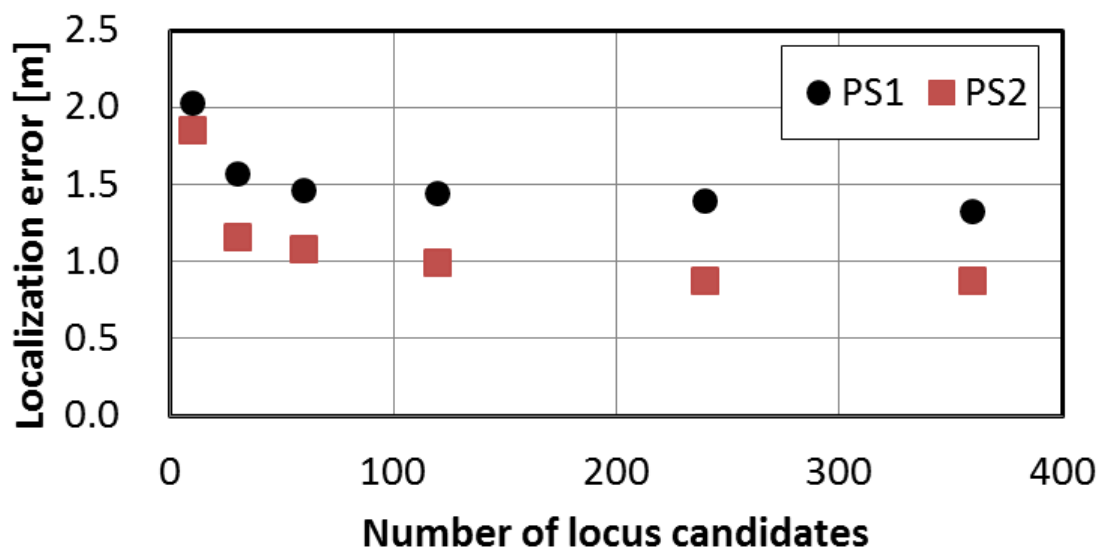


図 42 測位誤差と軌跡候補数の関係

次に、軌跡候補数が増加すると計算量が増え、平均消費電流も上がるため、軌跡候補数による測位計算処理にかかる時間及び平均消費電流の関係を調査した (図 43)。図 43 は実測で確認し、PS1 及び PS2 のいずれも同等の値となる。測位計算処理にかかる時間と平均消費電流は、いずれも軌跡候補数と比例の関係となる。PS2 における軌跡候補数が 30 の場合は、PS1 における軌跡候補数が 360 の場合に比べて、平均消費電流が約 34%改善し、更に測位誤差も約 12%改善することを確認した。

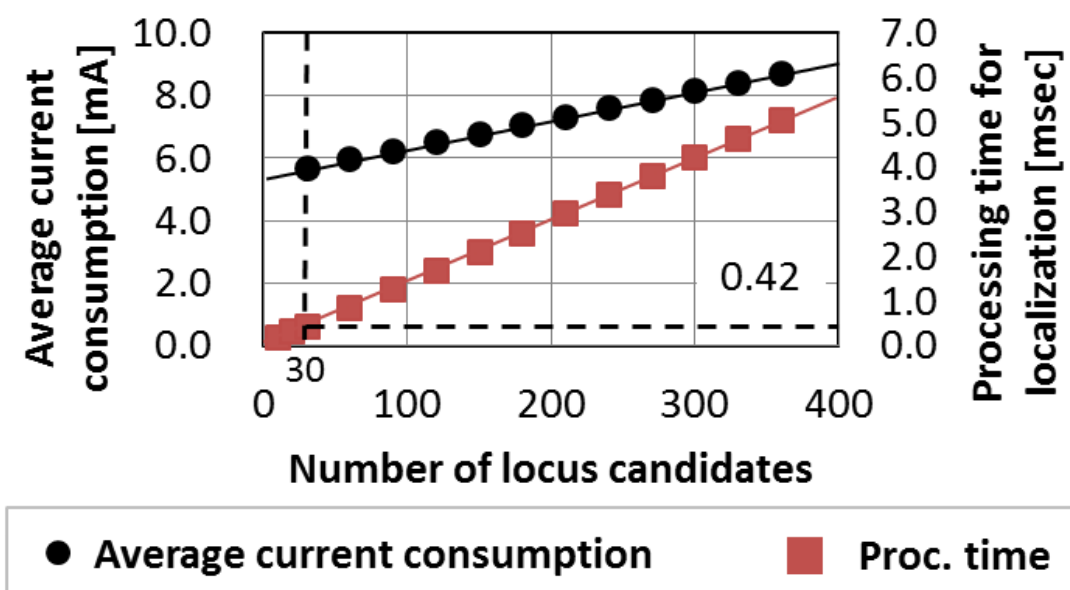


図 43 軌跡候補数と測位計算時間及び平均消費電流の関係

4.6 歩行実験 2

4.6.1 概要

歩行実験 2 では提案システムの想定シーンを考慮し、より実践的な環境(10m×15m)で行った。図 44 に歩行実験 2 の実験環境を示す。実験環境は棚が並べられた倉庫を想定した。図 44 の濃いハッチ部分は鉄筋コンクリートとなっており、天井までの高さは 2.5m となっている。薄いハッチには高さ 2m の金属製の棚が並んでいる。歩行実験 2 は歩行実験 1 に比べて見通し外となるビーコンを多く受信するため、その影響を確認することができる。なお、歩行実験 2 においては、歩行ルートは異なるが、それ以外については歩行実験 1 と同様の方法及び条件で測定した。また、固定局の設置台数はシステム要件である設置密度から計算し 6 台とした。

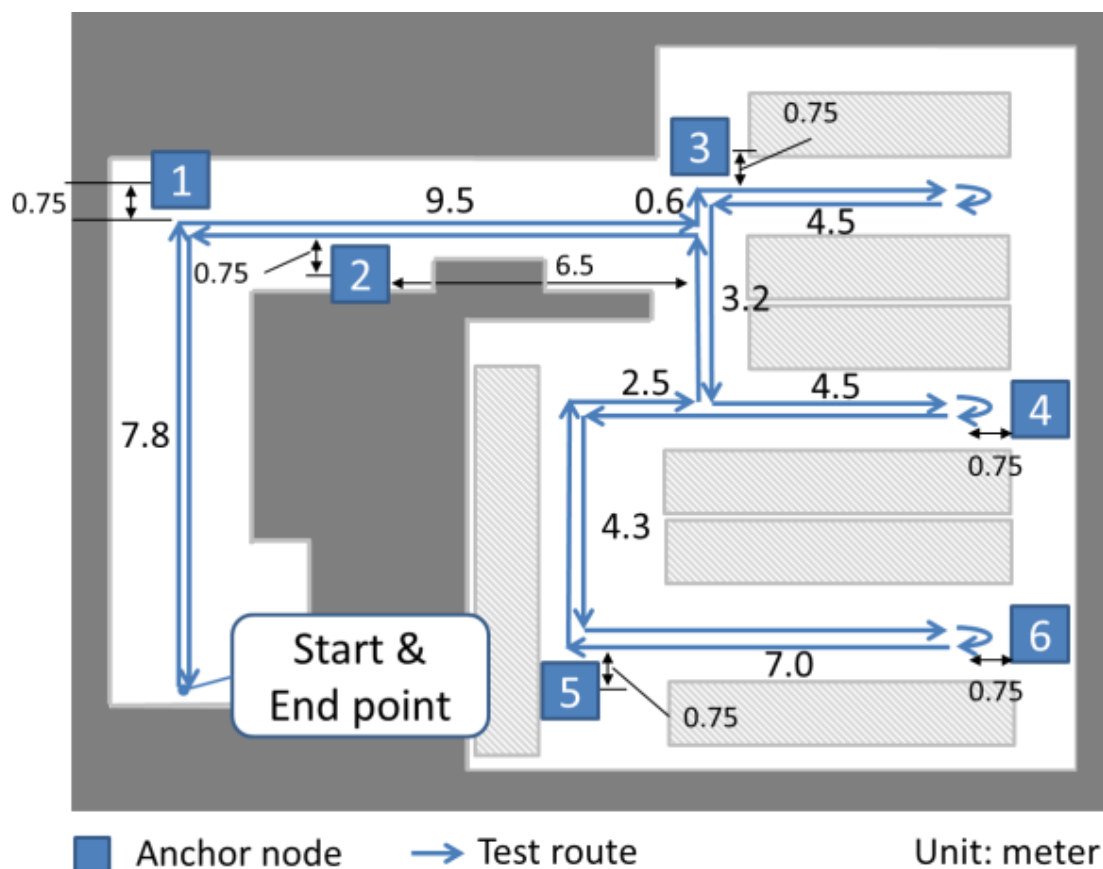


図 44 歩行実験 2 の歩行ルートと固定局の位置

4.6.2 各システムの歩行軌跡

図 45 に各システムの歩行軌跡の一例を示す。CS1(図 45(a))は歩行実験 1 と同じように軌跡が回転する現象が確認できる。CS2(図 45(b))は、図の星印の近傍では軌跡が確認できない。近傍に固定局が存在しない場所では、電力が高いビーコンを受信しないため、パーティクルの位置が更新されにくいことが原因と考えられる。一方、CS3(図 45(c))は星印の近傍でも軌跡が確認できる。電力が高いビーコンを受信しない場所であっても、ゆう度評価値が更新されにくくなるだけであり、パーティクルそのものは PDR の計算結果を利用し移動するためと考えられる。また、PS1 は歩行実験 1 での議論と同様に、周を重ねるごとに測位精度が少しずつ悪くなっていることが確認できる。

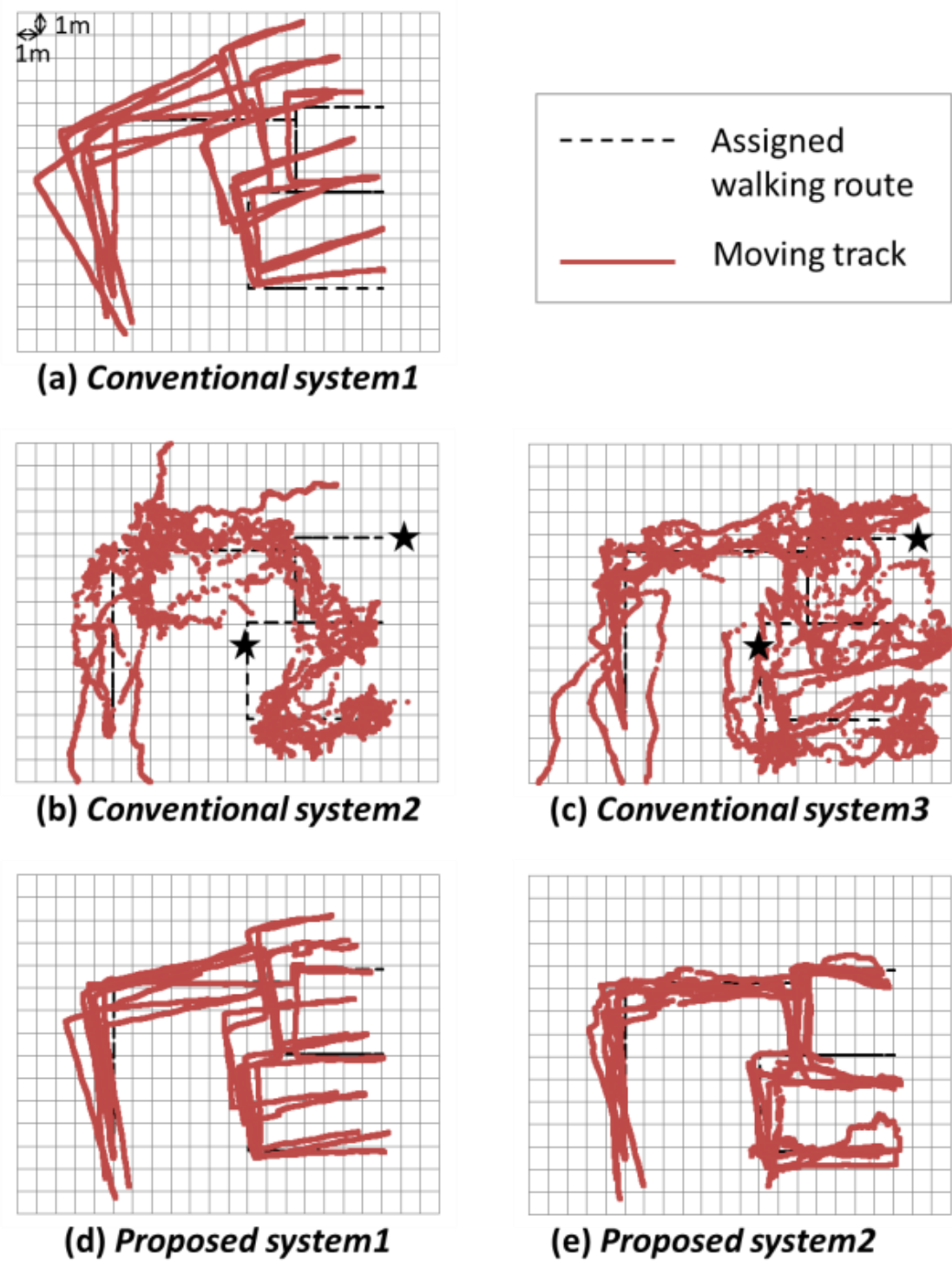


図 45 歩行実験 2 における軌跡の一例

4.7 考察

各システムにおける歩行実験の測位誤差の平均値と最大値を表 10 にまとめる。表 10 より、PS1、PS2 のいずれも、進行方向の修正により、従来システムに比べて平均測位誤差が改善することが確認できる。

表 10 歩行実験における測位誤差の平均値と最大値

	Localization error [m]			
	Experiment 1		Experiment 2	
	Average	Max.	Average	Max.
(a) Conv. system1	1.92	8.84	2.46	7.71
(b) Conv. system2	2.58	12.10	2.18	17.52
(c) Conv. system3	2.50	7.92	2.41	12.14
(d) Proposed system1	1.33	5.10	1.84	6.05
(e) Proposed system2	1.16	4.15	1.61	6.03

CS3 と PS2 は、いずれも電波と PDR によるゆう度評価を利用して測位する。しかし、リサンプリング時においてパーティクルの置き方と推定位置の探索範囲に違いがある。図 46 に再配置の違いを示す。リサンプリング時に、CS3 は現在の推定位置の近傍に正規分布に従ってパーティクルを再配置する。一方、PS2 は現在の選択軌跡を基に、基準点を中心として左右に回転させた円弧上にパーティクルを再配置する。PS2 は、PDR の軌跡を回転させれば、その軌跡の中には実際の歩行ルートに近いものがある、という前提を利用する。これが可能であるのは、2.3.2 の進行距離推定方法を用いれば、100m 程度の短い歩行距離では、進行距離の誤差が十分に小さくなるためである。例えば直線 150m の歩行後の距離誤差は 3.69m 程度となることを実験により確認している。したがって、基準点からの距離方向の誤差は十分に小さいと考えるならば、パーティクルを基準点からの距離方向に移動させる必要がなく、基準点からの回転方向に再配置すればよい。

一方、CS3 のパーティクルは平面上に移動する。しかし、ゆう度評価に重要な受信電力による距離推定の精度は十分ではなく、実験環境の中には距離推定の精度が良い場所と悪い場所が存在する。距離推定の精度が悪い場所において、理論値から乖離した電力となるビーコンを連続して受信すると、CS3 のパーティクルは平面上の誤った位置に移動してしまう。更にこの位置の近傍でリサンプリングが発動すると、次の位置も繰り返し誤って推定されてしまう。

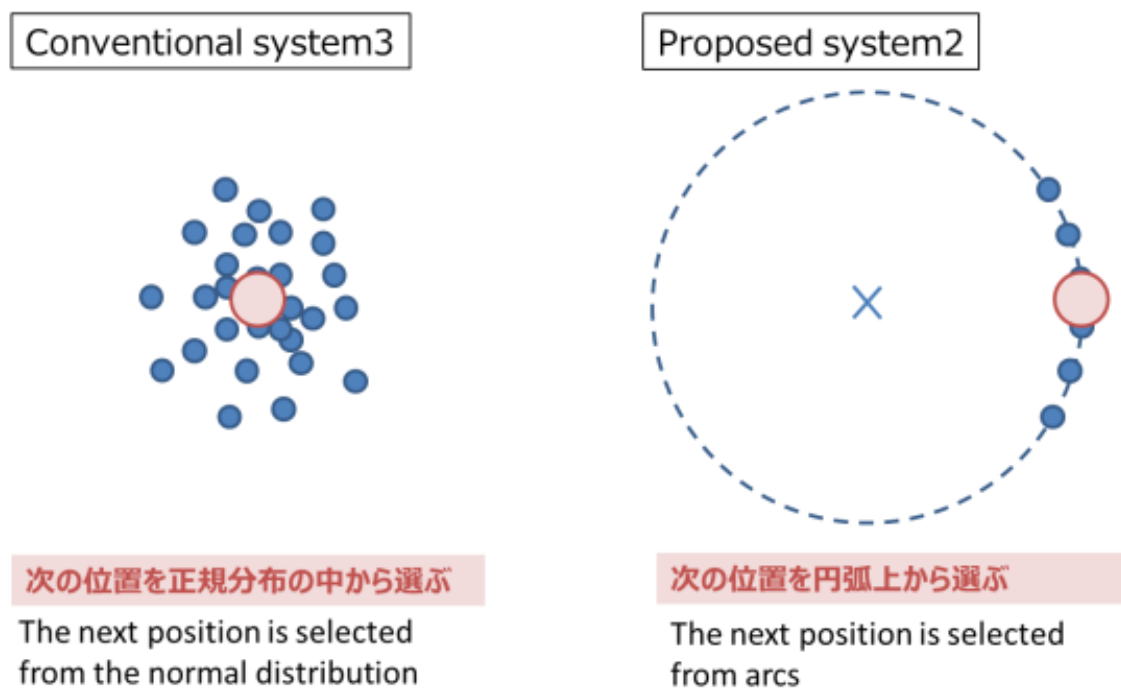


図 46 次の位置の選択方法の違い

PS2 は伝搬モデルの値から乖離した電力のビーコンを受信したとしても、位置そのものが更新されるのではなく、軌跡の角度にのみ影響を与えるため、パーティクルの移動範囲は限定される。つまり、PS2 は CS3 に比べて狭い範囲に存在するパーティクルから正解位置を探索することができる。ただし、前述のとおり、加速度を使った推定による進行距離誤差が十分に小さいのは、歩行距離が短い場合に限られるため、歩行を継続すると、円上に存在する軌跡候補の中に正解と近い軌跡が発見できなくなる。これは、例えば、図 40 に示すように、PS1 及び PS2 の 3 周目の劣化の要因と考えられる。よって、CS2 や CS3 よりも測位精度が低下する現象が発生すると考えられる。例えば、3 周歩行する際にスタート地点で位置をリセットせずに連続して歩行する実験を行ったところ、PS2 は 2 週目(歩行距離 100m)の平均測位誤差は 1.52m、3 週目(歩行距離 150m)の同誤差は 2.28m となった。ここで平均測位誤差が歩行距離に比例すると考えれば、CS3 の平均測位誤差である 2.50m に対して、PS2 の歩行距離が約 170m 程度を超えると逆転することになる。したがって、PS2 は約 170m 以内のいずれかのタイミングでは絶対位置をリセットする必要があり、リセットができない場合には CS2 や CS3 の方式に切り替えるなどの手段をとる必要がある。

次に、従来システムに対する PS2 の有意性を証明するため符号検定を用いて確認した。30 回の測定について符号検定を行う場合、従来方式より 22 回以上改善していれば、99% 信頼区間で有意性があることになる。ここで比較する条件を揃えるため、全ての測定において同じセンサの値や受信電力の値を用いて各システムで測位の計算を行った。30 回の全ての測定において PS2 は従来システムより測位誤差が改善する結果となったため、少なく

とも3名の被験者においては有意性があると考えられる。ただし、他の歩行者が3名の被験者と同様の歩行をするとは限らないため、被験者の数を増やした調査を継続する必要があると考える。

次に、システム要件で定めた目標値を確認する。第2章のシステム要件において平均測位誤差の目標値を1m以下と設定した。第3章で述べた第一の提案方式では、表7に示すように平均測位誤差が0.61mであった。実験会場の歩行コースに対して、第一の提案方式は、平均21.9mに1回の頻度で固定局の直下を歩行する必要がある。連続して歩行する距離と測位誤差が単純に線形の関係であると仮定すると、平均測位誤差が1m以下となるためには、35.9m以内に1回の頻度で固定局の直下を歩行する必要がある。すなわち、逆算すれば、歩行者が35.9m歩く間に、一度は固定局の直下を歩行するように、固定局の密度を設計することが望まれる。

これに対して、本章で述べた第二の提案方式は、歩行中に進行角度を修正できることから、第一の提案方式よりも固定局間を移動するまでの測位精度が改善している。第二の提案方式は、76.8m以内に1回の頻度で固定局の直下を歩行する必要があり、第一の提案方式の35.9mに比べて、約2倍以上に伸びることを確認した。すなわち、固定局の直下を歩行しない場合でも、進行方向の修正が可能となることで測位精度が改善し、アプリケーションの利便性の向上という観点において、提案方式は改善策として適用可能であることを示すことができた。

4.8 結言

本章では、PDRの計算手順を基本とし、複数の軌跡候補を同時に計算していき、固定局から送信される電波の受信電力を利用し、それぞれの軌跡候補にゆう度評価を施すことで、評価値の高い軌跡を選択する屋内測位システムを提案した。

屋内の会議室において測位精度の検証を行ったところ、150mの歩行ルート区間内の平均測位誤差は、提案システムでは1.16mとなり、電波とPDRによるパーティクルフィルタを利用した従来システムの2.50mに対して、約46%に改善することを確認した。

また、提案システムでは、全方位を分割するように放射的に回転させながら配置した複数の軌跡候補を同時に計算することで、磁気センサが不要であり絶対方向の基準を必要としない方式を実現させた。

さらに、提案方式では、76.8m以内に1回の頻度で固定局の直下を歩行すれば、平均測位誤差1m以内を満たすことができ、これは、第3章の提案方式の35.9mに比べて、約2倍以上に伸びることを確認した。すなわち、第3章の課題であったアプリケーションの利便性の向上という観点において、提案方式は改善策として適用可能であることを示すことができた。

第5章 結論

本論文では、低コストとなることを前提とし、汎用的なデバイスにより実現が可能となる、固定局の外部信号を用いた屋内測位システムについて提案し、その性能を実験により評価した。

まず、PDRを基本とした従来方式の適用を検討し、歩行実験による測位誤差の検証を行ったところ、ジャイロスコープの温度ドリフトによる角速度の累積的な誤差により、歩行者の進行歩行が時間の経過とともに劣化することを確認した。次に、測位精度を改善させるためには、ボトルネックとなっている進行方向を修正する必要がある、その解決策として、2つの方式を提案した。

第一の提案方式として、赤外線レーダを備えた固定局を敷設することで、進行方向の誤差を直接的に求め、歩行者の位置と角度を修正するシステムを検討した。本システムは、歩行者が赤外線レーダの直下を通過するたびに、歩行者の絶対位置がリセットされ、さらに、それまで累積されていた進行方向の角度誤差がリセットされるため、測位精度が改善することを確認した。

ただし、赤外線レーダは指向性が高いため、絶対位置をリセットするための検出精度は高いが、歩行者の歩行ルートによっては赤外線レーダにより検出されず、リセットされない可能性がある。したがって、連続して直下を歩行することのない状態が継続する場合であっても、進行方向が修正される方式が望まれる。また、ジャイロスコープからは相対的な回転角しか計算できないため、進行方向の初期値を求める必要がある。絶対方向の推定には磁気センサがしばしば用いられるが、本システムのユースケースを想定した場合、金属の影響を受けるため、鉄筋ビルの建設現場等では精度よく利用できない場合がある。そこで、磁気センサを不要とし、初期の動作において絶対方向の基準を必要としない方式が望まれる。

これらの問題点を解決するために、第二の提案方式として、第一の提案方式の機能を踏襲した上で、全方位を分割するように放射的に回転させながら配置した複数の軌跡候補を用意し、センサを利用した歩行者自律航法の手順により軌跡候補の位置をそれぞれ同時に

推定していき、屋内に設置された固定局から連続的に送信されるビーコンの受信電力を測定することで、それぞれの軌跡候補に対して受信電力に基づいたゆ度評価を施し、軌跡候補の中から評価値の高い軌跡を選択し、その現在位置を推定位置とするシステムを検討した。

第二の提案方式では、歩行中に進行角度を修正できることから、第一の提案方式よりも固定局間を移動するまでの測位精度が改善した。測位誤差 1m 以内を満たすために、第二の提案方式では、76.8m 以内に 1 回の頻度で固定局の直下を歩行すればよく、第一の提案方式の 35.9m に比べて、約 2 倍以上に伸びることが確認した。すなわち、固定局の直下を歩行しない場合でも、進行方向の修正が可能となることで測位精度が改善し、アプリケーションの利便性が向上することを確認した。

将来の検討事項

測位システムにおいて測位精度を改善させることができれば、アプリケーションの適用範囲が広がる。さらなる測位精度の改善のために、今後、検討する必要がある事項について述べる。

第3章及び第4章では、進行方向であるヨー角に着目し、ヨー角に累積した角度誤差を固定局の信号を利用してリセットする方式を検討した。しかし、ジャイロスコープによる角速度の誤差はヨー角だけでなく、ピッチ角及びロール角にも蓄積される。ピッチ角及びロール角は次のステップで計算されるヨー角に影響するため、ピッチ角及びロール角の誤差が低減すれば、ヨー角の誤差も蓄積されにくくなると考えられる。ピッチ角、ロール角を修正するためには、端末の正しい姿勢を何らかの方法で取得する必要がある。例えば、文献[48][49]では、静止時を判定し、静止時における重力に起因したベクトルを加速度センサから求め、ベクトルの成分を姿勢の答えとして与えることで、ピッチ角及びロール角を修正するシステムが提案されている。ベクトルの成分が正確となることが重要であるため、実現のためにアルゴリズムの改良や検証を進めていく必要がある。

また、第4章のシステムでは、固定局から距離が離れると受信電力が低い電波を受ける確率が上がるが、このような電波はゆ度評価値の更新への影響が低いため、遠方を継続的に歩行すると、次第に適切な選択軌跡が選ばれにくくなり、測位精度が低下する。これに対して、測位エリアを分割し、各エリアに伝搬モデルを用意することで、伝搬モデルの適用範囲を局所化すれば、距離推定の精度が改善すると考えられる[20]。

さらに、本システムは事前のプロファイル取得作業が必要である。しかし、当該作業はシステム導入への障壁となることから、自動的にプロファイルを学習させる技術が望まれる。伝搬パラメータの初期値を仮に設定しておき、PDRの結果が信頼できる区間の位置情報のみを利用し、そのときの受信電力と対応付けることで、歩行しながら伝搬パラメータを学習させていく方法が考えられる。また、伝搬環境は建物だけでなく、実際には人体による遮蔽の影響も受けるため[50]、人体の影響を考慮した伝搬モデルを利用すれば、測位性

能が改善する可能性があると考えられる。

電波を利用した測位方式は、遠隔から届く無線媒体を利用して測位できることが魅力であり、電波は周波数帯にもよるが、公共の場所で汎用的に利用できるものであるから、今後も重要な技術である。例えば、本論文では屋内での利用を中心に検討したが、将来的には公衆無線 LAN を利用した測位に応用できるかもしれない。現在、電波を利用した測位技術のうち、第 1 章で述べた到来時間を用いた方式の検討が進められている。到来時間を用いた方式は測位精度 10cm 以下を実現できる可能性があるが、高速なアナログデジタル変換を必要とするため、本論文のシステムにおいては実装のコストを考慮に入れると採用できるものではなかった。しかし、高速なアナログデジタル変換器のコストが将来的に低下すれば、採用されるシステムは増加すると考えられる。

PDR も、センサデバイスの性能向上により測位精度が改善し、今後も精力的に研究が進められていくと思われる。電波を利用した方式の測位精度が改善したとしても、PDR 技術が不要となることはないと考えられる。電波を利用した方式は、電波が届かない場所では精度よく測位できないため、PDR に頼る必要がある。一方、PDR も同様であり、デバイスの性能が向上したとしても累積誤差が完全に無くなることはないため、電波のように外部情報を利用したリセット処理が必要である。したがって、将来においても、PDR と電波を組み合わせたハイブリッド型の測位システムが検討されていくと考えられる。

高度な状態推定を行うセンサの必要性

本論文では測位技術に関する研究を進めたが、歩行者の状態を推定する技術を実装することで、従業員の安全性が高まることが期待できる。序論でも述べたとおり、加速度センサ及びジャイロスコップを利用することで人の状態を推定することができる。本論文の端末はこれらのセンサを備えるため、人の状態推定が可能である。しかしながら、より複雑な人の状態を推定するためには、更に高度なセンサが必要になると考えられる。

例えば、引越しの作業を行う従業員を安全目的で監視するアプリケーションを考える。図 47 に示すように、従業員は歩行以外にも様々な動作を行う。ここで、図 47 に示す動作を加速度センサやジャイロスコップを用いて判別することは困難であると考えられる。なぜなら、図 47 の動作は、ほとんど移動を伴わず、加速度や角速度が発生しない、あるいは変化が少ないと考えられるためである。



図 47 引っ越し作業の動作の例

このような場合、筋電センサを用いることで状態を推定できる可能性がある。図 47 の左から二つ目の例のように、従業員が荷物を背負う作業の場合、その積載重量を推定することは従業員の安全を確認するうえで重要である。そこで、筋電センサを用いた積載重量の推定について考える。

図 48 は積載重量の推定に関して一検討したものである。筋電センサを左右の足の太ももに設置し、3 秒に 1 回の間隔で 10 回スクワットをし、得られた筋電信号の平均値を求めた。背負う荷物の積載重量は 4、8、12、16 及び 20kg に変えて実施した。

図 48 の右のグラフより、いずれの筋電センサも積載重量が上がるとともに、筋電信号の平均値も大きくなる傾向となっている。すなわち、筋電信号を取得することで積載重量を推定することが可能であると考えられる。

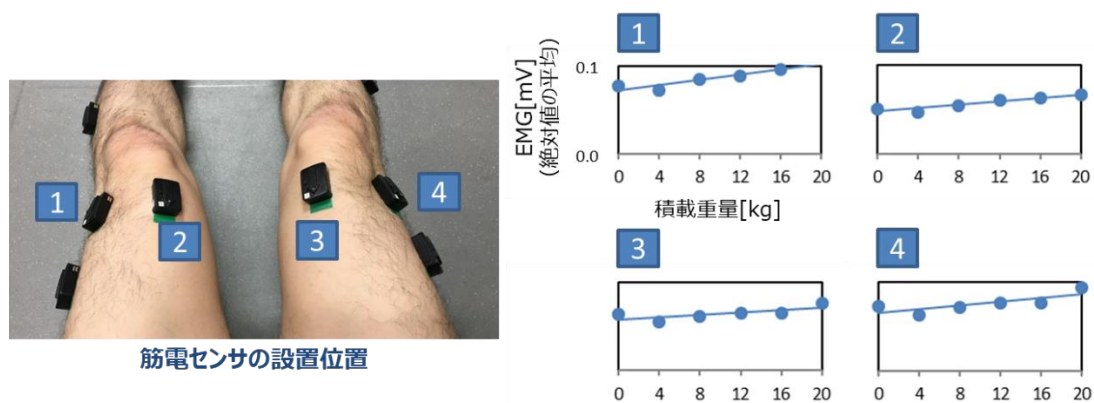


図 48 筋電センサによる積載重量の推定

また、筋電センサにより体の疲労を定量的に推定する技術も研究されている[54]。これらの歩行者の状態と位置情報を組み合わせれば、安全性はさらに精度よく推定できるようになる。例えば、体の状態が高精度に推定できれば、同じ人であっても、体調に合わせて安全な歩行ルートを随時変更する、などといったことが可能となるかもしれない。

結び

最後に、将来、ここまで挙げた課題が技術的に解決されることを仮定し、新たに創出される測位技術により、社会がどのように変化するのかを予想する。様々な技術的課題が解決されれば、屋外に限定することなく屋内においても、世界中の至る所で、シームレスに測位精度が1m以下となり、今よりもさらに、従業員の安全性が確保されるようになる。従業員の位置と状態はデータセットで表現され、遠隔で管理されるようになる。例えば、序論で述べた例のように、広大な施設内で作業する従業員が、急なトラブルに巻き込まれたとしても、データセットを早急に伝達することで、大事に至らなくなるかもしれない。このとき、従業員のデータセットを管理するのは人間とは限らない。データセットはリアルタイムに管理センタに届けられるが、データセットを人間がモニタで常時監視しているのは現実的ではない。データセットは管理センタのサーバに集められ、過去から蓄積されたデータも含めて人工知能により高度なパターン認識を施す結果、現在の安全性が推定されることになり、様々な事故を防止できるかもしれない。

また、これらのデータセットは、自動車などの機械へもフィードバックされる。工場などではフォークリフトなどとの接触事故も無くなる。

現在、ダイナミックマップと呼ばれる次世代の地図技術に関する研究が進められている[51][52][53]。ダイナミックマップでは、高精度な地図が三次元で表示されるようになり、さらに車両や歩行者などの自己位置推定の結果が随時管理サーバにアップされるため、利用者は静止物だけでなく、移動体もマップ上で認識することができるようになる。ダイナミックマップでは測位誤差25cm以下を目標としており、自動車の場合、本目標の実現のために、レーザレンジファインダや将来のGNSSを利用して自己位置を推定するようになると考えられる。しかし、歩行者においては高精度なレーザレンジファインダを持ち歩くことは現実的ではない。GNSSが利用できない屋内では、本論文のようなハイブリッド型の屋内測位システムの技術が、屋内用のダイナミックマップへの展開されることを期待したい。

さらに、人流の効率化も期待できる。現在の改札の入退場ではICカードを接触させるか、切符を投入する必要があるが、歩行者の位置が正確にわかれば、そのような動作も必要がなくなる。改札の入退場に限らず、テーマパーク、映画館などでもチケットを購入する必要がなくなる。位置情報が後から管理サーバに送信され、その場所にいたことが証明された時点で、利用した料金が引き落とされる仕組みが考えられる。

以上のように、測位技術は重要であり、今後も精力的に研究されていくことに違いはないと考えられ、安全社会の実現に向けて、本論文の技術がほんの些細な一端としてでも役に立てば幸いである。

文献

- [1] 内閣府, 準天頂衛星システム, <http://qzss.go.jp>
- [2] M. Kourogi, T. Kurata, "Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera," Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'03), pp103-112, Tokyo, Japan, Oct. 2003.
- [3] R. Harle, "A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.15, Issue: 3, Third Quarter 2013.
- [4] 梶航士, 岡田将吾, 新田克己, "屋内散策行動分析のための歩行者自律測位手法の提案と評価," 信学技報, MoNA, 113(495), pp.147-154, 2014.
- [5] 鶴沼宗利, 倉田謙一郎, 外山敦也, 堀江武, "人の歩行動作認識技術を応用した自律的位置検出手法," 信学論(A), J87-A(1), pp.78-86, 2004.
- [6] 興梠正克, 大隈隆史, 石川智也, 蔵田武志, "装着型自蔵センサモジュールを用いた歩行者の位置・方位計測技術," 信学誌, 92(4), pp.268-275, 2009.
- [7] 李欣洙, 間瀬憲一, 阿達透, 大沢達哉, 中野敬介, 仙石正和, 日高裕敏, 品川準輝, 小林岳彦, "GPS, 歩数計及び方位計を用いた歩行者移動経路追跡法," 信学論(B), vol.J84-B, No.12, pp.2254-2263, 2001.
- [8] 吉田慶介, 小栗悠生, 松野省吾, 大山 実, "複数センサを利用した移動状態の推定手法に関する検討," 情報科学技術フォーラム講演論文集 14(4), pp.547-548, 2015-08-24.
- [9] 赤堀顕光, 岸本圭史, 小栗宏次, "単一 3 軸加速度 センサを用いた行動推定," 電子情報通信学会技術研究報告, MBE, Vol.105, No.456, pp.49-52, 2005.
- [10] 倉沢央, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀, "センサ装着場所を考慮した 3 軸加速度センサを用いた姿勢推定 手法," 情報処理学会研究報告, UBI, Vol.54, pp.15-22, 2006.
- [11] 池谷直紀, 長健太, 岡本雄三, 瀬戸口久雄, 服部正典, "3 軸加速度センサに基づく 6 種移動状態識別方式" DEIM Forum 2010.
- [12] 森信一郎, 奥山鏡子, 峰野博史, 水野忠則, "地磁気センサを使った高精度測位技術," 信学論(D), vol.J93-D, No.10, pp.1894-1902, 2010.
- [13] J.Bird and D.Arden, "Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors," In Proceedings of the 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.7598 -7601, 2011.
- [14] 武島知勲, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩, "回転磁石マーカに基づくスマートフォン位置推定," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016)シンポジウム, pp.889-898, 2016.
- [15] 米田圭佑, 望月祐洋, 西尾信彦, "気圧センシングを用いた行動認識手法," 信学技報, MoNA, 113(495), pp.327-334, 2014.
- [16] 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸, "IMES の技術動向 : シームレス三次元測位・航法の新技術," 信学誌, 95(2), pp. 119-124, 2012.
- [17] 水垣健一, "UWB-IR 無線方式による屋内位置検知," 信学誌, 92(4), pp.256-261, 2009.
- [18] 安在大祐, 原晋介, "位置推定領域のレイアウトに基づいた事後確率最大推定によるトラッキング法," 信学技法, WBS2009-63, pp.87-92, April 2010.
- [19] S. Hara, D. Zhao, K. Yanagihara, J. Taketsugu, K. Fukui, S. Fukunaga, and K. Kitayama, "Propagation Characteristics of IEEE802.15.4 Radio Signal and Their Application for Location Estimation," Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 2005-Spring, pp.1-5,

Stockholm, Sweden, May/June 2005.

- [20] N. Kikuchi, T. Yano, T. Ohyama, S. Nakabayashi, and M. Hamaguchi, "Development of Localization System for Pedestrian Using Wireless Nodes," 22nd ITS World Congress, pp.1-10, Bordeaux, France, Oct. 2015.
- [21] Koutsou A.D., CSIC Madrid, Seco F., Jimenez A.R., Roa J.O., Ealo J.L., Prieto C., and Guevara J., "Preliminary Localization Results With An RFID Based Indoor Guiding System," IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2007), Alcala de Henares, Spain, Oct. 2007.
- [22] 木原渉, 河畑凌, 大西正輝, 興梠正克, 蔵田武志, "屋内環境における人の位置計測に向けたRGB-Dカメラに映るPDR利用者の同定と位置補正," 信学論(D), vol.J100-D, no.2, pp.244-254, Feb. 2017.
- [23] 渡辺義浩, 畑中哲生, 小室孝, 石川正俊, "単一のウェアラブルカメラを用いた人間の歩行動作推定," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.17, No.3, 2012.
- [24] 森田真司, 山澤一誠, 寺沢征彦, 横矢直和, "全方位画像センサを用いたネットワーク対応遠隔監視システム," 信学論(D), vol.J88-D-II, No.5, pp.864-875, 2005.
- [25] 合志和洋, 松尾聡, 田所嘉昭, "デジタル携帯電話を用いた歩行者追尾システム," 信学論(A), vol.J81-A, No.9, pp.1280-1288, 1998.
- [26] <https://panasonic.biz/cns/invc/hdbeacon/>
- [27] <https://inrawave.jp/products/>
- [28] <http://www.smapo.jp/>
- [29] M.Kouroggi, N.Sakata, T.Okuma, and T.Kurata, "Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/RFID/Self-contained Sensor System," In Proceedings of the 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2006), 2006.
- [30] <http://biz.kkc.co.jp/software/lbs/sdk/>
- [31] <http://www.csr.com/ja/products/sirfusion/>
- [32] A.S. Paul and E.A. Wan, "RSSI-Based indoor localization and tracking using sigma-point Kalman Smoothers," IEEE J. sel. Top. Signal Process, Vol.3, No.5, pp.860-873, Oct. 2009.
- [33] A. Jimenez, F. Seco, J. Prieto, and J. Guevara, "Pedestrian indoor navigation by aiding a foot-mounted IMU with RFID signal strength measurements," Proc. 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp1.-7, 2010.
- [34] 新谷敏弘, 中山謙二, 平野晃宏, 谷野英樹, 鶴見潔, 浅田博重, "カルマンフィルタによる推測航法システムにおけるジャイロゲイン推定に関する検討," 電子情報通信学会第22回信号処理シンポジウム, Nov. 2007.
- [35] 菊池典恭, 矢野貴大, 中林昭一, 浜口雅春, 小池康晴, "歩行者自律航法の位置及び進行方向修正において電波ビーコン及び赤外線レーダの近接検出を用いる屋内測位システム," 信学論(D), vol.J100-D, no.3, pp.404-418, Mar. 2017.
- [36] 興梠正克, 石川智也, 蔵田武志, "歩行者デッドレコニングに基づくハンドヘルド端末の屋内外測位技術," 信学技報, PRMU2010-171, 2011.
- [37] 矢野貴大, 菊池典恭, 中林昭一, 浜口雅春, "加速度センサを利用した歩行速度推定に対する装着位置依存性評価," 2016 信学ソ大 (基礎・境界), A-18-3, Sept. 2016.
- [38] 鈴木明宏, 石井賢治, 永富良一, "腰部身体加速度を用いた歩行速度・歩幅推定法-ウォーキング及びノルディックウォーキング-, "生体医工学, vol.49, no.5, pp.957-961, 2011.
- [39] 山口功, 木田隆, 岡本修, 狼嘉彰, "クォータニオンとオイラー角によるキネマティクス表現の比較について," 航空宇宙技術研究所報告 TR-636, 1991.

- [40] 狼嘉彰, “オイラー角表示による座標変換のアルゴリズム,” “航空宇宙技術研究所報告 TR-305, 1972.
- [41] 星尚志, 羽多野裕之, 藤井雅弘, 伊藤篤, 渡辺裕, “スマートフォンを用いた PDR のための進行方向推定に関する一検討,” “情報処理学会, 第 77 回全国大会.
- [42] Robert M. Rogers, *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, Third Edition, AIAA, 2007.
- [43] H. Wang, S. Sen, A. Elgohary, M. Farid, M. Youssef, and R.R. Choudhury, “No need to war-drive: unsupervised indoor localization,” *Proc. 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp.197-210, 2012.
- [44] J. Borenstein, L. Ojeda, and S. Kwanmuang, “Heuristic Reduction of Gyro Drift in IMU-based Personnel Tracking Systems,” *Proc. SPIE 7306, Optics and Photonics in Global Homeland Security V and Biometric Technology for Human Identification VI*, Orlando, USA, April 2009.
- [45] ITU-R P.1238-8, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz,” Jul. 2015.
- [46] 樋口知之, 予測にいかす統計モデリングの基本—ベイズ統計入門から応用まで, 講談社, 東京, 2011.
- [47] 和合肇, 萩原淳一郎, R によるベイジアン動的線型モデル, 朝倉書店, 東京, 2013.
- [48] C.-C.Lo, C.-P.Chiu, Y.-C.Tseng, S.-A.Chang and L.-C. Kuo,” A walking velocity update technique for pedestrian dead-reckoning applications,” *In Proceedings of the IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1249-1253, 2011.
- [49] I.Skog, P.Handel, J-O.nilsson, and J.Rantakko,"Zero-Velocity Detection – An Algorithm Evaluation," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* Volume 57, No.11, pp2657–2666, Nov. 2010.
- [50] 高橋応明, “ボディエリアネットワークにおけるアンテナ技術,” *信学論(B)*, vol.J96-B, no.3, pp.907-915, Sept. 2013.
- [51] ETSI TR 102 863 V1.1.1, “Intelligent transport systems; Vehicular communications; Basic set of applications; Local dynamic map(LDM); Rationale for and guidance on standardization,” June 2011.
- [52] ETSI EN 302 895 V1.1.1, “Intelligent transport systems; Vehicular communications; Basic set of applications; Local dynamic map(LDM),” Sept. 2014.
- [53] 佐藤健哉, 渡辺陽介, 高田広章, “動的地理情報共有のためのアプリケーションプラットフォームとしてのダイナミックマップの役割,” “電子情報通信学会学会誌, vol.101, no.1, pp.85-90, Jan. 2018.
- [54] 小西有人, 岡久雄, “変位筋音図と筋電図の同時計測による等尺性筋収縮の評価,” *電子情報通信学会技術研究報告, MBE, Vol.113, No.499, pp.69-72, 2014.*

謝辞

本論文は東京工業大学総合理工学研究科物理情報システム専攻小池康晴教授のご指導のもと、著者が研究成果をまとめたものである。本研究を進めるにあたり小池教授から賜ったご懇意なるご教示、ご鞭撻に対し、深甚なる感謝の意を表す次第である。

また、本研究を遂行し研究成果をまとめるにあたり、同専攻熊澤逸夫教授、中村健太郎教授、金子寛彦教授、吉村奈津江准教授から賜ったご懇意なるご教示、ご鞭撻に対し、深甚なる感謝の意を表す次第である。

さらに、筋電信号の実験に関して多大なご協力を賜った同研究室神原裕行助教に厚く感謝申し上げます。著者は研究を進めるにあたり、同研究室秘書佐々木涼子氏にご協力を頂いた。厚くお礼申し上げます。

そして、本論文作成の期間においてご厚誼を頂いた、沖電気工業株式会社の各位に感謝の意を表す次第である。

最後に、惜しみない援助と理解を頂いた家族に心より感謝する。