

博士学位論文  
システムエンジニアリング学

空間構成に迅速に適応する屋内測位環境を実現する  
距離情報のみの SLAM によるビーコン位置推定手法

Rapid Beacon Localization Method by Range-Only SLAM  
to Create Layout-Adaptable Indoor Positioning Environment

指導教員 神武 直彦 教授

2021 年 9 月

慶應義塾大学大学院  
システムデザイン・マネジメント研究科

佐藤 章博

# 論文要旨

氏名	佐藤 章博
主論文題名： 空間構成に迅速に適応する屋内測位環境を実現する距離情報のみの SLAM によるビーコン位置推定手法	
<p>(内容の要旨)</p> <p>本研究では、人が利用する屋内空間全体に測位機能を提供することを目指し、空間構成の変化に迅速に適応する屋内測位環境を構築するための、スマートフォンを持つ歩行観測者によるビーコン位置推定手法を提案した。屋内空間で位置情報サービスを利用するためには、衛星測位に代わり屋内測位システムを導入する必要があるが、利用するための事前準備に必要な時間と作業量の問題がある。広く普及が進むスマートフォンをはじめとした携帯情報端末では、電波による測位方式を容易に用いることができるが、その特性は屋内空間の物体配置に依存する。したがって、特に空間の構成が可変の屋内環境では、迅速に屋内測位環境を構築できることが求められる。そこで本研究では、高密度に電波ビーコンを設置した屋内測位環境に着目した。空間の区切りの物体を利用し、ビーコンを空間に面したところへ設置すれば、見通し内の信号を利用することが容易になる。この屋内測位環境でビーコンの位置座標を用いた測位を行うために、ビーコンの位置座標を短時間で取得する手法を確立することを本研究の目的とした。</p> <p>提案手法では、ビーコンの信号を用いた自己位置と環境地図の同時推定 (Simultaneous Localization and Mapping: SLAM) の手法に着目し、ビーコン信号を観測して取得した距離の情報からビーコンの位置座標を推定する。スマートフォンを所持した人物が現場の屋内空間を歩行しながらビーコン信号を観測することで容易に実施することを可能にする。SLAM を用いることにより、歩行経路の座標を事前に計測する必要がなくなることが利点となる。ここで、位置推定のための歩行観測が短時間で完了できること、位置推定の進行状況をリアルタイムに確認できることを提案手法の目標とした。</p> <p>ビーコンの方向の情報が利用できない場合、従来の SLAM 手法では、移動体の自律航法の精度が不十分な場合にはビーコン位置推定精度を上げるために長い観測時間を必要とする問題がある。そこで提案手法では、距離情報のみを用いた SLAM の推定アルゴリズムに複数仮説追跡を用いることで、推定に必要な観測を短時間で行うことを可能にした。さらに推定対象のビーコンの数に応じて仮説の生成数が増加してしまう問題を解決するために、ビーコンの間隔</p>	

情報を SLAM の推定アルゴリズムに用いることで計算負荷の軽量化を実現した。

一方で、平常時の利用だけでなく、災害発生時の避難に屋内位置情報を活用することが期待されている。提案手法を用いて構築した屋内測位環境による実現可能性を分析するために、緊急時の具体的な屋内位置情報サービスを想定した平常時と緊急時に共通利用する屋内位置情報システムの概念設計を行った。要求分析の結果に基づいて、提案手法を用いて構築した屋内測位環境で実現可能な、緊急時に利用するために有益な特徴を明らかにした。

その上で、提案手法を評価するために、現時点で多くのスマートフォンが対応している Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンを用いて実験を実施した。試験環境を 13 m×11 m の領域の屋内空間に構築し、8 個 (4 組) の位置座標が未知で間隔が既知のビーコンと、4 個の座標が既知のビーコンを配置した。実験の結果、90 秒の観測を用いて平均誤差 2.14 m でビーコンの位置を推定できること、従来の SLAM 手法と比較して、提案手法が最も速くビーコンの位置を推定できることを示した。この結果をもとに、推定されたビーコンの位置座標を用いて擬似的にスマートフォンを測位したところ、試験環境は平均 2.70 m の測位精度を示すことが可能であることを確認した。したがって、屋内測位環境構築の所要時間と、構築された屋内測位環境が示す測位精度の面において、提案手法の有効性が示された。また、屋内測位環境の遍在化と、さらには平常時と緊急避難時に共通利用する屋内測位システムの実現に向けて、本研究の成果の貢献が期待できる。

# SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

Name	Akihiro Sato
<b>Title :</b> Rapid Beacon Localization Method by Range-Only SLAM to Create Layout-Adaptable Indoor Positioning Environment	
<b>Abstract:</b> <p>This study proposed a method of beacon localization by a walking observer with smartphone to create an indoor positioning environment rapidly adaptable to the layout, aiming to distribute indoor positioning systems for the entire indoor space used for human activities. In order to provide indoor location-based services, indoor positioning systems are necessary to be introduced, that includes an issue of the time and effort for advance preparations. The performance of positioning methods using radio signals, that are readily available on popular mobile terminals especially such as smartphones, depends on the physical arrangement of indoor objects. Hence, rapid construction methods for each indoor positioning environment are required in indoor environments, particularly where having frequent opportunities for renovation of spatial composition. This study focused on constructing indoor positioning environments with densely and flexibly deployed radio beacons intended to provide indoor positioning methods using beacon coordinates. The line-of-sight signals become readily available by installing beacons on partitioning materials facing on the indoor space. The objective of this study is to establish the method to obtain rapidly the Cartesian coordinates of the beacons installed in such indoor positioning environments.</p> <p>In the proposed method, the beacon coordinates are estimated by Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) approach using ranging information obtained from in situ observation of beacon signals by a walking person holding a smartphone. The advantage of using SLAM prevents the necessity of preliminary measurements for the coordinates of the walking path. The proposed method aims to complete the walking observation rapidly, indicating the progress of the real time estimation.</p> <p>In case of the lack of angular information against the beacon, the conventional SLAM with inaccurate dead reckoning requires long observation time to achieve high estimation accuracy. The proposed method realizes the reduction of beacon signal observation period using multiple hypotheses tracking (MHT) on the SLAM using ranging information only. However, the standard</p>	

MHT increases the total number of hypotheses according to the number of beacons estimated in the algorithm. The proposed method reduces the number of hypotheses by using beacon interval information in the algorithm, that results in the suppression of computational load for estimation.

Meanwhile, it is expected to utilize indoor location information not only on normal period but also for evacuation support in the event of a disaster. In order to analyze the feasibility by the indoor positioning environment constructed by the proposed method, this study presented a conceptual design of an indoor location information system used in common for normal period and in case of emergency, supposing a practical indoor location-based service during emergency situations. The results of requirement analysis revealed the beneficial characteristics for use in case of emergency, feasible by the indoor positioning environment constructed by the proposed method.

To evaluate the proposed method, experimental evaluations were conducted using Bluetooth Low Energy (BLE) beacons that are currently supported by popular smartphones. An indoor test environment was constructed in an area of 13 m x 11 m. 8 (4 sets) beacons which coordinates were unknown whereas the beacon intervals were preliminary known, and 4 beacons with known coordinates were deployed. As a result, the position of the beacon could be estimated with an average error of 2.14 m using the observation of 90 seconds. With the comparison of conventional SLAM methods, the proposed method could obtain the beacon coordinates most rapidly. Based on these results, using the estimated beacon coordinates, the test environment is able to localize the smartphone with an average positioning accuracy of 2.70 m. Therefore, the effectiveness of the proposed method was confirmed, regarding the time required for the indoor positioning environment construction and the positional accuracy in the indoor positioning environment constructed by the proposed method. It can be expected from the results of this research to contribute to the ubiquity of the indoor positioning environment and thus the realization of the indoor positioning system used in common for normal period and in case of emergency.

# 目次

第1章	序論.....	1
1.1.	研究の背景.....	2
1.2.	研究の目的.....	5
1.3.	論文の構成.....	6
第2章	研究課題.....	9
2.1.	屋内位置情報サービスの動向.....	10
2.1.1.	歩行者ナビゲーション.....	10
2.1.2.	位置連動型情報配信.....	13
2.2.	屋内測位環境の遍在化に向けた課題.....	15
2.2.1.	屋内測位を利用するための事前準備.....	15
2.2.2.	屋内測位環境構築の効率化における従来の取り組み.....	15
2.2.3.	迅速な屋内測位環境構築の必要性.....	19
2.2.4.	ユビタスな屋内測位環境を構築する意義.....	21
2.3.	空間構成の変化に迅速に適応する屋内測位環境.....	22
2.3.1.	屋内測位方式の比較.....	22
2.3.2.	高密度に設置したビーコンの位置座標を用いた屋内測位.....	25
2.3.3.	本研究の取り組み.....	26
第3章	関連研究.....	27
3.1.	無線信号の発信機の位置座標を求めるための手法.....	28
3.1.1.	屋内地図や屋内空間モデルを用いる手法.....	28
3.1.2.	無線通信により計測した発信機の間隔を用いる手法.....	28
3.1.3.	移動しながら発信機との距離を観測し移動軌跡を別途測定する手法.....	30
3.2.	無線信号を用いた自己位置と環境地図の同時推定.....	31
3.2.1.	初期化にランダムな値を用いる方法.....	33
3.2.2.	<b>Delayed Initialization</b> .....	34
3.2.3.	<b>Undelayed Initialization</b> .....	36
3.2.4.	仮説数抑制のためのアプローチ.....	39
3.2.5.	歩行者の持つ携帯情報端末を移動体としたときの課題.....	40
第4章	屋内測位環境構築方法の設計.....	43
4.1.	想定環境.....	44
4.1.1.	ビーコンの設置場所.....	44
4.1.2.	ビーコンを設置する対象物.....	46
4.2.	ビーコンの設置方法.....	46
4.2.1.	アンカビーコン.....	46
4.2.2.	位置推定対象のビーコン.....	47

4.3.	具体的なビーコン規格の選定.....	47
4.3.1.	Bluetooth Low Energy ビーコン.....	47
4.3.2.	電波伝搬モデルを用いた距離推定.....	48
4.3.3.	距離マスクの適用.....	51
4.4.	ビーコン信号の観測方法.....	52
4.4.1.	スマートフォンを持つ歩行者によるビーコン信号の観測.....	52
4.4.2.	Range-Only SLAM を用いたビーコン位置推定.....	53
第5章	短時間の観測による計算負荷が軽量なビーコン位置推定手法の提案.....	55
5.1.	複数仮説追跡を用いた Range-Only SLAM.....	56
5.1.1.	位置推定対象のビーコンを用いた移動体の軌跡推定.....	56
5.1.2.	仮説の生成と追跡の過程.....	56
5.1.3.	仮説数増加の問題.....	59
5.2.	ビーコンの間隔情報を利用した仮説数の削減方法.....	60
5.2.1.	ツインビーコンの設置.....	60
5.2.2.	ツインビーコンにおける仮説の生成過程.....	60
5.2.3.	ツインビーコンの間隔.....	61
5.2.4.	ツインビーコンによる仮説数の削減効果.....	63
5.2.5.	推定アルゴリズムにおけるビーコンの同時利用個数.....	64
5.3.	推定アルゴリズム.....	65
5.3.1.	状態ベクトルと仮説の表現.....	66
5.3.2.	推定フィルタの初期化.....	66
5.3.3.	推定フィルタの予測と更新.....	68
5.3.4.	仮説の絞り込み.....	70
5.3.5.	推定位置の出力.....	70
第6章	平常時と緊急時に利用する屋内位置情報システムに対する要求分析.....	71
6.1.	屋内位置情報システムの位置付け.....	72
6.2.	想定する災害の状況と屋内位置情報サービス.....	72
6.3.	屋内位置情報システムの要求分析.....	75
6.3.1.	ステークホルダ要求.....	75
6.3.2.	想定するユースケース.....	78
6.3.3.	システム要求.....	79
6.4.	屋内位置情報システムの設計.....	82
6.4.1.	システムの機能.....	82
6.4.2.	システムの構成.....	85
6.5.	サブシステムに対する要求.....	89
6.5.1.	屋内測位サブシステム.....	89

6.5.2.	屋内測位環境構築サブシステム.....	91
6.5.3.	提案手法に対する達成目標.....	92
第7章	提案手法の評価.....	93
7.1.	実験方法.....	94
7.1.1.	使用機器.....	94
7.1.2.	実験環境.....	95
7.1.3.	ビーコンの配置と送信信号強度設定.....	95
7.1.4.	電波伝搬モデルの決定のための予備実験.....	97
7.1.5.	位置推定実験.....	97
7.2.	実験結果.....	98
7.2.1.	予備実験結果.....	98
7.2.2.	位置推定実験結果.....	99
7.3.	検証.....	102
7.3.1.	ビーコン位置座標の推定.....	102
7.3.2.	観測者歩行軌跡の推定.....	107
7.3.3.	仮説数の時系列変化.....	109
7.3.4.	歩行観測者によるビーコン信号の遮蔽の影響.....	110
7.3.5.	距離マスクの効果.....	112
7.3.6.	推定アルゴリズムで利用するビーコン数の時系列変化.....	115
第8章	考察.....	117
8.1.	提案手法の有効性.....	118
8.1.1.	ビーコン信号の歩行観測の所用時間.....	118
8.1.2.	推定に必要な計算量.....	122
8.1.3.	事前の座標計測が不要な歩行経路.....	123
8.2.	提案手法により構築した屋内測位環境.....	123
8.2.1.	屋内測位を行った場合の測位精度.....	123
8.2.2.	緊急時における利用可能性.....	124
8.3.	今後の課題と展望.....	125
8.3.1.	推定中の計算負荷の制御.....	125
8.3.2.	電波伝搬モデルの決定方法.....	125
8.3.3.	異なるビーコン規格への応用.....	126
第9章	結論.....	127
	参考文献.....	130
	研究業績.....	137
	謝辞.....	138



## 図表目次

図 1-1	無線通信の電波信号を用いた屋内測位方式における機器構成のイメージ	3
図 1-2	本論文の構成	7
図 2-1	電子地図を用いた歩行者ナビゲーションのユーザインターフェース [18]	12
図 2-2	AR を用いた歩行者ナビゲーションのユーザインターフェース [19]	12
図 2-3	BLE ビーコンを用いた位置連動型情報配信のイメージ	14
図 2-4	屋内測位環境構築の作業進行イメージ	20
図 3-1	WSN におけるノード間の距離を用いたノード位置推定	30
図 3-2	検出時に推定される発信機の位置の確率密度分布	32
図 3-3	ランダムな値の位置座標を用いたビーコン位置の初期化	33
図 3-4	Delayed Initialization によるビーコン位置の初期化	34
図 3-5	2つの仮説を追跡する Delayed Initialization	35
図 3-6	混合ガウス分布を用いた Undelayed Initialization	37
図 3-7	ビーコン位置の仮説の追跡が進行する様子	38
図 3-8	混合ガウス分布による Undelayed Initialization	39
図 3-9	移動体の推定位置が不正確な場合の混合ガウス分布による初期化	41
図 4-1	見通し内の信号を受信しやすくするためのビーコン配置	45
図 4-2	見通し内信号の場合と遮蔽が発生する場合の電波伝搬モデルの比較	50
図 4-3	距離マスクの概念図	51
図 4-4	想定環境における観測データの収集	53
図 5-1	検出時のビーコンの推定位置の候補	57
図 5-2	複数仮説追跡を用いた Range-Only SLAM における移動体の軌跡推定	58
図 5-3	時刻ステップごとの各推定フィルタにおける演算の実行イメージ	59
図 5-4	1組のツインビーコンにおける仮説の生成	61
図 5-5	距離マスクの半径とツインビーコンの間隔の関係	62
図 5-6	弦と移動体の距離 $s$ とツインビーコンの間隔 $l$ の関係	63
図 5-7	生成される仮説数の比較	64
図 5-8	提案手法における推定処理のフローチャート	65
図 6-1	設備の損傷がなくても避難が必要な災害発生直後の状況	73
図 6-2	災害の時間的経過区分	74
図 6-3	屋内位置情報システムの構成	85
図 6-4	屋内位置情報システムの概要図	87
図 6-5	平常時・緊急時それぞれの場合におけるシステム概要図	88
図 7-1	実験に使用した機器	94
図 7-2	実験環境	95
図 7-3	実験環境のフロアマップ	96
図 7-4	ビーコンの設置方法	96

図 7-5	観測時のスマートフォン保持姿勢 .....	98
図 7-6	見通し内の信号による受信信号強度と距離の関係 .....	98
図 7-7	観測終了時点のビーコン位置の推定結果 .....	103
図 7-8	ビーコン推定位置の時系列誤差（ツインビーコン・複数仮説追跡） .....	104
図 7-9	ビーコン推定位置の時系列誤差（シングルビーコン・単一仮説） .....	104
図 7-10	ビーコン推定位置の時系列誤差（シングルビーコン・SOG-FastSLAM） ..	105
図 7-11	ビーコン推定位置の時系列誤差（シングルビーコン・FIS） .....	105
図 7-12	擬似観測データによるビーコン推定位置の時系列誤差（シングルビーコン・ 単一仮説） .....	107
図 7-13	観測者歩行軌跡の推定結果 .....	108
図 7-14	観測者歩行軌跡の時系列誤差 .....	108
図 7-15	仮説数の時系列変化 .....	109
図 7-16	スマートフォンを身体の前に保持した場合のビーコン位置の推定結果 ....	111
図 7-17	ビーコン位置座標の推定結果における距離マスクの有無の比較 .....	112
図 7-18	HDOP と VDOP 理論値の時系列変化 .....	114
図 7-19	各観測時刻において推定に利用したビーコンの数の時系列変化 .....	116
図 8-1	検討対象の屋内空間におけるアンカビーコンの配置 .....	119
表 2-1	屋内測位システムのライフサイクルの例 .....	16
表 2-2	日本最大の各屋内施設の広さ .....	17
表 2-3	各屋内測位方式の特徴 .....	24
表 4-1	ビーコンの位置座標を取得する方法の比較検討 .....	54
表 6-1	本章における用語の対応 .....	72
表 6-2	関係するステークホルダの分類 .....	75
表 6-3	平常時の利用場面におけるシステム要求 .....	79
表 6-4	避難誘導支援の利用場面におけるシステム要求 .....	80
表 6-5	屋内位置情報システムの機能 .....	83
表 6-6	屋内測位サブシステムに対する要求 .....	89
表 6-7	屋内測位環境構築サブシステムに対する要求 .....	91
表 7-1	提案手法の推定アルゴリズムで用いたパラメータ .....	99
表 7-2	歩行経路「ジグザグ」の場合の推定精度 .....	101
表 7-3	歩行経路「直線」の場合の推定精度 .....	101
表 7-4	各手法における観測開始から 90 秒後の時点のビーコン位置推定精度 .....	106
表 7-5	複数仮説追跡を用いた推定のシングルビーコンとツインビーコンの比較 ...	110
表 8-1	アンカビーコンの数の割合 .....	120
表 8-2	設置されたすべてのビーコンを用いた場合の測位誤差 .....	124

# 第1章 序論

---

屋内空間で位置情報を利用するためには、屋内測位システムを導入し利用可能な状態にする必要がある。無線通信の電波信号を用いた屋内測位は、広く普及が進んだスマートフォンで容易に利用することができるが、測位精度に影響を与える電波伝搬特性は空間の構成や物体配置に依存する。そこで、対象の領域全体で適切な測位精度を得るには、機器の設置や測定などの事前準備が必要となり、そのための時間と作業量が屋内測位環境の構築において問題となる。本研究では、人が利用する屋内空間全体で測位を利用可能にすることを目指し、屋内測位環境構築の効率化・迅速化を主題として扱う。高密度に設置した電波ビーコンを用いる屋内測位環境に着目すると、ビーコンの位置座標を短時間で容易に取得する方法の実現が課題となる。本章では、これに基づいて本研究の目的を述べる。

---

## 1. 1. 研究の背景

位置情報の利用は、情報通信機器の発達と世界的な測位衛星の拡充により、我々の生活の中に根付きつつある[1]。衛星測位が手軽に行えるようになったことで、カーナビゲーションシステムが広く普及し、このことは自動車による位置情報の利用を一般的なものにした。GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) の民生用の測位信号に対し、アメリカ合衆国は、それまで軍事上の理由で実施していた選択利用性 (Selective Availability: SA) を 2000 年 5 月に解除した[2]。これにより、民生用の GPS 受信機を用いたときに、保証されていた値で 100m であった測位精度が 10 m 程度で利用できるようになった。以降、GPS のほかにも GNSS (Global Navigation Satellite System: 全地球測位衛星システム) [2] の構築が進められており、欧州宇宙機関の Galileo、ロシア連邦の GLONASS、中華人民共和国の北斗衛星測位システム (BeiDou)、日本の準天頂衛星システム (Quasi Zenith Satellite System: QZSS) などが運用されている。複数の GNSS の測位信号を同一の受信機上で受信することで、測位に利用する衛星の数が増加し、GPS の衛星のみを用いる場合よりも高い測位精度を得ることが容易になる。さらに、2008 年 8 月に米国 Apple 社が GPS 受信機を搭載した iPhone® の発売を開始した。以降 2010 年代に普及が進んだスマートフォンでは、GNSS 受信機を標準的に搭載している。それにともない、地図を用いた経路案内や交通機関の乗換案内のアプリケーションが登場し、歩行者の移動の場面で利用されている。位置情報の利用は、交通のための車両から個人へと普及の対象を拡大することで、経済発展と社会課題の解決の双方に対しての貢献が期待されている[3]。

歩行者の活動領域は屋外と屋内のそれぞれに及ぶ中、屋外においてはこのように衛星測位によって容易に位置情報を利用することができる。これに対し屋内では衛星測位を活用することができない[4]。屋内空間では測位衛星の電波信号が減衰によって微弱になり、十分な測位精度が得られないためである。したがって、屋内空間で位置情報を利用するためには、GNSS に代わる屋内測位システムを導入することが必要になるが、その整備は発展の途上にある。屋内測位にはさまざまな方式が提案されているが[5]、方式ごとに長所と短所の違いがあり、現時点ではあらゆる場所や状況に対して一つの手法で屋内測位を行うことはできるまでには至っていない。どの程度のコストを掛けることが許されているか、要求される測位精度はどれくらいか、用いる機器が市場で容易に調達できるか、対象の屋内空間に必要な機器が設置できるか否か、屋内空間に既にある設備を活用できるか否か、といった要因で、置かれた状況に適した測位方式が変わってくるためである。そこで、複数の測位方式の結果を切り替えるか、複数の種類のセンサから得た情報を融合させる、ハイブリッド測位の手法も考えられている。したがって、現状で実現可能な方法で、屋内測位を人が活動する屋内空間全体で利用可能にするためには、場所と状況に応じて適材適所の屋内測位方式を導入することが現実的になる。

広く普及が進んだ携帯情報端末であるスマートフォンを対象にして屋内測位を行う場合、Wi-Fi や Bluetooth Low Energy がスマートフォンで標準的に対応されているため、これらの無線通信方式の電波信号の受信信号強度（Received Signal Strength: RSS）を利用する屋内測位方式（図 1-1）[6],[7]は、多くの機種を利用対象にすることができる。受信信号強度を用いた位置指紋方式（Fingerprinting）は、事前に測位対象空間の各地点で位置指紋を観測して作成した電波環境マップを用いて、端末が観測した無線信号と類似する位置指紋を持つ地点の位置座標をもとにして測位結果を得る方式であり、さかんに研究されている[6]。電波の反射、干渉や遮蔽の影響は、位置指紋と測位時の無線信号の観測結果の双方に含まれているため、測位結果において相殺される傾向となる。そこで、高い品質の電波環境マップが用意されていれば、測位精度はこれらの影響を受けにくい。このように有益な特徴を持つ位置指紋方式ではあるが、屋内空間全体に測位環境を構築することを目指す場合には、位置指紋方式の特徴は利点ばかりではない。電波環境マップの作成作業は、時間と作業量の負担が大きいため、屋内測位環境の遍在化を進める上では作業期間と工数の確保が問題となる。また、位置指紋は電波の反射、干渉や遮蔽の影響を受けたものであるため、電波環境マップは空間の構成や物体配置、および用いる無線信号の発信機の位置に依存することになる。そこで、屋内空間の形状の変更や、発信機の移動にもなって、既存の電波環境マップが実際の屋内環境と一致なくなり、測位精度の低下がもたらされる。したがって、電波環境マップの更新のために定期的に位置指紋の観測作業が発生し、このために必要な時間と作業量の問題も解決する必要がある。

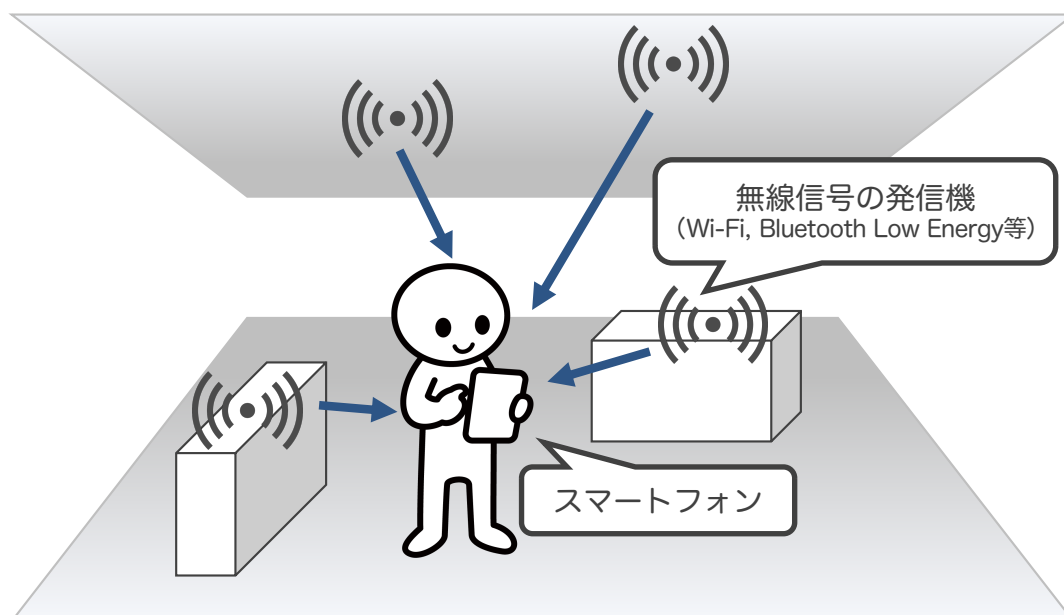


図 1-1 無線通信の電波信号を用いた屋内測位方式における機器構成のイメージ

一方、無線通信に用いられる電波信号の発信機をビーコン（無線標識）として利用し、高密度に発信機を設置すると、実用的な誤差性能（数 m 以内）が達成できることが確かめられている[7]。ここでさらに設置された発信機の位置座標の情報があれば、無線信号の受信信号強度を用いて三点測位方式（Trilateration）や近接検知方式（Proximity）などの屋内測位手法[5]によってスマートフォンの測位を行うことができる。これにより、電波環境マップの作成作業を不要とすることができる。また、それにもかかわらず、測位精度の面で位置指紋方式に劣らない屋内測位環境が実現できると考えられる。しかしこの場合は、屋内測位環境の構築において、多数の発信機を設置し、さらにその位置座標を取得するための作業が必要になる。測定の技法を用いれば発信機の位置座標を十分な正確さで測定することは可能である。しかしこの方法では、専用の測定機器を必要とする上に、相応の時間と作業量を要することになる[8]。測定する発信機の数減らすことで必要な時間と作業量は削減されるが、発信機の配置を疎にすることは測位精度劣化の要因になる。発信機の配置密度を高く保つことで測位精度の維持が可能になるため、発信機の位置座標を取得する作業の効率化が求められる。また、電波の反射、干渉や遮蔽によって測位精度が受ける影響を少なくするため、空間構成に適した配置で発信機を設置する必要がある。そこで、新しくレイアウトを設営した屋内空間に対しては、発信機の位置座標の取得は必須の作業となる。したがって、発信機の位置座標を短時間で容易に取得するための方法を実現することが課題となる。

## 1.2. 研究の目的

本研究の目的は、屋内測位に用いるために高密度に設置した電波ビーコンの位置座標を取得する効率的な手法を確立し、その有効性を示すことである。そのために、本研究では自己位置と環境地図の同時推定 (Simultaneous Localization And Mapping: SLAM) [9]の手法に着目する。スマートフォンを所持した人物が現場の屋内空間を歩行しながら無線信号を観測し、取得した距離の情報を用いる SLAM によりビーコンの位置座標を推定することで、作業を容易に実施できるようにする。この過程において必要になる時間と作業量を減らすために、次の3点の実現を本研究の目標とする。

- (1) 設置したビーコンの位置座標をすみやかに取得するために、位置推定に必要な無線信号の歩行観測を短時間で完了させることができる。
- (2) 位置推定の進行状況を、リアルタイムに表示し歩行観測者が確認できるようにするために、推定に必要な計算処理の負荷を少なくする。
- (3) 歩行経路の計画を通路単位で指定し、歩行観測者は計画した通路内を自由に歩くことができる。事前に歩行経路の座標計測をする必要がない。

観測情報が送受信機間の距離に相関がある受信信号強度であるとき、受信機に対するビーコンの方向の情報が観測情報に含まれていないため、ビーコンを新しく検出した段階ではビーコン位置座標の正確な初期値を得ることができない[10]。そこで、単一の推定フィルタによる SLAM では、十分なビーコンの位置推定精度に達するまでに長い観測時間を必要とする問題がある。ここで、観測した距離からスマートフォンの移動軌跡を推定することを考えると、移動軌跡の推定に自律航法などの他の手段を用いる必要がなくなり手法を簡素化できる反面、ビーコン位置推定に必要な観測時間はより短縮されにくくなる。

そこで本研究では、観測した距離からスマートフォンの移動軌跡を推定しつつ、ビーコンの位置推定誤差が小さい値に収束するまでの観測時間を短縮するとともに、必要になる計算量を軽量化できる方法を明らかにし、そのためのアルゴリズムを備えた距離情報のみを用いた SLAM によるビーコン位置推定手法を提案する。屋内空間に試験環境を構築し、ビーコンとスマートフォンの実機を用いた実験を行い提案手法を評価する。

### 1.3. 論文の構成

第1章ではここまで本研究の背景および目的について述べた。本節で図 1-2 に示す本論文の構成を述べる。

第2章では、屋内測位環境の構築の迅速化に取り組む必要性について述べる。また、各屋内測位方式の分析とともにビーコンの位置座標を用いた屋内測位方式の特徴を示し、本論文で取り組む研究課題について説明する。

第3章では、ビーコンを含む無線信号の発信機を対象とした、その位置座標を取得する手段という観点から、関連研究を概観した上で、無線信号から取得した距離情報を用いる（方向情報を用いない）SLAMを取り上げて分析し、残された課題を明らかにする。

第4章では、高密度にビーコンを配置した屋内測位環境を構築する方法を設計する。まず、本研究の想定環境およびビーコンの設置方法を示し、次に、想定環境を実現する具体的な手段となるビーコンの製品規格を選定する。さらに、ビーコン位置推定に用いる受信信号強度の情報を取得するための、移動するスマートフォンによるビーコン信号の観測方法について述べる。

第5章では、第4章で示す屋内測位環境の構築において用いるビーコン位置推定手法を提案する。提案手法では、第3章で明らかにされた課題に取り組み、距離情報のみを用いたSLAMにおいて、短時間の観測で位置推定結果を得ることができるアルゴリズムを実現する。提案手法の新規性は、複数仮説追跡を用いて推定に必要な観測時間の高速化を実現し、さらにビーコン間隔情報を用いて計算負荷の軽量化を実現したことである。

第6章では、第4章で示す屋内測位環境における、緊急時の避難支援の実現可能性を分析する。位置に基づいた情報伝達による緊急時の避難誘導を支援するための要求を分析し、平常時と緊急避難時で共通利用するスマートフォンを主な測位の対象とした屋内位置情報システムの概念設計を行う。設計結果に基づいて、位置推定に必要なビーコン信号測定の所要時間に対する達成目標を示す。

第7章では、第5章で示す提案手法の評価について述べる。実際の屋内空間にビーコンを設置して実験環境を構築し、スマートフォンの実機を用いて実験を行い、ビーコン位置推定精度をはじめとした提案手法が示す特性を検証する。

第8章において提案手法に関する考察を述べ、最後に第9章で本論文の結論を述べる。





- 
- ① Sato A, Nakajima M, Kohtake N (2019) Concept Design of Seamless Location Based Emergency Warning System with GNSS-Based Signals. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Volume 17, Issue 3, Pages 344-349. doi: 10.2322/tastj.17.344
- ② 佐藤 章博, 中島 円, 神武 直彦 (2021): スマートフォンを持つ歩行観測者によるRange-Only SLAMを用いたBLEビーコン位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 62, No. 1
- ③ Sato A, Nakajima M, Kohtake N (2015) Design of an IMES-Based Seamless Early Warning System with Signals from QZSS and a Disaster Prevention Center, International Symposium on GNSS (IS-GNSS), Pages 435-436.
- ④ Sato A, Nakajima M, Kohtake N (2019) Rapid BLE Beacon Localization with Range-Only EKF-SLAM Using Beacon Interval Constraint, 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Pages 1-8. doi: 10.1109/IPIN.2019.8911778
- 

図 1-2 本論文の構成



## 第2章 研究課題

---

本章では、まず 2.1 節で、屋内位置情報サービスの普及促進に関するこれまでの動向を紹介する。次に、2.2 節では、屋内測位環境の遍在化に向けた課題に焦点を当てる。屋内測位環境構築の効率化に関して、従来の手法では作業期間より作業量の負担軽減に焦点が当てられ、必要な期間の短縮に対しては力を注がれていなかった。利用目的の変更に対応するために空間構成が可変の屋内領域では、測位環境の再構築の頻度が高まるために、すみやかに構築できることが特に必要となる。続いて 2.3 節では、迅速な屋内測位環境の構築を実現するために、現在の主流の屋内測位方式を分析する。その結果として、本研究ではビーコンの位置座標を用いた屋内測位方式に着目する。空間構成の変化に対して迅速に適応する、高密度にビーコンを配置した屋内測位環境を実現することを目指し、本研究で取り組む課題を整理する。

---

## 2.1. 屋内位置情報サービスの動向

位置情報サービスとは、情報を提供するサービスのうち、データとそのもととなる行動や現象が起きた実際の位置を結びつけた情報を提供するサービス全般を指す用語である。対象となるサービスは、現状においても、経路案内やナビゲーション[11]をはじめとして、物流における荷物追跡[12]、天気情報の提供[13]、見守りサービス[14], [15]、位置情報ゲーム[16], [17]などを含んだ、さまざまな事例がある。また、少子高齢化の進展に伴う人手不足を補うための、各産業分野における業務改善、生産性向上のニーズや、主に交通、観光、高齢者・障害者支援、防災などの分野における、安全で快適な個人の生活のためのより高度なサービスのニーズがあり、今後、位置情報サービスが飛躍的に発展することで社会に革新をもたらす可能性がある。

屋内における位置情報サービスの目的には、歩行者ナビゲーション[18], [19]、位置に連動したプッシュ型の情報配信[20]、屋内空間における人流解析[21]や動線分析[22]などが主に考えられている。本節では、屋内を対象としたリアルタイムな位置情報を利用する代表的なサービスとして、歩行者ナビゲーション、位置連動型情報配信の2つを取り上げ、これまでの普及促進の動向を概観する。

### 2.1.1. 歩行者ナビゲーション

我が国では2007年に地理空間情報活用推進基本法が成立し、位置情報サービスの共通基盤となる屋内空間の測位環境および電子地図の整備に向けた技術開発[23]や、屋内外シームレス測位環境を構築した実証[24]などの取り組みが、地理空間情報の活用推進のための施策として進められている。2017年に閣議決定された第3期地理空間情報活用推進基本計画[3]は、情報通信技術（Information and Communication Technology: ICT）によって実現される仮想空間と、現実世界を高度に融合させることで、経済発展と社会的課題の解決を両立させたイノベーションを目指す、「Society 5.0」の推進を見据え、訪日外国人に対するサービスや、高齢者・障害者の支援のみならず、災害発生時の避難支援や情報提供といった防災・減災対策をも意識したものとなっている。その中で、目指すべき姿の一つとして「いつでもどこでも誰でも簡単に位置・場所がわかる」環境により、屋内外をシームレスに行きたい場所へ円滑に移動できるようにすることが掲げられ、その実現により市民の豊かな暮らしの実現に貢献することが期待されている。

商業施設や交通結節点となるターミナル駅などの、公共性が高く、大規模で複雑な構造を持つ屋内空間には、多様な人々が集まる。海外から来日した旅行者は、移動に不慣れな場所で、観光の目的地もしくは宿泊場所への行き方や、交通機関の乗り継ぎのための経路を知る必要がある。そのため、旅行者が理解できる言語による経路案内サービスの実現が望まれて

いる。車椅子で移動する人や、ベビーカーを使う親子連れに対しては、段差が少ない経路を移動したり、エレベータを使って上下階へ移動したりできるように、一般とは異なる経路を案内する必要がある。

歩行者ナビゲーションは、これらの例に挙げたような状況を想定して、歩行者に対する移動の支援という目的で提供される位置情報サービスである。歩行者ナビゲーションでは、利用者が所持する携帯情報端末を用いて、現在の位置や周囲の施設の情報、目的地までの経路案内を利用者に伝達する。移動の支援に必要な内容は使う人によってさまざまであるため、歩行者ナビゲーションは多様な目的に対応することが求められ、情報通信技術を駆使することによってはじめてその実現が可能になる。

歩行者ナビゲーションでは、出発地から目的地までの経路の提示だけでなく、その経路における現在の位置を示して利用者を案内する。したがって、携帯情報端末はリアルタイムに現在の位置の情報を取得する必要がある。屋内で歩行者ナビゲーションを実現するためには屋内測位環境の整備が重要な要素となる。

携帯情報端末として、利用者が多く入手が容易なスマートフォンを用いることにより、多くの人が歩行者ナビゲーションを利用できるようになる。また、GNSSと屋内測位システムの双方を利用して、屋内と屋外を相互に移動した場合にシームレスに歩行者ナビゲーションを行うことができる。スマートフォンを用いた屋内歩行者ナビゲーションの取り組みには、東京駅周辺などを対象に実施された「ジャパンスマートナビ」の実証実験[25]や、成田国際空港ターミナルで提供されたサービスの「NariNAVI」[18]の事例がある。歩行者ナビゲーションのユーザインタフェースは、図 2-1 のように、屋内環境の電子地図を端末上に表示し、さらに端末の現在の位置を地図上に表示する方法が典型的であるが、図 2-2 のように拡張現実 (Augmented Reality: AR) を用いて進行方向を画面に表示する方法[19]や、音声ガイダンスを用いた方法[26]も存在する。しかし、いずれの方法においても、リアルタイムな屋内測位が重要な位置付けとなる、ということについては共通である。



(a) 現在地表示

(b) 地図による経路案内表示

図 2-1 電子地図を用いた歩行者ナビゲーションのユーザーインターフェース [18]

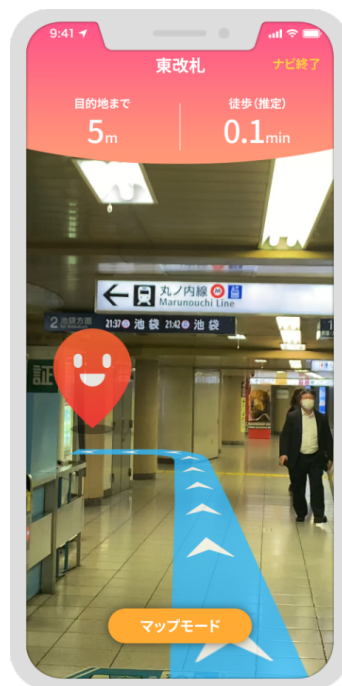


図 2-2 AR を用いた歩行者ナビゲーションのユーザーインターフェース [19]

## 2.1.2. 位置連動型情報配信

位置連動型情報配信は、利用者が移動した地点に関連する情報を、その場で自動的に携帯情報端末に表示するプッシュ型の情報配信である。広告配信を利用した O2O (Online to Offline) マーケティング<sup>1</sup>や、店舗の会員サービスアプリケーションを介したクーポンや来店ポイントの付与[20]、展示施設における展示物の解説[27], [28]などの位置情報サービスに応用されている。現在地と結びついた情報を、能動的な操作を必要とせずに自動表示することを価値につなげるサービスであるが、そのためには携帯情報端末でリアルタイムに位置情報を取得することが必須になる。

2013年に米国 Apple 社が iBeacon®[29]を発表したことは、位置連動型の情報配信を用いたサービスが注目される 1 つの大きなきっかけとなった。iBeacon とは、Bluetooth Low Energy (BLE) [30]を用いたビーコンの一種である。BLE は、近距離無線通信規格である Bluetooth に対し、Bluetooth 4.0 のバージョンにて追加された拡張仕様であり、通信の低消費電力化がなされている。BLE ビーコンは、BLE を用いた主要な製品の 1 つとなっている。

Bluetooth[31]は、スマートフォンと、スピーカー、ヘッドフォン、キーボードやウェアラブル端末などの周辺機器との通信という用途で消費者の支持を受けており、スマートフォンで標準的に対応されている。また、Bluetooth 対応のスマートフォンを BLE にも対応させることは容易である。したがって、広く流通している機種スマートフォンでは基本的に BLE ビーコンを利用することができる。そのほかにも、BLE ビーコンについては次のような特徴を挙げることができる。

- 屋内で位置情報を利用するための機器として、低価格帯の製品が多く流通している。
- 低消費電力なため、内蔵電池で数ヶ月以上駆動可能である。
- 内蔵電池を用いることで、電源のための配線を不要にすることができる。
- パッケージの小型化が可能である。

---

<sup>1</sup> インターネット上での情報発信 (オンライン) によって、実店舗での顧客の集客・購買 (オフライン) を促すマーケティング手法のこと。

BLE ビーコンを用いた位置連動型の情報配信の事例として、東京国立博物館の公式ガイドアプリケーション「トーハクなび」を用いた展示物解説サービス[28]がある。アプリケーションを利用中のスマートフォンが展示物の近くまで移動すると、BLE ビーコンに接近したことをアプリケーションが検知し、それに連動して展示物を解説するムービーが自動再生されることで、博物館における展示物の解説機能が提供されている。

同様の仕組みを用いたサービスは、他のさまざまな場面を対象に応用することが可能である。図 2-3 に示すように、POI (Point Of Interest: 興味のある特定の場所) の近くに BLE ビーコンを設置し、BLE ビーコンへの接近をスマートフォンが検知することで POI に関する情報を表示するが、表示する情報コンテンツは一般的には外部のサーバからインターネットを経由して提供される。

位置連動型情報配信そのものは、GNSS や屋内測位システムから携帯情報端末が取得した位置座標を利用するなど、BLE ビーコン以外の方法によっても実現可能である。一方で、BLE ビーコンの識別情報と直接結びつけた情報コンテンツを用意して、BLE ビーコンへの接近の検知を情報配信に利用する場合には、BLE ビーコンの設置場所の位置座標は必ずしも必要としない。また、BLE ビーコンが安価で小型なことにより、位置連動型の情報配信の導入が容易になることも、BLE ビーコンを用いる大きな利点の 1 つである。

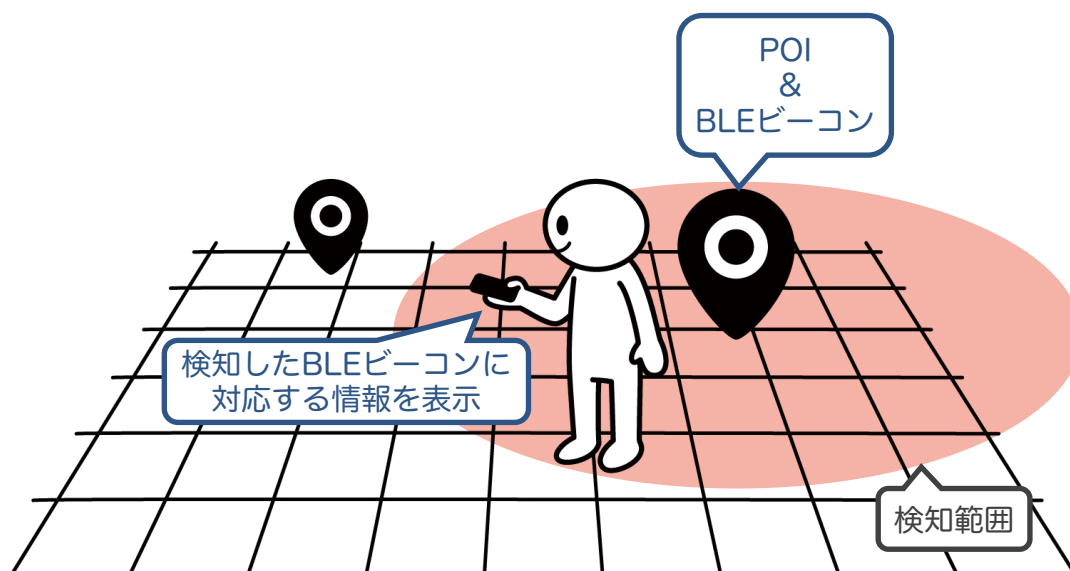


図 2-3 BLE ビーコンを用いた位置連動型情報配信のイメージ



## 2.2. 屋内測位環境の遍在化に向けた課題

### 2.2.1. 屋内測位を利用するための事前準備

前節で述べたように、屋内位置情報サービスの展開のためには、リアルタイムな屋内測位機能を提供できる環境の整備が必要不可欠である。屋内測位システムに用いる測位方式の選定において、システムのライフサイクル全体を見渡した上で要求分析を行い、その観点から屋内測位方式を比較検討した上で採用することは、屋内測位システムの目的の達成のために重要である[32]。個人用途の位置情報サービスに用いることを想定した屋内測位システムにおいて、各作業項目を主に表 2-1 に示すステージで実施するようなライフサイクルを定義したとする。屋内測位システムにおける「生産ステージ」は、実際の屋内空間に屋内測位システムを実装するためのステージとなる。現場に屋内測位環境を構築し、屋内測位システムとして利用可能な状態にするまでの一連の作業として、測位に用いる機器の設置・移動、機器の位置座標の取得や環境モデリングのための測定、そのほかの測位における設定パラメータの取得・調整などが、選択された屋内測位方式に応じて実施される。屋内測位を利用するための事前準備となるこれらの作業に要する時間は、屋内空間の利用開始を早めるためになるべく短くできることが望ましい。また、必要な作業量を少なくするために作業は容易に実施できることが求められる。

### 2.2.2. 屋内測位環境構築の効率化における従来の取り組み

#### 2.2.2.1. 位置指紋方式における屋内測位環境構築

位置指紋方式を用いた屋内測位は、位置指紋が空間に配置された物体の影響を受けることを逆手に取り、それぞれの位置指紋ごとに各地点との関連性が高いことによって、良好な測位精度を得やすい特徴がある。また、電波環境マップを用いた測位の演算において、発信機の位置座標を必要としない。そこで、屋内空間に通信設備として既に設置されている Wi-Fi 基地局の無線信号を利用して電波環境マップを作成できることから、位置指紋方式は注目を集めている。スマートフォンで利用できる屋内測位システムを位置指紋方式により構築する取り組みが、大規模商業施設[33]や空港[34]などを対象に行われている。位置指紋方式の屋内測位には、電波環境マップの作成のために空間の各所で無線信号の受信信号強度を観測し位置指紋を取得する作業（サイトサーベイ）を行うオフラインフェーズと、測位対象の端末が観測した受信信号強度から電波環境マップを用いて測位を行うオンラインフェーズの二段階の過程がある。多くの場合で、電波環境マップのデータ管理や測位演算機能をサーバに実装する構成がとられており、この場合はリアルタイムに測位結果を得るために、オンラインフェーズにおいて測位対象の端末とサーバとの間の通信機能が必要となる。

表 2-1 屋内測位システムのライフサイクルの例

ステージ	主な作業項目 (測位方式に応じて必要な項目を選択する)
コンセプト ステージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ステークホルダの特定・ステークホルダ要求の定義</li> <li>• 屋内測位対象領域の決定</li> <li>• 対象とする位置情報サービスの決定</li> <li>• 目標測位精度の設定</li> <li>• 測位方式の選定</li> <li>• コスト・スケジュールの見積もり</li> </ul>
開発 ステージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• システム要求の定義</li> <li>• 測位機能の詳細設計・測位演算モジュールの開発</li> <li>• 測位に利用する機器の開発・製品の選定</li> <li>• 試作による測位精度の評価</li> <li>• 機器設置計画の策定</li> <li>• サポート計画の策定</li> </ul>
生産 ステージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 現場で利用する機器の調達</li> <li>• 現場への機器の設置・移動</li> <li>• 設置した機器の位置座標の取得 / 環境モデリング用の計測</li> <li>• 設定パラメータの取得・調整</li> <li>• 測位に用いるサーバの設定</li> <li>• 現場での測位精度の評価</li> </ul>
利用 ステージ ・ サポート ステージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 測位対象端末へのアプリケーションのインストール</li> <li>• 利用中の測位機能の性能モニタリング</li> <li>• 設置した機器の動作モニタリング</li> <li>• 機器のメンテナンス・故障した機器の交換</li> <li>• 機器の設定の再調整</li> </ul>
廃棄 ステージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置した機器の撤去・回収</li> <li>• サーバに登録した情報の削除</li> <li>• 測位対象端末からのアプリケーションのアンインストール</li> </ul>

\* 各ステージは必ずしも順序に従って時系列で実行されるとは限らない。また、前のステージに戻り、ステージが反復される可能性がある。

屋内測位システムのライフサイクルにおいて、オフラインフェーズは生産ステージもしくはサポートステージで、オンラインフェーズは利用ステージで実行されることになる。電波環境マップの作成やメンテナンスのためのサイトサーベイの作業は、時間と作業量の負担が大きく、屋内測位システムの導入やメンテナンスの実施の妨げとなりうるものである。位置指紋方式の屋内測位環境を大規模商業施設に導入した事例[33]では、45万m<sup>2</sup>の領域に対するサイトサーベイに、15人掛かりの作業で2週間を費やしている。なお、この広さは東京ドーム9.6個分に相当する。

ここで、日本全体における大規模な屋内施設の総面積をみていくと、地下街は合計で119.1万m<sup>2</sup>の延床面積がある[35]。展示会場は合計36.6万m<sup>2</sup>の延床面積があり[36]、複合的な商業施設であるショッピングセンターは店舗面積に限っても合計5399.0万m<sup>2</sup>の広さがある[37]。また、それぞれに対する日本最大の施設の一覧を示す。これらのすべてに対して屋内位置情報サービスを展開するためには、非常に大掛かりなサイトサーベイの作業を必要とすることになるのがわかる。

表 2-2 日本最大の各屋内施設の広さ

	施設名	広さ	
地下街	クリスタ長堀*	81,765m <sup>2</sup>	8,653 m <sup>2</sup>
	(大阪府大阪市中央区)	(延床面積) [38]	(店舗面積) [37]
展示会場	東京ビッグサイト	115,420 m <sup>2</sup>	
	(東京都江東区)	(総展示面積) [39]	
ショッピングセンター	イオンレイクタウン	約 364,000 m <sup>2</sup>	160,000 m <sup>2</sup>
	(埼玉県越谷市)	(延床面積) [40]	(店舗面積) [37]

\*単体の地下街として日本最大。地下通路により複数の地下街が連結されていて、その合計の広さが上回る事例は存在する。

#### 2.2.2.2. 電波環境マップ作成の効率化アプローチ

サイトサーベイの作業を効率化するために、屋内空間を利用している間に位置指紋の収集を行うアプローチは、クラウドソーシング (Crowdsourcing) と呼ばれており、研究が進められている。屋内空間の利用者が携帯する端末がバックグラウンドで受信した無線信号の情報をを用いて、端末所有者の協力を得ることを前提に複数の端末から位置指紋を収集し、電波環境マップを作成する手法である。しかし、収集する位置指紋の観測データを多くすることで電波環境マップの品質を高めやすい傾向にあることは、手作業によるサイトサーベイと変わらない。Raiらの研究[41]の事例では、65m×40mの屋内空間に対する電波環境マップの作成のために15時間の観測データを用いている。Jungらの研究[42]では、大規模商業

施設や地下鉄の駅などの事例が取り上げられており、データ収集の期間は1日～3週間とさまざまな場合が示されている。これらをまとめると、標準的なサイトサーベイは、短い場合でも1日がかりの工程として見積もられている。電波環境マップ作成の効率化に対してクラウドソーシングがもたらす便益としては、サイトサーベイの作業に専用の工数をかける必要がなくなることが重要であるが、電波環境マップの完成のためには、依然として相応の期間を要することになる。

### 2.2.2.3. 位置指紋方式が不得意とする屋内空間

ここまで述べてきた特徴から、位置指紋方式は、次のような屋内空間に対しては不利になるといえる。

#### Wi-Fi 基地局の設置密度が低い領域

測位精度の面では、無線信号を複数の基地局から受信できるほうが有利である。しかし、Wi-Fi 基地局のような通信用の基地局は、少ない数で効率よく通信サービスを提供できるようにすることを考え、電波が届く範囲の重なりを少なくするように配置されることが求められる。したがってこれらの基地局は、必ずしも屋内測位のために適した配置がされているとは限らない[7]。また、通信の需要が多い領域に優先して基地局を配置する傾向が発生するのは自然な流れである。

そのため、既に屋内空間に設置されている基地局だけを用いる条件では、基地局の配置が適切ではないため、あるいは基地局の数が不足するために、必要な測位精度を達成することが困難な場合がある。また、もともと Wi-Fi 基地局がほとんど設置されていない屋内空間に対しては、そのままの状態では位置指紋方式による屋内測位環境を展開することができないため、無線信号の発信機を新たに設置する必要がある。

#### 屋内空間の利用者がいる間は常に屋内測位機能を提供する必要のある領域

位置指紋方式では、電波環境マップが未作成、あるいは品質の低下により測位精度が仕様以下まで劣化しメンテナンスが必要な場合に対しては、サイトサーベイを含めた屋内測位を利用するための準備が完了するまでの一定の期間において、所要の測位精度を満たした測位機能が提供できないことになる。特に、クラウドソーシングにより電波環境マップの作成やメンテナンスを行う場合は、屋内空間の利用者が活動することによってサイトサーベイが進行する。すなわち、屋内測位が利用できない状態の間にも、屋内空間の利用者が活動することになるのは明白である。

そこで、屋内空間の利用者が滞在中、常に屋内測位を提供する必要のある場合に対しては、屋内測位環境をクラウドソーシングにより構築することは適切ではない。したがって、測位手法の選定において位置指紋方式は不利になる。

## 2.2.3. 迅速な屋内測位環境構築の必要性

### 2.2.3.1. 空間構成が可変の屋内領域

屋内空間の利用形態の中で、空間の利用目的を変更する場合に対応するために、空間の構成や物体配置を頻繁に更新することを前提とした使い方がある。一時的に形成されている空間構成に対しては、レイアウトの空間的な位置関係について予備知識を得ることが難しくなり、来訪者にとっては目新しい場所となる。したがって、定常的な空間構成を持つ屋内空間の場合よりも、位置情報サービスが利便性を発揮する機会が多いと考えられる。具体的には、次のような場合が該当する。

#### 多目的に利用することを前提とした屋内空間

展示会や博覧会、ワークショップなどを開催するイベント会場などでは、空間を利用する目的に合わせてレイアウトを変更することを想定している。そこで、柱や間仕切りなどの少ない開放的な屋内空間を用意したうえで、目的に応じた空間構成となるように移動可能な物体を配置することが一般的である。会場の規模は、壁のないオープンな空間や、会議室、講演会場などのフロア内の一区画である場合から、博物館の特設展示用に用意された階のようにフロア全体を占めている場合、国際展示場のような建築物の大部分が該当する場合まで大小さまざまである。

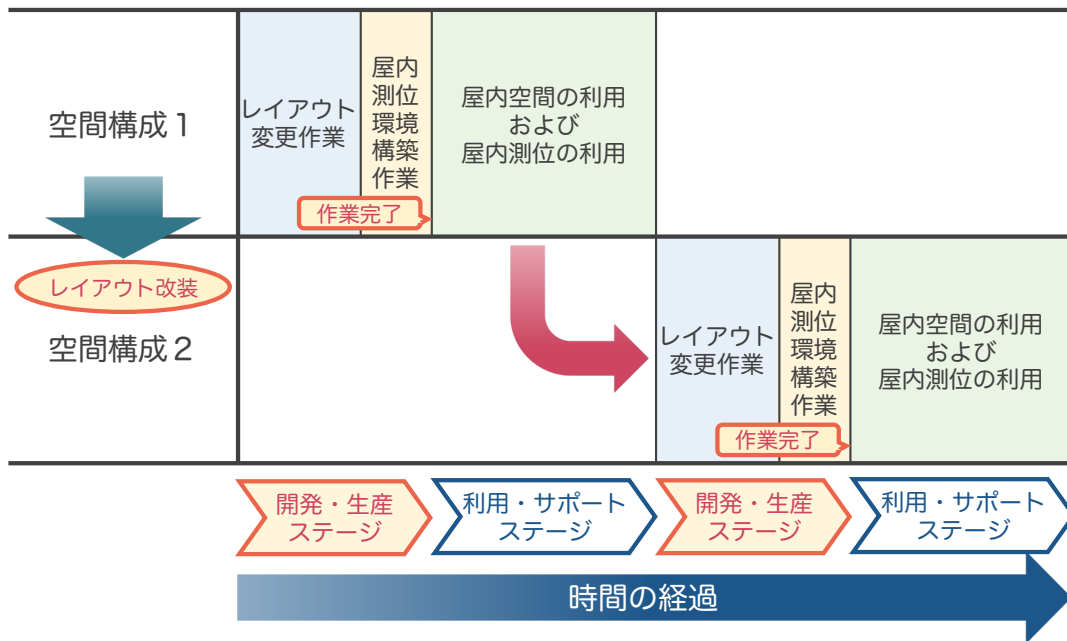
#### 工事実施中の区画の仮設通路

大都市のターミナル駅では、一部の区画で改修工事を実施している光景がみられることが少なからずある。そのような工事実施中の区画では、継続して人の動線を確保する必要性から、通路が仮設される場合がある。このときには、一時的に建築物の設計とは異なる形状の通路が屋内空間に存在することになる。

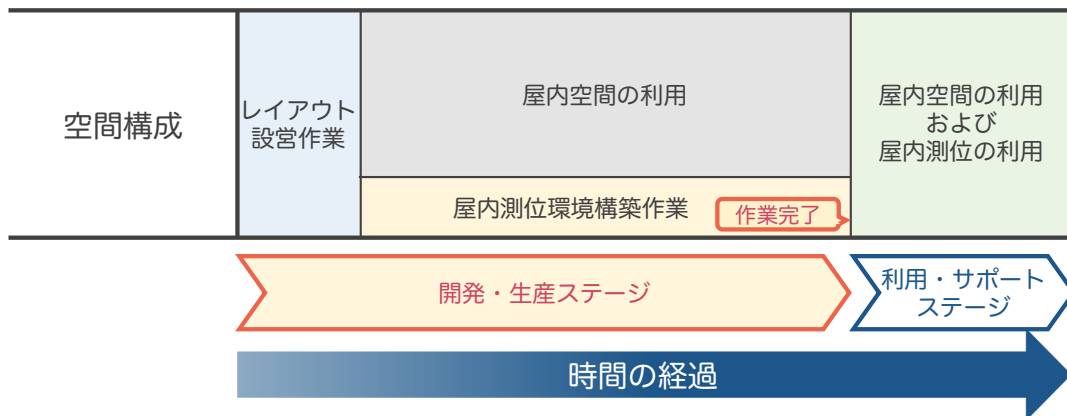
しかし、屋内測位に無線通信の電波信号を利用する場合、このような屋内空間では、屋内測位を利用するための準備作業も頻繁に発生することになる。電波信号を利用した屋内測位の精度は電波伝搬特性の影響を受けるが、屋内空間では、床・天井・内壁・屋内に配置された物体の素材やそれらによって構成される空間の形状、無線信号の発信機の配置によって、電波の反射、干渉、遮蔽の生じ方が変化するため、電波伝搬特性は空間にある物体とその配置に依存することになる。したがって屋内空間の形状や物体配置を大きく変更することで、複雑な空間の構成が新たに形成された場合には、屋内測位システムの測位精度は多くの場合で劣化することになる。その場合には、屋内測位システムを空間構成に適応させるためのメンテナンス作業が必要となるが、測位精度の劣化が激しい場合には、表 2-1 の「開発ステージ」や「生産ステージ」で実施されるのと本質的に変わらない作業の内容が要求されることになり、実質的な屋内測位環境の再構築になる。

2.2.3.2. 屋内空間の利用の開始と同時に屋内測位を利用する場合

空間構成が可変の屋内領域において、例えばイベントを開催しその中で位置情報サービスを提供する場合を想定すると、屋内空間の利用を開始する時点で屋内測位が利用可能である必要がある。このとき空間構成を変更することによって必要になる作業の進行は、図2-4(a)に示す流れとなる。



(a) 空間構成が可変の屋内領域に対して求められる作業進行



(b) クラウドソーシングにより電波環境マップを作成する場合

図 2-4 屋内測位環境構築の作業進行イメージ

この場合では、屋内空間の利用をいったん停止してレイアウト変更作業を行う段階で、その間に屋内測位利用のための事前準備を実施の上、屋内空間の利用再開前に作業を完了させることが求められる。さらに、空間利用の時間効率を高めるため、毎回の屋内測位環境の構築は、短時間かつ少ない作業量で実施する必要がある。そこで、クラウドソーシングにより構築する位置指紋方式の屋内測位環境では、図 2-4(b)に示すような作業の流れとなり、屋内測位は空間の利用開始時点では利用できない。イベント期間が数日程度ならば間に合わない可能性もある。屋内空間の形状が定常的な領域の場合であれば、測位性能の継時変化が許容範囲におさまる期間は数ヶ月といった単位で考えられ[43]、また屋内測位を使いながらクラウドソーシングでメンテナンスを行い測位性能を維持できるため、屋内空間の利用開始前に時間をかけて屋内測位環境の構築を行う選択も現実的なものとして受け止められている。しかし、空間構成を頻繁に更新する領域において、屋内空間の利用の開始と同時に位置情報サービスを提供することを想定すると、迅速な屋内測位環境構築の手段を実現することが課題になるといえる。

#### 2.2.4. ユビキタスな屋内測位環境を構築する意義

情報通信技術の発達とともに、これまで屋内測位に関して多くの取り組みがなされてきたが、屋内測位環境の遍在化はいまだ達成されていない。本節では屋内測位環境の遍在化を目指す意義について述べる。2.1.1 項で述べたように、地震や火災などの大規模な災害が発生した場合を想定し、位置情報により避難行動を支援して、円滑な避難の実現に貢献することが期待されている。災害情報の伝達による災害対策で起点となるのは、被害を受ける可能性のあるすべての人に向けて災害情報を伝達し、適切な対応行動に結びつけるという目的[44]である。この点を考えると、緊急時に利用する屋内位置情報サービスには、大多数の人が、いつ災害が発生しても、屋内のどこにいても利用できることが最優先で望まれることになる。したがって、屋内測位環境の遍在化は、屋内で位置情報を緊急時に利用するための必要条件の1つとみなすことができる。さらに、屋内で大勢の人が避難する状況で、避難経路に滞留が発生すると、間接的に建物全体の避難活動に影響を及ぼす可能性があることも考慮すべきである[45]。すなわち、屋内の一部の領域であっても、滞在する人の避難行動が適切でない場合には、屋内施設全体としての避難活動の質に影響が及んでしまう。この観点からは、屋内測位環境の遍在化が達成されなければ、緊急時に利用する屋内位置情報サービスは将来的にも実用化することができないと考えられる。

一方で、突然に発生する緊急時の場面で用いる装置に対しては、「必要な機器を所持していなければ機能を利用できない」、「必要な設備が構築されていなければ機能を利用できない」、「いざ使おうとしたときに装置が動作しない」、「緊急時の機能の操作に習熟できていない」という可能性に対して対策する必要がある。そのためには、普及グレードの機器を用いながらも、緊急時を想定することで発生する制約条件を満たすようにあらかじめ屋内測位

環境を構築し、平常時からこの測位環境を利用しつつ、緊急時には機能を切り替えて同じ測位環境を共通して利用する枠組みとすることで効果があると考えられる。これにより、利用できる準備が日常的かつ継続的に整えられ、いつ緊急時の場面が発生しても必要な機能をすみやかに利用可能にすることが期待できる。そこで、汎用的で普及が進んでいる機器を用いた構成の屋内測位環境において、緊急時に利用する屋内位置情報サービスの実現可能性を検討することは課題の1つといえる。

緊急時を想定することで発生する制約の1つに、次のことが挙げられる。災害の発生直後には、停電が発生する場合や、通信ネットワークの機能が停止し外部との通信が途絶する場合が想定される[46]。したがって、こうした状況でも測位を可能とするため、測位を行うときに外部との通信が不要となるように屋内測位システムを構成する必要がある。

## 2.3. 空間構成の変化に迅速に適応する屋内測位環境

### 2.3.1. 屋内測位方式の比較

前節において、空間構成が可変の屋内領域の場合を例に取り、迅速な屋内測位環境構築を実現する必要があることを示した。異なる屋内測位方式の間では、測位に利用する機器や端末の電力消費などの面で違いをもたらすが、屋内測位を利用するための事前準備において必要となる時間と作業量の観点からも特徴に差異がある。そこで、標準的なスマートフォンで利用可能な屋内測位方式の特徴をを比較、分析し、空間構成が可変の領域において速やかに屋内測位環境を構築するために適した測位方式を明らかにする。

スマートフォンを対象にした屋内測位では、屋内空間に設置された Wi-Fi 基地局や BLE ビーコンからの無線信号を利用する方法や、スマートフォンに内蔵されたセンサを用いて端末の動きを検知することで位置を追跡する方法が主に考えられている。屋内測位方式は、次の4つの方式が主に用いられ、単体の方式もしくは複数の方式のハイブリッドによる多様な屋内測位手法が研究されている。

#### (A) 位置指紋方式 (Fingerprinting)

端末が受信した無線信号の特徴と環境マップ内の位置指紋を比較分析し、類似した位置指紋を持つ地点の位置座標をもとにして端末の位置座標を算出する測位方式である[5]。環境マップとは、屋内測位の対象とする空間を網羅するように配置した地点の位置座標ごとに、複数の無線信号の発信機に対する識別 ID と信号観測結果（受信信号強度など）の組み合わせ（位置指紋）を関連づけたデータベースであり、無線信号を屋内空間の各所で測定して作成する。環境マップは、屋内測位の利用開始時点で用意されている必要がある。位置指紋を持つ地点は1メートルから5メートル程度



の間隔で配置することが多い[4]。屋内環境の地磁気を検出することによる、地磁気環境マップを用いた位置指紋方式も研究されている。

#### (B) 三点測位方式 (Trilateration)

端末が受信した無線信号から発信機との距離を推定し、3カ所以上の発信機の位置座標と推定した距離を用いて、最小二乗法などにより端末の位置座標を求める測位方式である[5]。測位に発信機の位置座標を用いるため、屋内測位環境の構築の段階で発信機の位置座標を取得する必要がある。

#### (C) 近接検知方式 (Proximity)

端末が受信した無線信号から、最も近くにある発信機を判定し、その位置を端末の位置とみなす測位方式である[5]。発信機の位置座標のデータベースを用意して照合するか、無線通信で位置座標の情報を伝送すれば、測位結果を位置座標の形で得ることができるが、この場合には三点測位方式と同様に屋内測位環境の構築の段階で発信機の位置座標を取得する必要がある。位置座標を使わずに、測位結果を場所や対象物の名前、住所などを用いて表す方法もある。

#### (D) 歩行者自律航法 (Pedestrian Dead Reckoning: PDR)

端末に搭載される加速度センサ、ジャイロセンサ、方位センサ（地磁気センサ）などを用いて移動軌跡を推定し、直前の時点との位置の差分を累積することで初期位置からの相対的な端末の位置座標を算出する測位方式である[47]。歩行者自律航法単独では絶対位置を求めることができない。

移動軌跡の推定のためには、屋内環境側に測位用の機器を必要としないことが利点である一方で、移動の継続にともなってセンサの誤差が蓄積する問題がある。絶対位置を取得するためと、蓄積したセンサ誤差を解消するために、別の測位手法を組み合わせる程度の間隔ごとに位置推定結果の補正が行われる。そのため、ハイブリッド測位で用いることが基本になるが、他の方式にとって歩行者自律航法を組み合わせることは測位精度の向上において有望な手法である。

移動軌跡は、人の動作をモデル化することで推定される。その中でも特に歩行動作を的確にモデル化することが重要である。一例を挙げると、センサ類から歩幅、歩数と一歩ごとの進行方向を推定して移動軌跡を算出する。そのため、スマートフォンを手にとって移動したときに、モデル化で想定していない動作（走る、横に歩く、ジャンプするなど）をすることや予期せぬ振動が加わることは誤差の原因になりうる。そこで今後の発展に向けて、これらの影響を受けにくくし実用的な場面でも信頼性を上げるための研究が続けられている。

表 2-3 にこれらの屋内測位方式の特徴を整理する。環境マップの要不要は、屋内測位環境の構築作業の効率に大きく影響を及ぼす特徴である。位置指紋方式は環境マップを必要とするため、2.2 節で示したように、屋内測位環境構築の時間効率において不利になる。これに対して、他の 3 つの屋内測位方式では環境マップは不要になる。

表 2-3 各屋内測位方式の特徴

項目	三点測位方式 近接検知方式	位置指紋方式	歩行者自律航法
環境マップ	不要	必要	不要
発信機的位置座標	必要	不要	不要
推定対象	絶対位置	絶対位置	相対位置

歩行者自律航法ではさらに、端末に内蔵のセンサを用いて移動時における出発点からの相対位置を推定するため、単独では無線信号の受信そのものを測位に必要としない。このことは測位環境構築の効率の面では有利な特徴といえる。しかし、相対測位の精度は、端末が搭載するセンサの特性によって異なる。また、端末の持ち方によって最適な推定アルゴリズムは異なったものになる。歩行ステップを検知して推定に用いるアルゴリズムの場合は、利用する人の歩き方などの個人差も測位精度に影響する。センサが電力を消費することや、アルゴリズムの計算処理のために演算装置を用いることによって、端末の電池が消耗することが問題になる場合もある。利用者の動作をモデル化している点、用いる端末の種類に応じたセンサ特性の違いに対処する必要がある点は、屋内測位の利用前に一定の調整作業を必要とする原因になりうる。

一方で、三点測位方式と近接検知方式はともに絶対測位を行うことができるが、そのためには発信機的位置座標を前もって取得しておく必要がある。環境マップを作成する作業が不要な代わりに、発信機を屋内空間に設置する作業と、発信機的位置座標を取得する作業が測位環境構築の効率に影響することになる。しかし、これらの方式では歩行者自律航法のように利用者の個人差に測位精度が影響されることはない。無線信号の受信機の特性的差異によって生じる、発信機に対する距離の推定あるいは近接検知の判定の特性の違いを吸収する必要があるが、これは端末に依存する問題となる。

以上のように、屋内測位方式の特徴は各種各様であり、屋内測位方式どうしの比較のみから一概に優劣を定めることは難しい。しかし、空間構成が可変の屋内領域に対しては、空間構成に依存して整備を必要とする環境マップを用いない方式が適しているといえる。

### 2.3.2. 高密度に設置したビーコンの位置座標を用いた屋内測位

前項での検討を踏まえて、本研究では、三点測位方式や近接検知方式などの、発信機の位置座標を用いた屋内測位方式に着目し、高密度に発信機を配置する場合を考える。屋内空間にビーコンをはじめとした無線信号の発信機を多数設置し、それらの位置座標を取得して構築した屋内測位環境では、次のようなことが実現されると考えられる。

- 見通し内 (Line-Of-Sight: LOS) の電波を受信しやすい状態ならば、屋内空間の物体による電波の反射、干渉、遮蔽の影響が減少し、数 m 以内の測位精度を目指すことができる。
- 密集した発信機の配置によって一定の測位精度を確保することから、発信機の構成が簡素になる無線通信規格を用いることができる。加えて、個々の発信機に対し、無線信号の到達範囲が 10 m 程度あるいはそれ以下で十分になるため、送信信号強度を抑えることができ、発信機の省電力化をはかることができる。
- 測位手法について、複数の屋内測位方式のハイブリッド測位を含めた選択肢を考えることで、測位の目的に合わせて測位精度とアルゴリズムの計算処理の負荷を調整できる。近接検知方式などでは簡単な計算処理で測位ができ、測位アルゴリズムを高度なものにすれば測位精度を高めることが可能になる。

ここで、空間構成を容易に変更できる屋内空間に対して高密度に発信機を設置することを考えると、次の2点の実現されれば、発信機の配置と測位精度が空間構成の変化に対してすみやかに適応できる屋内測位環境を構築することが可能になる。

- (1) 発信機の設置場所を柔軟に選択できるようにして、見通し内の電波を受信しやすい配置になるように位置を工夫して発信機を設置する。
- (2) 設置した発信機の位置座標を取得する作業の時間短縮と省力化を実現する。

### 2.3.3. 本研究の取り組み

本章におけるここまでの分析に基づいて、本研究では、空間構成の変化に対して迅速に適応する、高密度にビーコンを配置した屋内測位環境を実現することを目指すことにする。

これに対して、本研究では次のような過程で屋内空間にビーコンを設置することを想定する。まず、事前に少数のビーコンを間隔を空けて設置し、位置座標を取得した上で常設しておく。次に、その間を埋めるような形でビーコンを追加することで、屋内測位に利用するビーコンの数を数倍に増やす。追加するビーコンの設置対象には、移動可能な物体を含めた屋内のさまざまな物体を考えることで、屋内空間の形状に合わせた高密度なビーコンの設置を短時間で可能にする。さらに追加したビーコンの位置座標を効率的に取得することができれば、空間構成に迅速に適応する屋内測位環境が実現できる。

これに基づいて、本研究で実施する具体的な取り組みを以下に示す。

- ① ビーコンを空間構成に合わせて効率的に設置する作業方法の設計（第4章）
- ② ビーコンの信号を現場の屋内空間で観測する作業方法の設計（第4章）
- ③ リアルタイムに進行状況を示し、短時間の観測で位置推定結果を取得するための SLAM によるビーコン位置推定手法の提案（第5章）
- ④ 平常時と緊急時に共通利用する屋内位置情報システムの概念設計と、その要求分析に基づいた提案手法に対する達成目標の導出（第6章）
- ⑤ 実験による提案手法の評価（第7章）

本研究では、標準的なスマートフォンで利用でき、汎用的で製品の普及が進んでいる規格のビーコンを利用することを考え、Bluetooth 4.x 準拠の BLE ビーコンを採用する。本研究では、ビーコン位置推定のための SLAM 手法の提案において、採用するビーコン規格で実現できることを前提にアルゴリズムを設計する。

本研究で提案する SLAM 手法は、筆者の知る限りにおいて、屋内測位を行うために設置した複数のビーコンの位置座標を求める目的に対して、位置座標の推定に移動体で観測した距離情報のみを用いるという条件の下で、信号を観測するために必要な時間を短縮する手法を提案した初めての成果である。

## 第3章 関連研究

---

ビーコンやワイヤレスセンサネットワークのノード，あるいは無線通信の基地局という形で用いられている無線信号の発信機は，さまざまな場面で用いられているが，発信機の位置座標を求めるという共通の目的に対する取り組みがそれぞれの分野で存在する．このような取り組みでは，それぞれ置かれている状況に応じて利用できる機器や情報を条件に，位置座標を求める論理を組み立てて手法を構築している．本章では，この観点に基づいて，関連研究を分析する．まず，3.1節では，屋内地図や屋内空間モデルを用いる手法，発信機どうしの間隔を無線通信によって計測し用いる手法，移動しながら無線信号の観測と受信位置の取得を行う手法を取り上げ，それぞれの研究事例を紹介し特徴を分析する．続いて，3.2節では，無線信号から距離情報を取得して用いる SLAM に着目する．関連研究を，発信機の位置座標を求める目的の観点から分析することで，その課題を明らかにする．

---

### 3. 1. 無線信号の発信機の位置座標を求めるための手法

#### 3. 1. 1. 屋内地図や屋内空間モデルを用いる手法

電子地図として利用するために電子化された建築物の設計図面、あるいは点群データから作成された屋内 3 次元空間モデルなどを用意し、実際の空間における発信機の設置場所と一致する点を電子データ上で割り出してその座標を参照することにより、発信機が設置された位置の座標を取得することができる。

国土地理院では、屋内空間の位置情報基盤の整備に向けて、Wi-Fi 基地局や BLE ビーコンなどを「パブリックタグ」として屋内測位に利用するためのパブリックタグの位置情報共有の標準仕様[8]を策定した。この仕様では、パブリックタグの緯度経度の測定において、公共測量による方法に加えて、地理情報システム (Geographic Information System: GIS) 上に位置を照合して重ね合わせた建築物の設計図面を用いる方法や、レーザ測域センサ (Laser Imaging Detection and Ranging: LIDAR) による 3 次元点群データから作成した 3 次元空間モデルを用いる方法が取り上げられている。この仕様では、得られる緯度経度の測定精度について、GIS と設計図面を用いる方法では 3 m から 30 m、3 次元空間モデルを用いる方法では 0.3 m から 3 m を目安としている。この測定に要する作業工数については、国土地理院によるパブリックタグの品質情報に関する調査・検討[48]において参考情報ではあるが見積りが示されている。約 20 m×30 m の広さの 2 カ所の測定領域、16 個の測定対象タグ個数を前提条件とした工数は、GIS と設計図面を用いる方法では 0.75 日 (1 名で作業)、3 次元空間モデルを用いる方法では 3 日 (そのうちの 2 日を 2 名で、1 日を 1 名で作業) が見積られている。

これらの手法を屋内測位環境の構築のために採用することを考える場合、空間の構成や配置された物体の位置が定常的で、同時に屋内空間に対して電子地図などを用意する場合[49]に対しては有用であると考えられる。しかし、発信機の位置座標を求めるために、空間の構成の変更や物体の移動のたびに 3 次元空間モデルを作成する、あるいは移動可能な物体を電子地図上に常に最新の位置で記載するという必要が生じる場合は、電子データの作成や管理の作業の負担が大きくなるのがこの手法の問題点になると考えられる。

#### 3. 1. 2. 無線通信により計測した発信機の間隔を用いる手法

無線通信端末には、無線信号の発信機と受信機の双方が搭載されている。現実の空間上で無線通信端末間の通信に用いられた無線信号の観測情報を自動で収集し、その情報を用いて無線通信端末どうしの位置関係を求めることで、空間上に存在する無線ネットワークの端末の位置座標を取得する手法がある。

ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) とは、センサ付無線通信端末 (ノード) を空間に複数配置し、ノード間で協調して相互に通信を行うことでノードどうしのデータ転送を可能にした無線ネットワークである。WSN により空間の各所でセンサが得たデータを無線ネットワークを介して収集することができる。近年では、IEEE802.15.4[50]の国際標準規格に基づいた WSN の実装が、IoT (Internet of Things) を実現する具体的な手段の一つとして注目を集めている。

WSN で入手したデータと、そのデータが得られた位置を組み合わせ、情報として活用する場合には、WSN のそれぞれのセンサの位置を知る必要がある。そこで、WSN のノードの位置推定の問題に対して、図 3-1 のように座標が既知のアンカノードを疎に配置し、これを含めた各ノード間の距離情報を無線ネットワークを介して集約して、位置が不明な固定ノードの座標を一括して推定する手法[51], [52]が研究されている。WSN では、複数のノードを経由する経路によって各ノードがデータの中継を行うマルチホップによりデータの収集を実現するため、近隣のノードどうしで無線通信が行われる機会が頻繁に発生する。この機会において、無線通信の信号を利用してノード間の距離を計測する方法がある。受信側のノードにおける受信信号強度から、電波伝搬モデルによる受信信号強度と距離の関係式を用いて求める方式、電波信号が送信されてから受信機に到着するまでの時間を測定し、電波伝搬速度から距離を推定する到達時間 (Time of Arrival: TOA) 方式などがその例となる。また、アレイアンテナを用いて無線信号の送信または受信の利得に指向性を持たせるなどの方法により、無線信号の到来方向 (Angle of Arrival: AOA) を検知することで、近隣のノードの相対的な方向の情報を取得し、位置推定に用いる場合もある。

Patwari ら[53]は、900MHz~928MHz の帯域で動作する WSN を試験用に開発し、ノードの位置推定の実験を行った。9 m×9 m の領域に 16 個のノードを 3 m おきに格子状に配置し、四隅のノードの位置座標を既知として残りの 12 個のノードの位置を受信信号強度を用いて推定した。その結果、実験環境が住宅の屋内の場合でノード位置推定の誤差は実験ごとの 1.0 m から 2.7 m の間となった。さらに、WSN にノードを追加すると、クラメール・ラオの限界 (Cramér-Rao bound) よって示されるノード位置推定誤差の理論的な下限が小さくなることを理論解析によって示した。したがって、WSN の機器や通信方式の仕様が同じときに、同一の屋内領域に設置するノードの数が増加すると、ノード位置推定の誤差を小さくするために有利になる。

対象のノードに関して、得られた近隣のノードどうしの距離の情報を集約し、ノードの位置について最小二乗法などで全体最適化をはかりノードの位置座標を推定するという原理は、WSN 以外でも利用可能であるが、発信機間の距離の情報を取得でき、かつ集約可能なことが、利用するための条件になる。しかし、ZigBee®[54]などの IEEE802.15.4 に準拠した WSN の規格の送受信機は、標準的なスマートフォンに現時点では搭載されていない。

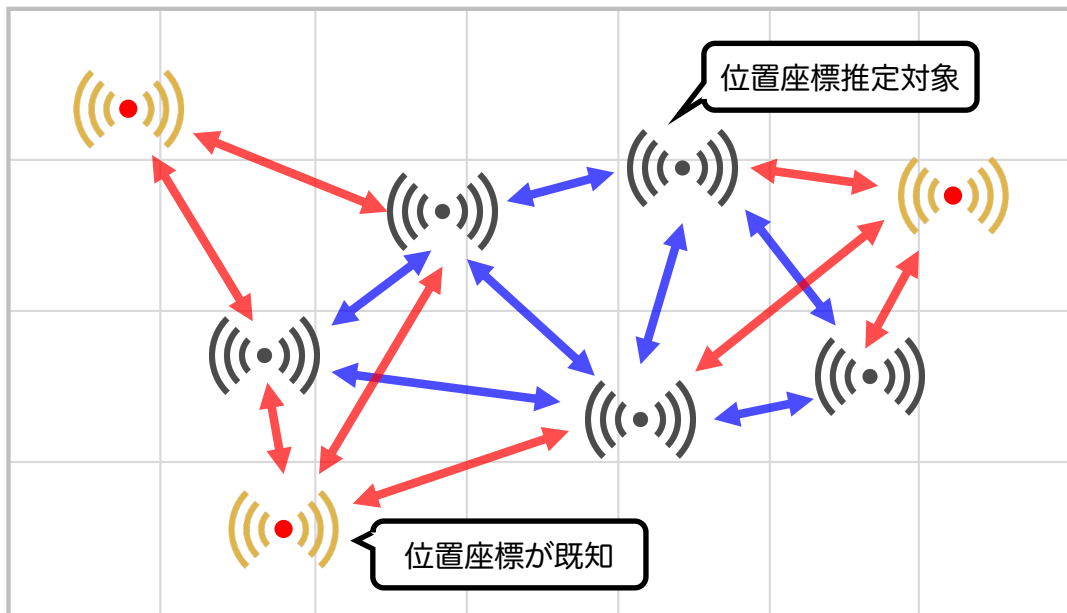


図 3-1 WSN におけるノード間の距離を用いたノード位置推定

### 3. 1. 3. 移動しながら発信機との距離を観測し移動軌跡を別途測定する手法

無線信号の受信機が対象とする発信機の近傍を通過するように移動すれば、位置座標を求めようとするすべての発信機について無線信号を観測することが可能である。Wi-Fi 基地局や携帯電話通信網の基地局を測位に利用するために、これらの発信機が通信用に既に設置され点在しているような領域で、移動端末で無線信号を観測し、観測した位置の情報と関連づけて発信機の位置を求める手法を用いた研究がある。

LaMarca ら[55]は、Wi-Fi 基地局や携帯電話基地局などの、発信機位置のデータベースを用いた測位システム Place Lab を構築した。データベースの作成のために、位置のリストを発信機を設置した組織から入手する他に、自動車などで移動しながら無線信号の受信記録と GNSS 測位で入手した位置をモバイルコンピュータ上で収集したデータを利用した。発信機の位置は、信号の受信位置の座標を平均することで求めている。Wi-Fi 基地局を探す行為であることから、この手法を指して War Driving<sup>2</sup>と呼ぶこともある。Place Lab の評価のために、大都市近郊で無線信号の受信データを移動しながら収集する実験を行い、構築した測位システムで 13.4 m から 31.3 m の測位精度が得られたことを報告している。Place Lab は、大都市圏で広域に展開することで、位置情報を利用できる領域の拡大を目指したものであ

<sup>2</sup>War Driving の用語については、不特定多数に開放された基地局を探してインターネット通信に利用する行為と関連づけて扱われる場合もみられるが、ここではその意味は含まない。



り、測位精度よりも、既存の設備を活用しサービス開発者の参入障壁を低くすることを優先している。同様の試みは、日本の PlaceEngine[56]や Locky.jp[57]に関連する研究でも行われているが、いずれも GNSS などから移動端末の位置を入手できることを前提としている。

受信機を搭載した移動端末の軌跡の位置座標が利用でき、観測した無線信号から発信機と移動端末の距離を推定することができれば、距離情報を用いて三点測位方式あるいはそれに準じた手法で発信機の位置座標を求めることができる。GNSS が利用できない屋内空間では、移動端末の軌跡を得る方法として自律航法を用いることが考えられる。Chen ら[58]は、探し物の発見や拡張現実の用途で BLE ビーコンタグを用いることを想定し、BLE ビーコンの周囲をスマートフォンを所持した人が L 字状の経路で歩行することにより、スマートフォンのセンサによる PDR と BLE ビーコンの無線信号の観測情報を用いて最小二乗法により BLE ビーコンとスマートフォンの相対位置関係を求めている。会議室やレストラン、ホールなどの 8 通りの室内環境と、屋外の駐車場の合計 9 通りの環境における実験で、0.8 m から 2.3 m の測位精度を報告している。

以上の手法はいずれも、移動端末の位置推定精度が低い場合は、それを受けて発信機位置の推定誤差も大きくなる。屋内空間でこのアプローチによって十分に正確な発信機の位置座標を求めるには、座標が判明している経路を移動するか、もしくは高性能な自律航法を用いるなどの方法によって、誤差が小さい移動端末の位置座標を提供する必要がある。

### 3.2. 無線信号を用いた自己位置と環境地図の同時推定

自己位置の推定と同時に環境地図の構築を行う SLAM の手法[9]は、近年では自動車の自動運転[59]、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) の制御[60]、宇宙探査[61]などへの応用が進んでいる。状況に応じて、レーザ測域センサ (Laser Imaging Detection and Ranging: LIDAR) [62]や単眼カメラ[63]など多様なセンサによりさまざまなアルゴリズムで SLAM が実現されている。SLAM はロボティクスの分野で発達を遂げてきた[64], [65]。初期の代表的な例では、環境に存在する特徴点の移動体に対する距離と方向の情報を、LIDAR などを用いて検知することで環境地図を構築し、同時に移動体の自己位置推定を行っている。このようなタイプの SLAM は Range-Bearing SLAM と呼ばれる。一方で、方向を検知することができる、LIDAR やカメラなどのセンサを用いずに、特徴点と移動体の間の距離を無線信号や音波からセンシングして用いる SLAM は Range-Only SLAM と呼ばれている。

移動体で無線信号を観測して Range-Only SLAM を行いながら、対象とする発信機の近傍を通過するように移動する手法も、無線信号の発信機の位置座標を取得する方法と考えることができる。Range-Only SLAM では、発信機が移動体において最初に観測されたとき、方向の情報が不明なことから、移動体に対する発信機の位置は、2 次元平面上において図 3-2 に示されるような観測された距離に基づいた同心円状の確率密度分布として推定される。

したがって **Range-Only SLAM** では、推定アルゴリズムにおいて、発信機の位置座標に対し初期値の誤差を抑えることが困難である。初期値の誤差が大きい場合、推定値の誤差が小さい値へ収束するためには、十分な量の観測データを移動しながら収集する必要がある。さらに、発信機の位置推定誤差が大きいことが影響して、移動体の軌跡推定精度が低くなる場合は、距離の観測地点の位置推定誤差が大きくなり、観測を続けても発信機の位置推定の誤差が減少しづらくなる状態が発生する。いわゆる「鶏が先か、卵が先か」という問題に陥ることで、移動観測の完了までに長い時間が必要となってしまう。

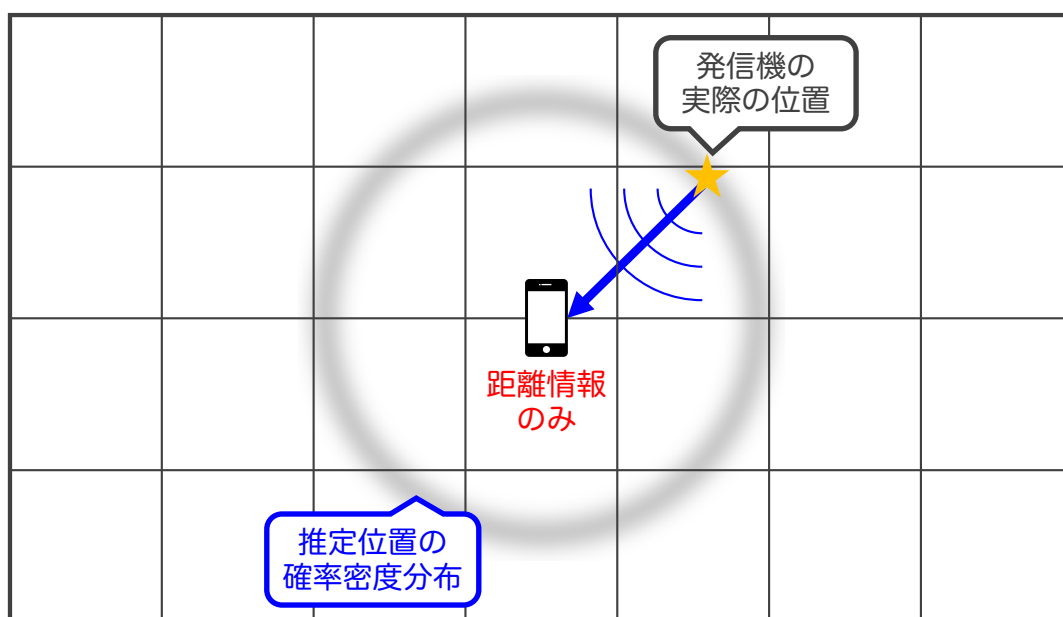


図 3-2 検出時に推定される発信機の位置の確率密度分布  
(文献[10]をもとに筆者作成)

移動観測中に位置推定の進行状況を確認したい場合、ベイジアンフィルタを用いた逐次推定などによってリアルタイムに **SLAM** を行う必要がある。逐次推定による **Range-Only SLAM** に関する研究は、これまで車輪型移動ロボット[10], [66], [67], [68], 無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) [69], [70], 自律型無人潜水機[71]における検討が主であった。本節では、推定フィルタの状態ベクトルを構成する、発信機位置座標の初期化方法によってこれらの研究を分類し、それぞれの初期化方法の特徴を分析する。それに基づいて、スマートフォンに代表される携帯情報端末が移動体の場合に生じる課題を抽出する。

### 3.2.1. 初期化にランダムな値を用いる方法

推定フィルタの状態ベクトルにおける発信機位置座標の初期化に、ランダムに生成した値を用いれば、初期化と同時に Range-Only SLAM による発信機位置の推定を開始できる。しかし、ランダムな値を用いるために、初期値の誤差が大きくなる場合がある。したがって、短時間の観測で十分な発信機の位置推定精度に達することが困難になる。図 3-3 は、この初期化方法のイメージを示したものである。

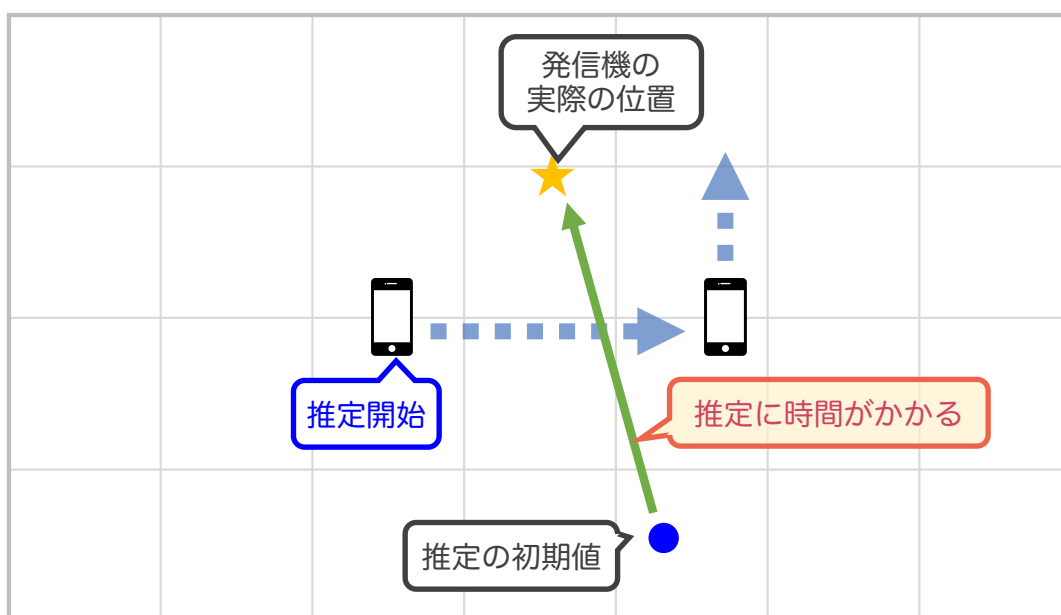


図 3-3 ランダムな値の位置座標を用いたビーコン位置の初期化

Seco ら[72]は、Radio Frequency Identifier (RFID) ビーコンを屋内に設置した環境を構築し、RFID 受信機を持った歩行者が観測した受信信号強度データを用いて、FastSLAM[73]により平面上におけるビーコン位置と歩行者軌跡の推定を行った。この研究では、SLAM を用いる場面として、ビーコンが設置された環境において、歩行者の持つ端末がバックグラウンドで受信信号強度データを収集し、それを用いてビーコンの位置座標を求めるシナリオが想定された。推定フィルタのビーコン位置座標は、領域内のランダムな位置の座標を用いて初期化された。部屋と廊下で構成された 65 m×40 m の屋内空間に、4 個の位置座標既知のビーコンを間隔を空けて設置し、さらに 60 個の位置座標未知のビーコンを設置して実験が行われた。報告において、5 回の歩行を組み合わせ合わせた合計約 100 分の観測によるビーコン位置座標の推定誤差は中央値 2.3 m、約 17 分の観測によるビーコン位置座標の推定誤差は、歩行者自律航法を併用しない場合において中央値 4.9 m、歩行者自律航法を併用した場合において中央値 3.4 m の結果が示されている。また、歩行者軌跡の推定について、歩行者自律

航法を併用しない場合は実際の軌跡から大きく逸脱した結果が得られたが、歩行者自律航法を併用した場合に改善されたことが述べられている。

### 3.2.2. Delayed Initialization

発信機の位置を、移動して無線信号を観測することにより、なるべく正確に求めてから Range-Only SLAM の推定フィルタを初期化する方法は、発信機の検出から位置座標の推定開始までに、図 3-4 に示すように初期値を得るための時間分の遅延が生じる。そこでこの初期化方法は Delayed Initialization と呼ばれる。初期値を求める方法は、移動体が無線信号を観測した位置と、観測された距離を用いた方法、すなわち 3.1.3 項で示した方法である。したがって、Delayed Initialization では、初期化に用いる距離の観測地点について、各地点の位置座標が（少なくとも相対座標で）判明している必要がある。発信機の位置座標を取得する方法の観点において 3.1.3 項の方法と異なる部分は、位置座標が初期化された以降において、観測された距離が発信機の位置と移動体の軌跡の双方の推定に寄与する点である。

移動体のセンサの性能が低いなどの理由で、自律航法による軌跡推定誤差が大きい場合、または移動体の軌跡を得る手段が存在しない場合は、得られる発信機位置の誤差が大きくなり、Delayed Initialization は十分に機能を果たすことができない。

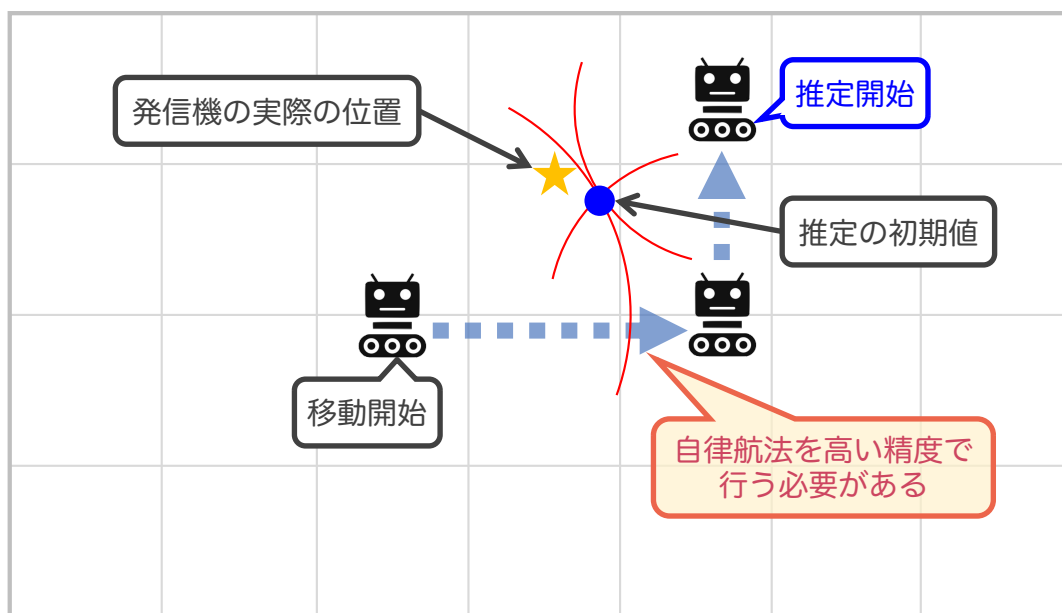


図 3-4 Delayed Initialization によるビーコン位置の初期化

Menegatti ら[66]は、868MHz 電波ビーコンと車輪型移動ロボットに対して Range-Only SLAM を行い位置の同時推定を行った。推定フィルタには、ビーコンの受信信号強度データとロボットのオドメトリを単一の拡張カルマンフィルタ (EKF) で密に結合した EKF-SLAM[74]が実装されている。推定フィルタのビーコン位置座標は、三点測位方式を用いた Delayed Initialization により初期化された。長さ 30 m 幅 6 m の屋内の廊下に 8 個のビーコンを設置し、ロボットが 6 m×3 m の範囲を周回する実験を行い、平面上のビーコン位置座標を推定した結果、平均で 0.8 m から 1.0 m の誤差となった。平面上のロボット軌跡の推定誤差は約 0.2 m であり、実際の軌跡とよく一致する結果が得られている。

発信機位置座標の初期化方法に、格子位置推定を利用した研究[67], [71]もある。また、発信機の位置を、図 3-5 のように線対称の関係にある 2 か所の候補に絞られるまで推定した段階で、2 つの推定フィルタの初期化にそれぞれを用い、推定結果を合成する方法 [75], [76]もある。

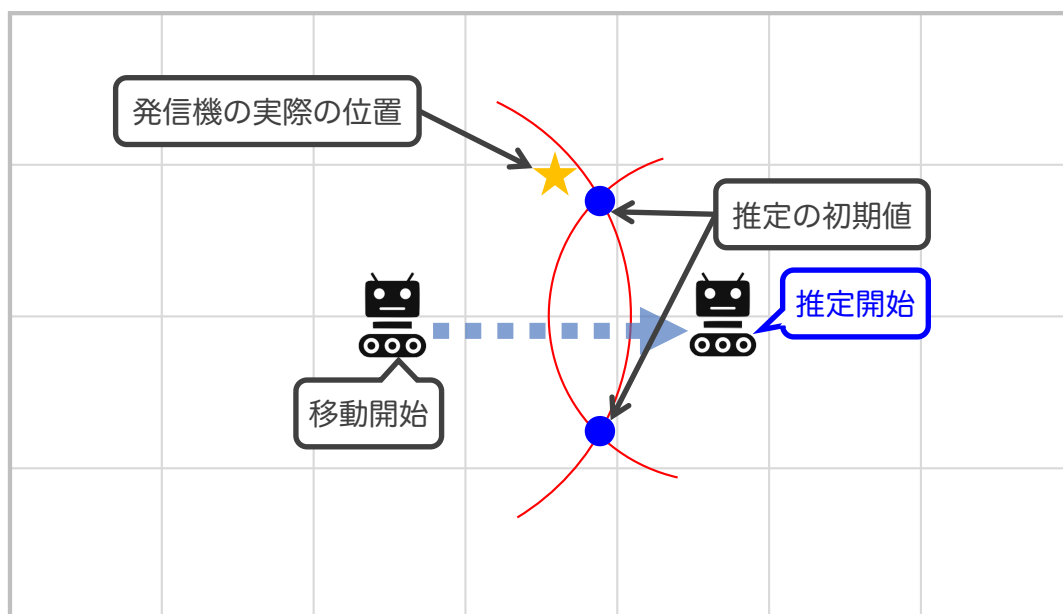


図 3-5 2つの仮説を追跡する Delayed Initialization

### 3.2.3. Undelayed Initialization

Range-Only SLAM の推定フィルタの初期化方法のうち、発信機の検出と同時に SLAM の中で位置座標の推定を開始する方法は、Undelayed Initialization として分類される。移動体が発信機を検出したときの、同心円状になる発信機の推定位置の確率密度分布をマルチモーダルな分布で表現して、即座に SLAM のためのベイジアンフィルタに組み入れると、遅延なしに推定を開始することが可能になる。

Blanco ら[10]は、UWB ビーコンと車輪型移動ロボットに対する位置の同時推定において、ビーコン位置の同心円状の確率密度分布をパーティクルで表現し、検出直後から SLAM でビーコン位置の推定を開始する手法を提案した。ロボット位置もパーティクルで表現して推定しているが、ロボット位置の個々のパーティクルそれぞれが、ビーコンのためのパーティクル一式をビーコンごとに持っている。このことにより、SLAM の推定フィルタの中で、マルチモーダルな分布で表現されたビーコンと、ユニモーダルな分布で表現されたビーコンが共存できるようになる。ビーコンのパーティクルがおおむね 1 点の近傍に収束したとみなされると、パーティクルはガウス分布に置き換えられ、ユニモーダルな分布の推定位置となったビーコンの位置は以降 FastSLAM に準じたアルゴリズムによって推定される。

Blanco らはこの手法をさらに改良し計算負荷の軽減をはかっている[68]。図 3-6 に示すように 1 つビーコンに対する推定位置の確率密度分布を混合ガウス分布で表現すると、混合ガウス分布の中で足し合わされている個々のガウス分布がビーコンの推定位置の候補となる。図 3-6 では推定位置の候補が 2 次元平面上でビーコン 1 つ当たり 8 個ある場合を示している。これらの推定位置の候補を仮説と見なし、各仮説を EKF で追跡するとともに、同一ビーコンの仮説間で尤度による重み付けをすることで、ビーコン位置の推定を検出直後から SLAM に組み込み、前述の手法と同様に FastSLAM を拡張したアルゴリズムを提案している。ビーコン推定位置の確率密度分布をパーティクルで表現する前述の手法と比べて、混合ガウス分布を用いることにより計算負荷が軽くなる。室内の約 4 m 四方の領域に設置された 3 個の UWB ビーコンに対して 3 次元位置座標を推定した実験結果が示されており、約 50 秒のロボットの移動により誤差 0.4 m 以内でビーコンの位置を求められたことが報告されている。

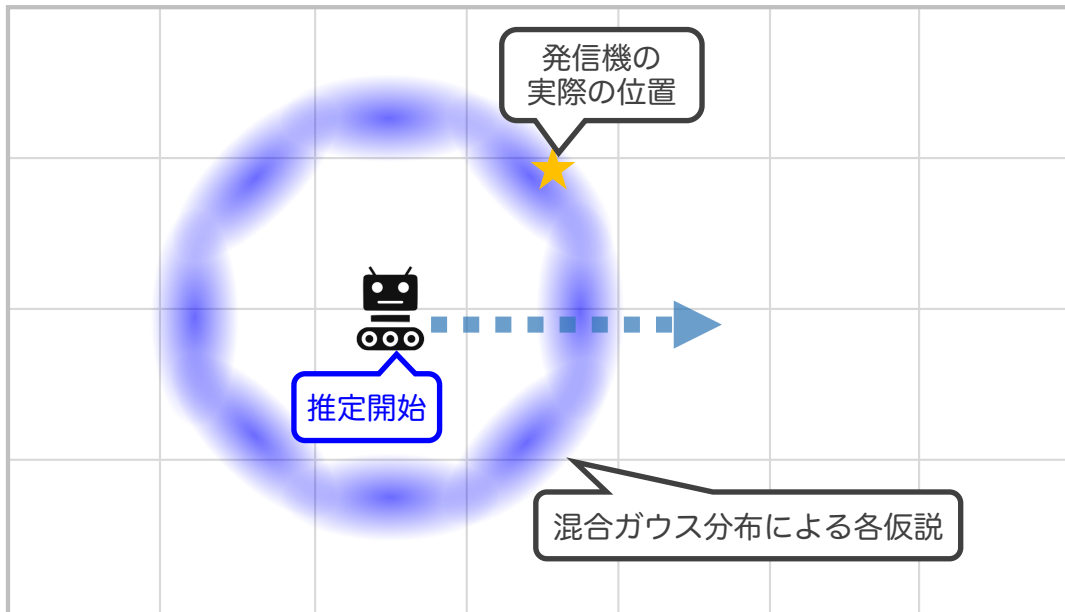


図 3-6 混合ガウス分布を用いた Undelayed Initialization

Blanco らの混合ガウス分布を用いた改良手法において、1つの発信機に対して推定位置の各仮説の追跡が進行していく様子を図 3-7 に示す。この手法では、高性能な自律航法と組み合わせることにより、3.2.1 項や 3.1.2 項で挙げたような単一の推定フィルタを用いる場合よりも、高速に発信機の位置座標の推定結果を得ることができる。

発信機が検出されたときに、移動体と発信機間の距離の推定誤差が小さければ、仮説の一部が実際の発信機の位置座標に近い値で初期化される（図 3-7 上段）。移動体の位置の変化にしたがい、推定値が実際の発信機の位置に近い仮説ほど重みが大きくなっていく。重みが相対的に小さい仮説は発信機の位置推定誤差が大きいと見なすことができるため、推定フィルタの更新ステップにおいて仮説の重みを比較し、重みが一定のしきい値を下回る仮説に対して、以降の追跡を停止する。それにより、残りの仮説の位置推定精度が高くなる（図 3-7 中段）。最終的に生き残った仮説により、誤差を抑えて発信機位置の推定結果を得ることができる（図 3-7 下段）。複数の仮説が生き残っている場合は、仮説の推定位置を結合して結果を得る。

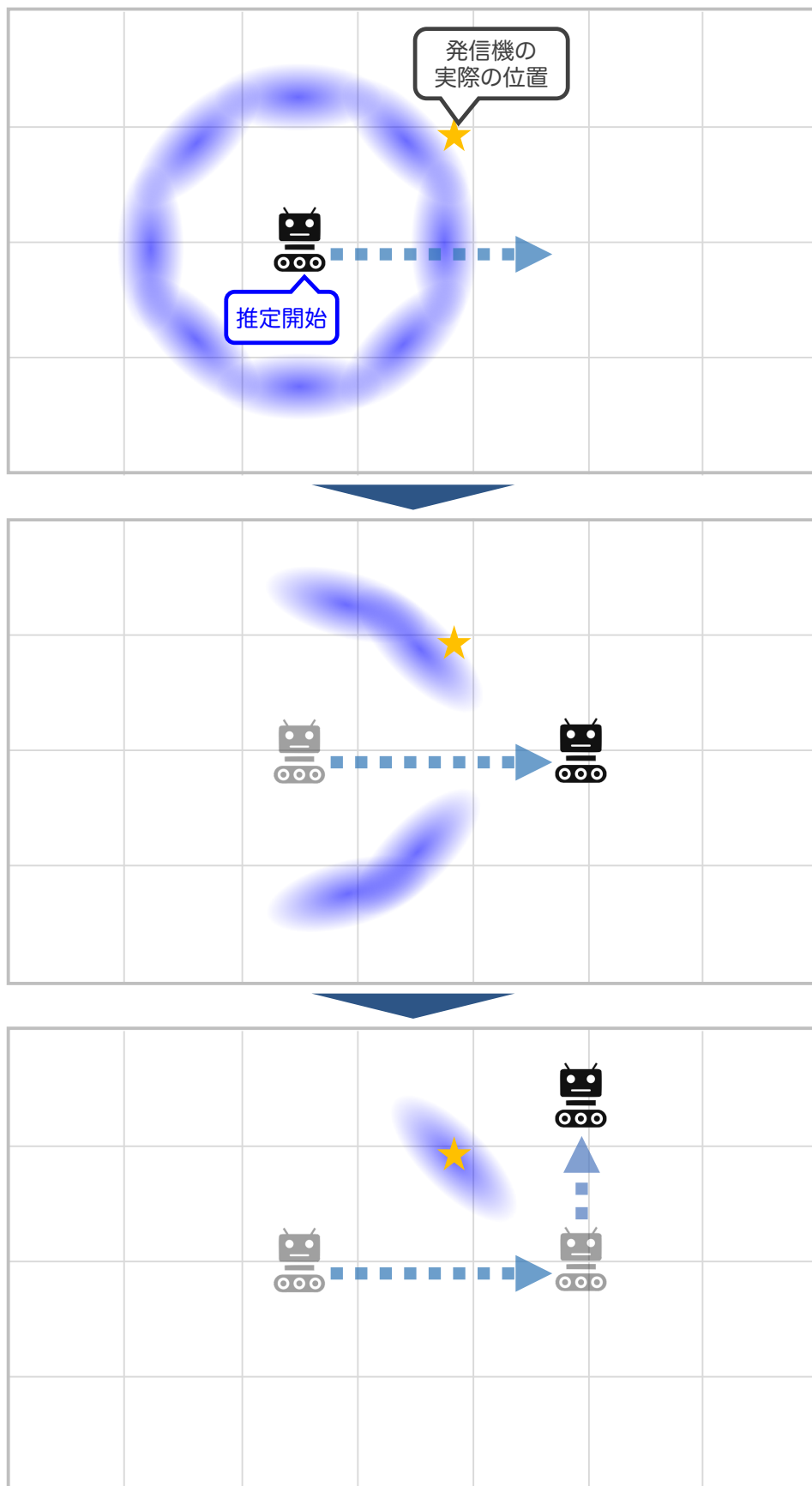


図 3-7 ビーコン位置の仮説の追跡が進行する様子



### 3.2.4. 仮説数抑制のためのアプローチ

3次元空間では、発信機が検出されたとき、発信機の推定位置の確率密度分布は球状になる。発信機的位置を楕円体状のガウス分布から構成される混合ガウス分布で表現するとき(図 3-8 左側)、1つの発信機に用いる仮説の数は、方位角および高度角方向に用意する各仮説数の積になる。3次元空間の位置を推定する Range-Only SLAM において、発信機的位置を初期化する混合ガウス分布の仮説数の削減に取り組んだ研究がある。

Fabresse ら[69],[70]は、3次元空間における混合ガウス分布を用いた Range-Only EKF-SLAM による、2.4GHz 帯電波ビーコンと UAV の位置の同時推定において、球状の確率密度分布を表現する混合ガウス分布に工夫を行い、仮説数を削減する手法を提案した。楕円体状の代わりにトロイド状の確率密度分布を用いて、方位角方向と高度角方向のそれぞれに複数の仮説を用意し、各方向を個別に推定する手法(図 3-8 右側)を用いた。これにより、1つのビーコンに用いる仮説の数を、方位角および高度角方向の仮説数の積から和に減らすことができる。しかし、はじめから方位角方向の仮説のみが存在する2次元平面上の位置推定の場合では、この手法で仮説数を低減させることができない。

なお、Fabresse らの手法では、状態ベクトルに移動体およびビーコンのすべての仮説の位置を含めてこれを単一の EKF の中で推定する、Federated Information Sharing (FIS) [77] を推定フィルタに用いている。

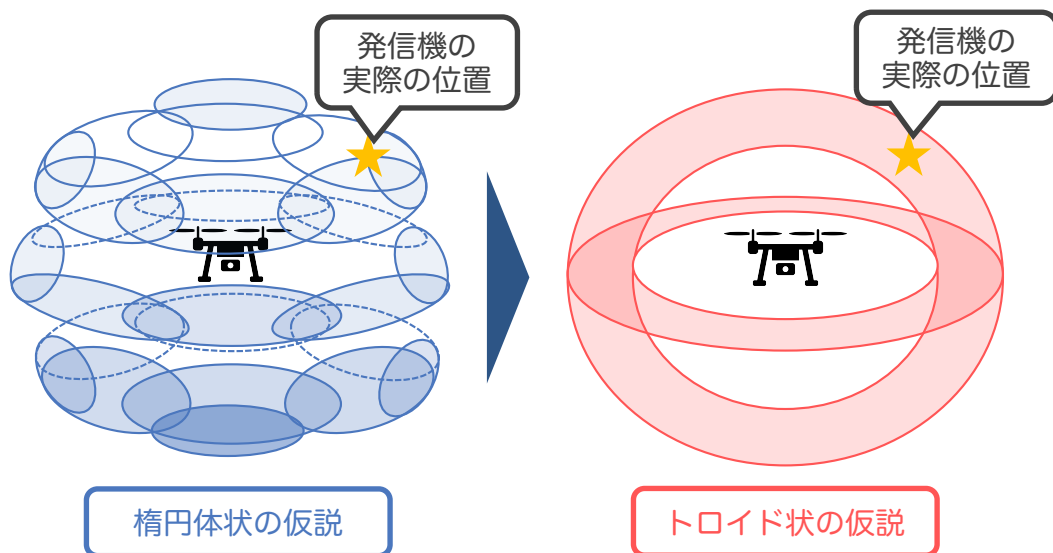


図 3-8 混合ガウス分布による Undelayed Initialization

### 3.2.5. 歩行者の持つ携帯情報端末を移動体としたときの課題

本節でここまで取り上げてきた **Range-Only SLAM** に関する研究では、用いている移動体の種類は多岐に渡っている。また構築された推定フィルタは、基本的な考え方として、**Range-Bearing SLAM** で既に用いられている **EKF-SLAM** や **FastSLAM** などのアルゴリズムから、単純に方向に関する変数を含む式を省いて適用したものになっている。したがって、移動体が距離の情報を入手できるという共通の条件が整えば、**Range-Only SLAM** で用いられている推定アルゴリズムを異なる種類の移動体に適用することは可能である。

しかし、携帯情報端末を移動体として考えたとき、端末を所持した人が歩行により移動することを考えると、車輪型移動ロボットの場合と同等の性能で自律航法を実現することが難しい[47]。歩行者自律航法は人の歩行をモデル化して行われることを 2.3.1 項で述べたが、このことにより、車輪の回転数と操舵角から軌跡を求めるオドメトリや、慣性計測装置 (**Inertial Measurement Unit: IMU**) を用いる自律航法に対して、位置推定の正確さの面で不利になる。端末がスマートフォンの場合では、加えて搭載するセンサの性能が低いことも位置推定精度を損なう要因の 1 つである。そこで、携帯情報端末による **Range-Only SLAM** では、軌跡の推定精度や、発信機の位置推定結果を取得するまでの観測時間を、3.2.2 項や 3.2.3 項で挙げたような車輪型移動ロボットによる場合と同等のレベルで達成することが、同じ推定アルゴリズムを適用しても困難である。

混合ガウス分布を用いた前述の手法では、十分な性能の自律航法と組み合わせたときには高速に発信機の位置推定結果を得ることを可能にする。しかし、自律航法の性能が不十分な場合には、移動体の推定軌跡が実際の軌跡から大きく逸脱してしまい、十分な発信機の位置推定精度に達するまでの観測に時間がかかってしまう問題がある。観測された距離は移動体の位置推定に寄与するものの、3.2.3 項や 3.2.4 項で挙げた手法では、距離情報のみでは移動体の軌跡を正確に推定するには不十分である。

3.2.3 項で挙げた **Blanco** らの改良手法では、各パーティクルにおける移動体の推定位置は、自律航法による予測ステップの制御入力によってのみ移動する。**EKF** で推定位置が更新されるのは **FastSLAM** と同様に発信機のみであり、更新ステップでは各パーティクルの移動体の推定位置はそのままである。観測された距離情報は、パーティクルの重みの更新によってのみ移動体の位置推定に寄与する。そこで、自律航法の性能が不足することで、実際の移動体の位置周辺にパーティクルが存在しなくなると、移動体の軌跡推定誤差が大きくなってしまふ[78]。**FastSLAM2.0**[79]ではこの問題について対策がなされているが、用いるパーティクルの数に比例してアルゴリズムの計算量が大きくなる。計算処理の負荷の観点からは **FastSLAM** 系統とは異なる、より軽量な推定アプローチが求められる。

3.2.4 項で挙げた Fabresse らの手法では、推定フィルタに用いられている FIS において、移動体の推定位置はユニモーダルな分布として扱われている。そのため、混合ガウス分布を用いて複数の仮説が生成されたとき、本来ならばそれぞれの仮説が持つビーコンの位置ごとに異なる移動体の推定軌跡が考えられるが、FIS ではそれらを区別することができない。したがって、観測された距離が移動体の位置推定に十分に反映されなくなるため、自律航法の性能が不足する場合には、移動体の推定軌跡は実際の軌跡から逸脱してしまう。

移動体の推定位置が実際の位置に対して大きく異なる状態で、新たに発信機を検出すると、図 3-9 に示すようにその推定位置の仮説はいずれも誤差が大きくなってしまう。このような状況では、十分な発信機の位置推定精度に達するまでに長時間の観測を必要とする。したがって、前述の Blanco らの改良手法や Fabresse らの手法は、自律航法による軌跡推定精度が不足する場合にはその高速性を発揮することができない。移動による観測と推定を長い時間継続することによって、最終的には発信機の位置および最新の移動体の位置の誤差を小さくすることは可能であるが、推定の途中では移動体の推定位置の誤差が大きくなり、それによって発信機の位置の推定を妨げてしまう。

したがって、Range-Only SLAM において、自律航法の性能によらずとも、距離情報のみを用いて移動体の軌跡推定精度を向上させることによって、短時間の観測で十分な発信機の位置推定精度を得る手法を実現することが課題として残されている。

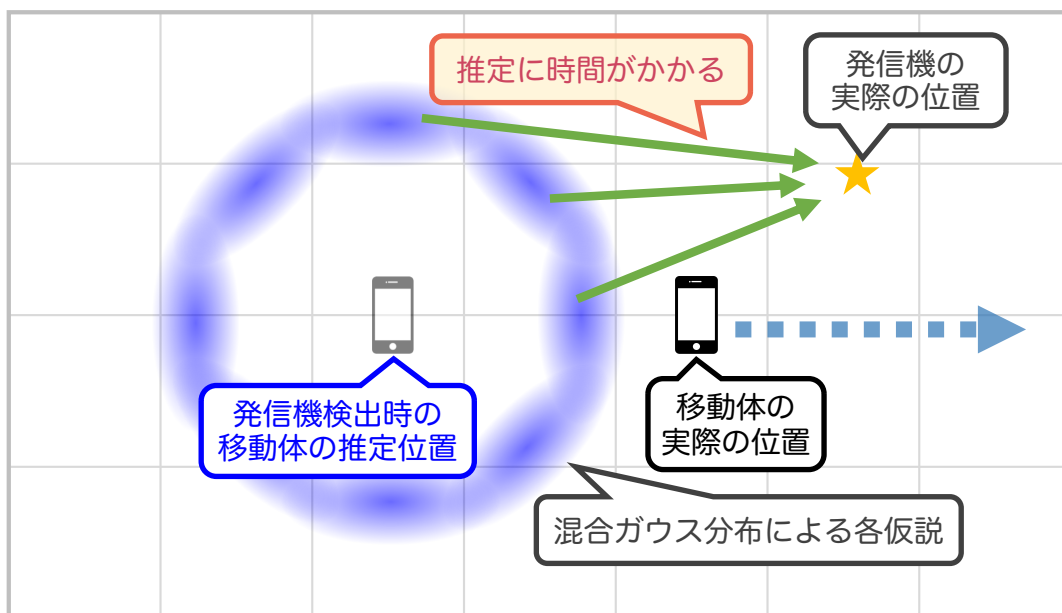


図 3-9 移動体の推定位置が不正確な場合の混合ガウス分布による初期化



## 第4章 屋内測位環境構築方法の設計

---

本章では、本研究で対象とする屋内測位環境を構築する方法の設計について述べる。現場の環境で必要となる主な作業は、ビーコンの設置、距離の推定に用いるパラメータ決定のための測定、ビーコン信号の観測の3つである。4.1節で本研究における屋内測位の想定環境を示し、4.2節で屋内空間にビーコンを設置する方法について述べる。4.3節では、想定環境を実現するためのビーコンについて検討し、具体的な手段となる規格を選定した上で、観測したビーコンの信号からスマートフォンとビーコンの間の距離を推定する方法について述べる。4.4節では、スマートフォンを持つ歩行者により現場の屋内空間でビーコンの無線信号を観測する方法について述べ、ビーコン位置推定の方法について検討した結果として本研究では Range-Only SLAM を用いることを述べる。

---

## 4.1. 想定環境

本研究では、想定環境として、空間を区切るために物体が配置されており、区切られた領域が人の滞在および通行に利用できるように構成された屋内空間に対してビーコンを設置した環境を考える。想定環境における屋内測位システムは、人が利用する空間を対象領域として、設置されたビーコンの位置座標を用いて屋内測位を行う。また、想定環境における屋内測位システムの主な測位対象をスマートフォンとする。屋内空間の同一階での平面上の位置を示す利用目的を想定し、屋内測位システムの出力は2次元座標とする。

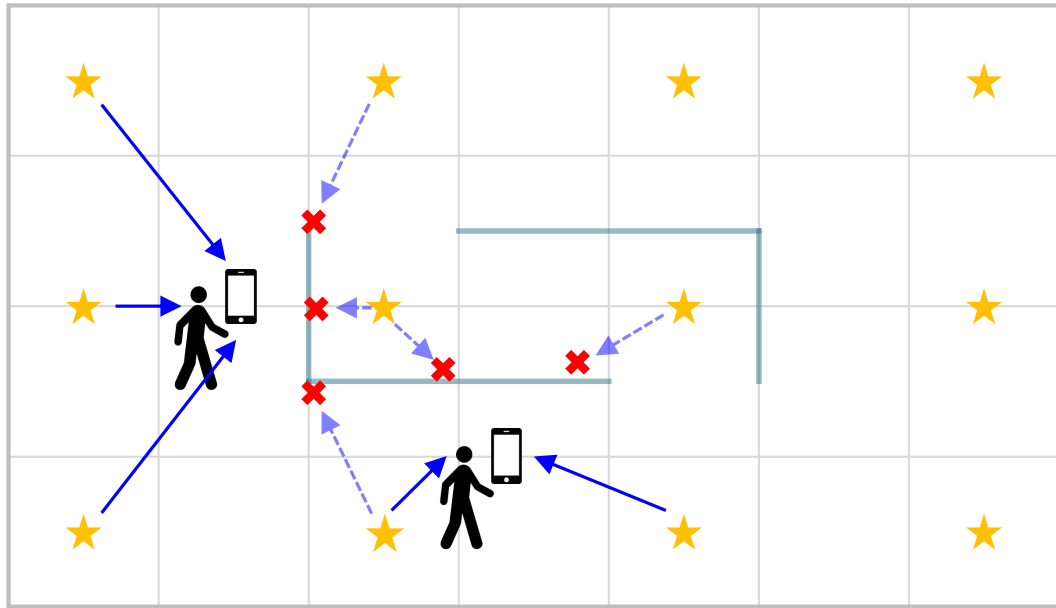
想定環境では、測位に用いることを前提としたビーコンを用意して設置するものとする。また、必要な測位精度を達成するために、ビーコンを高密度に配置することを目指す。具体的には、2 m から 6 m までの配置間隔を目安として、ビーコンを設置する数を多くすることを考える。

### 4.1.1. ビーコンの設置場所

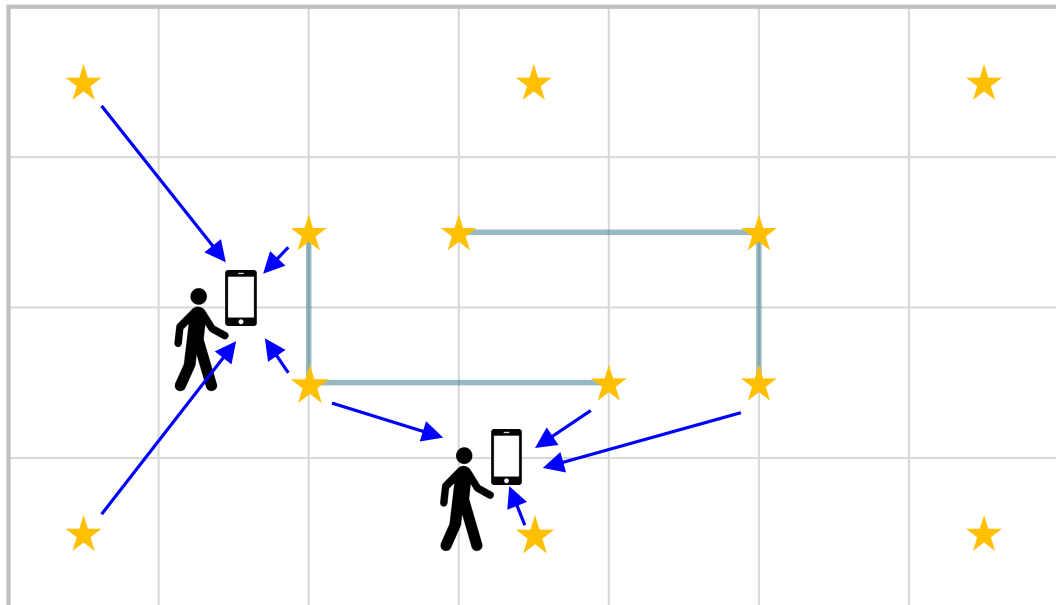
実用時の屋内環境では、外観上や屋内空間の管理上の問題によりビーコンの設置場所が制限を受けることも起こりうる。したがって、ビーコンの設置場所は取り付け可能な場所を優先して選ぶこととし、ビーコンの整然とした配置を実現することは目指さない。測位精度のために最適な配置形状ではなくなるが、ビーコンの数により測位精度を補うものとする。ビーコンの配置に対して GNSS における精度劣化度 (Dilution Of Precision: DOP) [2] を適用したときに、屋内空間の各測位地点で良好な DOP の値を示すことができるようにビーコンが配置される場合には、結果的に優れた測位精度の屋内測位を提供できると考えられる。

また、できるだけ見通し内の信号を受信できるように、人が滞在および通行できる空間に面した場所にビーコンを取り付ける。このことにより、図 4-1 に示すように、空間を通行する人以外の障害物によるビーコン信号の遮蔽が起きにくい状況を作り出す。

ビーコン信号を遮る障害物が何もない場合は、ビーコンを均等に配置するほうが、得られる測位精度を空間全体で均一化するために有利である。しかし、屋内空間に配置された物体が障害物になる場合は、図 4-1 (a) のように均等な配置を目指して設置すると、ビーコン信号の遮蔽が発生して測位精度に影響を与える場合が発生する。一方で図 4-1(b) のように、空間に面した場所へビーコンを設置すると、見通し内の信号を受信できるビーコンの数を増やすことができる。ビーコンを天井へ設置すると、混雑時の人体によるビーコン信号の遮蔽が起きにくくなると考えられるが、ビーコンの天井への設置は、多くの場合で人の手が届かない高い場所での作業をとまなうため、設置作業の効率の面で不利になると考えられる。そこで想定環境におけるビーコンの設置場所は、人の手が届く程度の高さの場所を基本とする。



(a) ビーコンを均等に配置する場合



(b) ビーコンを空間に面した場所に設置する場合

図 4-1 見通し内の信号を受信しやすくするためのビーコン配置

#### 4.1.2. ビーコンを設置する対象物

ビーコン設置作業を効率的に行うためには、ビーコンの取り付けやすさを優先して考える必要がある。そのため、小型で電源のための配線が不要なビーコンを用いる。またそのことによって、屋内のさまざまな物体を設置に利用することができ、設置場所を柔軟に選択できるようになる。利用する屋内空間に面して設置できるように、ビーコンの設置対象は主に屋内空間の形状を構成する物体とする。さらに、設置対象として移動可能な物体を積極的に利用することを考える。しかし、屋内測位に用いている間は、設置されたビーコンは静止しているものとする。

### 4.2. ビーコンの設置方法

#### 4.2.1. アンカビーコン

想定環境では、はじめにビーコンを設置し、続いてビーコンの位置座標を取得することで屋内測位環境を構築する。ビーコンの位置座標の推定に、現場の屋内空間で移動しながらビーコン信号を観測して取得した距離情報を用いる方法には、自律航法とビーコンに対する三点測位を組み合わせる手法や、**Range-Only SLAM** がある。これらはいずれも、単独で用いたときには、観測を行う移動体とビーコンの間の相対位置が得られるものである。したがって、絶対測位を行う手段がひとつもない状態で移動観測を行っても、設置されたビーコンの絶対位置を取得することができない。そこで、想定環境には事前に位置座標を取得したビーコンを低密度で配置しておく。本研究ではこれをアンカビーコンと呼ぶことにする。

絶対測位を行う手段を想定環境へ提供するには、空間に基準とする点を間隔を空けて配置し、その近傍で移動体が基準の点の位置座標を取得可能にすることが考えられる。基準の点に登録する位置座標の座標系は、緯度経度とする場合や用いる屋内地図の座標系とする場合などがある。基準の点の位置座標を得るための手段には、座標値が埋め込まれた QR コードを基準の点に設置して撮影する方法、近距離無線通信 (Near Field Communication: NFC) タグを用いる方法、GNSS 受信機で位置座標を含んだ航法メッセージを取得できる IMES 方式[80]を用いる方法などがある。想定環境では、この手段として基準の点にアンカビーコンを設置して用いることにする。

アンカビーコンどうしは、互いの電波の届く範囲が重ならない程度に離れて配置されているものとする。そのため、アンカビーコンのみを用いて測位を行うと、三点測位方式、位置指紋方式などの測位手法によらず十分な測位精度が得られない状況を想定する。アンカビーコンの座標の計測は屋内測位環境の構築時でもよいが、空間の構成を頻繁に変更する場合には、アンカビーコンを常設しておけば座標を計測する機会を減らすことができる。



## 4.2.2. 位置推定対象のビーコン

想定環境では、必要な測位精度を達成するために、アンカビーコンの間を埋めるような形でビーコンを追加して設置し、全体のビーコンの数を数倍に増やす。これらの追加されたビーコンが、位置座標を推定する対象のビーコンとなる。推定アルゴリズムにアンカビーコンの位置座標および距離情報を用いることで、残りのビーコンの絶対位置を推定することが可能になる。屋内測位を行うときには、アンカビーコンを含めた全体のビーコンを測位に利用する。

屋内測位環境を構築するとき、位置推定対象のビーコンを設置する手順は次の 2 通りの場合を考慮することができる。1 つめは、屋内空間のレイアウトを変更後の段階で、利用する空間に面した設置場所へビーコンを取り付けていく場合である。

2 つめは、空間のレイアウトを形成するために空間の区切りに使う物体を常に決めておき、空間の区切りの物体に事前にビーコンを取り付けておく場合である。物体の具体例にはパーティションボードや机、ロードコーンなどが挙げられる。このときのビーコンの設置は、ビーコンが取り付けられた区切りの物体を空間に配置すると同時に完了することになる。レイアウトの変更は、ビーコンが取り付けられた区切りの移動により実施されるが、このときにビーコンの配置も新たな屋内空間の形状に合わせた位置へと速やかに適応することができる。移動後もビーコンは利用する屋内空間に面して配置されていることで、見通し内の信号を受信しやすい状態を維持することができる。これによって、ビーコンの位置座標をあらためて取得する必要があるが、ビーコンの設置作業については効率的に行うことができる。

## 4.3. 具体的なビーコン規格の選定

### 4.3.1. Bluetooth Low Energy ビーコン

想定環境に設置するビーコンには、電源に配線せずに動作する小型のビーコンが求められることを 4.1.2 項で述べた。そこで、電源用に電池を内蔵することができ、それを用いて長時間連続して駆動できるような、低消費電力のビーコンが想定環境には適している。また、屋内測位の利用時やビーコン位置推定時にビーコン信号は途切れなく受信できる必要があるため、ビーコンは常に信号を発信し続ける必要がある。

本研究では、これらの必要事項を満たして想定環境を実現する具体的な手段として、Bluetooth 4.x 準拠の BLE ビーコンを利用する。BLE ビーコンは 2.1.2 項で述べたように、低消費電力のために内蔵電池を用いて数ヶ月以上連続して駆動することが可能であり、電源への配線を不要にできる。また、0.1 秒～数秒の間で信号の発信間隔を調整することがで

きる。さらに、汎用的で既に市場に多くの製品が投入されており、入手がしやすく、後発の規格に対して価格面の優位性があるため、屋内測位環境の構築に用いることが容易である。

BLEを利用したビーコンの規格の一つに2.1.2項で述べた iBeacon がある。iBeacon は Apple 社のスマートフォン向けオペレーションシステム(OS)である iOS でサポートされているが、市場シェアの高いもう一つのスマートフォン OS である Google 社の Android OS では BLE を利用するための組み込み関数が用意されている[81]。そこで、BLE ビーコンを用いて標準的なスマートフォンを対象にした屋内測位システムを開発できる環境は既に整っている。iBeacon では、ビーコン側は識別のための ID を BLE 規格の電波信号で発信し、端末側は受信した電波の強さによりビーコンからの距離を Immediate / Near / Far の 3 種類の識別子で判別する、近接検知方式を利用するのが主な使い方であるが、iBeacon を含む BLE ビーコンの信号は、ビーコンと受信機との距離に相関がある受信信号強度の情報を含んでいるため、これを利用して屋内測位をすることも可能である。

本研究では、スマートフォンで受信した BLE ビーコンの信号から、ビーコンの識別 ID と受信信号強度の情報を取得して、屋内測位およびビーコン位置推定に利用する。一方でビーコンの方向情報は、Bluetooth 4.x 準拠の BLE ビーコンの信号には含まれていないため、本研究では利用できないものとする。

2017年に発表された上位規格の Bluetooth Mesh[82]では、対応する機器によるメッシュネットワークの構築がサポートされ、対応機器どうしでの通信が可能となっている。しかし、先行した規格である Bluetooth 4.x 準拠の BLE ビーコンでは、ビーコンから受信機に向けたブロードキャストの片方向のみの信号伝達が想定されており、マルチホップ通信をサポートしていない。そこで、本研究ではビーコンどうしの通信は行われぬ前提とする。

ビーコンの信号発信の指向性について考えると、ビーコンの筐体が小型な場合には、ダイポールアンテナに準じた形式のアンテナが搭載されることが一般的である。アレイアンテナを搭載して無線信号の発信に指向性を持たせたり、到来方向の検知を可能にしたハードウェアは筐体の大型化を招く[83]。そこで本研究では、ビーコンから信号が方向に偏りなく放射されるものとし、ビーコンの周囲の測位対象は、ビーコンから見たときにどの方向に位置していても、信号を受信することによってビーコンとの距離の情報を得ることができるものとする。

#### 4.3.2. 電波伝搬モデルを用いた距離推定

本項では、BLE ビーコンを用いることを前提とした、スマートフォンとビーコンの間の距離を求めるために本研究で用いる方法について述べる。空間を伝搬する電波信号は、伝搬する距離により減衰する性質を持つ。電波信号の減衰特性を、受信信号強度と距離の関係式によりモデル化によることによって、受信信号強度を用いてスマートフォンとビーコンの

間の距離を求めることができる。障害物のない空間における電波の距離減衰のモデル[84]は Friis の伝達公式[85]を用いて次式のように表すことができる。

$$P_i = P_0 - 10\gamma \log_{10}(d_i/d_0) \quad (4-1)$$

ここで、 $P_i$ [dBm]は  $i$  番目のビーコンの受信信号強度、 $P_0$ はビーコンと受信機との距離が基準距離のときに計測される受信信号強度、 $\gamma$ は電波の減衰の度合いを表す空間伝搬係数、 $d_i$ はビーコンと受信機との距離、 $d_0$ は基準距離を表す。本研究では基準距離 $d_0$ を 1 m とする。

見通し内の信号を主に利用する場合には、空間に存在する物体による遮蔽や、反射によるマルチパスなどの影響が少なくなり、実際の空間で観測される受信信号強度に近い値を式(4-1)から求めることができると考えられる。本研究の想定環境では、4.1.1 項で述べたように、見通し内の信号を主に利用できるように対策を行なっていることから、本研究では電波伝搬モデルとして式(4-1)を用いる。図 4-2 において実線で示したものがこの場合の電波伝搬モデルの例になる。

一方で、障害物などによりビーコンの信号が遮蔽されると、信号強度の減衰が生じる。図 4-2 の点線は、受信機から 6 m の距離に障害物があることで、それより遠くにあるビーコンに対して信号強度が 3 dB 減衰するとした場合の電波伝搬モデルの例を示したものである。障害物によって遮蔽されたビーコンから届く信号は見通し外信号となり、見通し外信号を用いた距離の推定は信号の減衰の影響を考慮して行う必要がある。しかし、ビーコンが障害物の手前にある場合には、見通し内の信号に対する電波伝搬モデルを用いて距離の推定を行うことができる。

見通し外信号の影響を考慮すると、遮蔽物に関する項を追加することなどによって[86]、屋内環境に応じて変化するパラメータが含まれるために電波伝搬モデルは複雑化する。そこで本研究では、実際の屋内環境におけるパラメータ決定のための作業の簡素化をはかるために、電波伝搬モデルは遮蔽物などに関する変数を含めない単純な用いることとし、式(4-1)による単一の式で電波伝搬モデルを表現する。実際のビーコンの受信信号強度 $P_{real}$ は、電波伝搬モデルによる値と隔たりが生じるが、本研究ではこれを雑音 $\nu_{RSS}$ として扱い、 $\nu_{RSS}$ は加算性白色ガウス雑音と見なすことにする。

$$P_{real} = P_i + \nu_{RSS} \quad (4-2)$$

ビーコンの送信アンテナとスマートフォンの受信アンテナの利得は、実際には方向による偏りがあるが、本研究ではこれらを見なし、向きの違いに対してはパラメータの値は一定であるとして、単一の式による電波伝搬モデルを考える。

また、電波が伝搬する空間の状態によって、受信信号強度と距離の関係は変化し、式(4-1)においてパラメータ $P_0$ 、 $\gamma$ の値の違いとなって現れる。そこで、本研究では、屋内測位環境の構築に際して、現場の屋内環境でビーコン信号を測定して、事前に $P_0$ 、 $\gamma$ の値を決定してからビーコン位置推定を行う。決定されたパラメータはのちの屋内測位においても利用する。実際には、屋内測位環境の中で場所が異なれば最適な $P_0$ 、 $\gamma$ の値は変化するが、本研究では、測定作業の効率化を優先して、電波伝搬モデルを近似することを考え、現場の限られた数組の地点を選んでビーコン信号を測定し、1組の $P_0$ 、 $\gamma$ の値を対象とする屋内測位環境を代表するパラメータとして設定する。

ビーコンとスマートフォンの間の距離は、決定された電波伝搬モデルのパラメータを用いて式(4-1)の逆関数により求めることができる。観測した受信信号強度が $P_i$ であるときの距離は次式で与えられる。

$$d(P_i) = 10^{\left(\frac{P_0 - P_i}{10\gamma}\right)} \quad (4-3)$$

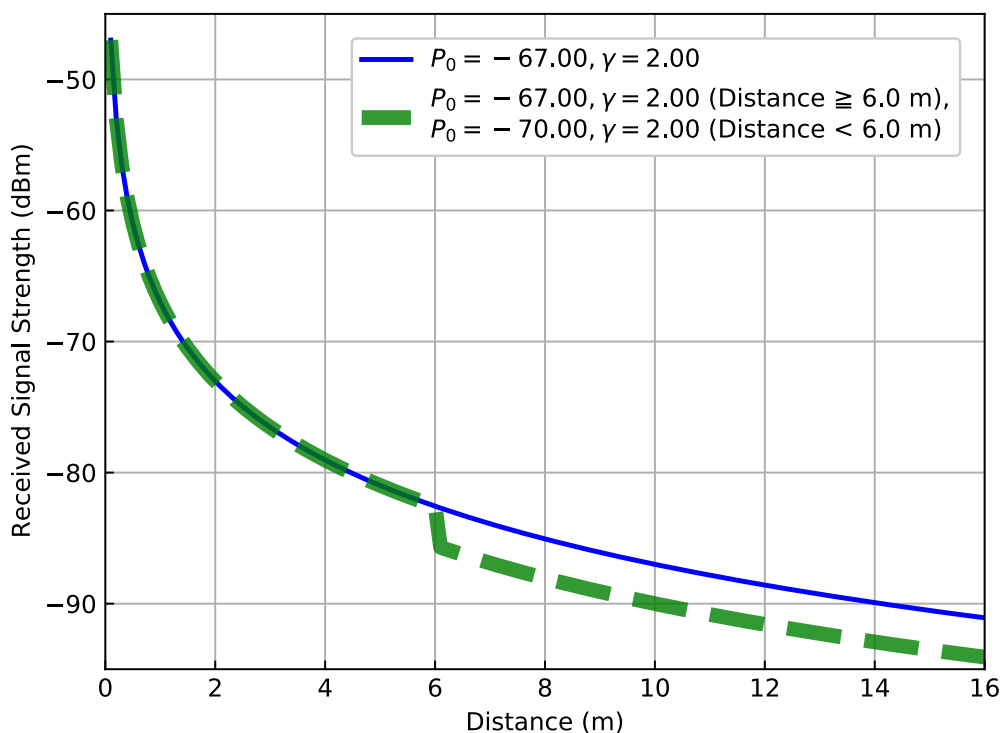


図 4-2 見通し内信号の場合と遮蔽が発生する場合の電波伝搬モデルの比較

### 4.3.3. 距離マスクの適用

式(4-1)を用いた電波伝搬モデルでは、図 4-2 に示されるように距離が遠いほど曲線の傾きが小さくなる。この場合、受信信号強度における同じ量の雑音 $v_{RSS}$ に対して発生する、ビーコンとの推定距離の誤差は大きくなることになる。また、障害物に遮られた場所のビーコンに対しては、見通し外の信号を受信することになり、式(4-1)を用いると推定距離の誤差が大きくなるが、このようなビーコンは必然的にスマートフォンから遠くに分布することになる。以上2点の理由から、式(4-1)により距離が遠くにあるビーコンの信号を用いて距離を求めると、推定された距離は大きな誤差を含むことになると考えられる。

そこで本研究では、スマートフォンからの距離が遠くにあると見なされるビーコンの信号は、ビーコン位置推定の精度に悪影響を及ぼすと考えられるため、ビーコン位置推定に用いないための対策を取る。具体的には、一定の閾値を下回る受信信号強度を示すビーコンの信号は、受信されなかったものと見なして推定アルゴリズムでは利用しない。本研究ではこれを距離マスクと呼ぶことにする。距離マスクの概念を図 4-3 に示す。図 4-3 では、スマートフォンを中心とした一定の半径の円内に存在するビーコンの観測信号のみを推定アルゴリズムで利用することを表している。観測された受信信号強度に含まれる雑音によって、推定アルゴリズムから除外されるビーコンは、スマートフォンからの実際の距離が一定ではなく、雑音の大きさによって変化することになる。本研究では、受信信号強度の観測結果に対する閾値を用いた方法により、判定を簡易的に行う。

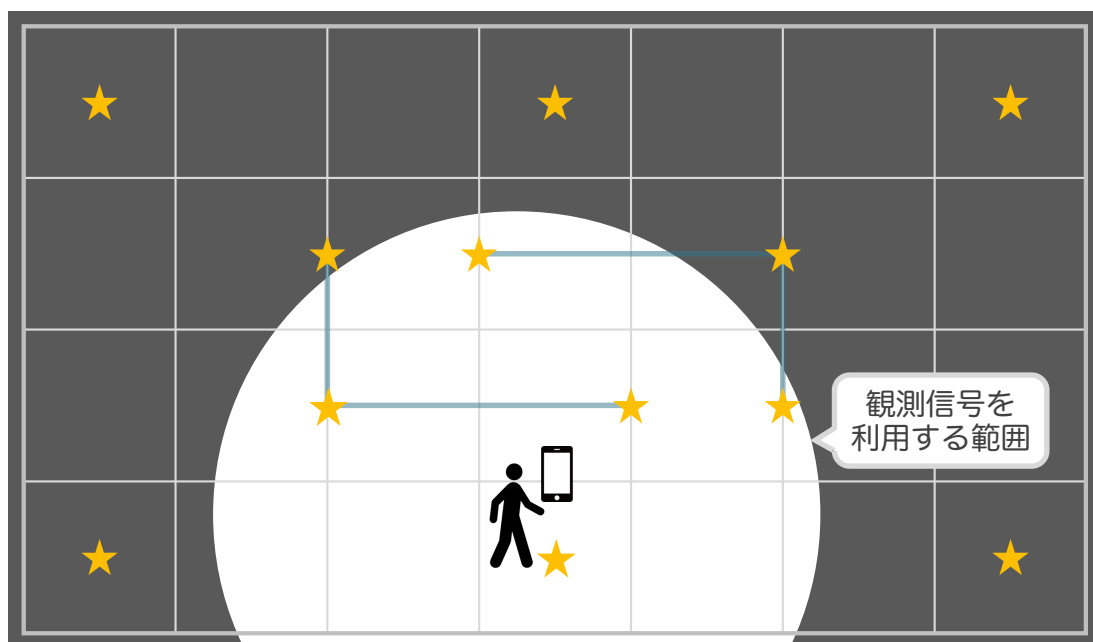


図 4-3 距離マスクの概念図

## 4.4. ビーコン信号の観測方法

### 4.4.1. スマートフォンを持つ歩行者によるビーコン信号の観測

本研究では、ビーコンの位置座標を取得するために実施する作業を、短時間で容易に実行可能なものにするため、ビーコンの位置推定に、現場の屋内空間でビーコン信号を受信して取得した距離情報を用いる手法に着目する。多くの人が利用できる屋内測位環境を構築することを優先するために、汎用的で普及が進んでいる、いわゆる「枯れた」技術の規格のビーコンを本研究で用いることを前節で述べた。これにより、第3章で挙げた発信機の位置座標を取得するための手法のうち、本研究で利用できる候補は限定されることになる。本研究で用いる規格の BLE ビーコンでは、ビーコンどうしの通信をサポートしていないため、無線通信によってビーコンの間隔を計測し収集することで一括してビーコンの位置座標を求める手法は利用することができない。そこで、3.1.2 項の手法は選択肢から外れることになる。

ビーコンどうしが通信しなくても、ビーコン信号の受信機が移動すれば、すべてのビーコンに対して信号を観測し距離情報を収集することが可能である。本研究では、広く普及した手配がしやすい道具によって手法を実現するために、ビーコン信号を観測する移動体としてスマートフォンを利用する。すなわち、構築した屋内測位環境が測位対象にする機器と同種のを、ビーコンの位置座標を取得する作業にも利用するということになる。

現場の屋内空間におけるビーコン信号の観測は次のように行う。スマートフォンを所持した人は、ビーコン信号を受信するためのアプリケーションを起動した状態で歩行し、図 4-4 に示すように、位置推定対象のすべてのビーコンの近傍を通過するような経路で移動する。この間に、位置推定を補正する絶対位置座標を得るために適切な頻度で、アンカビーコンの近傍も通過することになる。スマートフォンはこれらのビーコンの信号を観測し、ビーコンとの距離情報を取得してビーコンの位置推定に利用する。歩行による観測中は、ビーコンは静止しているものとする。歩行経路については大まかな方針を持って、観測者の判断をともないながら決めるものとするが、精密に定められた軌跡を歩行する必要はないものとする。また、その歩行経路の座標は事前に計測する必要がない。歩行中のスマートフォンの持ち方に関しては、向きを限定する、あるいは決められた箇所に固定するなどの制約は課さないことを考える。

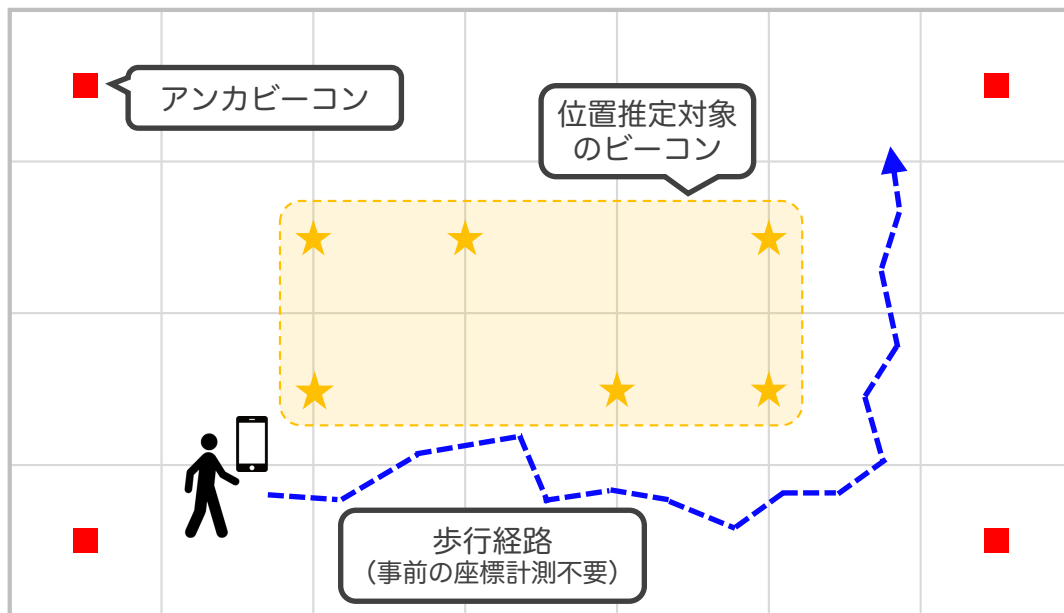


図 4-4 想定環境における観測データの収集

#### 4.4.2. Range-Only SLAM を用いたビーコン位置推定

歩行観測によりスマートフォン上で取得した距離情報を用いてビーコン位置座標を推定する方法は、スマートフォンの位置を追跡する方法によってアルゴリズムが異なる。大別すると、Range-Only SLAM による手法と、移動軌跡を測定する他の手段を用意する手法がある。後者は 3.1.3 項で示した手法のことであり、移動軌跡から三点測位などでビーコンの位置座標を求める。移動軌跡を測定する手段として、スマートフォンの自蔵センサを用いた歩行者自律航法と、単眼カメラを用いた推測航法の 2 つを取り上げ、これらの 3 つの手法の比較を表 4-1 に示す。

まず、端末の持ち方に関して比較すると、歩行者自律航法では、想定される持ち方に合わせて推定アルゴリズムを最適化している場合、実装した推定アルゴリズムに応じた端末の持ち方を歩行観測中に維持することが求められる。また同様の理由で、歩行者自律航法では歩き方にも一定の決まりに沿うことが必要になる。単眼カメラを用いた推測航法は、移動時に周囲の環境をカメラで連続して撮影し、各画像内に共通して写る物体を基準にして移動体の軌跡を推定するものである。用いる推定アルゴリズムには Visual Odometry [87] などが知られている。カメラで撮像を行うことから、端末を周囲に向けてかざすように持って移動する必要がある。これらに対し、Range-Only SLAM を用いる場合は、歩行観測者によるビーコン信号の遮蔽が影響を及ぼす懸念があることがリスクとなるが、基本としては自然に端末を利用するときの持ち方によって歩行観測をすることができる。

表 4-1 ビーコンの位置座標を取得する方法の比較検討

項目	Range-Only SLAM	歩行者自律航法 + 三点測位方式	単眼カメラによる 推測航法 + 三点測位方式
歩行観測者の 端末の持ち方	自然に端末を利用 するときの持ち方 が許容される	推定アルゴリズム によって持ち方が 制限される	周囲環境を連続して 撮像するための 持ち方が必要になる
推定に用いる センサ	BLE 受信機	BLE 受信機 自蔵センサ	BLE 受信機 単眼カメラ

次に、推定に利用するスマートフォン上のセンサを比較すると、BLE 受信機の他に利用するセンサの有無が焦点になる。歩行者自律航法では、加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサなどの自蔵センサを、単眼カメラを用いた推測航法ではカメラを必要とする。用いるセンサの種類が増えることは、利用するスマートフォンの多機種化に対応する場合において、推定アルゴリズムの調整が複雑化するリスクがある。一方で、Range-Only SLAM では、BLE 信号の受信特性のみに対して調整ができればよい。

上記の利点を実現できる可能性がありながらも、ビーコン位置推定の目的において、Range-Only SLAM が他の 2 つの手法に対して決定的に優位にあるわけではない。しかし、Range-Only SLAM と、歩行者自律航法または単眼カメラによる推測航法を結合したハイブリッド手法を想定することで、推定精度の向上を目指すこともできる。あるいは、Range-Only SLAM のなかでも、距離情報のみを用いた SLAM を実現すれば、歩行者の軌跡を測定する他の手段を用意する必要がなくなり、ビーコン位置座標を取得するための作業の簡素化につなげることができる。これらの観点を、Range-Only SLAM を用いた手法の性能向上に取り組み意義として挙げるができる。

以上の検討に基づいて、本研究では、ビーコン位置推定の方法に Range-Only SLAM を選定し、第 3 章で示した課題である、距離情報のみを用いて短時間の観測で位置推定結果が得られる Range-Only SLAM の実現に取り組む。



# 第5章 短時間の観測による計算負荷が 軽量なビーコン位置推定手法の 提案

---

本章では、第4章で示した屋内測位環境の構築において利用する、距離情報のみを用いたSLAMによるビーコン位置推定手法を提案する。提案手法は、方向を検知するセンサを用いずに推定を行うことから **Range-Only SLAM** の一種となる。5.1節では、複数仮説追跡を用いることで、距離情報のみを用いて移動体の軌跡とビーコンの位置を同時推定する方法と、この方法において必要になる計算量の問題について述べる。5.2節でビーコンの間隔情報を利用して計算量を削減する方法について述べ、5.3節で提案手法で用いる推定アルゴリズムの全体を示す。

---

## 5.1. 複数仮説追跡を用いた Range-Only SLAM

### 5.1.1. 位置推定対象のビーコンを用いた移動体の軌跡推定

本章では、スマートフォンは移動体の具体的な一つの場合として考え、提案する手法の説明を、移動体とビーコンが同時推定の対象であると見なして進める。SLAMにおいて、移動体に対するビーコンの距離と方向の情報が利用できる場合には、位置座標の推定対象のビーコンが静止していればこれを用いることでも移動体の相対的な軌跡の推定が可能である。しかし、方向情報を用いない Range-Only SLAM で、なおかつ自律航法も用いず距離情報のみが利用可能な場合は、単一の位置推定対象のビーコンでは移動体の軌跡を推定することができない。

ここで、ビーコンを検出したときに距離の推定精度が高ければ、ビーコンの推定位置を同心円状の混合ガウス分布で表現すると、一部の推定位置の候補が真値に近くなることに着目する。さらに、複数のビーコンが検出されている段階において、それぞれのビーコンから推定位置の候補を一つずつ選んで組を作り、これを仮説とすることを考える。このとき、作ることが可能なすべての仮説の中で、各ビーコンの推定位置がいずれも真値に近い仮説が存在するはずである。この仮説における 1 組の推定位置によって初期化された推定フィルタは、移動体の位置推定精度を良好に保って追跡することが期待できる。

### 5.1.2. 仮説の生成と追跡の過程

提案手法では、移動体の位置座標と、検出されているすべての推定対象のビーコンの位置座標から状態ベクトルを構成する。その上で、異なる初期値を持つ複数の仮説を用意し、移動体が観測したビーコンの受信信号強度を用いて、それぞれの仮説において個別に状態ベクトルを推定する複数仮説追跡 (Multiple Hypotheses Tracking: MHT) [88]を行う。時刻ステップごとに、観測値と仮説ごとの推定値を用いて求める尤度によって各仮説は重み付けされる。さらに、各仮説の推定値の加重平均を求めたものを位置推定の出力とすることで、全体として Range-Only SLAM を実現する。複数仮説追跡は、特徴点と観測データの対応関係が不明な場合に、対応関係の複数の仮説を追跡し比較することで対応関係を判別する手法 [9]としてよく知られているが、提案手法では、異なる位置を表す複数の仮説を追跡して、尤度の高い仮説から位置推定結果を得る過程に応用する。

追跡する対象の仮説は次のようにして生成される。あるビーコンが検出されたとき、観測した距離を用いて、2次元平面上でビーコンの推定位置を同心円状の混合ガウス分布で表現し、移動体の位置を中心として図 5-1 に示すように円周上に  $N_c$  個の推定位置の候補を考える。次に、それまでに存在している仮説のそれぞれを  $N_c$  個に複製し、推定位置の候補を各

仮説の状態ベクトルに追加することで検出されたビーコン位置を初期化する．また，絶対位置座標の推定のために，移動体がアンカビーコンを初めて検出したとき，同様にアンカビーコンの位置を中心として円周上に  $N_c$  個の移動体の推定位置の候補を考え，仮説を複製するとともに各仮説の状態ベクトル推定値を与えられた移動体の推定位置に合わせて修正する．

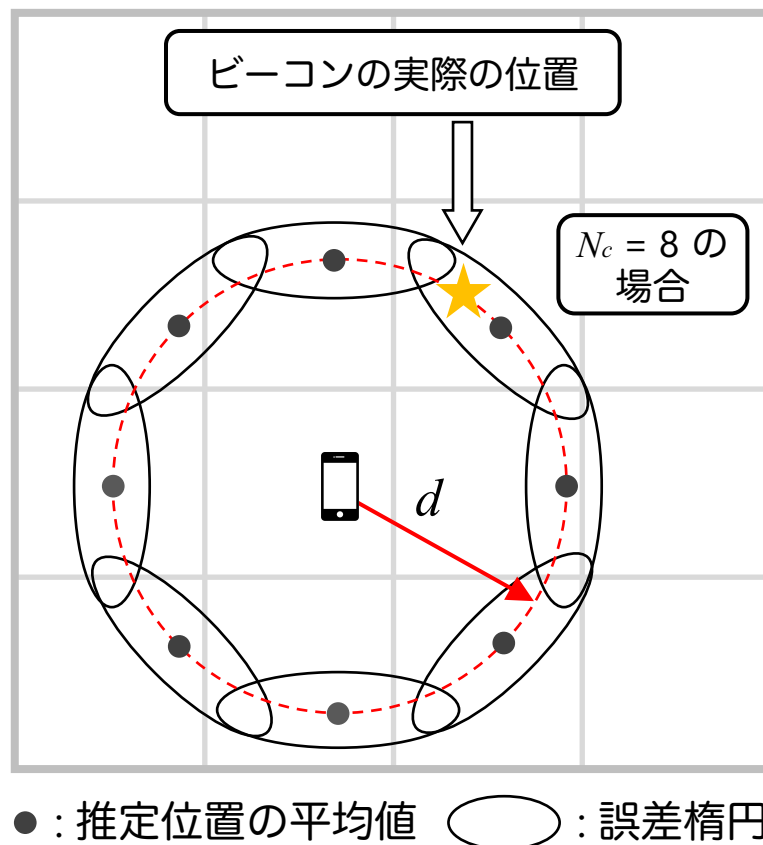
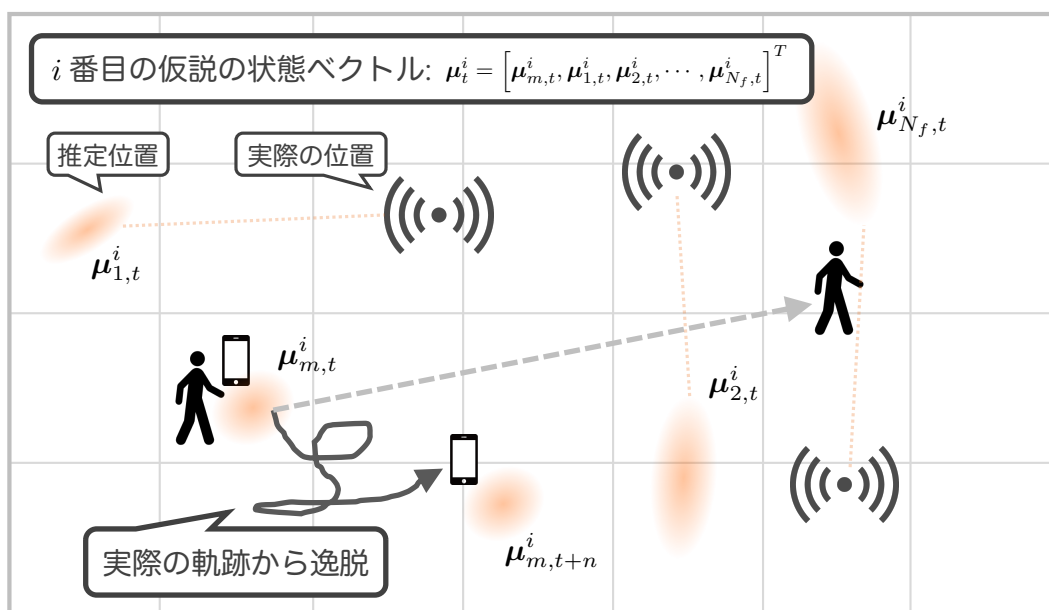


図 5-1 検出時のビーコンの推定位置の候補

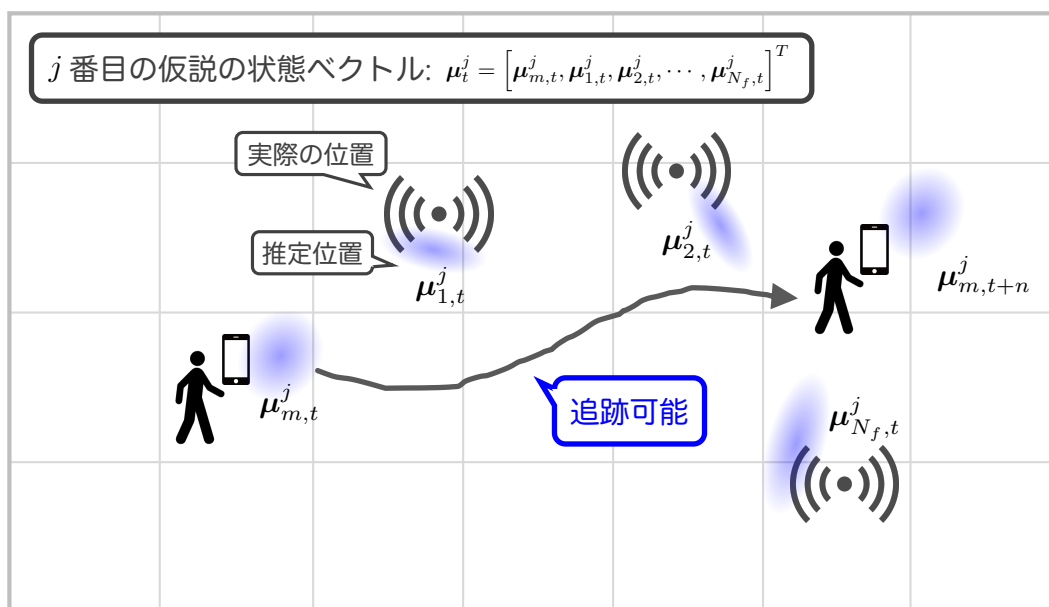
このようにして生成された仮説は，状態ベクトルにおけるビーコンの推定位置の違いにより異なる軌跡で移動体の位置を追跡することができる．図 5-2(a)に示すように，各ビーコンの推定位置が真値と大きく異なる仮説では移動体の軌跡推定精度は低くなるが，全仮説のうち一部において図 5-2(b)のような各推定位置が真値に近い仮説が存在し，これらの仮説において推定フィルタが移動体の軌跡推定精度を良好に保つことができるようになることで，短時間の観測で十分なビーコンの位置推定精度に達することができる．さらに，このような仮説は，尤度が他の仮説よりも高くなる傾向にあり，推定の進行にしたがって大きな重みを持つようになる．

位置推定精度が低い仮説は重みが小さくなる傾向にある．推定フィルタの更新ステップの後，仮説の重みを比較し，相対的に重みが小さい仮説に対して以降の追跡を停止する．ま

た、仮説間で推定位置を比較し、各ビーコンと移動体の推定位置が一定の距離まで接近した仮説を統合する。これらの処理は枝刈り (Puning) とも呼ばれる[70], [78]。このことにより、推定の進行にともなって追跡する仮説の数を絞り込む。絞り込みが速やかに進み、生き残った仮説から位置推定の出力を得ることで、推定結果を得るための観測時間が短くなる。



(a) 各ビーコンの推定位置が真値と大きく異なる仮説



(b) 各ビーコンの推定位置が真値に近い仮説が

図 5-2 複数仮説追跡を用いた Range-Only SLAM における移動体の軌跡推定

### 5.1.3. 仮説数増加の問題

前項の過程により仮説が生成されると、推定アルゴリズム全体の仮説の数は、推定対象のビーコンが検出されるごとに  $N_c$  倍になるため、推定対象のビーコンが連続して検出される場合には、仮説の数は指数関数的に増加し、計算量の増加を招いてしまう問題がある。図 5-3 において、複数仮説追跡を用いることで推定アルゴリズムは少ない時刻ステップで推定結果を得ることが可能になるが、位置推定の出力  $\mathbf{x}_t$  をリアルタイムに求めるためには、次の時刻ステップまでの間に各仮説の推定フィルタの計算が完了している必要があるため、追跡する仮説の数は少なくする必要がある。計算を継続する仮説数は絞り込みによって削減されるものの、ビーコンが検出されてから、増加した仮説の推定位置や重みが変化し、それともなって絞り込み処理が働き出すまでには時間差があるため、仮説の絞り込み処理では計算量の問題を完全に解決することができない。

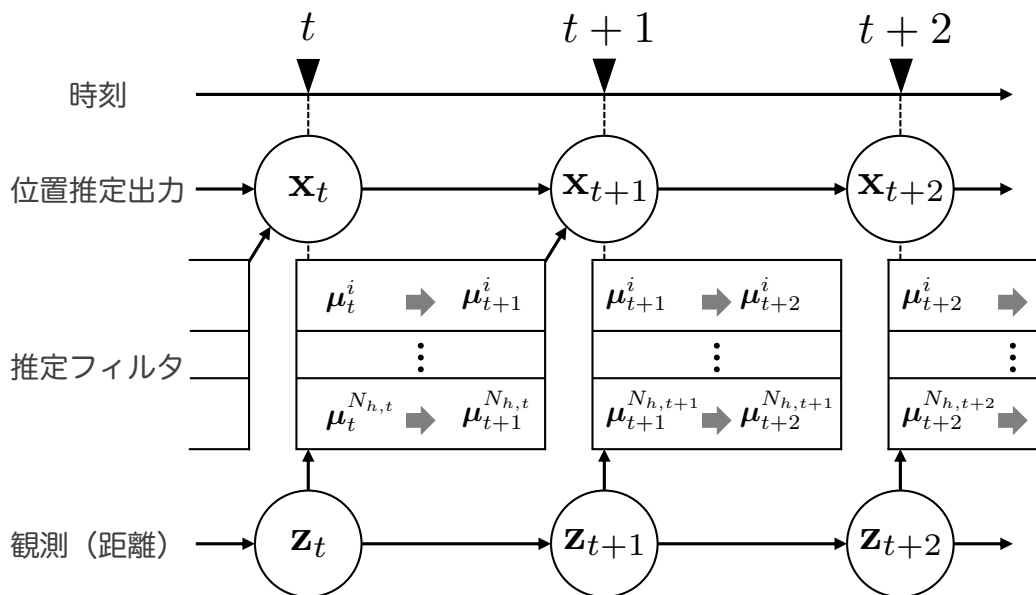


図 5-3 時刻ステップごとの各推定フィルタにおける演算の実行イメージ

移動体の位置を追跡する能力が高い、ビーコンの推定位置が真値に近い仮説は、初期化に用いる混合ガウス分布において、推定位置の候補の密度を高くすることで生成されやすくなる。推定位置の候補が一定の密度を超えて存在すると、推定アルゴリズム全体としての観測時間の短縮効果は実質的に頭打ちになると考えられるが、それ以下の密度の範囲では、観測時間の短縮効果と全体の仮説の生成数は相反する関係を示すことになる。前述の過程では、推定位置の候補の密度は  $N_c$  によって決まるため、ある程度まで大きな  $N_c$  の値を用いる必要がある。したがって、計算量の観点から、仮説の生成数をさらに抑制できるための対策を、仮説の絞り込み処理以外にも考える必要がある。

## 5.2. ビーコンの間隔情報を利用した仮説数の削減方法

### 5.2.1. ツインビーコンの設置

推定アルゴリズムの計算負荷を軽減させるためには、生成される仮説の数を減らしながら、移動体の位置を追跡する能力が高い仮説が生成される状態を維持する必要がある。生成される仮説の数を減らす方法には、3次元空間における推定では3.2.4節で紹介した方法があるが、この方法は2次元平面上の仮説生成に対して応用することができない。そこで提案手法では、2次元平面上において、推定位置の候補を実際の推定対象の位置に近いところに配置しつつ、候補の密度を低くすることを考える。

そこで提案手法では、間隔が判明している2個のビーコンを1組としたものを考え、これを位置推定対象のビーコンとして設置することを考える。本研究ではこの2個1組のビーコンをツインビーコンと呼ぶことにする。ツインビーコンでは2個とも絶対位置座標については事前には不明であり、間隔が既知という点を除いては通常のビーコンと変わらない。間隔の情報は、推定アルゴリズムにおいて利用できるものとし、2つめのビーコンが検出されたときに、考えられる推定位置に制約を与えることで仮説の生成数を低減させる。

ビーコンの間隔情報は事前は何らかの方法で入手しておくことになるが、たとえば、運用として机やパーティションボード、看板などの移動可能な物体の両端にビーコンを取り付けることを想定する。このようにすれば、ビーコンを取り付けた物体の寸法の情報を利用するか、あるいは物体の幅を計測することでツインビーコンの間隔を事前に取得することができる。

### 5.2.2. ツインビーコンにおける仮説の生成過程

ツインビーコンに対する仮説の生成は次の過程による。1組のツインビーコンのうち、先に検出されたものをプライマリビーコン、後から検出されたものをセカンダリビーコンと呼ぶことにする。

まず、プライマリビーコンが検出されると、推定位置の候補を2次元平面上で円周上の異なる位置に $N_c$ 個配置し、すでに存在している仮説を複製して各仮説の状態ベクトルに推定位置の候補を追加し、プライマリビーコンを初期化する。

次に、セカンダリビーコンが検出されると、仮説の移動体とプライマリビーコンの推定位置、観測されたセカンダリビーコンの距離情報、既知のビーコンの間隔情報をもとにして、図5-4に示すような2つの円の交点付近にセカンダリビーコンの推定位置の候補を考えることができる。そこで、それまでに存在する仮説のそれぞれから複製を作り、2通りの位置

でセカンダリビーコンを初期化した 2 つの仮説にする。観測された距離情報の誤差が大きく、2 つの円が交わらない場合には、推定位置の候補を見つけることができないため、次回以降の観測機会までセカンダリビーコンの初期化を保留する。

プライマリビーコンを検出する際に、推定位置の候補の数  $N_c$  に上限を設けると同時に距離マスクを設定すれば、隣接する候補どうしの距離を生成時点において一定値以内に抑えることができるため、仮説のうちのどれかが真値に近い状態が作りやすくとともに、大きな  $N_c$  の値を使わずに済むようになる。

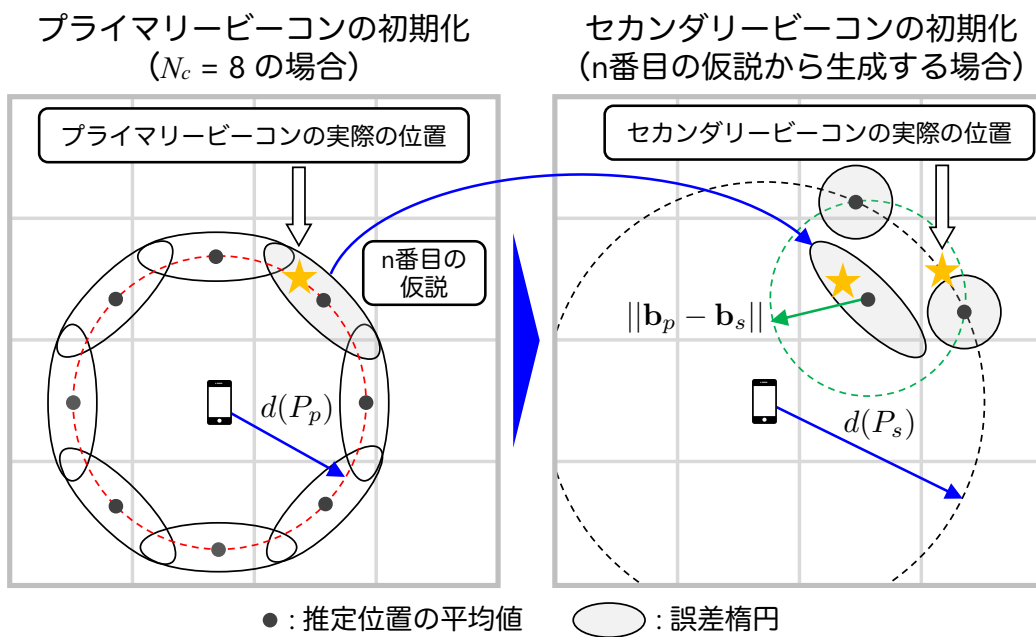


図 5-4 1 組のツインビーコンにおける仮説の生成

### 5.2.3. ツインビーコンの間隔

本項では、屋内空間に設置するときのツインビーコンの間隔の範囲について検討を行う。推定アルゴリズムにおいて、1 組のビーコンのうち片方だけが位置推定に使われている状態では、ツインビーコンが推定精度の向上に寄与する度合いが下がってしまう。そこで、実用的なツインビーコンの間隔の値は、4.3.3 項で述べた距離マスクに関連して決まることになる。

ここで、距離マスクの半径が  $r_{mask}$  のとき、移動体がビーコンどうしを結んだ線と並行に移動するものとして、ツインビーコンの間隔を図 5-5 に示すように定義する場合を考える。このときビーコンは距離マスクが作る円の弦の上にあるときに位置推定に使われることになる。

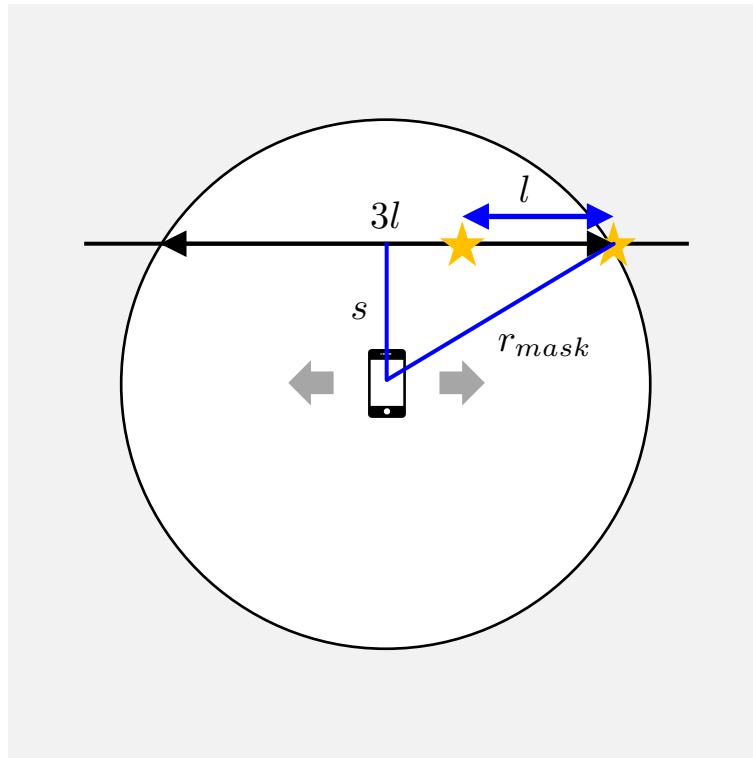


図 5-5 距離マスクの半径とツインビーコンの間隔の関係

ツインビーコンの間隔がこの弦の長さの  $1/3$  のとき、移動体がツインビーコンの近傍を通過するときに、十分に長い時間、推定アルゴリズムが 1 組のビーコンの両方とも利用している状態になると考えられる。このとき、移動体と弦との距離を  $s$ 、ツインビーコンの間隔を  $l$  と置くと、弦の長さは  $3l$  となる。また、ツインビーコンの間隔  $l$  は次式で表すことができる。

$$l = \frac{2}{3} \sqrt{r_{mask}^2 - s^2} \quad (5-1)$$

式(5-1)から求めた、移動体と弦の距離  $s$  とツインビーコンの間隔  $l$  の関係を図 5-6 に示す。距離マスクの半径は  $r_{mask} = 5.0 \text{ m}$  と  $r_{mask} = 10.0 \text{ m}$  の 2 通りの場合とした。  $s$  の値の範囲は、  $1.0 \leq s \leq r_{mask} - 1.0 \text{ (m)}$  とすることで、ツインビーコンに極端に近いところを移動体が通過する場合と、ツインビーコンが距離マスクの縁をかすめるように移動体が通過する場合が除外されるようにした。図 5-6 において、  $l$  の値は 2 つの曲線全体で  $2 \text{ m}$  から  $6.6 \text{ m}$  の範囲に分布していることから、ツインビーコンの間隔は、  $2 \text{ m}$  から  $6 \text{ m}$  までの間で、実際の屋内空間において移動体がビーコンに近づく距離や、用いる距離マスクの半径の値に応じて設定することがふさわしいと考えることができる。



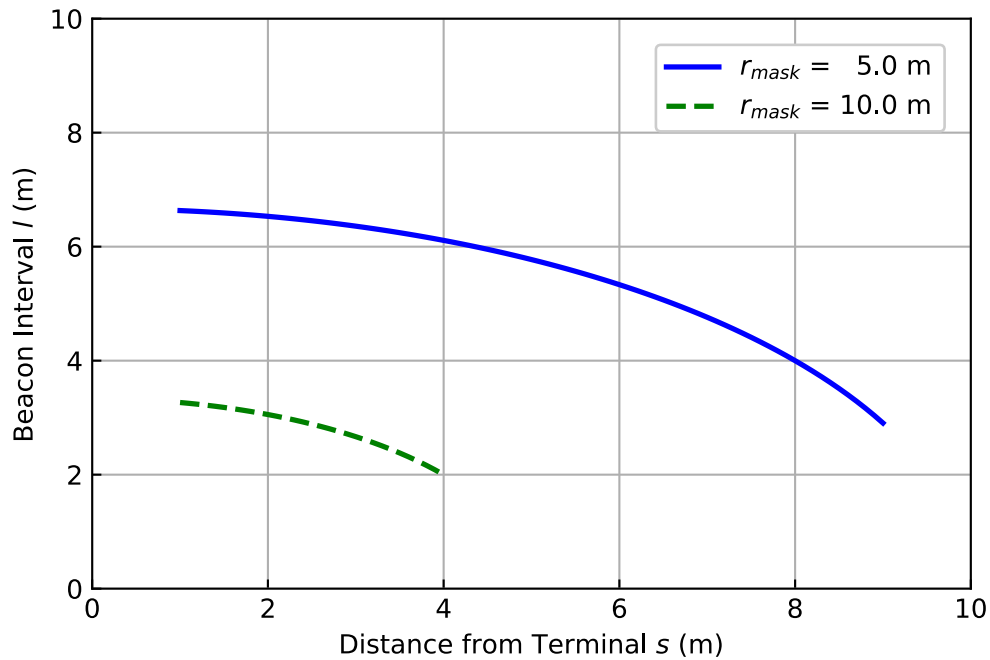


図 5-6 弦と移動体の距離  $s$  とツインビーコンの間隔  $l$  の関係

#### 5.2.4. ツインビーコンによる仮説数の削減効果

本項では、ツインビーコンを用いる場合と用いない場合のそれぞれにおける、推定の過程の中で生成される仮説の総数の分析を行う。推定対象のビーコンの個数を  $N_f$  個として、ツインビーコンを用いる場合は  $N_f$  個のすべてがツインビーコンであるとする。

ツインビーコンを用いない場合は、すべてのビーコンが対を作らずに散在している状態であり、ビーコン間距離の制約を考えないため、移動体とそれぞれのビーコンの全てにおいて円周上に  $N_c$  個の推定位置の候補を考える必要がある。このとき、生成される仮説の総数は  $N_c^{(N_f+1)}$  となる。一方、ツインビーコンを用いる場合は、 $N_f/2$  対のツインビーコンが存在することになる。一对のツインビーコンが検出されると仮説数はそれまでの  $2N_c$  倍になり、生成される仮説の総数は  $N_c \cdot (2N_c)^{N_f/2}$  となる。生成される仮説数は、 $N_c \geq 3$ ,  $N_f \geq 2$  において、ツインビーコンを用いる場合が常にツインビーコンを用いない場合を下回る。

$N_c = 8$  としたときの、生成される仮説数の比較を図 5-7 に示す。ツインビーコンを用いる場合は、ビーコン数が偶数個の場合のみ示される。

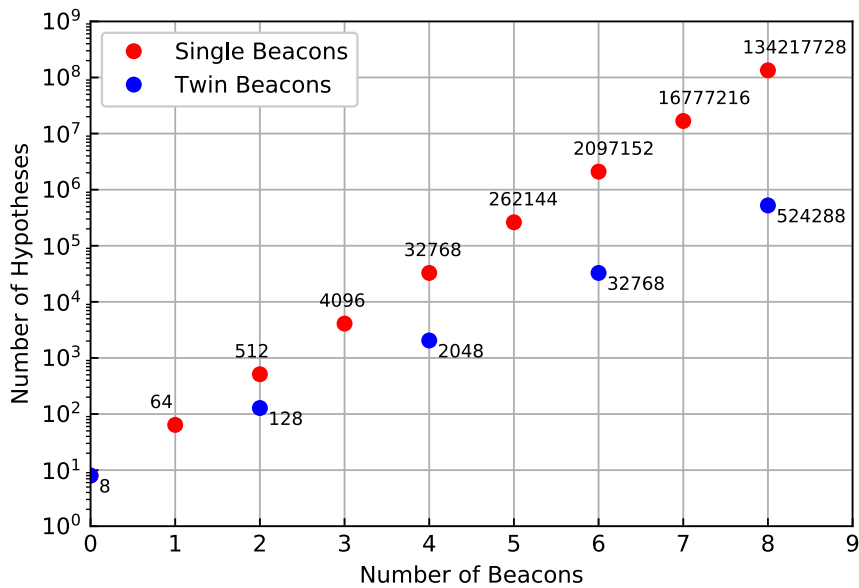


図 5-7 生成される仮説数の比較

推定の進行中に計算処理の対象となる仮説数は、仮説の絞り込みによって減少する。は上限の値であり、そこで、すべての推定対象のビーコンが同時に検出されない限りは計算処理の対象の仮説が図 5-7 に示す数に達することは稀である。しかし、推定対象のビーコンが数個程度のときでも、実質的に多くの仮説が生成されることがわかる。位置推定対象のビーコンが 8 個のとき、ツインビーコンを用いる場合の仮説の生成数は、用いない場合に対して 1/256 になり、ビーコン間隔の情報を用いることによって、検出されるビーコン数の増加とともに仮説数の増加を緩和できることがわかる。

#### 5.2.5. 推定アルゴリズムにおけるビーコンの同時利用個数

本項では、推定アルゴリズムにおいて同時に位置推定に使われるビーコンの個数について分析する。移動体が同時に観測可能なビーコンが分布する範囲は、距離マスクによって制限されるが、ビーコンは互いにある程度離れて配置されるため、推定アルゴリズムで同時に利用されるビーコンの個数はある程度以上は増加しないと考えられる。一例として、ビーコンが互いに距離マスクの半径の 1/3 の間隔で配置されている場合を考えると、移動体が同時に観測可能なビーコンが分布する範囲は、六角形とその中心に配置された 7 個のビーコンで覆うことができる。したがって、推定アルゴリズムで同時に利用されるビーコンの個数は 6 個から 8 個程度になると考えられる。また、推定中の計算対象の仮説数は、このビーコン数に応じて生成される仮説数が実質的な上限の値となる。仮説の絞り込み処理が働くため、推定開始からしばらくの間に仮説数が最大値になると考えられるためである。

### 5.3. 推定アルゴリズム

提案手法において移動体とビーコンの位置を同時推定するアルゴリズムを以下において説明する。アルゴリズム全体の流れを図 5-8 に示す。推定アルゴリズムは、各仮説に対して個別に拡張カルマンフィルタ（Extended Kalman Filter: EKF）を用意する。移動体が観測したビーコンの受信信号強度を入力として、受信信号強度の観測ごとに、各仮説で状態ベクトルの推定を行い、重みを更新した上で仮説の絞り込み処理を行う。また、必要に応じて仮説の生成と初期化を行う。

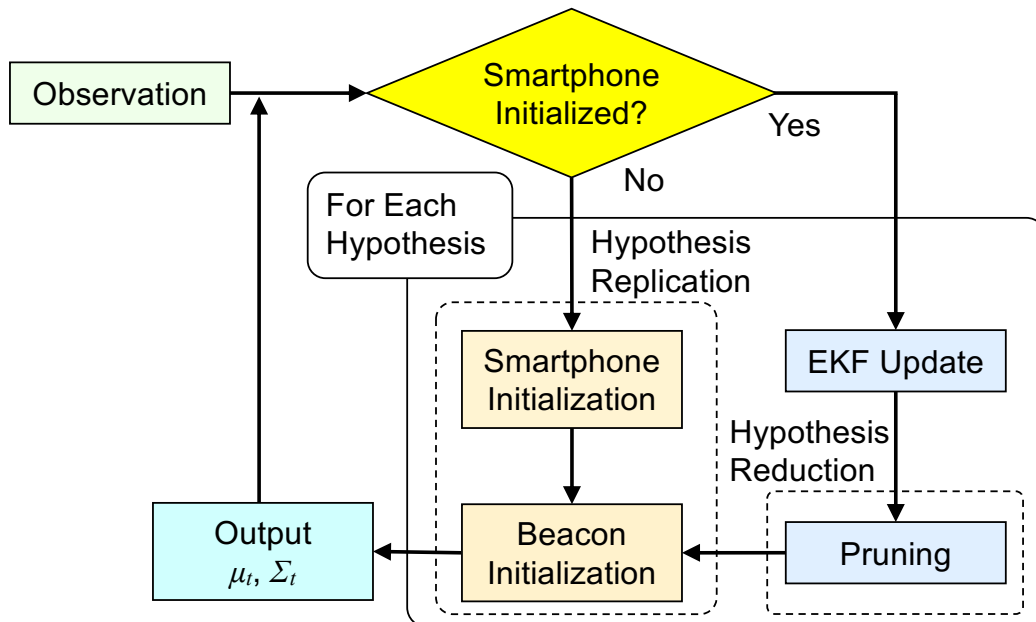


図 5-8 提案手法における推定処理のフローチャート

提案手法は 2 次元平面上の座標の出力を得ることを最終的な目標とするが、ビーコンと移動体、またはビーコンどうしが異なる高さにある場合に対応するため、移動体が収集した受信信号強度データを用いて 3 次元空間の位置座標を推定した上で、水平面上の成分を位置推定の出力とする。

本研究で用いる BLE ビーコンでは、ビーコン送信パケットに UUID, Major, Minor の情報が含まれているため、受信した観測データに対する送信元の個体識別が可能である。そこで提案手法の推定アルゴリズムは、受信信号強度のデータとビーコンの対応付けは、観測した情報によって解決できることを前提とする。

### 5.3.1. 状態ベクトルと仮説の表現

時刻  $t$  の状態ベクトル  $\mathbf{x}_t$  は、移動体と、検出されている推定対象のビーコンの 3 次元位置座標で構成され、以下のように表される。

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{m,t} \\ \mathbf{b}_f \end{bmatrix} = [\mathbf{x}_{m,t}, \mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_{N_f}] \quad (5-2)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{m,t} = [x_t, y_t, z_t]^T$  は移動体の位置座標、 $\mathbf{b}_b = [x_b, y_b, z_b]^T$  は  $b$  番目のビーコンの位置座標、 $N_f$  は推定中のビーコンの個数を表す。また、鉛直方向を  $z$  軸とする。

時刻  $t$  における  $i$  番目の仮説は、移動体と推定中のビーコンの推定位置を、平均  $\boldsymbol{\mu}_t^i$  と分散  $\boldsymbol{\Sigma}_t^i$  を持つガウス分布で表わしたものである。このとき、状態ベクトルの事後推定値  $\hat{\mathbf{x}}_t$  は、各仮説を  $w_t^i$  で重み付けした次式の混合ガウス分布で表現される。

$$p(\hat{\mathbf{x}}_t) = \sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^i \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_t^i, \boldsymbol{\Sigma}_t^i) \quad (5-3)$$

ここで、 $0 \leq w_t^i \leq 1$  かつ  $\sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^i = 1$  であるとする。また、 $N_{h,t}$  は仮説の総数を表す。

### 5.3.2. 推定フィルタの初期化

#### 5.3.2.1. 移動体

推定アルゴリズムが開始して最初のアンカビーコンを移動体が検出すると、仮説の状態ベクトル推定値に絶対位置座標が与えられる。 $a$  番目のアンカビーコン  $\mathbf{b}_a = [x_a, y_a, z_a]^T$  が最初に検出され、その受信信号強度の値が  $P_{a,t}$  であるとき、移動体とアンカビーコン  $\mathbf{b}_a$  の間の距離は式(4-3)により与えられる  $d(P_{a,t})$  であると考えられる。また移動体の高さは移動中一定であるものとし、その値  $h$  はわかっているものとする。このとき、移動体  $\boldsymbol{\mu}_{m,ini}^n$  の推定位置の候補をアンカビーコン  $\mathbf{b}_a$  を中心とした半径  $d(P_{a,t})$  の円周上に  $N_c$  通り生成する。

$$\boldsymbol{\mu}_{m,ini}^n = f(x_a, y_a, z_a, h, P_{a,t}, n) \quad (5-4)$$

$$f(x, y, z, h, P, n) = \begin{bmatrix} x + r \cos(\theta_n) \\ y + r \sin(\theta_n) \\ h \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

$$r = \sqrt{d(P)^2 - (z - h)^2} \quad (5-6)$$

$$\theta_n = 2\pi n/N_c, \quad n = 1, \dots, N_c$$

続いて、存在する  $N_{h,t}$  個の仮説のそれぞれを  $N_c$  個に複製し、生成された推定位置候補を用いて各仮説における移動体位置を初期化する。

移動体がアンカビーコンを検出することで推定アルゴリズムを開始すると、最初に追跡を始める仮説の数は  $N_{h,0} = N_c$  個になる。

### 5.3.2.2. プライマリビーコン

1組のツインビーコンのうち片方のビーコンが検出されたとき、そのビーコンはプライマリビーコンとして扱われる。移動体の推定位置が  $\boldsymbol{\mu}_{m,t}^i = [\hat{x}_t^i, \hat{y}_t^i, \hat{z}_t^i]^T$  でプライマリビーコン  $\mathbf{b}_p$  が検出され、その受信信号強度の値が  $P_{p,t}$  であるとき、プライマリビーコンはスマートフォンと同じ高さにあるとみなして、プライマリビーコン  $\boldsymbol{\mu}_{p,ini}^{i,n}$  の推定位置の候補を式(5-5)(5-7)を用いて移動体  $\boldsymbol{\mu}_{m,t}^i$  を中心とした半径  $d(P_{p,t})$  の円周上に  $N_c$  通り生成する。

$$\boldsymbol{\mu}_{p,ini}^{i,n} = f(\hat{x}_t^i, \hat{y}_t^i, \hat{z}_t^i, \hat{z}_t^i, P_{p,t}, n) \quad (5-7)$$

続いて、存在する  $N_{h,t}$  個の仮説のそれぞれを  $N_c$  個に複製し、生成された推定位置候補を用いて各仮説におけるプライマリビーコン位置を初期化する。

### 5.3.2.3. セカンダリビーコン

プライマリビーコンの相手となるビーコンはセカンダリビーコン  $\mathbf{b}_s$  となる。受信信号強度の値が  $P_{s,t}$  でセカンダリビーコンが検出されたとき、移動体の推定位置  $\boldsymbol{\mu}_{m,t}^i = A$ 、プライマリビーコンの推定位置  $\boldsymbol{\mu}_{p,t}^i = B$ 、セカンダリビーコンの初期位置  $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,n} = C$  からなる  $\triangle ABC$  を考えることにより  $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,n}$  の初期化位置を求める。

$C$  は  $A$  を中心とした半径  $\hat{d}_{AC} = d(P_{s,t})$  の円と、 $B$  を中心とした半径  $\hat{d}_{BC} = \|\mathbf{b}_p - \mathbf{b}_s\|$  の交点となる。 $\hat{d}_{BC}$  は、前述のとおり既知の値である。 $B$  と  $C$  は同じ高さにあると仮定すると、 $C$  の候補は図 5-4 のように 2 通りの位置に生成される。そこで、存在する  $N_{h,t}$  個の仮説のそれぞれを 2 個に複製し、 $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,1}$ 、 $\boldsymbol{\mu}_{s,ini}^{i,2}$  の値を余弦定理を用いて求め、各仮説におけるセカンダリビーコン位置を初期化する。

### 5.3.3. 推定フィルタの予測と更新

状態ベクトル中の移動体が初期化された以降は、各仮説のそれぞれの EKF において、新しい観測があるごとに予測ステップと更新ステップが実行される。以下、 $i$  番目の仮説における推定の過程を示す。

#### 5.3.3.1. 予測ステップ

時刻  $t-1$  における  $i$  番目の仮説の推定位置を  $\boldsymbol{\mu}_{t-1}^i$  とする。予測ステップの動作モデルは一般に移動体の推定位置と制御入力  $\mathbf{u}_t$  から与えられる。本研究では自律航法の精度が不十分な場合を想定しているが、その中で条件が最も厳しい場合として、観測したビーコンの受信信号強度のみを用いて推定することを考える。そこで、制御入力  $\mathbf{u}_t$  をゼロベクトル  $\mathbf{0}$ 、状態遷移関数を  $f(\boldsymbol{\mu}_{t-1}^i) = \boldsymbol{\mu}_{t-1}^i$  とし、移動体の座標に関する雑音に移動距離を考慮した値を与えることで移動体の移動を近似する。

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i = \boldsymbol{\mu}_{t-1}^i \quad (5-8)$$

$$\bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i = \boldsymbol{\Sigma}_{t-1}^i + \mathbf{Q}_t \quad (5-9)$$

ここで、 $\mathbf{Q}_t$  はシステム雑音の共分散行列を表し、移動体の座標に関する雑音を表す  $\sigma_m^2$  と、推定対象の各ビーコンの座標に関する雑音を表す  $\sigma_b^2$  で構成される。推定対象の各ビーコンは静止しているものとするため、 $\sigma_b^2$  にはゼロまたは非常に小さい値を用いる。

#### 5.3.3.2. 更新ステップ

更新ステップでは、受信信号強度と状態ベクトル推定値の密結合 (tight coupling) を行う。観測値として、受信信号強度のほかにツインビーコンの間隔情報を用いる。既知の値であるツインビーコンの間隔を式(4-1) の  $d_i$  に代入して得られる値は、1 組のビーコンの一方から送信した信号をもう一方で受信した場合の受信信号強度値と仮想的にみなすことができる。ビーコン  $\mathbf{b}_{p,k}$  とビーコン  $\mathbf{b}_{s,k}$  を 1 組にした  $k$  番目のツインビーコンの仮想受信信号強度値  $VP_{ps,k}$  を以下のように定義する。

$$VP_{ps,k} = P_0 - 10\gamma \log_{10}(d_{ps,k}/d_0) \quad (5-10)$$

$$d_{ps,k} = \|\mathbf{b}_{p,k} - \mathbf{b}_{s,k}\| \quad (5-11)$$

観測ベクトルは、推定対象のビーコンおよびアンカビーコンの受信信号強度の各観測値

と、ツインビーコンの仮想受信信号強度値を結合したものとする。  $N_a$  個のアンカビーコンと  $N_{twin}$  組のツインビーコンを推定に用いたときの観測ベクトル  $\mathbf{z}_t$  を次式で定義する。

$$\mathbf{z}_t = \left[ P_{1,t}, \dots, P_{N_f+N_a,t}, VP_{ps,1}, \dots, VP_{ps,N_{twin}} \right]^T \quad (5-12)$$

同様に、計測関数  $h(\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i)$  は、式(4-1)における  $d_i$  を状態ベクトルの事前推定値  $\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i$  とアンカビーコンの位置座標で表現し、観測ベクトルの各要素と対応する順番に並べたものとなる。これらを用いて、以下の式より状態ベクトルの事後推定値平均  $\boldsymbol{\mu}_t^i$  と推定誤差の共分散行列  $\boldsymbol{\Sigma}_t^i$  を得る。

$$\boldsymbol{\mu}_{t-1}^i = \bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i + \mathbf{K}_t^i \mathbf{e}_t^i \quad (5-13)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_t^i = \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i - \mathbf{K}_t^i \mathbf{H}_t^i \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i \quad (5-14)$$

$$\mathbf{K}_t^i = \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i \mathbf{H}_t^{i,T} \mathbf{S}_t^{i-1} \quad (5-15)$$

$$\mathbf{S}_t^i = \mathbf{H}_t^i \bar{\boldsymbol{\Sigma}}_t^i \mathbf{H}_t^{i,T} + \mathbf{R}_t \quad (5-16)$$

$$\mathbf{H}_t^i = \left. \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i} \quad (5-17)$$

$$\mathbf{e}_t^i = \mathbf{z}_t - h(\bar{\boldsymbol{\mu}}_t^i) \quad (5-18)$$

ここで、 $\mathbf{R}_t$  は観測雑音の共分散行列を表し、実際に観測した受信信号強度の雑音を表す  $\sigma_{RSS}^2$  と、ツインビーコンの間隔による仮想的な受信信号強度の雑音を表す  $\sigma_{VRSS}^2$  で構成される。事前に取得したツインビーコンの間隔の値は正確であると仮定し、 $\sigma_{VRSS}^2$  にはゼロまたは非常に小さい値を用いる。

#### 5.3.4. 仮説の絞り込み

$i$  番目の仮説の時刻  $t$  における重みは次のように与えられる。まず、時刻  $t-1$  における重みに計測の尤度を乗じて、次式で与えられる。

$$w_t^{i'} = w_{t-1}^i \cdot \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |\mathbf{S}_t^i|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{e}_t^{i'T} \mathbf{S}_t^{i-1} \mathbf{e}_t^i\right) \quad (5-19)$$

次に、すべての仮説の重みを計算したのち、各仮説の重みの値を正規化する。

$$w_t^i = \frac{w_t^{i'}}{\sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^{i'}} \quad (5-20)$$

重みが小さい仮説は全体の位置推定の出力に寄与する割合が小さい。そこで、次の枝刈りのプロセスにより仮説の絞り込みを行う。毎回の更新ステップの直後に以下の条件を調べ、当てはまる  $i$  番目の EKF について以降の追跡を停止し、必要とされる計算量を削減する。

- 仮説の重み  $w_t^i$  が、定められたしきい値を下回ったとき。
- $i$  番目と  $j$  番目の仮説の事後推定値における推定対象のビーコンまたは移動体の位置の差分の最大値が、定められた距離を下回る  $j$  番目の仮説が存在し、かつ  $i$  番目の仮説の重みのほうが小さい ( $w_t^i < w_t^j$ ) とき。

#### 5.3.5. 推定位置の出力

仮説が絞り込まれたあと、各仮説の状態ベクトルの事後推定値  $\boldsymbol{\mu}_t^i$  の平均を求めることで、時刻  $t$  の位置座標推定結果  $\boldsymbol{\mu}_t$  を得る。さらに、 $x$  座標、 $y$  座標の値を抽出することで、平面上における位置推定結果とする。

$$\boldsymbol{\mu}_t = \sum_{i=1}^{N_{h,t}} w_t^i \boldsymbol{\mu}_t^i \quad (5-21)$$



## 第6章 平常時と緊急時に利用する屋内位置情報システムに対する要求分析

---

本研究の提案手法により構築された屋内測位環境は，将来的に屋内測位環境の遍在化が達成されたのちに，緊急時にも共通して利用できることが期待される．本章では，緊急時における屋内位置情報サービスの具体的な利用場面を想定し，これを実現するための，平常時と緊急時に共通利用する屋内位置情報システムの概念設計を行う．緊急時の位置情報サービスの内容は，利用者に対して行われる避難誘導の支援とする．設計結果から屋内測位環境に対する要求を導き出すことで，設計された屋内位置情報システムに対する，第4章で示した屋内測位環境および第5章の提案手法による実現可能性を分析する．6.1節で，本章で扱う屋内位置情報システムの位置付けについて説明し，6.2節で対象とする災害状況の想定について述べる．6.3節で屋内位置情報システムの要求分析を行い，6.4節で設計について述べたあと，最後に6.5節で，サブシステムに対する下位要求を抽出し，提案手法におけるビーコン信号観測の所要時間に対する達成目標をを導く．

---

## 6.1. 屋内位置情報システムの位置付け

本章において概念設計を示す「屋内位置情報システム」は、屋内測位機能を用いて、平常時と緊急時のそれぞれで位置情報サービスを提供するためのシステム全体を指す。そこで本章では、本論文でこれまで述べてきた屋内測位システムおよび屋内測位環境の構築方法を、表 6-1 の通り異なる表現によって示すことになる。

第 4 章で示した方法を用いて屋内測位環境を構築する機能を提供するシステムを、本章では「屋内測位環境構築サブシステム」とする。また、これにより構築された屋内測位環境を用いた屋内測位システムを拡張し、位置情報を表示する機能を追加したものを、本章では「屋内測位サブシステム」とする。すなわち、本論文の他の章における屋内測位システムは、本章の「屋内測位サブシステム」の測位機能を提供する部分に該当することになる。

これらに対して、緊急時の警報を配信する機能と、避難誘導を支援する機能を提供する構成を追加した全体を、本章における、平常時と緊急時に共通利用する「屋内位置情報システム」とする。

表 6-1 本章における用語の対応

本論文での標準的な表現（第 4 章ほか）	第 6 章における位置付け
屋内測位システム	「屋内測位サブシステム」の測位機能を提供する部分に相当
屋内測位環境の構築方法	「屋内測位環境構築サブシステム」が提供する機能に相当

## 6.2. 想定する災害の状況と屋内位置情報サービス

日本は災害大国であり、地震・津波・火災などの大規模な複合災害は、過去に経験を繰り返してきた経緯から、今後も見舞われる危険に常にさらされているといえる。特に、地球の地殻を構成する海洋プレートと大陸プレートの境界があるために、日本付近は世界的にみても地震が多い地域であり、たびたび巨大地震の被害を受けている。1995 年には阪神・淡路大震災が、2011 年には東日本大震災が発生し、いずれも甚大な被害をもたらした。これらの経験における教訓を踏まえつつ、近い将来に発生することが想定されている首都直下型地震[89]や南海トラフ地震[90]に備えて対策が進められている。このような災害は、日常において突如として襲ってくることになる。したがって、災害のための対策は、平常時においてこそ進めておくことが求められる。

大規模な地震では、他の災害現象をとまなう複合災害となる傾向が強いことを対策において考慮しなければならない。東日本大震災では、直後に発生した巨大津波により多くの尊い人命が失われたが、このほかにも1983年の日本海中部地震、1993年の北海道南西沖地震、あるいは海外では2004年のスマトラ島沖地震など、津波による人的被害はこれまでに繰り返し発生してきている。そこで、地震発生直後は沿岸地域の広域に渡って津波の到来を警戒する必要がある。また、特に都市部では、強い地震の揺れや建物の倒壊が誘発する火災を想定した対策が必要である。さらに、このような場面における情報通信技術の活用を考えると、停電の発生により機器への電力供給が途絶する可能性や、設備の損害、通信の輻輳、停電に起因して地上の設備による通信網の機能が停止する可能性を想定する必要がある[46]。

地震や火災の影響により、緊急時に利用するシステムに用いるために屋内に設置されている機器は損傷を受ける可能性があり、それによってシステムが避難支援の機能を十分に果たせなくなる場合が想定しうることは明らかである。しかし、災害発生直後には、屋内施設内部では機器の損傷に至らずシステムが機能している状態であっても、円滑な避難を必要とする状況は少なからず発生すると考えられる。図6-1にそのような例を挙げる。

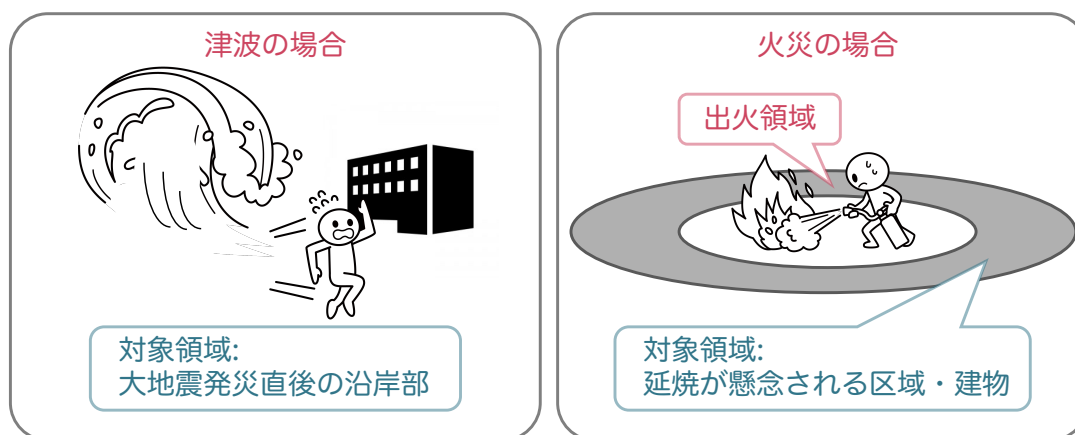


図 6-1 設備の損傷がなくても避難が必要な災害発生直後の状況

沿岸地域において津波の到来が予測される場合は、その場では地震そのものによる損害が軽微でも、津波の到達より先に、十分な標高を有する高台の避難場所や、津波避難ビルあるいは津波避難タワーへの移動を完了しておくことが重要である。火災の場合は、火元に近接した区域で避難の緊急度が高いことはもちろんであるが、火災発生の対象棟の火元から離れた区域や、隣接棟においても、火災の拡大や隣接棟への延焼が起きたときに備え、避難行動を取ることは重要である。さらに、非常階段などの避難経路における混雑や滞留の発生、二次災害による負傷などを避けるために、整然とした円滑な避難が求められる。大地震にとまなう火災であれば、同時多発的に避難を実施する屋内施設が発生すると考えられ、誘導のための人員リソースが限られる中で被害を抑えるために必要な対策を取ることになる。一

方で、地震とは関係のない一般的な火災の発生時においても、屋外の避難場所へ安全に移動するという基本的な避難行動に対しては、同じシステムにより避難支援をすることが可能になると考えられる。汎用的で普及が進んでいる機器を用いて緊急時に利用するシステムを構築することで、システムの普及を進め、利用者を増やすことができれば、いざというときにシステムを利用できる確率を高められるという便益につながると考えられる。

本章の屋内位置情報システムでは、対象とする災害を、地震、津波、火災として、緊急にはシステムの機能が損なわれずに稼働している状況において利用する場面を想定する。また、緊急時に利用するための制約に基づいた要求を満たすことを設計の前提とし、平常時からシステムを利用しつつ、緊急時には同じシステムで機能を切り替えて利用することを想定する。緊急時の位置情報サービスの内容は、利用者に対して行われる避難誘導を位置情報を活用して支援することとする。避難を支援する機能としては、屋内施設の被害状況に応じて適切な避難経路を自動で検知するというような、実現の難易度が高いことは目標とせず、屋内施設の防災センターの活動のような既存の災害対策の活動と融合し、その機能を補強することを目標に置いて考える。

災害の発生前から発生後までの各段階において必要となる防災対策はそれぞれ異なるが、本章の屋内位置情報システムが対象とする災害の時間的区分の段階は、次のように位置付けられる。中村によれば、災害の時間的経過区分は、何も起きていない「平常期」、災害の前兆が現れてくる「警戒期」、災害が生じつつある「発災期」、最初の危機が一段落した「復旧・復興期」の4つに分類することができる[91]。屋内の滞在者の屋外への避難は、図 6-2 に示すように、対象の建築物を含む地域全体という大局的な視点において、災害が発生した直後の段階ということになり、「発災期」における防災活動に区分される。ただし、位置情報の利用者が所在する場所という局所的な視点では、その場所における津波や火災の被害が発生する前の段階において、差し迫る危険を警戒し被害を未然に防ぐための活動に焦点を当てていることになる。

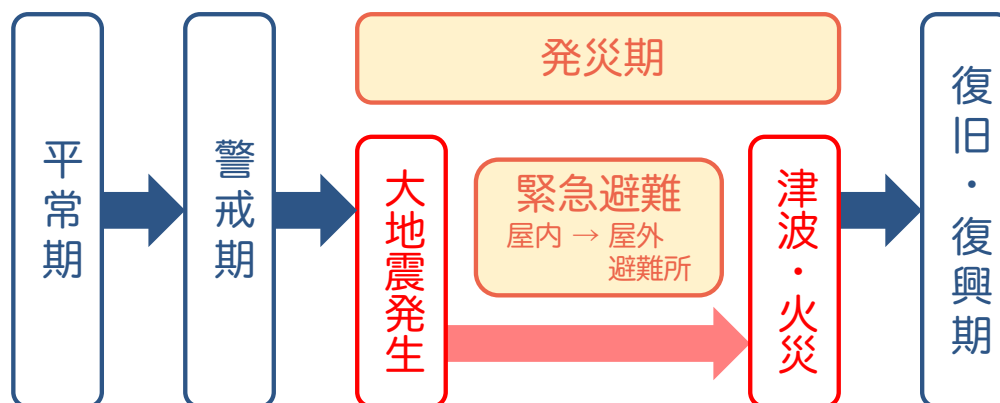


図 6-2 災害の時間的経過区分

## 6.3. 屋内位置情報システムの要求分析

### 6.3.1. ステークホルダ要求

災害の発生によって制限された通信環境を想定して屋内位置情報システムを構築し、地下街における情報伝達・避難誘導支援の実証実験を行った事例として、総務省の「G空間シティ構築事業」[92][93]がある。この事例を参考にして、平常時と緊急時に共通利用する屋内位置情報システムに係るステークホルダを表 6-2 のように定義する。

表 6-2 関係するステークホルダの分類

分類	ステークホルダ
(A) 情報受信者	①利用者
(B) 緊急時に関係	②自衛消防組織，③防災機関，④広域災害警報システム運用者， ⑤屋内位置情報サービス運用者
(C) 平常時に関係	⑤屋内位置情報サービス運用者，⑥屋内区画運用者
(D) その他	⑦屋内施設管理者，⑧携帯情報端末提供者・屋内測位機器提供者

各ステークホルダは、(A) 情報を受信して利用するステークホルダ、(B) 主に緊急時にシステムと関わるステークホルダ、(C) 主に平常時にシステムと関わるステークホルダ、(D) これらのステークホルダに影響を与えるその他のステークホルダ に分類することができる。ここで、各ステークホルダにおいて考える要求について述べる。

#### ① 利用者

屋内空間に滞在し、所持する携帯情報端末で位置情報を利用する人を、屋内位置情報システムの利用者として位置付ける。緊急避難時に利用する場面では、「災害発生直後の段階でシステムの機能が利用可能な状態であること」が、ステークホルダ要求として第一に挙げられる。次に、災害情報を取得したときに、利用者の個人それぞれが命を守る行動として適切な避難行動に移行できることが必要である。そのためには、「利用者が信頼できる情報を取得すること」、「利用者の現在地に応じた適切な情報を、適切な時間に取得すること」が重要であるため、これらをステークホルダ要求とする。平常時には、「利用者が所持する携帯情報端末で屋内位置情報サービスを利用できること」がステークホルダ要求として存在する。

## ② 自衛消防組織

日本では、防火対象物となる大規模で多数の者が出入りする屋内施設において、消防法第8条の2の5に基づき自衛消防組織が設置される。火災および地震等の災害発生時には、自衛消防組織は初期活動や応急対策を円滑に行い、建築物の利用者の安全を確保するための活動を行う。そこで、公設消防隊が現場に到着する前の段階において、適切な対応をとることが求められる。防災センターは、防火対象物となる屋内施設において、消防用設備などの防災のための設備を集中的に管理する場所として設置されており、災害発生時には自衛消防組織の本部の拠点となる。

災害発生時の避難誘導は、防災センターから発信される館内放送や、自衛消防組織の避難誘導班による直接避難誘導によって主に行われる。災害情報と避難誘導情報の伝達が屋内位置情報システムによって可能になり、利用者が適切な避難行動を取りやすくなれば、避難誘導のための自衛消防組織の負担が軽くなることが期待できるが、そのためには自衛消防組織による避難誘導の内容に対して屋内位置情報システムが提供する情報に矛盾がなく、「自衛消防組織の活動を妨げないこと」が少なくとも屋内位置情報システムに対しては求められる。

## ③ 防災機関

対象とする災害のうち地震、津波に関しては、日本では政府機関の一つである気象庁が発生時に地震情報や津波警報などを発表する。このような防災機関が提供する災害情報を利用者に確実かつ迅速に伝えることで利用者の避難行動を促すことができると考えられるため、防災機関をステークホルダとして位置付ける。

## ④ 広域災害警報システム運用者

防災機関がステークホルダに含まれることによって、防災機関が発表する情報を利用者に伝達するための広域災害警報システム運用者も同様にステークホルダとなる。気象庁が配信する緊急地震速報は、携帯電話事業者と連携し、大地震発生時に速報を利用者の持つ携帯情報端末へ通知できる仕組みが構築されており、具体的な広域災害警報システムの一つとして考えることができる。また、GNSSを経由して災害情報を配信する方法がある。日本の準天頂衛星システム（Quazi Zenith Satellite System: QZSS）で提供されている、災害危機管理通報サービスはその1つの例である。この方法では、GNSSの測位補強信号の情報フォーマットを利用し、必要最小限の災害情報を測位補強信号の代わりに配信する。利用者の持つ携帯情報端末にはGNSS受信機が標準的に搭載されているため、GNSSで配信された災害情報を携帯情報端末で表示する機能は容易に実現可能である。測位衛星を経由して情報を配信することで、災害によって地上の情報通信網が機能を停止した場合に、災害情報の代替配信経路の

役割を果たすことができ、測位衛星の信号が届く屋外にいる利用者に対して、災害情報伝達手段の多重化をはかることができる。

⑤ 屋内位置情報サービス運用者

屋内位置情報システムを利用することにより、経路検索、歩行者ナビゲーション、プッシュ型の位置に連動した情報配信、動線分析などの屋内位置情報サービスを運用するステークホルダである。平常時に提供する屋内位置情報サービスにおいて、屋内空間の利用形態に応じて、「通路、店舗、あるいは区画の単位で利用者の所在地を判別できること」が位置情報の価値を高めることになるため、ステークホルダ要求として取り扱う。また、「屋内測位環境の構築を、屋内空間の利用開始までに完了できること」、「屋内空間の形状や物体配置を変更したときに、屋内測位精度を維持できること」がステークホルダ要求として挙げられる。

⑥ 屋内区画運用者

店舗や展示会を含む各種イベントなど、特定の目的において屋内の区画を利用し運用するステークホルダである。イベントの場合であれば、イベント全体としての運用者と、個別の区画における出展者のそれぞれがこの中に含まれる。屋内区画運用者は、利用目的に沿って屋内の空間構成を構築する主体となる。屋内位置情報システムは形成された空間構成に応じて構築された屋内測位環境を用いる。屋内測位に用いる機器の設置場所、設置方法は、屋内空間の利用目的や外観上の問題、屋内施設管理者の管理方針により制限を受ける場合がある。

⑦ 屋内施設管理者

屋内区画運用者は、屋内施設の管理者から許可を得て屋内の区画を利用する。屋内区画運用者が行う空間構成の構築は、屋内施設管理者との調整に基づいて行われる。

⑧ 携帯情報端末提供者・屋内測位機器提供者

携帯情報端末の提供者は、消費者のニーズや市場での競争力を考慮し、新しい技術規格や機能の搭載を主にハイエンドの機種から始めていく。そのため、新しい技術や機能は市場への浸透に時間がかかり、浸透する前に搭載機種が市場から消えていく場合もある。一方で多数の消費者に受け入れられる技術や機能は大多数の機種に搭載されることになる。したがって、これらの動向は屋内位置情報システムで利用する機能の選択に影響を与える。屋内測位機器についても同様に、提供者が市場へ投入する製品に採用する技術規格や機能が製品の選択肢やコストに影響を与え、さらに利用する屋内測位方式や達成可能な精度などの性能に対して制約を与える。

## 6.3.2. 想定するユースケース

### 6.3.2.1. 平常時の利用場面

設計する屋内位置情報システムは、平常時における次のような利用場面への対応を可能にすることを目指す。イベント会場に展示ブースを設置し、展示会や展覧会を開催する場合を想定する。屋内区画運用者に含まれる、各ブースの出展者には、来場者とのコミュニケーションをはかりたい、マーケティングのために来場者から情報を収集したい、というニーズがある。そこで、イベント運用者が管理する BLE ビーコンを、各出展者の展示ブースに設置することで、プッシュ通知による情報配信機能を提供する。

同時に、来場者には、イベント会場において現在地を把握し、行きたい場所へ移動するための歩行者ナビゲーションのニーズがある。会場では、開催されるイベントのために新たなレイアウトが設営されているため、屋内測位環境を構築する必要がある。そこで、プッシュ通知による情報配信のために展示ブースに配置したビーコンを、屋内測位用途に兼用する。そのために、配置したビーコンの位置座標を取得して、屋内測位システムを構築する。

### 6.3.2.2. 緊急時の利用場面

大型の屋内施設の中で、位置情報サービスの利用者が災害に遭遇する場面では、利用者とその周囲の環境は次のような状況に陥る。災害発生直後の段階では、一人一人の命を守る行動が最優先であり、引き続き発生が予想される危険を回避するため屋外の安全な場所に向けて避難する必要がある[89]。この場面では、緊急でありながらも整然とした移動による円滑な避難行動が求められる。大規模な屋内施設では防災センターが設置されており、避難誘導のための指示が防災センターから非常放送設備を介して音声で伝達される[94]。しかし、音声放送では、屋内空間の区画ごとに個別の内容を伝達することが難しい。また、避難経路図が近くに掲示されていて内容を確認できるとは限らない。さらに、その時点で滞在中の屋内施設が、初めて訪れる場所、あるいは来訪頻度の低い場所である場合などでは、利用者が屋内空間における現在の自己の位置や他の場所との位置関係を把握できていない状況も考えられる。したがって、利用者の視点からは、適切な避難行動に移るための具体的な情報が不足する状況が起こりうると考えられる。

このような想定をすると、位置情報を利用して、伝達された避難指示の中で示された場所と現在地の対応関係の情報や、現在地に見合った避難経路および向かうべき非常口の位置などを、防災センターの情報発信と連動して利用者に伝達できれば、取るべき避難行動がより明確になることが期待できる。そこで、災害発生直後の緊急時には、利用者の避難行動を支援するための屋内位置情報サービスに対するニーズがあると考えられる。



### 6.3.3. システム要求

#### 6.3.3.1. 平常時の利用場面

平常時の場面で想定される利用状況からは、屋内位置情報システムに対して表 6-3 の要求を挙げることができる。屋内位置情報サービス運用者のステークホルダ要求である「通路、店舗、あるいは区画の単位で利用者の所在地を判別できること」を満たすために、利用者の所在地を携帯情報端末の位置で判別することとし、「間取りの中における位置関係を判別できる精度で端末を測位し、端末へ位置情報を提供すること」をシステム要求とする。

表 6-3 平常時の利用場面におけるシステム要求

No.	要求	要求元
R1.1	周囲の区画の間取りに対応した情報を利用者へ提供すること	
	R1.1.1	利用者が所持する端末を用いて情報を表示すること 利用者
	R1.1.2	間取りの中における位置関係を判別できる精度で端末を測位し、端末へ位置情報を提供すること 利用者、 屋内位置情報 サービス運用者
R1.2	人が利用する屋内空間の全域に、屋内測位環境を構築すること	
	R1.2.1	屋内測位環境の構築を、屋内空間の利用開始までに完了できること 屋内位置情報
	R1.2.2	屋内空間の形状や物体配置を変更したときに、屋内測位精度を維持すること サービス運用者

#### 6.3.3.2. 緊急時の利用場面

緊急時の場面で想定される避難誘導の状況を考えることにより、屋内位置情報システムに対する要求は表 6-4 に挙げる項目を導くことができる。必要な機能を災害発生直後に利用可能にすることは、「広く普及した端末で利用できること」、「災害に遭遇したときに屋内施設のどの場所においても利用できること」、「地上の設備による、屋内施設と外部を接続する通信網が使用できない状況においても利用可能なこと」によって実現できると考えられる。地震、津波、火災に関する情報は、信頼性の高い情報とするために情報の発信源を明確にした上で利用者に提供することをシステム要求とする。また、災害の危険に関する情報は、利用者が置かれている状況が認識できるようにするために、利用者の位置に応じた内容で伝達することをシステム要求に含める。加えて、館内放送や、自衛消防組織の避難誘導の役割を補完する目的で、自衛消防組織による避難誘導の情報と、避難経路及び非常口の場所の情

報を利用者の位置に応じた内容で提供することをシステム要求として挙げる。一方で、屋内施設の被害状況により、避難誘導を事前の想定とは異なる経路で行う必要が生じた場合に、提供される情報が自衛消防組織の避難誘導の支障となることを防ぐ必要がある。そのため、避難経路情報の表示機能を自衛消防組織の操作で無効にできることをシステム要求に含める。

表 6-4 避難誘導支援の利用場面におけるシステム要求

No.	要求	要求元
R2.1	利用者の位置に応じた災害情報・避難誘導情報・避難経路情報を確実に利用者へ提供すること	
R2.1.1	利用者が所持する端末を用いて情報を表示すること	利用者
R2.1.2	災害が発生した直後に情報を提供すること	
R2.1.3	人が利用する屋内空間の全域で情報を提供すること	
R2.1.4	地上の設備による、屋内施設と外部を接続する通信機能が使用できない状況においても情報を提供すること	
R2.2	利用者の位置に応じた災害情報を迅速に利用者へ提供すること	
R2.2.1	防災機関から発出された地震・津波の情報、屋内施設の自衛消防組織から発信された火災の情報と、利用者の位置に応じた災害の危険に関する情報を提供すること	利用者, 防災機関, 自衛消防組織
R2.3	利用者の位置に応じた避難誘導情報・避難経路情報を迅速に利用者へ提供すること	
R2.3.1	屋内施設の自衛消防組織による避難誘導の情報を、位置に応じた内容で提供すること	利用者, 自衛消防組織
R2.3.2	屋内における位置と自衛消防組織の避難誘導の内容に応じて、適切な非常口の場所および避難経路の情報を提供すること	
R2.3.3	自衛消防組織の判断と操作で、避難経路情報の表示機能を無効にできること	自衛消防組織

### 6.3.3.3. 屋内測位環境の遍在化に関するシステム要求

利用者のステークホルダ要求「災害発生直後の段階でシステムの機能が利用可能な状態であること」を実現するためには、位置情報を、多くの人が、いつ災害が発生しても、屋内のどこにいても利用できることが必要となる。これらはそれぞれ、以下の通りシステム要求の項目に対応する。

#### 多くの人が利用できること（要求 R1.1.1, 要求 R2.1.1）

利用する携帯情報端末については、入手が容易で広く普及しているスマートフォンをサービスの対象とすることで、多くの人がサービスを利用可能になると考えられる。日本における 2019 年のスマートフォンの個人保有率は 67.6%であり[95]、20 代から 50 代までの年齢層では 85%を超えている[96]。そこで、高齢者に対してはサービスの提供手段に検討を要するという課題が残るが、利用者の多さという観点から、サービスの提供対象としてスマートフォンを中心に考えることは合理的と考えられる。それによって、屋内測位環境はスマートフォンで標準的に利用できる屋内測位方式を導入して構築することが前提となる。

#### 災害がいつ発生しても利用できること（要求 R1.2.1, 要求 R2.1.2）

緊急時における特定の用途のみを純粋に考慮すると、専用設計の端末機器を用いれば、機能や耐久性の面を充実させることで、取れる対策の幅を広げることができる。しかし、利用者が特別な機器を、自身が所持する携帯情報端末以外にも常に所持しておくことは難しい。機器に対してコストが発生する上、携行品が増えることは煩わしさをともなうためである。したがって、いざというときに必要な機器が用意されていないということが起こりうる。さらに、仮に機器を所持していたとしても、普段は利用しておらず、緊急時になってはじめて利用する機器に対しては、機能が問題なく稼働するかどうか、その上で適切な方法で効果的に利用できるかどうかは懸念される点である。携帯できる機器に関しては、普段は利用する機会がないことで、電池切れを起こしていることに気づかないという状況は容易に起こりうる。幸運にも機器が動作したとしても、効果的に機能させるためには、利用者が機器を適切に使いこなせる必要がある[44]。

これに対して、屋内に滞在する人が日常的に所持し普段から使い慣れている携帯情報端末を、緊急時の避難の場面で共通して利用することにすれば、普段から稼働できる状態を整えておくことができ、突然災害に遭遇する場合でも可用性を高めることが容易になる。この観点においても、スマートフォンをサービスの対象に考えることは理にかなっているといえる。屋内測位環境についても同様に、平常時に利用しているものを共通して緊急時に利用する。さらに、アプリケーションの操作方法に一貫性を持たせることで、平常時の利用機会を通して前々から位置情報サービスの使い方の習熟度を高めておくことが可能になる。

これまでも、災害情報システムを、日常的にも利用して操作できる状態を整えておくという課題に着目した研究がなされてきた。濱村ら[97], [98]は、屋外の避難場所などに関する情報を、災害発生時に閲覧、利用できるスマートフォンのアプリケーションを実装した。避難場所の情報は平常時にスマートフォンが収集、保存しておくことで、災害発生時に通信ネットワークを使わずに利用できる。また、平常時に、利用者の移動に応じて現在地周辺の避難場所の情報の確認を促す通知を行い、アプリケーションの操作に慣れるとともに、避難場所に対する認識を前もって高めておくことができる利用コンセプトとなっている。岡崎ら[99]は、平常時には観光情報システムとして利用し、それと機能やユーザインタフェースを共通化した、被災状況、避難所や交通関連の情報を提供する災害情報システムを構築した。スマートフォンで利用することができ、利用者どうしで情報交換するための SNS (Social Networking Service) 機能を有している。平常時から災害時へ連続的に利用することで、システムに使い慣れた状態が実現できることを特長としている。本研究では、屋内位置情報サービスおよび屋内測位環境に対してこの考え方を適用することに着目する。

#### 屋内のどこにいても利用できること (要求 R1.2, 要求 R2.1.3)

利用者はスマートフォンを所持して屋内を移動することを前提に考えれば、屋内のどの場所においても端末の利用は可能である。それに応じて、屋内測位環境を人が利用する屋内の空間を満たすように構築することで、位置情報を屋内のどこでも利用できるようになる。

屋内測位環境の遍在化の必要性については、緊急時の避難の場面において利用者が確実に避難行動の支援を受けられるようにするほかに、もう 1 つ重要な理由がある。大勢の人が避難する状況で、避難経路に滞留が発生すると、間接的に建物全体の避難活動に影響を及ぼす可能性がある[45]。したがって、一部の人であっても適切な避難行動ができなくなることは避けなければならない。そこで、屋内施設全体としての避難活動の質を保つ意味においても、屋内空間全体に測位環境を構築することが必要になる。

## 6. 4. 屋内位置情報システムの設計

### 6. 4. 1. システムの機能

前節で挙げたシステム要求を満たすために、以下の機能を屋内位置情報システムに実装することを考える。表 6-5 に屋内位置情報システムの機能およびそれらに対応するシステム要求を示す。

表 6-5 屋内位置情報システムの機能

No.	機能名		対応するシステム要求
F1	屋内測位環境構築機能		R1. 2. 1, R1. 2. 2, R2. 1. 3, R2. 1. 4
	F1. 1	屋内測位機器設置機能	
	F1. 2	屋内測位機器位置推定機能	
	F1. 3	屋内測位設定情報計測機能	
F2	屋内測位機能		R1. 1. 1, R1. 1. 2, R2. 1, R2. 2, R2. 3. 1, R2. 3. 2
	F2. 1	屋内測位設定情報取得機能	
	F2. 2	端末位置座標取得機能	
	F2. 3	位置情報表示機能	
F3	警報配信機能		R2. 1, R2. 2
	F3. 1	警報発信機能	
	F3. 2	警報伝送機能	
	F3. 3	警報受信・表示機能	
F4	避難誘導情報配信機能		R2. 1, R2. 2, R2. 3
	F4. 1	避難誘導情報発信機能	
	F4. 2	避難誘導情報伝送機能	
	F4. 3	避難誘導情報受信・表示機能	
F5	経路案内機能		R1. 1. 1, R2. 1, R2. 3. 1, R2. 3. 2
	F5. 1	地図情報表示機能	
	F5. 2	経路情報表示機能	

- F1: 屋内測位環境構築機能

屋内測位に用いる機器を屋内空間に設置し、機器の位置座標を取得するとともに、屋内測位に用いる設定パラメータなどの情報を計測、取得する機能である。この機能によって屋内位置情報サービス運用者からの要求を満たすことになる。

- F2: 屋内測位機能

屋内において携帯情報端末の位置座標を取得する機能である。また、取得した携帯情報端末の位置座標は、避難経路と避難誘導の情報を位置に応じた内容で提供するために用いられる。

- F3: 警報配信機能

災害発生直後の緊急時において、防災機関から発出された地震・津波の情報を屋内に

警報として配信し、さらに屋内施設の自衛消防組織から発信された火災の情報を、屋内の利用者に対し伝達するための機能である。防災機関の災害情報は、利用者だけでなく、災害状況を把握することを必要とする自衛消防組織に対しても伝達される。防災機関による津波の情報は、複数の地域を対象とした内容を含んでいるが、その中から屋内施設の所在地における津波の危険の情報を抽出し伝達する。災害の状況やリスクについては刻々と変化するため、発信元から更新された情報が配信された場合には、更新情報についても確実かつ迅速に伝達することとする。

- F4: 避難誘導情報配信機能

警報を受信した屋内の利用者は、屋内施設の自衛消防組織による避難誘導の情報にしたがって避難行動を開始する。避難の方法は、災害の状況と屋内施設の被害状況に応じて「全館一斉避難」、「逐次避難」、「部分避難」から自衛消防組織の判断により選択される。本機能は自衛消防組織が選択した避難方法と、屋内空間の領域ごとの避難開始の指示を防災センターから発信し、位置情報システムを経由して伝達するための機能である。「全館一斉避難」は屋内施設のすべての領域で同時に避難を開始する方法、「逐次避難」は屋内空間の領域ごとに避難開始のタイミングを変えて避難する方法、「部分避難」は屋内空間の一部の領域を対象として避難を行う方法である。利用者はその位置における避難開始の指示を受信する。火災を伴う場合は、どのように危険が迫っているかの情報も受信する。また、屋内位置情報システムを用いた避難経路情報の提供を断念し、館内放送および自衛消防組織の人手を介した直接避難誘導で対応する場合は、防災センターにおいて操作を行い「直接避難誘導」モードを有効化する。

- F5: 経路情報表示機能

目的地へ向けて歩行移動するための経路の情報を携帯情報端末上で表示するための機能である。平常時の屋内位置情報サービスに対しては、歩行者ナビゲーション機能を実装し利用する。緊急時の避難誘導支援の場面では、非常口の場所と避難経路の情報を提供する。適切な非常口に向けた避難経路を確実に表示できる歩行者ナビゲーションを実装できれば望ましいが、災害や屋内施設の被害状況および避難による人流の動向を検知し、これらを考慮した避難経路を的確に導き出して表示することは難易度が高いと考えられ、適切ではない避難経路を表示してしまうことで避難に支障が発生すれば問題となる。

そこで、屋内施設の建築物を設計した際に定められた避難経路を、自衛消防組織の避難誘導の指示と連動させて表示するといった実装方法をとることも一つの方法として考えられる。建築物の設計において、非常口は二方向避難の原則に沿って異なる方向に選択肢が存在するように設定されており、避難経路もそれに応じて選択肢が存

在する。そこで、携帯情報端末が取得した位置座標を用いて、利用者の位置に適した選択肢の避難経路と非常口を示すとともに、利用者は必要に応じて他の選択肢の避難経路も確認できるようにする。判明している屋内施設の被害状況に基づいて、防災センターから利用できない避難経路や非常口の情報を発信し、携帯情報端末上で表示可能とするが、被害状況の把握が不十分な場合などで、携帯情報端末上での確な避難経路の表示が困難と考えられる状況では、「直接避難誘導」モードを有効にすることで、避難経路情報の表示そのものを無効にすることができる。この場合は自衛消防組織によって全面的に避難誘導が実施されることになる。

避難経路の伝達には、屋内地図上に経路と進行方向を表示する方法、携帯情報端末の画面上で進行方向を矢印で示す方法、携帯情報端末を所持する人に向けて音声で伝達する方法などが考えられる。これらの方法を組み合わせることや、個別の利用者に合わせた方法を選択することが可能である。システムの構成

#### 6.4.2. システムの構成

屋内位置情報システムは図 6-3 に示す構成によって表 6-5 に挙げた機能を実現する。「F1: 屋内測位環境構築機能」、「F2: 屋内測位機能」、「F4: 避難誘導情報配信機能」、「F5: 警報配信機能」はそれぞれ屋内測位環境構築サブシステム、屋内測位サブシステム、避難誘導情報配信サブシステム、警報配信サブシステムによって実現される。「F3: 経路情報表示機能」は、ここでは屋内測位サブシステム内で実現する構成とする。

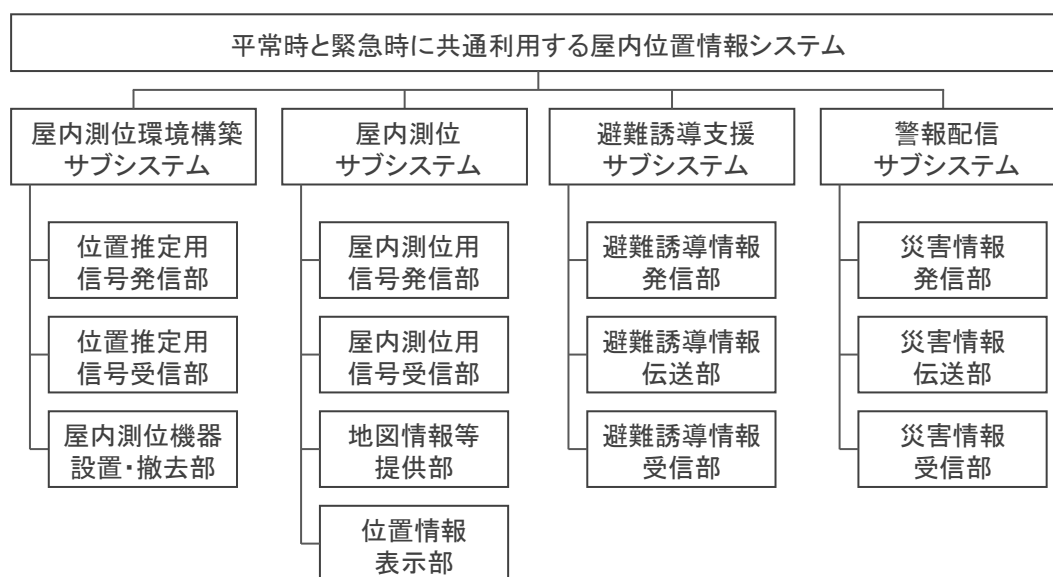


図 6-3 屋内位置情報システムの構成

図 6-4 に屋内位置情報システムの概要図を示す。ここでは、防災機関および屋内施設の防災センターから発信される情報が、携帯電話通信網や屋内施設の LAN を含んだ通信回線により、配信先を制御するサーバを経由して配信される場合を表しており、これを基本構成とする。「防災機関」と「通信回線」の一部は屋内施設の外側にあるが、それ以外の構成要素はすべて屋内施設の内部に存在する。防災センターには火災の情報と避難誘導情報の発信用端末が設置される。個人用携帯情報端末、防災センターの発信用端末、屋内測位用機器、屋内施設内部の通信回線は、災害により停電発生した場合に備え、非常用電源または内蔵電池によって、少なくとも避難が完了するまでの時間は動作できるようにする。

個人用携帯情報端末にはスマートフォンを想定する。災害情報と避難誘導情報の受信と表示、端末位置座標の取得と表示、経路情報の表示機能が、普及グレードのスマートフォンで動作可能な内容でスマートフォンのアプリケーションに実装され、利用者に対して提供される。緊急時には、情報を確実に利用者の携帯情報端末に配信できることが重要となる。配信されるデータ量が屋内施設の LAN の通信容量を超えてしまうことを防ぐために、災害情報、避難誘導情報、経路情報の配信には、動画データ、画像データ、音声データは用いないことを考える。そこで、警報の内容や避難方法などの配信項目に対してそれぞれ固定長のビット配列を用意し、各項目の内容に対応するビット列を割り当てて配信したい情報を表現する。配信するデータはこれらの固定長のビット列を組み合わせたものとし、データを受信した携帯情報端末では、ビット列の内容から各項目について表現されている情報を解析し、解析された内容に応じた災害情報、避難誘導情報、経路情報を表示する。表示に必要なデータを災害発生前にあらかじめスマートフォン上に保存しアプリケーションから利用できるようにしておくことで、情報の表示に動画、画像、音声などを利用することを可能にする。



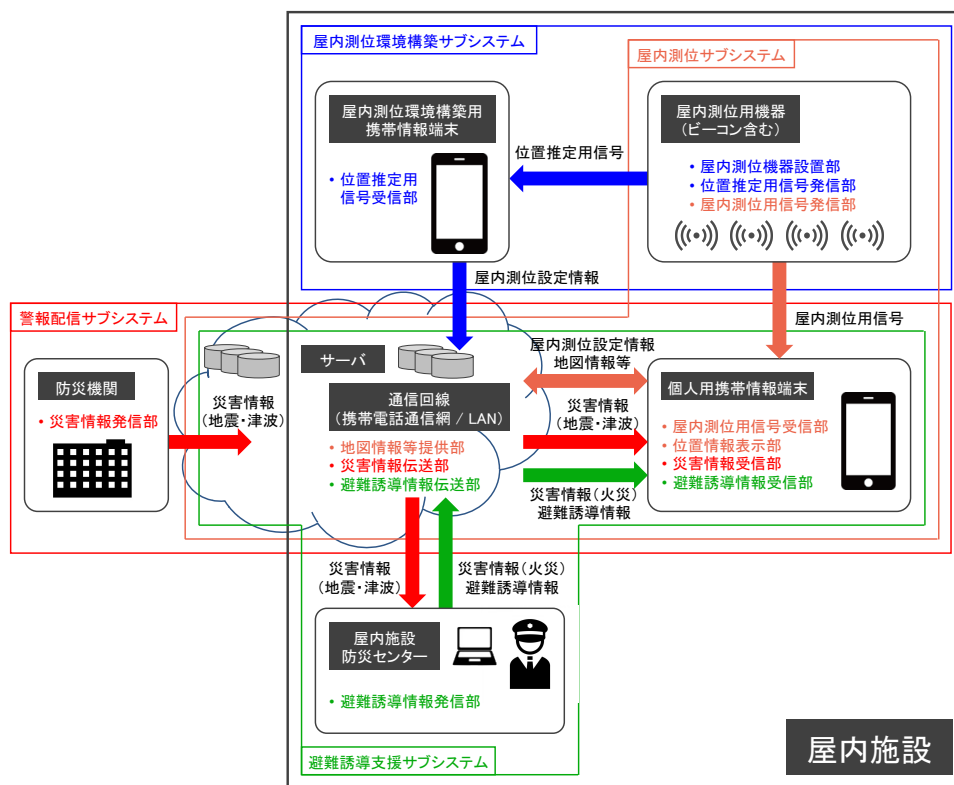
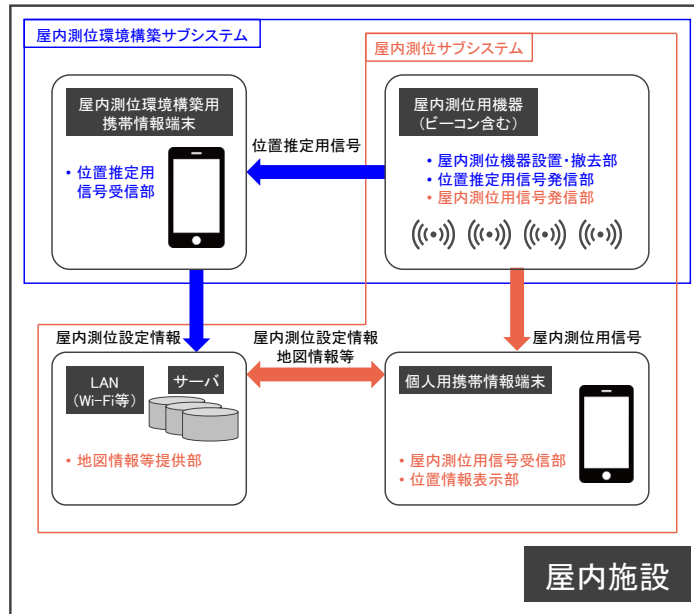
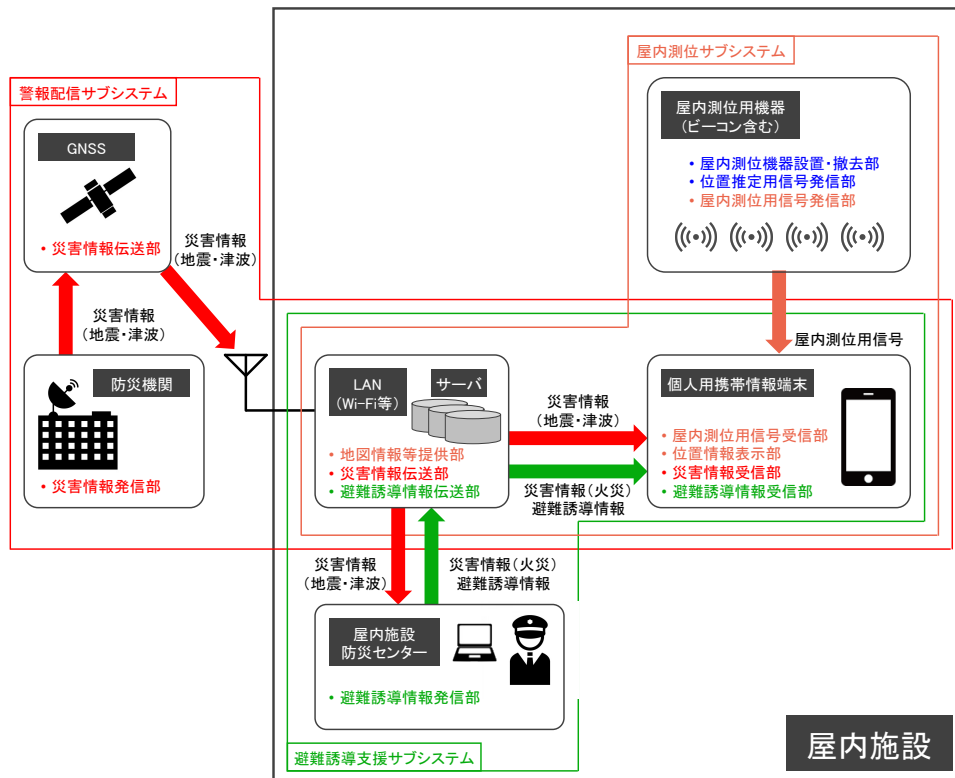


図 6-4 屋内位置情報システムの概要図

屋内位置情報システムの中で、平常時・緊急時それぞれの場合においてシステムで利用される部分を抽出すると、図 6-5 の通りとなる。緊急時の場合の図 6-5(b)では、災害の影響により通信回線のための地上の設備が機能を停止し、屋内施設と外部との通信接続ができない状況にも対応できるように、防災機関からの災害情報を GNSS を経由して配信する場合を表している。この構成は表 6-4 の要求 R2.1.4 に対応するためのものである。防災機関の災害情報は、小容量のビット列に変換することで GNSS を経由して配信を可能とする。屋内施設は、屋外に面した上空の見通しのよい場所に設置した GNSS アンテナを用いて、災害情報を受信し屋内施設の LAN を用いて屋内へ配信する。機能の提供に用いるサーバは、屋内施設の内部に設置し、屋内施設の LAN へ接続する。これにより、インターネットを介して外部に置かれたサーバと通信することを不要にしている。また、本章で提示する屋内位置情報システムの範囲外の機能になるが、安全な避難場所に向けて屋外を移動中の利用者に対して、GNSS を用いて災害情報を配信することにより、災害情報と位置情報を提供することが可能になる。



(a) 平常時



(b) 緊急時 (GNSS 経由で防災機関の災害情報を配信)

図 6-5 平常時・緊急時それぞれの場合におけるシステム概要図

## 6.5. サブシステムに対する要求

平常時と緊急時に共通利用する屋内位置情報システムの概念設計を前節で示したことから、緊急時に位置情報を用いて避難誘導を支援するためのシステム構成および提供する機能の具体的な例を示すことができた。本節では、サブシステムに対する下位要求を設計結果から導き出し、本研究の提案手法による実現可能性を分析するとともに、提案手法に対する達成目標を示す。

### 6.5.1. 屋内測位サブシステム

本項では、屋内測位サブシステムに対する下位要求を抽出し、屋内測位サブシステムを第4章で示した屋内測位環境を用いて実現可能であることを確認する。屋内測位サブシステムに対する要求と、その根拠となるシステム要求を表 6-6 に示す。

表 6-6 屋内測位サブシステムに対する要求

No.	要求		根拠
Rs1.1	スマートフォンを対象にした屋内測位が可能なこと		R1.1.1, R2.1.1
	Rs1.1.1	スマートフォン上の計算処理により測位結果を取得できること	R2.1.4
	Rs1.1.2	スマートフォンが位置情報の表示に必要なデータを場所に応じて自動でダウンロードすること	Rs1.1.1
	Rs1.1.3	測位の計算処理により発生するスマートフォンの電力消費が少ないこと	R2.1.2
Rs1.2	スマートフォンの位置座標を、平均誤差 0.6 m の精度で取得できること		R1.1.2, R2.2, R1.3
	Rs1.2.1	スマートフォンに生じる予期せぬ振動や、スマートフォンを所持する人の不規則な動作が発生した場合に、確実に位置座標を取得すること	R2.1

#### 6.5.1.1. 屋内測位方式

要求 Rs1.1.1 は、表 6-4 で示した要求 R2.1.4 に基づいて導かれる。

*要求 R2.1.4: 地上の設備による、屋内施設と外部を接続する通信機能が使用できない状況においても情報を提供すること*

設置されたビーコンの位置座標がスマートフォンに保存されていれば、屋内測位方式に近接検知方式などを採用することで、スマートフォン上の計算処理により測位結果を得ることが可能になるため、緊急時に外部との通信が途絶した場合でも測位が可能になる。そこで、要求 Rs1.1.1 を満たす手段とすることができる。ただし、ビーコンの位置座標と測位パラメータなどの屋内測位の設定情報や、屋内地図などの、位置情報の表示に必要なデータを事前にダウンロードしておき、緊急時に備え利用可能な状態を常に維持しておくことが必要になる。そこで、平常時にスマートフォンが場所に応じてこれらを自動的にダウンロードする仕組みの実装が前提となる。ここから要求 Rs1.1.2 が導かれる。

また、要求 Rs1.1.3 は、表 6-4 の要求 R2.1.2 に基づいて、緊急時の場面でのスマートフォンの電池切れリスクを小さくすることから導かれたものである。

*要求 R2.1.2: 災害が発生した直後に情報を提供すること*

要求 Rs1.1.3 を満たす手段には、ビーコンの位置座標を用いるシンプルな測位アルゴリズムを実装し、計算負荷を軽量にすることが考えられる。したがってこの観点からも、設置されたビーコンの位置座標を用いる屋内測位方式を採用することは理に適っている。

#### 6.5.1.2. 測位精度

表 6-3 で示した要求 R1.1.2 は、具体的には通路、店舗、あるいは区画の単位で位置を判別することが目標になる。これらの平均的な幅を仮に 6 m と見積ることになると、ここから要求される測位精度は平均 3 m となる。

*要求 R1.1.2: 間取りの中における位置関係を判別できる精度で端末を測位し、端末へ位置情報を提供すること*

また、表 6-4 の要求 R2.2 と要求 R2.3 に基づいて、緊急時に利用者の位置に応じた情報を提供するため、避難経路の表示において、利用者が位置している通路を確実に示し、隣接する区画を利用者の位置として表示することがないようにする必要がある。

*要求 R2.2: 利用者の位置に応じた災害情報を迅速に利用者へ提供すること*

*要求 R2.3: 利用者の位置に応じた避難誘導情報・避難経路情報を迅速に利用者へ提供すること*

建築基準法施行令第 119 条（廊下の幅）において、廊下の幅は最も狭い場合では 1.2 m 以上としなければならないこととされている。これに基づけば、要求される測位精度は平均 0.6 m となるが、測位精度の値は実際の屋内空間の間取りに応じて決めることも可能である。ここでは平均 0.6 m をそのまま採用し、要求 Rs1.2 が導かれる。

また、要求 R2.1 より、屋内測位機能は緊急時の避難中にも確実に測位結果を提供できる必要がある。緊急時の避難中には、急いだり、あわてたり、焦ったりすることで利用者が普段とは異なる動作をする可能性があり、そのときも測位精度の要求を達成する必要がある。これに基づいて要求 Rs1.2.1 が導かれる。設置されたビーコンの位置座標を用いる屋内測位方式は、無線信号の受信状況が十分な状態であれば、端末を持つ利用者の不規則な動作や予期せぬ端末の振動に対しては測位精度は劣化しにくい。そこで、歩行者自律航法よりも、安定して測位結果を示すことが容易になると考えられ、要求 Rs1.2.1 を満たす手段とすることができる。

### 6.5.1.3. 実現手段

第 4 章で示した屋内測位環境では、設置されたビーコンの位置座標を用いて屋内測位を行うことを意図しているため、本項でここまで述べたような設計を実現することが可能である。したがって、この屋内測位環境において、要求 Rs1.2 で示された測位精度の達成が可能であれば、表 6-6 の要求を満たす屋内測位サブシステムが実現できることになる。

### 6.5.2. 屋内測位環境構築サブシステム

本項では、屋内測位環境構築サブシステムに対する下位要求を抽出する。屋内測位環境構築サブシステムに対する要求と、その根拠となるシステム要求を表 6-7 に示す。

表 6-7 屋内測位環境構築サブシステムに対する要求

No.	要求	根拠
Rs2.1	人が利用する屋内空間の全域に屋内測位環境を構築すること	R1.2, R2.1.3
	Rs2.1.1 屋内測位環境の構築を、屋内空間の利用開始までに完了できること	R1.2.1
	Rs2.1.2 屋内空間の形状や物体配置を変更したときに、屋内測位精度を維持すること	R1.2.2
Rs2.2	構築された屋内測位環境においてビーコンの位置座標を用いる屋内測位が可能であること	Rs1.1.1, Rs1.1.3, Rs1.2.1

要求 Rs2.1 は、表 6-3 の要求 R1.2 および表 6-4 の要求 R2.1.3 よりに基づいて導かれたものである。また、前項の屋内測位サブシステムに対する分析結果に従うと要求 Rs2.2 が導かれる。これらの要求を満たす屋内測位環境構築サブシステムは、第 4 章で示した屋内測位環境を構築の対象として第 5 章の提案方式を用いることで実現が可能と考えられる。ここで、

要求 Rs2.1.1 に、2.2.3 項で述べたように、一部の屋内空間に対しては迅速に屋内測位環境を構築できる手段を必要とする。

以下、6.3.2 項で示した平常時の場合のユースケースを想定して、屋内測位環境の構築に許容される時間について検討する。

#### 6.5.2.1. 屋内測位環境構築のシナリオ

展示会などで実際に利用することを想定事例として、空間構成が可変の領域に屋内測位環境を構築する場合を考える。環境構築の作業工程の進行は、会場で開催されるイベントの日程に合わせる必要がある。そこで、開催されるイベントが入れ替わる谷間の期間内に、会場設営作業の一部として環境構築の作業が実行できる必要がある。

屋内測位環境を構築に要する時間は、一般的にはなるべく短くできることが望ましいことではあるが、開催されるイベントが交代する場面では、前のイベントが開催終了した当日中に次のイベントの会場設営作業が完了することが必要になると考えられる。次のイベントを翌日に開始することができなければ、会場を利用する時間効率に大きく影響するためである。したがって、イベントの会場設営の作業に許容される時間は数時間程度と想定され、屋内測位環境の構築はその間に実施する必要がある。

#### 6.5.2.2. ビーコン信号の観測に許容される時間

屋内測位環境の構築のために現場に必要な作業は、ビーコンの設置、距離推定パラメータの測定、現場に設置したビーコンの信号観測の 3 つである。このうち、ビーコンの設置は 4.2.2 項で述べたように空間の区切りの物体に事前にビーコンを取り付けておくことで、会場設営の作業そのものによって完了する場合を考える。残る 2 つの作業において、ビーコン信号を測定する作業が発生する。そこで、ビーコンの信号の測定に必要な合計時間に対して目標を考えることにする。ビーコン信号を測定する工程は、会場設営そのものの作業に必要な時間リソースを圧迫しない程度の時間で実施できる必要があると考えられる。そこで、ビーコン信号の測定に許容される時間を仮に 1 時間と見積ることにする。

#### 6.5.3. 提案手法に対する達成目標

本節におけるここまでのサブシステムの要求分析結果から、提案手法に対する達成目標を次の通り設定する。

- 屋内測位環境の構築において、提案手法を用いてビーコンの位置座標を取得するために行うビーコン信号の測定に対し、所要時間の達成目標を 1 時間以内とする。

## 第7章 提案手法の評価

---

本章では，提案手法の実験による評価について述べる．7.1 節で実験方法について述べ，7.2 節で実験結果を示す．最後に 7.3 節で，実験結果に基づいて検証を行う．

---

## 7.1. 実験方法

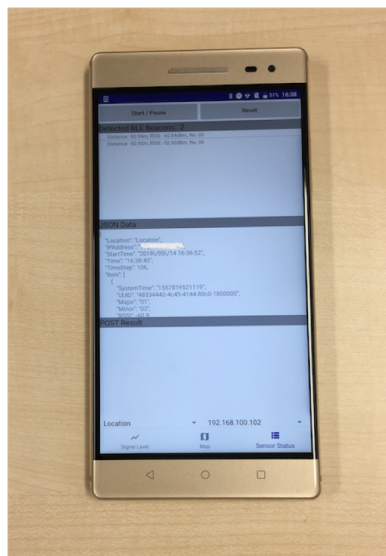
提案手法を評価するため屋内空間にビーコンを設置して実験環境を構築した。用いるビーコンは、4.3 節の選定結果にしたがい BLE ビーコンとした。電波伝搬モデルのパラメータを検討するために実験環境内でビーコン信号を静止しながら観測する予備実験を行った上で、スマートフォンを所持した人物が実験環境内でビーコン信号を歩行観測する位置推定実験を行った。

### 7.1.1. 使用機器

実験に使用した機器を図 7-1 に示す。BLE ビーコンには、株式会社芳和システムデザイン社製 BLEAD®を使用し、iBeacon として動作している状態を想定しアドバタイジングパケットの送信間隔を 100 ms に設定した。ビーコンの信号の観測に用いるスマートフォンには、受信信号強度の時間変化が確認した中で最も少なかった実機を使用した。機種は Lenovo 社製 Phab 2 Pro であり、OS は Android 6.0 (Marshmallow) を搭載している。観測データの収集のために、Android API の BluetoothLeScanner クラスを用いて受信信号強度のログを記録する観測用アプリケーションを作成し、スマートフォンにインストールして使用した。作成した観測用アプリケーションでは、受信した受信信号強度値に対して単純移動平均により平滑化を行っている[100]。移動平均算出のための時間区間幅において取得した同一のビーコンの受信信号強度に対し、平均値と分散値を求め、ログとして記録する[101]。移動平均を求める時間区間幅は 1 秒、観測データの記録レートは 5 Hz とした。



(a) BLE ビーコン



(b) スマートフォン

図 7-1 実験に使用した機器



### 7.1.2. 実験環境

実験は図 7-2(a)に示すような吹き抜けのある屋内空間で実施した。ビーコンを設置した領域の広さは 13 m × 11 m である。中央には八角錐形のランドマークが存在し、その周囲に木製のベンチが取り囲んでいる。ビーコン設置領域は、吹き抜けの真下に位置している。吹き抜けの中央部は、19.4 m の高さでガラス張りとなっており、その周囲には図 7-2(b)に示すように段階的に 15.2m, 11.0 m, 6.8 m の高さで天井面が存在する。吹き抜け部分の側面は、四方を壁またはガラスが取り囲んでいるが、床面と同じ階では、ビーコン設置領域の外周部分に柱はあるが壁はない。ビーコン設置領域の外側の天井の高さは 2.6 m である。

以上のことから、障害物は少ないが、近くに壁や障害物が全くない開放的な状況と比べると、この実験環境では受信信号強度から推定する距離の精度はある程度劣化すると考えられる。しかし、実際の屋内空間では、電波の反射や遮蔽の影響をある程度受けてしまうことは避けられないため、この実験環境は屋内測位システムを構築する空間を想定した現実的な例としてみなすことができる。



(a) ビーコン設置領域



(b) 吹き抜け上部の様子

図 7-2 実験環境

### 7.1.3. ビーコンの配置と送信信号強度設定

位置推定実験では、実験環境内にビーコンを図 7-3 に示す配置で設置した。アンカビーコンは、四隅にある柱の側面に床面から 1.8 m の高さで取り付けられた。位置推定対象のビーコンは、木製のベンチの背もたれの上部に床面から 0.7 m の高さで取り付けられた。これらは図 7-3 中のビーコン番号における(1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8)の組み合わせによって、すべてがツインビーコンであるとした。ツインビーコンの間隔はいずれも 2.5m である。

すべてのビーコンは図 7-4 に示す例のように、アンテナが上になるように向きを統一し

て設置した。ビーコンのアンテナ利得が実際には無指向性ではないことの影響を軽減するためである。

使用したビーコン機種の BLEAD では、送信信号強度の設定項目において選択可能な値は最大+4dBm となっている。本実験では、電池寿命を考慮した利用状況を想定して、すべてのビーコンにおいて送信信号強度を-8dBm に設定した。

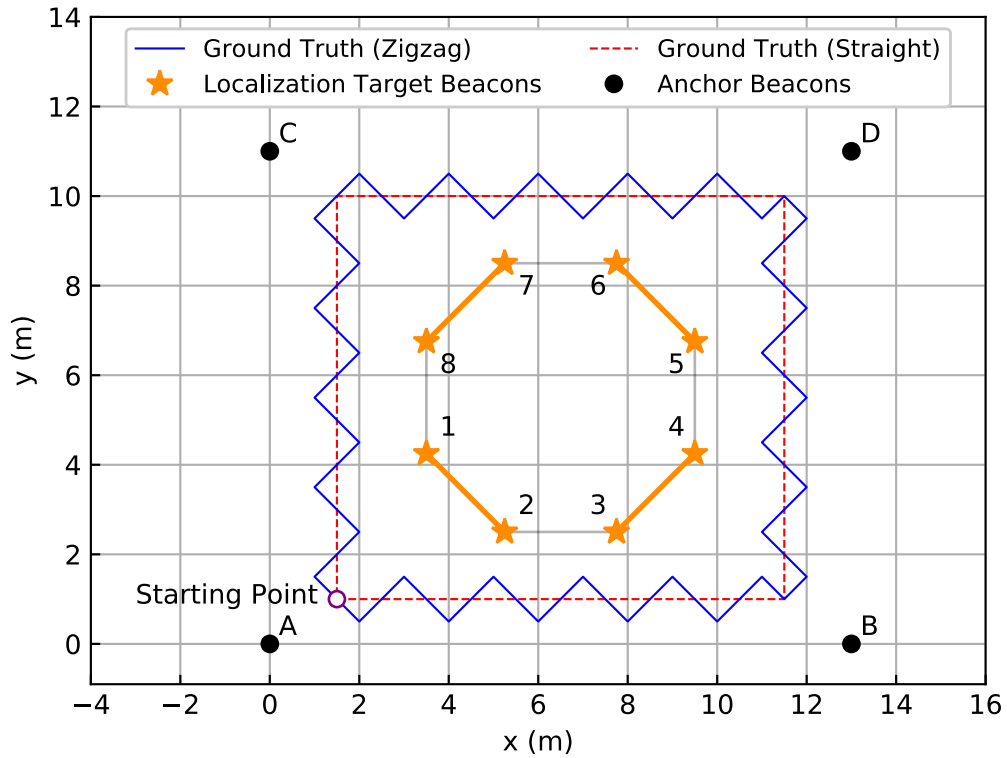


図 7-3 実験環境のフロアマップ



図 7-4 ビーコンの設置方法

#### 7.1.4. 電波伝搬モデルの決定のための予備実験

実験環境における電波伝搬モデルを調査するため、現場においてビーコン信号の観測を次のようにして行なった。環境内にビーコンを1つだけ設置した状態で、スマートフォンを用いて異なる観測地点でビーコンとの水平距離を変えて観測データを収集した。ビーコンの設置位置は図 7-3 中のツインビーコン5またはアンカビーコンBの位置の2通りとした。観測地点は、ビーコンの設置場所から床面においてそれぞれ 1.0 m, 2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m 離れた5通りとし、各地点で観測者がスマートフォンを保持して直立し、静止して約 30 秒間観測した。見通し内信号を受信できるように、ビーコンとスマートフォンの間は遮るものが何もない状態とした。観測者がスマートフォンを保持する位置は、ビーコンとの水平距離を床面で計測した値に保つため、ツインビーコンに対しては腰の前、アンカビーコンに対しては額の上とした。スマートフォンの向きは、スマートフォンを縦に立てて、画面を観測者側に向けた状態とした。

#### 7.1.5. 位置推定実験

位置推定実験では、実験環境中央にあるベンチの周囲を観測者がスマートフォンを所持して歩行し、観測データを収集した。歩行経路は、図 7-3 に示す「ジグザグ」「直線」の2パターンの形状を使用した。観測者は、観測用アプリケーションを起動したのちに、座標 (1.5 m, 1.0 m) の地点で観測ログの記録を開始し、2 秒間静止してから歩行を開始した。以降、スマートフォンを保持する位置を身体に対して保ったまま反時計回りに進み、1 周して少し過ぎたあたりとなる 90 秒経過時点で観測ログの記録を停止した。観測中は、スマートフォンを図 7-5 に示すように額の上に保持した。これを1回の観測とし、上記2パターンに対してそれぞれ8回ずつ、合計16回の観測を行った。スマートフォンの保持する位置を額の上とすることで、ツインビーコンとアンカビーコンの両方に対して、見通し内で信号を受信することを可能にしている。

歩行速度は、「ジグザグ」歩行の場合には 0.707 m/s、「直線」歩行の場合には 0.5 m/s とした。「ジグザグ」の歩行経路長は、「直線」歩行の場合の  $\sqrt{2}$  倍となるため、どちらの歩行パターンの場合にも1周にかかる時間は76秒となる。これにより、それぞれの歩行パターンにおいて、歩行を開始してから経過した時間に応じた観測者の歩行位置は、観測の開始から終了までずっと近い位置となる。観測者の歩行を決められた経路と速度で行うため、図 7-3 に示した位置の床面にテープで目印の線をつけ、スマートフォンのメトロノームアプリにより一定のリズムの音を出しながら、1拍あたり決まった距離を歩行した。その上で、図 7-3 に示した形状の歩行経路を上記の速度で進んだ場合の各時刻における位置を、観測者歩行軌跡の Ground Truth として検証に利用した。



図 7-5 観測時のスマートフォン保持姿勢

## 7.2. 実験結果

### 7.2.1. 予備実験結果

予備実験による受信信号強度の測定結果を図 7-6 に示す。プロットで示された受信信号強度の観測値は、約 30 秒の観測の間にも多いときには 10 dBm 近く変動しているが、フェージングの影響で受信信号強度が不安定になっているためと考えられる。

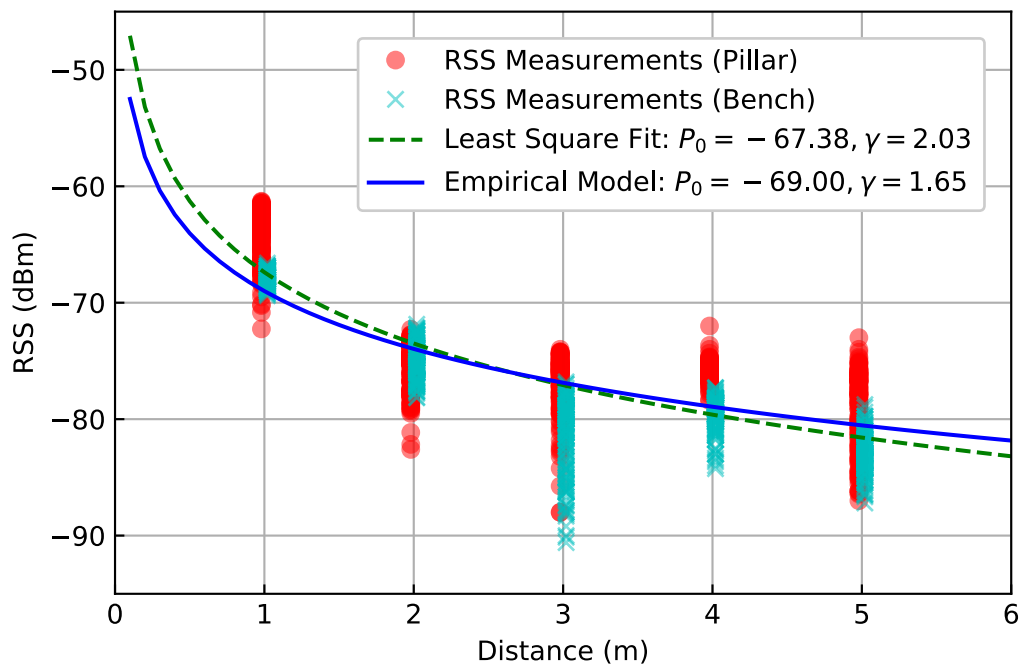


図 7-6 見通し内の信号による受信信号強度と距離の関係

測定結果を式(4-1)にあてはめた上で、次のようにして  $P_0$ ,  $\gamma$  のパラメータに対する 1 組の値を決定した。プロットされた測定値を近似する式(4-1)の曲線を最小二乗法で求めたときには、パラメータの値は  $P_0 = -67.38$ ,  $\gamma = -2.03$  となった。しかし、 $P_0 = -69.0$ ,  $\gamma = -1.65$  のパラメータを後述のビーコン位置推定実験に用いたときにも位置推定が良好な値を示したことから、実験環境に対する経験的に求めた電波伝搬モデルとしてこれらの値を採用し、提案手法の評価に用いた。

## 7.2.2. 位置推定実験結果

位置推定実験により収集した 16 回の観測より、観測データに含まれる受信信号強度を用いて、第 5 章で示した提案手法の推定アルゴリズムによりビーコンとスマートフォンの位置の同時推定を行い、ビーコンの位置座標と観測者歩行軌跡の座標を求めた。推定アルゴリズムのパラメータには表 7-1 に示す値を用いた。観測雑音の分散値は、表 7-1 の最小値を上回る場合には観測用アプリケーションで記録した分散値を用いた。

表 7-1 提案手法の推定アルゴリズムで用いたパラメータ

パラメータ		値
<b>電波伝搬モデル</b>		
基準距離 (1m) における受信信号強度	$P_0$	-69.0 dBm
空間伝搬係数	$\gamma$	1.65
<b>EKF 誤差分散</b>		
スマートフォン位置のシステム雑音	$\sigma_m^2$	1.0 m <sup>2</sup>
ビーコン位置のシステム雑音	$\sigma_b^2$	0.1 m <sup>2</sup>
観測雑音 (最小値)	$\sigma_{RSS}^2$	4.0 dBm <sup>2</sup>
ビーコン間隔に対する仮想受信信号強度の雑音	$\sigma_{VP}^2$	0.1 dBm <sup>2</sup>
<b>EKF の複製</b>		
プライマリビーコン検出時の推定位置の候補数	$N_c$	8
<b>距離マスク</b>		
アンカビーコン (EKF 更新ステップ)		5.0 m
ツインビーコン (EKF 更新ステップ)		10.0 m
ツインビーコン (プライマリビーコン検出時)		5.0 m
<b>仮説の絞り込み</b>		
重みのしきい値		$1 \times 10^{-5}$
2 仮説間の状態ベクトルユークリッド距離のしきい値		5.0 m

観測データに対して距離マスクを用いる場合は、受信信号強度の観測値と電波伝搬モデルから推定される距離が表 7-1 に示す値を超える場合は、その観測を推定において用いないこととした。推定アルゴリズムの EKF 更新ステップでツインビーコンに対して用いる距離マスクは、推定に利用するツインビーコンの個数を多くすることを重視し、その他の場合より大きい値とした。

プライマリビーコンを検出したときの推定位置の候補の数は一定の値  $N_c = 8$  とした。距離マスクの半径は 5.0m であるため、隣接する推定位置の候補どうしの距離は 4.0m 未満となる。

観測終了（90 秒経過）時点における、歩行経路が「ジグザグ」「直線」の場合の位置推定誤差と、推定中の各時刻で用いていた仮説数の最大値を、それぞれ表 7-2 と表 7-3 に示す。各観測あたり、ビーコン位置の推定精度は 8 個のビーコンに関する平均値と最大値を、観測者歩行軌跡の推定精度は、観測中各時刻の歩行者の位置に関する平均値と最大値を示している。

- ビーコン位置の推定精度は、8 回の観測に対する平均値、最大値ともに、歩行経路の違いにより目立った差はみられなかった。合計 16 回の観測を通してのビーコン位置推定精度は平均 2.14 m を達成した。
- 観測者歩行軌跡の推定精度についても同様に、それぞれの歩行経路の比較では 8 回の観測の平均値、最大値ともに近い値を示した。合計 16 回を通しては平均 2.94 m の推定精度であった。
- 仮説数の最大値については観測ごとにばらつきの大きい結果となった。これはフェージングの影響により受信信号強度が不安定になることで、仮説の絞り込みの尤度計算結果が影響を受け、追跡する仮説数が大きく変動しているためと考えられる。歩行経路による平均値の違いは、「ジグザグ」の No.7 の観測における最大仮説数の値が 4432 と突出しているためで、これを除いた平均値は両者ともに似た値となる。

表 7-2 歩行経路「ジグザグ」の場合の推定精度

観測 ID	ビーコン位置推定		観測者歩行軌跡		仮説数 最大値
	平均値	最大値	平均値	最大値	
No. 1	3.10 m	5.43 m	3.15 m	7.51 m	194
No. 2	2.45 m	4.49 m	3.02 m	10.33 m	736
No. 3	1.21 m	1.69 m	2.38 m	5.94 m	224
No. 4	1.93 m	3.20 m	3.20 m	10.27 m	496
No. 5	1.57 m	3.03 m	3.02 m	7.22 m	99
No. 6	1.28 m	2.28 m	3.24 m	7.72 m	504
No. 7	3.43 m	4.73 m	3.42 m	9.46 m	4432
No. 8	2.11 m	3.34 m	2.73 m	9.05 m	224
平均値	2.14 m	3.52 m	3.02 m	8.44 m	863.6

表 7-3 歩行経路「直線」の場合の推定精度

観測 ID	ビーコン位置推定		観測者歩行軌跡		仮説数 最大値
	平均値	最大値	平均値	最大値	
No. 1	1.98 m	2.51 m	3.12 m	8.89 m	256
No. 2	2.11 m	4.72 m	3.02 m	11.17 m	512
No. 3	2.40 m	4.27 m	2.38 m	6.68 m	256
No. 4	2.53 m	3.40 m	2.83 m	10.37 m	98
No. 5	2.15 m	3.40 m	3.08 m	7.96 m	208
No. 6	1.72 m	3.57 m	2.93 m	9.06 m	934
No. 7	2.30 m	3.72 m	2.70 m	7.13 m	128
No. 8	2.02 m	3.23 m	2.78 m	7.43 m	256
平均値	2.15 m	3.60 m	2.85 m	8.59 m	331.0

プライマリビーコン検出時の推定位置の候補数について適切な値を確認するため、 $N_c$  を 4, 6, 10, 12 に変更した場合のビーコンの位置推定精度を確認したところ、歩行観測あたりの平均で 1.21m から 3.62m の間におさまり、仮説数間の目立った優劣の差は生じなかった。ある一定以上のノイズが観測データに含まれていたためと考えられ、 $N_c$  を 8 より増やしても大きな精度の向上は期待できないことになる。また、実験結果では 8 より小さい  $N_c$  の値の場合でも  $N_c = 8$  の場合と同等の推定精度を示したが、シミュレーションで  $N_c$  が 4 または 6 の場合の推定精度を確認したところ、試行機会によって推定結果の収束が遅くなる現象がみられた。そこで、本研究の位置推定実験では  $N_c = 8$  を適切な値と判断した。

### 7.3. 検証

本節では、まず、提案手法におけるビーコン位置推定精度と、推定に必要な歩行観測時間を、位置推定実験の結果を用いて検証する。次に、ビーコン位置推定精度に影響を及ぼすことになる、観測者歩行軌跡の推定精度を検証する。続いて、推定に用いる距離マスクが、推定精度にどのような効果を及ぼすかについて確認する。また、推定アルゴリズム中の各時刻ステップにおけるビーコンの個数を調べることで、得られたビーコン位置推定精度が SLAM を実行した結果であることを確認する。最後に仮説数の時系列変化を図示することで、推定アルゴリズムに必要な計算量を可視化して検証する。

#### 7.3.1. ビーコン位置座標の推定

本項では、ビーコン位置推定精度の観測あたりの平均値が、位置推定実験の 16 回の観測の中で最も高かった、歩行経路「ジグザグ」の No.3 の観測を用いて、ビーコン位置推定における提案手法のアルゴリズム（ツインビーコン・複数仮説追跡）の特性を検証する。

比較対象として、位置推定対象のビーコンを、ビーコン間の距離情報を持たない個別のビーコン（シングルビーコン）として扱い、推定アルゴリズムに単一の EKF を用いた場合（シングルビーコン・単一仮説）を考え、同じデータに対して推定を行った。シングルビーコン・単一仮説の推定では、位置推定対象のビーコンの初期化を、それぞれのビーコンの検出時点における観測者推定位置を中心とした 10m 四方の範囲の中からランダムな位置を選択することで行った。

##### 7.3.1.1. 位置推定精度

図 7-7 は 90 秒の観測終了時点のビーコン位置の推定結果を平面図上に表したものである。提案手法を用いているツインビーコン・複数仮説追跡の場合は、平均 1.21 m の良好なビーコン位置推定精度を示しただけでなく、ビーコンの配置形状を保って位置推定ができていることがわかる。他の観測においても結果を確認したところ、配置形状に若干の崩れがみられる場合も存在したが、比較的安定した結果が得られていた。一方、シングルビーコン・単一仮説の場合は、ビーコンによっては 4m 以上の誤差となり、明らかに推定精度が劣る。また、ビーコンの配置形状も崩れてしまっている。さらに、ビーコンの初期化位置に別のランダムな値を選択して試行を繰り返したところ、推定誤差、配置形状ともに大きく変動し、安定した結果を得ることができなかった。また、歩行経路座標が既知であったとして、同じ観測データを用いて図 7-3 の Ground Truth を基準点とした最小二乗法による三点測位でビーコンの位置を推定したところ、平均誤差 0.86 m となった。提案手法の結果は、平均 1.21 m とこれより劣るものの、その差は大きくはない。



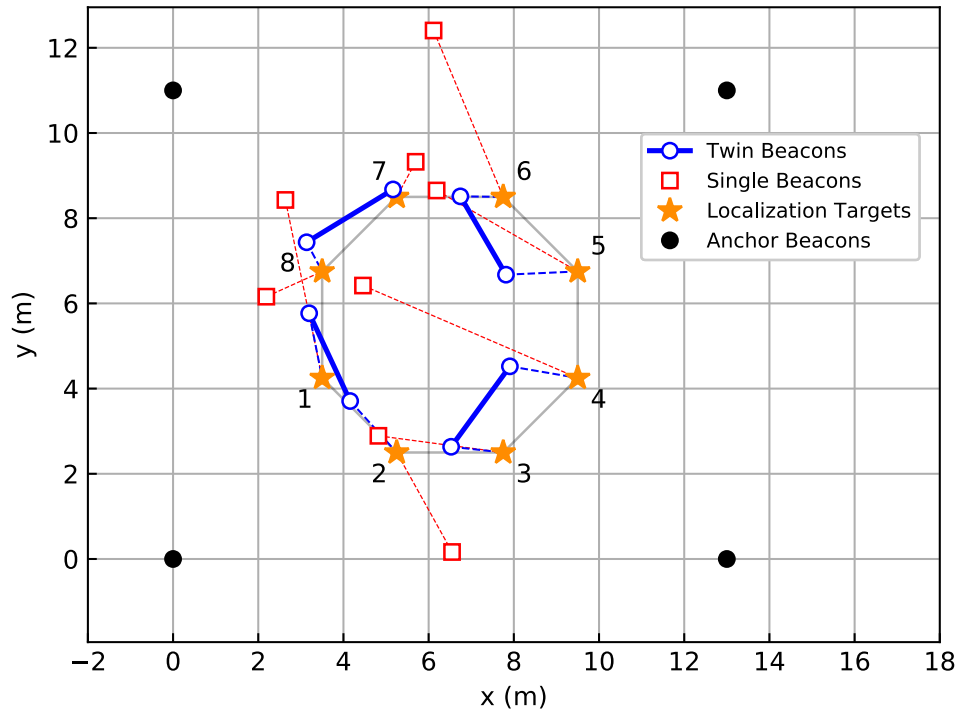


図 7-7 観測終了時点のビーコン位置の推定結果

### 7.3.1.2. 推定に必要な歩行観測時間

ここでは、提案手法において必要な歩行観測時間を確認するとともに、ビーコン推定位置の時系列誤差について提案手法と従来手法を比較する。推定アルゴリズムは次の 4 つを取り上げ、各手法のビーコン推定位置の時系列誤差を図 7-8～図 7-11 に示す。図中の番号はビーコンの番号を表し、図 7-3 の番号と対応している。4 つの場合いずれも、推定は観測した受信信号強度のみを用いて行なっている。また(3)と(4)では、ビーコン間隔情報を推定で用いていないため、シングルビーコンに対する推定となる。

- (1) 図 7-8: ツインビーコン・複数仮説追跡 (提案手法)
- (2) 図 7-9: シングルビーコン・単一仮説
- (3) 図 7-10: 3.2.3 項の手法 = 混合ガウス分布を用いた FastSLAM (SOG-FastSLAM) [68]
- (4) 図 7-11: 3.2.4 項の手法 = 混合ガウス分布を用いた Federated Information Sharing (FIS) [70]

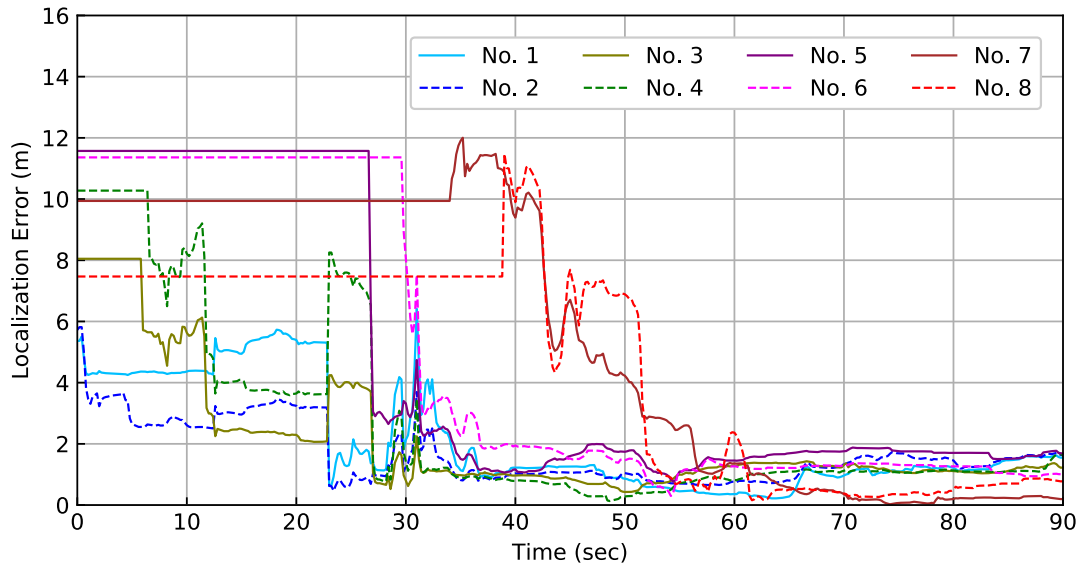


図 7-8 ビーコン推定位置の時系列誤差 (ツインビーコン・複数仮説追跡)

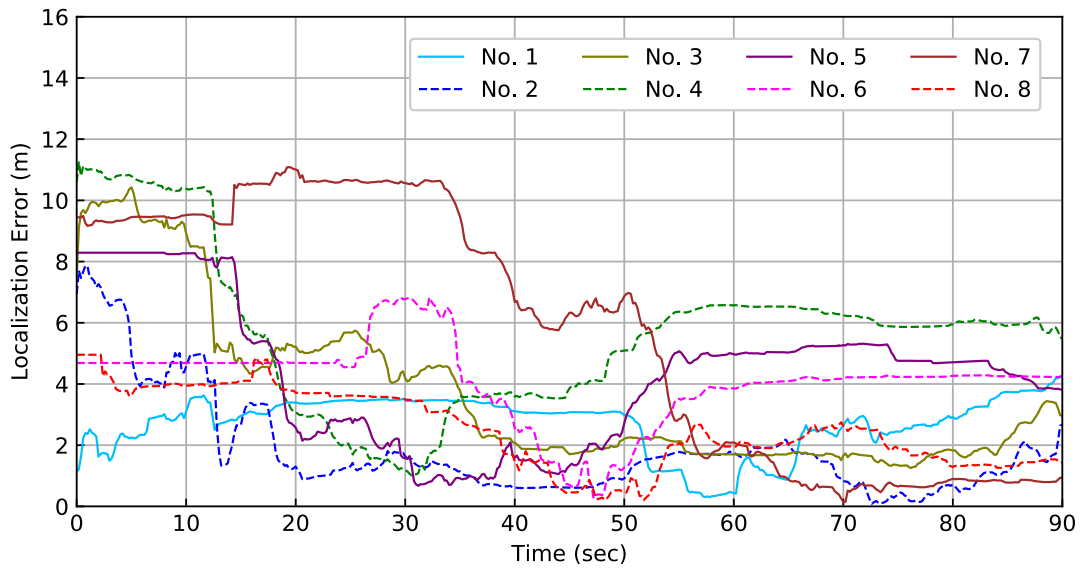


図 7-9 ビーコン推定位置の時系列誤差 (シングルビーコン・単一仮説)

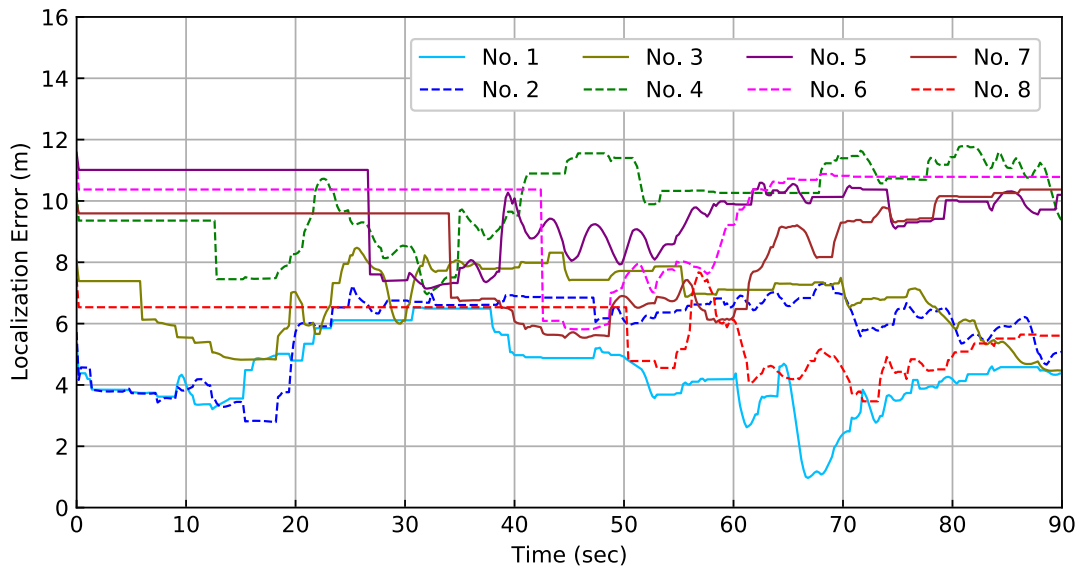


図 7-10 ビーコン推定位置の時系列誤差 (シングルビーコン・SOG-FastSLAM)

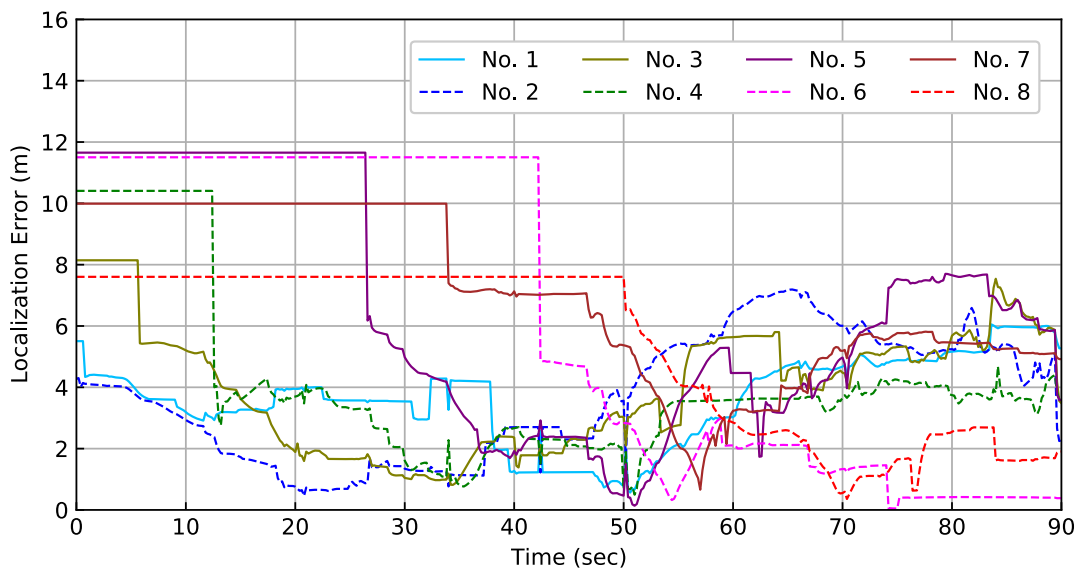


図 7-11 ビーコン推定位置の時系列誤差 (シングルビーコン・FIS)

(1)の提案手法 (ツインビーコン・複数仮説追跡) の場合では、観測開始から 60 秒後の時点で推定値が収束し、既に観測終了時点に近い精度が得られていることがわかる。位置推定実験における他の観測の場合では、観測開始から 60 秒後の時点では推定値が収束に至っていない場合もみられたが、多くの場合においてその後の推定で収束に向かい、精度に改善がみられていた。以上のことから、実験環境においては、提案手法を用いて 90 秒程度の観測によりビーコン位置座標の推定が実現できることが確認できた。

一方、(2) のシングルビーコン・単一仮説の場合では、観測開始から 40 秒後の時点で精度の改善がみられるものの、その後も観測開始から 90 秒後の時点に至るまで推定精度はあまり改善されていない。(3) のシングルビーコン・SOG-FastSLAM の場合と、(4) のシングルビーコン・FIS の場合においても同様に、観測開始から 90 秒後の時点までに推定値の収束は果たされていない。各手法が提案された参考文献の場合と異なり、推定アルゴリズムで自律航法を融合させていないことが、3.2.5 項で述べたように推定値の収束までの時間に影響を及ぼしたことが原因と考えられる。

表 7-4 に、観測開始から 90 秒後の時点での各手法におけるビーコン位置推定精度を示す。(1) の提案手法が最もよい推定精度を示している。この結果は、他の 3 つの手法では、より収束した推定値を得るために、90 秒よりも長い観測時間を必要としていることを表している。

表 7-4 各手法における観測開始から 90 秒後の時点のビーコン位置推定精度

推定アルゴリズム	推定精度 (平均値)
(1) ツインビーコン・複数仮説追跡 (提案手法)	1.21 m
(2) シングルビーコン・単一仮説	3.23 m
(3) シングルビーコン・SOG-FastSLAM	7.53 m
(4) シングルビーコン・FIS	3.18 m

シングルビーコン・単一仮説の場合では、どのくらいの観測時間で推定値が収束するのかを確認するために、複数の歩行観測によるデータを連結することで擬似的に長時間の観測データを生成して推定を行った。擬似観測データは、位置推定実験の歩行経路「ジグザグ」の 8 回の観測から、歩行経路を 1 周した分のデータを抽出し、No.3, No.6, No.5, No.4, No.8, No.2, No.1, No.7 の各観測 ID の順番で連結して生成した。この観測 ID の順番は、ツインビーコン・複数仮説追跡の場合のビーコン位置推定精度が高かった順番である。図 7-12 に 8 周回分の擬似観測データに対してシングルビーコン・単一仮説により推定したビーコン推定位置の時系列誤差を示す。この結果では、位置推定誤差がすべてのビーコンで 2.1 m 以内に収束する時点が存在しているが、最も速い場合で 360 秒後となっている。したがって、シングルビーコン・単一仮説を用いる場合は、提案手法より長い観測時間を必要としていることがわかる。また、それ以降の時点で位置推定誤差が再び劣化に転じているビーコンが存在している。これは、この区間で連結された元の観測データにおいて、提案手法を用いた場合のビーコン位置推定精度が手前の区間よりも悪いことから、観測データに含まれる誤差が原因になっていると考えられる。

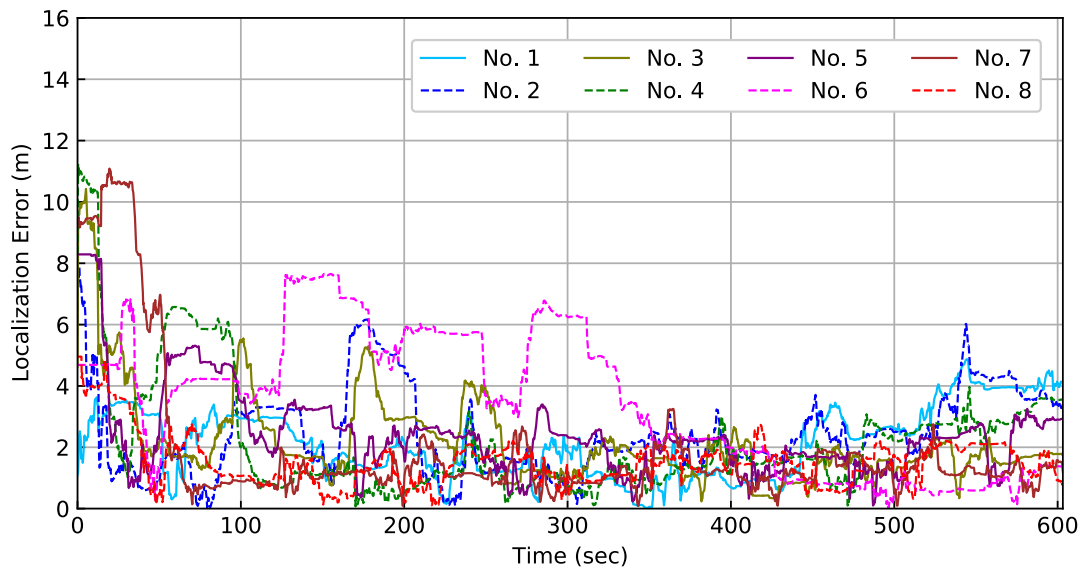


図 7-12 擬似観測データによるビーコン推定位置の時系列誤差  
(シングルビーコン・単一仮説)

### 7.3.2. 観測者歩行軌跡の推定

本項では、前項と同じく歩行経路「ジグザグ」の No.3 の観測を用いて、観測者歩行軌跡の推定の様子を分析し、シングルビーコン・単一仮説の場合と比較する。図 7-13 は 90 秒の観測中における観測者の歩行軌跡の推定結果を平面頭上に表したものである。提案手法を用いているツインビーコン・複数仮説追跡の場合は、観測者が実験環境を周回して移動する軌跡が得られているが、歩行経路に沿ってジグザグに移動する状況までは表現できていないことが確認できる。シングルビーコン・単一仮説の場合においても、一部で歩行経路を大きく外れているものの、実験環境を周回して移動する軌跡となっている。

観測者歩行軌跡の時系列誤差を図 7-14 に示す。ツインビーコン・複数仮説追跡とシングルビーコン・単一仮説のそれぞれの場合に極端に大きな差はみられない。これは、シングルビーコン・単一仮説の場合でも、比較的長い時間帯でアンカビーコンの信号を観測、利用できていたことで、観測者の移動を追跡できたためと考えられる。しかしながら、それでもシングルビーコン・単一仮説の場合にビーコン位置の推定精度が低いことは、ビーコン位置の初期化精度が低いことにその理由を求めることができる。

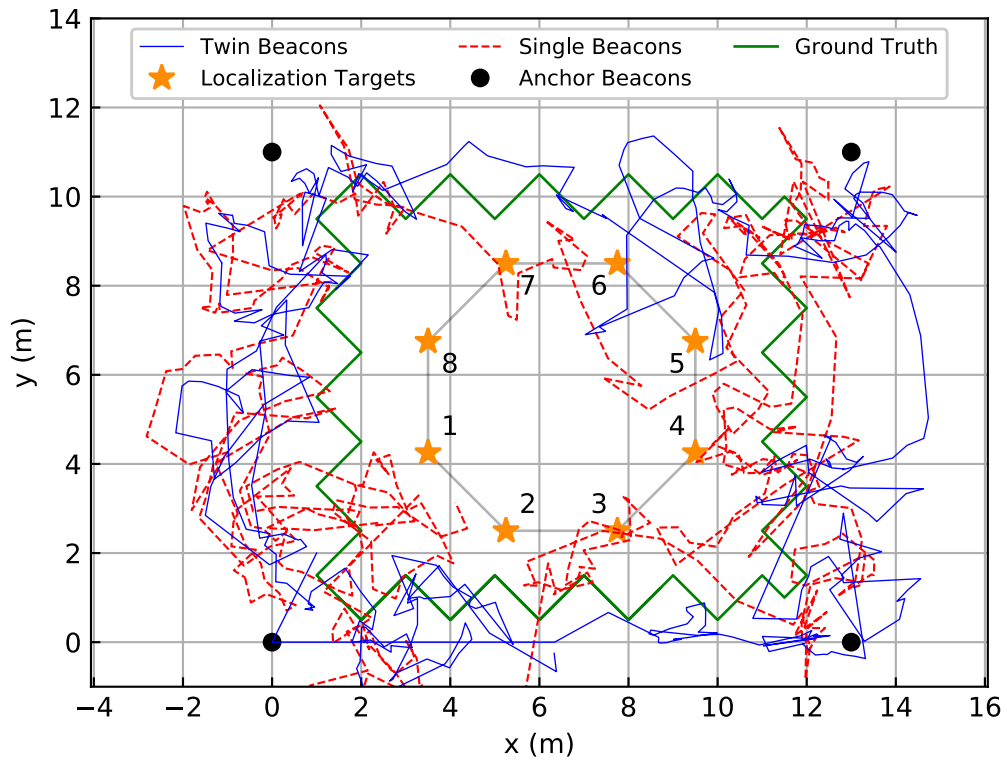


図 7-13 観測者歩行軌跡の推定結果

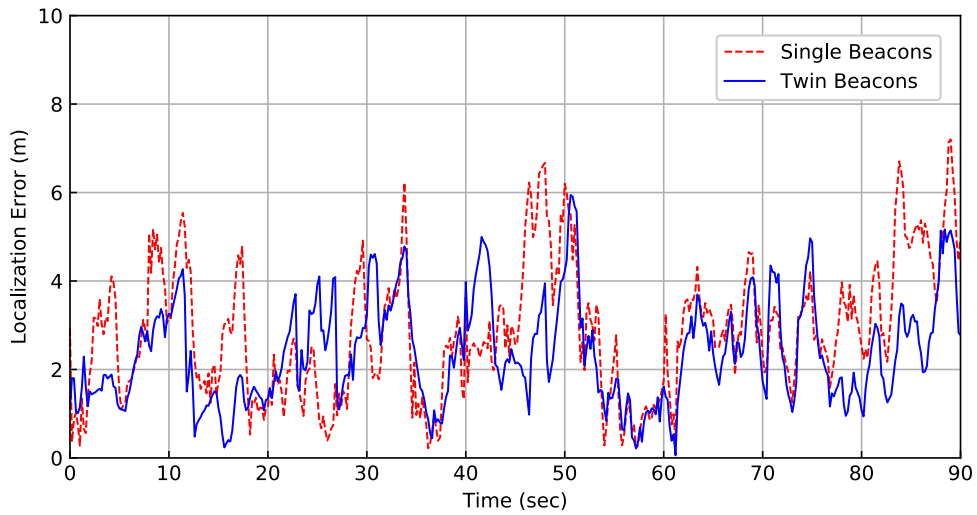


図 7-14 観測者歩行軌跡の時系列誤差

### 7.3.3. 仮説数の時系列変化

位置推定実験における 16 回の観測に対して提案手法による推定を行ったときの、推定アルゴリズム中の仮説数の時系列変化を図 7-15 に示す。仮説数は、7.2.2 項でも述べたように観測ごとのばらつきが大きくなっているのがこの図からも明らかである。また、歩行経路の違いによる差はここでもみられない。一方で、いずれの観測においても仮説数は図 5-7 に示される数より大幅に小さくなっているが、仮説の絞り込み処理が働いた結果であると考えられる。また、10 秒、30 秒、50 秒の各時点の近辺で 3 回の仮説数のピークがみられる。この理由は、プライマリビーコン検出時の距離マスクによって、ツインビーコンが推定アルゴリズムに組み込まれるタイミングが分散されたためと考えられる。もし、このタイミングが 1 つに集中すると、仮説数のピークは図 7-15 の結果よりも高くなると考えられる。したがって、プライマリビーコン検出時の距離マスクは、推定アルゴリズムの計算負荷が瞬間的に大きくなるのを防ぐことに貢献しているといえる。

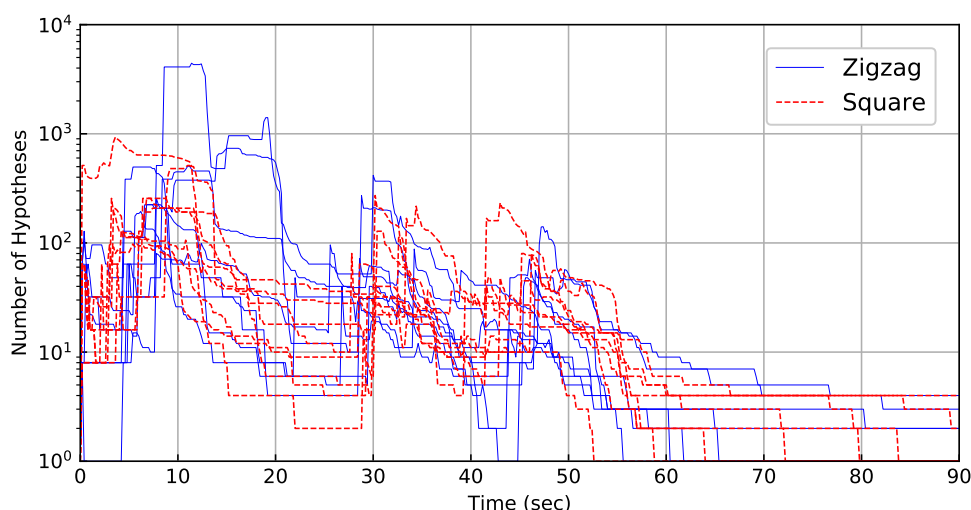


図 7-15 仮説数の時系列変化

ここで、ツインビーコンを用いたことによる仮説数の削減効果を確認する。位置推定対象のビーコンをシングルビーコンとして扱った上で、推定アルゴリズムに複数仮説追跡を用い（シングルビーコン・複数仮説追跡）、位置推定実験結果に対して推定を行った。提案手法（ツインビーコン・複数仮説追跡）で推定した場合と比較した結果を表 7-5 に示す。

表 7-5(a)は 90 秒の観測終了時点における推定精度について、観測あたりの平均値・最大値に対して 16 回の観測の平均値を求めたものである。推定精度に関しては、シングルビーコンの場合とツインビーコンの場合の差はわずかである。これにより、観測時間の短縮効果が、推定アルゴリズムで複数仮説追跡を用いることによりもたらされていることが確認された。シングルビーコンの場合でも、複数仮説追跡を用いれば、ビーコン位置推定のための

観測時間の短縮については可能であるといえる。

一方、表 7-5(b)に示す推定中の仮説数の最大値については、ツインビーコンの場合がシングルビーコンの場合に比べて大幅に少ない仮説数を示している。シングルビーコンの場合に対するツインビーコンの場合の減少率は、観測あたりでは最小の場合に 36.1%、最大の場合に 99.2%とばらつきが見られるものの、16 回の観測の平均の減少率は 85.2%であった。全体を通してはツインビーコンによる仮説数の削減効果が確認できたといえる。

表 7-5 複数仮説追跡を用いた推定のシングルビーコンとツインビーコンの比較  
(a) 推定精度 (90 秒の観測終了時点・16 回の観測の平均値)

推定アルゴリズム	ビーコン位置推定		観測者歩行軌跡	
	平均値	最大値	平均値	最大値
シングルビーコン・複数仮説追跡	2.16 m	4.74 m	2.75 m	8.02 m
ツインビーコン・複数仮説追跡	2.14 m	3.56 m	2.94 m	8.51 m

(b) 推定中における仮説数の最大値

観測 ID	歩行経路「ジグザグ」			歩行経路「直線」		
	シングル	ツイン	減少率	シングル	ツイン	減少率
No. 1	16760	194	98.8%	32768	256	99.2%
No. 2	1152	736	36.1%	1072	512	52.2%
No. 3	2384	224	90.6%	2512	256	89.8%
No. 4	19904	496	97.5%	2008	98	95.1%
No. 5	3888	99	97.5%	4088	208	94.9%
No. 6	11656	504	95.7%	2712	934	65.6%
No. 7	29696	4432	85.1%	7384	128	98.3%
No. 8	832	224	73.1%	3928	256	93.5%
平均値	10784.0	863.6	84.3%	7059.0	331.0	86.1%

#### 7.3.4. 歩行観測者によるビーコン信号の遮蔽の影響

ここまでの検証で用いた観測データは、位置推定実験においてスマートフォンを図 7-5 の通り歩行観測者の上に持ち上げた位置で取得された。これは、歩行観測者によってビーコン信号が遮蔽されることが検証に影響するのをできるだけ避けるためである。しかし、実用的な場面では、歩行観測者によるビーコン信号の遮蔽は発生することになる。本節では、スマートフォンを歩行観測者の身体の前に保持して観測データを取得した場合のビーコン位置推定精度を確認する。



実験は 7.2.2 節の位置推定実験と同じ場所ではあるが、異なる機会に実施した。また、ツインビーコンの数は 6 個、観測データの記録レートは 1Hz、歩行速度は 0.36m/s という点で実験の条件が異なっている。図 7-16 は提案手法のアルゴリズム（ツインビーコン・複数仮説追跡）で推定した結果における、観測開始から 90 秒経過時点のビーコン推定位置を平面図上に表したものである。歩行経路は「直線」で観測を行った。得られたビーコン位置推定精度は平均 2.73 m であった。この結果は 7.2.2 節の位置推定実験と比較して大幅に劣っているものではない。したがって、スマートフォンを保持する位置が身体の前、すなわちスマートフォンを利用するときの自然な持ち方で観測を行っても、ビーコン位置推定精度の劣化は少ないと考えられる。

このようになる理由は、ビーコンの受信信号強度の観測値には、信号の遮蔽の有無によらず誤差が含まれており、その影響が歩行観測者による遮蔽の影響よりも大きいためと考えられる。観測値における誤差の原因としては、信号のマルチパスの影響や、現実の屋内空間に対する電波伝搬モデルのずれなどが挙げられる。

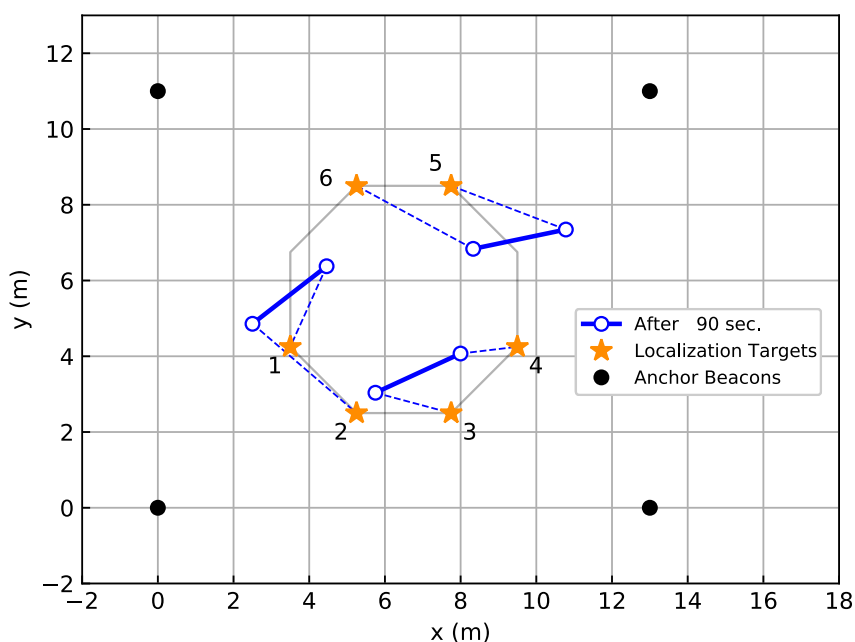


図 7-16 スマートフォンを身体の前に保持した場合のビーコン位置の推定結果

### 7.3.5. 距離マスクの効果

提案手法の推定アルゴリズムは 4.3.3 項で定義した距離マスクを用いているが、本項では、提案手法によるビーコン位置推定における距離マスクの効果を確認する。7.2.2 項で示した位置推定実験における歩行経路「ジグザグ」の No.3 の観測データを用いて、提案手法の推定アルゴリズムにおいて、EKF 更新ステップの距離マスクのあり、なしのそれぞれの場合で推定を行った結果を比較する。

図 7-17 は 90 秒の観測終了時点のビーコン位置の推定結果を平面図上に表したものである。8 つのビーコンの位置推定精度の平均は、距離マスクなしの場合の 1.21 m に対して、距離マスクなしの場合は 4.47m に劣化した。精度劣化の原因は、4.3.3 節で述べたとおり観測者に対する距離が遠いビーコンの観測雑音に起因すると考えられる。この結果より、距離マスクの適用はビーコン位置推定精度を高めるために重要な役割を担うことが確認できた。

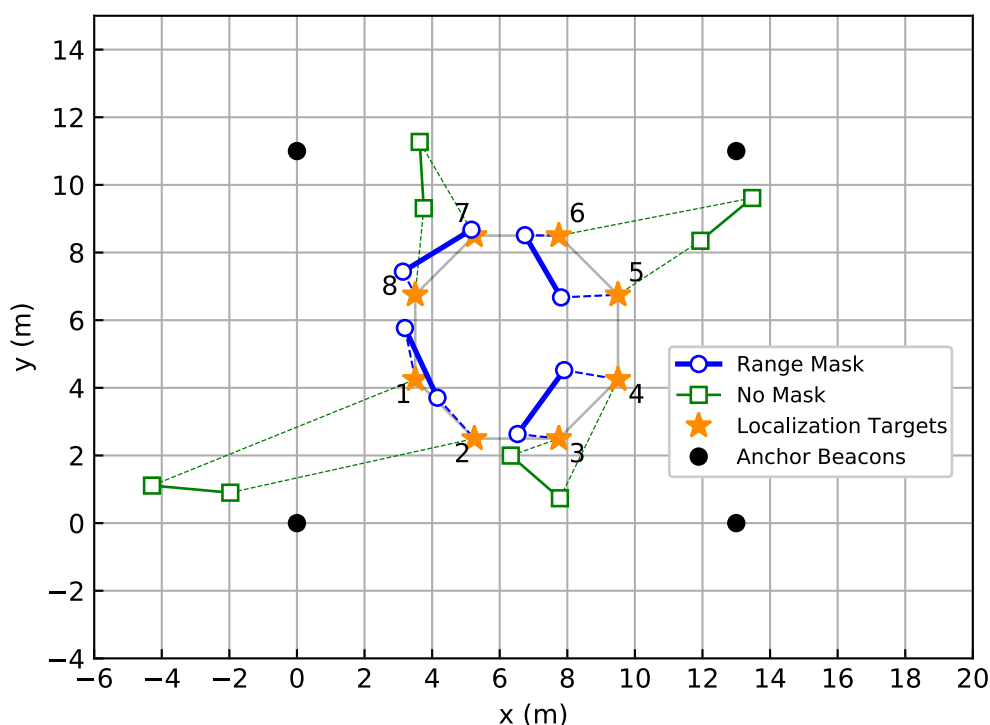
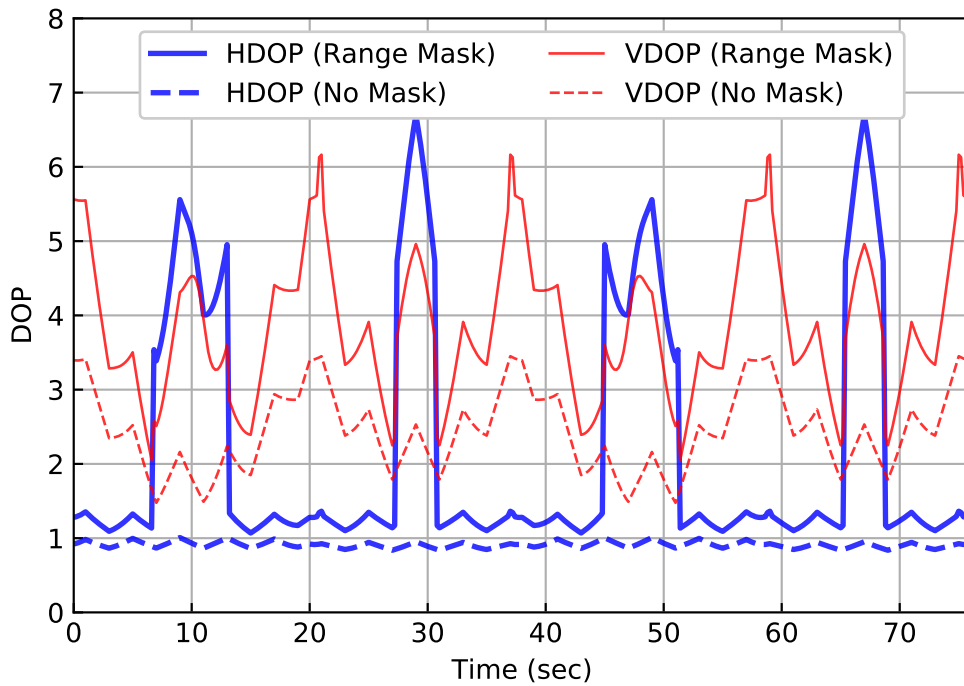


図 7-17 ビーコン位置座標の推定結果における距離マスクの有無の比較

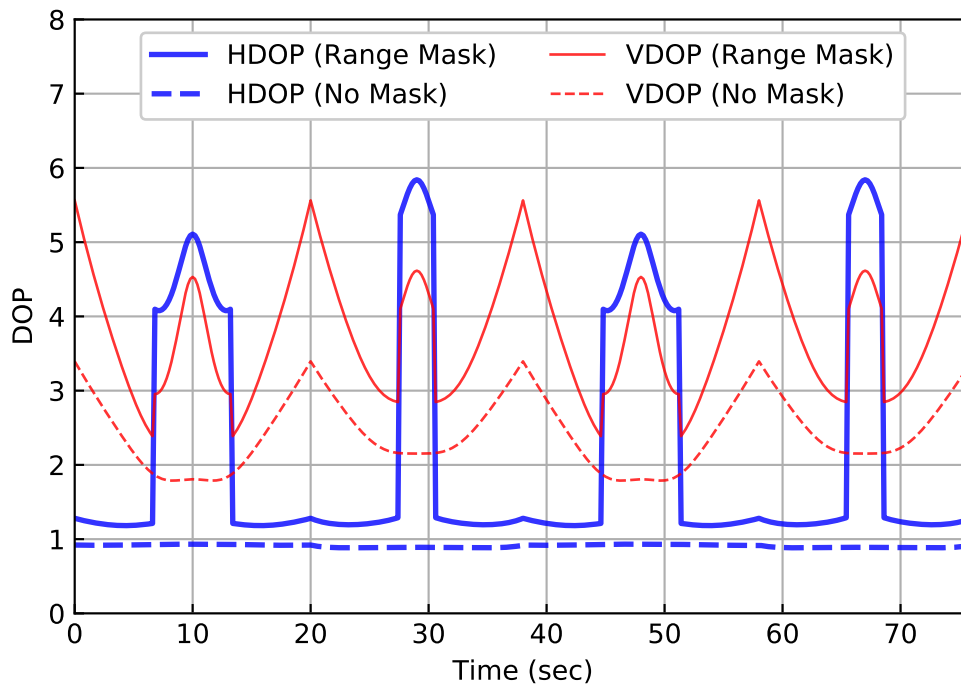
ここで、実験環境におけるビーコンの配置に対し、GNSS で用いられる精度劣化度 (DOP) [2]を適用して、ビーコンの配置が位置推定精度に及ぼす影響を確認する。距離マスクを用いる場合は、観測されるビーコンの数が減少する場面において、距離マスクを用いない場合よりも DOP の値が悪くなるはずである。

図 7-18 に、歩行経路を 1 周する間における、水平精度低下率 (Horizontal Dilution Of Precision: HDOP) と位置精度低下率 (Vertical Dilution Of Precision: VDOP) の理論値の時系列変化を、距離マスクあり、なしのそれぞれの場合について示す。算出にあたって、ビーコンの位置座標は正確な値を用いた。距離マスクありの場合には EKF 更新ステップ用の距離マスクを用いた。また、提案手法の推定アルゴリズムで用いた計測関数は受信信号強度の関数であるが、本節においては GNSS における議論に倣い、計測関数を距離の関数として HDOP, VDOP を算出した。距離マスクを用いない場合の HDOP (点線) は、「ジグザグ」「直線」の両方の歩行経路の場合とも、常に 1.1 を下回っていることから、ビーコンの配置自体に問題はないといえる。一方で、距離マスクを用いた場合の HDOP (実線) は、所々で大きな値を示している。このときに観測データを利用できるビーコンの数が減っているためである。

仮にビーコンの観測雑音の影響が無視できる場合、距離マスクを用いると HDOP の値が大きくなるにつれて位置推定精度は劣化するはずである。ところが実験データを用いた推定では、距離マスクを用いた場合の方がよい位置推定精度を示した。このことから、距離が遠くにあると考えられるビーコンの観測データでは、位置推定精度に悪影響を与えるほど受信信号強度の正確さが劣っていると考えられる。したがって、推定に利用するビーコンの数が減ることになっても、距離が遠くにあると考えられるビーコンの受信信号強度を推定から除外した方が、位置推定精度の向上に有利になるといえる。



(a) 歩行経路「ジグザグ」の場合



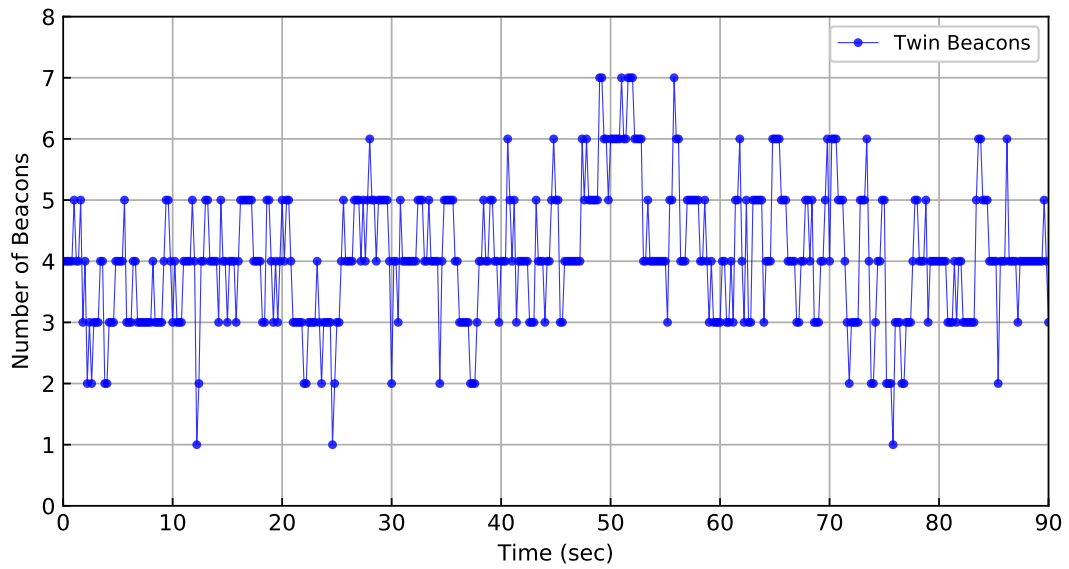
(b) 歩行経路「直線」の場合

図 7-18 HDOP と VDOP 理論値の時系列変化

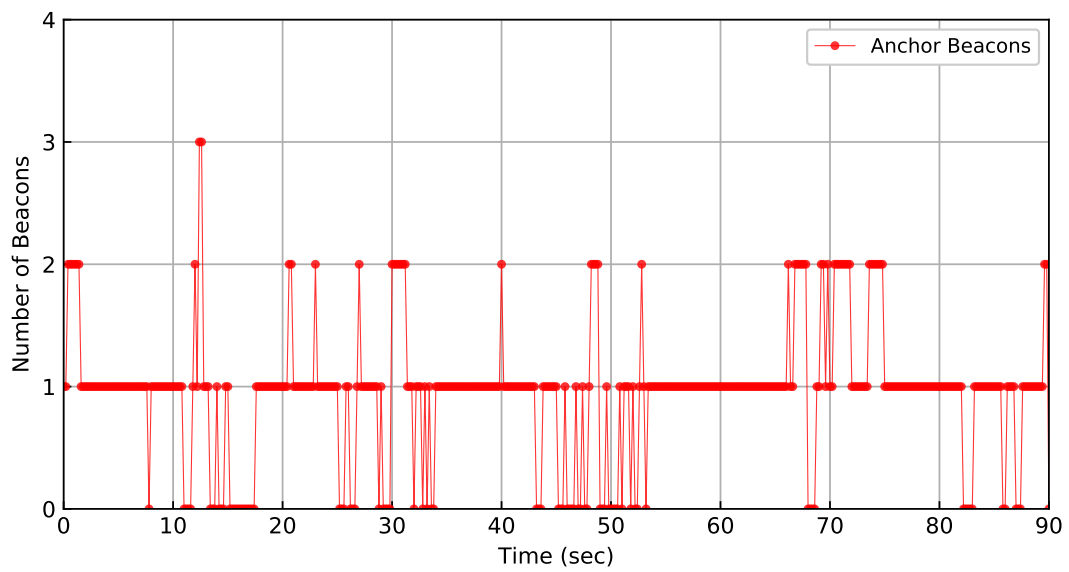
### 7.3.6. 推定アルゴリズムで利用するビーコン数の時系列変化

本項では、得られたビーコン位置推定精度が、推定アルゴリズムが SLAM として動作して、スマートフォンとツインビーコンの位置が同時推定された結果であることを確認する。7.2.2 項で示した位置推定実験における歩行経路「ジグザグ」の No.3 の観測データに対して提案手法を用いて位置推定を行った場合の、各観測時刻において推定アルゴリズムで利用したツインビーコンとアンカビーコンの数を図 7-19 に示す。推定アルゴリズムは距離マスクを用いているため、利用されるツインビーコンとアンカビーコンの個数は制限されている。

同一の時刻ステップにおいて推定に利用したツインビーコンの数が 3 以上で、かつアンカビーコンの数が 2 以下の場合、アンカビーコンによる三点測位ではスマートフォンの位置推定精度が見込めず、全体の位置推定精度は SLAM により達成されている状態であるといえる。推定に利用したツインビーコンの数は、全観測時刻の中で、3 より大きいことがほとんどである（図 7-19(a)）。また、推定に利用したアンカビーコンの数は、全観測時刻の中のほとんどで 3 を下回る（図 7-19 (b)）。これにより、得られた位置推定精度は、アンカビーコンの寄与が主体とはなっておらず、推定アルゴリズムが SLAM として動作することで達成されたものであることが確認できた。



(a) ツインビーコン



(b) アンカビーコン

図 7-19 各観測時刻において推定に利用したビーコンの数の時系列変化

## 第8章 考察

---

本章では、まず 8.1 節で、第 1 章で研究の目的とともに示した 3 つの研究目標に対する提案手法の有効性を確認する。続いて 8.2 節では、本研究の提案手法に対する考察を行う。提案手法により構築した屋内測位環境について、第 6 章で設定した達成目標に対する提案手法の到達度も併せて確認する。最後に 8.3 節で、今後の課題と展望を述べる。

---

## 8.1. 提案手法の有効性

本節では、1.2 節で述べた以下 3 つの研究目標に対して提案手法が有効であることを示す。

- (1) ビーコン位置推定に必要な歩行観測を、短時間で完了させることを可能にする
- (2) 推定位置をリアルタイムに出力するために、推定の計算負荷を軽量化する
- (3) 歩行経路の座標を事前に計測する必要がなく、歩行観測者は通路内を自由に歩くことができる

### 8.1.1. ビーコン信号の歩行観測の所用時間

研究目標(1)に対しては、歩行観測時間を短縮するために、提案手法は複数仮説追跡を用いている。7.3.1 項で行った検証により、実験環境において提案手法による推定に必要な歩行観測時間は、90 秒と考えることができる。また、従来手法では推定のために 90 秒よりも長い歩行観測時間を必要とすることが確認された。したがって、提案手法は従来手法よりも歩行観測時間を短縮できることになる。これにより、歩行観測の所要時間の短縮に対する提案手法の有効性が示された。

さらに本項では、第 6 章で設定したビーコン信号測定の所要時間を 1 時間以内にする目標に対して、提案手法の到達度を確認する。

#### 8.1.1.1. 検討に用いる屋内空間の想定

簡単な想定ではあるが、サイズが 10m 四方で、領域内に図 7-3 の実験環境と同じく 8 個のツインビーコンを配置したセルを  $m$  行  $n$  列並べ、各セルごとに単純に 90 秒の歩行観測を繰り返す状況を仮定する。実験環境の領域は 13 m × 11 m である。そこで、ビーコンが 10 m 四方に配置されている場合を考えると、提案手法によるデータ収集の所用時間に対して 90 秒を見積もることは現実的な数字といえる。これをもとにして、より広い領域の屋内空間を想定した場合における歩行観測の所用時間を概算により検討する。

アンカビーコンは環境に一様に分布している必要があるが、図 8-1 に示すように想定セルの四隅に設置するパターンを考える。このとき、 $m = 5$ 、 $n = 5$  の場合となる 50m 四方の領域を、検討に用いる屋内空間として想定する。この場合のツインビーコンの数は合計で 200 個である。



### 8.1.1.2. ビーコンの位置推定に必要な観測時間

歩行観測の所要時間は、 $m = 5, n = 5$  の場合には 90 秒の 25 倍となる。したがって、50m 四方の領域に対する歩行観測の所要時間は 37.5 分ということになり、セル間の移動時間を含めても 45 分で歩行観測作業が完了するという見積もりができる。

文献[72]では、合計約 100 分の観測により  $65 \text{ m} \times 40 \text{ m}$  の空間に設置した 60 個のビーコンの位置座標を中央値 2.3 m の推定精度で取得していることを 3.2.1 項で述べた。この結果は、単一の推定フィルタによる SLAM で推定されている。空間の間取りやビーコンの検出距離、設置されたアンカビーコンの個数などが異なっており単純な比較はできないが、単位面積あたり、またはビーコン 1 個あたりのどちらの場合をみても、歩行観測に関して提案手法の方が大幅に短い所用時間を示しており、提案手法において複数仮説追跡を用いたことによる歩行観測時間の短縮効果は、実際の屋内測位環境構築の場面においても有益なことが期待できる。

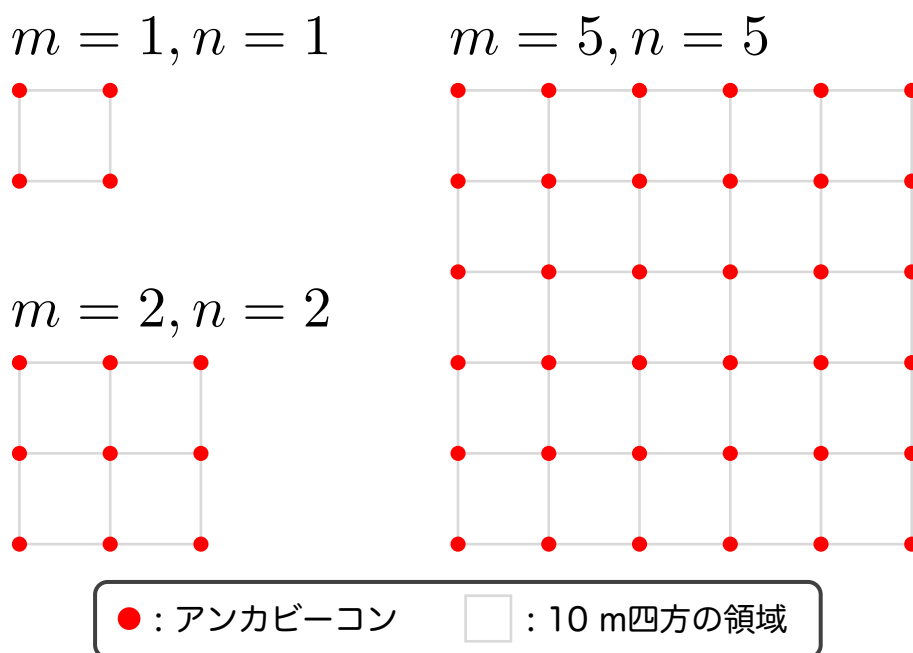


図 8-1 検討対象の屋内空間におけるアンカビーコンの配置

### 8.1.1.3. アンカビーコン数の割合

ここで、ビーコンの総数に対するアンカビーコンの数の割合について確認する。前述の通り  $m$  行  $n$  列にセルを配置した場合の全体のアンカビーコンの数は次のようになる。まず、セルの境界に柱がある場合などで、各セルに割り当てられたアンカビーコンを近接した位置に重複して設置する場合のアンカビーコンの数  $N_{anchor}$  は、次式のように表される。

$$N_{anchor} = m \times n \times 4 \quad (8-1)$$

一方、セルの境界がパーティションで区切られている場合などでは、隣接セルでアンカビーコンを兼用することができる。セル境界部分のすべてにおいて兼用できるとした場合は全体のアンカビーコンの数は次式にて表され、式(8-1)よりも減らすことができる。

$$N_{anchor} = (m + 1) \times (n + 1) \quad (8-2)$$

また、全体のツインビーコンの数  $N_{twin}$  は、1つのセルあたりの個数が8個であるため、次式で示される。

$$N_{twin} = m \times n \times 8 \quad (8-3)$$

セル境界部分のすべてで兼用を認める場合における、アンカビーコン数のビーコン総数に対する割合を表 8-1 に示す。 $m = 1$  ,  $n = 1$  の場合に最大の 33.3%となるが、これは 7.1.2 項で示した実験環境の場合と同じである。領域が広がるにつれてこの割合は減少し、50m 四方 ( $m = 5$  ,  $n = 5$ ) の場合では 15.3%となる。アンカビーコンの個数は 36 個となり、仮にアンカビーコン座標の計測が屋内測位環境の構築時に必要な場合でも、1 個あたり 1 分 40 秒以内での計測ができれば全体を 1 時間以内で終わられる計算になり、屋内測位環境の構築に対して実現性のある計画を立てることは可能と考えられる。

表 8-1 アンカビーコンの数の割合

	$m = 1, n = 1$	$m = 2, n = 2$	$m = 5, n = 5$
アンカビーコン割合	33.3 %	22.0 %	15.3 %
アンカビーコン個数	4	9	36
ツインビーコン個数	8	32	200
全体のビーコン個数	12	41	236

#### 8.1.1.4. 想定した屋内空間に対する目標到達度

提案方式を用いて屋内測位環境を構築するために必要となる合計の所要時間  $T_{total}$  は、すべてのビーコンを設置する所要時間を  $T_{installation}$ 、アンカビーコンの位置座標の計測の所要時間を  $T_{anchor}$ 、電波伝搬モデルのパラメータ決定のための測定を行う所要時間を  $T_{parameter}$ 、ビーコン位置推定のための歩行観測の所要時間を  $T_{SLAM}$ 、ビーコン位置座標の取得にかかる時間の全体を  $T_{coordinates}$  とおいたとき、次式で示される。

$$T_{total} = T_{installation} + T_{coordinates} \quad (8-4)$$

$$T_{coordinates} = T_{anchor} + T_{parameter} + T_{SLAM} \quad (8-5)$$

この定式化した合計の所要時間を、50m 四方 ( $m = 5$ ,  $n = 5$ ) の場合に対して 6.5.2 項で示したシナリオに沿って検討する。このとき、レイアウト設営作業によって、屋内空間にビーコンを設置する作業は同時に完了するため、 $T_{installation} = 0$  となる。また、4.2 節で述べたように、アンカビーコンは屋内空間に常設しておき、位置推定対象のビーコンは空間のレイアウトを形成する物体に取り付けるようにすると、レイアウト設営直後に毎回アンカビーコンの位置座標を計測する必要はなくなり、レイアウト設営の段階に限ると  $T_{anchor} = 0$  とおくことができる。アンカビーコンはレイアウトの構成が定常的な部分に設置されるため、それ以前の位置座標を計測する場面では、3.1.1 項で示した電子地図による方法を用いれば効率的に進めることができる。一方で、位置推定対象のビーコンはレイアウトが可変の部分に設置されるため、電子地図の更新を頻繁に行うことが屋内空間の運営上合理的でない場合には、位置の取得に提案手法を用いることになる。 $T_{parameter}$  については、7.1.4 項の予備実験においてビーコン信号の測定に要した時間が2地点の合計で10分57秒であった。この測定から求めたパラメータを50m四方の領域全体で用いることにすると、測定の準備時間を含めて  $T_{parameter} = 15$  (分) と見積もることが可能になる。さらに、本項における検討の結果より、 $T_{SLAM} = 45$  (分) が導かれている。以上のことから  $T_{total} = 60$  (分) が得られ、本項で想定した50m四方の屋内空間に対しては、第6章で設定したビーコン信号測定の所用時間の目標値である1時間以内を、提案手法によって達成することが可能と考えられる。また、これを歩行観測者1人が対応する広さの領域として、複数の歩行観測者が同時に別々の領域で観測を実施すれば、時間を増やさずにより広い領域の屋内測位環境の構築を実施できる。

ここで、既に運用されている屋内測位環境に対して、提案手法を保守作業において活用する場合を同様に検討する。ビーコンによる屋内測位環境において、機器のメンテナンス作業の内訳は、文献[49]ではビーコンの状態確認と、設置から期間が経過したビーコンの電池交換を挙げている。ここではさらに、空間の物体配置を部分的に変更するなどにより、いくつ

かのビーコンが追加, 撤去, 移動された場合を想定する. これらのメンテナンス作業を合わせた所要時間を式(8-4)の $T_{installation}$ とおく. 提案手法を用いる場合にも, ここまでの作業の内容は変わらないため,  $T_{installation}$ の値は従来と変わらない. 加えて, ビーコン位置座標の再計測が必要となるが, 提案手法を用いることにより, ビーコン位置座標取得の所要時間 $T_{coordinates}$ を短縮することが期待できるため, 提案手法は屋内測位環境のメンテナンスにも役立つと考えられる.

### 8.1.2. 推定に必要な計算量

研究目標(2)に対しては, 生成される仮説の数を削減するために, 提案手法はツインビーコンの間隔情報を利用している. 7.2.2 項で行った検証により, 推定アルゴリズムに複数仮説追跡を用いる場合の比較から, ビーコンの間隔情報を用いない場合 (シングルビーコン・複数仮説追跡) に対する提案手法 (ツインビーコン・複数仮説追跡) の仮説数の削減効果を確認した. 提案手法において, 仮説数は推定アルゴリズム中で計算の対象とする推定フィルタの数となるため, 必要とする計算量は仮説数に比例することになる. したがって, 提案手法は推定に必要な計算量の軽量化に対して有効であるといえる.

推定対象とするビーコンの数を  $n$ , プライマリビーコンを検出したときに円周上に配置する推定位置候補数を  $N_c = 8$  とし, さらに仮説の絞り込み (枝刈り) を行わないこととした場合における, 仮説数が最大値となった時点での計算複雑性は, 各アルゴリズムにおいて以下の通りとなる.

- シングルビーコン・単一仮説:  $O(n^2)$
- シングルビーコン・複数仮説追跡:  $O(n^2 \cdot 8^n)$
- ツインビーコン・複数仮説追跡:  $O(n^2 \cdot 8^{n/2} \cdot 2^{n/2})$

シングルビーコン・単一仮説の場合は EKF-SLAM の計算複雑性[102]になる. 複数仮説追跡の場合は, EKF-SLAM の計算複雑性を生成される仮説数倍する考え方になる. そこで, 仮説の生成数が指数関数的に増加するために, 指数時間アルゴリズムになってしまう. しかし, 5.2.5 項で述べたように, 同時に推定対象とするビーコンの数  $n$  を最大でもたかだか 10 個程度に抑えることにより, リアルタイムな推定を行うことが現実的になる. また, 仮説の絞り込みが行われるため実際の計算量はこれよりも小さくなる. さらに, ツインビーコンを用いる場合には, 指数の底を, 部分的に  $N_c$  から 2 に小さくできることが, 計算量の低減効果を持つ理由となる.

### 8.1.3. 事前の座標計測が不要な歩行経路

研究目標(3)に対しては、歩行観測者が持つスマートフォンの位置を、ビーコンの位置と同時に推定するために、提案手法は SLAM を用いている。7.3.6 項で行った検証により、スマートフォンとツインビーコンの位置が SLAM により推定されていることが確認され、そのときのビーコン位置の推定精度は平均 1.21 m、歩行軌跡の推定精度は平均 2.38m を達成している。また、同じ観測データから歩行経路の座標を用いた場合に得られるビーコン位置推定精度が 0.86 m となることを 7.3.1 項で述べた。したがって、SLAM によって実用的なビーコンの位置推定精度を得ることができると考えられる。このことから、提案手法によるビーコン位置推定は、事前の歩行経路の座標計測を不要とすることができているといえる。

歩行経路の「ジグザグ」「直線」2 パターンの中で、ビーコン位置の推定精度、歩行軌跡の推定精度ともに明確な差がみられなかったことは、観測者が全体として同じ方向に進むことができているならば、通路とみなされる領域で進む場所に違いが生じても位置推定精度に大きな影響を与えないことを意味する。この点は、ビーコン位置推定手法において、歩行観測者が通路の範囲内を自由に歩くことが許される根拠になると考えることができる。

## 8.2. 提案手法により構築した屋内測位環境

### 8.2.1. 屋内測位を行った場合の測位精度

本項では、提案手法により構築した屋内測位環境において得られる測位精度を、位置推定実験の観測データから擬似的に求めることで確認する。位置推定実験により得られたビーコンの推定位置を用いて、図 7-3 の配置の屋内測位環境を構築したと仮定し、位置推定実験の観測データにより擬似的にスマートフォンの測位を行った。各観測データによる測位結果の平均値と最大値に対し、16 回の観測の平均を求めた結果を表 8-2 に示す。測位手法は、最も大きい受信信号強度を示したビーコンの座標を推定位置とみなす単純な近接検知方式を用いる場合と、拡張カルマンフィルタ (EKF) でスマートフォンの位置を追跡する場合の 2 通りとした。測位には実験環境に設置した 12 個すべてのビーコンを用いた。ビーコンの位置座標は、ビーコン位置推定誤差が最大の「ジグザグ」No.7 の観測と、最小の「ジグザグ」No.3 の観測からそれぞれ提案手法により求めた場合と、正確な位置座標を用いた場合の 3 通りを比較した。

ビーコンの位置座標に推定結果を用いた場合の測位誤差は、近接検知方式と EKF のどちらの測位手法の場合も、正確なビーコンの位置座標を用いた場合とくらべてわずかな劣化にとどまっている。そこで、提案手法で推定したビーコンの位置座標は、実際の屋内測位環境に利用できる可能性が十分にあると考えることができる。また、測位手法が EKF の場合

において、スマートフォンの測位結果が目標である平均 2.7 m 以内におさまっている。

Faragher らの研究[7]では、BLE ビーコンを高密度に設置した屋内空間において、位置指紋方式によりスマートフォンの測位を行い、95%の信頼区間で 2.6 m の測位精度を達成している。本項における検討結果も、測位方式は異なるが、これに迫る水準の性能に達していると考えられる。

表 8-2 設置されたすべてのビーコンを用いた場合の測位誤差

ビーコン位置座標	近接検知方式		EKF	
	平均値	最大値	平均値	最大値
「ジグザグ」 No.7 (推定誤差最大)	3.41 m	10.08 m	2.70 m	6.88 m
「ジグザグ」 No.3 (推定誤差最小)	3.24 m	9.92 m	2.49 m	5.87 m
正確な位置座標を用いた場合	3.12 m	9.12 m	2.43 m	5.52 m

### 8.2.2. 緊急時における利用可能性

第 6 章において、汎用的で普及が進んでいる機器を用いて屋内測位環境を構築し、平常時から利用しつつ、災害が発生した場面の緊急時には同じ屋内測位環境を利用する可能性について検討した。要求分析結果から、本研究の提案手法により構築した屋内測位環境を、要求を満たす手段とすることができるシステム要求項目を整理すると、次のようになる。

- (1) 人が利用する屋内空間の全域に屋内測位環境を構築すること
- (2) スマートフォンを対象にした屋内測位が可能なこと
- (3) スマートフォンに生じる予期せぬ振動や、スマートフォンを所持する人の不規則な動作が発生した場合に、確実に位置座標を取得すること
- (4) スマートフォン上の計算処理により測位結果を取得できること

提案手法により構築した屋内測位環境は、空間構成が可変の領域に対しても効率的に屋内測位環境を構築できることから、上記 (1) に貢献することができる。また、設置されたビーコンの位置座標を用いる測位手法によってスマートフォンを対象にした屋内測位機能を提供できるため、(2) に対して対応できるとともに、(3) のような状況で測位精度の劣化が起きにくくなる。さらに、ビーコンの位置座標を事前にスマートフォンに保存しておくことで、測位を行うときにおける通信機能が不要となり、(4) に対して対応できる。

一方で、緊急時の避難誘導に利用するための屋内位置情報システムに対する要求分析は、今後も更に研究を進める必要がある。測位精度に対する要求は、最終的には利用者が自身の位置と適切な避難経路を認識できるように必要なことを明らかにした上で、そこから定義することが重要と考える。そのためには屋内測位を利用できる避難訓練の実証環境を構築することにより、実証の被験者からフィードバックを得て分析する必要がある。

### 8.3. 今後の課題と展望

#### 8.3.1. 推定中の計算負荷の制御

提案手法は推定に必要な計算量の軽量化に効有効であることを示したが、推定中の計算対象の仮説数に影響を及ぼす要因は、ビーコンの間隔情報を利用すること以外に、仮説の絞り込み処理、プライマリビーコン検出時における距離マスクの半径と推定位置の候補数  $N_c$  の値を上げることができる。しかし、7.3.3 項の図 7-15 において、仮説数の最大値は観測機会ごとに変動がみられ、現状のアルゴリズムでは仮説数の上限を制御することができていない。位置推定の進行状況をリアルタイムに出力することができる計算量は、推定アルゴリズムを実行する演算装置の処理速度によって左右されるものではあるが、実用化に向けては、与えられたリソースの制限の中で、より多くのビーコンの位置推定を連続的に実行できるようにすることが重要である。そこで、推定アルゴリズムにおいて仮説数の上限を制御するための改良が今後の課題の 1 つである。

#### 8.3.2. 電波伝搬モデルの決定方法

本研究では、屋内測位環境を構築する作業を効率化することを考えたため、屋内測位環境を代表する 1 組のパラメータを用いて電波伝搬モデルを近似することとした。電波伝搬モデルは、対象環境内のあらゆる地点における測定から求めるのが本来であれば望ましいが、時間と作業量の観点から現実的ではない。歩行経路「ジグザグ」の No.3 の観測において  $P_0$  と  $\gamma$  の値を変化させた場合のビーコンの位置推定精度を確認したところ、 $P_0 = -67.0$  のときは  $\gamma = 1.70, 1.80, 1.90, 2.00$  において、 $P_0 = -69.0$  のときは  $\gamma = 1.60, 1.65, 1.70$  において平均 2m を下回った。このことから、電波伝搬モデルのパラメータは、適切な値からある程度のずれが生じてても、ビーコン位置の推定精度に対して一定の寛容性があるといえる。したがって、環境内の一部の地点の測定結果からパラメータのチューニングを施すことによって、電波伝搬モデルを 1 組のパラメータで近似する運用も実用に耐えることができると考えられるが、チューニングの方法論を確立することが今後の課題となる。

空間を伝搬する電波信号は、距離の 2 乗に反比例するモデルが標準的に考えられるため、空間伝搬係数  $\gamma$  の値は 2 が基準となるが、障害物による電波の遮蔽の影響を受ける場合に

は $\gamma$ の値は2より大きくなる傾向にある。一方で、廊下のような場所において、壁面による電波の反射が導波管のような影響を与える場合には、 $\gamma$ の値は2を下回る傾向にある。これらのことを利用して、屋内空間の構成を類型化することが、電波伝搬モデルのパラメータの調整に役立てることができると考えられる。

### 8.3.3. 異なるビーコン規格への応用

本研究では、汎用的なビーコン規格を利用することを優先したために、距離推定は受信信号強度を用いて行うこととしたが、BLE ビーコンの受信信号強度は時間変動が大きく、距離推定のために有利な手段であるとはいえない。

提案手法のアルゴリズムは他の手段で測距を行うビーコンに対して応用することも可能である。そこで、十分な測位精度を提供する屋内測位環境を確実に構築するには、距離推定精度がより高い **Time Of Arrival (TOA)** 方式などによる測距が可能なビーコンを代わりに用いることが考えられる。現段階では、製品の普及がまだ進んでいないことと引き換えになるが、このようなビーコンを利用する場合は、距離推定精度の向上がそのまま屋内測位環境の測位精度の向上につながる可能性がある。

今後の発展の可能性として、より測距性能が高く、大きさや電力消費などの必要な条件を満たすことができるビーコンが普及したときに、提案手法による屋内測位環境の構築を応用することが期待できる。



## 第9章 結論

---

本章では、提案手法の新規性と、提案手法により構築した屋内測位環境が持つ意義、実験による提案手法の評価を中心に本論文をまとめ、本研究の結論を述べる。

---

本研究では、空間構成の変化に迅速に適応する屋内測位環境を構築するための、スマートフォンを持つ歩行観測者によるビーコン位置推定手法を提案した。提案手法では、電波ビーコンを高密度に設置した屋内測位環境を構築の対象とした。また、小型で、電池により駆動し電源への配線が不要なビーコンを用いることにより、屋内空間の形状に合わせた位置に柔軟にビーコンを配置することとした。これにより、構築の対象とした屋内測位環境は、空間構成が可変の領域に対しても、レイアウトを設営後にすみやかに、測位精度に対する電波の反射、干渉、遮蔽の影響を緩和できるようにビーコンを配置することが可能になった。

提案手法では、取得したスマートフォンとビーコン間の距離情報のみを用いた SLAM を行う。スマートフォンとビーコンの位置を同時に逐次推定することで、歩行観測の経路について事前の座標計測を不要とした。また、これらの位置推定の内容をリアルタイムに取得することを可能にした。さらに、短時間の観測で十分なビーコン位置推定精度に達するため、設置したビーコンの位置座標をすみやかに取得することを実現した。従来の SLAM 手法では、ビーコンの方向の情報が利用できないことと、移動体の軌跡推定精度が不十分になるために、距離情報のみでは短時間の観測によってビーコンの位置推定誤差が小さい値に収束することが困難であった。そこで提案手法では、SLAM の推定アルゴリズムに複数仮説追跡を用いることで、推定に必要な観測を短時間でを行うことを可能にした。さらに推定対象のビーコンの数とともに仮説の生成数が増加してしまう問題を解決するために、2 個 1 組の間隔が判明しているビーコンを屋内測位環境に設置することとし、SLAM の推定アルゴリズムにビーコンの間隔情報を用いることで計算負荷の軽量化を実現した。観測時間の短縮と計算負荷の軽減は相反する関係にあるが、距離情報のみを用いて、ツインビーコンを対象にした複数仮説追跡によりこの 2 点を両立する SLAM の推定アルゴリズムを実現したことが、本研究の新規性である。

以上のビーコン位置推定手法を用いると、屋内測位環境の迅速な構築が可能になる。大規模屋内施設に対して位置指紋方式の屋内測位環境を構築することが近年注目されているが、屋内測位環境構築の効率化に関して、従来は、屋内空間の利用と同時に環境モニタリングを行うアプローチにより、構築に必要な期間の短縮よりも工数の軽減に焦点が当てられてきた。提案手法は、従来のアプローチでは対応できなかった、主に空間構成が可変の屋内領域に対し、短時間で屋内測位環境の構築を可能にする手段を提示した。したがって提案手法は、屋内測位を利用できる環境の遍在化に貢献することができる。

屋内測位環境の遍在化は、平常時に利用しているのと同じ屋内測位環境を、災害が発生した場面の緊急時に活用するための必要条件の 1 つである。そこで、汎用的で普及が進んでいる機器を用いて構築した屋内測位環境による、避難誘導の支援の実現可能性を検討した。平常時と緊急時に利用する屋内位置情報システムの要求分析を行なった結果、提案手法により構築した屋内測位環境は、測位を行うときにおける通信機能が不要となり、緊急時に外部との通信が途絶しても測位が可能になること、歩行者自律航法と異なり、端末を持つ利用者

の不規則な動作や予期せぬ端末の振動に対して、避難中にも測位精度の劣化は発生しにくい。という2点において有益であることを明らかにした。

提案手法を評価するために、屋内空間に試験環境を構築し、BLE ビーコンとスマートフォンの実機を用いて実験を行った。13 m×11 m の領域の屋内空間に8個(4組)の位置座標が未知で間隔が既知のビーコンと、4個の位置座標が既知のビーコンを配置して実験を行った。その結果、90秒の観測を用いて平均誤差 2.14m でビーコンの位置を推定できることを確認した。また、推定に必要な観測時間について従来の SLAM 手法と比較したところ、距離情報のみを用いる条件において提案手法は最速という結果を示した。

この結果をもとに、10m 四方ごとに実験と同様の観測を繰り返すと想定とした場合に、50m 四方の領域の観測に要する時間を試算すると、37.5分となった。さらに、推定されたビーコンの位置座標を用いて、実験で取得したデータから擬似的にスマートフォンを測位したところ平均 2.70 m の測位精度を得ることができた。これらの結果より、屋内測位環境構築の所要時間と、構築された屋内測位環境が示す測位精度の面において、提案手法の有効性が示された。

以上のことから、屋内測位環境の遍在化に貢献するために、位置指紋方式、歩行者自律航法のそれぞれの弱点を補うものとして、高密度に設置したビーコンの位置座標を用いた屋内測位手法を位置付け、これを用いた空間構成に迅速に適応する屋内測位システムを構築する手法を提案したことが、本研究の成果であるといえる。

## 参考文献

- [1] 総務省, “情報通信白書平成25年版,” 2013. [Online]. Available: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h25.html>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [2] P. Misra and P. Enge, *精説GPS: 基本概念・測位原理・信号と受信機*, 改訂 第2版. 京都: 松香堂書店, 2010.
- [3] 内閣官房, “地理空間情報活用推進基本計画,” 2017. [Online]. Available: [http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/290324/170324\\_masterplan.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/290324/170324_masterplan.pdf). [Accessed: 03-Jul-2021].
- [4] 西尾信彦, 図解よくわかる屋内測位と位置情報. 日刊工業新聞社, 2018.
- [5] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [6] S. He and S. H. G. Chan, “Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 1. pp. 466–490, 2016.
- [7] R. Faragher and R. Harle, “Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2015.
- [8] 国土地理院, “位置情報基盤を構成するパブリックタグ情報共有のための標準仕様 Ver.1.1.1,” 2018. [Online]. Available: <https://www.gsi.go.jp/common/000198761.pdf>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [9] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. MIT Press, 2005.
- [10] J.-L. Blanco, J. González, and J.-A. Fernández-Madrigal, *A Pure Probabilistic Approach to Range-Only SLAM*. 2008.
- [11] “NAVITIME,” *NAVITIME JAPAN*. [Online]. Available: <https://products.navitime.co.jp/service/navitime/>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [12] “クロネコヤマトの荷物お問い合わせシステム,” ヤマト運輸. [Online]. Available: <https://toi.kuronekoyamato.co.jp/cgi-bin/tneko>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [13] “雨雲レーダー - Yahoo! 天気・災害,” *Yahoo Japan Corporation*. [Online]. Available: <https://weather.yahoo.co.jp/weather/zoomradar/>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [14] “みまもりタグ,” *ALSOK*. [Online]. Available: <https://www.alsok.co.jp/person/mimamoritag/>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [15] 木村峻介, 松本卓人, 矢澤櫻子, 星野准一, 李昇姫, 浜中雅俊, “屋内位置検出を利用した子ども見守りサービスシステム,” *情報処理学会論文誌*, vol. 56, no. 1, pp. 856–868, 2015.
- [16] “Ingress Prime,” *Niantic Inc.* [Online]. Available: <https://www.ingress.com>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [17] “Pokémon GO,” *Niantic Inc., 株式会社ポケモン*. [Online]. Available:

- <https://www.pokemongo.jp>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [18] 成田国際空港株式会社, “ルート案内機能付きデジタルマップ「NariNAVI」.” [Online]. Available: <https://www.narita-airport.jp/jp/map/narinavi>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [19] 株式会社テレコムスクエア, “ARナビゲーションアプリ「PinnAR」.” [Online]. Available: <https://telecomsquare.co.jp/solution-service/digital-media/pinnar.html?version=ja>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [20] “LINE Beaconを設定する,” *LINE Corporation*. [Online]. Available: <https://guide.line.me/ja/account-and-settings/settings/line-beacon.html>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [21] N. Kawaguchi *et al.*, “Wi-Fi Human Behavior Analysis and BLE Tag Localization: A Case Study at an Underground Shopping Mall,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, vol. 28-Novembe, no. November, pp. 151–159, 2016.
- [22] 神田崇行, 塩見昌裕, 野村竜也, 石黒浩, 萩田紀博, “RFIDタグを用いた科学館来館者の移動軌跡の分析,” *情報処理学会論文誌*, vol. 49, no. 5, pp. 1727–1742, 2008.
- [23] 国土地理院, “3次元地理空間情報を活用した安全・安心・快適な社会実現のための技術開発,” 国土交通省. [Online]. Available: <https://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40073.html>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [24] 国土交通省, “高精度測位社会プロジェクト.” [Online]. Available: [https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk1\\_000091.html](https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000091.html). [Accessed: 03-Jul-2021].
- [25] 国土交通省, “東京駅周辺屋内外シームレス測位サービス実証実験.” [Online]. Available: [https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk1\\_000084.html](https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000084.html). [Accessed: 03-Jul-2021].
- [26] M. Nakajima and S. Haruyama, “New indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [27] M. Shiomi, T. Kanda, D. Eaton, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Communication Robot for Science Museum with RFID Tags,” *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 24, no. 4, pp. 489–496, 2006.
- [28] “ISIDとクウジット, 東京国立博物館の公式ガイドアプリ『トーハクナビ』にBluetooth Low Energy (BLE) を含む3つの屋内測位技術を実装,” 株式会社電通国際情報サービスクウジット株式会社. [Online]. Available: <https://www.koozyt.com/press/2014/pr140415.html>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [29] “Getting Started with iBeacon Version 1.0,” *Apple Inc.* [Online]. Available: <https://www.gsi.go.jp/common/000198740.pdf>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [30] “Bluetooth Technology Overview,” *Bluetooth SIG*. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [31] “Bluetooth,” *Bluetooth SIG*. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com>. [Accessed: 03-Jul-

- 2021].
- [32] D. D. Walden, G. J. Roedler, K. Forsberg, R. D. Hamelin, T. M. Shortell, and 西村秀和, システムズエンジニアリングハンドブック, 第4版. 東京: 慶應義塾大学出版会, 2019.
  - [33] D. Han, S. Jung, M. Lee, and G. Yoon, “Building a practical wi-fi-based indoor navigation system,” *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 13, no. 2, pp. 72–79, 2014.
  - [34] S. He, B. Ji, and S. H. G. Chan, “Chameleon: Survey-Free Updating of a Fingerprint Database for Indoor Localization,” *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 15, no. 4, pp. 66–75, 2016.
  - [35] “大都市における地震災害時の 安全の確保について,” 日本学術会議. [Online]. Available: <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-kankoku.pdf>. [Accessed: 10-Aug-2021].
  - [36] “World Map of Exhibition Venues,” 国際見本市連盟 (*UFI: Union des Foires Internationales*), 2017. [Online]. Available: <https://www.ufi.org/archive-research/ufi-world-map-of-exhibition-venues-2017-edition-revised-december-2018/>. [Accessed: 10-Aug-2021].
  - [37] “SC白書2021 ～「新常態」と地域調和型SCの萌芽～,” 一般社団法人日本ショッピングセンター協会. [Online]. Available: [http://www.jcsc.or.jp/sc\\_data/data/overview](http://www.jcsc.or.jp/sc_data/data/overview). [Accessed: 10-Aug-2021].
  - [38] “施設のご案内,” クリスタ長堀. [Online]. Available: <https://www.crystaweb.jp/about/>. [Accessed: 10-Aug-2021].
  - [39] “施設紹介,” 東京ビッグサイト. [Online]. Available: <https://www.bigsight.jp/organizer/facilities/>. [Accessed: 10-Aug-2021].
  - [40] “モール概要,” イオンレイクタウン. [Online]. Available: <https://laketownkaze-aeonmall.com/static/detail/mall>. [Accessed: 10-Aug-2021].
  - [41] A. Rai, K. K. Chintalapudi, V. N. Padmanabhan, and R. Sen, “Zee : Zero-Effort Crowdsourcing for Indoor Localization,” *Proc. 18th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. - Mobicom '12*, p. 293, 2012.
  - [42] S.-H. Jung, G. Lee, and D. Han, “Methods and Tools to Construct a Global Indoor Positioning System,” *IEEE Trans. Syst. MAN, Cybern. Syst.*, vol. 48, no. 6, pp. 906–919, 2018.
  - [43] S. He, W. Lin, and S. H. Gary Chan, “Indoor Localization and Automatic Fingerprint Update with Altered AP Signals,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 7, pp. 1897–1910, 2017.
  - [44] 田中淳, 吉井博明, 災害情報論入門. 弘文堂, 2008.
  - [45] 矢嶋雅倫, 佐野友紀, 門倉博之, 関澤愛, “高層建築物避難訓練実態から見た階段室内での避難者の密度と歩行速度の関係および合流比,” *J. Environ. Eng.*, vol. 80, no. 710, pp. 315–322, 2015.
  - [46] 日本建築学会, 東日本大震災合同調査報告 建築編 7 火災, 情報システム技術. 東京: 日本建築学会, 2016.
  - [47] R. Harle, “A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1281–1293, 2013.

- [48] 国土地理院, “パブリックタグの品質情報に関する調査・検討,” 2017. [Online]. Available: <https://www.gsi.go.jp/common/000186737.pdf>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [49] 国土政策局, “屋内地図／屋内測位環境構築ガイドライン (案),” 国土交通省, 2019. [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001317136.pdf>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [50] “IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4),” *IEEE*. [Online]. Available: <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [51] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero III, R. L. Moses, and N. S. Correal, “Locating the Nodes,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. July, pp. 54–69, 2005.
- [52] 北須賀輝明, 中西恒夫, 福田晃, “無線通信網を用いた屋内向け測位方式,” *情報処理学会論文誌*, vol. 44, no. July, pp. 131–140, 2003.
- [53] N. Patwari, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, and R. J. O’Dea, “Relative location estimation in wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 8, pp. 2137–2148, Aug. 2003.
- [54] “Connectivity Standards Alliance,” *Connectivity Standards Alliance*. [Online]. Available: <https://csa-iot.org>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [55] A. LaMarca *et al.*, “Place lab: Device positioning using radio beacons in the wild,” *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 3468, pp. 116–133, 2005.
- [56] J. Rekimoto, A. Shionozaki, T. Sueyoshi, and T. Miyaki, “PlaceEngine: 実世界集合知に基づくWiFi 位置情報基盤,” *Sci. York*, pp. 1–10.
- [57] 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫, “無線LANを用いた広域位置情報システム構築に関する検討,” vol. 47, no. 12, pp. 3124–3136, 2006.
- [58] D. Chen, K. G. Shin, Y. Jiang, and K. H. Kim, “Locating and tracking BLE beacons with smartphones,” *Conex. 2017 - Proc. 2017 13th Int. Conf. Emerg. Netw. Exp. Technol.*, pp. 263–275, 2017.
- [59] J. Levinson *et al.*, “Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms,” *IEEE Intell. Veh. Symp. Proc.*, no. Iv, pp. 163–168, 2011.
- [60] F. R. Fabresse, F. Caballero, I. Maza, and A. Ollero, “Robust range-only SLAM for aerial vehicles,” *2014 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. ICUAS 2014 - Conf. Proc.*, pp. 750–755, 2014.
- [61] N. Takeishi *et al.*, “Evaluation of interest-region detectors and descriptors for automatic landmark tracking on asteroids,” *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 58, no. 1, pp. 45–53, 2015.
- [62] J. E. Guivant and E. M. Nebot, “Optimization of the Simultaneous Localization and Map-Building Algorithm for Real-Time Implementation,” 2001.
- [63] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and J. D. Tardos, “ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163, 2015.
- [64] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, “Simultaneous Localization and Mapping: Part I,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, pp. 99–108, 2006.

- [65] T. Bailey and H. Durrant-Whyte, “Simultaneous Localization and Mapping: Part II,” 2006.
- [66] E. Menegatti, A. Zanella, S. Zilli, F. Zorzi, and E. Pagello, “Range-only slam with a mobile robot and a wireless sensor networks,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 8–14, 2009.
- [67] J. Djughash, S. Singh, G. Kantor, and W. Zhang, “Range-only SLAM for robots operating cooperatively with sensor networks,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006.
- [68] J.-L. Blanco, J.-A. Fernández-Madrigal, and J. González, *Efficient Probabilistic Range-Only SLAM*. 2008.
- [69] F. R. Fabresse, F. Caballero, I. Maza, and A. Ollero, “Undelayed 3D RO-SLAM based on Gaussian-mixture and reduced spherical parametrization,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013.
- [70] F. R. Fabresse, F. Caballero, I. Maza, and A. Ollero, “An efficient approach for undelayed range-only SLAM based on Gaussian mixtures expectation,” *Rob. Auton. Syst.*, 2018.
- [71] E. Olson, J. J. Leonard, and S. Teller, “Robust range-only beacon localization,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 949–958, 2006.
- [72] F. Seco and A. R. Jiménez, “Autocalibration of a wireless positioning network with a FastSLAM algorithm,” in *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2017, pp. 1–8.
- [73] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, and B. Wegbreit, “FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem.”
- [74] S. Thrun, P. Probabilistic, and R. Obotics, “Probabilistic Robotics,” *Commun. ACM*, 2002.
- [75] J. Djughash and S. Singh, “A Robust Method of Localization and Mapping Using Only Range,” *Springer Tracts Adv. Robot.*, vol. 54, pp. 341–351, 2009.
- [76] L. Geneve, O. Kermorgant, and E. Laroche, “A composite beacon initialization for EKF range-only SLAM,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2015.
- [77] J. Solà, A. Monin, M. Devy, and T. Lemaire, “Undelayed initialization in bearing only SLAM,” in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2005.
- [78] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic robotics (intelligent robotics and autonomous agents series)*. 2005.
- [79] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, and B. Wegbreit, “FastSLAM 2.0: An Improved Particle Filtering Algorithm for Simultaneous Localization and Mapping that Provably Converges.”
- [80] 神武直彦, “衛星測位技術の利用と普及: 準天頂衛星を利用したリアルタイム防災システムと屋内測位方式IMESの紹介,” *航空と宇宙: 日本航空宇宙工業会会報*, pp. 19–29, 2012.
- [81] “Android developers: Bluetooth low energy,” *Google Developers*. [Online]. Available: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-le>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [82] “Overview – Bluetooth Mesh Networking,” *Bluetooth SIG*. [Online]. Available:



- <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/overview-bluetooth-mesh/>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [83] “Quuppa,” *Quuppa*. [Online]. Available: <https://quuppa.com>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [84] C. Gentile, N. Alsindi, R. Raulefs, and C. Teolis, *Geolocation techniques: Principles and applications*, vol. 9781461418. Springer New York, 2014.
- [85] J. Miranda *et al.*, “Path loss exponent analysis in Wireless Sensor Networks: Experimental evaluation,” *IEEE Int. Conf. Ind. Informatics*, pp. 54–58, 2013.
- [86] 星尚志, 石塚宏紀, 小林亜令, 南川敦宣, “動的遮蔽物を考慮したBLEによる屋内位置推定手法の提案,” *情報処理学会論文誌*, vol. 60, no. 1, pp. 48–57, 2019.
- [87] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, “Visual odometry,” *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 1, 2004.
- [88] D. L. Alspach, “A gaussian sum approach to the multi-target identification-tracking problem,” *Automatica*, 1975.
- [89] 首都直下地震対策検討ワーキンググループ, “首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告),” 中央防災会議, 2013. [Online]. Available: [http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku\\_wg/pdf/syuto\\_wg\\_report.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_report.pdf). [Accessed: 03-Jul-2021].
- [90] “南海トラフ地震防災対策推進基本計画,” 中央防災会議, 2019. [Online]. Available: [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough\\_keikaku.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough_keikaku.pdf). [Accessed: 03-Jul-2021].
- [91] 浦野正樹, 吉井博明, 大矢根淳, 田中淳, *災害社会学入門*. 弘文堂, 2007.
- [92] “G空間シティ構築事業,” 総務省..
- [93] “被災に伴い制限された通信環境下における, 地下空間を含む情報伝達・避難誘導支援の実現.” [Online]. Available: [https://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictriyou/geospatial\\_ict/g-city/project/p03.html](https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictriyou/geospatial_ict/g-city/project/p03.html). [Accessed: 10-Aug-2021].
- [94] 一般社団法人東京防災設備保守協会, *防火管理者・防災管理者の役割と仕事*. 2014.
- [95] 総務省, “情報通信白書令和2年版,” 2020. [Online]. Available: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/r02.html>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [96] 総務省, “令和元年通信利用動向調査世帯構成員編,” 2019. [Online]. Available: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200356&tstat=000001140586&cycle=0&year=20190&month=0&tclass1=000001140589>. [Accessed: 03-Jul-2021].
- [97] 濱村朱里, 福島拓, 吉野孝, 江種伸之, “オフライン対応型災害時避難支援システム ‘あかりマップ’ の災害発生前の利用可能性に関する評価,” *情報処理学会論文誌*, vol. 56, no. 1, pp. 185–195, 2015.
- [98] 濱村朱里, 福島拓, 吉野孝, 江種伸之, “日常利用可能なオフライン対応型災害時避難支援システム ‘あかりマップ’ の実環境における利用可能性,” *情報処理学会論文誌*, vol. 57,

- no. 1, pp. 319–330, 2016.
- [99] 岡崎亮介, 廣友雅徳, 毛利公美, 白石善明, “平時から災害時へ連続的に利用可能な被災者を直接的に支援するデュアルパーパス情報共有システム,” 情報処理学会論文誌, vol. 55, no. 8, pp. 1778–1786, 2014.
- [100] 佐野博之, 塚本昌克, 片桐雅二, 池田大造, 太田賢, “BLEタグを用いた屋内位置推定手法における耐障害性の向上,” 情報処理学会論文誌, vol. 58, no. 5, pp. 1138–1150, 2017.
- [101] F. Brockmann, M. Handte, and P. J. Marron, “CutiQueue: People Counting in Waiting Lines Using Bluetooth Low Energy Based Passive Presence Detection,” *Proc. - 2018 Int. Conf. Intell. Environ. IE 2018*, pp. 1–8, 2018.
- [102] F. Herranz, A. Llamazares, E. Molinos, M. Ocaña, and M. A. Sotelo, “WiFi SLAM algorithms: An experimental comparison,” *Robotica*, 2016.

## 研究業績

### 1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- A. Sato A, Nakajima M, Kohtake N (2019) Concept Design of Seamless Location Based Emergency Warning System with GNSS-Based Signals. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Volume 17, Issue 3, Pages 344-349. doi: 10.2322/tastj.17.344
- B. 佐藤 章博, 中島 円, 神武 直彦 (2021): スマートフォンを持つ歩行観測者による Range-Only SLAM を用いた BLE ビーコン位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 62, No. 1

### 2. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）

- C. Sato A, Nakajima M, Kohtake N (2015) Design of an IMES-Based Seamless Early Warning System with Signals from QZSS and a Disaster Prevention Center, International Symposium on GNSS (IS-GNSS) , Pages 435-436.
- D. Sato A, Nakajima M, Kohtake N (2019) Rapid BLE Beacon Localization with Range-Only EKF-SLAM Using Beacon Interval Constraint, 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Pages 1-8. doi: 10.1109/IPIN.2019.8911778

## 謝辞

本研究論文は、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント (SDM: System Design and Management) 研究科後期博士課程在学中に行った研究成果をまとめたものです。本研究は、多くの方々よりご指導とご協力を頂き、ここまで行うことができました。全ての方を記す事は出来ませんが、皆様から頂いたご支援に心より感謝いたします。

博士論文審査の主査であり指導教員の神武直彦教授には、外部発表など数多くの機会を与えて頂き、親身かつ丁寧なご指導を賜りましたことを深謝いたします。衛星測位からはじまり屋内測位の研究分野へと私を導いてくださっただけでなく、研究室におけるさまざまな研究プロジェクトに関わらせていただいたことは、多視点的に研究を捉えた上で博士学位論文を完成させるための大きな糧となりました。

博士学位審査にて、ご多忙の中、副査をを引き受けて下さいました、SDM 研究科の春山真一郎教授、産業技術総合研究所人間拡張研究センターの蔵田武志副センター長に深く御礼申し上げます。春山先生には、屋内位置情報のユーザベネフィットの観点から、論文の完成度を向上させるための有益な意見やご指摘を頂き、有難うございました。蔵田先生には、屋内測位の専門家としての観点から研究内容について有意義なご助言を頂きました。特に研究発表のために国際会議に参加した際には、屋内測位分野における国際的な動向をご紹介くださり、異国の地にも関わらず大変有意義な議論をさせていただきました。厚くお礼申し上げます。

SDM 研究科の中島円特任教授には、研究を進めていく上で、屋内位置情報サービスの専門家としてだけでなく、SDM 研究科で博士を取得された先輩としてもサポートして頂きました。博士論文につながる全ての投稿論文において共著者として研究に関わっていただきました。深く感謝いたします。また、SDM 研究科の特任講師の小高暁氏には、本研究の実環境実験において、長時間にわたる実験の補助を引き受けていただきました。この観測結果が無ければ、博士研究を完成させる事はできませんでした。本当に有難うございました。

慶應義塾大学大学院 SDM 研究科附属 SDM 研究所の狼嘉彰顧問、日比谷孟俊顧問には、Ph.D セミナーを通して、SDM の視点からの研究の考え方を基礎から授けて頂き、身に付けることができました。ここに感謝の意を記します。

立命館大学情報理工学部の西尾信彦教授には、地下街における位置情報を用いた避難誘導支援の実証プロジェクトにおいてご一緒させていただき、研究テーマを探すきっかけをいただきました。厚くお礼申し上げます。東京大学空間情報科学研究センターの Dinesh Manandhar 特任准教授には、準天頂衛星システムを用いた防災警報配信のデモンストレーションの機会をいただき、貴重な経験を得ることができました。厚くお礼申し上げます。IMES

(Indoor Messaging System) に関連して屋内測位の議論もさせていただきました。特に、BLE ビーコンのサンプルを見せていただいたことをきっかけに本研究のテーマの着想が浮かんだ日のことは今でも忘れません。東京海洋大学の久保信明教授には、G-SPASE プロジェクトを通じて、RTK-GNSS 測位およびカルマンフィルタについての学びを得ることができました。これらは博士研究を進める上での重要な基礎となりました。厚くお礼申し上げます。

後期博士課程入学同期の、井上絵里氏、奥田氏、田中ウルヴェ京氏、田端謙一氏とは、博士研究を進める中で苦楽を共にさせていただきましたことを深く感謝致します。特に博士論文審査直前において研究の意見交換をさせていただいたことは、COVID-19 感染拡大の渦中で不便な状況の中、大きな励みになりました。また、神武研究室の秘書様方、特に水野久恵様、菅野彰子様には、研究室活動で必要なときにはいつもきめ細かに事務的処理をサポートしていただき、大変感謝しております。

私の2度にわたる塾生生活での学業を支援していただいた父、母には心配をかけました。長い旅路でしたが、ここまで辿り着くことができました。心から感謝致します。

最後になりましたが、慶應義塾大学大学院 SDM 研究科での研究活動において、一緒に時間を共有できたすべての方々に深く感謝いたします。

2021年9月

佐藤 章博