

平成 29 年度
「自動走行向け高精度位置推定システム
に関する調査検討」
の請負報告書

平成 30 年 3 月

沖電気工業株式会社

目次

1. 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討の概要	1
1.1. 調査検討の目的	1
1.2. 調査検討の背景	1
1.3. 調査検討の前提条件	2
1.4. 調査検討の実施項目	2
1.5. 調査検討会の設置と実施体制	6
1.6. 高精度位置推定システムの構成と特徴	6
1.6.1. システム構成	6
1.6.2. 特徴分析	8
2. 高精度位置推定システムの方式検討（ユースケースの要件抽出）	11
2.1. 検討の流れ	11
2.2. ユースケースの調査	11
2.2.1. 調査対象	11
2.2.2. 有識者他の指摘事項	13
2.2.3. IEEE802.11az における検討ユースケース	14
2.3. 検討対象ユースケースの選定	16
2.4. 要件の抽出	21
2.5. ユースケースの要件抽出のまとめ	23
3. 高精度位置推定システムの方式検討（無線通信及び測位のプロトコル検討）	29
3.1. 検討の流れ	29
3.2. 測位プロトコルの検討	29
3.2.1. 測位方式の選定	29
3.2.2. 端末の定義	31
3.2.3. 測位の手順	32
3.2.4. 時刻同期	34
3.2.5. 相互相関処理	34
3.3. 無線通信プロトコルの検討	36
3.3.1. フレームフォーマット	37
3.3.2. 接続手順	38
3.3.3. 対象とする周波数帯	40
3.4. プロトコル案のまとめ	41
3.5. 無線通信及び測位のプロトコル検討のまとめ	41
4. 高精度位置推定システムの性能調査（計算機シミュレーションによる性能評価）	43
4.1. AWGN モデルにおける性能評価	43

4.1.1.	理論式を用いた目標測距誤差の確認	43
4.1.2.	測距誤差特性の評価	45
4.1.3.	回線設計による理論上の測位誤差の確認	46
4.1.4.	測位アルゴリズムを用いた測位誤差の確認.....	52
4.1.5.	固定局の設置位置、設置台数を変えた場合の測位誤差の確認.....	54
4.2.	路面反射モデルにおける性能評価.....	61
4.2.1.	電波伝搬モデル.....	62
4.2.2.	伝搬路推定方式.....	63
4.2.3.	測位手順	69
4.2.4.	シミュレーションパラメータ	70
4.2.5.	測位対象エリア.....	71
4.2.6.	AWGN モデルの評価結果.....	72
4.2.7.	路面反射モデルの評価結果（対策無し）	74
4.2.8.	路面反射への対策検討の条件	75
4.2.9.	路面反射モデルの評価結果（対策後）	76
4.3.	マルチパスモデルにおける性能評価	78
4.3.1.	マルチパスモデルにおける評価結果	78
4.4.	既存 Wi-Fi スポット利用時の性能評価	80
4.5.	計算機シミュレーションによる性能評価のまとめ.....	82
5.	高精度位置推定システムの性能調査（実機による性能評価）	83
5.1.	実機評価の流れ	83
5.1.1.	対象周波数.....	83
5.1.2.	実験系の構成	84
5.2.	実機評価条件.....	86
5.2.1.	評価条件	86
5.2.2.	測位環境	86
5.2.3.	実験の概要.....	87
5.2.4.	測位対象エリア及び測位ポイント	89
5.3.	実機評価結果.....	89
5.3.1.	グラウンドの結果	89
5.3.2.	テストコースの結果	95
5.3.3.	屋内の結果.....	100
5.3.4.	固定した条件での結果のまとめ.....	104
5.3.5.	歩行時の測位の結果	107
5.4.	技術的条件の見直し	113
5.5.	実機による性能評価のまとめ.....	114

6. 考察	115
6.1. 誤差要因の抽出	115
6.2. マルチパス対策技術の検討	117
7. まとめ	119
7.1. 成果まとめ	119
7.1.1. 全体	119
7.1.2. ユースケースの要件抽出	124
7.1.3. 無線通信及び測位のプロトコル検討	129
7.1.4. 計算機シミュレーションによる性能評価	136
7.1.5. 実機による性能評価	144
7.1.6. 考察	148
7.2. 課題まとめ	151
8. 【付属資料 1】平成 29 年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 実施体制および構成員名簿	155
8.1. 実施体制	155
8.2. 構成員名簿	156
9. 【付属資料 2】平成 29 年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 議事録集	157
9.1. 第 1 回会合議事録	157
9.2. 第 2 回会合議事録	165
9.3. 第 3 回会合議事録	172
9.4. 第 4 回会合議事録	179

1. 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討の概要

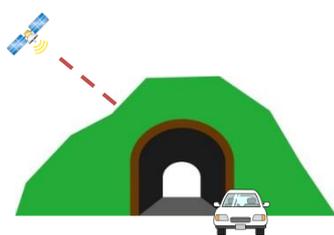
1.1. 調査検討の目的

SIP「自動走行システム」関連事業のこれまでの成果や、欧米における関連する位置推定技術の検討状況等を踏まえ、自動走行向け高精度位置推定システムに係る調査検討を行う。

1.2. 調査検討の背景

調査検討実施にあたっての背景を、自動走行の実現へ向けた取り組みと自動走行向け高精度位置推定システムの検討の必要性の観点から以下に記す。

- 自動走行の実現へ向けた取り組み
道路交通のさらなる円滑化や交通事故の削減、さらには高齢者等の移動支援やドライバー不足の対応など、従来の道路交通・移動に係る社会的課題の解決に資するものと期待され、政府や民間事業者等による実現へ向けた取り組みが加速している。
高度な自動走行システムの実現のためには、車や人の位置を高精度に把握することが不可欠である。衛星数の増加等により GNSS（Global Navigation Satellite System）の測位精度は 10cm 程度を目指しており、2015 年 1 月に策定された「宇宙基本計画」において「2023 年度をめどに持続可能な 7 機体制での運用を開始する」と決定されている。内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「自動走行システム」においても、平成 26 年度から研究開発事業「歩車間通信技術の開発」が実施されており、自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースを想定しつつ、当該ユースケースに対応する歩行者の位置推定技術の開発や歩行者事故低減に資する歩行者端末及びアプリケーション開発、実証実験による適用可能性の検証等が実施されてきた。
- 自動走行向け高精度位置推定システムの検討の必要性
実際に車や人の位置推定技術を自動走行システムに適用していくためには、高層ビルが多い都心等のマルチパスにより十分な精度の GNSS 測位が難しい場所や、トンネル、地下駐車場等の衛星を捕捉できない場所で、車や人が GNSS に頼ることなくスマートフォン等の汎用デバイスの無線通信によって実現可能な高精度位置推定システムの検討を行う必要がある。



a) トンネル等の GNSS 不感地帯 b) GNSS 測位精度が低下する高層ビル街等

図 1.2-1：高精度位置推定が必要なシーン（例）

1.3. 調査検討の前提条件

調査を実施するにあたって考慮した前提条件を以下に示す。

- ・ 調査検討対象周波数帯は、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯とする。
- ・ 測位対象は車両及び歩行者とする。
- ・ スマートフォン等の現行の歩行者端末を利用した既存の無線 LAN システムにおいて実現可能な位置推定システムの検討を実施する。
- ・ 本調査検討で扱う位置推定方式は、測位精度 10cm 程度を実現可能な到達時間方式の中で、特に TDOA (Time Difference Of Arrival) とする。
- ・ 調査検討にあたっては、平成 28 年度に実施された「自動走行向け ITS 無線通信手順についての調査検討」、平成 26 年度～28 年度に実施された「自動走行システムに必要な車車間通信・路車間通信技術の開発」と及び平成 26 年度から実施している「歩車間通信技術の開発」の検討結果・検討状況を踏まえる。
- ・ 調査検討にあたっては、最新の ITS 無線通信システム及び無線通信を用いた位置推定システムの規格化、標準化の動向を踏まえる。

1.4. 調査検討の実施項目

本調査検討の実実施計画及び実施範囲を、表 1.4-1 に示す。同表の赤枠部分が本調査検討の実施範囲である。

本調査検討における実施項目（1）では、自動走行向けの高精度位置推定システムのユースケースを調査・分析し、本調査検討の対象ユースケースの選定と当該ユースケースの要件抽出を行う。また、高精度位置推定システムを実現するための無線通信及び測位に関する基本方式を検討し、実施項目（2）の性能調査結果を踏まえて、無線通信及び測位のプロトコル案としてまとめる。

実施項目（2）では、上記（1）にて検討した無線通信及び測位方式を用いた高精度位置推定システムに対して、計算機シミュレーション及び実機による評価により測位精度等の性能調査を行う。それらの性能調査結果をもとに、対象とするユースケースに対する検討システムの適用可能性を検討し、抽出した要件を満足するための技術的条件を整理する。

本調査検討は、高精度位置推定システムの無線通信及び測位に関する基本方式を確立することを目指し、周辺構造物が無い等の理想的な環境を想定した検討、評価に重点を置くが、次年度は、実環境におけるマルチパスの影響の対策技術検討等の方式の見直しを行う予定である。

表 1.4-1：調査検討の実施計画
 ※表中の赤枠部分が H29 年度実施の本調査検討の実施項目と成果

	実施項目	成果
H29(2017)年度	(1)高精度位置推定システムの方式検討 ・ユースケースの調査・分析 ・方式検討(通信、測位) (2)高精度位置推定システムの性能調査 ・計算機シミュレーション評価 ・実機評価	・無線及び測位のプロトコル案 ・自動走行向けユースケースに対する適用可能性、技術的条件と課題
H30(2018)年度(予定)	●対策技術検討 ・マルチパス対策 ・測位精度向上 ●改善効果確認 ・計算機シミュレーション評価 ・実機評価	・無線及び測位のプロトコル案(見直し) ・対策技術適用時の適用可能性、技術的条件
H31(2019)年度以降(予定)	●自動運転/安全運転支援などを想定したシステムとして、インフラ整備に向けた提案を道路管理者、通信キャリア等へ実施 ●国内ガイドライン等の制定	

実施計画に基づき調査検討の目的を達成するための実施項目と成果目標を以下に示す。また、調査検討全体の実施フローを図 1.4-1 に示す。

【実施項目】

(1) 高精度位置推定システムの方式検討

自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースを調査・分析し、歩行者及び車両の高精度位置推定システムに対する要件を抽出する。さらに抽出した要件を踏まえて高精度位置推定システムの無線通信及び測位についての方式検討を実施し、(2)の性能調査結果をもとに、それらの方式に必要な技術的条件をまとめる。

ア ユースケースの要件抽出

自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースを調査・分析し、高精度位置推定システムの無線通信及び測位に関する要件をユースケース毎に抽出する。なお、ユースケースの調査・分析にあたっては、SIP における関連事業の検討状況を踏まえること。

イ 無線通信及び測位のプロトコル検討

(1) アで抽出した要件を踏まえて、高精度位置推定を実現するために必要な無線通信及び測位に関する手順、仕様等のプロトコル検討を実施する。なお、実施にあたっては、現行の歩行者端末等を利用して実現可能とすることを念頭に置き、前提条件のTDOA方式による位置推定システムに関して検討する。また、無線通信のプロトコル検討にあたっては、前提条件の既存の無線LANの通信仕様に加えて、これまで国内においてITS無線通信として検討、規格化されてきたITS FORUM RC-005、ARIB STD-T109等の通信仕様を参考にする。

さらに、検討したプロトコルに対して、上記(1)アで検討したユースケースの要件を満足するために必要となる技術的条件をまとめる。

(2) 高精度位置推定システムの性能調査

上記(1)で検討した高精度位置推定システムに関して、計算機シミュレーション及び実機による性能調査を実施し、自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースに対する適用可能性を検証する。

ア 計算機シミュレーションによる性能評価

(1) イで検討した無線通信及び測位による高精度位置推定システムの計算機シミュレーションによる評価系を構築し、上記(1)で検討したユースケースに対する適用可能性を評価する。さらに、シミュレーション評価結果より、(1)アで抽出した要件を満足するために必要な技術的条件を整理する。なお、シミュレーション評価にあたっては、無線通信における電波伝搬特性やアクセス制御、車両及び歩行者の移動等の時間的・場所的変動を考慮した評価系を構築し、前提条件で挙げた全ての周波数帯に対して実施する。

イ 実機による性能評価

上記(1)イで検討した高精度位置推定システムの実機による評価系を構築し、テストコース等の屋外環境にて上記(1)で検討したユースケースに対する適用可能性を評価する。さらに、実機評価結果より、(1)アで抽出した要件を満足するために必要な技術的条件を整理する。

また、上記(1)で検討したユースケースの内、少なくとも一つに対して、実環境を模擬した実機検証を実施し、高精度位置推定システムの有効性を検証する。

なお、上記の実機評価及び実機検証にあたっては、前提条件で挙げた検討対象周波数帯の内、少なくとも一つの周波数帯に対して実施する。

【成果目標】

欧米における位置推定システムに関する仕様検討状況を踏まえつつ、GNSSによる測位が難しいエリアでの測位精度を維持する自動走行向け高精度位置推定システムの仕様素案をまとめる。

- ・ 自動走行向けユースケースを想定した高精度位置推定システムの無線通信及び測位のプロトコル案のまとめ
- ・ 想定ユースケースに対する高精度位置推定システムの適用可能性、技術的条件と課題のまとめ

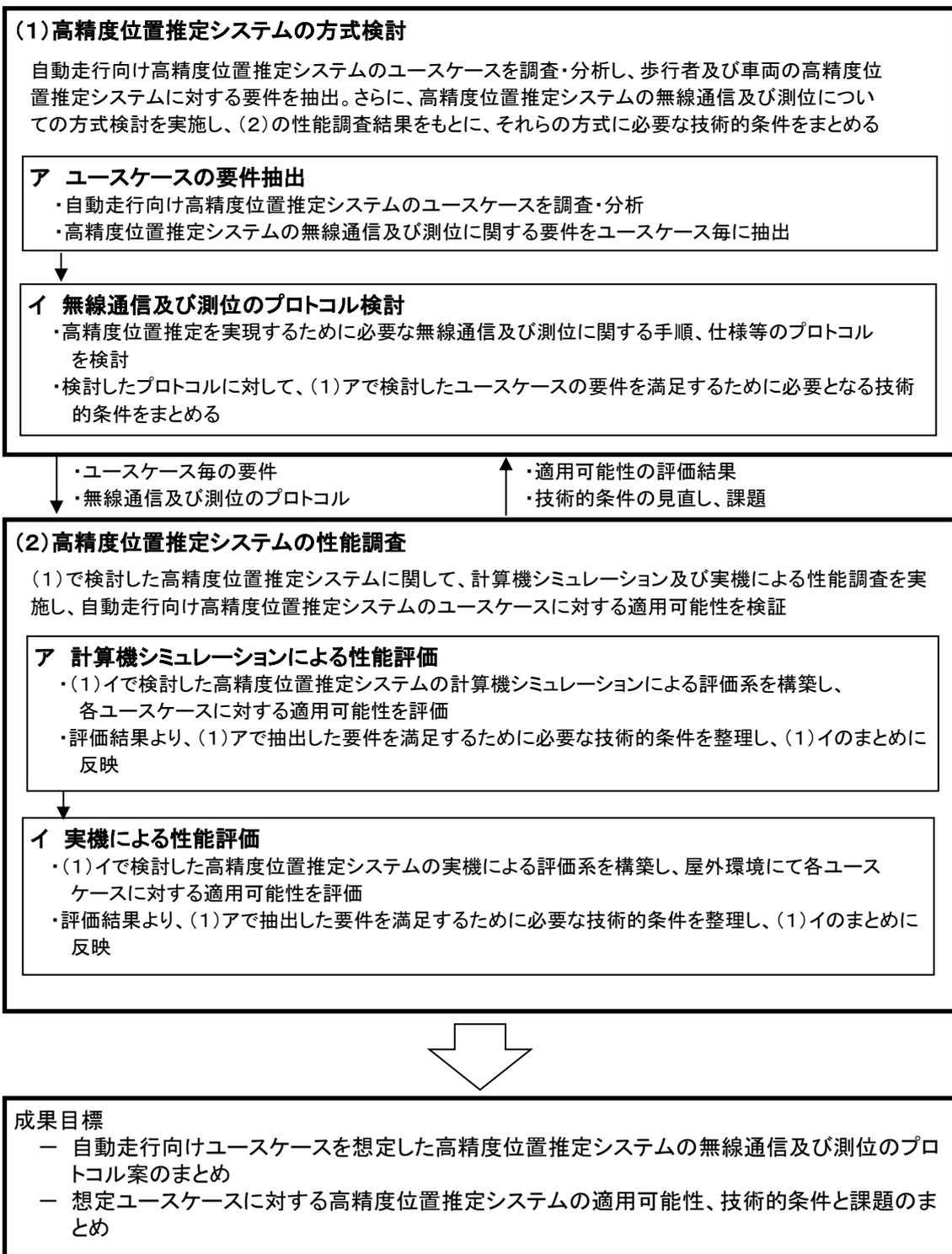


図 1.4-1：調査検討全体の実施フロー

1.5. 調査検討会の設置と実施体制

無線通信技術や自動運転、位置推定技術に関する専門家や学識経験者等からなる検討会を設置し、調査検討の実施内容に関する議論を実施した。具体的には、ITS や測位技術の研究を実施している大学、研究機関、自動車メーカー、通信機器メーカーから有識者に参加頂いた。また、自動車メーカーの構成員には、SIP における議論や情報の展開も担当してもらった。

調査検討会の実施体制及び構成員名簿、ならびに調査検討会における議論の詳細を議事録として、それぞれ 8 章【付属資料 1】ならびに 9 章【付属資料 2】に示す。

1.6. 高精度位置推定システムの構成と特徴

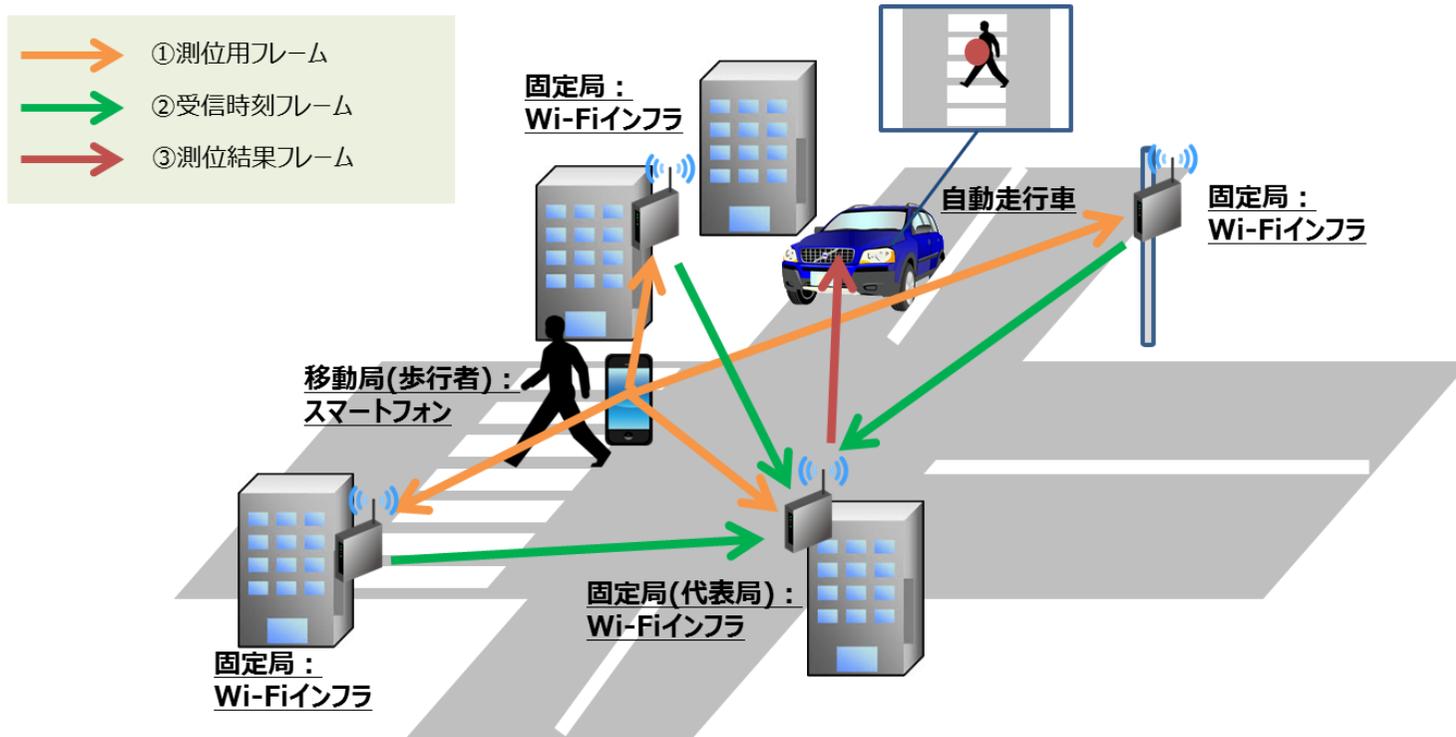
1.6.1. システム構成

本検討システムは、一般道における自動走行向け高精度測位の実現を目指し、特に衛星測位精度が劣化するビル街の交差点をターゲットとする。以下に、検討する上でのポイントを示す。

- 広く普及したスマートフォンの活用
- 屋外の Wi-Fi スポットを活用した歩行者測位の可能性を評価
- 要求される測位精度に対応したインフラ機器の条件を提示

図 1.6-1 に、本調査検討における高精度位置推定システムの基本構成を示す。本検討システムは、前提条件に従って以下の方法で測位を行う。

- 歩行者端末（スマートフォン）の無線 LAN（2.4GHz 帯または 5GHz 帯）の送信電波（図 1.6-1 の測位用フレーム）を交差点付近に設置された 4 台以上の固定局（Wi-Fi スポット）が受信
- 固定局間の受信時刻差を用いて TDOA（到達時間差）方式により歩行者位置を推定
- 固定局（代表局）は、無線 LAN（自動走行車が無線 LAN 搭載時）または安全運転支援等の既存無線通信を用いて、歩行者位置の推定結果を自動走行車へ通知



自動走行向け高精度位置推定システムイメージ

- ① 移動局(歩行者): スマートフォンより周辺の固定局(4台)へフレームを送信
- ② 固定局: ①の受信時刻を固定局(代表局)へ通知
- ③ 固定局(代表局): ②より固定局間の受信時刻差を算出し、移動局の位置を推定。測位結果を自動走行車へ通知

図 1.6-1: 自動走行向け高精度位置推定システムイメージ

1.6.2. 特徴分析

表 1.6-1 に、本検討システムの特徴分析の一つとして、他の測位システムとの比較結果を示す。GNSS の目標測位精度 10cm 程度に加えて、自動走行システムへの活用を想定して、利用形態は屋外、等の観点で比較を行っている。同表には、主な測位システムを示しており、磁気波を利用した測位等の研究段階の測位に関しては比較対象外としている。

同表より、他の測位システムは単独で GNSS の目標測位精度 10cm を達成するのは難しく、自動走行システムにおいて、他の測位システムの補完技術の一つとして本検討システムを検討する必要があることが分かる。

表 1.6-1：高精度位置推定システムの特徴分析（他の測位システムとの比較）

測位精度10cm程度(GNSS目標)、エリア40m程度(大規模交差点想定)、利用形態(屋外)に対して、従来測位システムを比較

システム	概要	課題、対策技術、等	性能判定
検討システム	<ul style="list-style-type: none"> 既存Wi-Fiスポットの活用により設置コスト低 IEEE標準化に合わせて高速処理可能なチップが搭載されたWi-Fiに移行する方向 目標測位精度：10cm程度 	<ul style="list-style-type: none"> マルチパス対策技術 高速サンプリング技術 測位性能に対するインフラ機器の条件抽出 	—
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> 準天頂等の衛星数増加、RTK利用等により測位精度10cm程度を目指す 	<ul style="list-style-type: none"> ビル街、高架下等の不感／マルチパス発生地帯での測位不可／精度低下 	—
リピーター	<ul style="list-style-type: none"> 衛星を補足できる場所にリピーターを設置、同軸ケーブル経由で中継／再放射 測位精度：10～100m程度(測位結果＝リピーター設置位置) 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内利用が基本 同軸ケーブルの設置工事が必要 	×
スードライト(擬似衛星)	<ul style="list-style-type: none"> 衛星に類似した信号を送信するスードライトを設置し、GNSSと同様の測位を行う 測位精度：数～10m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 遠近問題(擬似衛星からの電波が強すぎて衛星からの信号を受信できず) 高精度な時刻同期の仕組みが必要 	△
IMES	<ul style="list-style-type: none"> IMES送信機を設置し、IMES送信機に設定された位置情報を使って位置を推定 測位精度：10m程度(測位結果＝IMES設置位置) 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内利用が基本 IMES対応の受信端末が必要(一部スマホが対応) 	×
BLE	<ul style="list-style-type: none"> 端末－固定局間のパケット受信電力より測位 測位精度：数m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 測位精度のばらつきが大きい 	△
磁気	<ul style="list-style-type: none"> 計測結果を地磁気、建物等の残留磁場による磁気データと比較することにより測位 測位精度：5m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内利用が基本(環境変化に弱い) 利用場所の全地点での磁場データの事前計測が必要 	×
画像認識	<ul style="list-style-type: none"> 参照画像とカメラ撮影した画像の照合により測位 測位精度：数m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 逆光等の環境対策 測位エリアが狭く、かつ拡張困難 	△
自律航法	<ul style="list-style-type: none"> ジャイロや加速度センサを用いて測位 測位精度：数m以上 	<ul style="list-style-type: none"> センサーの蓄積誤差の補正技術が追加が必要 	×

2. 高精度位置推定システムの方式検討（ユースケースの要件抽出）

本章では、自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースを調査・分析し、高精度位置推定システムの無線通信及び測位に関する要件を抽出する。

2.1. 検討の流れ

図 2.1-1 に、本章における自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースの要件抽出の流れを示す。

まず、2.2 節にて自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースの調査を行う。また、国外の高精度位置推定システムに関する検討、標準化の一つである IEEE802.11az におけるユースケースの検討状況を調査する。

続いて、2.3 節にてユースケース調査結果をもとに本調査検討の対象ユースケースの選定を行う。

最後に、2.4 節にて選定したユースケースに対して、無線通信及び測位に関する要件を抽出する。

これらの検討結果を踏まえて、3 章以降にて高精度位置推定システムのプロトコル検討、性能調査を実施する。

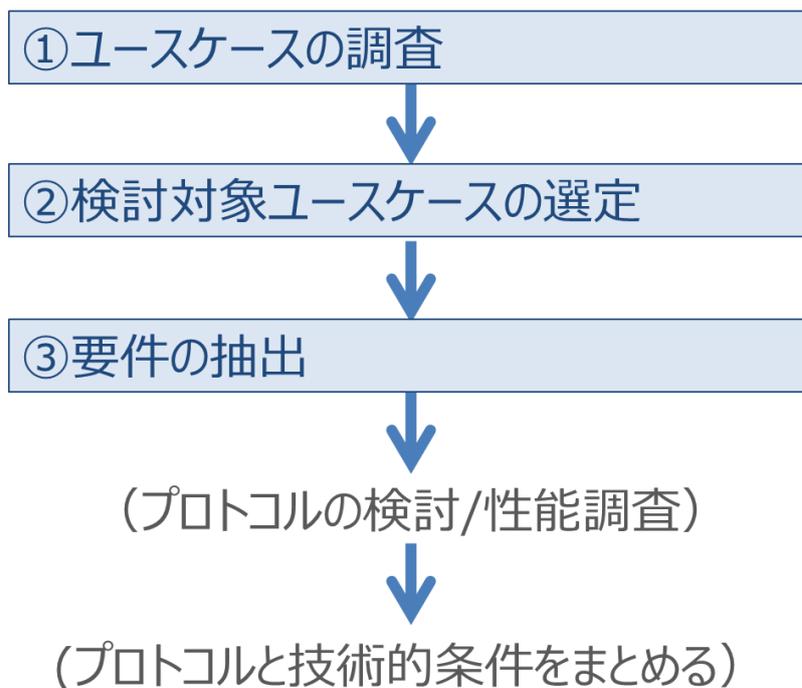


図 2.1-1：自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースの要件抽出の流れ

2.2. ユースケースの調査

本節では、自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースの調査を行う。

2.2.1. 調査対象

測位対象

自動走行向け高精度位置推定システムを適用する移動体（測位対象）としては

- 歩行者
- 自動車（四輪、二輪、大型）
- 自転車

が想定される。位置が移動しない構造物に関しては、高精度地図もしくは自動走行車の自律センサにて位置を把握できるものとして本調査検討システムによる測位対象外とする。

想定環境／場所

1.2節で述べたように、本調査検討システムは高層ビルが多い都心等のマルチパスにより十分な精度のGNSS測位が難しい場所や、トンネル、地下駐車場等の衛星を捕捉できない場所で必要となる。

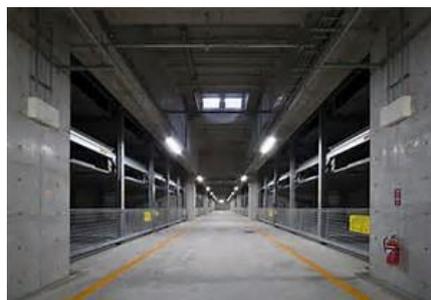
- 高層ビル街
- JCT等の高架下
- 地下／屋内駐車場
- トンネル



a)高層ビル街



b)JCT等の高架下



c)地下／屋内駐車場



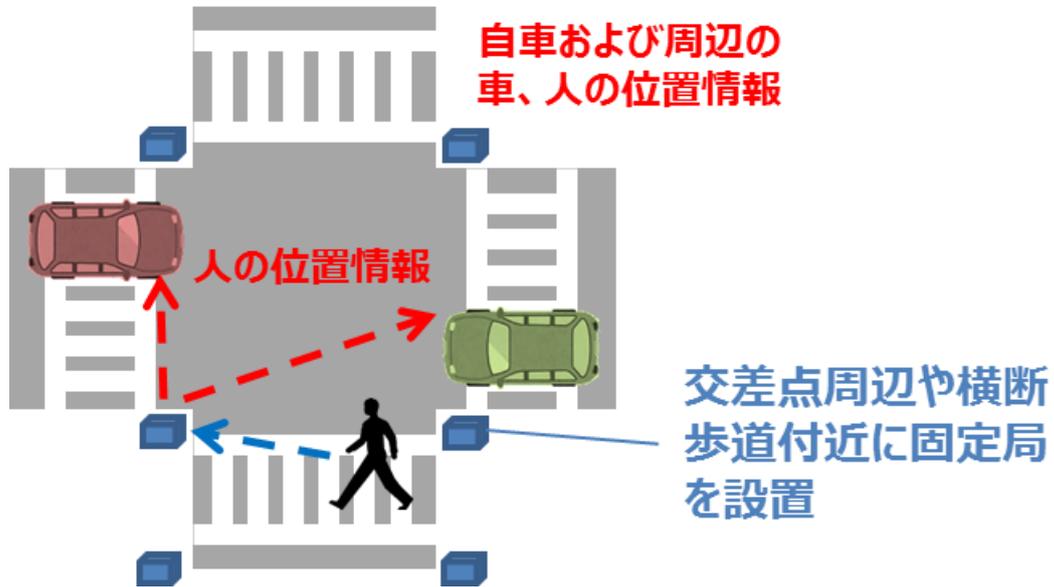
d)トンネル

図 2.2-1：自動走行向け高精度位置推定システムを適用する環境／場所（例）

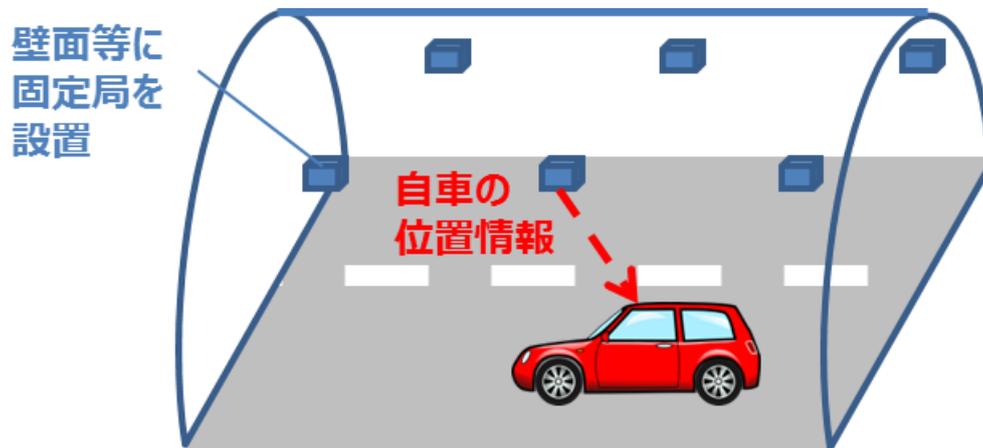
ユースケース（例）

上記測位対象、想定環境／場所に対するユースケース例として、以下のものが挙げられる。

- 高層ビル街、高架下の交差点における横断歩行者との衝突防止
- トンネル内での自動走行支援



a) 高層ビル街、高架下の交差点における横断歩行者との衝突防止



b) トンネル内での自動走行支援

図 2.2-2：自動走行向け高精度位置推定システムのユースケース（例）

2.2.2. 有識者他の指摘事項

上記ユースケースの調査検討結果、本調査検討の位置づけ／進め方等に関して、高精度地図を用いた自動走行の有識者（地図構造化 TF）にヒアリングを実施した。ヒアリングにおける主な指摘事項を以下に示す。

有識者（地図構造化 TF）の主な指摘事項

- 自動走行を行う上で「歩行者の測位精度の向上」が課題
 - 自動車の測位は「高精度地図＋自律系センサ」を用いることで、ある程度の精度は確保可能

- 当面の検討における位置情報表現は、従来の「緯度・経度・高度」が妥当
 - 基準点（CRP）等の他の位置情報表現の選択／拡張は、検討が進んだ段階で判断
- MMS（モバイルマッピングシステム）による固定局アンテナの測位、高精度地図への位置情報追加は可能
 - MMS を用いた高精度地図の精度は 25cm 以下（目標）
 - トンネル等の GNSS 信号が受信できない場所での測量方法／精度確保が課題

また、本調査検討会及びシステム実用化 WG において、以下の指摘を受けた。

本調査検討会における指摘事項

- 「歩行者の測位精度の向上」が課題
 - 都市部における自動車の測位は「トンネル、高架下、高層ビル街の 1 車線道路以外」は、ほぼ問題なし（1～2m の水平精度）

表 2.2-1：自動車の測位精度（例）
ローカル RTK 利用、2～3 車線の車道走行時の実験結果より

環境	測位精度	備考
オープンスカイ	問題なし (100%で cm レベル)	
低中層ビル	ほぼ問題なし (80～90%で cm レベル)	残りを他の GNSS、IMU と速度センサで補完(最大誤差 1m 程度)
高層ビル	RTK 利用により 30～60% 程度で cm レベル	残りを他の GNSS、IMU と速度センサで補完(最大誤差 2m 程度)

- 都市部の歩行者は歩行する場所がビル側でマルチパスの影響が大きくなり精度低下
 - 歩行者に対する IMU（慣性計測装置）や速度センサの利用方法も課題

システム実用化 WG における指摘事項

- 自動走行車は高精度地図及び自律系センサを用いることで必要な測位精度を確保可能

2.2.3. IEEE802.11az における検討ユースケース

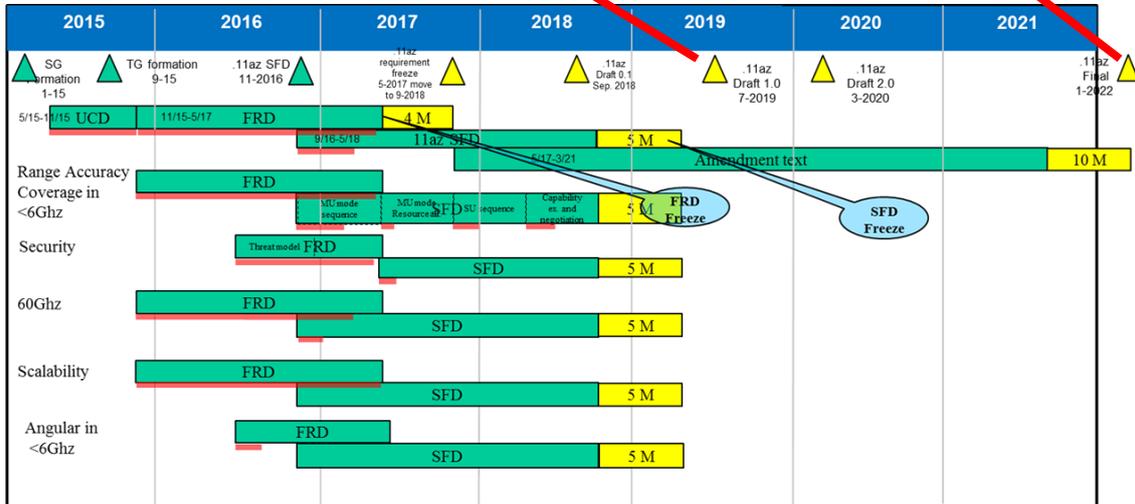
また、国外の高精度位置推定システムに関する検討、標準化の一つである IEEE802.11az におけるユースケースの検討状況を調査する。

IEEE802.11az (Next Generation Positioning) は、IEEE802.11(2016)の option 機能として加わった FTM (Fine Timing Measurement) を利用した高精度測位法の検討、規格化を進めている。FTM は最短 0.1nsec でタイムスタンプを取得する機能であり、スマートフォン等のチップでも FTM に対応することを各メーカーが想定している。

IEEE802.11az の規格化にともない、10Gsps 程度の高速サンプリング対応したチップの開発、普及が期待される。

Draft 1.0 2019 年 7 月 予定

Std. 2022 年 予定



UCD: User-centered design (ユーザ中心設計)

FRD: Functional requirements document (機能要件文書)

SFD: System function description (システム機能記述書)

図 2.2-3 : IEEE802.11az の検討、規格化状況

IEEE802.11az において、以下に示すような高精度測位を適用するユースケースが提案されているが、提案されたユースケースの中に、自動走行向けのユースケースは無い。

1. Micro location in store
2. Positioning for Home Audio
3. Navigation in Public Buildings
4. Positioning for Spectrum Management
5. Positioning for Medical Applications
6. Indoor Geotagging
7. Positioning for Video cameras
8. UAV Use Case Description
9. Location services of underground mining
10. Pipe/Vault Robot Positioning
11. Nano location in store
12. Augmented reality
13. Determine dynamic room setup
14. Proximity Detection
15. Determining Relative Location to Dock(s)
16. Wearable devices
17. Control consoles
18. Agricultural IOT
19. Location Based Network Management
20. Smart buildings
21. Position for traffic tracking in shopping mall
22. Position for electronic tag

2.3. 検討対象ユースケースの選定

前節における調査結果、指摘事項等を踏まえて、本調査検討において対象とするユースケースの選定を行う。

測位対象

有識者等の指摘事項より、自動車は高精度地図と自律系センサの活用により測位精度が確保されており、自動走行を行う上での課題は歩行者の測位精度の向上であるため、本調査検討における測位対象は歩行者とする。

なお、自動走行を行う上で自動走行車周辺の自転車の位置の把握も重要となるが、スマートフォンを活用することで測位を行うことが期待できる点は歩行者と同じであるので、まず歩行者を対象とした調査検討を実施する（自転車の測位の検討は今後の課題）。

想定環境／場所

測位対象を歩行者とすると、前節に挙げた想定環境／場所の中で高層ビル街や高架下の交差点における測位が重要となる。

単路等の交差点以外における歩行者測位も必要であるが、後述の通り交差点における測位に絞り込んでも衝突防止等の自動走行を実現する上での課題解決に十分有効である。

以上より、本調査検討では一般道における自動走行向け高精度歩行者測位、特に衛星測位精度が劣化するビル街の交差点をターゲットとし、「自律センサで検知困難なエリアの歩行者位置情報を自動走行車へ通知する」ユースケースを対象として検討、評価を行うこととする。

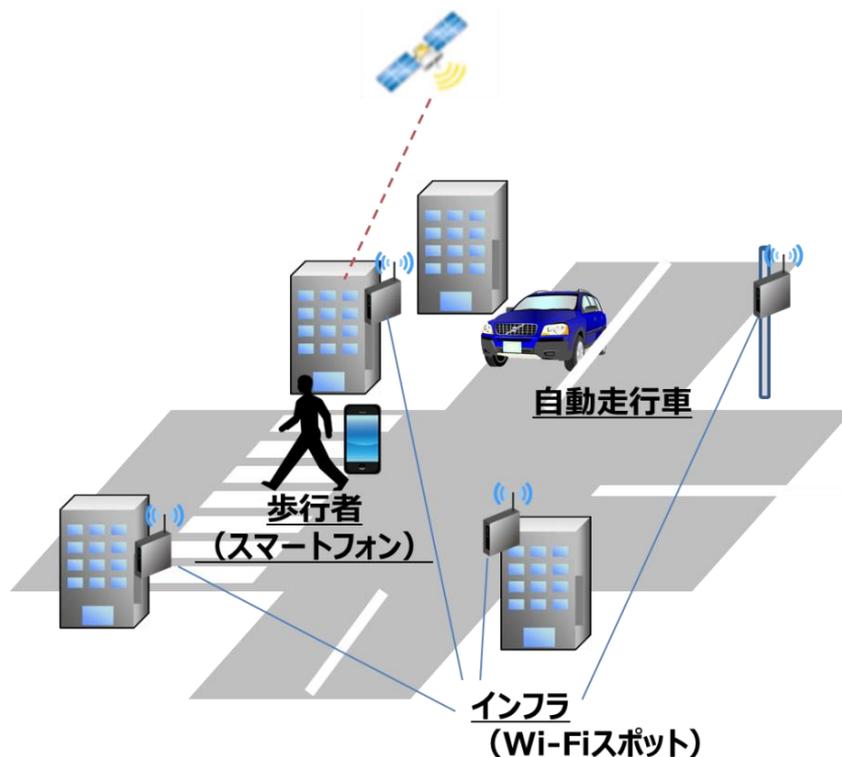


図 2.3-1：検討対象ユースケースイメージ
ビル街の交差点における歩行者位置情報を自動走行車へ通知

続いて、選定したユースケースに対して、交通事故統計をもとに、測位対象エリアの検討を行う。なお、以下に示す交通事故統計は自動走行車が走行していない現状でのものであり、自動走行車が走行する際に回避すべき事故ケースと同じであるかの検討は継続が必要であるが、本調査検討では現状で発生している事故と同じような状況が自動走行車にとっても問題となると想定する。

表 2.3-1 に、地形、道路形状別の交通事故件数を示す。同表より、GNSS 測位が困難な高層ビル街が多い「市街地」における事故は「交差点」が最も多いことがわかる。

図 2.3-2 及び表 2.3-2 に、それぞれ事故類型別の交通事故発生状況及び死亡事故件数の推移を示す。図 2.3-2 より、「死亡事故」に関しては「人対車両」の事故の構成率が多く、特に「横断歩道（付近）横断中」に限定しても多いことが分かる。さらに、表 2.3-2 より「横断歩道横断中」と「横断歩道付近横断中」では「横断歩道横断中」の死亡事故が多いことが分かる。

以上のことから、本調査検討では交差点、特に横断歩道を測位対象エリアとして検討、評価を行う。

表 2.3-1：地形、道路形状別の交通事故件数（H27 年中）
イタルダ交通統計（H27 年版）より

地形	昼夜		昼		夜		合計	
	道路形状		構成率	構成率	構成率	構成率		
市街地	交差点	信号機有	47,061	12.1	26,955	18.2	74,016	13.8
		信号機無	75,898	19.5	21,328	14.4	97,226	18.1
	交差点計		122,959	31.6	48,283	32.6	171,242	31.9
	交差点付近		42,736	11.0	19,138	12.9	61,874	11.5
	単路	トンネル	614	0.2	140	0.1	754	0.1
		橋	1,606	0.4	724	0.5	2,330	0.4
		カーブ・屈折	4,928	1.3	1,647	1.1	6,575	1.2
		一般単路	108,394	27.9	42,599	28.8	150,993	28.1
	単路計		115,542	29.7	45,110	30.5	160,652	29.9
	踏切		99	0.0	38	0.0	137	0.0
その他の道路		12,952	3.3	4,134	2.8	17,086	3.2	
市街地計		294,288	75.7	116,703	78.9	410,991	76.5	
非市街地	交差点	信号機有	8,258	2.1	3,964	2.7	12,222	2.3
		信号機無	23,103	5.9	4,825	3.3	27,928	5.2
	交差点計		31,361	8.1	8,789	5.9	40,150	7.5
	交差点付近		12,843	3.3	4,722	3.2	17,565	3.3
	単路	トンネル	846	0.2	145	0.1	991	0.2
		橋	1,067	0.3	497	0.3	1,564	0.3
		カーブ・屈折	6,970	1.8	1,886	1.3	8,856	1.6
		一般単路	36,525	9.4	13,809	9.3	50,334	9.4
	単路計		45,408	11.7	16,337	11.0	61,745	11.5
	踏切		22	0.0	8	0.0	30	0.0
その他の道路		5,079	1.3	1,339	0.9	6,418	1.2	
非市街地計		94,713	24.3	31,195	21.1	125,908	23.5	
市街地・非市街地	交差点	信号機有	55,319	14.2	30,919	20.9	86,238	16.1
		信号機無	99,001	25.5	26,153	17.7	125,154	23.3
	交差点計		154,320	39.7	57,072	38.6	211,392	39.4
	交差点付近		55,579	14.3	23,860	16.1	79,439	14.8
	単路	トンネル	1,460	0.4	285	0.2	1,745	0.3
		橋	2,673	0.7	1,221	0.8	3,894	0.7
		カーブ・屈折	11,898	3.1	3,533	2.4	15,431	2.9
		一般単路	144,919	37.3	56,408	38.1	201,327	37.5
	単路計		160,950	41.4	61,447	41.5	222,397	41.4
	踏切		121	0.0	46	0.0	167	0.0
その他の道路		18,031	4.6	5,473	3.7	23,504	4.4	
合計		389,001	100.0	147,898	100.0	536,899	100.0	

構成率 (%)

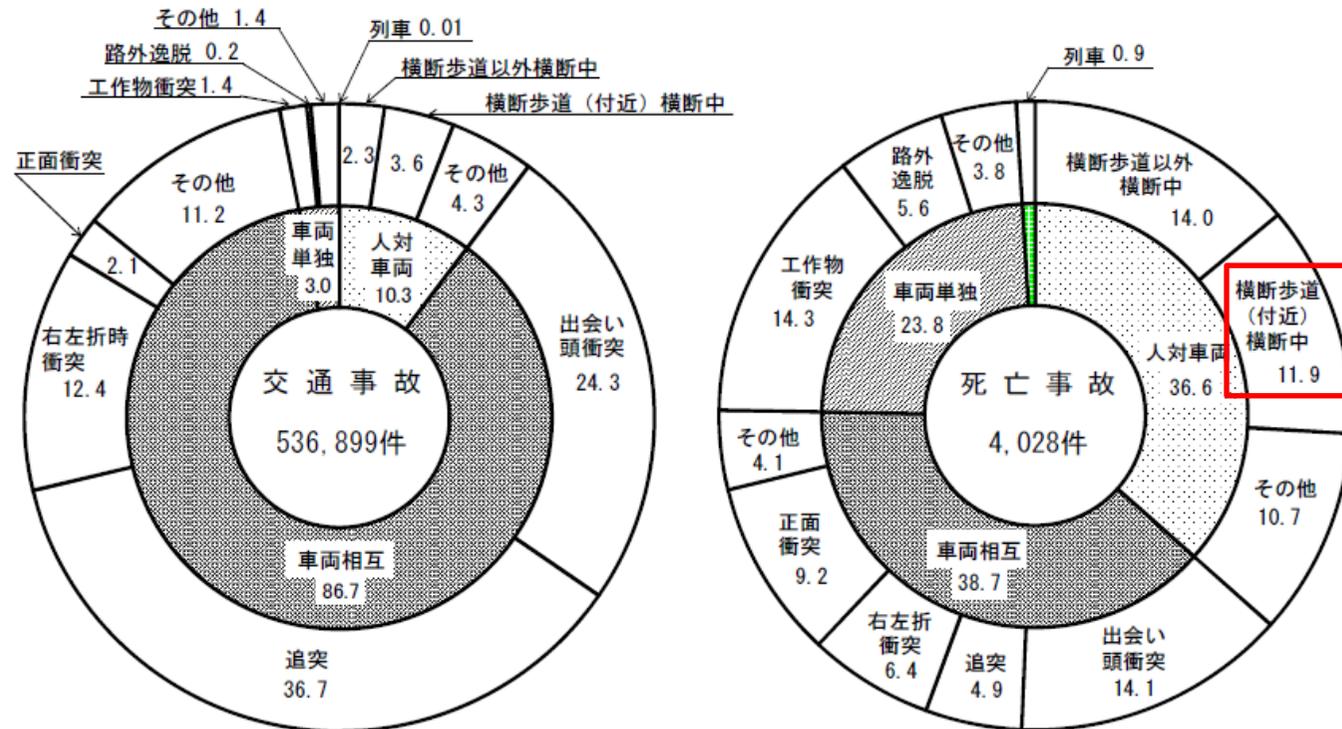


図 2.3-2：事故類型別の交通事故発生状況
イタルダ交通統計年報（H27年版）より

表 2.3-2 : 事故類型別の死亡事故件数の推移
イタルダ交通統計 (H27 年版) より

事故類型		年	昭和	平成				平成
			45	15	16	17	18	19
			年					年
人 対 車 両	対 面 通 行 中		347	74	61	69	52	58
	背 面 通 行 中		587	163	160	165	150	140
	横 断 歩 道 横 断 中		636	479	429	399	455	407
	横断歩道付近横断中		440	252	205	179	153	156
	そ の 他 横 断 中		2,897	986	1,012	889	875	838
	路 上 遊 戯 中		...	2	6	8	4	9
	路 上 作 業 中		220	42	46	61	39	34
	路 上 横 臥		...	...	...	...	...	...
	そ の 他		647	291	290	268	280	262
	小 計		5,774	2,289	2,209	2,038	2,008	1,904

平成	20	21	22	23	24	25	26	平成
年								27
	年							年
	52	72	52	40	50	43	50	46
	119	134	102	130	111	105	88	77
	365	365	365	336	365	329	320	346
	136	117	137	160	154	130	137	135
	743	722	740	676	626	628	569	563
	3	1	1	4	6	7	4	4
	26	39	28	33	19	35	27	22
	...	...	...	...	129	122	122	142
	266	220	266	262	114	101	127	139
	1,710	1,670	1,691	1,641	1,574	1,500	1,444	1,474

2.4. 要件の抽出

前節までの調査、検討結果を踏まえて、本調査検討の対象ユースケースに対する無線通信及び測位に関する要件を抽出する。

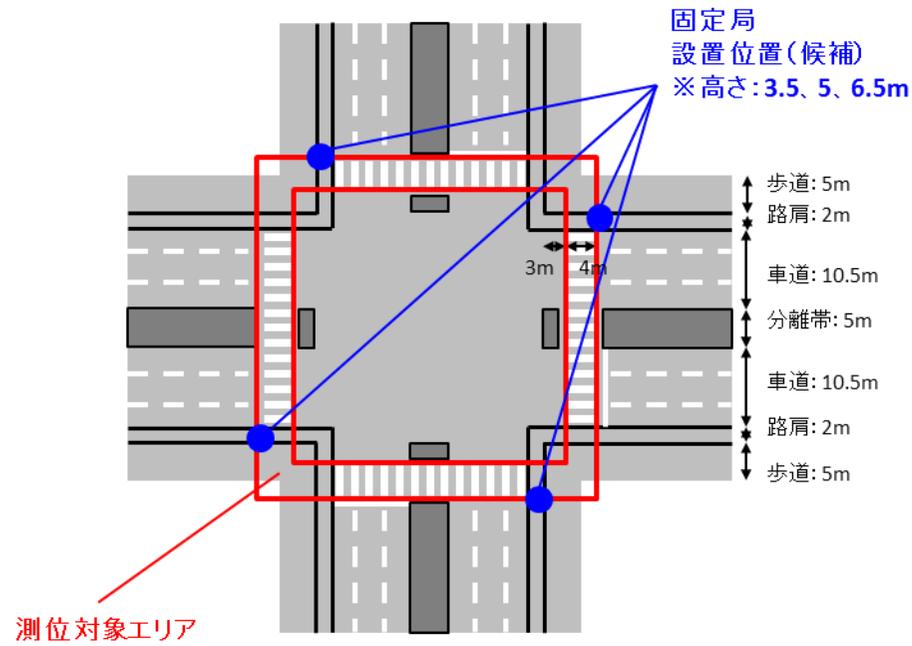
表 2.4-1 に、本調査検討の対象ユースケースである「自律センサで検知困難なエリアの歩行者位置情報を自動走行車へ通知」に対する自動走行向け高精度位置推定システムの無線通信及び測位の要件を示す。

- 無線通信における測位用フレームの送信頻度や測位の更新頻度は、GNSS+IMU の測位周期と同程度を想定
- 測位対象エリアにおいて目標測位精度を満たす場所率は、IEEE802.11az の検討ユースケースの場所率やインフラレーダーの検出率と同程度を想定
- 想定する交差点の道路規模は大規模及び小規模の両方を想定。本調査検討では、図 2.4-1 に示す交差点と測位対象エリアに関して検討、評価を行う。

表 2.4-1：対象ユースケースの要件の抽出結果

方式	項目	値	備考
共通	環境／場所	高層ビル街の交差点	大規模／小規模
	対象エリア	横断歩道	
	測位対象	歩行者	スマートフォンを携帯
	通知先	自動走行車	
無線通信	通信規格	IEEE802.11g/a	2.4GHz 帯／5GHz 帯
	送信頻度	100msec 周期以下	・測位用フレーム ・GNSS 測位周期と同程度を想定
測位	水平測位精度	10cm 以下 @場所率 90%	・測位精度 10cm:GNSS の目標精度 ・場所率 90%:IEEE802.11az の場所率、インフラレーダーの検出率の同程度を想定
	垂直測位精度	10cm／1m 以下 @場所率 90%	・測位精度 10cm:同上 測位精度 1m:道路／歩道橋上の歩行の識別可能 ・場所率 90%:同上
	更新頻度	100msec 周期以下	・GNSS 測位周期と同程度を想定

大規模交差点(片側3車線想定)



小規模交差点(片側1車線想定)

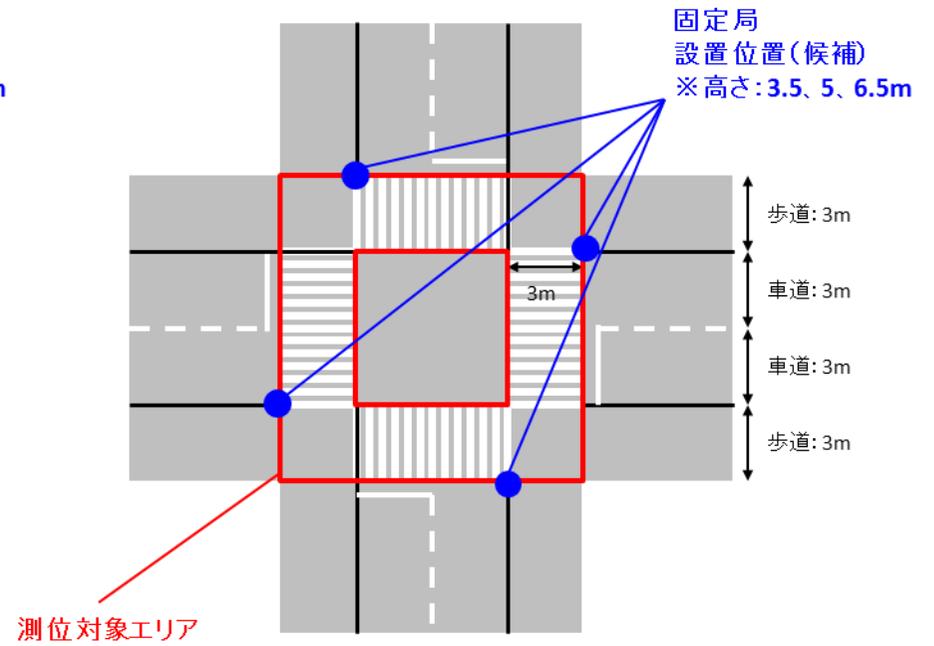


図 2.4-1 : 想定する交差点規模と測位対象エリア (横断歩道)

2.5. ユースケースの要件抽出のまとめ

自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースを調査・分析し、高精度位置推定システムの無線通信及び測位に関する要件を抽出した。

【ユースケースの調査】

自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースの調査を行い、測位対象や想定環境等を整理した。

測位対象

- 歩行者
- 自動車（四輪、二輪、大型）
- 自転車

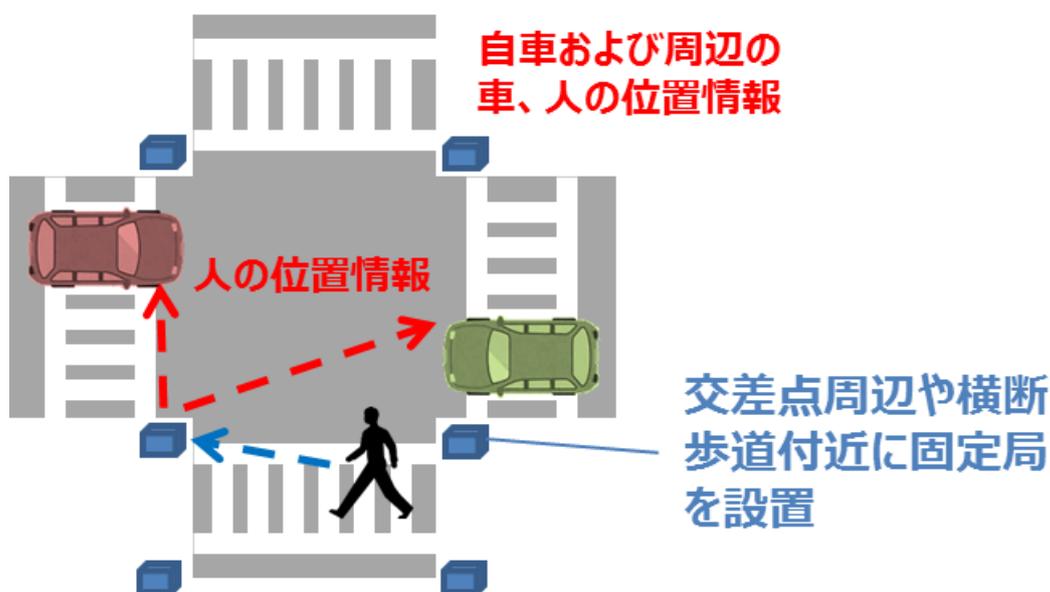
想定環境／場所

高層ビルが多い都心等のマルチパスにより十分な精度のGNSS測位が難しい場所や、トンネル、地下駐車場等の衛星を捕捉できない場所

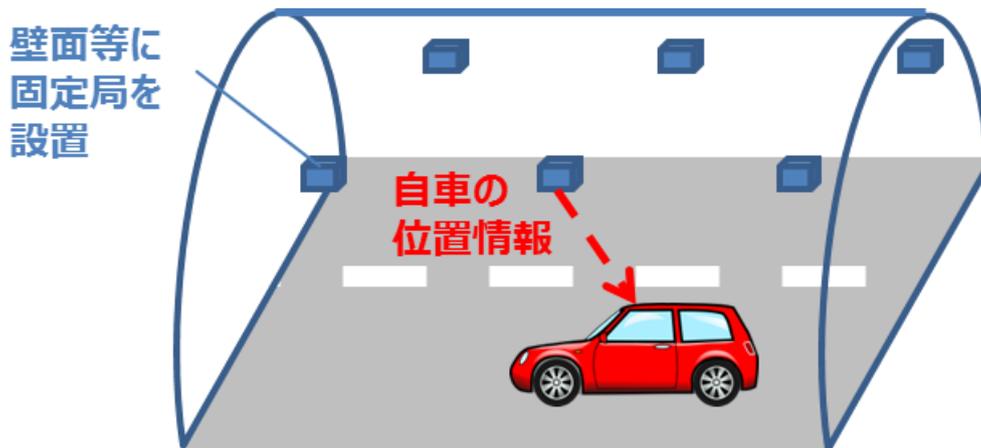
- 高層ビル街
- JCT等の高架下
- 地下／屋内駐車場
- トンネル

ユースケース（例）

- 高層ビル街、高架下の交差点における横断歩行者との衝突防止
- トンネル内での自動走行支援



a) 高層ビル街、高架下の交差点における横断歩行者との衝突防止



b) トンネル内での自動走行支援

図 2.5-1：自動走行向け高精度位置推定システムのユースケース（例）

【有識者他の指摘事項の整理、活用】

続いて、上記ユースケースの調査検討結果、本調査検討の位置づけ／進め方等に関して、高精度地図を用いた自動走行の有識者（地図構造化 TF）にヒアリングを実施し、本調査検討会及びシステム実用化 WG における指摘事項とともに整理し、以下の対象ユースケースの選定等に活用した。主な指摘事項は以下の通り。

有識者（地図構造化 TF）の主な指摘事項

- 自動走行を行う上で「歩行者の測位精度の向上」が課題
 - 自動車の測位は「高精度地図＋自律系センサ」を用いることで、ある程度の精度は確保可能
- MMS（モバイルマッピングシステム）による固定局アンテナの測位、高精度地図への位置情報追加は可能
 - MMS を用いた高精度地図の精度は 25cm 以下（目標）
 - トンネル等の GNSS 信号が受信できない場所での測量方法／精度確保が課題

本調査検討会における指摘事項

- 「歩行者の測位精度の向上」が課題
 - 都市部における自動車の測位は「トンネル、高架下、高層ビル街の 1 車線道路以外」は、ほぼ問題なし（1～2m の水平精度）

表 2.5-1：自動車の測位精度（例）
ローカル RTK 利用、2~3 車線の車道走行時の実験結果より

環境	測位精度	備考
オープンスカイ	問題なし (100%で cm レベル)	
低中層ビル	ほぼ問題なし (80~90%で cm レベル)	残りを他の GNSS、IMU と速度センサで補完(最大誤差 1m 程度)
高層ビル	RTK 利用により 30~60%程度で cm レベル	残りを他の GNSS、IMU と速度センサで補完(最大誤差 2m 程度)

- 都市部の歩行者の測位は歩行する場所がビル側でマルチパスの影響が大きくなり精度低下
 - 歩行者に対する IMU（慣性計測装置）や速度センサの利用方法も課題

システム実用化 WG における指摘事項

- 自動走行車は高精度地図及び自律系センサを用いることで必要な測位精度を確保可能

【IEEE802.11az における想定ユースケースの調査】

国外の高精度位置推定システムに関する検討、標準化の一つである IEEE802.11az (Next Generation Positioning) におけるユースケースの検討状況を調査した。

IEEE802.11az において、以下に示すような高精度測位を適用するユースケースが提案されているが、提案されたユースケースの中に、自動走行向けのユースケースは無いことが分かった。

IEEE802.11az は、IEEE802.11 の option 機能として加わった FTM (Fine Timing Measurement) を利用した高精度測位法の検討、規格化を進めており、最短 0.1nsec でタイムスタンプを取得する機能である FTM にスマートフォン等のチップでも対応することを各メーカーが想定していることが分かった。IEEE802.11az の規格化にともない、10Gbps 程度の高速サンプリング対応したチップの開発、普及が期待される。

【対象ユースケースの選定】

上記の調査結果、指摘事項等を踏まえて、本調査検討において対象とするユースケースの選定を行った。

測位対象

有識者等の指摘事項より、自動車は高精度地図と自律系センサの活用により測位精度が確保されており、自動走行を行う上での課題は歩行者の測位精度の向上であるため、本調査検討における測位対象は歩行者とする。

なお、自動走行を行う上で自動走行車周辺の自転車の位置の把握も重要となるが、スマートフォンを活用することで測位を行うことが期待できる点は歩行者と同じであるので、まず歩行者を対象とした調査検討を実施する（自転車の測位の検討は今後の課題）。

想定環境／場所

測位対象を歩行者とすると、前節に挙げた想定環境／場所の中で高層ビル街や高架下の交差点における測位が重要となる。

単路等の交差点以外における歩行者測位も必要であるが、後述の通り交差点における測位に絞り込んでも衝突防止等の自動走行を実現する上での課題解決に十分有効である。

以上より、本調査検討では一般道における自動走行向け高精度歩行者測位、特に衛星測位精度が劣化するビル街の交差点をターゲットとし、「自律センサで検知困難なエリアの歩行者位置情報を自動走行車へ通知する」ユースケースを対象として検討、評価を行うこととする。

続いて、選定したユースケースに対して、交通事故統計をもとに、測位対象エリアの検討を行った。交通事故統計は自動走行車が走行していない現状でのものであり、自動走行車が走行する際に回避すべき事故ケースと同じであるかの検討は継続が必要である（本調査検討では現状で発生している事故と同じような状況が自動走行車にとっても問題となると想定）。

交通事故の調査より、以下のことが分かった。

- GNSS 測位が困難な高層ビル街が多い「市街地」における事故は「交差点」が最も多い
- 「死亡事故」に関しては「人対車両」の事故の構成率が多く、特に「横断歩道（付近）歩行中」が多い
- 「横断歩道横断中」と「横断歩道付近横断中」では「横断歩道横断中」の死亡事故が多い

以上のことから、本調査検討では交差点、特に「横断歩道」を測位対象エリアとして検討、評価を行うこととした。

【要件の抽出】

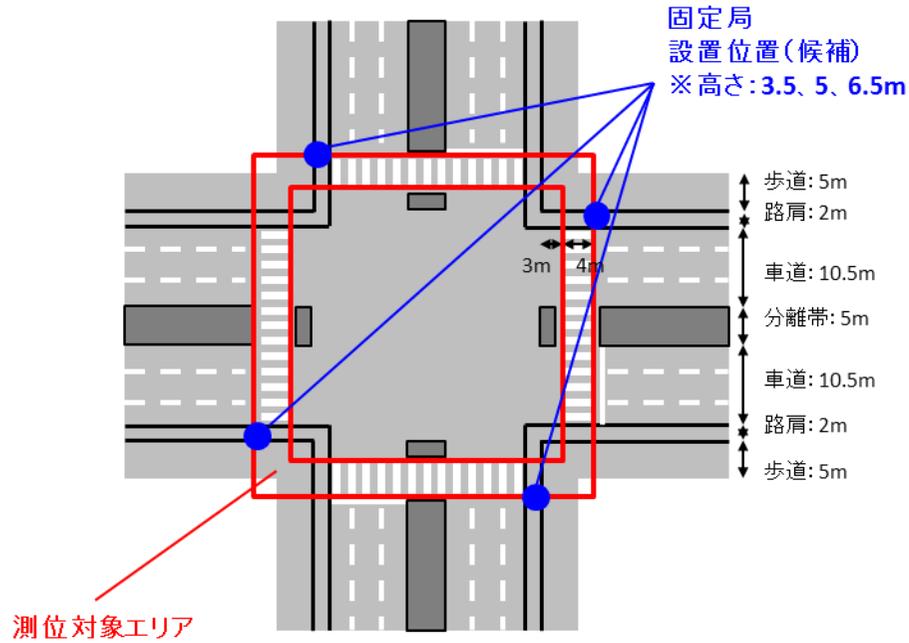
調査、検討結果を踏まえて、本調査検討の対象ユースケースに対する無線通信及び測位に関する要件を抽出した。

表 2.5-2 及び図 2.5-2 に、本調査検討の対象ユースケースである「自律センサで検知困難なエリアの歩行者位置情報を自動走行車へ通知」に対する自動走行向け高精度位置推定システムの無線通信及び測位の要件の抽出結果及び想定する交差点規模と測位対象エリア（横断歩道）を示す。

表 2.5-2：対象ユースケースの要件の抽出結果

方式	項目	値	備考
共通	環境／場所	高層ビル街の交差点	大規模／小規模
	対象エリア	横断歩道	
	測位対象	歩行者	スマートフォンを携帯
	通知先	自動走行車	
無線通信	通信規格	IEEE802.11g/a	2.4GHz 帯／5GHz 帯
	送信頻度	100msec 周期以下	・測位用フレーム ・GNSS 測位周期と同程度を想定
測位	水平測位精度	10cm 以下 @場所率 90%	・測位精度 10cm:GNSS の目標精度 ・場所率 90%:IEEE802.11az の場所率、 インフラレーダーの検出率の同程度を 想定
	垂直測位精度	10cm／1m 以下 @場所率 90%	・測位精度 10cm: 同上 測位精度 1m: 道路／歩道橋上の歩行 の識別可能 ・場所率 90%: 同上
	更新頻度	100msec 周期以下	・GNSS 測位周期と同程度を想定

大規模交差点(片側3車線想定)



小規模交差点(片側1車線想定)

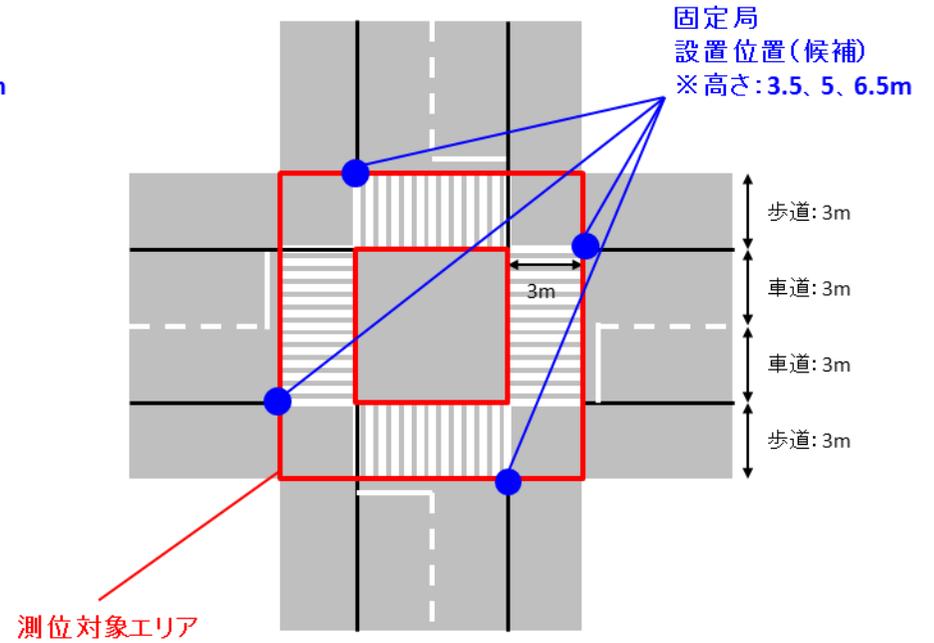


図 2.5-2 : 想定する交差点規模と測位対象エリア (横断歩道)

3. 高精度位置推定システムの方式検討（無線通信及び測位のプロトコル検討）

本章では、高精度位置推定システムの方式について検討する。本システムのプロトコルは、測位の計算処理及び手順を規定する測位プロトコルと、測位を行う上でのデータのやり取りを規定する無線通信プロトコルから構成される。測位プロトコルについては 3.2 節、無線通信プロトコルについては 3.3 節で示す。

3.1. 検討の流れ

本節では、本システムのプロトコルを検討する上での手順について示す。本検討は以下の手順で行う。

① 測位プロトコルの検討

2 章で抽出したユースケースを踏まえて、高精度位置推定システムにおける測位プロトコルを検討する。検討では以下の点を考慮する。

- ・ 1.3 節の前提条件に従って、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯を対象周波数とし、車両及び歩行者を測位対象とする。

② 無線通信プロトコルの検討

2 章で抽出したユースケースを踏まえて、高精度位置推定システムにおける無線通信プロトコルを検討する。検討では以下の点を考慮する。

- ・ 無線通信プロトコルは、1.3 節の前提条件を踏まえて、無線 LAN 規格、特に物理層及びデータリンク層の規格（IEEE 802.11）を参考にする。
- ・ 無線通信で利用するフレームフォーマット及び通信手順を決める。
- ・ 1.3 節の前提条件に従って、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯を対象周波数とし、車両及び歩行者を測位対象とする。

③ 技術的条件のまとめ

①及び②にて検討した測位及び無線通信プロトコルに対して、4 章及び 5 章で示す性能調査の結果をもとに、ユースケースの要件を満足するための技術的条件をまとめる。

3.2. 測位プロトコルの検討

本節では、高精度位置推定システムにおける測位プロトコルについて検討する。本調査検討では、以下のシステム要件を満たす必要がある。

- ・ 測位誤差 10cm 程度を実現すること
- ・ スマートフォン等の汎用デバイスにより実現できること

3.2.1 項では、これらのシステム要件を考慮し、電波を用いた一般的な測位方式を俯瞰した上で、本システムに適用可能な測位方式を選定する。

3.2.1. 測位方式の選定

表 3.2-1 に電波を用いた測位方式を示す。

電波を用いた測位方式は、受信電力を用いた方式と到来時間を用いた方式に大別できる。いずれの方式も、固定局を設置し、固定局から移動局に電波を送信する、あるいは移動局から固定局に電波を送信することで測位を行う。

表 3.2-1：電波を利用した測位方式

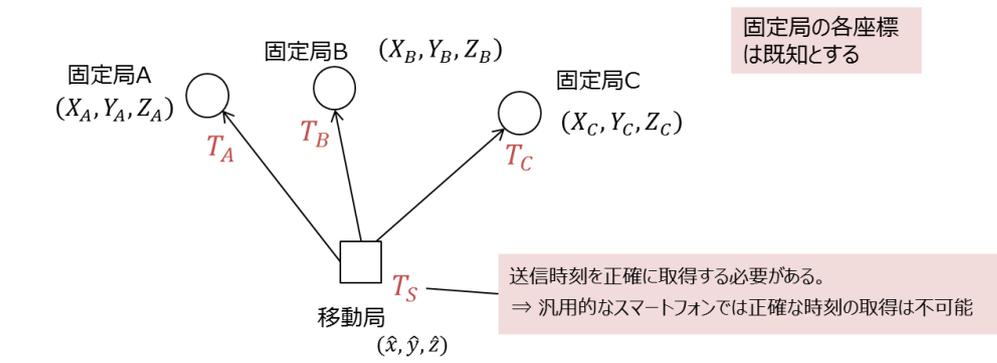
測位方式	測位精度	スマートフォンでの実現
RSSI (受信電力)	×	○
TOA (到来時間)	○	×
TDOA (到来時間差)	○	○

受信電力を用いた方式は、移動局から送信される電波の受信信号の強度(受信強度:RSSI、Received Signal Strength Indicator)を測定し、RSSIから測位するものである。RSSIが測定できれば、実験による統計的な結果、いわゆる電波伝搬特性から移動局までの距離が推定できる。さらに、複数の距離情報を用いることで位置が推定できる。ただし、電波伝搬の環境によりRSSIは大きく変動するため、測距精度が十分とはならない。一般的に、到来時間を用いた方式に比べ、電力を用いた方式は低コストで実現できるが測距精度が低い。測位精度を改善するためには、固定局の設置台数を増やすなどの対策が必要となるため、コストや敷設の条件を考慮する必要がある。したがって、高精度を要求する本システムにおいては、受信電力を用いたRSSI方式は適用できない。

到来時間を用いた方式は、移動局から送信される電波の受信時刻を固定局が測定し、送信時刻と受信時刻から伝搬にかかる到来時間を求め、光の速さを乗じることで距離を計算し、複数の移動局から受ける距離情報を基に位置を推定する。

TOA(Time Of Arrival)方式は到来時間を用いた測位方式である。TOA方式の概要を図3.2-1に示す。TOA方式は送信時刻と受信時刻を測定し、電波の伝搬時間を測定することで距離を求め、複数の距離情報から移動局の位置を求める。ここで、送信時刻及び受信時刻は高精度での取得が求められるため、高速に動作するADコンバータが必要となる。本調査検討では、スマートフォン等の移動局は汎用デバイスの利用を前提とするため、高速なADコンバータを備えておらず、送信時刻を高精度に取得することができない。したがって、TOA方式は本システムに適用できない。

- (1) 到達時刻 (T_A T_B T_C) と送信時刻 T_S を測定
- (2) 連立方程式を解くことで、移動局の位置 ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$) を求める



$$\begin{cases} \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} = (T_A - T_S) \times c \\ \sqrt{(\hat{x} - X_B)^2 + (\hat{y} - Y_B)^2 + (\hat{z} - Z_B)^2} = (T_B - T_S) \times c \\ \sqrt{(\hat{x} - X_C)^2 + (\hat{y} - Y_C)^2 + (\hat{z} - Z_C)^2} = (T_C - T_S) \times c \end{cases} \quad c : \text{光速}$$

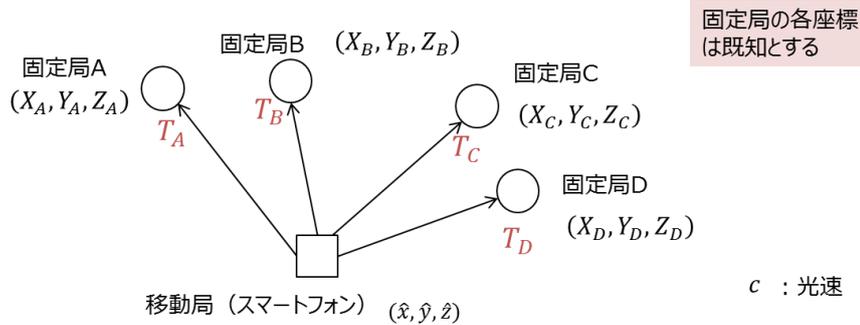
図 3.2-1 : TOA 方式

TDOA(Time Difference Of Arrival)方式も時間を利用した測位方式である。TDOA方式の概要を図3.2-2に示す。TDOA方式はTOA方式のように到来時間そのものではなく、到来時間差を求めて測位する。このため、固定局は少なくともTOA方式より1台多くなるが、移動局は送信時刻を正確に取得する必要がない。移動局は任意のタイミングで電波を送信することができ、それを固定局が受信した時刻により、固定局間の到来時間差を求めるこ

とで測位する。送信時刻を求める必要がないため、スマートフォン等の汎用デバイスを用いたシステムであっても、TDOA方式を実装することが可能である。

以上の観点から、本システムは測位方式としてTDOA方式を選定する。

- (1) 到達時刻 ($T_A T_B T_C T_D$) を測定
 - (2) 連立方程式を解くことで、移動局の位置 ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$) を求める



$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \sqrt{(\hat{x} - X_B)^2 + (\hat{y} - Y_B)^2 + (\hat{z} - Z_B)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_B - T_A| \times c \\ \left| \sqrt{(\hat{x} - X_C)^2 + (\hat{y} - Y_C)^2 + (\hat{z} - Z_C)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_C - T_A| \times c \\ \left| \sqrt{(\hat{x} - X_D)^2 + (\hat{y} - Y_D)^2 + (\hat{z} - Z_D)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_D - T_A| \times c \end{array} \right.$$

図 3.2-2 : TDOA 方式

3.2.2. 端末の定義

表 3.2-2 に端末の定義を示す。本システムは移動局及び固定局から構成される。

移動局は測位の対象となる無線端末のことであり、例えば、歩行者が所持するスマートフォンや車両に搭載する無線機のことである。

固定局はインフラに固定する無線端末のことであり、移動局の電波を受信し、その結果を利用することで測位を実行するものである。

また、固定局の特定の1台を代表局と呼ぶ。TDOA方式で測位するためには、受信時刻の情報を基に、図 3.2-2 に記載された連立方程式を解く必要がある。このため、受信時刻の情報を集め、連立方程式を代表して解く固定局が必要となる。これを行うのが代表局である。また、連立方程式を解き、得られた測位結果を移動局に返すことも行う。さらに、本システムでは高精度で時刻情報を取得するため、時刻の同期処理を実装しなければならない。代表局の時刻を基準とし、固定局間の時刻同期を行う。

表 3.2-2：端末の定義

端末	説明
移動局	測位の対象となる無線端末。歩行者のスマートフォンや車両に搭載された端末。
固定局	インフラに固定された無線端末。 移動局の電波を受信し、代表局に電波の受信時刻を渡す。
代表局	固定局のうち、代表となる1台。 <ul style="list-style-type: none"> 受信時刻情報を集め、測位計算処理を実行する。 時刻同期処理を実行する。(代表局の時刻が基準) 測位結果を移動局に返す。

3.2.3. 測位の手順

TDOA 方式を実現するための具体的な測位の手順を図 3.2-3 から図 3.2-6 に示す。ここでは、説明の便宜上、固定局が4台の場合を考える。以下では、固定局 A を代表局と設定するが、その他の固定局を代表局と設定しても測位の手順は変わらない。

まず、移動局は代表局である固定局 A に対して測位フレームを送信する(図 3.2-3)。測位フレームは測位に利用するものであり、移動局から代表局宛に送信する。ここで、固定局 B、C 及び D は、移動局から固定局 A に送信された測位フレームを傍受する。移動局からすれば、固定局 B、C 及び D へは直接的な接続を行わないため、固定局 B、C 及び D の存在を意識する必要はなく、代表局である固定局 A とのみ、通信を行えばよい。したがって、3.3.2 項で示す無線通信手順は移動局と代表局間でのみ行われる。

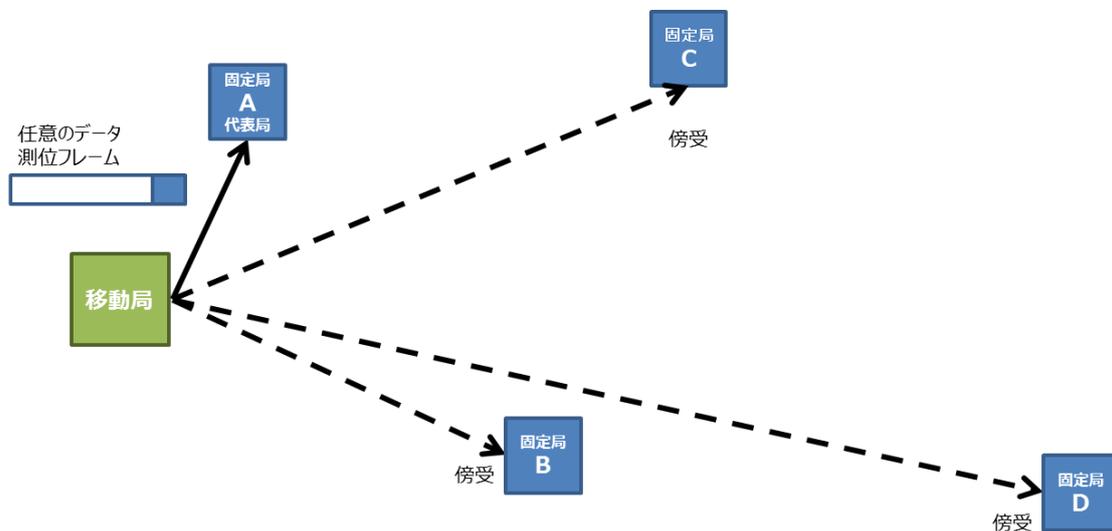


図 3.2-3：測位手順(1) 測位フレームの送信

次に、測位フレームの受信時刻の情報を固定局 A 以外の各固定局から受信時刻フレームを利用して集約する(図 3.2-4)。受信時刻フレームは、固定局間でやり取りするフレームであるため、任意の方法で伝達する手段が用意できればよい。例えば、無線 LAN において、測位に利用するチャンネルとは別のチャンネルで受信時刻フレームを送信してもよく、固定局間が有線ケーブルで接続できる環境では、有線 LAN を利用して受信時刻フレームを送信してもよい。

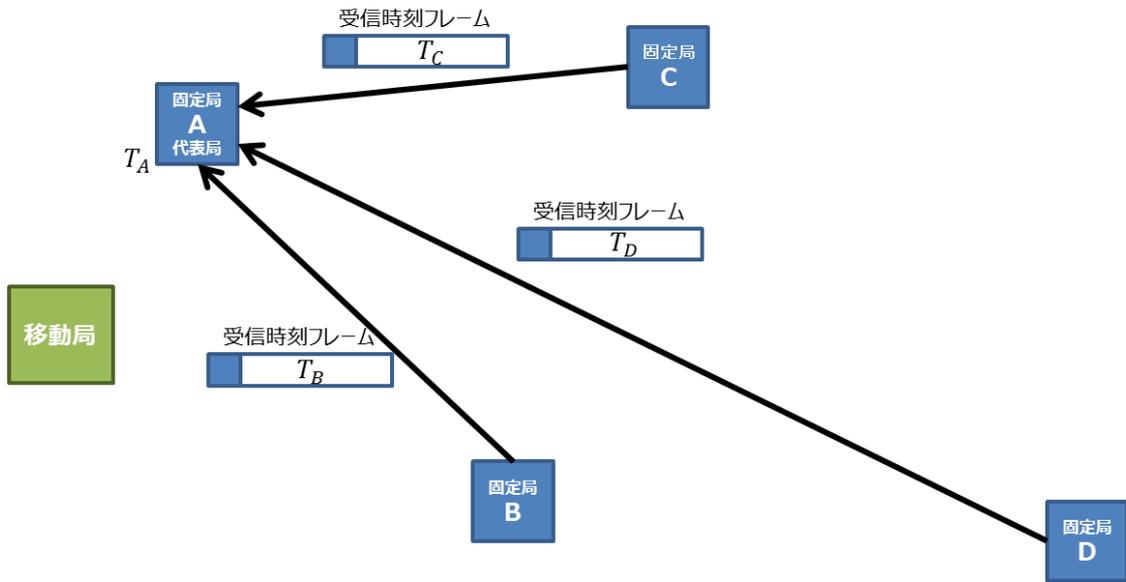
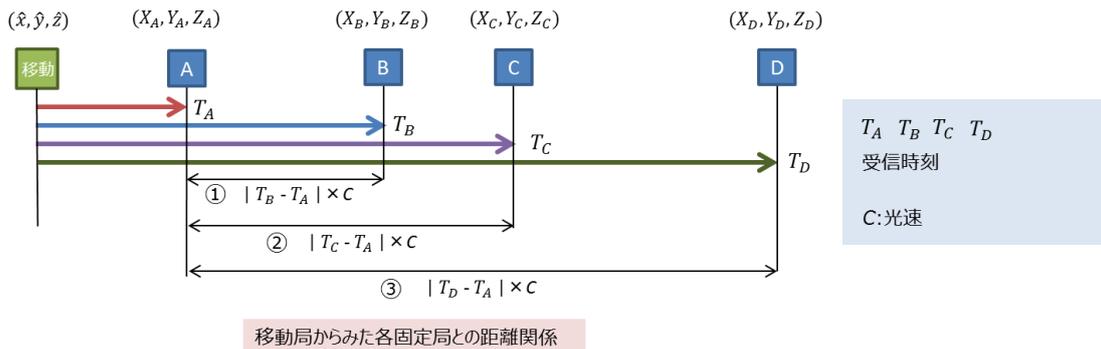


図 3.2-4 : 測位手順(2) 受信時刻情報の集約

集約された受信時刻の情報に基づき、代表局は測位の計算処理を実行する。図 3.2-5 に示す連立方程式の左辺は、位置関係から決まる距離差を表している。ここで、各固定局の座標 (X, Y, Z) は既知であるとする。各固定局との距離は図の色をついた線に示す式で表すことができる。

また、図 3.2-5 に示す連立方程式の右辺は、各固定局での受信時刻を T_A, T_B, T_C 及び T_D とすれば、受信時刻を用いた時刻差に光速を乗じることで計算される距離差を表している。以上より、①、②、③から成る連立方程式を解くことで、移動局の座標を求めることができる。



移動局からみた各固定局との距離関係

$$\begin{cases}
 \left| \sqrt{(\hat{x} - X_B)^2 + (\hat{y} - Y_B)^2 + (\hat{z} - Z_B)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_B - T_A| \times C & \text{①} \\
 \left| \sqrt{(\hat{x} - X_C)^2 + (\hat{y} - Y_C)^2 + (\hat{z} - Z_C)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_C - T_A| \times C & \text{②} \\
 \left| \sqrt{(\hat{x} - X_D)^2 + (\hat{y} - Y_D)^2 + (\hat{z} - Z_D)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_D - T_A| \times C & \text{③}
 \end{cases}$$

図 3.2-5 : 測位手順(3) 測位の計算処理

最後に、代表局である固定局 A から移動局に測位結果を返す。このとき、移動局のアドレス（MAC アドレス）を指定してユニキャストで送信するか、あるいは、近傍の車両全体にブロードキャストで送信するかは、本システムを適用するユースケースによって選択することができる。

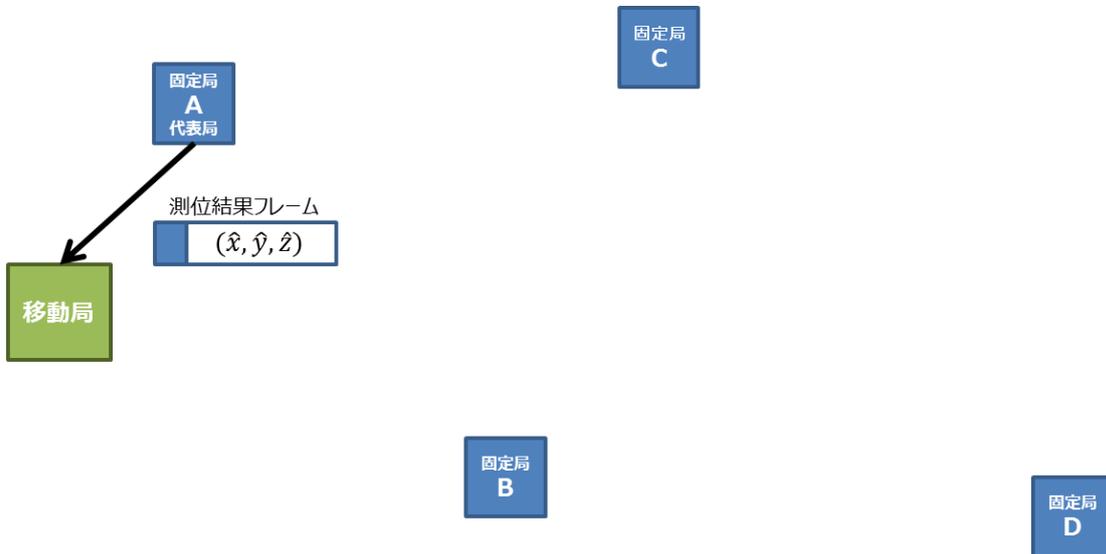


図 3.2-6 : 測位手順(4) 測位結果の送信

3.2.4. 時刻同期

図 3.2-7 に固定局間の時刻同期について示す。本システムはスマートフォンから送信されるフレームの受信時刻を測定し、到達する時刻差から測位するため、各固定局が管理する時刻は、システム全体で精度よく同期させる必要がある。そのため、代表局の時刻をシステムの基準となる時刻とし、代表局から定期的に時刻同期のためのフレーム（時刻同期フレーム）を送信し、同期をとる。時刻同期フレームには代表局が備える時計により取得できる送信時刻の情報が含まれる。代表局以外の固定局は、時刻同期フレームを受信すると、当該フレームから得られる、代表局の送信時刻の情報に、位置関係からあらかじめ計算できる伝搬時間の値を加えることで、代表局の基準時刻が逆算でき、その値を用いて自身の時計をリセットする。

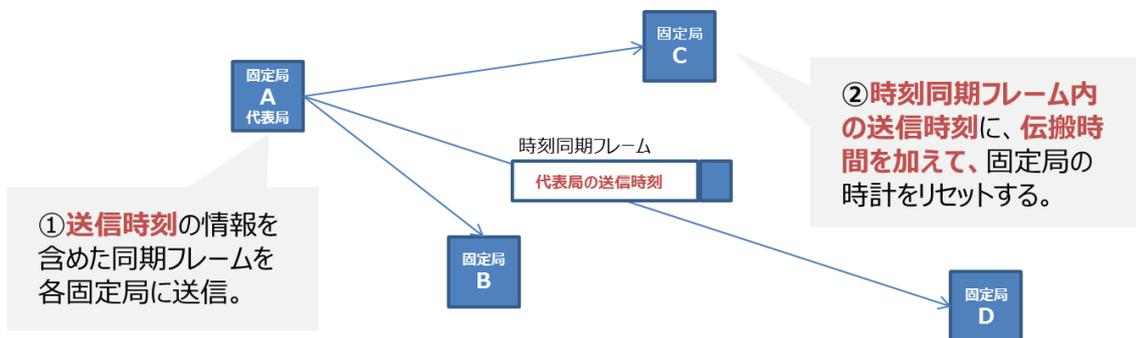


図 3.2-7 : 固定局間の時刻同期

3.2.5. 相互相関処理

本システムは、精度よくフレームの先頭の受信時刻を取得する必要がある。一般に、RSSI を監視し、RSSI の値が閾値を超えることでフレームを検出することができるが、フレーム

の先頭を完全なタイミングで取得するためには、変動の大きい RSSI による判定では不十分である。

本システムでは、RSSI による判定後に、その近傍の受信データを、一旦、システムの記憶領域に保存し、答えのパターンとなるプリアンブルデータと相互相関処理を施すことで、さらに正確なフレームの先頭位置を計算する。図 3.2-8 に相互相関処理を示す。

左上の図は AD コンバータから送られてくる 1 フレームの信号データの波形を示しており、RSSI による判定を行うことで、記憶領域に保存することが可能である。また、AD コンバータを動作させた開始時刻は自身が備えるタイマーから正確に取得できる。ただし、フレームの正確な先頭時刻はこの時点ではわからない。

右上の図は IEEE 802.11g フレームのプリアンブルデータの波形である。フレームフォーマットはシステムで共通であるため、どの移動局のフレームもプリアンブルの部分と同じである。そこで、受信した波形と答えのパターンとなるプリアンブルデータを利用し相互相関処理 (IQ 信号による複素相互相関演算) を行う。

左下の図は相互相関処理の結果であり、相関の最も高い位置がフレームの先頭を示している。相互相関の結果はデータ先頭からの相対的な位置として計算される。また、前述の通り、データの先頭位置は AD コンバータを動作させる開始時刻であり、システムのタイマーから正確な時刻が取得できる。したがって、AD コンバータの開始時刻から相対的にフレームの先頭位置を加算することで、絶対時刻におけるフレームの先頭時刻を正確に求めることができる。

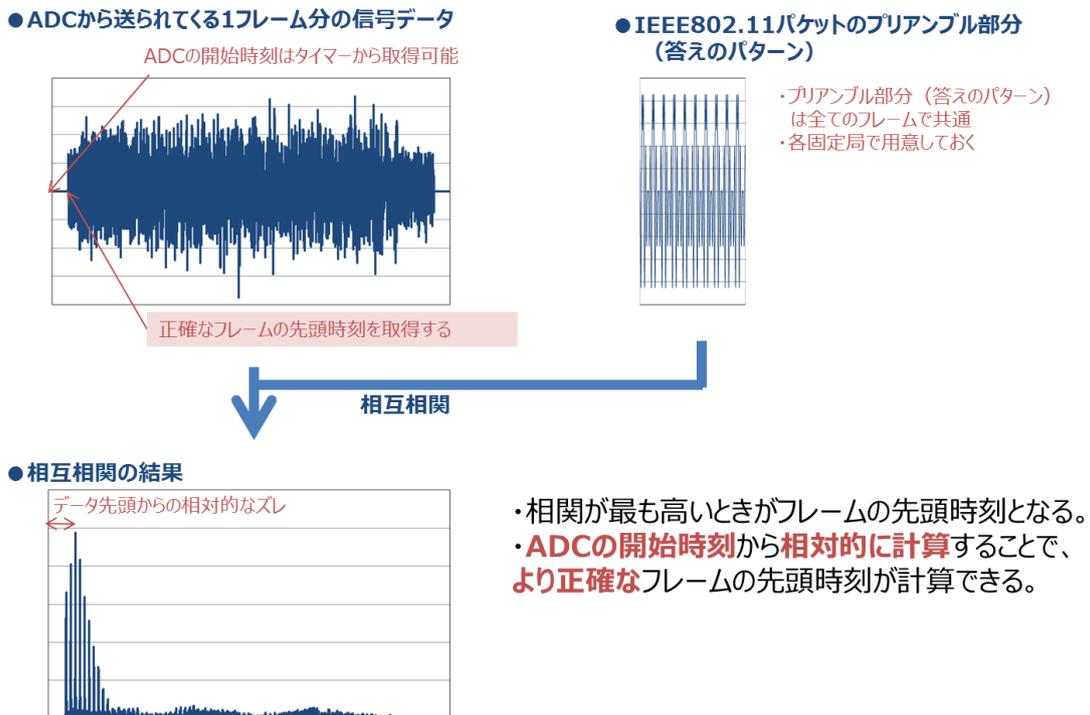


図 3.2-8 : 相互相関処理

3.3. 無線通信プロトコルの検討

本節では、無線通信プロトコルについて検討する。本調査検討の測位対象は、汎用的な端末を利用することが前提であり、一般に入手可能なスマートフォンを対象とした測位を実現するための無線通信プロトコルを検討する必要がある。これは、スマートフォンにあらかじめ備わった機能により実現することを前提としており、スマートフォンへの新たなハードウェアの追加（USBポートと接続する外部の無線モジュールなど）を認めるものではない。

現行のスマートフォンは、一般的に、IEEE 802.11 に準拠した無線モジュールが実装されている。本システムでは IEEE 802.11 に従った通信手順により測位することを考える。また、無線通信プロトコルを規定するにあたって、IEEE 802.11 の仕様を変更してはならない。現行のスマートフォンに実装されている無線モジュールを利用し、ハードウェアを改修せず、ソフトウェアのインストールのみで実現できる無線通信プロトコルを検討する。ここで、インストールするソフトウェアのことを TDOA 測位プロトコルと呼ぶことにする。

現行のスマートフォンは、インターネットを利用するように設計されているため、TCP/IP プロトコルが備わっている。3.2.1 項で検討した TDOA 方式において、移動局は任意のタイミングで電波を送信する機能を備えれば測位が可能である。すなわち、インターネットの接続と同じように、TCP/IP プロトコルのアプリケーションの一つとして、無線による通信が可能なソフトウェアを実装できれば、スマートフォン側の測位機能は実現できる。以上より、本システムの TDOA 測位プロトコルは TCP/IP プロトコルの上位であるアプリケーション層に実装する。

プロトコルスタックについて図 3.3-1 に示す。移動局及び固定局はいずれも図 3.3-1 に示すプロトコルスタックに従った機能を備える。TDOA 測位プロトコルは移動局及び固定局のアプリケーション層に実装する。

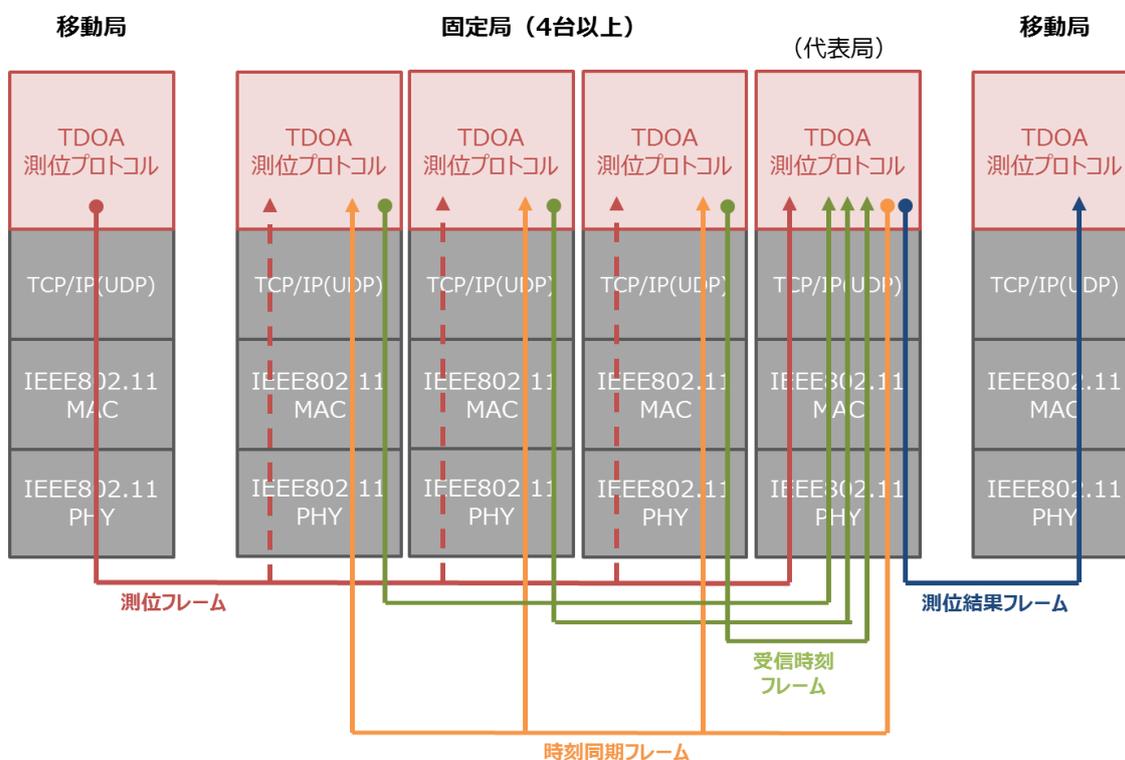


図 3.3-1 : プロトコルスタックとフレームのやり取り

3.3.1. フレームフォーマット

フレームフォーマット及びフレームタイプを図 3.3-2 に示す。本システムでは 4 種類のフレームタイプを規定する。各フレームは IEEE 802.11 及び TCP/IP で規定されたフレームフォーマットに従う。物理層、データリンク層のヘッダは IEEE 802.11 に従う。ネットワーク層、トランスポート層のヘッダは TCP/IP に従う。

測位フレームは、測位に利用するものであり、移動局から代表局宛に定期的に送信する。代表局以外の固定局は測位フレームを傍受する。すなわち、移動局は代表局の MAC アドレスを指定して通信し、代表局以外の固定局とは直接的な通信を行わない。代表局以外の固定局は、移動局と代表局間の通信で発生する測位フレームを傍受する。

また、測位自体は IEEE 802.11 フレームに従った任意のフレームを検出できれば可能である。例えば、ユーザが任意のアプリケーションによりデータ通信を行っていれば、そのデータ通信で利用されるフレームを傍受することで測位が可能となる。したがって、TDOA 測位プロトコルが、データ通信を行っていないことを検知した場合のみ、自発的に測位フレームを送信するという手順をとることで、測位に要する無駄なフレームを低減させることも可能である。

測位結果フレームは、測位した結果が含まれ、代表局から移動局へ送信する。このとき、移動局の MAC アドレスを指定してユニキャストで送信するか、あるいは、近傍の車両全体にブロードキャストで送信するかは、本システムを適用するユースケースによって選択できる。

受信時刻フレームは、各固定局から代表局に、受信時刻の情報を集約するために利用する。ここで、受信時刻の情報は移動局 1 台について 1 フレームとして送るだけでなく、複数台の移動局の受信時刻情報を集約して送ることも可能である。また、受信時刻フレームは、固定局と代表局間の通信であるため、固定局と代表局間に実装された任意の通信方式により情報が伝達できればよい。すなわち、固定局のインフラへの設置状況を考慮して伝達手段を設計すればよく、無線のみならず有線を利用してよい。

時刻同期フレームは、システムの基準となる代表局の時刻を、代表局から固定局に伝達するために利用する。

フレームフォーマット

802.11 PHY	802.11 MAC	TCP/IP	測位システムの各フレーム
------------	------------	--------	--------------

■ 移動局と代表局（例：公衆無線LANのアクセスポイント）間の通信

フレーム名	送信元	受信先	ペイロード	備考
測位フレーム	移動局	代表局	任意	代表局と通信しているフレームを各固定局が傍受する
測位結果フレーム	代表局	移動局	測位結果	

■ 固定局間の通信

フレーム名	送信元	受信先	ペイロード	備考
受信時刻フレーム	固定局	代表局	(MACアドレスと受信時刻のセット) ×近隣の移動局N台分	有線あるいは無線で伝送
時刻同期フレーム	代表局	固定局	代表局の送信時刻	

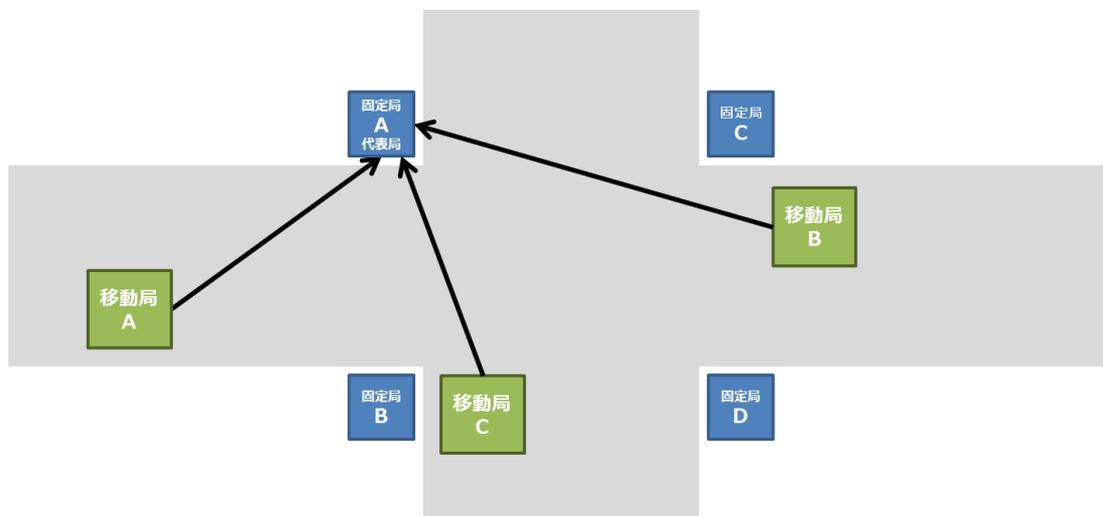
図 3.3-2：フレームフォーマットとフレームタイプ

3.3.2. 接続手順

本システムでは、測位対象エリアに必ず1台の代表局があり、移動局は代表局と接続することで測位を開始する。代表局との接続関係を図 3.3-3 に示す。全ての移動局は測位対象エリアの近傍に侵入すると代表局との接続を試みる。

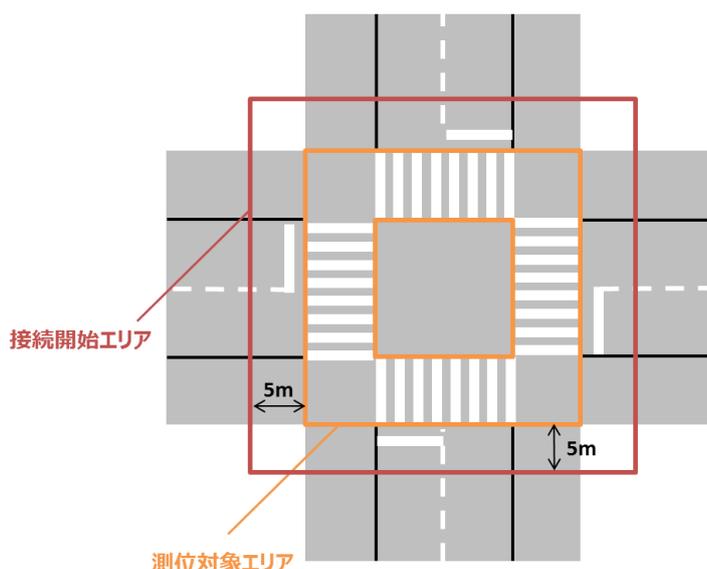
ここで、代表局への接続処理を開始する範囲のことを接続開始エリアと呼ぶことにする。測位を行う前に代表局との通信接続の手順を完了させておく必要があるため、接続開始エリアは測位対象エリアを包括し、測位対象エリアより広いエリアとして定義する。測位対象エリアと接続開始エリアの関係について図 3.3-4 に示す。

代表局は無線 LAN におけるアクセスポイントと同じ役割として動作し、接続処理もアクセスポイントと同じ手順を実行する。ここで、現行の無線 LAN のアクセスポイントは、認証等の手順を踏むことで、子機との最初の接続は3秒程度の時間がかかることとされている。歩行速度を 1.4m/s と想定すれば、3秒間では 4.2m 進むため、接続開始エリアは測位対象エリアの外周より全体的に 5m 程度広くする。



対象とする交差点にアクセスポイント（代表局）が1台あり、全ての移動局は代表局に接続することを考える

図 3.3-3 : 代表局への接続



現行のアクセスポイントは接続までに3秒かかるといわれている。歩行速度を1.4m/sとすると、3秒間では4.2m進むため、接続開始エリアは測位対象エリアより、5m程度広くする必要がある。

図 3.3-4 : 接続開始エリア

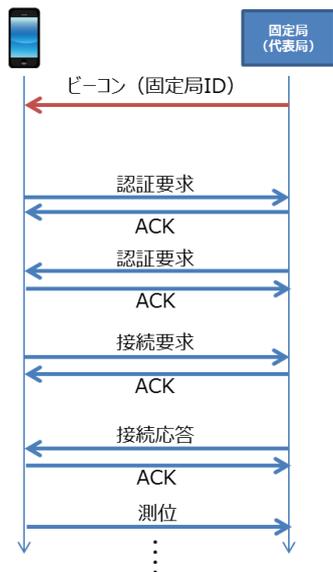
次に、代表局との接続手順について図 3.3-5 に示す。一般的な無線 LAN では、子機がアクセスポイントと最初の接続を試みる場合に、パッシブスキャンとアクティブスキャンのいずれかの手順を行う。

パッシブスキャンは、代表局から定期的送信されるビーコンを端末側がスキャンし、ビーコン内に含まれる代表局の MAC アドレスを利用し、アクセスポイント（代表局）への接続を試みる方法である。

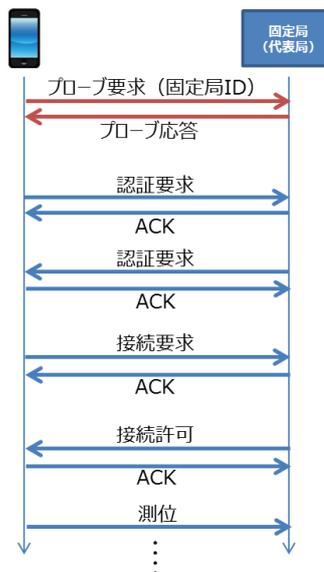
これに対して、アクティブスキャンでは、ビーコンのスキャンを必要とせず、端末側がアクセスポイント（代表局）の MAC アドレスを直接指定してプローブ要求を行う。アクティブスキャンでは、端末側はあらかじめアクセスポイント（代表局）の MAC アドレスを知っていることが前提となる。

本システムでは、交差点等に設置された公衆の代表局と接続することを想定する。この場合、あらかじめ代表局の MAC アドレスを知ることができないため、アクティブスキャンは適用できない。したがって、本システムは代表局と接続する手順としてパッシブスキャンを利用する。認証要求、接続要求、及び接続応答の手順は、一般的な無線 LAN における接続手順と同じである。接続開始後は端末から測位フレームを定期的送信する。

パッシブスキャン



アクティブスキャン



一般的な無線LANの接続手順に従う

接続する固定局IDが事前にわからないため、パッシブスキャンを利用する

図 3.3-5 : 接続手順

3.3.3. 対象とする周波数帯

本節で検討した無線通信プロトコルの手順は、現在普及しているスマートフォンに TDOA 測位プロトコルをインストールすることで実現できる。2.4GHz 帯及び 5GHz 帯のいずれも利用可能であり、無線通信プロトコルの観点からは、周波数帯を限定するものではない。また、スマートフォンに限らず、無線 LAN 規格を備えたデバイスを備えることで、車両及び歩行者のいずれも測位が可能である。ただし、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯は、周波数特性が異なるため、測位のシミュレーションや実機評価の結果を踏まえて、技術的条件を決める。

3.4. プロトコル案のまとめ

本章の検討結果を基にプロトコル案を表 3.4-1 にまとめる。

表 3.4-1：プロトコル案のまとめ

項目	仕様	備考
物理層、データリンク層	IEEE 802.11g/a	
ネットワーク層、トランスポート層	TCP/IP (UDP)	任意のポート番号を利用
ネットワーク構成	インフラストラクチャ・モード	
アクセス制御方式	CSMA/CA (DCF)	
変調方式	OFDM	
参入の接続手順	パッシブスキャン	
フレームフォーマット	IEEE802.11 及び TCP/IP に従ったフレーム	
フレームタイプ	測位フレーム、測位結果フレーム、受信時刻フレーム、時刻同期フレーム	
通信頻度	100ms 周期以下	一定周期
測位方式 (測距方式)	TDOA 方式	
固定局の設置台数	4 台以上	
測位プロトコルを実装する階層	アプリケーション層	
フレームの検出法	RSSI による閾値判定及びフレームのプリアンブルを利用した相互相関処理	

3.5. 無線通信及び測位のプロトコル検討のまとめ

本章では、高精度位置推定システムの方式について検討した。本システムのプロトコルとして、測位を行う上でのデータのやり取りに関する無線通信プロトコルと、測位の計算処理及び手順に関する測位プロトコルを規定した。

具体的には、一般に入手可能なスマートフォンでの実現を検討し、無線通信プロトコルとして IEEE 802.11 及び TCP/IP によるデータ通信を用いた測位手順を規定した。TCP/IP プロトコルのアプリケーションの一つとして、本システムの TDOA 測位プロトコルを TCP/IP プロトコルの上位であるアプリケーション層に実装するプロトコルスタックとした。

測位プロトコルとして、スマートフォンへの負担が少なく、現行のものでも実現できる TDOA 方式を採用した。また、高精度でフレームの先頭時刻を検出するために、RSSI による閾値判定に加え、フレームのプリアンブル部を利用した、相互相関処理を実装する。

本システムが利用する周波数帯は、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯のいずれも利用可能であり、無線通信プロトコルの観点からは、周波数帯を限定するものではない。ただし、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯は、周波数特性が異なるため、測位のシミュレーションや実機評価の結果を踏まえて、技術的条件を決める。

4. 高精度位置推定システムの性能調査（計算機シミュレーションによる性能評価）

本章では、計算機シミュレーションを用い、対象ユースケースの要件である大規模及び小規模交差点の測位対象エリアの90%の場所に対して水平測位精度が10cm以下となる技術的条件を明らかにする。

まず4.1節では、AWGNモデルにおける測位精度の理論式とシミュレーションの性能評価結果を示す。

続いて4.2節では、路面反射モデルにおける性能改善のための対策技術の検討を行い、その効果の評価結果を示す。それらの評価結果をもとに、大規模及び小規模交差点における技術的条件、特に固定局の設置条件を整理する。

さらに4.3節では、次年度の本格検討に先立ち、実環境におけるマルチパスの影響を考慮した評価を行い、上記モデルとの測位精度のギャップを把握する。

加えて4.4節では、既存のWi-Fiスポットを固定局として利用する場合の測位精度を確認する。

最後に4.5節では、本章のまとめを示す。

4.1. AWGNモデルにおける性能評価

本節では、AWGNモデル、すなわち直接波のみが受信される環境を想定した場合の測位誤差に関して、理論式及びシミュレーション評価により、前章にて検討した高精度位置推定システムの測距及び測位性能評価を行う。評価手順は下記の5つである。

1. 理論式を用いた目標測距誤差の確認
 2. 測距誤差特性の評価
 3. 回線設計による理論上の測位誤差の確認
 4. 測位アルゴリズムを用いた測位誤差の確認
 5. 固定局の設置位置、設置台数を変えた場合の測位誤差の確認
1. では、測位誤差を示す理論式を示し、次にユースケースの測位対象エリア（横断歩道）に対して水平測位精度10cmを満足するために必要となる測距誤差を明らかにする。2. では、受信電力に対する測距誤差のシミュレーション値を明らかにする。3. では、測位対象エリアに対して、DOPと回線設計上の受信電力から求まる測距誤差から測位誤差の理論値を明らかにする。4. では、測位アルゴリズムを使用して測位を行った場合の測位誤差を明らかにする。加えて、5. では、固定局の設置位置、設置台数を変えた場合の測位誤差の特徴について明らかにする。

4.1.1. 理論式を用いた目標測距誤差の確認

本項では理論式を用い、目標となる測位精度を満足させるために必要となる測距誤差を明らかにする。

測位誤差 σ_p は、DOPと測距誤差 σ_d の掛算となり、次式で示される。

$$\sigma_p = \text{DOP} \times \sigma_d$$

ここで、DOPは固定局の設置位置と、移動局の位置によって一意に決まる無次元の値であり、小さいほど測位精度が良好になりやすい場所であることを意味している。測位誤差を10cm以下にするため、例えば、DOPが10の位置に対しては測距誤差1cm以下が必要となる。また、DOPが5の位置に対しては、測距誤差2cm以下が必要となる。例に示した特徴を考慮し、大型交差点における測位対象エリアのDOPの特徴を把握した後、必要となる測距誤差を明らかにする。

表 4.1-1 に、大規模交差点における固定局配置の座標を示す。固定局の位置は図 2.5-2 に示すように横断歩道の外側の輪郭線上に配置される。この固定局配置を大規模交差点における「基準」の配置とする。

表 4.1-1：大規模交差点における固定局の基準の配置

固定局番号	X [m]	Y [m]	Z [m]
#1	22	15	3.5
#2	-15	22	5
#3	-22	-15	3.5
#4	15	-22	5

図 4.1-1 に、上記固定局配置の場合の大規模交差点モデルにおける水平方向の DOP (HDOP) のカラーマップを示す。青枠で囲まれた領域が測位対象エリア (横断歩道) である。緑色の丸が固定局の位置である。HDOP が 1 以下となる場所は白色とし、10 を超える場所は黒色にしている。図 4.1-1 より、交差点の中央は HDOP が高く、中央から離れると HDOP が低下する。

また、同図より、測位対象となる横断歩道では半分以上の領域で HDOP が 5 以下となる。したがって、大規模交差点の横断歩道で測位誤差を 10cm 以下にするために、少なくとも測距誤差を 2cm 以下にする必要がある。

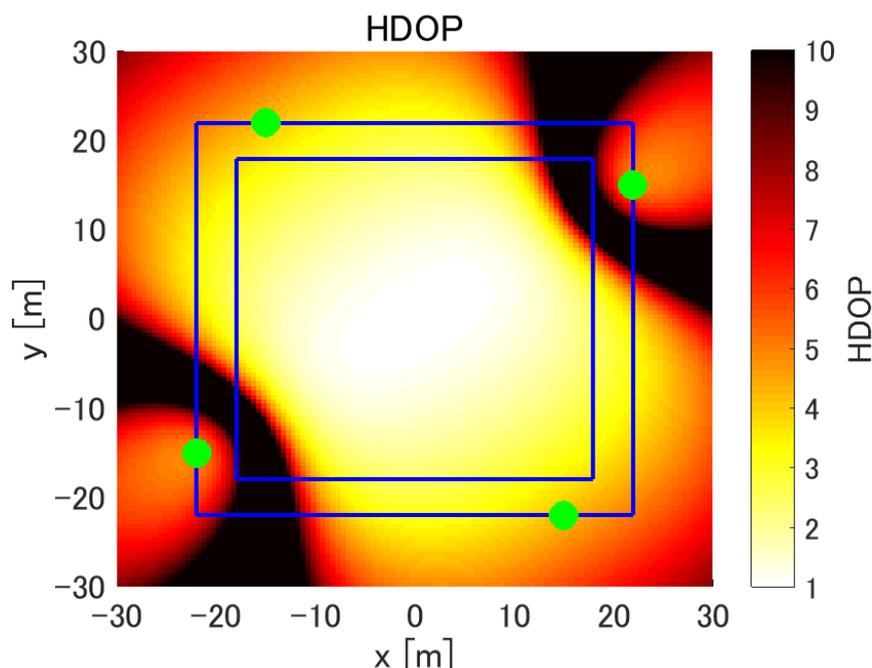


図 4.1-1：大規模交差点における HDOP のカラーマップ

表 4.1-2 に、小規模交差点における固定局配置の座標を示す。大規模交差点と同様、固定局の位置は横断歩道の外側の輪郭線上に配置される。この固定局配置を小規模交差点における「基準」の配置とする。

表 4.1-2：小規模交差点における固定局の基準の配置

固定局番号	X [m]	Y [m]	Z [m]
#1	6	3	3.5
#2	-3	6	5
#3	-6	-3	3.5
#4	3	-6	5

図 4.1-2 に、小規模交差点モデルにおける HDOP のカラーマップを示す。青枠で囲まれた領域が測位対象エリア（横断歩道）である。図 4.1-1 の大規模交差点と同様に、交差点の中央は HDOP が高く、中央から離れると HDOP が低下し、測位対象となる横断歩道では半分以上の領域で HDOP が 5 以下となる。したがって、小規模交差点でも横断歩道の測位誤差を 10cm 以下にするために、少なくとも測距誤差を 2cm 以下にする必要がある。

上記結果を踏まえて、以下の回線設計では、横断歩道の全ての領域で測距誤差が 2cm 以下となるよう設計を行う。さらに、小規模交差点は大規模交差点よりもスケールが小さく、固定局における受信電力は大規模交差点よりも高くなるので、厳しい条件である大規模交差点で回線設計を行うものとする。

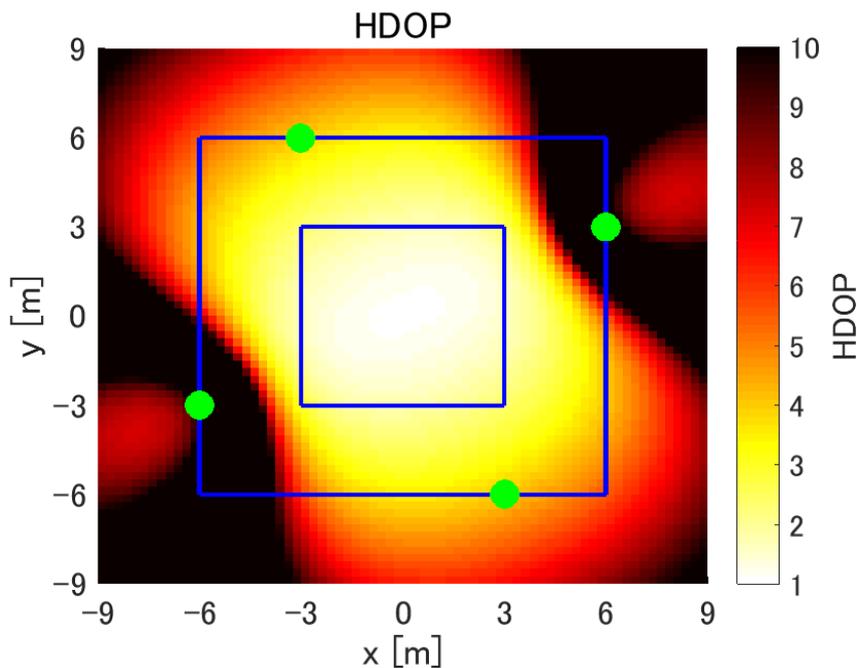


図 4.1-2：小規模交差点における HDOP のカラーマップ

4.1.2. 測距誤差特性の評価

受信電力に対する測距誤差特性は、IEEE802.11g/a のフレーム先頭で送信されたプリアンブル部の受信信号波形と既知の信号波形との相互相関計算によって得られる。図 4.1-3 に、受信電力に対する測距誤差特性を示す。伝搬路は AWGN モデルとし、サンプリング速度 1Gsps、1.8Gsps、5Gsps における特性をプロットしている。同図より、サンプリング速度を高くすることで測距誤差が小さくなる。例えば、回線設計における目標となる測距誤差 2cm に対して、サンプリング速度を 1Gsps から 5Gsps に上げることで、受信電力として約 5dB の改善効果がある（1Gsps 及び 5Gsps の場合、それぞれ -76dBm 及び -81dBm で、2cm 以下の測距誤差となる）。

高精度位置推定を行う上でサンプリング速度の高速化は重要な技術であることが、本評価より確認できる。

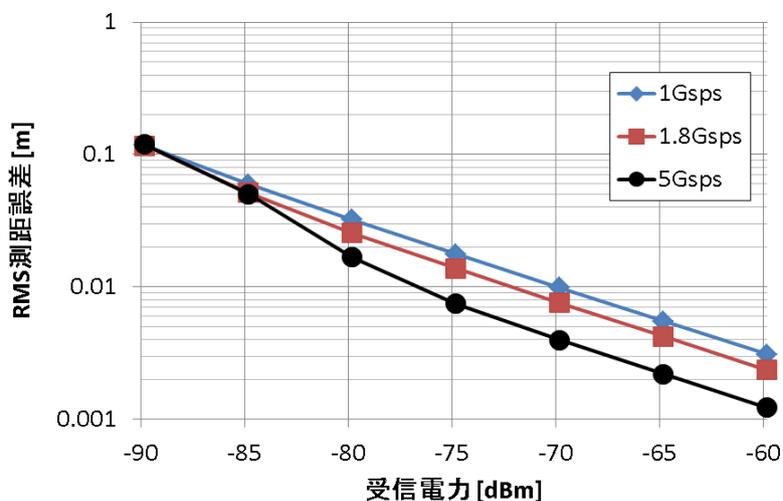


図 4.1-3 : 受信電力に対する測距誤差

4.1.3. 回線設計による理論上の測位誤差の確認

回線設計では、まず、固定局と移動局間の距離が最大となる場合の最小受信電力を見積もる。その後、最小受信電力に対する測距誤差を確認し、その値が 2cm 以下であれば問題ないと判断する。表 4.1-3 に、回線設計に用いたパラメータを示す。同表より、2.4GHz 帯の IEEE802.11g と 5GHz 帯の IEEE802.11a のシステムでの回線設計を行った。電波伝搬における減衰は次式で示される自由空間損失 L_p [dB] とした。ここで、 f_c は搬送周波数 [MHz]、 d は伝送距離 [km] である。

$$L_p [\text{dB}] = 32.44 + 20 \log_{10}(f_c [\text{MHz}]) + 20 \log_{10}(d [\text{km}])$$

また、人体による遮蔽の影響を考慮し、移動局からの送信信号が全ての固定局に対して 16dB 減衰して受信されるものとしている。一般に、人体遮蔽の影響は一部の固定局の受信電力の低下となるが、本検討では厳しく減衰を与えている。

表 4.1-3 : 回線設計用パラメータ

無線局	パラメータ	数値等	備考
共通	中心周波数	2.437GHz 5.600GHz	802.11g の 6ch 802.11a の 120ch
	電波伝搬	自由空間損失	
移動局	高さ	0m	最小値
	空中線電力	12dBm	汎用品を参照
	アンテナ利得	0dBi	汎用品を参照
	信号帯域幅	20MHz	
	人体減衰	16dB@2.4GHz 帯 19dB@5.6GHz 帯	人体遮蔽に関する論文を参照
固定局	高さ	7m	最大値
	アンテナ利得	2dBi	ダイポール
	雑音電力密度	-173.9dBm/Hz	気温 25 度
	雑音指数	4dB	汎用品を参照
	雑音帯域幅	60MHz	片側 30MHz

送受信間の距離が最大となる一例として、固定局が座標 (22, 15, 7) にいる場合と、移動局が座標 (-22, -22, 0) を想定する。この時、3次元距離は 57.9m、水平距離は 57.5m となる。この場合の回線設計上の受信電力は-77.4dBm@2.437GHz、-87.7dBm@5.6GHz となる。これらの情報から測距誤差を次に見積もる。

図 4.1-3 に示した前項の測距誤差特性より、サンプリング速度を 5Gsps とした場合に測距誤差を 2cm 以下にするために必要な受信電力は-81dBm 以上である。

したがって、回線設計上、2.4GHz 帯の信号の最小受信電力は-77.4dBm となるため、2cm 以下の測距誤差を達成できる。

一方、5GHz 帯の信号の最小受信電力は-87.7dBm であり、その場合の測距誤差は図 4.1-3 から 9cm となるため、所要の HDOP が 1.1 以下となる。そのため、5GHz 帯の信号を用いて大規模交差点で目標となる測位精度を満足することは困難と考える。

次に、サンプリング速度が 5Gsps の場合の測位誤差の理論値を確認する。図 4.1-4 に、大規模交差点における水平測位誤差の理論値のカラーマップを示す。周波数は 2.4GHz である。同図より、大規模交差点における横断歩道の大部分で測位誤差が 10cm 以下となる。なお、交差点では横断歩道の内側の方が良好な水平誤差となる。図 4.1-5 に、大規模交差点における垂直測位誤差の理論値のカラーマップを示す。同図より、大部分の横断歩道では垂直誤差が 1m 以下となる。

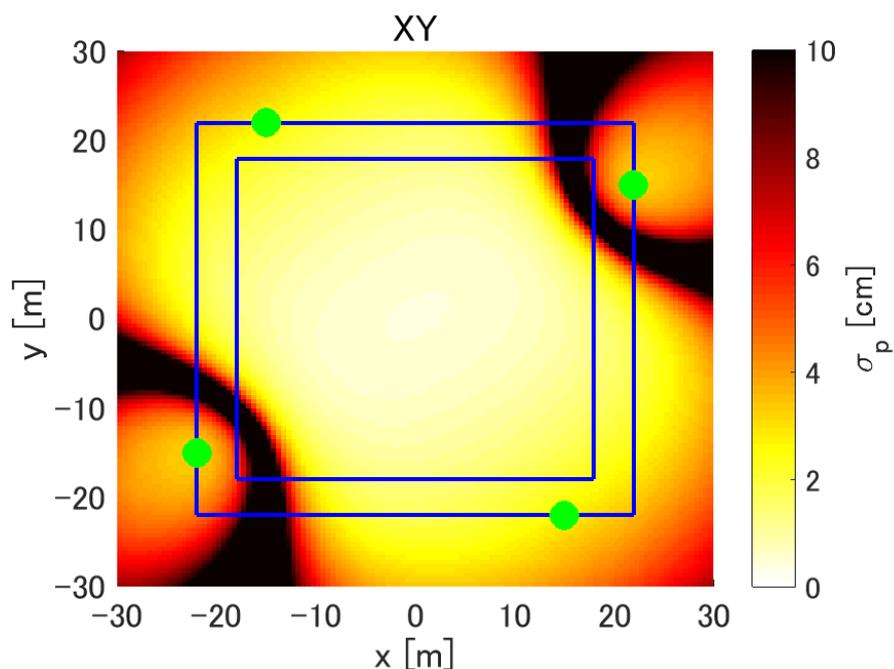


図 4.1-4：大規模交差点における水平測位誤差の理論値のカラーマップ

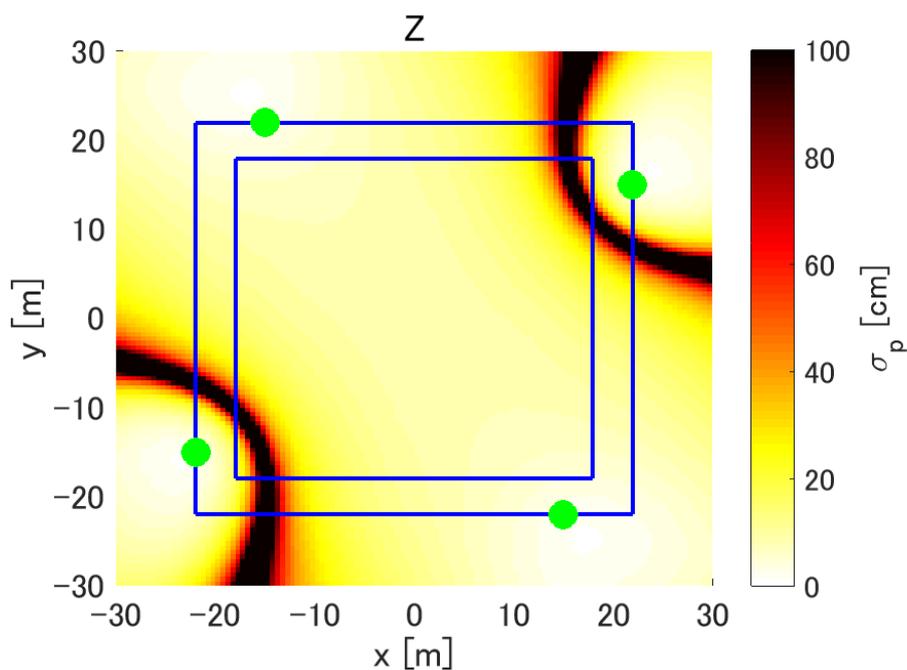


図 4.1-5：大規模交差点における垂直測位誤差の理論値のカラーマップ

表 4.1-4 に、大規模交差点における測距誤差の理論値の統計データを示す。同表より、サンプリング速度が 5Gsp/s の場合、90%以上の場所で水平測位誤差が 10cm 以下となる。誤差の累積分布の 90%値は 8.1cm となり、95%値も 15cm の測位誤差となる。なお、垂直誤差は 95%の場所で 1m 以下となる。従って、理論的には 5Gsp/s では、目標となる水平測位精度を満足する。一方、1.8Gsp/s、1Gsp/s では、水平測位誤差が 10cm 以下となる場所率が 90%未満となる。従って、サンプリング速度の高速化は目標となる水平測位精度を満足するために必要な条件であり、5Gsp/s は適切な設定値である。

表 4.1-4 : 大規模交差点における測位誤差の理論値

サンプル リング 速度	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
		<10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
5.0Gsp/s	91%	8.1cm	15cm	75cm	95%	45cm	85cm	4.3m
1.8Gsp/s	83%	15cm	29cm	1.4m	91%	83cm	1.6m	8.1m
1.0Gsp/s	76%	20cm	37cm	1.8m	89%	1.1m	2.0m	11m

次に、小規模交差点における測位誤差の理論値を示す。小規模交差点は大規模交差点よりもスケールが小さいため、2.4GHz帯だけでなく、5GHz帯における特性も確認する。図4.1-6に、2.4GHz帯を使用した場合の小規模交差点における水平測位誤差の理論値を示す。サンプリング速度は5Gsp/sである。同図より、小規模交差点における大部分の横断歩道で水平測位誤差が10cm以下となる。交差点で横断歩道の内側の方が良好な水平誤差になる。図4.1-7に、2.4GHz帯を使用した場合の小規模交差点における垂直測位誤差の理論値のカラーマップを示す。サンプリング速度は5Gsp/sである。同図より、大部分の横断歩道で垂直測位誤差が1m以下となる。

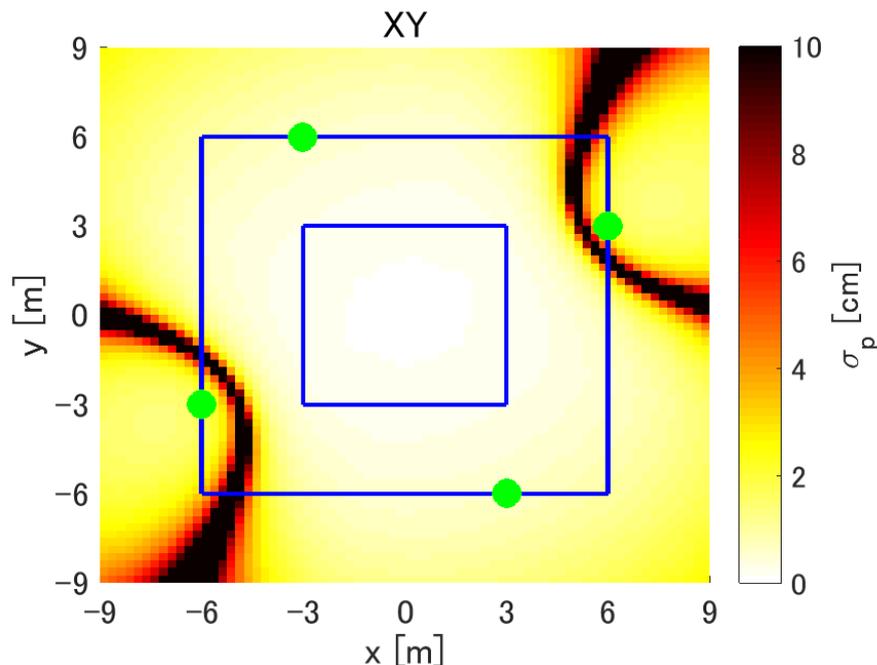


図 4.1-6 : 2.4GHz帯を使用した場合の小規模交差点における水平測位誤差の理論値のカラーマップ

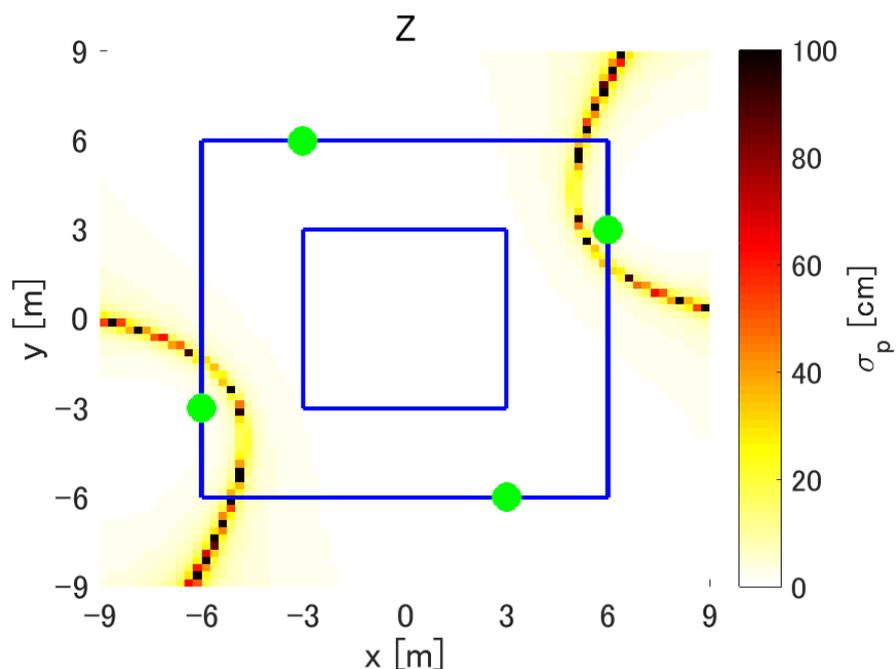


図 4.1-7 : 2.4GHz 帯を使用した場合の小規模交差点における垂直測位誤差の理論値のカラーマップ

図 4.1-8 に、5GHz 帯を使用した場合の小規模交差点における水平測位誤差の理論値のカラーマップを示す。サンプリング速度は 5Gsps である。同図より、小規模交差点における大部分の横断歩道で測位誤差が 10cm 以下となる。図 4.1-9 に、5GHz 帯を使用した場合の小規模交差点における垂直測位誤差の理論値を示す。サンプリング速度は 5Gsps である。同図より、大部分の横断歩道で垂直測位誤差が 1m 以下となる。小規模交差点では、2.4GHz 帯だけでなく、5GHz 帯でも垂直測位誤差が 1m 以下となる。

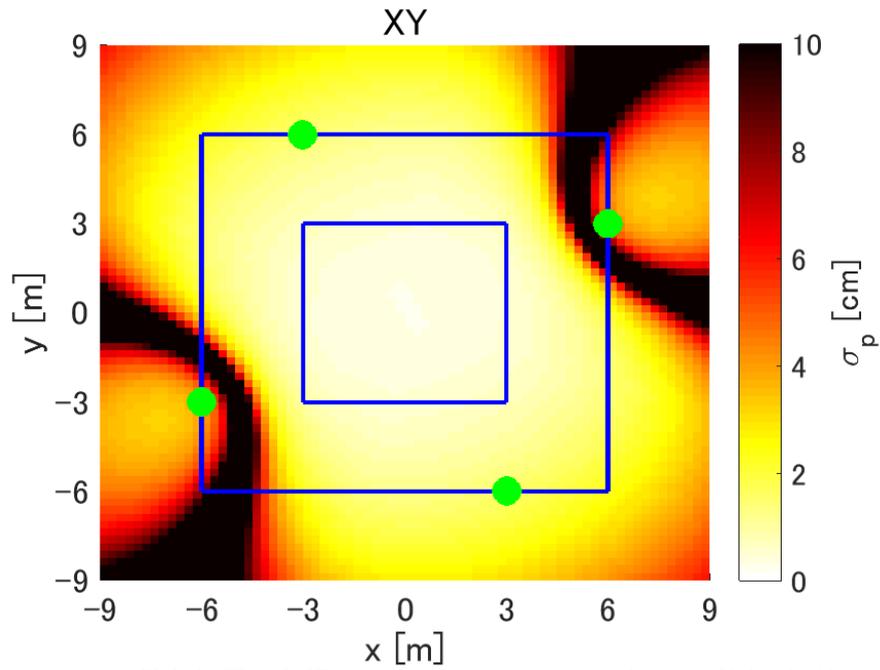


図 4.1-8 : 5GHz 帯を使用した場合の小規模交差点における水平測位誤差の理論値のカラーマップ

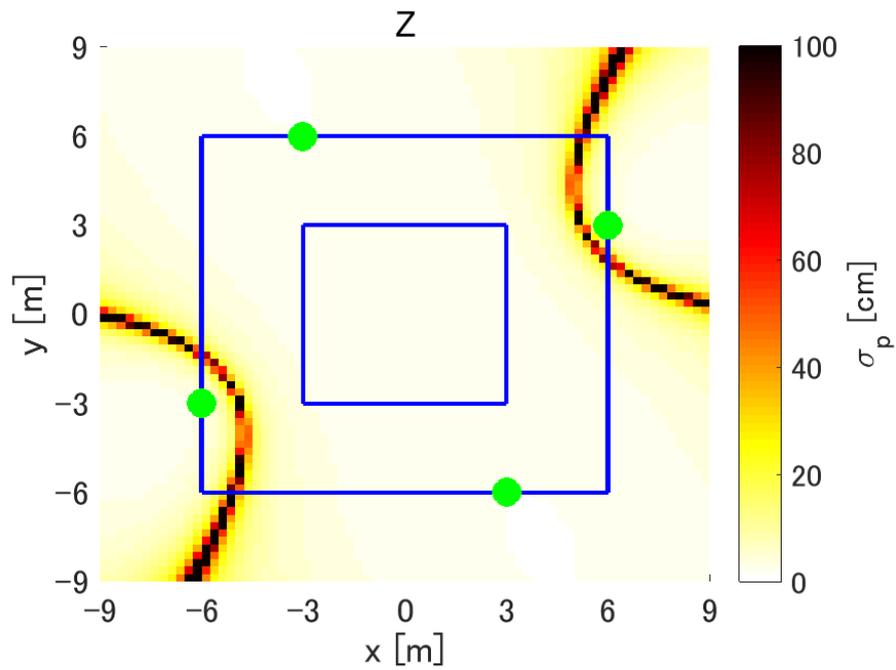


図 4.1-9 : 5GHz 帯を使用した場合の小規模交差点における垂直測位誤差の理論値のカラーマップ

表 4.1-5 に、小規模交差点における測距誤差の理論値の統計データを示す。同表より、サンプリング速度が 5Gspss の場合、2.4GHz 帯、5GHz 帯ともに 90%以上の場所で水平測位誤差が 10cm 以下となる。また、2.4GHz 帯、5GHz 帯ともに垂直測位誤差は 99%の場所で 1m 以下となる。従って、理論的には目標となる水平測位精度を満足する。なお、サンプリング速度が 1.8Gspss、1Gspss では、同一受信電力でも 5Gspss より測距精度が大きくなるため、水平測位精度 10cm 以下の場所率が低下し、5GHz 帯における 90%値が 10cm よりも大きくなる。

従って、小規模交差点では、2.4GHz 帯だけでなく 5GHz 帯で目標となる水平測位精度を満足させるために、5Gspss のサンプリング速度が適切な設定値であると考えられる。

表 4.1-5：小規模交差点における測位誤差の理論値

周波数帯	サンプリング速度	水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
			<10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
2.4GHz	5.0Gspss	97%	2.7cm	5.1cm	20cm	99%	4.2cm	8.1cm	34cm
	1.8Gspss	95%	5.2cm	9.7cm	37cm	99%	7.9cm	15cm	64cm
	1.0Gspss	93%	6.9cm	13cm	50cm	99%	11cm	20cm	86cm
5GHz	5.0Gspss	93%	6.5cm	12cm	47cm	99%	10cm	19cm	81cm
	1.8Gspss	88%	12cm	23cm	87cm	98%	19cm	36cm	1.5m
	1.0Gspss	85%	16cm	30cm	1.2m	97%	25cm	47cm	2.0m

以上の理論式を用いた評価により、大規模交差点と小規模交差点の横断歩道で測位誤差を目標値以下に低減可能である。本システムの測位方式として、固定局で得られた距離差データを用いる TDOA 方式を 3.2.1 項で選定している。次項では、TDOA 方式における測位アルゴリズムの説明と、アルゴリズムを用いた測位誤差の評価を行う。

4.1.4. 測位アルゴリズムを用いた測位誤差の確認

TDOA 方式では、3 つ以上の距離差データに対して測位アルゴリズムを用いることで 3 次元の測位が可能となる。本検討では、測位アルゴリズムとして Bancroft 法を採用した(文献[S. Bancroft, “An Algebraic Solution of the GPS Equations,” IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-21, no.1, Jan.1985.])。Bancroft 法は、3 元 2 次の連立方程式を 1 回の手順で解くことで移動局の位置を算出するアルゴリズムである。より具体的に、固定局の位置データと測定した距離差データをアルゴリズムの計算式に入力し、2 次方程式を解くことで測位解を算出する。

図 4.1-10 に、大規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差の CDF (累積分布関数)を示す。周波数帯は 2.4GHz である。同図では、AWGN モデルにおける横断歩道での定点測位における測位誤差を累積分布化した。サンプリング速度は 5Gspss とした。図 4.1-10 より、水平方向の測位誤差 10cm 以下となる場所率は 90%を超える。また、垂直方向の測位誤差が 1m 以下となる場所率も 90%を超える。これらの結果より、目標となる測位精度を達成できていることがわかる。

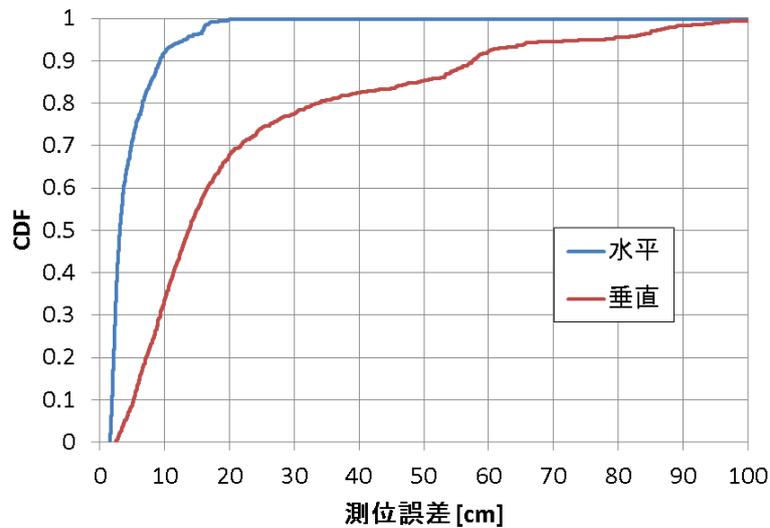


図 4.1-10：大規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差の CDF

図 4.1-11 に、2.4GHz 帯を使用した場合の小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差の CDF を示す。同図では、AWGN モデルにおける横断歩道での定点測位における測位誤差を累積分布化した。水平方向の測位誤差 10cm 以下となる場所率は 90%以上となる。また、垂直方向の測位誤差が 1m 以下となる場所率も 90%以上となる。これらの結果より、目標となる測位精度を達成できていることがわかる。

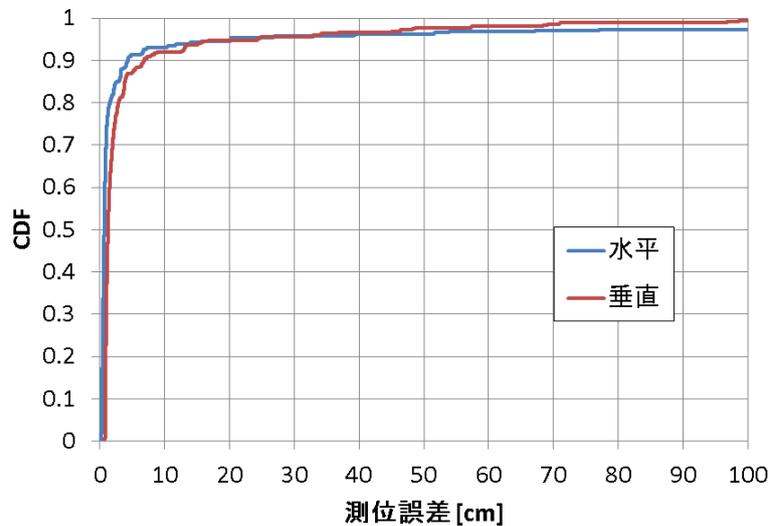


図 4.1-11：2.4GHz 帯を使用した場合の小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差の CDF

図 4.1-12 に、5GHz 帯を使用した場合の小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差の CDF を示す。同図より、水平方向の測位誤差 10cm 以下となる場所率は 90%となる。また、垂直方向の測位誤差が 1m 以下となる場所率も 90%を超えている。これらの結果より、5GHz 帯においても目標となる測位精度を達成できていることがわかる。

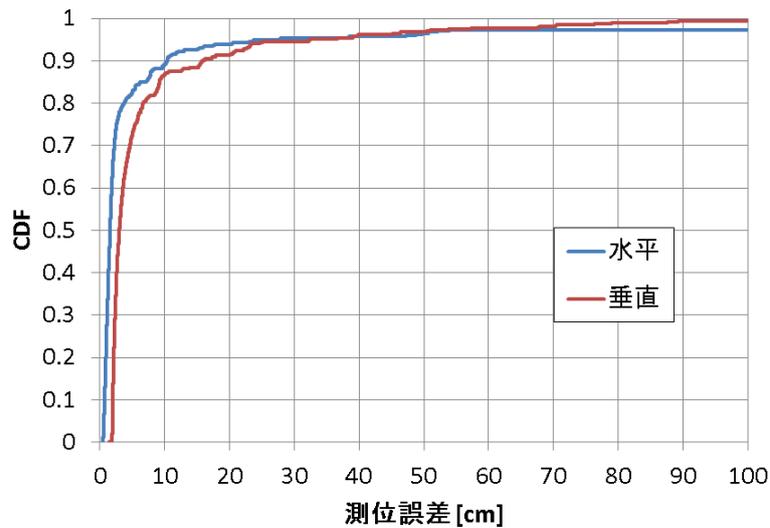


図 4.1-12：5GHz 帯を使用した場合の小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差の CDF

表 4.1-6 に、大規模交差点と小規模交差点の AWGN モデルにおける定点での測位誤差のシミュレーション値を示す。図 4.1-10 から図 4.1-12 の CDF 特性を数値化したものである。同表より、大規模交差点と小規模交差点における水平方向の測位誤差 10cm 以下となる場所率は 90%以上となる。また、垂直方向の測位誤差が 1m 以下となる場所率も 90%以上となる。

また、2.4GHz 帯であれば、大規模交差点及び小規模交差点ともに目標となる水平測位精度を達成するが、5GHz 帯の場合、小規模交差点のみ目標となる水平精度を達成する。

表 4.1-6：大規模交差点と小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差のシミュレーション値

交差点	周波数帯	水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
			<10 cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
大規模	2.4GHz	92%	9.2cm	13cm	17cm	99%	57cm	76cm	94cm
小規模	2.4GHz	93%	4.3cm	20cm	10m	99%	6.8cm	24cm	71cm
	5GHz	90%	10cm	24cm	10m	99%	16cm	32cm	79cm

4.1.5. 固定局の設置位置、設置台数を変えた場合の測位誤差の確認

本項では、固定局の設置位置、設置台数を変えた場合の測位誤差の傾向について説明する。固定局の設置位置、設置台数を変えることで、横断歩道における DOP が変わり、測位誤差も変わる。従って、電波伝搬モデルを AWGN モデルから別のモデルに変えた際に現状の固定局配置で目標の測位精度を満足しない場合、固定局の設置位置、設置台数を適切に変えることで、目標値を満足可能になると考える。本項の評価では、ユースケースを大規模交差点とし、周波数帯は 2.4GHz 帯とする。

(1) 固定局のアンテナの高さを変えた場合

固定局の設置位置に関して、アンテナの高さを高くする場合、垂直方向のスケールが大きくなるため、水平方向の改善を期待できる。表 4.1-7 に、アンテナの高さを変えた場合

の大規模交差点における固定局配置を示す。#2 及び#4 の固定局の高さ (Z 軸) を 5m から 6.5m に変更した (表内の網掛け部の数値)。図 4.1-13 と図 4.1-14 に、大型交差点における固定局アンテナの高さを 5m から 6.5m にした場合の水平測位誤差理論値と垂直測位誤差理論値のカラーマップを示す。図 4.1-13 と図 4.1-14 のカラーマップを見ると、図 4.1-4 と図 4.1-5 における基準のアンテナ位置の場合のカラーマップと比較して、測位精度が向上することがわかる。アンテナの高さを変えた場合の設置条件を「条件 A」とする。

表 4.1-7 : アンテナの高さを変えた場合の大規模交差点における固定局配置 (条件 A)

固定局番号	X [m]	Y [m]	Z [m]
#1	22	15	3.5
#2	-15	22	6.5
#3	-22	-15	3.5
#4	15	-22	6.5

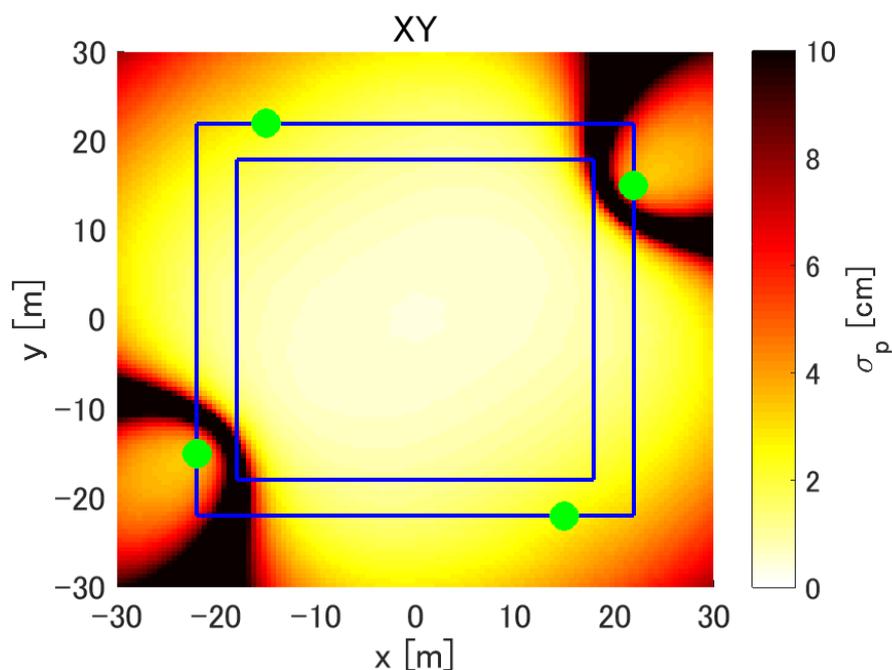


図 4.1-13 : アンテナの高さを変えた場合の大規模交差点における水平測位誤差理論値のカラーマップ

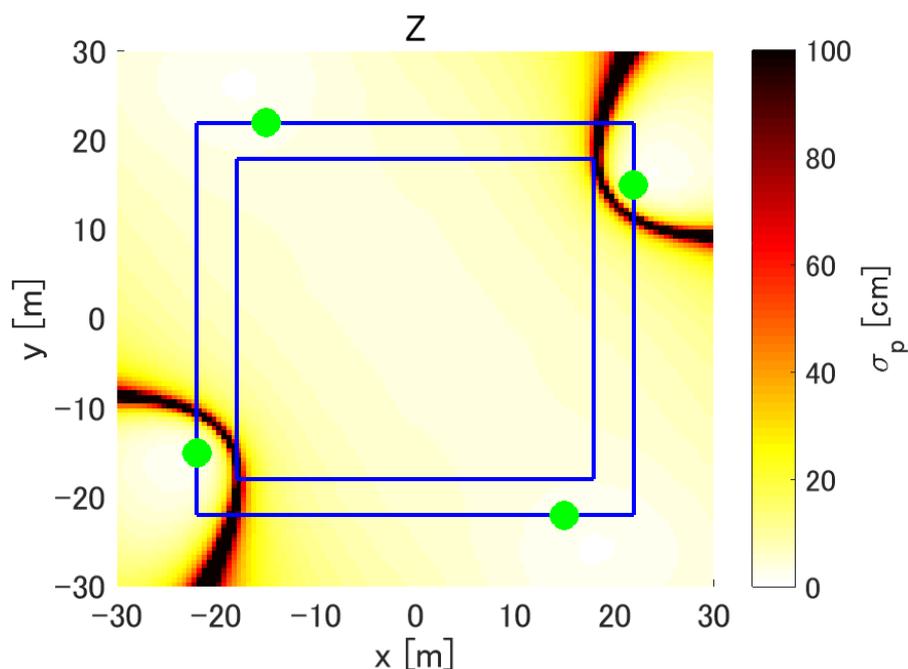


図 4.1-14 : アンテナの高さを変えた場合の大規模交差点における垂直測位誤差理論値のカラーマップ

(2) 固定局の配置を水平方向に拡大した場合

固定局の設置位置に関して、4 台の内 2 台 (#1、#3) の X 軸の位置を拡大することで、水平測位精度を改善させることが可能である。表 4.1-8 に、固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における固定局配置を示す。具体的には、#1 の固定局の X 軸を 22m から 29m とし、#3 の固定局の X 軸を -22m から -29m とした (表内の網掛け部の数値)。固定局の水平位置の一部を変えた場合の設置条件を「条件 B」とする。図 4.1-15 と図 4.1-16 に、固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における水平測位誤差と垂直測位誤差の理論値のカラーマップ特性を示す。これらの図より、基準の固定局配置の場合と比較して、#1 と #3 周辺の測位誤差の大きい領域が横断歩道の外側になり、測位誤差の場所率の改善を期待できる。

表 4.1-8 : 固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における固定局配置 (条件 B)

固定局番号	X [m]	Y [m]	Z [m]
#1	29	15	3.5
#2	-15	22	5
#3	-29	-15	3.5
#4	15	-22	5

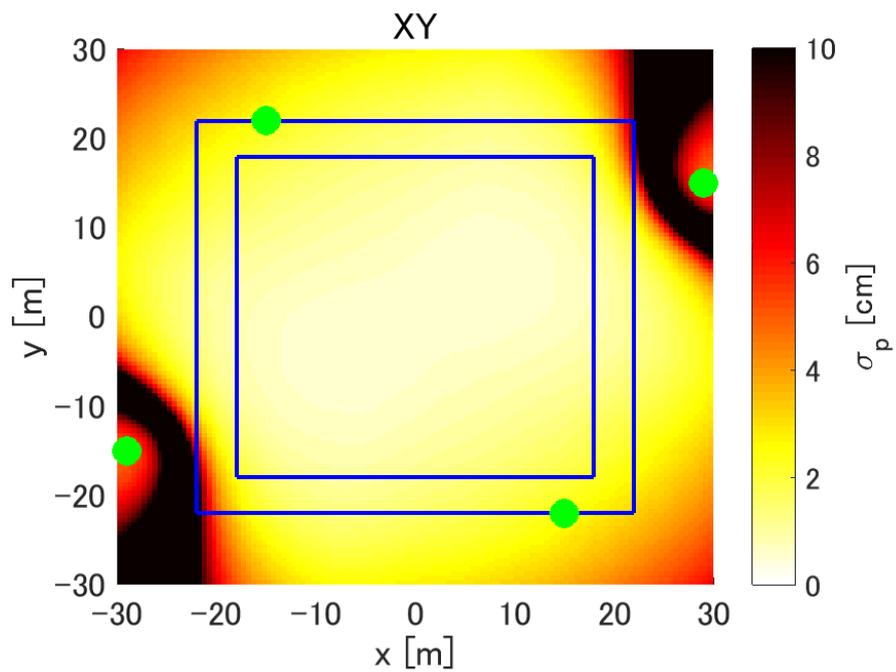


図 4.1-15 : 固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における水平測位誤差理論値のカラーマップ

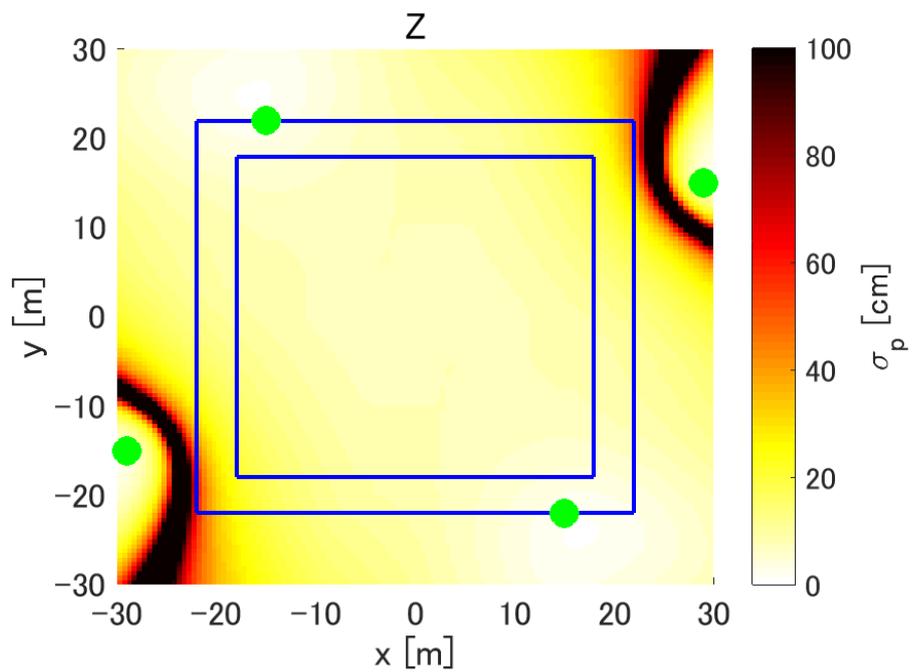


図 4.1-16 : 固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における垂直測位誤差理論値のカラーマップ

(3) 固定局の台数を増やした場合

固定局の設置台数を4台から5台にすることで、水平測位精度と垂直測位精度の改善が可能である。表 4.1-9 に、固定局の台数を5台にした場合の大規模交差点における固定局配置を示す。具体的には、#4の固定局と同じ水平位置に対してアンテナの高さが3.5mとなる固定局#5を追加した。固定局の台数を変えた場合の設置条件を「条件C」とする。図 4.1-17 と図 4.1-18 に、固定局の台数を5台にした場合の大規模交差点における水平測位誤差と垂直測位誤差の理論値のカラーマップを示す。これらの図より、固定局台数を5台にすることで、台数が4台の場合と比較してカラーマップ形状が変わり、横断歩道における測位精度の改善を期待できる。

表 4.1-9：固定局の台数を5台にした場合の大規模交差点における固定局配置（条件C）

固定局番号	X [m]	Y [m]	Z [m]
#1	22	15	3.5
#2	-15	22	5
#3	-22	-15	3.5
#4	15	-22	5
#5	15	-22	3.5

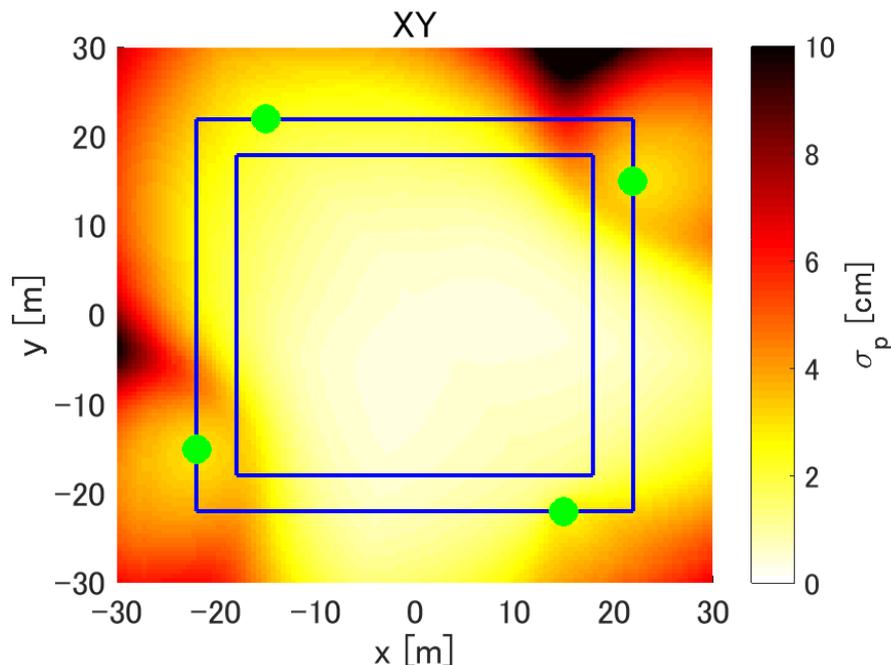


図 4.1-17：固定局の台数を5台に変えた場合の大規模交差点における水平測位誤差理論値のカラーマップ

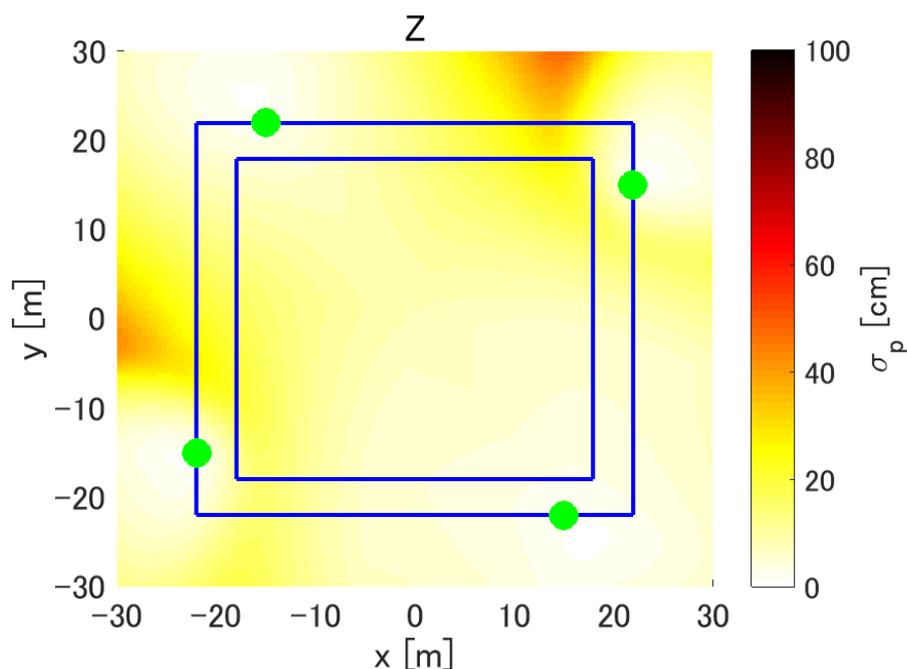


図 4.1-18：固定局の台数を 5 台に変えた場合の大規模交差点における垂直測位誤差理論値のカラーマップ

表 4.1-10 に、大規模交差点における設置条件毎の測位誤差の理論値を示す。同表より、一部の固定局のアンテナ高を高くする場合でも、水平位置を拡大しても、固定局の台数を増やしても、90%以上の場所率に対して目標となる測位精度を達成できる。水平誤差の 90% 値を見ると、水平位置を拡大する条件 B が最も良好な測位精度となる。

表 4.1-10：大規模交差点における設置条件毎の測位誤差の理論値

設置条件		水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
名称	変更内容	<10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
基準	無し	91%	8.1cm	15cm	74cm	95%	45cm	85cm	4.4m
条件 A	アンテナ高	93%	7.0cm	15cm	92cm	97%	23cm	43cm	2.7m
条件 B	水平位置	100%	2.8cm	3.8cm	7.6cm	100%	23cm	30cm	46cm
条件 C	台数増加	100%	3.7cm	4.4cm	5.6cm	100%	21cm	24cm	29cm

表 4.1-11 に、大規模交差点における設置条件毎の測位誤差のシミュレーション値を示す。表 4.1-10 で示した理論値のデータと傾向は一致しており、全ての設置条件で 90%以上の場所率に対して目標となる測位精度を達成できる。水平誤差の 90% 値を見ると、水平位置を拡大する条件 B が最も良好となる。

表 4.1-11：大規模交差点における設置条件毎の測位誤差のシミュレーション値

設置条件		水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
名称	変更内容	<10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
基準	無し	92%	9.2cm	13cm	17cm	99%	57cm	76cm	94cm
条件 A	アンテナ高	90%	10cm	16cm	49cm	97%	38cm	58cm	1.3m
条件 B	水平位置	95%	4.1cm	8.3cm	15cm	99%	37cm	53cm	80cm
条件 C	台数増加	94%	8cm	11cm	17cm	98%	49cm	61cm	1.0m

表 4.1-12 に、アンテナ設置位置、設置台数に対する測位精度への影響のまとめを示す。同表より、一部の固定局の水平位置を拡大する場合、水平方向、垂直方向ともに最も改善する。従って、同表は目標となる測位精度を達成するために設置条件を変更する際の指標として利用する。なお、3つの条件の中で条件 C に関しては、設置台数が増えることによるコスト増大が課題となる。

表 4.1-12：アンテナ設置位置、設置台数に対する測位精度への影響のまとめ

設置条件		水平方向の誤差への影響	垂直方向の誤差への影響
名称	変更内容の詳細		
条件 A	一部の固定局のアンテナの高さを高くする。	90%値で影響が小さい。	90%値、95%値で性能が改善する。
条件 B	一部の固定局の位置を拡大する。	性能が改善する。	性能が改善する。
条件 C	固定局の台数を増やす。	性能が改善する。	90%値、95%値で性能が改善する。

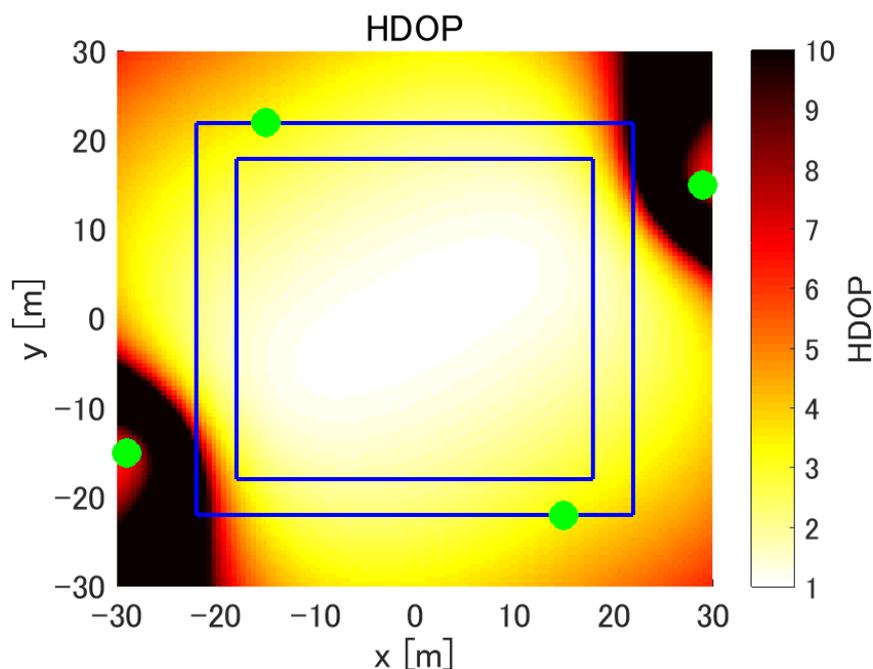


図 4.1-19：固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における HDOP のカラーマップ

以下、条件 B に関して、HDOP の観点から測位性能の改善度合いを確認する。

図 4.1-19 に、固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における HDOP のカラーマップを示す。図 4.1-1 における基準の固定局配置の場合と比較して、測位対象エリアの HDOP が 10 以上となる場所が大幅に減少する。

表 4.1-13 に、固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における HDOP の統計値を示す。同表より、条件 B では、HDOP が 3 以下となる割合が基準よりも 50% 上昇している。また、93% の場所の HDOP が 5 以下となり、90% 値では 4.0 となる。したがって、HDOP の観点から見ても、固定局の水平位置の一部を変えることは、測位精度改善に対して効果的な手段となる。

表 4.1-13: 固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における HDOP の統計値

設置条件		場所率			累積分布値		
名称	変更内容	3 以下	5 以下	10 以下	90%	95%	99%
基準	無し	21%	68%	86%	13	25	126
条件 B	水平位置	71%	93%	98%	4.0	6.0	11

4.2. 路面反射モデルにおける性能評価

前節では、AWGN モデルにおける測位誤差等の評価を理論式及びシミュレーションにより行った。しかしながら、周辺に建物等が無いオープンな環境であっても、AWGN モデルとは異なり、大地（路面）から反射の影響によって測位性能は劣化する。本節では、直接波以外の遅延波として路面反射波の影響を加味した場合の対象ユースケースにおける測位誤差を評価する。

まず、想定環境における電波伝搬モデルについて検討する。次に、直接波以外の遅延波が発生するマルチパスモデルにおける性能評価を行い、AWGN モデルとの性能ギャップを把握する。

さらに、上記ギャップを低減するための測距誤差低減対策として伝搬路推定技術及び測距誤差と測位誤差低減対策としての平均化処理について検討し、それらの効果をシミュレーションにより評価する。

4.2.1. 電波伝搬モデル

電波伝搬モデルとしては大きく 3 つ、AWGN モデル、路面反射モデル、マルチパスモデルに分類される。

1 つめは AWGN モデルであり、固定局で直接波のみが受信される理想的な電波伝搬環境である。4.1 節で示したとおり、回線設計時において基本的な測位精度を確認する際に、AWGN モデルでシミュレーション評価を行う。

2 つめは路面反射モデル（2 パスモデル）であり、このモデルでは、直接波だけでなく、路面からの反射波も固定局で受信される。表 4.2-1 に、路面反射モデルにおける遅延距離と相対電力の設定値を示す。最小遅延距離は 0.16m であり、この値は移動局の位置座標が (-22, -22, 1.3)、固定局の位置座標が (22, 15, 3.5) の場合の値となる。最大遅延距離は 2.6m であり、この値は移動局の高さを 1.3m とし、移動局が固定局の真下にいる場合の値である。図 4.2-1 に、路面反射のパスモデルを示す。直接波に対して路面反射波の相対電力を 6dB 減衰させる。周辺に建物などの反射物が無いオープンな環境の場合、路面反射モデルを用いた測位精度を評価すればよい。

表 4.2-1：路面反射モデルの設定値

パス番号	遅延距離	相対電力
1	0m	0dB
2	0.16~2.6m	-6dB

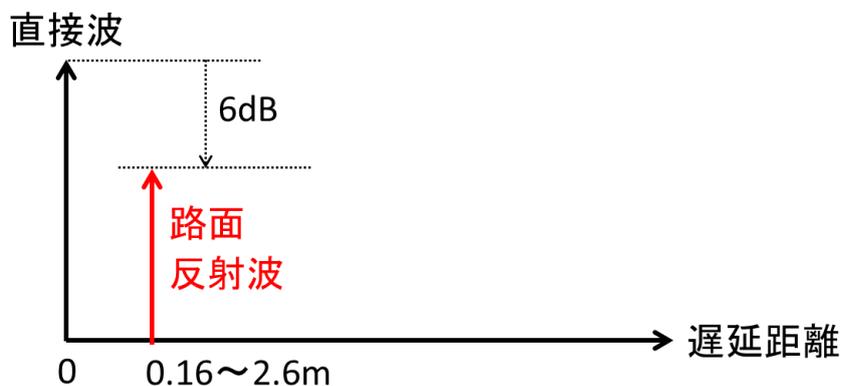


図 4.2-1：路面反射のパスモデル

3 つめはマルチパスモデル（3 パスモデル）であり、このモデルでは、直接波と路面反射波に加えて、周辺の建物等からの反射波が受信される。表 4.2-2 に、マルチパスモデルにおける遅延距離と相対電力の設定値を示す。今回想定した 3 番目のパスは直接波に対して相対電力を 12dB 減衰させたものである。このパスは文献の銀座 LOS 環境のマルチパスモデルにおける 3 番目の波から引用した値である（文献[岩井, 伊庭, 後藤, “5.8GHz 帯における路車・車車間通信環境の伝搬特性,” 信学技報 ITS2011-5, May 2011.]）。遅延時間は 100nsec であるため距離に換算すると 30m となる。このマルチパスモデルは、銀座のビル

街の中で2台の車両上に設置した送受信アンテナ間を見通しの状態として取得された電波伝搬データに対して統計処理を行い、モデル化されたものである。

表 4.2-2 : マルチパスモデルの設定値

パス番号	遅延距離	相対電力
1	0m	0dB
2	0.16~2.6m	-6dB
3	30m	-12dB

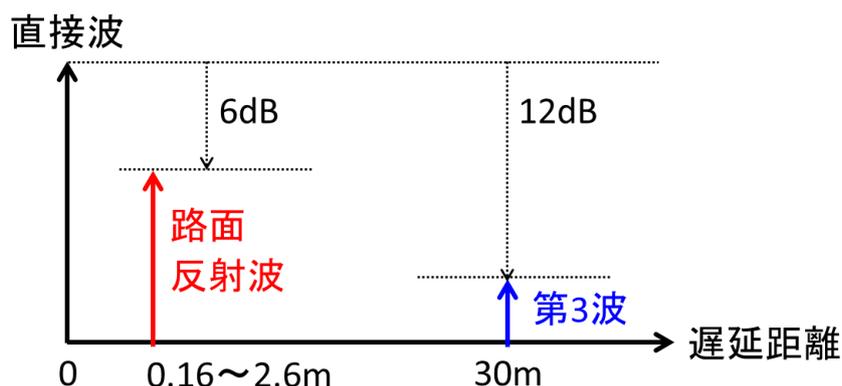


図 4.2-2 : マルチパスモデル

4.2.2. 伝搬路推定方式

2波以上のパスが存在する電波伝搬環境では、遅延波の影響によって相互相関波形のピークが歪む。図 4.2-3 と図 4.2-4 に、直接波と路面反射波が同相、逆相で合成された場合の相互相関波形（シミュレーション値）を示す。青色の実線が直接波であり、黒色の点線が遅延波であり、赤色の点線が直接波と遅延波との合成波である。

図 4.2-3 では、直接波と路面反射波が同相で合成されているため、直接波よりも合成波の方が、相関ピーク値が高くなる。ピークの位置は正の方向に遅延する。

一方、図 4.2-4 では、直接波と路面反射波が逆相で合成されているため、直接波よりも合成波の方が、相関ピーク値が低くなる。図 4.2-3 と異なり、ピークの位置は負の方向に遅延する。

以上のように、路面反射波の影響で相関ピークの位置が変化することで測距誤差が大きくなる。測距誤差の大きいデータを用いて測位アルゴリズムを使用すると測位誤差が大きくなる。従って、固定局で受信された際の相互相関波形となる合成波から本来の直接波の相関ピークの位置を推定し、測距誤差を低減する必要がある。

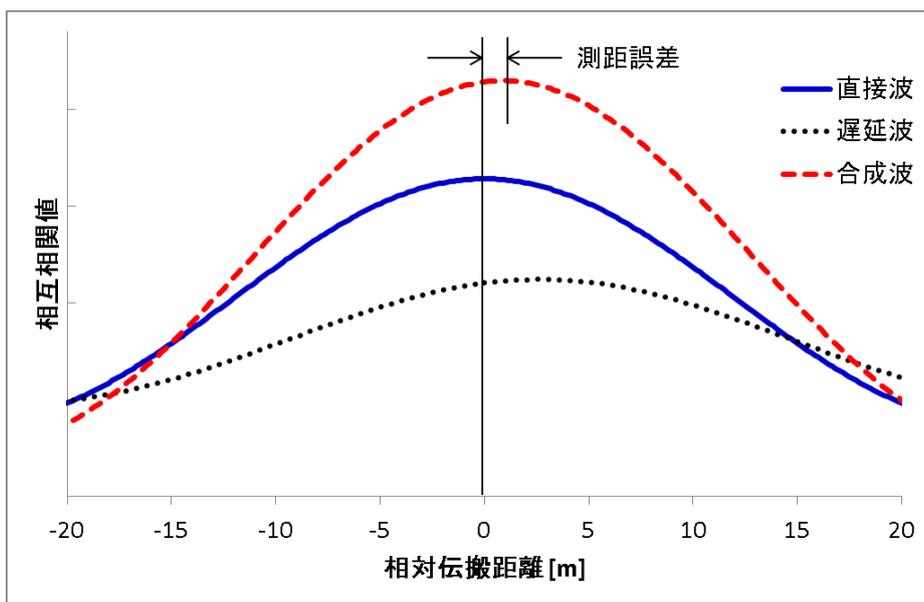


図 4.2-3 : 直接波と路面反射波が同相に加算された場合の合成波

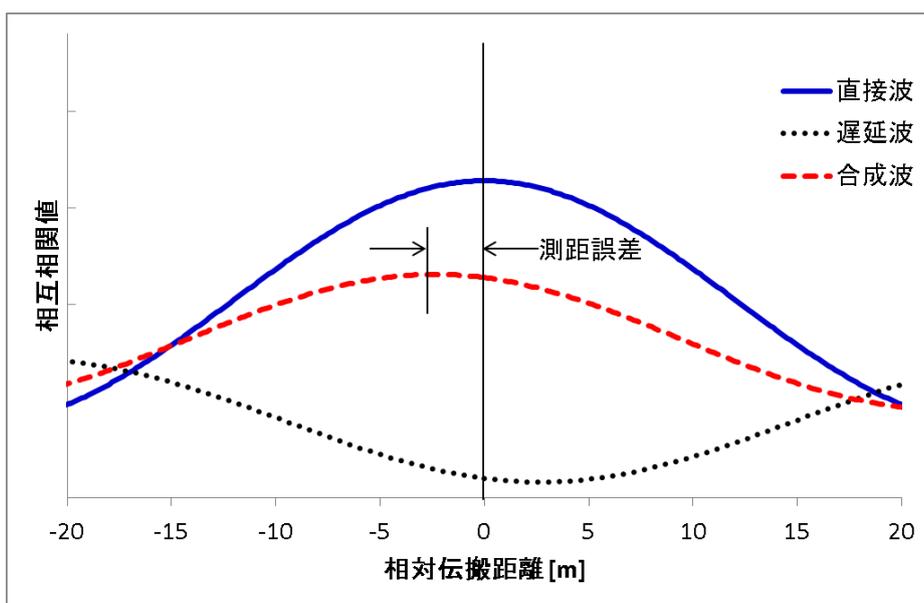


図 4.2-4 : 直接波と路面反射波が逆相に加算された場合の合成波

直接波の相関ピークの位置を推定する方法として、振幅、位相、遅延の3パラメータを与えたレプリカとなる直接波と遅延波を用意し、合成したレプリカの相互相関波形と受信した相互相関波形との最小二乗誤差を計算することで直接波の相関ピークを推定する伝搬路推定方式が挙げられる。2パスモデルの場合に推定するパラメータは、直接波の振幅 A_1 、位相 ϕ_1 、遅延 τ_1 と、遅延波の振幅 A_2 、位相 ϕ_2 、遅延 τ_2 との6つのパラメータとなる。6つのパラメータに対し、総当たりの組み合わせで次式に示す二乗誤差 Γ の計算をすると、長い計算時間を要することになる。

$$\Gamma = \int_{-T/2}^{T/2} [x(t) - A_1 \cos \phi_1 m(t - \tau_1) - A_2 \cos \phi_2 m(t - \tau_2)]^2 dt + \int_{-T/2}^{T/2} [y(t) - A_1 \sin \phi_1 m(t - \tau_1) - A_2 \sin \phi_2 m(t - \tau_2)]^2 dt$$

ここで、 $x(t)$ は受信した相互相関波形（複素数）の実数部であり、 $y(t)$ は受信した相互相関波形（複素数）の虚数部であり、 $m(t)$ は既知のプリアンブル信号から生成した相互相関波形（実数）である。積分区間は相互相関波形の推定ピークの位置を $t=0$ とした $\pm T/2$ の範囲としている。本検討では、 τ_1 と τ_2 の 2 つのパラメータの組み合わせの集合を用意し、直接波のピーク位置を推定する（文献[Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, and Angus P. Andrews, “Global Positioning Systems, inertial Navigation, and Integration, 2nd Edition”, March 2007.]）。

図 4.2-5 に、伝搬路推定方式のフローを示す。2パスモデルの場合、まず、 τ_1 、 τ_2 の組み合わせ集合を用意する。組み合わせ集合から τ_1 、 τ_2 の組み合わせを 1 つ選択する。次に、 τ_1 、 τ_2 の組み合わせに対して、2元1次の連立方程式を解くことで、 A_1 、 A_2 、 ϕ_1 、 ϕ_2 が一意に決定される。 A_1 、 ϕ_1 、 τ_1 、 A_2 、 ϕ_2 、 τ_2 からレプリカ波形を生成し、受信された相互相関波形とレプリカ波形の差の二乗値を計算する（ Γ の計算）。異なる τ_1 、 τ_2 の組み合わせに対して同様の処理を行い、差の二乗値を求める。全ての τ_1 、 τ_2 の組み合わせに対する差の二乗値の計算が終わった後、差の二乗値が最も小さい τ_1 、 τ_2 の組み合わせを見つけることで、直接波の相関ピークの位置が推定される。

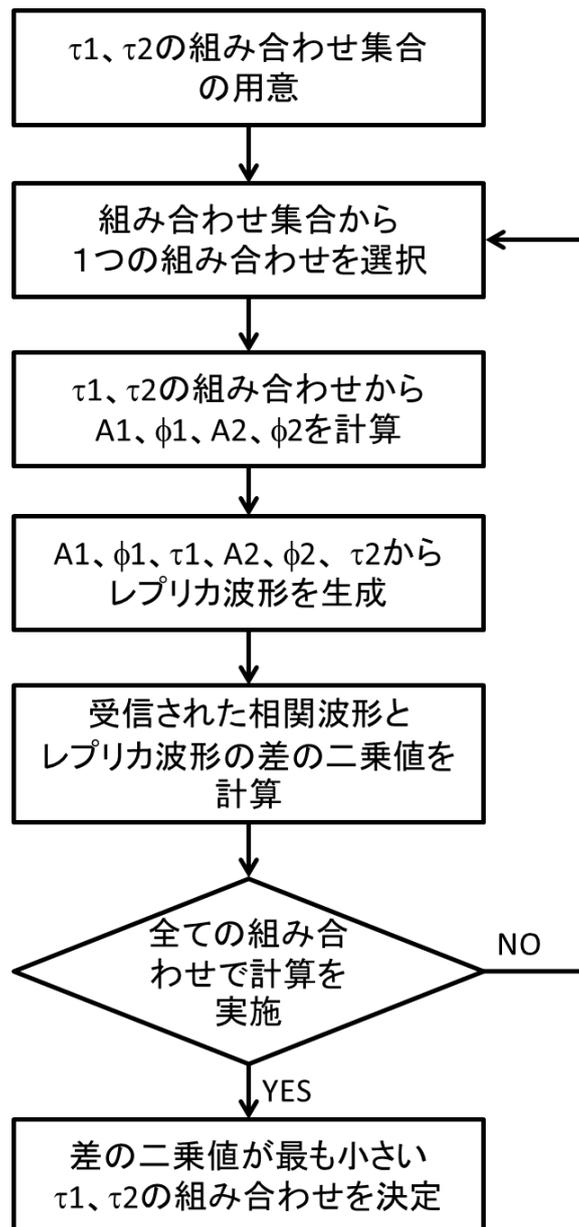


図 4.2-5：伝搬路推定方式のフロー

伝搬路推定方式の効果を確認するため、路面反射モデルにおける受信電力に対する RMS 測距誤差についてシミュレーション評価を実施した。図 4.2-6 に、伝搬路推定を行わない場合の路面反射モデルにおける RMS 測距誤差を示す。サンプリング速度は 5Gspss であり、表 4.2-2 で示した路面反射モデルを使用している。5Gspss において、3 サンプルの遅延である「0.18m」と、15 サンプルの遅延である「0.9m」と、44 サンプルの遅延である「2.6m」の特性を示している。「0.18m」は路面反射波の最小の伝搬遅延距離の特性であり、「2.6m」は路面反射波の最大の伝搬遅延距離の特性となる。なお路面反射波と直接波の位相差毎に測距誤差特性は異なるが、本特性は全ての位相差の測距誤差の結果から算出した RMS 測距誤差である。図 4.2-6 より、-75dBm よりも高い受信電力で、路面反射に対して対策を行わない場合、測距誤差特性が平坦になる。この理由として、受信電力が高くなることにより、相対的に相関ピークに含まれる雑音成分が低下するものの、遅延波による測距誤差が

低減されないことが挙げられる。受信電力-60dBm で、AWGN モデルの誤差特性よりも 1桁から 3桁程度大きい RMS 測距誤差となる。

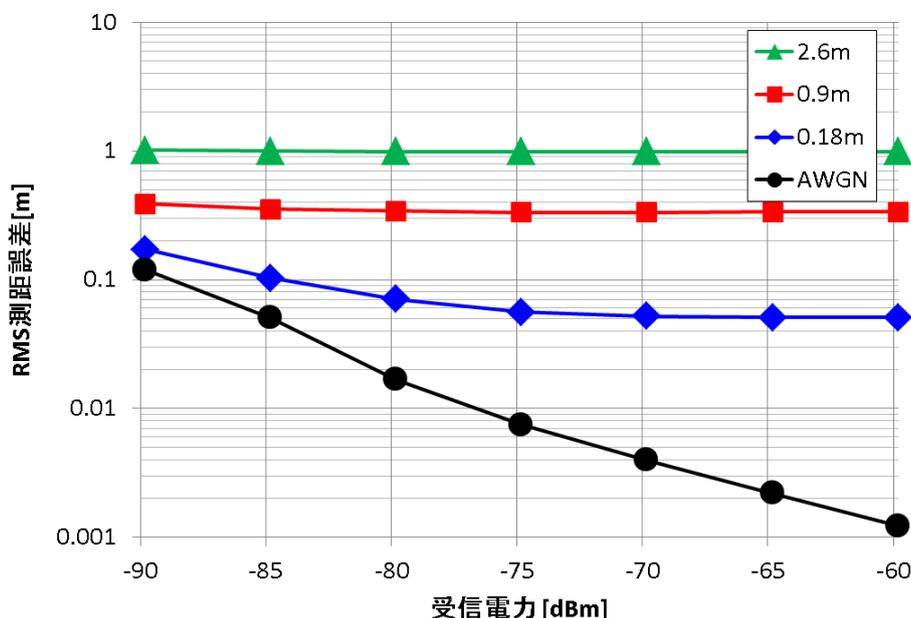


図 4.2-6 : 伝搬路推定を行わない場合の路面反射モデルにおける RMS 測距誤差

図 4.2-7 に、2 パスの伝搬路推定を行った場合の路面反射モデルにおける RMS 測距誤差を示す。同図では、受信電力の上昇とともに、相対的に相関ピークに含まれる雑音成分が低下することで伝搬推定精度が上昇し、直接波の推定位置が正確になる。そのため、図 4.2-6 とは異なり、受信電力に対して傾きのある RMS 測距誤差特性となる。AWGN モデルの特性に対して、1桁以内の精度劣化となる。

伝搬路推定を行うことによって測距誤差の低減が可能となるものの、AWGN モデルでの誤差特性と差が残る。この差を低減しなければ、大規模交差点、及び小規模交差点において目標とする水平測位精度を満足できないと考える。そこで追加となる路面反射対策について次項で説明する。

以上では 2 パスの伝搬路推定に関する説明を行った。L パスの場合、次式に従う二乗誤差 Γ の計算を全ての電波伝搬パラメータ ($A_k, \phi_k, \tau_k, k=1 \dots L$) の組み合わせに対して行い、最小 Γ となる τ_1 を算出すればよい。

$$\Gamma = \int_{-T/2}^{T/2} \left[x(t) - \sum_{k=1}^L A_k \cos \phi_k m(t - \tau_k) \right]^2 dt + \int_{-T/2}^{T/2} \left[y(t) - \sum_{k=1}^L A_k \sin \phi_k m(t - \tau_k) \right]^2 dt$$

上式に従って伝搬路推定を行うことで、3 パス以上の場合でも直接波の相関ピーク位置を推定し、測距誤差を低減可能となる。

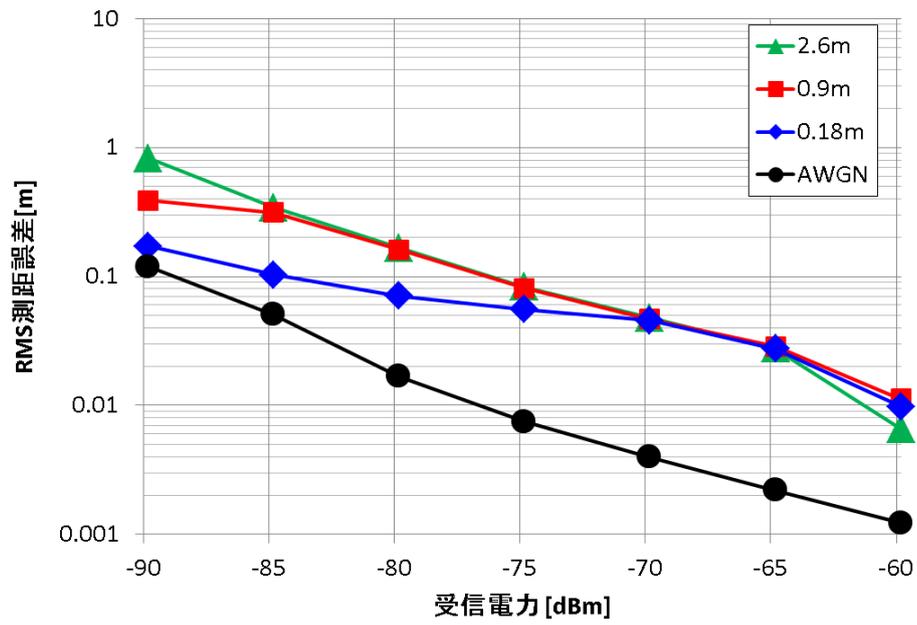


図 4.2-7 : 2 パスの伝搬路推定を行った場合の路面反射モデルにおける RMS 測距誤差

4.2.3. 測位手順

伝搬路推定方式によって測位誤差の低減が可能となるが、さらなる測位誤差の低減を行うために、平均化処理を行う。図 4.2-8 に、測位の平均化処理フローを示す。フレームの受信を行った際、伝搬路推定方式に基づいて直接波の相関ピークの位置を推定する。その後、今回得られた距離差データと過去の距離差データとの平均化を行う。3つ以上の平均化された距離差データを用いて3次元測位を行う。そして、今回得られた測位データと過去の測位データとの平均化を行う。

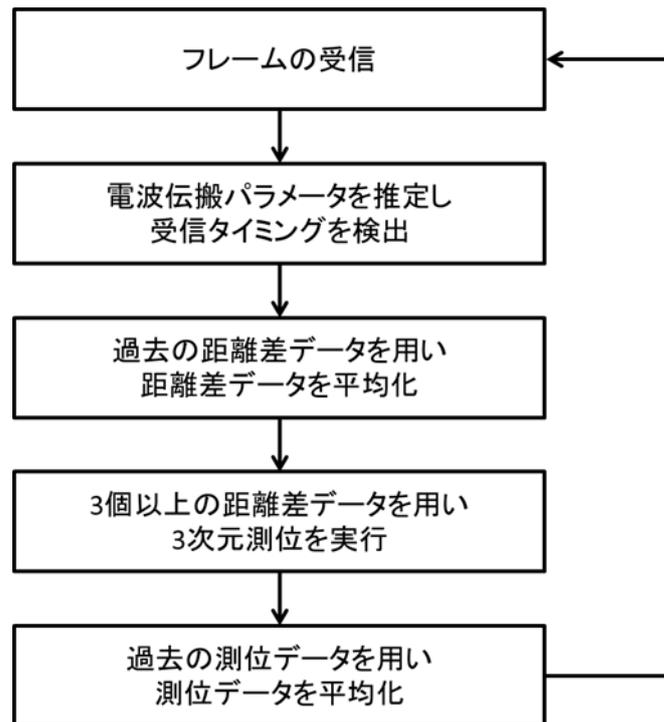


図 4.2-8 : 測位の平均化処理フロー

移動時の測位データの平均化では、測位位置が時間とともに変化するため、最小二乗法を用いた平均化を行う。図 4.2-9 に、移動時の測位の平均化処理について示す。同図では、時刻 n において過去 K 回分の測位データの平均化を行う場合の処理について記載している。同図より、時刻 n において測位アルゴリズムによって算出した測位解が 2 つある場合、時刻 $n-K$ から時刻 $n-1$ までの過去の K 回分の測位データから最小二乗法で推定される位置に近い方の測位解を選択する（測位解が 1 つの場合、このプロセスは実施しない）。そして、時刻 $n-(K-1)$ から時刻 $n-1$ までの過去の $(K-1)$ 回分の測位データと、選択された測位解を用いて最小二乗法で推定される測位位置を時刻 n での測位データとする。なお、この平均化処理は等速に移動している場合を想定しており、移動局に加速度がある場合や、横断歩道を渡り切った移動局が急に引き返す場合等は追加の対応が必要となる。

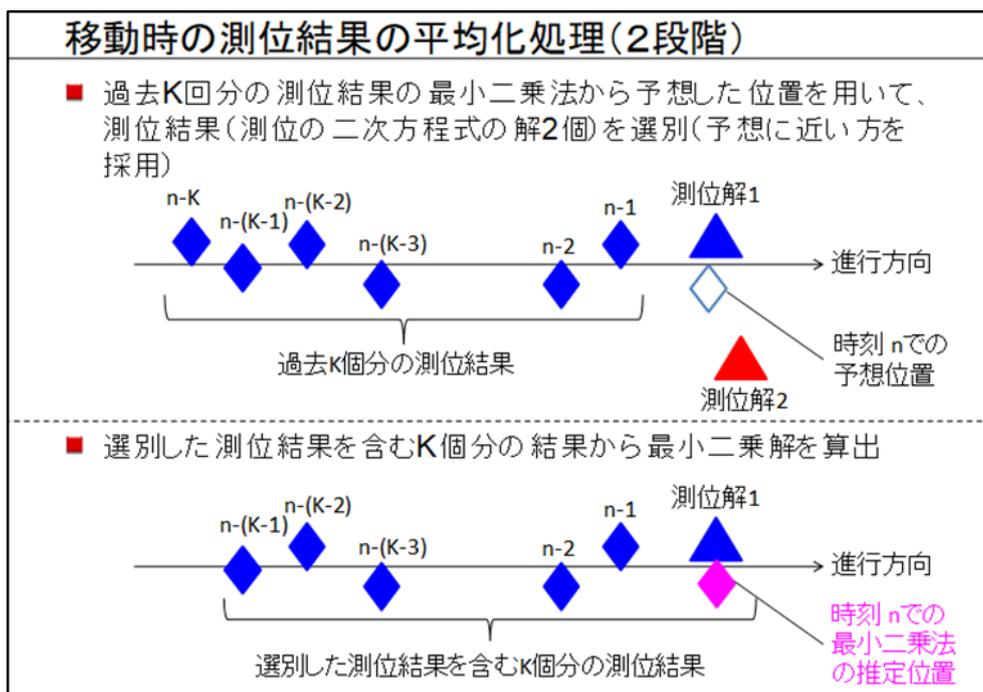


図 4.2-9 : 移動時の測位結果の平均化処理

4.2.4. シミュレーションパラメータ

表 4.2-3 に、シミュレーションパラメータを示す。同表より、周波数は 2.4GHz 帯を想定しており、直接波の電波伝搬は自由空間損失としている。移動局の高さは胸ポケット相当の 1.3m とし、人体による遮蔽の影響により移動局から送信された信号には全ての固定局に対して 16dB の減衰を与えている。移動測位における速度は 1.4m/sec の等速とした。フレームの送信頻度は 100msec 周期とした。

表 4.2-3 : シミュレーションパラメータ

無線局	パラメータ	数値等	備考
共通	中心周波数	2.437GHz	802.11g の 6ch
	電波伝搬 (直接波)	自由空間損失	
	ループ数	1000	1 測位点あたり
移動局	高さ	1.3m	
	空中線電力	12dBm	汎用品を参照
	アンテナ利得	0dBi	汎用品を参照
	信号帯域幅	20MHz	
	人体減衰	16dB@2.4GHz	人体遮蔽に関する論文を参照
	速度	1.4m/sec	移動測位の評価時
	送信頻度	100msec 周期	移動測位の評価時
固定局	アンテナ利得	2dBi	ダイポール
	雑音電力密度	-173.9dBm/Hz	気温 25 度
	雑音指数	4dB	汎用品を参照
	雑音帯域幅	60MHz	片側 30MHz

4.2.5. 測位対象エリア

交差点における測位対象エリアはシステム要件に従い横断歩道(図 4.2-10 及び図 4.2-11 の青色部分)とする。ただし、今後のエリア拡張等の参考として、横断歩道の外側(同図の緑色部分)、横断歩道の内側(同図の橙色部分)の評価結果も示す。

図 4.2-10 に大規模交差点における測位対象エリアを示す。22×22m の交差点において、青色の領域が横断歩道であり、横断歩道の道路幅は 4m となる。緑色の領域を横断歩道の外側と本評価では定義し、横断歩道の外側 3m 幅のエリアにおける測位精度を参考データとして評価する。また、橙色の領域を横断歩道の内側と本評価では定義し、横断歩道の内側 3m 幅のエリアにおける測位精度を参考データとして評価する。

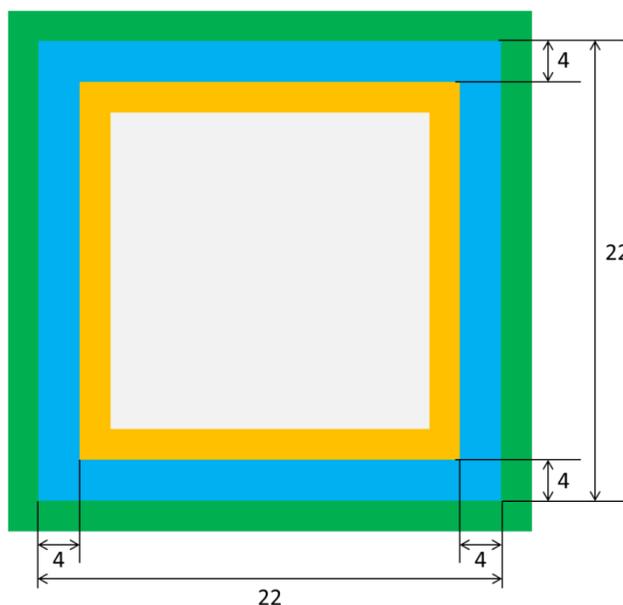


図 4.2-10：大規模交差点における測位対象エリア

図 4.2-11 に、小規模交差点における測位の評価エリアを示す。12×12m の交差点において、青色の領域が横断歩道であり、横断歩道の道路幅は 3m となる。

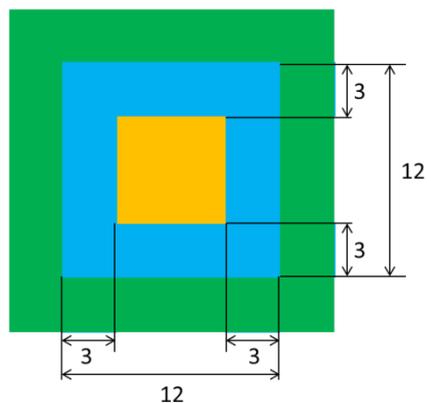


図 4.2-11：小規模交差点における測位対象エリア

以下に、AWGN モデル、及び伝搬路推定を行わない場合の路面反射モデルにおけるシミュレーション評価結果を示す。

4.2.6. AWGN モデルの評価結果

表 4.2-4 に、大規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差を示す。同表より、横断歩道の定点及び移動測位ともに場所率 90%以上で水平測位誤差 10cm 以下、垂直測位誤差 1m 以下となる。

表 4.2-4：大規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差

測位状態	測位対象エリア	水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
		< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
定点	横断歩道	92%	9.2cm	13cm	17cm	99%	57cm	76cm	94cm
	【参考】横断歩道外側	88%	11cm	15cm	21cm	99%	59cm	71cm	93cm
	【参考】横断歩道内側	95%	7.5cm	9.9cm	16cm	99%	55cm	63cm	97cm
移動	横断歩道	91%	9.4cm	15cm	41cm	96%	43cm	78cm	2.0m

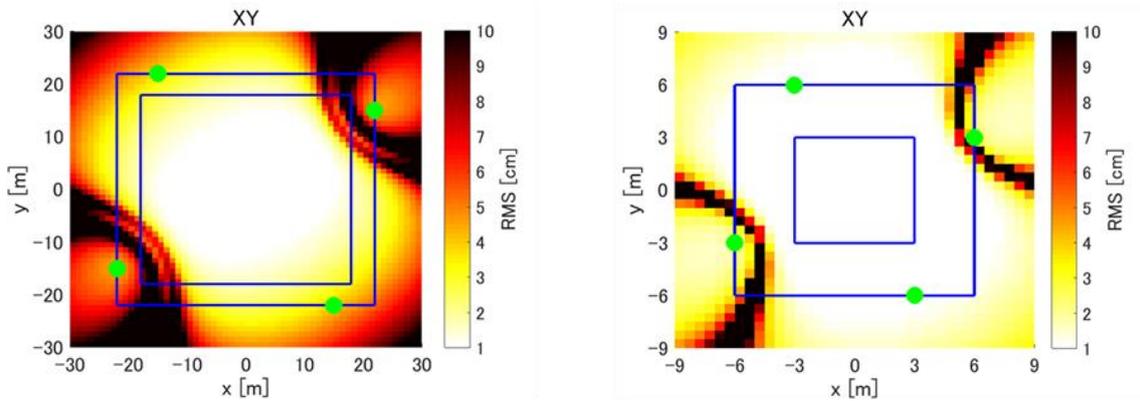
表 4.2-5 に、小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差を示す。同表より、横断歩道の定点及び移動測位ともに場所率 90%以上で水平測位誤差 10cm 以下、垂直測位誤差 1m 以下となる。

表 4.2-5 : 小規模交差点の AWGN モデルにおける測位誤差

測位状態	測位対象エリア	水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
			< 10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
定点	横断歩道	93%	4.3cm	20cm	10m	99%	6.8cm	24cm	71cm
	【参考】横断歩道外側	86%	31cm	1.8m	18m	94%	27cm	1.2m	3.3m
	【参考】横断歩道内側	95%	0.3cm	0.4cm	8.0m	98%	1.2cm	1.5cm	1.2m
移動	横断歩道	96%	2.9cm	6.6cm	33cm	99%	5.0cm	10cm	52cm

以上のように、AWGN モデルでは伝搬路推定及び平均化処理を行わなくても、定点測位、移動測位ともに場所率 90%以上で水平測位誤差 10cm 以下を達成する。

参考として、図 4.2-12 に、AWGN モデルにおける水平測位誤差のカラーマップを示す。青枠で囲まれた領域が横断歩道であり、緑色の丸は固定局の位置である。同図より、大規模交差点、小規模交差点ともに交差点中央の測位誤差は小さくなる。また、横断歩道外側の測位誤差は大きい。



(a) 大規模交差点

(b) 小規模交差点

図 4.2-12 : AWGN モデルにおける水平測位誤差のカラーマップ

4.2.7. 路面反射モデルの評価結果（対策無し）

表 4.2-6 に、路面反射モデルの測位対象エリアにおける定点測位での測位誤差を示す。伝搬路推定、平均化処理の対策を行わない場合の特性を示しており、路面反射波によって測距誤差が大きくなることで、10cm 以下となる場所率は大規模交差点、小規模交差点ともに 0%となる。

表 4.2-6：路面反射モデルの測位対象エリアにおける定点測位での測位誤差（対策無し）

交差点	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
		90%	95%	99%		<1m	90%	95%	99%
	< 10cm							
大規模	0%	7.1m	20m	24m	12%	13m	14m	15m
小規模	0%	6.6m	7.5m	9.3m	0%	5.6m	5.9m	6.5m

以上より、路面反射モデルに対して目標とする測位精度を満足するために、伝搬路推定、平均化処理の適用や、固定局の配置条件の見直し等の対策を検討する必要がある。

4.2.8. 路面反射への対策検討の条件

路面反射モデルにおいて、横断歩道の90%以上の場所に対して水平測位誤差10cm以下とするための対策検討を行う際の条件を示す。

表4.2-7に、路面反射モデルでの大規模交差点における対策検討の条件を示す。数値の網掛け部は、基準の固定局設置位置からの変更箇所である。同表より、固定局の設置条件は、測位対象エリアの外側7m以上離れた位置に固定局を4台以上設置し、移動局及びすべての固定局は見通しになるように配置する必要がある。また、アンテナ高は固定局で異なる高さで3.5m以上となる必要がある。

表 4.2-7：路面反射モデルでの大規模交差点における対策検討の条件

測位対象 エリア	固定局の設置位置				路面反射対策			備考
	番号	X [m]	Y [m]	Z [m]	伝搬路 推定	平均化回数		
						測距	測位	
横断歩道	#1	29	15	3.5	適用	5	25	#1と#3のX座標を7m拡大した。
	#2	-15	22	5				
	#3	-29	-15	3.5				
	#4	15	-22	5				

表4.2-8に、小規模交差点における対策検討の条件を示す。数値の網掛け部は、基準の固定局設置位置からの変更箇所である。同表より、固定局の設置条件は、測位対象エリアの外側3m以上離れた位置に固定局を4台以上設置し、移動局及びすべての固定局は見通しになるように配置する必要がある。また、アンテナ高は固定局で異なる高さで3.5m以上となる必要がある。

表 4.2-8：路面反射モデルでの小規模交差点における対策検討の条件

測位対象 エリア	固定局の設置位置				路面反射対策			備考
	番号	X [m]	Y [m]	Z [m]	伝搬路 推定	平均化回数		
						測距	測位	
横断歩道	#1	9	3	3.5	適用	5	25	#1と#3のX座標を3m拡大した。
	#2	-3	6	5				
	#3	-9	-3	3.5				
	#4	3	-6	5				

4.2.9. 路面反射モデルの評価結果（対策後）

表 4.2-9 に、対策検討の条件見直し後の大規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差を示す。同表より、横断歩道の定点及び移動測位ともに場所率 90%以上で水平測位誤差 10cm 以下、垂直測位誤差 1m 以下となる。表 4.2-6 で示した対策なし場合の特性結果と比較して、大幅に測位誤差を低減でき、大規模交差点における目標値を達成する。また、参考データとして、基準の固定局配置でも、伝搬路推定と平均化処理を実施することで、水平測位 10cm 以下の場所率が 93%となり、目標値を達成している。

表 4.2-9：大規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差（対策後）

測位状態	対策		水平測位誤差				垂直測位誤差			
			場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
	伝搬路推定と平均化	固定局位置見直し	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
定点	適用	適用	99%	3.5 cm	4.2 cm	11 cm	100%	23 cm	31 cm	61 cm
	適用	未適用（基準位置）	93%	8.7 cm	12 cm	16 cm	100%	58 cm	69 cm	94 cm
移動	適用	適用	98%	3.9 cm	5.9 cm	12 cm	100%	18 cm	27 cm	52 cm

表 4.2-10 に、技術的条件の見直し後の小規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差を示す。同表より、定点及び移動測位ともに場所率 90%以上で水平測位誤差 10cm 以下、垂直測位誤差 1m 以下となる。表 4.2-6 で示した技術的条件見直し前の特性結果と比較して、大幅に測位誤差を低減でき、小規模交差点においても目標値を達成する。また、参考データとして、基準の固定局配置でも、伝搬路推定と平均化処理を実施することで、水平測位 10cm 以下の場所率が 97%となり、目標値を達成している。

表 4.2-10：小規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差（対策後）

測位状態	対策		水平測位誤差				垂直測位誤差			
			場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
	伝搬路推定と平均化	固定局位置見直し	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
定点	適用	適用	100%	0.4 cm	0.5 cm	0.6 cm	100%	1.2 cm	1.3 cm	1.6 cm
	適用	未適用（基準位置）	97%	2.4 cm	4.7 cm	26cm	100%	3.8 cm	9.0 cm	47cm
移動	適用	適用	100%	2.1 cm	3.6 cm	7.2 cm	100%	2.6 cm	4.3 cm	8.5 cm

以上のように、伝搬路推定と平均化処理の適用、固定局配置の見直し等を行うことで、路面反射モデルでも目標精度を満足することが可能となる。

図 4.2-13に、路面反射モデルにおける水平測位誤差のカラーマップ(固定局は基準位置)を示す。伝搬路推定と平均化を適用している。図 4.2-12の AWGN モデルのカラーマップと同様、大規模交差点、小規模交差点ともに交差点中央の測位誤差は小さくなる。また、横断歩道より外側の測位誤差は大きい。

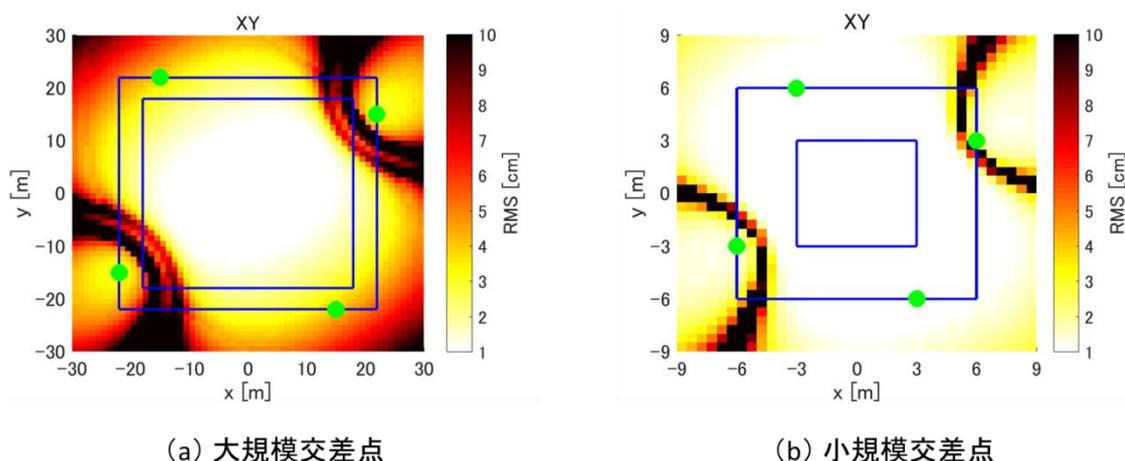


図 4.2-13：路面反射モデルにおける水平測位誤差のカラーマップ(固定局は基準位置)

図 4.2-14に、路面反射モデルにおける水平測位誤差のカラーマップ(固定局位置見直し適用)を示す。伝搬路推定と平均化を適用している。同図より、固定局位置を見直すことで、図 4.1-13よりも横断歩道における測位誤差 10cm 以下の領域が拡大する。

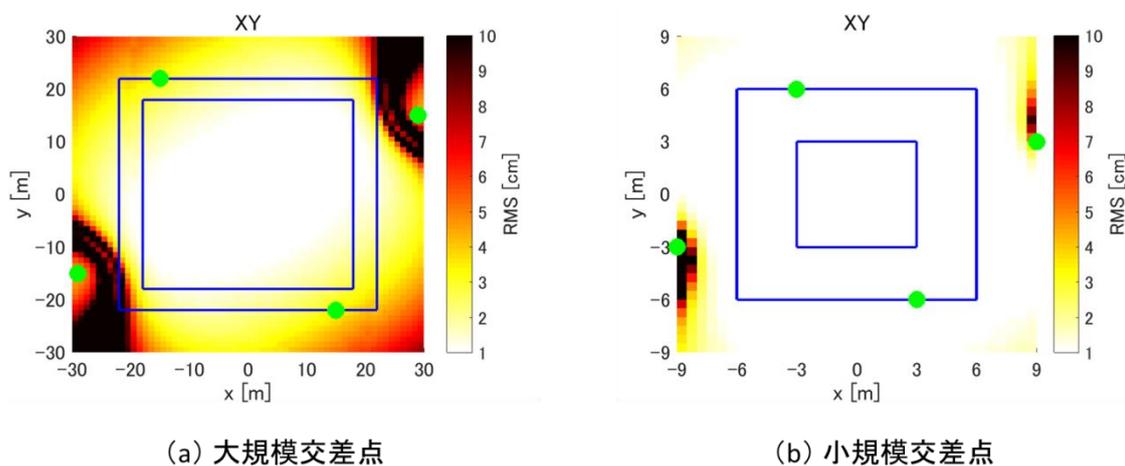


図 4.2-14: 路面反射モデルにおける水平測位誤差のカラーマップ(固定局位置見直し適用)

参考として、測位の平均化による測位誤差の低減効果を示す。表 4.2-11に、定点測位、横断歩道の大規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差の平均化の効果を示す。同表では、表 4.2-7の対策検討の条件において、測位の平均化回数のみを変更した。測位の平均化回数を5回にしても、90%以上の場所で水平測位誤差が 10cm 以下となる。このことから、必要に応じて、対策検討の条件で示した平均化回数を減らすことが可能である。

表 4.2-11：定点測位、横断歩道の大規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差の平均化の効果

測位の 平均化回数	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所 率	累積分布値			場所 率	累積分布値		
	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
1	51%	18cm	25cm	22m	86%	1.1m	1.4m	1.7m
5	93%	8.3cm	14cm	20cm	99%	53cm	79cm	99cm
10	95%	5.7cm	8.6cm	16cm	99%	36cm	52m	80cm
25	99%	3.5cm	4.2cm	11cm	100%	58cm	69cm	94cm

表 4.2-12 に、定点測位の小規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差の平均化の効果を示す。同表では、表 4.2-8 の対策検討の条件において、測位の平均化回数のみを変更した。測位の平均化回数を 1 回にしても、90%以上の場所で水平測位誤差が 10cm 以下となる。

表 4.2-12：定点測位の小規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差の平均化の効果

測位の 平均化回数	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所 率	累積分布値			場所 率	累積分布値		
	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
1	100%	2.3cm	2.6cm	3.1cm	100%	5.7cm	6.7cm	8.2cm
5	100%	1.0cm	1.2cm	1.4cm	100%	2.6cm	3.0cm	3.6cm
10	100%	0.7cm	0.8cm	1.0cm	100%	1.8cm	2.1cm	2.6cm
25	100%	0.4cm	0.5cm	0.6m	100%	1.2cm	1.3cm	1.6cm

4.3. マルチパスモデルにおける性能評価

2 パスよりもパス数の多いマルチパスモデルにおける測位誤差等の性能評価をシミュレーションにより行う。対象とする電波伝搬モデルは、表 4.2-2 で示した 3 パスモデルである。本節では、まず 2 パスでの伝搬路推定を行った場合の性能を示し、前節までに示した対策の効果を確認する。次に、追加対策として、3 パスでの伝搬路推定を行った場合と、アダプティブアレーと 2 パスでの伝搬路推定を組み合わせた場合の性能評価を行う。

4.3.1. マルチパスモデルにおける評価結果

表 4.3-1 に、マルチパスモデルの横断歩道における定点測位での測位誤差を示す。伝搬路推定、平均化処理の対策を行っているが、2 パスの伝搬路推定を行っており、3 パス目のパラメータ推定は行っていないことに注意が必要となる。固定局の配置は基準の場合と同じ条件とし、測距の平均化回数を 5 回、測位の平均化回数を 25 回とした。表 4.3-1 より、3 パス目による測距誤差が大きくなることで、10cm 以下となる場所率は大規模交差点、小規模交差点ともに 0%となる。2 パスの伝搬路推定と平均化処理の対策を行うことで、大規模交差点では 68%の場所で水平測距誤差 10cm 以下にできる。ただし、路面反射モデルでの結果（表 4.2-9、表 4.2-10）で示した水平測位精度 10cm 以下の場所率 90%以上に到達しておらず、対策による測距精度の改善度は小さい。

表 4.3-1：マルチパスモデルの横断歩道における定点測位での測位誤差

交差点	対策		水平測位誤差				垂直測位誤差			
			場所率		累積分布値		場所率		累積分布値	
	伝搬路推定と平均化	固定局位置見直し	<10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
大規模	適用	未適用 (基準位置)	68%	18cm	20cm	24cm	97%	90cm	97cm	1.1m
	未適用		0%	2.4m	11m	26m	0.3%	2.3m	2.7m	3.0m
小規模	適用	未適用	82%	19cm	29cm	72cm	98%	38cm	50cm	1.2m
	未適用		0%	59cm	70cm	88cm	95%	97cm	1.0m	1.1m

路面反射波よりも後続の遅延波が含まれるモデルでは、想定されるパス数に応じて伝搬路推定するパスの数を増やすことが追加対策の一つとなる。また別の追加対策としては、802.11nにおける複数本のアンテナを用いたアダプティブアレーアンテナ(AAA: Adaptive Array Antenna)技術が挙げられる。AAAでは、直接波と路面反射波のみに指向性を絞り、後続の遅延波に対してはヌルが発生するため、3パス以降の相対電力を10dB以上減衰させることが可能になると考える。

表 4.3-2 に、追加対策適用時におけるマルチパスモデルの横断歩道における定点測位での測位誤差を示す。固定局の設置位置は基準とし、測距の平均化回数は5回、測位の平均化回数は25回とした。AAAにおける3パス目の相対電力を-27dB(-12dBから15dB減衰)とし、AAAのアンテナ利得を9dBi(2dBiから7dB上昇)とした。

表 4.3-2 より、追加対策を行うことで基準の固定局設置でも、場所率90%に対して、水平測位誤差10cm以下、垂直測位誤差1m以下となることを確認した。大規模交差点において、3パス伝搬路推定の水平測位誤差10cm以下の場所率は92%であり、2パス伝搬路推定を行った表 4.3-1の結果と比較すると、場所率は68%から24%上昇している。この24%の改善は電波伝搬パラメータの推定数を増やした分の効果である。同様の比較として、AAAを適用した場合、場所率が68%から95%に27%上昇している。この27%の改善は、3パス目の相対電力を-12dBから-27dBに15dB低減させることで2パスと近似する伝搬路推定が有効になった効果と、アンテナ利得が7dB上昇することで受信電力が高まり測距誤差が低減した効果、によるものである。

加えて、大規模交差点の水平測位誤差90%値に着目すると、2パス伝搬路推定から3パス伝搬路推定に変えることで18cmから9.3cmとなり、約1/2の改善となる。AAAと2パス伝搬路推定に変えた場合、18cmから6.7cmとなり、約1/3の改善となる。

表 4.3-2：追加対策適用時におけるマルチパスモデルの横断歩道における
 定点測位での測位誤差

交 差 点	追加対策		水平測位誤差				垂直測位誤差			
			場所率		累積分布値		場所率		累積分布値	
	3 パス 推定	AAA	<10 cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
大 規 模	適用	未適用	92%	9.3cm	13cm	17cm	100%	60cm	70cm	91cm
	2 パス 推定 のみ	適用	95%	6.7cm	11cm	17cm	99%	46cm	58cm	1.0m
小 規 模	適用	未適用	96%	4.1cm	7.6cm	37cm	100%	6.5cm	15cm	67cm
	2 パス 推定 のみ	適用	96%	3.2cm	6.7cm	27cm	100%	5.1cm	13cm	48cm

以上の結果より、マルチパスモデルにおいても追加対策を行うことで、大規模交差点と小規模交差点の横断歩道では、水平測位誤差 10cm 以下、垂直測位誤差 1m 以下となることを確認した。

4.4. 既存 Wi-Fi スポット利用時の性能評価

本節では、既存の Wi-Fi スポットを利用した場合の測位精度の評価を行う。なお、電波伝搬環境は路面反射モデルを想定する。

まず、固定局 4 台の内の 1 台を既存 Wi-Fi スポットとした場合を想定した評価結果を示す。次に、東京都内の Wi-Fi スポット設置情報を調査し、4 台の既存 Wi-Fi スポットが近くにある環境での測位精度を示す。

表 4.4-1 に、既存 Wi-Fi スポット 1 台利用時の評価条件を示す。基準となる固定局配置に対して、既存 Wi-Fi スポットである#1 の固定局が、横断歩道から (X 軸方向に) 30m 外側に設置された場合を想定している。

表 4.4-1：既存 Wi-Fi スポット 1 台利用時の評価条件

交 差 点	固定局の設置位置				路面反射対策			備 考
	番号	X [m]	Y [m]	Z [m]	伝搬路 推定	平均化回数		
						測距	測位	
大 規 模	#1	52	15	3.5	適用	5	25	#1 が既存の Wi-Fi スポット 想定
	#2	-15	22	5				
	#3	-22	-15	3.5				
	#4	15	-22	5				
小 規 模	#1	36	3	3.5	適用	5	25	#1 が既存の Wi-Fi スポット 想定
	#2	-3	6	5				
	#3	-6	-3	3.5				
	#4	3	-6	5				

表 4.4-2 に、路面反射モデルにおける測位誤差を示す。同表より、大規模交差点、小規模交差点ともに、90%の場所で水平測位誤差が 10cm 以下、垂直測位誤差が 1m 以下となる。従って、交差点から数十 m 離れた既存 Wi-Fi が他の固定局や測位対象エリアの移動局（歩行者）と見通し内であれば、4 台の固定局のうちの 1 台として利用することで目標測位精度を達成する。

表 4.4-2 : 既存 Wi-Fi スポットを 1 台利用した場合の測位性能の評価例
(路面反射モデル)

交差点	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
大規模	91%	8.6cm	17cm	23cm	100%	24cm	58cm	88cm
小規模	99%	1.1cm	2.5cm	12cm	100%	3.0cm	4.5cm	14cm

図 4.4-1 に、都内の上野駅周辺における屋外の既存 Wi-Fi スポットの設置例を示す。同図では 4 台の既存 Wi-Fi が交差点周辺に設置される。但し、これら 4 台の既存 Wi-Fi スポットの中には見通しではない組合せがあるため、これら 4 台のみによる測位は困難、もしくは測位対象エリアが限られる。都内の他の交差点を調査した結果、4 台全てが見通しにある既存 Wi-Fi スポットが周辺に設置されている交差点は一つも存在せず、既存 Wi-Fi スポットのみで測位を行うことは難しいことがわかった。

表 4.4-3 に、参考として上野駅周辺における Wi-Fi スポット 4 台が見通しにある想定での測位誤差の評価結果を示す。測位対象は横断歩道を含む 100 メートル四方 ($[X, Y] = [0, 0]$ から $[100, 100]$ の範囲) を想定している。なお、XY 座標の単位はメートルである。同表より、80%の場所で 10cm 以下の水平測位精度となり、95%の場所で 1m 以下の垂直測位精度となる。したがって、既存 Wi-Fi を利用することで固定局の一部が交差点から離れても、高い測位精度を確保できる。



図 4.4-1 : 既存 Wi-Fi スポット設置例 (上野駅周辺)

<http://www.wifi-tokyo.jp/ja/spotmap.html> から引用

表 4.4-3：上野駅周辺における既存 Wi-Fi スポット 4 台利用時における測位性能の評価例
(上野駅周辺、路面反射モデル)

交差点	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
上野駅周辺	80%	20cm	29cm	73cm	95%	76cm	97cm	1.34m

4.5. 計算機シミュレーションによる性能評価のまとめ

本章で得られた計算機シミュレーションによる性能評価のまとめを以下に列挙する。

- ・AWGN モデルで回線設計を行った結果、2.4GHz 帯においてサンプリング速度は 5Gsp/s にしなければ、大規模交差点で目標となる測位精度を満足しない。また、小規模交差点では、サンプリング速度を 5Gsp/s にした場合にのみ、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯において目標となる水平測位精度を満足する。

- ・固定局の設置方法について調べた結果、一部の固定局の水平方向の位置を拡大することで、水平測位精度、垂直測位精度の向上を最も確認できた。その他、一部の固定局のアンテナ高さを高くした場合や、固定局の設置台数を増やした場合でも測位精度が向上する。

- ・路面反射モデルでは、固定局の設置条件を前記に従い、一部の固定局の水平方向の位置を拡大しつつ、伝搬路推定と測位データの平均化を実施することで、目標となる水平測位精度を達成することを確認した。

- ・3パスを含むマルチパスモデルでは、路面反射モデルと同様の対策を行うことで、水平測位精度を改善することができる。ただし、伝搬路推定のパス数を 2 にした場合、性能の改善度合いが小さいことを確認した。追加対策として、3パスの伝搬路推定や AAA を適用すると、水平測位精度が目標値を満足する。

5. 高精度位置推定システムの性能調査（実機による性能評価）

本章では、高精度位置推定システムの実機による性能調査について示す。

5.1. 実機評価の流れ

本節では、本システムの実機評価を行うための手順を示す。本評価は以下の手順で行う。

① 測位性能評価

- ・ 2章で抽出したユースケースの中から評価対象を選定する。
- ・ 2章で検討したシステム要件を踏まえて、選択したユースケースにしたがって固定局及び移動局の評価条件（設置位置、高さ、対象エリアの範囲等）を決める。
- ・ 移動局の設置位置から正解値を求める。
- ・ 移動局が送信した受信信号に対して各固定局で相互相関処理を施して、フレームの受信時刻を測定し、推定位置の実測値を求める。
- ・ 位置の正解値と実測値との差から測位性能を評価する。

② 技術的条件の整理

- ・ 上記①の評価結果をもとに、高精度位置推定システムの無線通信及び測位のプロトコルに対して、システム要件を満足するための技術的条件を整理する。

5.1.1. 対象周波数

3章で示したプロトコル案は、本システムが IEEE 802.11 を利用することを規定し、2.4GHz 帯及び 5GHz 帯の周波数帯を限定するものではない。プロトコルの観点からは 2.4GHz 帯及び 5GHz 帯のいずれであっても実装が可能であり、実機による評価が可能である。ただし、電波法による制限や現行のスマートフォンの機能を考慮して、本実機評価での対象周波数を選定する必要がある。

図 5.1-1 に実機評価の対象周波数を示す。2.4GHz 帯は屋内／屋外で利用することが可能である。5GHz 帯のうち、5.2GHz 帯は屋内のみ利用が可能である。また、5GHz 帯のうち、5.6GHz 帯は DFS(Dynamic Frequency Selection)機能を必要とするが、現行のスマートフォンでは対応したものが確認できない。

したがって、本実機評価では、現行のスマートフォンでの実現を想定し、屋外での利用が可能となる 2.4GHz 帯で実施する。具体的には、IEEE 802.11g による無線通信が可能なスマートフォン及び固定局を用意し、実機評価を行う。

検討 周波数帯		調査検討事項 (H29年度)		備考
		シミュレーション 評価	実機 評価	
2.4GHz帯		○	○	屋内/屋外で利用可
5GHz帯	5.2GHz	○		屋内のみ利用可
	5.6GHz			DFS機能が必要 (対応したスマホなし、SG利用も困難)

- ・シミュレーション評価は、2.4GHz帯、5GHz帯（5.2GHzまたは5.6GHz）ともに実施
- ・実機評価は、屋外利用が容易な2.4GHz帯で実施

図 5.1-1：実機評価における対象周波数

5.1.2. 実験系の構成

実験系の構成を図 5.1-2 に示す。また、各仕様を表 5.1-1 に示す。本実機評価では固定局を 5 台利用する。固定局は、それぞれ同じ機能を備え、無線機 (RF)、AD コンバータ、CPU 及びクロック発振器から構成される。

無線機は 2.4GHz 帯の IEEE 802.11g による通信を行う。アンテナは 2.4GHz 帯対応の無指向性ダイポールアンテナ (ナテック社製：AA2402SPU、利得 2dBi) を利用する。

AD コンバータは 1.8Gsp/s と 5Gsp/s を用意し、交換して測定する。

CPU は表 5.1-1 に示す汎用品を利用し、高速サンプリングで取得した受信信号を利用し、3.2.5 に示す信号波形の先頭を検出する計算 (相互相関処理) を行う。また、クロック発振器として、ルビジウム発振器 (スタンフォードリサーチシステムズ社製：FS725) を利用する。

汎用 PC は各固定局の受信時刻の情報 (T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 及び T_5) を受け、測位計算を実行する。

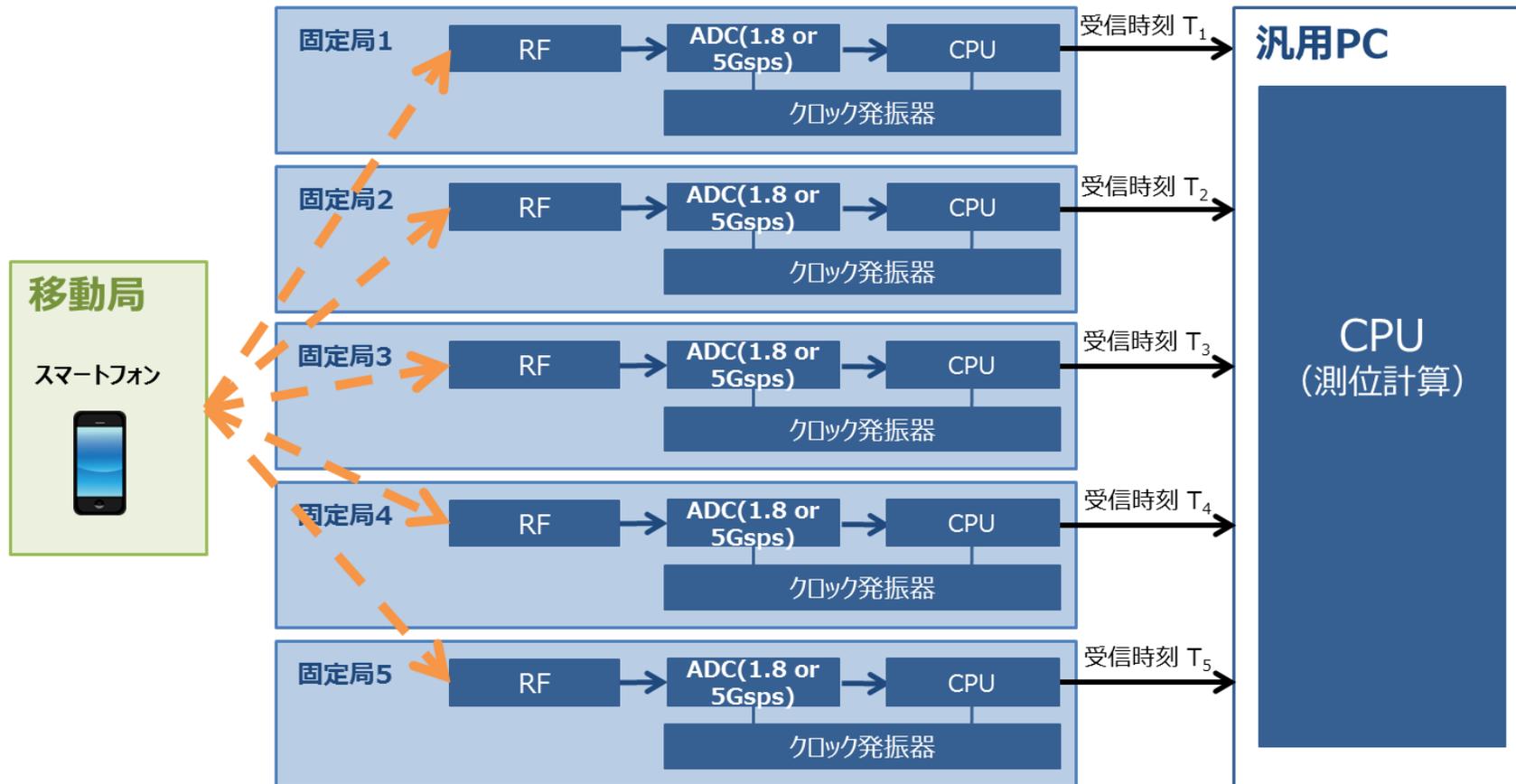


図 5.1-2 : 実験系の構成

表 5.1-1 : 固定局の仕様

パラメータ	値	
サンプリング速度	5Gspss	1.8Gspss
ADC 分解能	10bit	12bit
無線周波数帯	2.4GHz 帯	
CPU	Core i7-7700(4.2GHz×4)	
ボードのインタフェース	PCIe 3.0 (8 レーン)	
アンテナ	無指向性ダイポールアンテナ (ナテック社製 : AA2402SPU、利得 2dBi)	
クロック発振器	ルビジウム型発振器(スタンフォードリサーチシステムズ社製 : FS725)	

5.2. 実機評価条件

本節では、実機評価の条件について示す。

5.2.1. 評価条件

表 5.2-1 に評価条件を示す。本実機評価で対象とするユースケースは、2 章の検討結果より小規模交差点とする。また、測位環境は、グラウンド、テストコース及び屋内で行う。測位形態としては、静特性の確認のため小規模交差点の定点（8 か所）で測定した場合と、実際にスマートフォンを持って歩行した場合の 2 形態とする。測定回数は、定点の条件では各測位ポイントで 100 回行い、歩行の条件では 10 試行行う。サンプリング速度は 1.8Gspss と 5Gspss で行う。

表 5.2-1 : 評価条件

条件	値
ユースケース	小規模交差点
測位環境	グラウンド／テストコース／屋内
測位形態	定点（8 か所）／歩行
測定回数	定点（各ポイントで 100 回）／歩行（10 試行）
サンプリング速度	1.8Gspss／5Gspss

5.2.2. 測位環境

本実機評価では、小規模交差点を想定し、表 5.2-2 に示す測位環境で行う。

グラウンドは、理想的なオープンフィールドを想定し、同条件におけるシミュレーションと比較することで、装置の正常な動作を担保し、シミュレーション結果を踏まえた実機の妥当性を確認する。

また、テストコースは、グラウンドに比べて、より実践的なオープンフィールドを想定し、理想的な環境であるグラウンドとの測位結果の差を確認する。ビルなどの遠方の建物によるマルチパスは生じないが、オープンフィールドでありながら、近傍のフェンスなどの金属による反射は生じる環境を想定することで、その影響を確認する。

さらに、屋内は、次年度の検討対象であるマルチパス環境を想定する。マルチパスの影響を本年度のうちに確認しておくことを実験の目的とする。

表 5.2-2：測位環境

測位環境	選定の理由、目的
グラウンド	理想的なオープンフィールドを想定し、シミュレーションと比較する。
テストコース	グラウンドに比べて、より実践的なオープンフィールドを想定（ビルなどによるマルチパスは生じないが、オープンフィールドでありながら、フェンスなどの金属による反射は生じる環境を想定）し、理想的なオープンフィールドであるグラウンドとの差を確認する。
屋内	マルチパスが発生する状況を想定し影響を確認する。

5.2.3. 実験の概要

本実機評価では、小規模交差点を模擬した固定局の設置条件で行う。ポールを交差点の四隅に設置し、ポールに固定局を設置する。また、固定局 3 及び固定局 5 は同じポールに設置する（図 5.2-1）。

スマートフォンは 100msec 間隔の一定周期で測位フレームを送信し、各固定局が測位フレームを受信することで受信時刻を求める。本実機評価では、受信時刻の情報は受信時刻フレームを用いて有線 LAN 経由で汎用 PC に届ける。汎用 PC は受信時刻の情報から、スマートフォンの推定位置を計算する。測定ポイントの位置はあらかじめレーザー測距等から求めておき、これを正解値とする。

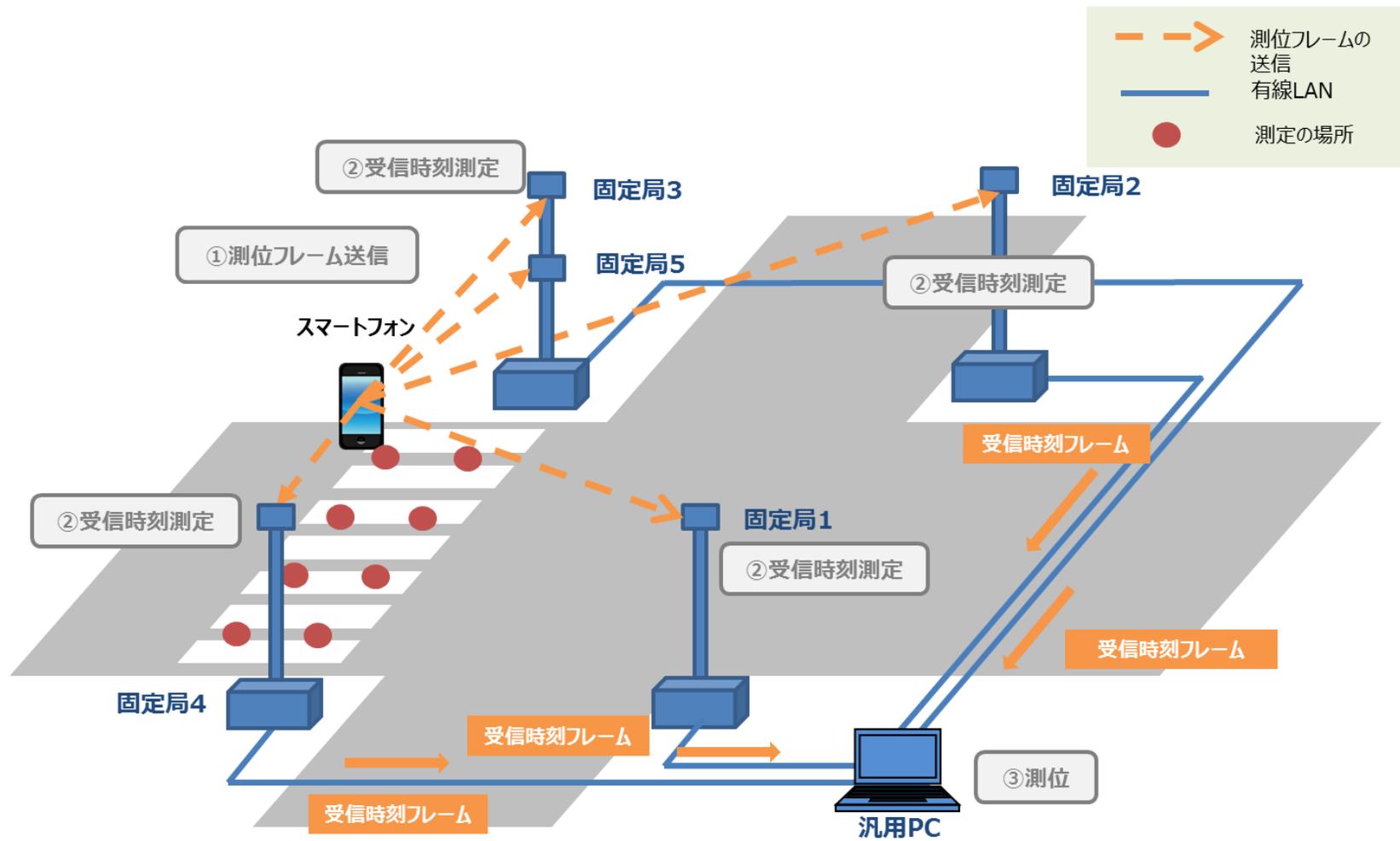


図 5.2-1 : 実験の概要

5.2.4. 測位対象エリア及び測位ポイント

測位対象エリア及び測位ポイントについて図 5.2-2 に示す。測位対象エリアは、外周を 12m×12m の正方形とし、内周を 6m×6m の正方形とする領域内とする。測位対象エリア内の 8 か所を測位ポイントとする。

小規模交差点（片側1車線想定）

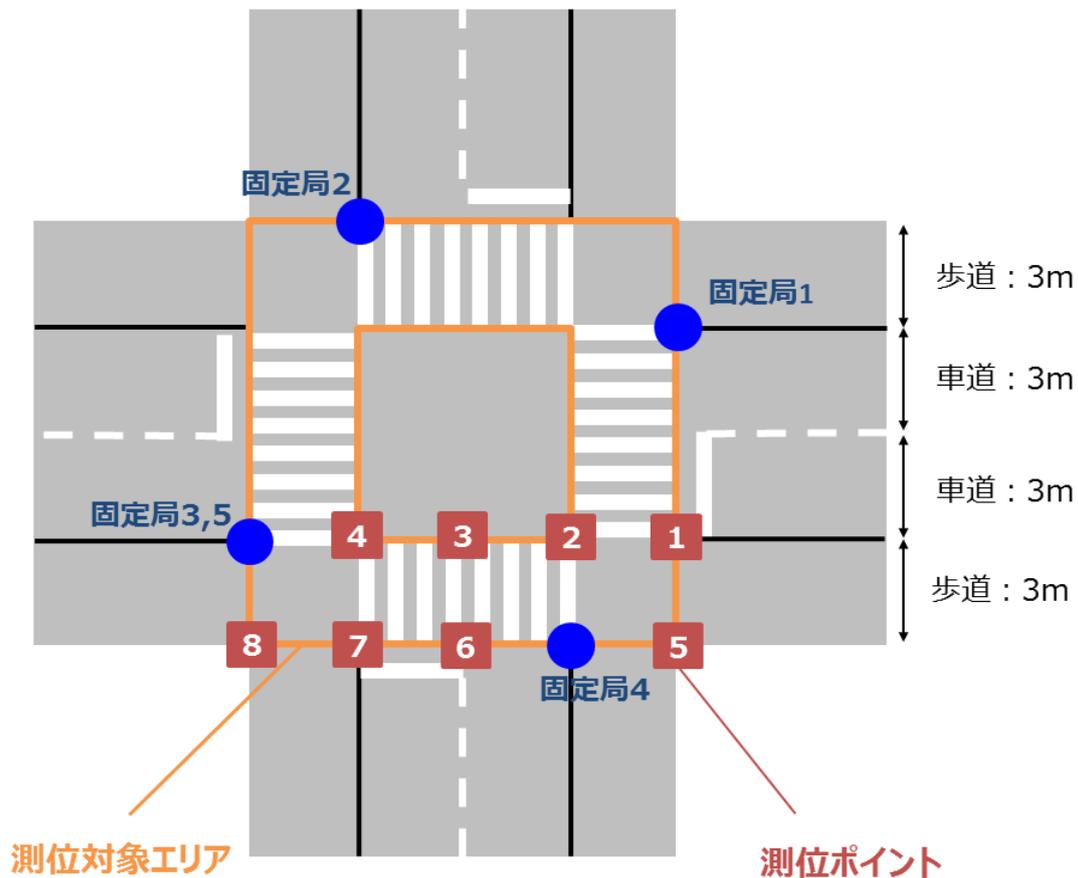


図 5.2-2：測位対象エリアと測位ポイント

5.3. 実機評価結果

本節では、実機評価の結果を示す。移動局を固定した場合の測位として、グラウンドでの結果を 5.3.1 項、テストコースでの結果を 5.3.2 項、屋内での結果を 5.3.3 項に示す。また、スマートフォンを所持した歩行中の測位結果を 5.3.5 項に示す。

5.3.1. グラウンドの結果

グラウンドの景観を図 5.3-1 に示す。グラウンドでは理想的なオープンフィールドを想定した実験を行う。伝搬環境として路面反射モデル（2パスモデル）を想定したシミュレーション結果と比較することで、装置の正常な動作を担保し、シミュレーション結果を踏まえた実機の妥当性を確認する。



図 5.3-1 : グラウンドの景観

図 5.3-2 から図 5.3-9 において、グラウンドの各ポイントでの測位結果を示す。縦軸及び横軸の単位は m である。図では 1.8GspS(青)、5GspS(紫)における実機での測位結果と 5GspS におけるシミュレーション(緑)の測位結果をプロットする。実機は 100 回の測位結果であり、シミュレーションは 1000 回の測位結果である。また、正解の位置は赤の四角で示す。

シミュレーションでは、路面反射を考慮した 2 パスモデルを適用しており、2 波の位相を回転させたものである。位相差は固定局と移動局の設置状況により変わるため、シミュレーションでは位相差をランダムに生じさせた。

図 5.3-2 から図 5.3-9 により、実機の結果はシミュレーションにより推定される測位結果上にほとんどがプロットされることが確認できる。これは路面反射モデルのシミュレーションにより実機の環境が再現できていることを意味する。

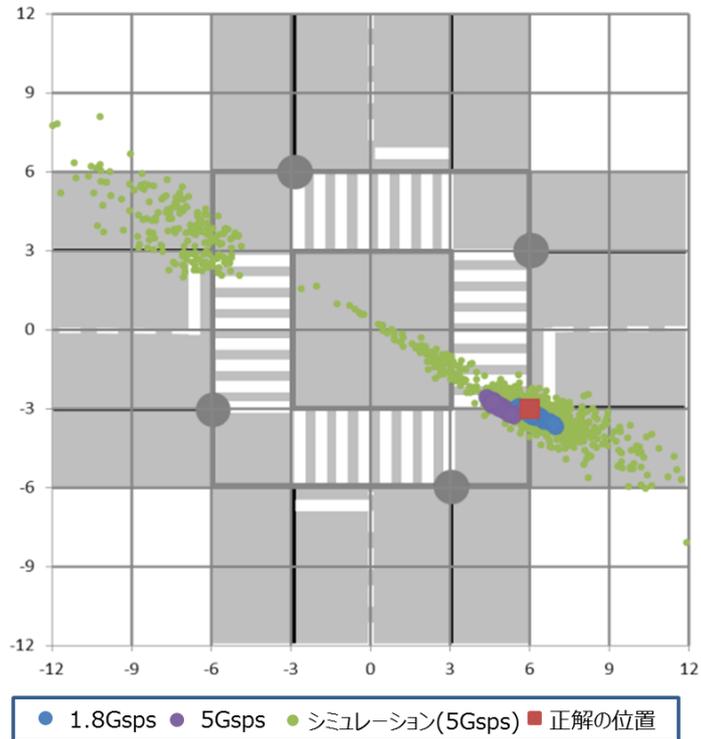


図 5.3-2 : グラウンド、測位ポイント 1 の結果

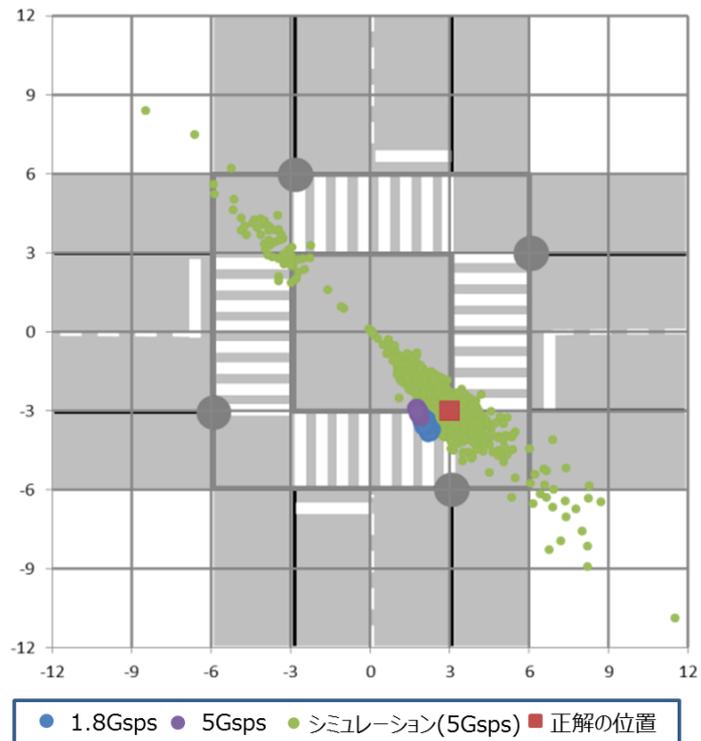


図 5.3-3 : グラウンド、測位ポイント 2 の結果

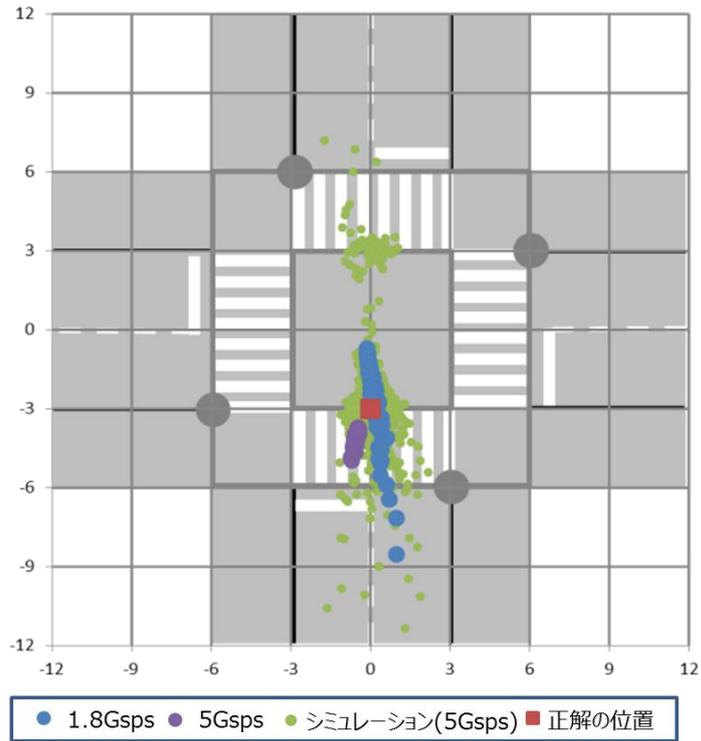


図 5.3-4 : グラウンド、測位ポイント 3 の結果

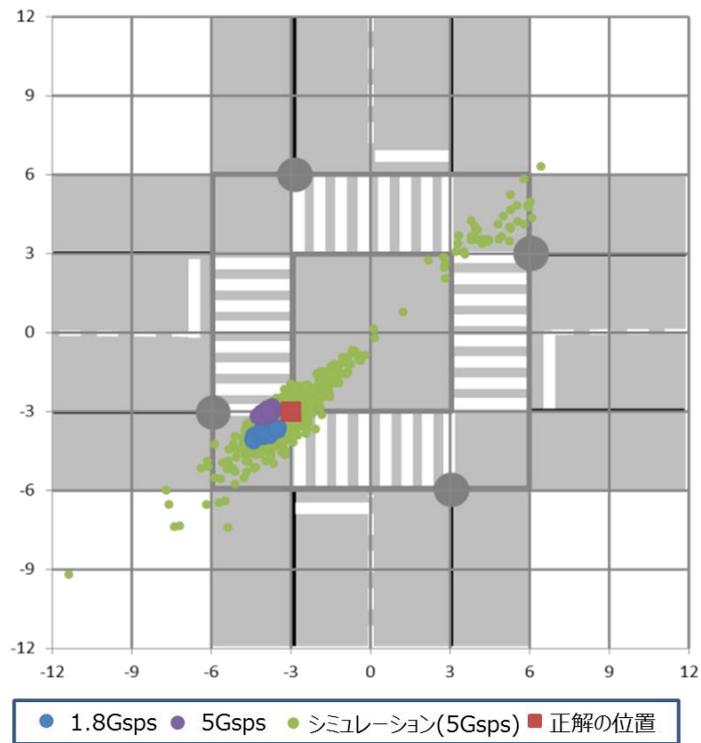


図 5.3-5 : グラウンド、測位ポイント 4 の結果

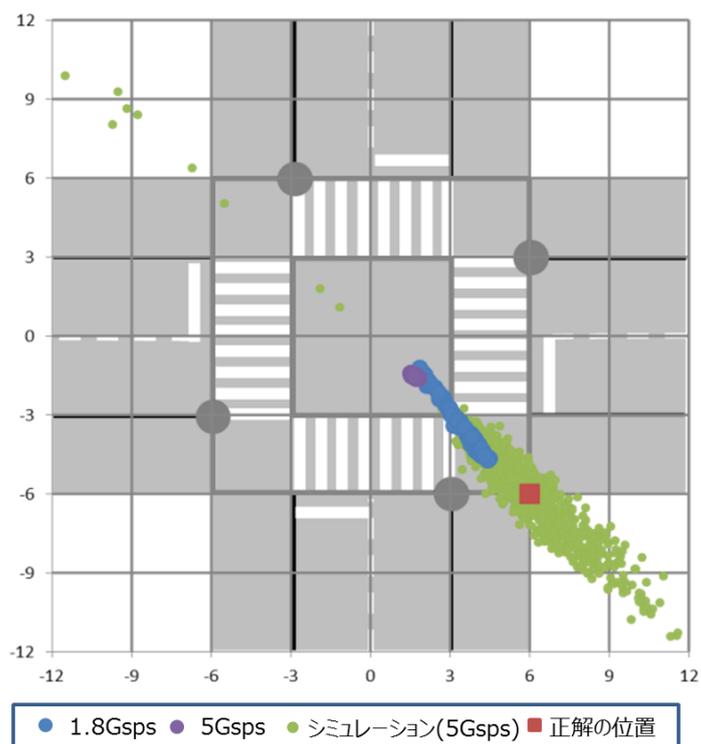


図 5.3-6 : グラウンド、測位ポイント 5 の結果

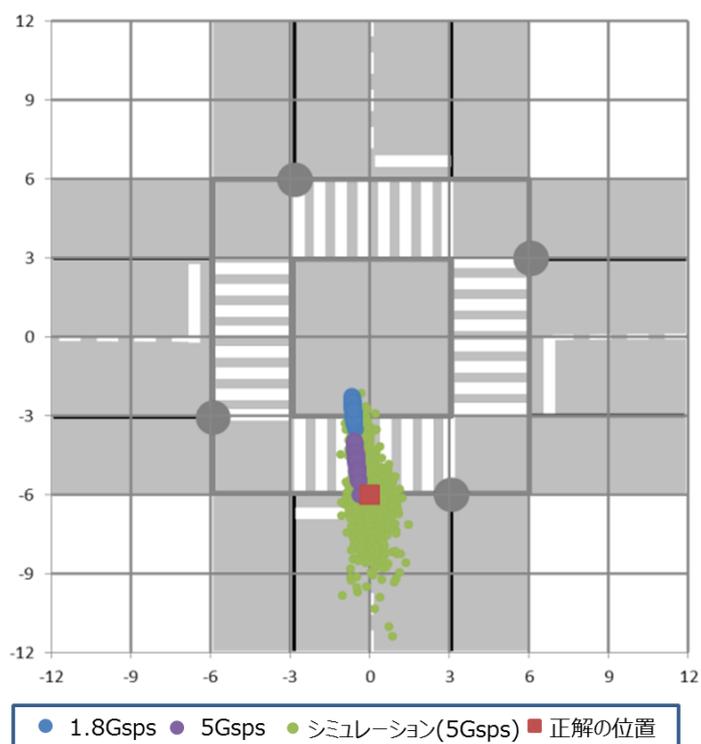


図 5.3-7 : グラウンド、測位ポイント 6 の結果

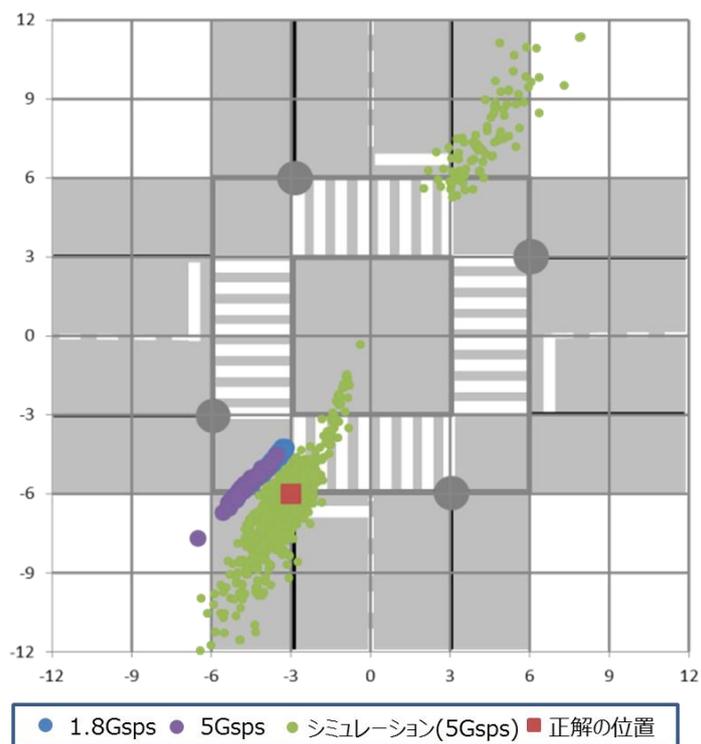


図 5.3-8 : グラウンド、測位ポイント 7 の結果

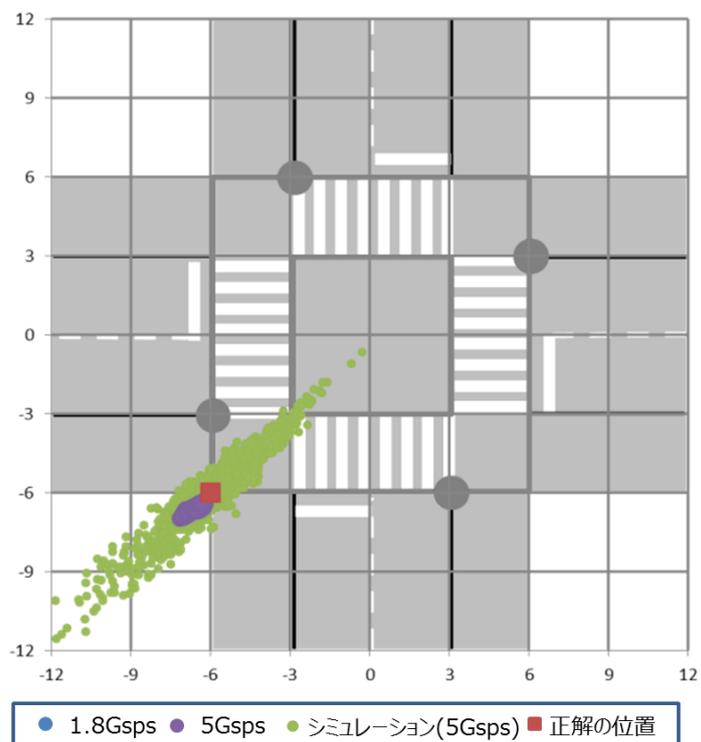


図 5.3-9 : グラウンド、測位ポイント 8 の結果

5.3.2. テストコースの結果

テストコースの景観を図 5.3-10 に示す。テストコースでは、ビルなどの遠方の建物によるマルチパスは生じないが、オープンフィールドでありながら、近傍のフェンスなどの金属による反射が生じる環境を想定する。グラウンドに比べて、より実践的なオープンフィールドを想定し、理想的なオープンフィールドであるグラウンドとの差を確認することを目的とする。

OKI 本庄工場内ITSテストコース

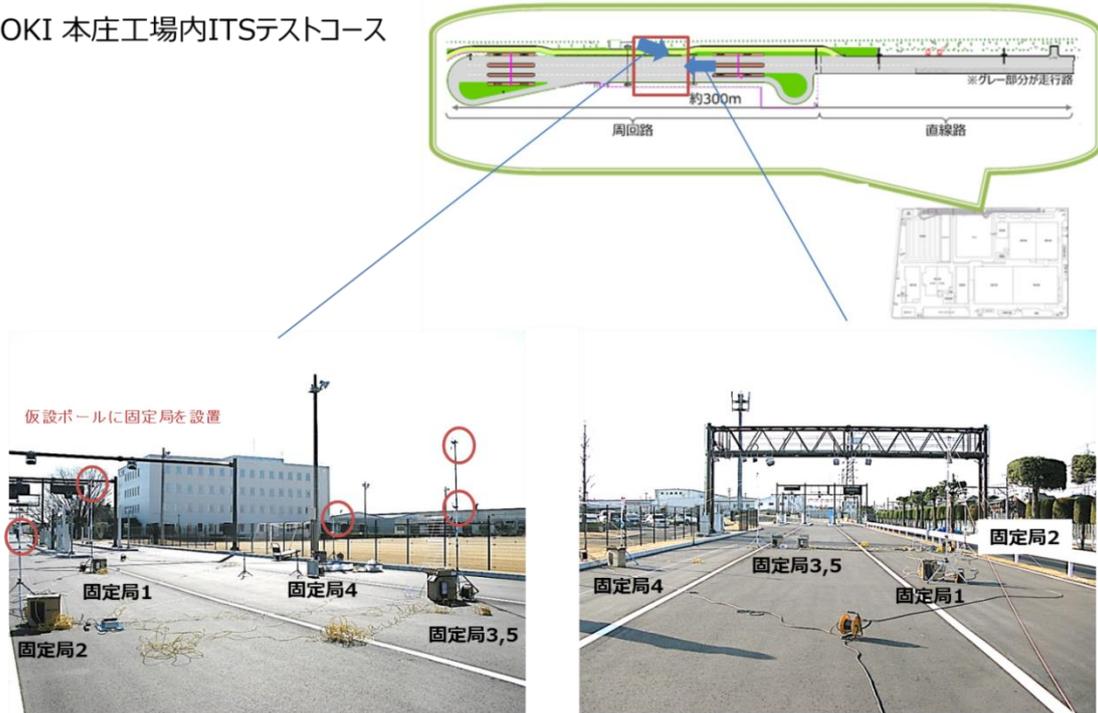


図 5.3-10 : テストコースの景観

図 5.3-11 から図 5.3-18 において、テストコースの各ポイントでの測位結果を示す。縦軸及び横軸の単位は m である。グラウンドの結果と同様に、1.8Gsps(青)、5Gsps(紫)における実機での測位結果と 5Gsps におけるシミュレーション(緑)の測位結果をプロットする。実機は 100 回の測位結果であり、シミュレーションは 1000 回の測位結果である。また、正解の位置は赤の四角で示す。

テストコースでは、近傍にフェンス等の反射物などがあり、マルチパスの影響をグラウンドに比べて受けるため、測位結果にオフセットのような誤差が生じる。推定位置からずれるが、路面反射が支配的となる環境という点において、グラウンドの環境とテストコースの環境は、測位結果の傾向として同じであると考えられる。

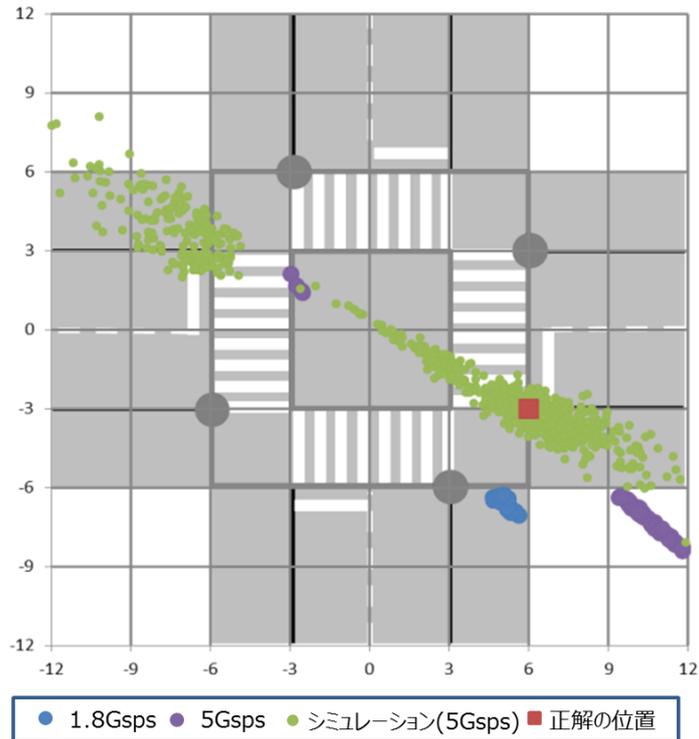


図 5.3-11 : テストコース、測位ポイント 1 の結果

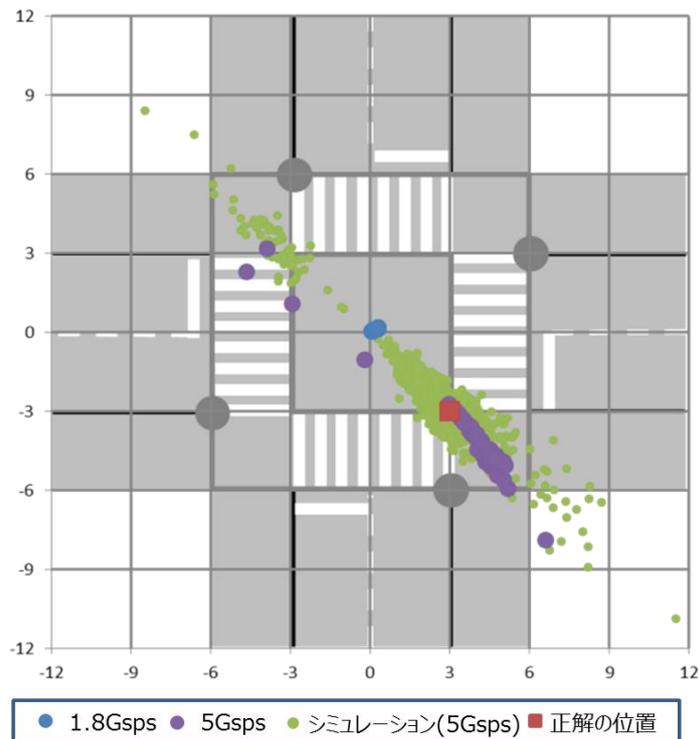


図 5.3-12 : テストコース、測位ポイント 2 の結果

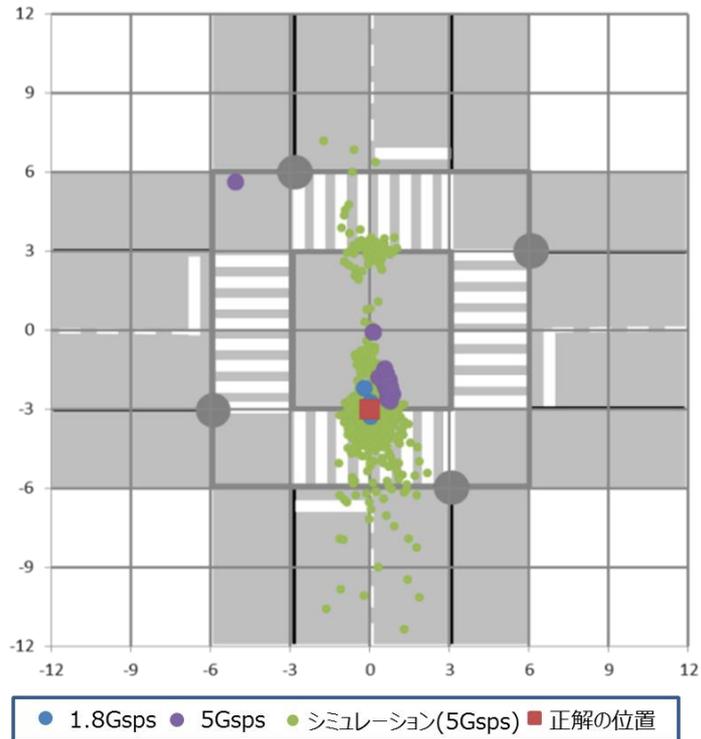


図 5.3-13 : テストコース、測位ポイント 3 の結果

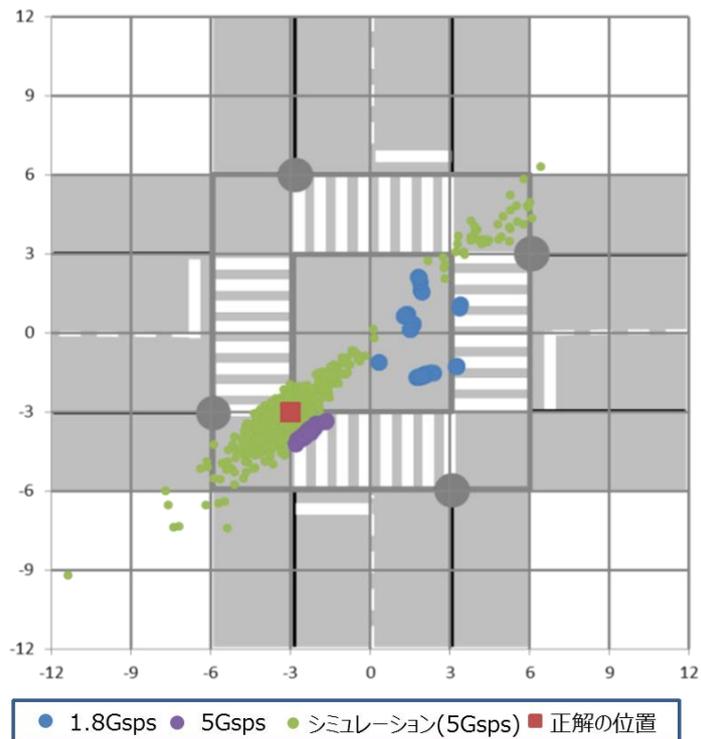


図 5.3-14 : テストコース、測位ポイント 4 の結果

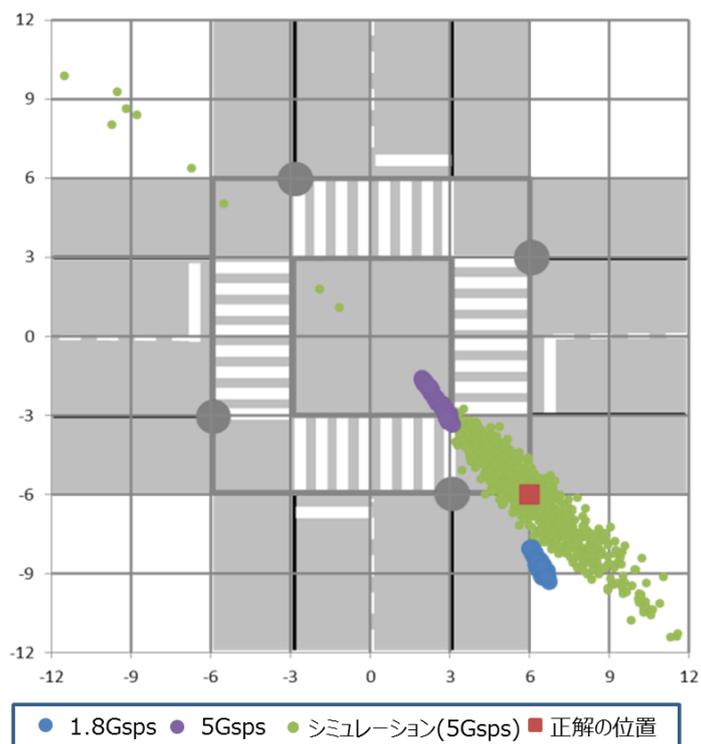


図 5.3-15 : テストコース、測位ポイント 5 の結果

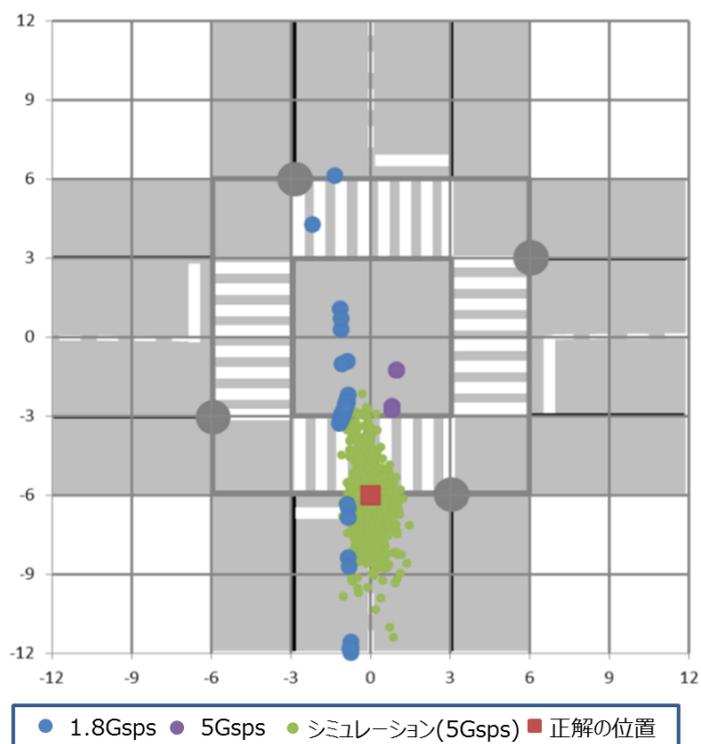


図 5.3-16 : テストコース、測位ポイント 6 の結果

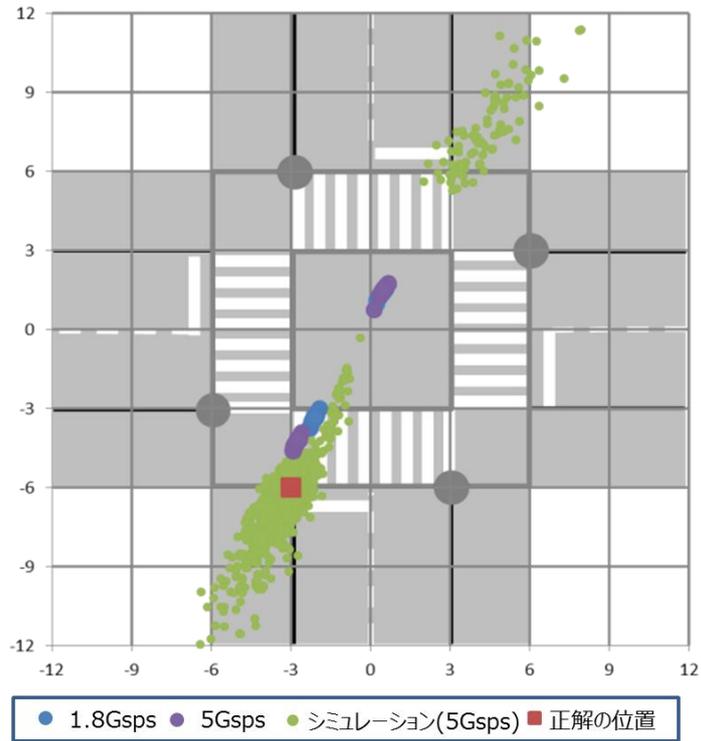


図 5.3-17 : テストコース、測位ポイント 7 の結果

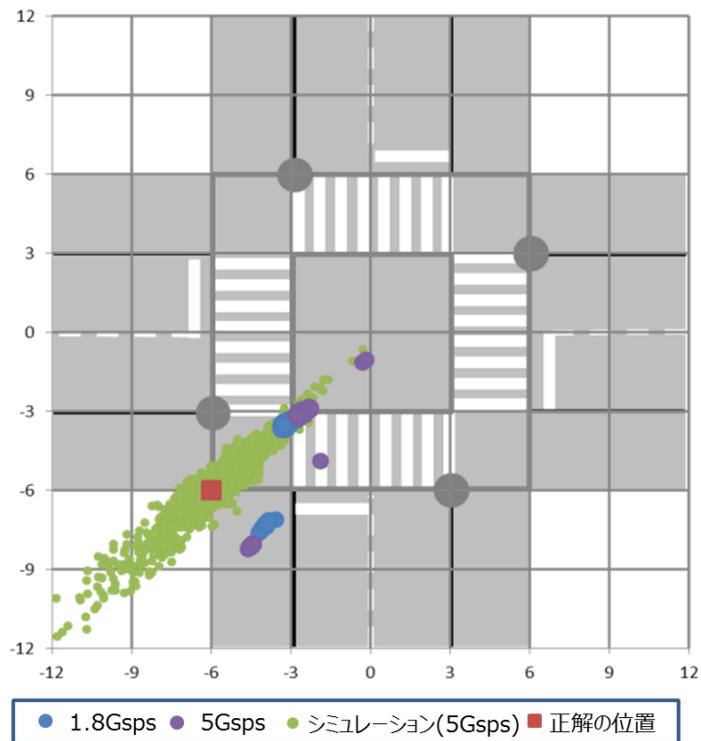


図 5.3-18 : テストコース、測位ポイント 8 の結果

5.3.3. 屋内の結果

屋内の景観を図 5.3-19 に示す。屋内は、次年度の検討対象であるマルチパス環境での測位を想定し、マルチパスの影響を本年度のうちに確認しておくことを実験の目的とする。

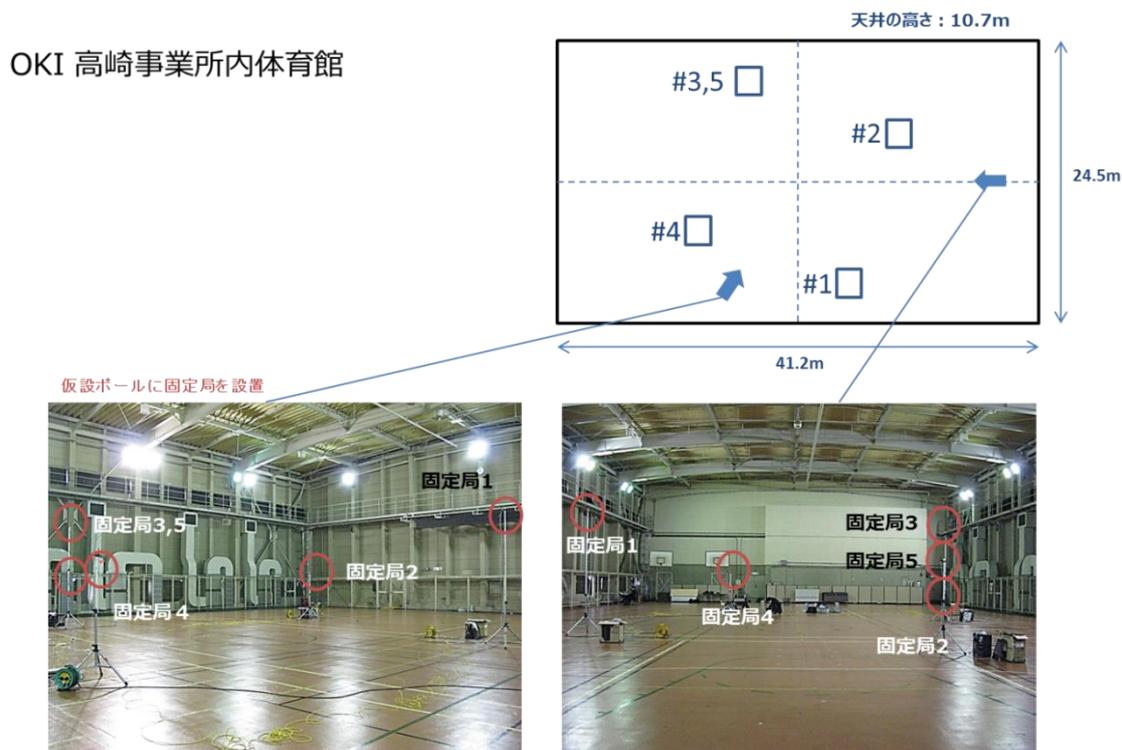


図 5.3-19：屋内の景観

図 5.3-20 から図 5.3-27 において、屋内の各ポイントでの測位結果を示す。縦軸及び横軸の単位は m である。グラウンドの結果と同様に、図では 1.8Gsps(青)、5Gsps(紫)における実機での測位結果と 5Gsps におけるシミュレーション(緑)の測位結果をプロットする。実機は 100 回の測位結果であり、シミュレーションは 1000 回の測位結果である。また、正解の位置は赤の四角で示す。

実験結果は、シミュレーションの結果と比べ、プロットされる位置において乖離した測位データが目立つようになる。屋内は路面反射だけでなく、屋内の壁から反射するマルチパスの影響を受けるため、路面反射モデルによるシミュレーションの結果と一致しなくなると考えられる。屋内での実機の測位をシミュレーションで再現するためには、正確な伝搬モデル（レイトレース法など）を構築する必要がある。

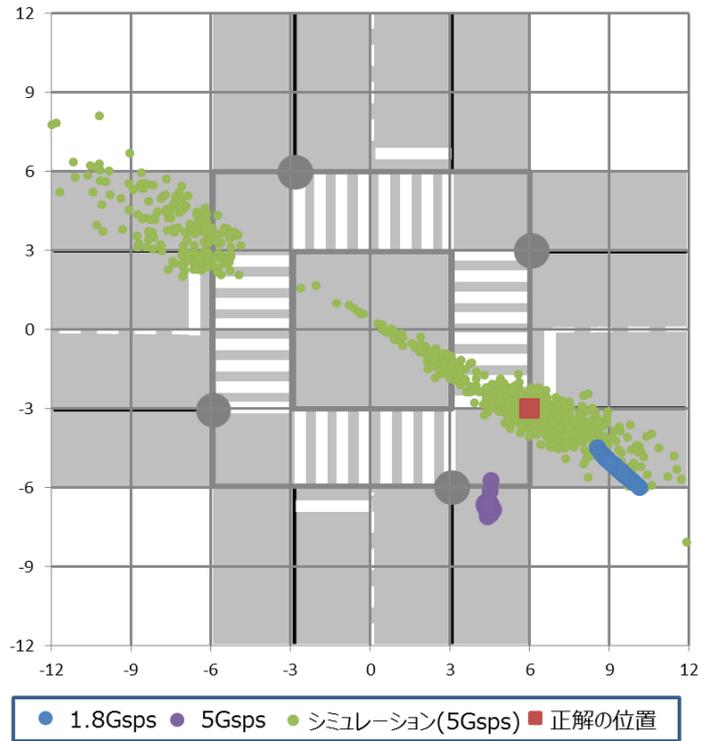


図 5.3-20 : 屋内、測位ポイント 1 の結果

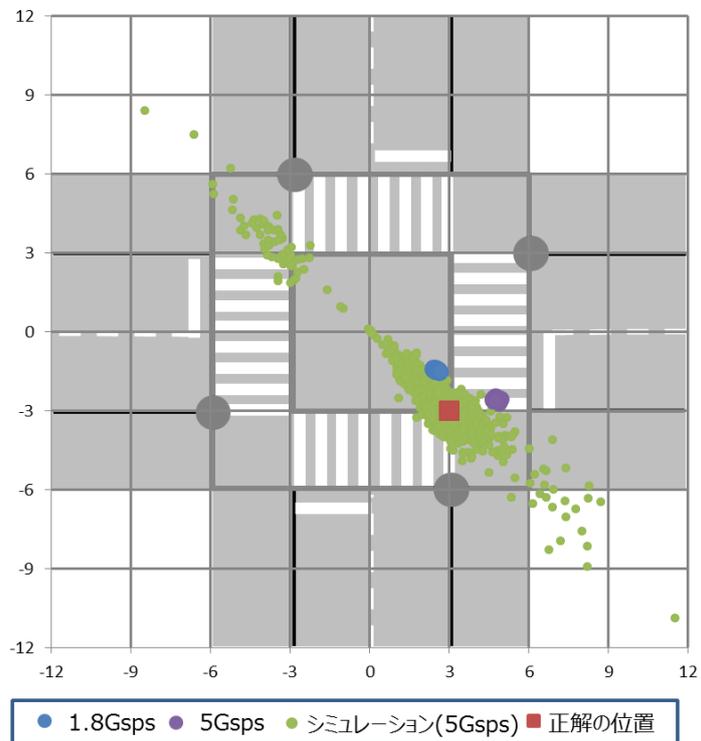


図 5.3-21 : 屋内、測位ポイント 2 の結果

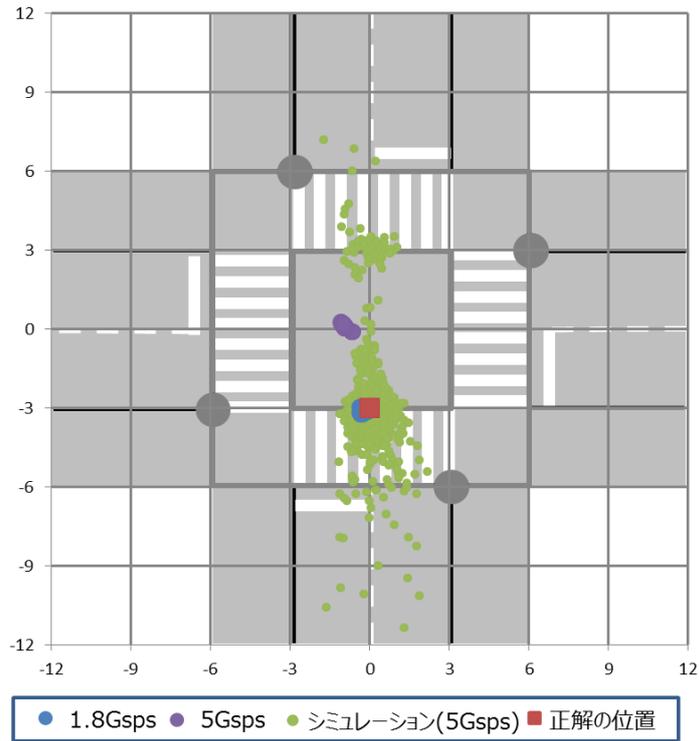


図 5.3-22 : 屋内、測位ポイント 3 の結果

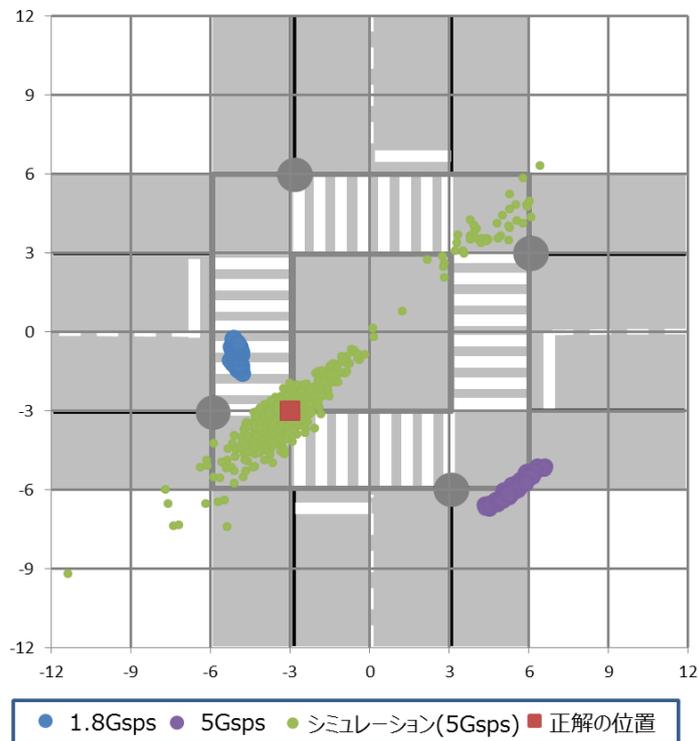


図 5.3-23 : 屋内、測位ポイント 4 の結果

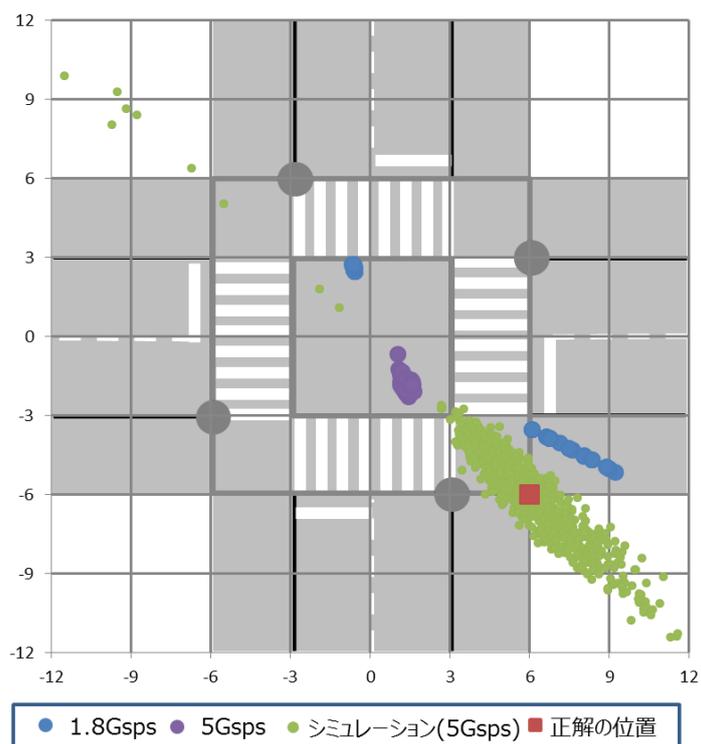


図 5.3-24 : 屋内、測位ポイント 5 の結果

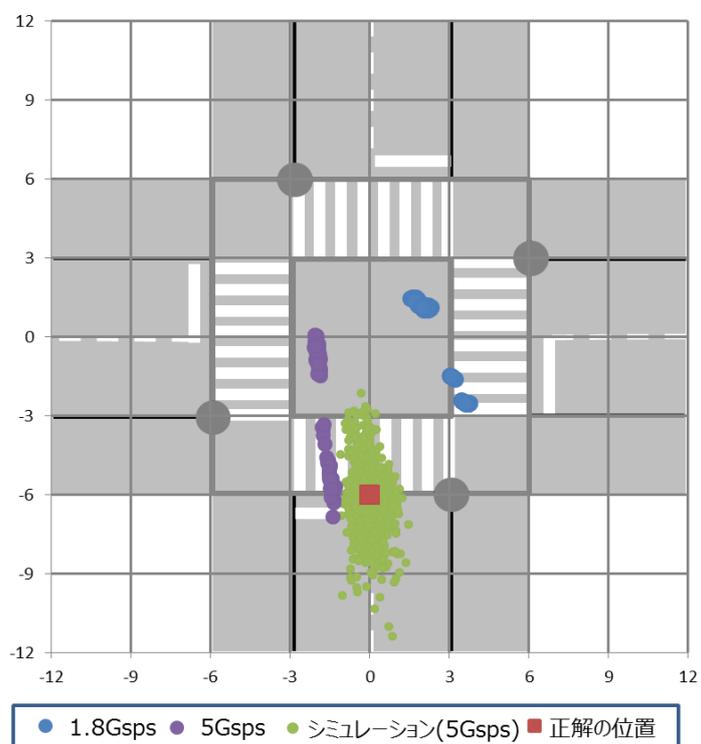


図 5.3-25 : 屋内、測位ポイント 6 の結果

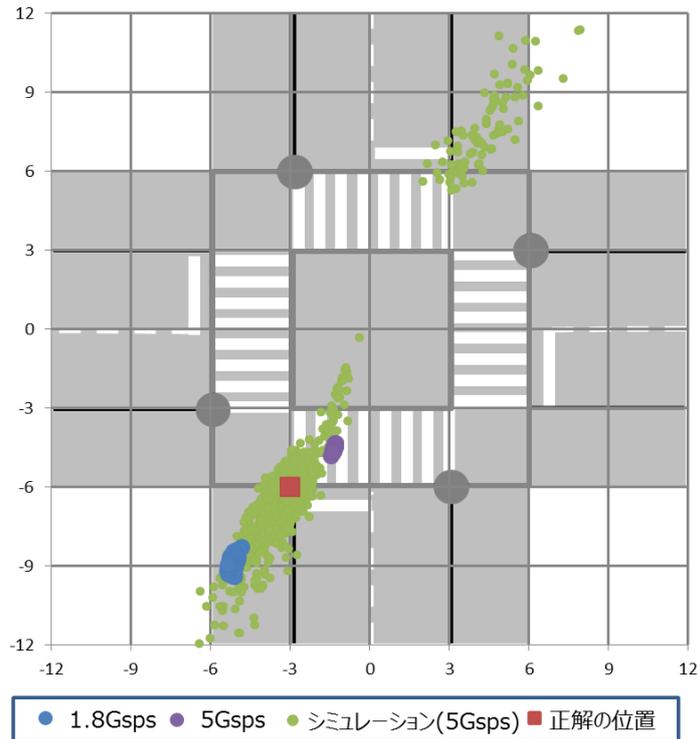


図 5.3-26 : 屋内、測位ポイント 7 の結果

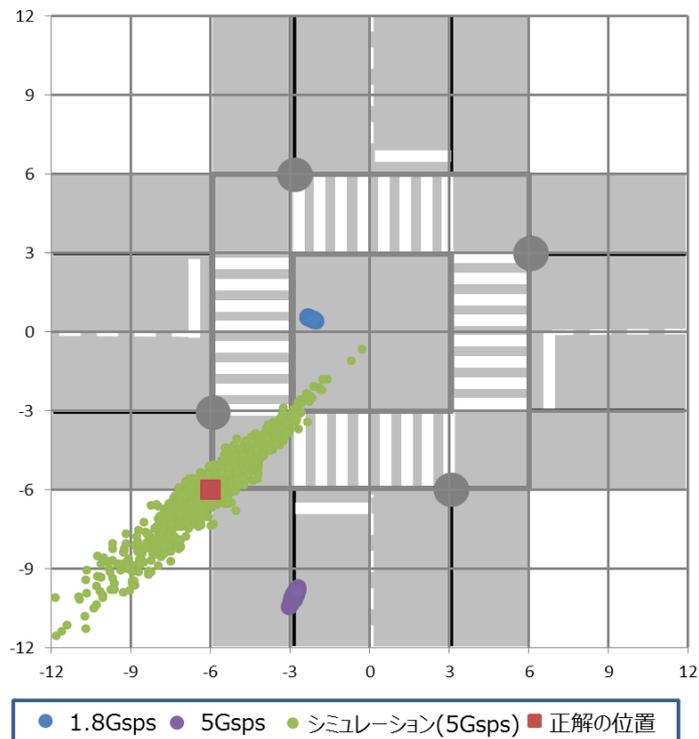


図 5.3-27 : 屋内、測位ポイント 8 の結果

5.3.4. 固定した条件での結果のまとめ

グラウンドとテストコースの結果を表 5.3-1 にまとめる。

グラウンドにおける実機の結果は、同条件を模擬したシミュレーションの結果より良いものとなった。これは、5.3.5項で後述するが、シミュレーションでは2波の位相をランダムに回転させることで、推定位置を網羅的に把握することを目的としたため、TDOA方式の特徴である、著しく離れた場所に推定される現象が再現されたが、実機ではその状況にはならず、比較的、測位誤差が少ない状況での測位に留まったためと考えられる。

テストコースの結果は、近傍にフェンス等の反射物などがあり、マルチパスの影響を受けるため、グラウンドの結果より測位精度が劣化すると考えられる。ただし、シミュレーションとの傾向は同じであり、テストコースは路面反射の影響が支配的な環境であると考えられる。

表 5.3-1：グラウンドとテストコースの結果のまとめ

測定ポイント	グラウンド の測位誤差[RMS]		テストコース の測位誤差[RMS]		シミュレーション(2パス) の測位誤差[RMS]
	1.8Gbps	5Gbps	1.8Gbps	5Gbps	5Gbps
1	0.34	1.18	3.74	7.56	7.71
2	1.06	1.19	4.18	2.11	3.00
3	1.44	1.36	0.68	2.08	2.00
4	1.25	0.89	5.51	1.05	2.39
5	3.65	6.27	2.75	4.80	3.56
6	3.28	1.50	4.46	3.48	1.29
7	1.49	1.89	4.63	4.45	5.38
8	0.85	0.90	3.45	4.11	3.26
全体	2.00 [m]	2.54 [m]	3.93 [m]	4.16 [m]	4.06 [m]

屋内での実機の結果は、路面反射モデル(2パスモデル)のシミュレーション結果より悪く、マルチパスモデル(3パスモデル)のシミュレーション結果より良いものとなっている。路面反射だけでなく、マルチパスの影響を受けるため、路面反射モデルのシミュレーション結果より悪くなるが、マルチパスの環境は複雑であり、同実験環境を再現するためには、レイトレース法などを用いた伝搬環境の精緻化が必要であると考えられる。

表 5.3-2：屋内の結果のまとめ

測定ポイント	屋内の測位誤差 [RMS]		シミュレーション(2パス) の測位誤差[RMS]	シミュレーション(3パス) の測位誤差[RMS]
	1.8Gbps	5Gbps	5Gbps	5Gbps
1	3.99	4.05	7.71	11.1
2	1.60	1.84	3.00	9.7
3	0.22	3.27	2.00	3.3
4	2.91	8.92	2.39	5.2
5	9.15	6.17	3.56	14.1
6	6.72	4.60	1.29	11.4
7	3.53	2.24	5.38	9.4
8	7.52	5.21	3.26	11.8
全体	5.31 [m]	5.02 [m]	4.06 [m]	10.1 [m]

次に、サンプリング速度が 5Gps における測位ポイント 4 及び測位ポイント 8 の測位結果の比較について、図 5.3-28 及び図 5.3-29 に示す。いずれの図もグラウンド及びテストコースにおいては、実機の結果はシミュレーションにより推定される測位結果上にほとんどがプロットされる。これは 2 パスモデルのシミュレーションにより実機の環境が再現できていることを意味する。すなわち、シミュレーションで適用した路面反射モデルが実機の環境と一致することから、誤差の要因は、路面反射の影響が支配的であると考えられる。路面反射による誤差は、4.2.2 項に示すシミュレーションの結果から、伝搬路推定アルゴリズムを適用することで除去することが可能であると判断でき、伝搬路推定アルゴリズムの適用により、実機でも同様の改善が見込めると判断できる。

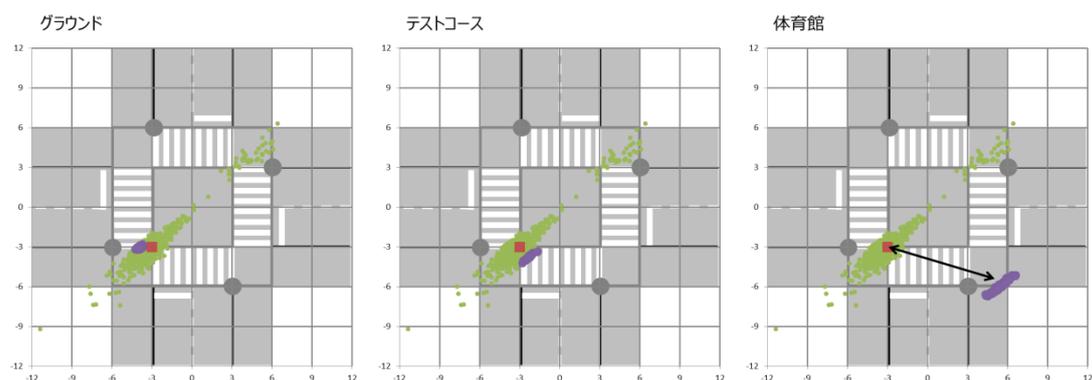


図 5.3-28 : 5Gps、測位ポイント 4 における測位結果の比較

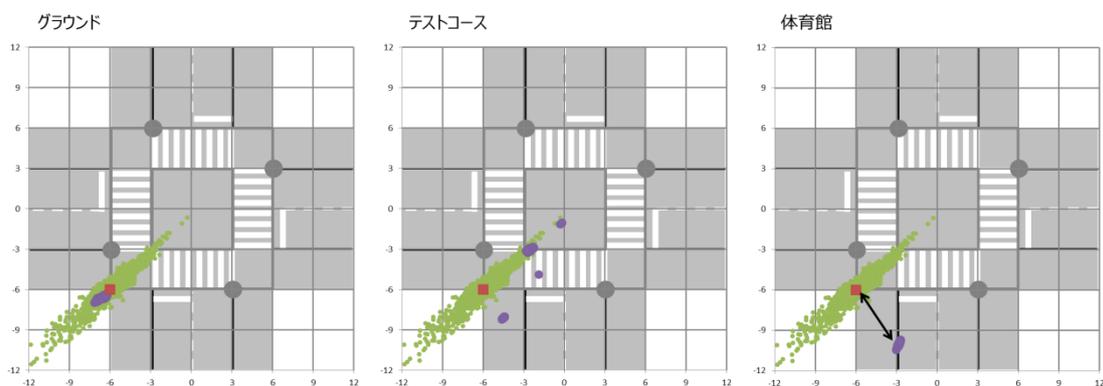


図 5.3-29 : 5Gps、測位ポイント 8 における測位結果の比較

5.3.5. 歩行時の測位の結果

テストコースにおいて歩行時の測位を行った。図 5.3-30 に歩行時の測位と歩行ルートについて示す。測位対象エリアの外部を起点とし、終点までの 18m を等速で歩行する。歩行時の測位の結果について図 5.3-31 から図 5.3-38 に示す。縦軸と横軸の単位は m である。

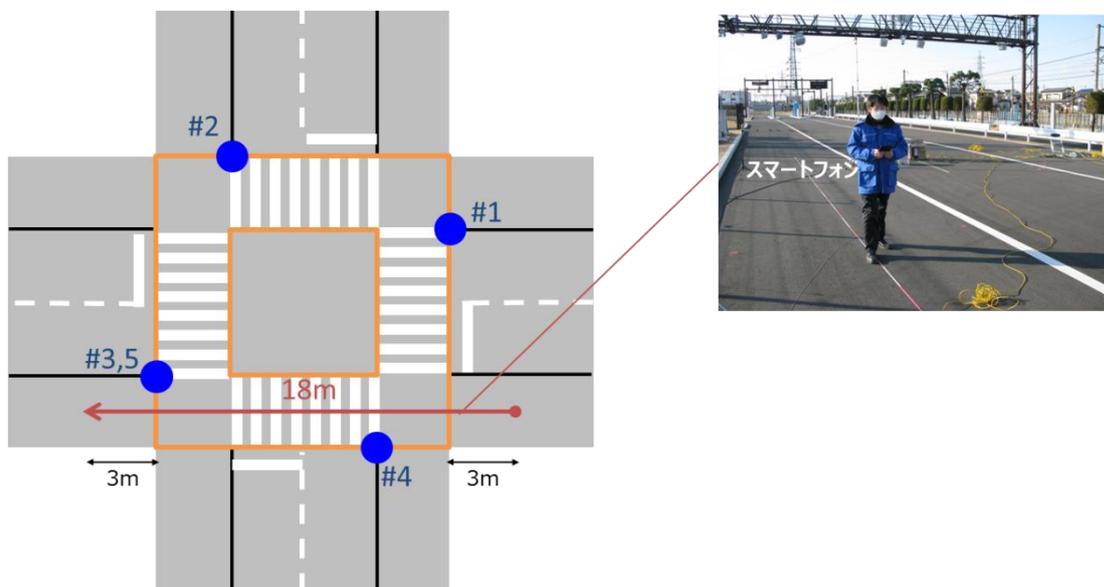


図 5.3-30 : 歩行時の測位

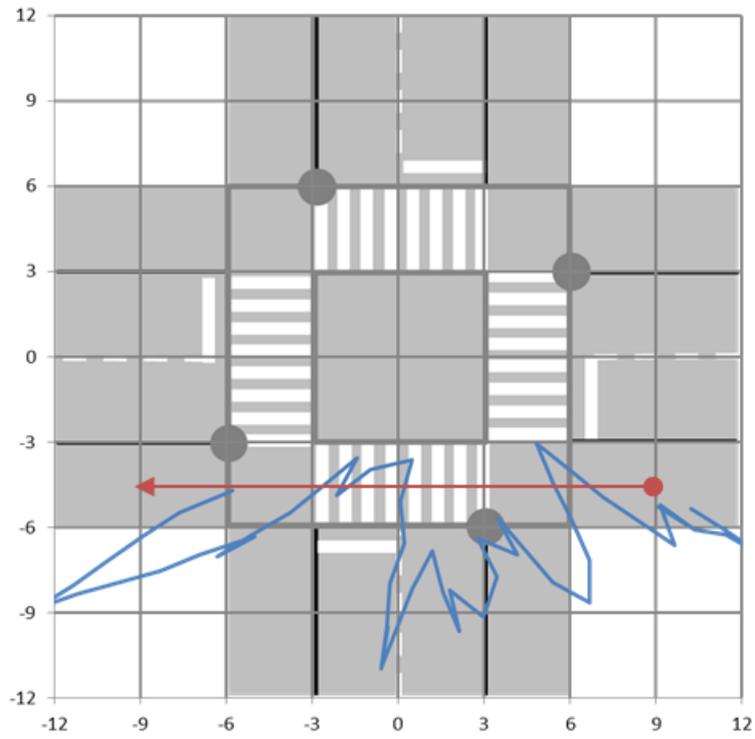


図 5.3-31 : 歩行時の測位結果 (1.8Gbps) の例 1

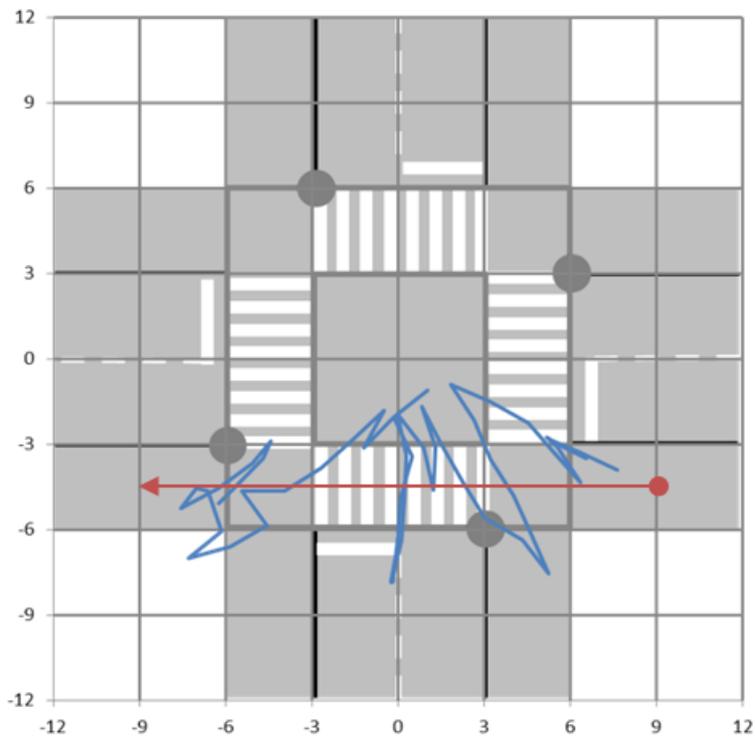


図 5.3-32 : 歩行時の測位結果 (1.8Gbps) の例 2

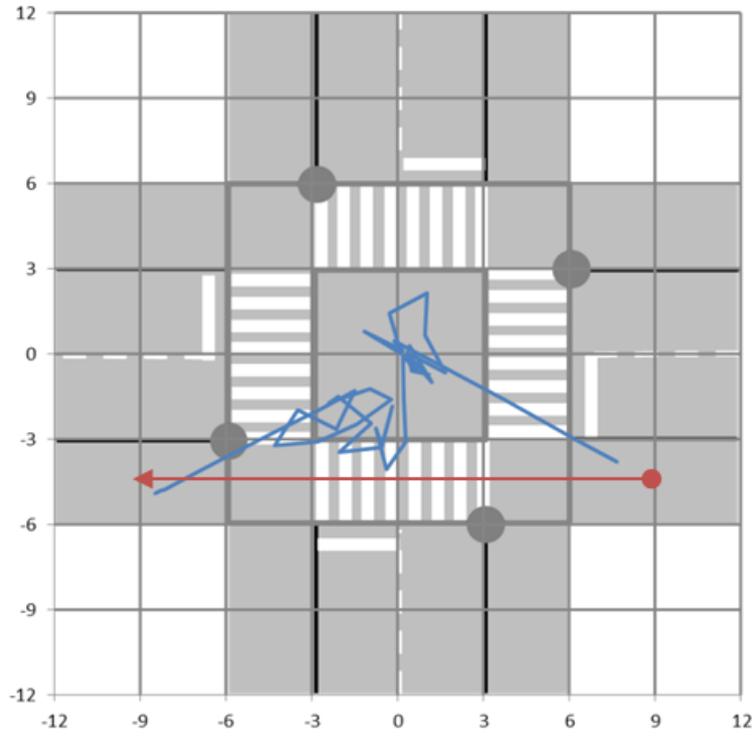


図 5.3-33 : 歩行時の測位結果 (1.8Gbps) の例 3

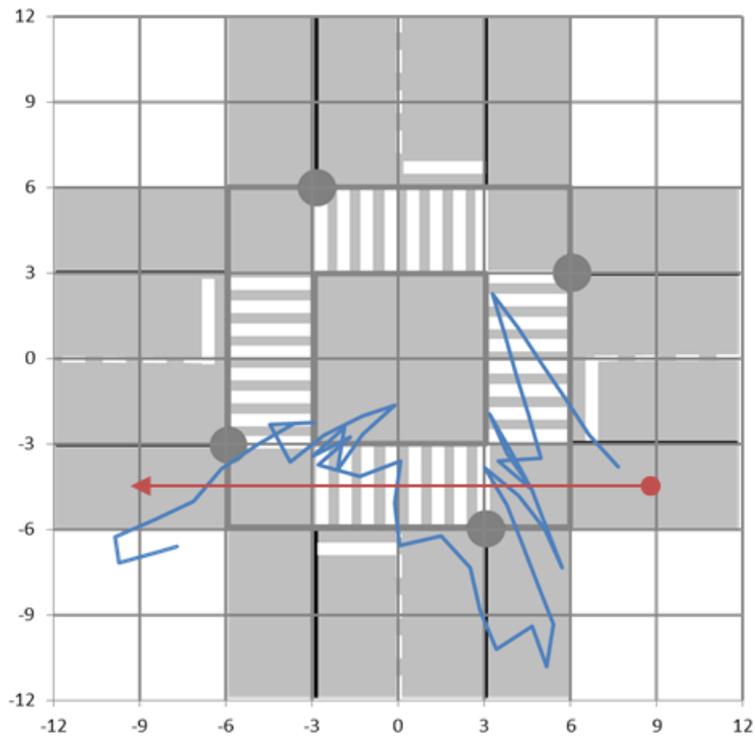


図 5.3-34 : 歩行時の測位結果 (1.8Gbps) の例 4

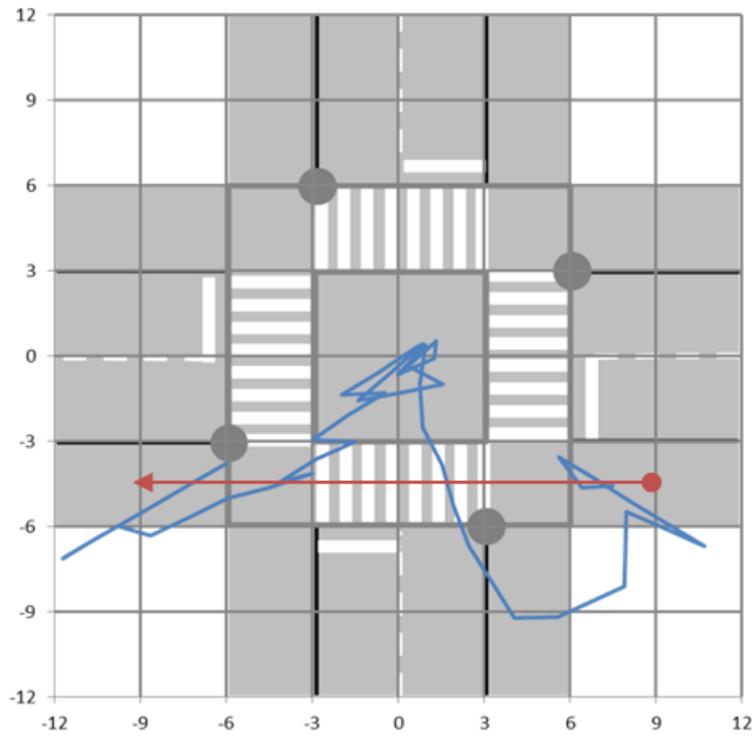


図 5.3-35 : 歩行時の測位結果 (5Gbps) の例 1

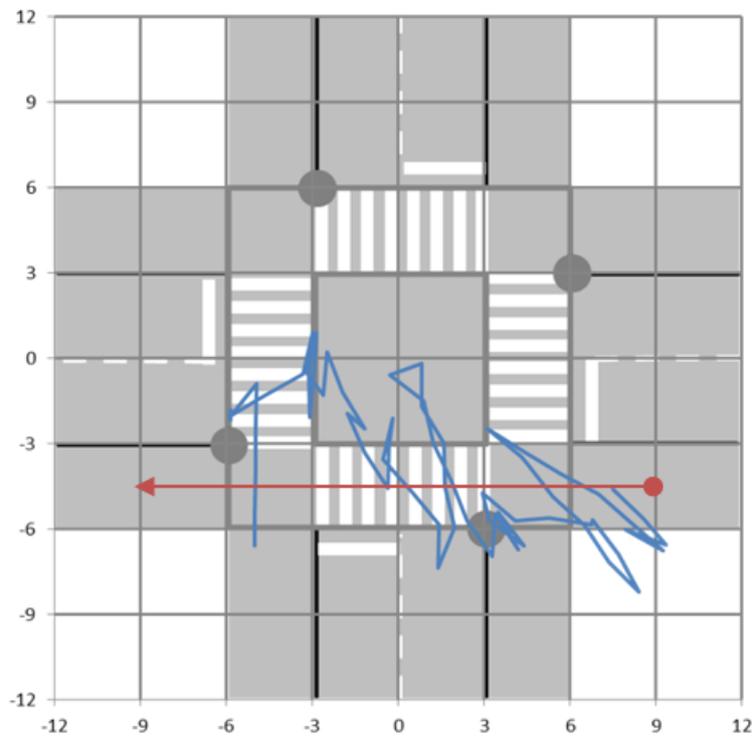


図 5.3-36 : 歩行時の測位結果 (5Gbps) の例 2

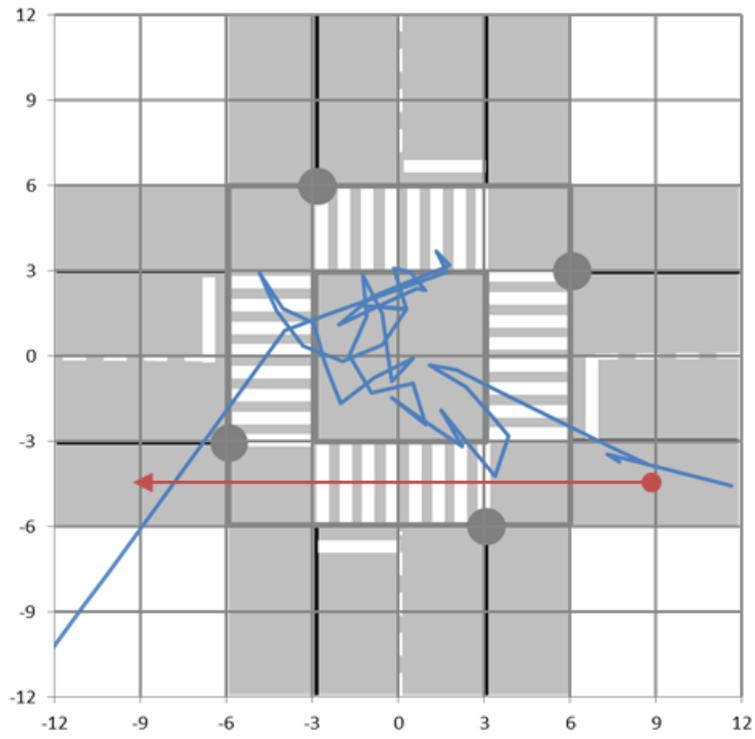


図 5.3-37 : 歩行時の測位結果 (5Gbps) の例 3

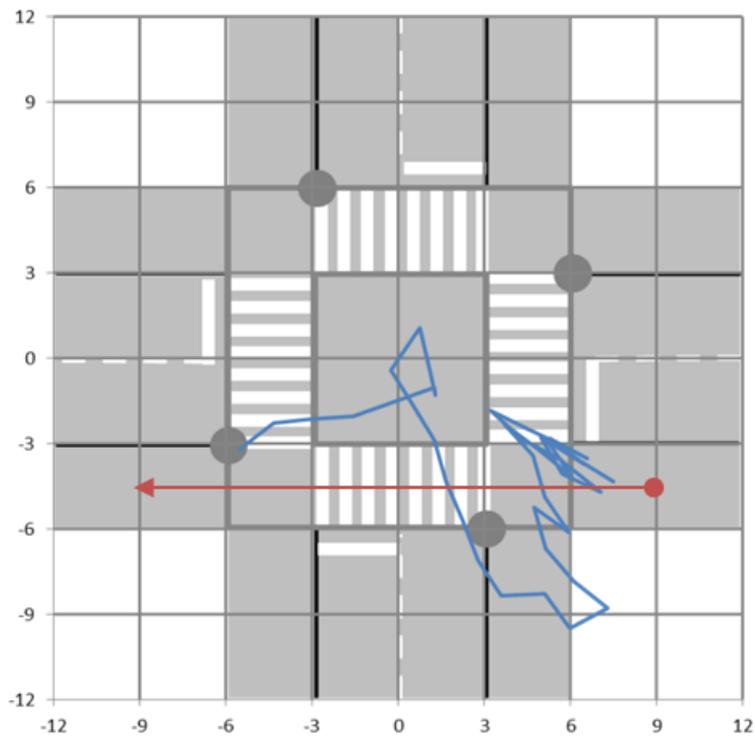


図 5.3-38 : 歩行時の測位結果 (5Gbps) の例 4

歩行ルートに対して、軌跡の概形が振動する結果となることが確認できる。距離差（時刻差）に誤差があるときに、TDOA方式の連立方程式を解くと、測位結果が著しく離れた場所に推定されてしまうことがある。図 5.3-39 は定点測位した場合のシミュレーションの結果であり、青の枠で囲った領域は測位結果が著しく離れた場所に推定される例である。これは TDOA 方式の特徴であり、軌跡が振動する原因となる。

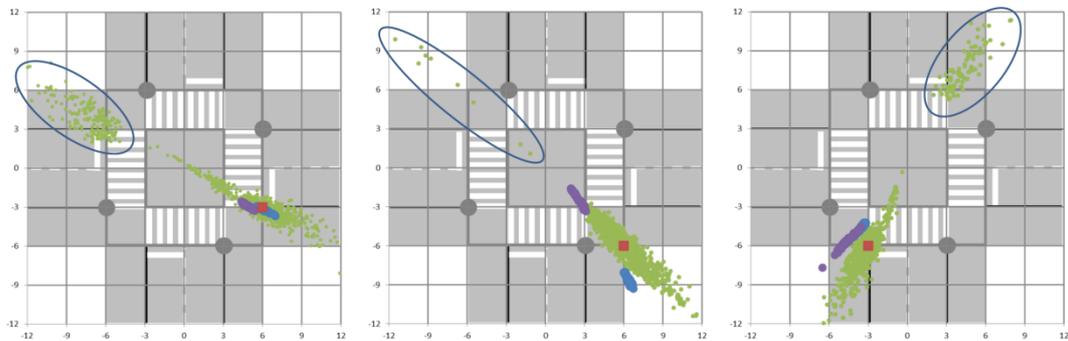


図 5.3-39：著しく離れた場所に推定される例（シミュレーション）

ただし、実際の歩行を考慮すると、単位時間での移動範囲は限定されるため、現在位置から著しく離れる推定結果はフィルタリングできると考えられる。すなわち、事前の位置(過去の情報)を考慮し、次の位置を推定する測位アルゴリズムは測位精度の改善に有効であり、検討を進める必要がある。

次に、10回歩行したデータをもとに、測位誤差を、歩行の位置毎(1m 間隔)で分類し、位置毎で平均値を集計した結果を図 5.3-40 に示す。歩行者は等速移動を前提とし、歩行時のデータ取得時刻と歩行速度から正解位置を計算し、測位誤差は正解位置と測位した位置との RMS 誤差として算出した。

測位対象区間における測位誤差の平均値は 1.8Gbps で 3.94m、5Gbps で 4.81m となった。これは、固定した条件における 1.8Gbps で 3.93 m、5Gbps で 4.16m と同等の結果である。

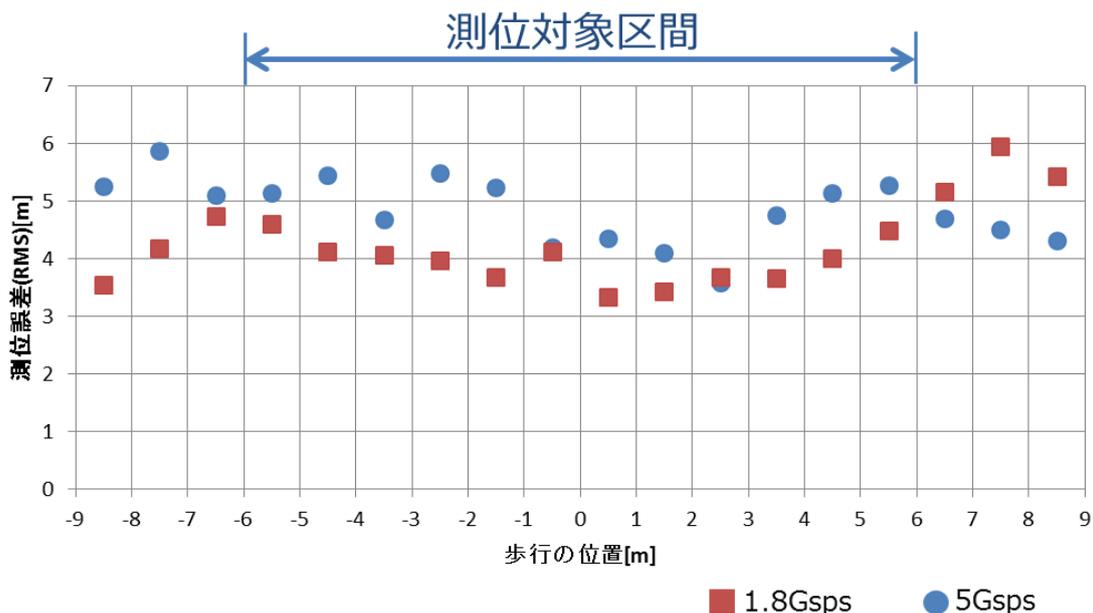


図 5.3-40 : 歩行位置における測位誤差 (測位誤差の区間毎の平均値)

5.4. 技術的条件の見直し

距離差 (時刻差) に誤差があるときに、TDOA 方式の連立方程式を解くと、測位結果が著しく離れた場所に推定されてしまうことがある。これは TDOA 方式の特徴である。ただし、実際の歩行を考慮すると、単位時間での移動範囲は限定されるため、現在位置から著しく離れる推定結果はフィルタリングできると考えられる。すなわち、事前の位置(過去の情報)を考慮し、次の位置を推定する測位アルゴリズムは測位精度の改善に有効であり、検討を進める必要がある。

本実験結果により、路面反射の影響が大きく、さらに、マルチパスの影響が測位に大きく影響することを確認した。したがって、伝搬路推定アルゴリズムを適用し、路面反射対策及びマルチパス対策を施すことが必須であることが明らかとなった。

これらの結果は、本実験により確認できた事項であり、当初の技術的条件を見直す必要がある。伝搬路推定アルゴリズムと、過去の結果を考慮する測位アルゴリズムの導入が必須であることを新たに技術的条件に加える。

表 5.4-1 : 新たに追加する技術的条件

条件	値
伝搬路推定	必要
過去の結果を考慮する測位アルゴリズム (例えば、平均化处理)	必要

5.5. 実機による性能評価のまとめ

本実機評価では、小規模交差点を想定し、グラウンド、テストコース及び屋内における測位環境で測位実験を行った。

グラウンドでの実験は、理想的なオープンフィールドを想定し、同条件を模擬した路面反射モデルのシミュレーションと比較することで、装置の正常な動作を担保し、シミュレーション結果を踏まえた実機の妥当性を確認することを目的とした。実機の結果により、シミュレーションにより推定される測位結果の位置上にほとんどがプロットされることを確認した。これは2パスモデルのシミュレーションにより実機の環境が再現できていることを意味し、想定通りの結果となることから、実機の結果は妥当であると判断できる。

また、テストコースの実験は、グラウンドに比べて、より実践的なオープンフィールドを想定し、理想的な環境であるグラウンドとの差を確認することを目的とした。ビルなどの遠方の建物によるマルチパスは生じないが、オープンフィールドでありながら、近傍のフェンスなどの金属による反射は生じる環境を想定したところ、その影響によりグラウンドより平均測位誤差が大きくなる結果となった。

さらに、屋内の実験は、次年度の検討対象であるマルチパス環境を想定し、マルチパスの影響を本年度のうちに確認しておくことを目的としたが、実験結果は、路面反射モデルのシミュレーションの結果と比べ、プロットされる位置において乖離したデータが目立つようになった。屋内は路面反射だけでなく、屋内の壁から反射するマルチパスの影響を受けるため、路面反射モデルによるシミュレーション結果と一致しないためであると考えられる。

表 5.5-1：結果のまとめ

測位場所	測位への影響		備考
	路面反射	マルチパス	
グラウンド	大	小	2パスモデルのシミュレーションと精度よく一致
テストコース	大	中	グラウンドよりマルチパスの影響を受けるが、支配的なのは路面反射
屋内	大	大	路面反射及びマルチパスのいずれも受ける

本実験を行うことで、測位性能に路面反射は大きく影響し、さらに、屋内での実験結果から、マルチパスも大きく影響することを確認し、性能改善のためには、伝搬路推定アルゴリズムを適用し、路面反射対策及びマルチパス対策を施すことが必須であることを明らかにした。

歩行の実験では、全10試行における測位誤差の平均値は1.8Gspsで3.94m、5Gspsで4.81mとなった。距離差（時刻差）に誤差があるときに、TDOA方式の連立方程式を解くと、測位結果が著しく離れた場所に推定されてしまうことがある。ただし、実際の歩行を考慮すると、単位時間での移動範囲は限定されるため、現在位置から著しく離れる推定結果はフィルタリングできると考えられる。すなわち、事前の位置(過去の情報)を考慮し、次の位置を推定する測位アルゴリズムを適用することが必須であることを明らかにした。

6. 考察

これまでのシミュレーション及び実機による性能評価では、固定局の位置が正確にわかっている（測量できている）等の理想的な条件のもと実施したが、実際の利用を想定すると、固定局位置の測量誤差等の劣化要因が発生する。

また、マルチパス環境を想定したシミュレーション及び実機による評価結果は、ともに目標測位精度を達成しておらず、本調査検討で検討した対策技術のさらなる追加・改良が必要である。

本章では、検討した測位方式自体で発生する誤差以外の誤差要因を抽出、分析し、実運用時のシステム全体の測位誤差精度の見積りを行う。さらに、次年度以降のマルチパス環境を想定した本格的な評価、検討に先立って、マルチパス環境における測位精度劣化に対する対策技術案の抽出と、それらの改善効果の見積りを行う。

6.1. 誤差要因の抽出

本調査検討において評価分析したノイズやマルチパスの影響による測距誤差によって生じる測位方式自体の測位誤差以外の誤差要因としては以下のものが想定される。

① 固定局設置位置の測量誤差

本検討システムは、固定局設置位置と固定局までの電波の到達時間をもとに測位を行うため、既知とする固定局の設置位置が正確に取得（測量）できていないと、測位誤差が増大する。

固定局設置位置の測量方法及びその誤差の検討が今後必要であるが、2.2.2 節における有識者の指摘事項を踏まえて、高精度地図の位置情報と同様に MMS を用いて固定局の位置情報を取得できる場合を想定すると、固定局設置位置の測量誤差は高精度地図の各種位置情報と同程度の 25cm 程度となる。

一方、表 4.1-13 に示したように、固定局を基準となる横断歩道のすぐ外側に設置した場合、水平方向の DOP は 13 程度となる（場所率 90%）。

以上より、4.1 節に示した、測位誤差 $\sigma_p = \text{DOP} \times \sigma_d$ を用いて、本誤差要因に対する測位誤差を見積もると、 $13 \times 25\text{cm} = 3.25\text{m}$ となる（固定局設置位置の測量誤差は測距誤差として影響）。

本誤差要因に対する誤差の低減方法（案）としては、

- 固定局の設置位置を基準位置よりも外側に設置することで DOP を小さくする
本誤差要因に対する対策としては、すでに挙げている固定局の設置位置の見直し（調整）が有効である。表 4.1-13 に示したように、固定局の設置位置を見直すことで、上記のように 13 であった DOP が 4 まで減少し、測位誤差は 1m に低減することが可能となる。さらに数 m 外側に固定局を設置することで DOP は 3 以下となり測位誤差は 75cm 程度まで低減できる。

上記の対策を適用する際の課題としては、固定局間の見通し確保、移動局からのフレームの受信電力の確保、エリア拡張による大型車等によるシャドウイング発生率の増加等が挙げられる。これらの対応も含めて、今後は固定局台数を最小である 4 台から増加させた場合の検討が必要である。

- 歩行者の測位結果と合わせて通知先である自動走行車の測位結果を送信することで、自動走行車側が自律系による測位結果を用いて補正する
本対策を適用する際の課題としては、自動走行車も無線 LAN 通信が可能である必要がある点、歩行者と自動車の測位を行うタイミングが異なることによる新たな誤差要因への対応検討が必要である、等が考えられる。

② 歩行状態の急激な変化による誤差

本検討における対策技術の一つである測位結果の平均化処理は過去の情報も用いて現在の測位精度の向上を行っている。フレームの送信周期 100ms に対して 25 回の平均化処理を行っているため、過去 2.5s 以内の情報を用いている。

したがって、歩行中の急な停止や方向転換等の歩行状態の急激な変化に対して、測位誤差は発生する。例えば、上記の条件による平均化処理を用いて、1.4m/s の歩行状態から急に停止した場合、最悪 $1.4\text{m/s} \times 2.5\text{s} = 3.5\text{m}$ 程度の測位誤差が発生する。

本誤差要因に対する誤差の低減方法（案）としては、

- フレームの送信周期の短縮や平均化回数の減少

フレーム送信周期や平均化処理における平均化回数を小さくすることで、測位誤差は低減できる。例えば、送信周期を 100ms から 10ms、平均化回数を 25 回から 5 回に変更できたとすると、誤差 7cm まで低減できる。

上記の対策を適用する際の課題としては、フレーム送信周期短縮にともなう測位演算処理等の高速化や歩行者台数増加（通信トラフィック増加）時の通信品質（測位品質と同じ）の確保や、平均化回数減少にともなう検討方式自体の測位精度低下をカバーする方法の追加検討、等が挙げられる。次年度以降の複数の歩行者がいる場合の検討、評価や他の対策技術による更なる検討が重要となる。

- 測位結果の平均化処理の見直し

カルマンフィルタ等の歩行や静止状態への追従を想定した方式の検討が必要である。

③ 風等による固定局アンテナの振動による誤差

風や大型車両通過時の振動によって固定局アンテナが振動することで、測位誤差が増加する。

振動時の振動幅や周期の詳細な調査、検討が今後必要となるが、上記①のようにオフセットして常に乗るものではなく、正しい位置を中心に短時間で振動することによる誤差であるため、既に検討した平均化処理により、十分に低減可能であると考えられる。

④ 測位演算、無線通信の遅延による誤差

歩行者からのフレームを受信した後、測位の演算を行い、さらにその後無線通信によって時間をかけて自動走行車へ歩行者がフレーム送信したときの位置を推定、通知するため、自動走行車が測位結果を受け取った時点の歩行者位置との誤差が生じる。例えば、送信周期 100ms、歩行速度 1.4m/s から測位誤差を計算すると 14cm 程度となる。

誤差を低減する方法（案）としては、送信周期及び測位演算処理の高速化や、測位結果とあわせて歩行軌跡（もしくは速度）を自動走行車へ伝え、それらの情報をもとに受信時の歩行者位置を推定（補正）する方法等が考えられる。

例えば、送信周期を 100ms から 10ms に短縮した場合の測位誤差は 1.4cm に低減できる。

以上より、検討方式自体の測位精度が目標精度 10cm を達成した場合の上記誤差要因①、②、④による測位誤差を含めたシステム全体の測位誤差は、

- ・低減方法なし： $10\text{cm} + \textcircled{1}3.25\text{m} + \textcircled{2}3.5\text{m} + \textcircled{4}14\text{cm} = 6.99\text{m}$
- ・低減方法あり（目標）： $10\text{cm} + \textcircled{1}75\text{cm} + \textcircled{2}7\text{cm} + \textcircled{4}1.4\text{cm} = 93.4\text{cm}$

となる。

以上より、測位方式としての目標測位精度 10cm を達成し、かつ誤差要因の低減方法を検討、追加適用することで、測位誤差は 1m 以下となり、現在のローカル RTK を利用した GNSS 測位の測位精度 1~2m と同程度の精度を実現できることが分かる。

6.2. マルチパス対策技術の検討

シミュレーション及び実機による評価結果より、マルチパスの発生する環境を想定したときの測位誤差は 10m 程度となり、本調査検討における伝搬路推定（2パスモデル）及び平均化処理の対策技術を適用することで測位誤差は 1/100 程度低減し、目標精度 10cm 程度と同程度となることが分かった。

しかしながら、変動マージンを考慮した際には十分な性能とは言えず、さらなる対策技術の検討が必要である。

以下に、追加改良の対策技術（案）と、その改善効果の見積り結果を示す。

① 伝搬路推定方法の改良（拡張）

本調査検討における 2パスモデルを想定した伝搬路推定により、支配的な路面反射波の影響はある程度除去できるが、それ以外のマルチパス（遅延波）の除去は十分でない。

そのため、3波以上のパスを想定した伝搬路推定方法を検討、評価する必要がある。本調査検討で用いた 3波のマルチパスモデルに対して、3パスモデルの伝搬路推定を適用すると、2パスモデルの伝搬路推定を用いた場合の測位誤差よりも 1/2 程度に誤差が低減可能なことがシミュレーション評価により確認できた。

② アダプティブアレーアンテナ機能の追加

本調査検討では無線 LAN 規格として IEEE802.11g/a を想定したが、IEEE802.11n 等の適用を想定すると、固定局側でアレーアンテナの利用が可能となる。

現在の 11n のアレーアンテナの実力（ゲイン約 7dB アップ、干渉抑圧 15dB 程度）を想定すると、シミュレーション評価により、1/3 程度の誤差低減効果が確認できた。

以上より、マルチパスの発生する環境における対策技術（案）の抽出とその効果見積りができ、目標精度 10cm を達成することが期待できることが確認できた。

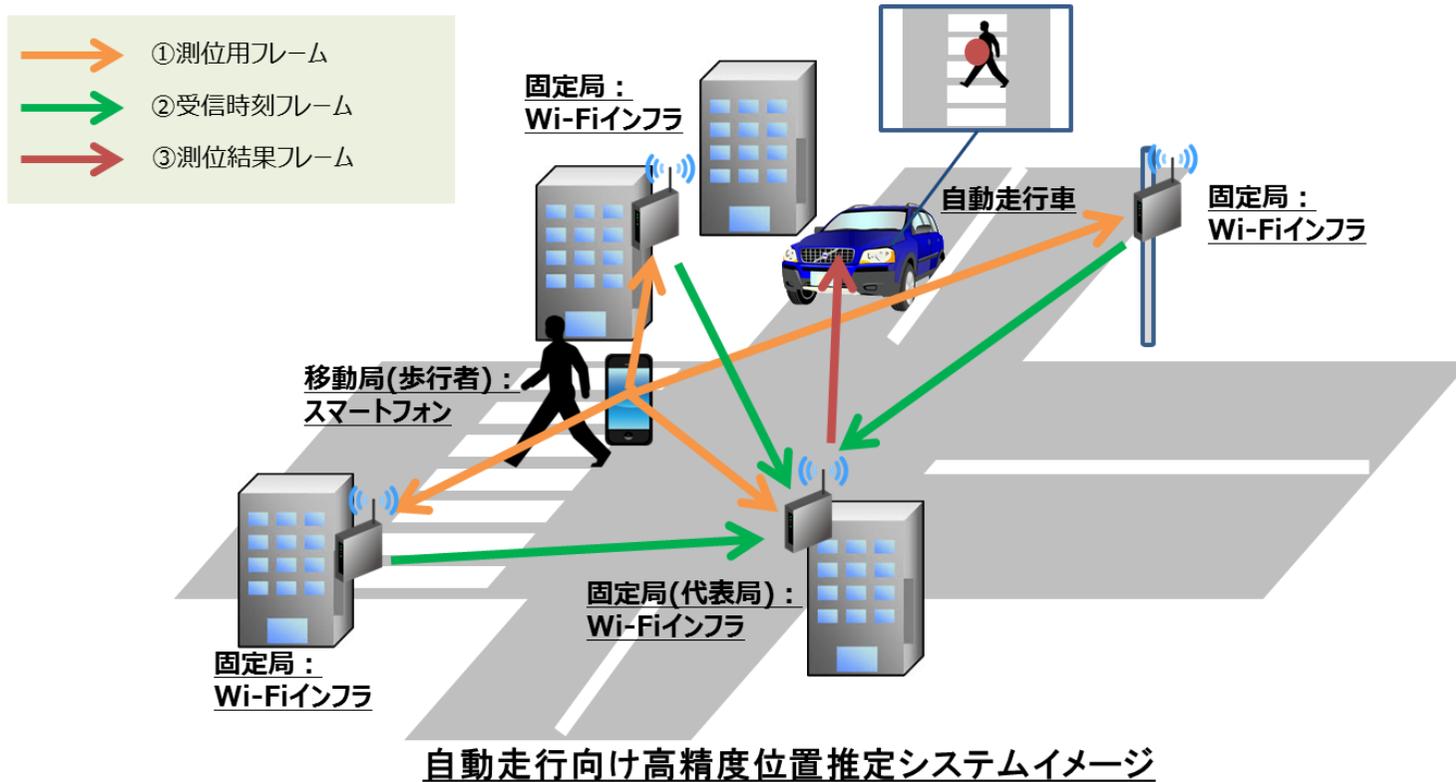
7. まとめ

7.1. 成果まとめ

7.1.1. 全体

- 一般道における自動走行向け高精度歩行者測位、特に衛星測位精度が劣化するビル街の交差点をターゲットとし、理想的な通信状況（オープンエリア）における無線通信及び測位のプロトコル仕様案を検討、まとめを実施した。
 - 検討したプロトコルの測位性能を計算機シミュレーション及び実機評価により明らかにした。
 - 上記測位性能評価より、目標測位精度 10cm を満足するための条件を明らかにした。その際、想定環境（オープンエリア）における課題を抽出し、対策技術を検討、評価した。
- 目標性能を満足するための条件を分析できた。これをもとに無線通信及び測位のプロトコル仕様（案）とともに技術的条件としてまとめた
- 今後は、実環境におけるマルチパスの影響を加味した方式検討を実施し、他の測位システムの補完技術の一つとして各種フィールド検証に展開を図る。
 - マルチパス対策技術の検討、評価
 - 検討プロトコルの実機への実装（処理速度の向上等）
 - 実環境における検証

以下に、本検討システムの基本構成、特徴とプロトコル仕様案、技術的条件を示す。



- ①移動局(歩行者)：スマートフォンより周辺の固定局(4台)へフレームを送信
- ②固定局：①の受信時刻を固定局(代表局)へ通知
- ③固定局(代表局)：②より固定局間の受信時刻差を算出し、移動局の位置を推定。測位結果を自動走行車へ通知

図 7.1-1：自動走行向け高精度位置推定のシステム構成イメージ

表 7.1-1：高精度位置推定システムの特徴分析（他の測位システムとの比較）

測位精度10cm程度(GNSS目標)、エリア40m程度(大規模交差点想定)、利用形態(屋外)に対して、従来測位システムを比較

システム	概要	課題、対策技術、等	性能判定
検討システム	<ul style="list-style-type: none"> 既存Wi-Fiスポットの活用により設置コスト低 IEEE標準化に合わせて高速処理可能なチップが搭載されたWi-Fiに移行する方向 目標測位精度：10cm程度 	<ul style="list-style-type: none"> マルチパス対策技術 高速サンプリング技術 測位性能に対するインフラ機器の条件抽出 	—
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> 準天頂等の衛星数増加、RTK利用等により測位精度10cm程度を目指す 	<ul style="list-style-type: none"> ビル街、高架下等の不感／マルチパス発生地帯での測位不可／精度低下 	—
リピーター	<ul style="list-style-type: none"> 衛星を補足できる場所にリピーターを設置、同軸ケーブル経由で中継／再放射 測位精度：10～100m程度(測位結果＝リピーター設置位置) 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内利用が基本 同軸ケーブルの設置工事が必要 	×
スードライト(擬似衛星)	<ul style="list-style-type: none"> 衛星に類似した信号を送信するスードライトを設置し、GNSSと同様の測位を行う 測位精度：数～10m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 遠近問題(擬似衛星からの電波が強すぎて衛星からの信号を受信できず) 高精度な時刻同期の仕組みが必要 	△
IMES	<ul style="list-style-type: none"> IMES送信機を設置し、IMES送信機に設定された位置情報を使って位置を推定 測位精度：10m程度(測位結果＝IMES設置位置) 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内利用が基本 IMES対応の受信端末が必要(一部スマホが対応) 	×
BLE	<ul style="list-style-type: none"> 端末－固定局間のパケット受信電力より測位 測位精度：数m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 測位精度のばらつきが大きい 	△
磁気	<ul style="list-style-type: none"> 計測結果を地磁気、建物等の残留磁場による磁気データと比較することにより測位 測位精度：5m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内利用が基本(環境変化に弱い) 利用場所の全地点での磁場データの事前計測が必要 	×
画像認識	<ul style="list-style-type: none"> 参照画像とカメラ撮影した画像の照合により測位 測位精度：数m程度 	<ul style="list-style-type: none"> 逆光等の環境対策 測位エリアが狭く、かつ拡張困難 	△
自律航法	<ul style="list-style-type: none"> ジャイロや加速度センサを用いて測位 測位精度：数m以上 	<ul style="list-style-type: none"> センサーの蓄積誤差の補正技術が追加が必要 	×

表 7.1-2 : プロトコル案のまとめ

項目	仕様	備考
物理層、データリンク層	IEEE802.11g/a	
ネットワーク層、トランスポート層	TCP/IP (UDP)	任意のポート番号を利用
ネットワーク構成	インフラストラクチャ・モード	
アクセス制御方式	CSMA/CA (DCF)	
変調方式	OFDM	
参入の接続手順	パッシブスキャン	
フレームフォーマット	IEEE802.11 及び TCP/IP に従ったフレーム	
フレームタイプ	測位フレーム、測位結果フレーム、受信時刻フレーム、時刻同期フレーム	
通信頻度	100ms 周期以下	一定周期
測位方式 (測距方式)	TDOA 方式	
固定局の設置台数	4 台以上	
測位プロトコルを実装する階層	アプリケーション層	
フレームの検出法	RSSI による閾値判定及びフレームのプリアンブルを利用した相互相関処理	

表 7.1-3 : 技術的条件まとめ (オープンエリア環境)

条件		条件	備考	
通信	通信規格	IEEE802.11g	小規模交差点では IEEE802.11a も利用可能	
	通信頻度	移動局から 100ms 以下の周期でフレーム送信が行われていること		
測位	測距方式	推定方法	・TDOA 方式	距離差を推定
		サンプリング速度	・5Gsps	下限速度に関しては継続評価が必要
	測位方式	伝搬路推定	・必要	オープンエリア環境では路面反射波を考慮した推定が必要
		平均化処理	・必要(25 回以上)	100ms 周期測位の場合、2.5s に相当
設置	固定局	台数	・4 台以上	
		設置位置 (水平)	・測位対象エリアの外側に設置 ・全ての固定局間が見通し内となるように設置 ・測位対象エリア内の移動局と見通し内となるように設置	
	設置位置 (垂直)	・3.5m 以上	異なる高さに設置(1.5m 以上)	

7.1.2. ユースケースの要件抽出

自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースを調査・分析し、高精度位置推定システムの無線通信及び測位に関する要件を抽出した。

【ユースケースの調査】

自動走行向け高精度位置推定システムのユースケースの調査を行い、測位対象や想定環境等を整理した。

測位対象 (例)

- 歩行者
- 自動車 (四輪、二輪、大型)
- 自転車

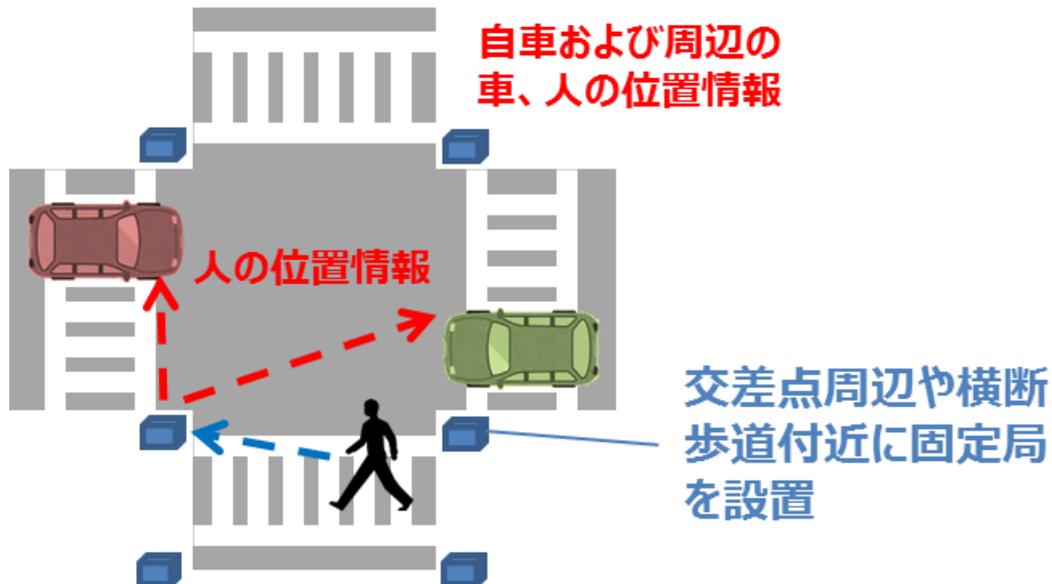
想定環境/場所 (例)

高層ビルが多い都心等のマルチパスにより十分な精度の GNSS 測位が難しい場所や、トンネル、地下駐車場等の衛星を捕捉できない場所

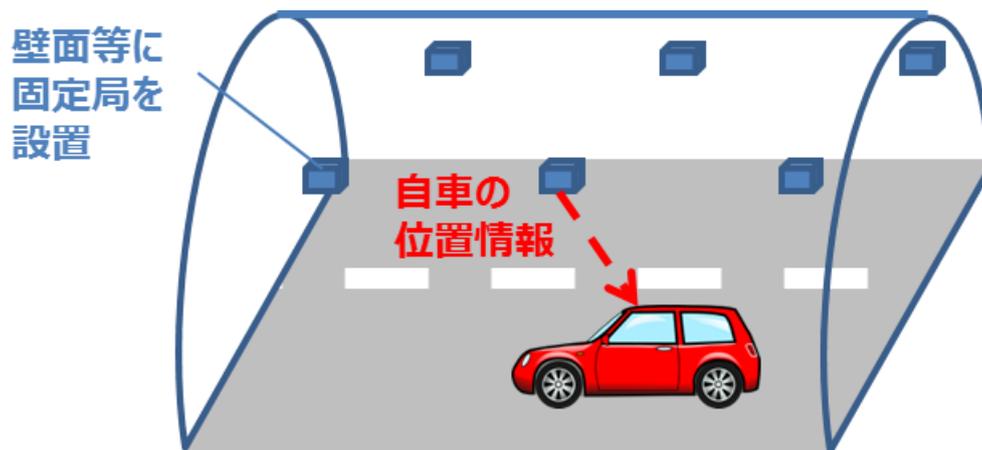
- 高層ビル街
- JCT 等の高架下
- 地下/屋内駐車場
- トンネル

ユースケース (例)

- 高層ビル街、高架下の交差点における横断歩行者との衝突防止
- トンネル内での自動走行支援



a) 高層ビル街、高架下の交差点における横断歩行者との衝突防止



b) トンネル内での自動走行支援

図 7.1-2：自動走行向け高精度位置推定システムのユースケース（例）

【有識者他の指摘事項の整理、活用】

続いて、上記ユースケースの調査検討結果、本調査検討の位置づけ／進め方等に関して、高精度地図を用いた自動走行の有識者（地図構造化 TF）にヒアリングを実施し、本調査検討会及びシステム実用化 WG における指摘事項とともに整理し、以下の対象ユースケースの選定等に活用した。主な指摘事項は以下の通り。

有識者（地図構造化 TF）の主な指摘事項

- 自動走行を行う上で「歩行者の測位精度の向上」が課題
 - 自動車の測位は「高精度地図＋自律系センサ」を用いることで、ある程度の精度は確保可能
- MMS（モバイルマッピングシステム）による固定局アンテナの測位、高精度地図への位置情報追加は可能
 - MMS を用いた高精度地図の精度は 25cm 以下（目標）
 - トンネル等の GNSS 信号が受信できない場所での測量方法／精度確保が課題

本調査検討会における指摘事項

- 「歩行者の測位精度の向上」が課題
 - 都市部における自動車の測位は「トンネル、高架下、高層ビル街の 1 車線道路以外」は、ほぼ問題なし（1～2m の水平精度）

表 7.1-4：自動車の測位精度（例）

ローカル RTK 利用、2~3 車線の車道走行時の実験結果より

環境	測位精度	備考
オープンスカイ	問題なし (100%で cm レベル)	
低中層ビル	ほぼ問題なし (80~90%で cm レベル)	残りを他の GNSS、IMU と速度センサで補完(最大誤差 1m 程度)
高層ビル	RTK 利用により 30~60% 程度で cm レベル	残りを他の GNSS、IMU と速度センサで補完(最大誤差 2m 程度)

- 都市部の歩行者は歩行する場所がビル側でマルチパスの影響が大きくなり精度低下
 - 歩行者に対する IMU（慣性計測装置）や速度センサの利用方法も課題

システム実用化 WG における指摘事項

- 自動走行車は高精度地図及び自律系センサを用いることで必要な測位精度を確保可能

【IEEE802.11az における想定ユースケースの調査】

国外の高精度位置推定システムに関する検討、標準化の一つである IEEE802.11az (Next Generation Positioning) におけるユースケースの検討状況を調査した。

IEEE802.11az において、以下に示すような高精度測位を適用するユースケースが提案されているが、提案されたユースケースの中に、自動走行向けのユースケースは無いことが分かった。

IEEE802.11az は、IEEE802.11 の option 機能として加わった FTM (Fine Timing Measurement) を利用した高精度測位法の検討、規格化を進めており、最短 0.1nsec でタイムスタンプを取得する機能である FTM にスマートフォン等のチップでも対応することを各メーカーが想定していることが分かった。IEEE802.11az の規格化にともない、10Gbps 程度の高速サンプリング対応したチップの開発、普及が期待される。

【対象ユースケースの選定】

上記の調査結果、指摘事項等を踏まえて、本調査検討において対象とするユースケースの選定を行った。

測位対象

有識者等の指摘事項より、自動車は高精度地図と自律系センサの活用により測位精度が確保されており、自動走行を行う上での課題は歩行者の測位精度の向上であるため、本調査検討における測位対象は歩行者とする。

なお、自動走行を行う上で自動走行車周辺の自転車の位置の把握も重要となるが、スマートフォンを活用することで測位を行うことが期待できる点は歩行者と同じであるので、まず歩行者を対象とした調査検討を実施する（自転車の測位の検討は今後の課題）。

想定環境／場所

測位対象を歩行者とすると、前節に挙げた想定環境／場所の中で高層ビル街や高架下の交差点における測位が重要となる。

単路等の交差点以外における歩行者測位も必要であるが、後述の通り交差点における測位に絞り込んでも衝突防止等の自動走行を実現する上での課題解決に十分有効である。

以上より、本調査検討では一般道における自動走行向け高精度歩行者測位、特に衛星測位精度が劣化するビル街の交差点をターゲットとし、「自律センサで検知困難なエリアの歩行者位置情報を自動走行車へ通知する」ユースケースを対象として検討、評価を行うこととする。

続いて、選定したユースケースに対して、交通事故統計をもとに、測位対象エリアの検討を行った。交通事故統計は自動走行車が走行していない現状でのものであり、自動走行車が走行する際に回避すべき事故ケースと同じであるかの検討は継続が必要である（本調査検討では現状で発生している事故と同じような状況が自動走行車にとっても問題となると想定）。

交通事故の調査より、以下のことが分かった。

- GNSS 測位が困難な高層ビル街が多い「市街地」における事故は「交差点」が最も多い
- 「死亡事故」に関しては「人対車両」の事故の構成率が多く、特に「横断歩道（付近）横断中」が多い
- 「横断歩道横断中」と「横断歩道付近横断中」では「横断歩道横断中」の死亡事故が多い

以上のことから、本調査検討では交差点、特に「横断歩道」を測位対象エリアとして検討、評価を行うこととした。

【要件の抽出】

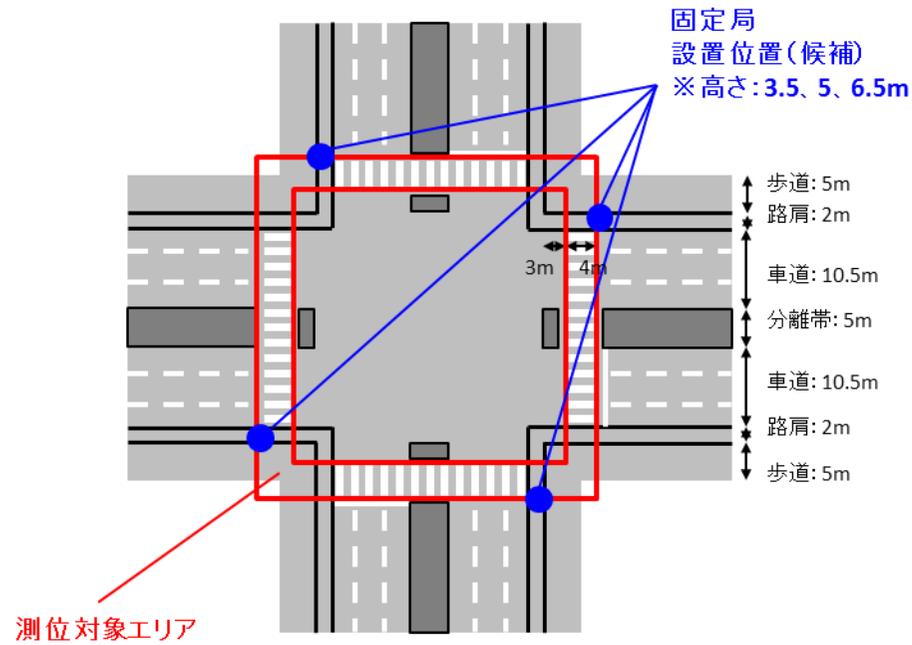
調査、検討結果を踏まえて、本調査検討の対象ユースケースに対する無線通信及び測位に関する要件を抽出した。

表 7.1-5 及び図 7.1-3 に、本調査検討の対象ユースケースである「自律センサで検知困難なエリアの歩行者位置情報を自動走行車へ通知」に対する自動走行向け高精度位置推定システムの無線通信及び測位の要件の抽出結果及び想定する交差点規模と測位対象エリア（横断歩道）を示す。

表 7.1-5：対象ユースケースの要件の抽出結果

方式	項目	値	備考
共通	環境／場所	高層ビル街の交差点	大規模／小規模
	対象エリア	横断歩道	
	測位対象	歩行者	スマートフォンを携帯
	通知先	自動走行車	
無線通信	通信規格	IEEE802.11g/a	2.4GHz 帯／5GHz 帯
	送信頻度	100msec 周期以下	・測位用フレーム ・GNSS 測位周期と同程度を想定
測位	水平測位精度	10cm 以下 @場所率 90%	・測位精度 10cm:GNSS の目標精度 ・場所率 90%:IEEE802.11az の場所率、 インフラレーダーの検出率の同程度を 想定
	垂直測位精度	10cm／1m 以下 @場所率 90%	・測位精度 10cm:同上 測位精度 1m:道路／歩道橋上の歩行 の識別可能 ・場所率 90%:同上
	更新頻度	100msec 周期以下	・GNSS 測位周期と同程度を想定

大規模交差点(片側3車線想定)



小規模交差点(片側1車線想定)

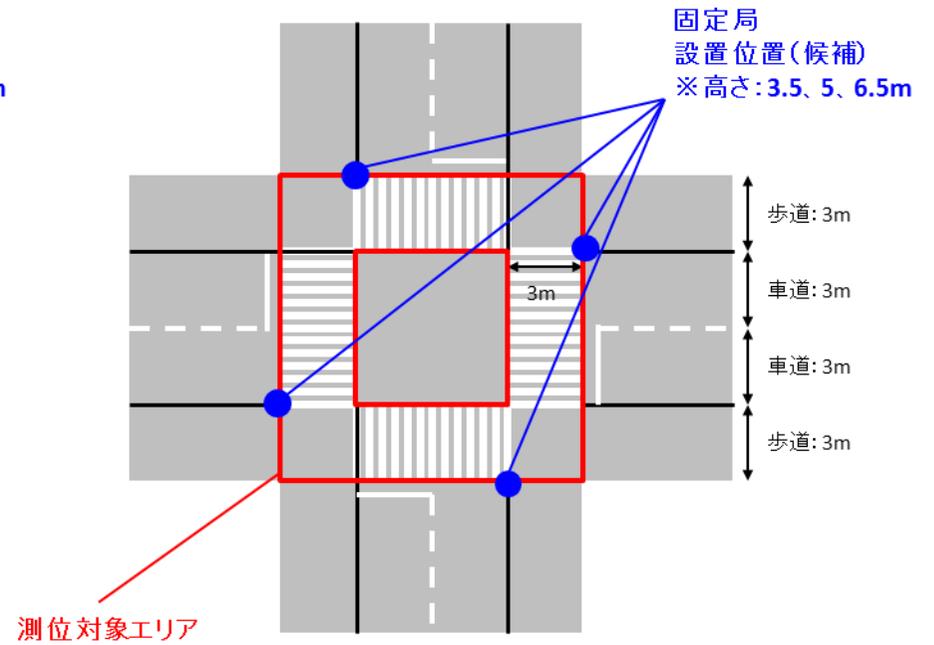


図 7.1-3 : 想定する交差点規模と測位対象エリア (横断歩道)

7.1.3. 無線通信及び測位のプロトコル検討

抽出した対象ユースケースの要件を踏まえて、高精度位置推定を実現するために必要な無線通信及び測位に関する手順、仕様等のプロトコル検討を実施した。

現行の歩行者端末（スマートフォン）等を利用して実現可能とすることを念頭に置き、無線通信プロトコルとしてIEEE802.11及びTCP/IPによるデータ通信を用いた測位手順を規定した。また、インターネットの接続と同じように、TCP/IPプロトコルのアプリケーションの一つとして、本システムのTDOA測位プロトコルをTCP/IPプロトコルの上位であるアプリケーション層に実装するプロトコルスタックとした。

【測位プロトコルの検討】

測位方式として、スマートフォンへの負担が少なく、現行のものでも実現できるTDOA方式を採用した。また、高精度でフレームの先頭時刻を検出するために、RSSIによる閾値判定に加え、フレームのプリアンプルを利用した相互相関処理を実装する。

本調査検討の高精度位置推定システムでは、以下のシステム要件を満たす必要がある。

- ・ 測位誤差 10cm 程度を実現すること
- ・ スマートフォン等の汎用デバイスにより実現できること

これらのシステム要件を考慮し、電波を用いた一般的な測位方式を俯瞰した上で、本システムに適用可能な測位方式を選定した。

測位方式の比較、選定

表 7.1-6 に示すように、電波を用いた測位方式は、受信電力を用いた方式と到来時間を用いた方式に大別できる。いずれの方式も、固定局を設置し、固定局から移動局に電波を送信する、あるいは移動局から電波を受信することで測位を行う。

- RSSI（受信強度：Received Signal Strength Indicator）を用いた方式
 - ・ 到来時間（差）を用いた方法に比べ低コストで実現できるが、電波伝搬の環境によりRSSIは大きく変動するため、測距及び測位精度が低い。
 - ・ 測位精度を改善するためには、固定局の設置台数を増やすなどの対策が必要となり、コストや敷設の条件を考慮する必要がある。
- TOA（到来時間：Time Of Arrival）方式
 - ・ 送信時刻及び受信時刻を高精度で取得するため、高速に動作するADコンバータが必要となる。
 - ・ 本調査検討では、スマートフォン等の移動局が汎用デバイスを利用することを前提とするため、送信時刻を高精度で取得することができない。
- TDOA（到来時間差：Time Difference Of Arrival）方式
 - ・ TOA方式のように到達時間そのものではなく、到達時間差を求めて測位するため、固定局は少なくともTOA方式より1台多くなるが、移動局は送信時刻を正確に取得する必要がない。
 - ・ 移動局は任意のタイミングで電波を送信することができ、それを固定局が受信した時刻により、固定局間の到達時間差を求めることで測位する。
 - ・ 送信時刻を求める必要がないため、スマートフォン等の汎用デバイスを用いたシステムであっても、TDOA方式を実装することが可能である。

以上の観点から、本調査検討では測位方式としてTDOA方式を選定した。

表 7.1-6 : 電波を利用した測位方式

測位方式	測位精度	スマートフォンでの実現
RSSI (受信電力)	×	○
TOA (到来時間)	○	×
TDOA (到来時間差)	○	○

測位の手順

図 7.1-4 から図 7.1-7 に示すように、TDOA 方式を実現するための具体的な測位の手順を検討した。

- (1) 測位フレームの送信
 移動局は代表局である固定局 A に対して測位フレームを送信する。他の固定局 B、C 及び D は、移動局から固定局 A に送信された測位フレームを傍受する。
- (2) 受信時刻情報の集約
 測位フレームの受信時刻の情報を固定局 A 以外の各固定局から受信時刻フレームを利用して集約する。
- (3) 測位の計算処理
 集約された受信時刻の情報を基に、代表局は測位の計算処理を実行する。
- (4) 測位結果の送信
 代表局である固定局 A から移動局（自動走行車または歩行者自身）に測位結果を送信する。

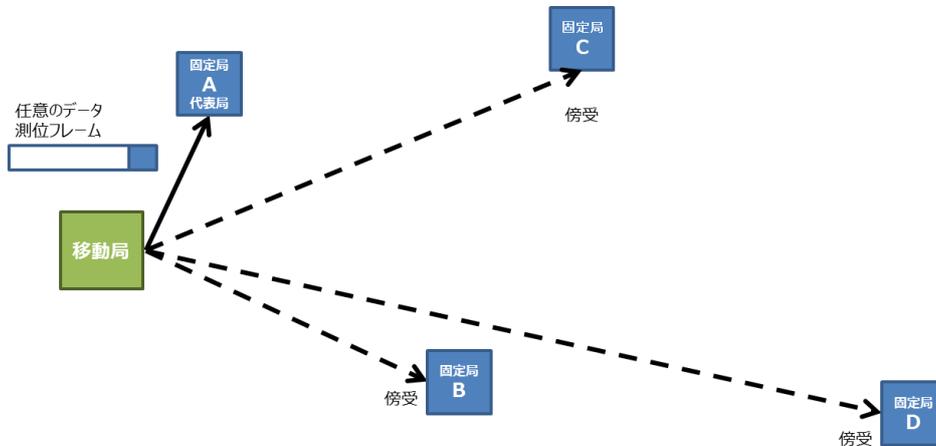


図 7.1-4 : 測位手順(1) 測位フレームの送信

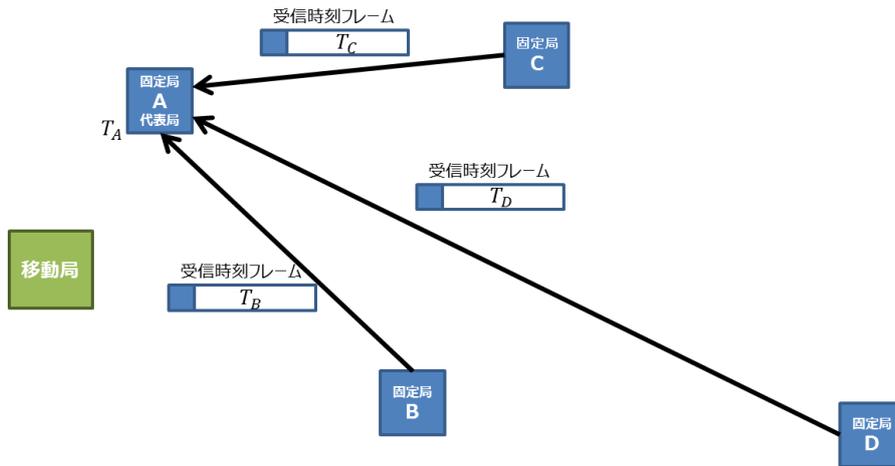
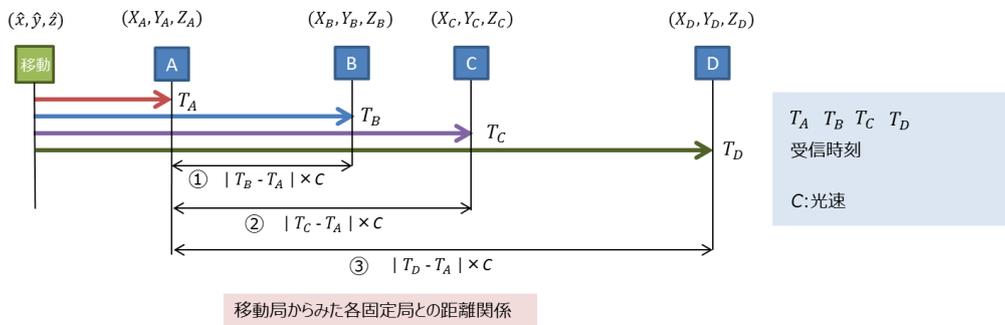


図 7.1-5 : 測位手順(2) 受信時刻情報の集約



移動局から見た各固定局との距離関係

$$\begin{cases}
 \left| \sqrt{(\hat{x} - X_B)^2 + (\hat{y} - Y_B)^2 + (\hat{z} - Z_B)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_B - T_A| \times C & \text{①} \\
 \left| \sqrt{(\hat{x} - X_C)^2 + (\hat{y} - Y_C)^2 + (\hat{z} - Z_C)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_C - T_A| \times C & \text{②} \\
 \left| \sqrt{(\hat{x} - X_D)^2 + (\hat{y} - Y_D)^2 + (\hat{z} - Z_D)^2} - \sqrt{(\hat{x} - X_A)^2 + (\hat{y} - Y_A)^2 + (\hat{z} - Z_A)^2} \right| = |T_D - T_A| \times C & \text{③}
 \end{cases}$$

図 7.1-6 : 測位手順(3) 測位の計算処理

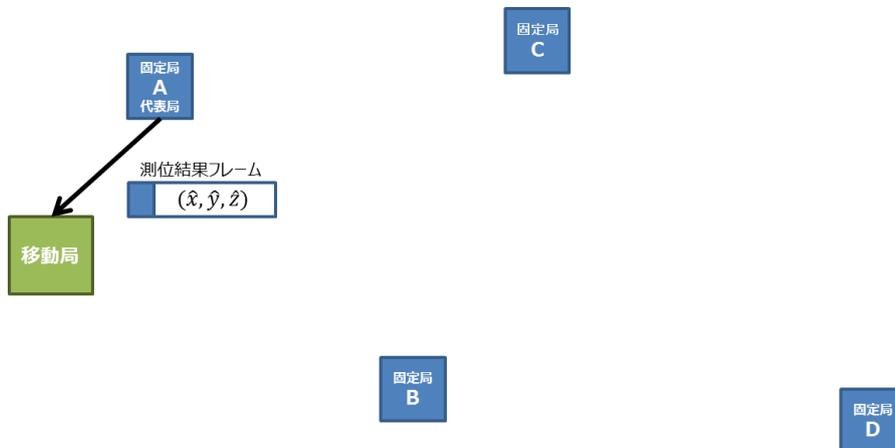


図 7.1-7 : 測位手順(4) 測位結果の送信

時刻同期

図 7.1-8 に示すように、固定局間の時刻同期について検討した。

システムの基準となる時刻は代表局の時刻とし、代表局から定期的に時刻同期のためのフレーム（時刻同期フレーム）を送信する手順をとることとした。時刻同期フレームには代表局の送信時刻の情報が含まれており、代表局以外の固定局は、時刻同期フレームを受信すると、当該フレームから得られる、代表局の送信時刻の情報に、位置関係からあらかじめ計算することができる伝搬時間の値を加えることで、代表局の基準時刻を計算し、その値を用いて自身の時計をリセットする。

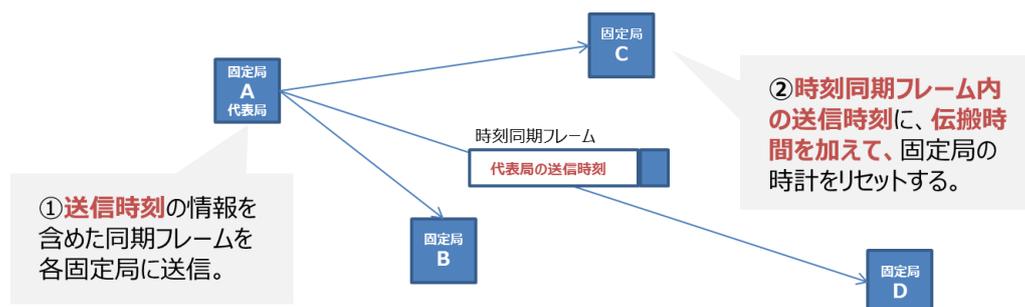


図 7.1-8：固定局間の時刻同期

相互相関処理

精度よくフレームの先頭等の受信時刻を取得するために、RSSI を用いたフレーム検出後に、その近傍の受信データを、一旦、システムの記憶領域に保存し、答えのパターンとなるプリアンブルデータと相互相関処理を施すことで、さらに正確なフレームの先頭位置を計算する方法を用いることとした。

【無線通信プロトコルの検討】

汎用的な端末を利用することが前提であり、一般に入手可能なスマートフォンを対象とした測位を実現するための無線通信プロトコルを検討した。

図 7.1-9 に、検討した無線通信のプロトコルスタックを示す。

- IEEE 802.11 に準拠した無線モジュールを利用し、ハードウェアを改修せず、ソフトウェアのインストールのみで実現
- インターネットの接続と同じように、TCP/IP プロトコルのアプリケーションの一つとして、無線による通信が可能なソフトウェアを実装できれば、スマートフォン側の測位機能は実現できる。TDOA 測位プロトコルは TCP/IP プロトコルの上位であるアプリケーション層に実装

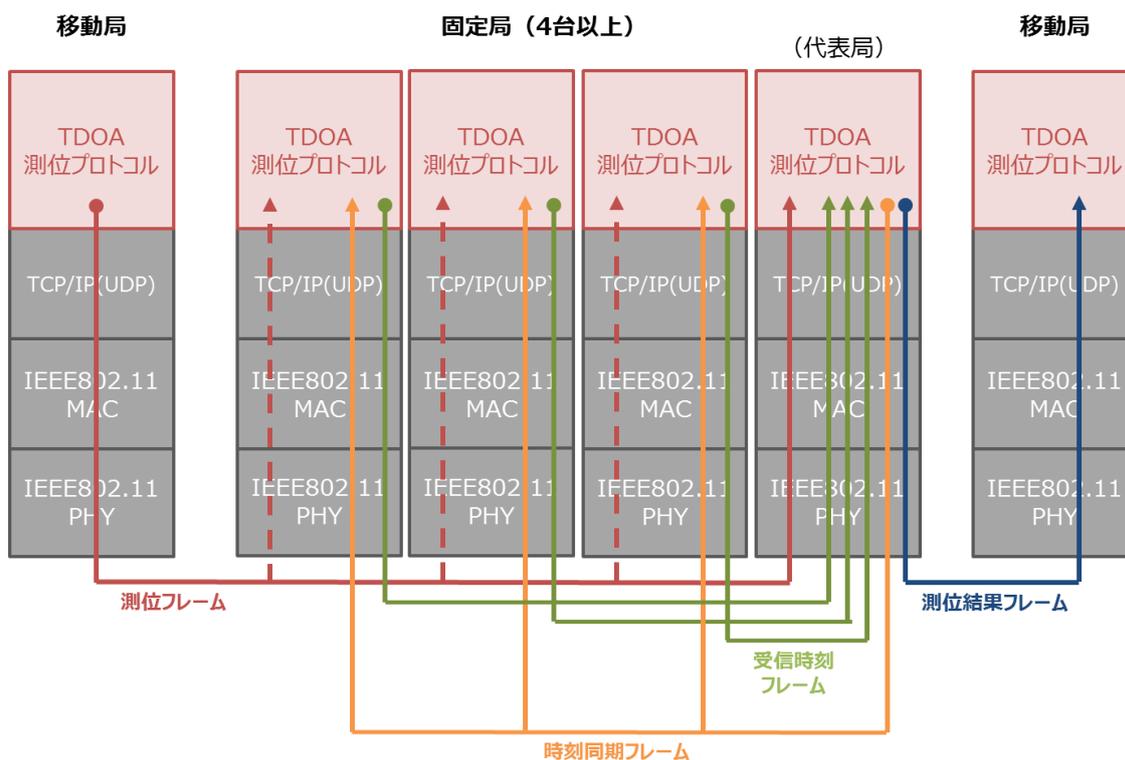


図 7.1-9 : プロトコルスタックとフレームのやり取り

フレームフォーマット

検討したフレームフォーマット及びフレームタイプを図 7.1-10 に示す。本システムでは 4 種類のフレームタイプを規定する。各フレームは IEEE802.11 及び TCP/IP で規定されたフレームフォーマットに従う。物理層、データリンク層のヘッダは IEEE 802.11 に従う。ネットワーク層、トランスポート層は TCP/IP に従う。

- 測位フレーム
測位に利用するものであり、移動局から代表局宛に定期的を送信。但し、測位自体は IEEE 802.11 フレームに従った任意のフレームを検出できれば可能であるため、データ通信を行っていない場合のみ、自発的に測位フレームを送信することで、測位に要する無駄なフレームの送信を低減可能
- 測位結果フレーム
測位結果フレームは、測位した結果が含まれ、代表局から移動局へ送信
- 受信時刻フレーム
各固定局から代表局に、受信時刻の情報を集約するために利用
- 時刻同期フレーム
代表局から固定局に、システムの基準となる代表局の時刻を伝達するために利用

フレームフォーマット

802.11 PHY	802.11 MAC	TCP/IP	測位システムの各フレーム
------------	------------	--------	--------------

■ 移動局と代表局（例：公衆無線LANのアクセスポイント）間の通信

フレーム名	送信元	受信先	ペイロード	備考
測位フレーム	移動局	代表局	任意	代表局と通信しているフレームを各固定局が傍受する
測位結果フレーム	代表局	移動局	測位結果	

■ 固定局間の通信

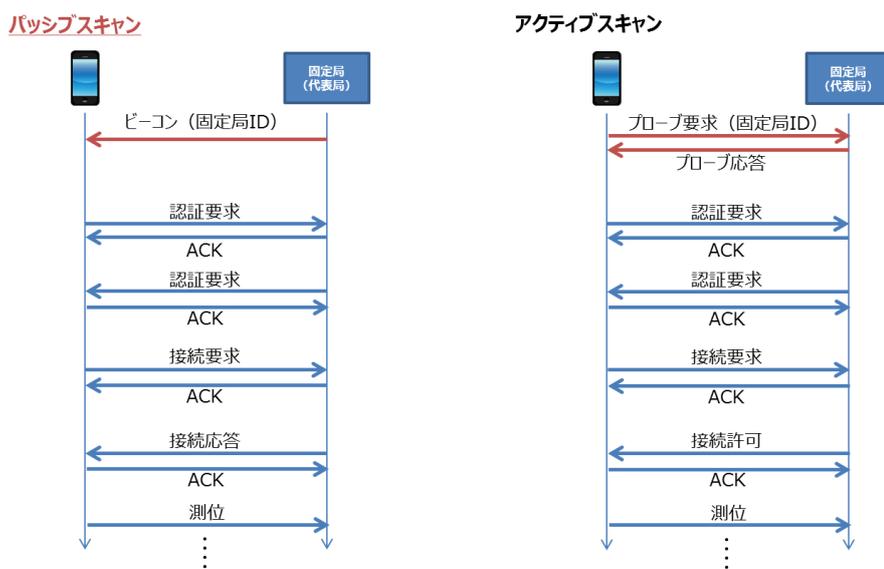
フレーム名	送信元	受信先	ペイロード	備考
受信時刻フレーム	固定局	代表局	(MACアドレスと受信時刻のセット) ×近隣の移動局N台分	有線あるいは無線で伝送
時刻同期フレーム	代表局	固定局	代表局の送信時刻	

図 7.1-10：フレームフォーマットとフレームタイプ

接続手順

移動局は代表局と接続することで測位を開始する。代表局は無線 LAN におけるアクセスポイントと同じ役割として動作し、接続処理もアクセスポイントと同じ手順を実行する。ここで、現行の無線 LAN のアクセスポイントは、認証等の手順を踏むことで、子機との最初の接続は 3 秒程度の時間がかかるとされている。歩行速度を 1.4 m/s と想定すれば、3 秒間では 4.2m 進むため、接続開始エリアは測位対象エリアの外周より全体的に 5m 程度広くなる。

代表局との接続手順について図 7.1-11 に示す。一般的な無線 LAN では、子機がアクセスポイントと最初の接続を試みる場合に、パッシブスキャンとアクティブスキャンのいずれかの手順を行う。本システムでは、交差点等に設置された公衆の代表局と接続することを想定すると、あらかじめ代表局の MAC アドレスを知ることができないため、アクティブスキャンは適用できない。したがって、本システムは、代表局と接続する手順としてパッシブスキャンを利用する。



一般的な無線LANの接続手順に従う
 接続する固定局IDが事前にわからないことを想定し、パッシブスキャンを想定する

図 7.1-11 : 接続手順

表 7.1-7 に、以上の検討結果を基にまとめたプロトコル案を示す。

表 7.1-7 : プロトコル案のまとめ

項目	仕様	備考
物理層、データリンク層	IEEE 802.11g/a	
ネットワーク層、トランスポート層	TCP/IP (UDP)	任意のポート番号を利用
ネットワーク構成	インフラストラクチャ・モード	
アクセス制御方式	CSMA/CA (DCF)	
変調方式	OFDM	
参入の接続手順	パッシブスキャン	
フレームフォーマット	IEEE 802.11 及び TCP/IP に従ったフレーム	
フレームタイプ	測位フレーム、測位結果フレーム、受信時刻フレーム、時刻同期フレーム	
通信頻度	100ms 周期以下	一定周期
測位方式 (測距方式)	TDOA 方式	
固定局の設置台数	4 台以上	
測位プロトコルを実装する階層	アプリケーション層	
フレームの検出法	RSSI による閾値判定及びフレームのプリアンブルを利用した相互相関処理	

7.1.4. 計算機シミュレーションによる性能評価

計算機シミュレーションにより検討システムの測距及び測位性能評価を用い、対象ユーザースペースの要件である大規模交差点と小規模交差点における横断歩道 90%の場所に対して水平測位誤差が 10cm 以下となる技術的条件、特に固定局の設置条件を抽出した。性能評価は大別して 3 つである。

まず 1 番目の性能評価として、AWGN モデルにおける評価により、理想的な環境における本検討システムの適用可能性を検討した。また、本検討システムにおける高速サンプリング化による性能改善を示し、その有効性を示した。

続いて 2 番目の性能評価では、オープンスペースにおいて発生する路面反射波を加味した環境における評価を行い、AWGN モデルにおける性能とのギャップを把握した。さらに性能改善のための対策技術の検討を行い、対策技術による性能改善効果を評価した。

以上の評価結果をもとに、各想定環境における技術的条件、特に固定局の設置条件を整理した。

最後の 3 番目の性能評価では、次年度の本格検討に先立ち、実環境におけるマルチパスの影響を考慮した評価を行い、上記環境とのギャップを把握する（さらなる対策技術の検討及び改善効果見積もりは 7.1.6 項の考察にて実施）。

【AWGN モデルにおける性能評価】

AWGN モデル、すなわち直接波のみが受信される環境を想定した場合の測位誤差に関して、理論式及びシミュレーション評価により、高精度位置推定システムの測距及び測位性能評価を行った。

理論式を用いた目標測距誤差の設定

以下に示す理論式を用い、目標となる測位誤差を満足させるために必要となる測距誤差を明らかにした。

$$\sigma_p = \text{DOP} \times \sigma_d$$

ここで、測位誤差： σ_p 、DOP：精度低下率、測距誤差： σ_d

図 7.1-3 に示す固定局配置における水平方向の DOP (HDOP) 特性より、大規模交差点、小規模交差点ともに、測位対象エリア（横断歩道）における HDOP は 5 以上となる地点が発生し、測位誤差を 10cm 以下にするためには少なくとも測距誤差を 2cm 以下にする必要があることが分かった。

高速サンプリングの有効性評価

図 7.1-12 に、プロトコル検討結果に従って、IEEE802.11g/a のプリアンプル部の受信信号波形と既知のプリアンプル信号波形との相互相関計算をもとに受信タイミングを決定する方法を用いた場合の測距誤差－受信電力特性を示す。同図より、サンプリング速度を高くすることで測距精度が良くなり、高精度位置推定を行う上でサンプリング速度の高速化は重要な技術であることを確認した。例えば、上記の目標測距誤差 2cm に対して、サンプリング速度を 1Gsps から 5Gsps に上げることで、受信電力として約 5dB の改善効果がある。

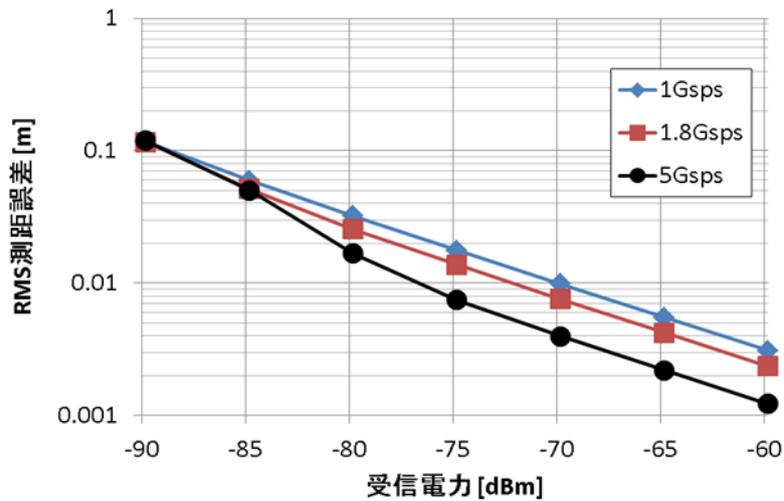


図 7.1-12：受信電力に対する測距誤差（AWGN 環境）

測位誤差の性能評価（理論式）

固定局間と移動局の位置関係をもとに DOP 及び測距誤差を計算し、測位誤差の理論式に代入することで、測位対象エリア内の測位誤差特性を評価した。

表 7.1-8 と表 7.1-9 に、大規模と小規模交差点における測距誤差の理論値の統計データを示す。これらの表より、両交差点において水平及び垂直の測位誤差の場所率が 90%以上となるのは、サンプリング速度が 5Gbps の場合のみであることが分かる。

表 7.1-8：大規模交差点における測位誤差の理論値（2.4GHz 帯）

サンプリング速度	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
		<10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
5.0Gbps	91%	8.1cm	15cm	75cm	95%	45cm	85cm	4.3m
1.8Gbps	83%	15cm	29cm	1.4m	91%	83cm	1.6m	8.1m
1.0Gbps	76%	20cm	37cm	1.8m	89%	1.1m	2.0m	11m

表 7.1-9：小規模交差点における測位誤差の理論値

周波数帯	サンプリング速度	水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
			<10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
2.4GHz	5.0Gbps	97%	2.7cm	5.1cm	20cm	99%	4.2cm	8.1cm	34cm
	1.8Gbps	95%	5.2cm	9.7cm	37cm	99%	7.9cm	15cm	64cm
	1.0Gbps	93%	6.9cm	13cm	50cm	99%	11cm	20cm	86cm
5GHz	5.0Gbps	93%	6.5cm	12cm	47cm	99%	10cm	19cm	81cm
	1.8Gbps	88%	12cm	23cm	87cm	98%	19cm	36cm	1.5m
	1.0Gbps	85%	16cm	30cm	1.2m	97%	25cm	47cm	2.0m

以上の理論式を用いた評価により、AWGN モデルにおいて 5Gbps 以上のサンプリングを行う高精度位置推定システムは、測位対象エリアに対して目標測位精度 10cm 以下を達成する。

シミュレーションによる測位性能の評価 (AWGN モデル)

TDOA 方式の測位アルゴリズムを適用した場合の測位誤差の性能評価をシミュレーションにより実施した。

表 7.1-10 に、AWGN モデルにおける定点での測位誤差のシミュレーション評価結果を示す。同表より、理論値と同様に、サンプリング速度を 5Gpsps にすることで目標測位誤差の場所率 90%以上を達成することを確認した。

表 7.1-10 : AWGN モデルにおける定点での測位誤差のシミュレーション評価結果 (2.4GHz 帯、5Gpsps)

交差点 規模	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
		<10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
大規模	92%	9.2 cm	13cm	17cm	99%	57cm	76cm	94cm
小規模	93%	4.3cm	20cm	10m	99%	6.8cm	24cm	71cm

固定局の設置条件を変えた場合の測位誤差の評価

固定局の設置位置、設置台数を変えた場合の測位誤差を評価比較した。

表 7.1-11 に、図 7.1-3 に示した固定局の配置台数、位置を基準として、条件 A : アンテナ高を変化 (高くする)、条件 B : アンテナ水平位置を変化 (拡大)、条件 C : 台数を変化 (増加) させた場合の測位誤差の評価結果をまとめる。全ての設置条件で 90%以上の場所率に対して目標となる測位精度を達成できる。水平誤差の 90%値を見ると、水平位置の X 軸の位置を拡大する条件 B が最も良好となる。

表 7.1-11 : 大規模交差点における設置条件毎の測位誤差のシミュレーション値

設置条件		水平測位誤差				垂直測位誤差			
		場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
名称	変更内容	<10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
基準	無し	92%	9.2cm	13cm	17cm	99%	57cm	76cm	94cm
条件 A	アンテナ高	90%	10cm	16cm	49cm	97%	38cm	58cm	1.3m
条件 B	水平位置	95%	4.1cm	8.3cm	15cm	99%	37cm	53cm	80cm
条件 C	台数増加	94%	8cm	11cm	17cm	98%	49cm	61cm	1.0m

表 7.1-12 に、固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における HDOP の統計値を示す。同表より、条件 B の場合、HDOP が 3 以下となる割合が基準よりも 50%上昇している。また、93%の場所の HDOP が 5 以下となる。条件 B の 90%値においては 4.0 となっていることが分かる。

表 7.1-12: 固定局の水平位置の一部を変えた場合の大規模交差点における HDOP の統計値

設置条件		場所率			累積分布値		
名称	変更内容	3以下	5以下	10以下	90%	95%	99%
基準	無し	21%	68%	86%	13	25	126
条件 B	水平位置	71%	93%	98%	4.0	6.0	11

【路面反射モデルにおける性能評価】

上記では、AWGN モデルにおける測位誤差等の評価を理論式及びシミュレーションにより行った。しかしながら、周辺に建物等が無いオープンな環境であっても、AWGN モデルとは異なり、大地からの反射の影響によって測位等の性能は劣化する。直接波以外の遅延波として路面反射波の影響を加味した場合の対象ユースケースにおける測位誤差を評価した。

図 7.1-13 に、路面反射波が発生する環境における測距誤差を示す。同図では、後述の伝搬路推定等の対策技術は適用していない。同図より、遅延波（路面反射波）の影響により AWGN モデルの特性よりも 1 桁から 3 桁程度大きい測距誤差となる。

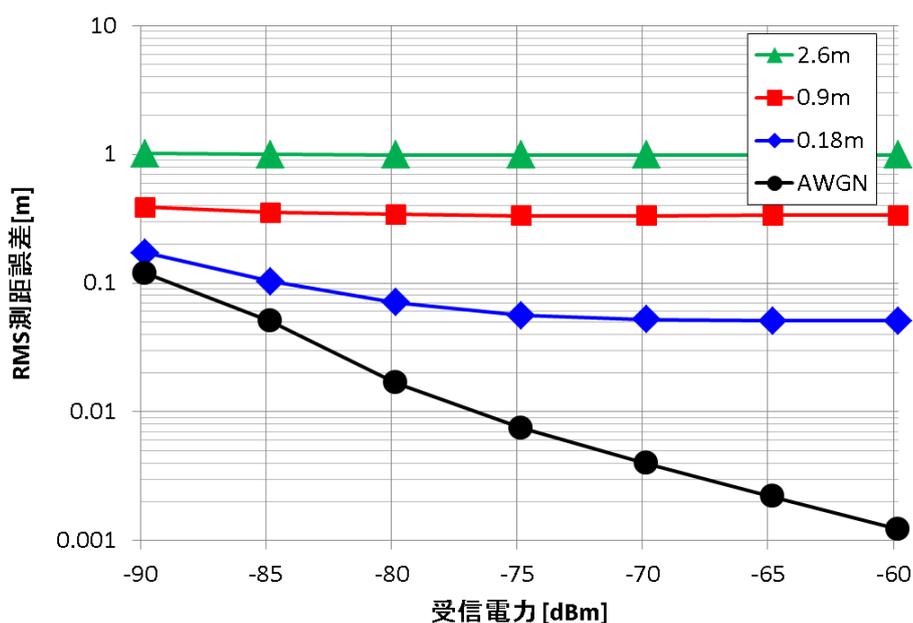


図 7.1-13 : 伝搬路推定を行わない場合の路面反射モデルにおける測距誤差

表 7.1-13 に、路面反射波が発生する環境の測位対象エリアにおける定点測位での測位誤差を示す。上記のように測距誤差が大きくなることで、測位誤差が増加し、10cm 以下となる場所率が著しく減少することがわかる。

表 7.1-13 : 路面反射モデルの測位対象エリアにおける定点測位での測位誤差 (対策無し)

交差点	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
		<10cm	90%	95%		99%	<1m	90%	95%	99%
大規模	0%	7.1m	20m	24m	12%	13m	14m	15m
小規模	0%	6.6m	7.5m	9.3m	0%	5.6m	5.9m	6.5m

路面反射波が発生する環境に対して目標とする測位精度を満足するために、以下の対策技術の検討を行い、改善効果をシミュレーションにより評価した。

伝搬路推定方式

直接波の受信タイミング (相関ピークの位置) を推定する方法として、振幅、位相、遅延の3パラメータを与えたレプリカとなる直接波と遅延波 (計2パス) を用意し、合成したレプリカの相互相関波形と受信した相互相関波形との最小二乗誤差を計算することで直接波の相関ピークの位置を推定する伝搬路推定方式を検討、評価した。

図 7.1-14 に、検討した2パスの伝搬路推定を行った場合の路面反射モデルにおける測距誤差を示す。図 7.1-13 と比較して、伝搬路推定を行うことにより測距誤差の低減が可能であることを確認した。

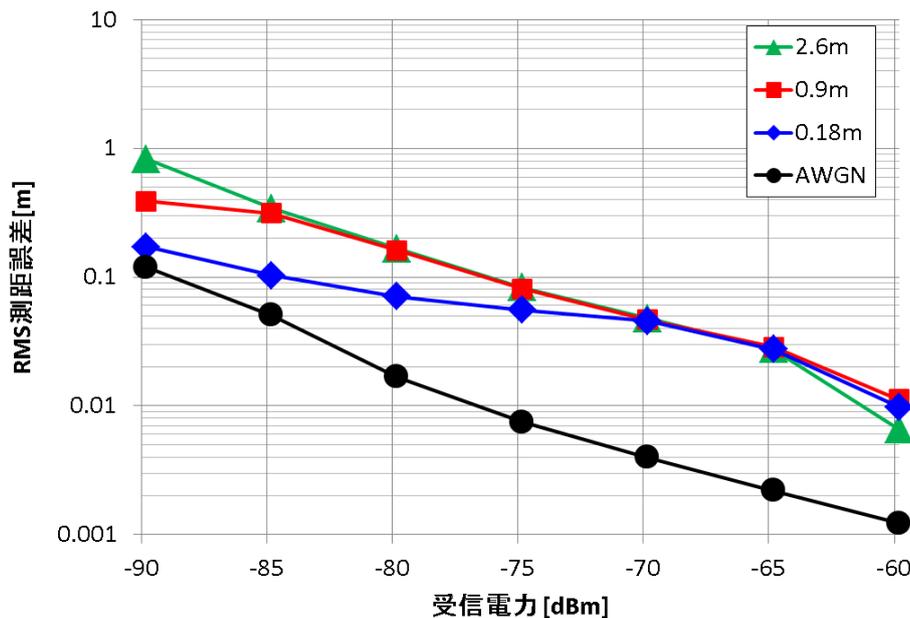


図 7.1-14 : 2パスの伝搬路推定を行った場合の路面反射モデルにおける RMS 測距誤差

測位の平均化処理

伝搬路推定に加えて、測位の平均化処理による測位誤差低減方法を検討、評価した。

図 7.1-15 に、移動 (歩行) 時の測位の平均化処理方法を示す。

固定局の配置位置の見直し (拡張)

固定局の配置条件の中で、一部の固定局の設置位置を基準とした位置 (横断歩道のすぐ外側) よりも外側に移動 (今回の評価では 7m 移動@大規模交差点) することによる測位誤差低減を検討、評価した。

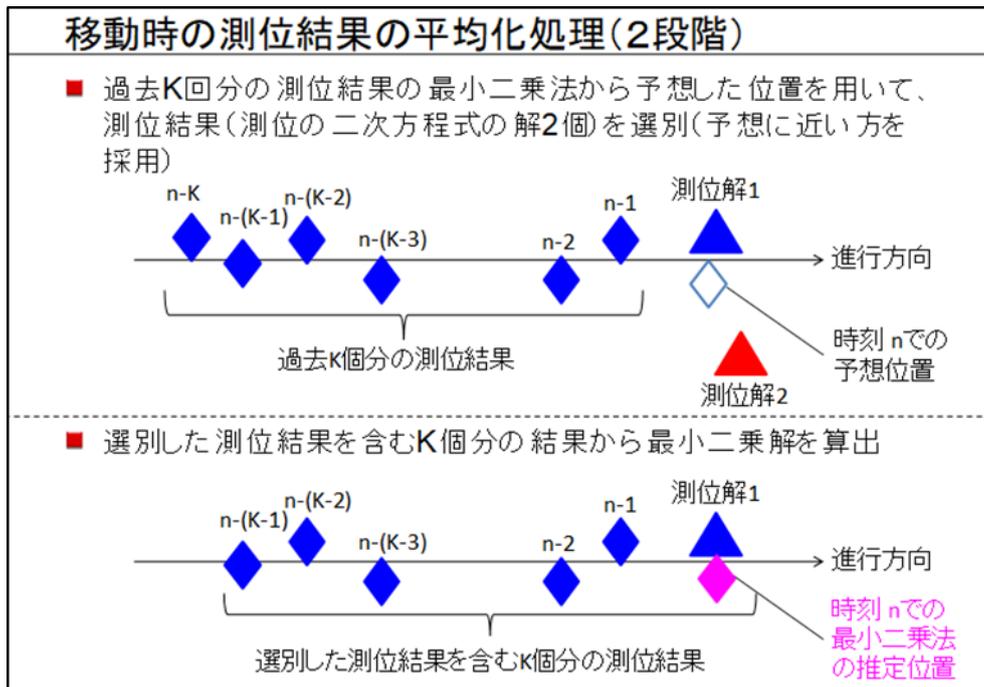


図 7.1-15：移動時の測位結果の平均化処理

シミュレーションによる測位性能の評価 (路面反射モデル)

表 7.1-14 と表 7.1-15 に、上記の対策技術を適用した場合の路面反射波が発生する環境における測位対象エリア (横断歩道) での測位誤差のシミュレーション評価結果を示す。同表より、測位対象エリアでの定点及び移動測位ともに測位精度が改善し、場所率 90%以上で水平測位誤差 10cm 以下、垂直測位誤差 1m 以下を達成する。

以上のように、伝搬路推定と平均化処理の適用、固定局配置の見直し等の対策技術を適用することで、路面反射波が発生する環境における測位精度は改善し、目標精度を満足する。

表 7.1-14：大規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差 (対策技術適用時)

測位状態	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率		累積分布値		場所率		累積分布値	
	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
定点	99%	3.5cm	4.2cm	11cm	100%	23cm	31cm	61cm
移動	98%	3.9cm	5.9cm	12cm	100%	18cm	27cm	52cm

表 7.1-15：小規模交差点の路面反射モデルにおける測位誤差（対策技術適用時）

測位 状態	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率		累積分布値		場所率		累積分布値	
	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
定点	100%	0.4cm	0.5cm	0.6m	100%	1.2cm	1.3cm	1.6cm
移動	100%	2.1cm	3.6cm	7.2cm	100%	2.6cm	4.3cm	8.5cm

技術的条件の整理

上記のシミュレーション評価結果をもとに、目標測位精度を達成するための、固定局の設置位置や対策技術の適用有無、等に関する技術的条件を整理した。

表 7.1-16 及び表 7.1-17 に、整理した技術的条件（例）を示す。

表 7.1-16：路面反射モデルでの大規模交差点における技術的条件（例）

測位対象 エリア	固定局の設置位置				路面反射対策		備考
	番号	X [m]	Y [m]	Z [m]	伝搬路 推定	平均化回数	
横断歩道	#1	29	15	3.5	適用	25	#1 と#3 の X 座 標を 7m 拡大し た。
	#2	-15	22	5			
	#3	-29	-15	3.5			
	#4	15	-22	5			

表 7.1-17：路面反射モデルでの小規模交差点における技術的条件（例）

測位対象 エリア	固定局の設置位置				路面反射対策		備考
	番号	X [m]	Y [m]	Z [m]	伝搬路 推定	平均化回数	
横断歩道	#1	9	3	3.5	適用	25	#1 と#3 の X 座 標を 3m 拡大し た。
	#2	-3	6	5			
	#3	-9	-3	3.5			
	#4	3	-6	5			

【マルチパスモデルにおける性能評価】

本年度調査検討の対象である理想的な環境（AWGN モデル、路面反射モデル）では、直接波及び路面反射波の影響が支配的である。しかしながら、実環境では周辺の建物等の影響で上記以外のマルチパスが発生する。

次年度以降の本格検討に先立って、実環境におけるマルチパスの影響を加味した伝搬モデルの検討、評価を行い、理想的な環境との測位性能のギャップを把握した。さらに、マルチパスの発生する環境に対応した対策技術（案）を整理した（対策技術（案）による性能改善の見積りは 7.1.6 項に記述）。

マルチパスが発生する場合の伝搬モデル

銀座等のビル街における電波伝搬特性実験結果をもとに検討された伝搬モデルを参考に、上記の直接波、路面反射波に加えてマルチパスを加えた伝搬モデル（3 パスモデル）を検討した。

シミュレーションによる測位性能の評価（マルチパスモデル）

表 7.1-18 に、検討したマルチパスモデルを用いた測位性能のシミュレーション評価結果（例）を示す。対策技術を適用しない場合と、路面反射波対策として検討した伝搬路推定（2 パスモデルによる推定）と測位結果の平均化処理を対策技術として適用した場合の結果を比較した。

同表の「対策無し」の結果より、マルチパスモデルにおける測位性能は理想的な環境よりも大きく劣化し、目標性能を達成しないことが分かった。

また、「対策有り」の結果より、路面反射波を想定した対策技術を適用することで、多くの遅延波が発生しているマルチパスモデルにおいても性能改善があることが分かった（誤差が 1/10 程度に低減）。しかしながら、目標性能（誤差 10cm@場所率 90%）は達成しない。そのため、さらなる改善へ向けた対策技術の検討が必要である。

表 7.1-18：マルチパスの発生する環境（3 パスモデル）の測位対象エリアにおける測位誤差（大規模交差点）

対策	水平測位誤差				垂直測位誤差			
	場所率	累積分布値			場所率	累積分布値		
・伝搬路推定 (2 パス) ・平均化処理	< 10cm	90%	95%	99%	<1m	90%	95%	99%
無し	0%	2.4m	11m	26m	0.3%	2.3m	2.7m	3.0m
有り	68%	18cm	20cm	24cm	97%	90cm	97cm	1.1m

マルチパス対策技術（案）の検討

マルチパスの発生する環境に対応した対策技術案を検討した（検討した対策技術案による改善効果の見積りは 7.1.6 項に記述）。

- ・伝搬路推定方式の改良
路面反射波に対応した 2 パスモデルによる伝搬路推定を 3 パス以上に拡張
- ・アダプティブアレーアンテナ
既存の無線 LAN アクセスポイント（IEEE802.11n 対応）も実装しているアレーアンテナを用いて、マルチパスを抑圧
- ・固定局の配置見直しによる改善

7.1.5. 実機による性能評価

検討した無線通信及び測位プロトコル（対策技術なし）にしたがった高精度位置推定システムの実機による性能評価を行った。シミュレーション評価結果との比較を行い、その妥当性確認等を行った。

【評価環境、条件】

表 7.1-19 に示すように、オープンスペースを想定しテストコース及びグラウンドで測定を行った。加えて、周辺に建物が存在する小規模交差点を想定した屋内実験によりマルチパスの影響がある場合の測定も行った。

表 7.1-19 : 評価条件

条件	値
ユースケース	小規模交差点
測位環境	グラウンド／テストコース／屋内
測位形態	定点（8 か所）／歩行
測定回数	定点（各ポイントで 100 回）／歩行（10 試行）
サンプリング速度	5Gsp/s／1.8Gsp/s（事前評価）

小規模交差点（片側1車線想定）

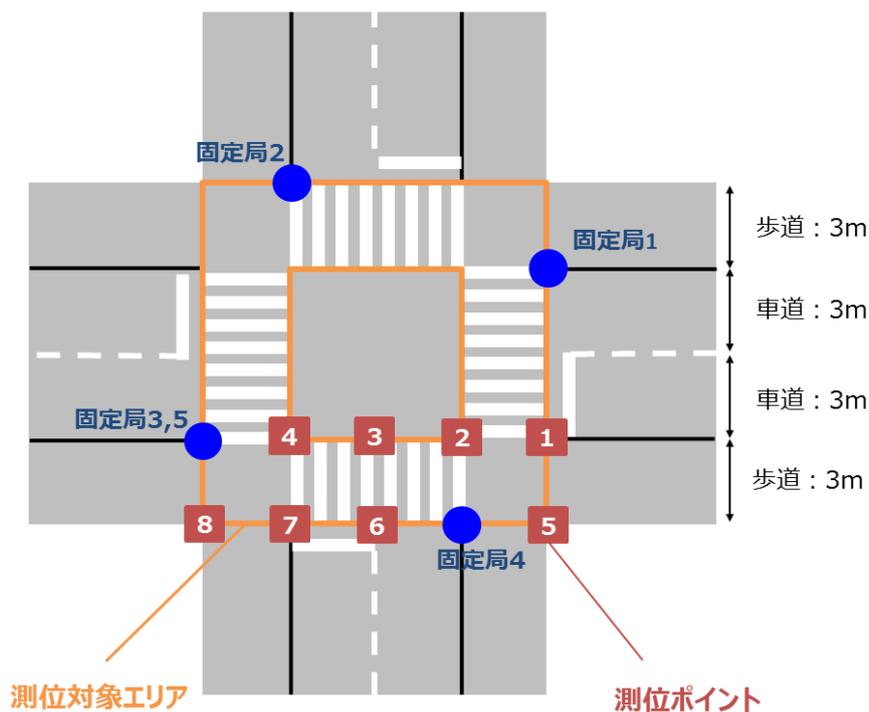


図 7.1-16 : 測位対象エリアと測位ポイント（定点測位）

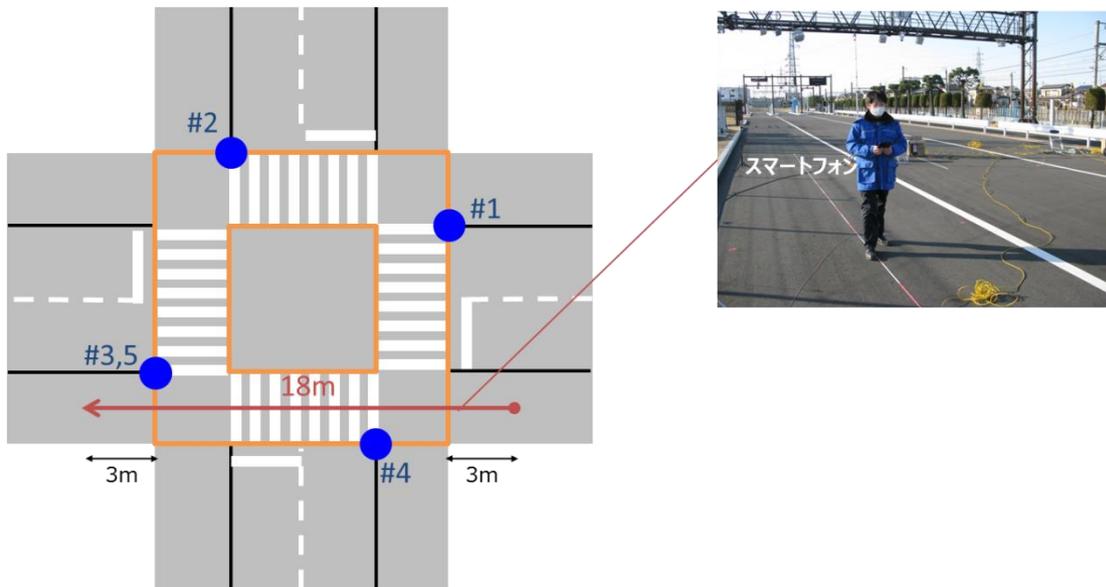


図 7.1-17：歩行時の測位

【実機評価結果】

オープンスペース（テストコース、グラウンド）

図 7.1-18 及び図 7.1-19 に、実機による測定例として、グラウンド及びテストコースにおける定点測位（静止）の測位結果を示す。同図には、路面反射波の影響を考慮した場合のシミュレーション評価による測位結果もプロットしている。

図 7.1-18 より、グラウンドにおける実験の結果はシミュレーションにより推定される測位結果上にほとんどがプロットされており、路面反射波の影響を考慮した 2 パスモデルのシミュレーションによりオープンエリア環境（グラウンド）が再現できることを確認した。

図 7.1-19 より、テストコースにおける実験の結果は、近傍のフェンス、ガントリ等の構造物からの反射波（マルチパス）の影響により、2 パスモデルのシミュレーション評価結果とのずれが発生するが、測位誤差はグラウンドと大きな差がない。したがって、テストコースのようなオープンスペースであるが周辺構造物の影響がある環境においても、路面反射波の影響が支配的であり、2 パスモデルと同程度の性能となることがわかった。

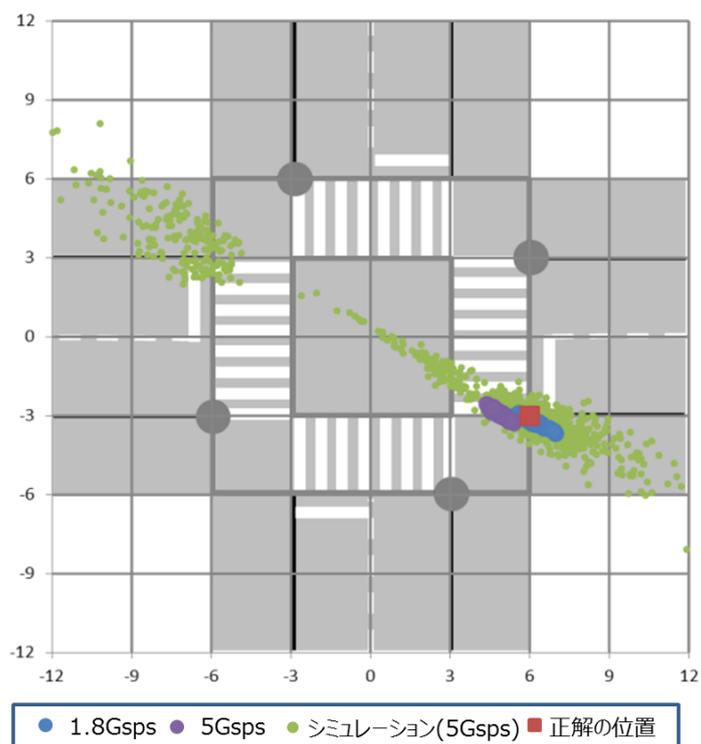


図 7.1-18 : グ라운드、測位ポイント 1 の結果

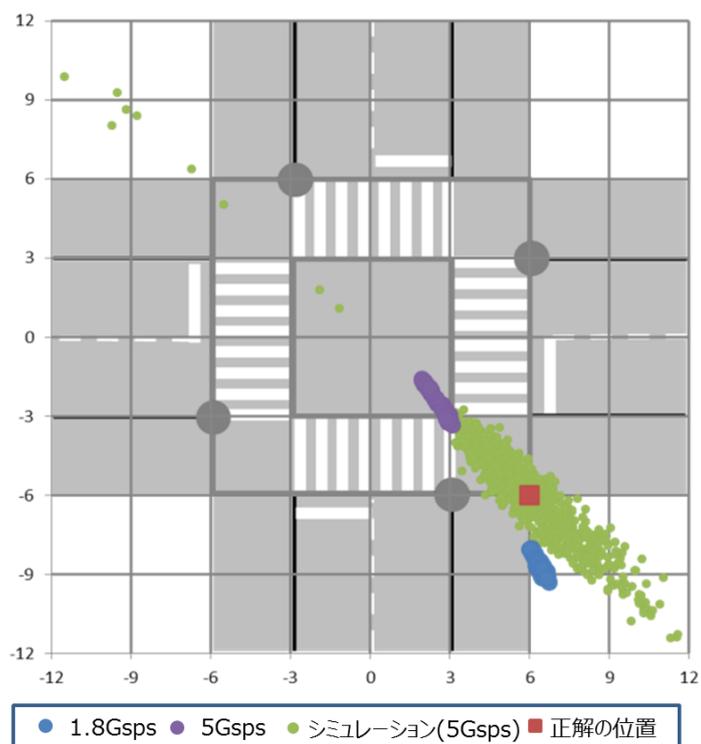


図 7.1-19 : テストコース、測位ポイント 5 の結果

表 7.1-20 に、テストコースの実機評価とシミュレーション評価（2 パスモデル、対策技術なし）による測位誤差の結果まとめを示す。同表より、上記のように、近傍のフェンス、ガントリ等の構造物からの反射波（マルチパス）の影響はあるものの、テストコースのようなオープンスペースでは、路面反射波の影響が支配的であり、2 パスモデルと同程度の性能となることがわかった。

表 7.1-20：グラウンドとテストコースの実機評価の結果まとめ（小規模交差点想定）

測定 ポイント	実機評価	シミュレーション評価
	テストコースの測位誤差 (RMS)	2 パスモデルの測位誤差 (RMS)
1	7.6	7.7
2	2.1	3.0
3	2.1	2.0
4	1.1	2.4
5	4.8	3.6
6	3.5	1.3
7	4.5	5.4
8	4.1	3.3
全体 (平均)	4.2 [m]	4.1 [m]

マルチパス環境（屋内）

表 7.1-21 に、マルチパス環境を想定した屋内での実機による評価結果と、2 パスモデル及び 3 パスモデルの伝搬モデルを用いたシミュレーション評価結果を示す。

同表より、マルチパスの影響がテストコースよりも大きくなり、屋内の実験結果は 2 パスモデルのシミュレーション結果より測位精度が劣化し、誤差 30%程度増加することがわかった。

一方、3 パスモデルのシミュレーション結果より良いものとなっている。路面反射だけでなく、マルチパスの影響を受けるため、2 パスモデルのシミュレーション結果より悪くなるが、マルチパスの環境は複雑であり、同実験環境を再現するためには、レイトレース法などを用いた伝搬環境の精緻化が今後必要である。

表 7.1-21：マルチパス環境（屋内）の実機評価の結果まとめ（小規模交差点想定）

測定 ポイント	実機評価	シミュレーション評価	
	テストコースの 測位誤差 (RMS)	2パスモデルの 測位誤差 (RMS)	3パスモデルの 測位誤差 (RMS)
1	4.1	7.7	11.1
2	1.8	3.0	9.7
3	3.3	2.0	3.3
4	8.9	2.4	5.2
5	6.2	3.6	14.0
6	4.6	1.3	11.4
7	2.2	5.4	9.4
8	5.2	3.3	11.8
全体 (平均)	5.0 [m]	4.1 [m]	10.1 [m]

歩行実験

10回歩行したデータをもとに、測位誤差を、歩行の位置毎(1m 間隔)で分類し、位置毎で平均値を集計した結果を図 7.1-20 に示す。歩行者は等速移動を前提とし、歩行時のデータ取得時刻と歩行速度から正解位置を計算し、測位誤差は正解位置と測位した位置との RMS 誤差として算出した。

測位対象区間における測位誤差の平均値は 1.8Gspss で 3.94m、5Gspss で 4.81m となった。これは、固定した条件における 1.8Gspss で 3.93m、5Gspss で 4.16m と同等の結果である。

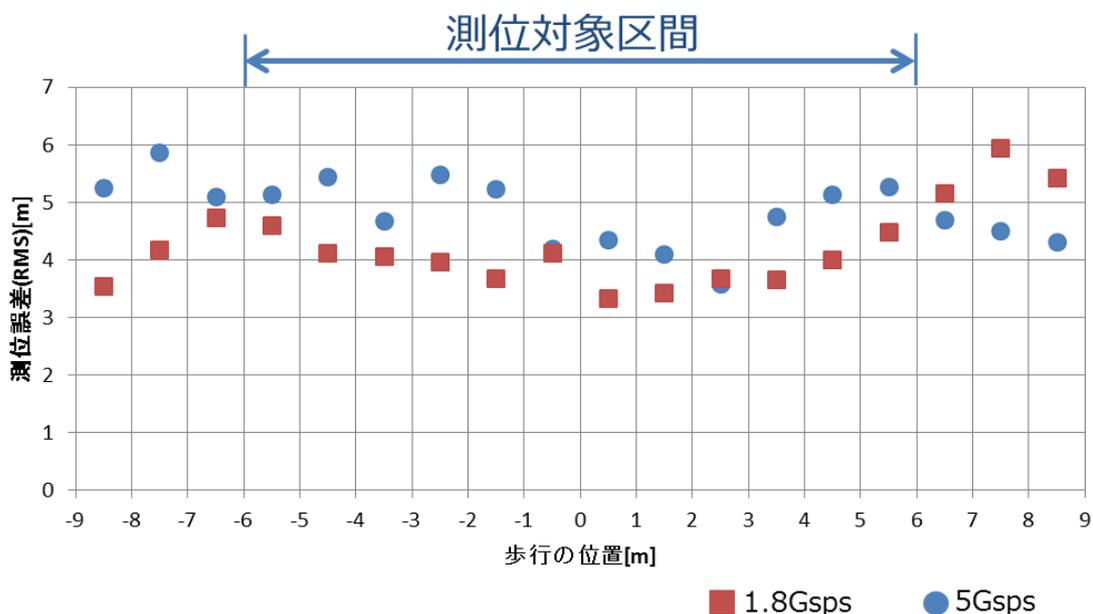


図 7.1-20：歩行位置における測位誤差（測位誤差の区間毎の平均値）

7.1.6. 考察

これまでのシミュレーション及び実機による性能評価では、固定局の位置が正確にわかっている（測量できている）等の理想的な条件のもと実施したが、実際の利用を想定すると、固定局位置の測量誤差等の劣化要因が発生する。

また、マルチパス環境を想定したシミュレーション及び実機による評価結果では、ともに目標測位精度を達成しておらず、本調査検討で検討した対策技術のさらなる追加・改良が必要である。

検討した測位方式自体で発生する誤差以外の誤差要因を抽出、分析し、実運用時のシステム全体の測位誤差精度の見積りを行った。さらに、次年度以降のマルチパス環境を想定した本格的な評価、検討に先立って、マルチパス環境での測位精度劣化に対する対策技術案の抽出と、それらの改善効果の見積りを行った。

誤差要因の抽出

本調査検討において評価分析したノイズやマルチパスの影響による測距誤差によって生じる測位方式自体の測位誤差以外の誤差要因としては以下のものが想定される。

① 固定局設置位置の測量誤差

本検討システムは、固定局設置位置と固定局までの電波の到達時間をもとに測位を行うため、既知とする固定局の設置位置が正確に取得（測量）できていないと、測位誤差が増大する。

固定局設置位置の測量方法及びその誤差の検討が今後必要であるが、2.2.2 項における有識者の指摘事項を踏まえて、高精度地図の位置情報と同様に MMS を用いて固定局の位置情報を取得できる場合を想定すると、固定局設置位置の測量誤差は高精度地図の各種位置情報と同程度の 25cm 程度となる。

一方、表 4.1-13 に示したように、固定局を基準となる横断歩道のすぐ外側に設置した場合、DOP は 13 程度となる（場所率 90%）。

以上より、4.1 節に示した、測位誤差 $\sigma_p = \text{DOP} \times \sigma_d$ を用いて、本誤差要因に対する測位誤差を見積ると、 $13 \times 25\text{cm} = 3.25\text{m}$ となる（固定局設置位置の測量誤差は測距誤差として影響）。

本誤差要因に対する誤差の低減方法（案）としては、

- 固定局の設置位置を基準位置よりも外側に設置することで DOP を小さくする
本誤差要因に対する対策としては、すでに挙げている固定局の設置位置の見直し（調整）が有効である。表 4.1-13 に示したように、固定局の設置位置を見直すことで、上記のように 13 であった DOP が 4 まで減少し、測位誤差は 1m に低減することが可能となる。さらに数 m 外側に固定局を設置することで DOP は 3 以下となり測位誤差は 75cm 程度まで低減できる。

上記の対策を適用する際の課題としては、固定局間の見通し確保、移動局からのフレームの受信電力の確保、エリア拡張による大型車等によるシャドウイング発生率の増加等が挙げられる。これらの対応も含めて、今後は固定局台数を最小である 4 台から増加させた場合の検討が必要である。

- 歩行者の測位結果と合わせて通知先である自動走行車の測位結果を送信することで、自動走行車側が自律系による測位結果を用いて補正する
本対策を適用する際の課題としては、自動走行車も無線 LAN 通信が可能である必要がある点、歩行者と自動車の測位を行うタイミングが異なることによる新たな誤差要因への対応検討が必要である、等が考えられる。

② 歩行状態の急激な変化による誤差

本検討における対策技術の一つである測位結果の平均化処理は過去の情報も用いて現在の測位精度の向上を行っている。フレームの送信周期 100ms に対して 25 回の平均化処理を行っているため、過去 2.5s 以内の情報を用いている。

したがって、歩行中の急な停止や方向転換等の歩行状態の急激な変化に対して、測位誤差は発生する。例えば、上記の条件による平均化処理を用いて、1.4m/sの歩行状態から急に停止した場合、最悪 $1.4\text{m/s} \times 2.5\text{s} = 3.5\text{m}$ 程度の測位誤差が発生する。

本誤差要因に対する誤差の低減方法（案）としては、

- フレームの送信周期の短縮や平均化回数の減少
フレーム送信周期や平均化処理における平均化回数を小さくすることで、測位誤差は低減できる。例えば、送信周期を 100ms から 10ms、平均化回数を 25 回から 5 回に変更できたとすると、誤差 7cm まで低減できる。
上記の対策を適用する際の課題としては、フレーム送信周期短縮にともなう測位演算処理等の高速化や歩行者台数増加（通信トラフィック増加）時の通信品質（測位品質と同じ）の確保や、平均化回数減少にともなう検討方式自体の測位精度低下をカバーする方法の追加検討、等が挙げられる。次年度以降の複数の歩行者がいる場合の検討、評価や他の対策技術による更なる検討が重要となる。
- 測位結果の平均化処理の見直し
カルマンフィルタ等の歩行や静止状態への追従を想定した方式の検討が必要である。

③ 風等による固定局アンテナの振動による誤差

風や大型車両通過時の振動によって固定局アンテナが振動することで、測位誤差が増加する。

振動時の振動幅や周期の詳細な調査、検討が今後必要となるが、上記①のようにオフセットして常に乗るものではなく、正しい位置を中心に短時間で振動することによる誤差であるため、既に検討した平均化処理により、十分に低減可能であると考えられる。

④ 測位演算、無線通信の遅延による誤差

歩行者からのフレームを受信した後、測位の演算を行い、さらにその後無線通信によって時間をかけて自動走行車へ歩行者がフレーム送信したときの位置を推定、通知するため、自動走行車が測位結果を受け取った時点の歩行者位置との誤差が生じる。例えば、送信周期 100ms、歩行速度 1.4m/s から測位誤差を計算すると 14cm 程度となる。

誤差を低減する方法（案）としては、送信周期及び測位演算処理の高速化や、測位結果とあわせて歩行軌跡（もしくは速度）を自動走行車へ伝え、それらの情報をもとに受信時の歩行者位置を推定（補正）する方法等が考えられる。

例えば、送信周期を 100ms から 10ms に短縮した場合の測位誤差は 1.4cm に低減できる。

以上より、検討方式自体の測位精度が目標精度 10cm を達成した場合の上記誤差要因①、②、④による測位誤差を含めたシステム全体の測位誤差は、

- ・ 低減方法なし： $10\text{cm} + \textcircled{1}3.25\text{m} + \textcircled{2}3.5\text{m} + \textcircled{4}14\text{cm} = 6.99\text{m}$
- ・ 低減方法あり（目標）： $10\text{cm} + \textcircled{1}75\text{cm} + \textcircled{2}7\text{cm} + \textcircled{4}1.4\text{cm} = 93.4\text{cm}$

となる。

以上より、測位方式としての目標測位精度 10cm を達成し、かつ誤差要因の低減方法を検討、追加適用することで、測位誤差は 1m 以下となり、現在のローカル RTK を利用した GNSS 測位の測位精度 1~2m と同程度の精度を実現できることが分かる。

マルチパス対策技術の検討

シミュレーション及び実機による評価結果より、マルチパスの発生する環境を想定したときの測位誤差は 10m 程度となり、本調査検討における伝搬路推定（2 パスモデル）及び平均化処理の対策技術を適用することで測位誤差は 1/100 程度に低減し、目標精度 10cm 程度と同程度となることが分かった。

しかしながら、変動マージンを考慮した際には十分な性能とは言えず、さらなる対策技術の検討が必要である。

以下に、追加改良の対策技術（案）と、その改善効果の見積り結果を示す。

① 伝搬路推定方法の改良（拡張）

本調査検討における 2 パスモデルを想定した伝搬路推定により、支配的な路面反射波の影響はある程度除去できるが、それ以外のマルチパス（遅延波）の除去は十分でない。

そのため、3 波以上のパスを想定した伝搬路推定方法を検討、評価する必要がある。本調査検討で用いた 3 波のマルチパスモデルに対して、3 パスモデルの伝搬路推定を適用すると、2 パスモデルの伝搬路推定を用いた場合の測位誤差よりも 1/2 程度に誤差を低減可能なことがシミュレーション評価により確認できた。

② アダプティブアレーアンテナ機能の追加

本調査検討では無線 LAN 規格として IEEE802.11g/a を想定したが、IEEE802.11n 等の適用を想定すると、固定局側でアレーアンテナの利用が可能となる。

現在の 11n のアレーアンテナの実力（ゲイン約 7dB アップ、干渉抑圧 15dB 程度）を想定すると、シミュレーション評価により、1/3 程度の誤差低減効果が確認できた。

以上より、マルチパス環境における対策技術（案）の抽出とその効果見積りができ、目標精度 10cm を達成することが期待できることが確認できた。

7.2. 課題まとめ

技術的な課題及びアクションアイテムを表 7.2-1 及び表 7.2-2 にまとめる。

表 7.2-1：技術的な課題

課題	対策	対応
BLE、GNSS 等の他方式との切り替え/併用に関する検討	今年度は無線 LAN ベースの検討に重点を置いた。切り替え/併用をする場合、適切な方式を選択するために、各方式の測位精度の信頼性を考慮する必要がある。例えば、併用することで、精度が高いと思われる方式の重みを高くして測位する方式が可能となるが、このとき、重みを計算するために信頼性の指標が必要となる。 信頼性の指標をリアルタイムに取得できる技術の検討を先行し、切り替え/併用の手順について検討を進める。	来年度以降、検討
自動車、歩行者以外（自転車、二輪車等）への対応	今年度に検討した方式は歩行者の測位に限定するものではないが、自動車や二輪車等は、端末の設置条件が異なるため、追加での評価が必要となる。 次年度は自動車や二輪等もシミュレーション評価等を実施することで、自動車や二輪等における技術的な課	来年度以降、検討

	題を抽出し、方式検討にフィードバックする。	
エリアを連続的にカバーする技術	今年度は GNSS 測位が難しい場所等の特定エリアの測位を検討の対象とした。測位のエリアを連続的にカバーするためには、いわゆるハンドオーバー（ローミング）技術が必要となる。一般的な無線 LAN でもハンドオーバーは可能であるが、再接続により測位ができない区間（時間帯）が生じる。ストリーミング時のハンドオーバーなどでも同様の課題が検討されており、これらを参考にし、具体的な方式の検討を進める。	来年度以降、検討
高精度地図と位置情報の紐付け方法	有識者のヒアリングを実施した。2.2.2 項に示す。	実施済み
移動局から直接波が届かない場合の対策	今年度は見通し内環境を検討対象とした。一時的に、直接波が届かず、測位フレームに欠落があったとしても、残った測位フレームを利用して平均化処理を行うことで、できる限り測位精度を保つアルゴリズム等の実装は可能であると考えられる。しかし、永続的に直接波が届かない見通し外環境への対応は、無線を扱ったシステム全体における課題であり、技術的な難易度は高い。まずは、伝搬環境の把握が重要であると考え、直接波が届く環境なのか、あるいは、それ以外なのかを判断する技術等の検討から進める。	来年度以降、検討
移動局が多い場合の効率的通信方式及び台数の上限	今年度は、単一の端末での測位に限定した。本システムは CSMA/CA 方式による衝突回避機能が含まれるが、移動局が多い場合には、衝突する確率が増加する。今年度検討したユースケースから現実的なトラフィック量をシミュレーション等により確認した上で、他チャネルへの切り替え方法、CSMA/CA 方式以外のアクセス制御方式（TDMA 方式など）などの検討を進める。	来年度以降、検討
マルチパス環境における伝搬路推定法	今年度は、2 パスモデルを想定した伝搬路推定を検討。支配的な路面反射波の影響はある程度除去できるが、それ以外のマルチパス（遅延波）の除去は十分でないため、3 波以上のパスを想定した伝搬路推定方法を検討、評価する必要がある。 本調査検討で用いた 3 波のマルチパスモデルに対して、3 パスモデルの伝搬路推定を適用すると、2 パスモデルの伝搬路推定を用いた場合の測位誤差よりも 1/3 程度に誤差が低減可能なことがシミュレーション評価により確認した。 来年度は、伝搬路推定法の導入による効果を実機でも確認する。	検討実施（改良等、来年度以降も継続検討）
干渉、隠れ端末対策	今年度は、基本的な検討として、全ての端末が見通せる環境を前提とし、無線 LAN が一般的に備える CSMA/CA 方式により、干渉や隠れ端末の影響がほぼ発生しない状況を想定した。 実環境では、全ての端末が見通せるとは限らないため、隠れ端末対策として RTS/CTS 方式やポーリング方式等を適用することが可能かを検討する必要がある。これらの導入によりトラフィックの増大などが考えられるため、計算機シミュレーション等により合わせて評価を進める。	来年度以降、検討
測位結果の信頼性をリアルタイムに提示する技術	測位結果には誤差が含まれるため、信頼性を考慮して、測位結果の利用を判断する必要がある。このための測位結果の信頼性に関する指標を提示する技術は重要で	来年度以降、検討

	ある。例えば、指標として GNSS で利用されている DOP や伝搬路推定における推定誤差 Γ の値の適用を検討する。	
移動状態で測位精度を改善させる技術	今年度の方式では、過去の情報を利用した平均化処理を行うことで測位精度の改善を図った。より高度な統計的手法を利用することで、さらに改善することが期待できる。来年度はカルマンフィルタ等の検討、評価を追加する。	検討実施（改良等、来年度以降も継続検討）
雨や雪などの天候による測位結果への影響	今年度は雨や雪などの天候を対象外とした。2.4GHz 帯においては、雨や雪は、ミリ波帯ほどの影響はないと考えられる。	調査を継続

表 7.2-2：アクションアイテム

課題	内容	対応
無線 LAN 以外の方式についての検討	安全運転支援（ARIB STD-T109、IEEE 802.11p）、SIP において検討された方式、海外の検討状況（IEEE 802.11az）について調査、参考として検討を進める。	検討を継続
GNSS 測位等の他の測位方式の調査	今年度は文献調査により GNSS、磁場等の他の測位方式に関して整理した。有識者の助言、協力を受けながら、シミュレーション、実機性能での比較を次年度検討する。	検討を継続
IEEE 802.11ad 利用の検討	IEEE 802.11g/a よりも IEEE 802.11ad は信号帯域幅が広いこと、測距精度の改善が期待できる。IEEE 802.11az で検討されているユースケースの中で測位精度 10cm 以下を目指すものは、IEEE 802.11ad の実装を前提としている。 ただし、IEEE 802.11ad は信号帯域幅が広がるが、ミリ波帯の電波伝搬特性により、信号の減衰が大きくなる。したがって、本調査検討のシステムへの適用を考えた場合には、測位精度のみならず、測位対象エリアの範囲への影響もシミュレーション等で確認する必要がある。 また、現行のスマートフォンでは、IEEE 802.11ad に対応したものがないため、今後のマーケット、海外の動向／普及状況等を注視する必要がある。	調査、検討を継続
端末の高さの影響	今年度は歩行者の胸ポケットへの設置を想定し、評価を実施した。 車両、歩行者、自転車の違いや携帯位置（胸ポケット、カバン等）の違いによる高さの影響、及び道路上、歩道橋等の歩行者位置の影響に関する評価を進める。	調査を継続
無線通信の送受信の関係	今年度検討した方式は、測位の計算を固定局側で行う。送受信の関係を逆にさせ、端末側で測位の計算を行うことは、方式としては可能であるが、現行のスマートフォンでの測位を想定した本システムへの適用はできない。なぜなら、現行のスマートフォンは、高速な AD コンバータを備えないため、固定局から送信される電波を正確なタイミングで取得できないためである。 ただし、将来的に IEEE 802.11ad がスマートフォンに導入された場合には、この限りではない。 IEEE802.11ad には高速な AD コンバータが実装されることが想定されるため、送受信の関係を逆にさせることが可能となる。前述のとおり、今後のマーケット、海外の動向／普及状況等を注視する必要がある。	検討実施（IEEE802.11ad の動向を踏まえて、調査、検討を継続）
検討方式の 11az への提案、	IEEE 802.11az が想定するユースケースでは、自動走	検討を継続

別プロトコルとしての選択等	<p>行を対象としたものは無いことを確認した。また、測位精度 10cm 以下を目指すものは、IEEE 802.11ad の実装を前提としており、本システムが想定する 2.4GHz 帯や 5GHz 帯においては、IEEE 802.11az を適用しても、測位精度は 1m 程度に留まる、と考えられる。</p> <p>本システムは、IEEE 802.11g/a を利用した場合であっても、測位精度 10cm 以下となることを目標としており、固定局側に高精度の AD コンバータや高度な伝搬路推定機能を備えることで、これを実現する。したがって、IEEE 802.11az に対しては、(IEEE 802.11ad のようにミリ波帯ではなく) 2.4GHz 帯や 5GHz 帯を利用しながらも、測位精度が 10cm 以下となるという点で差別化できる。</p> <p>なお、今年度及び次年度の検討により有効性を確認した上で、IEEE への提案も検討していく。</p> <p>また、別プロトコルとして併用が可能か等も検討を進める。</p>	
事故が多く発生している場所等の確認	2.3 節に調査結果を示す。	実施済み
通常のサンプリング速度における測位精度の確認	今年度は 5Gbps のサンプリングにおける測位精度を確認した。次年度は、低コスト化や汎用性を考慮し、通常のサンプリング速度（例えば、20Msps など）における測位精度を確認する。	来年度以降、検討
測位するエリア毎に伝搬モデルを設定することで測位精度を高める方法、固定局のアンテナを複数用意して電波伝搬の状態をモニタリングする方法の検討	本システムは、対象エリア毎に固定局の位置などをチューニングし、高い測位精度を維持できることが特長である。伝搬モデルを事前に用意する方法や複数アンテナ化も可能であると考えられ、検討を継続する。	来年度以降、検討

8. 【付属資料 1】平成 29 年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 実施体制および構成員名簿

8.1. 実施体制

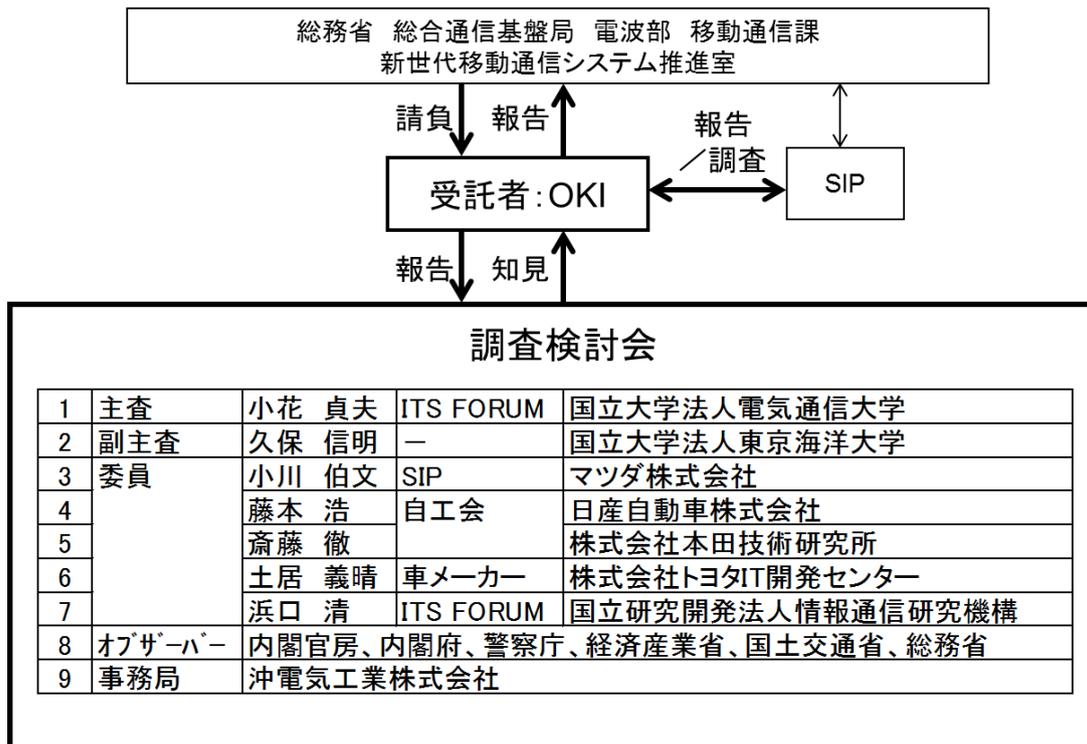


図 8.1-1 : 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会の実施体制

8.2. 構成員名簿

表 8.2-1：自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会の構成員名簿

	名前	委員会等	所属
主査	小花 貞夫	ITS 情報通信システム推進会議 高度化専門委員会 委員長	国立大学法人電気通信大学 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻
副主査	久保 信明	—	国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 海事システム工学部門
委員	小川 伯文	SIP 自動走行システム システム実用化 WG 車車路車間通信民間窓口 国際連携 WG 準構成員 Connected Vehicle 窓口	マツダ株式会社 R&D 技術管理本部 開発調査部
	藤本 浩	ITS 情報通信システム推進会議 高度化専門委員会 次期システム企画 TG 主査	日産自動車株式会社 電子技術・システム技術開発本部 AD&ADAS 先行技術開発部 戦略企画グループ
	斎藤 徹	ITS 情報通信システム推進会議 高度化専門委員会 無線方式検討 TG	株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター 統合制御開発室 第 2 ブロック
	土居 義晴	—	株式会社トヨタ IT 開発センター 研究部 ITS 無線グループ
	浜口 清	ITS 情報通信システム推進会議 技術企画委員会 委員長	国立研究開発法人情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センター
オブザーバ		内閣官房 内閣府 警察庁 経済産業省 国土交通省 総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課 新世代移動通信システム推進室	
事務局(請負者)		沖電気工業株式会社	

9. 【付属資料2】平成29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 議事録集

9.1. 第1回会合議事録

H29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第1回会合議事録

1. 日時：平成29年10月26日（木） 10:00～12:00
2. 場所：STANDARD 会議室 虎ノ門ヒルズ FRONT 店 6階 A 会議室
3. 出席者：(順不同、敬称略)
 - (1) 委員
小花 貞夫（主査）、久保 信明（副主査）、藤本 浩、斎藤 徹、土居 義晴
 - (2) オブザーバ
[内閣官房 IT 総合戦略室] 大澤 良樹、河西 航太
[内閣府 政策統括官付] 竹馬 真樹
[警察庁 交通局 交通企画課] 大城 ゆりか
[経済産業省 製造産業局 自動車課] 小林 史和
[総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課] 川崎 大佑、和田 憲拓、石井 智章
 - (3) 事務局 [沖電気工業]
浜口 雅春、金子 富、中林 昭一、菊池 典恭、畑本 浩伸、浅野 欽也
4. 配布資料
 - H29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第1回 議事次第
 - [H29_高精度位置推定-1-1]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会」規程
 - [H29_高精度位置推定-1-2]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」概要
 - [H29_高精度位置推定-1-3]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施内容
(1) ア ユースケースの要件抽出
 - [H29_高精度位置推定-1-4]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施内容
(1) イ 無線通信及び測位のプロトコル検討
 - [H29_高精度位置推定-1-5]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施内容
(2) イ 実機による性能評価
 - [H29_高精度位置推定-1-6]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施内容
(2) ア 計算機シミュレーションによる性能評価
 - [H29_高精度位置推定-1-7]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」実施計画

- [付属資料 1]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会」構成員名簿

5. 開会

総務省移動通信課 川崎課長補佐より開会の挨拶が行われた。

川崎課長補佐) 自動走行の実現に向けて、総務省として様々な研究開発を行っている。自動走行を実現するには、車や歩行者を高精度に測位することが重要となる。GNSS による衛星測位に関しては、受信する電波が微弱であり不安定な状況が発生するため、測位精度を担保する別の手段を検討する必要がある。活発にご議論いただきたい。

6. 委員の紹介

委員、オブザーバおよび事務局の自己紹介が行われた。

7. 検討会開催に関する説明（検討会規程の確認）

資料 [H29_高精度位置推定-1-1] に基づき、検討会規程の説明が行われた。特に指摘事項はなかった。

8. 主査、副主査の選出

小花委員、久保委員がそれぞれ、主査、副主査に選出された。小花主査、久保副主査より以下のコメントがあった。

小花主査) 自動運転を実現するためには位置情報の扱い、精度が非常に重要であり、従来から様々な取組みがあるが、自動走行に要求される十分な精度を有する測位方法はまだ確立されていない。準天頂衛星の増加により少なくとも 1 機が常に真上付近を通ることになり、数 cm 程度の測位精度になると言われている。しかしながら、農場における農業機械の自動運転など特定の条件のみでの利用が検討されている状況である。世の中では既に自動運転が実現できると考えられているが、多くの課題が残っており様々な方法、条件で検証する必要がある。忌憚無いご意見をお聞かせ頂き、より良い成果を残せるよう協力をお願いする。

久保副主査) 小花主査のご指摘の通りである。成果創出に協力していきたい。

9. 議事

(1) 調査検討概要説明

資料 [H29_高精度位置推定-1-2] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

土居委員) 反射波があるような閉空間においては、マルチパスによって精度が劣化すると思われる。今回、マルチパス環境でのシミュレーションを実施するのか。

中林) 今年度はオープンスペースを想定して基本的な方式を固めることに注力するが、マルチパス環境によるシミュレーション評価等を実施し理想的な環境とのギャップを把握し課題として整理する。具体的なマルチパス対策技術の検討、検証は、次年度実施する計画である。

土居委員) Wi-Fi を検討対象としていることは今後の展開を考えると合理的である。Wi-Fi 以外の方式に関する調査検討は行わないのか。

中林) これまで SIP において検討されていた方式等を調査し参考とする。海外の

IEEE802.11az（以下、11az）における検討状況も踏まえて報告する。

小花主査) 測位精度 10cm 程度を目標として挙げているが、20cm、30cm では問題なのか。

目標値の設定根拠を明確にする必要がある。

また、他の方式の調査は文献によるものか、シミュレーション等も実施するのか。例えば、今回の検討方式の有効性を示すには、衛星による測位に関して、銀座等の高層ビル群において衛星数が増えてマルチ GNSS を用いた場合の精度はどの程度なのか、シミュレーション等で把握する必要がある。

さらに、自動運転において、車同士の相対位置を把握すれば良いケースも考えられる。今回の検討では、絶対位置と相対位置のどちらが必要となるのか明確にして議論を進める必要がある。

中林) 1 点目に関しては、ご指摘の通り、測位精度 10cm 程度は仮の目標値である。各ユースケースの要件の抽出作業において、それぞれのユースケースが必要とする測位精度を整理し、仮の目標値と比較分析する。

2 点目に関しては、他の測位方式の調査において、GNSS による測位に関してシミュレーション等による評価は今年度実施しない想定であるが、指摘を踏まえて次年度の実施等を検討したい。

3 点目の絶対位置と相対位置に関しては、ご指摘の通りユースケースによっては相対位置だけ取得できれば良いというケースがあると考えられる。いずれのケースか明確にして次回以降検討、報告する。

久保副主査) GNSS 測位に関しては、可能な範囲で協力する。

斎藤委員) これまでの SIP における総務省の施策の中で、BLE を用いた交差点内での歩行者位置測定の検討があるが、本調査検討の施策とのつながり、位置付けはどのように考えているのか。

川崎課長補佐) 一つの方法のみで高精度な位置測定を実現することは難しく、いくつかの方法によるダイバーシチ等を実施する必要があると考えている。BLE、準天頂衛星、今回の検討方式がそれぞれ使える場所で多重的に使えば良いとの認識である。

川崎課長補佐) BLE、準天頂及び無線 LAN の切り替えに関する検討は、本プロトコル検討に入っているか。

中林) 今年度は無線 LAN を用いた方式の検討に重点を置き、他方式との切り替えに関しては含んでいないが、切り替え時の課題等を机上にて調査、整理したい。

浜口) 測位結果の精度に関する情報が予め分かっているならば、精度が悪くなる前に切り替える方法も考えられる。予め分かるかどうかは、ユースケースによると思われるので、ユースケースの検討においてコメント、情報を頂きたい。

小花主査) 単純な切り替えだけでなく、併用に関しても検討する必要がある。精度が高いと思われる方式の重みを高くして測位の演算を実施する等の方法が考えられる。

(2) 調査検討実施内容説明

① 高精度位置推定システムの方式検討：ユースケースの要件抽出

資料 [H29_高精度位置推定-1-3] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

土居委員) 4 ページの評価対象とするユースケースに関して、自動車と歩行者を挙げているが、自転車や二輪車は対象としないのか。

- 菊池) 今年度は、最初の評価として、自動車、歩行者を対象とする。二輪車等に関しては、マルチパスの影響の違い等を考慮したシミュレーション評価により次年度確認することを検討する。
- 土居委員) 最終的な報告では自転車や二輪車にも対応可能な技術としてまとめて欲しい。
- 土居委員) マルチパスが発生しにくいような波として磁界を利用した測位技術を調査対象に追加して欲しい。
加えて、5 ページのユースケースに関して、自動運転だけでなく安全運転においても測位精度は重要となる。日本では信号機が無い小さい交差点での飛び出し事故が多く、そのような環境でも対応できるか検討して欲しい。
10 ページの 11az に関して、今回検討する方式は 11az の方式とどのように関係するのか。例えば、検討方式は 11az へ提案していくのか、別プロトコルとして選択できるようにするのか等。
- 中林) 持ち帰り検討し、次回以降に説明する。特に 11az に関しては、成果によって判断する必要があると考えている。11az では端末、固定局のチップが将来高速サンプリング対応になる想定で高精度測位の検討が進められているが、本調査検討では端末側は高精度なタイムスタンプ機能の無い現状の汎用チップが搭載されている想定で検討する。当然、将来スマートフォン等の端末が高速サンプリング対応になった場合も、検討方式は適用可能である。
- 川崎課長補佐) トンネル、駐車場の GNSS 測位が難しい場所において、GPS の信号を送信できる固定局を設置する場合と Wi-Fi を設置する場合で、どちらが効率的なのか。
- 菊池) 固定局として IMES(Indoor Messaging System)が考えられるが、現時点の IMES では固定局の近傍にいることしかわからない。
- 藤本委員) 要件整理における測位精度に関して、自動走行のユースケースでは高精度地図を使用しており、そのベースの上に検討方式による測位結果を重ね合わせる際に様々な誤差が足し合わされる点も考慮して調査して欲しい。
また、複数のユースケースをまたぐ場合の地図の使い方の重みの変化等も検討して欲しい。
- 浜口) 案を示しつつ、車メーカーがイメージしているものと合うように検討を進めていきたい。
- 小花主査) 藤本委員にもアプリケーションの立場から提案、意見等の協力をお願いしたい。
- 斎藤委員) 車の座標からのローカルな相対位置や、GNSS のようなグローバルな座標の他に、中間的なランドマークに対する位置表現をもって、お互いの位置を共有する方法がある。地図とコンバインし、無線局との位置関係を直接把握する方法を検討するべきではないか。様々な方式による測位結果と地図をコンバインする方法等は、業界でも議論しているところであり、留意して欲しい。
- 小花主査) ばらばらにあるのではなく、絶対位置、相対位置、ランドマークの関係等の紐付けの検討は重要であり、紐付け方法に関しても検討することが望ましい。
- 浜口) ご指摘の通りであり、検討会の場で整理していきたい。

② 高精度位置推定システムの方式検討：無線通信及び測位のプロトコル検討

資料 [H29_高精度位置推定-1-4] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

- 川崎課長補佐) 8 ページの超高速サンプリングの必要性に関して、1Gsp/s 程度の市販デバイスに対して、今回は 5Gsp/s の新たなチップを開発するのか。
- 菊池) 新たなチップの開発は行わない。市販デバイスを並列に動かすことで 5Gsp/s までサンプリング速度を上げる。
- 川崎課長補佐) 価格面、技術面等で高くなる点は問題とならないのか。
- 菊池) 高速サンプリングは固定局に実装するものであり、現段階では高価なものとなってしまいが、将来的にはコストが下がっていくことを期待している。
- 小花主査) 普及すれば安くなる。
- 土居委員) スマートフォン等の端末から飛んでくる Wi-Fi の信号をサンプリングするか。Wi-Fi のバンド幅は 20MHz、もしくは IEEE802.11ac のような 160MHz を想定しているのか。
- 菊池) ユースケース次第であるが、最初は 20MHz を想定して検討する。
- 土居委員) 20MHz ではマルチパスが到来すると信号が鈍ってしまい、5Gsp/s でサンプリングしてもピークがわからなくなるのではないのか。
- 菊池) マルチパスの影響はシミュレーション等で確認し、次年度に対策を検討する。
- 土居委員) 隠れ端末のように干渉を受けるケースも将来的には考える必要がある。
- 土居委員) 10 ページのプロトコルスタックにおいて、通信プロトコルは何でも良いのか。
- 菊池) その通りある。
- 土居委員) 自動運転、安全運転支援の場合、V2X 装置が搭載される。日本では 760MHz 帯、欧米だと 5.9GHz 帯の IEEE802.11p による通信であるが、このような通信プロトコルでも測位可能となるのか。
- 菊池) Wi-Fi 以外の通信も考慮しながら検討を進めていく。
- 小花主査) 予め既知としている固定局の位置の精度はどの程度を想定しているか。
- 菊池) まずは仮の目標精度と同じ 10cm 程度を想定している。実験では赤外線レーダ等を用いて数 cm レベルで固定局の位置を測ることができるが、実際に設置する際には課題となる。
- 小花主査) 例えば、交差点を対象とした場合、信号機等への設置が考えられる。設置時にある程度測量していると思われるが、信号機はどの位の位置精度で設置されているのか。
- 藤本委員) おそらく数 cm の精度ではない。また、図面をもとに立てようとした場所に他の物がある場合は避けて設置される。避けた場合の位置管理まではできていないのではないのか。
- 小花主査) 将来、今回の検討方式を使用する場合、全国の交差点の路側機の位置を測り直すことになるのか。それは大変な手間になる。
- 浜口) 固定局の位置管理は検討が必要である。例えば、3D の高精度地図の測位と関連付けることができるのではないのか。例えば、絶対位置は分からなくても、道路上でどの位の位置に設置されているか分かる等。
- 久保副主査) 車メーカーで高精度 3D 地図を作るときに、絶対座標を WGS (世界測地系) で決めていると聞いたことがあるが、それを用いれば分かるのではないのか。レーザーを用いて求めており 1cm の精度で求めることができるのではないのか。
- 藤本委員) おそらく技術的には問題ないが、測定した全てのデータを残しているかは不明である。全部の地物データを残すと、膨大なデータ量となり費用もかかる。また地物は工事などで頻繁に動く点が問題となる。交差点ですら工事で白線等が微妙に動くので、絶対位置で追い求めても中々合わない所が出るのではないのか。

- 浜口) 自動運転を行う際には高精度地図があるという前提ならば、その情報を使えるのではないかと。当然、工事のときも含めて高精度地図情報を使えないこともあるが、そのときは自動運転も行えず、手動に切り替えることになる。そのような状況での測位精度は高いもの必要としないと思われる。高精度地図情報を高精度測位に使う際の考え方を整理する必要がある。
- 小花主査) 今回の方式は固定局の位置情報をもとにした測位であり、高精度地図情報との関係、固定局位置の測位誤差の影響、等をきちんと整理して検討を進めることが重要である。
- 浜口) ご指摘の通り固定局の位置をきちんと測位した上で使える方式であるが、既にある地物に設置する際に正確に位置が把握できるか等の課題も整理して検討を進める。
- 斎藤委員) ランドマークにおける基準点を使った、二次的な測位については鶏と卵の関係なので、測位性能を上げるには、どちらかの位置をきちんと決める必要がある。
- 斎藤委員) 固定局の組合せを固定することで、あるエリアに対して測位精度を上げる検討からスタートすると理解した。その際、高速道路に対して、道路を連続的に移動していくようなユースケースを対象にした、その先の拡張を考慮して検討するのか。
- 中林) ご指摘の通り拡張性を考慮して検討を進めることが望ましいが、まずは GNSS 測位が難しい場所等の特定のエリアを対象とした形で検討を進めたい。
- 斎藤委員) 連続的にカバーするのか、ポイントポイントでカバーすることでエリア間の中間を埋めていくのか、どちらの考え方に立つかで、アプローチが変わってくる。
- 浜口) 考え方を整理する。
- 斎藤委員) 連続でカバーするにはシステム規模が非常に大きくなることは理解している。ポイントポイントでカバーする方が効率的と思われる。
- 藤本委員) 4つの基地局は、移動局に対してどのくらいの立体角なのか。10cmの精度を出すためには、どのような位置関係になる必要があるのか検討する必要がある。例えば、縦に固定局が並んでいると誤差が大きくなる、精度を上げるには遠く／近くした方が良い、等。
- ③ 高精度位置推定システムの性能調査：実機による性能評価
資料 [H29_高精度位置推定-1-5] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。
- 土居委員) 測位評価の実験は屋外で実施するのか。
- 中林) 屋外のテストコースで実施する。
- 川崎課長補佐) 代表局に他の固定局が時刻を同期する際に、代表局の時刻ずれは問題となるか。
- 菊池) 検討方式では、絶対的な時刻は重要ではなく、代表局の時刻を基準とし、システム内で差分情報をもとに同期が取れていれば問題ない。
- 和田様) 9ページと10ページの歩行者と車両の位置推定に関して、歩行者と自動車の移動速度は異なり、自動車を相手にしたシステムを想定した場合、システム的にかなり高度な物が必要となるのではないかと。それを歩行者のスマートフォンに実装するには負荷がかかるのではないかと。

菊池) 測位の処理は固定局で実施する。歩行者、車の端末側はビーコンの送信等を行うだけで負荷は少なく、汎用的なデバイスで実現できる。

斎藤委員) カバーするエリアに関して、あるエリアでは縦方向の測位が重要ではなかったり、別のエリアでは重要であったりする。その際、固定局の配置方向が重要となると思われる。

小花主査) 衛星の配置と同じように、固定局の配置に応じて測位精度も変化する。考慮して検討を進めて欲しい。

④ 高精度位置推定システムの性能調査：計算機シミュレーションによる性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-1-6] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

久保副主査) 5 ページの図における DOP は何を示しているか。

畑本) 水平方向の DOP (HDOP) を示している。

久保副主査) HDOP が非常に大きい理由は何か。

畑本) 30m 四方に同じ高さ 5m で固定局を設置しているためである。10 ページの図に示すように高さ等の配置を変えることで DOP は大きく変化する。固定局の設置条件は重要であり、ユースケース毎に検討し技術的条件としてまとめる。

久保副主査) 4 ページに示しているように、測位誤差は DOP×測距誤差で決まるため、HDOP が 5 ページの図のように非常に大きい (10 以上) と、測距誤差が 1cm であっても測位誤差は 10cm にならない。

中林) 過去の複数ビーコンによる測位結果を用いた平均化や異常値の除去等の処理を測位アルゴリズムに追加することで、測位精度が上がらない場所での改善を検討する。

土居委員) 5 ページの図のような配置では、固定局に近い所ほど精度が悪く、中央付近の精度が良くなると思われるが、5 ページの図では逆になっている。

畑本) TOA の場合はご指摘のような測位精度の分布になるが、検討方式の TDOA では 5 ページのような分布となる。TDOA では距離差をもとに測位するため、距離差がゼロに近くなる箇所では精度が悪くなる。

小花主査) 計算結果の妥当性や TOA との比較等、久保副主査に協力して頂いて確認、議論する形で進めて欲しい。

土居委員) 8 ページの技術的条件と無線通信条件は、端末側と固定局側を分けて整理する必要がある。また、送信電力 0dBm、雑音指数 3dB 等の妥当性を端末、固定局のそれぞれで確認する必要がある。

畑本) ご指摘の通り整理する。

小花主査) 移動局の高さも測位精度に影響するのであれば、自動車、歩行者、自転車の場合の高さの違いによって測位精度が変わる。また、自動車の場合、通常では約 1.5m と想定するのに対して、歩行者の場合、胸ポケット想定 1m だけでなく、カバンの中に入れた場合等の様々な高さを想定する必要があるのではないか。

土居委員) 歩車間通信における問題の一つに、歩行者が道路上ではなく歩道橋 (高さ 5m 程度) を通っている状況を検出することが難しい点がある。高さ方向も考慮した評価も行って欲しい。

藤本委員) この調査検討は、各ユースケースに対して、測位精度を確保する固定局の配置、高さの条件を抽出することが目的と考えて良いか。

浜口) ご指摘の通りである。資料では一例として交差点全体をカバーする場合を示しているが、横断歩道にフォーカスした場合の配置など、ユースケースによって条件が変わってくる。

藤本委員) 固定局の配置だけでなく、時間的な平均処理等による工夫を含めた条件整理か。

浜口) ご指摘の通りである。

藤本委員) 11az との違いを明確にして調査検討のポイントを次回説明して欲しい。例えば、11az の標準化を待たずに今この調査検討を行う理由等。

浜口) 既に利用されている BLE に加えて、11az 等のそれ以外の測位方式との比較も行う。

(3) 実施計画

資料 [H29_高精度位置推定-1-7] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

浜口) 検討を進める前に本日の指摘をもとにアクションアイテムを整理する必要がある。引き続き、ご協力をお願いしたい。

小花主査) 次回検討会の最初に、今回出たご意見に対して、実施時期は今年度、次年度のいずれか等、スケジュール的なことも含めて、どのように実施するか整理して説明して欲しい。

10. その他連絡事項

- ・ 第 2 回会合は、12 月 26 日 15:00～17:00 に行う。
- ・ 第 3 回会合は、2 月 27 日 15:00～17:00 に行う。

以上

9.2. 第2回会合議事録

H29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第2回会合議事録

1. 日時：平成29年12月26日（火） 15:10～17:00
2. 場所：OKI 虎ノ門本社3階会議室
3. 出席者：(順不同、敬称略)
 - (1) 委員
小花 貞夫（主査）、久保 信明（副主査）、小川 博文、齋藤 徹、土居 義晴、
浜口 清
 - (2) オブザーバ
[内閣官房 IT 総合戦略室] 大澤 良樹
[警察庁 交通局 交通企画課] 大城 ゆりか
[経済産業省 製造産業局 自動車課 ITS・自動走行推進室] 木村 禎志
[総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課] 川崎 大佑、和田 憲拓、石井 智章
 - (3) 事務局 [沖電気工業]
浜口 雅春、中林 昭一、菊池 典恭、畑本 浩伸、浅野 欽也、星名 悟、
矢野 貴大
4. 配布資料
 - H29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第2回議事次第
 - [H29_高精度位置推定-2-1]
H29年度自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第1回会合議事録
 - [H29_高精度位置推定-2-2]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」アクションアイテム一覧
 - [H29_高精度位置推定-2-3]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施状況報告(1) ア ユースケースの要件抽出
 - [H29_高精度位置推定-2-4]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施状況報告(1) イ 無線通信及び測位のプロトコル検討
 - [H29_高精度位置推定-2-5]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施状況報告(2) ア 計算機シミュレーションによる性能評価
 - [H29_高精度位置推定-2-6]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施状況報告(2) イ 実機による性能評価
 - [H29_高精度位置推定-2-7]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」実施計画

- [付属資料 1]
自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 構成員名簿

5. 開会

総務省移動通信課 川崎課長補佐より開会の挨拶が行われた。

川崎課長補佐) 本調査検討会では、自動走行を実現するためにどのように測位を行うかについて議論いただきたい。他方、SIP の推進委員会において、本調査検討のシステムはスードライト等の他の位置推定システムと比較してどのようなメリットがあるのか、どのように実用化していくのかについての指摘を受けている。それらの指摘を念頭に置いて議論を進めていただきたい。

6. 第 1 回会合議事録 (案) の確認

資料 [H29_高精度位置推定-2-1] に対し、修正が必要でないことを確認した。

7. 議事

(1) アクションアイテムの確認

資料 [H29_高精度位置推定-2-2] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、特に指摘事項はなかった。

(2) 調査検討実施内容説明

① 高精度位置推定システムの方式検討 ユースケースの要件抽出

資料 [H29_高精度位置推定-2-3] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 9 ページ目に示す想定 of 道路環境に関して、赤枠で囲まれたエリアが測位対象となるのか。

中林) 赤枠で囲まれたエリアが測位対象となる。

小花主査) 事故が発生するエリアは赤枠で囲まれたエリアと同じか。

中林) 事故が発生するエリアと同じ想定である。本検討では赤枠で囲まれたエリアを測位対象として注力する。ただし、エリアを拡大した場合の測位精度も確認する。

小花主査) 死亡事故、負傷事故が一番多い場所は赤枠のエリア外ではないか。横断歩道以外で歩行者が飛び出し交通事故が発生するケースも多いと考える。また、ITARDA (交通事故総合分析センター: イタルダ) のデータによると、死亡事故の多い場所は信号機のある交差点と単路だったと記憶している。どのような場所で事故が発生しているのかを把握した上で対象エリアを決めるべきであり、事故多発ケースを調べてほしい。

中林) 承知した。

小川委員) 6 ページ目における従来の測位方式の比較表に今回の測位方式を加えてほしい。

中林) 承知した。

浜口委員) インフラ側のレーダで歩行者を検出する方式もあるが、今回の測位方式では歩行者が測位専用の端末を持つのか。

浜口) 測位専用の端末は持たない。スマートフォンの Wi-Fi を利用した測位を考えている。

小花主査) 5 ページ目に記載されているトンネル内での測位も今年度の検討対象とするのか。
中林) トンネル内での測位は今年度の検討対象としない。

② 高精度位置推定システムの方式検討 無線通信及び測位のプロトコル検討

資料 [H29_高精度位置推定-2-4] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 移動局が送信したビーコンを各固定局が受信し、測位するのか。

菊池) その通りである。

小花主査) どのように固定局間は時刻の同期をとるのか。

菊池) 固定局間の定期的な信号のやり取りにより時刻の同期をとる。

小花主査) どのように距離を測定するのか。

菊池) 距離自体は測定しない。歩行者の端末から各固定局に電波を送信し、各固定局が電波を受信する時刻の時間差を測定し距離差を求める。

土居委員) 11 ページ目において、ビーコンではなくデータ通信の packets を使うことでも測位を可能としているが、交差点に歩行者が接近した際、どのように固定局とデータ通信を行うのか。

菊池) 歩行者は Wi-Fi を常時起動しており、交差点に歩行者が接近した際、交差点付近の固定局に接続して、通信が行われることを想定している。

土居委員) Wi-Fi を起動していても通信を行うとは限らない。事前に専用のアプリをユーザがダウンロードして、そのアプリに従って固定局と通信を行う必要があるのではないか。

浜口) 基本的に専用のアプリを利用し、ビーコンを定期的に出すことになる。ただし、歩行者が固定局と任意のデータ通信をしている場合は、ビーコンを追加で送信する必要はない。これにより、余分な電波を出す必要がなくなる。

小花主査) Wi-Fi を使う場合、代表局がプローブのリクエストを出せば、交差点に接近した移動局は応答すると思われる。

小花主査) 移動局が固定局から遠くにある場合に測位精度は問題ないか。

菊池) 検討対象とした 44m 四方の交差点エリア内において、計算機シミュレーションでは、目標とする測位誤差 10cm 以下を達成しており、問題ないと考えている。

小川委員) 11 ページ目において、代表局は図に記載された A 以外の固定局 (B、C、D) で代用可能か。

菊池) A 以外の固定局で代用可能である。便宜上、資料では A を代表局としているが、その他の固定局を代表局として測位することは可能である。

小花主査) 歩行者が建物の陰に隠れると、一部の固定局においては直接波が受信されず、電波の到達時刻が遅延する。このとき、距離差に誤差が発生し、測位結果に影響すると思われる。

浜口) 承知した。測位への影響に対してマージンを設けた検討を行う。

斎藤委員) 実装条件や、どの通信に対して測距を行うかなどの付随的な検討を同時並行で行うと混乱する。高精度位置推定システムの実現に向けて、本質的な検討事項を抽出し、どのような順番で検討していくのか明確にしてほしい。

浜口) 承知した。指摘事項を踏まえて前提条件を再整理する。

小川委員) 理想的な環境でない場合、今回の測位方式では測位精度が劣化する要因がどれだけあるのか。また、今回の測位方式であればどこまで解決できるのか。測位方式の比較表において、従来の方式では解決が困難である要因に対して、今回の測位方式が有用であることを示してほしい。

浜口) 承知した。

小花主査) 前提として最も大事なことは、どの歩行者を事故から救うのかである。検討対象としたユースケースでは、少数の歩行者しか事故から救えないのではないかと。交差点の中で測位する必要のあるエリアを整理してほしい。

浜口) ユースケースを再度整理する。本検討では隣接する高層ビルにより衛星での測位が困難である交差点を対象エリアとして基本的なユースケースを抽出する。

土居委員) 事故を防ぐために、車両側へ歩行者の位置情報を伝えるのか。

浜口) その想定である。

小川委員) 移動局の台数に上限はあるのか。歩行者数も含めてどの程度の規模の交差点を想定しているのか等を明らかにし、整理する必要がある。

浜口) ご指摘の点を踏まえて、システム要件を整理する。

③ 高精度位置推定システムの性能調査 計算機シミュレーションによる性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-2-5] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

斎藤委員) 5 台目の固定局の高さはいくらか。

畑本) 5m である。高さ 3.5m の 3 台目の固定局と同じ XY 座標に設置している。

小花主査) 固定局の高さを全て 3.5m や 5m に変えた場合、測位精度は変わるのか。

畑本) 固定局の高さを全て同じにした場合、測位精度が劣化する。高さを全て同じにすると前回の調査検討会で示した DOP 特性のように、著しく精度が劣化する領域が発生することを確認している。TDOA 方式では固定局の高さに高低差をつけることで DOP 特性が良好になる。

土居委員) 固定局の高さを変えることは、9 ページ目で示した測位誤差の理論式のどの項に影響するのか。

畑本) DOP の項に影響する。

川崎課長補佐) 固定局を増加させれば性能が改善することは理解できるが、何台で場所率 90%以上を目指すのか。

畑本) 4 台で場所率 90%以上を目指す。検討対象のユースケースにおいて、4 台で測位誤差 10cm 以下を達成する場所率が 90%以上となることを理論式で確認している。今回のシミュレーション結果は理論式の結果より測位精度が劣化しているが、測位アルゴリズムの改良により、理論式の結果に近づけることが可能であると考えている。

川崎課長補佐) DOP は固定局の配置によって変化するが、ユースケース毎に固定局の配置について検討するのか。

畑本) ユースケース毎に測位精度が良好となる固定局の配置を検討する。

小花主査) 歩行者のいるエリア、端末を持つ高さによって測位精度が良好となる固定局の配置も変わるのではないかと。

畑本) ご理解のとおりである。歩行者のいるエリア、端末の高さによって、場所率 90% 以上を可能とする固定局の配置が変わる。なお、今回のシミュレーションでは端末の高さを胸ポケット相当の 1.3m とした。

土居委員) 測位精度 10cm 以下を満たさない残りの 10%の場所では測位精度がどの程度劣化するのか。場所率 99%での測位精度も参考として示してほしい。

浜口) 承知した。

土居委員) 10 ページ目の測位誤差の計算では、9 ページ目の測位の理論式を利用したのか。

畑本) 9 ページ目の理論式を利用した。ただし、理論式の計算で用いる測距誤差は、移動局と 4 つ (もしくは 5 つ) の固定局間における測距誤差のうち、最悪値を利用した。最悪値を利用することで厳しい条件での測位誤差を計算した。

土居委員) 9 ページ目に計算方法を明記してほしい。

畑本) 承知した。

土居委員) 13 ページ目のシミュレーション結果と理論式の結果の差異は何か。

畑本) 結果の差異は使用した測位アルゴリズムによって発生している。今回のシミュレーションで使用した測位アルゴリズムでは、測位の計算過程において解が複数出力されるケースがある等の課題がある。測位アルゴリズムを改良することによって、正しい位置に近い解に絞り込むことができれば、測位精度は理論値に近づくと考えている。

小川委員) 11、12 ページ目の測位誤差のカラーマップにおいて、右下と右上の領域で測位誤差が大きくなる理由は何か。

畑本) 固定局と歩行者端末の高さの関係が測位誤差に影響している。すなわち、歩行者端末と近い高さにある固定局の近傍で誤差が大きくなる。

土居委員) 測位結果の信頼性を判断する方法はあるか。

畑本) GPS において DOP の情報を判断材料の一つとして利用すると同様に、移動局の推定位置と固定局の位置情報から DOP を推定し、測位結果の信頼性を判断する際の参考として示すことができる可能性はある。

土居委員) 取得した測位結果ごとに、どの程度の誤差が含まれるのかを判断できれば、測位結果を利用する車メーカーにとって有用である。

斎藤委員) DOP のようなスタティックな情報だけでなく、車体の反射等による瞬時的な変化による測位誤差の発生も知りたい。測位結果の信頼性をリアルタイムに提示する技術を検討してほしい。

④ 高精度位置推定システムの性能調査 実機による性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-2-6] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) マルチパス環境において、相互相関のピーク位置を正しく検出できるか。

菊池) マルチパス環境では相互相関のピーク位置が変化する。マルチパスの影響を抑圧する対策技術を検討する必要がある。

土居委員) マルチパスの影響を抑圧するために指向性制御を検討する予定はあるのか。

中林) 今年度は指向性制御を検討する予定はない。マルチパス対策として有効な技術であるが、固定局の実装コスト面が課題となる。

小川委員) オープンエリア以外にマルチパスのある環境でも測定する予定か。
菊池) マルチパスのある環境で測定する予定である。

浜口委員) 雨や雪などの天候が測位結果に影響するものと考えられるが、このような天候でも測定する予定か。

中林) 雨や雪などの天候において測定する予定はない。

小花主査) 2.4GHz帯において、雨や雪によってどの程度の影響を受けるのか。

中林) ミリ波帯ほどの影響はないと考えられる。天候の影響に関しては、机上で整理する。

小川委員) オープンエリアにおいて、地面が土からアスファルトに変わった場合、電波伝搬の変化はあるのか。

浜口) 電波伝搬の変化がある。路面反射の影響を受けるものと考えられる。

⑤ 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討 実施計画

資料 [H29_高精度位置推定-2-7] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、特に指摘事項はなかった。

⑥ 全体を通じた指摘事項

斎藤委員) 今回の測位方式では見通し環境となる固定局が少なくとも 4 台必要であると認識している。車両が歩行者と固定局間を遮蔽する状況が発生しないのかを確認する必要がある。ただし、巻き込み事故等を想定すると、歩行者と固定局の間の車両により通信が遮蔽される状況が発生するため、交差点における歩行者と車の位置関係の把握が必要である。位置関係を踏まえた上で、固定局のアンテナの設置条件を明確にし、4 台以上の固定局と歩行者の見通し通信を確保できる設置条件を示すことが望ましい。そのために 5 台以上の固定局の利用を想定する等、段階的に検討を進める必要がある。

浜口) 承知した。対象ユースケースにおいて、4 台の固定局と見通しが確保できる条件を検討する。

小花主査) GPS においては、見通しとなる衛星数が減少すると測位精度が劣化する。今回の検討においても見通せる固定局を確保できるのかを確認してほしい。段階的に検討を進める上でも、前提条件の整理を先行して進めてほしい。また、90%の場所以外の 10%の場所において、測位の確からしさを車に提供できるのかを検討してほしい。

浜口) 承知した。

小川委員) 自動運転に今回の位置推定システムが役立つことを示す必要がある。自動運転を実現するために、交差点の歩行者の位置情報を取得することが必要であることを示すことが望ましい。

浜口) ご指摘の点、承知した。自動運転が行われる際、車両自身の位置はダイナミックマップや自律センサで把握できる。次に歩行者の位置情報の収集が必要となると認識している。

土居委員) 電波の到来時間差以外の情報を使って測位することは検討するか。

中林) 到来時間差以外の情報を併用することで測位の高精度化が可能であると考えられるが、今回の検討では電波の到来時間差を用いた測位方式の検討に注力する。

土居委員) 交差点にバスが侵入する状況では、4 台の固定局で測位できない場合があると思われる。そのときに追加の情報を使う方式を検討することが望ましい。

小花主査) TDOA 方式で固定局が 4 台必要な理由は、GPS と同じように端末側との同期誤差を未知数としているためか。

中林) 端末側との同期誤差をキャンセルする分を含めて固定局は 4 台必要である。GPS の測位方式と基本的な考え方は同じである。固定局が 3 台の場合は、原理的に測位できない。

斎藤委員) 歩行者の端末の高さが推定できる場合には、固定局が 3 台であっても測位できると考えられる。

8. その他連絡事項

- ・第 3 回会合は、2 月 27 日 15:00~17:00 に行う。

以上

9.3. 第3回会合議事録

H29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第3回会合議事録

1. 日時：平成30年2月27日（火） 15:00～17:00
2. 場所：OKI 虎ノ門本社3階会議室
3. 出席者：(順不同、敬称略)
 - (1) 委員
小花 貞夫（主査）、久保 信明（副主査）、小川 博文、齋藤 徹、土居 義晴、
浜口 清
 - (2) オブザーバ
[内閣官房 IT 総合戦略室] 河西 航太
[内閣府 政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付 参事官（社会システム基盤）
付] 竹馬 真樹
[警察庁 交通局 交通企画課] 大城 ゆりか
[経済産業省 製造産業局 自動車課 電池・次世代技術・ITS 推進室] 小林 史和
[総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課] 和田 憲拓、石井 智章
 - (3) 事務局 [沖電気工業]
浜口 雅春、金子 富、中林 昭一、菊池 典恭、畑本 浩伸
4. 配布資料
 - H29年度自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第3回議事次第
 - [H29_高精度位置推定-3-1]
H29年度自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第2回会合議事録
 - [H29_高精度位置推定-3-2]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」アクションアイテム一覧
 - [H29_高精度位置推定-3-3]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施状況報告(1) ア ユースケースの要件抽出
 - [H29_高精度位置推定-3-4]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施状況報告(1) イ 無線通信及び測位のプロトコル検討
 - [H29_高精度位置推定-3-5]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施状況報告(2) イ 実機による性能評価
 - [H29_高精度位置推定-3-6]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施状況報告(2) ア 計算機シミュレーションによる性能評価
 - [H29_高精度位置推定-3-7]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」実施計画

5. 開会

総務省移動通信課 和田係長より開会の挨拶が行われた。

和田係長) 本調査検討会では、都市部の衛星の電波が届きにくい環境における高精度な測位の検討を対象としており、重要なシステムと考える。次期 SIP 及び来年度の SIP の自動走行システムに対して本検討内容を生かすために、ご協力いただきたい。

6. 連絡事項

浜口) 実機検証において追加で評価すべき項目があるため、第4回会合を3月13日に追加開催させていただきたい。年度末の多忙の折恐縮ですが、スケジュールを調整いただき、出席していただきたい。調整が困難な場合は個別説明に伺う。

7. 第2回会合議事録(案)の確認

資料[H29_高精度位置推定-3-1]に対し、1ヶ所修正の必要があることを確認した。3ページの上から2つ目における小花主査の発言において、信号機の「無い」交差点と記載されている部分を、信号機の「ある」交差点に修正する。

8. 議事

(1) アクションアイテムの確認

資料[H29_高精度位置推定-3-2]に基づき、説明が行われた。本説明に対し、特に指摘事項はなかった。

(2) 調査検討実施内容説明

① 高精度位置推定システムの方式検討 ユースケースの要件抽出

資料[H29_高精度位置推定-3-3]に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小川委員) ITARDA の統計データは歩行者事故のデータか、それとも全事故のデータか。

中林) 全事故のデータである。

小川委員) 測位対象が歩行者であるため、歩行者事故のデータを使用すると良い。

中林) 承知した。

小花主査) 事故が多い場所と死亡事故が多い場所のどちらに着目すべきかを考える必要がある。固定局を配置する際には、死亡事故を優先して着目する方が良い。

土居委員) 8ページ目に関して、1回目の調査検討会において指摘した磁気を用いた測位システムは、資料に記載されている技術と異なる。指摘した技術は、路側機数台でデジタル変調された磁波を用いた測位技術である。磁波はコンクリートを透過するためマルチパスが発生しにくく、電波を使った測位よりも良好な性能を期待できる。追加調査してほしい。

中林) 追加調査を行う。

土居委員) 13ページ目に関して、Wi-Fi スポットが少ないというデータが示されている。このデータをどのように活用するのか教えてほしい。

中林) 交差点に配置する固定局の一部として既存の Wi-Fi スポットを活用した場合に達成できる測位精度の確認を実施する。

浜口) 補足として、SIP のシステム実用化ワーキングにおいては、測位用に新たなインフラを立てることを前提条件にしないように強く依頼されている。そのため、

既存インフラのみを用いて測位する場合の検討を行う。加えて、測位精度を高めるために新しい追加のインフラを用いて測位する場合の設置要件を明らかにする。

土居委員) 現状の Wi-Fi のアクセスポイントは 5 千円程度である。5 千円のアクセスポイントを用いて誤差が 1m 以下となるのであれば、新たに設置する必要があるとしても良い測位システムではないか。

小花主査) Wi-Fi スポットが建物の中に設置されているとすると、マルチパスが発生し、測位精度が劣化する。

浜口) 移動局からの電波が直接波として受信されない屋内の Wi-Fi スポットは利用しない。屋内の Wi-Fi スポットを利用せずに目標となる測位精度を出すためのインフラ設置要件を明らかにする。

土居委員) インフラ設置に関するコストが明らかになれば、新たなインフラ設置の判断が可能となる。コストが高い場合は、新たなインフラを設置しない方向となる。

浜口) インフラの設置コスト、設置容易性等に関する調査、比較が今後必要であることを報告書に記載する。

小花主査) 移動局がパケットを送信し、固定局が受信する関係を逆にすることは可能か。

浜口) 難しい。送受信の関係を逆にすると、移動局でのスマートフォンの処理能力が間に合わない。スマートフォンのハードウェア処理能力を上げる必要がある。

小花主査) インフラ提供側ではなく、高精度測位を利用したいユーザ側がハードウェア処理能力向上にお金を払えば良いのではないか。固定局側がパケットを受信する場合、新たなインフラの設置コストがかかると思う。送受信の関係を逆にする検討も可能であれば、報告してほしい。

浜口) IEEE802.11az における検討状況を踏まえると、将来的には処理能力が高いチップを搭載したスマートフォンが普及することが期待できる。送受信の関係を逆にした場合の構成、課題等を報告書に記載する。

土居委員) 14 ページにおける図に記載された FRD、SFD 等の用語について説明を加えてほしい。

中林) 説明を加える。

土居委員) 同図の黄色部分と 5M 等の数字は何を意味しているか。

菊池) 標準化対応の時期が予定よりも期間延長されたことと延長期間を意味している。

② 高精度位置推定システムの方式検討 無線通信及び測位のプロトコル検討

資料 [H29]高精度位置推定-3-4] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

斎藤委員) 10 ページにおいて測位フレームと説明しているが、以前までの説明だと通常のデータパケットを傍受するだけで測位できるとの認識である。今回の資料修正の目的は、新たに測位専用のフレームを使用する意図があるのか。

菊池) ご指摘の点、前回までの説明から変更する意図はない。測位フレームと、任意のデータパケットの両方で測位できる。データパケットは任意のアプリケーションで利用されるものであるが、データパケットが送信されていない時間帯がある。このとき、測位専用のアプリケーションから自発的に送信するフレームのことを本検討では測位フレームと呼んでいる。前回の調査検討会において、測位専用のアプリケーションを立ち上げる必要があるとのご指摘があったので、その指摘を踏まえて資料を修正した。

斎藤委員) 測位結果を入手するためにアプリケーションを立ち上げる必要はあると思う。それに付随して測位専用のフレームを定義するということか。

菊池) その通りである。

小花主査) 通常の Wi-Fi 以外、例えば路車間通信を利用するのか。

中林) 車両に Wi-Fi が搭載されていれば Wi-Fi を用いて車両へ測位結果情報を伝達できるが、Wi-Fi 非搭載の場合、700MHz の路車間通信等の別の手段を用いる必要がある。

斎藤委員) 上位レベルのユースケースとして 2 つ考えられる。1 つ目は移動局が自身の位置を知るためのアプリケーションである。2 つ目は、インフラ側が移動局の位置を知るために、無線通信イベントを検知して車両へ通知するアプリケーションとなる。後者に関しては、移動局が通常のアプリケーションにおいて使用しているフレームを傍受することで移動局の位置がわかると認識している。もし、移動局側に特殊な動作を求める場合、後者の話が変わってくると思う。

中林) 移動局に特殊な動作は求めている。移動局がスマートフォンを持っていても、データの送受信を行わない場合、全く測位できない。このことに対し、アクセスポイント側で定期的にビーコンを送信し、スマートフォンが応答を行うことで測位できることを想定している。もし、通常のデータの送受信が行われている場合、フレームの傍受で測位が可能となる。

小花主査) 移動局はデータの送受信以外の場合でも、ビーコンを自動的に送信するのではないか。

浜口) 移動局がビーコンを送信し続けているのであれば、あえて難しいことをしなくても良いとの認識である。ただし、ビーコンの送信周期が長い場合、インフラ側が移動局を検知した時点で、移動局に対してビーコンフレームの送信周期を短くするように促すことが考えられる。

③ 高精度位置推定システムの性能調査 実機による性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-3-5] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 路面反射波がどのように受信信号の到達時間や測位へ影響するのか。

菊池) 路面反射波が加わることによって受信信号波形が歪み、到達時間の推定結果が前後する。その結果、TDOA 方式による測位結果に誤差が発生する。

小花主査) サンプリング速度を高めれば、測位精度を改善できるか。

菊池) 路面反射波も含めたマルチパスが発生している環境では、サンプリング速度を高めるだけでは測位精度の改善効果は小さく、マルチパス対策技術も合わせて適用することで、その効果が現れると考える。

④ 高精度位置推定システムの性能調査 計算機シミュレーションによる性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-3-6] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

浜口委員) 12 ページ記載の数式による伝搬路推定において電波伝搬パラメータは離散値、連続値のどちらを入力したか。

畑本) $\tau 1$ と $\tau 2$ を離散値として探索範囲を決めて入力している。資料には記載していない数式を用いて、離散値として入力した $\tau 1$ 、 $\tau 2$ に対応する $A1$ 、 $A2$ 、 $\phi 1$ 、 $\phi 2$ の値を計算している。その後、計算した 6 つの電波伝搬パラメータ ($\tau 1$ 、

$\tau 2$ 、 $A1$ 、 $A2$ 、 $\phi 1$ 、 $\phi 2$) を 12 ページの数式に代入し、探索範囲内で Γ が最小となるものを探している。

久保副主査) 12 ページの所に記載されている伝搬路推定の数式に関して、最尤推定、最小二乗法のどちらを用いているか。

中林) 最小二乗法である。

久保副主査) 直接波と路面反射波間の時間差を時間サンプル数に直すとどの程度か。

畑本) 歩行者がスマートフォンを胸付近に携帯することを想定すると最大行路差は 2.6m 程度である。サンプリング速度を 1.8Gsps とした場合、1 サンプルが 16.6cm となるため、最大行路差は 16 サンプルに相当する。

久保副主査) 9 ページに記載されている相関波形は GPS の文献から引用したものか。

中林) 本調査検討で用いている無線 LAN の OFDM 信号のプリアンブル部の相関波形である。

久保副主査) 無線 LAN の信号帯域幅ほどの程度か。

中林) 信号帯域幅は 20MHz である。雑音帯域幅は 60MHz に設定した。

久保副主査) シミュレーションだけでなく実験の相関波形データも示すと良い。

中林) 報告書に実験の相関波形データも示す。

久保副主査) 路面反射波を想定した場合、大規模交差点における最大の行路差が決まっているため、電波伝搬パラメータ $\tau 1$ と $\tau 2$ の範囲が制限できると考える。制限された範囲内で伝搬路推定を行っているか。

畑本) その通りである。

土居委員) 無線 LAN の OFDM 信号の帯域を増やすことで測位精度が向上すると考えられる。信号帯域幅が 2GHz である IEEE802.11ad を使えば、高精度測位が容易になるのではないか。

中林) 測位は容易になる。しかしながら、既存のスマートフォンには 11ad が搭載されていない点が課題として残る。

土居委員) 2017 年 7 月に Qualcomm が 11ad のチップを発表している。将来的にスマートフォンに搭載されるのではないか。

浜口) 11ad がスマートフォンに搭載され、11ad の信号を測位に利用することは将来の可能性の 1 つと考える。

久保副主査) 路面反射波の影響のみを検討しておけば、問題ないと考えて良いか。

畑本) 実験結果を踏まえて、今年度の検討対象であるオープンな環境では路面反射波の影響が大きいと考え、2 パスモデルを用いた。

土居委員) ビル街で発生するマルチパスモデルを 2 パスモデルに近似して伝搬路推定した場合、対策後の測距誤差にフロアが発生するのではないか。

中林) ご指摘の通りである。今後ビル街等のマルチパス環境を対象とした検討では、より多くのマルチパスに対応した 3 パス以上のモデルを用いた伝搬路推定の性能を評価する必要がある。直接波に対して十分に遅く到来する遅延波は、相関ピークから外れるため、伝搬路推定が不要なパスとなる可能性がある。ビル街等の複雑なマルチパス環境に対する検討は次年度実施の計画である。

久保副主査) 伝搬路推定が不要と見なせるマルチパスの遅延時間を評価すると良い。

中林) 承知した。

- 小花主査) どのような信号帯域幅でも、直接波と遅延波は分離できるのではないか。
- 中林) 仮に受信信号に雑音が含まれていない場合、完全に伝搬路推定が可能となるが、雑音を受信信号に加わることで、伝搬路推定結果に誤りが発生し、測距/測位誤差が増加していく。
- 久保副主査) 9 ページの波形は受信信号に対して相互相関した後の波形と考えて良いか。
- 中林) その通りである。
- 久保副主査) 9 ページの相互相関用の信号は PN 符号か。
- 中林) PN 符号ではなく無線 LAN のパケット先頭に共通でついているプリアンブル部を相互相関用の信号として用いている。
- 斎藤委員) 19 ページに実験とシミュレーションの測位誤差比較について掲載されているが、「対策前」が 11 ページの結果、「対策後」が 14 ページの結果、「平均化追加」が 15 ページの結果に対応すると考えて良いか。
- 畑本) その通りである。
- 斎藤委員) これらの測位誤差の結果が異なる原因は何か。
- 中林) 19 ページ以外のシミュレーション結果は大規模交差点、19 ページのシミュレーション結果は実験の環境に合わせて小規模交差点を想定したものである。条件が異なることを明記する。
- 久保副主査) 静止状態での測位結果を平均化することで、測位精度が良くなるか。
- 中林) シミュレーション評価によって測位精度が改善することを確認している。
- 小花主査) 実験時の測位結果は静止状態で実施したのか。
- 中林) 19 ページの結果は静止時測位結果、16 ページの結果は移動時の測位結果である。
- 小花主査) 移動状態の場合はカルマンフィルタを使うと良い。
- 中林) 今回の検討では平均化による改善効果を確認した。カルマンフィルタの検討を今後の課題として報告書に記載する。
- 土居委員) 平均化について、距離差の平均化か、もしくは SNR の平均化か。
- 中林) 距離差を平均化した。
- 土居委員) 歩行速度に対して 25 回の平均化は可能か。
- 中林) 今後確認、検討が必要である。仮に 100msec 間隔でパケットを受信する場合、25 回の平均化を行うのに 2.5 秒必要となる。移動時には単純な平均化ではなくカルマンフィルタ等を用いて測位の軌跡に対するパラメータ推定を行う必要がある。
- 小花主査) 実験における移動状態の測位データに関しては、次年度の検討を行うための課題確認用のデータとして取得されたものとする。
- 和田係長) 本システムの実導入に向けて、路面反射波の対策技術を使ってシミュレーションで評価した結果を踏まえて、固定局のインフラをどの程度増やす必要があるのか、11ad を使用すればどの程度測位精度が改善するのか、等の知見を整理してほしい。
- 浜口) 今回の検討において得られた知見は報告書に記載する。
- 小花主査) 渋谷の交差点で、歩行者が 100 人いる場合に測位の処理は可能か。
- 浜口) 渋谷の交差点では、全ての歩行者を測位する必要はないと考える。
- 土居委員) パケットの衝突による劣化を考えなければ、想定する移動局を増やす分、固定

局側のハードウェア処理部の数を増やせば良いと思う。

浜口) ご指摘の通り、100人の歩行者の測位を行う場合、固定局のハードウェア処理部の数を100台にすれば測位は可能となると思う。移動局が増えた場合の測位対象を間引く必要性等の課題に関しては、コスト面と合わせて報告書に整理する。

土居委員) 歩行者が移動している場合、伝搬路推定における $\tau 1$ と $\tau 2$ は大きく変動しない
と考える。そのため、 $\tau 1$ と $\tau 2$ を移動平均すれば良いと思う。

中林) ご指摘の通りである。p6の測位フローにおける距離差データの平均化の部分が、 $\tau 1$ 、 $\tau 2$ の移動平均を求める処理に相当する。

⑤ 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討 実施計画

資料 [H29_高精度位置推定-3-7] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 実施計画の遅延は、実験が遅れたとの説明があったが、何が遅れたのか。

中林) 1つ目の理由は、実験に要する時間が想定よりも長かったことである。特に固定局の位置を正確に計測して配置することが難しく、時間を要したため、1日間で取得した実験データが想定よりも少なかった。2つ目の理由は、天候不順による実験の延期が発生したことである。

小花主査) 報告書案の送付はいつか。

中林) 3月20日頃に報告書案を送付する。送付後1週間以内に内容をご確認いただき、年度末に修正した報告書を提出する。

9. その他連絡事項

- ・第4回会合は、3月13日10:00~12:00に虎ノ門周辺にて行う。

以上

9.4. 第4回会合議事録

H29年度 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第4回会合議事録

1. 日時：平成30年3月13日（火） 10:00～12:00
2. 場所：スタンダード会議室 虎ノ門ヒルズ FRONT 店 2階ホール
3. 出席者：(順不同、敬称略)
 - (1) 委員
小花 貞夫（主査）、小川 博文、斎藤 徹、土居 義晴、藤本 浩
 - (2) オブザーバ
[警察庁 交通局 交通企画課] 大城 ゆりか
[総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課] 和田 憲拓、石井 智章
 - (3) 事務局 [沖電気工業]
浜口 雅春、金子 富、中林 昭一、菊池 典恭、畑本 浩伸、浅野 欽也
4. 配布資料
 - H29年度自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第4回議事次第
 - [H29_高精度位置推定-4-1]
H29年度自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討会 第3回会合議事録
 - [H29_高精度位置推定-4-2]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」アクションアイテム一覧
 - [H29_高精度位置推定-4-3]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施状況報告(1) ア ユースケースの要件抽出
 - [H29_高精度位置推定-4-4]
「(1) 高精度位置推定システムの方式検討」実施状況報告(1) イ 無線通信及び測位のプロトコル検討
 - [H29_高精度位置推定-4-5]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施状況報告(2) ア 計算機シミュレーションによる性能評価
 - [H29_高精度位置推定-4-6]
「(2) 高精度位置推定システムの性能調査」実施状況報告(2) イ 実機による性能評価
 - [H29_高精度位置推定-4-7]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」成果まとめ(案)
 - [H29_高精度位置推定-4-8]
「自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討」報告書目次(案)
5. 開会
総務省移動通信課 和田係長より開会の挨拶が行われた。

和田係長) 事務局より、本調査検討に関する結果を一通り得られたと聞いている。本調査検討会で得られた結果に対してどのようにまとめていくべきかについて、ご協力いただきたい。

6. 第3回会合議事録(案)の確認

資料 [H29_高精度位置推定-4-1] に対し、1ヶ所修正の必要があることを確認した。8ページにおいて赤字で記載した和田様のご発言「本システムの実導入にむけて、」の一文節を追加するものとする。

7. 議事

(1) アクションアイテムの確認

資料 [H29_高精度位置推定-4-2] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、特に指摘事項はなかった。

(2) 調査検討実施内容説明

① 高精度位置推定システムの方式検討 ユースケースの要件抽出

資料 [H29_高精度位置推定-4-3] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 11 ページにおける横断歩道のデータにおける横断歩道の「付近」とはどのくらいの範囲を定義しているか。

中林) 明確な定義はない。

小花主査) 横断歩道の外側は測位の対象か。

中林) 測位の対象と考えている。

小川委員) 横断歩道が測位の対象であることを明確にし、性能的には横断歩道付近の測位もできるということを示す方が良いのではないか。横断歩道付近の定義が曖昧であるため、横断歩道付近の測位性能を正しく評価できるかを心配している。

小花主査) 横断歩道付近の定義を明確にすればよい。

藤本委員) 「付近」と明確に言わない方がよい。横断歩道の外側 5m 程度を検証すればよい。

土井委員) 横断歩道付近の事故において警察の調書に記載される「付近」の定義に関しては、主観が含まれていると思う。

斎藤委員) 横断歩道付近の事故に関して厳密に調査して分析することは困難である。参考情報として横断歩道の外側について調査した結果を残せば、今後の調査検討に対して役立つ。

小花主査) 11 ページにおけるピンクで示された『横断歩道(付近)横断中』の(付近)は取る方がよい。

中林) 承知した。

② 高精度位置推定システムの方式検討 無線通信及び測位のプロトコル検討

資料 [H29_高精度位置推定-4-4] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 14 ページの接続手順において、認証用のフレームを用いた測位は可能か。

菊池) 測位は可能である。認証手順が完了すると認証用のフレーム伝送が行われなため、定期的な測位を行うために測位用のフレーム伝送が必要となる。

土井委員) 前回の検討会においてフレームの平均化を 25 回程度行うと聞いている。25 回の内、最初の数回分に関しては認証用のフレームを用いた測位を行うものと考えている。

- 小花主査) フレームの送信間隔を教えてください。
- 菊池) 100msec 周期としている。
- 藤本委員) 2.5sec 経過した場合、3m 程度移動しているものとする。
- 菊池) 1 回の測位に 2.5sec は必要としない。25 回の平均化には、過去 2.5sec 分の測位データを使用している。
- 斎藤委員) 測位を開始して測位データがたまり、測位精度が上がるまで 2.5sec かかるとの認識でよいか。
- 菊池) その通りである。
- 小花主査) 2.5sec 分の測位データがたまった後に、100msec 周期で測位データが示されるとの認識でよいか。
- 菊池) その通りである。
- 浜口) 接続開始エリアから接続対象エリアに入るまでに、十分な測位精度が得られるのに要する時間に関する整理を行う。
- 土井委員) 移動時において 25 回分の平均化する場合、2.5sec 前から今の時間差データを平均化しても時間差にずれが発生すると考える。そのため、2.5sec 前からの測位データを使うのではなく、10msec 程度の短い時間でフレームを送信して平均化の方がよい。
- 斎藤委員) 測位は 1 フレームに対して、1 回しかできないのか。1 フレームで複数回測位する方法があるのではないか。
- 土井委員) ノイズの影響を低減するために平均化を行うのであれば、フレームのプリアンブル部以降のデータ部を復調して再生し、OFDM シンボル毎に相関処理を行えば、1 フレーム内で 25 回平均化することも可能であると思う。
- 小花主査) 次年度の検討に向けて、測位方法の実現性を整理してほしい。
- 浜口) 承知した。
- 和田係長) サンプリング速度が 5Gbps の時に、フレームの送信間隔が 100msec か。
- 菊池) その通りである。5Gbps は AD コンバータの速度であり、1.8Gbps の場合も、フレームの送信間隔を 100msec としている。
- 小花主査) 通常の OFDM 変調を用いた通信機器におけるサンプリング速度は 50nsec 程度か。
- 菊池) その通りである。
- 小花主査) 次年度においては、通常のサンプリング速度にした場合の測位精度を検討してほしい。
- 菊池) 承知した。
- 小花主査) 高速のサンプリング速度を端末に実装することは可能か。
- 菊池) 現状では困難である。将来、IEEE802.11ad のチップが端末に搭載された場合は、実現の可能性がある。
- 小花主査) 固定局の数は 4 台でよいか。
- 菊池) その通りである。
- 小花主査) 4 台の中の 1 台がフレームを受信できない場合はどうするのか。
- 菊池) 今年度の検討では見通し環境を想定しているため、定常的に 1 台の固定局が受信できないケースは発生しない。実環境で車両による遮蔽がある環境では、フレームを受信できない場合が発生する。そのような場合、固定局 4 台のみの設置では不十分な可能性がある。
- 小花主査) 測位フレームを 4 台同時に受信できない場合は計算を行わないのか。
- 菊池) その通りである。

③ 高精度位置推定システムの性能調査 計算機シミュレーションによる性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-4-5] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小川委員) 測位エリアに記載された「歩道内側」に関して、さらに内側の領域の測位データを確認したか。

中林) 18 ページのスライドの DOP のカラーマップに記載した通り、交差点の内側は HDOP が高く、横断歩道よりも良好な測位精度が得られると判断した。

小川委員) 交差点中央の測位データも参考情報として追加で確認してほしい。

浜口) エリアの定義を含めて、追加データを報告書に記載するようにする。

小花主査) 交差点から十分に外側にある移動局が、CSMA/CA によるキャリアセンスを行った後にフレームを送信した場合、固定局においてフレームの衝突が想定される。そのような場合においても、交差点内の移動局の測位は可能か。

畑本) 隠れ端末によって、フレームのプリアンプル部に干渉信号が加わった場合、測位は困難となる。

小花主査) 隠れ端末によって測位フレームを連続的に受信できない状況では、測位精度が劣化するのではないか。

中林) 測位フレームに欠落があったとしても、残った測位フレームに対して平均化処理を行うなど、できる限り測位精度を保つアルゴリズムの実装が可能である。

土井委員) 10 ページに示した移動時の平均化処理を行っているため、歩行者が移動していても測位精度が劣化しないとの認識でよいか。

中林) その通りである。移動時に関しては、等速直線運動をしている想定で直線近似での位置推定を行っている。等速以外で運動するモデルに対する追加対策として、カルマンフィルタなどを今後検討する必要がある。

土井委員) 23 ページと 26 ページにおける 3 波モデルは異なるモデルか。

畑本) 異なるモデルである。

土井委員) 体育館での伝搬環境を 3 波モデルにした理由についての説明がある方が良い。

畑本) 承知した。報告書において記載する。

小花主査) 23 ページにおける 3 波モデルは具体的にどのような伝搬モデルであるのか。

畑本) 都内の LOS 環境において電波伝搬測定を行い、測定データに対して統計処理を行って作成されたものである。

小川委員) 体育館の実験環境における壁の位置について教えてほしい。

畑本) 最も近い壁と固定局の水平距離は 5m 程度となる。長手方向が 40m 程度、短手方向が 25m 程度の領域の中央付近に固定局を設置している。

石井様) 交差点におけるマルチパスは 4 波以上発生するのではないか。

畑本) 実環境においては 4 波以上発生している。今回は 3 波目に対して 10dB の強い相対電力を与えており、3 波目が 4 波以降を集約したパスと仮定して比較評価を行った。

小花主査) 体育館での測位評価を行った理由に関する説明が欲しい。

畑本) 承知した。

斎藤委員) マルチパス環境におけるパスモデルの説明に関しては、路面反射環境のパスモデルの説明とともに、絵を用意して説明する方がわかりやすいと思う。

畑本) 承知した。

藤本委員) 次年度に向けた課題が3つある。1つ目として、等速でない歩行者や、横断歩道を渡った後に引き返す歩行者が存在する。特異な動きをする歩行者に対しても目標とする測位精度が出るのかを課題として明記してほしい。2つ目として、交差点でトレーラーが右折した場合、シャドウイングによる測位への影響を回避するために固定局をどのように配置すべきかを課題として明記してほしい。例えば、交差点の中央に大型トレーラーが存在する場合の評価が挙げられる。3つ目として、既存の Wi-Fi インフラを利用する場合、そのインフラの位置情報を高い精度で取得する必要があることを課題として明記してほしい。

浜口) ご指摘の点、課題として明記する。

藤本委員) 既存の Wi-Fi インフラのアンテナは交差点から見通すことのできる場所に設置されているのか。

浜口) SIP の親会において、既存の Wi-Fi インフラを使用した場合の測位精度について調査する必要があるとのご指摘があり、見通し環境に既存インフラが設置されている想定で評価を行った。ご指摘の通り、実際に見通すことのできる場所に既存インフラが設置されているかどうかは課題となる。

藤本委員) 固定局のアンテナが風で揺れ、全てのアンテナが同じ方向に振動する場合や、異なる方向に振動する場合に測位精度が劣化すると思う。測位精度が落ちる要因について整理してほしい。

浜口) 承知した。

④ 高精度位置推定システムの性能調査 実機による性能評価

資料 [H29_高精度位置推定-4-6] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

土井委員) 実験結果に対して伝搬路推定や平均化処理による対策を行わなかったのは、ハード的な問題か、時間的な問題か。

菊池) 両方である。

土井委員) シミュレーションの方で対策の効果を確認しているので、実験結果に対しても、効果を期待できるとの認識で良いか。

菊池) その通りである。

小花主査) シミュレーション結果と実験結果の測位精度にギャップがある。分析と対策を行ってほしい。

菊池) 承知した。

小花主査) 今年度は基礎的なデータを取得したと認識している。

小川委員) 実験結果を見る限り、どのようにすれば測位精度が良くなるのかを示す必要がある。

浜口) シミュレーションにおいては対策を適用することで、測位精度が改善することを確認している。

小川委員) 3波以上のパスモデルに対しても、測位精度が良くなる見込みはあるか。

浜口) 3波以上のパスモデルでは、測位精度 10cm に到達していないため、追加の対策を次年度に検討する必要がある。

土井委員) マルチパス対策として、802.11ad などの帯域の広い信号の使用や、802.11n の4本のアンテナを利用したアダプティブアレーの使用が考えられる。アダプティブアレーを用いてマルチパスを低減できることを定量的に評価することは可能

と思う。例えば、直接波に対する遅延波の相対電力をアダプティブアレーで 20dB 減衰させることができた場合の評価などが挙げられる。

中林) マルチパスへの追加対策によって期待できる効果を見積もる。

⑤ 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討 成果まとめ (案)

資料 [H29_高精度位置推定-4-7] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

藤本委員) 2 ページの成果まとめの 3 番目の項に関して、目標測位精度 10cm を満足するための条件を明らかにしたと記載しているが、現実的に実装できるのかの考察を書いておくほうが良い。現実的に 10cm を達成するのは困難だと考える。人の横幅 50cm から 1m 程度で良いのではないか。理想的な固定局の配置に対する理論値と、実際の環境における固定局の配置での見込みとなる測位精度を明らかにしてほしい。もし実環境においても 50cm から 1m 程度の測位精度であれば、準天頂衛星を用いた場合の測位精度と遜色ないと考える。

中林) 承知した。

小花主査) 準天頂衛星が天頂方向に集まった場合は測位精度が悪くなると思う。そのような環境においても、今回の測位システムの測位精度が良いことを示してほしい。
浜口) 報告書に記載する。

斎藤委員) 今回の測位システムは対象エリア毎に固定局の位置などをチューニングし、高い測位精度を維持できることが特長である。例えば、測位するエリア毎に伝搬モデルを設定することで測位精度を高めることや、固定局のアンテナを複数用意して電波伝搬の状態をモニタリングすることもできると考える。これらの機能を持たせることのできるポテンシャルが今回のシステムにあるのであれば、その特長を報告書に記載してほしい。

浜口) 頂いたご意見を報告書に記載する。静的な伝搬環境を学習して対策を行うことは可能と考える。時々刻々と変化する伝搬環境についてどのように対応するかは検討が必要となる。

小川委員) マルチパスへの対策の見込みが今回の調査検討の最終報告における肝になるのではないか。

浜口) 複雑なマルチパスへの対策は順番を踏んで行いたい。実際の環境における測位精度がどのような方向感になるのかに関しては、今回の検討会において頂いたご意見を踏まえて、整理したい。

和田係長) 今後の検討に生かすべき事項、得られた知見を報告書に整理してほしい。

⑥ 自動走行向け高精度位置推定システムに関する調査検討 成果まとめ (案)

資料 [H29_高精度位置推定-4-8] に基づき、説明が行われた。本説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

小花主査) 今回の調査検討において実験を行ったことにより、課題が明らかになった。成果まとめの 4.2 に課題を単に記載するのではなく、新たに 4 章を追加して考察を記載してほしい。その後の 5 章にまとめを記載すればよい。

浜口) 報告書の目次を修正する。次年度に向けてどうすべきかの考察を 4 章に記載する。

斎藤委員) 今回の検討結果を SIP へ報告するタイミングはいつか。
和田係長) 5月になる方向である。

8. その他連絡事項

- ・ 報告書(案)は 3/20(火)に送付する。3/27(火)期限としてメール審議をお願いする。

以上