

博士學位論文

システムエンジニアリング学

半屋外空間を含むシームレス測位のための  
建物情報と GPS 信号対雑音比を活用した  
空間検知手法

指導教官 神武 直彦 教授

2021 年 9 月

慶應義塾大学大学院

システムデザイン・マネジメント研究科

田 端 謙 一

Doctoral Dissertation

Space Detection Method Using Building  
Information and GPS Signal-to-Noise Ratio  
for Seamless Positioning Including  
Semi-Outdoor Spaces

Kenichi Tabata

Supervisor Naohiko Kohtake

September 2021

Graduate School of System Design and Management,  
Keio University

## 論文要旨

学籍番号	81552133	氏名	田端 謙一
主論文題名： 半屋外空間を含むシームレス測位のための建物情報と GPS 信号対雑音比を活用した空間検知手法			
(論文要旨) 人々は屋内と屋外との間を頻繁に移動するため、屋内外をシームレスに接続するナビゲーションは人々が望む主なサービスの 1 つである。シームレス測位を実現するための重要な要素技術の 1 つとして、対象物が屋外にいるのか屋内にいるのかを検知する処理がある。この技術は屋内/屋外検知またはハンドオーバーと呼ばれ、正確な屋内/屋外検知の実現のためにこれまで様々なアプローチで研究が行われている。近年では機械学習等を利用することにより高い確率で屋内/屋外検知を実現する方法も提案されている。 しかしながら、実際には現実空間を屋外空間と屋内空間の 2 つに分類するのは難しいという側面がある。特に上部が覆われて側面が完全に閉じていない空間は半屋外空間と定義され、半屋外空間では GPS による測位では上部の遮蔽により測位精度の低下が予想される。そのため、この空間では屋内測位環境の構築が求められるが、一方で側面が開いているため GPS の電波もある程度受信できることから、屋外空間と屋内空間の 2 種類の空間検知を対象とした従来の屋内/屋外検知手法の適用が難しい。 そこで、本研究は、半屋外空間において正しい測位手段が選択され測位精度の低下を防ぐことを目的に、半屋外空間を含むシームレス測位のための空間検知手法を設計した。具体的には、半屋外空間の滞在検知に必要な衛星を選定するために半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータとして衛星を選定する手法を設計した。次に、選定した衛星の信号対雑音比を活用して半屋外空間への滞在を検知する手法を設計した。検知手法は SNR の変化率を利用する方式とファジィ推論を利用する方式の 2 種類を設計し、評価実験によって検知精度を比較した。 最後に、評価実験によって検知精度が高かったファジィ推論による方式を利用して、屋外、半屋外空間、屋内の 3 つの空間の滞在を検知する手法を設計した。半屋外空間を含む実験箇所では評価実験を行った結果、93.1% の検知精度で滞在空間を正しく検知できることを確認した。3 つ以上の複数空間の滞在検知を目的とした類似研究における検知精度は 88.2% であり、本研究における提案手法は、従来の手法よりも約 5% 高い検知精度を実現した。 本研究の新規性に、半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータとすることによって、軌道上の衛星から半屋外空間の検知に必要な衛星を特定する手法を設計した点が挙げられる。この手法を適用することにより、常に変化する衛星の配置や半屋外空間の			

形状に影響を受けることなく必要な衛星を選定することが可能となる。独自性としては、半屋外空間の検知にファジィ推論を用いている点が挙げられる。ファジィ推論自体は様々な分野で使用されている汎用的な理論だが、半屋外空間の検知にファジィ推論を適用した事例は、筆者が知る限り見受けられない。有用性としては、類似研究よりも 5%高い検知精度を実現した点が挙げられる。このことにより、半屋外空間というこれまでのシームレス測位の提供が難しい空間であっても高い精度で使用する測位手段を選択することが可能になる。

現実空間には“屋外”と“屋内”のどちらかに区分することが難しい空間も多く存在することから、本研究で対象とした半屋外空間のような空間も考慮したシームレス測位手法の研究を進めていくことが重要である。本研究は、半屋外空間という屋外測位と屋内測位との境界が曖昧で安定的な測位が難しい空間において、GPS の信号対雑音比と半屋外空間の建物情報という 2 つの要素を融合させることにより、「屋外/半屋外/屋内」の安定的な空間検知が可能なることを明らかにすることが出来た点に価値があると考ええる。

本研究は半屋外空間が多く存在する工場や倉庫での利用をターゲットとしているが、工場や倉庫で作業する作業員やフォークリフトの行動分析を行う上でより正確な行動分析を行うことが可能になり、生産性向上や安全性向上に寄与することが期待できる。

キーワード:

シームレス測位、半屋外空間、信号対雑音比、ファジィ推論、建物情報

## Summary of Doctoral Dissertation

Student No.	81552133	Name	Kenichi Tabata
Title: Space Detection Method Using Building Information and GPS Signal-to-Noise Ratio for Seamless Positioning Including Semi-Outdoor Spaces			
Thesis Summary: Since people frequently move between indoors and outdoors, seamless indoor/outdoor navigation is one of the main services people demand. One of the key elemental technologies to achieve seamless positioning is the process of detecting whether an object is outdoors or indoors. This technique is called Indoor-Outdoor (IO) Detection or Handover, and various approaches have been studied so far to achieve accurate IO Detection. In recent years, a method to achieve high accuracy in IO detection has been proposed by using machine learning. However, in reality, there is an aspect that it is difficult to classify real space into two categories: outdoor space and indoor space. In particular, a space where the top is covered and the sides are not completely closed is defined as a semi-outdoor space. In a semi-outdoor space, GPS positioning is expected to lose positioning accuracy due to the shielding of the top. Therefore, an indoor positioning environment is required in this space, but on the other hand, the sides are open and GPS signals can be received to some extent, which makes it difficult to apply the conventional IO Detection method for two types of space detection: outdoor space and indoor space. In this study, we designed a spatial detection method for seamless positioning including semi-outdoor spaces, with the aim of ensuring that the correct positioning method is selected in semi-outdoor spaces and preventing degradation of positioning accuracy. Specifically, we designed a method to select satellites based on the parameters of the height, depth, and open direction of the side of the semi-outdoor space in order to select satellites necessary for detecting stays in the semi-outdoor space. Next, we designed a method to detect the stay in the semi-outdoor space utilizing the signal-to-noise ratio of the selected satellites. We designed two detection methods, one using the rate of change of SNR and the other using fuzzy inference, and compared their detection accuracy through evaluation experiments. Finally, using a method based on fuzzy inference, which showed high detection accuracy in evaluation experiments, we designed a method for detecting stays in three spaces: outdoor, semi-outdoor, and indoor spaces. As a result of evaluation experiments conducted at test locations including semi-outdoor spaces, we confirmed that the method can correctly detect the space to stay with a detection accuracy of 93.1%. The detection accuracy in similar studies that			

aimed at detecting stays in three or more multiple spaces was 88.2%, and the proposed method in this study was able to achieve a detection accuracy about 5% higher than the conventional method.

One of the novelties of this study is that we have designed a method to identify the satellites required to detect the semi-outdoor space from among the satellites in orbit by using the height, depth, and side opening direction of the semi-outdoor space. This method makes it possible to select the necessary satellites without being affected by the constantly changing arrangement of the satellites or the shape of the semi-outdoor space. The originality of this method is that it uses fuzzy inference to detect semi-outdoor spaces. Fuzzy inference itself is a general theory used in various fields, but as far as I know, there are no examples of fuzzy inference applied to the detection of semi-outdoor spaces. The usefulness of this method is that it achieves a 5% higher detection accuracy than similar studies. This makes it possible to select the positioning method to be used with high accuracy even in semi-outdoor spaces, which are difficult to provide seamless positioning as before.

Since there are many spaces in the real world that are difficult to classify as either "outdoor" or "indoor", it is important to research a seamless positioning method that takes into account such spaces as the semi-outdoor space targeted in this study. This research is valuable in that it shows that stable outdoor/semi-outdoor/indoor space detection is possible in semi-outdoor spaces, where the boundary between outdoor and indoor positioning is ambiguous and stable positioning is difficult, by integrating two elements: the signal-to-noise ratio of GPS and building information in semi-outdoor spaces.

This study is targeted for use in factories and warehouses where there are many semi-outdoor spaces, and it is expected to contribute to the improvement of productivity and safety by enabling more accurate behavioral analysis of workers and forklifts working in factories and warehouses.

Key words :

Seamless Positioning, Semi-outdoor space, Signal-to-noise ratio, Fuzzy inference, Building information

## 目次

<b>第1章 序論</b>	1
1-1. 研究の背景	1
1-2. 研究の目的	9
1-3. 提供対象の特定	10
1-4. 本論文の構成	12
<b>第2章 半屋外空間を含むシームレス測位の現状と課題</b>	14
2-1. 屋内測位のこれまでの取り組み	14
2-2. シームレス測位のこれまでの取り組み	17
2-2-1. シームレス測位の概要と分類	17
2-2-2. シームレス測位の実現に向けたこれまでの取り組み	20
2-3. 半屋外空間を含むシームレス測位の現状と課題	27
2-3-1. 半屋外空間を含むシームレス測位の現状	27
2-3-2. 半屋外空間を含むシームレス測位の課題	28
<b>第3章 半屋外空間を含むシームレス測位の要求分析</b>	33
3-1. 想定するユースケース	33
3-2. シームレス測位システムのライフサイクルの分析とステークホルダの抽出	35
3-2-1. シームレス測位システムの導入プロセス調査	35
3-2-2. シームレス測位システムのライフサイクル	38
3-2-3. ステークホルダの特定	40
3-3. 要求の抽出と分析	44
3-3-1. 要求の抽出	44
3-3-2. 要求の分析	47
<b>第4章 半屋外空間での GPS 信号受信状況の確認実験</b>	49
4-1. 確認実験の目的及び概要	49
4-1-1. 確認実験の目的	49
4-1-2. 確認実験の概要	51
4-2. 確認実験の結果及び分析	53
4-2-1. 既存手法での検知精度の算出結果	53
4-2-2. 確認実験結果に対する分析	74
4-3. 確認実験のまとめ	78
<b>第5章 「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計と評価実験</b>	79
5-1. 「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計方針	79
5-2. 半屋外空間の建物情報を活用した衛星選定手法の設計	85
5-2-1. 進入角度閾値の算出方法の設計	85

5-2-2. 半屋外空間の開放方向を利用した衛星の分類方法の設計	87
5-2-3. 監視対象衛星の選定フローの設計	88
5-3. SNR の変化率を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計と評価実験	91
5-3-1. SNR の変化率を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計	91
5-3-2. SNR の変化率を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の評価実験	95
5-4. ファジィ推論を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計と評価実験	105
5-4-1. ファジィ推論を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計	105
5-4-2. ファジィ推論を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の評価実験	112
5-5. 設計した空間検知手法に対する分析	117
5-5-1. 2つの手法の検知精度の違いに対する分析	117
5-5-2. 設計した閾値に対する妥当性の確認	122
<b>第6章 「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の設計と評価実験</b>	<b>129</b>
6-1. 「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の概要	129
6-2. 空間情報と GPS 信号対雑音比を活用した「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の設計	130
6-3. 空間情報と GPS 信号対雑音比を活用した「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の評価実験	133
6-3-1. 評価実験の概要	133
6-3-2. 評価実験の結果	135
6-4. 準天頂衛星を利用した場合の効果の検証	144
6-5. 要求に対する充足度の確認	147
<b>第7章 検知手法に対する考察</b>	<b>150</b>
7-1. 評価実験結果に対する考察	150
7-2. 検知手法の課題と今後の発展性	152
7-2-1. 検知手法の課題	152
7-2-2. 今後の発展性	153
7-3. 実用化に向けた考察	155
7-4. 本研究の特徴	156
<b>第8章 結論</b>	<b>159</b>
<b>参考文献</b>	<b>161</b>
<b>研究業績</b>	<b>167</b>
<b>謝辞</b>	<b>168</b>



## 図表リスト

図 1-1. 建物による GPS の信号の遮蔽	1
図 1-2. 生活における屋内空間滞在率	2
図 1-3. 屋外の位置情報サービスと屋内の位置情報サービスとの違い	3
図 1-4. 屋内測位の基本的な仕組み	4
図 1-5. シームレス測位のイメージ	5
図 1-6. シームレス測位技術の必要性	5
図 1-7. 現実空間の分類例	6
図 1-8. 半屋外空間での測位環境	7
図 1-9. 半屋外空間の形状の違いが GPS 信号受信に与える影響	7
図 1-10. 半屋外空間の例	8
図 1-11. 本研究による達成イメージ	9
図 1-12. 本研究による半屋外空間の建物情報活用イメージ	10
図 1-13. 本研究のターゲット	11
図 1-14. 本論文の構成	13
図 2-1. 屋内測位技術の分類	14
図 2-2. 日本初の屋内測位を利用した空港内ナビゲーションサービス	16
図 2-3. Angle of Arrival (AoA)を採用した高精度屋内測位サービス	17
図 2-4. シームレス測位の屋内/屋外検知	18
図 2-5. 屋内/屋外検知の難易点	19
図 2-6. シームレス測位手法の分類	20
図 2-7. 主張精度比較型シームレス測位手法の自己位置算出の流れ	23
図 2-8. 高精度測位社会プロジェクト実証実験における BLE ビーコン配置	24
図 2-9. 高精度測位社会プロジェクト実証実験における測位検証結果の比較	25
図 2-10. 主張精度比較型シームレス測位による測位技術の選択結果	25
図 2-11. 主張精度比較型によるシームレス測位のイメージ	26
図 3-1. シームレス測位システムの提供対象の分類	33
図 3-2. 本研究の提供対象	35
図 3-3. シームレス測位システムのライフサイクル	38
図 3-4. 工場や倉庫におけるシームレス測位システムの利用用途	41
図 3-5. シームレス測位システムと上位システムとの階層関係	41
図 3-6. オニオンモデルを利用したステークホルダの抽出	44
図 4-1. 確認実験実施箇所	52
図 4-2. 確認実験の歩行ルート	53
図 4-3. 歩行検証時のスマートフォンの保持状態	53

図 4-4. 衛星全体の SNR 平均の変化(Site-A 午前の計測)	55
図 4-5. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化(Site-A 午前の計測)	56
図 4-6. 衛星の配置(Site-A 午前の計測 2m 進入ルート時)	58
図 4-7. 衛星全体の SNR 平均の変化(Site-A 午後の計測)	60
図 4-8. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化(Site-A 午後の計測)	61
図 4-9. 衛星の配置(Site-A 午後の計測 2m 進入ルート時)	63
図 4-10. 衛星全体の SNR 平均の変化(Site-B 午前の計測)	64
図 4-11. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化(Site-B 午前の計測)	65
図 4-12. 衛星の配置(Site-B 午前の計測 2m 進入ルート時)	67
図 4-13. 衛星全体の SNR 平均の変化(Site-B 午後の計測)	68
図 4-14. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化(Site-B 午後の計測)	69
図 4-15. 衛星の配置(Site-B 午後の計測 2m 進入ルート時)	71
図 4-16. 個々の衛星の SNR の比較(Site-A 午前の計測 1m 進入ルート)	74
図 4-17. 衛星の配置(Site-A 午前の計測 1m 進入ルート時)	75
図 4-18. 個々の衛星の SNR の変化(Site-A 午前の計測 2m 進入ルート時)	76
図 4-19. 個々の衛星の SNR の変化(Site-B 午後の計測 2m 進入ルート時)	77
図 5-1. シームレス測位機能の構成	79
図 5-2. 半屋外空間の高さの違いが GPS 信号受信に与える影響	81
図 5-3. 時間の経過とともに変化する衛星配置の例	82
図 5-4. 半屋外空間を考慮した衛星配置と GPS 信号の減衰との関係	82
図 5-5. 建物情報と信号対雑音比を活用した空間検知の判定ステップ	83
図 5-6. 半屋外空間検知判定の Step-2 実現方法	84
図 5-7. Site-A における進入角度の算出例	86
図 5-8. 進入角度閾値の算出例	86
図 5-9. 半屋外空間の開放方向の算出例	87
図 5-10. 監視対象衛星を選定する際の処理フロー	90
図 5-11. 定義済処理(Group1a の場合。Group1b、Group2 でも同様)	91
図 5-12. SNR 変化率方式の流れ	92
図 5-13. 確認実験における監視対象衛星の半屋外空間進入時の SNR の変化	93
図 5-14. 半屋外空間滞在の判定フロー	94
図 5-15. 評価実験実施箇所の概要	95
図 5-16. 評価実験の歩行ルート(Site-C)	96
図 5-17. 評価実験時の衛星配置例(Site-C 2m 進入時)	97
図 5-18. 評価実験における既存手法と提案手法との SNR 変化率の比較 (a) 既存手法 / (b) 提案手法(半屋外空間進入時) / (c) 提案手法(半屋外空間退出時)	98
図 5-19. Site-D 及び Site-E の実験時の歩行ルート	103

図 5-20. 2 つの監視対象衛星を利用した場合の半屋外空間の判定パターン	106
図 5-21. ファジィ推論の適用例	107
図 5-22. ファジィ推論方式の流れ	108
図 5-23. 屋外か半屋外かの判定のためのメンバシップ関数	109
図 5-24. コンテキスト判定のためのメンバシップ関数	109
図 5-25. 設計手法に基づく空間判定例	112
図 5-26. 監視対象衛星の選定例 (Site-C 2m 進入ルート時)	113
図 5-27. Site-C における判定結果	115
図 5-28. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-D 午後の計測 1m 進入ルート)	119
図 5-29. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-D 午後の計測 2m 進入ルート)	119
図 5-30. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-C 午後の計測 2m 進入ルート)	120
図 5-31. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-C 午後の計測 1m 進入ルート)	121
図 5-32. 監視対象衛星の SNR の変化 (Site-C 午後の計測 3m 進入ルート)	121
図 5-33. 奥行き基準の違いによる進入角度閾値の違い (Site-D の場合)	126
図 5-34. 進入角度閾値を変更した場合の監視対象衛星の選定の違い (Site-D の場合)	126
図 5-35. 仰角の高くない衛星が監視対象衛星に選定された場合の SNR の変化例	127
図 6-1. 「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の全体像	129
図 6-2. 空間検知の判定フロー	131
図 6-3. 半屋外/屋内の判定のためのメンバシップ関数 (前件部)	132
図 6-4. 半屋外/屋内の判定のためのメンバシップ関数 (後件部)	132
図 6-5. 評価実験実施箇所	134
図 6-6. 断面方向から見た実験箇所における計測点	135
図 6-7. Site-F における評価実験時の衛星配置例	136
図 6-8. QZSS を利用した歩行検証実施箇所 (Site-D)	145
図 6-9. QZSS を利用した場合の半屋外空間の SNR の変化	146
図 6-10. GPS 測位の主張精度計測点	148
図 7-1. 進入の深さによる提案手法における空間検知のしやすさの違い	151
図 7-2. 半屋外空間の反対方向にビル等の建物がある場合の影響	153
図 7-3. ファジィ推論を活用した空間判定によるスコア化の例	158
表 2-1. 半屋外空間を含む空間分類の定義の違い	29

表 2-2. 半屋外空間を含むシームレス測位に関する主な研究の比較	32
表 3-1. 屋内測位システムまたはシームレス測位システムの導入事例調査対象	37
表 3-2. オニオンモデルを構成するサークルとステークホルダの分類	42
表 3-3. 抽出されたステークホルダ	43
表 3-4. 半屋外空間を含むシームレス測位システムの空間検知に関する要求	48
表 4-1. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度(Site-A 午前の計測)	57
表 4-2. Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度(Site-A 午前の計測)	58
表 4-3. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度(Site-A 午後の計測)	62
表 4-4. Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度(Site-A 午後の計測)	63
表 4-5. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度(Site-B 午前の計測)	66
表 4-6. Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度(Site-B 午前の計測)	67
表 4-7. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度(Site-B 午後の計測)	70
表 4-8. Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度(Site-B 午後の計測)	71
表 4-9. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度(各実験結果の合計)	72
表 4-10. Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度(各実験結果の合計)	73
表 5-1. 半屋外空間滞在検知のための衛星の分類	88
表 5-2. 確認実験における監視対象衛星の半屋外空間進入時の SNR の変化率	94
表 5-3. Site-C 計測実験時の監視対象衛星の状況	97
表 5-4. Site-C での評価実験結果(午前)	100
表 5-5. Site-C での評価実験結果(午後)	101
表 5-6. 評価実験結果(Site-C 全体)	102
表 5-7. 評価実験結果(評価実験全体)	104
表 5-8. 「屋外/半屋外」の判定のためのファジィルール	110
表 5-9. Site-C における判定結果	114
表 5-10. 評価実験結果(全体)	116
表 5-11. 1m 進入ルートにおける半屋外空間の検知精度比較	117
表 5-12. 2m 進入ルートにおける半屋外空間の検知精度比較	118
表 5-13. SNR 変化率閾値の比較検討(Site-D AM 計測 2m 進入ルート 2 回目)	123
表 5-14. SNR 変化率閾値の比較検討(Site-D AM 計測 1m 進入ルート 2 回目)	124
表 5-15. SNR 変化率の閾値の妥当性確認結果(全体)	125
表 5-16. 進入角度閾値を変更した場合の監視対象衛星の選定の違い	128
表 6-1. 半屋外/屋内の判定のためのファジィルール	132
表 6-2. 各計測点における SNR 平均値	137
表 6-3. 判定結果(P1(屋外)の場合)	138
表 6-4. 判定結果(P2(屋外)の場合)	139
表 6-5. 判定結果(P3(半屋外空間)の場合)	140

表 6-6. 判定結果(P4(半屋外空間)の場合)	141
表 6-7. 判定結果(P5(屋内)の場合)	142
表 6-8. 判定結果(P6(屋内)の場合)	143
表 6-9. 提案手法に基づく検知精度の結果	144
表 6-10. 抽出した要求に対する充足度の確認	147
表 6-11. 各計測点での主張精度平均値	149
表 7-1. 既存手法との検知精度比較	150

# 第 1 章

## 序論

### 1-1. 研究の背景

携帯電話に Global Positioning System (GPS) に代表される GNSS (Global Navigation Satellite System) が搭載されるようになり、かつ i モードや EZ ウェブ等のインターネットに接続可能なサービスが携帯電話で可能になったことにより、私達は外出時に自分の位置を携帯電話の画面上で地図に重畳表示させて見ることが出来るようになった[1][2]。さらに、自分の位置から目的地までの経路を案内するナビゲーションサービスも手軽に利用できるようになり、特に Google 社が 2005 年に Google Maps のサービス提供を開始し、2010 年前後からスマートフォンが市場に提供されるようになったことにより、現在では地図配信サービスやナビゲーションサービスは私達の生活になくてはならないものとなった[3]。Basiri ら[4]によると、約 2/3 のユーザが 1 日に 1 回以上位置情報サービスを利用している。一方で、GPS の信号は屋内空間までは届くことは難しいため、図 1-1 に示すように屋内空間に入ると GPS による測位精度は著しく低下するか、測位そのものが出来なくなる。そのため、屋外空間のみを対象とした地図配信サービスやナビゲーションサービスは屋内空間では有効に利用することが出来ない。

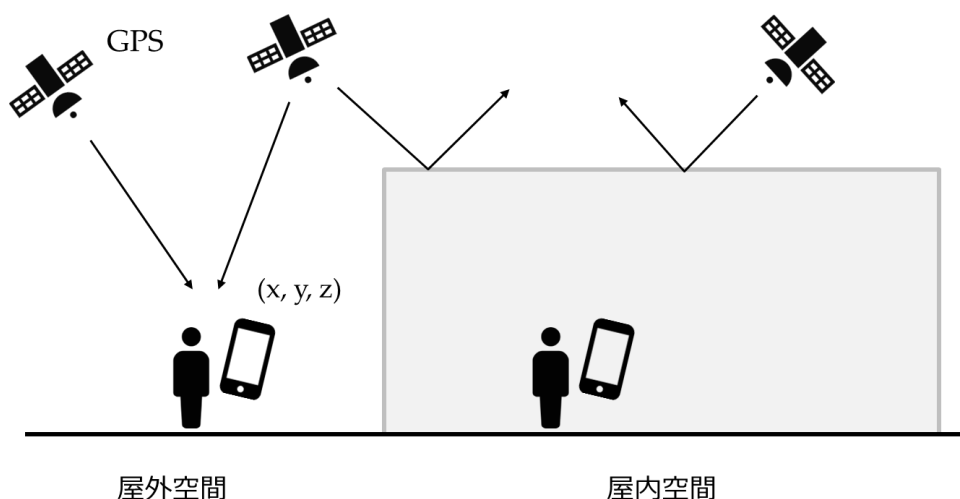


図 1-1. 建物による GPS の信号の遮蔽

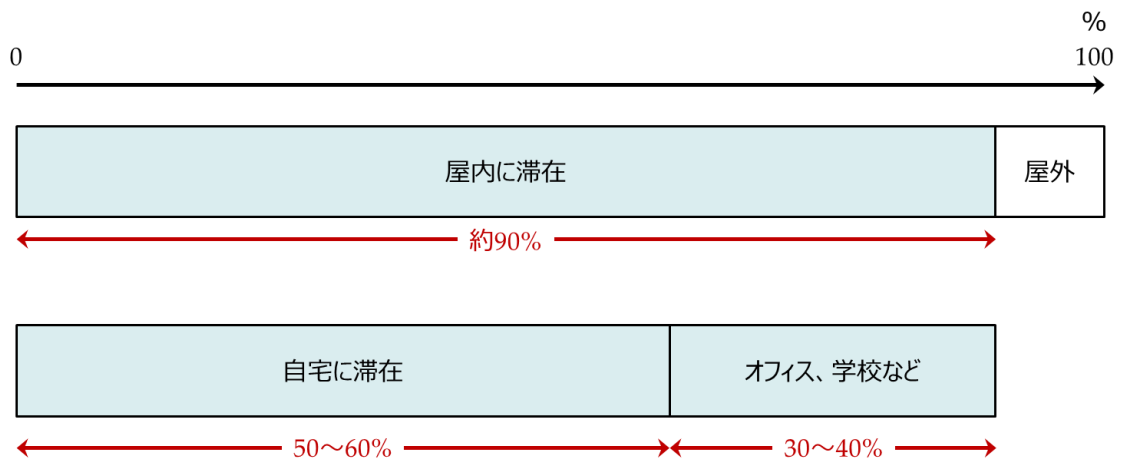


図 1-2. 生活における屋内空間滞在率 [9] を基に筆者作成

加えて、人間は生活の約9割を屋内で生活しているという調査が北米、欧州、東アジアの各地域で行われた研究で示されている[5][6][7][8]。20年以上前の調査になるが、国内では塩津ら[9]が屋内滞在時間量の調査を行っている。この調査によると、社会人常勤者は平日の24時間のうち91%を屋内で過ごしており、その内訳として、52%は自宅であり、36%は会社となっている。また、屋内以外で過ごしている9%のうち、移動に使っている時間が6%となっている(図1-2)。このように、普及が進み私たちの生活になくはならなくなった現状の屋外空間のみを対象とした地図配信サービスやナビゲーションサービスは、人間の生活の10%弱しかカバーしておらず、90%以上の行動を位置と紐づけて記録することが出来ていないということになる。

屋内空間でも測位技術を利用してナビゲーション等を実現するには図1-3に示すように屋内測位機能と屋内地図表示機能が必要となる。GPSの信号が届かない屋内空間でも自分の位置を計測できるようにするために、屋内測位技術に関する研究は古くから行われてきた。しかしながら、GPSのような標準となる技術が存在しないこともありスマートフォン等に標準機能として屋内測位機能は搭載されておらず、普及が進まない原因の一つとなっている[10]。大型商業施設や駅構内などはナビゲーションサービスの中で屋内地図が表示されるようになりつつあるが、屋内測位機能は提供されていない。現状では、屋内測位を実現するには独自に屋内測位機能を対象空間内で実現させる必要がある。

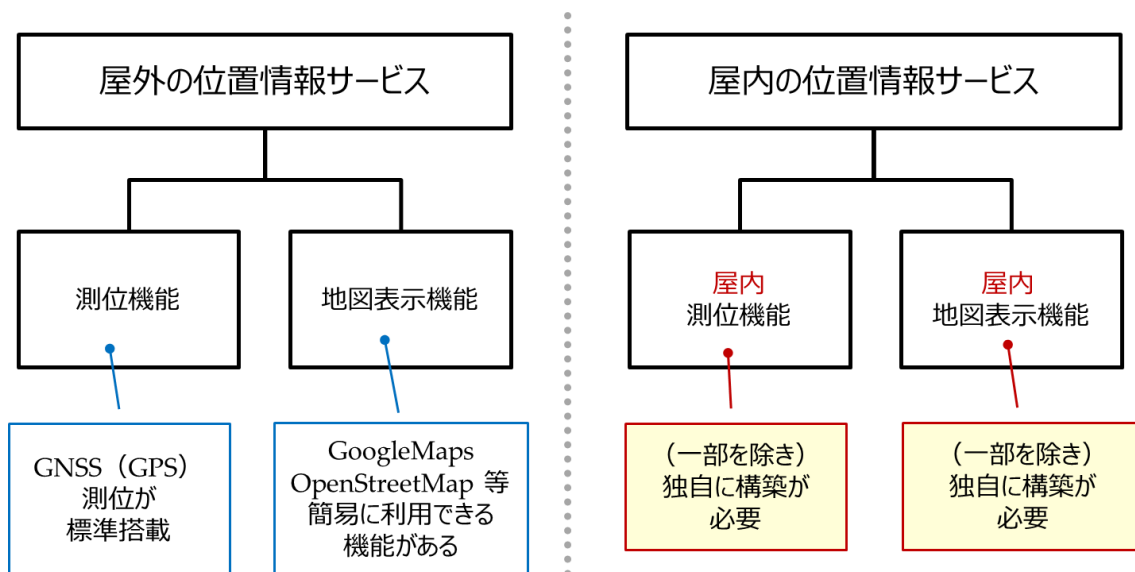


図 1-3. 屋外の位置情報サービスと屋内の位置情報サービスとの違い

これまで様々な屋内測位技術が開発されているが、典型的な屋内測位の仕組みは図 1-4 のようになり、GPS の信号が届かない屋内空間で Wi-Fi や Bluetooth Low Energy (BLE) 等の電波を GPS の代わりに利用することで位置算出を行う。スマートフォンに様々なセンサーが搭載され、Wi-Fi や BLE の電波を取得できるようになったことから、これらの電波を利用した屋内空間での位置情報サービスが 2010 年代に入り提供されるようになった。Wi-Fi を利用した事例としては羽田空港内をナビゲーションするアプリが国内で提供され、BLE を利用した事例としては成田空港内をナビゲーションするアプリが国内で提供されている[11][12]。また、近年は専用の測位機器を利用することで数十 cm レベルの測位が可能な屋内測位システムも販売されるようになり、工場や倉庫に設置して作業員の作業時の行動をトラッキングすることによって、これまで可視化出来てこなかった屋内空間での作業員の行動を分析できるようにし、生産性向上等に役立てる取り組みが進展し始めている[13][14]。



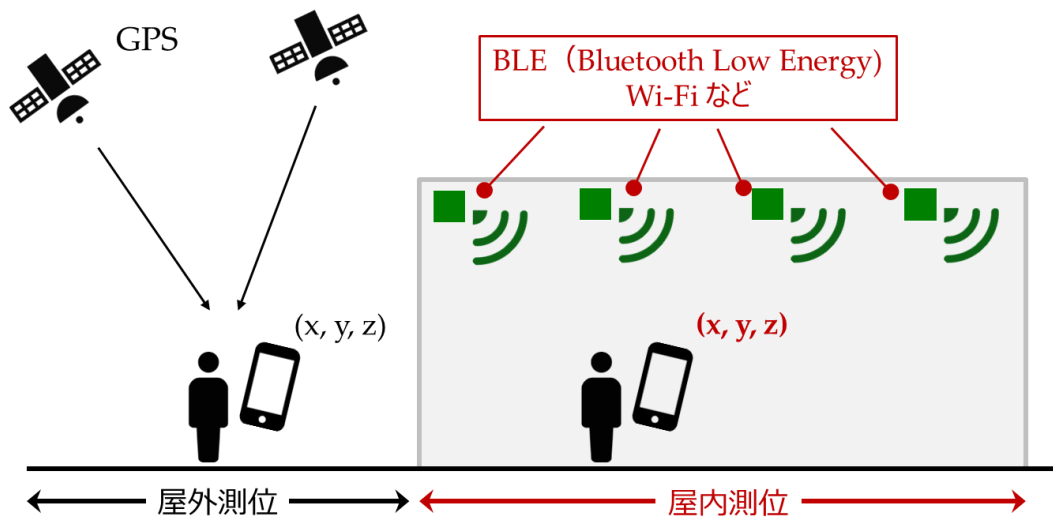


図 1-4. 屋内測位の基本的な仕組み

また、人々は屋内と屋外との間を頻繁に移動することから、屋内外をシームレスに接続する測位技術やナビゲーションは人々が望む主なサービスの 1 つである[15]。屋内外をシームレスに接続するには屋外空間向けの測位技術(主に GPS)と対象空間内に構築された屋内測位技術を使い分ける処理が必要であり、この技術は Indoor-Outdoor (IO) Detection (屋内/屋外検知) またはハンドオーバーと呼ばれる[16] (図 1-5)。GPS の信号は屋内空間でも窓や入口を通して多少受信することが出来てしまい、屋内測位に利用される Wi-Fi や BLE の電波も同様に屋外空間にいても受信できてしまうことから、正確な屋内/屋外検知の実現のためにはどちらの測位技術を利用して測位を行うかを判定するためのアルゴリズムが必要になる[17] (図 1-6)。屋内測位技術と同様に屋内/屋外検知技術に関しても様々なアプローチで研究が行われており、近年では機械学習等を利用することにより高い確率で屋内/屋外検知を実現する方法も提案されている[18]。

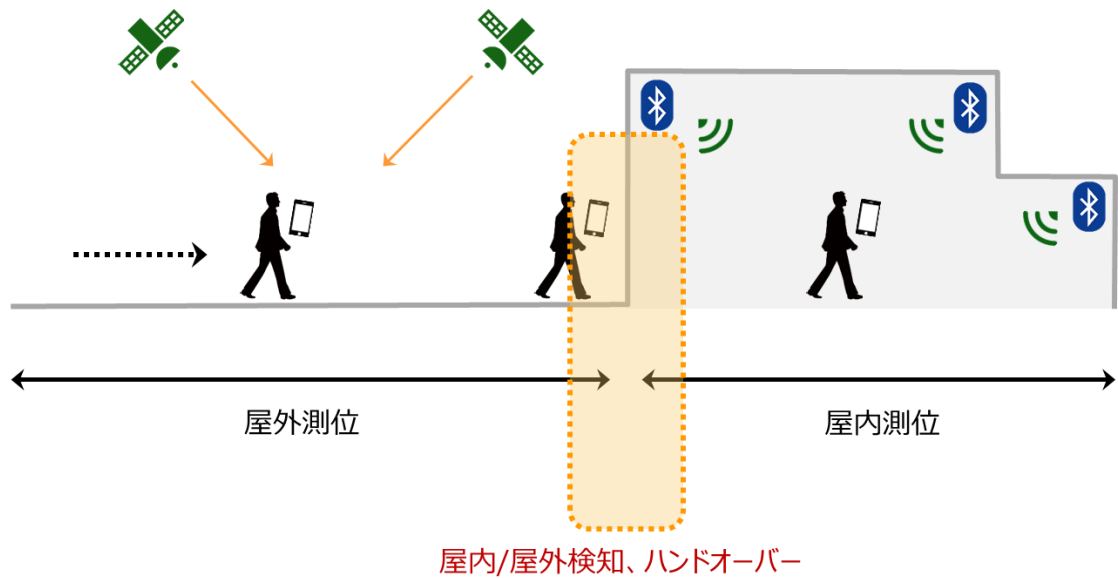
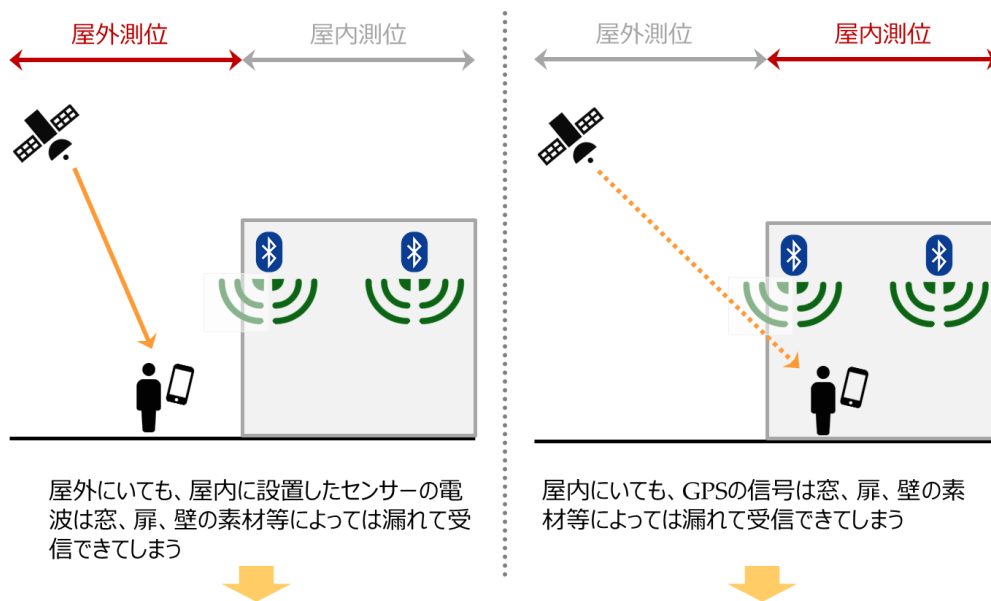


図 1-5. シームレス測位のイメージ



単純に屋外測位・屋内測位の信号受信のON/OFFではシームレス測位は実現できない

図 1-6. シームレス測位技術の必要性

一方で、これまで多くのシームレスな測位技術に関する研究が行われているが、実際には現実空間を屋外空間と屋内空間の 2 つに分類するのが難しいという側面がある[19]。そのため、現実の空間を“Bounded”、“Unbounded”、“Semi-bounded”の 3 つに分類する提案がされ

ている[20][21]。ここで、“Bounded”は屋内空間のことを意味し、“Unbounded”は屋外空間のことを意味している。“Semi-bounded”はさらに“Top-bounded”と“Side-bounded”に分類され、“Top-bounded”は上部は屋根や庇に覆われているが側面が開けている空間のことを意味し、“Side-bounded”は上部は覆われていないが側面が覆われている空間のことを意味している(図 1-7)。本研究では、“Top-bounded”な空間のことを“半屋外空間”と定義する。図 1-7 に示すとおり、“Semi-bounded”の空間は屋外空間であるが庇や壁の遮蔽物によりGPSの信号を十分に受けられなくなることから、GPSによる測位精度の低下が予想される[22]。このうち、“Side-bounded”はいわゆる“Urban Canyon”と呼ばれる環境と類似しており、ビルが林立した都市環境下で測位精度の低下を防ぐための手法の研究はこれまでも多く行われており、この手法を適用すれば測位精度の低下を防ぐことが可能になる[23][24]。もう一方の半屋外空間では、GPSによる測位では上部の遮蔽により測位精度の低下が予想されるため、この空間では屋内測位環境の構築が求められる。しかし、側面も開いているためGPSの電波もある程度十分に受信できてしまう。そのため、屋外空間と屋内空間の2種類の空間検知を対象とした屋内/屋外検知手法の適用が難しい[25]。

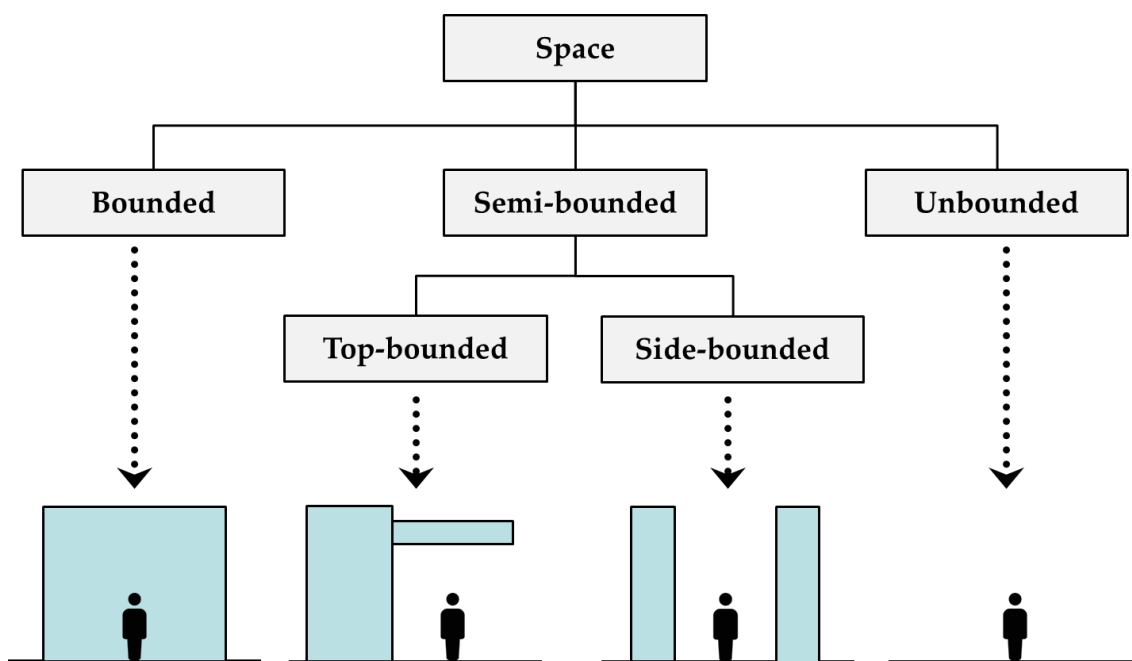


図 1-7. 現実空間の分類例 [20][21] を基に筆者作成

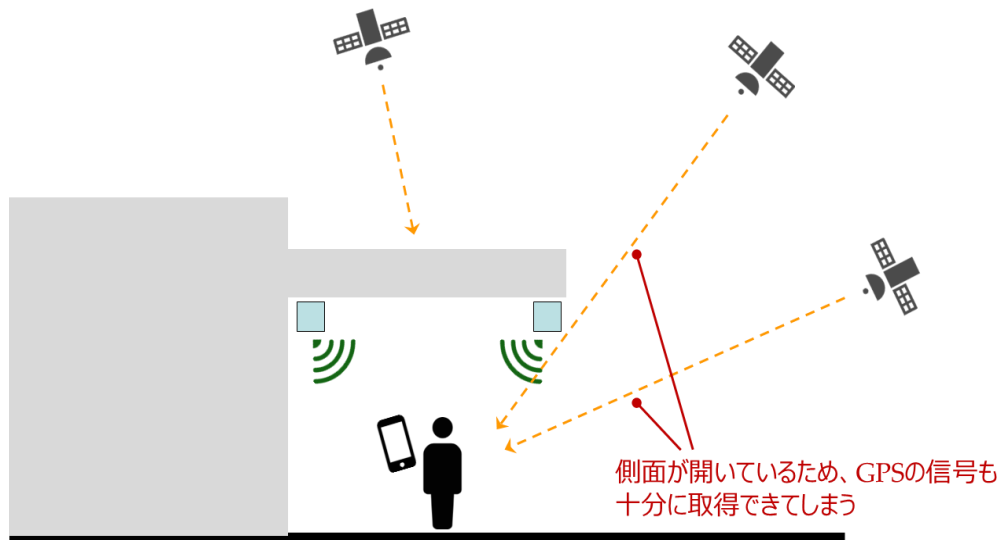


図 1-8. 半屋外空間での測位環境

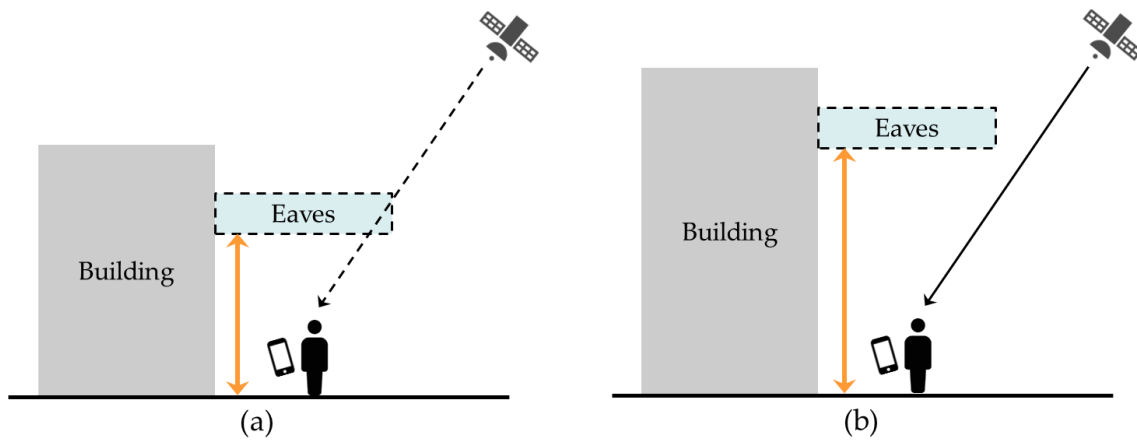


図 1-9. 半屋外空間の形状の違いが GPS 信号受信に与える影響

半屋外空間を含む対象空間下で自分が今どの空間にいるかを判定することで適切な測位手段を選択し、測位精度の低下を防ぐ先行研究は一部に限られているのが現状である。このうち、BlueDetect[26]、Anagnostopoulosら[27]、Gaoら[28]は、半屋外空間への進入に伴い、GPS の信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio: SNR) の値が減少することや測位精度が低下することを利用して半屋外空間の空間検知を行っている。しかしながら、これらの先行研究では、半屋外空間下で GPS 信号を受信するにあたり、半屋外空間の空間形状がどのように影響を

与えているかについて、具体的には考慮されていない。例えば、図 1-9 に示すように、同じ位置にある衛星でも半屋外空間の形状が変われば受信状況にも変化があると想定されるが、このような考慮は先行研究ではされていない。また、軌道上の GPS の衛星の配置は常に変化しているが、衛星の配置の変化に対応した手法となっているかについても、具体的な言及はされていない。そのため、先行研究の手法では異なる箇所でも適用できるかどうかの汎用性や、検知の安定性の面で課題がある。

現実世界には様々な箇所に半屋外空間が存在し、図 1-10 に示すように主に製造工場、物流施設、商業施設、車道に面した歩道等に多く見られる空間である。半屋外空間を含むようなエリアでシームレス測位を提供する場合、検知対象(来場者、作業員、フォークリフトなど)が半屋外空間にいる際に利用する測位手段を誤ると、測位精度の低下を招く可能性がある。例えば商業施設で来場者向けにナビゲーションサービスを提供する場合、誤ったナビゲーション経路を提供してしまう可能性がある。また、工場や倉庫で作業員の作業状況をトラッキングする場合、測位精度の低下によって実際とは異なるエリアで作業していると記録されてしまう可能性がある。図 1-8 で示したように、半屋外空間では GPS の信号も十分に取得可能なことから既存のシームレス測位手法を適用することは難しく、半屋外空間を含むようなエリアでシームレス測位を提供する場合は、誤りなく測位手段選択できるように、別途半屋外空間にいることを正しく判定できる検知手法が必要となる。



図 1-10. 半屋外空間の例

## 1-2. 研究の目的

以上のことから、本研究は、半屋外空間でも利用可能なシームレス測位のために、安定的に「屋外/半屋外/屋内」の判定が可能で、かつ異なる箇所での利用に対応した空間検知手法を設計し、有効性を評価することを研究の目的とする。本研究による達成イメージを、図 1-11 に示す。

また、本研究では先行研究と同様に空間検知のために GPS の SNR を利用するが、SNR のみの入力では GPS にとって障害物となる半屋外空間の空間形状の違いを考慮することは難しいため、半屋外空間の建物情報を活用する。具体的には、半屋外空間の空間形状に関する情報として、半屋外空間の「高さ」「奥行き」「側面の開放方向」をパラメータとすることによって、常に変化する軌道上の衛星から半屋外空間の空間検知に利用できる衛星を選定する手法を設計する(図 1-12)。本研究では、「高さ」「奥行き」「側面の開放方向」の 3 つのパラメータを総合して「建物情報」と定義することとする。半屋外空間を含むシームレス測位に関する既存研究では半屋外空間の空間形状を考慮した手法となっていないため、既存研究で実験を行った箇所以外の半屋外空間での利用性に懸念が残る。本研究での提案手法は半屋外

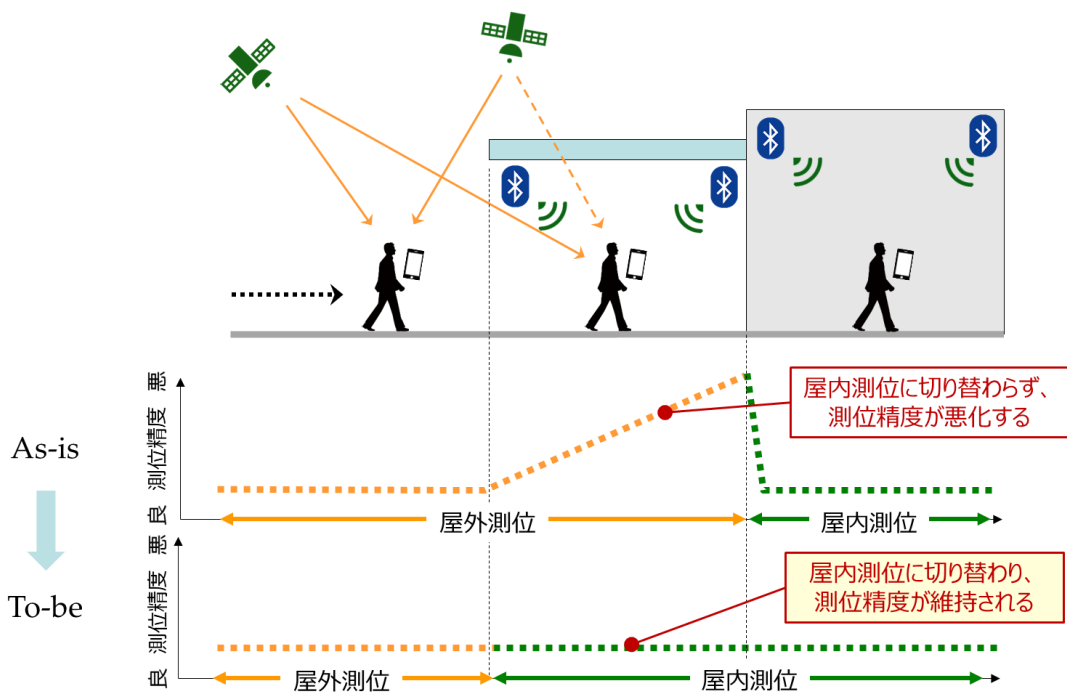


図 1-11. 本研究による達成イメージ

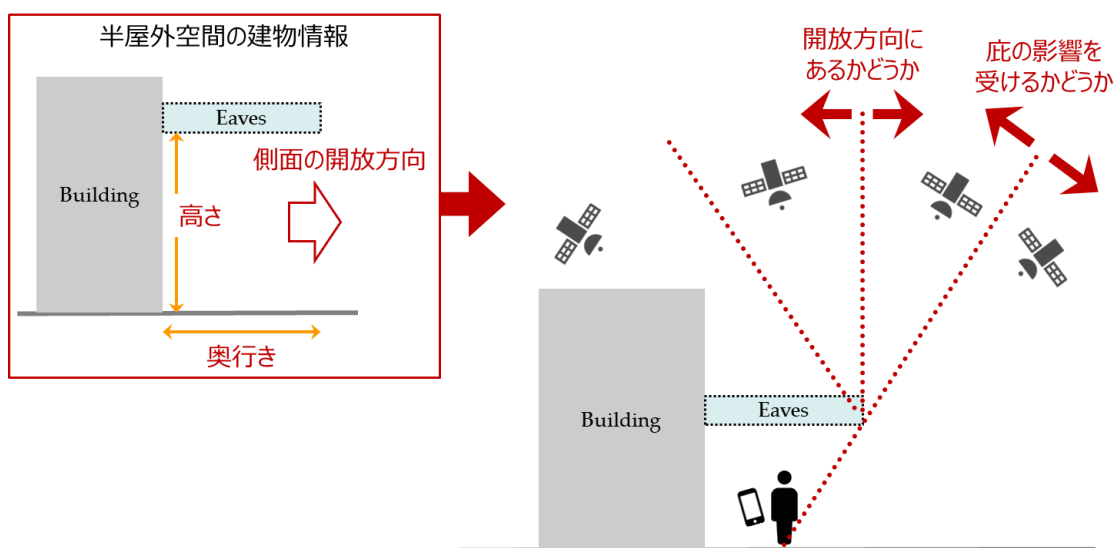


図 1-12. 本研究による半屋外空間の建物情報活用イメージ

空間の空間形状を考慮するために異なる空間でも適用が可能になるとともに、適切な衛星を選定することにより既存手法より安定的な空間検知が実現可能と考えられる。

半屋外空間の建物情報の取得は、本研究では、予めレーザ距離計や Google Maps で簡易的に取得し、インプットデータとして保有することとする。一方で、近年 Building Information Modelling (BIM) の利用が進みつつあり、国内では国土交通省が 3D 都市モデルの整備やオープンデータ化を進めている[29][30]。建物情報の取得は、将来的には BIM の利用やオープンデータによって自動で取得することが期待できる。

このように、本研究は、半屋外空間という屋外測位と屋内測位との境界が曖昧で安定的な測位が難しい空間において、GPS の SNR と半屋外空間の建物情報という 2 つの要素を融合させることにより、「屋外/半屋外/屋内」の安定的な空間検知を目指すものである。

### 1-3. 提供対象の特定

シームレス測位システムはどのような空間で誰を対象に提供するかによって求められる要件や条件も変化するため、本研究で対象とするユーザを明確にする必要がある。シームレス測位に求められる要件は、「対象とするユーザが一般コンシューマか作業員・社員か」「対象とする空間が公共(一般コンシューマも立ち入り可能な空間)な空間かプライベートな空間か」によ

って 4 つに分類することが出来る。例えば、公共な空間で対象ユーザが一般コンシューマの場合、コンシューマのスマートフォンにアプリケーションをインストールしてもらい、シームレス測位を提供すること等が想定される。そのため、アプリケーションをインストールしてもらうことに対するユーザメリット等が重要な要素になる。また、個人情報保護に対する対策等も入念に構築することが求められる。一方で、プライベートな空間で対象ユーザが作業員・社員の場合、産業用途での工場や物流施設内における作業員の行動分析などの利用が想定される。この場合、対象ユーザが作業員・社員ということもあり、個人情報保護等よりは検知精度や導入コストに対する費用対効果等が重視される面もある。本研究は、対象とする空間が物流施設や工場に多く存在することから、ターゲットは図 1-13 に示すとおり工場や物流施設などのプライベートな空間でその空間内で作業する作業員やフォークリフトの行動をトラッキングすることとする。本研究で構築する手法の提供対象については、第 3 章で詳述する。

また、半屋外空間の形状は非常に様々であり、すべての形状に適用可能な手法を予め設計することは難しい。本研究では、工場や倉庫に多く見られる上から見ると細長い矩形状の形状で、長辺方向の一边が側面で覆われている空間を対象とした。本研究では、この条件に合致する半屋外空間を現実空間の中から複数抽出し、設計した手法の評価実験を実施した。

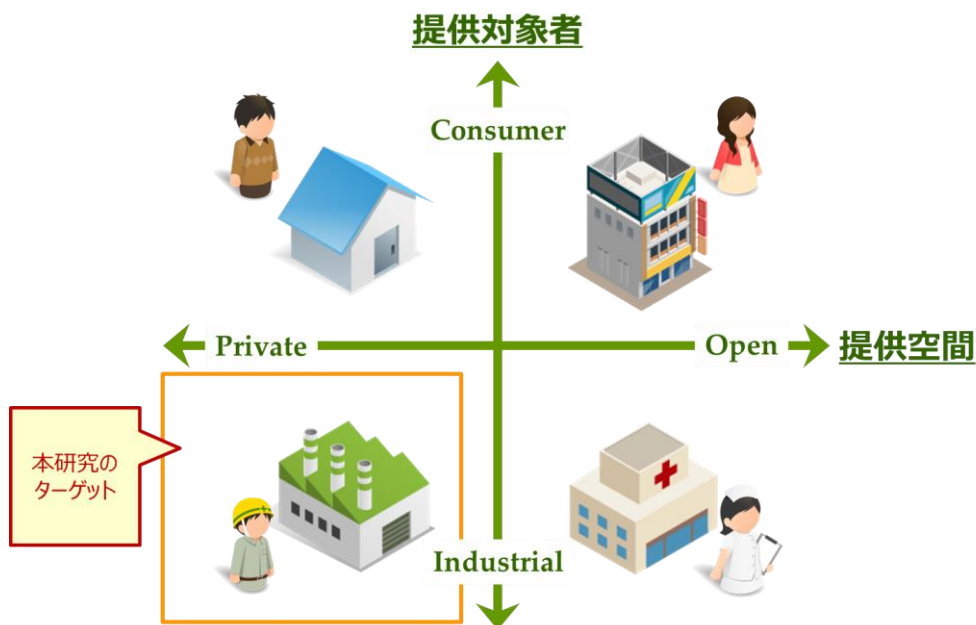


図 1-13. 本研究のターゲット



## 1-4. 本論文の構成

本論文の構成を、図 1-14 に示す。

第 1 章の序論では、本研究の背景を述べた後、本研究の目的を示す。

第 2 章では、本研究の目的である、半屋外空間を含むシームレス測位の実現に向けて、現状のシームレス測位および半屋外空間の定義に関する現状の課題を、関連研究の調査を踏まえて整理する。

第 3 章では、本研究のターゲットとなるユースケースを特定し、オニオンモデルを使用してステークホルダを明らかにした。さらに、各ステークホルダがシームレス測位システムに対して求める要求を洗い出し、システムに対する要求を整理した。

また、これまで屋外と屋内の 2 つの空間コンテキストを検知するための屋内外シームレス測位手法は多く存在するが、半屋外空間を考慮した手法は一部に限られていることから、第 4 章では半屋外空間を 2 箇所抽出し、半屋外空間での GPS 信号受信状況の確認実験を行うことで既存手法が半屋外空間でも適用可能かどうかを評価した。

確認実験で得られた結果を踏まえ、第 5 章ではまず「屋外/半屋外」の 2 種類の空間検知を行うための手法を 2 種類設計し、新たに 3 か所の半屋外空間を抽出し評価実験を行うことで、2 種類の手法の検知精度の比較を行った。ここでの評価実験結果を踏まえて、第 6 章では、屋外空間／半屋外空間／屋内空間の 3 つの空間コンテキストを対象にした空間検知手法を設計し、評価実験を行った。

最後に、これまでに設計した機能に対する考察を第 7 章で行った。

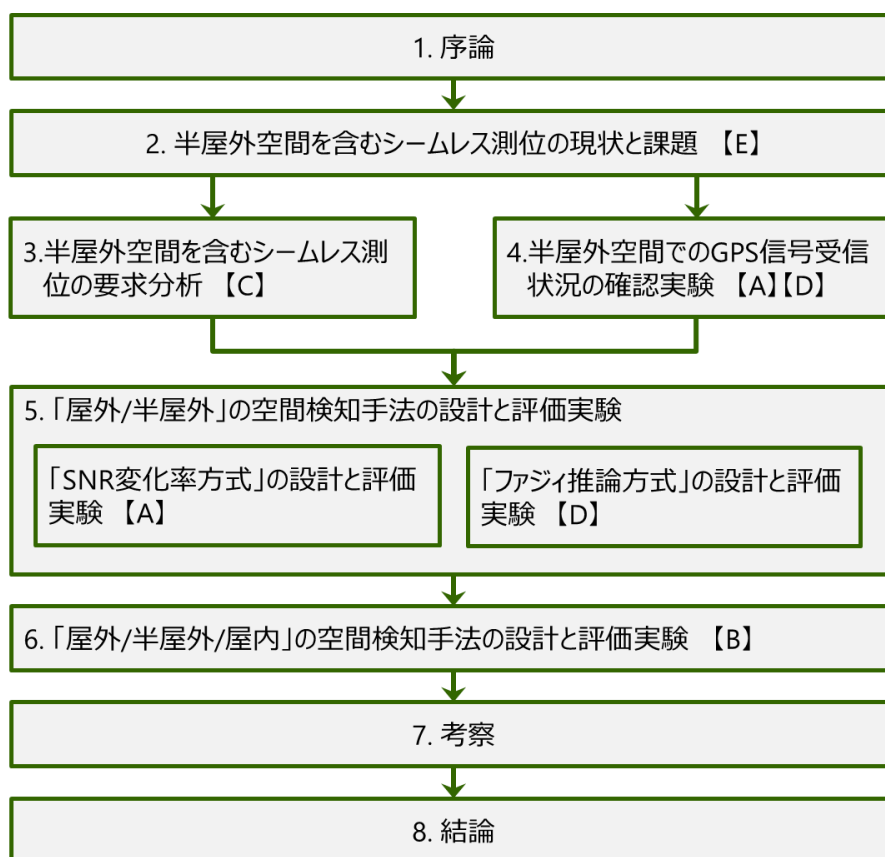


図 1-14. 本論文の構成

表 1-1. 本論文に関連する査読付投稿論文等の業績

査読付投稿論文	
A.	Tabata, K.; Nakajima, M.; Kohtake, N. Design of Entry Detection Method for Top-Bounded Spaces Using GPS SNR and Spatial Characteristics for Seamless Positioning in Logistics Facilities. <i>Sensors</i> 2020, 20, 6864.
B.	Tabata, K.; Nakajima, M.; Kohtake, N. Design of Multiple Spatial Context Detection Method Considering Elongated Top-Bounded Spaces Based on GPS Signal-To-Noise Ratio and Fuzzy Inference. <i>ISPRS Int. J. Geo-Inf.</i> 2020, 9, 717.
C.	Tabata, K.; Nakajima, M.; Kohtake, N. Process Optimization Method for the Simplification of Developing Indoor Positioning Environment. <i>Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan</i> , 2019, 17(4), 552-560.
D.	田端謙一, 中島円, 神武直彦. 空間形状特性とファジィ推論を活用した GPS 信号対雑音比による半屋外空間の滞在検知手法の設計. <i>測位航法学会論文誌</i> , 2020, 11.1, 1-11.
国際学会発表論文	
E	Tabata, K., Konno, H., Tsuno, K., Morioka, W., Nishino, A., Nakajima, M., & Kohtake, N. (2015, October). The design of selective hybrid positioning by utilizing accuracy information for indoor-outdoor seamless positioning and verification in Tokyo station. In <i>Proc. Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigation</i> .

## 第 2 章

# 半屋外空間を含むシームレス測位の現状と課題

### 2-1. 屋内測位のこれまでの取り組み

GPS の信号は屋内空間までは届くことは難しいため、屋内空間に入ると GPS による測位精度は著しく低下するか、測位そのものが出来なくなる[31][32]。そのため、GPS の信号が届かない屋内空間でも自分の位置を計測できるようにするために、屋内測位技術に関する研究は古くから行われてきた。西尾[33]によると、屋内測位技術の始まりは 1992 年の Cambridge 大学の“Active Badge”とされている。以降、様々な屋内測位技術が研究・開発されてきた[34][35]。測位技術によって精度も様々であり、0.1m レベルのものもあれば数 m レベルのものもあり、利用用途やコスト等の条件によって使い分けられている[36]。

屋内測位技術は、大別すると、図 2-1 に示すように「インフラ型」と「インフラレス型」に分類することができる。「インフラ型」とは、屋内測位を実現したい対象空間に Wi-Fi や BLE 等の機器を設置することで屋内測位を実現する方式のことを言い、「インフラレス型」とは、対象空間に機器を設置することなく屋内測位を実現する方式のことを言う。インフラ型に対してインフラレス型は対象空間に機器を設置する必要がないことから対象空間に対する負荷や設置に要するコストも必要なく、実現すれば利便性の高い屋内測位方式だということが出来る。インフラレス型の測位方式の代表的な手法としては、Fingerprinting 方式と Pedestrian Dead Reckoning (PDR) 方式が挙げられる。Fingerprinting 方式は、予め定点で Wi-Fi の ID や受信信号強度、

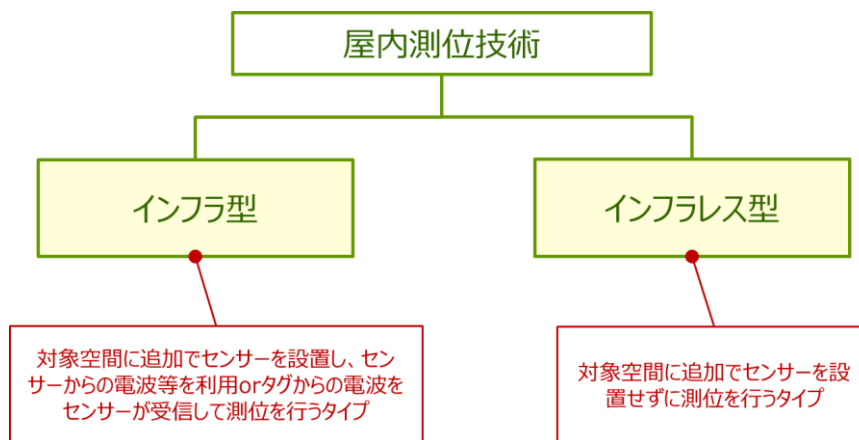


図 2-1. 屋内測位技術の分類

残留磁気等を計測してデータベースに格納し、歩行時に計測した値とデータベースに格納した結果とを照合することで位置を推定する方式である[37]。また、PDR方式はスマートフォンに内蔵する加速度センサー、方位センサー、ジャイロセンサー等を利用し、歩行時のそれらのデータの変化量から移動量や移動方向を推定する方式である[38][39]。将来的には普及が期待される測位方式だが、現状では測位精度の安定性の面で課題があり、多くの空間で実用化されるには至っていない。

一方で、インフラ型の屋内測位方式は対象空間に設置する機器のコストや設置に掛かる手間等の課題はあるものの、設置した機器が発する電波の受信電波強度を利用することによりインフラレス型と比較して安定的な測位精度を得られることから実用化が進んでいる屋内測位方式である[40]。国内ではスマートフォンの普及が進むのとともに実用例が登場し始め、2012年には、空港内に設置されたWi-Fiの電波を利用して現在位置から目的の搭乗口までを2DマップとAugmented Reality (AR:拡張現実)で案内するサービスが日本で初めて提供された[11] (図2-2)。さらに、2013年にはAppleがiPhone端末におけるiBeaconへの対応を発表した。これにより、Bluetooth Low Energy (BLE) 4.1に対応したビーコン端末が安価で販売されるようになり、BLEによる屋内測位サービスが登場するようになった。当時の代表的なサービスの1つとして、「とーはくナビ」がある[41]。これは、博物館内の展示品のある箇所にBLEビーコンを設置し、展示品に近づくと専用アプリの入ったスマートフォンがBLEビーコンの電波を受信して自動で展示品のガイダンスを始めるというものである。一般コンシューマ向けにはこのサービス以外にも店舗内等に設置したBLEビーコンに近づくと来店者にクーポン、ポイント、おすすめ情報等のコンテンツを付与するサービス等が提供されるようになった[42]。また、企業向けには、オフィスや工場内の社員の行動を把握するためのサービスなど、BLEビーコンを利用した様々なサービスが展開されるようになった[43][44]。

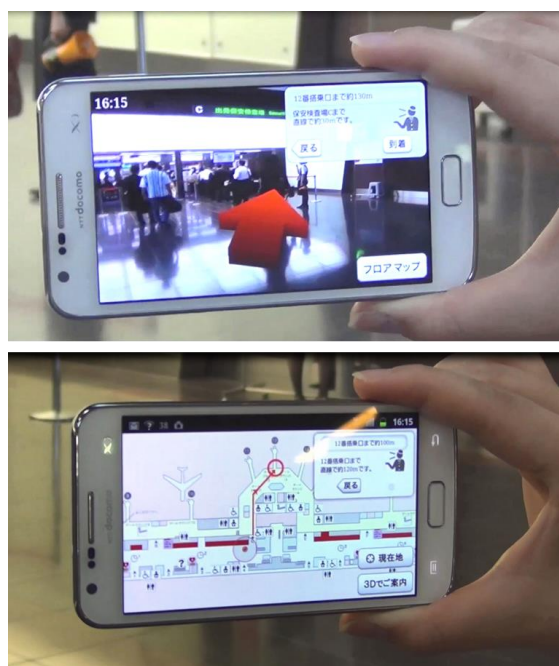


図 2-2. 日本初の屋内測位を利用した空港内ナビゲーションサービス

BLE ビーコンや Wi-Fi の電波を使用した屋内測位は測位精度が 2m~5m あり、ビーコン端末が安価で比較的簡易に使用できるものの精緻な位置情報が必要となる用途への適用が難しかった。その一方で、数十 cm レベルの高精度な屋内測位が実現できる手法として、Ultra Wide Band (UWB) を利用した屋内測位技術があり、2014 年からは電波法の改正により日本でも利用が可能となった[45]。この技術を採用した屋内測位システムは最高で 10cm レベルの測位精度を実現することが出来た。さらに、Angle of Arrival (AoA) という測位方式によって UWB と同等の測位精度を、UWB を採用したシステムよりも安価に提供する測位システムが登場した[46] (図 2-3)。この測位システムは、従来と比較して安価なこともあり、現在日本を含む世界各国の工場、物流施設、オフィス、病院、スポーツ施設、博物館などで採用が進んでいる[47][48]。

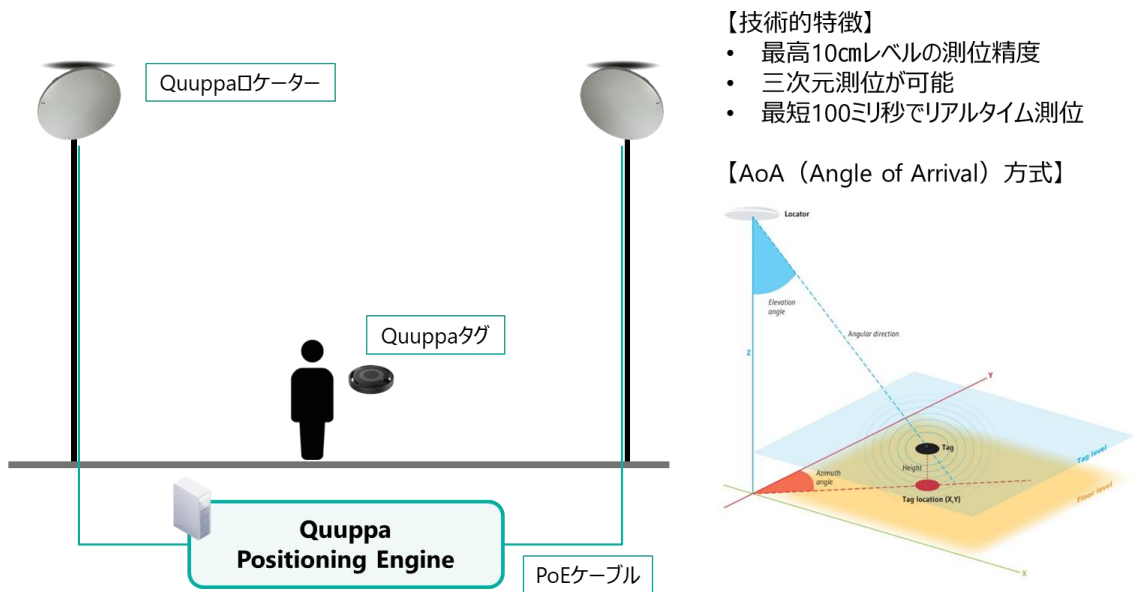


図 2-3. Angle of Arrival (AoA) を採用した高精度屋内測位サービス

近年はスマートフォンに高精度測位が実現可能な技術の搭載が進んでいる。Apple 社が販売する iPhone や iPad の上位機種には、上述した UWB のチップが搭載されるようになった[49]。加えて、もともとは地図作成などに使用されるリモートセンシング技術で、最近では自動車の自動運転の実現のための利用が始まっている Light Detection and Ranging (LiDAR) も iPhone や iPad の上位機種に搭載されることになり、屋内空間での高精度な測位や屋内マップ作成に利用することが可能になった[50]。

このように、屋内測位技術は、使用するセンサーの小型化や廉価化、スマートデバイスへの搭載とも関連しながら技術の進展が進んでおり、今後もこの傾向は続くと想定される。

## 2-2. シームレス測位のこれまでの取り組み

### 2-2-1. シームレス測位の概要と分類

人々は屋内と屋外との間を頻繁に移動するため、屋内外をシームレスに接続するナビゲーションは人々が望む主なサービスの 1 つである[15]。屋外では主に GPS が使用され、屋内では用途に応じて 2-1 で述べたような屋内測位環境が構築されるが、シームレス測位を実現する

ための重要な要素技術の 1 つとして、対象物が屋外にいるのか屋内にいるのかを検知する処理が必要となる[51]。この技術は、屋内/屋外検知またはハンドオーバーと呼ばれる[52][53] (図 2-4)。屋外では GNSS を測位として利用し、屋内では屋内測位環境を構築すれば屋内/屋外検知が簡易に実現できると考えがちだが、実際にはそれだけでは正確な屋内/屋外検知は難しい。例えば、スマートフォンなどの受信端末が屋内にいる場合、「GPS の電波を受信しなくなったら屋内測位を有効にする」ことによって屋内測位への切り替えは可能だが、実際には屋内にいても周囲に窓や入口などがあると GPS の電波は屋内にいてもある程度受信できてしまう。反対に、受信端末が屋外にある場合、「屋内測位センサーの電波を受信しなくなったら屋外測位を有効にする」ことによって屋外測位への切り替えは可能だが、BLE や Wi-Fi などの屋内測位センサーの電波もまた窓や入口、壁の素材等によって屋外でも電波を受信できてしまう(図 2-5)。そのため、正確な屋内/屋外検知の実現に向けて様々なアプローチで研究が行われている。

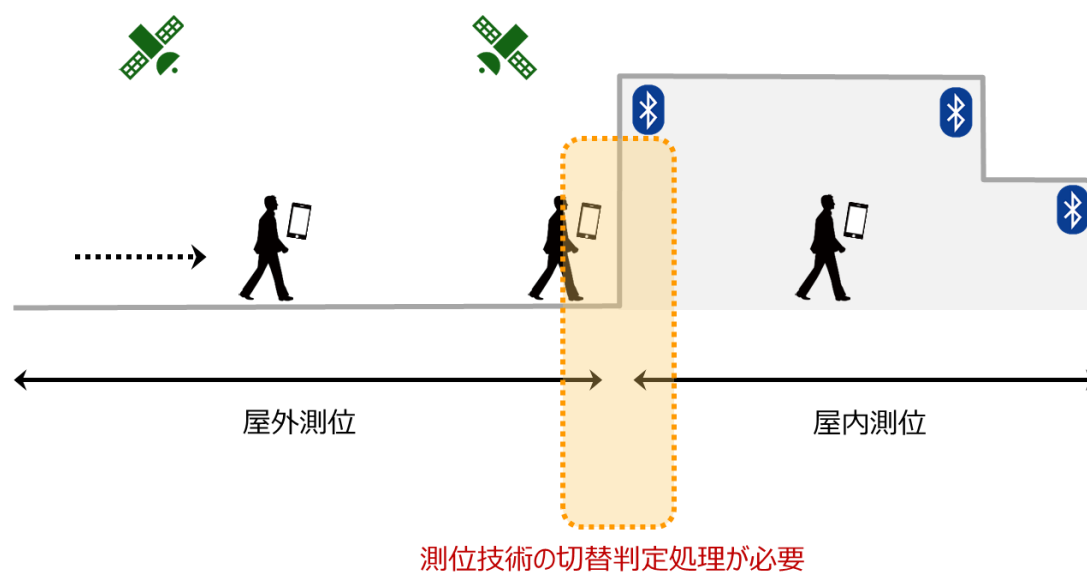


図 2-4. シームレス測位の屋内/屋外検知

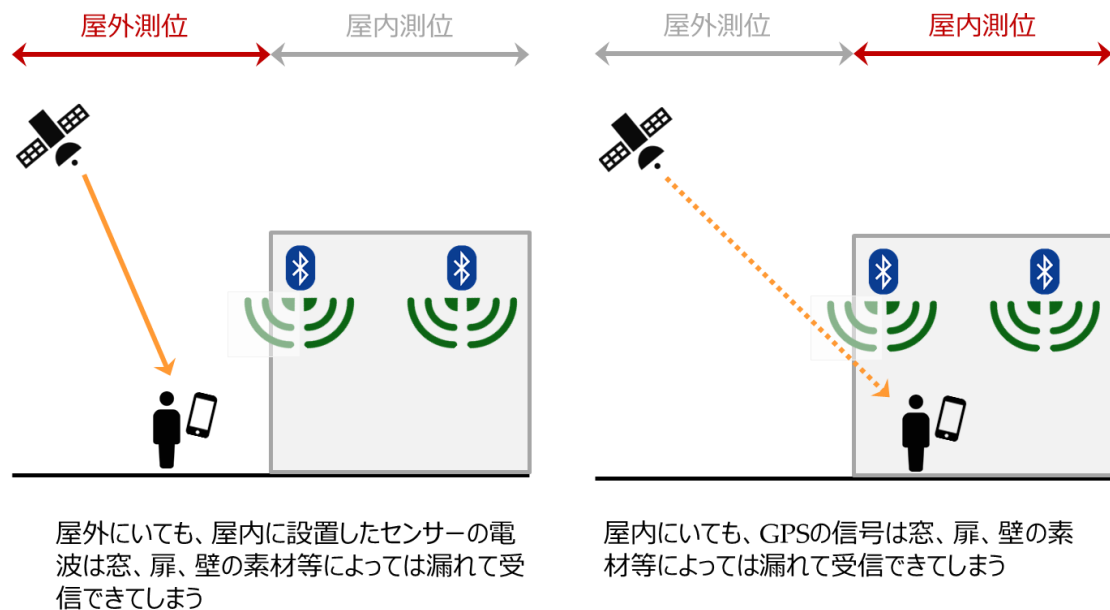


図 2-5. 屋内/屋外検知の難易点

シームレス測位手法は、大きく“自位置算出を含むシームレス測位手法”と“自位置算出を含まないシームレス測位手法”の 2 つに分類することが出来る。“自位置算出を含むシームレス測位手法”の場合、屋外では多くの場合 GNSS を用いて自位置算出を行い、屋内/屋外検知によって屋内空間にいると判定した後は 2-1 で示したような測位手段を用いて自位置を算出することになる。自位置算出を含むため、他の測位手法を追加で用意する必要がない点にメリットがあるが、使用する屋内測位手法が固定されるため、測位精度やコストなどの諸条件に対する柔軟性に欠ける点がデメリットとなる。一方、“自位置算出を含まないシームレス測位手法”の場合、特に屋内での自位置算出は行わず、屋外空間にいるのか屋内空間にいるのかを屋内/屋外検知によって判定するまでを測位手法の範囲内としている。屋内測位手法を含まないため、採用する屋内測位を柔軟に選択できる点にメリットがあるが、別途屋内測位手法を用意をしなければならぬ点がデメリットとなる。さらに、2-3 で後述するように、一部のシームレス測位手法は屋外屋内に加えて半屋外空間を対象としている。よってシームレス測位手法は図 2-6 に示すように 4 つに分類することができる。

本研究では、2-1 で述べたように屋内測位手法は常に新しい手法が登場している点や、工場や倉庫等で導入する場合は測位精度やコストなどによって必要となる屋内測位手法は異なる点を考慮して、自位置算出を含まないシームレス測位手法をターゲットとする。



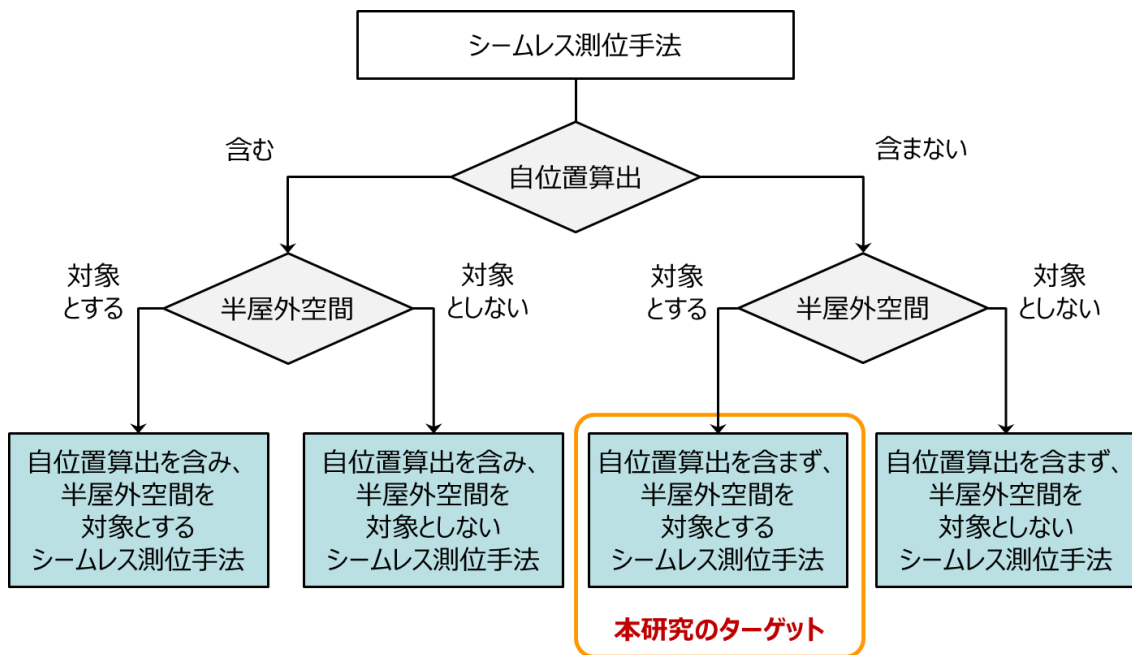


図 2-6. シームレス測位手法の分類

## 2-2-2. シームレス測位の実現に向けたこれまでの取り組み

### 2-2-2-1. 信号や電波受信の On/OFF や受信数によって判定するシームレス測位手法

様々なアプローチのなかで比較的初期に多かったのが、GPS の信号や Wi-Fi の電波の取得の On/Off によって屋外測位を利用するか屋内測位を利用するかを判定する方式である。Zeng ら[54]、Zou ら[55]、Machaj ら[56]は、GPS 信号が利用かどうかを判断基準とし、利用不可の場合は屋内にいると判断し屋内測位を利用するアルゴリズムを採用している。しかしながら、図 2-5 に示したように、屋内空間にいても周囲に窓や入口があると GPS の信号はある程度受信できてしまうため、この手法は GPS 信号が入らないような屋内空間であれば適用可能だが、そうでない屋内空間の場合は判定精度に懸念が残る。

### 2-2-2-2. GNSS からの信号の変化によって判定するシームレス測位手法

2-2-2-1 で示した手法と比較して現実空間での測位状況を反映したシームレス測位手法として、GNSS からの信号の変化によって屋外から屋内への進入を判定する手法がある。この手法の場合、屋内測位で使われるセンサー等は使用せず GNSS のみで屋内/屋外検知を行うため、自位置の算出は含まない。GNSS の信号の強さは、National Marine Electronics Association

(NMEA) 0183 Standard に基づく GSV メッセージから Signal-to-Noise Ratio (SNR) 値として取得することが出来る。SNR は、受信端末が建物などの遮蔽の影響を受けると GPS の電波を直接受信できない Non-Line-of-Sight (NLOS) の状態になり、直接受信できる Line-of-Sight (LOS) の状態と比較して SNR の値が低下するという性質がある[57][58]。この性質を利用して、スマートフォン等の受信端末が屋内に進入する際の SNR の変化を屋内/屋外検知の判定に利用している。

Kimら[59]は、予備実験を通して仰角の高い衛星の SNR は建物入口付近で急に SNR が低下し、仰角の低い衛星の SNR は急激には下がらないという性質を発見し、取得可能な衛星の中から該当する衛星を抽出し、その衛星の SNR の変化をモニタリングすることで屋内への進入を判定している。衛星の仰角や方位角の値は、SNR と同様に NMEA0183 Standard の GSV メッセージから取得することが出来る。Zhangら[60]は、SNR の変化に加えて、可視衛星数等をパラメータに追加した判定アルゴリズムを設計し、屋内/屋外検知を行っている。Okamotoら[61]や勝田ら[62]も同様に仰角の高い衛星ほど屋外空間から屋内空間への進入時の SNR の変化が大きい点に着目した屋内/屋外検知の手法を提案している。Okamotoら[61]は、仰角の高い衛星の SNR の変化をモニタリングしながら、受信端末が建物方向に向かっているかどうかをスマートフォンの方位センサーから取得することで、検知精度を向上させる提案を行っている。勝田ら[62]は、仰角の高い衛星の SNR のみを用いる事ができるようなアルゴリズムの提案を行っている。Chenら[63]は、屋内に進入すると可視衛星数が減少するという特徴に着目し、可視衛星数の減少から屋内への進入を検知するアルゴリズムを提案している。

また、近年機械学習を用いた研究が分野を問わず多く取り組まれているが、Zhuら[18]やBuiら[64]は、GPS を用いた屋内/屋外検知に機械学習を利用することで高い屋内進入判定精度を実現している。

### 2-2-2-3. 複数のセンサーの値を利用したシームレス測位手法

スマートフォンには光センサー、方位センサー、加速度センサー等様々なセンサーが搭載されていることを活用して、複数のセンサーの値を利用して屋内/屋外検知を実現する研究も多く行われている。

多く利用されているのは光センサーである。これは、屋内空間では屋外空間と比較して光セ

ンサーの値が低下するという特徴を利用しており、Aliら[65]、Zhuら[66]、Jiaら[67]は光センサーの値の変化をパラメータの1つとして用いている。しかしながら、光センサーの値の変化を取得するにはスマートフォンの保持状態に工夫が必要であり、一般ユーザや工場や倉庫で作業中の作業員にこれらの手法を適用できるかという点では懸念がある。また、地磁気データを取得して屋内/屋外検知に活用する研究も存在する。これは、残留磁気は場所ごとに少しずつ異なるという性質があることと、他のセンサーと比較して電力消費量が少ないことから、予め各場所の残留磁気を取得し、パラメータの1つとして活用したものである[68][69]。一方で、残留磁気は鉄道やエレベーター等の移動に伴い変化しやすいことも知られており、それらをノイズとして除去することが求められる。

#### **2-2-2-4. 複数の測位技術の主張精度の比較によるシームレス測位手法**

複数のセンサーの値を利用したシームレス測位手法の別の手法として、それぞれの測位技術が算出した精度を比較し、精度の良い方の測位技術を選択し、その測位技術が算出した自己位置を採用することでシームレス測位を実現する方法も考えられる。そこで、本研究ではプロトタイプアプリケーションを実装し、東京駅地下街で測位実験を行った。それぞれの測位技術が算出した精度のことを、本論文では主張精度と呼び、このシームレス測位手法のことを主張精度比較型シームレス測位手法と呼ぶこととする。この測位手法における主張精度比較による測位技術の選択の流れを、図 2-7 に示す。例えば、t1 において測位手法 1 が算出した主張精度(=4.0m)と測位手法 2 が算出した主張精度(=5.0m)を比較すると測位手法 1 の主張精度の方が良いため、測位手法 1 が算出した自己位置が最終的な自己位置となる。この比較を随時行い、主張精度の良い方の自己位置を採用することで、高精度な測位を維持することを目指している。



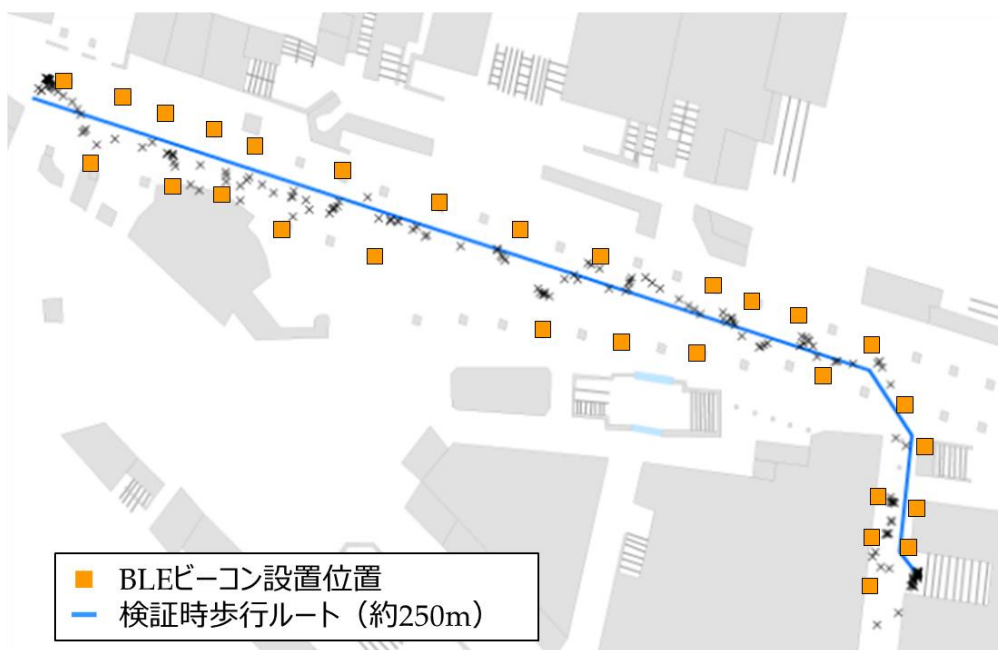
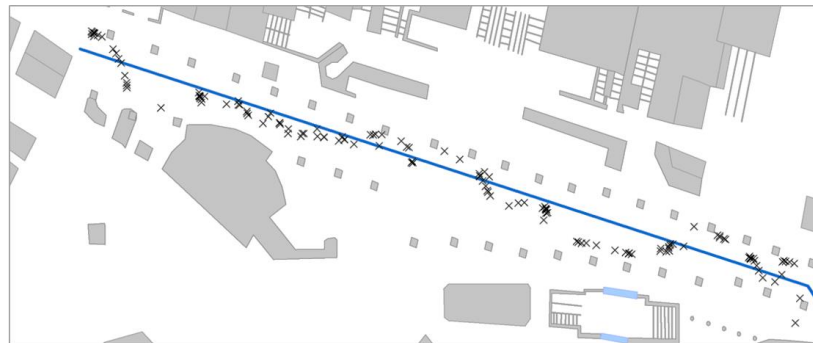


図 2-8. 高精度測位社会プロジェクト実証実験における BLE ビーコン配置

歩行による測位検証を行った結果、図 2-9 に示すように、「A:BLE ベース三点測位のみ」では平均測位誤差が 4.22m だったが、「B:BLE ベース三点測位と PDR による主張精度比較型シームレス測位手法」では平均測位誤差が 1.97m となり、主張精度比較型のほうが良い測位結果を得られた。この手法では、図 2-10 に示すとおり 2 つの測位技術が算出する主張精度によって採用する測位技術に切り替えが行われることによって測位誤差の低減が図られており、この手法の有効性を確認することができた。

【A】  
BLEベース三点測位のみ

平均測位誤差：4.22m



【B】  
主張精度比較型シームレス測位  
(BLEベース三点測位  
+ PDR)

平均測位誤差：1.97m

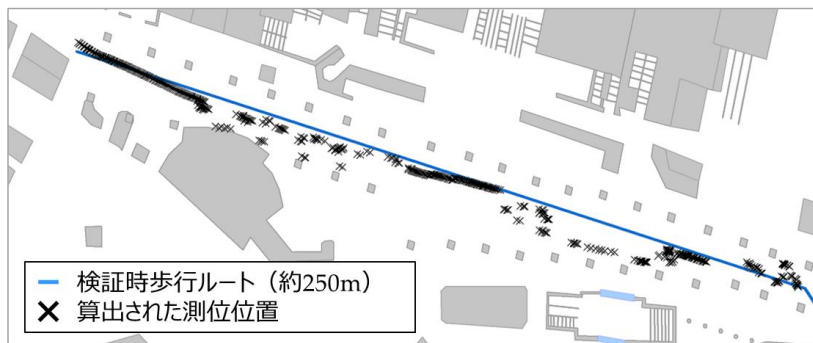


図 2-9. 高精度測位社会プロジェクト実証実験における測位検証結果の比較

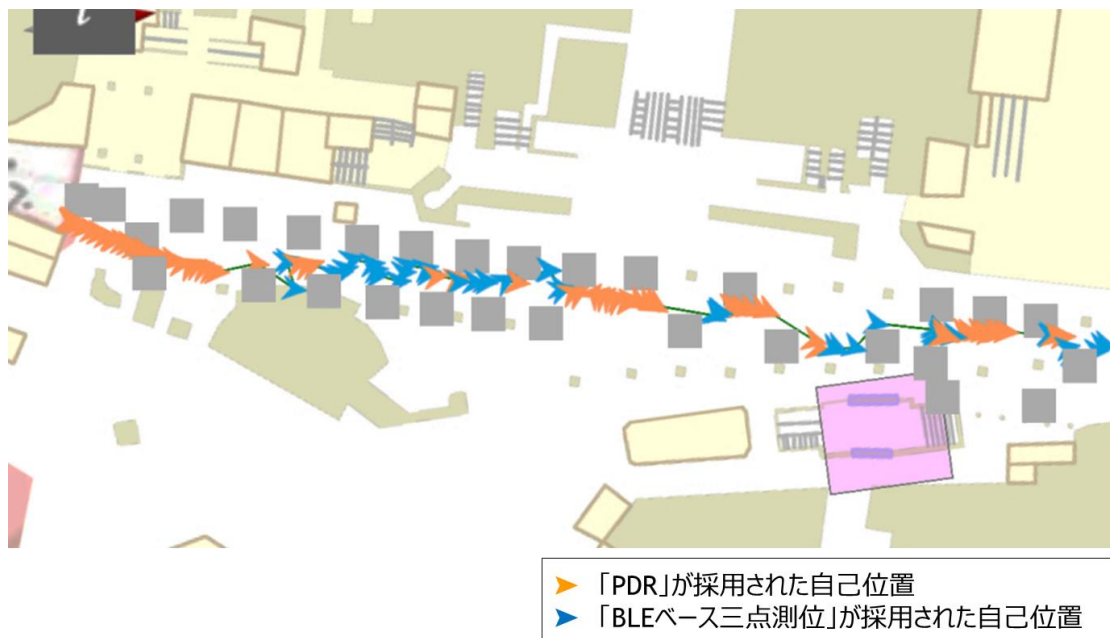


図 2-10. 主張精度比較型シームレス測位による測位技術の選択結果

この測位手法の特徴は、主張精度を算出することができる測位技術であれば採用する測位技術を選ばず使用できる点にある。そのため、図 2-11 に示すように、屋外測位の手法として GPS を用い、屋内測位の手法として BLE ベースの三点測位や Wi-Fi を使った測位を用いることにより、屋外空間滞在時は GPS 測位が算出する主張精度の方が屋内測位技術の主張精度よりも基本的には高くなるため GPS 測位が採用され、屋内空間滞在時は屋内測位技術の主張精度の方が基本的には高くなるため屋内測位技術が採用される。例えば、t1 の地点では建物から離れているため GPS 測位のみが位置算出され、最終的な自己位置として採用される。t2 の地点では、GPS 測位と BLE ベース三点測位の両方の位置算出結果が得られるが、建物の外にいるため BLE ベース三点測位の主張精度は十分でなく、GPS 測位が採用される。一方、t3 の地点では、t2 と同様に両方の位置算出結果が得られるものの、屋内にいるために GPS 測位の主張精度は十分でなく、BLE ベース三点測位が採用される。このように、屋内空間滞在と屋内空間滞在の判断及び測位技術の切り替えに主張精度を用いることにより、比較的簡易なアルゴリズムで正確性の高いシームレス測位の実現を目指している。

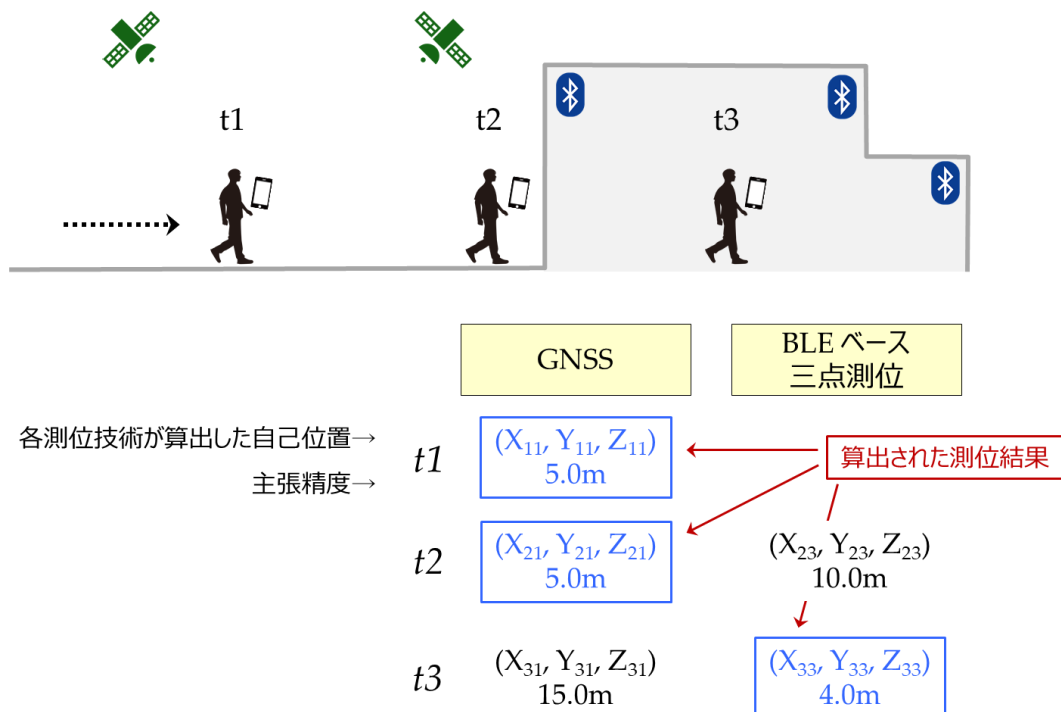


図 2-11. 主張精度比較型によるシームレス測位のイメージ

## 2-3. 半屋外空間を含むシームレス測位の現状と課題

### 2-3-1. 半屋外空間を含むシームレス測位の現状

シームレス測位に関する研究はこれまで数多く行われているが、そのほとんどは屋外空間と屋内空間の 2 つの空間をシームレスに接続することを目的に測位手法が提案されており、半屋外空間を含むシームレス測位手法の研究は一部に限られる。しかしながら、第 1 章で述べたとおり、現実空間には屋外空間と屋内空間のどちらかに分類するのが難しい半屋外空間も存在する。そのため、屋外空間と屋内空間の 2 つの空間を対象にしたシームレス測位手法は、半屋外空間を含む空間では精度良く適用することが難しい。

これまでに行われている半屋外を含むシームレス測位手法のうち、Anagnostopoulos ら[27] は、2-2-2-4 で示した手法を用いながら半屋外空間を含むシームレス測位の検証を実施している。彼らは、屋内空間に BLE ビーコンを設置してシームレス測位の検証を行っているが、本研究の対象である半屋外空間となる底のあるエントランスエリアでは双方の主張精度の変化が激しく、正確に屋内外の判定が行えなかった点を課題に挙げている。

IODetector[72]は、“Outdoor”、“Semi-outdoor”、“Indoor”の 3 つの空間コンテキストを判定するためのシームレス測位手法として、光センサー、携帯電話基地局からの受信電波強度、地磁気センサーの 3 つのセンサー情報を組み合わせたシームレス測位手法を提案している。具体的には、3 つのセンサーは単独でもある程度 3 つの空間コンテキストを判定することが可能だが、3 つのセンサーの値の結果を組み合わせることで判定精度を向上させている。Li ら[73]も同様に光センサーを利用して“Semi-outdoor”を含むシームレス測位手法を提案している。しかしながら、2-2-2-3 で述べた通り、光センサーを用いる手法は値の変化を検知するためのスマートフォンの保持状態を実用段階下でどのように実現するか、という点に課題がある。

BlueDetect[26]は、IODetector と同様にコリドー状で屋根のある空間を“Semi-Outdoor”と定義し、“Outdoor”、“Semi-outdoor”、“Indoor”の 3 つの空間コンテキストを判定するためのシームレス測位手法を提案した。この手法では“Semi-Outdoor”への進入を判定する手法として、屋外空間と比較して取得可能な GPS の SNR の平均が 20%低下することを基準としている。また、“Semi-Outdoor”の空間には BLE ビーコンを設置して測位を行い、“Indoor”への進入判定には出入り口の内側と外側に 1 つずつ BLE ビーコンを設置し、内側に設置したビーコンの電波を外側のビーコンより強く検知した場合、“Indoor”に進入したと判定している。また、この手法では半屋外空間では BLE ビーコン、屋内空間では Wi-Fi を使って屋内測位を行ってお



り、自位置算出を行うシームレス測位手法となっている。

一方、Gao ら[28]は、3 つの空間分類ではなく、屋外空間を“Open”と“Urban”の 2 つに分類して Open-sky/Urban/Intermediate/Indoor の 4 つの空間分類を判別する手法を提案している。判別するために使用するスマートフォンからの情報としては GNSS のみを用いている。取得可能な GNSS の衛星数と SNR の合計値をパラメータにした時に、全ての衛星を対象にすると空間の分類には活用できないが、SNR が 25dB-Hz 以上の衛星に絞ると、SNR の値が 25dB-Hz の衛星数や SNR の合計値をパラメータとして用いて 4 つの空間の滞在判定を行っている。Wang ら[74]も 4 つの空間分類の判定手法を提案しているが、対象は Open Outdoors/Semi-Outdoors/Light Indoors/Deep Indoors の 4 つとなっており、Gao らとは内容が異なっている。彼らは、Global System for Mobile communication (GSM) の信号強度を用いて 4 つの空間を判別する手法を提案している。しかしながら、GSM は通信規格として日本では使用されていない。

## 2-3-2. 半屋外空間を含むシームレス測位の課題

### 2-3-2-1. 空間の定義に関する課題

Zlatanova ら[19]は、“空間”という言葉は測位において空間を分割するために使用され、センサー(GNSS など)の受信内容から、屋内、屋外、半境界のセルを区別することができる、としている。そして、その典型的な例として、上述の IODetector[72]を挙げており、この研究では“Outdoor”、“Semi-outdoor”、“Indoor”の 3 つの空間コンテキストを判定するためのシームレス測位手法を提案している。

半屋外空間を含むシームレス測位に関する研究を考える上では、まず“半屋外空間”の定義や対象が研究ごとに異なることが課題の一つとして挙げられる。IODetector[72]では、“Semi-Outdoor”を“Near Building”と定義しており、本研究の対象である建物の外であるが上部に屋根や庇がある空間は考慮されていない。Li ら[73]も同様の定義をしており、上部に屋根や庇がある空間は考慮されていない。Wang ら[74]は Open Outdoors/Semi-Outdoors/Light Indoors/Deep Indoors の 4 つの空間分類を対象としているが、“Semi-Outdoors”の対象は同様に“Near Building”としている。Gao ら[28]は、“Intermediate”を上部が建物によって覆われ、その領域の少なくとも 1 つの周囲の側面が開放されている空間と定義しており、上述の定義とは異なっている。BlueDetect[26]ではコリドー状の空間を“Semi-Outdoor”と定義しており、用語と

しては IODetector[72]等と同じだが、対象としている空間の特徴は彼らとは異なり Gao ら[28]と類似する。このように、半屋外空間の定義は統一的かつ定量的な定義がされてこなかった。

このような課題認識のもと、Yan ら[75]は、全ての空間は Outdoor/Semi-Outdoor/Semi-Indoor/Indoor の4つに区分し、それらを上部の閉塞度合と側面の閉塞度合によって定量的に分類するためのフレームワークを提案した。このフレームワークを使用することにより4つの空間分類を定量的に定めることができる一方で、閾値となる値は各応用分野で定めることとしているため、同じような特徴を持つ空間でも分野によっては異なる空間分類となってしまう可能性がある。

以上の点を整理すると、表 2-1 のようにまとめることができる。

表 2-1. 半屋外空間を含む空間分類の定義の違い

	屋外		半屋外 (Semi-outdoor) または、半屋内 (Semi-indoor)		屋内	
	Open	Urban	Semi-outdoor	Semi-indoor	Light-indoor	Deep-indoor
IODetector[72] Li ら[73]	特に区分せず使用		“Near Building” として定義。上部に屋根や底のある空間は考慮されていない。		特に区分せず使用	
Wang ら[74]	特に区分せず使用		“Near Building” として定義。上部に屋根や底のある空間は考慮されていない。		窓のある室内	窓のない室内
BlueDetect[26]	特に区分せず使用		上部が覆われたコリドー状の空間を“Semi-Outdoor”として定義		特に区分せず使用	
Gao ら[28]	周囲にビルのない空間	周囲にビルのある空間	上部が覆われたコリドー状の空間を“Intermediate”として定義		特に区分せず使用	
Yan ら[75]	上部と側面がともに覆われていない空間	上部の閉塞度合と側面の閉塞度合によって分野ごとに定義			側面と上部がともに覆われている空間	

### 2-3-2-2. 測位の観点から見た課題

測位の観点から半屋外空間を含むシームレス測位手法を見た場合、特に GNSS を空間判定に用いる場合は、受信端末が軌道上の衛星からの信号を受信するにあたって障害となる建物等の有無が重要となる。2-2-2-2 で述べたとおり、屋内/屋外検知の手法では仰角の高い衛星の方が屋内空間への進入に伴い建物の影響を受けやすいことが示されており、仰角の高い衛星のみを用いた屋内/屋外検知手法が提案されている。Feriol ら[25]も、空間判定を行う上で仰角の高い衛星の SNR 等の情報を利用することの有効性について言及している。しかしながら、既存研究の中で半屋外空間の滞在検知に仰角の高い衛星を選定して判定処理を行っている事例は筆者が知る限り見受けられない。また、ビルの林立する都市空間で GPS の測位精度を向上させるために、Hsu[55]や内山ら[56]は建物の情報を利用して LOS の衛星と NLOS の衛星を選別する手法を採用しているが、同様のアプローチは半屋外空間に対しても有効であると考えられる。しかしながら、この点に関しても半屋外空間の滞在検知に建物情報を活用している事例は筆者が知る限り見受けられない。

半屋外空間の滞在検知に GNSS の SNR を利用している研究としては、BlueDetect[26]や Gao ら[28]が存在する。BlueDetect[26]は、半屋外空間での滞在を判定する手法として、屋外空間と比較して取得可能な GPS の SNR の平均が 20%低下することを基準としている。この基準は、彼らの研究の対象空間であるコリドー状の空間の上部が屋根で覆われていることによる影響を考慮して設計されているが、半屋外空間ごとに高さや奥行きが異なることは考慮されていないため、彼らが実験を行った場所以外の半屋外空間での利用可能性に懸念が残る。また、彼らの手法では取得可能な全ての衛星の SNR を利用しているが、衛星の配置は常に異なる中で全ての衛星の情報を使っても安定的な検知が行えるのかも懸念が残る。Gao ら[28]は、SNR の値が 25dB-Hz の衛星数や SNR の合計値をモニタリングすることで半屋外空間や屋内空間での滞在を検知している。25dB-Hz という基準は彼らが行った実験結果に基づいて導出されているが、半屋外空間の形状を考慮して導出されたものとはなっていない。そのため、BlueDetect[26]と同様に彼らが行った場所以外の半屋外空間での利用可能性に懸念が残る。Anagnostopoulos ら[27]は、SNR ではなく GNSS のアプリが算出する測位精度(この精度を主張精度と呼ぶ)と屋内空間に設置した BLE ビーコンによる屋内測位の主張精度とを比較することにより屋内/屋外検知を行っている。彼らは、上部に屋根のある建物のエンタラン

スで屋内/屋外検知の実験を行ったが、それぞれの主張精度のブレが大きく、安定的な屋内/屋外検知が行われなかったことを報告している。

これらの既存手法の空間検知方法をまとめたものを、表 2-2 に示す。いずれの手法も半屋外空間の空間形状を考慮した手法とはなっておらず、本研究で設計する空間検知手法は半屋外空間の空間形状を考慮した空間検知手法とする点に新規性があるとともに、適用空間の汎用性と検知精度の安定性を目指すものである。

表 2-2. 半屋外空間を含むシームレス測位に関する主な研究の比較

研究	対象とする半屋外空間	空間検知手法		空間検知手法に対する評価	
		検知に使用するセンサーと判定概要 (屋外⇔半屋外)	検知に使用するセンサーと判定概要 (半屋外⇔屋内)	仰角の高い衛星の選定	半屋外空間の空間形状の活用
IODetector [72]	“Near Building”としており、本研究で対象とする半屋外空間とは異なる	光センサー、携帯基地局からの受信電波強度、地磁気センサーの値を組み合わせて判定		考慮されていない	考慮されていない
BlueDetect [26]	上部が覆われたコリドー状の空間	GPS の SNR 平均値の 20% 以上の低下によって判定	半屋外と屋内にそれぞれ BLE ビーコンを 1 つ設置し、RSS の値の変化によって判定	考慮されていない	考慮されていない
Gao ら [28]	上部が覆われたコリドー状（側面の一方が開けている）の空間	GNSS の受信状況（SNR が 25dB-Hz 以上の衛星数と SNR の合計値等）の違いから判定		SNR の値によって衛星を選定しているが、仰角の高い衛星を選定している訳ではない	考慮されていない
Anagnostopoulos ら [27]	建物のエントランス	屋外測位と屋内測位のそれぞれの主張精度を比較し、精度の良い方を採用することにより判定		考慮されていない	考慮されていない

## 第3章

# 半屋外空間を含むシームレス測位の要求分析

### 3-1. 想定するユースケース

シームレス測位システムは適用対象や利用用途の違いによって求められる要求が変わるため、提供対象を特定することが必要である[76]。

提供対象は、図 3-1 に示すように「一般ユーザも入ることができるオープンな空間で提供するか、工場や倉庫など限られた人しか入れない空間で提供するか」による提供空間の軸と、「不特定の一般ユーザに提供するか、産業用途で社員や作業員に提供するか」による提供対象者の軸によって、4つのケースに分類することができる。

分類 A は、オープンな空間で一般ユーザに提供するケースとなり、例えば商業施設や駅などで来場者向けにシームレスなナビゲーションを提供する場合である。このケースの場合、対象者が一般ユーザとなるため、測位のための専用タグなどの配布は難しく、センシング端末としてはスマートフォンの利用が求められ、アプリとしての提供が必要となることが多い。また、

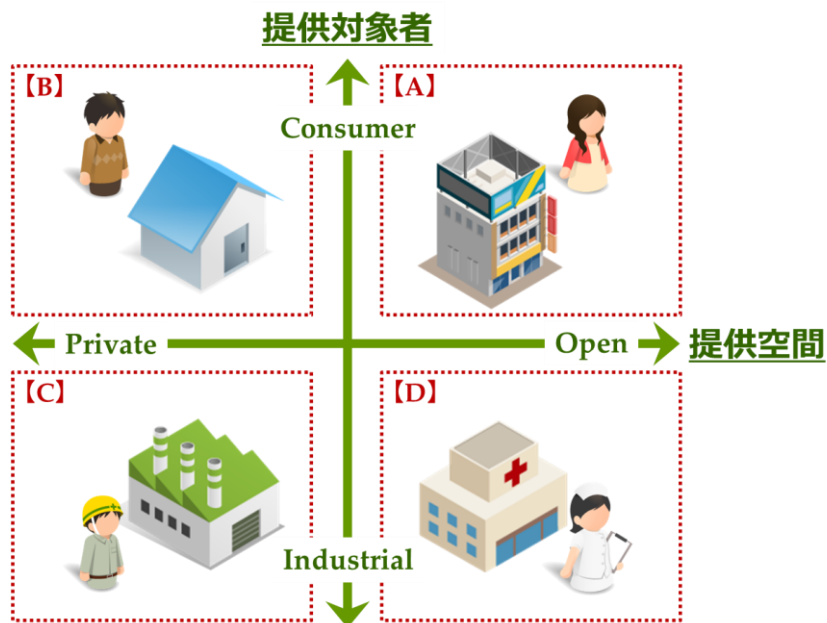


図 3-1. シームレス測位システムの提供対象の分類

多くの人にアプリを利用してもらうために産業用途で利用する場合よりも利用者に対するユーザメリットが求められることになる。また、位置情報を利用することに対するセキュリティやプライバシーへの配慮も求められる[77]。

分類 B は、プライベートな空間で一般ユーザに提供するケースとなり、対象空間が自宅などの空間になる。屋内空間での見守りサービスなどが想定されるが、測位環境をどのように整備するかが課題となり、現状はあまり提供機会が少ないケースである。

分類 C は、プライベートな空間で社員や作業員に提供するケースとなり、対象空間はオフィス、工場、倉庫などが該当する。提供対象者が社員や作業員になるため、専用の測位タグ等の配布も可能になる。また、企業内での利用となるため、利用者に対するユーザメリットではなく、生産性や効率性の向上にどの程度寄与できるか、という観点が求められることもある[78]。

分類 D は、オープンな空間で社員や作業員に提供するケースとなり、対象空間は病院などが考えられ、医師や看護師の現在位置をリアルタイムに把握するサービスや、医師や看護師の作業動線を分析するサービスなどが想定される。分類 C との違いは対象空間に一般ユーザの進入があるかどうか、という点になり、センシング端末の対象空間への配置計画に影響を与える可能性がある。

本研究は、半屋外空間を含むシームレス測位システムの実現が目的であり、半屋外空間が多く存在するのは商業施設や工場・倉庫となる。商業施設の場合は分類 A に該当する一般ユーザ向けのシームレスなナビゲーションへの適用等が対象となり、工場・倉庫の場合は分類 C に該当する作業員の動線分析等が対象となるが、近年 Smart Factory や Smart Logistics の実現に向けて作業員の動線分析やフォークリフトの移動分析を目指す事例が多い[79][80][81]。そのため、本研究では分類 C を提供対象とした(図 3-2)。

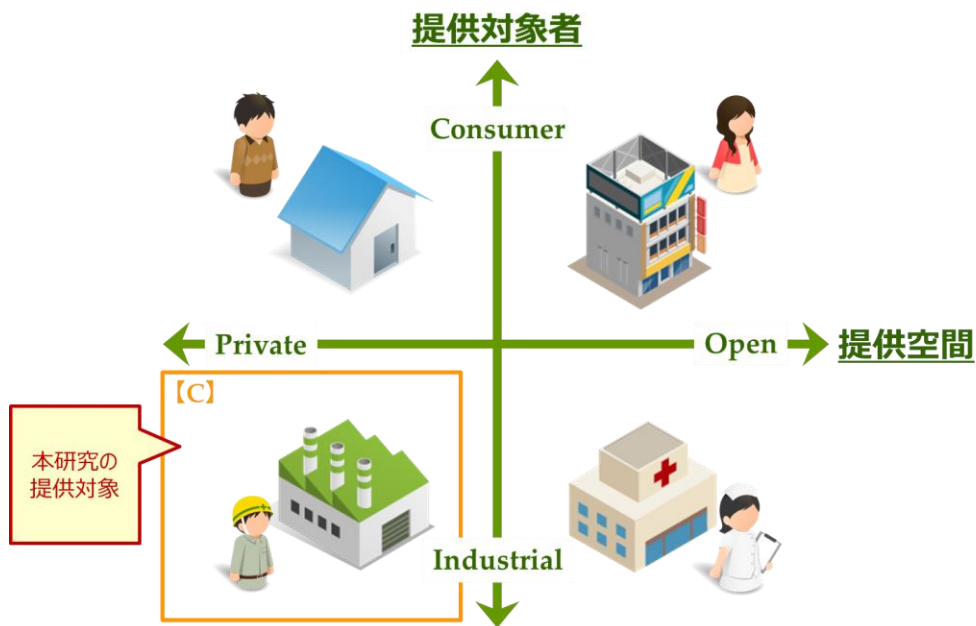


図 3-2. 本研究の提供対象

## 3-2. シームレス測位システムのライフサイクルの分析とステークホルダの抽出

### 3-2-1. シームレス測位システムの導入プロセス調査

屋内測位システムやシームレス測位システムのアルゴリズムに関する研究は数多く発表されているが、導入までのプロセスに関する研究は、Jung ら[82]が導入プロセスを示している以外にあまり見受けられない。また、空間に設置するセンサーについて、配置の最適化に関する研究事例は存在するが、設置にあたっての課題等については明らかにされていない[83]。そのため、シームレス測位システムのライフサイクルを整理するにあたり、どのようなプロセスで屋内測位システムやシームレス測位システムが導入されているかを調査した。

調査は、表 3-1 に示す 12 の導入事例を対象にした。これらの事例は、国際航業株式会社が屋内測位システムまたはシームレス測位システムを導入した事例の中から選定した。この中で、図 3-1 で示した 4 分類のうち分類 A に該当するものが事例①⑦⑨、分類 C に該当するものが事例②③④⑤⑥⑧⑩⑪⑫、分類 D に該当するのが事例③である。事例①は、来場者の



入館証に BLE タグを貼付し、空間内に BLE の電波を検知するためのスマートフォンを設置して来場者のリアルタイムの位置を把握した事例である。事例②はトラッキング対象がフォークリフトであり、フォークリフトは工場敷地内の屋外空間、屋内空間を移動することからシームレス測位によるトラッキングを行った。フォークリフトにスマートフォンを設置し、屋外では GPS で測位を行い、製造建屋内に BLE ビーコンを設置して屋内では BLE による測位を行った事例である。事例③④⑤⑥は BLE による作業員や社員を対象にしたトラッキングであり、空間内に BLE ビーコンを設置し、作業員や社員に BLE の電波を検知するためのスマートフォンを貸与して測位した事例となる。事例⑦は空港利用者向けの空港内のナビゲーションサービスであり、サービスを利用したい空港利用者は専用アプリをダウンロードして利用した。測位技術としては Wi-Fi を利用し、空間内に専用の Wi-Fi アクセスポイントを設置した。事例⑧⑨⑩⑪⑫は、フィンランド Quuppa 社が提供する“Quuppa Intelligent Locating System (以降、Quuppa)”を利用した導入事例となる。トラッキング対象の人やモノに専用タグを配布し、測位を行った。事例⑧⑫は屋外空間も対象としているが、Quuppa は屋外空間でも利用が可能な測位システムのため、GPS は使用していない。

表 3-1. 屋内測位システムまたはシームレス測位システムの導入事例調査対象

事例	提供対象	用途	トラッキング対象	使用した屋内測位技術	測位センサー設置数	屋内外シームレス
①	展示会場	来場者のリアルタイム位置把握	来場者	BLE	60	×
②	工場	工場敷地内のフォークリフトの移動分析	フォークリフト	GPS、BLE	50	○
③	市役所	窓口業務担当者の行動範囲分析	自治体職員	BLE	60	×
④	倉庫	倉庫内の作業員の行動分析	作業員	BLE	500	×
⑤	オフィス	社員の空間利用状況分析、社員間コミュニケーション頻度分析	社員	BLE	50	×
⑥	オフィス	オフィスリニューアル前後の社員の空間利用状況比較、社員間コミュニケーション頻度比較	社員	BLE	350	×
⑦	空港	空港内の搭乗口までのナビゲーション	空港利用者	Wi-Fi	40	×
⑧	オフィス	コワーキングスペースにおける利用者のリアルタイム位置把握	来場者	Quuppa	110	○
⑨	博物館	来場者への位置に応じたコンテンツ提供サービス	来場者	Quuppa	20	×
⑩	工場	作業員の部品ピッキング業務の作業内容分析	作業員	Quuppa	40	×
⑪	工場	食品加工工場における作業員の行動分析	作業員	Quuppa	40	×
⑫	工場	車両製造工場における製造中の車両のリアルタイム位置把握	製造中車両	Quuppa	70	○

### 3-2-2. シームレス測位システムのライフサイクル

ISO/IEC/IEEE 15288:2015 (以降、ISO15288:2015)では、システムのライフサイクルに関してプロセスと要求を記述している[84]。この国際標準の中では、システムはライフサイクルを持ち、一般的なライフサイクルとして、6つのステージが設定されており、雑賀ら[85]は、各ステージの特徴を以下のように述べている。

- ・コンセプトステージ :ステークホルダの要求を定義する
- ・開発ステージ :ステークホルダの要求を実現する対象システムを定義する
- ・生産ステージ :システムを生産または製造する
- ・使用ステージ :サービスを提供する環境でシステムを提供する
- ・サポートステージ :継続的にシステムを運用できるサービスを提供する
- ・廃棄ステージ :運用環境からシステムとそれが提供するサービスを取り除く

この6つのステージから成るライフサイクルを、調査結果を基にシームレス測位システムに当てはめると、図 3-3 のように示すことができる。

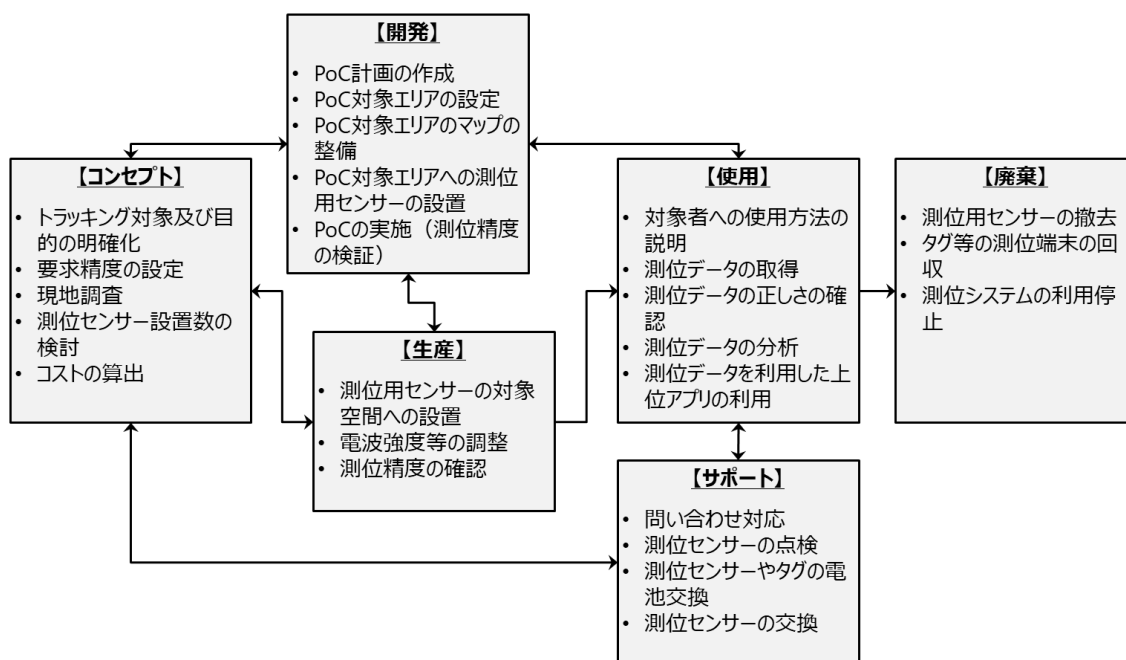


図 3-3. シームレス測位システムのライフサイクル

### 3-2-2-1. コンセプトステージ

コンセプトステージでの作業の目的は、目標精度の決定、目標空間の観測、センサー機器の設置計画の作成、コストの算出である。電波を遮る障害物の有無や具体的な設置場所は設計図面では明確にできないため、多くの場合、現地調査が必要となる。シームレス測位システムを工場や倉庫に導入するためには企業の技術開発や設備投資の予算獲得が必要であり、決定権のある経営層などに対して費用対効果を説明し、予算獲得を行う。

### 3-2-2-2. 開発ステージ

開発ステージでは、コンセプトステージで設定した測位精度が対象空間で実現可能かを検証するために、プロトタイプとして PoC (Proof of Concept) を実施する。対象空間のうち一部を PoC 対象エリアとして設定し、実際にセンシング端末を空間に設置して測位精度の検証を行う。測位精度検証の結果、設定した測位精度を得られない場合は、コンセプトステージに戻り、立案した計画を見直す必要もある。

### 3-2-2-3. 生産ステージ

生産ステージでは、目標空間にセンシング端末を設置し、決められた測位精度を実現するために、センシング端末の信号強度、スマートフォンの受信信号強度、センシング端末の設置位置の調整を行う。調整作業は繰り返し行うことが多く、基本的に高い目標精度を設定するためには、多大な調整時間と専門的な知識が必要となる。

### 3-2-2-4. 使用ステージ

使用ステージでは、作業員に測位に必要な端末(受信型の場合は専用タグ、発信型の場合はスマートフォン)を業務中携行してもらい、測位データを取得する。開発ステージでの PoC 内容が十分でない場合や PoC 時と比較して作業員の人数が違う等の理由により十分な測位精度が得られない場合は、再び測位精度の検証が必要になる場合もある。

### 3-2-2-5. サポートステージ

サポートステージでは、シームレス測位システムが安定的に稼働するように問い合わせ対応を行い支援する。また、空間に設置したセンシング端末に故障等が発生していないかを監視

する必要がある。センシング端末として電池駆動の BLE ビーコンを設置している場合は、定期的に電池交換を行う必要がある。

### 3-2-2-6. 廃棄ステージ

システムが当初の目的を達成した場合、あるいは設定した費用対効果を得られていないと判断された場合は、システムの提供が終了となる。対象空間に設置したセンシング端末を回収し、作業員に配布したタグやアプリケーションも回収する。

### 3-2-3. ステークホルダの特定

シームレス測位システムを導入する際に各ライフサイクルで必要となる作業を整理した結果を踏まえて、ステークホルダの特定を行った。

シームレス測位システムは、工場や倉庫において、主に図 3-4 に示すような用途のために導入される。シームレス測位システムの導入は企業にとっては投資案件となるため、生産性の向上や安全性を向上させるために利用される[86]。したがって、シームレス測位システムによって得られた測位結果がそのまま利用されるわけではなく、地図上での現在位置表示、ナビゲーション、作業員への通知などを行う上位システムが存在することとなる。シームレス測位システムは作業員が携行する携帯端末から情報を取得し、算出した自己位置を上位システムに提供し、上位システムが利用目的に応じた表現等を行う。この階層関係は、Peng ら[87]によって、図 3-5 に示すように「Application Layer」と「Positioning Layer」という形で整理されている。このことから、シームレス測位システムは上位システムのサブシステムと捉えることができる。



図 3-4. 工場や倉庫におけるシームレス測位システムの利用用途

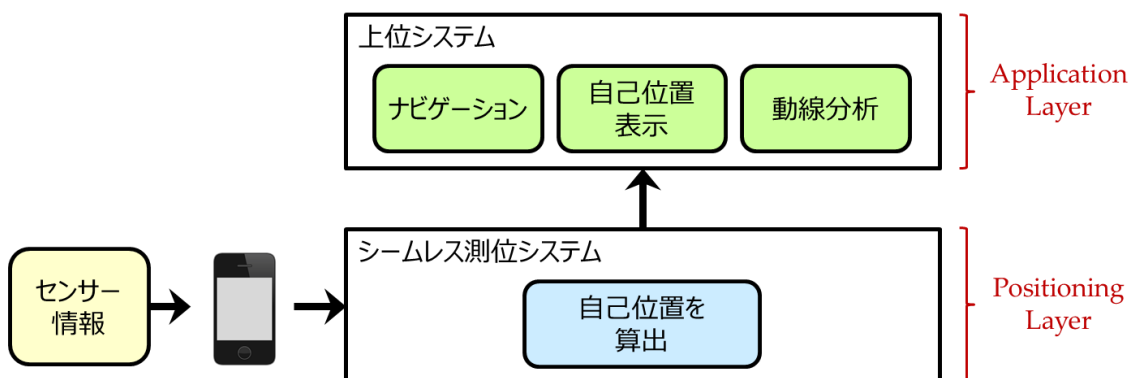


図 3-5. シームレス測位システムと上位システムとの階層関係 [87]を基に筆者作成

上述の点やライフサイクルの整理結果を踏まえ、オニオンモデルを使用して関係するステークホルダの抽出を行った。ステークホルダを抽出する際に用いる主な手法として、他にも Customer Value Chain Analysis (CVCA) が挙げられるが、ステークホルダ抽出の際の網羅性の面でオニオンモデルの利用が適切と考え、オニオンモデルを使用することとした[88]。Alexander[89]はデフォルトで表 3-2 に示すとおり 3 つのサークル (Our System、Containing System、Wider Environment) と 13 のステークホルダの分類を提案しており、本研究でも参考

表 3-2. オニオンモデルを構成するサークルとステークホルダの分類

[89] を基に筆者作成

	サークル	ステークホルダの分類
1	Our System	Normal Operator
2		Maintenance Operator
3		Operational Support
4	Containing System	Functional Beneficiary
5		Interfacing System
6		Purchaser
7		Product Champion
8	Wider Environment	Negative Stakeholder
9		Political Beneficiary
10		Financial Beneficiary
11		Regulator
12		Consultant
13		Supplier

にした。

オニオンモデルを使用してステークホルダを抽出した結果を、図 3-6 に示す。また、各ステークホルダの概要を、表 3-3 に示す。

表 3-3. 抽出されたステークホルダ

ステークホルダ	概要
トラッキング対象者	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 使用ステージにおいて、作業時にタグやスマートフォンを携行し、作業時の行動を記録される人</li> </ul>
システム運用部門 担当者	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ システム運用部門としてコンセプトステージから参画し、システム導入に向けて活動する人</li> <li>✓ 開発ステージでは PoC の計画の立案・実行を行う</li> <li>✓ 使用ステージ・運用ステージでは、システムの維持管理、運用サポート、測位結果を利用した分析等も実施する</li> </ul>
施設管理部門	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 開発ステージ・生産ステージでは、対象エリアにセンシング端末を設置する人</li> <li>✓ 使用ステージ・運用ステージでは、設置したセンシング端末の状態監視等のメンテナンスを行う</li> <li>✓ 廃棄ステージでは、センシング端末の撤去を行う</li> </ul>
上位システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ シームレス測位システムから測位結果を取得し、図 3-4 に示すような用途を実現するシステム</li> </ul>
システム運用部門 責任者	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ システム導入に向けた責任者として、コンセプトステージにおいてシステム導入の企画・提案を経営層に対して行い、予算獲得を行う人</li> <li>✓ 開発ステージ・生産ステージ・使用ステージにおいても、システム導入プロジェクトのプロジェクトマネージャーとして全体を統括する</li> </ul>
トラッキング対象部門 責任者	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 使用ステージにおいて、上位システムを利用し、生産性向上等に役立てる人</li> </ul>
経営層	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ コンセプトステージにおいて、シームレス測位システムの導入可否を決定する人</li> <li>✓ シームレス測位システムの廃棄を決定する人</li> </ul>
情報システム部門	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ シームレス測位システムの導入にあたり、情報セキュリティ等の面から制約事項を述べる人。そのため、<b>Negative Stakeholder</b> となり得る人</li> </ul>
IT コンサルタント	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ システム運用部門等から依頼を受けて、得られた分析結果を基に生産性向上に関するコンサルティングを行う人</li> </ul>
システム提供者	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ シームレス測位システムをシステム運用部門に提供する人</li> </ul>



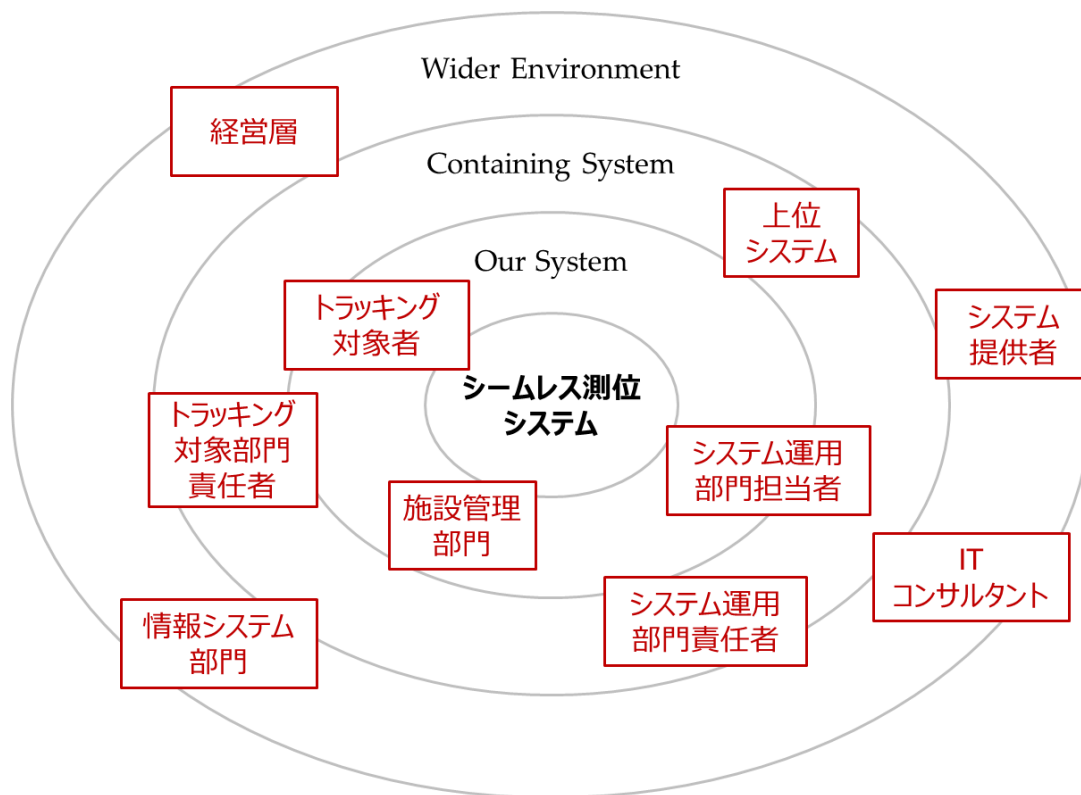


図 3-6. オニオンモデルを利用したステークホルダの抽出

### 3-3. 要求の抽出と分析

#### 3-3-1. 要求の抽出

抽出した 10 のステークホルダがシームレス測位システムに対してどのような要求があるかを抽出した。シームレス測位システムに対する要求は、機能に対する要求、性能に対する要求、インタフェースに関する要求、動作環境に関する要求など様々な種類が存在するが、本研究は半屋外空間を含むシームレス測位における空間検知手法の構築が目的のため、この観点に絞って要求の抽出を行った。

#### 【トラッキング対象者】

- ✓ トラッキング対象者は、作業時に送信端末としてのタグあるいは受信端末としてのスマートフォンを携帯しながら作業を行うこととなる。そのため、作業時に支障のあるような端末の

保持方法は作業効率の低下を招くため、作業に影響しない端末及び端末の保持方法であることが求められる(SR1-1)。

- ✓ また、作業時に測位のために別途ボタンを押す等の行為も作業効率の低下を招くため、別途行為を行う必要のない測位方法であることが求められる(SR1-2)。

### 【システム運用部門担当者】

- ✓ システム運用部門担当者は、システム運用部門としてコンセプトステージから参画し、システム導入に向けて活動する人である。システム運用部門担当者が半屋外空間を含む空間でシームレス測位システムを導入するにあたり、半屋外空間の有効な検知手法がこれまで無いことから、半屋外空間を確実に検知できることが、システムに対しての要求事項となる(SR2-1)。
- ✓ 加えて、導入するシームレス測位システムは、屋外／半屋外／屋内の3つの空間検知が行える必要がある(SR2-2)。
- ✓ 空間検知との関連は薄いですが、システム運用部門は施設管理部門に対してセンサーの設置位置や設置方法に関して様々な調整を行うことになるため、システム導入をしやすいことがシームレス測位システムへの要求事項となる(SR2-3)。
- ✓ さらに、トラッキング対象者に携行してもらう端末に関しても、携行しやすい端末であることが要求事項となる(SR2-4)。

### 【施設管理部門】

- ✓ 空間検知との関連は薄いですが、施設管理部門は、開発ステージや生産ステージにおいて、対象空間への測位センサーの設置に関与する人である。空間に測位センサーを設置するにあたり、システム運用部門が設置したい位置に施設管理上の都合で設置が難しい場合も多いため、空間に設置するセンサーが設置しやすいことが要求事項となる(SR3-1)。

### 【上位システム】

- ✓ 図 3-5 に示すように、上位システムはシームレス測位システムから測位結果を取得し、ナビゲーションや分析結果等を利用者へ提供する。できるだけ正確な情報を提供するためには、正確に屋外/半屋外/屋内の空間検知ができることが要求事項となる(SR4-1)。
- ✓ 加えて、滞在空間が変化した場合に出来るだけ迅速に滞在空間変更の判定がシームレス

測位システム側で行われることが求められる(SR4-2)。

#### 【システム運用部門責任者】

- ✓ システム運用部門責任者は、シームレス測位システム導入にあたりプロジェクトマネージャーとなることが多く、コンセプトステージにおいては企画立案や経営層からの予算獲得を担うことになる。そのためシームレス測位システム導入による費用対効果を求められることになるため、シームレス測位システムに対しては費用対効果に資するための正確な位置情報を算出できることが要求事項となる(SR5-1)。
- ✓ また、中長期的に他の工場や倉庫でも導入ができるように、他の空間でも適用可能なシームレス測位手法・空間検知手法であることが要求事項となる(SR5-2)。

#### 【トラッキング対象部門責任者】

- ✓ トラッキング対象部門責任者は、システム運用部門から依頼を受けてトラッキング対象者に測位端末を配布し、位置情報の取得を行ってもらうことになる。位置情報の取得が十分に価値のあるものと認識できれば協力的に参画できるため、そのためには精度の良い位置情報を取得できることがシームレス測位システムに求められることになる(SR6-1)。
- ✓ また、位置情報取得のために作業効率が低下する等は避ける必要があるため、対象者に配布する測位端末は作業に支障のないものであることが要求事項となる(SR6-2)。

#### 【経営層】

- ✓ 経営層はシームレス測位システム導入のプロジェクトに対して導入可否の権限を持っており、システム導入部門責任者からの提案に対して要否を判断することになる。導入可否の判断基準は費用対効果が見込めるかどうか最も一般的であり、費用対効果を生み出せるための精度の良い位置情報の算出がシームレス測位システムに対しての要求事項となる(SR7-1)。

#### 【情報システム部門】

- ✓ 情報システム部門は導入されるシステムに対してセキュリティ等の面からチェックする部門となる。空間検知との関連は薄いですが、情報セキュリティやネットワーク構成の面で社内の規定に抵触しないシステムであることが要求事項となる(SR8-1)。

### 【IT コンサルタント】

- ✓ IT コンサルタントは、システム運用部門等から依頼を受けて、得られた分析結果を基に生産性向上に関するコンサルティングを行う場合がある。コンサルティングを行う上では分析結果が正確であることが前提となるため、シームレス測位システムに対しても正確な位置情報の算出が要求事項となる(SR9-1)。

### 【システム提供者】

- ✓ システム提供者はシームレス測位システムをシステム運用部門に提供する人のことを指すが、使用ステージや運用ステージでは保守契約としてシステム運用部門から業務委託を受ける場合がある。その場合は、空間検知との関連は低いですが、保守担当としてシームレス測位システムに対してメンテナンスのしやすさ等を要求することになる(SR10-1)。

## 3-3-2. 要求の分析

各ステークホルダからの要求を踏まえ、シームレス測位システムの滞在空間検知手法に関連した要求として、表 3-4 に示す 7 つに整理した。なお、各ステークホルダの要求のうち、空間検知手法との関連が薄い要求(SR2-3、SR3-1、SR8-1、SR10-1)に関しては、本研究で扱う要求の対象外とした。

表 3-4. 半屋外空間を含むシームレス測位システムの空間検知に関する要求

項番	要求	要求元
R-1	半屋外空間の滞在を正確に検知できること	SR2-1
R-2	屋外空間／半屋外空間／屋内空間の3分類の滞在空間判定ができること	SR4-1
R-3	他の半屋外空間が存在する箇所でも適用可能な手法であること	SR5-2
R-4	迅速に滞在空間判定及び自己位置算出ができること	SR4-2
R-5	精度の良い自己位置算出ができること	SR5-1、SR6-1、SR7-1、SR9-1
R-6	保持する端末は作業に影響しないこと	SR1-1、SR2-4、SR6-2
R-7	測位のために対象者が別途端末を動作する必要がないこと	SR1-2、SR2-4

## 第 4 章

# 半屋外空間での GPS 信号受信状況の確認実験

### 4-1. 確認実験の目的及び概要

#### 4-1-1. 確認実験の目的

2-3 で述べた通り、シームレス測位に関する研究は多く行われているが、半屋外空間を含むシームレス測位に関する研究は一部に限られる。2-3 で述べた主な研究の概要を整理した表を再掲する。

IODetector[72]は、スマートフォンに搭載の様々なセンサーの中で電力消費の少ない光センサー、基地局からの電波の受信センサー、地磁気センサーを使用し、それぞれが取得する値を組み合わせて滞在空間の判定を行っている。しかしながら、光センサーの取得に必要なスマートフォンの保持状態を考えると、第 3 章で抽出した要求の「R-6: 保持する端末は作業に影響しないこと」「R-7: 測位のために別途対象者が動作する必要がないこと」に満たさないことから、本研究での適用が難しい。

BlueDetect[26]及び Gao ら[28]は、屋外と半屋外との間の滞在空間検知に GPS や GNSS を使用しており、上述の要求(R-6 及び R-7)は満たすと考えられる。しかしながら、これらの研究の滞在空間検知方式は、取得可能なすべての衛星の SNR を用いて判定を行っている点に汎用性の面で課題が残る。例えば、BlueDetect では半屋外空間に進入すると GPS の SNR 平均値が 20%以上低下することを判定基準としているが、常に軌道上で GPS 衛星の配置が変化する中で常に 20%以上の低下が発生するかどうかは懸念が残る。また、Gao らは「SNR の値が 25dB-Hz 以上の衛星数」及び「SNR の値が 25dB-Hz 以上の衛星の SNR の合計」によって判定を行っているが、この方式についても GPS 衛星が常に変化する中での汎用性に懸念が残る。

加えて、BlueDetect や Gao らが各研究で実験を行った半屋外空間と本研究で対象としている半屋外空間は空間の特性が異なる。そのため、本研究で対象とする半屋外空間で GPS の SNR がどのように変化するかについて明らかになっていない。

表 2-2. 半屋外空間を含むシームレス測位に関する主な研究の比較（再掲）

研究	対象とする半屋外空間	空間検知手法		空間検知手法に対する評価	
		検知に使用するセンサーと判定概要 (屋外⇔半屋外)	検知に使用するセンサーと判定概要 (半屋外⇔屋内)	仰角の高い衛星の選定	半屋外空間の空間形状の活用
IODetector [72]	“Near Building”としており、本研究で対象とする半屋外空間とは異なる	光センサー、携帯基地局からの受信電波強度、地磁気センサーの値を組み合わせで判定		考慮されていない	考慮されていない
BlueDetect [26]	上部が覆われたコリドー状の空間	GPS の SNR 平均値の 20% 以上の低下によって判定	半屋外と屋内にそれぞれ BLE ビーコンを 1 つ設置し、RSS の値の変化によって判定	考慮されていない	考慮されていない
Gao ら [28]	上部が覆われたコリドー状（側面の一方が開けている）の空間	GNSS の受信状況（SNR が 25dB-Hz 以上の衛星数と SNR の合計値等）の違いから判定		SNR の値によって衛星を選定しているが、仰角の高い衛星を選定している訳ではない	考慮されていない
Anagnostopoulos ら [27]	建物のエントランス	屋外測位と屋内測位のそれぞれの主張精度を比較し、精度の良い方を採用することにより判定		考慮されていない	考慮されていない

そこで、本研究では、以下の2点を目的に半屋外空間でのGPS信号受信状況の確認実験を行った。

- ✓ 対象とする半屋外空間における既存手法の適用可能性を確認すること
- ✓ GPSのSNRが半屋外空間下でどのように変化するかを確認すること

#### 4-1-2. 確認実験の概要

確認実験は、図1-10に示す空間と同様の特性を持つ空間2箇所(Site-A及びSite-B)を抽出し、実施した。確認実験実施箇所とその特徴を、図4-1に示す。各実施箇所の高さとお行きは、レーザ距離計で大きさを計測した。

確認実験では、Site-A、Site-Bそれぞれに対して被験者が約1m/sの速度で歩行しながら半屋外空間に進入し、半屋外空間を約20m歩行後に半屋外空間から退出する歩行ルートを設定した。加えて、進入の度合いに応じたGPSのSNRの変化を計測するために、各実験箇所に対して1m進入ルート/2m進入ルート/3m進入ルートを設定した。Site-A、Site-Bそれぞれの歩行ルートを、図4-2に示す。歩行中はスマートフォンアプリケーションを利用して、取得可能な衛星の衛星番号、SNR、仰角(Elevation)、方位角(Azimuth)を1秒毎にNMEA-0183 Standardに基づくデータとして取得した。さらに、衛星の配置は時間帯によって常に変化することから、各サイトに対して午前と午後にそれぞれ計測を行い、異なる衛星配置の中で計測を行った。



**【Site-A】**

高さ : 4.0m  
奥行き : 4.0m



**【Site-B】**

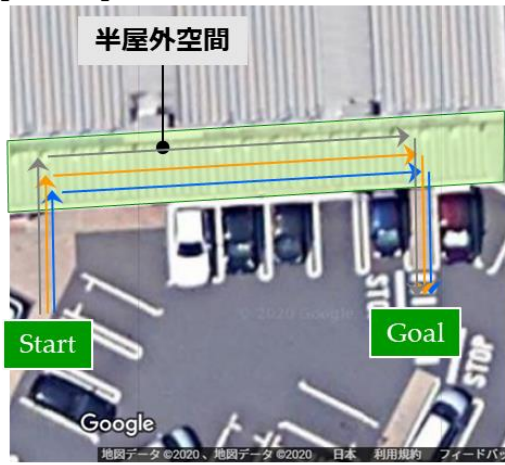
高さ : 5.6m  
奥行き : 4.7m



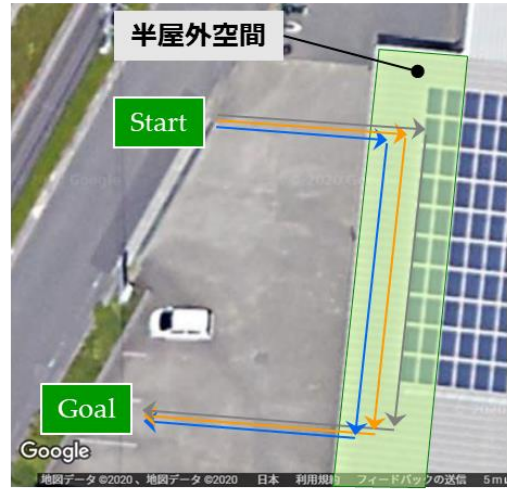
図 4-1. 確認実験実施箇所

計測回数は、各ルートを午前と午後に3回ずつ計測したため、1サイトにつき18回、合計で36回であった。計測端末にはスマートフォン機種A(機種名:Fujitsu Arrows m4、OS version: Android 7.1.1、チップセット:Qualcomm Snapdragon 410)を使用し、地上から1.2mの地点で画面を上向きに手で水平に固定した状態で歩行した(図 4-3)。

【Site-A】



【Site-B】



→ 1m進入ルート  
 → 2m進入ルート  
 → 3m進入ルート

図 4-2. 確認実験の歩行ルート

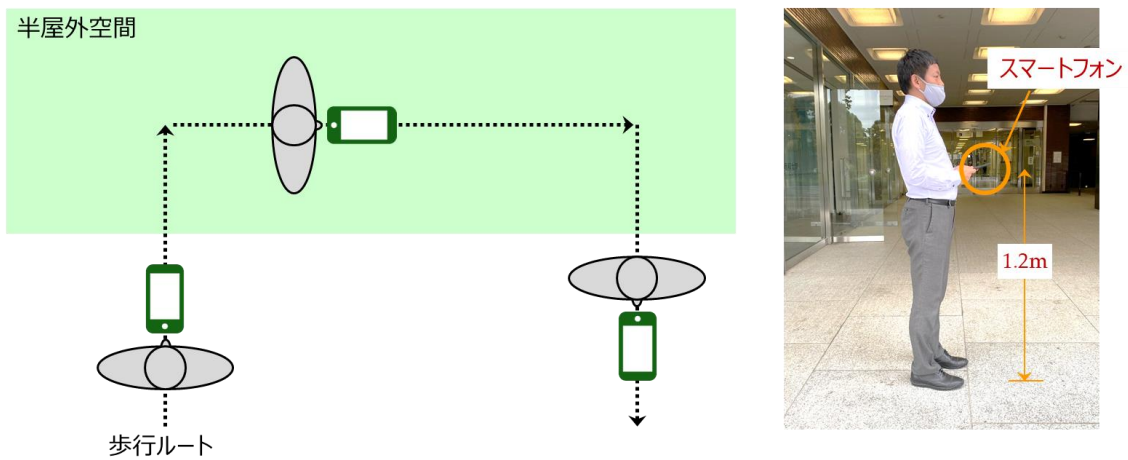


図 4-3. 歩行検証時のスマートフォンの保持状態

## 4-2. 確認実験の結果及び分析

### 4-2-1. 既存手法での検知精度の算出結果

Site-A 及び Site-B で午前午後それぞれに確認実験を行った。

Site-A における午前の確認実験について、BlueDetect[26]が採用している取得した全衛星の各秒の SNR 平均の変化を示したグラフを図 4-4 に示す。グラフの縦軸は、計測開始時に取

得した全衛星 SNR の平均値を基準に、その値と 1 秒ごとに取得する全衛星の SNR の平均値を比較し、変化の度合いを示している。例えば、図 4-4 において、1m 進入ルート of 1 回目の計測で計測開始時の全衛星の SNR の平均値は 33.2dB-Hz だった。この値を基準とし、5 秒歩行時点での全衛星の SNR の平均値は 33.8 dB-Hz だったため、変化率は 0.02 となる。同様に、10 秒歩行時点での平均値は 29.8 dB-Hz だったため変化率は -0.10 となる。また、緑の縦線は半屋外空間に進入した時点と退出した時点を示しており、緑の線に囲まれた範囲が半屋外空間内を歩行していた時間となる。また、グラフ内の赤線は、変化率が -0.2 を示すラインである。BlueDetect[26]の手法では、屋外歩行時の SNR 平均に対して 20%以上減少した時を半屋外空間への進入の閾値としており、比較のために記載している。

次に、Gaoら[28]が採用している SNR が 25dB-Hz 以上の衛星の各秒の合計値 ( $\text{sumSNR}_{25}$ ) を示したグラフを図 4-5 に示す。グラフの縦軸は SNR の合計値である。図 4-4 と同様に緑の縦線に囲まれた範囲が半屋外空間内を歩行していた時間となる。彼らの手法では合計値が 100 ~ 200dB-Hz の場合を半屋外空間滞在の指標としており、図 4-5 では黄色の網掛けの範囲がその領域を示している。つまり、緑線に囲まれた区間で黄色網掛けの領域内に合計値がプロットされている場合が、彼らの手法通りに半屋外空間の滞在を検知できているケースとなる。

それぞれの Site-A での午前の結果について、半屋外空間への滞在検知判定を行った場合の検知精度を、表 4-1 及び表 4-2 に示す。上述の通り、BlueDetect[26]の手法では屋外歩行時の SNR 平均に対して 20%以上減少した時を半屋外空間への滞在の閾値としており、歩行開始時を基準として SNR 平均が 20%以上減少した時に半屋外空間に滞在したと判定することとした。この判定を毎秒行い、計測点数に対して正しく判定された点数(正解点数)の割合を検知精度としている。同様に、Gaoら[28]の手法では  $\text{sumSNR}_{25}$  が 100 ~ 200 の場合を半屋外空間滞在の基準としており、半屋外空間に滞在したと判定することとした。

また、Site-A での午前の実験において、2m 進入歩行実験時の衛星配置の状況を、図 4-6 に示す。これらの図は“Sky plot”とも呼ばれ、各衛星の Elevation と Azimuth を表現している。図中の緑円は衛星番号を示しており、例えば、衛星番号 1 の Elevation(仰角)は  $72^\circ$ 、Azimuth(方位角)は  $237^\circ$  である。

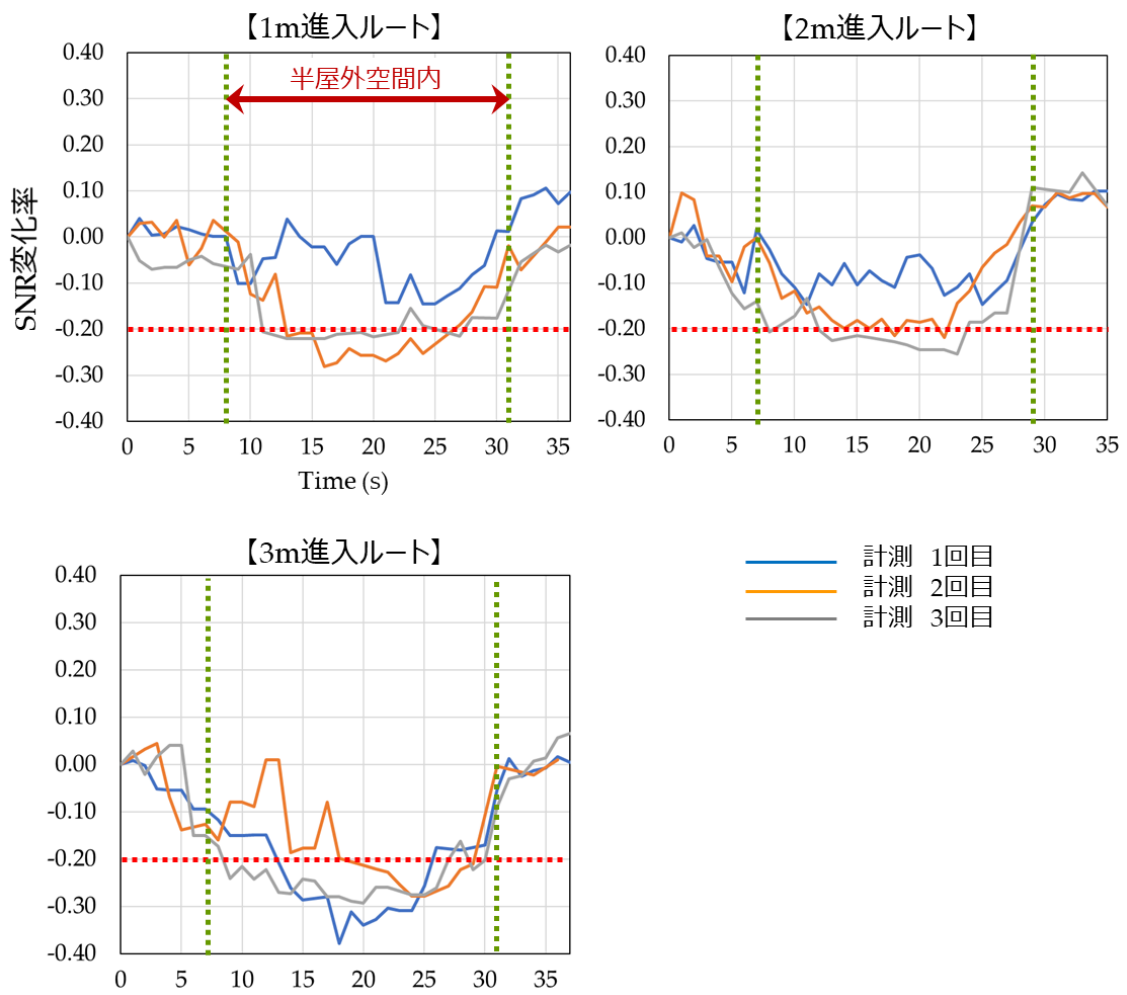


図 4-4. 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-A 午前の計測)

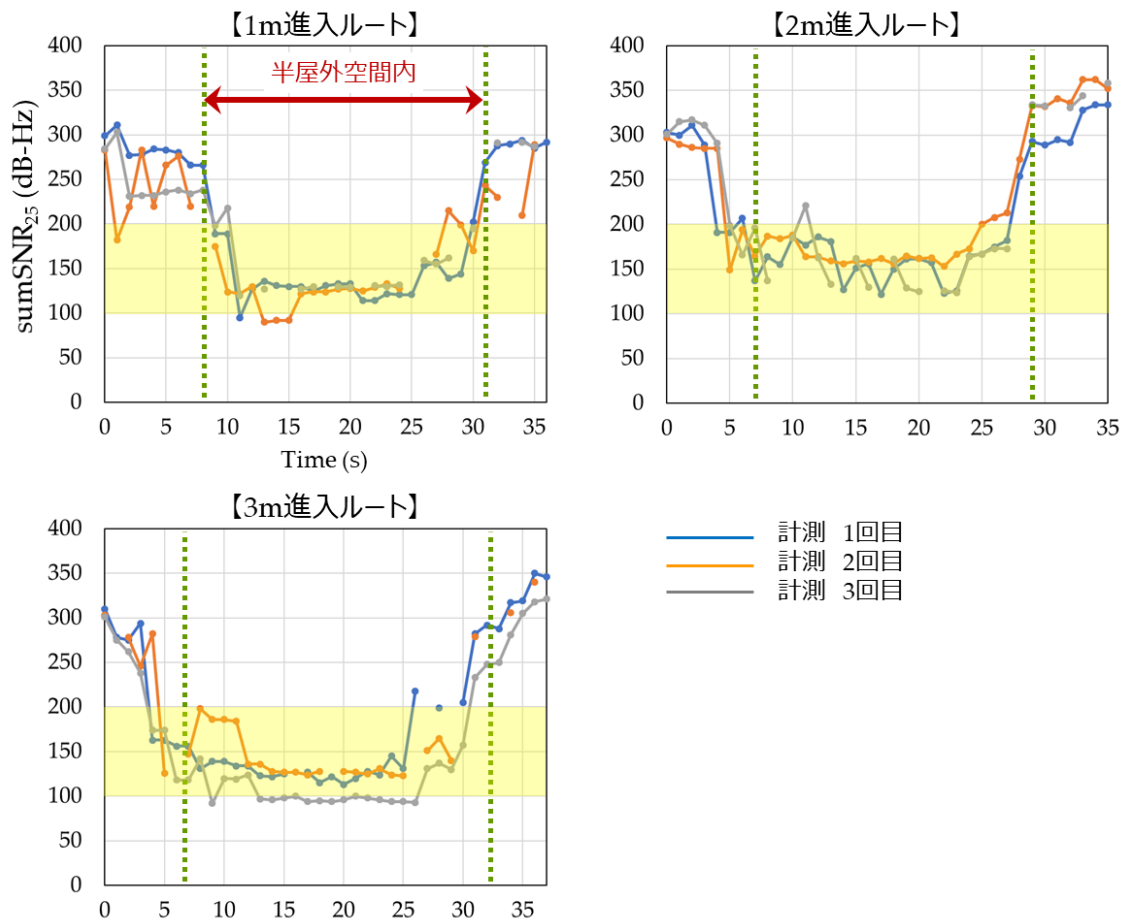


図 4-5. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-A 午前の計測)

表 4-1. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-A 午前の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	36	13	36.1%	23	0	0.0%
	2回目	36	27	75.0%	23	14	60.9%
	3回目	36	26	72.2%	23	13	56.5%
	合計	108	66	61.1%	69	27	39.1%
2m 進入 ルート	1回目	35	13	37.1%	22	0	0.0%
	2回目	35	15	42.9%	22	2	9.1%
	3回目	35	27	77.1%	22	14	63.6%
	合計	105	55	52.4%	66	16	24.2%
3m 進入 ルート	1回目	37	15	40.5%	24	2	8.3%
	2回目	37	13	35.1%	24	11	45.8%
	3回目	37	34	91.9%	24	21	87.5%
	合計	111	83	74.8%	72	45	62.5%
総計		324	204	63.0%	207	88	42.5%

表 4-2. Gao ら [28] の手法を適用した場合の検知精度 (Site-A 午前の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	36	34	94.4%	23	21	91.3%
	2回目	36	26	72.2%	23	16	69.6%
	3回目	36	25	69.4%	23	14	60.9%
	合計	108	85	78.7%	69	51	73.9%
2m 進入 ルート	1回目	35	30	85.7%	22	20	90.9%
	2回目	35	27	77.1%	22	17	77.3%
	3回目	35	23	65.7%	22	15	68.2%
	合計	105	80	76.2%	66	52	78.8%
3m 進入 ルート	1回目	37	29	78.4%	24	20	83.3%
	2回目	37	26	70.3%	24	21	87.5%
	3回目	37	17	45.9%	24	8	33.3%
	合計	111	72	64.9%	72	49	68.1%
総計		324	237	73.1%	207	152	73.4%

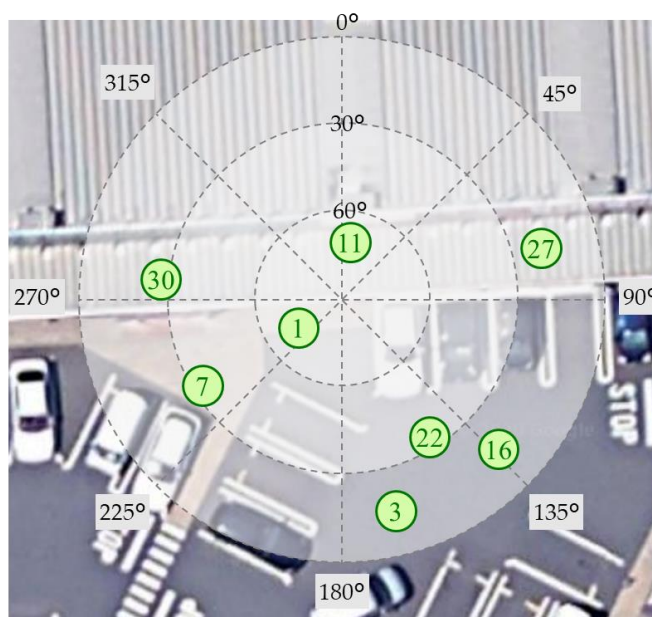


図 4-6. 衛星の配置 (Site-A 午前の計測 2m 進入ルート時)

Site-A の午前計測と同様の集計及び分析を、「Site-A 午後の計測」「Site-B 午前の計測」「Site-B 午後の計測」に対しても同様に行った。集計及び分析の結果を以下の通り示す。

- ✓ Site-A 午後の計測
  - 図 4-7 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-A 午後の計測)
  - 図 4-8 SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-A 午後の計測)
  - 表 4-3 BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-A 午後の計測)
  - 表 4-4 Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-A 午後の計測)
  - 図 4-9 衛星の配置 (Site-A 午後の計測 2m 進入ルート時)
  
- ✓ Site-B 午前の計測
  - 図 4-10 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-B 午前の計測)
  - 図 4-11 SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-B 午前の計測)
  - 表 4-5 BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午前の計測)
  - 表 4-6 Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午前の計測)
  - 図 4-12 衛星の配置 (Site-B 午前の計測 2m 進入ルート時)
  
- ✓ Site-B 午後の計測
  - 図 4-13 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-B 午後の計測)
  - 図 4-14 SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-B 午後の計測)
  - 表 4-7 BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午後の計測)
  - 表 4-8 Gao ら[28]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午後の計測)
  - 図 4-15 衛星の配置 (Site-B 午後の計測 2m 進入ルート時)



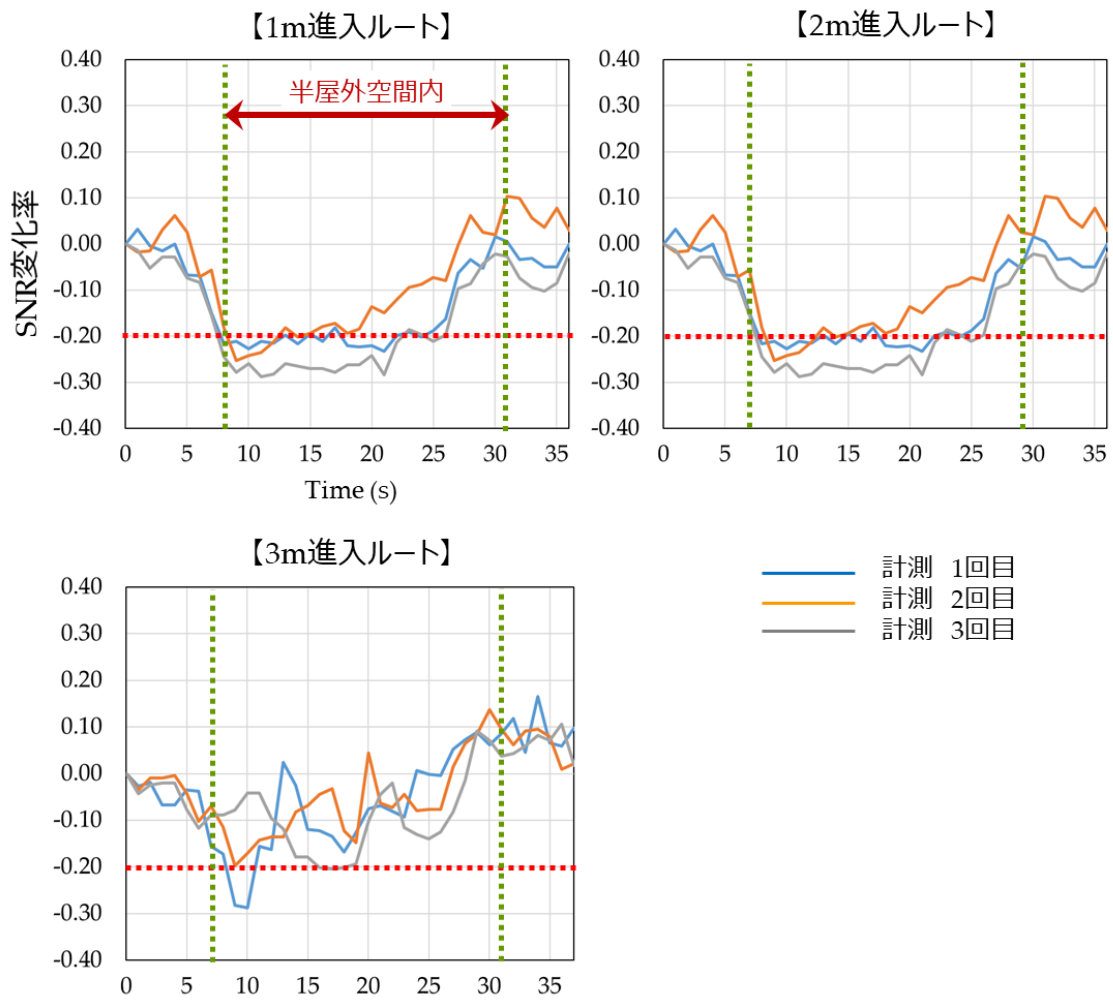


図 4-7. 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-A 午後の計測)

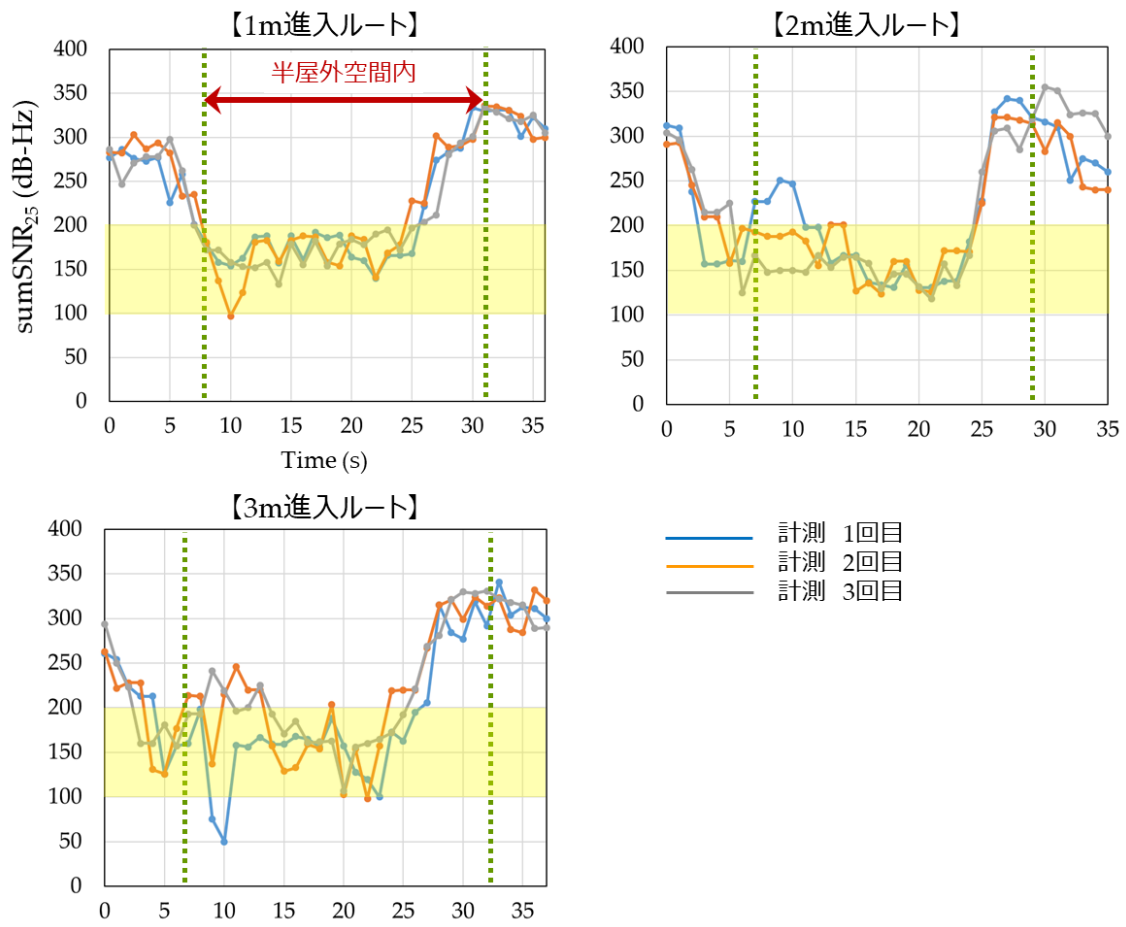


図 4-8. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-A 午後の計測)

表 4-3. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-A 午後の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	36	23	63.9%	23	11	47.8%
	2回目	36	17	47.2%	23	4	17.4%
	3回目	36	28	77.8%	23	16	69.6%
	合計	108	68	63.0%	69	31	44.9%
2m 進入 ルート	1回目	35	13	37.1%	22	0	0.0%
	2回目	35	13	37.1%	22	0	0.0%
	3回目	35	13	37.1%	22	0	0.0%
	合計	105	39	37.1%	66	0	0.0%
3m 進入 ルート	1回目	37	15	40.5%	24	2	8.3%
	2回目	37	13	35.1%	24	0	0.0%
	3回目	37	16	43.0%	24	3	13.0%
	合計	111	44	39.6%	72	5	6.9%
総計		324	151	46.6%	207	36	17.4%

表 4-4. Gao ら [28] の手法を適用した場合の検知精度 (Site-A 午後の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	36	29	80.6%	23	17	73.9%
	2回目	36	27	75.0%	23	15	65.2%
	3回目	36	29	80.6%	23	17	73.9%
	合計	108	85	78.7%	69	49	71.0%
2m 進入 ルート	1回目	35	23	65.7%	22	14	63.6%
	2回目	35	25	71.4%	22	15	68.2%
	3回目	35	28	80.0%	22	17	77.3%
	合計	105	76	75.2%	66	46	69.7%
3m 進入 ルート	1回目	37	27	73.0%	24	17	70.8%
	2回目	37	19	51.4%	24	9	37.5%
	3回目	37	22	59.5%	24	14	58.3%
	合計	111	68	61.3%	72	40	55.6%
総計		324	229	70.7%	207	135	65.2%

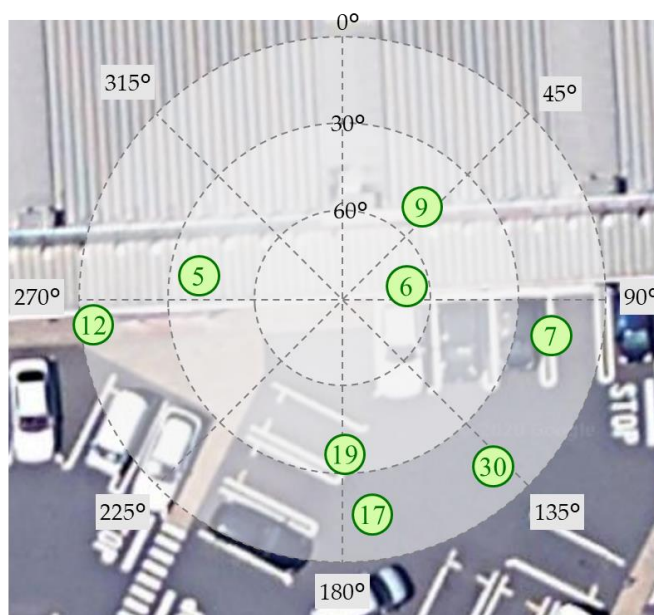


図 4-9. 衛星の配置 (Site-A 午後の計測 2m 進入ルート時)

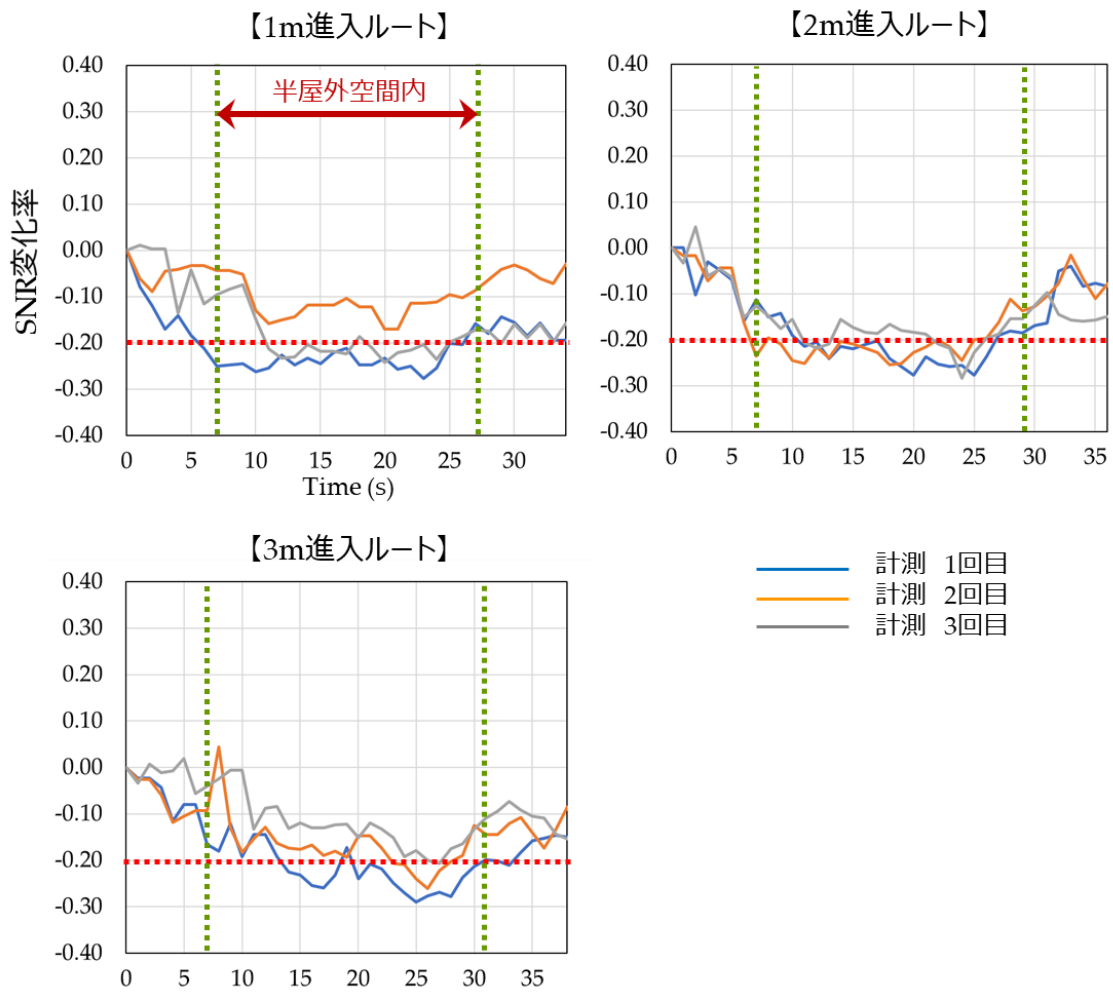


図 4-10. 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-B 午前の計測)

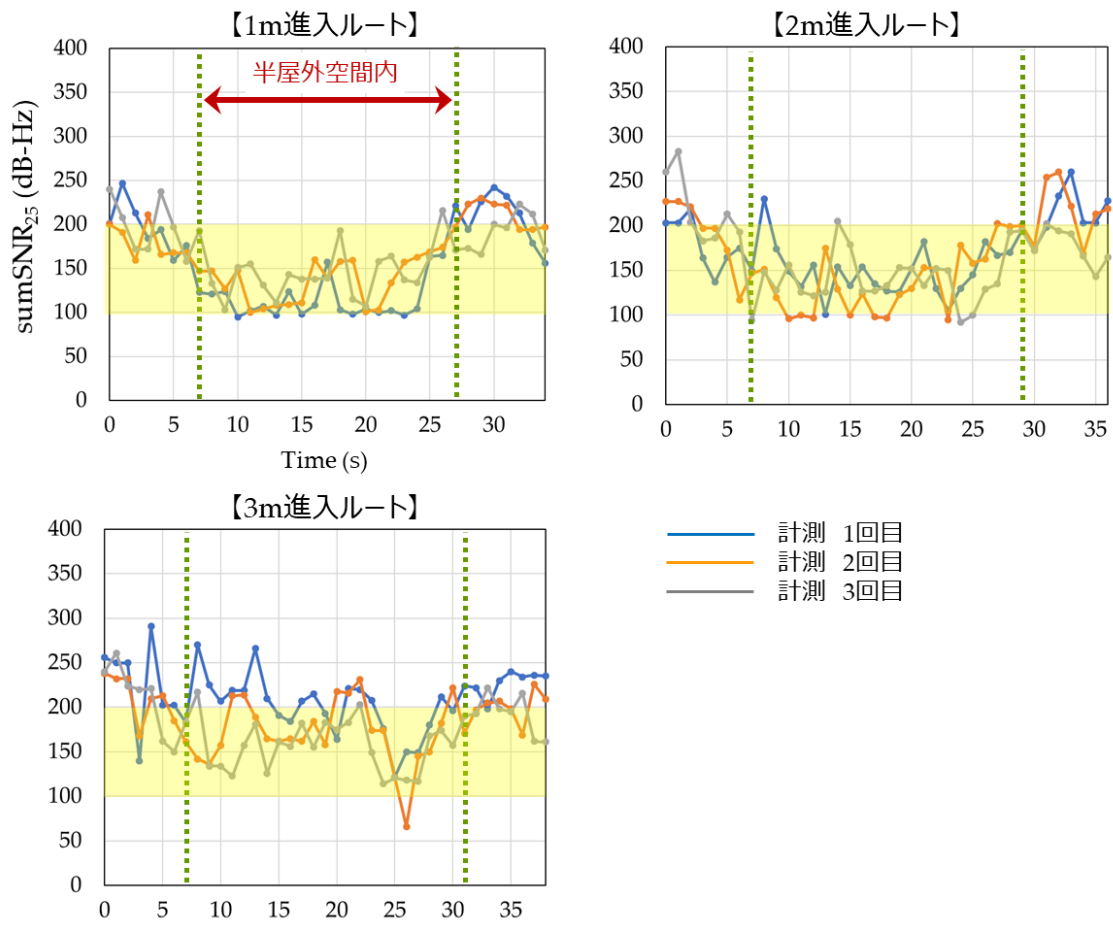


図 4-11. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-B 午前の計測)

表 4-5. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午前の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	34	31	91.2%	20	19	95.0%
	2回目	34	14	41.2%	20	0	0.0%
	3回目	34	26	76.5%	20	13	65.0%
	合計	102	71	69.6%	60	32	53.3%
2m 進入 ルート	1回目	36	30	83.3%	22	16	72.7%
	2回目	36	29	80.6%	22	16	72.7%
	3回目	36	21	58.3%	22	7	31.8%
	合計	108	80	74.1%	66	39	59.1%
3m 進入 ルート	1回目	38	28	73.7%	24	16	66.7%
	2回目	38	19	50.0%	24	6	25.0%
	3回目	38	15	39.5%	24	1	4.2%
	合計	114	62	54.4%	72	23	31.9%
総計		324	213	65.7%	198	94	47.5%

表 4-6. Gao ら [28] の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午前の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	34	21	61.8%	20	13	65.0%
	2回目	34	24	70.6%	20	19	95.0%
	3回目	34	23	67.6%	20	19	95.0%
	合計	102	68	66.7%	60	51	85.0%
2m 進入 ルート	1回目	36	28	77.8%	22	21	95.5%
	2回目	36	20	55.6%	22	13	59.1%
	3回目	36	23	63.9%	22	19	86.4%
	合計	108	71	65.7%	66	53	80.3%
3m 進入 ルート	1回目	38	21	55.3%	24	10	41.7%
	2回目	38	25	65.8%	24	17	70.8%
	3回目	38	28	73.7%	24	22	91.7%
	合計	114	74	64.9%	72	49	68.1%
総計		324	213	65.7%	198	153	77.2%

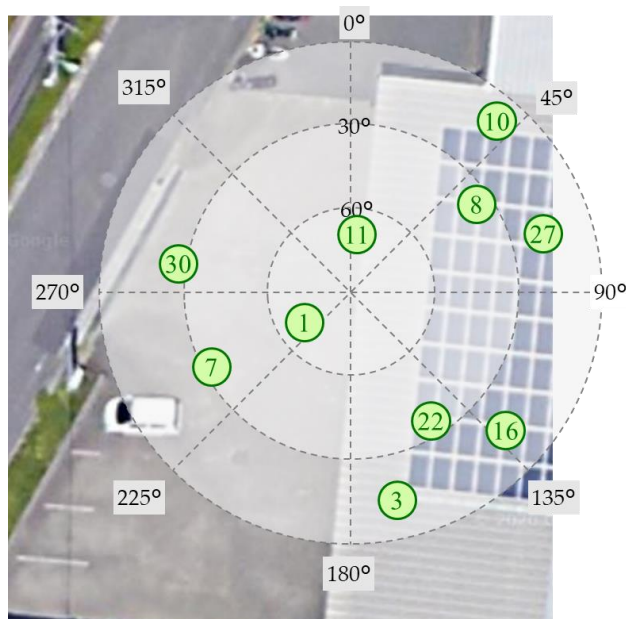


図 4-12. 衛星の配置 (Site-B 午前の計測 2m 進入ルート時)



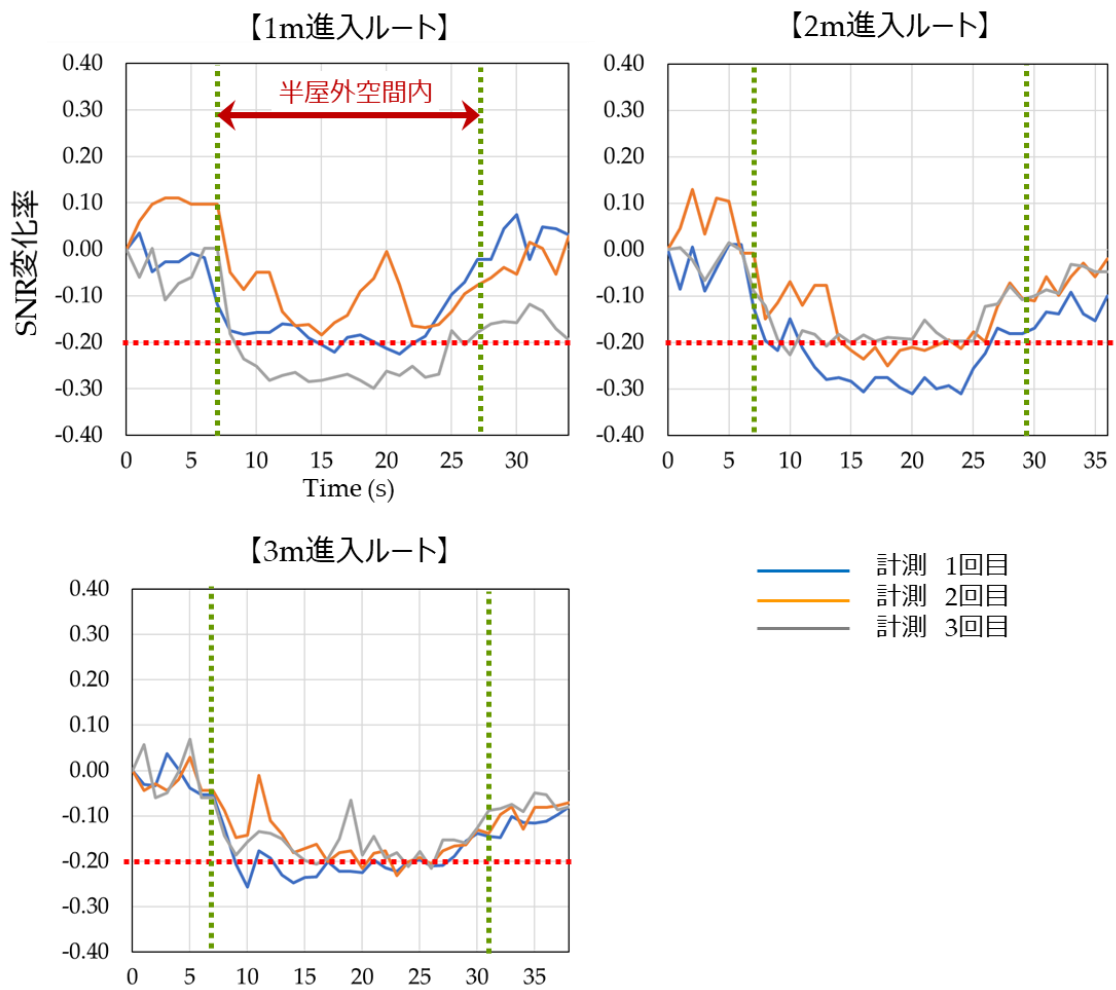


図 4-13. 衛星全体の SNR 平均の変化 (Site-B 午後の計測)

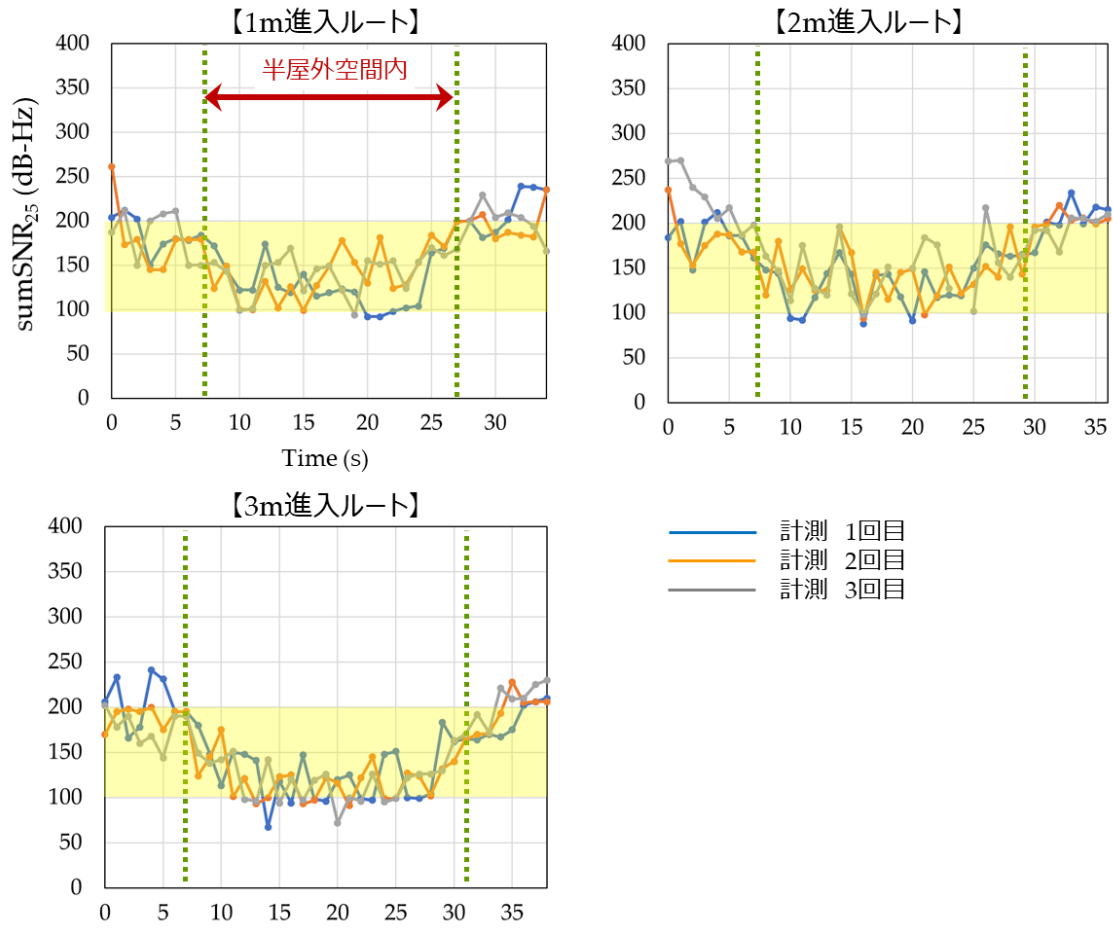


図 4-14. SNR が 25dB-Hz 以上の各衛星の SNR 合計値変化 (Site-B 午後の計測)

表 4-7. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午後の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	34	19	55.9%	20	5	25.0%
	2回目	34	14	41.2%	20	0	0.0%
	3回目	34	31	91.2%	20	17	85.0%
	合計	102	64	62.7%	60	22	36.7%
2m 進入 ルート	1回目	36	31	86.1%	22	17	77.3%
	2回目	36	23	63.9%	22	9	40.9%
	3回目	36	17	47.2%	22	3	13.6%
	合計	108	71	65.7%	66	29	43.9%
3m 進入 ルート	1回目	38	29	76.3%	24	15	62.5%
	2回目	38	17	44.7%	24	3	12.5%
	3回目	38	17	44.7%	24	3	12.5%
	合計	114	63	55.3%	72	21	29.2%
総計		324	198	61.1%	198	72	36.3%

表 4-8. Gao ら [28] の手法を適用した場合の検知精度 (Site-B 午後の計測)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	1回目	34	24	70.6%	20	17	85.0%
	2回目	34	19	55.9%	20	17	85.0%
	3回目	34	24	70.6%	20	17	85.0%
	合計	102	67	65.9%	60	51	85.0%
2m 進入 ルート	1回目	36	25	69.4%	22	18	81.8%
	2回目	36	23	63.9%	22	20	90.9%
	3回目	36	27	75.0%	22	18	81.8%
	合計	108	75	69.4%	66	56	84.8%
3m 進入 ルート	1回目	38	21	55.3%	24	15	62.5%
	2回目	38	19	50.0%	24	15	62.5%
	3回目	38	20	52.6%	24	15	62.5%
	合計	114	60	52.6%	72	45	62.5%
総計		324	202	62.3%	198	152	76.8%

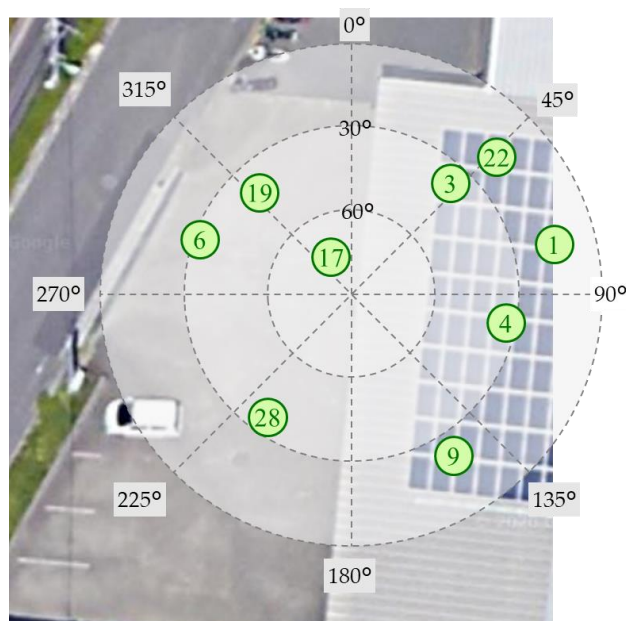


図 4-15. 衛星の配置 (Site-B 午後の計測 2m 進入ルート時)

最後に、各実験結果を集計したものを、表 4-9 及び表 4-10 に示す。BlueDetect[26]が行った評価実験では、Outdoor / Semi-Outdoor / Indoor の 3 つの空間の検知精度として 96.2%という結果が示されているが、本研究の対象とする半屋外空間では、屋外と半屋外の 2 つの空間コンテキストの検知精度が 59.1%となり、十分な検知精度は得られなかった。半屋外空間に限定した検知精度は 38.5%と、さらに良くない検知精度となった。また、一般的には半屋外空間の奥に進入するほど上部が遮蔽されるため SNR が低下し、BlueDetect の手法では検知精度が上がるように想定されるが、今回の確認実験では 3m 進入ルートでも 1m 進入ルートと比較して検知精度の向上は確認できなかった。

表 4-9. BlueDetect[26]の手法を適用した場合の検知精度（各実験結果の合計）

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	Site-A AM	108	66	61.1%	69	27	39.1%
	Site-A PM	108	68	63.0%	69	31	44.9%
	Site-B AM	102	71	69.6%	60	32	53.3%
	Site-B PM	102	64	62.7%	60	22	36.7%
	合計	420	269	64.0%	258	112	43.4%
2m 進入 ルート	Site-A AM	105	55	52.9%	66	16	24.2%
	Site-A PM	105	39	37.1%	66	0	0.0%
	Site-B AM	108	80	74.1%	66	39	59.1%
	Site-B PM	108	71	65.7%	66	29	43.9%
	合計	426	245	57.5%	264	84	31.8%
3m 進入 ルート	Site-A AM	111	83	74.8%	72	45	62.5%
	Site-A PM	111	44	39.6%	72	5	6.9%
	Site-B AM	114	62	55.4%	72	23	31.9%
	Site-B PM	114	63	55.3%	72	21	29.2%
	合計	450	252	56.0%	288	116	40.3%
総計		1,296	766	59.1%	810	312	38.5%

また、Gaoら[28]が行った評価実験では、Open-sky / Urban / Intermediate / Indoor の4つの空間の検知精度として 88.2%という結果が示されているが、本研究の対象とする半屋外空間では、屋外と半屋外の2つの空間コンテキストの検知精度が 68.0%という結果であった。半屋外空間の検知精度は高いが、一方でルート全体での検知精度の方が低い結果となっており、このことは屋外空間での検知精度が低いことを示している。図 4-11 や図 4-14 を見ると、屋外空間歩行時と半屋外空間歩行時とで明確な違いが発生しておらず、屋外空間歩行時でも半屋外空間滞在と判定されていることが分かる。原因としては可視衛星数が少ないことが考えられ、この手法は衛星配置の変化に対する適応性に課題があるといえる。

表 4-10. Gao ら [28] の手法を適用した場合の検知精度 (各実験結果の合計)

		ルート全体			半屋外空間のみ		
		計測 点数	正解 点数	検知 精度	計測 点数	正解 点数	検知 精度
1m 進入 ルート	Site-A AM	108	85	78.7%	69	51	73.9%
	Site-A PM	108	85	78.7%	69	49	71.0%
	Site-B AM	102	68	66.7%	60	51	85.0%
	Site-B PM	102	67	65.9%	60	51	85.0%
	合計	420	305	72.6%	258	202	78.3%
2m 進入 ルート	Site-A AM	105	80	76.2%	66	52	78.8%
	Site-A PM	105	76	75.2%	66	46	69.7%
	Site-B AM	108	71	65.7%	66	53	80.3%
	Site-B PM	108	75	69.4%	66	56	84.8%
	合計	426	302	70.9%	264	207	78.4%
3m 進入 ルート	Site-A AM	111	72	64.9%	72	49	68.1%
	Site-A PM	111	68	61.3%	72	40	55.6%
	Site-B AM	114	74	64.9%	72	49	68.1%
	Site-B PM	114	60	52.6%	72	45	62.5%
	合計	450	274	60.9%	288	183	63.5%
総計		1,296	881	68.0%	810	592	73.1%

## 4-2-2. 確認実験結果に対する分析

BlueDetect[26]の手法では、屋外歩行時の取得した全衛星の SNR 平均に対して 20%以上 SNR が減少した時を半屋外空間への進入の閾値としていたが、本研究で対象とする半屋外空間では 20%以上減るケースと減らないケースが様々であり、汎用的にこの手法を用いることには課題があることが分かった。この原因を分析するために、全衛星の SNR 平均ではなく、個々の衛星の SNR の値の取得状況を分析した。

今回の確認実験では、同じ時間帯に同じ歩行ルートで計測していても SNR 平均が大きく異なる結果となる事例が散見された。その事例の一つである Site-A 午前計測:1m 進入ルートでの実験について、各衛星の SNR の取得状況を図 4-16 に示す。4-2-1 で示した図と同様に横軸は時間、緑の縦線は半屋外空間への進入時点と退出時点を示しているが、縦軸は SNR (dB-Hz)となっている。また、図中の“PRN”は Pseudo Random Noise コードのことを指し、衛星番号を表している。左のグラフ(a)は計測 1 回目の結果であり、(b)は計測 2 回目の結果となるが、半屋外空間内での検知精度は計測 1 回目が 0%、計測 2 回目が約 60%であり、大きな違いが生じている。2 つのグラフを比較すると、半屋外空間歩行時に、SNR の値が低いゾーンで

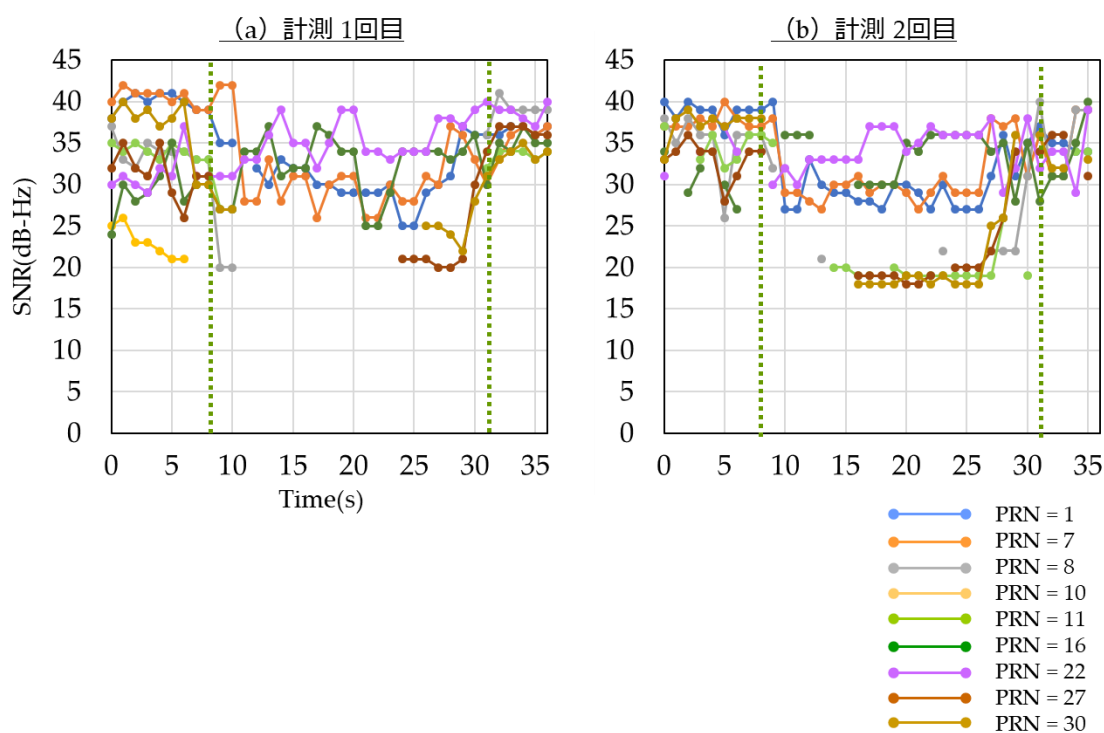


図 4-16. 個々の衛星の SNR の比較 (Site-A 午前の計測 1m 進入ルート)

データの取れ方に違いがあることが分かった。(a)では PRN=11、27、30 の SNR が取得できていないが、(b)では取得できており、この違いが全衛星の SNR 平均の違いを生み出していると想定できる。この時の衛星の配置状況を確認すると図 4-17 のようになり、PRN=11、27、30 の衛星はともに建物方向に位置している衛星であることが分かった。さらに、PRN=27 と PRN=30 は Elevation も低く、信号を受信するには不安定な状態にある衛星であることが分かった。

また、個々の衛星の値の変化に着目すると、半屋外空間への進入時に大きく値が変化する衛星と、あまり値が変化しない衛星が存在することが分かった。そこで、個々の衛星ごとにグラフ化したものを、図 4-18 及び図 4-19 に示す。図 4-18 は Site-A 午前計測:2m 進入ルート時の主な衛星の SNR 取得状況であり、図 4-19 は Site-B 午後計測:2m 進入ルート時の主な衛星の SNR 取得状況である。図 4-18 を見ると、Elevation の値が大きい、つまり高い仰角に位置する PRN=1 や PRN=11 の衛星は半屋外空間に進入すると SNR が大きく減少し、半屋外空間から退出すると再び大きく増加していることが分かる。一方、Elevation の値が小さい、つまり低い仰角に位置する PRN=3 や PRN=22 の衛星は半屋外空間に進入しても高仰角の衛星のように SNR が減少しないことが分かった。この傾向は図 4-19 から読み取ることができ、高仰角の PRN=17 や PRN=19 は SNR が大きく減少し、PRN=1 や PRN=6 は減少しない。

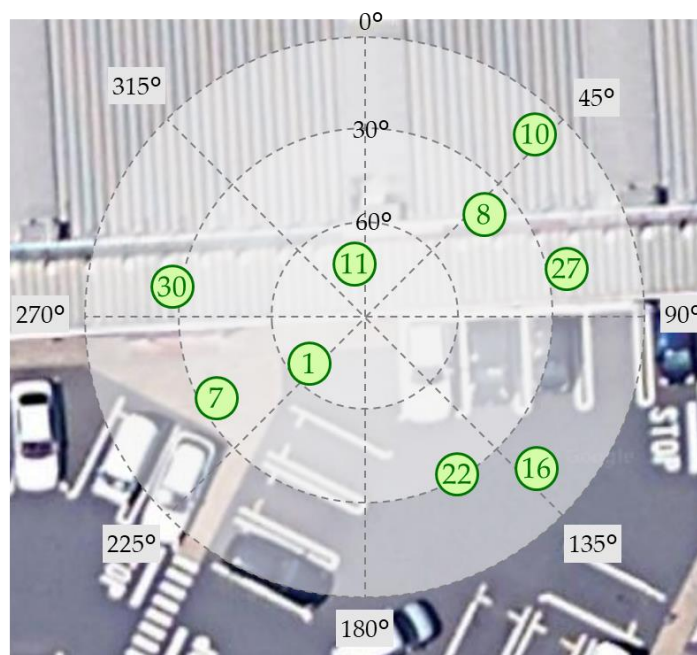


図 4-17. 衛星の配置 (Site-A 午前の計測 1m 進入ルート時)



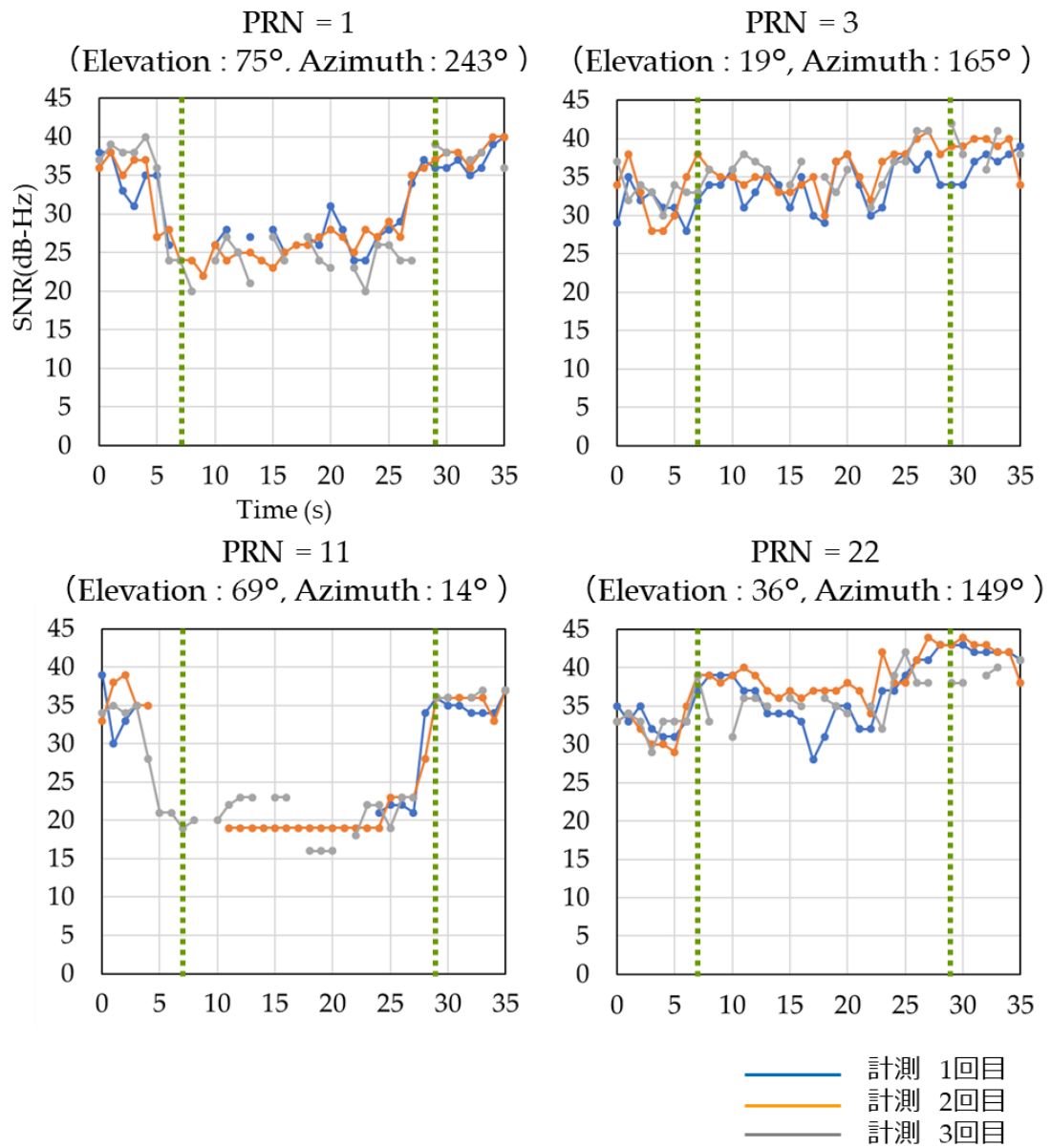


図 4-18. 個々の衛星の SNR の変化 (Site-A 午前の計測 2m 進入ルート時)

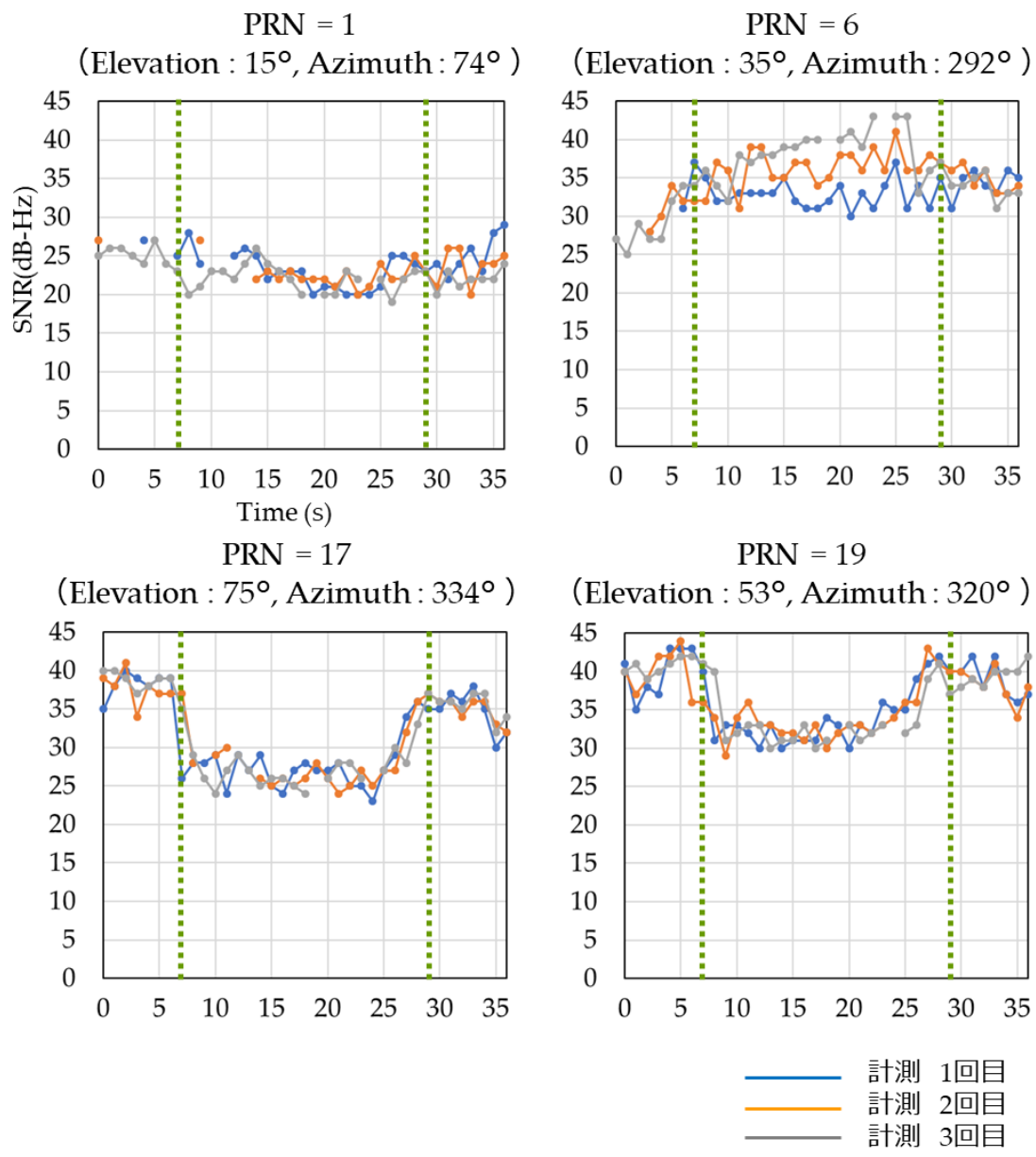


図 4-19. 個々の衛星の SNR の変化 (Site-B 午後の計測 2m 進入ルート時)

### 4-3. 確認実験のまとめ

本研究では、対象とする半屋外空間における既存手法の適用可能性を確認することと GPS の SNR が半屋外空間下でどのように変化するかを確認することを目的に確認実験を行った。

確認実験によって取得した半屋外空間における衛星の SNR の値とその分析から得られた知見を以下の通り整理する。

- ✓ BlueDetect[26]の手法では、屋外歩行時の取得した全衛星の SNR 平均に対して 20% 以上 SNR が減少した時を半屋外空間への進入の閾値としていたが、本研究で対象とする半屋外空間では 20%以上減るケースと減らないケースが様々であり、汎用的にこの手法を用いることには課題がある。特に、建物方向に位置する衛星や仰角の低い衛星は半屋外空間進入時に信号の受信状況が不安定になる。
- ✓ Gao ら[28]の手法では、各衛星の SNR のうち 25dB-Hz のもののみ合計し、合計値が 100~200dB-Hz の場合を半屋外空間滞在の基準としているが、可視衛星数が少ないと検知精度に影響が出る傾向がある。
- ✓ 高い仰角に位置する衛星は半屋外空間に進入すると SNR が大きく減少し、半屋外空間から退出すると再び大きく増加する傾向がある。一方、低い仰角に位置する衛星は半屋外空間に進入しても高い仰角の衛星のように SNR が減少しない。

## 第 5 章

### 「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計と評価実験

#### 5-1. 「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計方針

2-2 で、シームレス測位手法には“自位置算出を含むシームレス測位手法”と“自位置算出を含まないシームレス測位手法”があり、本研究では“自位置算出を含まないシームレス測位手法”をターゲットにすることとした。この方式の場合、シームレス測位機能は、スマートフォンが取得したデータを基に、まず自身が「屋外空間にいるのか」あるいは「屋内空間にいるのか」を判定し、その後に判定した結果に基づいた測位手段を使用し、位置算出を行うことになる。この流れを図示すると図 5-1 のようになり、シームレス測位機能は“空間検知機能”と“位置算出機能”の 2 つのサブ機能によって構成されることが分かる。本研究は、半屋外空間を含むシームレス測位のための空間検知機能の設計をターゲットにしていることから、「空間検知機能」に絞って設計と評価を行うこととした。

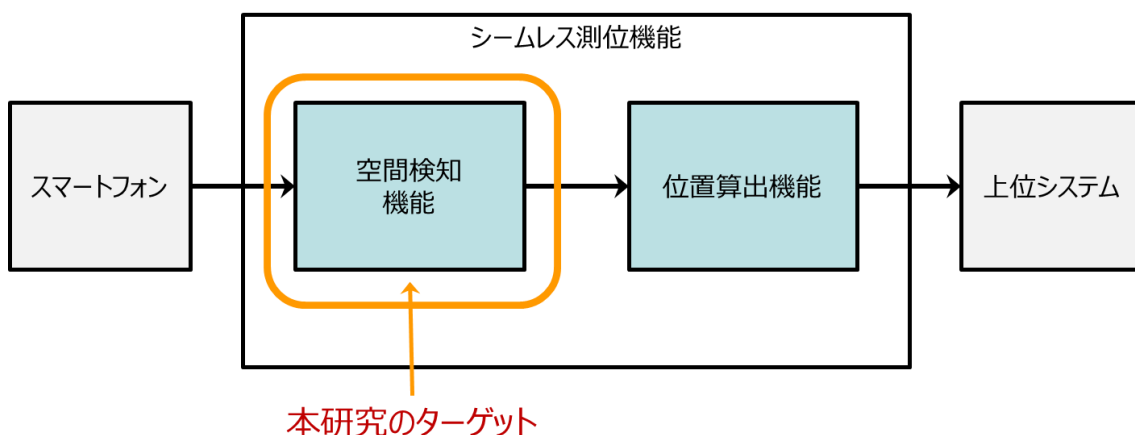


図 5-1. シームレス測位機能の構成

第 3 章で抽出した要求のうち、「R-1:半屋外空間の滞在を正確に検知できること」について、第 4 章で既存手法では半屋外空間での滞在を安定的な精度で検知することが難しいことを確認した。そこで、本章では確認実験で得られた結果も踏まえて、安定的に半屋外空間の滞在を検知する機能を設計した。

半屋外空間の滞在を検知するには、2 つの観点を加える必要がある。1 つ目は、半屋外空間の形状は空間によって異なることから、空間形状の違いを考慮した検知手法であることが求められる点である。特に、半屋外空間の高さが異なれば影響の度合いも変化すると考えられるため、高さ方向についても考慮しなければならないという点である。例えば、図 5-2 に示すように二次元上は同一の形状であっても高さが異なる場合、GPS 測位の観点でみると明確な影響の違いがある。同じ衛軌道上の衛星であっても、図 5-2 (a) の場合は衛星と受信端末との間に庇が遮蔽になるため信号を直接受信することが出来ない状態になり、測位精度が低下することが推測されるが、図 5-2 (b) の方は衛星信号を受信端末が直接受信することが可能である。同様に、空間の奥行きも検知には重要な情報となる。同じ高さでも奥行きが異なると衛星と受信端末との間の位置関係が異なるため、GPS 測位に影響が出ることが想定される。半屋外空間進入時に GPS の信号の受信状況に変化が出るため SNR が変化する、という事象は、受信端末が建物などの遮蔽の影響を受けて GPS の信号を直接受信できない NLOS の状態になり、直接受信できる Line-of-Sight (LOS) の状態と比較して SNR の値が低下するという性質と類似する[57][90]。LOS/NLOS の判定を行う代表的な方法の 1 つとして、3D 建物モデルを利用する方法がある。これは、あらかじめ衛星の位置と 3D 建物モデルとのマッチングにより、各位置における衛星の見通し状況をフィンガープリントとして保持し、実際に取得した衛星の SNR の LOS/NLOS 比率を算出することで LOS と推定される衛星のみを採用することで都市部における精度向上を図っている[91][92]。半屋外空間に対しても 3D 建物モデルを利用することで LOS/NLOS の予測をある程度行うことが可能になると想定できるが、庇の形状を考慮した 3D 建物モデルの構築は CityGML で定める Level of Detail 2 以上の精緻なモデル化が必要となり、モデルの構築コストの面で課題がある[93]。よって、半屋外空間の場合には別の方法を検討する必要がある。

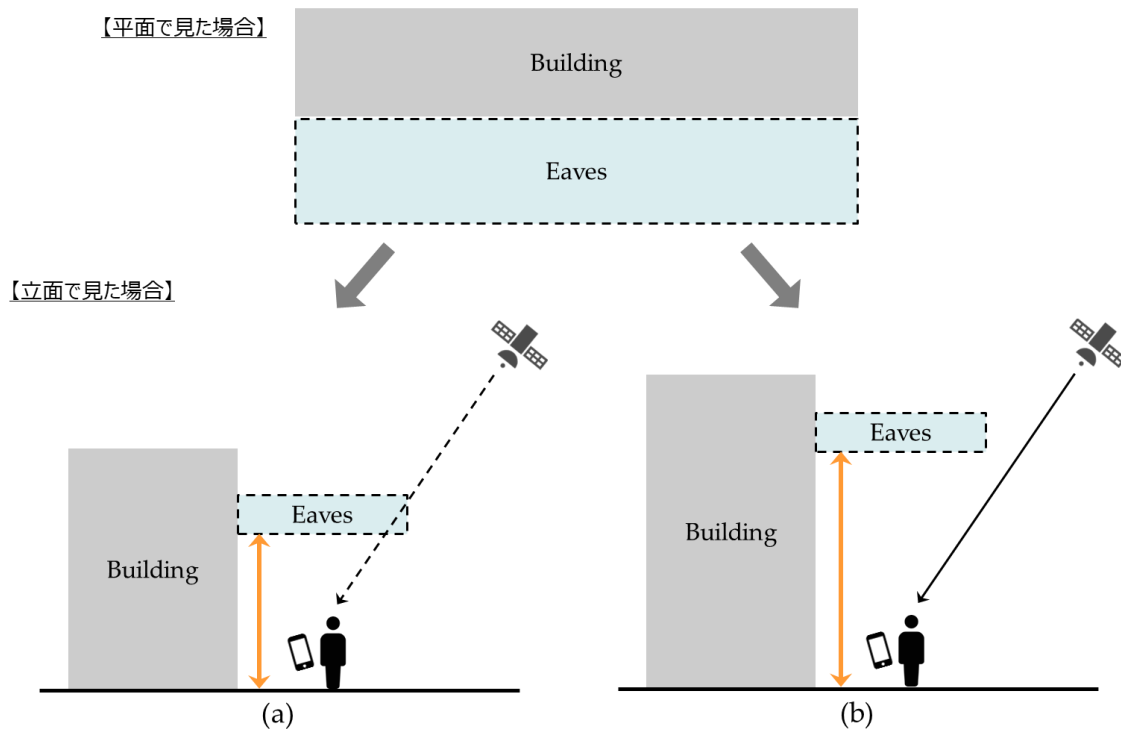


図 5-2. 半屋外空間の高さの違いが GPS 信号受信に与える影響

2つ目は、軌道上の衛星の配置は時間とともに常に変化する、という点である。図 5-3 は、同じ場所における午前と午後の衛星配置の違いの例である。例えば、図 5-3 (a) では建物の反対方向に多く衛星がプロットされているが、図 5-3 (b)では建物方向に多くの衛星がプロットされている。建物方向にプロットされている衛星の信号は、建物の遮蔽の影響で信号を直接受信できない可能性がある。半屋外空間での滞在の検知手法を設計するうえでは、常に変化する衛星の配置に対応できる手法であることが求められる。

一方で、第 4 章で実施した確認実験を通して、仰角の高い衛星は、計測端末であるスマートフォンが半屋外空間に進入するとともに SNR の値が大きく減衰する傾向があり、仰角の低い衛星は半屋外空間に進入しても SNR の値が減衰しない傾向にあることを確認した。この傾向を汎用性のあるアルゴリズムとして設計することができれば、SNR の値の変化を利用して半屋外空間での滞在を検知することが可能となる。

衛星の配置は時間とともに常に変化するが、半屋外空間の存在を考慮すると、軌道上の衛星は図 5-4 に示すように 4 つに分類することができる。半屋外空間の滞りに伴い衛星の信号の受信状態に変化が起こる可能性の高い衛星を選定することで、安定的に半屋外空間の滞

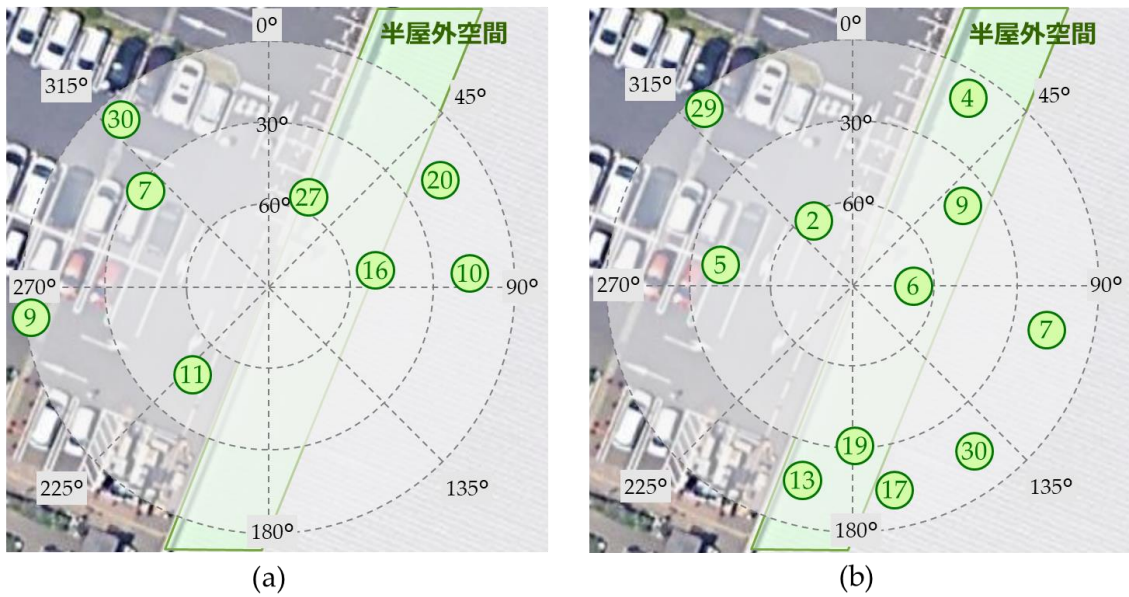


図 5-3. 時間の経過とともに変化する衛星配置の例

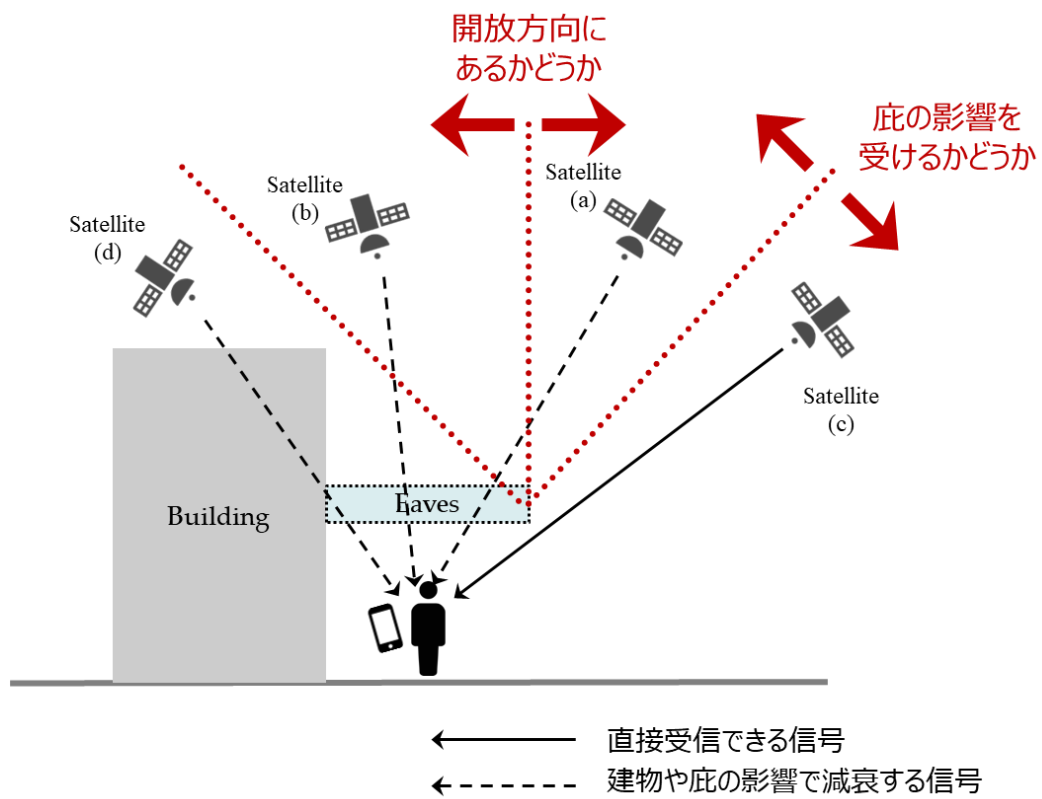


図 5-4. 半屋外空間を考慮した衛星配置と GPS 信号の減衰との関係

在を検知することが可能になると考えられる。受信状態に変化が起こる衛星を選定する方法として、本研究では半屋外空間の空間的な形状の特性を簡易的に抽出することに着目した。本研究では半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向の3つをパラメータとして利用することで、3D建物モデルを使用しなくても簡易的に衛星を選定する方法を設計した。

半屋外空間への滞在を検知する機能は、図5-5に示す2つのステップで構成する。Step-1では、図5-4で示した考え方を基に、半屋外空間の建物情報を活用して軌道上の衛星からモニタリングする衛星を特定する。具体的には、半屋外空間の建物情報として“高さ”“奥行き”“側面の開放方向”をパラメータとして利用する。Step-2では、第4章の確認実験で得られた結果を基に、Step-1で特定した衛星のSNRを活用して半屋外空間の滞在を検知する。

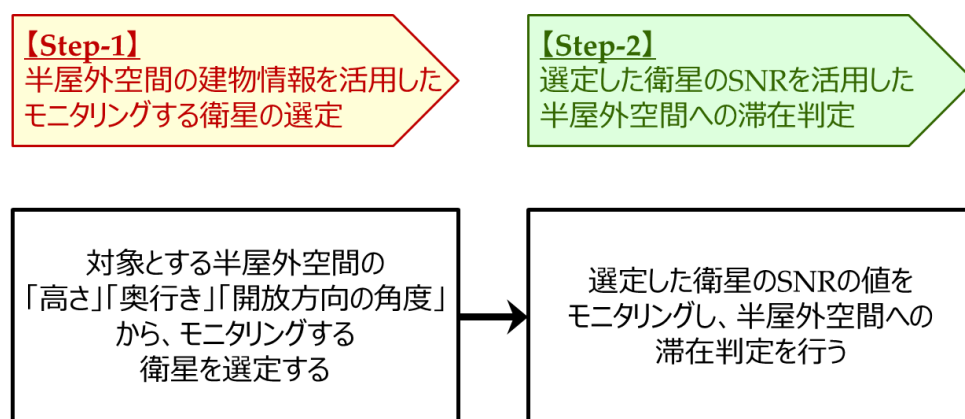


図5-5. 建物情報と信号対雑音比を活用した空間検知の判定ステップ



Step-2 は、具体的な実現方法として、図 5-6 に示すように 2 つの方法が考えられる。

### A : SNR の変化率を活用する

既存研究においても、屋外滞在時の取得した衛星の SNR の平均と比較して、一定の割合で SNR の平均が低下したことを半屋外空間への滞在の判定基準としている。確認実験では、既存研究に従って衛星全体の SNR の平均が 20%以上減衰した時を TBS への滞在の判定基準としたが、安定的な滞在検知とはならなかった。しかしながら、Step-1 で SNR の変化を監視する衛星を特定した上で、SNR の変化を計測することにより、既存研究よりも安定的な半屋外空間滞在の検知が期待できる。

### B : 複数の衛星の SNR のパターンから推定する

A の手法は半屋外空間への進入検知に SNR の値が屋外空間滞在時と比較して減衰することを利用している。しかし、この手法を利用するには、受信端末が屋外空間に位置していることがあらかじめ分かっている必要がある。また、1 つのパラメータでの判定では、安定的な検知の観点で懸念がある。そこで、判定に用いる衛星数を 2 つにし、2 つの衛星の SNR の値のパターンから半屋外空間への滞在を判定する手法を設計する。

本研究では、A と B の 2 つの検知手法を設計し、評価実験を行うことにより、検知精度を比較することとした。

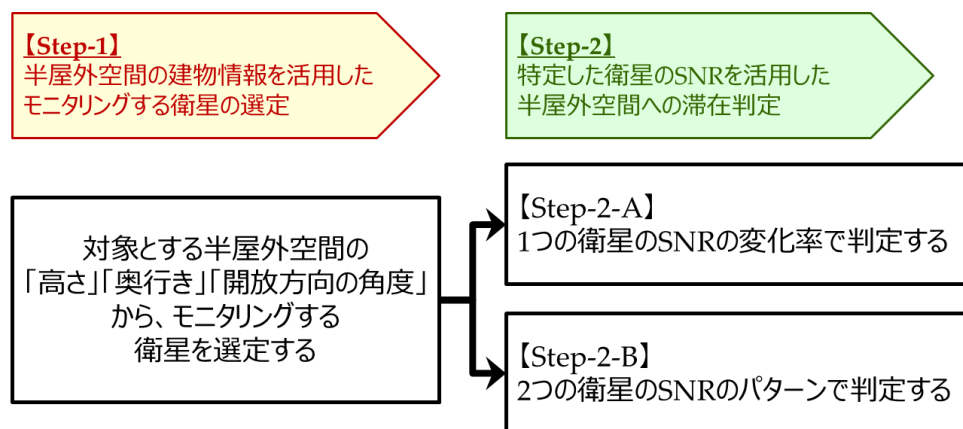


図 5-6. 半屋外空間検知判定の Step-2 実現方法

## 5-2. 半屋外空間の建物情報を活用した衛星選定手法の設計

### 5-2-1. 進入角度閾値の算出方法の設計

図 5-4 において、常に衛星の配置が変化する状況下で衛星(a)と衛星(c)を区分するためには、汎用的に使用することができる判定式が必要となる。本研究では、判定式を設計するために半屋外空間の建物情報を活用した。半屋外空間は屋外との境界面から壁までの奥行きと地上からの高さを計測することで、どの程度まで深く進入できる空間なのかを以下の式によって定量的に示すことが出来る。

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{D}{(H_{tbs} - H_m)} \quad (5-1)$$

ここで、 $\theta_{max}$  は半屋外空間の最も奥まで進入したときの角度、 $D$  は半屋外空間の奥行き、 $H$  は半屋外空間の高さ、 $H_m$  はスマートフォンを保持する高さを示す。例えば、確認実験を行った Site-A の場合、最も奥まで進入したときの角度は図 5-7 に示すとおり  $54^\circ$  となる。したがって、論理上はスマートフォンを持った作業員が一番奥まで進入すると  $36^\circ$  より仰角の高い衛星は庇の影響を受けて SNR が低下することになる。逆に、仰角が  $36^\circ$  より低い衛星は作業員が一番奥まで進入しても庇の影響を受けないことになる。ただし、実際には一番奥まで行かずに進入角度の浅い位置で作業することも想定される。そのような状態であっても半屋外空間の滞在を検知できる可能性を上げるため、奥行きの  $1/2$  を進入角度の基準とすることにより、庇の影響を受ける衛星を抽出することとした。この時の、庇の影響を受けるかどうかを判定するための閾値を「進入角度閾値」と呼ぶこととした。例として、高さ 5m、奥行き 4m の半屋外空間での算出例を、図 5-8 に示す。この場合、進入角度閾値となる  $\theta_{cat}$  は、以下の式で表すことが出来る。



$$\theta_{eat} = 90 - \theta_{med} \quad (5-2)$$

$$\theta_{med} = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2}D}{(H_{tbs} - H_m)} \quad (5-3)$$

ここで、 $\theta_{eat}$  はこの半屋外空間の進入角度閾値、 $\theta_{med}$  は、この半屋外空間の 1/2 の奥行きまで進んだ時の進入角度である。

この手法であれば、半屋外空間の高さと奥行きをレーザ距離計等で計測すれば、3D 建物モデルを使用しなくても簡易に進入角度閾値を算出することが可能となる。

### 5-2-2. 半屋外空間の開放方向を利用した衛星の分類方法の設計

次に、図 5-4 において、衛星(a)及び(c)と衛星(b)及び(d)とを区分する方法を設計した。これは、例えば衛星(b)のような仰角の高い衛星が存在したとしても、SNR が減衰した時に建物の遮蔽の影響で減衰したのか庇の遮蔽の影響で減衰したのか判定することができない。そのため、建物方向にある衛星は、SNR の減衰の判定には使用しないことが望ましいためである。

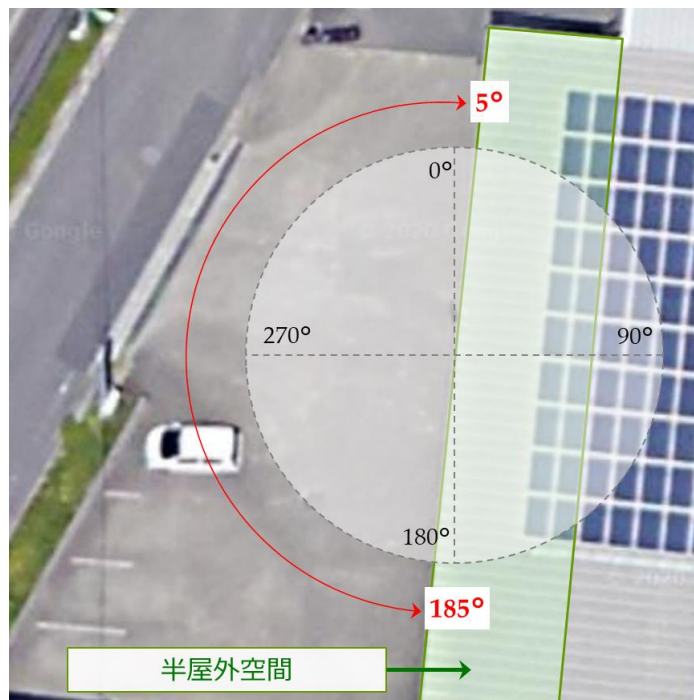


図 5-9. 半屋外空間の開放方向の算出例

半屋外空間の開放方向は Google Maps 等の地図サービスや地理情報システムを利用することにより取得できる。側面の開放方向の算出例を、図 5-9 に示す。本研究では矩形の細長い半屋外空間を対象としているため、設定される角度の範囲は 180 度となる。この場合、185° から 5° が、側面の開放方向となる。この値を、開放方向閾値と呼ぶこととした。

### 5-2-3. 監視対象衛星の選定フローの設計

5-2-1 及び 5-2-2 により、軌道上の衛星は、“進入角度閾値”と“側面の開放方向”の 2 つのパラメータにより、表 5-1 に示す 4 つのグループに分類することが出来る。このうち、Group 1a に属する衛星が半屋外空間への進入検知の対象として最も優先度の高い衛星となる。衛星の配置状況により Group 1a に該当する衛星が存在しない場合、次に優先度の高い衛星は Group 1b の衛星となる。この 2 つの Group に属する衛星は、単独で半屋外空間への進入の検知に利用できる衛星となる。衛星の配置状況から Group 1a 及び Group 1b のどちらにも該当する衛星がない場合は、Group 2 の衛星が対象となる。この場合、半屋外空間に進入しても SNR が減衰しない可能性が高いが、半屋外空間の奥まで進入している場合や Group 2 の衛星の仰角が比較的高い場合は半屋外空間への進入を検知できる場合があると想定できる。ただし、全体としては判定精度は大きく低下することが予想される。Group 3 に属する衛星は、建物方向に位置し仰角が低い衛星のため、半屋外空間への進入検知に利用することは難しい衛星と言える。

5-3 で詳述する選定した衛星の SNR の変化率で半屋外空間への進入を検知する手法の場合、4 つに分類した中から衛星を 1 つ選定する。5-4 で詳述する選定した衛星の SNR のパタ

表 5-1. 半屋外空間滞在検知のための衛星の分類

衛星の分類	進入角度閾値より仰角が高い衛星かどうか	側面の開放方向にある衛星かどうか	選定の優先順位
Group 1a	Yes	Yes	1
Group 1b	Yes	No	2
Group 2	No	Yes	3
Group 3	No	No	-

ーンで半屋外空間への進入を検知する手法の場合、4 つに分類した中から衛星を 2 つ選定する。選定された衛星のことを、本研究では監視対象衛星と呼ぶこととした。

図 5-10 及び図 5-11 は、監視対象となる衛星を選定する際の処理フローである。端末はあらかじめ対象とする半屋外空間の進入角度閾値、開放方向閾値及び半屋外空間の中心座標をパラメータとして保有する。敷地内に複数の半屋外空間があることも想定し、受信端末の現在位置から各半屋外空間の中心座標を比較して最も近い半屋外空間を検知対象半屋外空間として決定する。受信端末は NMEA0183 形式で各衛星の仰角及び方位角を取得する。そして、各衛星に対して 5-2-1 及び 5-2-2 で設計した手法を用いて“衛星の仰角は進入角度閾値以上か”“衛星の方位角は開放方向にあるか”によって、各衛星を「Group1a」「Group1b」「Group2」「Group3」の 4 つに分類する。次に、「Group1a」「Group1b」「Group2」について、図 5-11 に示す定義済処理に従って各グループの監視対象衛星を特定する。この定義済処理では、各グループの中で最も仰角の高い衛星が監視対象衛星となるよう判定処理を行う。Group3 の衛星は、半屋外空間の判定には用いないため、定義済処理を行わず、このグループの監視対象衛星は発生しない。各グループの中で最も仰角の高い衛星を監視対象衛星とすることから、各グループの監視対象衛星の数は常に 1 となる。

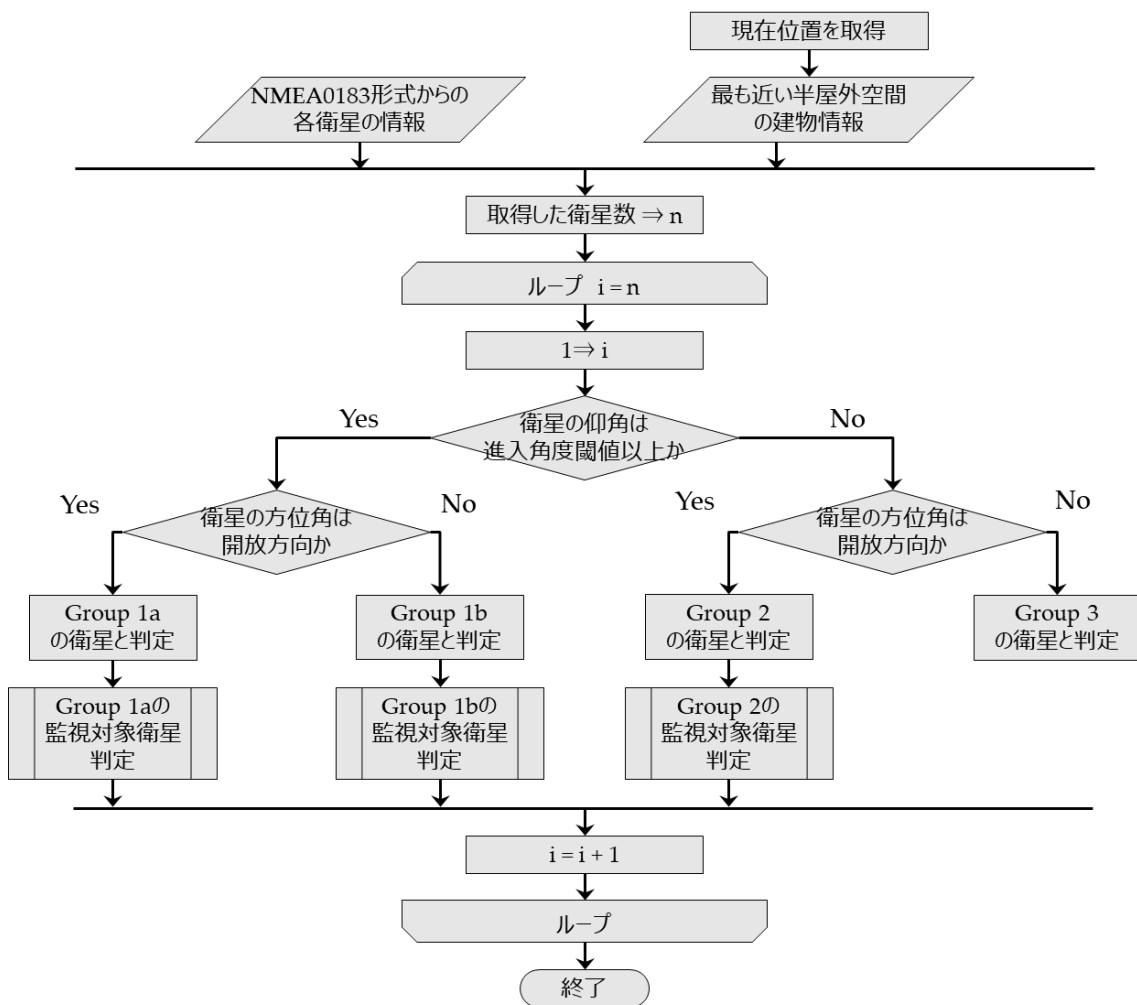


図 5-10. 監視対象衛星を選定する際の処理フロー

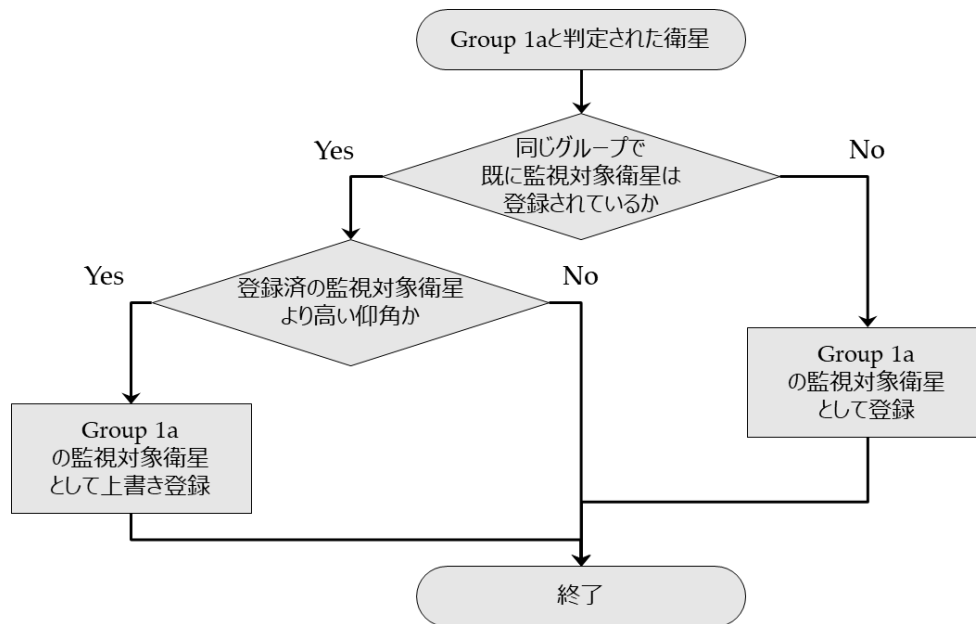


図 5-11. 定義済処理(Group1a の場合。Group1b、Group2 でも同様)

### 5-3. SNR の変化率を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計

#### と評価実験

#### 5-3-1. SNR の変化率を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計

半屋外空間での滞在検知手法の 1 つとして、図 5-6 に示したように、選定した 1 つの衛星の SNR の変化率を活用した半屋外空間検知手法を設計した。この手法を、本研究では“SNR 変化率方式”と定義する。SNR 変化率方式による判定の流れを、図 5-12 に示す。Step-1 では、5-2 で設計した監視対象衛星の選定手法を利用して、監視対象衛星を 1 つ選定する。Step-2 では、選定した 1 つの衛星の SNR の変化率を活用して、半屋外空間の滞在を検知する。

確認実験の結果より、幾つかの衛星は半屋外空間への進入に伴い SNR の値が低下し、半屋外空間から屋外に出たときに SNR の値が上昇することが確認できた。同様の結果は他の研究でも報告されており、第 2 章で述べたとおり、コリドー状の形状の半屋外空間への進入時に衛星全体の SNR の平均値が 20%以上減衰することが BlueDetect[26]によって報告されている。また、半屋外空間への進入の事例ではないが、建物に近づくと衛星の SNR が約 5db 減衰し、建物内に入るとさらに急激に減衰することが、Gao ら[28]によって報告されている。さらに、



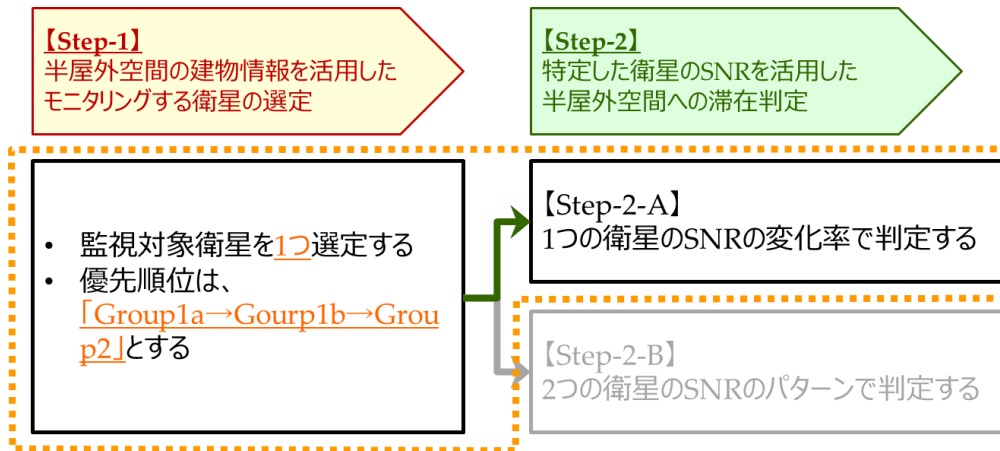


図 5-12. SNR 変化率方式の流れ

屋外での SNR が 35～45dB なのに対して窓の近くの屋内だと 10～20dB の減衰があって 25～35dB になることが Seco-Granados ら[31]によって報告されている。それぞれの研究で使用している計測端末は異なるが、いずれの場合においても概ね 20%以上の減衰が半屋外空間への進入や窓の近くの屋内で発生すると推測することが出来る。

そこで、確認実験時のデータを利用し、図 5-10 で示すフローによって選定された監視対象衛星の SNR が半屋外空間への進入や半屋外空間からの退出に伴いどのように変化したのかを確認した。確認した結果を、図 5-13 及び表 5-2 に示す。図 5-13 は、Site-B で午後に行った確認実験における、選定された監視対象衛星の屋外から半屋外空間進入時の SNR の変化の推移を示している。他の図と同様に緑の縦線は半屋外空間への進入時点を示しており、縦線の左側が屋外歩行時、右側が半屋外空間歩行時である。縦軸は、監視対象衛星の直近 2 回の SNR 平均がそれ以前の SNR 平均に対してどの程度変化したかを示している。赤の横線が 20%の減衰を示すラインであり、進入検知の閾値を 20%と設定すると、監視対象衛星の SNR の変化をトラッキングすることによって半屋外空間への進入を判定できることが分かった。表 5-2 は、確認実験で行った 36 回の計測における半屋外空間進入時の監視対象衛星の SNR 減衰率を示したものである。平均で 26.3%減衰し、最も減衰が小さい場合でも 20.5%の減衰が発生している。これらの結果に基づいて半屋外空間への進入を検知するための処理フローを、図 5-14 に示す。SNR の変化率は、以下の式で表すことが出来る。

$$\delta_n = \frac{last2tSNR_n}{aveSNR_n} - 1 \quad (5-4)$$

$$last2tSNR_n = \frac{\sum_{i=n-1}^n mtsSNR_i}{2} \quad (5-5)$$

$$aveSNR_n = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} mtsSNR_i}{n-2} \quad (5-6)$$

ここで、 $\delta_n$ はSNRの変化率、 $mtsSNR_i$ は監視対象衛星の*i*回目のSNRの値、 $last2tSNR_n$ は直近2回の監視対象衛星のSNR平均、 $aveSNR_n$ は監視対象衛星の*n*=0となってから*n*-2回目まで、つまり直近2回より以前のSNR平均である。受信端末が屋外にいるときは、2つの値はどちらも減衰しないため、 $\delta_n$ の値は0付近となる。しかし、受信端末が半屋外空間に進入すると、 $last2tSNR_n$ の値は大きく低下するのに対して $aveSNR_n$ の値はまださほど変化しないため、 $\delta_n$ の値は大きく低下する。そして、2つの値を比較して20%以上減衰している時、受信端末が半屋外空間に進入したと判定することとした。そして、全体の測位モードを屋外測位から屋内測位に変更する。測位モードを変更することにより、それ以降は半屋外空間内に構築した屋内測位環境を用いて現在位置を算出できるようにする。

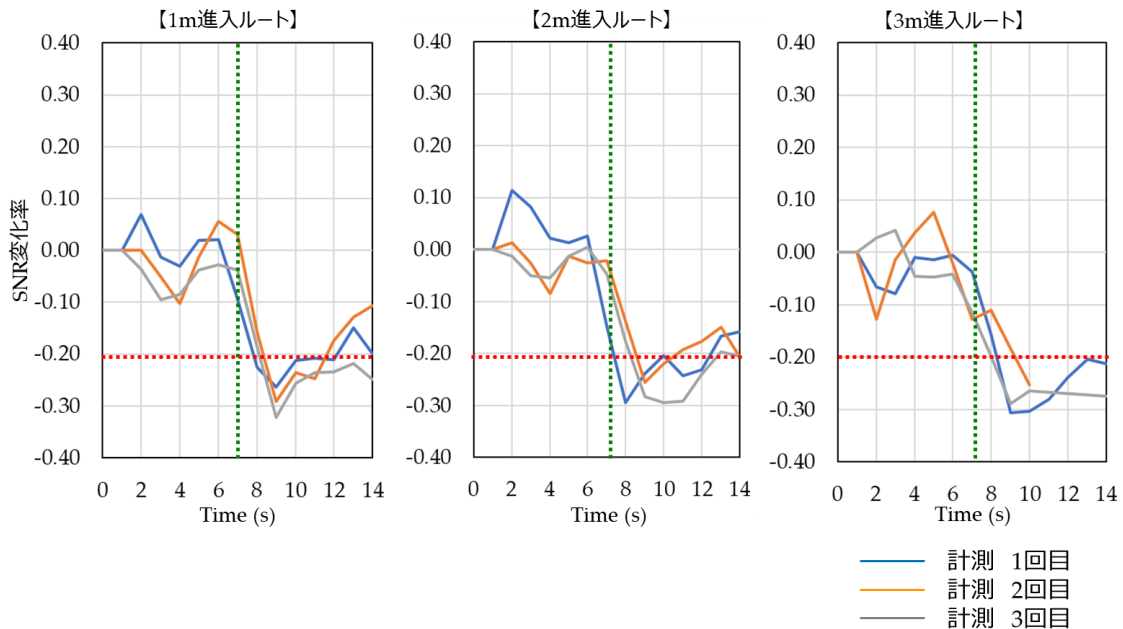


図 5-13. 確認実験における監視対象衛星の半屋外空間進入時の SNR の変化

表 5-2. 確認実験における監視対象衛星の半屋外空間進入時の SNR の変化率

計測回数	半屋外空間への進入に伴う last2tSNR の変化率			
	平均値	中央値	最大値	最小値
36	-26.32%	-25.45%	-39.10%	-20.50%

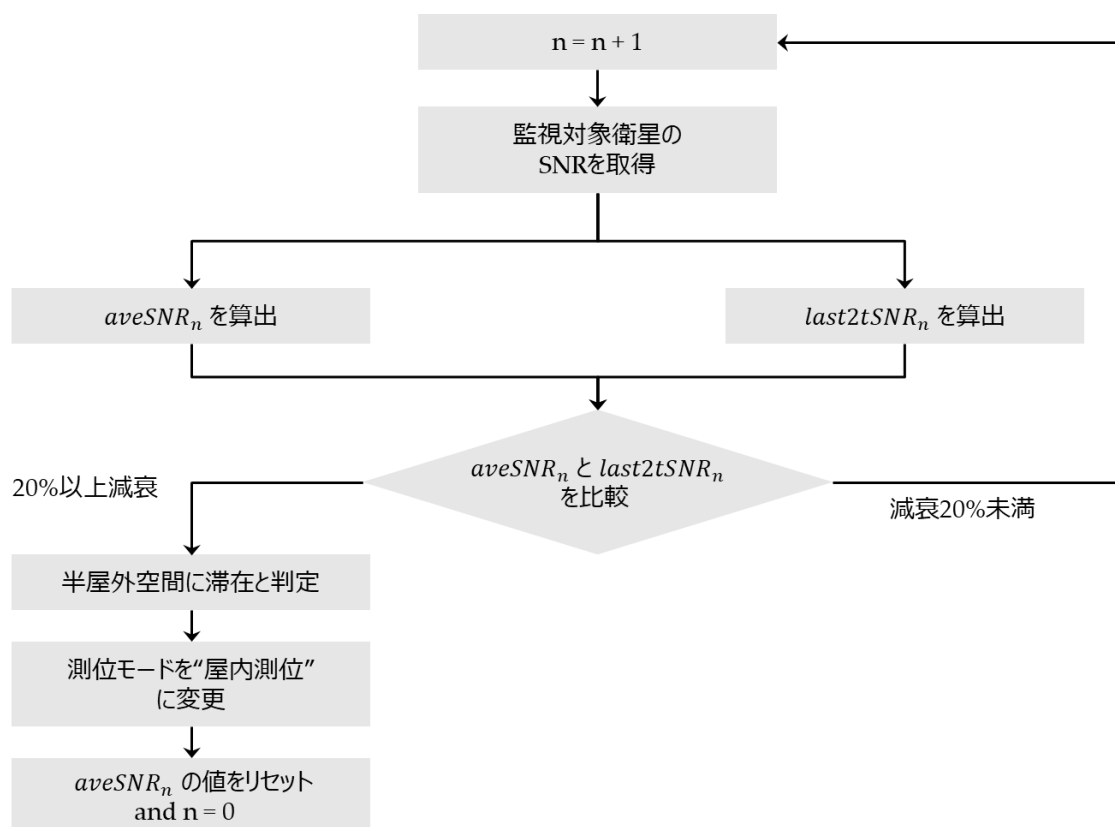


図 5-14. 半屋外空間滞在の判定フロー

また、半屋外空間から屋外への退出を検知するための処理フローは、半屋外空間からの退出に伴い監視対象衛星の SNR が増加することを利用した。図 5-14 の判定フローと同様に直近 2 回の SNR 平均とそれ以前の SNR 平均を比較して 20%以上増加した場合、半屋外空間からの退出と判定することとした。そして測位モードを“Outdoor Positioning”に変更し、GPS による測位への切り替えを図 5-1 で示す「位置算出機能」に通知する。

## 5-3-2. SNR の変化率を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の評価実験

### 5-3-2-1. SNR 変化率方式の評価実験の概要

設計した手法の有効性を確認するために評価実験を行った。評価実験は、確認実験の実施箇所と同様に、上空から見ると矩形であり長辺方向の側面の一边が開いている工場や倉庫によく見られるような空間を3か所抽出し実施した。ただし、空間形状の特性に偏りがないように、高さとお行ききの比率が異なるように考慮した。評価実験実施箇所の概要を図 5-15 に示す。計測端末は、確認実験の時と同様に、機種 A を使用した。評価実験の各サイトに対して確認実験と同様の計測ルートを設定し、被験者が地上から 1.2m の高さで体の前でスマートフォンを水平に保持した状態で約 1m/s の速度で歩行した。そして、歩行時に 1 秒ごとに NEMA0183 形式で記録される各衛星の SNR、Elevation(仰角)及び Azimuth(方位角)の値を、スマートフォンアプリケーションを利用して取得した。半屋外空間へ 1m 進入/2m 進入/3m 進入のルートを各 3 回計測し、さらに、時間に伴う衛星の配置の変化を考慮するため、これらの計測を各サイトに対して午前と午後にそれぞれ行った。計測の回数は合計で 54 回となる。

高さ > 奥行き	高さ ≒ 奥行き	高さ < 奥行き
Site-C	Site-D	Site-E
		
高さ = 4.6m 奥行き = 4.3m	高さ = 4.5m 奥行き = 4.5m	高さ = 3.2m 奥行き = 5.8m
進入角度閾値 : 58°	進入角度閾値 : 56°	進入角度閾値 : 35°
側面の開放方向 from 273° to 93°	側面の開放方向 from 10° to 190°	側面の開放方向 from 110° to 290°

図 5-15. 評価実験実施箇所の概要

### 5-3-2-2. SNR 変化率方式による検知精度の評価

設計した GPS の SNR の変化率を利用した半屋外空間滞在検知手法の検知精度を検証するために、歩行開始時刻、半屋外空間に進入した時刻と退出した時刻及び歩行終了時刻を記録した。記録した時刻とスマートフォンアプリケーションで取得した監視対象衛星の SNR の変化を分析することで、半屋外空間滞在の検知精度を算出した。

各サイトとも同じように評価を実施しているが、代表して Site-C の実験結果を記載する。Site-C での評価実験時の歩行ルートは図 5-16 に示すとおりであり、また、実験時の衛星配置の例として、Site C の午前と午後の 2m 進入の実験時の衛星の配置を図 5-17 に示す。赤いドットで

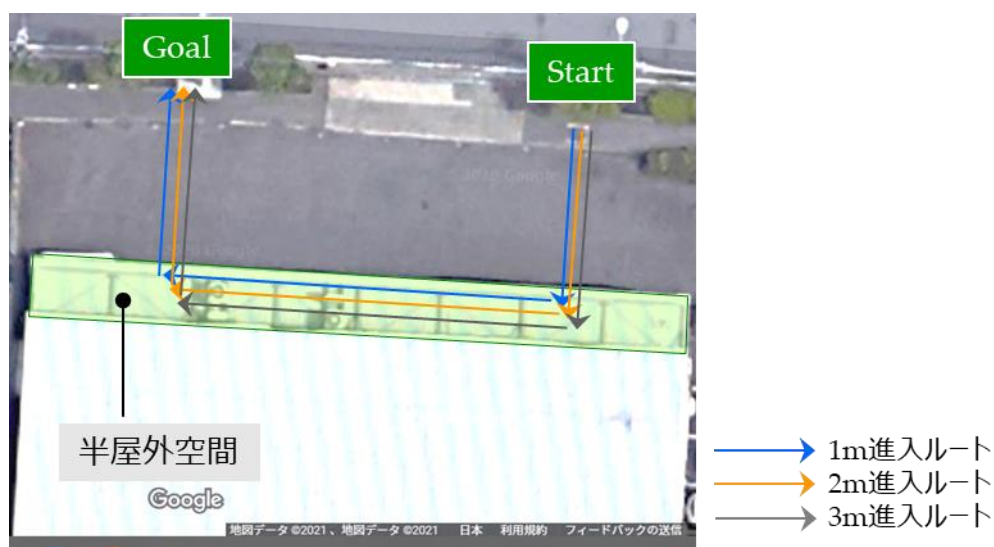


図 5-16. 評価実験の歩行ルート (Site-C)

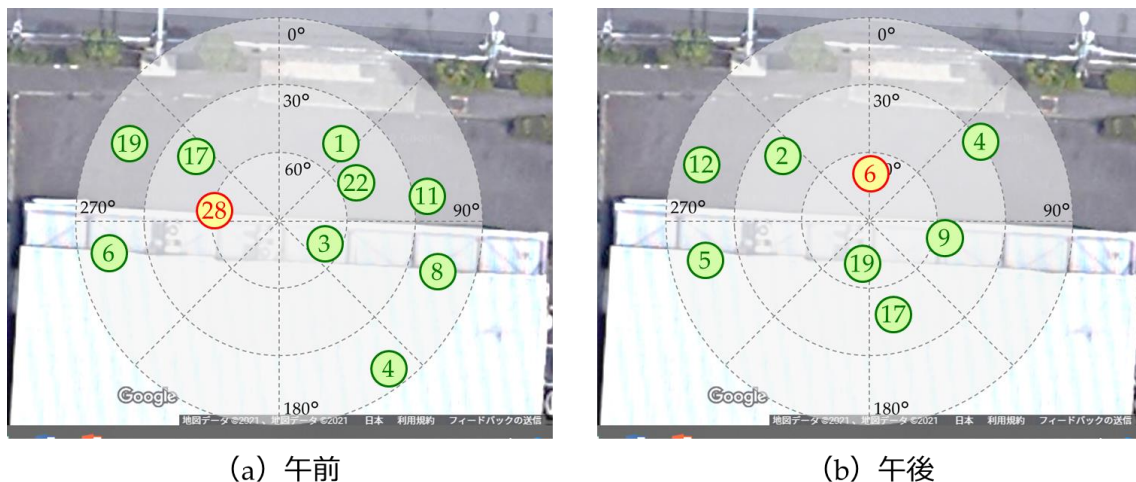


図 5-17. 評価実験時の衛星配置例 (Site-C 2m 進入時)

表 5-3. Site-C 計測実験時の監視対象衛星の状況

回数	午前			午後		
	1m 進入	2m 進入	3m 進入	1m 進入	2m 進入	3m 進入
分類	1a	1a	1a	1a	1a	1a
PRN	28	28	3	6	6	6
仰角	59	60	68	64	66	67
方位角	279	274	88	352	0	5

示された衛星が監視対象衛星として選定された衛星である。ドットの中の数字は、衛星の PRN コード(衛星番号)を示す。Site-C での評価実験では 18 回行った計測全てで表 5-1 における Group 1a に属する衛星が存在した。各実験時の監視対象衛星の選定状況を表 5-3 に示す。

既存手法と提案手法との検知精度の比較のために、Site-C の午後の 2m 進入時の SNR の変化を記載したグラフを、図 5-18 に示す。図 5-18(a)は、第 4 章で行った確認実験と同様に BlueDetect[26]の手法で採用された取得した全衛星の SNR の平均値の推移を示したものである。緑の縦線に囲まれた区間が半屋外空間内を歩行している区間であり、屋外空間に滞在

する計測開始時を基準に SNR 平均値の変化の度合いを縦軸に示している。図 5-18 (b) 及び (c) は、図 5-14 で示したフローに基づき、監視対象衛星の SNR 全体平均値に対する直近 2 回の SNR 平均値の変化の度合いを示している。図 5-18 (b) は屋外から半屋外空間進入までの SNR の変化を記載しており、図 5-18 (c) は半屋外空間から屋外へ退出するまでの SNR の変化を記載している。半屋外空間への進入時は、実際の進入から 4 秒前後の遅延が発生しているが、直近 2 回の SNR 平均値が 20% 以上の減衰を示し、半屋外空間への進入が検知された。また、半屋外空間からの退出時は、実際の退出より 1 秒または 2 秒早い、直近 2 回の SNR 平均それまでより 20% 以上増加し、半屋外空間からの退出が検知された。

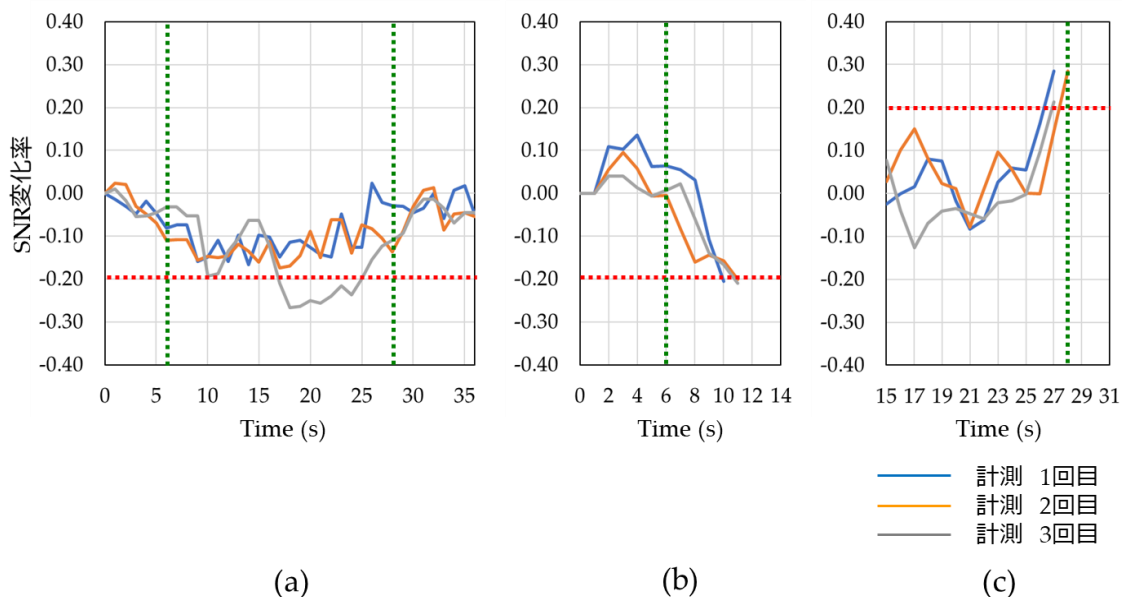


図 5-18. 評価実験における既存手法と提案手法との SNR 変化率の比較 (a) 既存手法 / (b) 提案手法 (半屋外空間進入時) / (c) 提案手法 (半屋外空間退出時)

Site-C での計 18 回の評価実験について、午前の計測の結果を表 5-4 に、午後の計測の結果を表 5-5 に示す。また、午前の計測と午後の計測を合わせて結果を、表 5-6 に示す。1m 進入時を例にすると、歩行ルートを 34 秒掛けて歩行したため、計測点数は 34 となる。各秒において設計した手法に基づき“屋外空間”か“半屋外空間”かの判定を行い、実際の滞在空間と正しいかどうかをカウントした。34 秒のうち 30 秒実際の滞在空間と合致していた場合、正解数は 30 となる。1m 進入ルートのうち、半屋外空間を歩行していた時間は 20 秒のため、半屋外空間のみの計測点数は 20 となり、同様に正解数をカウントした。また、既存手法と検知精度を比較するために、BlueDetect[26]での手法を用いて同様に正解数をカウントした。



表 5-4. Site-C での評価実験結果（午前）

回数	提案手法						既存手法 (BlueDetect)					
	全体			半屋外空間のみ			全体			半屋外空間のみ		
	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)
1m 進入												
1	34	30	88.2	20	17	85.0	34	15	44.1	20	1	5.0
2	34	30	88.2	20	16	80.0	34	24	70.6	20	10	50.0
3	34	32	94.1	20	18	90.0	34	23	67.7	20	9	45.0
計	102	92	90.2	60	51	85.0	102	62	60.8	60	20	33.3
2m 進入												
1	36	28	82.3	22	14	63.6	36	27	75.0	22	13	59.1
2	36	34	94.4	22	20	90.9	36	30	83.3	22	16	72.7
3	36	33	91.7	22	20	90.9	36	23	63.9	22	9	40.9
計	108	95	88.0	66	54	81.8	108	80	74.1	66	38	57.6
3m 進入												
1	34	33	97.1	20	19	95.0	34	23	67.7	20	9	45.0
2	34	30	88.2	20	18	90.0	34	23	67.7	20	9	45.0
3	34	32	94.1	20	18	90.0	34	14	41.2	20	0	0.0
計	102	95	93.1	60	55	91.7	102	60	58.8	60	18	30.0
午前 計	315	282	89.5	186	160	86.0	315	202	64.1	186	76	40.9

表 5-5. Site-C での評価実験結果（午後）

回数	提案手法						既存手法 (BlueDetect)					
	全体			半屋外空間のみ			全体			半屋外空間のみ		
	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 数	検知 精度 (%)
1m 進入												
1	34	14	41.2	20	0	0.0	34	14	41.2	20	0	0.0
2	34	14	41.2	20	0	0.0	34	14	41.2	20	0	0.0
3	34	14	41.1	20	0	0.0	34	25	73.5	20	11	55.0
計	102	42	41.2	60	0	0.0	102	53	52.0	60	11	18.3
2m 進入												
1	36	31	86.1	22	17	77.3	36	14	38.9	22	0	0.0
2	36	31	86.1	22	17	77.3	36	14	38.9	22	0	0.0
3	36	30	83.3	22	16	72.7	36	22	61.1	22	8	36.3
計	108	92	85.2	66	50	75.8	108	50	46.3	66	8	12.1
3m 進入												
1	34	29	85.3	20	15	75.0	34	28	82.4	20	14	70.0
2	34	30	88.2	20	16	80.0	34	24	70.6	20	10	50.0
3	34	32	94.1	20	18	90.0	34	30	88.2	20	16	80.0
計	102	91	89.2	60	49	81.7	102	82	80.4	60	40	66.7
午後 計	315	225	71.4	186	99	53.2	315	185	58.7	186	59	31.7

表 5-6. 評価実験結果 (Site-C 全体)

距離	提案手法						既存手法 (BlueDetect)					
	全体			半屋外空間のみ			全体			半屋外空間のみ		
	計測点数	正解点数	検知精度 (%)	計測点数	正解点数	検知精度 (%)	計測点数	正解点数	検知精度 (%)	計測点数	正解点数	検知精度 (%)
1 m 進入	204	134	65.7	120	51	42.5	204	115	56.4	120	31	25.8
2 m 進入	216	187	86.6	132	104	78.8	216	130	60.2	132	46	34.8
3 m 進入	204	186	91.2	120	104	86.7	204	142	69.6	120	58	48.3
全体計	624	507	81.3	372	259	69.6	624	387	62.0	372	135	36.3

提案手法による全体の検知精度は 81.3%となり、既存手法に対して約 19%検知精度が高い結果となった。同様に、半屋外空間部分の検知精度は 69.6%となり、既存手法に対して約 33%高い結果となった。一方で、午後の計測の 1m 進入ルートでは、半屋外空間の滞在が検知できない時があった。

Site-D、Site-E についても同様の集計を行った。Site-D 及び Site-E での実験の歩行ルートを図 5-19 に、全てのサイトの実験結果を集計したものを、表 5-7 に示す。

【Site-D】



【Site-E】

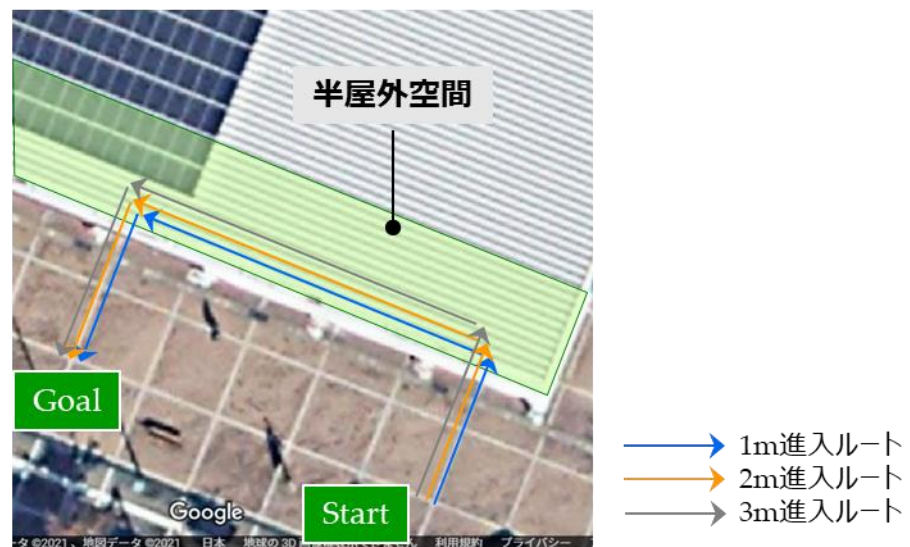


図 5-19. Site-D 及び Site-E の実験時の歩行ルート

表 5-7. 評価実験結果（評価実験全体）

距離	提案手法						既存手法 (BlueDetect)					
	全体			半屋外空間のみ			全体			半屋外空間のみ		
	計測点数	正解点数	検知精度 (%)	計測点数	正解点数	検知精度 (%)	計測点数	正解点数	検知精度 (%)	計測点数	正解点数	検知精度 (%)
1 m 進入	582	425	73.0	378	228	60.3	582	348	59.8	378	145	38.4
2 m 進入	618	496	80.3	414	293	70.8	618	430	69.6	414	227	54.8
3 m 進入	630	587	93.2	426	386	90.6	630	422	67.0	426	218	51.8
全体計	1830	1508	82.4	1218	907	74.5	1830	1200	65.6	1218	590	48.4

提案手法の検知精度は全体で 82.4%となり、既存手法に対して約 17%高かった。半屋外空間内の検知精度についても 74.5%となり、既存手法に対して約 27%高かった。一方で、以下の計測回では、半屋外空間の滞在を検知することが出来なかった。

- ✓ Site-C: 午後の計測 1m 進入ルート
- ✓ Site-D: 午後の計測 1m 進入ルート
- ✓ Site-D: 午後の計測 2m 進入ルート

## 5-4. ファジィ推論を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計

### と評価実験

#### 5-4-1. ファジィ推論を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計

5-3 では、SNR の変化率を利用して半屋外空間への進入及び半屋外空間からの退出を検知する手法(SNR 変化率方式)の設計と評価を行った。この手法により、BlueDetect[26]で採用している従来手法と比較して高い精度で半屋外空間の滞在を検知できることを確認した。一方で、この方式は屋外空間と半屋外空間との間で 20%以上 SNR に違いが出る、という判定方法のため、予め屋外空間での SNR が分かっている必要がある。あるいは、初期状態では屋外空間に受信端末がいることを前提とする必要がある。また、用いる監視対象衛星が 1 つのため、何かの要因で正しく値を取得できなかつた場合に即座に判定結果に影響を与えることになる。

SNR 変化率方式のように監視対象衛星を 1 つに絞るのではなく 2 つ選定することにした場合、屋外空間なのか半屋外空間なのかの判定は、図 5-20 に示すように 2 つの衛星の SNR の組み合わせで判定できると考えられる。

- Group 1 と Group 2 の衛星の SNR がともに高い場合は、屋外空間に滞在している
- Group 1 の衛星の SNR が低く、Group 2 の SNR が高い場合は、半屋外空間に滞在している
- Group 1 と Group 2 の衛星の SNR がともに低い場合は、半屋外空間に滞在している

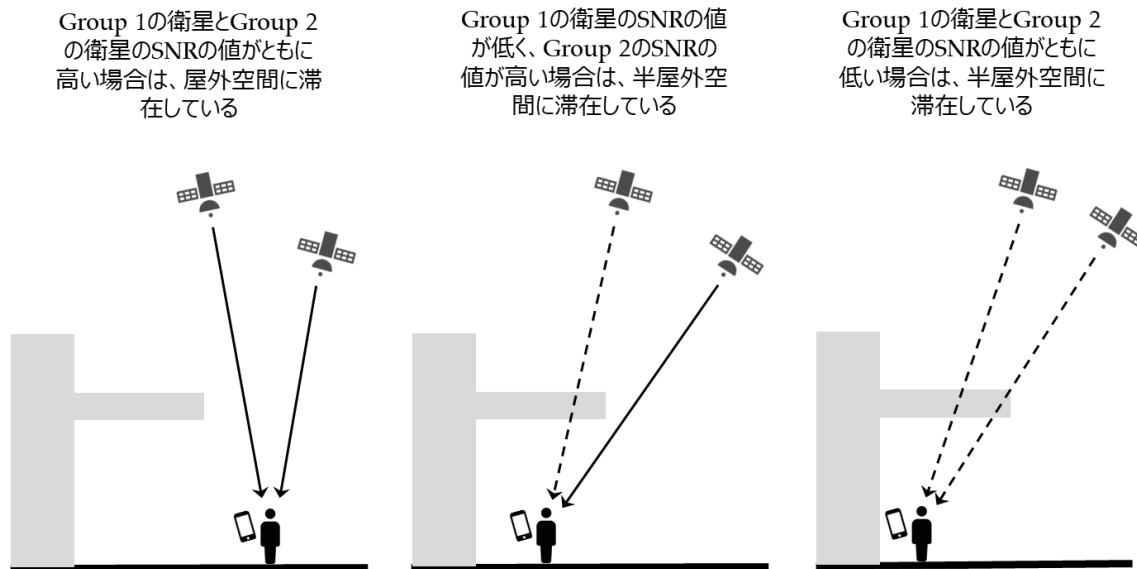


図 5-20. 2 つの監視対象衛星を利用した場合の半屋外空間の判定パターン

しかしながら、第 4 章の確認実験や 5-3 の評価実験で明らかのように、監視対象衛星の仰角や方位角は常に変化していることや、個々の半屋外空間の空間形状の違いにより、ここで“高い”“低い”を示す SNR の値を一律に定めることは難しい。

このような、一律の閾値を設定するのは難しいあいまいな事象を取り扱う推論手法の代表的なものとしてファジィ推論がある[94][95]。ファジィ推論の fuzzy という単語は曖昧という意味であり、ファジィ推論はあいまい性を扱うための数学的な理論である[96]。曖昧な言葉を含む命題から構成された“ルール”と実際の状況を与える“事実”を前提として、“結論”を導くプロセスであり、長年に渡り、制御、予測、システムモデリング等幅広い分野で応用され、その効果が確認されている[97][98]。ファジィ推論の利用例として、水本[96]は車の制御を挙げている。人間が先行車との衝突を避けるために持っている思考や判断は、「車間距離が 24m で、スピードが 78km/h であるならば、83 度の角度でブレーキを踏む」といった正確な形ではなく、「車間距離が小さくて、スピードが速いならば、ブレーキをかなり強く踏む」といった大雑把な形で行っている。これをファジィ推論の規則にあてはめると、図 5-21 に示すような規則と関数で示すことが出来る。ここで、曖昧性を伴う下線部のことをファジィ集合といい、ファジィ規則として表現することにより定量的に扱うことが可能となる。先行車との車間距離が 30m、スピードが 60km/h の場合、規則 1 において、「小さい」というファジィ集合を推論として扱うためのシンプルなグラフを作成することにより、0~1 の値による適合度を定めることが出来る。ここでは車間

距離:30m のため、0.78 という適合度を定めることが出来、同様に「速い」というファジィ集合に対してグラフを作成することで、スピード:60 kmのため 0.56 という適合度を定めることが出来る。そして、2 つの適合度の小さい方の 0.56 によってブレーキの「強さ」を設定することが出来る。規則 2 に対しても同様の作業を行うと、0.22 というブレーキの「強さ」を設定することが出来る。最後に、2 つの規則により得られた結果を統合する。ここでは、「ブレーキを強くする」規則の 0.56 という値から、「ブレーキを弱くする」規則の 0.22 を引いて、0.34 という値が算出される。

- ⊕ 規則1：車間距離が小さく、スピードが速い ⇒ ブレーキ力を強くする
- ⊕ 規則2：車間距離が大きく、スピードが遅い ⇒ ブレーキ力を弱くする

↓ ファジィ規則として表現

【車間距離：30m、スピード：60km/hの場合】

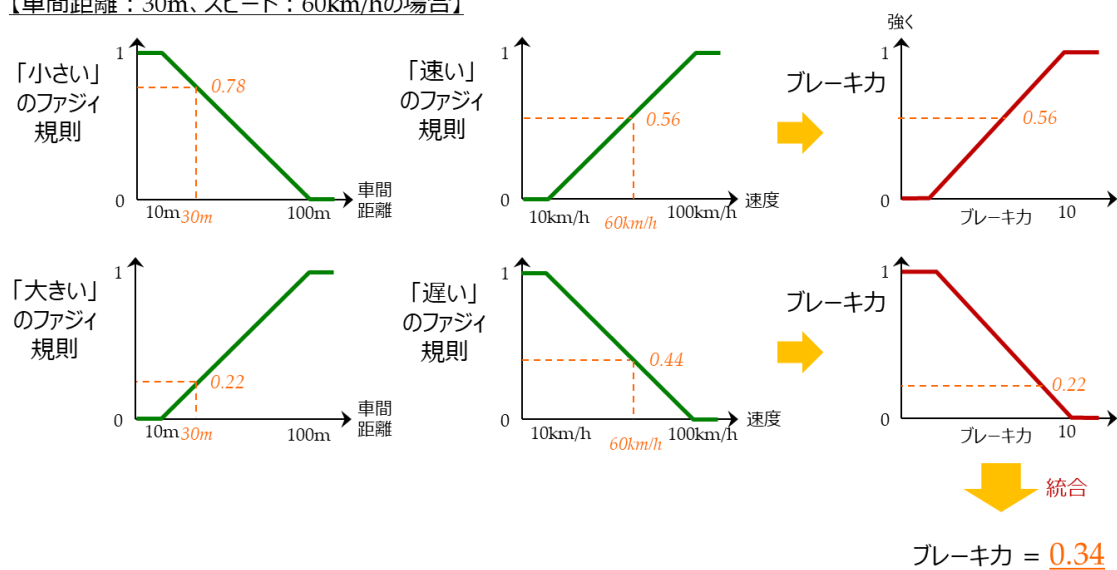


図 5-21. ファジィ推論の適用例 [96] を基に筆者作成



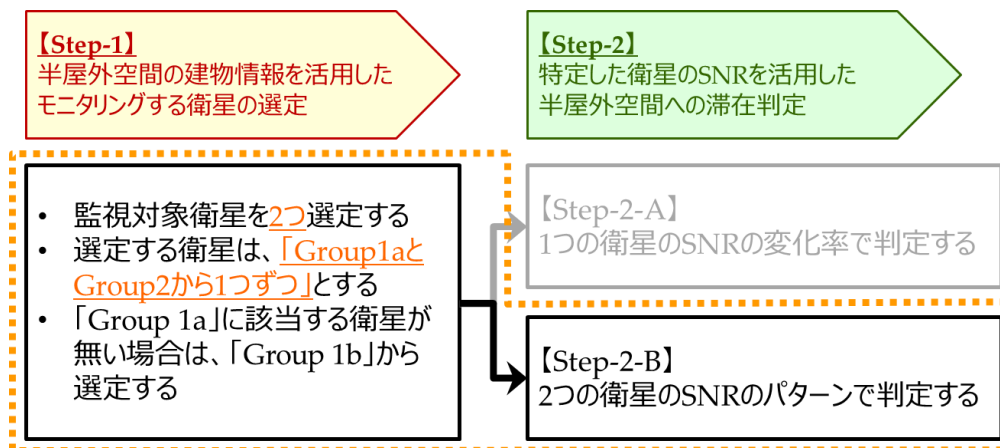


図 5-22. ファジィ推論方式の流れ

本研究では、図 5-20 に示した 2 つの監視対象衛星の SNR のパターンによる半屋外空間検知にファジィ推論を活用するために、「屋外/半屋外」の空間検知手法の設計を行った。本研究では、この方式を“ファジィ推論方式”と定義する。ファジィ推論方式による判定の流れを、図 5-22 に示す。Step-1 では、5-2 で設計した監視対象衛星の選定手法を利用して、監視対象衛星を 2 つ選定する。Step-2 では、選定した 2 つの衛星の SNR から、ファジィ推論を活用して半屋外空間の滞在を検知する。

ファジィ推論を適用するためには、メンバシップ関数とファジィルールを設計する必要がある。メンバシップ関数は、入力値がある集合に対してどの程度適合するかを 0 から 1 の間の数値を解とする関数であり、ファジィルールは、メンバシップ関数によって得られた出力値からどのような推論を導くかを以下の形式で記述したルールである。

$$\text{If } x \text{ is } P \text{ then } y \text{ is } Q \quad (5-7)$$

この時、“x is P”の部分の前件部、“y is Q”の部分の後件部と呼ぶ。受信端末が屋外空間にいるか半屋外空間にいるかを判定するために本研究で設計したメンバシップ関数を図 5-23 および図 5-24 に、ファジィルールを表 5-8 に示す。

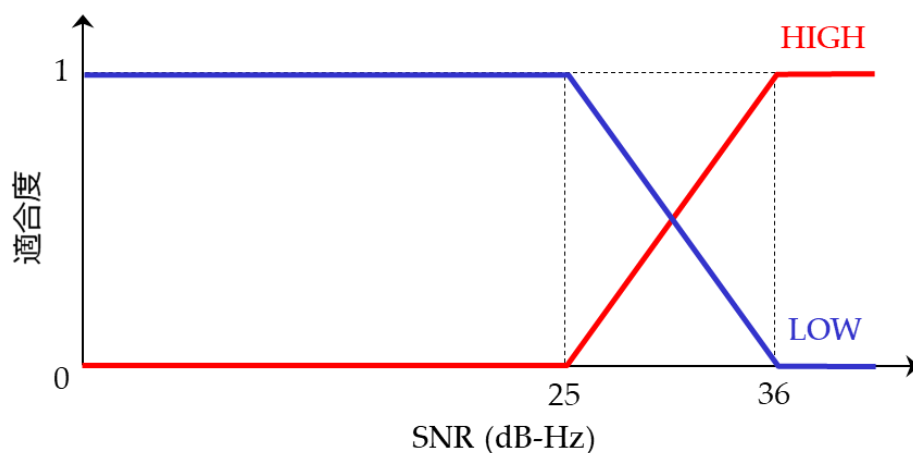


図 5-23. 屋外か半屋外かの判定のためのメンバシップ関数

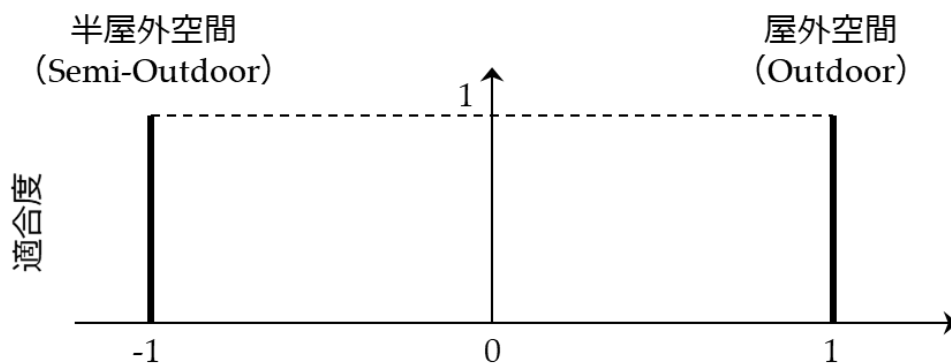


図 5-24. コンテキスト判定のためのメンバシップ関数

図 5-23 は前件部において SNR の値が“高い(HIGH)”か“低い(LOW)”かを推論するためのメンバシップ関数である。SNR の値が“高い(HIGH)”ほど屋外空間に滞在している可能性が高く、“低い(LOW)”ほど半屋外空間にいる可能性が高いと推論する。この関数を作成するためには閾値となる数値が必要となるため、確認実験において監視対象衛星に設定された衛星の SNR の値が、屋外空間と半屋外空間とでどのような値だったかを確認した。確認の結果、受信端末が屋外空間にいる時の SNR の平均が 35.7dB-Hz、半屋外空間にいる時の SNR の平均が 25.8 dB-Hz だったため、図 5-23 における閾値を 36 dB-Hz と 25 dB-Hz に設定した。図 5-24 は、後件部において前件部の結果から推定されるコンテキストの取る値を示している。本研究で求めたいコンテキストは“屋外空間”か“半屋外空間”のどちらかであるため、シングルトン型ファジィ推論を採用し、“1”または“-1”を付与することとした[99]。

表 5-8 は、受信端末が半屋外空間に滞在しているかどうかを判定するために設計したファジィルールであり、図 5-20 で示した内容を 3 つのルールとして記述している。ここで、 $aveSNR_{g1}$  は Group 1 の SNR の 2 秒間平均値、 $aveSNR_{g2}$  は Group 2 の SNR の 2 秒間平均値、 $IC_i$  は想定されるコンテキストを表す。5-3 において、直近 2 秒の SNR 平均値によって半屋外空間滞在判定を行ったことから、本機能においても同様に 2 秒間平均値を使用することとした。例えば、Rule-1 の場合、前件部は  $aveSNR_{g1}$  と  $aveSNR_{g2}$  の値がともに高い場合の状態の推定を示している。この場合、“屋外空間”が想定されるコンテキストのため、1 を値として付与することとした。Rule-2 と Rule-3 の場合、 $aveSNR_{g1}$  と  $aveSNR_{g2}$  の値のいずれかまたは両方が低い場合の推定を示しているため、後件部において  $IC_i$  の値として -1 を付与することとした。

表 5-8. 「屋外/半屋外」の判定のためのファジィルール

No.	Rule
Rule-1	if $aveSNR_{g1}$ is HIGH, and $aveSNR_{g2}$ is HIGH then $IC_i = 1$
Rule-2	if $aveSNR_{g1}$ is LOW, and $aveSNR_{g2}$ is HIGH then $IC_i = -1$
Rule-3	if $aveSNR_{g1}$ is LOW, and $aveSNR_{g2}$ is LOW then $IC_i = -1$

3つのファジィルールから、式(5-8)によって $IC_{total}$ の値が算出される。

$$IC_{total} = \frac{\sum_i \mu_i IC_i}{\sum_i \mu_i} \quad (5-8)$$

ここで、 $\mu_i$ はファジィルールを構成する各ルールにおける適合度を示す。この時、 $IC_{total}$ の値は、

$$-1 \leq IC_{total} \leq 1 \quad (5-9)$$

となるため、最終的なコンテキストの判定は、式(5-10)によって決定することとする。

$$IC_{fin} = \begin{cases} Semi - Outdoor & (-1 \leq IC_{total} < 0) \\ Outdoor & (0 \leq IC_{total} \leq 1) \end{cases} \quad (5-10)$$

例として、2つの入力値 $aveSNR_{g1}$ が=29、 $aveSNR_{g2}$ =33 だった場合の $IC_{fin}$ の算出過程を、図 5-25 に示す。この場合、 $IC_{total}$ の値が-0.43 のため、 $IC_{fin}$ は Semi-Outdoor(半屋外空間)と判定される。

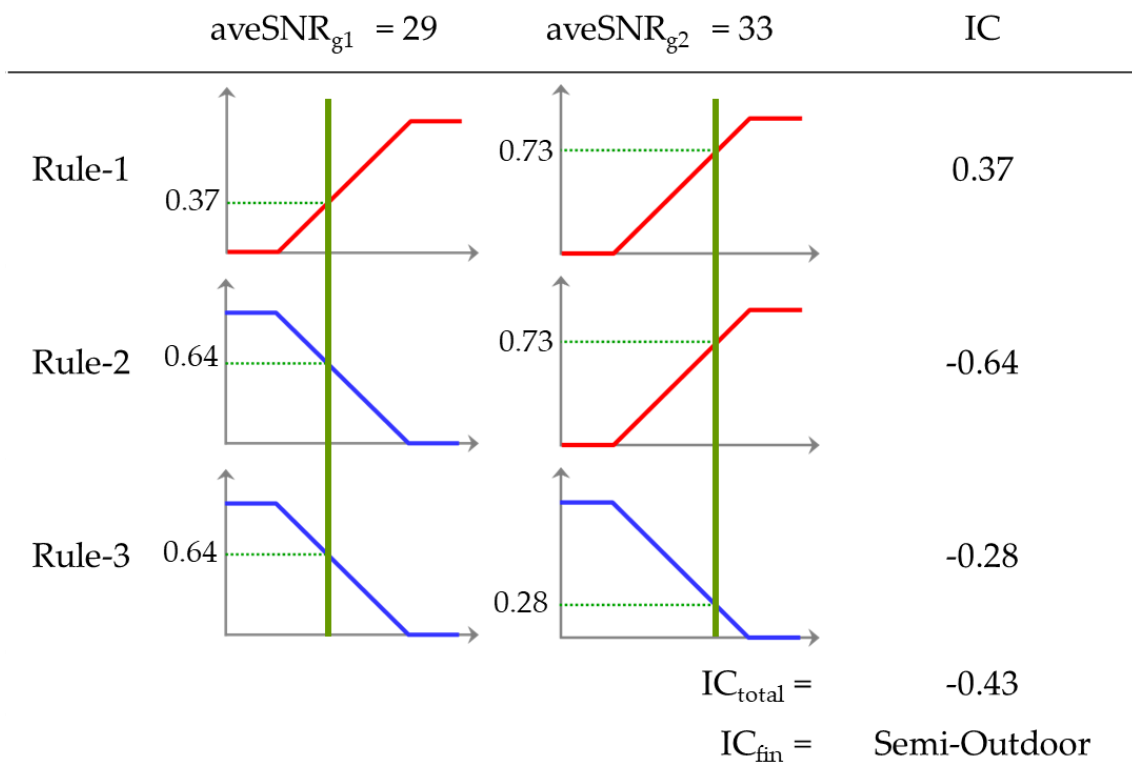


図 5-25. 設計手法に基づく空間判定例

## 5-4-2. ファジィ推論を活用した「屋外/半屋外」の空間検知手法の評価実験

### 5-4-2-1. ファジィ推論方式の評価実験の概要

設計した検知機能の有効性を確認するための評価を行った。評価は、5-3 で設計した SNR 変化率方式と検知精度を比較するために、5-3 で行った評価実験と同じデータを用いることとした。歩行ルートを歩行中に毎秒取得したデータから各秒の  $\text{aveSNR}_{g1}$  及び  $\text{aveSNR}_{g2}$  を算出し、設計した判定式を適用して判定結果が屋外空間なのか半屋外空間なのかを算出した。算出した結果と実際の滞在空間とを比較し、検知精度を算出した。

### 5-4-2-2. ファジィ推論方式による評価実験の結果

各 Site とも同様に評価を実施しているが、代表して Site-C の実験結果を記載する。SNR 変化率方式とは異なり、本手法では 2 つの衛星の信号を使用することから、判定に使用する 2

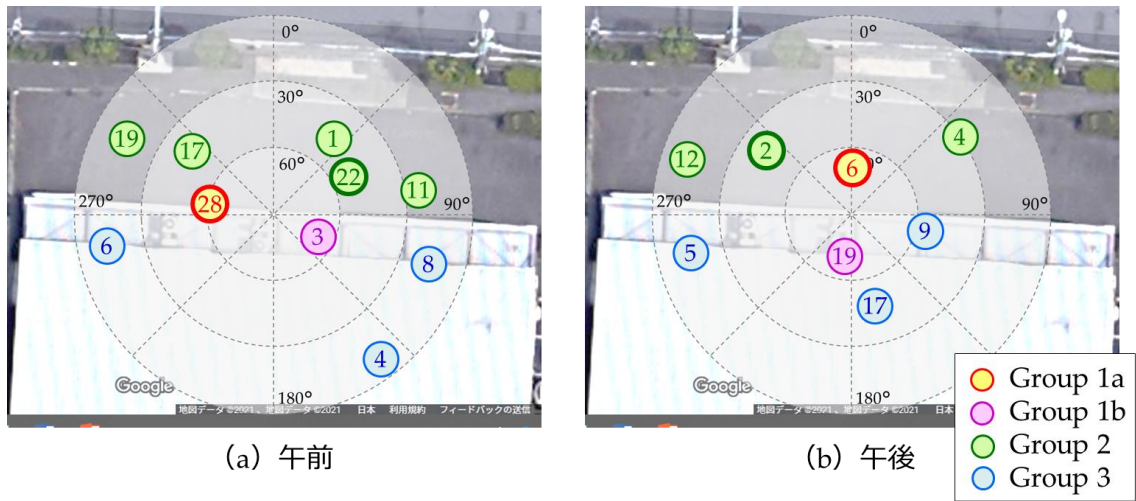


図 5-26. 監視対象衛星の選定例 (Site-C 2m 進入ルート時)

つの衛星を選定する必要がある。NMEA0183 形式で取得した衛星の情報により、Group1 及び Group2 から 2 つの衛星を選定した。午前と午後の 2m 歩行ルート時の選定例を図 5-26 に示す。太円で表示された衛星が Group1 及び Group2 として選定された衛星である。

次に、選定した衛星の各秒の  $aveSNR_{g1}$  及び  $aveSNR_{g2}$  を用いて滞在空間判定を行った午前計測と午後計測の判定結果を、表 5-9 に示す。また、判定結果の基となる各秒の判定式の結果を、図 5-27 に示す。

表 5-9. Site-C における判定結果

			全体			半屋外空間のみ		
歩行 ルート	AM/PM	回数	計測 点数	正解 点数	検知精 度(%)	計測 点数	正解 点数	検知精 度(%)
1m	AM	1	34	30	88.2	20	17	85.0
		2	34	32	94.1	20	18	90.0
		3	34	32	94.1	20	18	90.0
	PM	1	34	14	41.2	20	0	0.0
		2	34	16	47.1	20	2	10.0
		3	34	14	41.2	20	0	0.0
1m 合計			204	138	67.6	120	55	45.8
2m	AM	1	36	33	91.7	22	19	86.4
		2	36	33	91.7	22	20	90.9
		3	36	33	91.7	22	20	90.9
	PM	1	36	23	63.9	22	9	40.9
		2	36	24	66.7	22	10	45.5
		3	36	24	66.7	22	10	45.5
2m 合計			216	170	78.7	132	88	66.7
3m	AM	1	34	32	94.1	20	19	95.0
		2	34	33	97.1	20	19	95.0
		3	34	32	94.1	20	18	95.0
	PM	1	34	30	88.2	20	16	80.0
		2	34	32	94.1	20	18	90.0
		3	34	33	97.1	20	19	95.0
3m 合計			204	192	94.1	120	109	90.8
総計			624	500	80.1	372	252	67.7

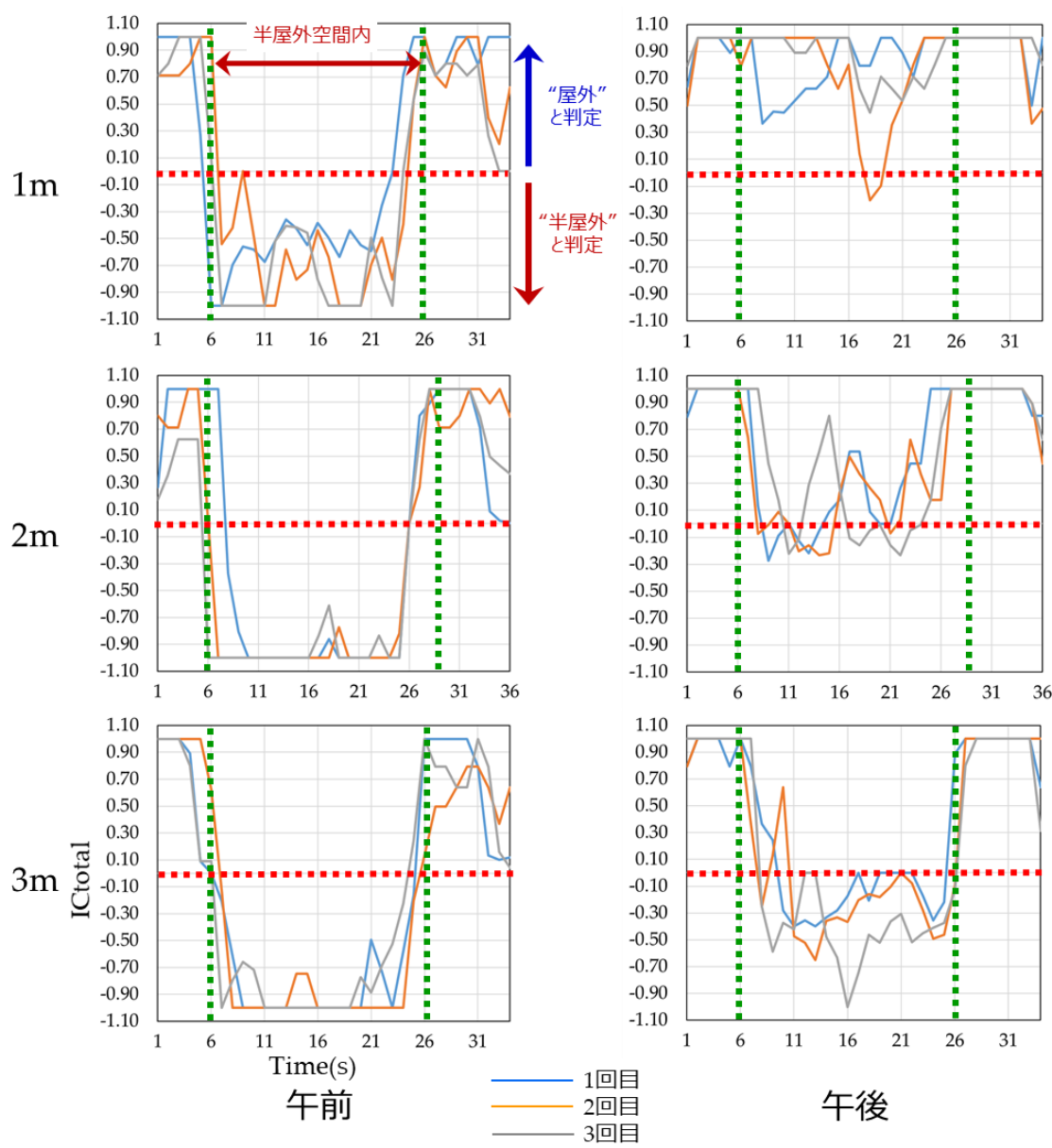


図 5-27. Site-C における判定結果



Site-C、Site-D、Site-E での評価を合計したものを、表 5-10 に示す。

SNR 変化率方式と比較すると、全体で 6.0%、半屋外空間の判定のみでいくと 11.1%の検知精度の向上が見られた。進入ルートごとで比較すると、1m 進入ルートでは 17.2%と大きな改善が見られ、2m 進入ルートでも 15.0%の改善が見られた。3m 進入ルートでは、検知精度はほとんど変わらなかった。

表 5-10. 評価実験結果（全体）

	ファジィ推論を利用した 半屋外空間滞在検知機能						SNR の変化を利用した 半屋外空間滞在検知機能					
	全体			半屋外空間のみ			全体			半屋外空間のみ		
	計測 点数	正解 点数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 点数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 点数	検知 精度 (%)	計測 点数	正解 点数	検知 精度 (%)
1 m 進 入	582	483	83.0	378	293	77.5	582	425	73.0	378	228	60.3
2 m 進 入	618	543	87.9	414	355	85.8	618	496	80.3	414	293	70.8
3 m 進 入	630	591	93.8	426	394	92.5	630	587	93.2	426	386	90.6
全 体 計	1,830	1,617	88.4	1,218	1,042	85.6	1,830	1,508	82.4	1,218	907	74.5

## 5-5. 設計した空間検知手法に対する分析

### 5-5-1. 2つの手法の検知精度の違いに対する分析

表 5-10 に示すとおり、SNR 変化率方式と比較して、ファジィ推論方式では 1m 進入ルートと 2m 進入ルートで検知精度に改善が見られた。原因を分析するために、各計測回における半屋外空間の検知精度を比較した。1m 進入ルートの比較を表 5-11 に、2m 進入ルートの比較を表 5-12 に示す。

表 5-11. 1m 進入ルートにおける半屋外空間の検知精度比較

Site	AM/PM	回数	ファジィ推論方式			SNR 変化率方式		
			計測 点数	正解 点数	検知精 度(%)	計測 点数	正解 点数	検知精 度(%)
C	AM	1	20	17	85.0	20	17	85.0
		2	20	18	90.0	20	16	80.0
		3	20	18	90.0	20	18	90.0
	PM	1	20	0	0.0	20	0	0.0
		2	20	2	10.0	20	0	0.0
		3	20	0	0.0	20	0	0.0
D	AM	1	23	23	100.0	23	22	95.7
		2	23	23	100.0	23	23	100.0
		3	23	23	100.0	23	23	100.0
	PM	1	23	21	91.3	23	0	0.0
		2	23	21	91.3	23	0	0.0
		3	23	17	73.9	23	0	0.0
E	AM	1	20	17	85.0	20	17	85.0
		2	20	19	95.0	20	18	90.0
		3	20	18	90.0	20	18	90.0
	PM	1	20	19	95.0	20	19	95.0
		2	20	18	90.0	20	18	90.0
		3	20	19	95.0	20	19	95.0

表 5-12. 2m 進入ルートにおける半屋外空間の検知精度比較

Site	AM/PM	回数	ファジィ推論方式			SNR 変化率方式		
			計測 点数	正解 点数	検知精 度 (%)	計測 点数	正解 点数	検知精 度 (%)
C	AM	1	22	19	86.4	22	14	63.6
		2	22	20	90.9	22	20	90.9
		3	22	20	90.9	22	20	90.9
	PM	1	22	9	40.9	22	17	77.3
		2	22	10	45.5	22	17	77.3
		3	22	10	45.5	22	16	72.7
D	AM	1	25	24	96.0	25	23	92.0
		2	25	24	96.0	25	22	88.0
		3	25	25	100.0	25	23	92.0
	PM	1	25	25	100.0	25	0	0.0
		2	25	24	96.0	25	0	0.0
		3	25	21	84.0	25	0	0.0
E	AM	1	22	20	90.9	22	20	90.9
		2	22	20	90.9	22	20	90.9
		3	22	21	95.5	22	20	90.9
	PM	1	22	21	95.5	22	20	90.9
		2	22	21	95.5	22	20	90.9
		3	22	21	95.5	22	21	95.5

1m 進入ルート時の各回の結果を比較すると、Site-D の午後の計測時の結果が大きく異なっており、この時の結果の違いが検知精度の違いとなっていることが分かった。また、Site-C の午後の計測ではどちらの手法でも半屋外空間の滞在を検知できなかった。一方、2m 進入ルート時の各回の結果を比較すると、Site-D の午後の計測時でファジィ推論方式のみ正しく検知できていた。逆に、Site-C の午後の計測時は、SNR 変化方式の場合のみ半屋外空間の滞在を検知できていることが分かった。

判定結果の違いの原因を分析するために、Site-D の午後計測の 1m 進入ルート時における監視対象衛星の SNR の変化を確認した。1m 進入ルート時における Group1 と Group2 の SNR の状況を、図 5-28 に示す。この図から、Group1 の衛星は SNR 変化方式で検知されるほどの SNR の減少は見られないが、Group2 の衛星の SNR に減少が見られることで、ファジィ推論方式では半屋外空間の滞在が検知されるケースが増えたことが推測される。同様の事象は、Site-D の午後計測の 2m 進入ルート時からも確認することが出来た(図 5-29)。

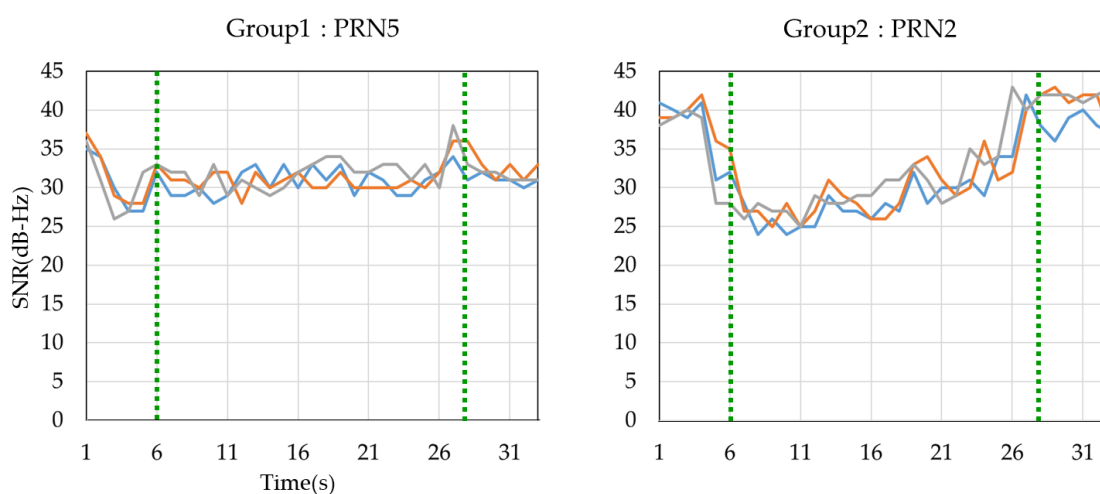


図 5-28. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-D 午後の計測 1m 進入ルート)

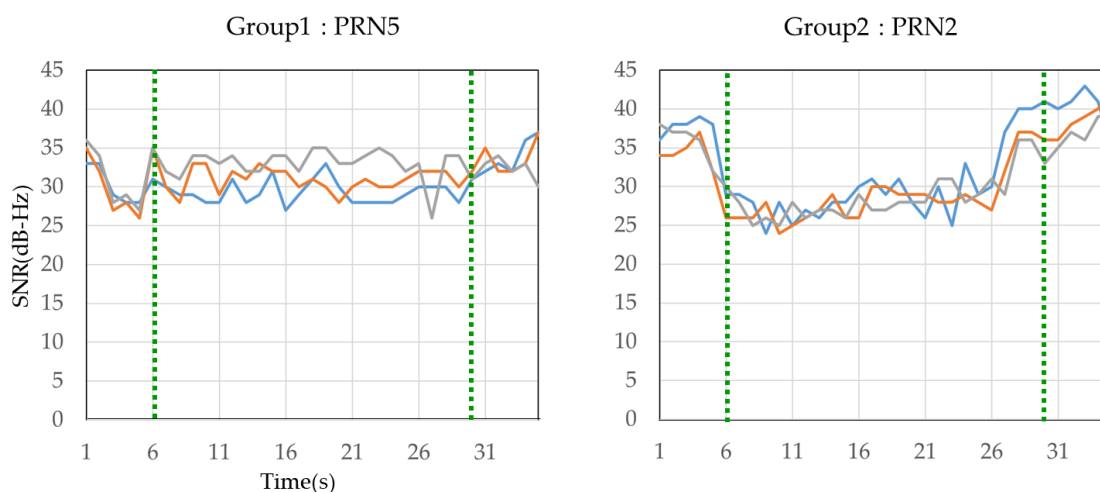


図 5-29. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-D 午後の計測 2m 進入ルート)

次に、SNR 変化率方式の場合のみ半屋外空間の滞在を検知できていた Site-C の午後計測の 2m 進入ルートについても SNR の変化を確認した(図 5-30)。このケースでは、Group1 の衛星が検知に十分な SNR の減少を示しており、SNR 変化方式では半屋外空間への検知判定を行っているにもかかわらず、減少後の SNR の値が大きいためファジィ推論方式では半屋外空間への検知とならなかったことが確認できた。

最後に、ファジィ推論方式でも SNR 変化方式でも半屋外空間への検知を判定できなかった Site-C の午後計測の 1m 進入ルートについても同様に SNR の変化を確認した(図 5-31)。Group1 の衛星の SNR が高い値のままほとんど減少していないため、ファジィ推論方式でも検知することが出来なかったと考えられる。

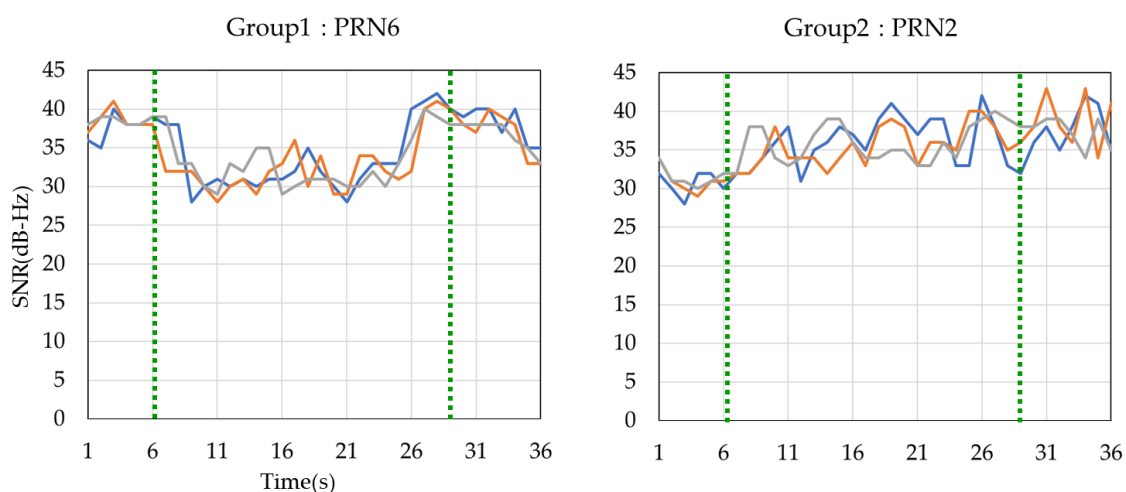


図 5-30. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-C 午後の計測 2m 進入ルート)

また、3m 進入ルートでは高い検知精度をどちらの手法でも得られているが、検知精度が100%とはならないケースも多い。その点についても確認を行った。Site-C 午後計測 3m 進入ルートでの監視対象衛星の SNR の変化を、図 5-32 に示す。半屋外空間への進入や半屋外空間からの退出に伴い SNR は大きく変化しているが、実際の進入や退出から数秒前後して値が変化することがあり、このことが 100%にならない理由と推測できる。

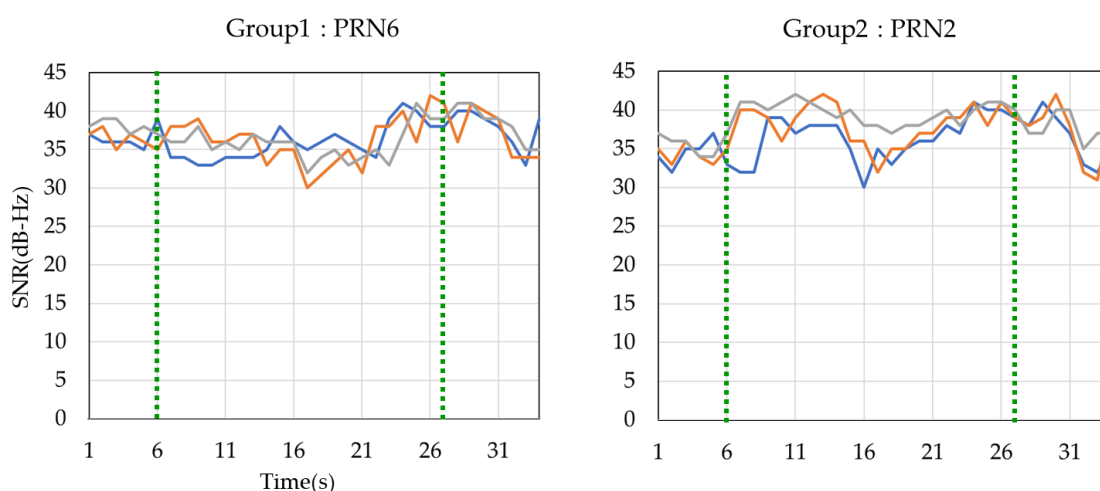


図 5-31. Group1 と Group2 の衛星の SNR の状況 (Site-C 午後の計測 1m 進入ルート)

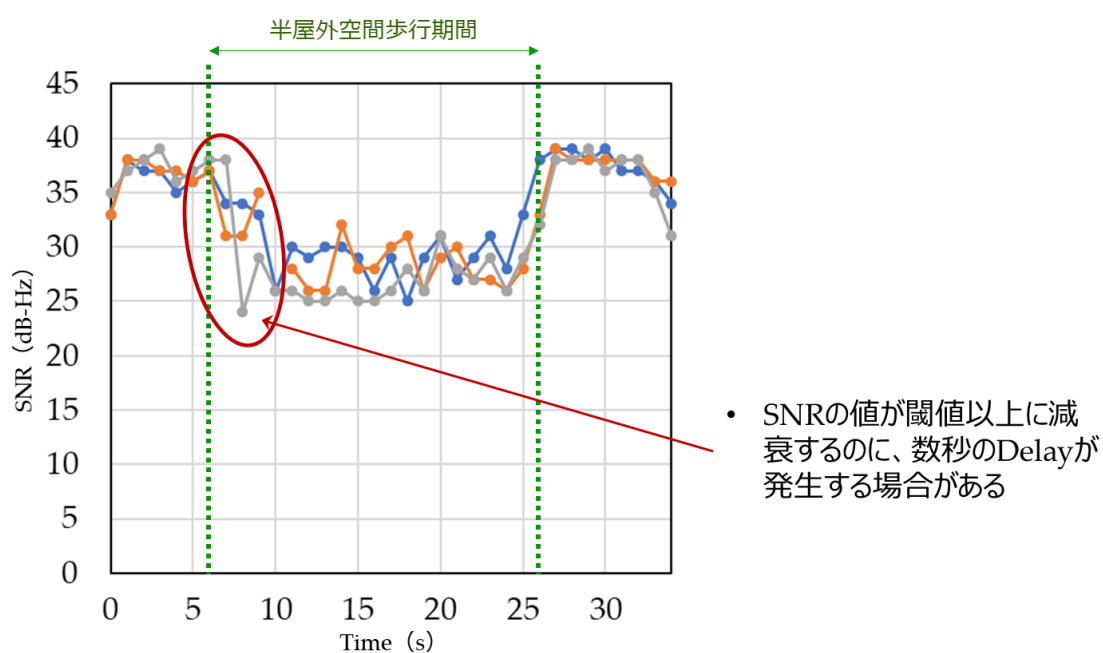


図 5-32. 監視対象衛星の SNR の変化 (Site-C 午後の計測 3m 進入ルート)

これらの比較により、SNR 変化率方式では以下のケースの場合に半屋外空間への検知が出来なくなることを確認できた。

- ① 半屋外空間進入時に、監視対象衛星の SNR に減衰が見られない場合は、半屋外空間への進入を検知できない
- ② 半屋外空間進入時に、監視対象衛星の SNR がある程度減衰するが設定した閾値まで減衰しない場合は、半屋外空間への進入を検知できない

2 つのケースのうち、②に関しては、ファジィ推論方式の場合は監視対象の衛星を 2 つにしていることにより、半屋外空間への滞在を検知できる場合があると推測できる。一方で、①のケースに関しては、どちらの手法でも検知が難しいと考えられる。

## 5-5-2. 設計した閾値に対する妥当性の確認

### 5-5-2-1. SNR 変化率に対して設計した閾値の妥当性の確認

SNR 変化率方式では、既存手法で使用されていた“SNR の 20%の減衰”を提案手法でも閾値として採用した。ここでは、実験結果を用いて他の閾値を採用した場合との検知精度の違いについて確認した。本研究で採用した“20%”に加え、減衰の割合を低くした“18%”“16%”“14%”のケースと、減衰の割合を大きくした“22%”“24%”“26%”のケースを用意し、どのタイミングで検知判定が行われるかを比較した。対象の実験データとして、Site-C 及び Site-D の午前計測時の 1m 進入ルート、2m 進入ルートの結果全 12 回のデータを使用した。3m 進入ルート及び Site-E は検知精度が非常に高かったため、この確認の対象から除外することとした。

確認事例の 1 つとして、Site-D 午前計測 2m 進入ルート 2 回目の検証結果を、表 5-13 に示す。ここでは、半屋外空間から屋外に退出する際に、27s の時点で SNR 変化率が 1.16 (16%増)となっている。この時、閾値が“20%”や“18%”の場合は屋外滞在判定とはならないが、閾値を“16%”や“14%”に設定しているとこの時点で屋外滞在与判定されることになる。また、別の事例として、Site-D 午前計測 1m 進入ルート 2 回目の検証結果を、表 5-14 に示す。ここでは、実際の進入よりも早い 3s の時点で SNR 変化率が 0.80 (20%減)となるが、それ以上の減衰は発生しなかった。そのため、閾値を“22%”“24%”“26%”に設定していると、半屋外空間への検知が判定されないままとなる。

表 5-13. SNR 変化率閾値妥当性確認の例 (Site-D 午前計測 2m 進入ルート 2 回目)

Time (秒)	SNR 変化率	正解	閾値						
			20%	18%	16%	14%	22%	24%	26%
2	1.08	O	O	O	O	O	O	O	O
3	1.01	O	O	O	O	O	O	O	O
4	0.93	O	O	O	O	O	O	O	O
5	0.96	O	O	O	O	O	O	O	O
6	1.00	SO	O	O	O	O	O	O	O
7	0.71	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
8		SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
9		SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
25	1.09	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
26	1.10	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
27	1.16	SO	SO	SO	O	O	SO	SO	SO
28	1.25	SO	O	O	O	O	O	O	SO
29	1.48	O	O	O	O	O	O	O	O
30		O	O	O	O	O	O	O	O
31		O	O	O	O	O	O	O	O
32		O	O	O	O	O	O	O	O
正解数		16	14	14	13	13	14	14	15

青網掛け:「屋外」として正しく判定できた時

黄網掛け:「半屋外」として正しく判定できた時

O:Outdoor を示し、SO:Semi-Outdoor を示す



表 5-14. SNR 変化率閾値妥当性確認の例 (Site-D 午前計測 1m 進入ルート 2 回目)

Time (秒)	SNR 変化率	正解	閾値						
			20%	18%	16%	14%	22%	24%	26%
2	0.90	O	O	O	O	O	O	O	O
3	0.80	O	SO	SO	SO	SO	O	O	O
4	0.82	O	SO	SO	SO	SO	O	O	O
5	0.84	O	SO	SO	SO	SO	O	O	O
6	0.85	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
7	0.85	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
8	0.87	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
9	0.87	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
25	1.01	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
26	1.05	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
27	1.05	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
28	0.96	SO	SO	SO	SO	SO	O	O	O
29	1.23	O	O	O	O	O	O	O	O
30	1.57	O	O	O	O	O	O	O	O
31		O	O	O	O	O	O	O	O
32		O	O	O	O	O	O	O	O
正解数		16	13	13	13	13	8	8	8

青網掛け:「屋外」として正しく判定できた時

黄網掛け:「半屋外」として正しく判定できた時

O:Outdoor を示し、SO:Semi-Outdoor を示す

表 5-15. SNR 変化率の閾値の妥当性確認結果（全体）

全正解数	閾値						
	20%	18%	16%	14%	22%	24%	26%
192	163	162	162	160	158	156	153
順位	1	2	2	4	5	6	7

全 12 回の比較検討時の正解数をカウントし、閾値ごとの正解数を比較した。カウントした結果を、表 5-15 に示す。結果として、今回の設計で採用した“20%”が最も正解数が多い結果となったが、“18%”や“16%”とも結果はほとんど変わらなかった。一方、閾値を“24%”や“26%”と大きくすると、検知精度は低下することが確認できた。

#### 5-5-2-2. 進入角度閾値に対して設計した閾値の妥当性の確認

5-2 で設計した手法では、半屋外空間に対する進入角度閾値を、半屋外空間の奥行き $\frac{1}{2}$ を基準に設定した。奥行き $\frac{1}{2}$ を基準とした場合、評価実験での 54 回の計測において 51 回の計測で Group1a の衛星が存在し、監視対象衛星として選定された。残りの 3 回の計測では Group1a の衛星が存在せず、Group1b の衛星が選定された。

進入角度閾値は、奥行き $\frac{1}{2}$ の基準を長くするとその分進入角度閾値の角度は小さくなり、奥行き $\frac{1}{2}$ の基準を短くすると進入角度閾値の角度は大きくなる。進入角度閾値を大きくすると仰角の高い衛星の存在が求められるため、存在しない可能性が高くなる。Group1a の衛星が存在しないケースが多くなると、Group1b や Group2 の衛星が選定されるケースが増え、検知精度に影響を与える可能性がある。本研究では、進入角度閾値を変化させた場合の、監視対象衛星の選定のされ方の違いを確認した。

#### 【進入角度閾値の値を小さくした場合】

進入角度閾値は、奥行き $\frac{1}{2}$ の基準を長く設定するとその分進入角度閾値の角度は小さくなる。Site-D を例にすると、奥行き $\frac{1}{2}$ の基準を  $\frac{1}{2}D$  から  $\frac{2}{3}D$  に変更した場合、進入角度閾値は  $56^\circ$  から  $48^\circ$  へと小さくなる(図 5-33)。Site-D での実験の場合、18 回の計測中 3 回は Group1a に該当する衛星が存在せず Group1b の衛星が監視対象衛星として選定されたが、進入角度閾

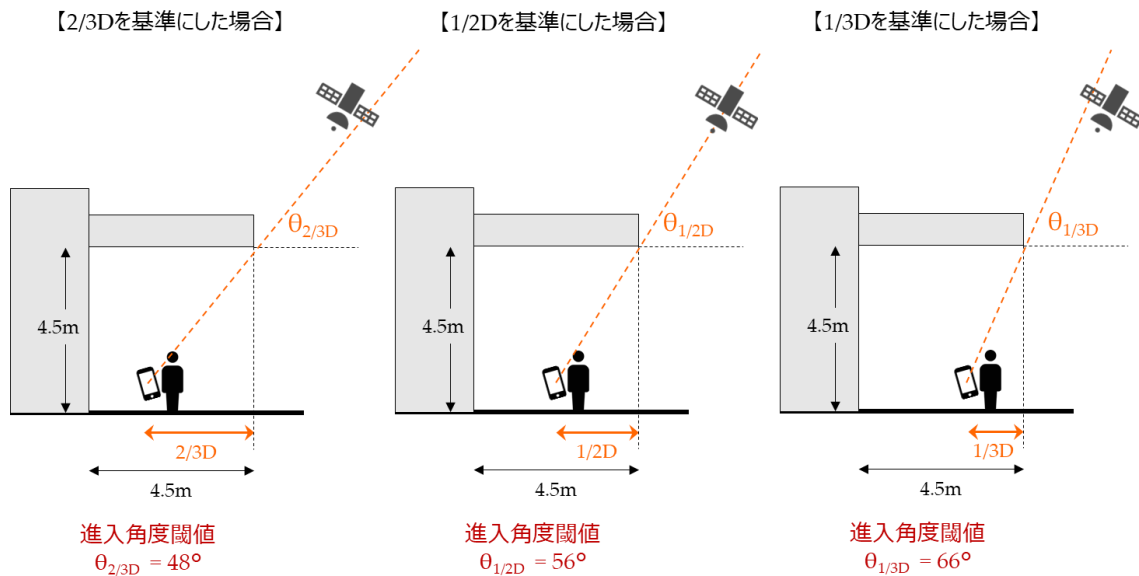


図 5-33. 奥行き基準の違いによる進入角度閾値の違い (Site-D の場合)

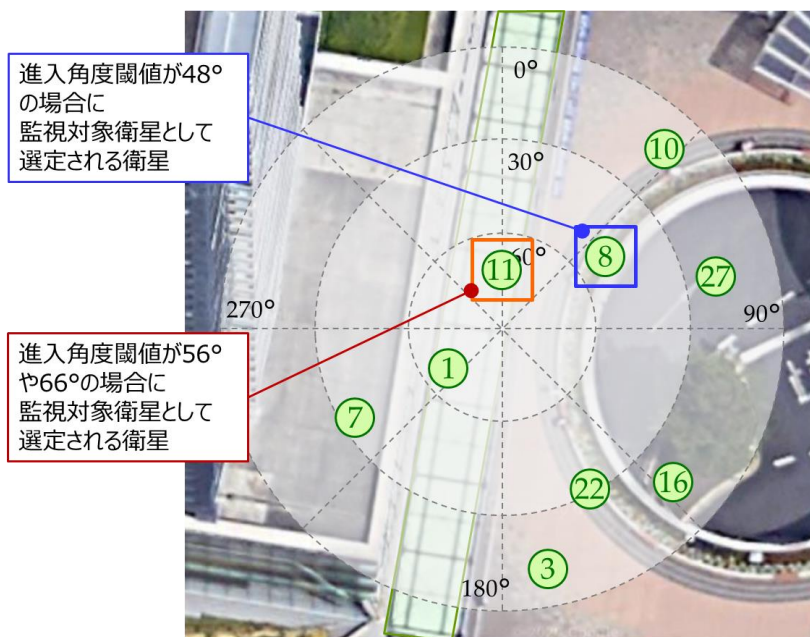


図 5-34. 進入角度閾値を変更した場合の監視対象衛星の選定の違い (Site-D の場合)

値を  $48^\circ$  とすると、図 5-34 に示すとおり仰角が  $51^\circ$  の衛星 (PRN = 8) が選定されることになる。しかしながら、この場合仰角の高くない衛星が選定されるため、図 5-35 に示すとおり半屋外空間に進入しても SNR の減衰が発生しない。仰角が高くない衛星が選定されると検知精度

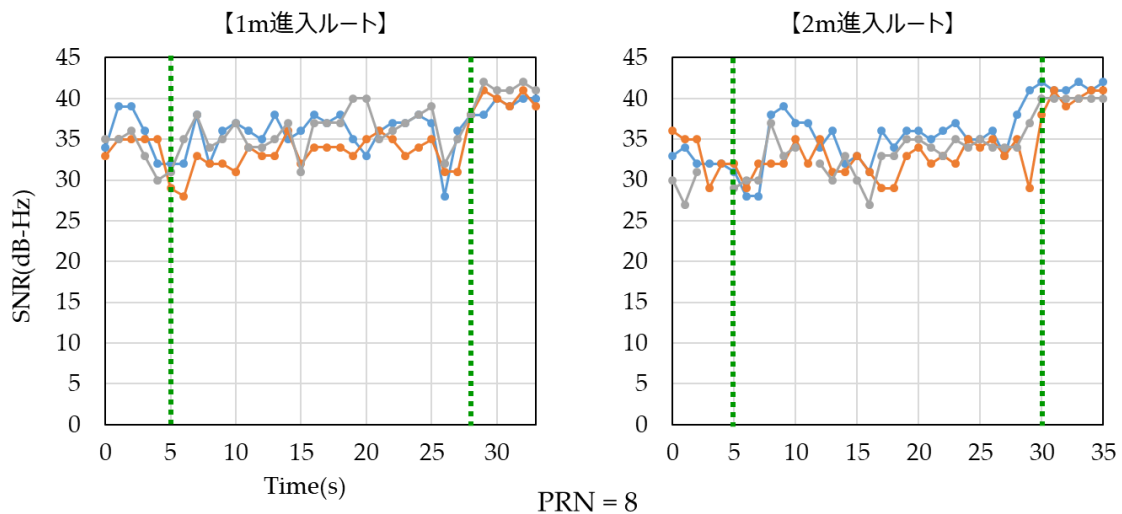


図 5-35. 仰角の高くない衛星が監視対象衛星に選定された場合の SNR の変化例

が低くなる可能性があるため、奥行き基準を 2/3D 等に設定し、進入角度閾値を小さくするのは適切でないと考えられる。

#### 【進入角度閾値の値を大きくした場合】

進入角度閾値は、奥行き基準を長く設定するとその分進入角度閾値の角度は小さくなる。Site-D を例にすると、奥行き基準を 1/2D から 1/3D に変更した場合、進入角度閾値は  $56^\circ$  から  $66^\circ$  へと大きくなる(図 5-33)。Site-C、Site-D、Site-E で奥行き基準を 1/3D に設定した場合の監視対象衛星の選定のされ方を比較すると表 5-16 のようになり、Group1b の衛星が選定される場合が増える結果となった。Group1b の衛星は半屋外空間の上部の屋根や庇の影響ではなく建物の影響によって SNR が減衰している可能性もある衛星のため、検知の安定性の面で課題があり、本研究では選定の優先順位を Group1a より低く設定している。以上のことから、Group1b の衛星が監視対象衛星として多く選定されるような進入角度閾値の設定も好ましくないと考えられる。

表 5-16. 進入角度閾値を変更した場合の監視対象衛星の選定の違い

	進入角度閾値:1/2D が基準の場合		進入角度閾値:1/3D が基準の場合		
	Group1a の衛星が選定される回数	Group1b の衛星が選定される回数	Group1a の衛星が選定される回数	Group1b の衛星が選定される回数	Group2 の衛星が選定される回数
Site-C	18	0	5	9	4
Site-D	15	3	6	12	0
Site-E	18	0	18	0	0
合計	51	3	29	21	4

以上の確認より、進入角度閾値の算出に必要となる半屋外空間の奥行きの設定は、1/3D や 2/3D に設定すると検知精度や検知の安定性の面でマイナスの影響を与える可能性がある。本研究で行った実験では奥行きの設定を 1/2D にした場合にほとんどのケースで Group1a の監視対象衛星を選定できており、この基準の設定は妥当であったと考えられる。

## 第 6 章

# 「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の設計と評価 実験

### 6-1. 「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の概要

第 5 章で半屋外空間の滞在を検知する手法として 2 つの方式 (SNR 変化率方式、ファジィ推論方式) の設計を行い、評価実験を行った。結果として、ファジィ推論方式の方が検知精度が高いことを確認することが出来た。そこで、本章では、ファジィ推論方式を採用しながら、適用範囲を拡大し、屋外空間/半屋外空間/屋内空間の 3 つの空間コンテキストを検知する手法の設計を行った。さらに、3 つの空間コンテキストを含む実験箇所での評価実験を行い、検知精度を確認した。

設計する建物情報と信号対雑音比を活用した「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の全体像を、図 6-1 に示す。空間検知手法は、これまでと同様に 2 つのステップで構成される。Step-

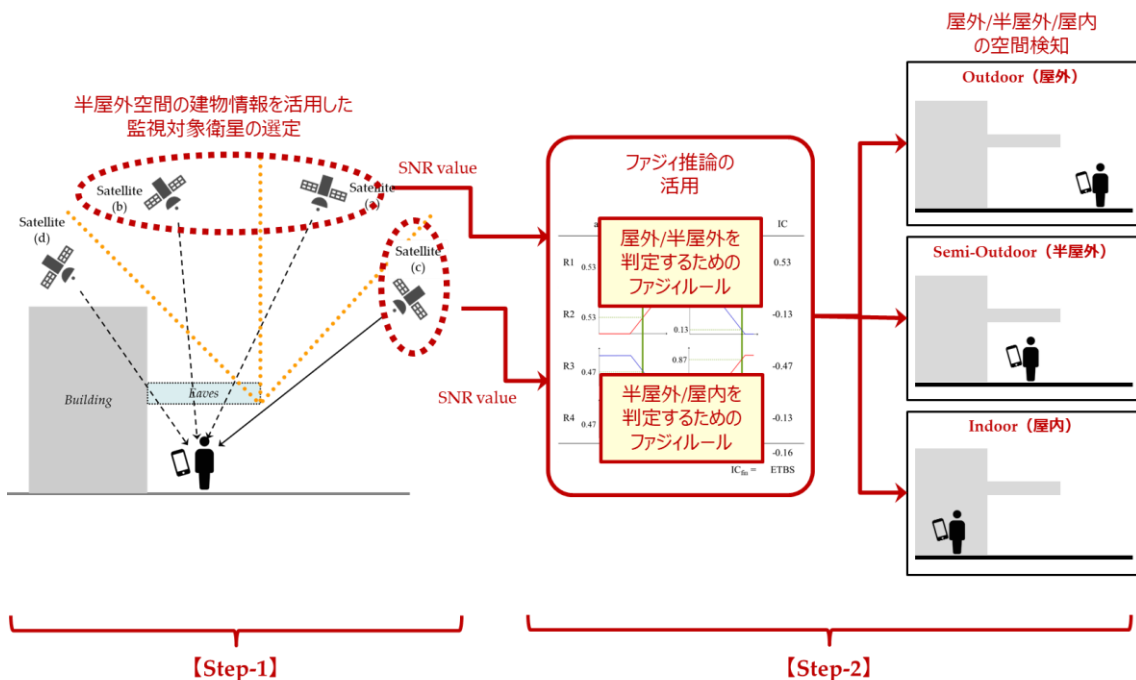


図 6-1. 「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の全体像

1 に関しては、第 5 章で設計した内容と同一となる。半屋外空間の空間形状から軌道上の衛星を 4 つのグループに分類し、そのうち、Group 1 と Group 2 に属する衛星から 1 つずつ衛星を選定し、SNR の値をモニタリングする対象とした。Step-2 では、取得した Group1 と Group 2 の SNR の値を利用して、ファジィ推論による空間検知の判定を行った。第 5 章では「屋外空間」と「半屋外空間」の 2 種類の空間検知の判定手法を設計したが、本章では 2 種類に「屋内空間」を加えた 3 種類の空間検知を目的とした。そのために、第 5 章で設計した手法を 3 種類の空間検知が可能となるように、6-2 で改良した。

## 6-2. 空間情報と GPS 信号対雑音比を活用した「屋外/半屋外/屋内」の空間検知手法の設計

受信端末が 3 つの空間コンテキストのどこにいるかを判定するために本研究で設計した判定フローを、図 6-2 に示す。ここで、aveSNRg1 は、Group 1 から選定された衛星の計測点における SNR の平均値、aveSNRg2 は、Group 2 から選定された衛星の計測点における SNR の平均値を示す。Group1 の衛星の SNR がとても低い場合に受信端末が屋外にいるケースや、反対に SNR がとても高い場合に受信端末が屋内にいるケースは想定しづらいため、本研究では、屋外空間か半屋外空間かを判定するためのファジィルールと、半屋外空間か屋内空間かを判定するためのファジィルールの 2 種類を設計した。どちらのファジィルールを利用するかは、aveSNRg1 の値によって決定することとした。分岐の閾値は、第 5 章で設計したファジィルールでの aveSNRg1 の値の下限が 25dB-Hz だったため、その値を踏襲することとした。

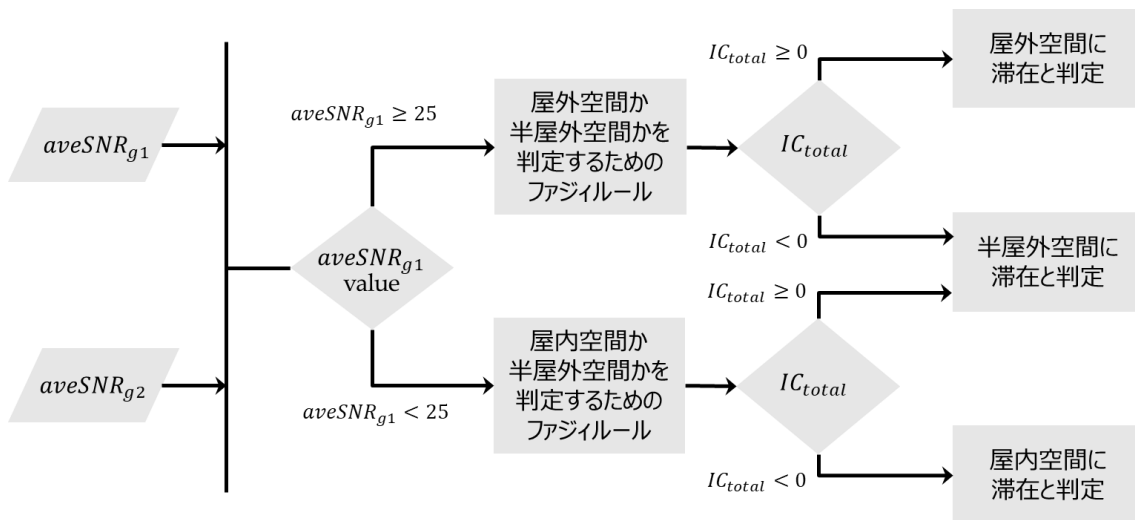


図 6-2. 空間検知の判定フロー

「屋外空間か半屋外空間かを判定するためのファジィルール」は、第 5 章で設計した方式をそのまま採用することとした。次に、「屋内空間か半屋外空間かを判定するためのファジィルール」を構成するメンバシップ関数を図 6-3 及び 6-4 に、ファジィルールを表 6-1 に示す。第 5 章では、屋外空間か半屋外空間かを判定するためのファジィルールとして上限が 36dB-Hz、下限が 25 dB-Hz によるメンバシップ関数を設計したため、ここではメンバシップ関数の上限を 25 dB-Hz、下限を 14dB-Hz とした。14dB-Hz 以上の場合、値が上がるにつれて NLOS と LOS の混在の割合が増すことを図 6-3 は示している。また、SNR の状態として“MIDDLE”と“LOW”の 2 つを設定し、それぞれの適合度を示している。図 6-4 は、後件部において前件部の結果から推定されるコンテキストの取る値を示している。このファジィルールで求めたい空間コンテキストは屋内空間か半屋外空間のどちらかであるため、屋外空間と半屋外空間の判定のときと同様に、1 または-1 を付与することとした。表 6-1 は、検知対象である受信端末が屋内空間にいるのか半屋外空間にいるのかを判定するために設計したファジィルールである。第 5 章では 3 つのルールで構成したが、ここでは 4 つのルールによる構成とした。Gao ら[28]や Seco-Granados ら[31]によって屋内に進入すると SNR が大きく減衰することが報告されており、Group1、Group2 の衛星に関係なく、SNR が大きく減衰する場合は屋内にいると判定するファジィルールとした。



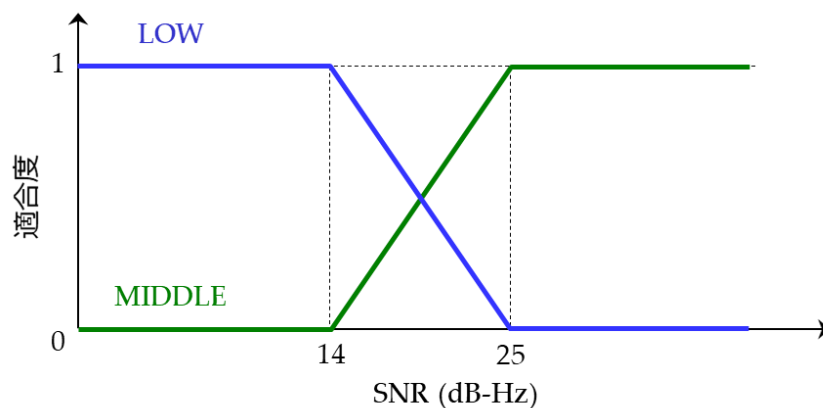


図 6-3. 半屋外/屋内の判定のためのメンバシップ関数（前件部）

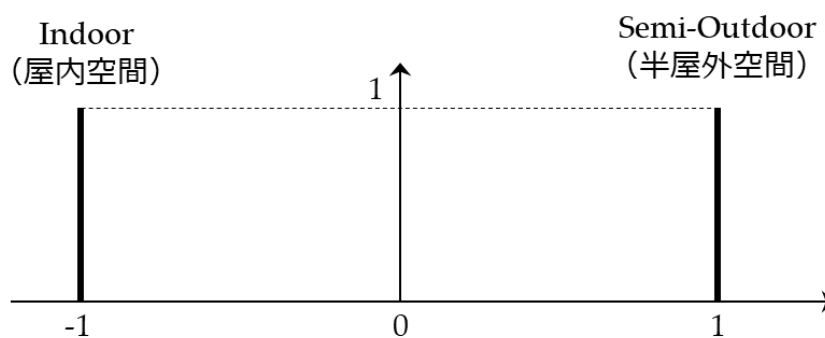


図 6-4. 半屋外/屋内の判定のためのメンバシップ関数（後件部）

表 6-1. 半屋外/屋内の判定のためのファジィルール

ID	Contents
Rule-11	If aveSNRg1 is MIDDLE, and aveSNRg2 is MIDDLE then $IC_i = 1$
Rule-12	If aveSNRg1 is MIDDLE, and aveSNRg2 is LOW then $IC_i = -1$
Rule-13	If aveSNRg1 is LOW, and aveSNRg2 is MIDDLE then $IC_i = -1$
Rule-14	If aveSNRg1 is LOW, and aveSNRg2 is LOW then $IC_i = -1$

屋外空間と半屋外空間の判定の場合と同様に、 $IC_{total}$  は

$$-1 \leq IC_{total} \leq 1 \quad (6-1)$$

となり、最終的なコンテキスト  $IC_{fin}$  の判定は、式(6-2)によって決定することとする。

$$IC_{fin} = \begin{cases} Indoor & (-1 \leq IC_{total} < 0) \\ Semi - Outdoor & (0 \leq IC_{total} \leq 1) \end{cases} \quad (6-2)$$


### 6-3. 空間情報と GPS 信号対雑音比を活用した「屋外/半屋外/屋内」 の空間検知手法の評価実験

#### 6-3-1. 評価実験の概要

設計した検知手法の有効性を確認するために、屋外空間／半屋外空間／屋内空間を有する場所を2箇所抽出し、評価実験を行った。評価実験実施箇所の概要を図 6-5 に示す。

Site-F	Site-G
高さ = 4.5m、奥行き = 4.5m	高さ = 4.6m、奥行き = 4.0m
進入角度閾値 : 56°	進入角度閾値 : 59°
側面の開放方向 : from 10° to 190°	側面の開放方向 : from 200° to 20°






図 6-5. 評価実験実施箇所

1 つの実験箇所について P1～P6 の計測点を設定し、計測点ごとに 5 秒静止して NMEA0183 形式で記録される各衛星の SNR、Elevation 及び Azimuth の値をスマートフォンアプリケーションを利用して取得した。各計測点の断面方向の位置関係を、図 6-6 に示す。P1 及び P2 は屋外の計測点であり、P2 のほうが建物に近い計測点である。P3 及び P4 は半屋外空間内の計測点である。P3 と P4 では空間的な特徴は変わらない。P5 及び P6 は屋内の計測点である。P5 の方が半屋外空間からエントランスに近い計測点である。計測端末は、第 5 章と同様にスマートフォン機種 A (Fujitsu Arrows m4、OS version: Android 7.1.1、チップセット: Qualcomm Snapdragon 410) を使用し、地上から 1.2m の高さで体の前でスマートフォンを水平に保持した状態で計測した。計測点ごとに 3 回計測を行い、さらに、時間に伴う衛星の配置の変化を考慮するため、これらの計測を各サイトに対して午前と午後にそれぞれ行った。計測回数は、合計で 72 回である。

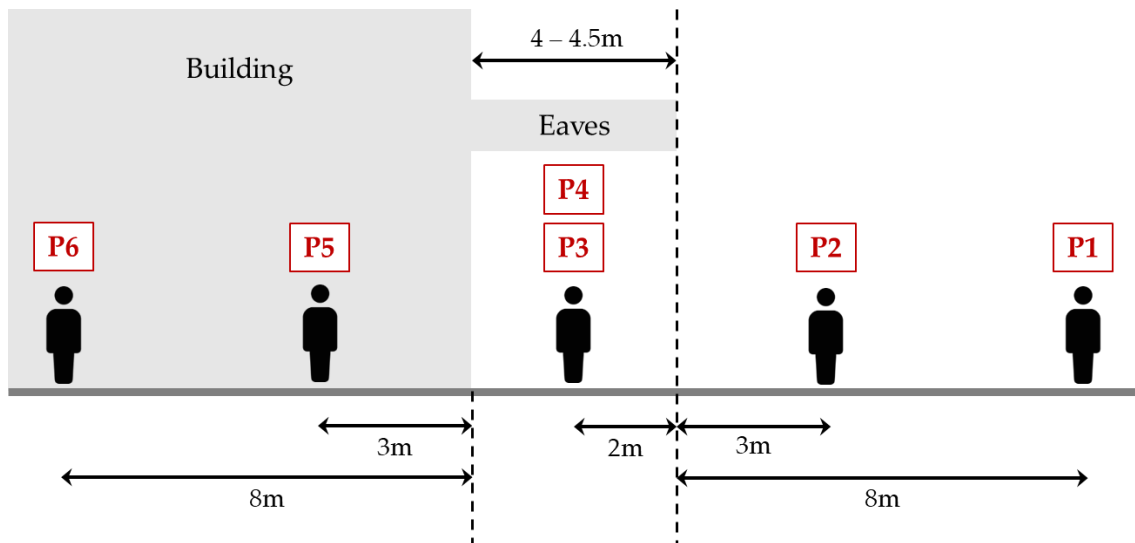


図 6-6. 断面方向から見た実験箇所における計測点

### 6-3-2. 評価実験の結果

まず、設計した手法に従って監視対象とする衛星の選定を行った。実験実施時の衛星の配置例として、Site-F での実験時の午前と午後の衛星配置を図 6-7 に示す。円内の数字は衛星の PRN コードを示す。衛星の配置は時刻とともに常に変化するため、選定される衛星も時刻とともに変化するが、図 6-7(a) の時点では、Group 1 の衛星として、Group 1a の衛星が存在しないため Group 1b の PRN=2 が選定された。Group 2 の衛星として、Group 2 のなかで最も仰角が高い PRN=6 が選定された。

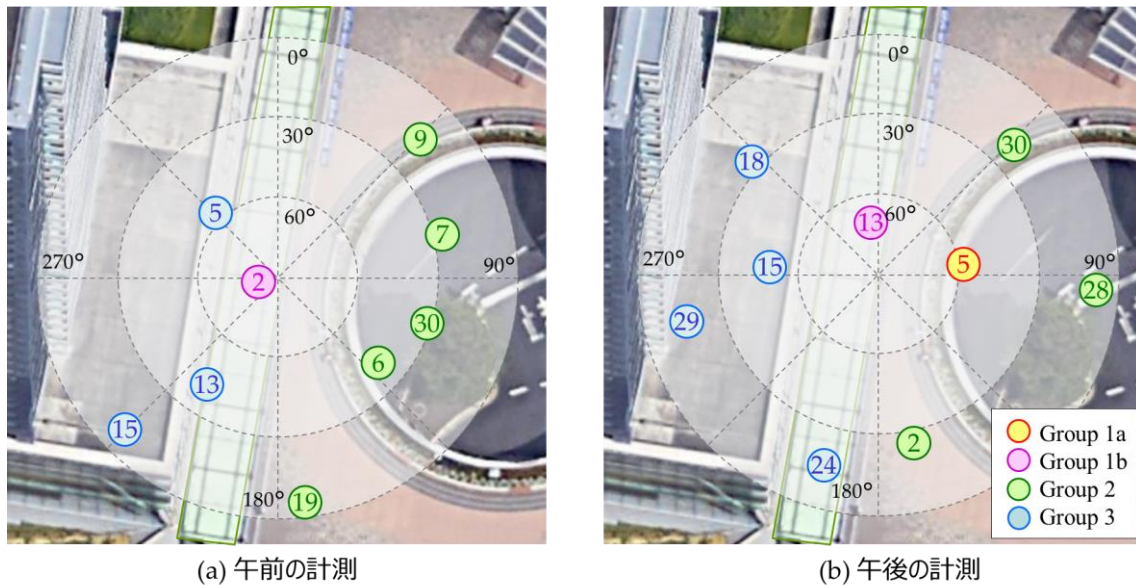


図 6-7. Site-F における評価実験時の衛星配置例

次に、各計測点で計測した Group 1 と Group 2 の衛星の SNR の値から平均値  $\text{aveSNRg1}$  及び  $\text{aveSNRg2}$  を算出した。P1 から P6 に分けて算出した結果を、表 6-2 に示す。なお、P3 と P4 は計測点の空間的な特徴が同じなため、一緒に集計している。屋外の計測点である P1 と P2 ではどちらも平均で 35dB-Hz 以上となり、十分大きな値であった。半屋外空間内の計測点である P3 と P4 では、Group 1 の衛星は平均値が大きく低下し、半屋外空間の滞在に伴う信号の減衰の影響が表れているが、最大値が 35.4dB-Hz とあまり信号の減衰が感じられない計測回もあった。また、標準偏差が他の計測点よりも大きく、計測回ごとのばらつきが見られることがわかる。Group 2 の衛星に関しては、屋外の計測点からやや数値が低下しているものの、あまり半屋外空間の滞在に伴う信号の減衰が起きていないことがわかる。屋内の計測点である P5 と P6 では、Group 1 と Group 2 の衛星がともに大きく数値が低下している。一方で、P5 に関しては、Group 2 の衛星は 25dB-Hz 以上を計測する回もあった。

表 6-2. 各計測点における SNR 平均値

aveSNR value (dB-Hz)	P1		P2		P3 and P4		P5		P6	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
平均	36.5	35.1	36.9	36.2	27.6	34.9	21.2	23.2	19.9	19.7
最大	40.6	40	38.4	39.6	35.4	40.6	24.2	26.6	24	21.2
最小	33.4	33	35.4	33.8	20.8	28.8	19	20.2	16	18.2
標準偏差	2.02	1.95	1.11	1.55	3.92	2.92	1.57	1.86	2.45	0.92

G1:Group 1、G2:Group 2 を指す

次に、算出した aveSNRg1 及び aveSNRg2 を基に、設計した判定フローに従って滞在空間の判定を行った。計測点ごとの判定結果を、表 6-3～表 6-8 に示す。また、検知精度をまとめたものを、表 6-9 に示す。全体では 93.1% の検知精度となり、屋外の計測点である P1 及び P2、屋内の奥側の計測点である P6 では全ての計測回で正しい判定が行われた。一方で、半屋外空間内の計測点である P3 及び P4、屋内のエントランス側の計測点である P5 では、正しく判定されない計測回があった。

表 6-3. 判定結果 (P1 (屋外) の場合)

【屋外/半屋外のファジィルールによる判定】										
			aveSNR (dB-Hz)			Score			ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule-1	Rule-2	Rule-3		
			1a	1b						
Site-F	AM	1		35.4	33.4	0.76	0.06	0.06	0.75	屋外
		2		36.2	34	0.82	0	0	1	屋外
		3		36.2	35.4	0.95	0	0	1	屋外
	PM	1	40.6		40	1	0	0	1	屋外
		2	39		38.2	1	0	0	1	屋外
		3	36		34.4	0.86	0	0	1	屋外
Site-G	AM	1	38.6		34.6	0.87	0	0	1	屋外
		2	37.2		34.2	0.84	0	0	1	屋外
		3	35.8		35.6	0.96	0.02	0.02	0.93	屋外
	PM	1	33.6		33	0.73	0.22	0.22	0.25	屋外
		2	33.4		35	0.76	0.24	0.09	0.40	屋外
		3	35.6		33.8	0.8	0.04	0.04	0.84	屋外
									試験回数	12
									成功回数	12
									検知精度	100%

※ 赤字は、誤判定を表す。

表 6-4. 判定結果 (P2 (屋外) の場合)

【屋外/半屋外のファジィルールによる判定】										
			aveSNR (dB-Hz)			Score			ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule-1	Rule-2	Rule-3		
			1a	1b						
Site-F	AM	1		35.6	33.8	0.8	0.04	0.04	0.84	屋外
		2		35.4	36.4	0.95	0.06	0	0.89	屋外
		3		35.4	36.4	0.95	0.06	0	0.89	屋外
	PM	1	38.4		39.6	1	0	0	1	屋外
		2	38		38.4	1	0	0	1	屋外
		3	38		34.2	0.84	0	0	1	屋外
Site-G	AM	1	37.8		35.8	0.98	0	0	1	屋外
		2	37.2		35.8	0.98	0	0	1	屋外
		3	35.4		34.8	0.89	0.06	0.06	0.78	屋外
	PM	1	37.6		36.2	1	0	0	1	屋外
		2	37.4		35.8	0.98	0	0	1	屋外
		3	36.6		36.6	1	0	0	1	屋外
									試験回数	12
									成功回数	12
									検知精度	100%

※ 赤字は誤判定を表す。



表 6-5. 判定結果 (P3 (半屋外空間) の場合)

【屋外/半屋外のファジィルールによる判定】										
			aveSNR (dB-Hz)			Score			ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule-1	Rule-2	Rule-3		
			1a	1b						
Site-F	AM	3		27.2	35.4	0.2	0.8	0.06	-0.62	半屋外
	PM	1	35.4		32.8	0.71	0.06	0.06	0.73	屋外
		2	32.4		34.2	0.67	0.33	0.16	0.16	屋外
		3	30.8		34.6	0.53	0.47	0.13	-0.07	半屋外
Site-G	AM	1	27.8		37.4	0.26	0.75	0	-0.49	半屋外
		2	27.8		39.6	0.26	0.75	0	-0.49	半屋外
		3	28.4		40.6	0.31	0.69	0	-0.38	半屋外
	PM	2	25.2		34	0.02	0.82	0.18	-0.97	半屋外
		3	25.8		34	0.07	0.82	0.18	-0.86	半屋外

【半屋外/屋内のファジィルールによる判定】											
			aveSNR (dB-Hz)			Score				ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule -11	Rule -12	Rule -13	Rule -14		
			1a	1b							
Site-F	AM	1		23.4	35	0.86	0	0.15	0	0.71	半屋外
		2		24.2	34.6	0.93	0	0.07	0	0.85	半屋外
Site-G	PM	1	23.8		33.8	0.89	0	0.11	0.78	0.42	半屋外
試験回数										12	
成功回数										10	
検知精度										83.3%	

※ 赤字は誤判定を表す。

表 6-6. 判定結果 (P4 (半屋外空間) の場合)

【屋外/半屋外のファジィルールによる判定】										
			aveSNR (dB-Hz)			Score			ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule-1	Rule-2	Rule-3		
			1a	1b						
Site-F	PM	1	33.6		28.8	0.35	0.22	0.22	-0.12	半屋外
		2	31.8		30.2	0.47	0.38	0.38	-0.24	半屋外
		3	29.6		29	0.36	0.36	0.58	-0.44	半屋外
Site-G	AM	1	31.6		35.8	0.6	0.4	0.02	0.18	屋外
		2	29.2		38.2	0.38	0.62	0	-0.24	半屋外
		3	29.2		37.4	0.38	0.62	0	-0.24	半屋外
	PM	1	27.6		35.4	0.24	0.76	0.06	-0.55	半屋外
		2	26		36.8	0.09	0.91	0	-0.82	半屋外
		3	26.6		38.8	0.15	0.86	0	-0.71	半屋外

【半屋外/屋内のファジィルールによる判定】											
			aveSNR (dB-Hz)			Score				ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule -11	Rule -12	Rule -13	Rule -14		
			1a	1b							
Site-F	AM	1		20.8	33.2	0.62	0	0.38	0	0.24	半屋外
		2		20.8	33.6	0.62	0	0.38	0	0.24	半屋外
		3		21.8	34.8	0.71	0	0.29	0	0.42	半屋外
試験回数										12	
成功回数										11	
検知精度										91.7%	

※ 赤字は誤判定を表す。

表 6-7. 判定結果 (P5 (屋内) の場合)

【半屋外/屋内のファジィルールによる判定】											
			aveSNR (dB-Hz)			Score				ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule -11	Rule -12	Rule -13	Rule -14		
			1a	1b							
Site-F	AM	1		19	21.6	0.46	0.31	0.55	0.31	-0.44	屋内
		2		23	23.8	0.82	0.11	0.18	0.11	0.34	半屋外
		3		20	23	0.55	0.18	0.44	0.18	-0.2	屋内
	PM	1	24.2		20.2	0.56	0.44	0.07	0.07	-0.02	屋内
		2	21.4		21	0.64	0.36	0.33	0.33	-0.23	屋内
		3	21		21.2	0.64	0.35	0.36	0.35	-0.25	屋内
Site-G	AM	1	22.4		25	0.76	0	0.24	0	0.53	半屋外
		2	19.4		26.2	0.49	0	0.51	0	-0.02	屋内
		3	19		26.6	0.46	0	0.55	0	-0.09	屋内
	PM	1	21		22	0.64	0.27	0.36	0.27	-0.18	屋内
		2	22		22	0.73	0.27	0.27	0.27	-0.06	屋内
		3	21		21.6	0.64	0.31	0.36	0.31	-0.21	屋内
										試験回数	12
										成功回数	10
										検知精度	83.3%

※ 赤字は誤判定を表す。

表 6-8. 判定結果 (P6 (屋内) の場合)

【半屋外/屋内のファジィルールによる判定】											
			aveSNR (dB-Hz)			Score				ICtotal	ICfin
			Group 1		Group 2	Rule -11	Rule -12	Rule -13	Rule -14		
			1a	1b							
Site-F	AM	1		19	18.8	0.44	0.46	0.44	0.55	-0.53	屋内
		2		22	19.2	0.47	0.53	0.27	0.27	-0.39	屋内
		3		20	19	0.46	0.55	0.46	0.46	-0.52	屋内
	PM	1	23.8		19	0.46	0.55	0.11	0.11	-0.25	屋内
		2	18		19	0.36	0.36	0.46	0.55	-0.58	屋内
		3	20		18.2	0.38	0.55	0.38	0.46	-0.57	屋内
Site-G	AM	1	16		21.2	0.18	0.18	0.66	0.35	-0.73	屋内
		2	17		20.4	0.27	0.27	0.58	0.42	-0.65	屋内
		3	17.2		20	0.29	0.29	0.55	0.46	-0.63	屋内
	PM	1	21		20.6	0.6	0.4	0.36	0.36	-0.31	屋内
		2	22		21	0.64	0.36	0.27	0.27	-0.18	屋内
		3	22		20	0.55	0.46	0.27	0.27	-0.30	屋内
										試験回数	12
										成功回数	12
										検知精度	100.0%

※ 赤字は誤判定を表す。

表 6-9. 提案手法に基づく検知精度の結果

		計測点数	正解点数	検知精度
屋外空間	P1	12	12	100.0%
	P2	12	12	100.0%
半屋外空間	P3 and P4	24	21	87.5%
屋内空間	P5	12	10	83.3%
	P6	12	12	100.0%
	Total	72	67	93.1%

#### 6-4. 準天頂衛星を利用した場合の効果の検証

日本では天頂付近に常に 1 機の衛星を配置させる準天頂衛星 (Quasi-Zenith Satellite System : QZSS) の運用が始まっており、QZSS の軌道の関係で東アジア、東南アジア、オーストラリア等の地域でも QZSS の利用が可能である[100][101]。本研究で設計した検知機能は SNR の値を使用する衛星の仰角が高い場合に半屋外空間進入に伴う SNR の減少を利用していることから、QZSS を利用することで検知精度の向上を見込むことが出来る可能性がある。そこで、QZSS の SNR の値が半屋外空間内でどのように取得できるか、検証を行った。

検証は、QZSS に対応したスマートフォン機種 B (機種名 : XPeria XZ2、OS Version : Android 8.0、チップセット : Qualcomm Snapdragon 845) を用い、Site-D の 1m 進入ルート、2m 進入ルート、3m 進入ルートで第 5 章で実施した歩行検証と同様の検証を行った (図 6-8)。

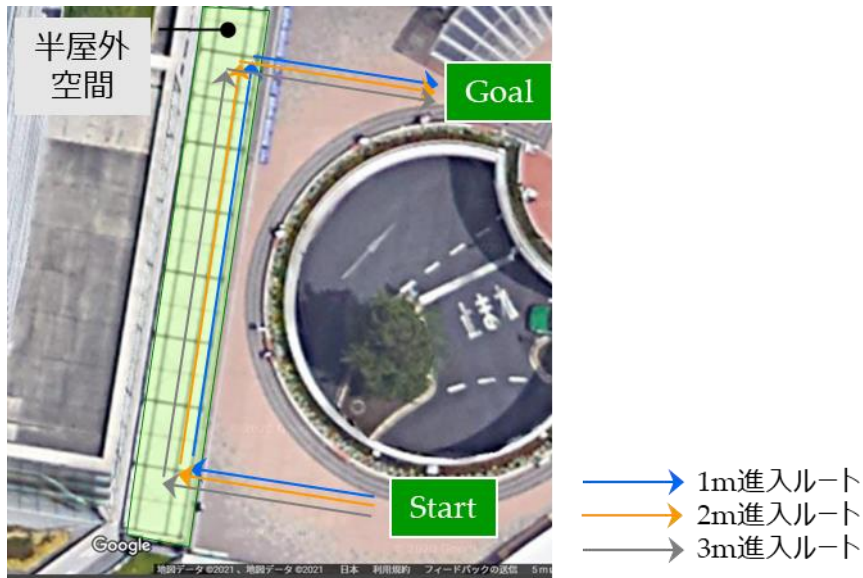


図 6-8. QZSS を利用した歩行検証実施箇所 (Site-D)

計測結果を、図 6-9 に示す。どの計測回でも仰角が  $75^\circ$  以上の位置に QZSS が存在し、半屋外空間への進入に伴い SNR が大きく減少することを確認することが出来た。一方で、今回の検証では以下の点で設計した検知手法に利用するには課題があることが分かった。

- ① 半屋外空間に深く進入すると、QZSS の信号を受信端末が受信できなくなり、SNR が算出されない時間が続くケースが散見された
- ② GPS 衛星と比較すると屋外空間にいる場合でも SNR の値がやや低く、設計した検知機能のアルゴリズムだと半屋外空間に滞在していると判定される可能性がある

QZSS を利用する場合は SNR 変化方式を併用すれば進入が浅い場合でも半屋外空間への滞在を検知できると考えられるが、上述①のような事象が存在するため、検知手法の改良が必要になると考えられる。

また、今回の検証で得られた事象が他の QZSS 対応端末でも発生する事象かどうかは、検証端末を増やして確認していく必要がある。

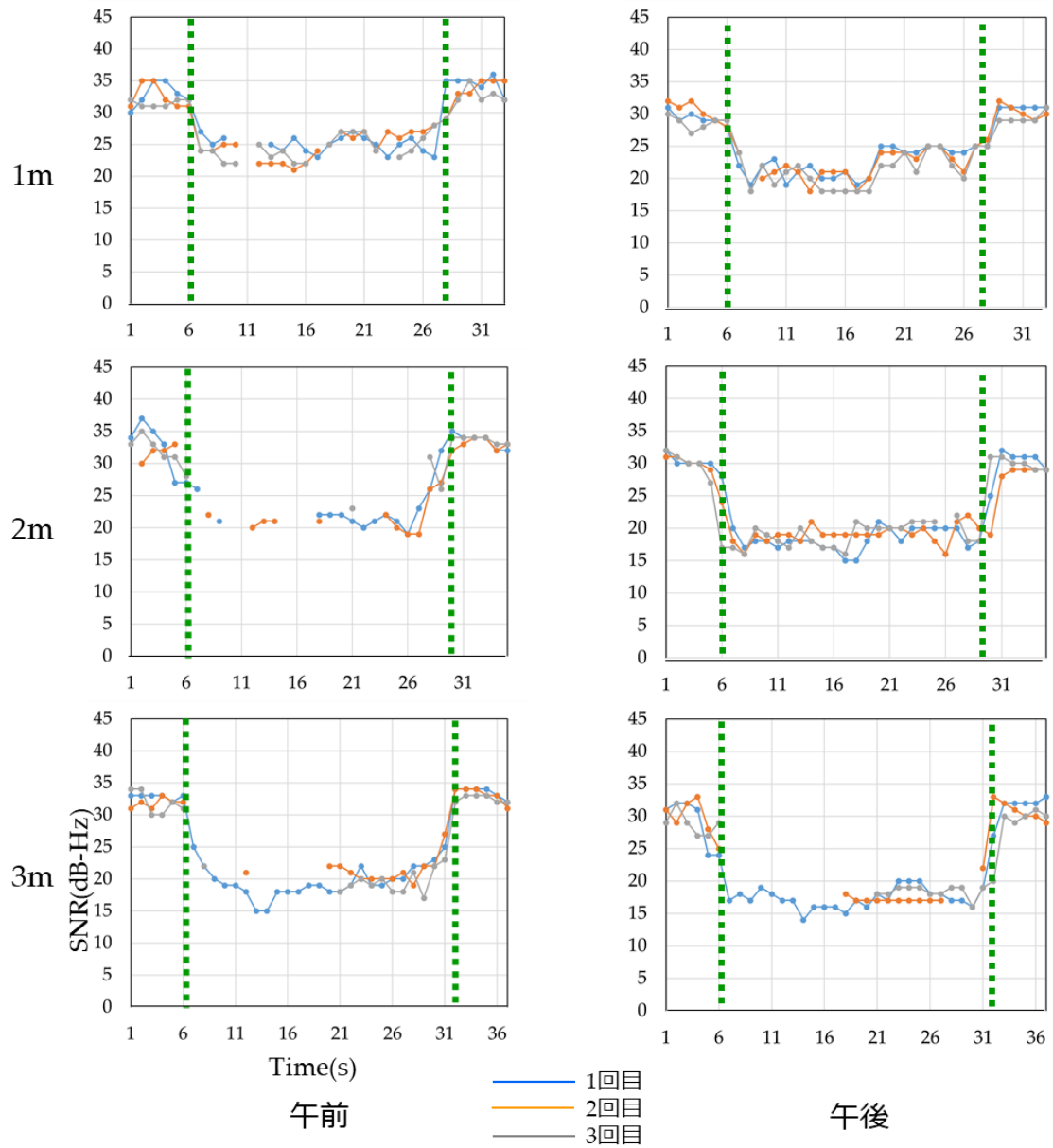


図 6-9. QZSS を利用した場合の半屋外空間の SNR の変化

## 6-5. 要求に対する充足度の確認

第3章において、半屋外空間を含むシームレス測位に対する要求として7つの要求を抽出した。ここでは、7つの要求に対して、設計した検知機能が要求を満たしているかについて、充足度の確認を行った。確認を行った結果を、表6-10に示す。

表 6-10. 抽出した要求に対する充足度の確認

項番	要求	充足度の確認
R-1	半屋外空間の滞在を正確に検知できること	✓ 設計した空間検知手法によって、87.5%の検知精度で半屋外空間の空間検知を判定することが出来た
R-2	屋外空間／半屋外空間／屋内空間の3分類の滞在空間判定ができること	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 第6章で3分類を対象にした空間検知手法を設計したことにより、この要求を満たすことが出来た</li> <li>✓ 93.1%の検知精度で、「屋外/半屋外/屋内」の空間検知を判定出来た</li> </ul>
R-3	他の空間でも適用可能な手法であること	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 半屋外空間の建物情報を活用し、空間検知に必要な衛星を選定する手法を設計した。</li> <li>✓ 常に変化する衛星の配置や半屋外空間の形状に影響を受けることなく必要な衛星を選定することが可能なため、他の空間へも適用可能な汎用性のある手法であるといえる</li> </ul>
R-4	迅速に滞在空間判定及び自己位置算出ができること	✓ 5秒程度実際の移動からズレが発生するが、本研究におけるシームレス測位システムの提供対象を考えると支障のない範囲といえる
R-5	精度の良い自己位置算出ができること	✓ 自己位置算出機能は本研究の対象外としているが、高い検知精度で滞在空間を判定することで、精度の良い測位手段選択による自己位置算出を支援できているといえる
R-6	保持する端末は作業に影響しないこと	✓ 光センサー等は用いずスマートフォンのGPSのみで判定を行っているため、作業には影響しないといえる
R-7	測位のために別途対象者が動作する必要がないこと	✓ 設計した検知機能はスマートフォンのGPSのみで判定を行い、対象者に特に操作を強いることなく判定を行うことが出来る



この中で、R-5の充足度の確認を行うにあたり、半屋外空間におけるGPSの主張精度を確認した。確認は、第5章の評価実験におけるSite-Cを対象に行い、歩行検証時の図6-10の各点における検証に用いたスマートフォンアプリケーションが算出する主張精度を記録することにより実施した。P1は半屋外空間に1m進入した地点、P2及びP3はそれぞれ2m、3mに進入した地点である。各計測点で記録された主張精度の平均値を、表6-11に示す。アプリケーションが算出する主張精度はアプリケーションによって算出方法が異なり、厳密には実際の位置との相関関係も確認する必要があるが、半屋外空間に進入するにつれてGPSの信号を直接受信できないNLOSの状態が進み、主張精度が低下することを確認できた。屋内測位の精度は高精度な専用測位システムも登場しているが費用面とトレードオフの面があり、比較的廉価なBLEビーコンを用いた場合の測位精度は数m程度と言われている。図2-9に示すように、筆者らがBLEベースの三点測位によるプロトタイプアプリケーションで実験した場合の測位精度は4.2mであり、仮にこのシステムを半屋外空間内に構築すれば、半屋外空間の判定によって採用する測位手段が切り替わり、GPS測位単体よりも高精度なシームレス測位環境を提供できることになることを確認した。

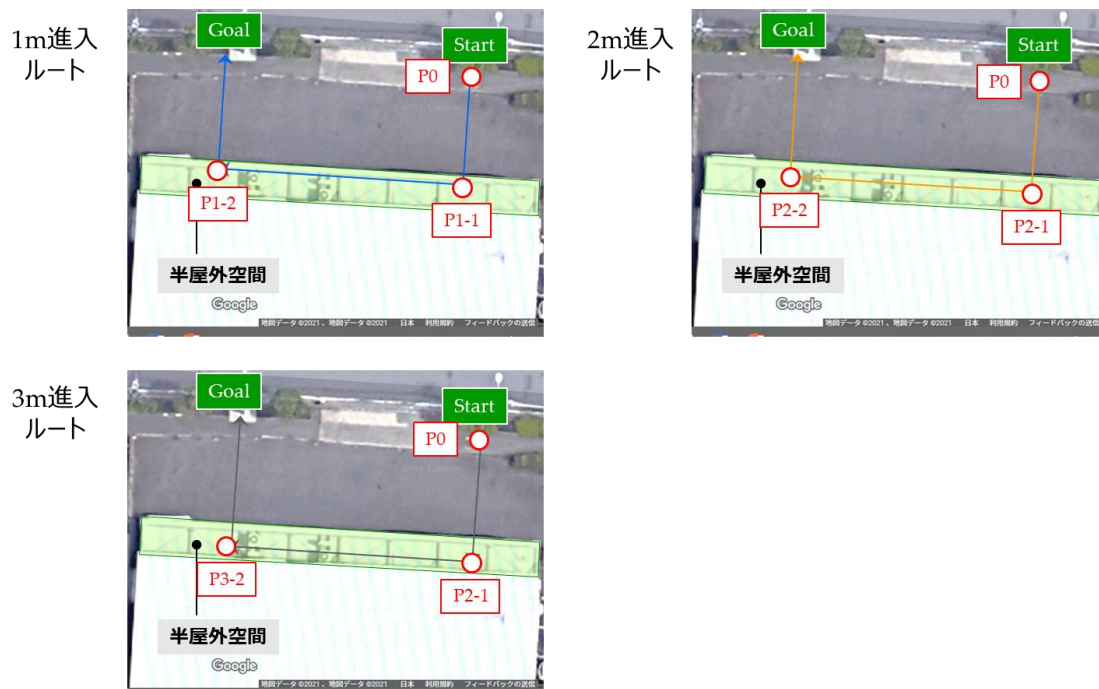


図 6-10. GPS 測位の主張精度計測点

表 6-11. 各計測点での主張精度平均値

P0	P1		P2		P3	
	P1-1	P1-2	P2-1	P2-2	P3-1	P3-2
5.50	8.34	9.86	9.10	11.88	11.12	13.90

単位:m

## 第 7 章

### 検知手法に対する考察

#### 7-1. 評価実験結果に対する考察

第 6 章で示したとおり、本研究で設計した手法によって、屋外空間／半屋外空間／屋内空間の 3 つの空間コンテキストを持つ空間での滞在検知として 93.1% の検知精度を出すことが出来た。同じく GPS のみを用いて半屋外空間を含む滞在検知手法の提案を行った Gao ら[28] と比較すると、表 7-1 に示すとおり約 5% 高い検知精度を達成することが出来た。特に、半屋外空間の検知精度に関しては、Gao ら[28] の 71.4% に対して 87.5% と約 16% 向上させることが出来た。本研究の対象は滞在空間の空間検知手法であり、それに基づく位置算出は研究の対象外であるが、表 6-11 に示した通り、半屋外空間の奥に進むほど GPS の測位精度は低下が予想されるため、半屋外空間の滞在を高い精度で検知し、GPS 測位ではなく屋内測位を適用できるようにすることは、半屋外空間を含むシームレス測位を実現する上で重要な点である。このことより、半屋外空間という屋外測位と屋内測位との境界が曖昧で安定的な測位が難しい空間において、GPS の SNR と半屋外空間の建物情報という 2 つの要素を融合させることにより、「屋外/半屋外/屋内」の安定的な空間検知が可能であることを明らかにすることが出来たといえる。

一方で、表 6-9 に示したとおり、第 6 章で設計した手法では半屋外空間での検知精度は 87.5% であり、正しく空間検知が出来ないケースもあった。提案手法は半屋外空間滞在時に SNR の値が減衰することを前提としており、表 6-2 で示したように、P3 や P4 の計測点で SNR

表 7-1. 既存手法との検知精度比較

	Gao ら[28]	本提案手法
全体の検知精度	88.2%	93.1%
半屋外空間の検知精度	71.4%	87.5%

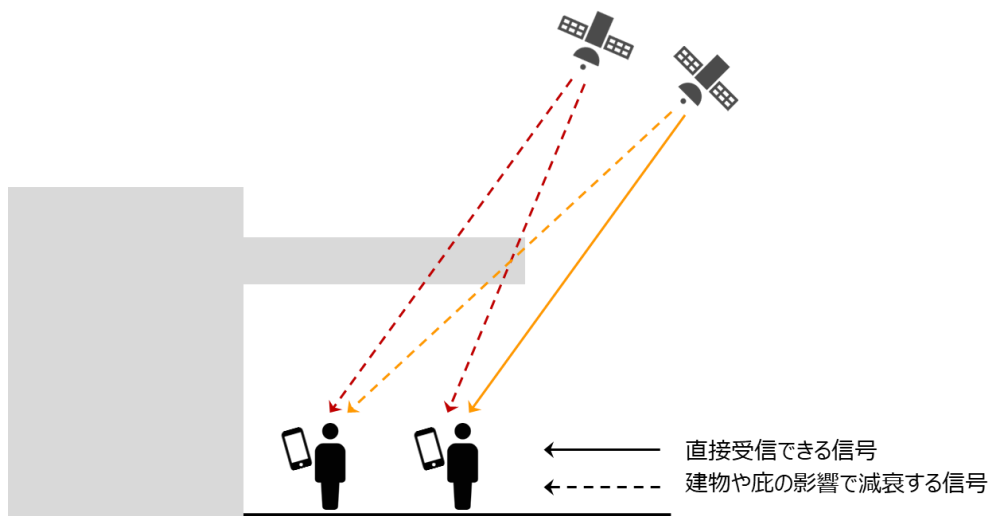


図 7-1. 進入の深さによる提案手法における空間検知のしやすさの違い

の値が減衰せず 35dB-Hz 程度の高い値を取得するようなケースでは、半屋外空間の滞在を判定することは難しいことがわかった。第 5 章で行った 2 つの空間検知手法の評価実験においても、1m 進入ルートでの半屋外空間の検知精度は、SNR 変化率方式で 60.3%、ファジィ推論方式で 77.5%と全体と比較して低い検知精度となっている。提案手法は半屋外空間への進入に伴い仰角の高い衛星の SNR が減少することを前提としているが、進入の浅い位置でも半屋外空間の滞在をより安定的に検知できるようにするには、より仰角の高い衛星を Group 1 の衛星として選定することが必要であると考えられる(図 7-1)。解決策としては、本研究では GPS のみを用いて評価実験を行ったが、第 6 章で検証を行ったように QZSS を活用することで仰角の高い衛星を対象にしやすくすることが挙げられる。本研究での検証では QZSS の SNR の値の内容に幾つか課題を残したが、今後の検討課題であるといえる。

2 つ目の課題として、屋内のエントランス側の計測点である P5 でも正しい判定が行われない場合があった。これは、屋内の滞在に伴い Group 1、Group 2 の衛星の SNR はともに減衰しているものの、Group 2 の衛星は仰角が高くないために、エントランスの開口部を通過して GPS の信号をある程度受信できている点が原因と考えられる。したがって、P5 の計測点において、Group 2 の衛星の SNR が 25dB-Hz 程度ある場合は、本研究の提案手法では半屋外空間と判定してしまう場合があった。屋内空間ではあるが窓やエントランスが近くにあり、GPS の信号をある程度受信できてしまう空間は、“Light indoor”や“Shallow indoor”とも呼ばれ、窓やエントラ

ンスが近くでない屋内空間とは違う空間コンテキストとして扱っている研究もある[102]。本研究でも、屋内空間をさらに細かくコンテキストを分類できるように手法を改良するか、あるいは、本研究で設計したメンバシップ関数を改良することにより、“Light indoor”や“Shallow indoor”と呼ばれる空間であっても安定的に正しい検知ができるようにする必要がある。

## 7-2. 検知手法の課題と今後の発展性

### 7-2-1. 検知手法の課題

本研究で設計した手法では、半屋外空間の開放方向にある衛星を優先して選定することとしており、開放方向に高さのあるビル等が存在するケースを現状では考慮できていない点が課題として挙げられる(図 7-2)。開放方向に高さのあるビル等が存在する都市環境では、受信端末が屋外にいる時に検知対象衛星からの信号が既に NLOS の状態の可能性があり、半屋外空間滞在時の検知に必要な SNR の減衰が起きない可能性がある。ビル等が存在する都市環境で 3D 建物モデルを使用して LOS と NLOS の衛星を選別し、LOS の衛星のみを使用することで GPS 測位精度の低下を防ぐ研究は既に存在している[57][58]。これらの研究と組み合わせることで、ビル等が存在する都市環境下でも適用可能な手法に改良することが出来ると考える。3D 建物モデルの利用に関しては、国内では国土交通省が都市域の 3D 都市モデルのオープンデータ化を進めており、手軽に使いやすい環境が出来つつある[30]。半屋外空間の空間形状が反映されているかはまだ確認できていないが、今後 3D 都市モデルを使用して半屋外空間の空間検知の自動判定を行うことも可能になることが期待される。また、BIM の普及も進み始めており、同様に BIM のデータを利用することによる自動判定も期待される。

また、提案手法のもう一つの課題として、対象エリアに複数の半屋外空間が存在する場合、算出された自位置を基に対象にする半屋外空間をセットしている点が挙げられる。例えば、システム起動時が屋内空間の場合、正確でない自位置が算出されることにより、本来対象とすべきでない半屋外空間がセットされてしまう可能性がある。本研究では複数の半屋外空間を含むケースでの実験を行っていないため、上述のような事象の発生頻度等は今後実験箇所を増やしていくことにより確認する必要がある。

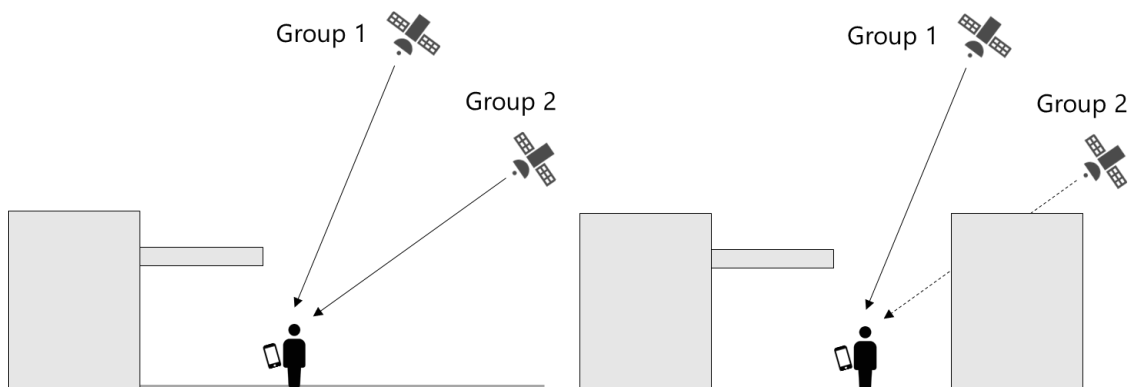


図 7-2. 半屋外空間の反対方向にビル等の建物がある場合の影響

## 7-2-2. 今後の発展性

本研究で設計した検知手法を発展させる観点として、以下の 3 点が挙げられる。

### 1. Elevation だけでなく Azimuth 方向も加味した空間検知判定処理の高度化

本研究では Elevation の値のみを監視対象衛星の選定に用いているが、Azimuth 方向を加味することでより精緻に監視対象衛星の選定を行うことが可能になると考えられる。例えば、Elevation の値は現行の監視対象衛星より低い、Azimuth 方向を加味するとより半屋外空間滞在に伴う SNR の減衰を検知しやすい衛星を選定できる可能性がある。Azimuth 方向を加味することに伴い判定処理が複雑化し、計算負荷が上がることになるが、運用上問題がなければ、より高度な監視対象衛星の選定とそれに伴う半屋外空間を含むシームレス測位の精度向上が期待できる。Azimuth 方向を加味するにあたっては、上述の 3D 都市モデルや BIM を利用することによる高度化・自動化も期待できる。3D 都市モデルや BIM を利用することで GPS にとって障害物となる建物等のオブジェクトを抽出できるようになると、本研究では対象外とした様々な形状の半屋外空間等に提案手法の適用を拡張させることも可能になると考える。

### 2. 「SNR 変化率方式」と「ファジィ推論方式」の融合

本研究では「SNR 変化率方式」と「ファジィ推論方式」の 2 種類の検知手法を設計するとともに評価実験を行い、検知精度の高かったファジィ推論方式を採用して屋外空間／半屋外空間／屋内空間の 3 つの空間コンテキストに対応した滞在検知手法を設計した。一方で、

Elevation が高い衛星が存在する場合は SNR の減衰を確実に見込むことが出来、ファジィ推論のみで検知手法を構築するより安定的に検知できる可能性もある。本研究での評価実験では、2 つの方式を使い分ける場合の閾値やパターンの検討に至っていないが、今後の検討課題の 1 つであるといえる。

### 3. 半屋外空間検知のハイブリッド化

2-1 で屋内測位技術の変遷について述べたが、Angle of Arrival (AoA) 方式等の専用の高精度屋内測位システムを除いて屋内測位技術には一長一短があり、複数の測位方式を組み合わせることで高精度な屋内測位環境を目指す取り組みも多く行われている[103][104]。そのように考えると、半屋外空間の空間検知に関しても各方式・各技術のメリットを組み合わせることでより高精度な検知精度を目指すことも可能であると考えられる。

本研究の検知手法をベースで考えると、次のケースでは高い検知精度となっていない可能性を抽出することが出来る。一番目は、本研究で設計したファジィルールによって算出したスコアが 0.5～-0.5 の間で推移しているようなケースは SNR の値からは正しい検知が行われていない可能性として抽出することが出来る。二番目としては、本研究で設計した衛星の選定手法によって Group1a の衛星が該当しないケースも、本研究の設計手法では空間検知に有効なデータを取得できていない可能性として抽出することが出来る。このようなケースでは、本研究での検知手法ではなく代替の検知手法を利用することによってトータルの検知精度を向上させられる可能性があると考えられる。

本研究の検知手法以外で契機となり得るデータとしては、GPS の LOS/NLOS の判定が挙げられる。7-2-1 で述べたように、衛星の信号から LOS の衛星のみを選定して測位精度を向上させる取り組みは行われており、半屋外空間でも適用できる可能性はあると考えられる。例えば、半屋外空間にいたとしても LOS の衛星が多く存在し、GPS によって精度の良い位置演算が行われるのであれば、屋内測位を使用せずそのまま GPS を使用することによって、ユーザーに精度の良い自位置を提供することが出来ると考えられる。

### 7-3. 実用化に向けた考察

本研究で設計した手法を実用ベースで適用にするにあたっての課題として、3点挙げることが出来る。

1点目は、本研究の実験では、スマートフォンを体の前で水平に保持した状態で測定しており、通常の保持状態とは異なっている点が挙げられる(図4-3再掲)。例えば、実際に提案手法を物流施設に適用することを考えた場合、作業員は受信端末となるスマートフォンを胸ポケットまたはズボンの後ろポケットにしまった状態で作業することが想定される。GPSの電波は人体のような水分を通すと電波が減衰するが、胸ポケットにしまうことによって実験時の保持状態より多くの減衰の影響を受けることが想定される[105]。一方で、物流施設内のフォークリフトをトラッキングする際には、実験時と同じような保持状態でのトラッキングが可能となるかもしれない。実用時のスマートフォンの保持状態は、トラッキングの対象物等によって変化するため一様に定めることが難しく、実際の保持状態を考慮して閾値の変更が必要となる可能性がある。

2つ目の課題として、半屋外空間への進入に伴うSNRの減衰の度合いがスマートフォンの機種によって異なる可能性があることが挙げられる。本研究では確認実験の結果及び半屋外空間や屋内への進入に伴うSNRの減衰に関する先行事例から屋外空間と比較して20%以上の減衰があった場合を閾値とした。本研究で使用した2種類のスマートフォンのチップセットはいずれもQualcomm製だったが、異なるメーカーのチップセットを搭載しているスマートフォンもあり、機種が異なれば内蔵されているGNSS受信機の性能も異なる可能性がある。すべての機種に適用可能なSNRの減衰の閾値を設定することは難しいと考えるが、一方で、より多くの機種を用いて半屋外空間への進入実験を行うことで、この閾値の妥当性をより精緻に検証することは可能である。



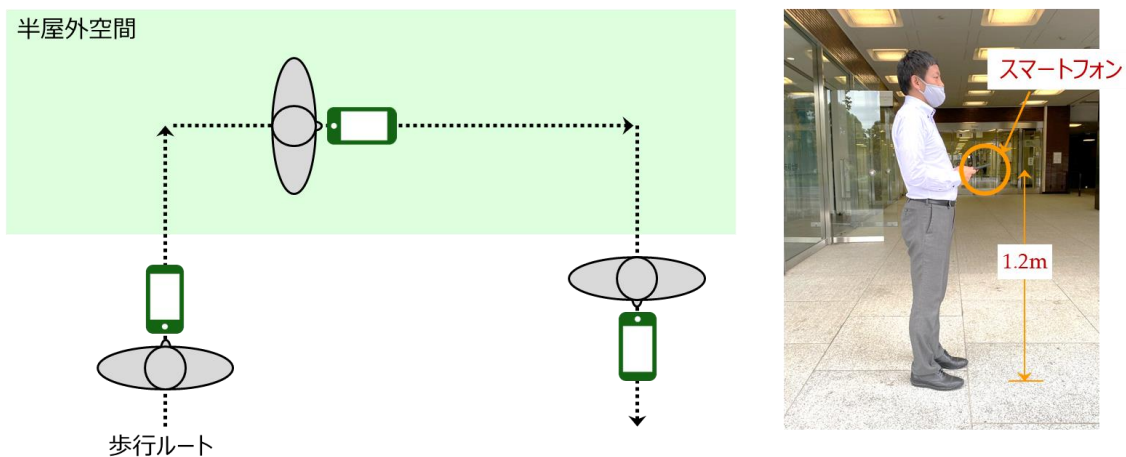


図 4-3. 歩行時のスマートフォンの保持状態（再掲）

3 つ目の課題として、適用可能な半屋外空間の空間パターンの拡張がある。本研究で対象とする半屋外空間は、物流施設、商業施設、車道に面した歩道によく見られる大きな庇や屋根に覆われた空間であり、真上から見ると長方形の形状であり、長辺方向の 1 辺に壁面があり、もう 1 辺には壁面がなく開けている空間である。しかしながら、現実空間にはそれ以外の特徴を持った半屋外空間も数多く存在している。本研究で設計した手法自体はある特定の半屋外空間でのみ適用可能な手法は取っておらず、高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータとすることで汎用的に適用可能と考えているが、本研究で対象とした以外の特徴をもつ半屋外空間に対してはまだ検証が行えていない。施設管理者の立場で考えると、この手法が自身の施設で適用可能かどうかを実用化に向けて検討するはずであり、“適用可能な半屋外空間”と“適用が難しい半屋外空間”をどのように定量的に区分できるかどうかは、今後の検討課題であるとする。

#### 7-4. 本研究の特徴

本研究で設計した手法は、半屋外空間を含むシームレス測位の実現のために、半屋外空間の建物情報を利用してモニタリングする衛星を軌道上の衛星の中から絞り込み、絞り込んだ衛星に対して信号対雑音比を活用することで屋外空間／半屋外空間／屋内空間のどこにいるのかを判定するものである。

本研究の新規性として、半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータとすることによって、軌道上の衛星から半屋外空間の検知に必要な衛星を特定する手法を設計した点が挙げられる(図 5-4)。この手法を用いて検知に必要な衛星を特製することによって、従来手法よりも高い検知精度を得ることが出来ることになったと考えられる。また、この手法は常に変化する衛星の配置や半屋外空間の形状に影響を受けることなく必要な衛星を選定することが可能なため、汎用性のある手法であるということが出来る。

独自性としては、半屋外空間の検知にファジィ推論を用いている点が挙げられる。ファジィ推論自体は様々な分野で使用されている汎用的な理論だが、半屋外空間の検知にファジィ推論を適用した事例は、筆者が知る限り見受けられない。ファジィ推論を活用するにあたり、本研究では図 5-20 に示したような半屋外空間の空間検知が可能となる衛星のパターンを設定し、このパターンに基づくファジィルールを新たに設計した。また、メンバシップ関数を設計するために、上限と下限となる SNR の閾値を確認実験で取得したデータを分析することにより設定し、客観性を持たせた。ファジィ推論を活用することによる効果として、単に“屋外”“半屋外”“屋内”の判定を行うだけでなく、判定式によりスコアを値として算出することが可能な点が挙げ

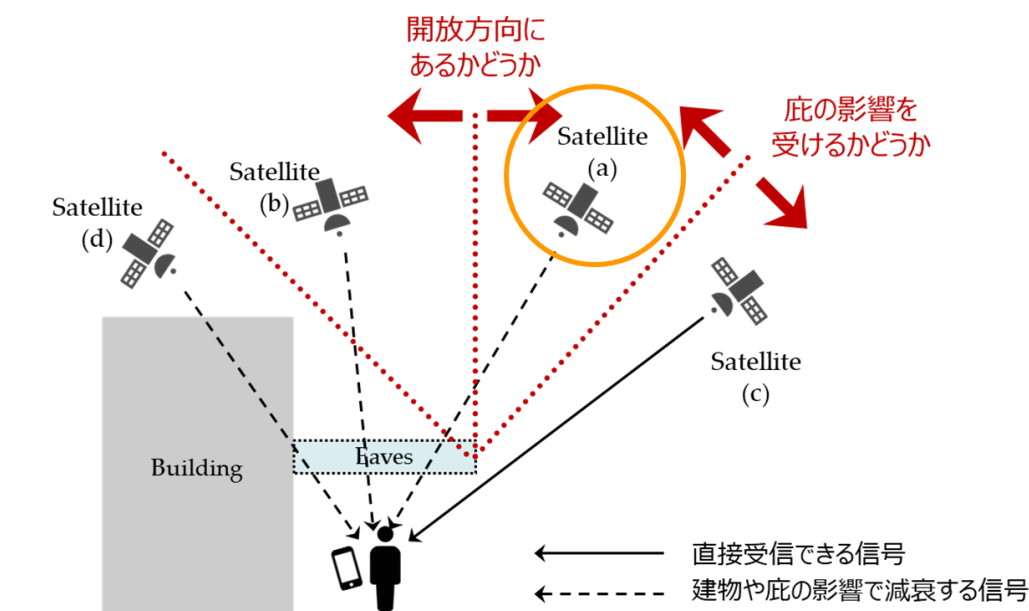


図 5-4. 半屋外空間を考慮した衛星配置と GPS 信号の減衰との関係 (再掲)

られる。スコア値を算出することによって、図 7-3 に示すように空間判定の結果が明確に分かれているケースと判定結果に乱れがあるケースを区別することが可能になる。例えば、判定結果に乱れがある場合は誤判定である可能性もあるため補正処理を加える等の改良策にスコア値を活用できる可能性がある。

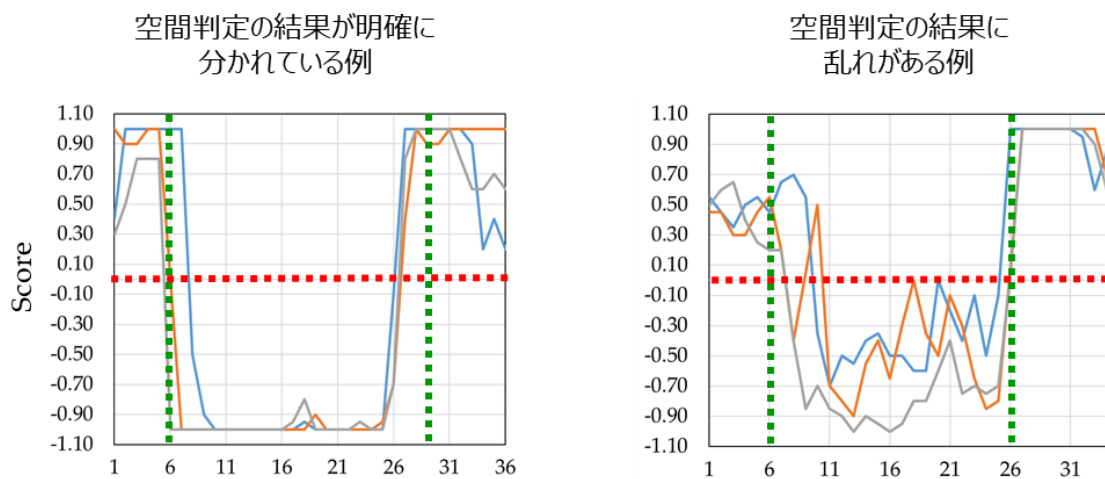


図 7-3. ファジィ推論を活用した空間判定によるスコア化の例

## 第 8 章

### 結論

屋外空間と屋内空間とをシームレスに接続するためのシームレス測位技術に関する研究はこれまで多く行われているが、一方で、現実空間には屋外空間と屋内空間の 2 つに分類するのが難しい空間が存在する、という側面がある。半屋外空間は GPS の信号も十分な強さで受信できるため、対象空間に屋内測位環境を構築したとしても既存のシームレス測位技術の適用が難しい。本研究は、そのような半屋外空間を含むシームレス測位を実現するために、半屋外空間の建物情報と GPS の信号対雑音比を活用して、屋外空間、半屋外空間、屋内空間のどの空間にいるのかを判定する手法の設計と評価を行った。

検知手法は 2 つのステップで構成され、1 番目のステップでは、半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータに、軌道上の衛星のうちどの衛星をモニタリングの対象にするかを選定するための手法を設計した。2 番目のステップでは、選定した衛星の信号対雑音比を活用して滞在空間を判定する手法を設計した。具体的には、衛星の信号対雑音比の変化率を基に半屋外空間の滞在を判定する方式と、選定した 2 つの衛星の信号対雑音比をパラメータにファジィ推論を用いて半屋外空間の滞在を判定する方式の 2 つを設計し、評価実験を行うことによって検知精度を比較した。その結果、信号対雑音比の変化率を活用した検知手法での検知精度は 82.4%、ファジィ推論を活用した検知手法の検知精度は 88.4%となり、ファジィ推論を活用した検知手法の方が 6%高い結果となった。

最後に、評価実験の結果検知精度が高かったファジィ推論方式を採用して、屋外空間、半屋外空間、屋内空間の 3 つの空間コンテキストでの滞在を判定する検知手法を設計し、再び評価実験を行うことによって検知精度を検証した。評価実験の結果、提案手法の検知精度は 93.1%となり、既存手法での検知精度より約 5%高い結果となった。半屋外空間の検知精度は 87.5%であり、既存手法と比較して約 16%高い結果となったが、半屋外空間に進入しても監視対象衛星の信号対雑音比が全く減衰しない場合があり、そのような場合は提案手法では検知が難しいことが分かった。また、入り口付近の屋内空間では信号対雑音比の減少が少ない場合があり、そのような場合に屋内空間ではなく半屋外空間と判定されるケースがあることが明らかになった。

屋外空間と屋内空間をシームレスに接続するシームレス測位の研究は多く行われているが、現実空間には“屋外”と“屋内”のどちらかに区分することが難しい空間も多く存在することから、より多様な現実空間でシームレス測位を実現できるようにするためには、本研究で対象とした半屋外空間のような空間も考慮したシームレス測位手法の研究を進めていくことが重要である。本研究は、半屋外空間も対象とした既存のシームレス測位手法と比較して高い検知精度を実現しただけでなく、半屋外空間の高さ、奥行き、側面の開放方向をパラメータとすることによって、常に変化する軌道上の衛星配置や半屋外空間の空間形状の違いの影響を受けることなく必要な衛星を選定出来る点に新規性がある。このことにより、半屋外空間という屋外測位と屋内測位との境界が曖昧で安定的な測位が難しい空間において、GPS の信号対雑音比と半屋外空間の建物情報という 2 つの要素を融合させることにより、「屋外/半屋外/屋内」の安定的な空間検知が可能なことを明らかにすることが出来たと考える。

本研究は、半屋外空間が多く存在する工場や倉庫での利用を具体的なターゲットとした。半屋外空間を含む工場や倉庫で本研究において設計した手法を適用することにより、屋内外を移動する作業員やフォークリフトの行動をより正確に取得することが可能になり、生産性向上や安全性向上に寄与することが期待できる。

## 参考文献

- [1] NTT ドコモ. “i モード”. NTT DOCOMO. <https://www.nttdocomo.co.jp/service/imode/>, (Accessed 2021-07-01)
- [2] KDDI. “au20 周年”. KDDI. <https://time-space.kddi.com/au-kddi/20200722/2941> (Accessed 2021-07-01)
- [3] Google Japan Blog. “Google マップの 15 年を振り返ってみましょう”. Google. [https://japan.googleblog.com/2020/02/google-15\\_6.html](https://japan.googleblog.com/2020/02/google-15_6.html) (Accessed 2021-07-01)
- [4] Basiri, A., Lohan, E. S., Moore, T., Winstanley, A., Peltola, P., Hill, C., Amirian, P., & e Silva, P. F. (2017). Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions. *Computer Science Review*, 24, 1-12.
- [5] Leech, J. A., Nelson, W. C., BURNETT, R. T., Aaron, S., & Raizenne, M. E. (2002). It's about time: a comparison of Canadian and American time–activity patterns. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 12(6), 427-432.
- [6] Schweizer, C., Edwards, R. D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W. J., Ilacqua, V., Jantunen, M. J., Lai, H. K., Nieuwenhuijsen, M., & Künzli, N. (2007). Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 17(2), 170-181.
- [7] Yang, W., Lee, K., Yoon, C., Yu, S., Park, K., & Choi, W. (2011). Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 21(3), 310-316.
- [8] Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252.
- [9] 塩津弥佳, 吉澤晋, 池田耕一, & 野崎淳夫. (1998). 生活時間調査による屋内滞在時間量と活動量: 室内空気汚染物質に対する曝露量評価に関する基礎的研究 その 1. *日本建築学会計画系論文集*, 63(511), 45-52.
- [10] Conti, G., Malabocchia, F., Li, K.-J., Percivall, G., Burroughs, K., Strickland, S. (2016). Benefits of indoor location. Use case survey of lessons learned and expectations, Open Geospatial Consortium. 1st edition
- [11] JAPAN AIRLINES. “国内初、空港内をナビゲーションするスマートフォンアプリ「JAL AiRport ナビ」の提供を開始”. JAPAN AIRLINES. <https://press.jal.co.jp/ja/release/201112/001321.html> (Accessed 2021-07-01)
- [12] Narita Airport. “NariNAVI”. Narita Airport. <https://www.naa.jp/jp/20180919-narinavi.pdf> (Accessed 2021-07-01)
- [13] Quuppa. “Quuppa – Real-Time Location Technology Platform”. Quuppa. <https://www.quuppa.com/> (Accessed 2021-07-01)
- [14] 国際航業株式会社. “生産性向上ツール Patt Plus”. KOKUSAI KOGYO. <https://biz.kkc.co.jp/software/lbs/patt-plus/> (Accessed 2021-07-01)
- [15] Maghdid, H. S., Lami, I. A., Ghaffoor, K. Z., & Lloret, J. (2016). Seamless outdoors-indoors localization solutions on smartphones: Implementation and challenges. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 48(4), 1-34.
- [16] Gallagher, T., Li, B., Dempster, A. G., & Rizos, C. (2011, September). Power efficient indoor/outdoor positioning handover. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN11)*.

- [17] Kjærsgaard, M. B., Blunck, H., Godsk, T., Toftkjær, T., Christensen, D. L., & Grønbæk, K. (2010, May). Indoor positioning using GPS revisited. In *International conference on pervasive computing* (pp. 38-56). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] Zhu, Y., Luo, H., Wang, Q., Zhao, F., Ning, B., Ke, Q., & Zhang, C. (2019). A fast indoor/outdoor transition detection algorithm based on machine learning. *Sensors*, 19(4), 786.
- [19] Zlatanova, S., Yan, J., Wang, Y., Diakité, A., Isikdag, U., Sithole, G., & Barton, J. (2020). Spaces in spatial science and urban applications—state of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), 58.
- [20] Yan, J., Diakité, A. A., Zlatanova, S., & Aleksandrov, M. (2020). Finding outdoor boundaries for 3D space-based navigation. *Transactions in GIS*, 24(2), 371-389.
- [21] Yan, J., Diakité, A. A., & Zlatanova, S. (2018). An extraction approach of the top-bounded space formed by buildings for pedestrian navigation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4(4).
- [22] Wakabayashi, Y., Kogure, S., Yamashita, J., Tateshita, H., & Miyoshi, M. (2012). Evaluation of Availability Improvement by Adding QZSS on Multi Locations in Various Conditions. *Transactions of the Japan society for aeronautical and space science, Aerospace technology Japan*, 10(ists28), Pj\_17-Pj\_22.
- [23] Hsu, L. T., Gu, Y., & Kamijo, S. (2016). 3D building model-based pedestrian positioning method using GPS/GLONASS/QZSS and its reliability calculation. *GPS solutions*, 20(3), 413-428.
- [24] Groves, P. D. (2011). Shadow matching: A new GNSS positioning technique for urban canyons. *The journal of Navigation*, 64(3), 417-430.
- [25] Feriol, F., Vivet, D., & Watanabe, Y. (2020). A Review of Environmental Context Detection for Navigation Based on Multiple Sensors. *Sensors*, 20(16), 4532.
- [26] Zou, H., Jiang, H., Luo, Y., Zhu, J., Lu, X., & Xie, L. (2016). Bluedetect: An ibeacon-enabled scheme for accurate and energy-efficient indoor-outdoor detection and seamless location-based service. *Sensors*, 16(2), 268.
- [27] Anagnostopoulos, G. G., & Deriaz, M. (2015, October). Automatic switching between indoor and outdoor position providers. In *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (pp. 1-6). IEEE.
- [28] Gao, H., & Groves, P. D. (2018). Environmental context detection for adaptive navigation using GNSS measurements from a smartphone. *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, 65(1), 99-116.
- [29] 国土交通省. 建築 BIM の将来像と工程表. MLIT Japan. <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/content/001351969.pdf> (Accessed 2021-08-14)
- [30] 国土交通省. PLATEAU. MLIT Japan. <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (Accessed 2021-07-01)
- [31] Seco-Granados, G., Lopez-Salcedo, J., Jimenez-Banos, D., & Lopez-Risueno, G. (2012). Challenges in indoor global navigation satellite systems: Unveiling its core features in signal processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(2), 108-131.
- [32] 鳥本秀幸, & 石井真. (2014). 屋内外シームレス測位における IMES (Indoor Messaging System) の機能. *地図*, 52(3), 3\_15-3\_20.
- [33] 西尾信彦, 図解よくわかる屋内測位と位置情報. 日刊工業新聞社, 2018.
- [34] Brena, R. F., García-Vázquez, J. P., Galván-Tejada, C. E., Muñoz-Rodríguez, D., Vargas-Rosales, C., & Fangmeyer, J. (2017). Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors*, 2017.

- [35] Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568-2599.
- [36] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1067-1080.
- [37] Davidson, P., & Piché, R. (2016). A survey of selected indoor positioning methods for smartphones. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 1347-1370.
- [38] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, & 横山浩之. (2011). 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案. *情報処理学会論文誌*, 52(2), 558-570.
- [39] 興梠正克, 石川智也, & 蔵田武志. (2011). 歩行者デッドレコニングに基づくハンドヘルド端末の屋内外測位技術. *信学技報*, PRMU2010-171.
- [40] Mendoza-Silva, G. M., Torres-Sospedra, J., & Huerta, J. (2019). A meta-review of indoor positioning systems. *Sensors*, 19(20), 4507.
- [41] 東京国立博物館. “トーハクナビ”. Tokyo National Museum. [https://www.tnm.jp/modules/r\\_free\\_page/index.php?id=1467](https://www.tnm.jp/modules/r_free_page/index.php?id=1467) (Accessed 2021-07-01)
- [42] Jeon, K. E., She, J., Soonsawad, P., & Ng, P. C. (2018). BLE beacons for internet of things applications: Survey, challenges, and opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 811-828.
- [43] ビーキャップ. “Beacapp HERE”. beacapp. <https://jp.beacapp-here.com/> (Accessed 2021-07-01)
- [44] Tabata, K., Konno, H., & Nakajima, M. (2016). The Design of Worker’s Behavior Analysis Method in Workplace Using Indoor Positioning Technology. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 127.
- [45] Ubisense. “Ubisense RTLS”. Ubisense. <https://ubisense.com/dimension4/> (Accessed 2021-07-01)
- [46] Quuppa. “Bluetooth Low Energy Overview powered by Quuppa”. Quuppa. <https://quuppa.com/technology/overview/> (Accessed 2021-07-01)
- [47] Quuppa. “Case study of the Mizkan Museum”. Quuppa. <https://quuppa.com/case-study-mizkan-museum/> (Accessed 2021-07-01)
- [48] Quuppa. “Case study of Morita Fire Truck Factory”. Quuppa. <https://quuppa.com/case-study-morita/> (Accessed 2021-07-01)
- [49] 日経クロステック. “iPhone 採用で脚光の UWB、高精度測位で急拡大”. *Nikkei Business Publications*. <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01267/00062/> (Accessed 2021-07-01)
- [50] Engadget 日本版. “iPhone 12 Pro / Max だけの「LiDAR スキャナ」とは。デプスマップで AR や暗所撮影に威力”. *Verizon Media Japan*. <https://japanese.engadget.com/iphone-12-pro-lidar-220006265.html> (Accessed 2021-07-01)
- [51] Zou, D., Meng, W., Han, S., He, K., & Zhang, Z. (2016). Toward ubiquitous LBS: Multi-radio localization and seamless positioning. *IEEE Wireless Communications*, 23(6), 107-113.
- [52] Hansen, R., Wind, R., Jensen, C. S., & Thomsen, B. (2009, May). Seamless indoor/outdoor positioning handover for location-based services in streamspin. In *2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware* (pp. 267-272). IEEE.
- [53] Adell, M. C., & González, J. P. (2013, October). Smart indoor-outdoor positioning handover for smartphones. In *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation* (pp. 1-7). IEEE.



- [54] Zeng, Q., Wang, J., Meng, Q., Zhang, X., & Zeng, S. (2017). Seamless pedestrian navigation methodology optimized for indoor/outdoor detection. *IEEE Sensors Journal*, 18(1), 363-374.
- [55] Zou, D., Niu, S., Chen, S., Su, B., Cheng, X., Liu, J., Liu, Y., & Li, Y. (2019). A smart city used low-latency seamless positioning system based on inverse global navigation satellite system technology. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(9), 1550147719873815.
- [56] Machaj, J., Brida, P., & Benikovsky, J. (2016). Scalability optimization of seamless positioning service. *Mobile information systems*, 2016.
- [57] Hsu, L. T. (2018). Analysis and modeling GPS NLOS effect in highly urbanized area. *GPS solutions*, 22(1), 1-12.
- [58] 内山彰, 勝田悦子, 上嶋祐紀, 山口弘純, & 東野輝夫. (2014). 都市区画における GPS 衛星の見通し判定を用いた位置精度向上法の提案. *情報処理学会論文誌*, 55(1), 389-398.
- [59] Kim, Y., Lee, S., Lee, S., & Cha, H. (2012). A GPS sensing strategy for accurate and energy-efficient outdoor-to-indoor handover in seamless localization systems. *Mobile Information Systems*, 8(4), 315-332.
- [60] Zhang, J., Fu, X., Yang, F., Liu, Q., Deng, Z., & Liu, W. (2019, November). Research on indoor/outdoor state switching based on smart phone and GNSS satellite status information. In *2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)* (pp. 524-529). IEEE.
- [61] Okamoto, M., & Chen, C. (2015, September). Improving GPS-based indoor-outdoor detection with moving direction information from smartphone. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers* (pp. 257-260).
- [62] 勝田悦子, 内山彰, 山口弘純, & 東野輝夫. (2011). GPS 受信状態を用いた屋内外判定法. *研究報告モバイルコンピューティングとコネクティクス通信 (MBL)*, 2011(18), 1-8.
- [63] Chen, K., & Tan, G. (2017, May). SatProbe: Low-energy and fast indoor/outdoor detection based on raw GPS processing. In *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 1-9). IEEE.
- [64] Bui, V., Le, N. T., Vu, T. L., Nguyen, V. H., & Jang, Y. M. (2020). GPS-Based Indoor/Outdoor Detection Scheme Using Machine Learning Techniques. *Applied Sciences*, 10(2), 500.
- [65] Ali, M., ElBatt, T., & Youssef, M. (2018). SenseIO: Realistic ubiquitous indoor outdoor detection system using smartphones. *IEEE Sensors Journal*, 18(9), 3684-3693.
- [66] Zhu, Y., Luo, H., Zhao, F., & Chen, R. (2020). Indoor/Outdoor Switching Detection Using Multisensor DenseNet and LSTM. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1544-1556.
- [67] Jia, M., Yang, Y., Kuang, L., Xu, W., Chu, T., & Song, H. (2016, August). An indoor and outdoor seamless positioning system based on android platform. In *2016 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA* (pp. 1114-1120). IEEE.
- [68] Wang, D., Lu, Y., Zhang, L., & Jiang, G. (2019). Intelligent positioning for a commercial mobile platform in seamless indoor/outdoor scenes based on multi-sensor fusion. *Sensors*, 19(7), 1696.
- [69] Ashraf, I., Hur, S., & Park, Y. (2018). MagIO: Magnetic field strength based indoor-outdoor detection with a commercial smartphone. *Micromachines*, 9(10), 534.
- [70] 国土交通省. “高精度測位社会プロジェクト実証実験”. MLIT Japan. [https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk1\\_000071.html](https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000071.html) (Accessed 2021-07-

- 01)
- [71] 磯尚樹 & 高木洋一郎. (2016). 東京駅周辺屋内外シームレスナビゲーション実証実験—国土交通省「高精度測位社会プロジェクト」への対応. NTT 技術ジャーナル, 13.
- [72] Zhou, P., Zheng, Y., Li, Z., Li, M., & Shen, G. (2012, November). Iodetector: A generic service for indoor outdoor detection. In Proceedings of the 10th acm conference on embedded network sensor systems (pp. 113-126).
- [73] Li, S., Qin, Z., Song, H., Si, C., Sun, B., Yang, X., & Zhang, R. (2020). A lightweight and aggregated system for indoor/outdoor detection using smart devices. Future Generation Computer Systems, 107, 988-997.
- [74] Wang, W., Chang, Q., Li, Q., Shi, Z., & Chen, W. (2016). Indoor-outdoor detection using a smart phone sensor. Sensors, 16(10), 1563.
- [75] Yan, J., Diakité, A. A., & Zlatanova, S. (2019). A generic space definition framework to support seamless indoor/outdoor navigation systems. Transactions in GIS, 23(6), 1273-1295.
- [76] Alinsavath, K. N., Nugroho, L. E., & Hamamoto, K. (2019, March). The Seamlessness of Outdoor and Indoor Localization Approaches based on a Ubiquitous Computing Environment: A Survey. In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Information Science and Systems (pp. 316-324).
- [77] Basiri, A., Moore, T., Hill, C., & Bhatia, P. (2016, June). The non-technical challenges of Location Based Services markets: Are the users' concerns being ignored?. In 2016 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS) (pp. 1-5). IEEE.
- [78] Stephan, D. I. P., & Heck, D. I. I. (2010). Using spatial context information for the optimization of manufacturing processes in an exemplary maintenance scenario. IFAC Proceedings Volumes, 43(4), 228-233.
- [79] Cao, L., Depner, T., Borstell, H., & Richter, K. (2019, June). Discussions on sensor-based Assistance Systems for Forklifts. In Smart SysTech 2019; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies (pp. 1-8). VDE.
- [80] Barral, V., Suárez-Casal, P., Escudero, C. J., & García-Naya, J. A. (2019). Multi-sensor accurate forklift location and tracking simulation in industrial indoor environments. Electronics, 8(10), 1152.
- [81] Zhao, Z., Fang, J., Huang, G. Q., & Zhang, M. (2016, September). iBeacon enabled indoor positioning for warehouse management. In 2016 4th international symposium on computational and business intelligence (ISCBI) (pp. 21-26). IEEE.
- [82] Jung, S. H., Lee, G., & Han, D. (2017). Methods and tools to construct a global indoor positioning system. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 48(6), 906-919.
- [83] Vlasenko, I., Nikolaidis, I., & Stroulia, E. (2014). The smart-condo: Optimizing sensor placement for indoor localization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 45(3), 436-453.
- [84] D. D. Walden, G. J. Roedler, K. Forsberg, R. D. Hamelin, T. M. Shortell, and 西村秀和, システムズエンジニアリングハンドブック, 第4版. 東京: 慶應義塾大学出版会, 2019.
- [85] 雑賀充宏, & 児玉公信. (2017). ISO/IEC/IEEE 15288: 2015 の情報システム構築にもたらす影響. 研究報告情報システムと社会環境 (IS), 2017(4), 1-3.
- [86] Kanan, R., Elhassan, O., & Bensalem, R. (2018). An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. Automation in Construction, 88, 73-86.
- [87] Peng, X., & Nguyen, T. (2010, June). Industrial location-based Services. In 2010 5th IEEE

- Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 1815-1820). IEEE.
- [88] 嶋津恵子. (2008). Stakeholder 分析手法の比較報告: CVCA vs. OnionModel. In 情報システム学会 全国大会論文集 第 4 回全国大会・研究発表大会論文集 (pp. E2-3). 一般社団法人 情報システム学会.
- [89] Alexander, I. F. (2005). A taxonomy of stakeholders: Human roles in system development. *International Journal of Technology and Human Interaction (IJTHI)*, 1(1), 23-59.
- [90] Yozevitch, R., Moshe, B. B., & Weissman, A. (2016). A robust GNSS los/nlos signal classifier. *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, 63(4), 427-440.
- [91] Wang, L., Groves, P. D., & Ziebart, M. K. (2015). Smartphone shadow matching for better cross-street GNSS positioning in urban environments. *The Journal of Navigation*, 68(3), 411-433.
- [92] Adjrard, M., & Groves, P. D. (2018). Intelligent urban positioning: integration of shadow matching with 3D-mapping-aided GNSS ranging. *The Journal of Navigation*, 71(1), 1-20.
- [93] Open Geospatial Consortium. "OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0.0; 2012". OGC. <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0> (Accessed 2021-07-01)
- [94] Zimmermann, H. J. (2010). Fuzzy set theory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3), 317-332.
- [95] 上原清彦, & 廣田薫. (2016). ファジィ推論: 基本的手法とその拡張 (1). *知能と情報*, 28(4), 107-112.
- [96] 水本雅晴. (1992). ファジィ推論 (1)(ファジィ理論入門 (8)). *日本ファジィ学会誌*, 4(2), 256-264.
- [97] 水本雅晴. (1989). ファジィ制御向きのファジィ推論法. *計測と制御*, 28(11), 959-963.
- [98] 岩永千尋, & 佐々木健. (1996). ファジィ推論を適用したおいしい水の判定. *水環境学会誌*, 19(3), 209-219.
- [99] Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1), 116-132.
- [100] 河野功. (2001). 準天頂衛星と静止衛星による衛星測位システム. *電子情報通信学会論文誌 B*, 84(12), 2092-2100.
- [101] Zaminpardaz, S., Wang, K., & Teunissen, P. J. (2018). Australia-first high-precision positioning results with new Japanese QZSS regional satellite system. *GPS Solutions*, 22(4), 1-14.
- [102] Xia, Y., Pan, S., Gao, W., Yu, B., Gan, X., Zhao, Y., & Zhao, Q. (2020). Recurrent neural network based scenario recognition with Multi-constellation GNSS measurements on a smartphone. *Measurement*, 153, 107420.
- [103] De Angelis, G., De Angelis, A., Pasku, V., Moschitta, A., & Carbone, P. (2015, September). A hybrid outdoor/indoor positioning system for IoT applications. In *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [104] Gu, F., Hu, X., Ramezani, M., Acharya, D., Khoshelham, K., Valace, S., & Shang, J. (2019). Indoor localization improved by spatial context—A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(3), 1-35.
- [105] Alanezi, K., & Mishra, S. (2015). Design, implementation and evaluation of a smartphone position discovery service for accurate context sensing. *Computers & Electrical Engineering*, 44, 307-323.

## 研究業績

### 1. 定期刊行誌掲載論文(主論文に関連する原著論文)

- A. Tabata, K., Nakajima, M., & Kohtake, N. (2020). Design of Entry Detection Method for Top-Bounded Spaces Using GPS SNR and Spatial Characteristics for Seamless Positioning in Logistics Facilities. *Sensors*, 20(23), 6864.
- B. Tabata, K., Nakajima, M., & Kohtake, N. (2020). Design of Multiple Spatial Context Detection Method Considering Elongated Top-Bounded Spaces Based on GPS Signal-To-Noise Ratio and Fuzzy Inference. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 717.
- C. Tabata, K., Nakajima, M., & Kohtake, N. (2019). Process Optimization Method for the Simplification of Developing Indoor Positioning Environment. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 17(4), 552-560.
- D. 田端謙一, 中島円, & 神武直彦. (2020). 空間形状特性とファジィ推論を活用した GPS 信号対雑音比による半屋外空間の滞在検知手法の設計. *測位航法学会論文誌*, 11(1), 1-11.

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

- E. Tabata, K., Konno, H., Tsuno, K., Morioka, W., Nishino, A., Nakajima, M., & Kohtake, N. (2015, October). The design of selective hybrid positioning by utilizing accuracy information for indoor-outdoor seamless positioning and verification in Tokyo station. In *Proc. Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigation*.

## 謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント (SDM: System Design and Management) 研究科後期博士課程在学中に、同研究科神武直彦教授の指導のもとで行ったものです。

はじめに、指導教員である神武直彦教授に心から御礼申し上げます。2015年4月に入学して以来、研究活動の成果を出せない期間の方が圧倒的に長く、博士号取得を断念しようと思ったことも数多くありましたが、先生の叱咤激励のおかげで何とかここまでたどり着くことが出来ました。本当にありがとうございます。先生と初めてお会いしたのは2011年の二子玉川での経済産業省のプロジェクトでした。当時はまだ研究室のメンバーの数も少なかったですが、今ではとても規模の大きな研究室となりました。研究活動以外にも様々な活動の機会を頂き、神武研究室に所属させて頂くことで、普通に社会人として過ごしていたら得ることのできない様々な経験をさせて頂きました。心から御礼申し上げます。

ご多忙の中、副査を引き受けてくださった白坂成功教授、東京海洋大学の久保信明教授に心から感謝いたします。

白坂先生には、副査として私の博士論文に対して大変有益なご指摘を数多くして頂きました。私の論文の至らない点に対して核心を突くようなご指摘が多く、博士論文を仕上げる上で大変勉強になりました。心から感謝いたします。

久保先生には、測位技術の専門家としての観点から数多くのご指摘をして下さいました。私の測位技術に対する知識が足りない中で、数多くのご指摘が大変勉強になりました。また、久保先生がエディタを務める *Sensors* の *Special issue* に論文投稿する際には数多くのご助言を頂きました。加えて、測位航法学会への論文投稿にもご支援を頂きました。心から感謝いたします。

私が研究活動を行う上で、神武研究室の PhD セミナーは大変重要な場所でした。特に、SDM 研究科の狼嘉彰 SDM 研究所顧問・元 SDM 研究科研究科委員長、日比谷孟俊 SDM 研究所顧問の両先生から直接ご指摘頂ける機会は大変貴重でした。狼先生には、「いい研究

ですね」といつも励まして頂き、研究活動を続けるモチベーションをいつも頂きました。日比谷先生には博士号を取得することの心構えや研究のあるべき姿についてご指導頂き、研究内容を見つめ直す機会をいつも頂きました。心から感謝いたします。また、2021年度からは井上雅裕特任教授にも PhD セミナーに参加頂き、先生のご専門の観点から有益なご助言を多く頂くことができました。私の論文の内容をより深くすることが出来、心から感謝いたします。

中島円特任教授には、会社の先輩として、研究者の先輩として、入学前から博士号取得に至るまで常に多大なご支援を頂きました。中島さんがいなければ、私が SDM に入学し、様々な貴重な経験をさせて頂けることも無かったと思います。心から感謝いたします。

私は国際航業株式会社の後期博士課程進学支援制度を活用して SDM に入学することが出来ました。入学にあたり多大なご支援を頂いた土方聡社長、伊藤篤顧問に心から感謝いたします。また、仕事と学業の両立はなかなか難しく、特に昨年度は有給休暇を多く利用し学業に注力することとなりました。そのような状況を受容し、研究活動を支援頂いた国際航業株式会社 LBS センシング事業部の皆様、特にロケーションサービス部 LBS チームの皆様に心から感謝いたします。会社の同僚であり、SDM の同志でもある大野嘉子氏には、博士論文を執筆する上でご支援を頂きました。ありがとうございます。

私は SDM での活動の中で多くの同期に恵まれました。博士課程の同期である井上絵理氏、ウルヴェ京氏、奥田知之氏、佐藤章博氏に心から感謝いたします。同期との支えあいが無かったら、おそらく途中で挫折していたと思います。加えて、SDM8 期生の研究室同期の皆様に心から感謝いたします。皆様のおかげでとても楽しい学生生活を送ることが出来ました。

神武研究室は規模の大きな研究室になりましたが、そのおかげで非常に多くの方と切磋琢磨しながら研究活動を進めることが出来ました。博士課程に所属する方々とは、同志として、研究内容は違いますがお互いの研究内容を PhD セミナー等を通じて共有することで多くのインプットを頂くことが出来ました。神武研究室博士課程の皆様に心から感謝いたします。特に、西野瑛彦氏には、神武研究室に在籍する中で多大な支援をいつも頂きました。心から感謝いたします。また、神武研究室博士課程の先輩の皆様にも感謝いたします。博士研究の進

め方や必要な観点など、PhD セミナーやディスカッションを通して学ぶことが出来ました。

加えて、PhD セミナーにいつも参加頂いた特任講師の小高暁氏、特任助教の山口翔大氏にも心から感謝いたします。博士の先輩として、経験を交えながら有益なコメントを多く頂きました。ありがとうございます。

論文投稿の際には神武研究室秘書チームの皆様大変お世話になりました。秘書チームの皆様のご支援のおかげで、海外への論文投稿を完了することが出来ました。心から感謝いたします。

最後に、平日夜間と週末を学業に費やすことを受容し、常にサポートしてくれた妻と二人の息子に心から感謝いたします。これから、精一杯の還元をしていきたいと思えます。

2021年9月

田端 謙一